

**UNTERSUCHUNG EINER MÖGLICHEN DUNKLE MATERIE-
SUBSTRUKTUR IN DER GALAKTISCHEN HALO**

**Research on a Possible Dark Matter Substructure
within the Galactic Halo**

von

KATHARINA BORM

geboren am

30. JULI 1986

Bachelor-Arbeit im Studiengang Physik

Universität Hamburg

4. AUGUST 2010

1. Gutachter: Prof. Dr. Dieter Horns

2. Gutachter: Prof. Dr. Günter Sigl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Nichtbaryonische Dunkle Materie	2
1.1.1	Hinweise auf Dunkle Materie	2
1.1.2	Eigenschaften von Dunkler Materie	5
1.1.3	Dunkle Materie-Kandidaten	7
1.1.4	Suche nach Dunkler Materie	9
1.2	Dunkle Materie in der galaktischen Halo	11
1.2.1	Bildung von Dunkle Materie-Substrukturen	12
1.2.2	Detektion mittels des Fermi-Satelliten	13
1.3	Die Fermi-Mission	14
1.3.1	Das Large Area Telescope	15
1.3.2	Die Point-Spread-Function	17
1.3.3	Der Fermi-Katalog <i>1FGL</i>	18
1.4	Kandidat für einen Dunkle Materie-Klumpen	20
1.5	Blazare als mögliche astrophysikalische Gegenstücke	24
2	Charakterisierung der möglichen Dunkle Materie-Substruktur	27
2.1	Präsentation des Datensatzes	27
2.2	Positionsbestimmung	29
2.2.1	Unsicherheiten der einzelnen Photonpositionen	29
2.2.2	Berechnung des Schwerpunktes	36
2.3	Likelihood-Analyse zur Ausdehnung der Quelle	40
3	Suche nach astrophysikalischen Gegenständen in anderen Wellenlängen	43
3.1	Vorstellung der verwendeten Sternkataloge	43
3.2	Suche im Optischen und Infraroten	45

3.2.1	Auflistung umgebender USNO-Objekte	45
3.2.2	Darstellung im Zweifarbendiagramm	47
3.2.3	Vergleich mit dem 2MASS-Katalog	55
3.2.4	Vergleich mit der SDSS	57
3.3	Mögliche Gegenstücke im Radiobereich	58
3.4	Untersuchungen im Röntgenbereich	61
3.4.1	Die ROSAT-Mission	62
3.4.2	Berechnung der oberen Grenze auf den Röntgenfluss (Punktquelle) . .	62
3.4.3	Berechnung der oberen Grenze auf den Röntgenfluss (ausgedehnte Quelle)	66
4	Zusammenfassung und Ausblick	69
	Anhang	73
A	Auflistung umgebender Quellen	73
B	Bildanalyse der SDSS-Daten	91
	Literaturverzeichnis	93

Kurzfassung

Diskussionen über Dunkle Materie nehmen in der heutigen Forschung einen wichtigen Bereich der Astro- sowie der Teilchenphysik ein. Moderne Vielteilchensimulationen der Entstehung von Milchstraßen-ähnlichen Systemen zeigen eine Bildung von zahlreichen Dunkle Materie-Substrukturen in galaktischen Halos. Aufgrund einer Sensitivität im Energiebereich zwischen 10MeV und 300GeV unterstützt das *Large Area Telescope* der Fermi-Mission die Suche nach diesen Substrukturen in der Halo der Milchstraße.

Diese Bachelorarbeit diskutiert eine detaillierte Untersuchung der bislang unassozierten Fermi-Quelle 1FGL J0030.7+0724, die gemäß ihrer beschriebenen Charakteristika eine Interpretation als Dunkle Materie-Substruktur zulässt. Zu Beginn wird die Berechnung der Quellenposition, basierend auf den aktuellen Fermi-Daten, durchgeführt und anschließend eine ausführliche Gegenstücksuche in verschiedenen Wellenlängenbereichen präsentiert. Zusätzlich wird eine Überlegung bezüglich eines Blazars als Emitter der detektierten nicht-thermischen Photonen verfolgt. Infolge dieser wird die beobachtete Strahlung mit der charakteristischen spektralen Energieverteilung eines Blazars verglichen. Diese beschriebenen Analyseaspekte ermöglichen eine Prüfung des Sachverhalts, die Quelle 1FGL J0030.7+0724 als Dunkle Materie-Substruktur zu interpretieren.

Abstract

Discussions on Dark Matter represent a very important aspect of modern astrophysics as well as particle physics. According to recent N-body simulations of the structure formation in systems similar to our Milky Way Galaxy, Dark Matter is predicted to form substructures within the galactic haloes. The Large Area Telescope onboard the Fermi-Mission explores the sky within an energy range from 10MeV to 300GeV and is therefore able to participate in the search for those Dark Matter substructures.

This bachelor thesis discusses a detailed research on the unassociated Fermi-source 1FGL J0030.7+0724, which displays several characteristics required to be interpreted as a Dark Matter substructure. At the beginning, calculations on the source position are described, including the most recent Fermi data. Based on the achieved results, an emphasis is placed upon the research for possible counterparts of this source in different wavelengths. Furthermore, a blazar is considered as emitter of the detected non-thermal photons, which leads to a comparison of the observed radiation with the characteristic spectral energy distribution of blazars. Due to the mentioned analysis aspects, the properties of the source 1FGL J0030.7+0724 are tested and interpreted in terms of a dark matter substructure.

Kapitel 1

Einleitung

Die Geheimnisse des Weltalls faszinieren die Menschheit bereits seit Anbeginn der Zeit, doch scheint jedes gelöste Rätsel immer weitere Fragen aufzuwerfen. Insbesondere aufgrund des technischen Fortschritts des letzten Jahrhunderts konnte vielen tiefgreifenden Fragen, wie solchen zur Entstehung des Universums, entgegengetreten werden und es wurden „eigenartige“ Objekte wie Schwarze Löcher, Pulsare oder Quasare entdeckt. Eine große Fragestellung der heutigen Astronomie zeigt die Dunkle Materie, für deren Existenz einerseits viele Indizien sprechen, andererseits konnten jedoch noch keine Dunkle Materie-Teilchen direkt nachgewiesen werden. Die im August 2008 gestartete Fermi-Mission soll die Suche nach Dunkle Materie-Ansammlungen, insbesondere in der Halo der Milchstraße, unterstützen.

Ebenfalls diese Arbeit widmet sich der Suche nach Dunkle Materie-Strukturen in unserer galaktischen Halo. Ein vielversprechender, bislang unassoziierter Kandidat, welcher die Charakteristika einer Dunkle Materie-Substruktur aufweist, wird aus dem ersten Fermi-Katalog entnommen und auf eine mögliche Interpretation als eine derartige Struktur untersucht. Hierfür wird eine detaillierte Suche nach möglichen Gegenstücken in anderen Wellenlängen durchgeführt. Zusätzlich wird ein Blazar als Emitter der von Fermi detektierten Photonen betrachtet. Hierfür wird der beobachtete Fluss dieser Region im Röntgen- sowie im Gammabereich mit dem spektralen Verlauf eines Blazarspektrums verglichen.

Das erste Kapitel ermöglicht einen zusammenfassenden Überblick über die bisher bekannten Eigenschaften der Dunklen Materie und zeigt einige Informationen zur Fermi-Mission. Im anschließenden Kapitel wird der Schwerpunkt der detektierten Photonen dieser Fermi-Quelle berechnet, bevor im dritten Kapitel die ausführliche Gegenstücksuche und die Betrachtung des Blazars als Emitter dokumentiert wird. Kapitel 4 zeigt eine Zusammenfassung der erlangten Ergebnisse und bietet einen kurzen Ausblick für weiterführende Analysen.

1.1 Nichtbaryonische Dunkle Materie

Kosmologische Beobachtungen von entfernten Supernovae-Explosionen sowie Analysen der kosmischen Hintergrundstrahlung ermöglichen einen Einblick in die Geometrie und die Zusammensetzung unseres Universums. Die *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP), welche von der NASA im Jahre 2001 gestartet wurde, bestimmte die Bestandteile unseres Universums zu $\Omega_B \approx 0,043$ sichtbarer, baryonischer Materie, $\Omega_{DM} \approx 0,20$ Dunkler Materie sowie zu einem Hauptteil von $\Omega_\Lambda \approx 0,73$ bestehend aus Dunkler Energie (Amsler 2008). Die einzelnen Dichten der Bestandteile Ω_i addieren sich zu einer gesamten Dichte von $\Omega \approx 1$, welches auf eine flache Geometrie unseres Universums deutet.

$$\Omega = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_\Lambda \approx 1 \quad (1.1)$$

Die Dunkle Energie ist bislang weitestgehend unerforscht, für den Aspekt der Dunklen Materie hingegen existieren viele Theorien bezüglich deren Charakteristika sowie zahlreiche Hinweise auf dessen Existenz und Projekte für deren Nachweis.

1.1.1 Hinweise auf Dunkle Materie

Hinweise auf die Existenz von Dunkler Materie können auf den verschiedensten räumlichen Skalen, angefangen bei einzelnen Galaxien bis hin zu kosmologischen Größenordnungen, beobachtet werden. Im Folgenden werden daher die markantesten astronomischen Hinweise auf den genannten unterschiedlichen Skalen zusammenfassend erläutert.

Rotationskurven in Galaxien: Beobachtungen der Bewegungen von Gaswolken sowie Sternen um unser galaktisches Zentrum zeigen flache Rotationskurven für die radialen Geschwindigkeiten $v(r)$ in Abhängigkeit von der Entfernung r zum Zentrum der Galaxie (Bertone *et al.* 2005). Die Geschwindigkeit verbleibt somit auch für Distanzen jenseits der sichtbaren galaktischen Scheibe ($r > 10\text{kpc}$) konstant. Dieses Phänomen, welches in Abbildung 1.1 graphisch dargestellt ist, kann ebenfalls bei vielen weiteren Spiralgalaxien detektiert werden (Bergström 2000).

Die Gesetze der Newton'schen Dynamik zeigen bei der Gleichsetzung von Zentripetal- und Gravitationskraft nachfolgenden Zusammenhang für die radiale Geschwindigkeit einzelner galaktischer Objekte.

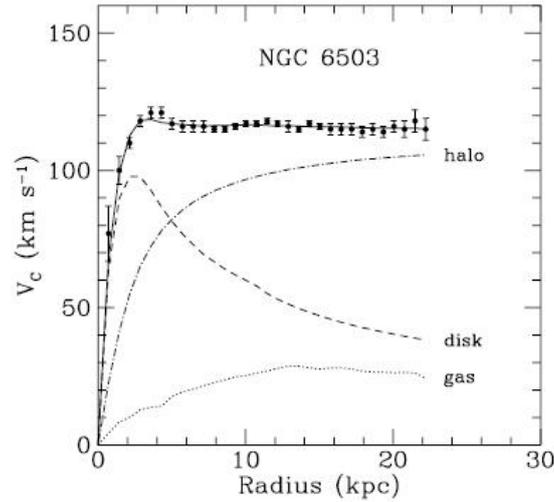


Abbildung 1.1: Rotationskurve der Galaxie NGC 6503 (durchgezogene Linie), die gepunkteten und gestrichelten Linien präsentieren die einzelnen Anteile des Gases, der galaktischen Scheibe (disk) sowie der Halo an dem Geschwindigkeitsprofil (Bertone *et al.* 2005).

$$v(r) = \sqrt{\frac{G \cdot M(r)}{r}}. \quad (1.2)$$

Hierbei präsentiert G die Gravitationskonstante und $M(r)$ die Masse innerhalb des Bahnradius r . Wird nun, wie sich aus optischen Beobachtungen folgern lässt, eine Konzentration des überwiegenden Teils der Masse im galaktischen Zentrum angenommen, ergibt sich ein Abfall der Geschwindigkeit mit steigender Distanz in der Form $v(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$. Eine konstante Rotationskurve hingegen verlangt eine Zunahme der Masse gemäß $M(r) \propto r$ in der galaktischen Halo, welches auf die dortige Existenz von Dunkler Materie schließen lässt (Bertone *et al.* 2005). Die Massenanteile der galaktischen Scheibe, des sichtbaren Gases sowie einer Halo mit einem derartigen Massenprofil ergeben schließlich die verlangte flache Rotationskurve (vgl. Abbildung 1.1).

Kinematik in Galaxienhaufen: Die Bewegungen einzelner Galaxien in einem Galaxienhaufen folgen einem Zusammenhang zwischen der mittleren kinetischen Energie $\langle E_{\text{kin}} \rangle$ sowie der potentiellen Energie $\langle E_{\text{pot}} \rangle$ gemäß dem Virialsatz, insofern das System als abgeschlossen betrachtet werden kann und sich im mechanischen Gleichgewicht befindet (Kolanoski 2006):

$$2 \cdot \langle E_{\text{kin}} \rangle + \langle E_{\text{pot}} \rangle = 0. \quad (1.3)$$

Während seiner Beobachtungen des Komahaufens erkannte Zwicky (1933), dass für die Erklärung der einzelnen Galaxienbewegungen eine Masse benötigt wurde, welche um den Faktor

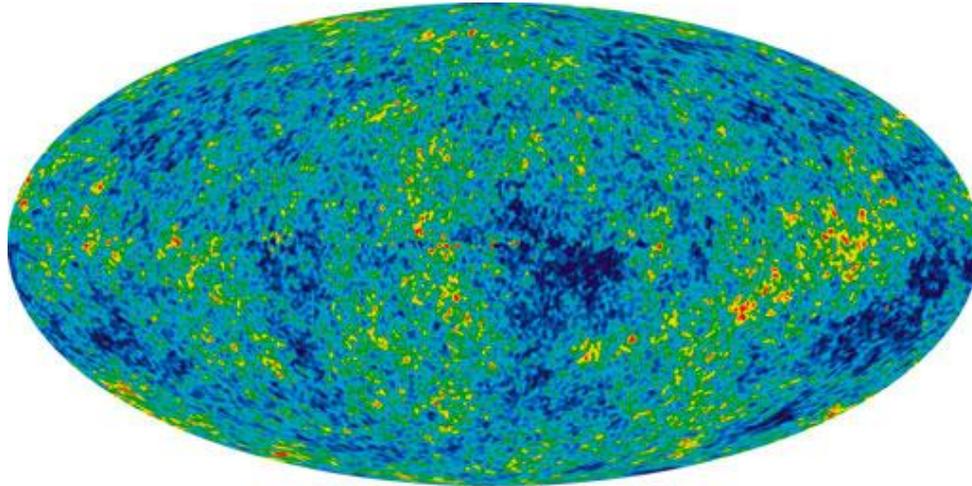


Abbildung 1.2: Anisotropie des CMB aufgenommen von der *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP); zwischen den kühleren (blau) und wärmeren Regionen (rot) besteht ein Unterschied von lediglich 0,0002 Kelvin (Hinshaw *et al.* 2009).

400 oberhalb der Masse lag, die anhand der Leuchtkraft des Haufens bestimmt werden konnte. Dieses Phänomen verwies somit auf die Existenz von Dunkler Materie und konnte ebenfalls für weitere Galaxieansammlungen beobachtet werden.

Beobachtung des CMB und Strukturbildung: Die kosmische Hintergrundstrahlung (CMB; *Cosmic Microwave Background*) entstand bei einer Rotverschiebung von $z \approx 1000$, nachdem das Universum aufgrund der Rekombination von Elektronen mit Wasserstoff- und Heliumkernen transparent für Photonen geworden war. Heutzutage weist diese Strahlung, aufgrund der Expansion des Universums, lediglich noch eine Temperatur von 2,73 Kelvin auf (Amsler 2008). Satellitenbeobachtungen, insbesondere der WMAP, bestätigten eine Anisotropie in der Temperatur des CMB von etwa $\Delta T/T = 10^{-5}$, welche auf eine äquivalente Anisotropie in der Massenverteilung zur Zeit der Entkopplung der Photonen schließen lässt. Nach heutigen Modellen der kosmischen Entwicklung, welche lediglich das Vorhandensein von baryonischer Materie berücksichtigen, verlief die Strukturbildung und somit die Verstärkung der Anisotropien, linear mit der Abnahme der Rotverschiebung z . Anhand dieses Modells könnte bis zur heutigen Zeit lediglich eine Anisotropie von $\Delta T/T = 10^{-2}$ erreicht werden. Eine derzeitiges Verhältnis von $\Delta T/T \approx 1$ verlangt daher einen zusätzlichen Anteil bestehend aus Dunkler Materie, welche bereits bei einer höheren Rotverschiebung entkoppelte und erste Anisotropien bildete. Dies ermöglichte der baryonischen Materie zum Zeitpunkt ihrer Entkopplung diese bereits gebildeten Strukturen zu verstärken, sodass die Strukturbildung insgesamt beschleunigt werden konnte (Bergström 2000).

1.1.2 Eigenschaften von Dunkler Materie

Die Eigenschaften der Dunklen Materie folgen einerseits aus den oben genannten Hinweisen auf deren Existenz, andererseits aus dem Aspekt, dass dieser Bestandteil des Universums bislang noch nicht detektiert wurde. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung der Charakteristika dieser Materie präsentiert, welche sich an der Review von Bergström (2000) orientiert.

Die Existenz von Dunkler Materie kann, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, insbesondere aufgrund ihres gravitativen Einflusses auf ihre Umgebung nachgewiesen werden. Eine weitere Wechselwirkung der Dunklen Materie mit gewöhnlicher, baryonischer Materie wurde bislang noch nicht weiter beobachtet. Dieses erlaubt einen geringen Wirkungsquerschnitt für eine derartige Wechselwirkung. Eine analoge Argumentation, basierend auf der fehlenden Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung, verweist auf die elektrische Neutralität der gesuchten Teilchen. Der Sachverhalt, dass auch heutzutage der Einfluss der Dunklen Materie beobachtet wird, verlangt nach einer langen Lebensdauer ihrer Komponenten, um ihre Existenz seit dem Urknall erklären zu können.

Weitere astronomische Beobachtungen unterstützen die Existenz von Teilchen mit nichtbaryonischen, nichtrelativistischen Charakteristika als Hauptbestandteil der Dunklen Materie. Dieses wird im Folgenden nun genauer erläutert.

Nichtbaryonisch: Insbesondere zwei Beobachtungen verlangen nach der Existenz von nichtbaryonischer Materie: die Strukturbildung basierend auf den Anisotropien des CMB sowie die Nukleosynthese während des Big Bang.

Wie bereits in Abschnitt 1.1.1 dargestellt, ist für die Erklärung der heutigen Strukturen nichtbaryonische Dunkle Materie notwendig. Aufgrund ihres geringen Wirkungsquerschnittes entkoppelte diese bereits zu einem früheren Zeitpunkt und formte erste Strukturen, sodass die anschließende Strukturbildung der baryonischen Materie beschleunigt wurde.

Beobachtungen der Elementhäufigkeiten, insbesondere von Deuterium, Helium sowie Lithium, bestätigen die Vorhersagen von Big Bang Nukleosynthese-Modellen, beschränken jedoch gleichzeitig den Anteil der baryonischen Materie an der Zusammensetzung des Universums auf $\Omega_B \approx 0,043$ (Amsler 2008). Analysen der Dynamik von Galaxien sowie Galaxienhaufen verweisen hingegen auf einen Materieanteil von $\Omega_M \approx 0,2 - 0,4$, welches wiederum auf eine Erklärung basierend auf nichtbaryonischer Materie schließen lässt (Bergström 2000).

Nichtrelativistisch (kalt): Leichte Teilchen, welche sich zum Zeitpunkt ihrer Entkopplung mit relativistischen Geschwindigkeiten fortbewegten und daher als „heiße Dunkle Materie“ (HDM: *Hot Dark Matter*) bezeichnet werden, konnten nicht auf galaktischen Größenskalen gebunden werden. Die gebildeten Strukturen kaskadierten zu immer kleineren Systemen, so dass sich aus großen Galaxienhaufen einzelne Galaxien herausbildeten (*Top-Down*-Szenario). Kalte Dunkle Materie (CDM: *Cold Dark Matter*) hingegen, welche sich aus nichtrelativistischen, schweren Teilchen zusammensetzt, ermöglichte die Strukturbildung beginnend mit kleinen Strukturen auf galaktischen Skalen, welche sich anschließend zu immer größeren Ansammlungen ausbildeten (Buckley *et al.* 2008). Dieses *Bottom-Up*-Szenario wird gemäß Beobachtungen der Bildung von Galaxienstrukturen bei hohen Rotverschiebungen als favorisiert angesehen. Kalte Dunkle Materie, oftmals auch als *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPs) bezeichnet, verlangt als Bestandteil Teilchen mit einer Ruheenergie von etwa 100 GeV, welches die Überlegungen auf neue, bislang unbekannte Teilchen der Supersymmetrie erweitert (vgl. Abschnitt 1.1.3).

Obige Argumente beschränken die Anteile von relativistischen sowie baryonischen Teilchen an der Dunklen Materie, obwohl deren Einfluss gleichzeitig nicht vollständig ausgeschlossen werden kann und viele Modelle existieren, welche diese Teilchen bedenken. Der Hauptanteil der Dunklen Materie sollte gemäß obigen Argumenten aus WIMPs zusammengesetzt sein.

Thermischer Wirkungsquerschnitt: Nach der Entkopplung der Dunklen Materie verringerte sich deren Anteil aufgrund von Annihilationsprozessen beständig. Ein Vergleich der Dunklen Materie Dichte zum Zeitpunkt der Entkopplung mit ihrem heutigen Anteil Ω_{DM} an der Zusammensetzung des Universums ermöglicht folglich Rückschlüsse bezüglich des Annihilationswirkungsquerschnittes. Die folgende Relation beschreibt diesen Zusammenhang (Bertone *et al.* 2005), wobei gemäß Amsler (2008) eine Größe von $\Omega_{\text{DM}} h^2 \approx 0,1$ angenommen wird:

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \approx \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle \sigma v \rangle} \quad (1.4)$$

$$\Rightarrow \langle \sigma v \rangle \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}. \quad (1.5)$$

Der Parameter h wird über die Hubble-Konstante $H_0 \approx 73 \text{ km}/(\text{s Mpc})$ definiert als:

$$h = \frac{H_0}{100 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}} \quad (1.6)$$

und präsentiert folglich die Expansionsrate des Universums zu $h = 0,73$ (Amsler 2008).

Aufgrund der thermischen Natur dieser Teilchen während ihrer Entkopplung wird diese Größe häufig als *thermischer Wirkungsquerschnitt* bezeichnet.

1.1.3 Dunkle Materie-Kandidaten

Neben Überlegungen bezüglich bisher unentdeckter Teilchen der supersymmetrischen Theorie werden ebenfalls insbesondere Neutrinos oder baryonische Teilchen als Dunkle Materie-Kandidaten vorgeschlagen. Aufgrund der erwarteten hohen Ruheenergie der WIMPs von etwa 100 GeV sowie der weiteren, im vorherigen Abschnitt erwähnten, Charakteristika, wie Stabilität und ein sehr geringer Wirkungsquerschnitt, kann der Großteil der Standardmodellteilchen als Kandidaten der CDM jedoch ausgeschlossen werden (Kolanoski 2006). Das supersymmetrische Neutralino wird zur Zeit als favorisierter Kandidat betrachtet, jedoch auch einige weitere Lösungen der Dunklen Materie sollen in dieser Arbeit aufgegriffen werden. Eine ausführlichere Ausarbeitung der zahlreichen möglichen Kandidaten präsentiert Bertone *et al.* (2005).

Neutralino: Das Neutralino stellt das leichteste supersymmetrische Teilchen (LSP: *Lightest Supersymmetric Particle*) dar und besteht aus einer Zusammensetzung der supersymmetrischen Partner der Eichbosonen des Standardmodells. Eine Ruhemasse von etwa 100 GeV würde nach den bestehenden Theorien erfüllt werden, ebenso wie die geforderte elektrische Neutralität und der geringe Wechselwirkungsquerschnitt mit baryonischer Materie.

Aufgrund der Erhaltung der R-Parität in der supersymmetrischen Theorie¹ vermögen supersymmetrische Teilchen lediglich in eine ungerade Anzahl dieser Teilchen zu zerfallen. Das LSP existiert folglich als stabiles Teilchen, welches sich lediglich durch Paarannihilation in Sekundärprodukte umwandelt und somit einen vielversprechenden WIMP-Kandidaten darstellt.

¹Eine ausführliche Definition der R-Parität sowie weitere Aspekte der Supersymmetrie können in Bertone *et al.* (2005) aufgefunden werden.

Neutrinos: Aufgrund der Gewissheit über die schwache Wechselwirkung der Neutrinos zeigen diese einen möglichen Dunkle Materie-Kandidaten. Bertone *et al.* (2005) hingegen beschreiben Ergebnisse für den maximalen Anteil der Neutrinos an der Zusammensetzung des Universums von $\Omega_\nu \leq 0,07$, sodass diese als Hauptbestandteil der Dunklen Materie ($\Omega_{\text{DM}} = 0,20$) abgelehnt werden. Ein weiteres Argument für die Ablehnung bezieht sich auf die bereits erwähnte Strukturbildung im frühen Universum (vgl. Abschnitt 1.1.2). Mit einer geringen Masse von wenigen eV werden Neutrinos der HDM zugeordnet und würden somit ein *Top-Down*-Szenario in der Strukturbildung hervorrufen.

Anhand obiger Argumentation können Neutrinos lediglich einen geringen Anteil der Dunklen Materie bilden, sodass mindestens ein zusätzliches CDM-Teilchen benötigt wird.

Kaluza-Klein-Zustände: Nach der Theorie der extra Dimensionen beinhaltet unsere vierdimensionale Raumzeit weitere kompaktifizierte Dimension. Kaluza-Klein-Zustände beschreiben die Anregungen der Standardmodellteilchen in diese zusätzlichen Dimensionen, welche orthogonal zu unserer Raumzeit ausgerichtet sind (Baltz 2004). Als leichtestes Kaluza-Klein-Teilchen (LKP: *Lightest Kaluza-Klein Particle*), oftmals auch als $B^{(1)}$ bezeichnet, wird der erste angeregte Zustand des B-Bosons aufgefasst. Für nachweisbare Reliktdichten seit der Zeit des Urknalls wird eine Ruhemasse von etwa 1TeV gefordert, welches den Charakteristiken eines kalten Dunkle Materie-Teilchens entspricht (Baltz 2004).

Weitere Kandidaten: Neben den oben genannten Kandidaten bestehen viele weitere Theorien bezüglich supersymmetrischer Teilchen oder extra Dimensionen. Ebenfalls existieren Ansätze basierend auf dem Standardmodell, wie beispielsweise „versteckte“ Baryonen in der Form von MACHOS (*Massive Compact Halo Objects*). Durchmusterungen der galaktischen Halo mithilfe des Gravitationslinseneffektes² ergaben jedoch einen maximalen Anteil dieser Objekte an der Gesamtmasse der Halo von lediglich 20% (Bergström 2000).

Eine weitere Theorie, welche sich mit einer Modifikation der Gravitationsgesetze befasst (MOND: *Modified Newtonian Dynamics*), konnte bislang jedoch noch nicht vollständig geprüft werden (Kolanoski 2006).

²Der Gravitationslinseneffekt folgt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie und beschreibt die Ablenkung von Licht aufgrund der Krümmung der Raum-Zeit durch massereiche Objekte.

1.1.4 Suche nach Dunkler Materie

Für die Suche nach Dunkler Materie werden drei verschiedene Ansätze verfolgt: die direkte sowie die indirekte Detektion und der Nachweis in Teilchenbeschleunigern. Eine vollständige Bestätigung einer Dunkle Materie-Theorie sowie die Bestimmung sämtlicher Charakteristika des zugrundeliegenden Teilchens verlangen astronomische Beobachtungen sowie einen zusätzlichen Nachweis über die Existenz dieses Teilchens in einem Teilchenbeschleuniger (Buckley *et al.* 2008).

Die folgende Diskussion bezüglich direkter sowie indirekter Detektionen bezieht sich auf das supersymmetrische Neutralino als favorisierten Dunkle Materie-Kandidaten.

Direkte Suche: Die direkte Suche nach Dunkler Materie beruht auf der Annahme, dass diese Teilchen die Galaxie sowie ihre Halo ausfüllen und somit ebenfalls durch die Erde hindurch propagieren. Die bestehenden Experimente³ detektieren die Rückstöße von Atomen, welche diese aufgrund eines elastischen Stoßes mit einem Dunkle Materie-Teilchen erfahren. Aufgrund des geringen Wirkungsquerschnittes sowie des hohen Hintergrundes einer solchen Reaktion müssen die Experimente für die Messungen der entstehenden Rückstoßenergien der Atome vor der kosmischen sowie vor radioaktiver Strahlung abgeschirmt werden.

Der detektierte Dunkle Materie-Fluss wäre somit von der Dichte- und der Geschwindigkeitsverteilung der Neutralinos sowie von deren Wirkungsquerschnitt mit baryonischer Materie abhängig. Bislang konnte jedoch noch keine signifikante Nachweise der Dunklen Materie in Form von WIMPs erzielt werden. Derzeitige Ergebnisse des CDMS II-Experiments zeigen beispielsweise lediglich zwei spinunabhängige Ereignisse, welches einem Wirkungsquerschnitt von $\sigma_{\text{Proton}} < 7,0 \cdot 10^{-44} \text{cm}^2$ bei einer WIMP-Masse von etwa 70 GeV entspräche (CDMS-Kollaboration 2010).

Indirekte Suche Die indirekte Suche beschäftigt sich mit der Detektion der Produkte aus der Selbstannihilation zweier Neutralinos, wobei in dieser Arbeit insbesondere auf den Nachweis der entstehenden Photonen eingegangen werden soll.

Das Energiespektrum der resultierenden Photonen zeigt insgesamt drei verschiedene Beiträge, welche in Abbildung 1.3 schematisch dargestellt werden (Kuhlen (2009) sowie Buckley *et al.* (2008)).

³Eine Übersicht bezüglich der bestehenden Experimente präsentiert Kolanoski (2006).

Bei der Neutralinoannihilation in einen vorläufigen Zwischenzustand, wie beispielsweise ein Quark-Antiquark-Paar, können infolge des Hadronisierungsprozesses neutrale Pionen entstehen, welche anschließend in zwei Photonen zerfallen ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$). Dieser Prozess erzeugt ein kontinuierliches Spektrum (vgl. Abbildung 1.3a). Annihilieren die Neutralinos hingegen in Bosonen, wie beispielsweise $\chi\chi \rightarrow W^+W^-$, besteht die Möglichkeit der Emission von Photonen aufgrund von sog. internen Bremsstrahlungsprozessen ($\chi\chi \rightarrow W^+W^-\gamma$). Diese Prozesse der Photonemission verlangen kein externes elektromagnetisches Feld, welches die geladenen Teilchen abbremst. Außerdem tragen sie aufgrund eines Maximums im Emissionsspektrum bei $E \approx m_\chi$ bedeutend zum spektralen Verlauf in diesem Energiebereich bei (vgl. Abbildung 1.3b). Abbildung 1.3c beschreibt die direkte Annihilation in zwei Photonen, bzw. in einen Endzustand aus einem Photon sowie einem Z-Boson:

$$\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma \quad , \quad \chi\chi \rightarrow Z^0\gamma. \quad (1.7)$$

Die energetische Verteilung dieser Emissionslinien wird von der Neutralinomasse m_χ bestimmt mit dem Zusammenhang $E_\gamma \approx m_\chi$ für den Endzustand aus zwei Photonen und $E_\gamma = m_\chi(1 - m_Z^2/4m_\chi^2)$ für die Annihilation in ein Photon sowie in ein Z-Boson (Bergström 2000). Diese Signalstrukturen würden folglich einen direkten Rückschluss auf die Neutralinomasse ermöglichen (*smoking gun signal*), sind jedoch aufgrund der Loopstruktur ihrer Zerfallskanäle unterdrückt. Bei der häufig angenommenen Neutralinomasse von $m_\chi \approx 100\text{GeV}$ ist dieses Annihilationsspektrum größtenteils im Energiebereich zwischen 10MeV und 100GeV wiederzufinden (Kuhlen 2009).

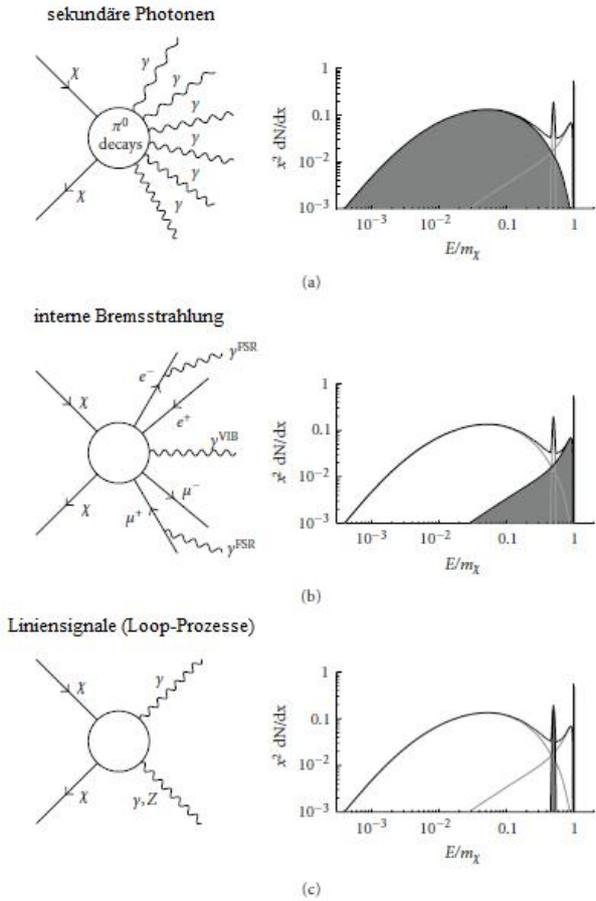


Abbildung 1.3: Energiespektrum des Neutralinoannihilationsprozesses; (a) Beitrag sekundärer Photonen aus Hadronisierungsprozessen der Annihilationsprodukte, (b) Beitrag der internen Bremsstrahlung, (c) Liniensignal (Kuhlen 2009)

Der Photonfluss Φ^4 dieser Annihilationsprozesse weist einen engen Zusammenhang insbesondere mit der Neutralinomasse m_χ , dem thermischen Wirkungsquerschnitt $\langle \sigma v \rangle$ sowie dem Dichteprofil der Dunklen Materie $\rho(s)$ entlang der Sichtlinie (LoS: *Line of Sight*) auf (Bertone *et al.* 2005):

$$\frac{d\Phi}{dE d\Omega} = \underbrace{\frac{1}{2} \frac{1}{m_\chi^2} \langle \sigma v \rangle}_{\text{Teilchenphysikalischer Anteil}} \cdot \underbrace{\frac{dN_\gamma}{dE} \cdot \frac{1}{4\pi} \int_{LoS} ds \rho(r(s))^2}_{\text{Astrophysikalischer Anteil}}. \quad (1.8)$$

Der differentielle Fluss bezüglich des betrachteten Energieintervalls dE sowie des Raumwinkels $d\Omega$ präsentiert sich folglich bestehend aus zwei Anteilen, welche unterschiedlichen Prozessen zugeordnet werden können. Der teilchenphysikalische Aspekt beschreibt die Wechselwirkung zwischen zwei Neutralinos, wobei der Parameter $\frac{dN_\gamma}{dE}$ das entstehende Spektrum der Annihilation wiedergibt. Eine mögliche Dichteverteilung $\rho(r(s))$ kann gemäß folgender Relation beschrieben werden (Bertone *et al.* 2005):

$$\rho(r) = \frac{\rho_c}{(r/R)^\gamma [1 + (r/R)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}} \quad (1.9)$$

Die Parameter α, β, γ sind frei wählbar. R folgt aus der Ausdehnung der Halo, ρ_c beschreibt die kritische Dichte des Universums und r die Entfernung vom Zentrum der Galaxie.

Satellitengestützte Teleskope, wie das Fermi-LAT (vgl. Abschnitt 1.2.2 und 1.3.1), sowie Cherenkov-Teleskope auf der Erdoberfläche, wie beispielsweise MAGIC und HESS⁵, welche eine Sensitivität im Energiebereich zwischen 1GeV und 100TeV aufweisen, sind für eine Detektion der Gammastrahlung aus obigen Annihilationsprozessen geeignet.

1.2 Dunkle Materie-Substrukturen in der galaktischen Halo

Aufgrund ihrer gravitativen Wechselwirkung mit der umgebenden Materie, können Ansammlungen von Dunkler Materie in Galaxienhaufen, in den Zentren von Galaxien sowie in deren Halos beobachtet werden. Regionen mit solchen hohen Dunkle Materie-Massendichten ergeben gemäß Gleichung 1.8 sehr gute Beobachtungsziele für die Detektion eines Dunkle Materie-Signals.

⁴Der Photonfluss Φ beschreibt die Anzahl der Photonen, welche pro Zeit und pro Fläche detektiert werden.

⁵Für Informationen bezüglich der Cherenkov-Teleskope MAGIC sowie HESS kann auf MAGIC-Collaboration (2008) bzw. Aharonian *et al.* (2006a) verwiesen werden.

1.2.1 Bildung von Dunkle Materie-Substrukturen

Die Bildung von Dunkle Materie-Substrukturen wird heutzutage mittels Vielteilchensimulationen untersucht, welche übereinstimmend eine große Anzahl dieser Strukturen in galaktischen Halos zeigen.

Die höchsten Auflösungen erzielen bisher die *Aquarius*- sowie die *Via Lactae II*-Simulationen⁶. Beide Projekte simulieren die Strukturbildung lediglich der Dunklen Materie für die Zeit vom Urknall bis heute und basieren auf kosmologischen Parametern aus den Beobachtungen der WMAP. Aus der Menge der entstehenden Strukturen wurden einige ausgewählt, welche anschließend mittels einer höheren Auflösung erneut simuliert wurden. *Aquarius* vermochte insgesamt 300000 klumpenartige Substrukturen mit einer minimalen Masse von $3 \cdot 10^4$ in diesen Halos bis hin zu Entfernungen von 405kpc vom Zentrum aufzulösen.

Die *Aquarius-A1* Simulationen beschreiben die Berechnungen Milchstraßen-ähnlicher Systeme (vgl. Abbildung 1.4). Die Farbskala dieser Abbildung setzt sich aus einer Abhängigkeit von dem Logarithmus der quadratischen Dunkle Materie-Dichte, projiziert auf die Sichtlinie, sowie von der Geschwindigkeitsdispersion der Substrukturen zusammen. Die erste Abhängigkeit weist dabei eine direkte Proportionalität zum Photonfluss aus Dunkle Materie-Annihilationsprozessen auf, sodass Regionen hoher Dunkle Materie-Dichten heller erscheinen. Die Geschwindigkeitsdispersion wird durch die Farbgebung wiedergegeben. Die Strukturen folgen einer isotropen Verteilung in der simulierten Halo, wobei sich die Dunkle Materie in einem Bereich außerhalb des galaktischen Zentrums konzentriert. Die obere Grenze für den Anteil dieser Substrukturen an der Gesamtmasse der Galaxie konnte auf 18% festgelegt werden (Springel *et al.* 2008). Basierend auf den angenommenen Anfangsmassen von mehreren Sonnenmassen⁷ (M_{\odot}) für die simulierten Teilchen werden für die wahren Größen der Substrukturen Massen zwischen $10^{-6}M_{\odot}$ und $10^{10}M_{\odot}$ vermutet. Die Anzahl der beobachteten „Klumpen“ nimmt mit zunehmender Masse jedoch ab (Springel *et al.* 2008):

$$\frac{dM}{dM} \propto M^{-1,9}. \quad (1.10)$$

Kandidaten für solche Dunkle Materie-„Klumpen“ sind Zwerggalaxien, da von ihnen ein sehr hohes Masse-Leuchtkraft-Verhältnis bekannt ist und sie daher als von Dunkler Materie dominiert aufgefasst werden. Die bisher detektierte Anzahl an Zwerggalaxien verhält sich jedoch

⁶Ausführliche Informationen bezüglich der *Aquarius*- sowie der *Via Lactae II*-Simulation können den Ausarbeitungen von Springel *et al.* (2008) bzw. Diemand *et al.* (2008) entnommen werden.

⁷Die Masse unserer Sonne beträgt $M_{\odot} = 1,988 \cdot 10^{30}$ kg (Amsler 2008).

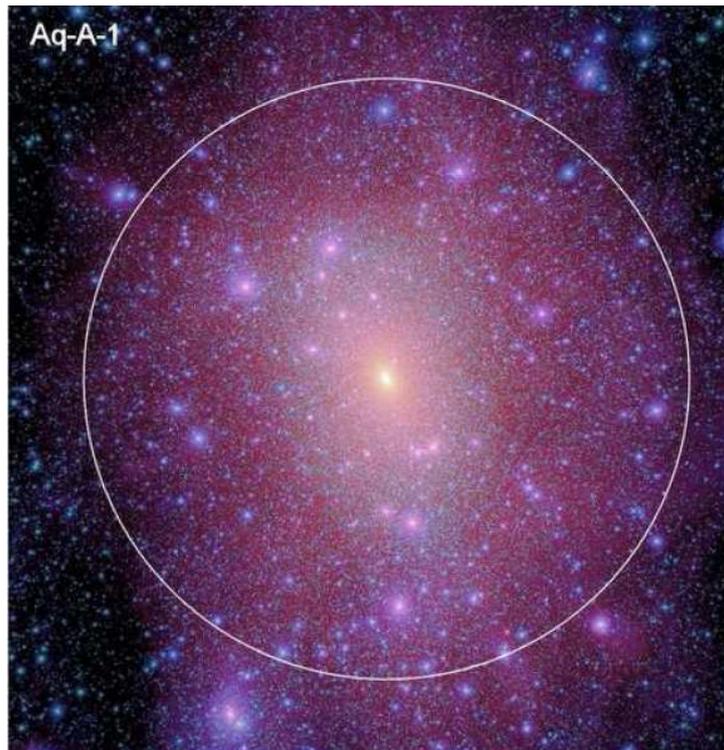


Abbildung 1.4: Simulierte Verteilung der Dunkle Materie-Substrukturen eines Milchstraßen-ähnlichen Systems mit höchster Auflösung gemäß des Aquarius-Projektes (A-A1-Simulation); die Helligkeit der einzelnen Strukturen repräsentiert die Leuchtkraft aus Dunkle Materie-Annihilationsprozessen der einzelnen Regionen, die Farbgebung gibt die Geschwindigkeitsdispersion wieder, wobei in das Zentrum der Verteilung geschaut wird; die Abbildung zeigt eine Kantenlänge von 1,08kpc, der weiße Kreis beschreibt den angenommenen Virialradius von $r_{50} = 433,48\text{kpc}$ (Springel *et al.* 2008).

zu gering, um die aus den Simulationen erwartete Menge an Dunkle Materie-Substrukturen wiedergeben zu können. Daher werden, zusätzlich zu diesen Systemen, reine Dunkle Materie-Strukturen vermutet, welche keinen weiteren Anteil an baryonischer Materie aufweisen und somit lediglich durch Selbstannihilationsprozesse Strahlung emittieren (Buckley *et al.* 2008).

1.2.2 Detektion mittels des Fermi-Satelliten

Bei dem Hauptinstrument des Fermi-Satelliten⁸, dem *Large Area Telescope* (LAT), handelt es sich um ein Paarzeugungsteleskop mit einer Sensitivität im Energiebereich zwischen 20MeV und 300GeV. Somit zeigt es geeignete Charakteristika für die Beobachtung von Photonen aus Dunkle Materie-Annihilationsprozessen.

Aus den Ergebnissen der erwähnten Vielteilchensimulationen lässt sich die Wahrscheinlichkeit der Detektion einer Dunkle Materie-Substruktur durch das Fermi-LAT vorhersagen. Zu-

⁸Informationen bezüglich der Fermi-Mission sowie insbesondere des LAT werden in Abschnitt 1.3 aufgegriffen.

sätzlich zu den Signalen der Substrukturen müssen Hintergrundemissionen, wie insbesondere die kosmische Strahlung der galaktischen Scheibe, berücksichtigt werden, da diese die Dunkle Materie-Ereignisse überlagern würden. Zum Erreichen hoher Signifikanzen des detektierten Signals, verwiesen Kuhlen *et al.* (2008) daher auf Beobachtungen höherer galaktischer Breiten, um somit den Untergrund der galaktischen Scheibe unterdrücken zu können. Die statistische Signifikanz S eines Ereignisses lässt sich aus der Anzahl N_s der detektierten Photonen im Vergleich zu dem erwarteten Hintergrund N_b berechnen:

$$S = \frac{N_s}{\sqrt{N_b}}. \quad (1.11)$$

Ausführliche Rechnungen von Kuhlen *et al.* (2008) mit Neutralinmassen zwischen $m_\chi = 50 - 500\text{GeV}$ und Wirkungsquerschnitten von $\langle \sigma v \rangle = (1 - 10) \cdot 10^{-26}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ ergaben die Detektion von bis zu einigen dutzend Substrukturen mit einer Signifikanz von $S=5$ innerhalb der Fermi-Missionszeit von 10 Jahren.

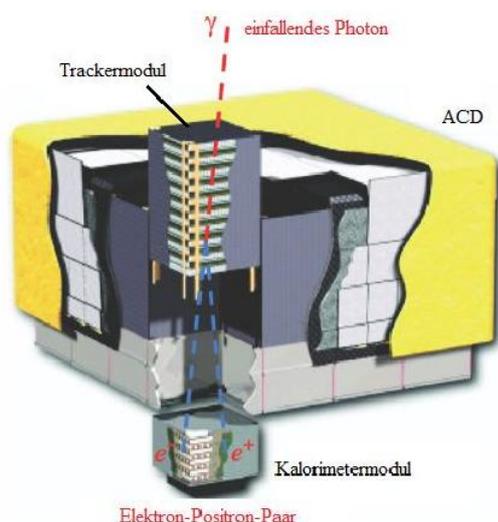
Januschek (2010) erarbeitete eine mögliche Detektion von Substrukturen bereits nach lediglich einem Missionsjahr ($m_\chi = 100\text{GeV}$). Solch eine Beobachtung basiere jedoch auf einem Wirkungsquerschnitt von $\langle \sigma v \rangle = 3 \cdot 10^{-24}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ und befände sich somit zwei Größenordnungen über dem thermischen Wirkungsquerschnitt. Dieser Argumentation zufolge ermöglichen die geplanten zehn Missionsjahre Detektionen von Substrukturen bei einer Annahme von Wirkungsquerschnitten im Bereich von $\langle \sigma v \rangle \approx 10^{-25}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$.

1.3 Die Fermi-Mission

In kosmischen Beschleunigungsprozessen, wie sie beispielsweise in Supernovae-Schocks oder Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) zu beobachten sind, entsteht neben der Komponente der kosmischen Strahlung ebenfalls hochenergetische nicht-thermische Gammastrahlung⁹. Da Photonen aufgrund der Transparenz des Universums in diesem Energiebereich einen geringen Wechselwirkungsquerschnitt zeigen und nicht aufgrund von magnetischen Feldern von ihrer Ausbreitungsrichtung abgelenkt werden, ermöglichen sie einen direkten Einblick in die zugrunde liegenden Beschleunigungen bis an den Rand des sichtbaren Universums.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde im Juni 2008 der Fermi-Satellit gestartet. Mithilfe seines präzisen räumlichen sowie energetischen Auflösungsvermögens soll u.a. eine Karte des

⁹Strahlung, welche nicht infolge von thermischen Anregungen entsteht, erhält die Bezeichnung *nicht-thermisch*.



Parameter	Wertebereich
Energiebereich	20 MeV-300 GeV
effektive Fläche	9500 cm ²
Energieauflösung:	
100 MeV-1 GeV	9%-15%
1 GeV-10 GeV	8%-9%
10 GeV-300 GeV	8,5%-18%
Winkelauflösung (on-axis, 68%-Radius):	
>10 GeV	$\leq 0,15^\circ$
1 GeV	$0,6^\circ$
100 MeV	$3,5^\circ$
95%-Radius	$< 3 \times \Theta_{68\%}$
Field of View (FoV)	2,4 sr

Abbildung 1.5: Schematischer Aufbau des LAT; die Abmessungen des Teleskops belaufen sich auf 1,8m \times 1,8m \times 0,72m (links); Übersicht einiger wichtiger Parameter des LAT (rechts) (Atwood *et al.* 2009).

Gammahimmels erstellt und Beobachtungen bezüglich der Entstehung von Gamma-Ray-Bursts durchgeführt werden. Ein weiteres Augenmerk der Fermi-Mission liegt auf der Detektion von Photonen aus Dunkle-Materie-Annihilationsprozessen in der galaktischen Halo (Fermi-Website 2008).

Das Fermi-Teleskop besteht insgesamt aus zwei einzelnen Beobachtungssystemen: dem *Large Area Telescope* (LAT) sowie dem *GLAST Burst Monitor* (GBM). Letzteres beschäftigt sich mit der Erforschung von Gamma-Ray-Bursts sowie deren Spektren und berechnet deren Position für mögliche weitere Beobachtungen. Die in dieser Bachelorarbeit beschriebene Datenauswertung stützt sich jedoch lediglich auf die Detektion mittels des LAT, sodass auf den GBM nicht ausführlicher eingegangen werden soll.

1.3.1 Das Large Area Telescope¹⁰

Das *Large Area Telescope* (LAT) dient der Detektion von Photonen mit Energien zwischen 20MeV und 300GeV und ermöglicht gleichzeitig die Energieauflösung sowie die Rekonstruktion der Ursprungsrichtung des eintreffenden Photons. Hierbei basiert es auf der Konversion von Photonen in jeweils ein Elektron-Positron-Paar und ermöglicht den Ausschluss von Ereignissen, verursacht durch Hintergrundphotonen.

Die Hauptbestandteile dieses Teleskops werden von einem Antikoinzidenz-Detektor (ACD: *Anticoincidence Detector*) zur Ablehnung von Ereignissen geladener Teilchen sowie von einem

¹⁰Die Inhalte dieses Abschnittes sind hauptsächlich auf Atwood *et al.* (2009) zurückzuführen.

Hochpräzisionstracker und einem Kalorimeter gebildet. Tracker und Kalorimeter befinden sich in einer quadratischen Anordnung von jeweils 4x4 Modulen, wobei der gesamte Aufbau von dem ACD umgeben wird (s. Abbildung 1.5).

Präzisions-Konversions-Tracker: Im Präzisions-

Konversions-Tracker konvertieren die eintreffenden Photonen in ein Elektron-Positron-Paar, deren Spuren anschließend in ihren x- sowie y-Koordinaten aufgezeichnet werden (vgl. Abbildung 1.6). Insgesamt zeigt dieser Bestandteil 18 Ebenen aus einseitigen Silizium-Streifen-Detektoren.

Die obersten 16 Detektorebenen werden von einer Schicht aus Wolfram ($Z=74$) als Konversionsmaterial überlagert. Die Wahrscheinlichkeit eines Paarerzeugungsprozesses wird folglich aufgrund der hohen Ordnungszahl optimiert. Die ersten 12 Konversionsschichten (*front*) weisen eine geringe Dicke von etwa 0,03 Strahlungslängen auf. Um die effik-

tive Fläche eines Konversionsprozesses im hinteren Teil des Trackers zu vergrößern, wurden diese Schichten in den letzten vier Ebenen (*back*) um das Sechsfache stärker gewählt.

Kalorimeter: Jedem der 16 Tracker-Module ist ein Kalorimeter, bestehend aus CsI(Tl) Kristallen, zugeordnet. Beim Eintreten von Teilchen in das Kalorimeter entstehen Kaskaden, welche mittels der als Szintillatoren fungierenden Kristalle und der anschließenden Photodioden aufgezeichnet sowie aufgrund der Anordnung der einzelnen Kristalle räumlich rekonstruiert werden können.

Das Profil der Schauerkaskade ermöglicht Rückschlüsse auf die Energie sowie auf die Charakteristika der eintreffenden Teilchen. Für die Energieauflösung zeigte sich eine Abhängigkeit von der Energie des eintreffenden Photons, sodass diese während der Kalibrierung des LAT zwischen 4% bei 5GeV und 2% bei 196GeV variierte. Die Tiefe jedes Kalorimeters wurde als 8,6 Strahlungslängen gewählt, um insgesamt Sensitivitäten bis zu 1TeV zu erzielen.

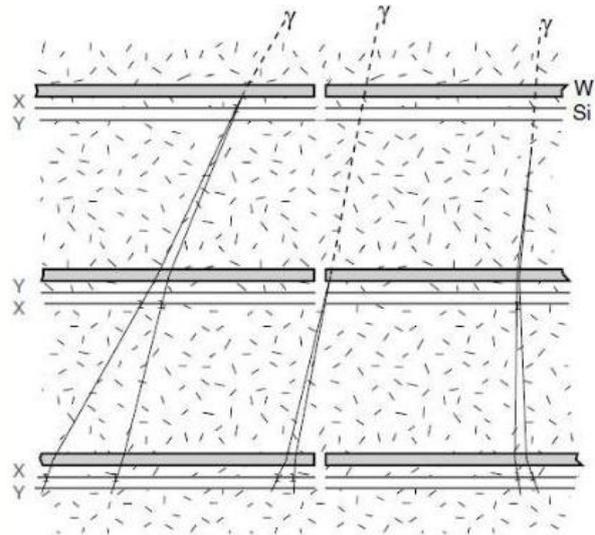


Abbildung 1.6: Schematische Darstellung des Tracker-Aufbaus; ein eintreffendes Photon konvertiert in einer Konversionsschicht W in ein Elektron-Positron-Paar, dessen Verlauf anschließend in der x- sowie y-Richtung mittels des Siliziumdetektors aufgezeichnet wird (Atwood *et al.* 2009)

Antikoinzidenz-Detektor: Der Antikoinzidenz-Detektor (ACD) ist aus kleinen Fliesen, bestehend aus Szintillatormaterial, aufgebaut, die den gesamten Aufbau aus Trackern sowie Kalorimetern umschließen. Geladene Teilchen deponieren folglich ein Signal innerhalb dieses Teleskopbestandteils und können somit von eintreffenden Photonen unterschieden werden.

Die Segmentierung des Detektors kann auf den sog. *black splash*-Effekt zurückgeführt werden. Geladene sekundäre Teilchen der im Kalorimeter entstehenden Kaskaden können aufgrund von Compton-Streuung in den ACD diffundieren und ein Signal erzeugen. Um daher Photonereignisse nicht fälschlicherweise auszuschließen, werden lediglich die Fliesen nahe der rekonstruierten Photontrajektorie zur Ablehnung eines Ereignisses hinzugezogen.

Photonereignisse äußern sich somit durch eine bestimmte Signalstruktur in den verschiedenen Komponenten des LAT: Der ACD zeigt kein deponiertes Signal, im Tracker werden zwei Spuren sichtbar, welche auf den selben Ursprungsort zurückweisen. Im Kalorimeter entstehen zwei Kaskaden mit den Profilen elektromagnetischer Schauer (Fermi-Website 2008).

1.3.2 Die Point-Spread-Function

Die Auflösung der Herkunftsrichtung geladener Teilchen im Tracker ist aufgrund der Breite der einzelnen Siliziumstreifen sowie durch Vielfachstreuung und Bremsstrahlungsprozessen beschränkt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, mit welcher die wahre Ursprungsrichtung eines detektierten Photons rekonstruiert werden kann, wird als Punktabbildungsfunktion (PSF: *Point Spread Function*) bezeichnet und ist vom Einfallswinkel der Photonen θ sowie von der Photonenergie E abhängig.

Die PSF des Fermi-LAT lässt sich durch die folgende Relation beschreiben (Fermi LAT Collaboration 2009):

$$F(\delta, E, \theta) = \left(1 - \frac{1}{\gamma(E, \theta)}\right) \left(1 + \frac{\delta^2}{2\sigma(E, \theta)^2\gamma(E, \theta)}\right)^{-\gamma(E, \theta)} \quad (1.12)$$

Der Parameter δ bezeichnet hierbei den gewichteten Winkelabstand¹¹ zwischen der rekonstruierten und der wahren Richtung des Photons. $\sigma(E, \theta)$ sowie $\gamma(E, \theta)$ ergeben sich für die unterschiedlichen Energien und Auftreffwinkel aus Monte-Carlo-Simulationen, welche zusätzlich

¹¹Eine genaue Definition des gewichteten Winkelabstandes δ kann der Gleichung 2.1 entnommen werden.

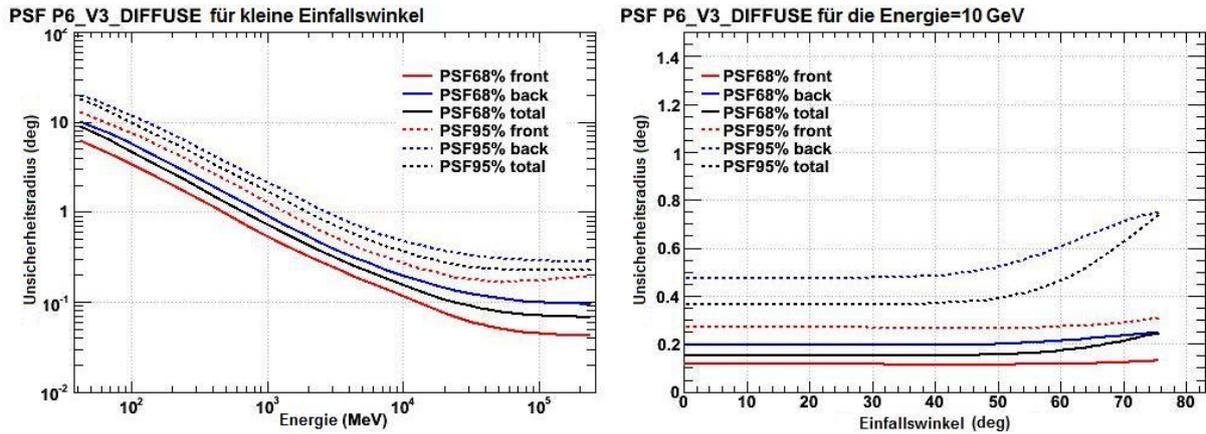


Abbildung 1.7: Radien der Unsicherheitsregionen gemäß der P6_V3-Simulation¹³ für diffuse Quellen für die 68%- sowie 95%-Regionen in Abhängigkeit von der Energie des Primärphotons (links) bzw. von dem Einfallswinkel für eine Photonenergie von 10 GeV (rechts)(Glast-Website 2009).

die Schicht der Paar-Konversion (*front* oder *back*) sowie drei verschiedene Ereignisklassen¹² berücksichtigen. In dieser Arbeit soll jedoch lediglich die Klasse 3 (*diffuse class*) betrachtet werden, da diese Ereignisse mit größter Wahrscheinlichkeit als Photonen eingeordnet werden können (Atwood *et al.* 2009).

Der Verlauf der PSF wird für unterschiedliche Photonenergien und in Abhängigkeit von der Konversionsschicht in Abbildung 1.7 dargestellt. Anhand dieser wird ebenfalls die stärkere Unsicherheit der Positionsrekonstruktion bei Konversionen in den unteren Schichten des Trackers (*back-conversion*) verdeutlicht. Dieses ist auf die stärkeren Wolframschichten in diesem Abschnitt zurückzuführen.

1.3.3 Der Fermi-Katalog *1FGL*

Im ersten *Fermi Gamma-Ray LAT*-Katalog (1FGL) sind die Ergebnisse der Suche nach Punktquellen in den ersten elf Monate Datennahme des Fermi-LAT (August 2008 bis Juli 2009) zusammengefasst. Insgesamt konnten 1451 Gammastrahlungsquellen im Energiebereich zwischen 100 MeV und 100 GeV detektiert werden.

Abbildung 1.8 veranschaulicht die Himmelskarte für eine 9-monatige Datennahme. Neben der

¹²Eine Darstellung der verschiedenen Ereignisklassen präsentiert Atwood *et al.* (2009).

¹³Die P6_V3-Simulation erfolgte nach den ersten Auswertungen aufgenommener LAT-Daten im Orbit und unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Hintergrund- und γ -Ereignissen (Fermi LAT Collaboration 2009)

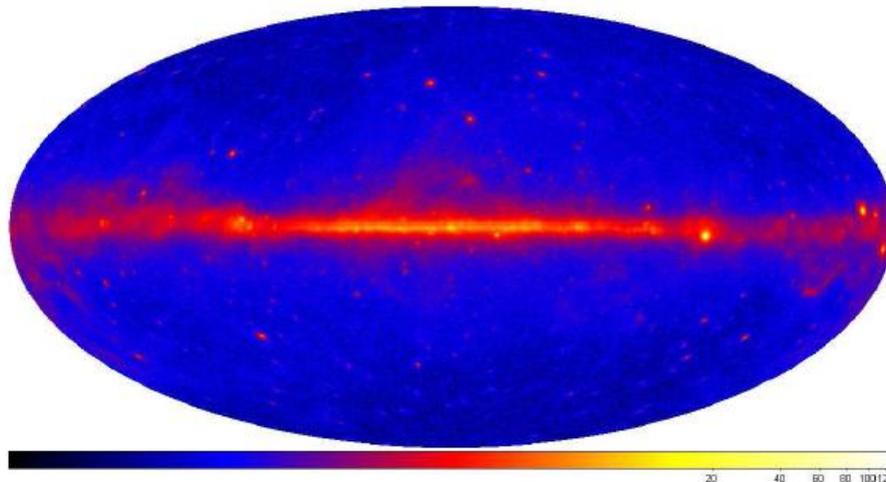


Abbildung 1.8: Himmelskarte der in den ersten elf Beobachtungsmonten aufgenommenen LAT-Daten für Energien $>300\text{MeV}$, Darstellung der Photonintensität in $[\text{Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}]$, (Abdo *et al.* 2010a)

sehr markanten diffusen Emission der galaktischen Scheibe werden zusätzlich kleinere Strukturen deutlich erkennbar, welche insbesondere mit extragalaktischen Quellen assoziiert werden können.

Abdo *et al.* (2010a) zeigt eine Zusammenfassung der Details zur Analyse und Zusammenstellung dieses Katalogs, sodass im Folgenden die für diese Arbeit relevanten Schritte kurz dargestellt werden sollen.

Die Detektion einer Gammaquelle im LAT äußert sich mittels Ereignissen, welche das Signal des simulierten diffusen Hintergrundes überschreiten. Hierbei wird eine Signifikanz von 4σ oberhalb des berechneten Hintergrundes verlangt. Auf die berechnete Ursprungsrichtung des detektierten Photons kann anschließend mithilfe der PSF eine elliptische 95%-Konfidenzregion angegeben werden.

Zusätzlich zu Energie und Richtung der Photonen veröffentlichte der erste Fermi-Katalog Angaben bezüglich spektraler Indizes, der Größe des energetischen Flusses sowie der Variabilität der beobachteten Objekte.

Die aufgenommenen Daten wurden mithilfe vorheriger Gammastrahlungskataloge sowie mit Datensammlungen anderer Wellenlängenbereiche abgeglichen, um den Fermi-Quellen mögliche Gegenstücke zuordnen zu können. Hierbei wurde zwischen einer Assoziation und einer Identifikation mit einer bereits bekannten Quelle unterschieden. Die Assoziation basierte dabei auf der Übereinstimmung der Position des möglichen Gegenstücks mit den Koordinaten der

Fermi-Quelle. Für eine Identifikation wurde zusätzlich eine Korrelation zeitlicher Charakteristika, wie beispielweise eine Variabilität, welche ebenfalls in anderen Energiebändern sichtbar ist, gefordert.

Insgesamt 630 beobachtete Quellen konnten mit keinem Eintrag in einem anderen Katalog assoziiert werden und blieben daher unbestimmt.

1.4 Kandidat für einen Dunkle Materie-Klumpen:

1FGL J0030.7+0724

Wie bereits in Abschnitt 1.2 diskutiert, zeigen Simulationen der Entstehung von Milchstraßen-ähnlichen Systemen, wie *Aquarius* oder *Via Lactea II*, die Bildung von zahlreichen Dunkle Materie-Substrukturen in der galaktischen Halo. Berechnungen von Kuhlen *et al.* (2008) und Januszek (2010) bestätigen zudem die Möglichkeit, Photonen aus Annihilationsprozessen in diesen „Klumpen“ mit dem Fermi-LAT nachweisen zu können. Das Ziel, eine solche Substruktur mithilfe der Fermi-Daten zu identifizieren, ist daher naheliegend. Die folgende Durchmusterung des Fermi-Kataloges 1FGL (Fermi-Website 2008) nach möglichen Dunkle Materie-Substrukturen basieren auf einem Beobachtungsantrag von Zechlin *et al.* (2010).

Eine reine Dunkle Materie-Substruktur äußert sich lediglich in der Emission von Gammastrahlung aus Selbstannihilationsprozessen. Unter der Annahme, dass Dunkle Materie vorrangig aus Neutralinos mit einer Masse von $m_\chi \approx 100\text{GeV}$ besteht, ergibt sich ein Gammastrahlungssignal im Energiebereich zwischen 10MeV bis 100GeV (vgl. Abschnitt 1.1.4). In anderen Wellenlängenbereichen erscheint eine solche Quelle als „dunkel“, sodass keine Identifikation oder Assoziation mit einem in anderen Energiebändern detektierten Objekt möglich ist. Die Suche im Fermi-Katalog konnte folglich auf unassoziierte Objekte eingeschränkt werden. Zusätzlich wurde eine Detektion mit einer Signifikanz von 4σ im Energiebereich zwischen 10GeV und 100GeV verlangt, welches Pulsare¹⁴ als mögliche Emittter der beobachteten Strahlung

¹⁴Die Objektklasse der Pulsare beschreibt isolierte, schnell rotierende Neutronensterne, welche sehr starke Magnetfelder von bis zu $3 \cdot 10^8\text{T}$ aufweisen. Entlang der Magnetfeldlinien können geladene Teilchen beschleunigt werden, sodass diese infolge der Lorentzbewegung um die Feldlinien Synchrotronstrahlung emittieren. Zusätzlich werden umliegende Photonen mittels des inversen Compton-Effekts beschleunigt (Kolanoski 2006). Der erste Fermi-Pulsar-Katalog zeigte jedoch einen starken Abfall des Pulsarspektrums bei Energien von $E \approx 1 - 5\text{GeV}$ (Abdo *et al.* 2010c).

Name	Ra (J2000)	Dec (J2000)	$\sigma_{Position}$ [arcmin]	Spektraler Index	Energiefluss [$10^{-11}\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
1FGL J0051.4-6242	00 51 29,6	-62 42 23	2,4	1,68±0,12	1,75±0,46
1FGL J0143.9-5845	01 43 56,6	-58 45 42	3,0	1,95±0,18	1,44±0,42
1FGL J0335.5-4501	03 35 31,2	-45 01 54	2,4	2,12±0,17	1,45±0,37
1FGL J0614.1-3328	06 14 10,9	-33 28 43	1,2	1,93±0,03	11,6±0,60
1FGL J2134.5-2130	21 34 33,5	-21 30 21	3,0	1,92±0,17	1,12±0,34
1FGL J0022.2-1850	00 22 16,5	-18 50 49	6,0	1,56±0,14	1,29±0,28
1FGL J2146.6-1345	21 46 41,3	-13 45 13	3,0	1,82±0,16	1,51±0,45
1FGL J0848.6+0504	08 48 41,1	+05 04 50	5,4	1,24±0,35	1,03±0,46
1FGL J0030.7+0724	00 30 42,6	+07 24 09	3,0	1,68±0,35	1,03±0,39
1FGL J1323.1+2942	13 23 06,1	+29 42 22	1,8	1,97±0,12	1,53±0,38
1FGL J1754.3+3212	17 54 19,7	+32 12 07	2,4	2,09±0,09	2,61±0,37
1FGL J2329.2+3755	23 29 12,1	+37 55 53	1,2	1,61±0,17	1,73±0,47

Tabelle 1.1: Geordnet nach der Deklination: unidentifizierte, stabile Gammaquellen großer galaktischer Breiten mit Detektion im Energiebereich von 10-100GeV aus dem 1FGL-Katalog; von links nach rechts werden der Name der Quelle, dessen Position in equatorialen Koordinaten (J2000) sowie die Unsicherheit auf die Position (68%-Konfidenz), der spektrale Index des angenäherten Potenzspektrums und der integrierte Fluss für den Bereich von 100MeV-100GeV angegeben (Zechlin *et al.* 2010).

ausschloss. Aufgrund des stabilen Selbstannihilationsprozesses erscheinen Dunkle Materie-Ansammlungen als konstante, nichtvariable Emittter. Quellen mit einer Wahrscheinlichkeit für eine Variabilität oberhalb von 99% wurden somit ebenfalls bei der Durchmusterung des Kataloges angelehnt.

Als weiteres Kriterium wurde die Position des Objektes auf galaktische Breiten $|b|>20^\circ$ eingeschränkt, um Verwechslungen der unassoziierten Quellen mit Objekten der galaktischen Ebene vermeiden zu können.

Eine Suche im 1FGL mit den obigen Kriterien ergibt insgesamt zwölf unidentifizierte Fermi-Quellen (vgl. Tabelle 1.1).

Für die Identifikation bzw. Assoziation der im LAT detektierten Quellen, wurden bei der Zusammenstellung des ersten Fermi-Katalogs nur einige wenige ausgewählte Objekt-Datenbanken verwendet. Daher erweiterten Zechlin *et al.* (2010) die Suche nach Gegenstücken für obige zwölf Quellen auf die NED-Datenbank (NED-Website 2010).

Die Betrachtung von Radioobjekten als mögliche Emittter dieser nicht-thermischen Photonen erwies sich insgesamt als sehr relevant, da u.a. Aktive Galaktische Kerne (AGN: *Active Galactic Nuclei*) Strahlung in diesem Energiebereich zeigen (vgl. Abschnitt 1.5).

Lediglich eine der zwölf Quellen (1FGL J0030.7+0724) verblieb nach der Recherche ohne Assoziation innerhalb der 68%-Unsicherheitsregion. Für zwei weitere Quellen (1FGL J0335.5-

Name	mögliche Gegenstücke 68%-Konfidenz	mögliche Gegenstücke 95%-Konfidenz
1FGL J0335.5-4501	G(18 ^{mag}), G(19 ^{mag})	XrayS (ROSAT, Distanz 3,8')
1FGL J0030.7+0724	—	RadioS (NVSS, Distanz 3,9', Fluss von 3,8mJy bei 1,4GHz)
1FGL J2329.2+3755	G(14 ^{mag})	RadioS (NVSS, Distanz 1,68', Fluss 20,4mJy) XrayS (ROSAT, Distanz 1,68')

Tabelle 1.2: Auflistung unassoziierter Fermi-Quellen in der Multiwellenlängenbetrachtung, wobei Quellen mit einer wahrscheinlichen Assoziation innerhalb ihrer 68%-Unsicherheitsregion vernachlässigt werden; die Suche nach Gegenstücken wird zusätzlich auf die 95%-Konfidenzregionen ausgeweitet; die dritte Spalte gibt die Distanz zur Fermi-Position sowie den Fluss des Objektes an (Zechlin *et al.* 2010).

4501, 1FGL J2329.2+3755) konnten lediglich Galaxien und für 1FGL J0614.1-3328 lediglich ein EGRET¹⁵-Objekt in diesen Bereichen nachgewiesen werden. Letzteres Objekt zeigt jedoch ein sehr gekrümmtes differentiellles Spektrum im Gammabereich, welches nicht mit dem spektralen Index eines Dunkle Materie-Annihilationsprozesses ($\Gamma \approx 1,5$) in Einklang gebracht werden kann (vgl. Abschnitt 1.1.4). 1FGL J0614.1-3328 wurde daher von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen, ebenso wie die verbleibenden acht Quellen der Tabelle 1.1, da eine Übereinstimmung mit den im 68%-Konfidenzbereich beobachteten Objekten als naheliegend erscheint.

Innerhalb ihrer 95%-Unsicherheitsregionen zeigen jedoch ebenfalls die drei noch unbestimmten Objekte mögliche Gegenstücke.

Für die Quellen 1FGL J0335.5-4501 und 1FGL J2329.2+3755 listet NED innerhalb dieser Regionen jeweils eine Röntgenquelle (XrayS) sowie für 1FGL J2329.2+3755 eine zusätzliche Radioquelle (RadioS) auf (vgl. Tabelle 1.2). Aufgrund der Eigenschaften von Röntgenquellen als sehr effiziente Emittler von Gammastrahlung, wurde in diesen Fällen eine Übereinstimmung als sehr wahrscheinlich angenommen und die beiden Quellen für die weiteren Überlegungen verworfen.

Der Fermi-Position 1FGL J0030.7+0724 hingegen konnte lediglich eine Radioquelle (NVSS J003030+072132) in einer Entfernung von 3,9' mit einem Fluss von 3,8mJy¹⁶ bei 1,4GHz als mögliches Beschleunigungssystem für die detektierten Photonen zugeordnet werden. Insgesamt detektierte das Fermi-LAT im Radiobereich bisher 709 AGN, von denen es sich bei 300 Objekten um Blazare handelt. Diese Quellen zeigen einen durchschnittlichen Fluss im Radiobereich von etwa 100mJy bei 1,4GHz, wobei nur 10 AGN (Blazare) einen Fluss $< 10mJy$ bei sel-

¹⁵Für weitere Informationen bezüglich der EGRET-Mission kann auf die HEASARC-Homepage unter <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/> verwiesen werden.

¹⁶Die Einheit Jy (Jansky) beschreibt den Fluss eines Objektes mit der Umrechnung: $1Jy=10^{-26} \frac{W}{m^2Hz}$.

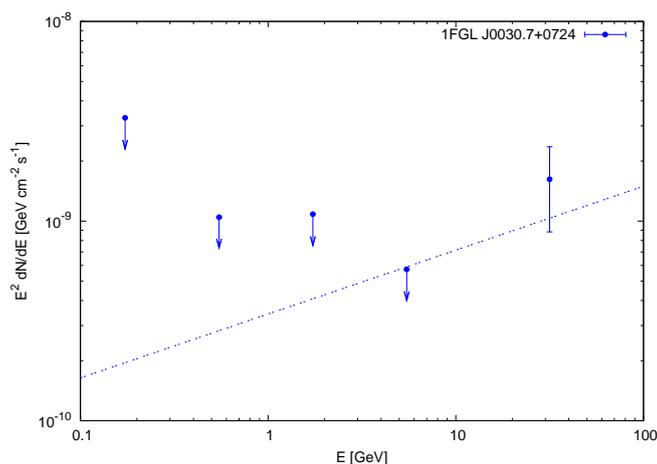


Abbildung 1.9: Darstellung des differentiellen Energieflusses der Quelle 1FGL J0030.7+0724 mit einem angepassten spektralen Index von $\Gamma=1,68$ (Zechlin *et al.* 2010).

biger Frequenz aufweisen (Abdo *et al.* 2010b). Aufgrund der sehr großen Distanz und dem geringen Fluss wurde die Assoziation mit dieser Radioquelle folglich zu einer großen Wahrscheinlichkeit als zufällig eingestuft. Das differentielle Spektrum der Fermi-Quelle zeigt mit $\Gamma=1,68$ eine sehr gute Übereinstimmung mit dem erwarteten Spektrum eines Dunkle Materie-Annihilationsprozesses. Abbildung 1.9 beschreibt diesen spektralen Verlauf, dessen Angaben dem ersten Fermi Katalog 1FGL entnommen wurden. Die ersten vier Flusspunkte bei geringeren Energien beschreiben dabei lediglich obere Flussgrenzen, da keine direkte Detektion beobachtet werden konnte. Der wahre Fluss zeigt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% (2σ) einen Wert, welcher kleiner als der eingezeichnete Betrag ausfällt.

Aus der Suche nach Dunkle Materie-Klumpenkandidaten im ersten Fermi-Katalog verblieb folglich lediglich das Objekt 1FGL J0030.7+0724 als vielversprechender Kandidat.

In dieser Bachelorarbeit soll anhand obiger Überlegungen eine ausführlichere Analyse der Fermi-Quelle 1FGL J0030.7+0724 durchgeführt und die Suche nach möglichen Gegenständen erweitert werden. Dieses soll die Hinweise auf die Dunkle-Materie-Natur dieser Quelle bestätigen bzw. verwerfen.

1.5 Blazare als mögliche astrophysikalische Gegenstücke

In dem letzten Abschnitt dieses Kapitels sollen AGN als mögliche Objekttypen erwähnt werden, welche ebenfalls für die Emission von nicht-thermischer Strahlung in Betracht gezogen werden können.

Aktive Galaktische Kerne stellen den zentralen Bereich von Galaxien dar, deren Leuchtkräfte Werte von bis zu 10^{37}W erreichen können und welche somit ihre gesamte Heimatgalaxie überstrahlen. Zahlreiche Charakteristika dieser AGN verweisen auf ein massives Schwarzes Loch mit Massen zwischen 10^5 und 10^{10} Sonnenmassen im Zentrum dieser Objekte, sodass die hohe Luminosität anhand der Strahlung von akkretierter Materie erklärt werden kann (Kolanoski 2006). Senkrecht zur Akkretionsscheibe bilden sich in entgegengesetzten Richtungen zwei sehr stark gebündelte Jets aus, in welchen Teilchen beschleunigt werden.

Die Untergruppe der Blazare beschreibt diejenigen AGN, für welche der Winkel zwischen der Achse des emittierten Jets und der Sichtlinie klein ausfällt. Die spektrale Verteilung dieser Systeme wird oftmals in sog. SED-Grafiken (SED: *Spectral Energy Density*) dargestellt, in welchen die Frequenz ν auf der Abszissen und das Produkt νf_ν aus Frequenz und dem entsprechenden spektralen Fluss f_ν , bzw. das Produkt νL_ν aus der Frequenz und der spektralen Leuchtkraft L_ν auf der Ordinate in doppelt logarithmischem Maßstab aufgetragen wird. Donato *et al.* (2001) beschreiben den Verlauf von Blazar-Spektren in einer SED-Grafik als einen stetigen Graphen mit zwei breiten Maxima im Röntgen- sowie im Gammabereich (vgl. Abbildung 1.10). Die Röntgenstrahlung mit Energien von einigen keV wird auf Synchrotronstrahlung von beschleunigten Elektronen sowie Positronen in den Jets der Systeme zurückgeführt. Das zweite Maxima hingegen basiert auf inverser Compton-Streuung. Für geringe Luminositäten gleichen sich die Intensitäten der beiden Maxima an. Bei einem Anstieg der bolometrischen Helligkeit des Systems kann jedoch eine Verschiebung der beiden Maxima zu geringeren Frequenzen beobachtet sowie eine Dominanz des Compton-Maximums gezeigt werden (Donato *et al.* 2001). Gemäß des ersten Fermi-AGN-Katalogs weisen Blazare größtenteils einen spektralen Index von $\Gamma < 2,0$ im Gammabereich auf, welches eine gute Übereinstimmung mit der zu untersuchenden Quelle darstellt (Abdo *et al.* 2010b).

Blazare zeigen somit einen markanten Anteil ihres Spektrums innerhalb des vom Fermi-LAT detektierbaren Energiebereichs und werden folglich für die Untersuchung der möglichen Dunkle Materie-Substruktur hinzugezogen.

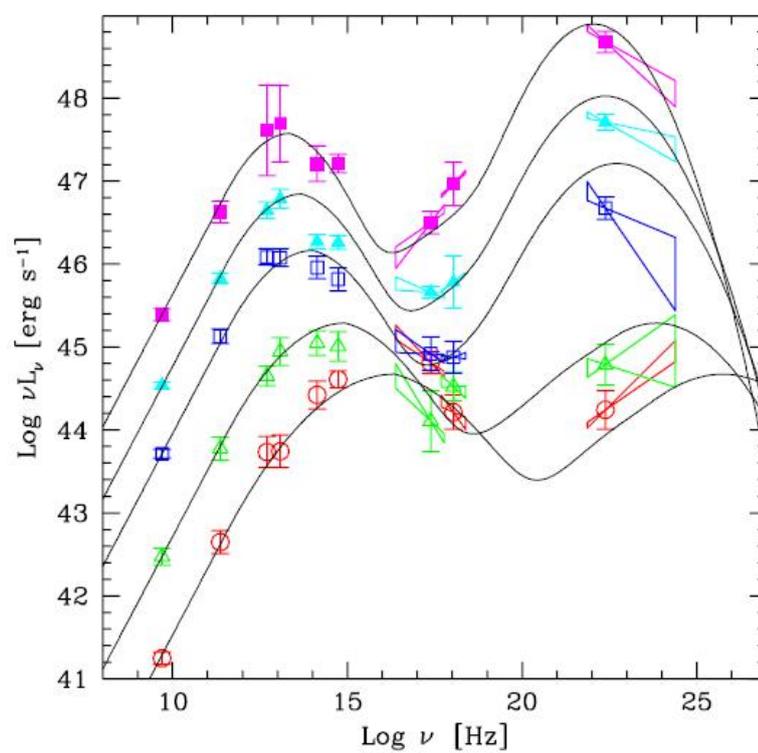


Abbildung 1.10: Spektrale Energieverteilung von Blazaren für verschiedene Luminositäten; die Verschiebung der Graphen zu geringeren Frequenzen ebenso wie die Dominanz der Compton-Maxima bei einer Erhöhung der Luminosität treten deutlich hervor (Donato *et al.* 2001).

Kapitel 2

Charakterisierung der möglichen Dunkle Materie-Substruktur

Nachdem die Durchmusterung des ersten Fermi-Kataloges 1FGL von Zechlin *et al.* (2010) die Quelle 1FGL J0030.7+0724 als möglichen Dunkle Materie-Kandidaten zeigte, soll im Zuge dieser Bachelorarbeit eine Charakterisierung dieses Objektes vorgenommen werden. Aufgrund der verlängerten Datennahme von bereits 21 Monaten, im Vergleich zu den im Fermi-Katalog dokumentierten ersten elf Missionsmonaten, ist eine leichte Verbesserung der berechneten Position sowie der Unsicherheitsellipse zu erwarten.

Im Folgenden wird daher eine Rechnung bezüglich der Positionsunsicherheiten der einzelnen Photonen dieser Quelle durchgeführt und anschließend ein Schwerpunkt angegeben. Zusätzlich soll ein kurzer Einblick in die mögliche Ausdehnung dieses Objektes dargestellt werden.

2.1 Präsentation des Datensatzes

Von Beginn der Datennahme am 8. August 2008 bis zum 8. Mai 2010 detektierte das Fermi-LAT sechs Photonen im Energiebereich zwischen 10GeV und 100GeV, welche der Quelle 1FGL J0030.7+0724 zugeordnet werden können (Tabelle 2.1). Diese Auswahl an beobachteten Photonen wird der Datenanalyse von Fernandes (2010) entnommen, welche auf die veröffentlichten Daten des LAT-Data-Servers¹ zurückgreift. Die Auflistung wird auf einen Energiebereich zwischen 10-100GeV beschränkt und bezieht sich lediglich auf Ereignisse der Klasse 3 (*diffuse Quellen*), da diese Signale aufgrund ihrer Struktur mit sehr großer Wahrscheinlichkeit als Pho-

¹Zugang zu den Fermi-Daten kann über die Fermi-Website (2008) unter <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/> erzielt werden.

Photon	Energie [GeV]	Ra [deg]	Dec [deg]	Impaktwinkel Θ [deg]	Konversion
1	83,8	7,633	7,398	56,3	back
2	11,8	7,729	7,377	36,4	front
3	39,8	7,784	7,496	47,4	back
4	10,2	7,643	7,448	34,2	front
5	15,0	7,636	7,187	38,2	back
6	43,86	7,839	7,415	20,8	front

Tabelle 2.1: Auflistung der Charakteristika der einzelnen detektierten Photonen von der Quelle 1FGL J0030.7+0724 (Fernandes 2010).

tonen angenommen werden können (Atwood *et al.* 2009). Die im ersten Fermi-Katalog 1FGL veröffentlichte Position der Photonenquelle sowie die 95%-Unsicherheitsellipse basieren jedoch lediglich auf den ersten elf Missionsmonaten, sodass das sechste Photon (43,8GeV) nicht einbezogen wurde (die Detektion erfolgte nach Veröffentlichung des Kataloges). Eine erneute Berechnung des Schwerpunktes der Quelle sowie der Unsicherheit auf die Position ist daher erforderlich.

Mittels der Software *DS9*² lassen sich die von Fermi gewonnen Daten grafisch darstellen (Abbildung 2.1). Als Hintergrund wurde eine optische Aufnahme des SAO-DSS-Kataloges³ (*Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalog*) gewählt, welcher Quellen mit scheinbaren Helligkeiten von bis zu 11^{mag} im visuellen Farbband *V* wiedergibt. Die Helligkeit der einzelnen Regionen stützt sich dabei auf die Anzahl der detektierten Photonen aus diesen Bereichen. Die aufgetragene Ausrichtung der Grafik wird für alle weiteren Himmelsabbildungen dieser Arbeit übernommen und wird daher im weiteren Verlauf nicht mehr explizit angegeben.

Diese Abbildung verdeutlicht, dass lediglich drei der detektierten Photonen einer Position innerhalb der 95%-Unsicherheitsellipse zugeordnet werden können, sodass insgesamt eine breite Verteilung der Photonen um die Quellenposition beobachtet wird. Vergleichend wird die Radioquelle NVSS 003030+072132 der Grafik beigelegt, da sie aufgrund ihrer Position innerhalb der 95%-Fehlerregion ein mögliches Gegenstück darstellt. Es soll erwähnt sein, dass die Abbildung die weiteren NVSS-Objekte dieses Himmelsausschnittes zur besseren Übersicht vernachlässigt.

²Die Software *DS9* ist unter der Adresse <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/> zum Download frei zugänglich.

³Zugang zu den Daten des SAO-Kataloges kann über die HEASARC-Website unter <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/star-catalog/sao.html> erzielt werden.

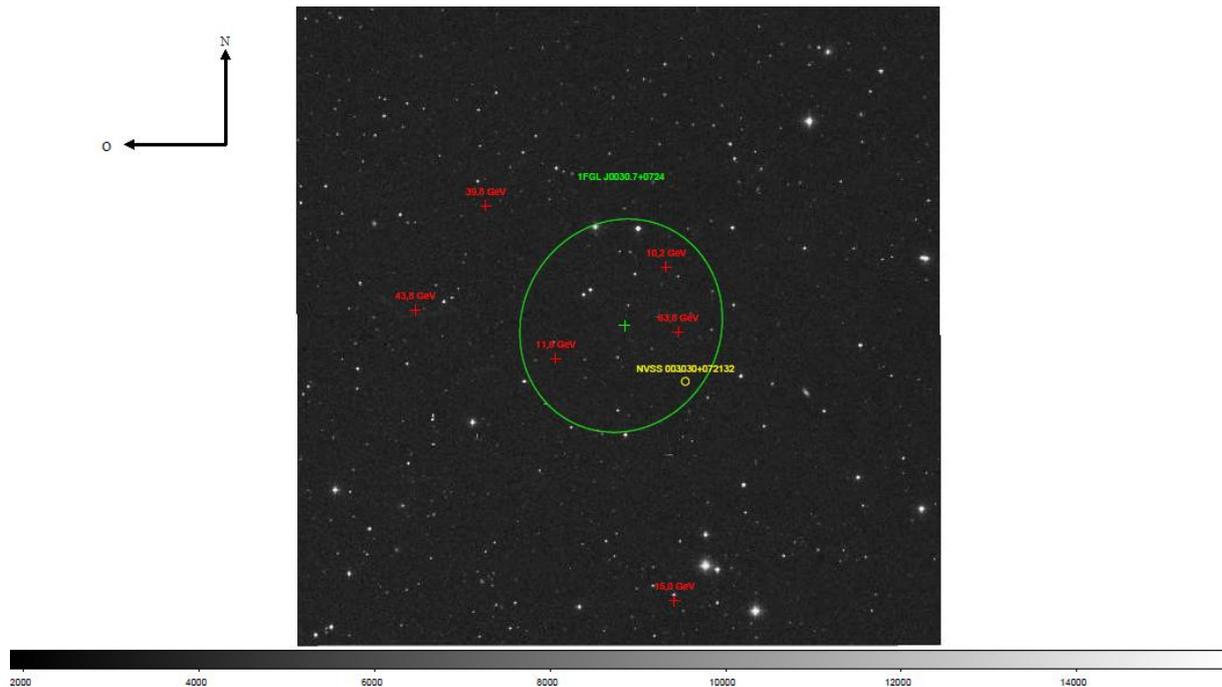


Abbildung 2.1: Grafische Darstellung der Daten zur Fermi-Quelle 1FGL J0030.7+0724; der Hintergrund entspricht einer 30x30 Bogenminuten Auflösung aus dem SAO-DSS-Katalog; die detektierten Photonen erscheinen mit ihrer Energie in rot, die 95%-Unsicherheitsellipse in grün und die Radioquelle NVSS J003030+072132 in gelb.

2.2 Positionsbestimmung

2.2.1 Unsicherheiten der einzelnen Photonpositionen

Um den Überlegungen des vorherigen Abschnitts zur Verschiebung der Quellenposition nachzukommen, wird der Fehler auf die Position der einzelnen Photonen errechnet. Die Unsicherheit auf die von Fermi bestimmte Photonposition basiert auf dem radialen Winkelabstand r zwischen dieser und der wahren Position für die Herkunft des detektierten Photons. Dabei wird der Abstand r gesucht, sodass die Wahrscheinlichkeit, den wahren Ursprungsort innerhalb der mit diesem Radius entstehenden Kreisfläche aufzufinden, 68% (1σ -Umgebung) bzw. 95% ($1,96\sigma$ -Umgebung) beträgt. Die Berechnung dieses Abstandes erfolgt mithilfe der PSF, welche die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Rekonstruktion der Photonrichtung wiedergibt.

Die nachfolgenden Definitionen und Angaben bezüglich der PSF beziehen sich auf die Fermi-Website (2008)⁴ der NASA.

⁴Die Angaben zur PSF sind insbesondere unter dem Link http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone_LAT_IRFs/IRF_PSF.html aufzufinden.

Konversion	c_0	c_1
front	$58 \cdot 10^{-3}$	$377 \cdot 10^{-6}$
back	$96 \cdot 10^{-3}$	$1300 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 2.2: Übersicht der Faktoren zur Berechnung des Skalenfaktors in Abhängigkeit von dem Ort der Konversion des eintreffenden Photons (Fermi-Website 2008).

Für den bereits in Abschnitt 1.3.2 aufgeführten gewichteten Winkelabstand δ zwischen der wahren und der angegebenen Position kann mithilfe dieser Dokumentation eine präzise Definition angegeben werden:

$$\delta = \frac{\sqrt{(\vec{d} \cdot \vec{\Phi})^2 + (\vec{d} \cdot \vec{\Theta})^2}}{s(E[\text{MeV}])} = \frac{r}{s(E[\text{MeV}])} \quad (2.1)$$

$$s(E[\text{MeV}]) = \sqrt{\left[c_0 \cdot \left(\frac{E}{100} \right)^{-0,8} \right]^2 + c_1^2}. \quad (2.2)$$

Der Vektor \vec{d} bezeichnet dabei die Richtung zwischen der gemessenen und der wahren Photonposition, die Vektoren $\vec{\Phi}$ sowie $\vec{\Theta}$ beziehen sich auf die Einheitsvektoren der Rektaszension bzw. der Deklination am Ort der wahren Position. Der Zähler der Gleichung 2.1 beinhaltet somit die Projektionen des Abstandsvektors \vec{d} auf die beiden Himmelsrichtungen. Dieser Definition zufolge verläuft der projizierte, radiale Abstand r zwischen den betrachteten Punkten auf der tangentialen Ebene zur gekrümmten Himmelsfläche. Eine erneute Transformation dieses Winkelabstandes auf die Himmelskugel r' würde eine Umrechnung gemäß $r' = \arcsin r$ verlangen. Aufgrund der zu erwartenden geringen Winkelausdehnung der Unsicherheitsregionen ($r < 1\text{deg}$) war eine Näherung $\sin(r') \approx r'$ und somit die Annahme von $r' = r$ trotz der Krümmung der Himmelskugel gerechtfertigt.

Für den zusätzlichen Skalenfaktor s besteht eine vorrangige Abhängigkeit von der Energie E des einfallenden Photons, wobei zusätzlich die Region der Konversion im LAT (*front* oder *back*) durch die Faktoren c_0 sowie c_1 Einfluss findet (Tabelle 2.2).

Die bereits angegebene Gleichung 1.12 der PSF in der Einleitung beschreibt lediglich die grundlegende Struktur dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung:

$$F(r, \sigma, \gamma) = \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2} \right)^{-\gamma}. \quad (2.3)$$

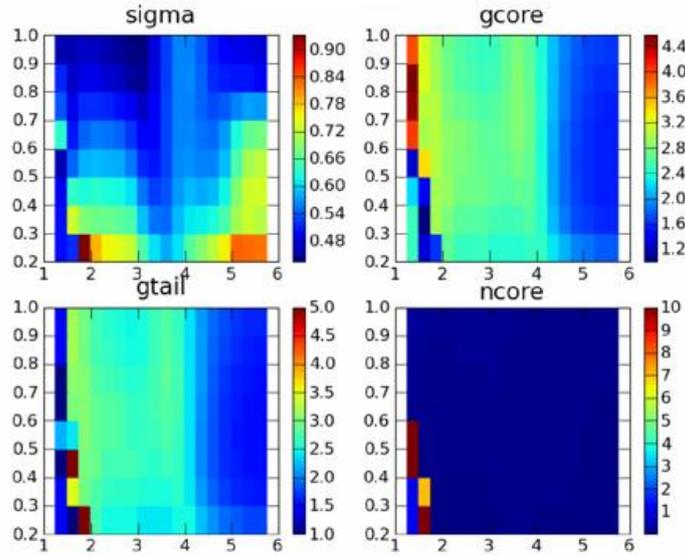


Abbildung 2.2: Darstellung der simulierten Parameter der PSF für die diffuse Ereignisklasse, basierend auf der P6_V3-Simulation für *front*-Konversionen; auf der Abzisse sind die einzelnen Energieintervalle und auf der Ordinate der Cosinus der Impaktwinkel $\cos(\theta)$ aufgetragen; der Pixelwert ist äquivalent zur Größe des entsprechenden Parameters (Fermi-Website 2008).

Der Verlauf der PSF zeigt jedoch für große Winkelabstände r weite Ausläufe, welche in der obigen Gleichung noch nicht berücksichtigt sind. Für die exakte Angabe der Funktion ergibt sich folgender Ausdruck:

$$PSF(r, \sigma, \gamma_{tail}, \gamma_{core}) = N_{core} \cdot F(r, \sigma, \gamma_{core}) + N_{tail} \cdot F(r, \sigma, \gamma_{tail}). \quad (2.4)$$

$$N_{tail} = N_{core} \cdot \frac{F(2\sqrt{5}\sigma, \sigma, \gamma_{core})}{F(2\sqrt{5}\sigma, \sigma, \gamma_{tail})} \quad (2.5)$$

Eine Verknüpfung der Gleichungen 2.3, 2.4 sowie 2.5 ergibt schließlich die vollständige Formel für die Wahrscheinlichkeitsverteilung:

$$PSF(r, \sigma, \gamma_{core}, \gamma_{tail}) = N_{core} \left(1 - \frac{1}{\gamma_{core}}\right) \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{2\gamma_{core}} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{-\gamma_{core}} + \frac{\left(1 + \frac{10}{\gamma_{core} \cdot s^2}\right)^{-\gamma_{core}}}{\left(1 + \frac{10}{\gamma_{tail} \cdot s^2}\right)^{-\gamma_{tail}}} \cdot \left(1 + \frac{1}{2\gamma_{tail}} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{-\gamma_{tail}} \right] \quad (2.6)$$

Photon	Energie [GeV]	N_{core}	σ	γ_{core}	γ_{tail}	Skalenfaktor s
1	83,8	0,409542	0,307333	1,626833	1,626833	0,001373
2	11,8	0,122377	0,561834	2,393815	2,393815	0,001327
3	39,8	0,204798	0,433884	1,962477	1,962477	0,001525
4	10,2	0,122377	0,561834	2,393815	2,393815	0,001480
5	15,0	0,161299	0,489661	2,246779	2,246779	0,002175
6	43,8	0,131848	0,540430	2,122988	2,122988	0,000585

Tabelle 2.3: Zusammenfassung der PSF-Parameter der einzelnen Photonen; die Parameter N_{core} , σ , γ_{core} sowie γ_{tail} werden den Kalibrierungs-Files der HEASARC-Website (2009) entnommen, der Skalenfaktor s basiert auf Gleichung 2.2.

Die Parameter N_{core} , σ , γ_{core} und γ_{tail} werden in Abhängigkeit von der Energie E des Photons sowie des Eintreffwinkels θ in Monte-Carlo-Simulationen für die verschiedenen Ereignisklassen ermittelt (vgl. Abbildung 2.2). Hierbei wird eine Einteilung der Energien in vier Intervalle pro Dekade, basierend auf einer logarithmischen Skala und beginnend ab $\log(E/[MeV]) = 1,25$ bis einschließlich $5,75$, vorgenommen. Auch der Auftreffwinkel θ wird über die Angabe als $\cos(\theta)$ in insgesamt acht Wertegruppen unterteilt, welche in gleich großen Abschnitten von $0,2$ bis $1,0$ reichen.

Da bereits während der Auswahl des Datensatzes für die Quelle 1FGL J0030.7+0724 lediglich Ereignisse mit der Signatur der diffusen Klasse zugelassen wurden, müssen auch im folgenden Verlauf dieser Arbeit die simulierten Parameter dieser Ereignisklasse hinzugezogen werden.

Die Simulationen der PSF-Parameter sind als *fits*-Files in der Kalibrierungs-Datensammlung der HEASARC-Website (2009) zugänglich, sodass die einzelnen Parameter für die sechs Photonen in Abhängigkeit von Energie und Winkel ausgelesen werden können (vgl. Tabelle 2.3). Die Berechnung des Skalenfaktors s erfolgt mithilfe der Gleichung 2.2.

Bei der Betrachtung der Simulationen ergeben sich für die Parameter γ_{core} sowie γ_{tail} jeweils identische Werte ($\gamma_{core} = \gamma_{tail} = \gamma$). Dieser Zusammenhang wird im Folgenden somit angenommen und führt zu einer Vereinfachung der Gleichung 2.6.

$$PSF(r, \sigma, \gamma) = 2N_{core} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{-\gamma} \quad (2.7)$$

Zur Berechnung der Unsicherheitsradien $\sigma_{r_{68}}$ und $\sigma_{r_{95}}$ der 68%- bzw. 95%-Fehlerregionen wird die derart vereinfachte PSF für die einzelnen Photonen mit den entsprechenden Parametern in Polarkoordinaten integriert. Die Integration des Polarwinkels φ erfolgt dabei über ein Intervall von $[0, 2\pi]$, für den Winkelabstand hingegen wird ein Bereich zwischen $[0, \sigma_{r_{68}}]$ bzw.

$[0, \sigma_{r_{95}}]$ gewählt. Zusätzlich muss die Funktionaldeterminante der Zylinderkoordinaten eingebunden werden, welche sich aufgrund des flachen Untergrundes lediglich als $\det F = r$ darstellen lässt. Eine weitere Integration der PSF mit Grenzen für den Winkelabstand von $[0, \infty]$ erfolgt zur Normierung des ersten Integrals, sodass die Division dieser beiden Ausdrücke eine Wahrscheinlichkeit von 68% bzw. 95% ergibt.

$$\frac{\int_0^{\sigma_{r_{68}}} \int_0^{2\pi} 2N_{core} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{-\gamma} d\varphi dr}{\text{Normierung}} = 0,68 \quad (2.8)$$

$$\text{Normierung} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} 2N_{core} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{-\gamma} d\varphi dr \quad (2.9)$$

Für eine Unsicherheit von 95% kann auf eine analoge Formulierung zurückgegriffen werden. Die analytische Lösung der Integration über diese Wahrscheinlichkeitsverteilung ist in den folgenden Schritten dokumentiert:

$$\begin{aligned} I &= \int_0^R \int_0^{2\pi} 2N_{core} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{-\gamma} d\varphi dr \\ &= 2\pi \cdot 2N_{core} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \int_0^R \left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{-\gamma} r dr \end{aligned}$$

$$\text{Substitution: } z = 1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{r^2}{\sigma^2 s^2} \quad \Leftrightarrow \quad dz = \frac{r}{\gamma \sigma^2 s^2} dr$$

$$\begin{aligned} I &= 4\pi \cdot N_{core} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \gamma \sigma^2 s^2 \cdot \int_1^{1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{R^2}{\sigma^2 s^2}} z^{-\gamma} dz \\ &= -4\pi \cdot N_{core} \cdot \sigma^2 s^2 \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{R^2}{\sigma^2 s^2}\right)^{1-\gamma} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Bei einer zusätzlichen Annahme von $\gamma > 1$, welches aus den Parametern der Kalibrierung hervorgeht (vgl. Tabelle 2.3), vereinfacht sich der Ausdruck 2.10 für das Normierungsintegral im Limes $R \rightarrow \infty$ zu:

$$\text{Normierung} = 4\pi \cdot N_{core} \sigma^2 s^2. \quad (2.11)$$

Aus den Gleichungen 2.8, 2.10 sowie 2.11 lässt sich somit folgende Beziehung herleiten, welche für die einzelnen Photonen sowie für die 68%- und 95%-Unsicherheitsregionen nach den entsprechenden σ_{r_i} aufgelöst werden muss:

$$- \left[\left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{\sigma_{r_{68}}^2}{\sigma^2 s^2} \right)^{1-\gamma} - 1 \right] = 0,68 \quad (2.12)$$

$$\Leftrightarrow \left(1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{\sigma_{r_{68}}^2}{\sigma^2 s^2} \right)^{1-\gamma} = 0,32$$

$$\Leftrightarrow 1 + \frac{1}{2\gamma} \cdot \frac{\sigma_{r_{68}}^2}{\sigma^2 s^2} = (0,32)^{1/(1-\gamma)}$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{r_{68}} = s \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\gamma \cdot \left({}^{1-\gamma}\sqrt{0,32} - 1 \right)}. \quad (2.13)$$

Die aus Gleichung 2.13 erhaltenen Größen können aufgrund der Beziehungen für kleine Winkel ($\sin(r') \approx r'$) direkt als Winkelabstände auf der Himmelskugel interpretiert werden.

Es ergeben sich Standardabweichungen in der Größenordnung von $\sigma_{r_{68}} \approx 0,1 \text{deg}$ sowie Winkelabstände von $\sigma_{r_{95}} \approx (0,1 - 0,5) \text{deg}$ für die 95%-Unsicherheitsregionen. Die kleinsten Unsicherheiten bezüglich der Position zeigt das sechste Photon (43,8GeV), da dieses neben einem sehr geringen Impaktwinkel von $\theta = 20,8 \text{deg}$ (*on-axis*-Szenario) ebenfalls eine Konversion im vorderen Teil des Trackers aufweist.

Tabelle 2.4 zeigt eine Übersicht der einzelnen, in dieser Arbeit berechneten, Unsicherheitsradien der sechs Photonen. Diese einzelnen Fehler befinden sich in sehr guter Übereinstimmung mit den simulierten Daten der Abbildung 1.7. Das Interesse an der vergleichenden Betrachtung der Gaußverteilung begründet sich in den noch folgenden Rechnungen. Diese verwenden die in diesem Abschnitt bestimmten Ergebnisse und basieren auf den Grundlagen der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung.

Die Gauß'sche Standardabweichung kann mittels Wolfram *Mathematica* derart an die PSF der einzelnen Photonen angepasst werden, dass die maximalen Amplituden der beiden Verteilungen übereinstimmen und sich der Unterschied in deren Breiten minimiert. Lediglich für das sechste Photon (43,8GeV) kann eine Abweichung der Standardabweichungen der beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen von einander beobachtet werden. Insgesamt zeigen die Gauß'schen Fehler für alle Photonen minimal kleinere Werte als die Standardabweichung der PSF, welches die Annahme einer Gaußverteilung für die weiteren Rechnungen rechtfertigt. Für die folgenden Rechnungen werden jedoch, aufgrund des direkten Zusammenhangs zum Experiment, stets

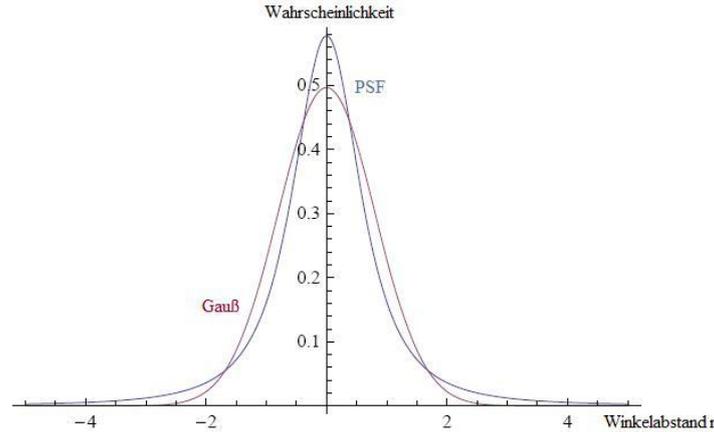


Abbildung 2.3: Eindimensionale PSF im Vergleich zur Gaußverteilung mit der gleichen Standardabweichung; die Ordinate gibt den Winkelabstand zwischen berechneter sowie wahrer Position und die Abzisse die entsprechende Wahrscheinlichkeit wieder.

Photon	Energie [GeV]	$\sigma_{r_{68}}$ [deg]	$\sigma_{r_{95}}$ [deg]	$\sigma_{\text{Gauß}}$ [deg]	Distanz [deg]
1	83,8	0,099	0,474	0,062	0,133
2	11,8	0,105	0,257	0,069	0,048
3	39,8	0,113	0,348	0,073	0,090
4	10,2	0,117	0,287	0,078	0,129
5	15,0	0,158	0,410	0,103	0,256
6	43,8	0,049	0,137	0,012	0,025

Tabelle 2.4: Berechnete 68%- sowie 95%-Unsicherheitsregionen der einzelnen Photonen und Standardabweichung der angenäherten Gaußverteilung; die Berechnung der Unsicherheitsregionen erfolgt mit Gleichung 2.13; zusätzlich zeigt die letzte Spalte die Distanzen der einzelnen Photonen von der berechneten Schwerpunktsposition gemäß Gleichung 2.23.

die berechneten Unsicherheiten der PSF verwendet. Dies entspricht gemäß der leicht höheren Unsicherheiten der PSF ebenfalls einem konservativeren Ansatz. Die Vergleichbarkeit dieser beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird als Projektion auf lediglich eine Dimension und für gleiche Standardabweichungen in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt.

Die Abbildung 2.4 veranschaulicht die berechneten Fehlerregionen der einzelnen Photonen und zeigt deren Position bezüglich der ursprünglichen Fermi-Ellipse. Zur Übersicht werden jedoch lediglich die 68%-Unsicherheitsregionen wiedergegeben, sodass insbesondere der sehr kleine Fehler des sechsten Photons verdeutlicht werden kann. Ebenfalls wird präsentiert, dass die Fehlerregion des Photons mit einer Energie von 15,0GeV, trotz dessen weiter Entfernung von der berechneten Quellenposition, mit der Fermi-Ellipse überlappt und somit diesem Objekt zugeordnet werden kann.

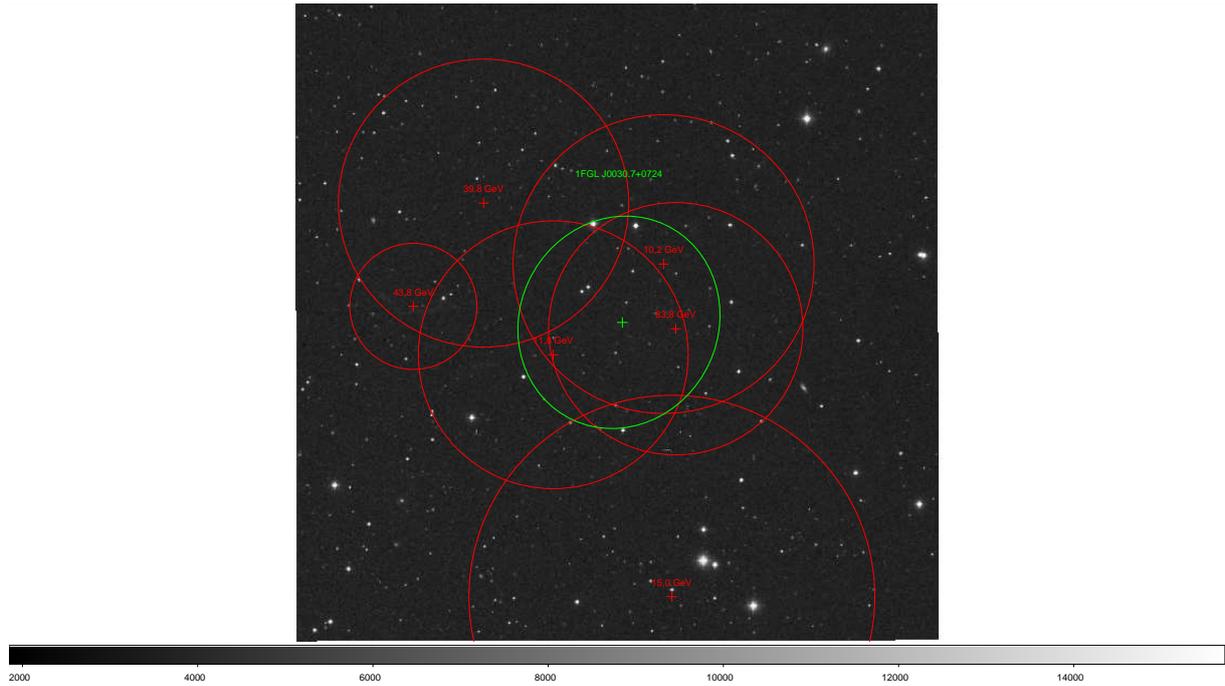


Abbildung 2.4: Berechnete 68%-Unsicherheitsregionen der einzelnen Photonen (rot) im Vergleich zur ursprünglichen 95%-Fermi-Ellipse (grün); der Hintergrund entspricht einer 30x30 Bogenminuten Auflösung aus dem SAO-DSS-Katalog.

2.2.2 Berechnung des Schwerpunktes

Die Berechnung des Schwerpunktes der Photonen und somit die Berechnung der Quellenposition basiert auf der Gleichung des gewichteten Mittelwertes gemäß der χ^2 -Statistik⁵. Mithilfe dieser Methode wird den Werten mit einem geringeren Fehler eine höhere Gewichtung für die Bestimmung der Quellenposition zugewiesen, sodass deren Unsicherheit minimiert wird. Hierfür werden die folgenden Formulierungen verwendet (Zhang 2006):

$$x_{CoG} = \frac{\sum_{i=1}^6 g_i \cdot x_i}{\sum_{j=1}^6 g_j} \quad (2.14)$$

$$g_i = \frac{1}{\sigma_{x_i}^2}. \quad (2.15)$$

Der Parameter x_{CoG} repräsentiert die Koordinate der Rektaszension für den Schwerpunkt, welcher oftmals auch als *Center of Gravity* (CoG) bezeichnet wird. Des Weiteren definieren die Größen x_i die entsprechende longitudinale Koordinate der einzelnen Photonen und die Parameter σ_{x_i} die Fehler auf diese. Die Summation wird folglich über die Anzahl der Photonen von eins bis sechs ausgeführt. Ein analoger Zusammenhang kann für die Deklination y_{CoG} des Schwerpunktes hergeleitet werden.

⁵Press *et al.* (1988) veröffentlichten eine erläuternde Dokumentation bezüglich dieser statistischen Formulierungen.

Die Anwendung der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung auf die Gleichung 2.15 ergibt die Standardabweichung der Schwerpunktsposition, die wie folgt formuliert werden kann:

$$\sigma_{x_{CoG}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i g_i}}. \quad (2.16)$$

Die Berechnung der Quellenposition anhand obiger Relationen verlangt somit, anstelle des berechneten radialen Fehlers des vorangegangenen Abschnittes, eine Unsicherheit auf die einzelnen Koordinaten der Photonpositionen. Für den Zusammenhang zwischen den Radien σ_{r_i} der Unsicherheitsregionen der Photonen sowie den Fehlern bezüglich der Himmelsrichtungen σ_{x_i} (Rektaszension) und σ_{y_i} (Deklination) ergibt sich nach Gauß:

$$\sigma_{r_i} = \sqrt{\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{y_i}^2}. \quad (2.17)$$

In dieser Definition wird eine Abhängigkeit der beiden Richtungsfehler untereinander vernachlässigt. Mit der Annahme einer gleichen Unsicherheit in beide Richtungen ($\sigma_{x_i} = \sigma_{y_i}$) lässt sich eine einfache Formulierung zur Berechnung dieser Fehler herleiten:

$$\sigma_{x_i} = \sigma_{y_i} = \frac{\sigma_{r_i}}{\sqrt{2}}. \quad (2.18)$$

Anhand dieser Argumente und der berechneten Unsicherheitsregionen aus Tabelle 2.4 ergibt sich die folgende Position für den Schwerpunkt:

Rektaszension:	(7,766 ± 0,025)deg	($\sigma_{95} = 0,071$deg)
Deklination:	(7,408 ± 0,025)deg	($\sigma_{95} = 0,071$deg)

Gemäß der Gleichung 2.16 und der Annahme von $\sigma_{x_i} = \sigma_{y_i}$ folgt eine quadratische Unsicherheitsregion für die Schwerpunktsposition ($\sigma_{x_{CoG}} = \sigma_{y_{CoG}} = \sigma_{68}$). Für die Berechnung der 95%-Unsicherheit (σ_{95}) werden die entsprechenden 95%igen radialen Fehler der einzelnen Photonen verwendet und anschließend wird eine analoge Rechnung durchgeführt.

Zusätzlich zu dieser Fehlerbox wird vergleichend ein konservativerer Ansatz betrachtet, welcher eine kreisförmige 68%- sowie 95%-Fehlerregion beschreibt, analog zu den Unsicherheiten der einzelnen Photonpositionen. Gemäß der Gleichung 2.18 können die Radien dieser Regionen ($\sigma_{r_{68}}$ bzw. $\sigma_{r_{95}}$) wie folgt angegeben werden:

$$\sigma_{r_{68}} = \sqrt{2} \cdot \sigma_{68} = 0,035\text{deg} \quad (2.19)$$

$$\sigma_{r_{95}} = \sqrt{2} \cdot \sigma_{95} = 0,100\text{deg} \quad (2.20)$$

Die derart berechneten Unsicherheitsradien umschreiben gerade die zuvor genannten Fehlerboxen.

Die gesamten Rechnungen basieren bis zu diesem Punkt auf den PSF-Parametern, welche mittels Monte-Carlo-Simulationen für verschiedene Energie- sowie Winkelintervalle errechnet wurden (vgl. Abbildung 2.2). Berechnungen des Schwerpunktes, ausgehend von den gleichen mathematischen Zusammenhängen und den interpolierten Parametern der Kalibrierungssimulation, zeigen innerhalb ihrer Fehler die gleichen Koordinaten (Zechlin 2010):

$$\begin{aligned} \text{Rektaszension:} & \quad (7,765 \pm 0,025)\text{deg} & (\sigma_{95} = 0,073\text{deg}) \\ \text{Deklination:} & \quad (7,408 \pm 0,025)\text{deg} & (\sigma_{95} = 0,073\text{deg}) \end{aligned}$$

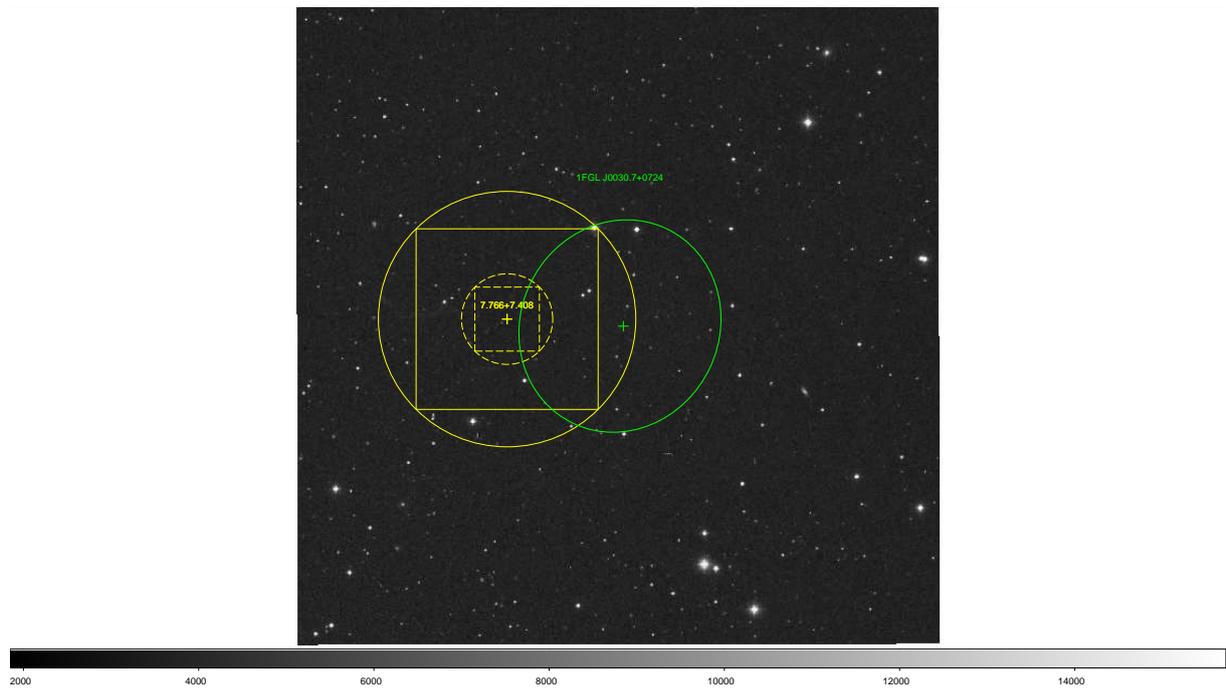
Aufgrund dieser vernachlässigbaren Abweichungen der zuvor bestimmten Koordinaten von der exakteren Rechnung mit den interpolierten Werten, wird für den weiteren Verlauf dieser Arbeit stets auf die ersten Ergebnisse zurückgegriffen.

Abbildung 2.5a veranschaulicht die Position des berechneten Schwerpunktes sowie dessen Unsicherheitsregionen im Vergleich zu der ursprünglichen Fermi-Ellipse der ersten elf Monatsdaten. Aufgrund des hinzugekommenen sechsten Photons (43,8GeV) erfolgt eine Verschiebung der Quellenposition zu einer höheren longitudinalen Koordinate. Dieser Sachverhalt kann insbesondere anhand der sehr geringen Unsicherheit auf die Position dieses Photons begründet werden. Der Winkelabstand r zwischen ursprünglicher sowie neu berechneter Quellenposition ergibt sich als

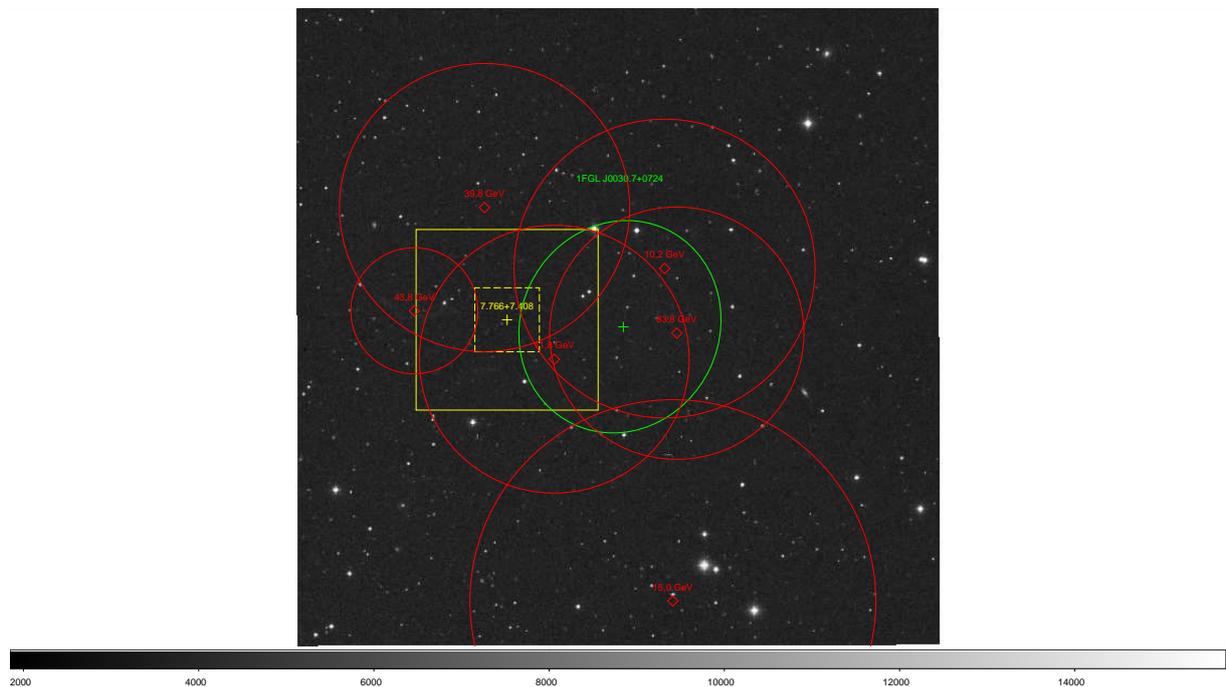
$$r = (0,091 \pm 0,056)\text{deg.}$$

Der Fehler auf die Position von etwa 6 Bogenminuten für die 95%-Fermi-Ellipse bleibt jedoch mit dem Radius des 95%igen Fehlerkreises vergleichbar.

Abbildung 2.5b zeigt zusätzlich die Positionen der einzelnen Photonen mit ihren 68%-Fehlerregionen, sodass die Zuordnung der einzelnen Photonen zu der berechneten Quellenposition anhand des Überlappens ihrer Fehlerregionen mit der Unsicherheit des Schwerpunktes verdeutlicht werden kann.



(a)



(b)

Abbildung 2.5: (a) Neuer berechneter Photonenschwerpunkt mit den 68%- sowie 95%-Unsicherheitsregionen (gelb) im Vergleich zu den ursprünglichen Koordinaten des Fermi-Kataloges (grün) und dessen 95%-Fehlerellipse; (b) zeigt zusätzlich die beobachteten Photonen mit ihren 68%-Fehlerregionen (rot); der Hintergrund entspricht einem 25x25 Bogenminuten Ausschnitt aus dem SAO-DSS-Katalog.

Für eine eingehendere Betrachtung der Photonverteilung wird die Distanz zwischen den einzelnen Photonpositionen sowie den Koordinaten des Schwerpunktes berechnet.

Die Bestimmung der Entfernung zweier Punkte auf der Kugeloberfläche greift auf das Skalarprodukt der Vektoren \vec{v}_1 sowie \vec{v}_2 der betrachteten Punkte in Kugelkoordinaten zurück:

$$\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2 = |\vec{v}_1| \cdot |\vec{v}_2| \cdot \cos(\angle(\vec{v}_1, \vec{v}_2)) \quad (2.21)$$

$$\vec{v}_i = \begin{pmatrix} \cos(y_i) \cos(x_i) \\ \cos(y_i) \sin(x_i) \\ \sin(y_i) \end{pmatrix} \quad i \in \{1, 2\} \quad (2.22)$$

x_i sowie y_i beschreiben die Winkel der Rektaszension bzw. der Deklination. Zusätzlich wird die Himmelskugel als Einheitskugel angenommen, sodass der Abstand $|v_i|$ vom Beobachter zur Himmelskugel als $|v_i| = 1$ gesetzt wird. Die Größe $\angle(\vec{v}_1, \vec{v}_2) = r$ bezeichnet demnach den gesuchten Winkelabstand zwischen den beiden Punkten, sodass unter der Berücksichtigung der Definition der Vektoren (vgl. Gleichung 2.22) die Relation 2.21 nach dem Winkelabstand aufgelöst wird:

$$r = \arccos[\cos(y_1) \cos(y_2) \cdot \cos(x_1 - x_2) + \sin(y_1) \sin(y_2)]. \quad (2.23)$$

Die Ergebnisse der einzelnen Photonabstände zur Quellenposition werden in Tabelle 2.4 wiedergegeben.

2.3 Likelihood-Analyse zur Ausdehnung der Quelle

Die Berechnung der möglichen Ausdehnung der Fermi-Quelle wird von Zechlin (2010) anhand einer *likelihood*-Analyse durchgeführt. Eine eingehende Dokumentation dieser Analysemethodik kann Press *et al.* (1988) entnommen werden.

Bei einer gegebenen Verteilung von Messpunkten i , welche einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsfunktion folgen, definiert die *likelihood* \mathcal{L} das Produkt aus den Wahrscheinlichkeiten p_i der einzelnen Messpunkte:

$$\mathcal{L} = \prod_i p_i \quad (2.24)$$

Für die Betrachtung einer Punktquelle folgt die Photonverteilung demnach der PSF des beobachtenden Detektors als Wahrscheinlichkeitsverteilung (p_{PSF}). Bei einer ausgedehnten Quelle hingegen überlagern sich die PSF sowie das Strukturprofil des Objektes zu einer Verteilung mit den Wahrscheinlichkeiten p_{ext} . Das *likelihood ratio* beschreibt in diesem Zusammenhang das Verhältnis zwischen der *likelihood* einer Punktquelle \mathcal{L}_{PSF} und der eines ausgedehnten Objektes \mathcal{L}_{ext} :

$$\frac{\mathcal{L}_{\text{ext}}}{\mathcal{L}_{\text{PSF}}} = \frac{\prod_i p_{\text{ext}_i}}{\prod_j p_{\text{PSF}_j}} \quad (2.25)$$

Wird die Ausdehnung der Quelle als variabel betrachtet, so folgt der Logarithmus dieses Verhältnisses einer χ^2 -Verteilung (mit einem freien Parameter), aus welcher der wahrscheinlichste Wert für die Ausdehnung und dessen Fehler bestimmt werden können.

Die Analyse der Fermi-Quelle 1FGL J0030.7+0724 basiert in dieser Reihenfolge auf einer Gauß-förmigen Ausdehnung des Objektes und zeigte die oberen Grenzwerte (*upper limit*) für die 95%igen sowie 99%igen Unsicherheiten:

$$95\% \text{ obere Grenze: } = 0,26\text{deg}$$

$$99\% \text{ obere Grenze: } = 0,43\text{deg}$$

Die Ausdehnung der Quelle kann demnach mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% als ein Wert von bis zu 0,26deg angegeben werden bzw. mit 99%iger Wahrscheinlichkeit als ein Wert kleiner als 0,43deg.

Kapitel 3

Suche nach astrophysikalischen Gegenständen in anderen Wellenlängen

Für die Identifikation der Quellen im 1FGL wurde lediglich eine begrenzte Anzahl von astronomischen Katalogen verwendet. Die Suche nach möglichen Gegenständen der Quelle 1FGL J0030.7+0724 soll daher in dieser Arbeit erweitert werden. Diese Untersuchung greift auf insgesamt vier Kataloge unterschiedlicher Wellenlängen zurück, um einen ausführlichen Überblick der umliegenden Objekte zu ermöglichen. Zusätzlich wird für die Fermi-Quelle eine obere Grenze des integrierten Flusses im Röntgenbereich berechnet, welche die Überlegungen zur Annahme bzw. Ablehnung eines Blazars als Emitter der Photonen erweitert.

3.1 Vorstellung der verwendeten Sternkataloge

USNO (*United States Naval Observatory*)¹: Der USNO-Katalog basiert auf optischen Himmelsdurchmusterungen der letzten 50 Jahre, welche auf photographischen Platten gespeichert und anschließend mit der speziell hierfür entwickelten *Precision Measuring Machine* (PMM) ausgewertet wurden. Über eine Milliarde Objekte mit Angaben über die Magnituden in den Farbbändern „Blau“ (B), „Rot“ (R) sowie „Infrarot“ (I) mit einer Genauigkeit von etwa $0,25^{\text{mag}}$ sind in diesem Katalog enthalten (eine Definition dieser Magnituden zeigt Unsöld & Baschek (2002)). Lediglich Objekte, die in mindestens zwei verschiedenen Durchmusterungen sowie in zwei unterschiedlichen Farbbändern detektiert wurden, sind in dieser Datensammlung zusammengetragen.

¹Die Informationen bezüglich des USNO-Katalogs konnten der Arbeit von Monet *et al.* (2003) entnommen werden.

SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*)²: Die digitale Himmelsdurchmusterung des SDSS begann im Jahre 1998 und konnte bis heute eine Himmelsfläche von 10000deg^2 insbesondere in dem Bereich geringer galaktischer Breiten abdecken. Insgesamt wurden mehr als 357 Millionen Objekte detektiert. Neben der Beobachtung einzelner Objekte in den fünf optischen Bändern $u(365,5\text{nm})$, $g(515,5\text{nm})$, $r(648\text{nm})$, $i(710,5\text{nm})$ und $z(863\text{nm})$ wurden ebenfalls digitale Bilder der betrachteten Regionen in diesen Farbbereichen sowie zahlreiche Spektren von Galaxien und Quasaren aufgenommen. Die Detektion eines Objektes forderte dabei je nach Belichtungszeit und Beobachtungsziel Signifikanzen von bis zu $S \approx 10$.

Infolgedessen stellt die aktuelle Veröffentlichung dieser Durchmusterung, SDSS-7, die ausführlichste Datensammlung über die beobachteten Regionen im Optischen dar.

2MASS (*Two Micron All Sky Survey*)³: Der 2MASS-Katalog beinhaltet die Ergebnisse einer vollständigen Himmelsdurchmusterung im infraroten Spektralbereich, welche in den Jahren zwischen 1997 und 2001 an den Observatorien auf dem Mt. Hopkins in Arizona sowie in Cerro Tololo, Chile durchgeführt wurden. Lediglich ein kleiner Bereich (0,002%) in Richtung des galaktischen Zentrums wurde von der Datennahme ausgeschlossen. Der Katalog zeigt Einträge in den Farbbändern $J(1,25\mu\text{m})$, $H(1,65\mu\text{m})$ sowie $K(2,16\mu\text{m})$, wobei lediglich Objekte, welche in mindestens zwei der Bänder mit einer Signifikanz von $S = 10\sigma$ gegenüber dem Hintergrund detektiert werden konnten, aufgenommen wurden.

NVSS *NRAO VLA Sky Survey*)⁴: In den Jahren zwischen 1993 bis 1997 führte das *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) mittels des *Very Large Arrays* (VLA) zahlreiche Durchmusterungen des Himmels bei einer Frequenz von 1,4GHz durch. Der gesamte Himmel wurde für Deklinationen $\delta \geq 40\text{deg}$ beobachtet, wobei lediglich Quellen mit einem größeren Radiofluss als 2,5mJy detektiert werden konnten. Insgesamt umfasst der NVSS-Katalog annähernd $2 \cdot 10^6$ Punktquellen.

²Eine ausführliche Darstellung der aktuellen Version der SDSS bieten Abazajian *et al.* (2009).

³Skrutskie *et al.* (2006) ermöglichen einen Überblick bezüglich der Charakteristika des 2MASS-Katalogs.

⁴Weitere Informationen bezüglich des NVSS-Katalogs präsentieren Condon *et al.* (2002).

Name	Himmelsbereich	Bänder	Genauigkeit	Sensitivität
USNO-B1.0	gesamt	B	0,25 ^{mag}	22,0 ^{mag}
		R		
		I		
SDSS-7	10.000deg ²	u	2%	22,0 ^{mag}
		g	1%	22,2 ^{mag}
		r	1%	22,2 ^{mag}
		i	1%	21,3 ^{mag}
		z	1%	20,5 ^{mag}
2MASS	gesamt	J	0,03 ^{mag}	15,8 ^{mag}
		H		15,1 ^{mag}
		K		14,2 ^{mag}

Tabelle 3.1: Wichtige Parameter der verwendeten Kataloge; von links nach rechts werden die Namen der Kataloge sowie die abgedeckten Himmelsbereiche, die betrachteten Bänder, die Unsicherheiten in den verschiedenen Magnituden und die Sensitivitäten in den einzelnen Wellenlängen angegeben (Monet *et al.* (2003), Abazajian *et al.* (2009), Skrutskie *et al.* (2006)).

3.2 Suche im Optischen und Infraroten

Im Verlauf der Suche nach möglichen Gegenständen der Fermi-Quelle 1GFL J0030.7+0724 wird vorerst der USNO-Katalog verwendet, da dieser im Vergleich zur 2MASS-Datensammlung Objekte mit sehr geringen Helligkeiten beinhaltet. Eine anschließende Betrachtung der USNO-Quellen im Zweifarbendiagramm soll die Anzahl der möglichen Gegenstände einschränken. Lediglich die aus dieser Analyse als „vielversprechende“ Kandidaten hervortretenden Objekte werden für eine Suche innerhalb der Kataloge 2MASS sowie SDSS hinzugezogen.

3.2.1 Auflistung umgebender USNO-Objekte

Mithilfe der Software *DS9* können die neu berechnete Quellenposition sowie deren Unsicherheitsregionen vergleichend zu den bekannten Objekten des USNO-Katalogs eingezeichnet werden (vgl. Abbildung 3.1).

Innerhalb der verschiedenen Unsicherheitsregionen wird somit eine große Anzahl von optischen Quellen erkennbar:

Box (68%-Unsicherheit): 18 Quellen

Box (95%-Unsicherheit): 154 Quellen

Kreis (68%-Unsicherheit): 33 Quellen

Kreis (95%-Unsicherheit): 238 Quellen

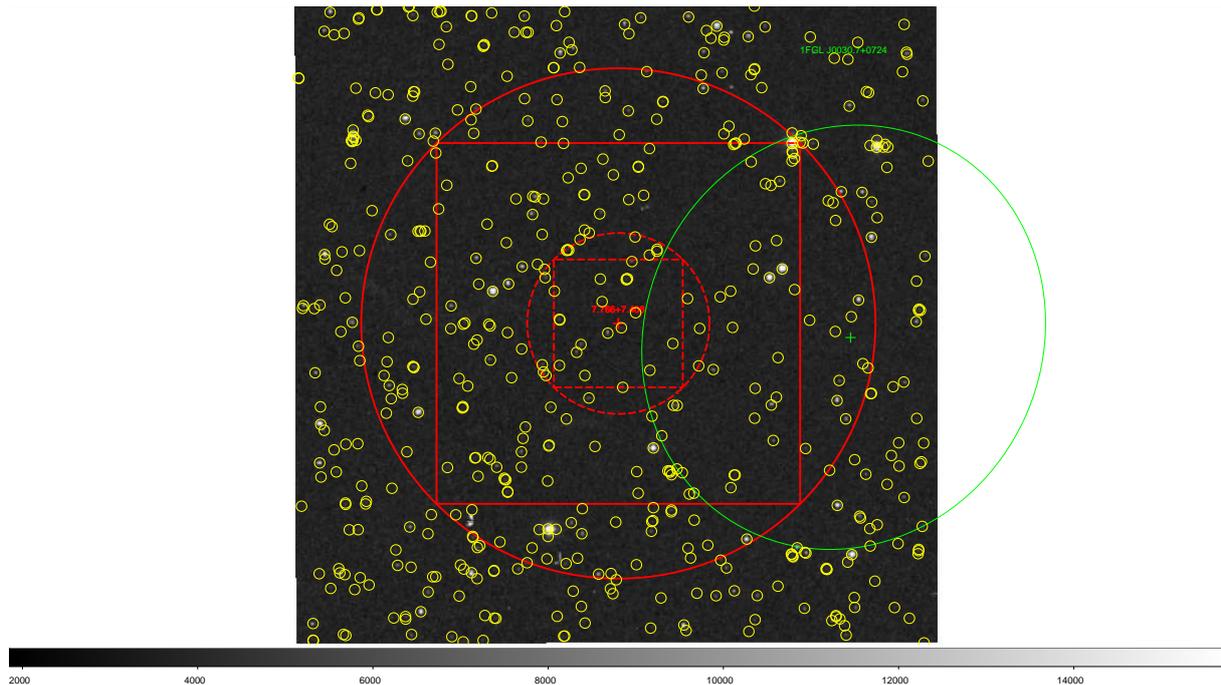


Abbildung 3.1: USNO-Quellen (gelb) in der Umgebung des Photonenschwerpunktes sowie dessen Unsicherheitsregionen (rot); vergleichend wird zusätzlich die Position der ursprünglichen 95%igen Fermi-Ellipse dargestellt; der Hintergrund entspricht einer 15x15 Bogenminuten Auflösung aus dem SAO-DSS-Katalog.

Eine Tabelle aller, in diesen Regionen und Wellenlängenbereichen detektierten, Objekte kann im Anhang A dieser Arbeit vorgefunden werden. Die Angaben der Distanzen zwischen den USNO-Quellen und dem Photonenschwerpunkt basieren auf Gleichung 2.23.

Diese Untersuchung zeigt eine Quelle (USNO-B1.0 0974-0005560) mit lediglich einer Distanz von 0,0021deg in Bezug auf den Schwerpunkt der Photonen.

Aufgrund der Sensitivität des verwendeten Katalogs im Optischen folgte die Überlegung, dass es sich bei vielen, der in dieser Region beobachteten Quellen, um Vordergrundsterne der Milchstraße

handelt. Sterne der Hauptreihe können allgemein als Emittler nicht-thermischer Strahlung abgelehnt werden, da diese keine weiteren Beschleunigungsmechanismen für Teilchen zeigen. Ein Ausschluss dieser Kandidaten unterstützt somit grundlegend die Untersuchung möglicher Gegenstücke. Im Folgenden soll daher überprüft werden, ob es sich bei den aufgefundenen Objekten um Hauptreihensterne handelt.

3.2.2 Darstellung im Zweifarbendiagramm

Die Charakterisierung von beobachteten Objekten als Sterne erfolgt in der Astrophysik insbesondere über die Betrachtung der Position dieser zu untersuchenden Kandidaten in einem Zweifarbendiagramm.

Sterne, welche sich im Stadium des Wasserstoffbrennens befinden, zeigen stets eine feste Relation zwischen ihrer effektiven Temperatur und ihrer Leuchtkraft bzw. ihrer absoluten Helligkeit. Ähnliches beobachtete W. Becker 1942 bei der Zusammenstellung eines Zweifarbendiagramms mithilfe scheinbarer Helligkeiten verschiedener Bänder (Unsöld & Baschek 2002). Dieses Diagramm erfasste entlang seiner Abzisse die Differenz zwischen der blauen (B) sowie der visuellen Magnitude (V) und entlang der Ordinate den Unterschied zwischen dem ultravioletten (U) sowie dem blauen Band. Wie in Abbildung 3.2 gezeigt ordnen sich Sterne im Stadium des Wasserstoffbrennens innerhalb dieser Darstellung entlang eines markanten Bandes, der Hauptreihe, an. Objekte hoher effektiver Temperaturen können im oberen linken, kühlere Objekte im unteren rechten Bereich dieser Reihe vorgefunden werden. Zusätzlich

beschreibt die Grafik den Verlauf des Schwarzkörperspektrums im Vergleich zum Verlauf der Hauptreihe.

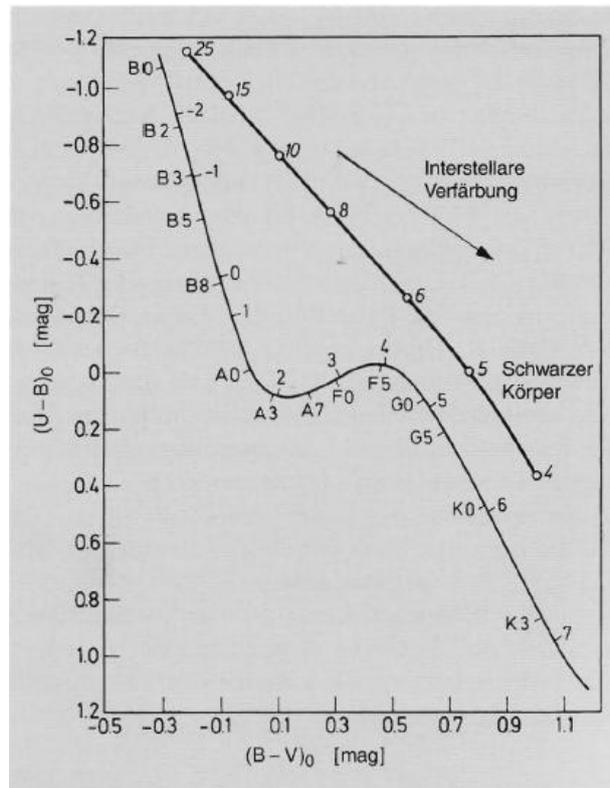


Abbildung 3.2: Zweifarbendiagramm in Abhängigkeit von den Magnituden UBV ; neben dem geschwungenen Band der Hauptreihe ist zum Vergleich der Verlauf eines Schwarzkörperspektrums aufgezeichnet sowie der Rötungsvektor, entlang welchem sich Objekte aufgrund der interstellaren Extinktion verschieben (Unsöld & Baschek 2002).

Das Interesse an derartigen Diagrammen verschiedener Farbbänder begründet sich insbesondere in der Unabhängigkeit von der Entfernung der betrachteten Objekte (Unsöld & Baschek 2002). Lediglich eine Rötung der detektierten scheinbaren Helligkeiten aufgrund der interstellaren Extinktion muss bei der Darstellung beachtet werden. Diese Absorption des emittierten

Flusses zeigt eine Abhängigkeit von der zu durchlaufenden Säulendichte und variiert somit für die Beobachtung unterschiedlicher Richtungen. Zusätzlich lassen sich verschiedene Extinktionsparameter A_i für die einzelnen betrachteten Wellenlängen finden.

Ein Vergleich der beobachteten Objekte mit Sternen der Hauptreihe im Zweifarbendiagramm verlangt folglich eine „Entrötung“ der detektierten Magnituden. Dieses führt eine Verschiebung der Objekte entgegen des Rötungsvektors mit sich führt (vgl. Abbildung 3.2).

Falls sowohl die blaue als auch die rote Magnitude eines Objektes im Verlauf der USNO-Durchmusterungen aufgenommen werden konnten, zeigt der Katalog zusätzliche scheinbare Helligkeiten, u.a. in den benötigten Farbbändern U sowie V . Die Berechnung dieser Magnituden basiert auf den photometrischen Relationen, welche von Henden & Kaitchuck (1978) entwickelt wurden. Objekte, welche dieses Kriterium nicht erfüllen, können leider nicht in die nachfolgenden Untersuchungen eingebunden werden. Dieses trifft auf etwa die Hälfte der bekannten USNO-Quellen in den Unsicherheitsregionen des Photonenschwerpunktes zu. Für einige Quellen sind zwei verschiedene blaue Magnituden aus unterschiedlichen Himmelsdurchmusterungen im Katalog angegeben, sodass in diesen Fällen das arithmetische Mittel der beiden Werte verwendet wird.

Mithilfe der NED-Website (2010) können die verschiedenen Extinktionsparameter A_i der einzelnen Wellenlängen sowie der sog. Farbexzess E_{B-V} in der Richtung der Quellenposition (7,766323+7,408031) abgefragt werden.

$$A_U=0,285^{\text{mag}} \quad A_B=0,226^{\text{mag}} \quad A_V=0,174^{\text{mag}} \quad E_{B-V}=0,052^{\text{mag}}$$

Folgende Relationen zwischen den beobachteten Magnituden UBV und den wahren scheinbaren Helligkeiten $U_0V_0B_0$ ohne interstellare Extinktion ermöglichen mithilfe der obigen Extinktionsparameter die „Entrötung“ der detektierten USNO-Quellen:

$$U = U_0 + A_U \quad (3.1)$$

$$E_{B-V} = A_B - A_V \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow (B_0 - V_0) = B - V - E_{B-V} \quad (3.3)$$

$$\Rightarrow (U_0 - B_0) = U - B + A_B - A_U. \quad (3.4)$$

Eine weitere Argumentation beinhaltet, dass für die USNO-Quellen aufgrund ihrer sehr geringen Winkelverteilung zum Photonenschwerpunkt die selben Extinktionsparameter angenommen werden können.

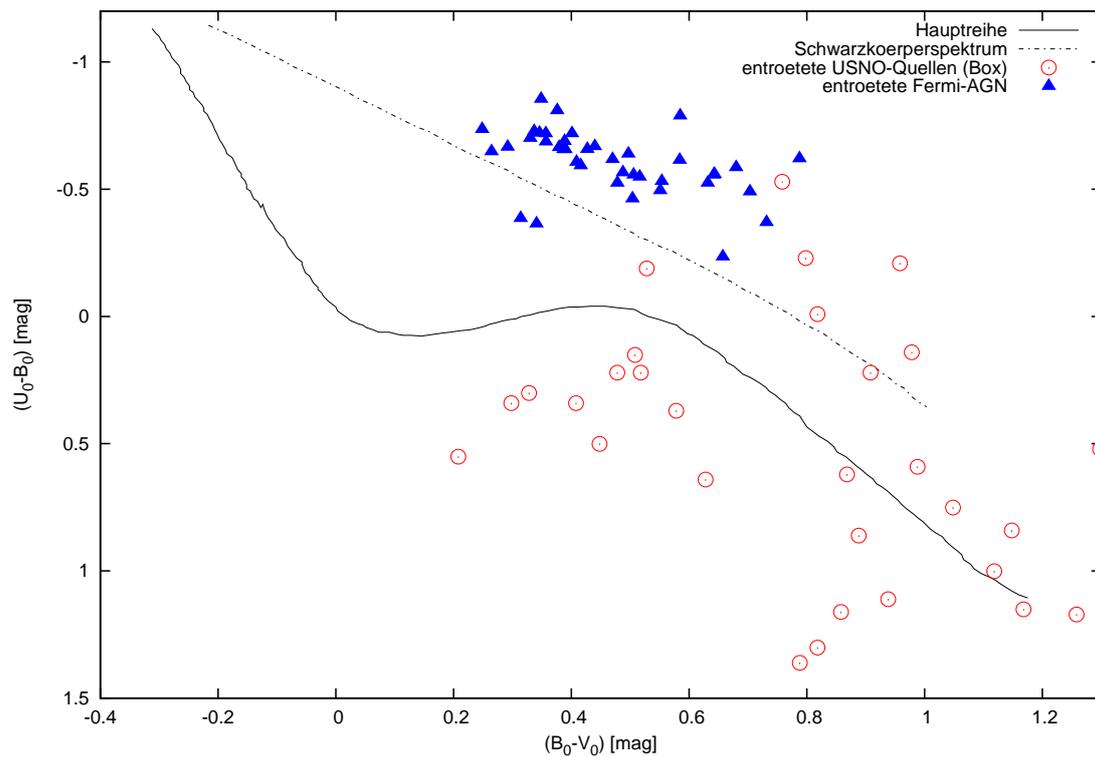
Die Abbildungen 3.3(a) sowie 3.3(b) beschreiben die Darstellung der „entröteten“ USNO-Quellen für die verschiedenen Unsicherheitsregionen (Box bzw. Kreis) in einem Zweifarben-diagramm. Die Objekte folgen nicht der Erwartung für Hauptreihensterne, welche sich auf der durchgezogenen schwarzen Linie orientieren würden, und können folglich nicht als solche identifiziert werden.

Eine neue Überlegung beschäftigt sich daher mit der Ablehnung spezieller USNO-Quellen als Gegenstücke infolge eines Vergleichs ihrer Eigenschaften mit den Charakteristika von AGN. Wie bereits in Abschnitt 1.5 erläutert, stellen Blazare aufgrund ihres spektralen Verlaufs bei Energien im GeV-Bereich ($\Gamma < 2, 0$) mögliche Kandidaten für die Emission der nicht-thermischen Photonen dar. Infolgedessen soll die Position der Blazare im Zweifarben-diagramm mit den Positionen der Kandidaten aus dem USNO-Katalog verglichen werden.

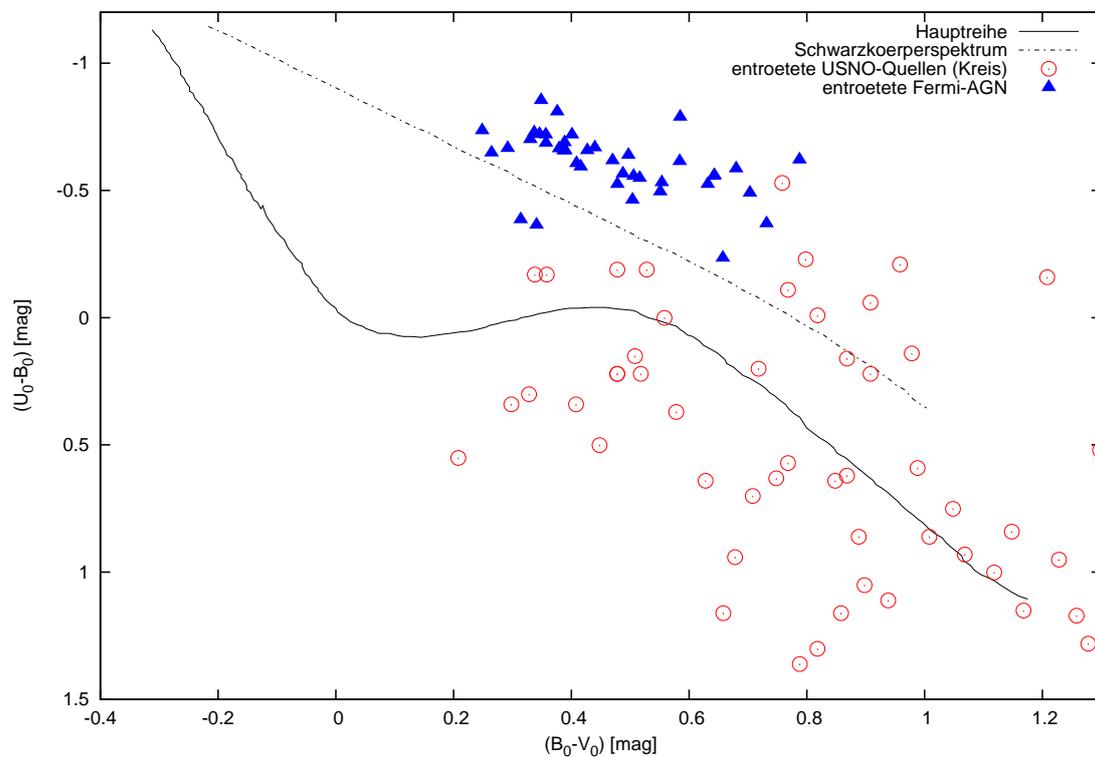
Um äquivalente Bedingungen für die Detektionen dieser AGN sowie für die Beobachtung der unassoziierten Fermi-Quelle voraussetzen zu können, wird die AGN-Datensammlung des ersten Fermi-Katalogs hinzugezogen (Abdo *et al.* 2010b). Die Anzahl der bekannten Fermi-AGN wird zusätzlich auf einen spektralen Index von $\Gamma < 2, 0$ beschränkt, gemäß des Spektrums der Fermi-Struktur von $\Gamma = 1, 68$. Die benötigten Magnituden UBV dieser Objekte für die Darstellung im Zweifarben-diagramm werden der VII/258-Datensammlung⁵ von AGN und Quasaren, herausgegeben von Véron-Cetty, entnommen und müssen auf ihre entröteten Werte zurückgeführt werden. Aufgrund der Verteilung dieser Systeme über den gesamten Himmel verlangt der Prozess der „Entrötung“ unterschiedliche Extinktionsparameter für die verschiedenen Quellen. Der Extinktionsparameter A_V sowie der Farbexzess E_{B-V} können für die einzelnen AGN über die Anwendungen zur Berechnung der galaktischen Extinktion der IRSA-Website (2010) erworben werden. Die Berechnung des Parameters A_U hingegen basiert auf dem folgenden Zusammenhang von Schlegel *et al.* (1998):

$$\frac{A_U}{E_{B-V}} = 5,434 \quad (3.5)$$

⁵Der Zugang zur VII/258-Datensammlung kann über die Adresse <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=VII/258> erzielt werden.



(a)



(b)

Abbildung 3.3: Zweifarbendiagramm der entröteten USNO-Quellen aus der quadratischen (a) sowie der kreisförmigen (b) 95%-Unsicherheitsregion des Photonenschwerpunktes; vergleichend sind die Hauptreihe sowie der Verlauf des Schwarzkörper-Spektrums eingezeichnet; die mittleres des Fermi-Satelliten detektierten AGN mit einem spektralen Index von $\Gamma < 2,0$ konzentrieren sich im mittleren, oberen Bereich der Grafik (*Informationen bezüglich der Helligkeiten in den verschiedenen Bändern können dem USNO-Katalog bzw. dem VII/258 Véron-Cetty entnommen werden.*).

Mithilfe dieser bekannten Größen und der Relation 3.5 ergeben sich zur Bestimmung der ent-röteten Magnituden die Gleichungen:

$$(B_0 - V_0) = B - V - E_{B-V} \quad (3.6)$$

$$(U_0 - B_0) = U - B - 4,434 \cdot E_{B-V} + A_V \quad (3.7)$$

Bei der anschließenden Darstellung der AGN im Zweifarbandiagramm konzentrieren sich diese im oberen, zentralen Bereich der Grafik (vgl. Abbildungen 3.3(a) sowie 3.3(b)). Diese Region gibt somit die Verteilung der mittleren Charakteristika von AGN mit einem spektralen Index von $\Gamma < 2,0$ wieder. Eine derartige Verteilung der AGN im Zweifarbandiagramm basiert auf den unterschiedlichen Spektren, welche sich für AGN verschiedener Flussintensitäten ergeben (Donato *et al.* 2001). Um die Eigenschaften einer USNO-Quelle mit diesen mittleren AGN-Charakteristika vergleichen zu können, wird ein Schwerpunkt für die AGN-Position im Diagramm sowie dessen 95%-Unsicherheitsregion berechnet. Hierbei wird der 95%ige Fehler betrachtet, da die entsprechende Unsicherheitsellipse die Verteilung der AGN sehr genau wiedergibt (vgl. Abbildung 3.5).

Aufgrund der gemeinsamen Ungenauigkeiten der AGN von $0,2^{\text{mag}}$ in den beobachteten Helligkeiten (Véron-Cetty & Véron 2006) basiert die Berechnung des Schwerpunktes der AGN-Region auf dem algebraischen Mittelwert (x_{CoG}, y_{CoG}) :

$$x_{CoG} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i x_i \quad (3.8)$$

$$\sigma_{x_{CoG}} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \cdot \sum_i (x_i - x_{CoG})^2} \quad (3.9)$$

Der Parameter N beschreibt in dieser Rechnung die Anzahl der betrachteten AGN ($N=40$). Ihre Größen x_i hingegen repräsentieren die Abzissenkoordinaten im Zweifarbandiagramm. $\sigma_{x_{CoG}}$ gibt die Standardabweichung der verschiedenen AGN-Positionen vom berechneten Schwerpunkt entlang der x-Achse wieder. Analoge Rechnungen können ebenfalls auf die y-Koordinate angewendet werden, sodass sich folgender Schwerpunkt ergibt:

$$(B_0 - V_0) = 0,51^{\text{mag}}$$

$$(U_0 - B_0) = -0,55^{\text{mag}}$$

Aufgrund der Struktur der AGN-Ansammlung im Diagramm wird eine ellipsoide Unsicherheitsregion für die Verteilung der mittleren Charakteristika angenommen. Die Berechnung dieser Region erfolgt im ersten Schritt in der Definition eines kartesischen Koordinatensystems mit Ursprung in dem ermittelten Schwerpunkt. Zusätzlich wird eine Transformation der AGN-Diagrammkoordinaten in dieses neue Bezugssystem vorgenommen. Mithilfe der Gleichung 3.9 können anschließend die Fehler auf die Schwerpunktskoordinaten entlang der beiden Achsen des Systems bestimmt werden. Der Betrag der 95%-Unsicherheit beruht hierbei auf der Gauß'schen Relation von $\sigma_{i,95} = 1,96 \cdot \sigma_{i,68}$ für die beiden Koordinaten $i = x, y$. Für die Berechnung der Fehler entlang weiterer, beliebiger Achsen wird das Koordinatensystem (x,y) mittels einer Rotation um den Winkel γ gegen den Uhrzeigersinn in ein neues System (x',y') überführt (Greiner 1981):

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Infolge dieser Rotation kann die Standardabweichung gemäß Gleichung 3.9 entlang der Richtungen bestimmt werden, welche Winkel von $n \cdot \frac{\pi}{2} - \gamma$ mit $n \in 0, 1, 2, 3$ gegenüber der Abzisse im ursprünglichen Koordinatensystem (x,y) aufweisen. Die 95%-Unsicherheit wird erneut mittels der Gauß'schen Statistik aus der Standardabweichung ermittelt. Abbildung 3.4 greift diesen gesamten Sachverhalt erläuternd auf. Insgesamt wird diese Rotation für die Winkel $\gamma=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ durchgeführt. Abschließend kann mittels des Programms *Gnuplot* eine Ellipse an die berechneten Unsicherheitsstrukturen angepasst werden, sodass sich die folgende ellipsoide Fehlerregion ergibt:

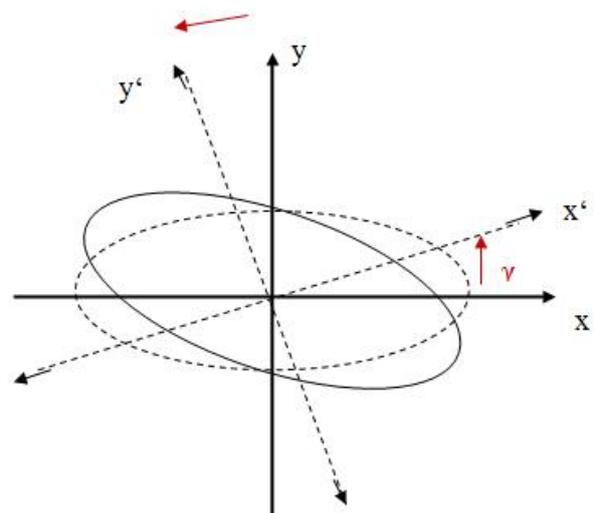


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Rotation eines Koordinatensystems um den Winkel γ gegen den Uhrzeigersinn.

	gr. Halbachse	kl. Halbachse	Neigungswinkel
95%-Fehler	0,33 ^{mag}	0,17 ^{mag}	35°

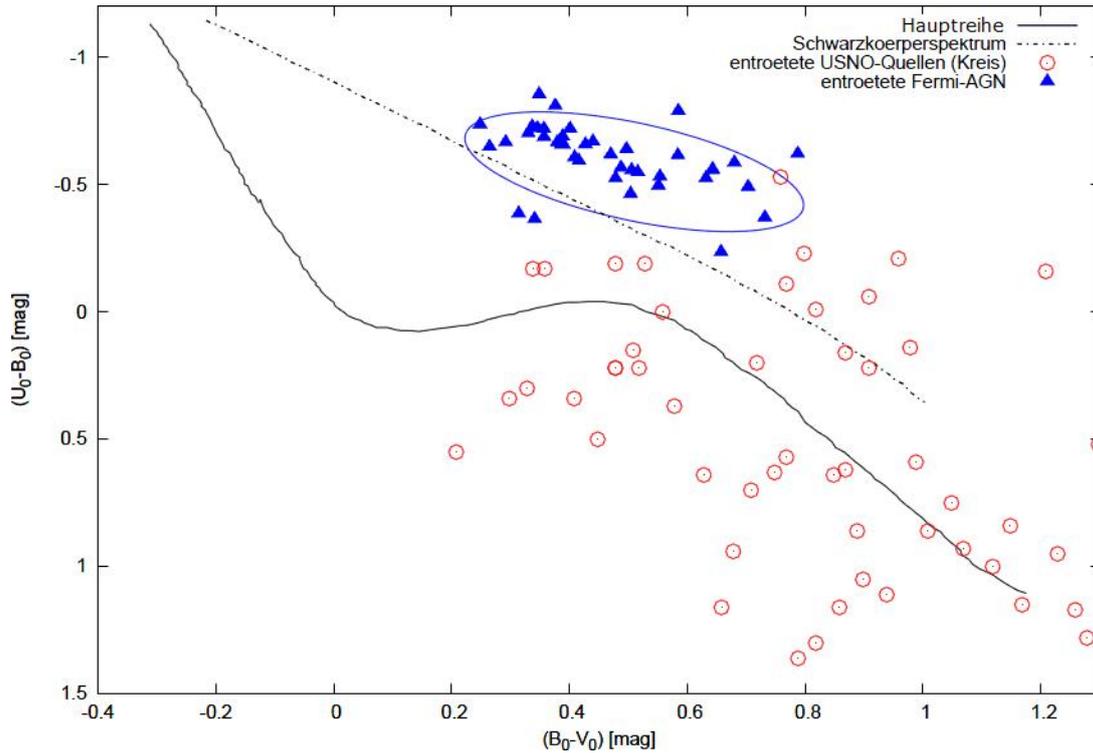


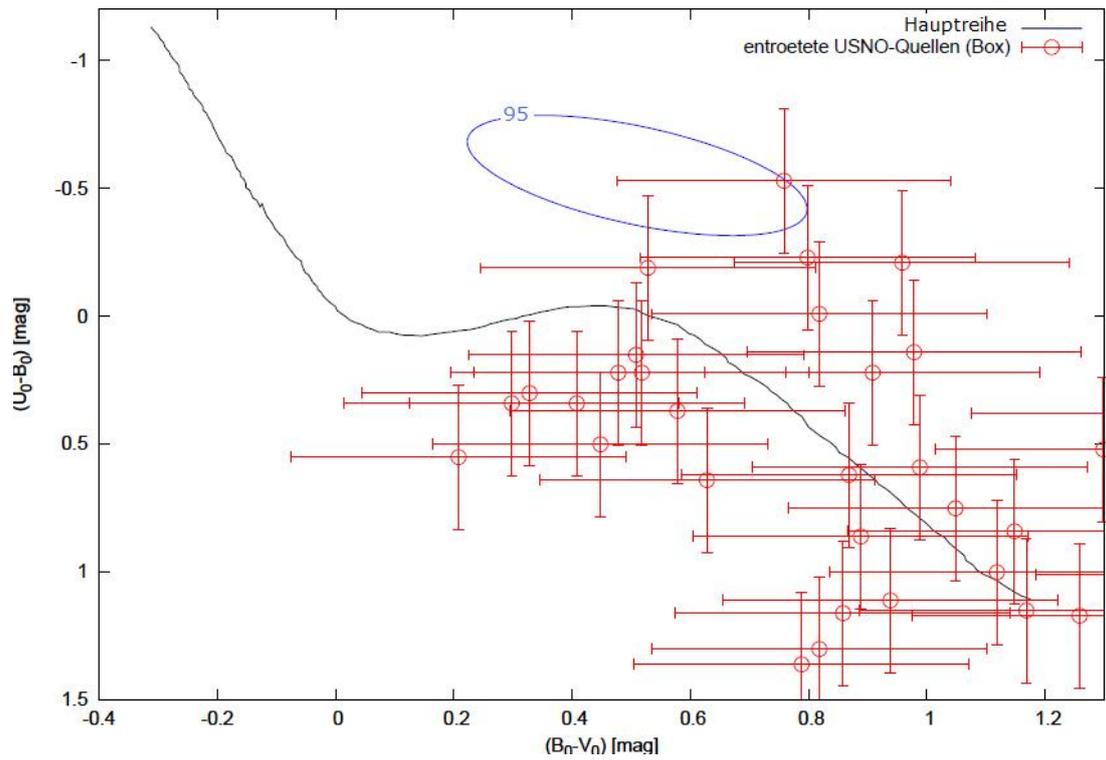
Abbildung 3.5: Darstellung der entroteten USNO-Quellen (rot) der kreisförmigen Fehlerregion des Photoschwerpunktes im Zweifarbandiagramm im Vergleich zu Fermi-AGN mit spektralem Index von $\Gamma < 2,0$ (blau); zusätzlich wird die berechnete elliptische Unsicherheitsregion der mittleren AGN-Charakteristika vergleichend zur Verteilung der AGN dargestellt.

Ein Vergleich dieser Fehlerellipse mit der Verteilung der AGN im Zweifarbandiagramm wird in Abbildung 3.5 wiedergegeben.

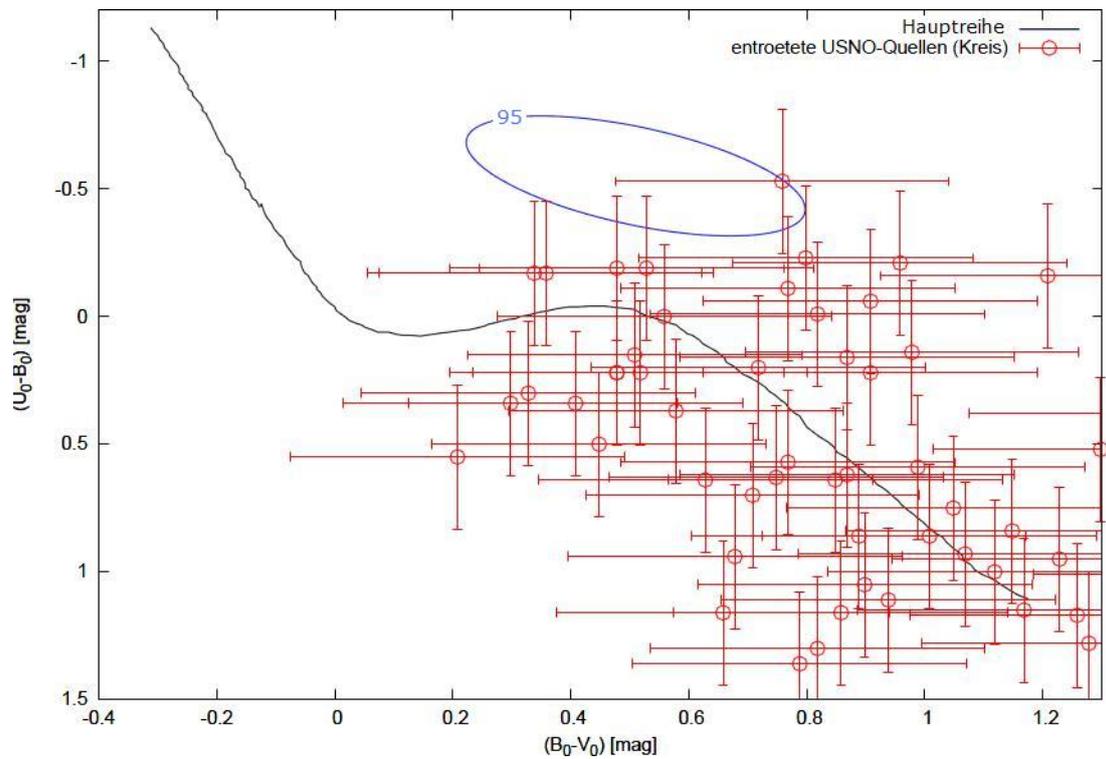
Ein Vergleich dieser Unsicherheitsellipse mit den Diagrammkoordinaten der einzelnen USNO-Quellen zeigt lediglich eine geringe Anzahl an Überschneidungen (vgl. Abbildungen 3.6(a) und 3.6(b)). Zusätzlich zu der 95%-Fehlerellipse werden in den Diagrammen die Unsicherheiten auf die Magnituden der USNO-Quellen berücksichtigt. Gemäß Monet *et al.* (2003) ergeben sich diese zu $\sigma_{\text{mag}} = 0,2^{\text{mag}}$ sowohl für die beobachtete Magnitude B als auch für die geschätzten Magnituden UV . Folglich zeigen die Positionen der Quellen im Zweifarbandiagramm insgesamt eine Unsicherheit von:

$$\sigma_{\text{mag}} = 0,2^{\text{mag}} \cdot \sqrt{2}. \quad (3.11)$$

Anhand dieser Fehlerbalken wird ersichtlich, dass für neun USNO-Quellen aus der kreisförmigen Unsicherheitsregion der Quellenposition eine Übereinstimmung mit den mittleren Charakteristika der AGN als wahrscheinlich erscheint. Für die quadratische Fehlerregion reduziert sich diese Anzahl auf lediglich vier Quellen. Die Kandidaten beider Unsicherheitsregionen des Photoschwerpunktes werden in Tabelle 3.2 dargestellt. Ein besonderes Interesse kann der Quelle USNO-B1.0 0973-0005603 zugeordnet werden, da sich diese bereits aufgrund ihrer



(a)



(b)

Abbildung 3.6: Zweifarbendiagramm der entroteten USNO-Quellen aus der quadratischen (a) sowie der kreisförmigen (b) 95%-Unsicherheitsregion des Photonenschwerpunktes; vergleichend ist die Hauptreihe eingezeichnet; die Ellipse (blau) beschreibt die 95%-Unsicherheitsregion auf die mittleren Charakteristika der Fermi-AGN mit spektralem Index von $\Gamma < 2,0$; (Informationen bezüglich der Helligkeiten in den verschiedenen Bändern können dem USNO-Katalog bzw. dem VII/258 Véron-Cetty entnommen werden.).

	USNO-B1.0	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	U [mag]	V [mag]	Distanz [deg]
Box:	0973-0005603	20,42	19,30	18,79	18,81	19,39	19,05	0,017
	0974-0005525	14,52	14,23	13,80	13,38	14,24	13,79	0,062
	0974-0005521	14,33	13,79	13,24	12,71	13,89	13,21	0,067
	0974-0005519	12,62	11,92	10,78	10,72	12,12	11,26	0,098
Kreis:	0975-0005388	18,00	17,57	17,06	17,22	17,68	17,40	0,098
	0974-0005537	20,59	20,15	19,15	19,77	20,26	19,96	0,085
	0973-0005615	12,81	12,49	11,81	11,77	12,52	12,12	0,085
	0974-0005556	20,59	20,19	18,65	19,04	20,34	19,57	0,084
	0974-0005565	20,59	20,07	18,95	18,81	20,33	19,37	0,091

Tabelle 3.2: Präsentation der USNO-Quellen, deren Eigenschaften zu einer hohen Wahrscheinlichkeit mit den mittleren Charakteristika von AGN mit einem spektralen Index von $\Gamma < 2,0$ übereinstimmen; die ersten vier Quellen entstammen der quadratischen Unsicherheitsregion des Photonenschwerpunktes, wohingegen die zirkulare Region zusätzlich die unteren fünf Kandidaten zeigt; von links nach rechts werden die USNO-Bezeichnung der Objekte, ihre blauen und roten Magnituden zu zwei verschiedenen Beobachtungszeitpunkten sowie die Helligkeiten in den Farbbändern U und V und die Distanz der Quellen zur Quellenposition beschrieben; (Die Informationen können dem USNO-B1.0-Katalog unter <http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/icas/fchpix> entnommen werden; die Berechnung der Distanz erfolgen gemäß Gleichung 2.23).

Differenzen in den betrachteten Farbbändern und ohne Hinzunahme ihres Fehlers in der 95%-Unsicherheitsregion der AGN-Charakteristika wiederfindet.

Wie zuvor bereits erwähnt, beschränkt sich dieser Vergleich aufgrund des Spektrums der Fermi-Quelle auf AGN mit spektralen Indizes von $\Gamma < 2,0$. Die Möglichkeit, dass die verbleibenden USNO-Quellen Eigenschaften von AGN eines weicheren Spektrums aufweisen, kann somit nicht ausgeschlossen werden. Für diese Objekte wäre jedoch die Reproduktion eines Spektrums im Gammabereich mit einem spektralen Index von $\Gamma = 1,68$ nicht möglich, sodass sie vernachlässigt werden können.

3.2.3 Vergleich mit dem 2MASS-Katalog

Eine weiterführende Untersuchung der neun selektierten USNO-Kandidaten behandelt die mögliche Identifikation dieser mit Quellen des 2MASS-Katalogs. Betrachtungen in mehreren Wellenlängenbereichen ermöglichen stets präzisere Aussagen bezüglich der Bestimmung des Quellentyps.

Mithilfe der Software *DS9* kann eine erste Assoziation zwischen den selektierten Objekten des USNO-Katalogs und den 2MASS-Quellen erzielt werden. Folglich zeigt die Abbildung 3.7 die möglichen neun AGN-Kandidaten sowie die bekannten Quellen der 2MASS-Datensammlung

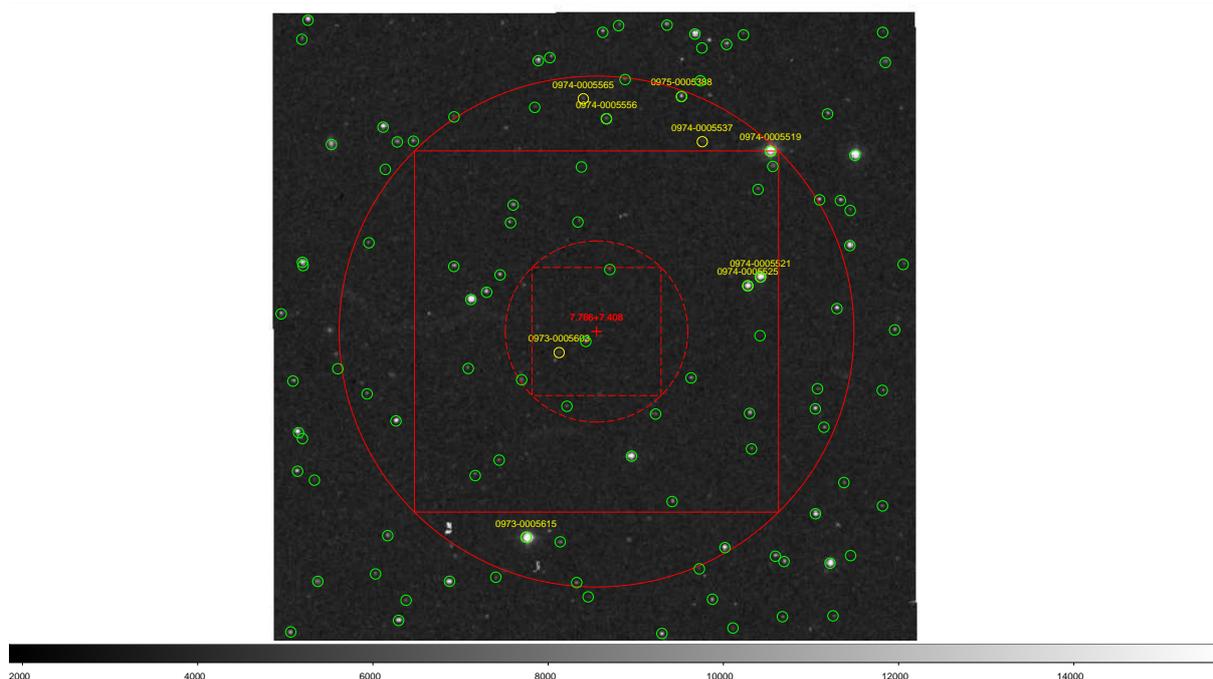


Abbildung 3.7: Selektierte Quellen aus dem USNO-Katalog (gelb) im Vergleich zu den bekannten Objekten im infraroten Spektralbereich (grün); in rot sind erneut die Unsicherheitsregionen des Photonschwerpunktes eingezeichnet; das Hintergrundbild entspricht einer 15x15 Bogenminuten Auflösung aus der SAO-SDSS mit invertierter Farbskala.

im Vergleich. Für die auf diesen ersten Blick wahrscheinlichen Assoziationen wird eine anschließende genauere Untersuchung, basierend auf den Fehlern der Quellenpositionen, durchgeführt. Hierfür werden die 95%-Unsicherheitsregionen auf die Positionen der Quellen beider Kataloge werden mittels *DS9* auf mögliche Überschneidungen analysiert.

Zwei USNO-Objekte, USNO-B1.0 0973-0005615 sowie USNO-B1.0 0974-0005519, zeigen keine Angaben bezüglich ihrer Fehler auf ihre Position, sodass für diese Quellen eine gemittelte Unsicherheit von 100marcs angenommen wird.

Tabelle 3.3 präsentiert die einzelnen Assoziationen zwischen den Quellen der beiden Kataloge sowie die Wahrscheinlichkeit einer Übereinstimmung. Für vier der neun USNO-Objekte können keine Vergleiche zu Einträgen im 2MASS-Katalog gezogen werden. Dieses kann auf zu geringe Magnituden im Infraroten zurückgeführt werden.

Die Kenntnis über die Helligkeiten der Objekte in weiteren Wellenlängenbereichen ermöglicht anhand von Analysen der spektralen Flüsse Aussagen bezüglich des Objekttyps dieser Quellen. Die Ausarbeitung einer weiteren Analyse ist jedoch im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

USNO-B1.0	2MASS	Wahrscheinlichkeit	J [mag]	H [mag]	K [mag]
0973-0005603	keine Assoziation				
0974-0005525	00304966+0719381	0,95	12,8±0,03	12,51±0,03	12,52±0,03
0974-0005521	keine Assoziation				
0974-0005519	00304751+0728436	0,95	9,89±0,02	9,44±0,03	9,34±0,02
0975-0005388	00305591+0730009	0,95	16,05±0,09	15,52±0,11	15,5±0,19
0974-0005537	keine Assoziation				
0973-0005615	00311056+0719381	0,95	10,51±0,02	10,19±0,02	10,11±0,02
0974-0005556	00310300+0729297	0,68	16,49±0,14	16,01±0,17	16,7
0974-0005565	keine Assoziation				

Tabelle 3.3: Übersicht der Assoziationen zwischen USNO- sowie 2MASS-Quellen; von links nach rechts werden die USNO-Objekte sowie ihre 2MASS-Gegenstücke, die Wahrscheinlichkeit einer Identifikation und die Helligkeiten der 2MASS-Quellen in den verschiedenen Bändern präsentiert; kann keine Assoziation aufgefunden werden, so ist die Spalte der 2MASS-Quelle mit „keine Assoziation“ gekennzeichnet; die ersten vier Quellen entfallen erneut auf die quadratischen Unsicherheitsregion der Schwerpunktsposition, die weiteren Kandidaten bezeichnen die zusätzlichen Objekte der kreisförmigen Fehlerregion; (Die Informationen der 2MASS-Quellen konnten DS9 entnommen werden.).

3.2.4 Vergleich mit der SDSS

Im Anschluss an die Untersuchung der neun möglichen AGN-Kandidaten im Infraroten wird ein Vergleich dieser Objekte mit den Daten der SDSS-7 vorgenommen. Die SDSS-Datensammlung zeigt neben Assoziationen mit Objekten anderer Kataloge gemäß räumlicher sowie spektraler Übereinstimmungen ebenfalls eine Charakterisierung der Quellen hinsichtlich ihres Objekttyps. Hierbei wird zwischen „Stern“, „Galaxie“ sowie „Quasar“ unterschieden. Der Vergleich zwischen „Stern“ und „Galaxie“ erfolgt anhand der beobachteten Magnituden dieser Objekte, welche mit einem entwickelten Modell-Spektrum verglichen werden. Quasare hingegen können aufgrund ihrer hohen Rotverschiebung identifiziert werden (Abazajian *et al.* 2004).

Tabelle 3.4 stellt die Ergebnisse dieser Analyse der SDSS-Datensammlung dar, wobei zwei mögliche AGN-Kandidaten (USNO-B1.0 0974-0005519 sowie USNO-B1.0 0973-0005615) keine Assoziationen mit Objekten dieses Katalogs nachgewiesen werden können.

Im Anhang B dieser Arbeit wird für ausgewählte Objekte eine zusätzliche Analyse der Bild- daten vorgenommen, anhand welcher die Charakterisierung in die Objekttypen „Stern“ sowie „Galaxie“ nachvollzogen wird. Mithilfe dieser Analyse erscheinen ebenfalls die beiden USNO-Kandidaten, welche keine direkte Assoziation mit einer SDSS-Quelle zeigen, als sternähnlich.

USNO	SDSS	u	g	r	i	z	Objekttyp
		[mag]	[mag]	[mag]	[mag]	[mag]	
0973-0005603	58774398089612527	21,26	19,85	19,00	18,65	18,40	Galaxie
0974-0005525	587743980896124934	15,45	14,23	13,10	13,01	13,64	Stern
0974-0005521	587743980896059473	15,52	14,71	14,89	15,25	13,39	Stern
0974-0005519	–						
0975-0005388	587744045858750479	18,28	17,31	16,96	16,83	16,79	Stern
0974-0005537	587743980896125136	21,31	20,28	19,98	19,77	19,79	Galaxie
0974-0005556	587744045858750582	22,79	19,94	18,63	18,09	17,77	Stern
0973-0005615	–						
0974-0005565	587744045858750585	22,11	20,25	19,12	18,57	18,19	Galaxie

Tabelle 3.4: Assoziationen der selektierten USNO-Kandidaten mit Objekten des SDSS-7-Kataloges; von links nach rechts werden die Bezeichnungen in den beiden Katalogen, die Magnituden der SDSS-Datensammlung sowie der Objekttyp angegeben; die ersten vier Quellen entfallen auf die quadratischen Unsicherheitsregion der Schwerpunktsposition, die weiteren Kandidaten bezeichnen die zusätzlichen Objekte der kreisförmigen Fehlerregion; (*Die Daten der SDSS-7-Datensammlung konnten unter <http://cas.sdss.org/astrodr7/en/tools/search/radial.asp> eingesehen werden*).

Die Betrachtung des Objekttyps zeigt somit unter den neun betrachteten Quellen lediglich drei Galaxien. Als Sterne charakterisierte Objekte hingegen, können für die Emission der nicht-thermischen Photonen abgelehnt werden.

3.3 Mögliche Gegenstücke im Radiobereich

Dieser Abschnitt soll einen ausführlichen Einblick in die Charakteristika der umliegenden Radioquellen bieten, da diese als mögliche Emittter der detektierten Fermi-Photonen gedeutet werden können.

Die Berechnung des Photonenschwerpunktes des Abschnitts 2.2.2 beschreibt eine Verschiebung der Koordinaten der Quelle von etwa 5arcmin aufgrund der Erweiterung des Datensatzes auf das sechste Photon (43,8GeV). Dies unterstützt die Überlegung, dass infolge der Beobachtung weiterer Photonen von dieser Quelle eine erneute, deutliche Verschiebung der Schwerpunktskoordinaten zu erwarten ist. In dieser Arbeit wird somit die Betrachtung möglicher Gegenstücke auf alle Radioquellen in einem Radius von $r = 10\text{arcmin}$ erweitert.

Abbildung 3.8 zeigt eine Übersicht der räumlichen Verteilung dieser Quellen im Vergleich zu den Unsicherheitsregionen des Photonenschwerpunktes. Innerhalb eines Radius' von $r = 10\text{arcmin}$ um den Photonenschwerpunkt zeigt der NVSS-Katalog insgesamt sechs Radioobjekte, von welchen sich lediglich eine Quelle (NVSS 003119+072456) innerhalb der quadratischen

sowie der kreisförmigen 95%-Fehlerregion befindet (vgl. Tabelle 3.5). Ebenfalls die Radioquelle NVSS J003030+072132, welche innerhalb der ursprünglichen Fermi-Ellipse positioniert ist, findet sich unter diesen Objekten wieder. Aufgrund der Verschiebung des Photonenschwerpunkts liegt diese nun außerhalb des 95%igen Fehlers auf der Quellenposition.

Eine anschließende, eingehendere Untersuchung der sechs Radioquellen befasst sich mit einer möglichen Assoziation dieser Objekte mit Einträgen des USNO-Katalogs innerhalb ihrer 95%-Unsicherheitsregionen. Auf die benötigten Positionsfehler der Radioobjekte sowie auf die Daten des USNO-Katalogs kann mittels der *DS9*-Software zugegriffen werden, sodass analog zu dem in Abschnitt 3.2.3 erläuterten Verfahren eine Übereinstimmung zwischen Objekten der beiden Datensammlungen geprüft wird. Lediglich zwei Radioquellen zeigen innerhalb ihrer 95%-Unsicherheit eine räumliche Übereinstimmung mit einem USNO-Objekt (vgl. Tabelle 3.6).

Mithilfe der bekannten Magnituden im Optischen sowie den Extinktionsparametern in Richtung der Photonenquelle (vgl. Abschnitt 3.2.2), ergeben sich, unter Verwendung der Gleichungen 3.3 und 3.4, für die beiden Radioquellen die folgenden Positionen im Zweifarbendiagramm:

$$\begin{aligned} \text{NVSS J003119+072456:} & \quad (B_0 - V_0) = 0,280^{\text{mag}} & \quad (U_0 - B_0) = 0,551^{\text{mag}} \\ \text{NVSS J003141+072409:} & \quad (B_0 - V_0) = 0,317^{\text{mag}} & \quad (U_0 - B_0) = 0,260^{\text{mag}} \end{aligned}$$

Für eine Auswertung dieser Sachverhalte präsentiert Abbildung 3.9 zusätzlich die Fehler auf die Magnituden gemäß des USNO-Katalogs ($\sigma_{(B_0-V_0)} = \sigma_{(U_0-B_0)} = 2 \cdot \sqrt{2}$). Des Weiteren wird der Verlauf der Hauptreihe sowie die Unsicherheitsellipse für die Position der mittleren Charakteristika für AGN mit einem spektralen Index von $\Gamma < 2$ dargestellt. Diese Grafik verdeutlicht, dass die beiden Radioquellen lediglich mit einer geringen Wahrscheinlichkeit die Eigenschaften der AGN des geforderten spektralen Verlaufs wiedergeben.

Ebenfalls zeigen beide Objekte einen Fluss von nur wenigen mJy bei 1,4 GHz, sodass sich nach Abdo *et al.* (2010b) eine Detektion dieser Quellen mittels des Fermi-LAT mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = \frac{10}{709} = 0,014$ als sehr unwahrscheinlich herausstellt (vgl. Abschnitt 1.4).

Infolgedessen kann ebenfalls die Radioquelle NVSS J003119+072456 trotz ihrer geringen Distanz zum Photonenschwerpunkt mit sehr großer Wahrscheinlichkeit als Gegenstück der unassoziierten Fermi-Quelle abgelehnt werden.

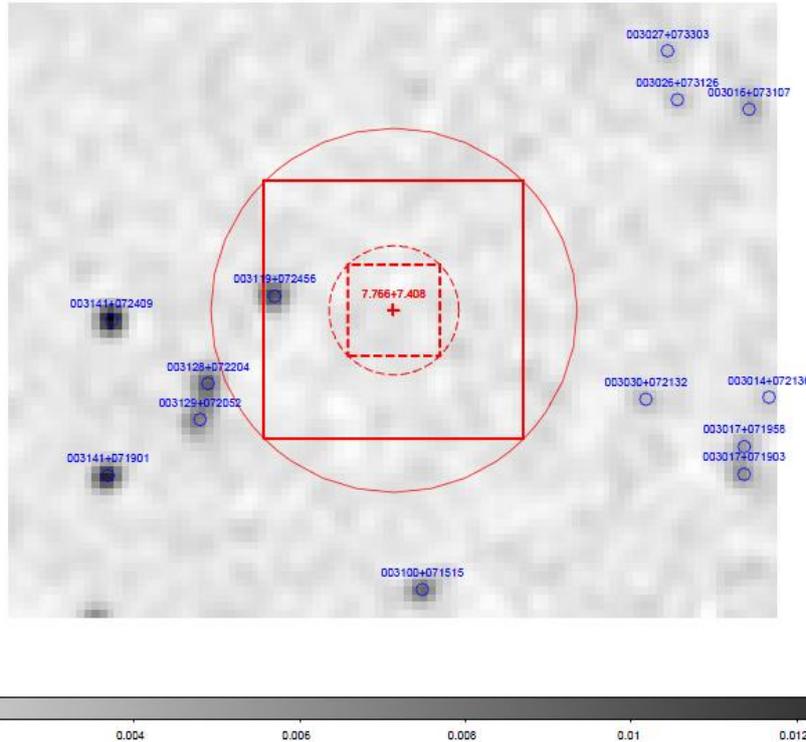


Abbildung 3.8: Umliegende NVSS-Quellen (blau) des Photonenschwerpunkts (rot); die Hintergrundaufnahme entspricht einem 25x20 Bogenminuten Ausschnitt aus dem NVSS-Katalog mit invertierter Farbskala.

NVSS	Quellentyp	Ra [deg]	Dec [deg]	Distanz [arcmin]	Fluss bei 1,4GHz [mJy]
J003119+072456	Radioquelle	7,832	7,416	3,93	10,8
J003128+072204	Radioquelle	7,869	7,368	6,55	11,2
J003129+072052	Radioquelle	7,873	7,348	7,3	10,8
J003030+072132	Radioquelle	7,627	7,359	8,8	5,8
J003141+072409	Radioquelle	7,922	7,403	9,26	12,1
J003100+071515	Radioquelle	7,750	7,254	9,28	10,2

Tabelle 3.5: Übersicht der beobachteten NVSS-Objekte in einem Radius von $r = 10$ arcmin um den Photonenschwerpunkt (Die beschriebenen Objektdaten sind mittels der Software DS9 zugänglich).

NVSS	USNO-B1.0	B [mag]	R [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
J003119+072456	0974-0005617	19,435	18,4	18,67	20,05	19,173
J003141+072409	0974-0005684	20,565	19,41	18,74	20,884	20,196

Tabelle 3.6: Zusammenfassung der Assoziationen von Radioquellen mit Objekten des USNO-Katalogs; zusätzlich werden die Helligkeiten in den einzelnen optischen Bändern angegeben, wobei bei einer wiederholten Detektion in einem der Farbbänder *B* oder *R* jeweils die mittlere Helligkeit dargestellt wird (Die Informationen der USNO-Quellen können dem USNO-Katalog unter <http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/icas/fchpix> entnommen werden.).

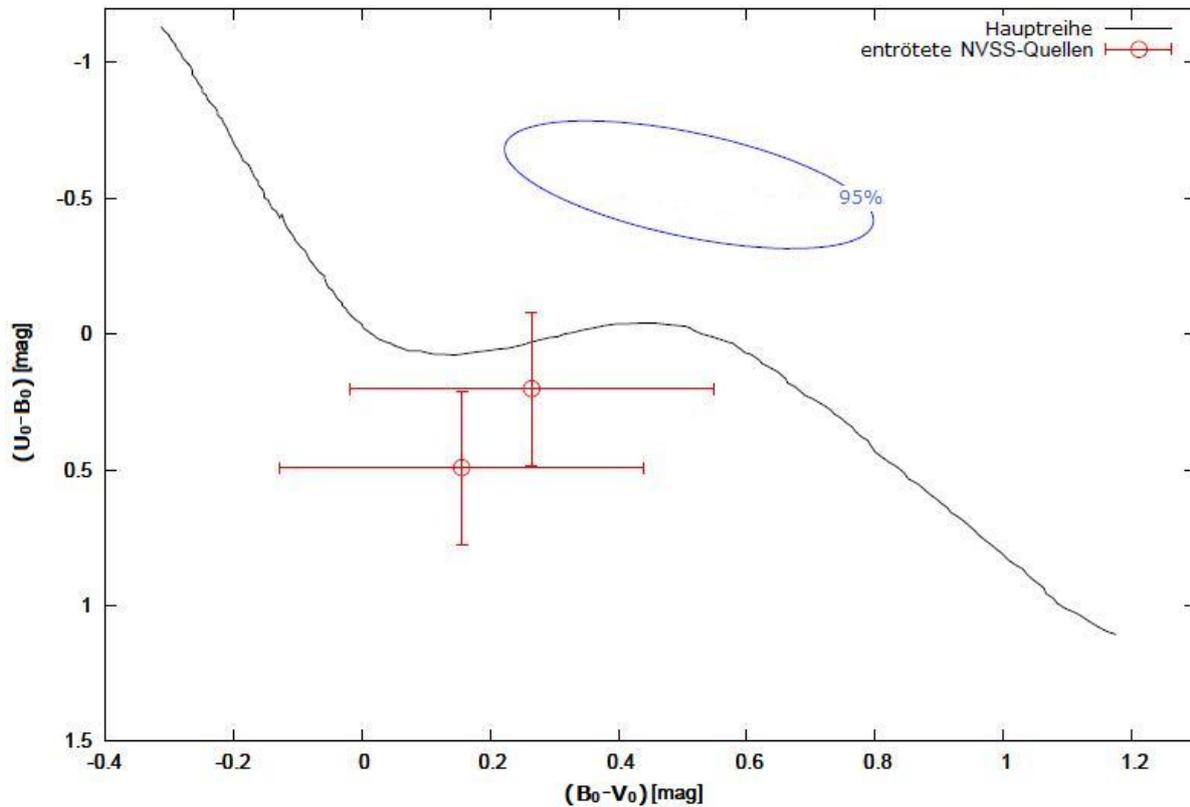


Abbildung 3.9: Zweifarbendiagramm der Radioquellen, welche mit einem USNO-Objekt assoziiert werden können; zusätzlich werden die Fehler auf die Helligkeiten der beiden Objekte, die Hauptreihe sowie die Unsicherheitsregionen auf die AGN-Charakteristika mit spektralem Index von $\Gamma < 2$ dargestellt.

3.4 Untersuchungen im Röntgenbereich

Eine abschließende Untersuchung der Fermi-Quelle 1FGL J0030.7+0724 beinhaltet eine Betrachtung von Röntgendaten der ROSAT-Mission. Im Verlauf dieser Himmelsdurchmusterung konnte kein Objekt in der Region der möglichen Dunklen Materie-Quelle detektiert werden, so dass im Verlauf dieser Arbeit eine obere Grenze des Flusses (*Upper Limit*) im Röntgenbereich berechnet wird.

Wie in Abschnitt 1.5 des einleitenden Kapitels bereits erwähnt, zeigen Blazare in ihrem spektralen Verlauf bei Energien im Röntgen- sowie im Gammabereich jeweils ein markantes Maximum. Für geringe bolometrische Helligkeiten gleichen sich die Intensitäten dieser beiden Maxima an. Eine kritische Betrachtung des berechneten *Upper Limits* im Vergleich zu den detektierten Flusspunkten des Fermi-LAT kann somit die Blazar-Charakteristika dieser Quelle hervorheben bzw. ablehnen.

3.4.1 Die ROSAT-Mission⁶

Der Röntgen Satellit (ROSAT) durchmusterte in den Jahren zwischen Juni 1990 bis Februar 1999 den gesamten Himmel im Röntgenbereich.

Das Hauptinstrument dieser Mission bildete der *Position-Sensitive Proportional Counter* (PSPC), eine Proportionalkammer, welche Photonen im Energiebereich zwischen 0,1 und 2,4keV nachwies sowie deren Energie und ursprüngliche Richtung berechnete.

Im Zentrum des PSPC-Aufbaus befand sich eine Kathode, aufgebaut aus einer gitterförmigen Leiterstruktur sowie einem Gasgemisch. Infolge der Wechselwirkung der Röntgenphotonen mit dem Gasgemisch durch den Photoeffekt entstand ein primäres, freies Elektron. Dieses wurde zur Anode beschleunigt und ionisierte folglich umliegende Atome. Die Stärke dieser sekundären Elektronenwolke zeigte eine Proportionalität zur Energie des ursprünglichen Röntgenphotons, sodass diese direkt über den an der Anode detektierten Puls bestimmt werden konnte. Die energetische Auflösung der PSPC zeigte die folgende Relation in Abhängigkeit von der Energie E des einfallenden Photons:

$$\frac{\Delta E}{E} = 0,43 \cdot \left(\frac{E[\text{keV}]}{0,93} \right)^{-0,5} \quad (3.12)$$

3.4.2 Berechnung der oberen Grenze auf den Röntgenfluss (Punktquelle)

Die Startseite der HEASARC-Website⁷ der NASA ermöglicht den Zugang zu den Daten der ROSAT-Mission. Die Datensätze könne dabei für den gesamten Energiebereich zwischen 0,1 und 2,4keV sowie für das weiche Band (0,1-0,4keV) und das harte Band (0,4-2,4keV) separat betrachtet werden. Zusätzlich werden in den Energiebereichen jeweils *fits*-Dateien des gesamten Signals sowie des simulierten Hintergrunds bereitgestellt.

Die Software *DS9* ermöglicht eine Betrachtung dieser Beobachtungsdaten in Relation zu der Quellenregion (vgl. Abbildung 3.10), wobei zusätzlich die Ausdehnung der Quellen gemäß der *likelihood*-Analyse von Zechlin (2010) dargestellt wird. Die umliegenden ROSAT-Quellen werden als grüne Markierungen eingefügt.

Bei der Annahme einer Punktquelle wird lediglich ein einzelner Pixel als die zu betrachtende Region (RoI: *Region of Interest*) definiert. Aufgrund der Photonenverteilung von maximal einem Photon pro Pixel innerhalb der 95%-Unsicherheitsregion der Quellenposition wird die

⁶Informationen bezüglich der ROSAT-Mission präsentiert deren Website unter <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/rosgof.html>.

⁷Die HEASARC-Website kann unter dem Link <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/> gefunden werden.

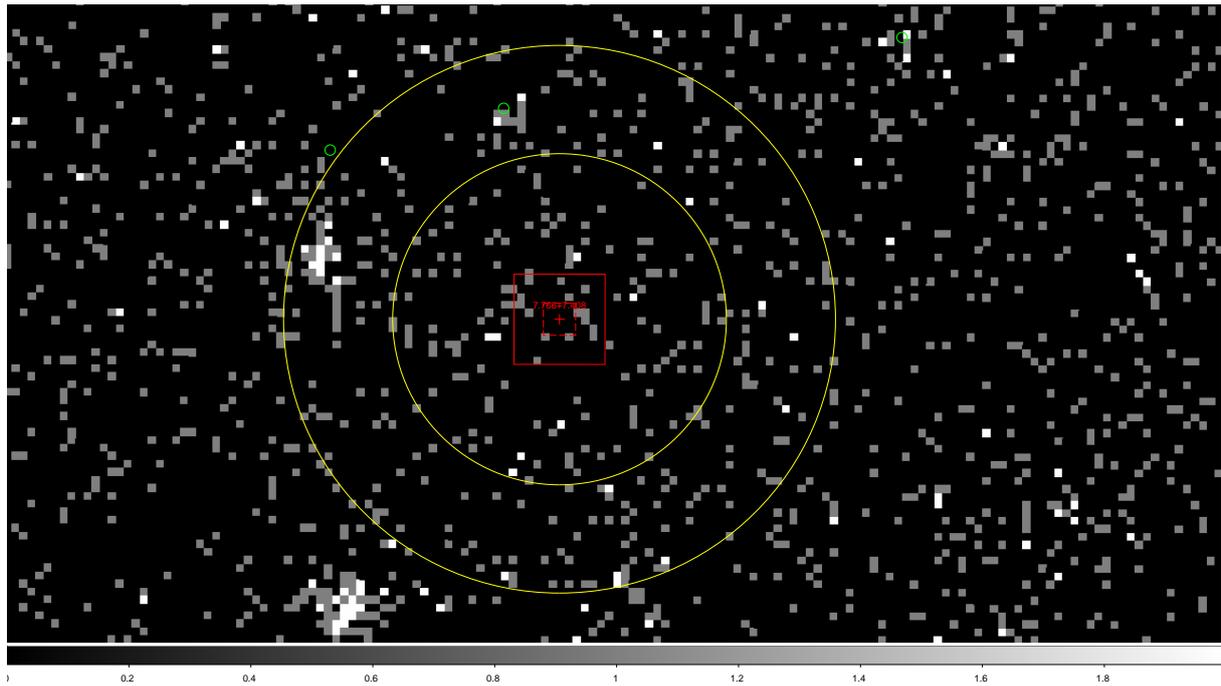


Abbildung 3.10: Detektierte Photonen im Energiebereich zwischen 0,1-2,4keV in der Region des Schwerpunktes der Fermi-Quelle (rot); in gelb sind die berechneten Ausdehnungen der 95% sowie der 99% *likelihood* präsentiert und in grün die umliegenden ROSAT-Quellen; (Die ROSAT-Daten entstammen der HEASARC-Webpage).

Emission der Punktquelle als jeweils ein Photon in den verschiedenen Energiebändern festgelegt ($N_{RoI} = 1$). Die entsprechende Anzahl von Hintergrundphotonen N_B für die jeweiligen Bänder zeigt über die Unsicherheitsregion einen nahezu konstanten Wert und wird somit gemittelt angegeben (vgl. Tabelle 3.7), sodass sich für die Anzahl der Quellenphotonen N_S folgende Relation ergibt:

$$N_S = N_{RoI} - N_B. \quad (3.13)$$

Die obere Grenze der Photonenzahl $N_{U.L.}$ wird analog zu den bisher berechneten Unsicherheiten als 95%-*Upper Limit* gewählt ($95\% \equiv 1,96\sigma$). Aufgrund der geringen Anzahl kann die einfache Poisson-Statistik nicht für die Berechnung exakter Werte hinzugezogen werden, welche sich mittels der Gleichung

$$N_{U.L.} = N_S + 1.96 \cdot \sqrt{N_S} \quad (3.14)$$

ergeben würden. Infolgedessen wird die Methodik von Feldman & Cousins (1998) betrachtet. Diese basiert ebenfalls auf der Poisson-Statistik und beschäftigt sich u.a. mit der Abschätzung eines *Upper Limits*, insofern trotz des vorhandenen Hintegrunds lediglich eine zu geringe Anzahl von Ereignissen registriert werden kann. Anhand von Tabellen zeigt die Ausarbeitung von

Energiebereich [keV]	N_{RoI}	N_{B}	N_{S}	$N_{\text{U.L.}}$ nach Gl. 3.14	$N_{\text{U.L.}}$ exakt	$R_{\text{U.L.}}$ [1/s]
0,1-2,4	1	0,095	0,905	2,77	5,14	0,03
0,1-0,4	1	0,056	0,944	2,85	5,14	0,03
0,4-2,4	1	0,031	0,969	2,90	5,14	0,03

Tabelle 3.7: Zusammenfassung der mittels der ROSAT-Daten erhaltenen Größen für die verschiedenen Energiebereiche; vergleichend werden sowohl das *Upper Limit* nach Gleichung 3.14 sowohl der exakte Wert gemäß der Ausarbeitung von Feldman & Cousins (1998) aufgeführt, die letzte Spalte zeigt den gemäß Gleichung 3.15 berechneten Photonfluss

Feldman & Cousins (1998) die gesuchten oberen Flussgrenzen in Abhängigkeit von der Photonenanzahl der Quelle sowie der des Hintergrunds. Tabelle 3.7 stellt die oberen Grenzen des Photonenflusses, welche mittels dieser beiden unterschiedlichen Methoden nach Poisson bzw. nach Feldman & Cousins (1998) gewonnen werden, vergleichend dar. Die weiteren Rechnungen basieren jedoch lediglich auf den Werten nach Feldman & Cousins (1998).

Nach der Bestimmung der oberen Grenze für die Anzahl der Quellenphotonen wird das *Upper Limit* der Photonenrate $R_{\text{U.L.}}$ mithilfe der Beobachtungszeit des ROSAT-Satelliten für diese Region ($t \approx 173\text{s}$) berechnet:

$$R_{\text{U.L.}} = \frac{N_{\text{U.L.}}}{t}. \quad (3.15)$$

Während ihrer Propagation zur Erde zeigen Röntgenphotonen aufgrund von Wasserstoffionisationsprozessen starke Absorptionen. Diese sind von der Säulendichte der Sichtlinie n_H abhängig. Die bestimmten Raten $R_{\text{U.L.}}$ geben folglich lediglich den abgeschwächten Fluss wieder. Die Säulendichte n_H sowie die wahren Flüsse für verschiedene spektrale Indizes können mittels einer Anwendung der HEASARC-Website (*Web-PIMMs*) bestimmt werden. Hierfür müssen lediglich die Quellenposition, der betrachtete Energiebereich sowie der geforderte spektrale Index angegeben werden. Tabelle 3.8 präsentiert die mittels dieser Anwendungen berechneten Daten für die spektralen Indizes $\Gamma = 1, 5; 2, 0; 3, 0$, wobei gemäß den Angaben der HEASARC-Webseite eine Säulendichte von $n_H = 4, 40 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{cm}^2}$ in die Rechnungen einfließt.

Die Wahl der spektralen Indizes basiert auf dem bekannten Verlauf von Blazar-Flussspektren im Gammabereich (Abdo *et al.* 2010b), sodass im Röntgenbereich, aufgrund der Vergleichbarkeit des Spektrums in diesen beiden Energiebereichen, dieselben Indizes angenommen werden.

Tabelle 3.8 zeigt einen Anstieg der unabsorbierten integrierten Flüsse in allen drei Energiebändern bei einer Erhöhung des spektralen Index⁸. Dieses kann anhand des Absorptionsverhaltens erklärt werden. Bei einem weicheren⁸ Spektrum wird aufgrund des stärkeren Anstiegs des spek-

⁸Spektrern mit hohen Indizes von $\Gamma > 1$ werden stets als *weich* bezeichnet, Spektrern mit geringen Indizes

Energiebereich [keV]	unabsorbierter integrierter Fluss [10^{-12} ergs/(cm ² s)]		
	$\Gamma=1,5$	$\Gamma=2,0$	$\Gamma=3,0$
0,1-2,4	0,597	0,706	1,336
0,1-0,4	1,615	1,782	2,415
0,4-2,4	0,490	0,481	0,512

Tabelle 3.8: Präsentation der unabsorbierten integrierten Flüsse in den drei verschiedenen Energiebändern für die spektralen Indizes $\Gamma=1,5;2,0;3,0$; die Flüsse werden jeweils in der Einheit 10^{-12} ergs/(cm²s) angegeben und können mittels der Anwendungen der HEASARC-Homepage ermittelt werden.

tralen Verlaufs eine größere Anzahl von Photonen absorbiert. Diese Anzahl muss für die Angabe des wahren Flusses dem scheinbaren Wert hinzugefügt werden, sodass der unabsorbierte Fluss stärker ausfällt als der Fluss eines Spektrums mit einem geringeren Index.

Einen Vergleich der berechneten oberen Grenze des Röntgenflusses mit der SED-Grafik eines Blazars zeigt Abbildung 3.11 (Horns 2010)⁹.

Da das Radioobjekt NVSS J003119+072456 aufgrund seiner Position im Zweifarbendiagramm als wahrscheinliches Gegenstück der Fermi-Quelle ausgeschlossen werden kann (vgl. Abschnitt 3.3), stützt sich die folgende Argumentation auf einen unbeobachteten Blazar als Emmitter der Photonen. Diesem wird ein geringer Fluss von 3mJy zugeordnet, um die fehlende Detektion im Fermi-LAT erklären zu können. Der Verlauf der spektralen Energieverteilung basiert dabei auf einer Ausarbeitung von Fossati (1998) und ändert sich je nach angenommenem Fluss bei einer bestimmten Frequenz. Der äußerste, linke Flusspunkt der Abbildung beschreibt diesen Stützpunkt des spektralen Verlaufs für einen Fluss von 3mJy bei einer Frequenz von 4,8GHz (aufgrund des flachen Verlaufs des Blazar-Spektrums entspricht dies einem gleichen Fluss bei 1,4GHz (Abdo *et al.* 2010b)). Die roten Datenpunkte beschreiben die beobachteten Flusswerte der Fermi-Quelle im Gammabereich, die stärkeren Linien die Schwelle für eine 5σ -Detektion mit MAGIC bzw. mit HESS. Für den Verlauf der Absorption des beobachteten Flusses (gestrichelte Linie) wird eine Rotverschiebung von $z = 0,2$ angenommen sowie ein *Extragalactic Background Light* nach der Veröffentlichung von Aharonian *et al.* (2006b).

Für den Flusspunkt des *Upper Limits* der zu untersuchenden Fermi-Quelle im Röntgenbereich wird ein Wert von $1,336 \cdot 10^{-12}$ ergs/(cm²s), welcher für den spektralen Index von $\Gamma=3,0$ und das Energieintervall von 0,1-2,4keV errechnet werden kann, verwendet. Dieser Index zeigt den stärksten Fluss der betrachteten Potenzspektren für den gesamten Energiebereich.

hingegen als *hart*.

⁹Die Überlegungen, welche in diese Grafik mit einfließen, wurden von Prof. Horns durchgeführt und sollen an dieser Stelle nur kurz erwähnt werden.

Anhand dieser SED-Grafik wird verdeutlicht, dass die von Fermi detektierten Flusspunkte im Gammabereich ein Spektrum höherer Luminosität voraussagen würden. Da für die betrachteten, geringen Flüsse von wenigen mJy die Maxima beider Energiebereiche eine ähnliche Intensität zeigen (Donato *et al.* 2001), würde eine Anhebung des Spektrums das berechnete *Upper Limit* im Röntgenbereich übersteigen.

Die Anpassung eines Blazar-Spektrums an die beobachteten Daten der Fermi-Quelle gelingt mit diesem *Upper Limit* folglich nicht. Ein Blazar kann somit eventuell als Emitter dieser nicht-thermischen Strahlung abgelehnt werden.

Untersuchungen von Blazaren zeigen jedoch aufgrund ihrer Variabilität oftmals Beobachtungszeiten in der Größenordnung von mehreren 10^3 s. Folglich besteht die Möglichkeit, dass während der kurzen ROSAT-Detektion von 173s lediglich das Intensitätsminimum des Blazars beobachtet wurde. Ein *Upper Limit* des Flusses, gemittelt über den gesamten Intensitätsbereich, könnte somit dennoch den geforderten spektralen Verlauf reproduzieren.

Handelt es sich bei dem Gegenstück dieses Objekts dennoch um ein AGN, so wäre ebenfalls ein bisher unbekannter Beschleunigungsmechanismus denkbar.

3.4.3 Berechnung der oberen Grenze auf den Röntgenfluss (ausgedehnte Quelle)

In Abschnitt 2.3 wurde bereits die mögliche Ausdehnung der Photonenquelle dargestellt. Für die beiden Ausdehnungen der 95%- sowie der 99%-*likelihood* werden daher ebenfalls die oberen unabsorbierten Flussgrenzen berechnet. Ausgedehnte Quellen beschreiben dabei Objekte, welche aufgrund einer geringen Distanz zum Beobachter einen gewissen Bereich des Himmels einnehmen und nicht als punktförmig bezeichnet werden können. Bei der anschließenden Berechnung der oberen Flussgrenzen wird folglich von galaktischen Quellen als Emitter der Photonen ausgegangen und somit der Blazar-Aspekt vernachlässigt.

Als *Region of Interest* wird in dieser Untersuchung eine kreisförmige Region mit der berechneten Ausdehnung von 0,26deg (95%) bzw. von 0,43deg (99%) als Radius gewählt. Mittels der HEASARC *funtools*-Software können die Photonenzahlen aus den *fits*-Dateien der ROSAT-Mission für diese Regionen abgezählt werden. Ebenfalls erleichtert dieses Programm die Bestimmung der mittleren Beobachtungszeiten, indem die Zeitangaben der einzelnen Pixel zusammengezählt und die Summe anschließend durch die Gesamtzahl der Pixel dividiert wird. Somit

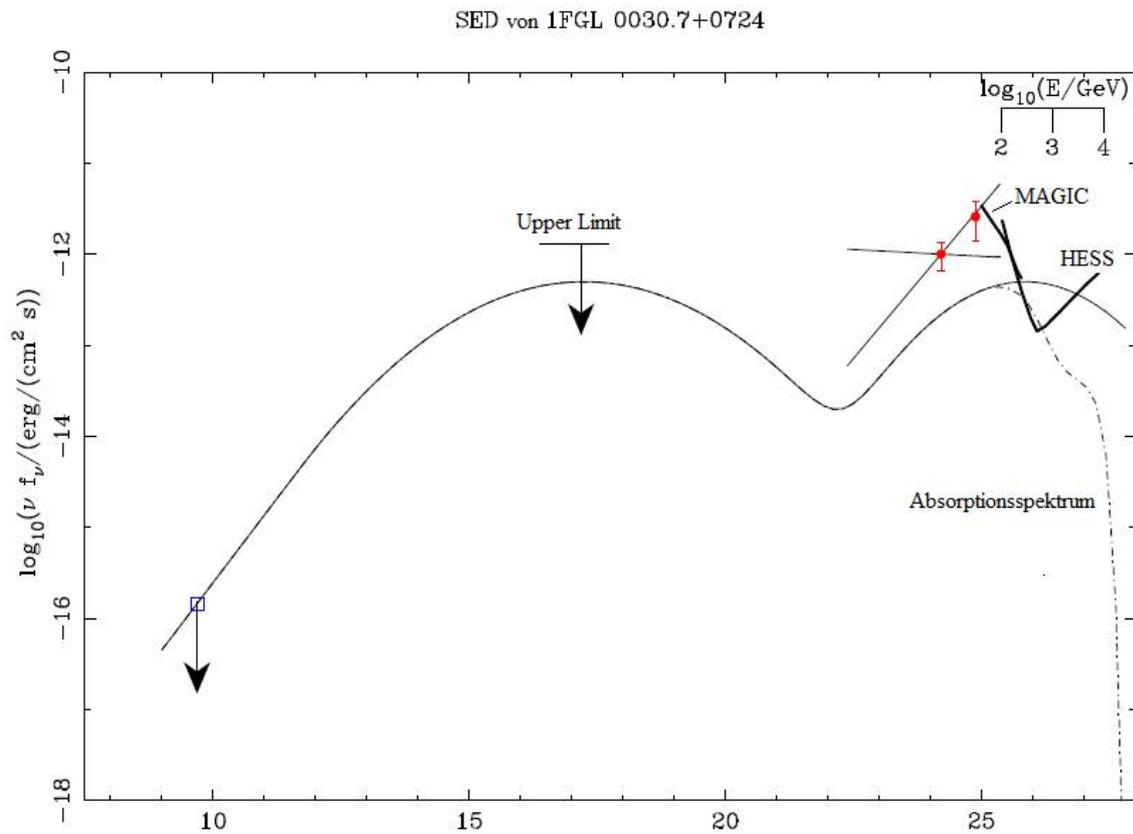


Abbildung 3.11: Spektrales Energieschema für einen Blazar mit einem Fluss von 3mJy bei 4,8GHz; zusätzlich sind die berechnete, obere Grenze des Röntgenflusses sowie die vom Fermi-LAT detektierten Flusspunkte der untersuchten Quelle im Gammabereich (rot) eingetragen; im Gammabereich werden ebenfalls die Sensitivitäten von HESS und MAGIC aufgeführt sowie die Schwächung des Flusses aufgrund von Absorptionsprozessen (gestrichelte Linie) (Horns 2010).

Ausdehnung [deg]	Energiebereich [keV]	N_{RoI}	N_{B}	N_{S}	$N_{\text{U.L.}}$	$R_{\text{U.L.}}$ [1/s]
0,26	0,1-2,4	141,00	128,52	12,48	15,25	0,088
	0,1-0,4	77,00	75,44	1,56	4,00	0,023
	0,4-2,4	58,00	41,29	16,2	16,741	0,097
0,43	0,1-2,4	429,00	351,07	77,93	95,23	0,553
	0,1-0,4	242,00	206,35	35,65	47,35	0,275
	0,4-2,4	166,00	122,8	43,20	56,08	0,326

Tabelle 3.9: Zusammenfassung der mittels der ROSAT-Daten erhaltenen Größen für die verschiedenen Energiebereiche sowie für die beiden Ausdehnungen der 95%- sowie der 99%-likelihood.

Ausdehnung [deg]	Energiebereich [keV]	unabsorbierter integrierter Fluss [10^{-12} ergs/(cm^2s)]		
		$\Gamma=1,5$	$\Gamma=2,0$	$\Gamma=3,0$
0,26	0,1-2,4	1,752	2,071	3,919
	0,1-0,4	1,238	1,366	1,851
	0,4-2,4	2,338	2,293	2,442
0,43	0,1-2,4	11,01	13,02	24,63
	0,1-0,4	14,81	16,33	22,13
	0,4-2,4	5,33	5,23	5,57

Tabelle 3.10: Präsentation der unabsorbierten integrierten Flüsse in den drei verschiedenen Energiebändern für die spektralen Indizes $\Gamma=1,5;2,0;3,0$ sowie für die beiden betrachteten Quellenausdehnungen; die Flüsse werden erneut in der Einheit 10^{-12} ergs/(cm^2s) angegeben und können mittels der Anwendungen der HEASARC-Website ermittelt werden.

ergeben sich Beobachtungszeiten von:

$$\langle t \rangle_{0,26\text{deg}} = 173, 17\text{s} \quad , \quad \langle t \rangle_{0,43\text{deg}} = 172, 47\text{s}.$$

Analog zu der Argumentation des vorherigen Abschnittes können mithilfe dieser Größen die obere mögliche Grenze der Photonenrate $R_{U.L.}$ sowie anschließend das 95%-Upper-Limit des integrierten unabsorbierten Flusses berechnet werden (vgl. Tabelle 3.9). Aufgrund der hohen Photonenzahlen dieser Regionen basieren die oberen Grenzen der Quellenphotonen $N_{U.L.}$ jedoch auf der gewöhnlichen Poisson-Verteilung gemäß Gleichung 3.14.

Tabelle 3.10 präsentiert die unabsorbierten integrierten Flüsse der beiden ausgedehnten Quellenregionen für die 95%- sowie die 99%-likelihood, welche erneut mittels den Anwendungen der HEASARC-Website bestimmt werden. Analog zu den Berechnungen bezüglich der Punktquelle werden auch an dieser Stelle spektrale Indizes von $\Gamma=1,5;2,0;3,0$ gemäß des Verlaufs von Blazar-Spektren gewählt. Die Säulendichte des Wasserstoffs wird erneut als $n_H = 4, 40 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{cm}^2}$ angenommen.

Im Unterschied zu den oberen Flussgrenzen der Punktquelle zeigen die Berechnungen eines ausgedehnten Objektes unabsorbierte integrierte Flüsse in der Größenordnung von 10^{-11} ergs/(cm^2s). Diese fallen somit allgemein um eine Zehnerpotenz höher aus als die Flüsse der Punktquelle. Die stärksten Luminositäten können auch in diesen Überlegungen für einen spektralen Index von $\Gamma=3,0$ erzielt werden.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit wurde eine Untersuchung der bislang unassoziierten Fermi-Quelle 1FGL J0030.7+0724 durchgeführt, in Folge welcher mögliche Gegenstücke dieses Objektes herausgefiltert und deren Charakteristika mit den Eigenschaften von Blazaren verglichen wurden.

Vielteilchensimulationen wie beispielsweise *Aquarius* oder *Via Lactea II* zeigen die Bildung von Dunkle Materie-Substrukturen innerhalb der galaktischen Halo. Von diesen Regionen wird daher ein Signal von Dunkle MAterie-Selbstannihilationsprozessen erwartet wird. Das Fermi-LAT weist eine Sensitivität für Photonen im entsprechenden Energiebereich auf, wodurch diese Mission geeignete Voraussetzungen für die Detektion einer solchen Struktur zeigt. Die oben genannte Fermi-Quelle weist die geforderten Eigenschaften einer möglichen Dunkle Materie-Substruktur auf, sodass diese Interpretation des Quellentyps eingehender untersucht werden sollte.

In den ersten 21 Missionsmonaten detektierte das Fermi-LAT insgesamt sechs Photonen im Energiebereich zwischen 10-100GeV, welche dieser Quelle zugeordnet werden können. Der erste Abschnitt dieser Arbeit beschäftigte sich mit einer Positionsbestimmung des Photonen-schwerpunktes. Mithilfe der PSF des Fermi-LAT wurden hierfür vorerst die Unsicherheiten der Positionen der einzelnen Photonen berechnet. Mithilfe dieser Positionsfehler konnte der gewichtete Photonenschwerpunkt und somit die Quellenposition gemäß der Gauß'schen Statistik als die folgenden Koordinaten bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \text{Rektaszension:} & \quad (7,766 \pm 0,025)\text{deg} & \quad (\sigma_{95} = 0,071\text{deg}) \\ \text{Deklination:} & \quad (7,408 \pm 0,025)\text{deg} & \quad (\sigma_{95} = 0,071\text{deg}) \end{aligned}$$

Dies entspricht einer Verschiebung der Quellenposition um etwa 5 Bogenminuten im Vergleich zu den Angaben des ersten Fermi-Katalogs.

Neben den angegebenen Unsicherheiten einer quadratischen Fehlerregion wurden zusätzlich ein konservativerer Ansatz einer kreisförmigen Fehlerregion, welche die quadratischen Fehler umschließt, betrachtet.

Im Anschluss wurde eine Gegenstücksuche in verschiedenen Wellenlängenbereichen durchgeführt, welche insbesondere auf den Katalogen USNO-B1.0, 2MASS, SDSS sowie NVSS beruhte. Die USNO-Datensammlung zeigt insgesamt 154 Quellen in der quadratischen und 238 Quellen in der kreisförmigen 95%igen Fehlerregion. Diese Objekte wurden anschließend auf eine mögliche Emission des beobachteten Spektrums der Fermi-Quelle untersucht. Hierfür wurden die USNO-Objekte sowie die Fermi-AGN mit einem spektralen Index von $\Gamma < 2,0$ in einem Zweifarbendiagramm dargestellt. Lediglich neun USNO-Objekte aus der kreisförmigen 95%-Unsicherheitsregion des Photonenschwerpunktes zeigten innerhalb ihrer Fehler eine Übereinstimmung mit den mittleren Charakteristika der AGN.

Diese selektierten Objekte wurden anschließend auf Assoziationen in den Katalogen 2MASS sowie SDSS untersucht, um anhand weiterer spektraler Eigenschaften auf den möglichen Objekttyp dieser Quellen eingehen zu können. Hierbei wurden insgesamt drei Galaxien als Kandidaten für die Emission der Photonen herausgefiltert:

USNO-B1.0 0973-0005603

USNO-B1.0 0974-0005537

USNO-B1.0 0974-0005565

Diese Objekte zeigten jedoch keine Gegenstücke im Radiobereich mit einem größeren Fluss als 2,5mJy. Dies stellt eine Detektion mittels des Fermi-LATs nach Abdo *et al.* (2010b) als unwahrscheinlich dar, sodass eine mögliche Emission der nicht-thermischen Photonen von diesen Objekten als sehr fraglich erscheint.

Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Hälfte der USNO-Objekte, aufgrund von zu geringen Informationen bezüglich ihrer Magnituden in den verschiedenen Farbbändern, von einer Darstellung im Zweifarbendiagramm ausgeschlossen werden musste. Diese Quellen konnten folglich nicht weiter betrachtet und auf mögliche AGN-Charakteristika untersucht werden.

Eine anschließende Durchmusterung einer kreisförmigen Region mit einem Radius von 10 Bogenminuten um den Photonenschwerpunkt im Radiobereich zeigte sechs Quellen, von denen sich nur eines der Objekte innerhalb der quadratischen sowie kreisförmigen 95%-Unsicherheitsregion der Quellenposition befand. Ebenfalls weisen diese Radioobjekte lediglich Flüsse von wenigen

mJy bei 1,4GHz auf, welches die Wahrscheinlichkeit für eine Identifikation mit der Photonenquelle gemäß Abdo *et al.* (2010b) stark reduzierte. Für zwei der Objekte konnte eine Assoziation mit einer USNO-Quelle vorgenommen werden. Im Zweifarbendiagramm ergab sich eine Übereinstimmung der Eigenschaften dieser Quellen mit den mittleren Charakteristika der Fermi-AGN mit $\Gamma < 2,0$ jedoch als unwahrscheinlich. Sonst zeigte sich ebenfalls bei der Suche im Radiobereich kein markanter Gegenstück-Kandidat für die Fermi-Quelle.

Zum Abschluss wurde eine Berechnung der oberen Grenze des Flusses im Röntgenbereich anhand der ROSAT-Daten durchgeführt. Mithilfe des bestimmten *Upper Limits* für eine Punktquelle wurde der spektrale Energieverlauf eines möglichen Blazars in dieser Region dargestellt. Das Spektrum konnte jedoch den gemessenen Energiefluss der Photonen im Gammabereich nicht wiedergeben. Diese Gegebenheit verringerte die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei dem Fermi-Objekt um einen Blazar handelt bzw. ermöglichte Überlegungen bezüglich eines bisher unbekanntem Beschleunigungsmechanismen von Blazaren.

Im Verlauf dieser Untersuchungen zeigten sich folglich keine vielversprechenden Gegenstücke für die Fermi-Quelle 1FGL J0030.7+0724. Ebenfalls die Möglichkeit eines Blazars als Emittter der Strahlung tritt als unwahrscheinlich hervor. Die Interpretation einer Dunklen Materie-Substruktur als Objekttyp konnte somit nicht ausgeschlossen, sondern viel eher untermauert werden.

Eine endgültige Festlegung des Objekttyps erfordert jedoch noch weitere Untersuchungen.

Für die Fortsetzung der Analyse dieser Fermi-Quelle wäre eine erweiterte Suche in der SDSS denkbar, da diese Datensammlung ebenfalls Assoziationen der Objekte mit Quellen weiterer Kataloge beschreibt. Zusätzlich beinhaltet dieser Katalog bereits eine Charakterisierung der Quellen bezüglich ihres Objekttyps. Leider waren die Daten der SDSS-7, welche die Beobachtung des relevanten Himmelsabschnittes beschreiben, erst gegen Ende dieser Arbeit zugänglich, sodass die Suche nach Gegenstücken vorerst auf dem USNO-Katalog aufgebaut wurde.

Eine Beobachtung der Quelle mittels des HESS-Teleskops wurde bereits von Zechlin *et al.* (2010) beantragt. Mithilfe einer derartigen Beobachtung könnte die mögliche Position der Quelle auf eine kleinere Region beschränkt werden, welches eine Assoziation mit Objekten anderer Wellenlängen vereinfachen würde. Ebenfalls ist eine Folgebeobachtung dieser Region mithilfe des SWIFT-Satelliten denkbar, welcher aufgrund seiner verbesserten Sensitivität und einer längeren Beobachtungszeit gegenüber ROSAT, die Überlegungen bezüglich einer Röntgenquelle

aufgreifen könnte.

Die Natur der Dunklen Materie konnte bislang lediglich in Ansätzen erarbeitet werden und es sind ebenfalls weitere Analysen notwendig um die Dunkle Materie-Charakteristik der betrachteten Fermi-Quelle eindeutig annehmen zu können. Mithilfe des Fermi-Satelliten ist jedoch die Detektion einer derartigen Substruktur in den kommenden Jahren durchaus denkbar, sodass ein weiterer Schritt auf die Lösung des Rätsels der Dunklen Materie zugegangen werden kann.

Anhang A

Auflistung umgebender Quellen

In diesem Kapitel des Anhangs sollen einerseits die bekannten USNO-Quellen der 95%igen quadratischen sowie der 95%igen kreisförmigen Fehlerregion, geordnet nach ihrer Rektaszension, aufgelistet werden. Die Tabellen geben in den ersten drei Spalten die Bezeichnung der Quelle im USNO-Katalog sowie deren Koordinaten (J2000) wieder. Zusätzlich werden die Fehler der Positionen in Millibogensekunden und die Distanz des USNO-Objekts vom Photonschwerpunkt dargestellt. Die letzten sieben Spalten zeigen die Magnituden in den Farbbänder *BRIUV*, wobei die Bänder *U* sowie *V* die geschätzten Magnituden wiedergeben. Leider konnten diese nicht für alle Quellen im Katalog angegeben werden. Die Magnituden mit dem Index 1 bzw. 2 beschreiben die Detektionen während zwei verschiedener Durchmusterungen.

Andererseits präsentiert dieses Kapitel ebenfalls eine zusammenfassende Tabelle der neun selektierten USNO-Objekte mit ihren Assoziationen im 2MASS-Katalog sowie in der SDSS.

Tabelle A.1: USNO-Quellen der quadratischen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005514	7,6970	7,4213	80	200	0,0700	20,57	19,56	19,76	18,85	20,58	20,15	
0974-0005515	7,6971	7,4729	202	213	0,0944	20,59	20,13	18,41	18,71	17,44	20,56	19,33
0974-0005516	7,6978	7,4750	44	114	0,0954	18,56	19,55					
0974-0005517	7,6979	7,4757	436	325	0,0958	17,99	19,11					
0974-0005519	7,6980	7,4788	0,0980	12,62	11,92	10,78	10,72	10,22	12,12	11,26		
0974-0005520	7,6980	7,4719	639	999	0,0931	19,73	19,55					
0974-0005521	7,7019	7,4294	58	65	0,0674	14,33	13,79	13,24	12,71	12,23	13,89	13,21
0974-0005522	7,7029	7,4639	48	52	0,0841	20,55	20,44	18,57	18,52	17,13	21,31	19,40
0973-0005544	7,7035	7,3946	362	999	0,0637	20,35	19,52	19,65				
0974-0005523	7,7041	7,4406	483	63	0,0698	19,60	19,91	18,77				
0973-0005546	7,7042	7,3791	367	116	0,0681	20,95	19,55	20,21	20,97	20,57		
0973-0005547	7,7054	7,3621	50	54	0,0759	20,58	20,74	18,68	18,86	18,51	21,58	19,72
0973-0005548	7,7062	7,3760	133	55	0,0677	20,05	19,27	17,57	17,41	16,83	20,10	18,25
0974-0005524	7,7063	7,4623	215	233	0,0805	20,97	19,44	20,15	20,97	20,55		
0974-0005525	7,7069	7,4260	55	83	0,0616	14,51	14,23	13,80	13,38	12,71	14,24	13,79
0974-0005526	7,7084	7,4630	999	999	0,0794	19,59	19,05					
0974-0005527	7,7124	7,4385	24	7	0,0616	19,56	19,63	19,06				
0973-0005550	7,7125	7,3825	48	358	0,0591	19,55	19,92	19,11				
0973-0005551	7,7127	7,3708	999	999	0,0649	19,99	19,06					
0974-0005528	7,7133	7,4295	68	338	0,0568	19,53	19,72	18,46				
0974-0005529	7,7141	7,4715	999	667	0,0820	20,37	19,65	19,11				
0974-0005531	7,7200	7,4789	337	499	0,0845	20,79	19,62	20,96	20,15			
0973-0005553	7,7204	7,3485	182	0,0750	20,60	21,00	20,28	21,03	20,63			
0974-0005532	7,7205	7,4788	999	380	0,0841	21,04	20,38	21,09	20,71			
0973-0005555	7,7208	7,3485	999	854	0,0747	20,59	20,82					
0974-0005533	7,7209	7,4784	999	108	0,0835	20,65	19,45	19,38	20,92	19,94		

Tabelle A.1: USNO-Quellen der quadratischen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B_1 [mag]	B_2 [mag]	R_1 [mag]	R_2 [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005534	7,7214	7,4065	803	950	0,0446	20,99	19,54	21,45	20,18			
0973-0005556	7,7221	7,3435	120	205	0,0780	20,84	19,32	19,71	19,13	20,98	20,23	
0974-0005535	7,7222	7,4207	471	245	0,0456	20,74	19,54	20,94	20,08			
0974-0005538	7,7263	7,4185	882	894	0,0411	21,25	18,35					
0973-0005560	7,7290	7,3899	408	100	0,0412	19,85	19,48	18,32	18,24	18,28	19,72	18,79
0974-0005539	7,7343	7,4061	356	124	0,0318	20,33	18,94					
0973-0005562	7,7347	7,3914	55	208	0,0355	20,78	19,60	19,88	20,80	20,31		
0973-0005565	7,7366	7,3413	57	88	0,0729	20,57	20,41	17,81	18,34	16,56	21,39	19,29
0973-0005567	7,7384	7,3410	999	500	0,0725	21,08	18,75					
0974-0005540	7,7391	7,4178	999	829	0,0287	20,50	19,86					
0973-0005569	7,7412	7,3494	218	530	0,0638	20,96	18,74					
0973-0005570	7,7432	7,3758	180	195	0,0396	20,52	20,96	18,60	18,86	17,84	21,96	19,83
0973-0005571	7,7433	7,3508	999	999	0,0616	20,61	18,54					
0973-0005572	7,7447	7,3759	145	69	0,0387	20,99	19,12	19,07	18,75	21,86	19,95	
0974-0005541	7,7449	7,4002	143	999	0,0227	21,00	19,54					
0973-0005573	7,7454	7,3486	935	999	0,0630	21,00	19,57	18,70				
0973-0005576	7,7461	7,3496	39	229	0,0618	21,00	20,29	21,03	20,64			
0973-0005577	7,7461	7,3501	277	734	0,0613	20,92	20,14	20,93	20,52			
0973-0005578	7,7468	7,3501	999	859	0,0611	20,91	20,19	20,94	20,54			
0973-0005579	7,7492	7,3639	108	0,0473	20,90	19,60	19,80	21,02	20,30			
0974-0005544	7,7511	7,4372	141	834	0,0328	20,56	21,00	20,29	21,03	20,64		
0974-0005545	7,7511	7,4364	104	219	0,0321	20,59	21,08	20,32	21,10	20,69		
0973-0005582	7,7526	7,3591	28	97	0,0508	14,20	14,37	13,43	13,18	12,53	14,56	13,72
0973-0005584	7,7531	7,3716	999	999	0,0387	20,54	19,66					
0973-0005587	7,7539	7,3896	149	194	0,0221	19,52	19,54	19,12				
0974-0005547	7,7541	7,4768	14	69	0,0698	20,39	20,40	20,32	20,41			

Tabelle A.1: USNO-Quellen der quadratischen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005548	7,7541	7,4349	999	999	0,0295	20,56	19,06					
0974-0005549	7,7564	7,4584	49	60	0,0513	20,39	19,06					
0974-0005550	7,7584	7,4698	118	149	0,0622	19,57	18,54					
0974-0005551	7,7585	7,4695	74	395	0,0619	19,92	19,10					
0973-0005588	7,7585	7,3413	133	179	0,0672	20,51	19,87	20,56	20,19			
0973-0005589	7,7591	7,3498	999	999	0,0587	19,42	20,28					
0974-0005552	7,7595	7,4122	267	129	0,0079	19,60	20,38					
0974-0005553	7,7597	7,4420	52	221	0,0346	19,58	20,40	18,66				
0974-0005554	7,7610	7,4324	105	264	0,0249	20,59	20,27	18,60	18,84	17,79	20,71	19,47
0974-0005555	7,7622	7,4567	976	435	0,0488	21,07	20,30	21,09	20,68			
0974-0005557	7,7627	7,4256	777	45	0,0180	20,47	19,41	18,96				
0974-0005558	7,7631	7,4256	173	98	0,0178	19,91	19,09	19,30	18,39	19,97	19,60	
0974-0005559	7,7632	7,4252	580	935	0,0174	19,53	18,69					
0973-0005591	7,7646	7,3829	84	195	0,0252	20,29	20,65	19,29	19,79	20,66	20,20	
0974-0005560	7,7651	7,4063	144	179	0,0021	20,51	21,03	19,37	19,90	19,10	21,17	20,42
0974-0005562	7,7683	7,4664	584	119	0,0584	19,61	20,39					
0974-0005563	7,7705	7,4042	179	60	0,0056	20,56	20,57	17,90	18,09	16,68	21,80	19,26
0974-0005566	7,7724	7,4727	307	118	0,0649	20,70	20,35	18,84	20,81	20,53		
0974-0005567	7,7727	7,4166	74	64	0,0107	20,36	18,94					
0974-0005568	7,7734	7,4255	999	999	0,0188	20,93	18,57					
0974-0005569	7,7737	7,4511	141	139	0,0437	21,07	19,02	19,73	17,28	21,41	20,32	
0973-0005598	7,7755	7,3597	362	522	0,0492	20,50	19,59	20,39	20,55	20,46		
0974-0005570	7,7778	7,4436	261	298	0,0374	20,53	20,65	19,42	19,50	18,92	20,80	20,03
0973-0005599	7,7779	7,3787	139	106	0,0315	20,60	20,61	18,46	18,95	17,83	21,29	19,69
0973-0005600	7,7795	7,3876	942	999	0,0242	19,60	18,68					
0974-0005571	7,7796	7,4586	82	550	0,0522	20,49	21,00	20,23	21,02	20,61		

Tabelle A.1: USNO-Quellen der quadratischen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005572	7,7796	7,4447	143	335	0,0390	20,52	20,92					
0974-0005573	7,7799	7,4587	44	39	0,0524	20,52	20,64					
0974-0005574	7,7810	7,4690	81	100	0,0627	19,54	19,91	18,99				
0973-0005603	7,7810	7,3998	211	103	0,0167	20,42	19,30	18,79	18,81	18,28	19,39	19,05
0974-0005575	7,7814	7,4410	530	999	0,0362	19,60	19,92					
0973-0005605	7,7827	7,3967	70	120	0,0198	20,52	20,35	18,67	18,62	18,65	21,08	19,40
0974-0005576	7,7859	7,4368	441	365	0,0347	21,08	19,97	21,20	20,48			
0974-0005577	7,7861	7,4653	183	314	0,0605	21,12	19,56					
0974-0005578	7,7863	7,4370	37	354	0,0351	20,75	19,55	18,59	20,95	20,09		
0974-0005579	7,7867	7,4367	347	273	0,0351	20,77	19,60	19,76	18,97	20,83	20,23	
0973-0005608	7,7867	7,3705	78	114	0,0426	20,47	20,92	19,21	19,80	19,13	21,05	20,31
0974-0005580	7,7879	7,4788	128	229	0,0739	20,59	20,74	19,48	19,44	21,04	20,01	
0974-0005582	7,7893	7,4094	178	999	0,0229	19,58	18,64					
0973-0005610	7,7895	7,3915	172	123	0,0283	20,33	20,73	19,34	19,53	19,05	20,93	20,07
0974-0005583	7,7895	7,4097	88	199	0,0230	20,50	20,98	19,16	19,66	18,55	21,30	20,24
0974-0005585	7,7915	7,4207	228	240	0,0280	20,99	19,56	21,43	20,19			
0973-0005612	7,7929	7,3751	113	43	0,0421	20,98	19,12	19,52	18,97	21,45	20,16	
0973-0005613	7,7935	7,3602	223	999	0,0549	20,88	18,81					
0973-0005614	7,7937	7,3599	235	104	0,0553	19,70	18,98	18,73	18,41	19,75	19,18	
0973-0005617	7,7941	7,3461	999	39	0,0678	20,43	20,46					
0973-0005619	7,7948	7,3876	65	68	0,0348	20,75	19,30	19,48	18,55	21,02	20,04	
0974-0005586	7,7951	7,4260	93	173	0,0337	20,06	20,28	18,99	19,11	18,69	20,45	19,64
0974-0005587	7,7954	7,4293	114	325	0,0358	21,11	19,44	19,80	19,11	21,42	20,38	
0973-0005620	7,7958	7,3890	184	145	0,0349	20,50	20,50	18,59	18,31	18,34	21,56	19,33
0974-0005588	7,7958	7,4570	102	135	0,0570	20,50	20,57	19,46	19,90	20,61	20,23	
0973-0005621	7,7962	7,3918	353	216	0,0338	20,42	21,00	19,52	19,82	21,18	20,36	

Tabelle A.1: USNO-Quellen der quadratischen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005589	7,7963	7,4430	999	999	0,0459	19,60	19,61					
0974-0005591	7,7981	7,4313	739	171	0,0392	20,53	21,28	19,64	21,94	20,37		
0974-0005592	7,7990	7,4578	24	90	0,0594	19,97	19,63	17,13	17,08	16,64	20,87	18,28
0974-0005593	7,8000	7,4580	208	695	0,0601	20,58	19,41					
0974-0005594	7,8001	7,4508	210	104	0,0543	20,57	20,65	17,62	18,29	16,92	21,82	19,39
0973-0005625	7,8029	7,3673	221	215	0,0545	21,13	19,48	19,81	19,09	21,45	20,39	
0973-0005626	7,8038	7,3629	52	220	0,0585	20,62	19,54	20,39	20,71	20,52		
0974-0005597	7,8041	7,4303	169	19	0,0436	18,00	18,22	16,77	16,90	16,65	18,54	17,48
0973-0005627	7,8043	7,3980	38	81	0,0390	20,30	19,44	19,79	20,38	20,04		
0973-0005628	7,8044	7,3576	94	221	0,0630	20,39	20,99	18,88	18,81	18,09	22,05	19,82
0973-0005629	7,8044	7,3516	416	140	0,0680	19,48	19,58					
0974-0005598	7,8066	7,4570	599	620	0,0632	20,44	18,51					
0973-0005631	7,8083	7,3867	870	113	0,0468	20,71	19,45	19,72	18,76	20,76	20,18	
0974-0005599	7,8095	7,4236	132	25	0,0455	17,67	17,97	15,92	15,85	14,82	18,99	16,83
0973-0005632	7,8098	7,3420	12	8	0,0789	20,51	21,05	20,39	21,10	20,72		
0973-0005633	7,8098	7,3417	401	240	0,0791	20,85	25,72	24,11	25,57			
0974-0005600	7,8099	7,4044	25	346	0,0434	20,59	21,19	19,66	21,73	20,34		
0974-0005601	7,8104	7,4398	250	404	0,0540	20,52	21,01	20,34	21,05	20,67		
0973-0005634	7,8106	7,3466	107	37	0,0755	21,07	20,30	19,12	21,09	20,68		
0973-0005635	7,8110	7,3467	999	354	0,0757	18,97	19,66					
0973-0005636	7,8112	7,3472	999	999	0,0754	19,89	19,12					
0973-0005638	7,8141	7,3515	74	65	0,0738	20,77	18,44	18,62	18,01	21,81	19,62	
0974-0005602	7,8157	7,4207	101	86	0,0506	14,44	14,78	13,45	13,26	12,35	15,31	13,93
0974-0005603	7,8158	7,4700	97	252	0,0791	20,07	19,57	19,40	19,13	20,11	19,73	
0974-0005604	7,8161	7,4698	575	454	0,0791	20,54	18,27					
0973-0005641	7,8166	7,3936	91	157	0,0519	20,33	21,02	18,75	18,81	17,46	22,09	19,84

Tabelle A.1: USNO-Quellen der quadratischen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005605	7,8167	7,4070	999	174	0,0500	20,59	20,40					
0973-0005642	7,8167	7,3547	95	540	0,0731	19,46	19,92	18,57				
0974-0005606	7,8173	7,4077	788	999	0,0505	20,31	20,37					
0973-0005643	7,8176	7,3553	999	817	0,0732	20,58	20,39	18,69				
0974-0005607	7,8179	7,4471	999	359	0,0644	20,59	19,81					
0974-0005608	7,8212	7,4235	111	186	0,0566	21,27	19,46	20,40	18,70	21,28	20,82	
0973-0005645	7,8215	7,3480	104	24	0,0812	20,24	20,34	19,96	20,32			
0974-0005609	7,8219	7,4015	999	999	0,0555	20,37	19,13					
0974-0005610	7,8223	7,4336	126	54	0,0611	19,73	19,13	17,22	17,20	16,37	20,01	18,08
0973-0005648	7,8224	7,3553	999	164	0,0766	19,50	19,81					
0973-0005649	7,8227	7,3552	78	201	0,0770	20,52	21,05	19,30	18,57	21,80	20,09	
0973-0005650	7,8232	7,3999	517	157	0,0569	20,54	20,80	19,82	20,85	20,28		
0973-0005655	7,8255	7,3834	69	95	0,0637	20,59	21,08	19,91	21,25	20,44		
0974-0005614	7,8267	7,4082	272	309	0,0598	19,85	18,56					
0974-0005615	7,8273	7,4077	152	539	0,0605	20,94	20,37	19,09	21,01	20,65		
0973-0005657	7,8274	7,3750	436	204	0,0690	20,94	19,21	21,67	19,99			
0973-0005658	7,8275	7,3754	999	135	0,0689	21,04	19,77	21,31	20,33			
0973-0005659	7,8277	7,3748	79	254	0,0693	20,79	19,55	21,03	20,10			
0973-0005662	7,8289	7,3864	74	245	0,0658	19,34	18,72					
0974-0005617	7,8321	7,4149	75	91	0,0656	19,03	19,84	18,17	18,63	18,67	20,05	19,17
0974-0005618	7,8322	7,4060	191	68	0,0654	20,88	18,95	19,75	18,55	21,02	20,27	
0973-0005664	7,8335	7,3514	70	289	0,0874	21,07	19,61	19,89	19,12	21,25	20,43	
0974-0005619	7,8338	7,4623	999	845	0,0862	20,12	21,00					
0974-0005620	7,8370	7,4530	371	149	0,0833	20,61	19,66	20,65	20,11			

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0973-0005519	7,6681	7,3906	174	165	0,0989	20,96	19,05	18,85	19,05	21,97	19,82	
0973-0005521	7,6701	7,3922	999	870	0,0967	19,92	18,63					
0974-0005501	7,6719	7,4172	34	83	0,0941	16,80	16,90	15,79	15,34	14,88	17,48	16,03
0974-0005502	7,6747	7,4107	110	0	0,0909	21,06	19,58	20,03	21,13	20,51		
0973-0005528	7,6769	7,3705	133	90	0,0963	20,54	20,38	17,91	18,14	16,79	21,47	19,18
0973-0005529	7,6795	7,3856	133	221	0,0890	20,55	21,03	18,87	19,26	18,15	21,79	20,06
0973-0005531	7,6803	7,3777	120	35	0,0905	17,67	17,69	16,08	15,72	15,20	18,60	16,62
0974-0005505	7,6809	7,4485	148	999	0,0939	19,61	19,05					
0974-0005506	7,6810	7,4049	629	149	0,0847	19,37	20,33					
0974-0005507	7,6819	7,4555	203	999	0,0962	20,80	19,59					
0974-0005508	7,6838	7,4562	999	999	0,0950	20,51	19,61					
0974-0005510	7,6911	7,4093	475	55	0,0746	21,08	20,40	21,12	20,74			
0973-0005537	7,6927	7,3589	268	121	0,0880	20,92	19,05	19,31	18,43	21,55	20,03	
0974-0005514	7,6970	7,4213	80	200	0,0700	20,57	19,56	19,76	18,85	20,58	20,15	
0974-0005515	7,6971	7,4729	202	213	0,0944	20,59	20,13	18,41	18,71	17,44	20,56	19,33
0974-0005516	7,6978	7,4750	44	114	0,0954	18,56	19,55					
0974-0005517	7,6979	7,4757	436	325	0,0958	17,99	19,11					
0974-0005519	7,6980	7,4788	0	0	0,0980	12,62	11,92	10,78	10,72	10,22	12,12	11,26
0974-0005520	7,6980	7,4719	639	999	0,0931	19,73	19,55					
0974-0005521	7,7019	7,4294	58	65	0,0674	14,33	13,79	13,24	12,71	12,23	13,89	13,21
0974-0005522	7,7029	7,4639	48	52	0,0841	20,55	20,44	18,57	18,52	17,13	21,31	19,40
0973-0005544	7,7035	7,3946	362	999	0,0637	20,35	19,52	19,65				
0974-0005523	7,7041	7,4406	483	63	0,0698	19,60	19,91	18,77				
0973-0005546	7,7042	7,3791	367	116	0,0681	20,95	19,55	20,21	20,97	20,57		
0973-0005547	7,7054	7,3621	50	54	0,0759	20,58	20,74	18,68	18,86	18,51	21,58	19,72
0973-0005548	7,7062	7,3760	133	55	0,0677	20,05	19,27	17,57	17,41	16,83	20,10	18,25

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005524	7,7063	7,4623	215	233	0.0805	20,97	19,44	20,15	20,97	20,55		
0974-0005525	7,7069	7,4260	55	83	0.0616	14,51	14,23	13,80	13,38	12,71	14,24	13,79
0974-0005526	7,7084	7,4630	999	999	0.0794	19,59	19,05					
0974-0005527	7,7124	7,4385	24	7	0.0616	19,56	19,63	19,06				
0973-0005550	7,7125	7,3825	48	358	0.0591	19,55	19,92	19,11				
0973-0005551	7,7127	7,3708	999	999	0.0649	19,99	19,06					
0974-0005528	7,7133	7,4295	68	338	0.0568	19,53	19,72	18,46				
0974-0005529	7,7141	7,4715	999	667	0.0820	20,37	19,65	19,11				
0973-0005552	7,7158	7,3233	40	58	0.0985	16,14	16,07	14,97	15,01	14,31	16,16	15,50
0974-0005530	7,7168	7,4805	107	27	0.0876	20,78	19,18	19,63	18,98	20,93	20,16	
0974-0005531	7,7200	7,4789	337	499	0.0845	20,79	19,62	20,96	20,15			
0973-0005553	7,7204	7,3485	182	0	0.0750	20,60	21,00	20,28	21,03	20,63		
0974-0005532	7,7205	7,4788	999	380	0.0841	21,04	20,38	21,09	20,71			
0973-0005555	7,7208	7,3485	999	854	0.0747	20,59	20,82					
0974-0005533	7,7209	7,4784	999	108	0.0835	20,65	19,45	19,38	20,92	19,94		
0974-0005534	7,7214	7,4065	803	950	0.0446	20,99	19,54	21,45	20,18			
0973-0005556	7,7221	7,3435	120	205	0.0780	20,84	19,32	19,71	19,13	20,98	20,23	
0974-0005535	7,7222	7,4207	471	245	0.0456	20,74	19,54	20,94	20,08			
0974-0005536	7,7228	7,4856	86	93	0.0888	20,59	20,94	20,19	20,96	20,56		
0974-0005537	7,7248	7,4826	206	124	0.0852	20,59	20,15	19,15	19,77	19,12	20,26	19,96
0974-0005538	7,7263	7,4185	882	894	0.0411	21,25	18,35					
0973-0005560	7,7290	7,3899	408	100	0.0412	19,85	19,48	18,32	18,24	18,28	19,72	18,79
0973-0005561	7,7311	7,3209	30	45	0.0939	20,53	21,01	20,28	21,04	20,64		
0975-0005388	7,7329	7,5003	46	60	0.0981	18,00	17,57	17,06	17,22	16,74	17,68	17,40
0974-0005539	7,7343	7,4061	356	124	0.0318	20,33	18,94					
0973-0005562	7,7347	7,3914	55	208	0.0355	20,78	19,60	19,88	20,80	20,31		

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0973-0005564	7,7365	7,3307	674	999	0.0828	21,26	19,41	22,08	20,25			
0973-0005565	7,7366	7,3413	57	88	0.0729	20,57	20,41	17,81	18,34	16,56	21,39	19,29
0973-0005566	7,7379	7,3158	73	195	0.0964	19,55	20,35	19,04				
0973-0005567	7,7384	7,3410	999	500	0.0725	21,08	18,75					
0973-0005568	7,7389	7,3197	999	999	0.0924	19,59	18,72					
0974-0005540	7,7391	7,4178	999	829	0.0287	20,50	19,86					
0973-0005569	7,7412	7,3494	218	530	0.0638	20,96	18,74					
0973-0005570	7,7432	7,3758	180	195	0.0396	20,52	20,96	18,60	18,86	17,84	21,96	19,83
0973-0005571	7,7433	7,3508	999	999	0.0616	20,61	18,54					
0973-0005572	7,7447	7,3759	145	69	0.0387	20,99	19,12	19,07	18,75	21,86	19,95	
0974-0005541	7,7449	7,4002	143	999	0.0227	21,00	19,54					
0973-0005573	7,7454	7,3486	935	999	0.0630	21,00	19,57	18,70				
0973-0005574	7,7454	7,3347	105	125	0.0762	20,28	20,45	18,98	18,86	18,17	21,06	19,57
0973-0005575	7,7455	7,3340	143	855	0.0769	20,52	18,59					
0973-0005576	7,7461	7,3496	39	229	0.0618	21,00	20,29	21,03	20,64			
0973-0005577	7,7461	7,3501	277	734	0.0613	20,92	20,14	20,93	20,52			
0973-0005578	7,7468	7,3501	999	859	0.0611	20,91	20,19	20,94	20,54			
0974-0005542	7,7487	7,4953	133	133	0.0890	21,13	19,02	19,48	18,53	21,80	20,22	
0974-0005543	7,7488	7,4951	287	59	0.0887	20,94	18,96					
0973-0005579	7,7492	7,3639	0	108	0.0473	20,90	19,60	19,80	21,02	20,30		
0974-0005544	7,7511	7,4372	141	834	0.0328	20,56	21,00	20,29	21,03	20,64		
0974-0005545	7,7511	7,4364	104	219	0.0321	20,59	21,08	20,32	21,10	20,69		
0974-0005546	7,7512	7,4883	999	404	0.0817	19,49	20,28					
0973-0005581	7,7525	7,3356	999	755	0.0737	19,70	19,61					
0973-0005582	7,7526	7,3591	28	97	0.0508	14,20	14,37	13,43	13,18	12,53	14,56	13,72
0973-0005583	7,7528	7,3305	585	225	0.0787	20,60	19,59					

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0973-0005584	7,7531	7,3716	999	999	0.0387	20,54	19,66					
0973-0005585	7,7532	7,3302	399	781	0.0790	20,59	21,07	19,28	20,31	21,09	20,68	
0973-0005586	7,7533	7,3263	173	134	0.0827	20,40	21,08	18,55	19,14	18,37	21,96	20,03
0973-0005587	7,7539	7,3896	149	194	0.0221	19,52	19,54	19,12				
0974-0005547	7,7541	7,4768	14	69	0.0698	20,39	20,40	20,32	20,41			
0974-0005548	7,7541	7,4349	999	999	0.0295	20,56	19,06					
0975-0005406	7,7551	7,5070	90	92	0.0996	20,59	20,28	18,48	18,91	16,99	20,65	19,51
0974-0005549	7,7564	7,4584	49	60	0.0513	20,39	19,06					
0974-0005550	7,7584	7,4698	118	149	0.0622	19,57	18,54					
0974-0005551	7,7585	7,4695	74	395	0.0619	19,92	19,10					
0973-0005588	7,7585	7,3413	133	179	0.0672	20,51	19,87	20,56	20,19			
0973-0005589	7,7591	7,3498	999	999	0.0587	19,42	20,28					
0973-0005590	7,7592	7,3132	52	381	0.0951	21,08	19,59	19,66	21,51	20,28		
0974-0005552	7,7595	7,4122	267	129	0.0079	19,60	20,38					
0974-0005553	7,7597	7,4420	52	221	0.0346	19,58	20,40	18,66				
0974-0005554	7,7610	7,4324	105	264	0.0249	20,59	20,27	18,60	18,84	17,79	20,71	19,47
0974-0005555	7,7622	7,4567	976	435	0.0488	21,07	20,30	21,09	20,68			
0974-0005556	7,7624	7,4916	160	87	0.0836	20,59	20,19	18,65	19,04	18,12	20,34	19,57
0974-0005557	7,7627	7,4256	777	45	0.0180	20,47	19,41	18,96				
0974-0005558	7,7631	7,4256	173	98	0.0178	19,91	19,09	19,30	18,39	19,97	19,60	
0974-0005559	7,7632	7,4252	580	935	0.0174	19,53	18,69					
0973-0005591	7,7646	7,3829	84	195	0.0252	20,29	20,65	19,29	19,79	20,66	20,20	
0974-0005560	7,7651	7,4063	144	179	0.0021	20,51	21,03	19,37	19,90	19,10	21,17	20,42
0974-0005561	7,7660	7,4822	257	684	0.0742	19,65	18,80					
0973-0005593	7,7673	7,3300	292	574	0.0781	20,80	20,39	20,90	20,59			
0974-0005562	7,7683	7,4664	584	119	0.0584	19,61	20,39					

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0973-0005595	7,7692	7,3097	39	999	0.0983	20,73	19,63	20,85	20,13			
0974-0005563	7,7705	7,4042	179	60	0.0056	20,56	20,57	17,90	18,09	16,68	21,80	19,26
0974-0005564	7,7715	7,4968	999	571	0.0889	21,00	19,34	19,63	21,37	20,23		
0974-0005565	7,7715	7,4994	112	136	0.0915	20,59	20,07	18,95	18,81	18,49	20,33	19,37
0974-0005566	7,7724	7,4727	307	118	0.0649	20,70	20,35	18,84	20,81	20,53		
0974-0005567	7,7727	7,4166	74	64	0.0107	20,36	18,94					
0974-0005568	7,7734	7,4255	999	999	0.0188	20,93	18,57					
0974-0005569	7,7737	7,4511	141	139	0.0437	21,07	19,02	19,73	17,28	21,41	20,32	
0973-0005597	7,7741	7,3095	78	94	0.0988	20,59	20,75	18,30	18,07	17,70	22,01	19,35
0973-0005598	7,7755	7,3597	362	522	0.0492	20,50	19,59	20,39	20,55	20,46		
0974-0005570	7,7778	7,4436	261	298	0.0374	20,53	20,65	19,42	19,50	18,92	20,80	20,03
0973-0005599	7,7779	7,3787	139	106	0.0315	20,60	20,61	18,46	18,95	17,83	21,29	19,69
0973-0005600	7,7795	7,3876	942	999	0.0242	19,60	18,68					
0974-0005571	7,7796	7,4586	82	550	0.0522	20,49	21,00	20,23	21,02	20,61		
0974-0005572	7,7796	7,4447	143	335	0.0390	20,52	20,92					
0974-0005573	7,7799	7,4587	44	39	0.0524	20,52	20,64					
0973-0005601	7,7805	7,3352	999	999	0.0741	20,59	20,85	19,61	21,09	20,16		
0973-0005602	7,7807	7,3254	28	128	0.0839	20,60	20,60	17,96	18,52	17,75	21,59	19,48
0974-0005574	7,7810	7,4690	81	100	0.0627	19,54	19,91	18,99				
0973-0005603	7,7810	7,3998	211	103	0.0167	20,42	19,30	18,79	18,81	18,28	19,39	19,05
0974-0005575	7,7814	7,4410	530	999	0.0362	19,60	19,92					
0973-0005604	7,7824	7,3158	639	510	0.0936	21,08	19,58	21,59	20,24			
0973-0005605	7,7827	7,3967	70	120	0.0198	20,52	20,35	18,67	18,62	18,65	21,08	19,40
0973-0005607	7,7848	7,3297	39	90	0.0804	20,35	20,27	18,66	18,97	18,83	20,57	19,54
0974-0005576	7,7859	7,4368	441	365	0.0347	21,08	19,97	21,20	20,48			
0974-0005577	7,7861	7,4653	183	314	0.0605	21,12	19,56					

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005578	7,7863	7,4370	37	354	0.0351	20,75	19,55	18,59	20,95	20,09		
0974-0005579	7,7867	7,4367	347	273	0.0351	20,77	19,60	19,76	18,97	20,83	20,23	
0973-0005608	7,7867	7,3705	78	114	0.0426	20,47	20,92	19,21	19,80	19,13	21,05	20,31
0973-0005609	7,7869	7,3136	163	77	0.0966	21,11	19,12	19,40	18,31	21,83	20,17	
0974-0005580	7,7879	7,4788	128	229	0.0739	20,59	20,74	19,48	19,44	21,04	20,01	
0974-0005581	7,7883	7,4874	999	999	0.0823	21,24	19,65	21,85	20,36			
0974-0005582	7,7893	7,4094	178	999	0.0229	19,58	18,64					
0973-0005610	7,7895	7,3915	172	123	0.0283	20,33	20,73	19,34	19,53	19,05	20,93	20,07
0974-0005583	7,7895	7,4097	88	199	0.0230	20,50	20,98	19,16	19,66	18,55	21,30	20,24
0974-0005584	7,7905	7,4960	247	122	0.0912	21,21	19,19	19,78	18,45	21,65	20,41	
0973-0005611	7,7908	7,3272	629	114	0.0844	20,56	20,38	19,45	20,41	19,89		
0974-0005585	7,7915	7,4207	228	240	0.0280	20,99	19,56	21,43	20,19			
0973-0005612	7,7929	7,3751	113	43	0.0421	20,98	19,12	19,52	18,97	21,45	20,16	
0973-0005613	7,7935	7,3602	223	999	0.0549	20,88	18,81					
0973-0005614	7,7937	7,3599	235	104	0.0553	19,70	18,98	18,73	18,41	19,75	19,18	
0973-0005615	7,7940	7,3273	0	0	0.0853	12,81	12,49	11,81	11,77	11,47	12,52	12,12
0973-0005616	7,7940	7,3243	73	297	0.0881	21,03	18,10	19,01	21,97	19,94		
0973-0005617	7,7941	7,3461	999	39	0.0678	20,43	20,46					
0973-0005618	7,7944	7,3155	143	191	0.0966	20,40	19,77	18,56				
0973-0005619	7,7948	7,3876	65	68	0.0348	20,75	19,30	19,48	18,55	21,02	20,04	
0974-0005586	7,7951	7,4260	93	173	0.0337	20,06	20,28	18,99	19,11	18,69	20,45	19,64
0974-0005587	7,7954	7,4293	114	325	0.0358	21,11	19,44	19,80	19,11	21,42	20,38	
0973-0005620	7,7958	7,3890	184	145	0.0349	20,50	20,50	18,59	18,31	18,34	21,56	19,33
0974-0005588	7,7958	7,4570	102	135	0.0570	20,50	20,57	19,46	19,90	20,61	20,23	
0973-0005621	7,7962	7,3918	353	216	0.0338	20,42	21,00	19,52	19,82	21,18	20,36	
0974-0005589	7,7963	7,4430	999	999	0.0459	19,60	19,61					

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005590	7,7967	7,4793	129	53	0,0774	21,06	19,02	19,76	18,53	21,36	20,33	
0973-0005622	7,7975	7,3270	999	269	0,0867	21,06	19,35	18,43	21,78	20,12		
0974-0005591	7,7981	7,4313	739	171	0,0392	20,53	21,28	19,64	21,94	20,37		
0974-0005592	7,7990	7,4578	24	90	0,0594	19,97	19,63	17,13	17,08	16,64	20,87	18,28
0974-0005593	7,8000	7,4580	208	695	0,0601	20,58	19,41					
0974-0005594	7,8001	7,4508	210	104	0,0543	20,57	20,65	17,62	18,29	16,92	21,82	19,39
0973-0005623	7,8002	7,3198	247	56	0,0944	21,21	19,60	19,41	21,99	20,22		
0974-0005595	7,8020	7,4876	70	83	0,0871	20,58	20,85	18,91	19,24	18,69	21,48	19,96
0973-0005625	7,8029	7,3673	221	215	0,0545	21,13	19,48	19,81	19,09	21,45	20,39	
0974-0005596	7,8032	7,4964	94	205	0,0956	19,83	19,11					
0973-0005626	7,8038	7,3629	52	220	0,0585	20,62	19,54	20,39	20,71	20,52		
0974-0005597	7,8041	7,4303	169	19	0,0436	18,00	18,22	16,77	16,90	16,65	18,54	17,48
0973-0005627	7,8043	7,3980	38	81	0,0390	20,30	19,44	19,79	20,38	20,04		
0973-0005628	7,8044	7,3576	94	221	0,0630	20,39	20,99	18,88	18,81	18,09	22,05	19,82
0973-0005629	7,8044	7,3516	416	140	0,0680	19,48	19,58					
0974-0005598	7,8066	7,4570	599	620	0,0632	20,44	18,51					
0973-0005631	7,8083	7,3867	870	113	0,0468	20,71	19,45	19,72	18,76	20,76	20,18	
0974-0005599	7,8095	7,4236	132	25	0,0455	17,67	17,97	15,92	15,85	14,82	18,99	16,83
0973-0005632	7,8098	7,3420	12	8	0,0789	20,51	21,05	20,39	21,10	20,72		
0973-0005633	7,8098	7,3417	401	240	0,0791	20,85	25,72	24,11	25,57			
0974-0005600	7,8099	7,4044	25	346	0,0434	20,59	21,19	19,66	21,73	20,34		
0974-0005601	7,8104	7,4398	250	404	0,0540	20,52	21,01	20,34	21,05	20,67		
0973-0005634	7,8106	7,3466	107	37	0,0755	21,07	20,30	19,12	21,09	20,68		
0973-0005635	7,8110	7,3467	999	354	0,0757	18,97	19,66					
0973-0005636	7,8112	7,3472	999	999	0,0754	19,89	19,12					
0973-0005637	7,8129	7,3221	64	999	0,0975	19,58	19,02					

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0973-0005638	7,8141	7,3515	74	65	0.0738	20,77	18,44	18,62	18,01	21,81	19,62	
0974-0005602	7,8157	7,4207	101	86	0.0506	14,44	14,78	13,45	13,26	12,35	15,31	13,93
0974-0005603	7,8158	7,4700	97	252	0.0791	20,07	19,57	19,40	19,13	20,11	19,73	
0974-0005604	7,8161	7,4698	575	454	0.0791	20,54	18,27					
0973-0005641	7,8166	7,3936	91	157	0.0519	20,33	21,02	18,75	18,81	17,46	22,09	19,84
0974-0005605	7,8167	7,4070	999	174	0.0500	20,59	20,40					
0973-0005642	7,8167	7,3547	95	540	0.0731	19,46	19,92	18,57				
0974-0005606	7,8173	7,4077	788	999	0.0505	20,31	20,37					
0973-0005643	7,8176	7,3553	999	817	0.0732	20,58	20,39	18,69				
0974-0005607	7,8179	7,4471	999	359	0.0644	20,59	19,81					
0974-0005608	7,8212	7,4235	111	186	0.0566	21,27	19,46	20,40	18,70	21,28	20,82	
0973-0005645	7,8215	7,3480	104	24	0.0812	20,24	20,34	19,96	20,32			
0974-0005609	7,8219	7,4015	999	999	0.0555	20,37	19,13					
0974-0005610	7,8223	7,4336	126	54	0.0611	19,73	19,13	17,22	17,20	16,37	20,01	18,08
0973-0005648	7,8224	7,3553	999	164	0.0766	19,50	19,81					
0973-0005649	7,8227	7,3552	78	201	0.0770	20,52	21,05	19,30	18,57	21,80	20,09	
0973-0005650	7,8232	7,3999	517	157	0.0569	20,54	20,80	19,82	20,85	20,28		
0974-0005612	7,8232	7,4828	297	540	0.0936	20,57	19,58					
0973-0005653	7,8239	7,3348	999	999	0.0929	20,17	18,65					
0974-0005613	7,8242	7,4881	175	65	0.0985	20,05	20,85	20,40	20,95	20,62		
0973-0005655	7,8255	7,3834	69	95	0.0637	20,59	21,08	19,91	21,25	20,44		
0974-0005614	7,8267	7,4082	272	309	0.0598	19,85	18,56					
0974-0005615	7,8273	7,4077	152	539	0.0605	20,94	20,37	19,09	21,01	20,65		
0973-0005657	7,8274	7,3750	436	204	0.0690	20,94	19,21	21,67	19,99			
0973-0005658	7,8275	7,3754	999	135	0.0689	21,04	19,77	21,31	20,33			
0973-0005659	7,8277	7,3748	79	254	0.0693	20,79	19,55	21,03	20,10			

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B ₁ [mag]	B ₂ [mag]	R ₁ [mag]	R ₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0973-0005662	7,8289	7,3864	74	245	0.0658	19,34	18,72					
0973-0005663	7,8302	7,3328	999	999	0.0984	19,90	19,46	18,69				
0974-0005617	7,8321	7,4149	75	91	0.0656	19,03	19,84	18,17	18,63	18,67	20,05	19,17
0974-0005618	7,8322	7,4060	191	68	0.0654	20,88	18,95	19,75	18,55	21,02	20,27	
0973-0005664	7,8335	7,3514	70	289	0.0874	21,07	19,61	19,89	19,12	21,25	20,43	
0974-0005619	7,8338	7,4623	999	845	0.0862	20,12	21,00					
0974-0005620	7,8370	7,4530	371	149	0.0833	20,61	19,66	20,65	20,11			
0974-0005621	7,8381	7,4750	999	999	0.0978	20,38	19,60	20,31				
0974-0005624	7,8402	7,4321	525	784	0.0771	21,00	20,35	21,05	20,67			
0974-0005625	7,8420	7,4097	503	47	0.0750	20,55	21,07	19,64	21,51	20,27		
0974-0005626	7,8424	7,4444	118	204	0.0837	19,53	19,13					
0974-0005627	7,8440	7,4443	203	259	0.0851	20,33	19,10					
0974-0005628	7,8443	7,4444	38	210	0.0854	21,09	19,36	19,56	21,63	20,24		
0974-0005629	7,8444	7,4204	288	146	0.0784	20,99	19,50	20,17	20,99	20,57		
0973-0005670	7,8450	7,3731	93	92	0.0855	16,09	16,13	14,96	14,47	13,65	16,81	15,21
0974-0005631	7,8451	7,4442	117	481	0.0861	20,86	19,39	19,71	19,13	21,01	20,24	
0973-0005671	7,8468	7,3907	75	999	0.0816	20,50	19,25	18,08				
0973-0005672	7,8468	7,3909	209	133	0.0816	20,42	19,45	18,35	18,07	18,42	19,83	18,68
0974-0005634	7,8471	7,4176	160	191	0.0807	20,66	19,42	19,56	20,78	20,06		
0973-0005673	7,8471	7,3911	248	656	0.0819	18,71	19,69	17,74				
0973-0005676	7,8495	7,3576	468	313	0.0967	20,67	19,33	20,13	20,75	20,40		
0973-0005677	7,8512	7,3806	349	16	0.0885	21,04	19,53	19,91	21,18	20,43		
0973-0005678	7,8513	7,3821	396	70	0.0881	21,00	19,61	21,40	20,22			
0973-0005682	7,8556	7,3785	139	305	0.0934	21,00	19,26	19,80	18,19	21,20	20,34	
0974-0005638	7,8558	7,4429	128	204	0.0954	20,58	20,88	18,57	18,84	17,88	21,84	19,78
0973-0005683	7,8564	7,3836	92	126	0.0926	20,81	18,41	18,53	17,67	21,93	19,59	

Tabelle A.2: USNO-Quellen der kreisförmigen 95%-
Fehlerregion

USNO	Ra [deg]	Dec [deg]	σ_{Ra} [marcs]	σ_{Dec} [marcs]	Distanz [deg]	B₁ [mag]	B₂ [mag]	R₁ [mag]	R₂ [mag]	I [mag]	U [mag]	V [mag]
0974-0005639	7,8568	7,4025	159	218	0.0899	21,01	19,41	19,65	18,95	21,37	20,25	
0973-0005684	7,8573	7,3930	999	999	0.0914	19,56	20,40					
0973-0005685	7,8575	7,3727	367	322	0.0971	20,85	20,06	19,05	20,86	20,44		
0973-0005686	7,8585	7,3875	98	166	0.0937	20,58	20,79	19,16	19,62	18,76	20,96	20,15

Tabelle A.3: Zusammenfassung der Assoziationen für die selektierten USNO-Quellen

USNO	2MASS	SDSS	Objekttyp
0973-0005603	–	587743980896125270	Galaxie
0974-0005525	00304966+0725333	587743980896124934	Stern
0974-0005521	00304847+0725457	587743980896059473	Stern
0974-0005519	00304751+0728436	–	
0975-0005388	00305591+0730009	587744045858750479	Stern
0974-0005537	–	587743980896125136	Stern
0974-0005556	00310300+0729297	587744045858750582	Stern
0973-0005615	00311056+0719381	–	
0974-0005565	–	587744045858750585	Galaxie

Anhang B

Bildanalyse der SDSS-Daten

Neben dem Vergleich der selektierten USNO-Quellen mit den Katalogdaten der SDSS werden ebenfalls deren Bilddaten analysiert, um die dargestellten Charakterisierungen in Sterne und Galaxien anhand einiger ausgewählter Objekte nachvollziehen zu können.

Abbildung B.1 zeigt eine Überlagerung der Aufnahme in den Farbbändern u (blau), g (grün) sowie z (rot), wobei die einzelnen Farbfilteraufnahmen vorerst mittels des Programms *montage*¹ zusammengefügt werden. Diese Zusammenstellung der Daten mittels *DS9* zeigt bereits, dass die diffusen Profile der Galaxien deutlich von den punktförmigen Strukturen der Vordergrundsterne unterschieden werden können (vgl. Abbildungen B.2a sowie B.2b).

Ebenfalls die beiden USNO-Quellen (USNO-B1.0 0974-0005519 sowie USNO-B1.0 0973-0005615), welche nicht als Assoziationen von SDSS-Objekten aufgeführt sind, erscheinen gemäß Abbildung B.1 als sternähnlich.

¹Hinweise zu dieser Software sowie dessen Download können auf der Internetseite <http://montage.ipac.caltech.edu/> vorgefunden werden.

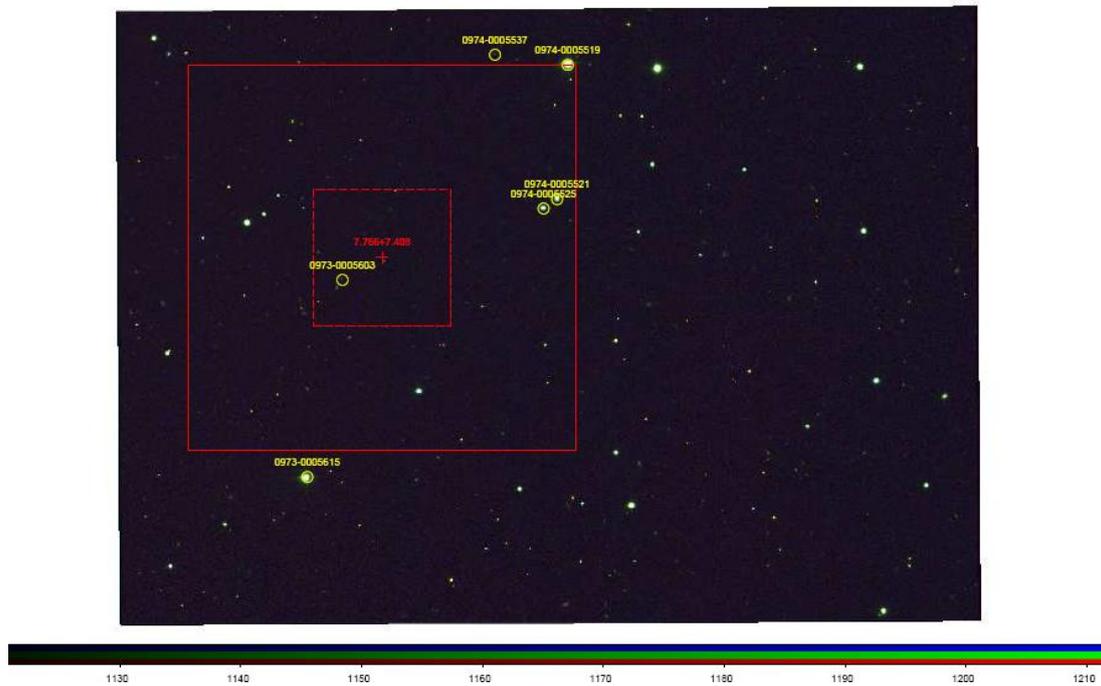


Abbildung B.1: Aufnahmen der SDSS-7, wobei die Farbbänder u (blau), r (grün) und z (rot) überlagert werden; zusätzlich sind die quadratischen Unsicherheitsregionen des Photonenschwerpunktes sowie einige der selektierten USNO-Quellen eingetragen; (Die Bilddaten können der SDSS-Website unter <http://cas.sdss.org/astrodr7/en/tools/search/radial.asp> entnommen werden).

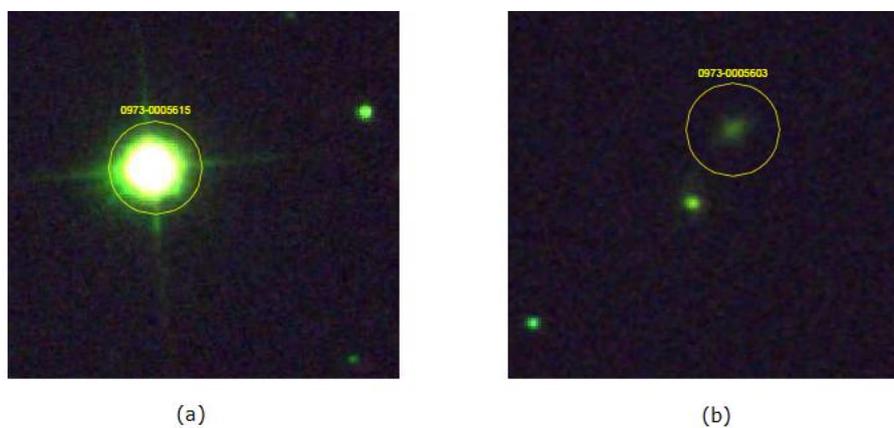


Abbildung B.2: Unterschiedlichen Strukturprofile eines Sterns (a) und einer Galaxie (b); vergrößerte Aufnahmen der Abbildung B.1.

Literaturverzeichnis

- ABAZAJIAN, K., ADELMAN-MCCARTHY, J. K., & AGÜEROS, M. A. 2004. The Second Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *Astron. J.*, **128**, 502–512.
- ABAZAJIAN, K. N., ADELMAN-MCCARTHY, J. K., & AGÜEROS, M. A. 2009. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, **182**(June), 543–558.
- ABDO, A. A., ACKERMANN, M., & AJELLO, M. 2010a. Fermi Large Area Telescope First Source Catalog. *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, **188**, 405–436.
- ABDO, A. A., ACKERMANN, M., & AJELLO, M. 2010b. The First Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope. *Astrophys. J.*, **715**, 429–457.
- ABDO, A. A., ACKERMANN, M., & AJELLO, M. 2010c. The First Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars. *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, **187**, 460–494.
- AHARONIAN, F., AKHPERJANIAN, A. G., & BAZER-BACHI, A. R. 2006a. HESS Observations of the Galactic Center Region and Their Possible Dark Matter Interpretation. *Physical Review Letters*, **97**(22), 221102–+.
- AHARONIAN, F., AKHPERJANIAN, A. G., & BAZER-BACHI, A. R. 2006b. A low level of extragalactic background light as revealed by gamma-rays from blazars. *nature*.
- AMSLER, C. ET AL. 2008. *Review of Particle Physics*. Physics Letters B667, 1.
- ATWOOD, W. B., ABDO, A. A., & ACKERMANN, M. 2009. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *Astrophys. J.*, **697**, 1071–1102.
- BALTZ, E. A. 2004. Dark Matter Candidates. *ArXiv e-prints*, Dec.
- BERGSTRÖM, L. 2000. Non-baryonic dark matter: observational evidence and detection methods. *Reports on Progress in Physics*, **63**(May), 793–841.

- BERTONE, G., HOOPER, D., & SILK, J. 2005. Particle dark matter: evidence, candidates and constraints. *Phys. Rep.*, **405**(Jan.), 279–390.
- BUCKLEY, J., BALTZ, E. A., & BERTONE, G. 2008. Section on Prospects for Dark Matter Detection of the White Paper on the Status and Future of Ground-Based TeV Gamma-Ray Astronomy. *ArXiv e-prints:0812.0795*, Dec.
- CDMS-KOLLABORATION. 2010. Dark Matter Search Results from the CDMS II Experiment. *Science Magazine*, **327**.
- CONDON, J. J., COTTON, W. D., & GREISEN, E. W. 2002. 1.4GHz NRAO VLA Sky Survey (NVSS). *VizieR Online Data Catalog*, **8065**, 0–+.
- DIEMAND, J., KUHLEN, M., & MADAU, P. 2008. Clumps and streams in the local dark matter distribution. *Nature*, **454**(Aug.), 735–738.
- DONATO, D., GHISELLINI, G., & TAGLIAFERRI, G. 2001. Hard X-ray properties of blazars. *VizieR Online Data Catalog*, **337**(Sept.), 50739–+.
- FELDMAN, G. J., & COUSINS, R. D. 1998. Unified approach to the classical statistical analysis of small signals. *Phys. Rev. D*, **57**(Apr.), 3873–3889.
- FERMI LAT COLLABORATION. 2009. Post-launch performance of the Fermi Large Area Telescope. *ArXiv e-prints:0907.0626*.
- FERMI-WEBSITE. 2008. *Fermi Gamma-ray Space Telescope*. <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>.
- FERNANDES, M. V. 2010. private Kommunikation.
- FOSSATI, G. (ed). 1998. *The active X-ray sky: results from BeppoSAX and RXTE*.
- GLAST-WEBSITE. 2009. *Fermi LAT Performance*. http://www-glast.slac.stanford.edu/software/IS/glast_lat_performance.htm.
- GREINER, W. 1981. *Theoretische Physik Band 1: Mechanik*. Harri Deutsch.
- HEASARC-WEBSITE. 2009. *HEASARC-Calibration-Database*. <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/caldb/data/fermi/lat/index.html>.
- HENDEN, A. A., & KAITCHUCK, R. H. 1978. *Astronomical Photometry*. Willmann-Bell.

- HINSHAW, G., WEILAND, J. L., & HILL, R. S. 2009. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Data Processing, Sky Maps, and Basic Results. *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, **180**, 225–245. arXiv:astro-ph/0803.0732.
- HORNS, D. 2010. private Kommunikation.
- IRSA-WEBSITE. 2010. *NASA/IPAC Infrared Science Archive*.
- JANUSCHEK, S. 2010. *Analyse zur Detektierbarkeit von Substrukturen Dunkler Materie-Halos mit dem Fermi-LAT-Experiment*. M.Phil. thesis, Universität Hamburg.
- KOLANOSKI, H. 2006. *Einführung in die Astroteilchenphysik*. Vorlesungsskript, Humboldt-Universität zu Berlin.
- KUHLEN, M. 2009. The Dark Matter Annihilation Signal from Dwarf Galaxies and Subhalos. *arXiv e-prints*.
- KUHLEN, M., DIEMAND, J., & MADAU, P. 2008. The Dark Matter Annihilation Signal from Galactic Substructure: Predictions for GLAST. *Astrophys. J.*, Oct.
- MAGIC-COLLABORATION. 2008. VHE γ -ray Astronomy with the MAGIC Telescope. *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, **175**, 395–400.
- MONET, D. G., LEVINE, S. E., & CANZIAN, B. 2003. The USNO-B Catalog. *Astron. J.*, **125**(Feb.), 984–993.
- NED-WEBSITE. 2010. *NASA/IPAC Extragalactic Database*. <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>.
- PRESS, W. H., FLANNEY, B. P., TEUKOLSKI, S. A., & VETTERLING, W. T. 1988. *Numerical Recipes*. Cambridge University Press.
- SCHLEGEL, D. J., FINKBEINER, D. P., & DAVIS, M. 1998. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *Astrophys. J.*, **500**(June), 525–+.
- SKRUTSKIE, M. F., CUTRI, R. M., & STIENING, R. 2006. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *Astron. J.*, **131**(Feb.), 1163–1183.
- SPRINGEL, V., WANG, J., & VOGELSBERGER, M. 2008. The Aquarius Project: the subhaloes of galactic haloes. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **391**(Dec.), 1685–1711.

UNSÖLD, A., & BASCHEK, B. 2002. *Der neue Kosmos*. Springer Verlag.

VÉRON-CETTY, M.-P., & VÉRON, P. 2006. A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition. *Astron. Astrophys.*, **455**(Aug.), 773–777.

ZECHLIN, H. S. 2010. private Kommunikation.

ZECHLIN, H. S., HORNS, D., & ELSÄSSER, D. 2010. *Follow-up observation on a dark matter clump candidate: 1FGL J0030.7+0724*. Observation Proposal.

ZHANG, N. F. 2006. The Uncertainty associated with the weighted mean of measurement data. *Metrologia*, **43**, 195–204.

ZWICKY, F. 1933. Remarks on the Redshift from Nebulae. *Helv. Phys. Acta*, **6**(Nov), 110–127.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den Menschen danken, welche mich in den letzten Monaten während meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Zuallerst möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr. Dieter Horns für die Aufnahme in seine Arbeitsgruppe und die freundliche Betreuung meiner Arbeit bedanken. Das ausgesuchte Thema meiner Bachelorarbeit faszinierte mich bis zum Schluss und es freute mich sehr an einem aktuellen wissenschaftlichen Forschungsthema mitarbeiten zu dürfen. Vielen Dank ebenfalls an Hannes-Sebastian Zechlin für seine tatkräftige Unterstützung, die zahlreichen Diskussionen sowie die Korrekturen der letzten Wochen. Insgesamt möchte ich der gesamten Arbeitsgruppe, insbesondere der „Chamber of Darkness“, für die nette Atmosphäre und die stets angebotene Hilfe, wie in Sachen Latex, danken. Ein großes Dankeschön möchte ich ebenfalls an Martin Raue für die Korrektur meiner Arbeit richten.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Freund René, der mich während dieser stressigen Zeit stets unterstützte und schlaflose Nächte für die Grammatik- und Rechtschreibprüfung dieser Arbeit investiert hat. Dies gilt auch für meine Familie und Freunde, die mein Leidklagen geduldig ertragen haben und bemüht waren mich aufzubauen.

Vielen Dank!

Gülzow den 4. August 2010

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 universitätsintern veröffentlicht wird.

KATHARINA BORM