

Radioteleskopie

Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum an der Universität Konstanz

Autoren: Philipp Gebauer und Simon Keegan

Tutor: Stefan Schupp

Versuch durchgeführt am 13.05.2020

Abstract



This experiment aims to map a wide range of astronomical objects in the Milky Way. Therefore an antenna in Onsala, Sweden was used remotely. As a first step the main characteristics of this antenna were examined.

By measuring the total power of the sun and taking a grid image of the sun's radiation profile the sun was legitimized as a point source.

Based on the assumption that the SALSA-telescope can be idealized as an aperture, mathematically described by a sinc-function, a GAUSSIAN fit was applied to the data. Thus FWHM referred to as angular resolution was quantified as $6,6(11)^\circ$. Inferred from that the diameter of the telescope was calculated as $2,23(37)$ m in good accordance to the real value of $2,3$ m [HJVK]. At last a degree of intrinsic inaccuracy of the telescope was obtained and measured as $0,976(34)^\circ$ from the GAUSSIAN fit.

The measurements at 1410 MHz (H1 line; $\lambda = 21\text{cm}$) results in a constant velocity of all objects in the Milky Way of $210,9(31) \frac{\text{km}}{\text{s}}$ which is really close to the literature value ($220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ [WC07]). The verification of the constant velocity is an indirect proof of dark matter.

The mapping of the Milky Way results in good values which are consistent with the literature. At least three different spiral arms of the galaxy are visible with the calculated data.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	1
3	Aufbau und Durchführung des Versuchs	2
4	Auswertung	4
4.1	Beobachtung der Sonne	4
4.1.1	Raster-Scan der Sonne	4
4.1.2	Öffnungsfunktion des Radioteleskops	6
4.2	Beobachtung der Milchstraße	9
4.2.1	Belichtungszeit	9
4.2.2	Verarbeitung der Daten	11
4.2.3	Rotationsgeschwindigkeit	12
4.2.4	Kartografie der Milchstraße	14
5	Fazit	18
	Anhang	20

1 Einleitung

Die Astrophysik beschreibt ein großes Feld physikalischer Forschungsmöglichkeiten. Mithilfe des Wissens über die Stabilität und des Ursprungs der Universums lassen sich womöglich viele neue Bereiche der Physik, vor allem im Bereich der Energieforschung, ermöglichen. In der Astrophysik liegen stets kaum erfassbare Größenordnungen zugrunde. So benötigte beispielsweise die in diesem Versuch gemessene Strahlung mehrere Jahre bei Lichtgeschwindigkeit durch das Universum, um schließlich mit einem Radioteleskop in Onsala gemessen werden zu können. Dies veranschaulicht, wie unbegreifbar groß die Weiten und damit auch die Forschungsmöglichkeiten dort sind. Allein unser Sonnensystem liegt ca. 25 Lichtjahre vom Zentrum der Milchstraße entfernt. Dennoch ist es mit recht einfachen Mitteln möglich, Teile der Milchstraße zu kartografieren, wie der vorliegende Bericht dokumentiert.

2 Grundlagen

Die in diesem Abschnitt stichpunktartig erläuterten Themen sind bereits vorab mit dem Tutor in einem Vorkolloquium behandelt worden und sind nach Rücksprache hier nur noch kurz zu erwähnen. Bei genauerem Interesse wird hier auf die Literatur [HJV], [HJVK] und [Var] verwiesen:

- Hyperfeinstruktur im Wasserstoffatom
 - Wechselwirkung von Kern- und Elektronenspin, Entstehung der 21-cm-Linie, deren Lebensdauer, Einfluss der DOPPLER-Verschiebung
- Rotationsmodelle (differentiell, Kepler und starrer Körper) und deren Vorliegen in Milchstraße oder unserem Sonnensystem
- Koordinatensysteme (galaktisch, horizontal und äquatorial)
 - Wann sind welche Bereiche der Milchstraße am besten zu beobachten? Überprüfen der Beobachtungen via STELLARIUM
- Verständnis für die Größenordnungen
 - Milchstraße vs. Sonnensystem (Parsec [pc] und Lichtjahr [ly])

3 Aufbau und Durchführung des Versuchs

Für die Messungen der Frequenz- bzw. Geschwindigkeitsspektren astronomischer Objekte in der Milchstraßenebene wurde das Radioteleskop „Brage“, welches in Abbildung 3.1 dargestellt ist, des ONSALA SPACE OBSERVATORY in Schweden genutzt. Dazu wurden das Teleskop der SALSA-Onsala-Einrichtung per Remote-Steuerung bedient und dabei interne Software der Forschungsanstalt genutzt.



Abbildung 3.1: Fotografie der beiden Radioteleskope „Brage“ und „Vale“ in Onsala, Schweden. Entnommen aus [HJVK].

Gemäß der Dokumentationen [HJVK] und [Var] beträgt der Durchmesser des Teleskops 2,3 m. Die Track-Genauigkeit wird auf $0,5^\circ$ und das Auflösungsvermögen auf 6° bei 1420 MHz beziffert. Zur Erstellung von präzisen Spektren ist eine Bandbreite von 2 MHz mit 256 Kanälen verwendet worden, dabei beträgt die Frequenzauflösung pro Kanal 7,8 kHz. Da SALSA noch nicht Flux-kalibriert ist, werden Intensitäten stets in „arbitrary units“ angegeben und bei der Messung von Antennen-Temperaturen sind nur Betrachtungen relativer Werte aussagekräftig. Zudem sollten zum Erhalt guter Spektren stets Bereiche über 15° horizontaler Höhe und Messdauern von über 20 s beachtet werden. Eine Betrachtung unterhalb dieser Höhe und Zeit würde ein zu großes Rauschen in den Spektren erzeugen. Für die Vermessungen von Milchstraße und Sonne konnten verschiedene Frequenzen betrachtet

werden (1420,4 MHz respektive 1410 MHz) sowie zwischen „Switched“ - – zur Minderung von Rauschen – und „Signal“ -Modus – zur besseren Intensitätsmessung – gewechselt werden. Zudem konnten je nach Anforderung galaktische Koordinaten übergeben oder spezielle astronomische Objekte wie die Sonne direkt getrackt werden. Auch azimuthaler und Höhenoffset sowie die Messdauer waren einstellbar.

In Vorbereitung der Messungen wurde mittels des Programms STELLARIUM der am Mess- tag, 13. Mai, zur Messzeit zwischen 7 und 13 Uhr vermessbare Bereich der Milchstraße ermittelt. Am Versuchstag wurden dann zunächst die Areale der Milchstraße vermessen, welche als Erste den beobachtbaren Bereich verlassen. Dabei wurden in Schritten von 5° galaktischer Länge von 33° bis 103° , jeweils bei 0° galaktischer Breite und im ersten Quadranten ($0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ galaktischer Länge) auch bei $b = \pm 2^\circ$, Spektren aufgezeichnet. Anschließend wurden die Belichtungsdauern bei fester galaktischer Länge (84°) und Breite (0°) zwischen 1 s, 3 s, 10 s, 30 s, 100 s und 300 s variiert. Dann wurden in Schritten von 10° galaktischer Länge von 113° bis 203° jeweils bei 0° galaktischer Breite Spektren aufgezeichnet. Zuletzt wurden, bei möglichst hohem Sonnenstand, folglich möglichst zu lokaler Mittagszeit Spektren der Sonne gewonnen. Zum einen wurde ein Raster durch 25 Messungen generiert. Dabei wurden eine relative Weite des Rasters von 5° genutzt und durch azimuthalen und Höhenoffset relativ zur Sonne das Raster erstellt. Zum anderen wurde ein Kreuzscan der Sonne durchgeführt. Dabei wurde in 2° -Schritten von -16° bis 16° relativem Offset sowohl in Azimut wie in Altitude gemessen. Die jeweils ander Größe wurde auf 0° Offset gesetzt.



4 Auswertung

Im Folgenden werden die Auswertung der gewonnenen Daten und die Interpretation und Analyse der Ergebnisse dargelegt.

4.1 Beobachtung der Sonne

Dabei wird mit der Betrachtung der Sonne begonnen. Intention dessen war einerseits, die „antenna response function“ mittels Intensitätsmessungen zu ermitteln und daraus charakteristische Größen des Teleskops zu berechnen, und andererseits, als Grundlage hierfür die Annahme zu legitimieren, dass die Sonne innerhalb dieses Versuchs als Punktquelle aufgefasst wird.

Um die Messungen der Intensitätsspektren der Sonne nicht durch charakteristische Radiostrahlung der 21-cm-Linie zu beeinflussen, wurden die Messungen bei einer Frequenz von 1420 MHz gemessen. Genauer wurde der Messprozess bereits in Abschnitt 3 beschrieben. Aus den gewonnenen Spektren wurde anschließend stets der Intensitätswert bei 1420 MHz ausgelesen und in den entsprechenden Abbildungen 4.1 bis 4.3 geplottet. Zur Einheit der Intensität sei angemerkt, dass diese stets in „arbitrary units“ bzw. in K angegeben wurden, da eine Kalibrierung des Teleskops für Absolutwerte vom ONASALA SPACE OBSERVATORY nicht vorgenommen wurde. Allerdings genügt für die geforderten Belange eine Betrachtung der relativen Werte.



4.1.1 Raster-Scan der Sonne

Zunächst wurde ein Raster-Scan der Sonne vorgenommen, dabei wurden 25 Messungen zwischen -10° und 10° azimuthalem und Höhenoffset in 5° -Schritten durchgeführt. Die entsprechenden jeweiligen Intensitätsmaxima wurden in Abbildung 4.1 über den Relativwinkeln zur Sonne bei 0° aufgetragen.



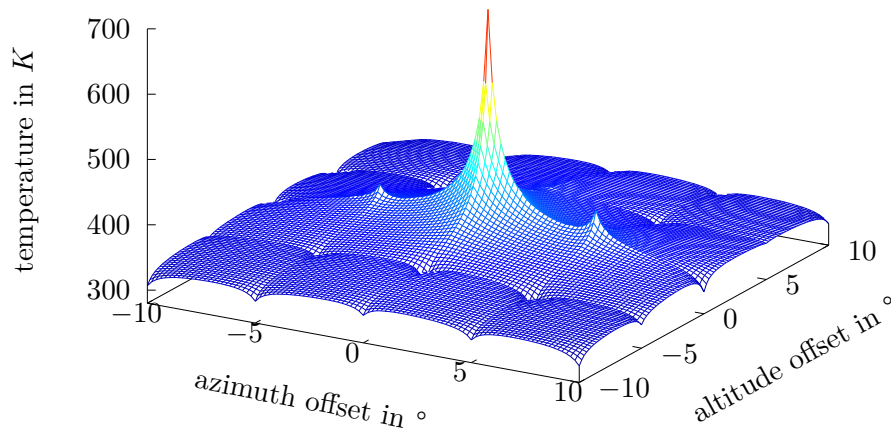


Abbildung 4.1: Diese Abbildung zeigt den 5×5 -Raster-Scan der Sonne. Dabei wird deutlich, dass in den dunkelblau gefärbten Bereichen von $> |5^\circ|$ Offset sowohl in **Altitude** wie in **Azimuth** eine Grundintensität – hier in K gemessen – vorliegt. Je kleiner der relative Offset zur im Zentrum fokussierten Sonne, desto höher wird der Intensitätsgradient. Die Sonne als Punktquelle aufzufassen, wird durch das ausgeprägte Intensitätsmaximum bei 0° azimuthalem und Höhenoffset legitimiert. Zudem fällt auf, dass bei 0° Höhenoffset und $|5^\circ|$ azimuthalem Offset erhöhte Intensitätswerte vorliegen, was in entsprechender Altitude-Ausrichtung nicht zu erkennen ist.

Die Farbskala veranschaulicht deutlich, dass in den äußeren Bereichen mit Relativwinkeln größer $\approx |5^\circ|$ eine Grundintensität von ca. 300 K vorliegt. Zum Zentrum hin nimmt die Intensität hingegen stark zu, wobei selbst die zentrumsnächsten Messungen bei $|5^\circ|$ lediglich in azimuthaler Auslenkung leichte Erhöhungen aufweisen. Dies lässt die oben angedeutete Annahme zu, dass die Sonne hier als Punktquelle aufgefasst werden kann. Auf eine Betrachtung oder Darstellung von Unsicherheiten wurde aufgrund der Übersichtlichkeit verzichtet. Zudem werden nur qualitative Aussagen getroffen, insofern sind Unsicherheitsbetrachtungen hier hinfällig.

4.1.2 Öffnungsfunktion des Radioteleskops

Zur Bestimmung der „antenna response function“, welche unter der Annahme, das Teleskop sei eine Lochblende, auch als Öffnungsfunktion verstanden werden kann, wurden zusätzlich jeweils in azimuthaler und altitude Koordinaten relativ zur Sonne 17 Messungen von -16° bis 16° in 2° -Schritten durchgeführt. Dabei wurde die jeweils andere Koordinate auf 0° fixiert. Die ausgelesenen Intensitätsmaxima wurden gegen den relativen Offset, bezogen auf die Sonne, aufgetragen. Die entsprechenden Darstellungen finden sich in Abbildung 4.2 (azimuthaler Offset) und Abbildung 4.3 (altitude Offset). In beiden Abbildungen ist der charakteristische Verlauf der sinc-Funktion zu erkennen. Dabei bilden sich leichte lokale Maxima im Bereich von $|10^\circ|$ bis $|15^\circ|$ (Abb. 4.2) bzw. $|6^\circ|$ bis $|10^\circ|$ (Abb. 4.3) aus.

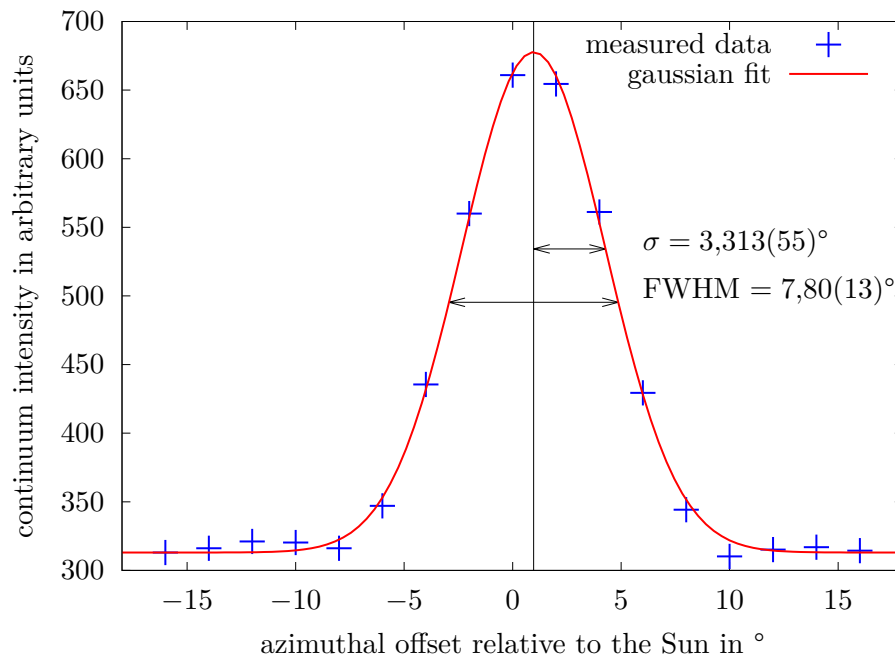


Abbildung 4.2: Die Abbildung verdeutlicht den Verlauf der Datenpunkte gemäß einer sinc-Funktion. Dies bestätigt die Annahme, das Radioteleskop als Lochblende aufzufassen, deren Öffnungsfunktion einer sinc-Funktion entspricht. Zudem lassen sich mittels GAUSS-Fit drei charakteristische Größen ermitteln: die Standardabweichung σ als direktes Ergebnis des Fits mit GAUSSscher Fehlerfunktion und die als spektrales Auflösungsvermögen zu verstehende FWHM, welche nach Formel (4.1) zu berechnen ist. Zudem kann ebenfalls direkt aus dem GAUSS-Fit die Positioniergenauigkeit des Teleskop welche auch als intrinsische Unsicherheit d verstanden wird, abgelesen werden. Sie bezieht sich auf $d = 0,968(47)^\circ$.

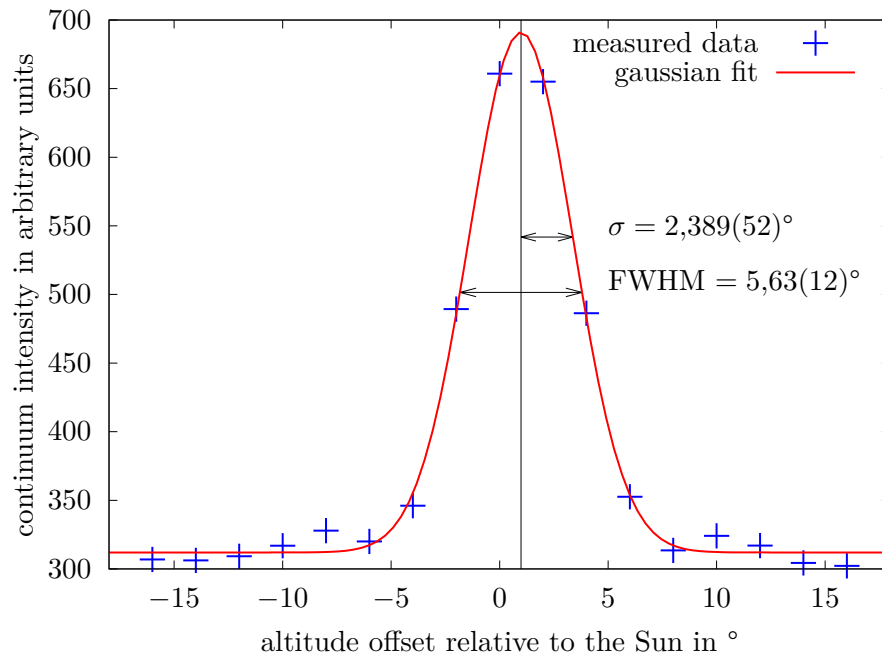


Abbildung 4.3: Analog zu Abbildung 4.2 ist hier die Messung bei variiertem Altitude-Offset dargestellt. Die Standardabweichung, FWHM, sowie die intrinsische Unsicherheit ($d = 0,984(48)^\circ$) berechnen sich entsprechend.

An die Datenpunkte wurde jeweils eine GAUSS-Funktion angefitet, welcher dann weitere Berechnungen folgten. Der Erwartungswert d lässt einen Rückschluss auf Abweichungen in der Positioniergenauigkeit des Teleskops zu und kann hier somit als intrinsische Unsicherheit aufgefasst werden. Diese umfasst beispielsweise äußere Einflüsse, wie ein Zittern des Teleskops aufgrund von Wind oder auch der Umstand, dass das Teleskop in Schritten von $0,125^\circ$ trackt [HJVK]. Auch die Erdrotation ruft eine Winkeländerung mit $\approx 0,25^\circ$ pro Minute hervor. Diese „tracking accuracy“ beträgt nach [HJVK] $0,5^\circ$. Aus den beiden Messreihen ergab sich nach Bilden des gewichteten Mittelwerts und der zugehörigen **inter-**
nen Unsicherheit auf Grundlage der aus den mittels GNU PLOT gewonnenen Größen und zugehörigen Unsicherheiten ein Wert von $d = 0,976(34)^\circ$. Somit liegt der hier gefundene Wert der Positioniergenauigkeit, auch im Rahmen der berechneten Unsicherheiten, höher als der aus der Literatur erwartete Wert. Dennoch lässt die korrekte Größenordnung auf eine fehlerfreie Vorgehensweise schließen. Es lässt sich lediglich für die weiteren Beobachtungen festhalten, dass bei den hier gegebenen Bedingungen vermutlich etwas größere Unsicherheiten vorlagen aufgrund von beispielsweise kürzeren Messzeiten, starkem Wind oder anderen Einflüssen.



Zudem wird die Betrachtung des spektralen Auflösungsvermögens zeigen, dass sowohl die berechnete wie auch die in der Literatur angegebene „tracking accuracy“ deutlich unterhalb derer liegen. Eine entsprechende Betrachtung folgt nun. Aus der beim GAUSSschen Fit gewonnenen Standardabweichung σ konnte zunächst die Halbwertsbreite (FWHM) nach [Wik18]

$$\text{FWHM} = \sigma \cdot 2\sqrt{2\ln(2)} \quad (4.1)$$

berechnet werden. Diese kann direkt als spektrales Auflösungsvermögen verstanden werden. Die entsprechenden Werte sind den beiden Abbildungen 4.2 und 4.3 zu entnehmen. Hierbei wurden ebenfalls der gewichtete Mittelwert gebildet und die externe Unsicherheit bestimmt. Somit ergab sich ein Wert von $\text{FWHM} = 6,6(11)^\circ$, welcher ebenfalls auf Grundlage der berechneten Unsicherheit in guter Übereinstimmung mit dem Literaturwert von $\approx 6^\circ$ [HJVK] liegt. Dieser Wert übersteigt die vorab bestimmte intrinsische Ungenauigkeit deutlich und bestätigt somit die hinreichende Genauigkeit des Teleskops für die nachfolgend dargelegten Untersuchungen.

Anhand der gewonnenen Werte des Auflösungsvermögens (FWHM) aus den beiden Messreihen konnte nach dem RAYLEIGH-Kriterium mittels folgender Gleichung zudem auf den Durchmesser D des Teleskops geschlossen werden [KKO⁺13]:

$$\Theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \approx 2,52'' \times \frac{\lambda}{100 \text{ nm}} \frac{1 \text{ cm}}{D} = 70^\circ \frac{\lambda}{D} \quad (4.2)$$

$$\Leftrightarrow D = 70^\circ \frac{\lambda}{\theta} \quad (4.3)$$

Hierbei bezeichnet Θ das spektrale Auflösungsvermögen, welches durch FWHM gegeben ist. Für die Wellenlänge λ wurde über $c = \lambda \cdot f$ die bekannte Frequenz f eingesetzt und D bezeichnet den Teleskopdurchmesser. Der Vorfaktor geht dabei aus der Bestimmung der Nullstellen der dem RAYLEIGH-Kriterium zugrunde liegenden BESSELFunktionen hervor und wurde in das Gradmaß umgerechnet. Anschließend wurde der gewichtete Mittelwert der beiden berechneten Werte des Teleskopdurchmessers gebildet. Da die Grundlage der durch den GAUSS-Fit gewonnenen Größen eine nicht geringe Anzahl an einzelnen Messwerten darstellt, wurde statt der außerordentlich groß ausfallenden internen und externen Unsicherheiten ($\approx 150 \text{ m}$), welche auf Grundlage der kombinierten Unsicherheiten berechnet wurden, stattdessen die Standardabweichung der berechneten Teleskopdurchmesser berechnet und als sinnvoll erachtet. Somit konnte der Durchmesser des Radioteleskops



„Brage“ aus den erhaltenen Daten berechnet werden und beziffert sich auf $D = 2,23(37)$ m. Dieser Wert liegt ebenfalls in guter Übereinstimmung zum in der Projekt-Dokumentation [HJVK] genannten Wert von $D = 2,3$ m.

Somit kann konstatiert werden, dass die Messungen während des Versuchstags mit hinreichend großer Präzision durchgeführt und einige charakteristische Größen des Teleskops bestätigt werden konnten.

4.2 Beobachtung der Milchstraße

Ziel dieses Auswertungsabschnitts ist es, die Rotationsgeschwindigkeit in der Milchstraße zu ermitteln und die Milchstraße zu kartografieren.

Hierfür werden Radiowellen bei 1410 MHz untersucht. Diese Frequenz ist das Äquivalent zu der charakteristischen „ $\lambda = 21$ cm“-Linie des H1-Übergangs von Wasserstoff. Aufgrund der großen Menge an Wasserstoff in unserer Galaxie ist dieser eigentlich „verbotene“ Übergang mit dem Radioteleskop detektierbar.

4.2.1 Belichtungszeit

Um die Milchstraße kartografieren zu können, müssen zunächst die richtigen Einstellungen an dem Radioteleskop getroffen werden. Mithilfe des *Switched*-Modus, welcher das Rauschen minimiert und bei einer Bandbreite von 2 MHz und 256 Kanälen und somit einer Frequenzauflösung von 7,8 kHz pro Kanal [HJVK] wird dafür zunächst die Belichtungszeit variiert.

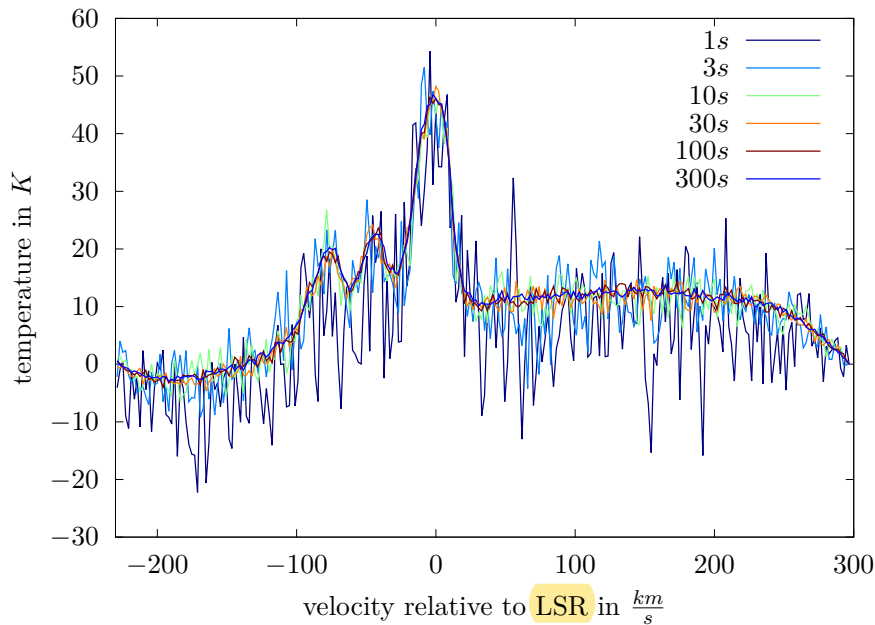


Abbildung 4.4: Mithilfe dieser Abbildung lässt sich erkennen, wie sich die gemessenen Spektren mit der Belichtungszeit verändern. Bei einer Belichtungszeit von 1 s ist ein sehr ausgeprägtes Rauschen des Signals zu verzeichnen. Maxima sind bei dieser Belichtungszeit kaum ausmachbar. Das Rauschen ist allerdings schon bei einer Belichtungszeit von 10 s deutlich reduzierter ausgeprägt. Maxima lassen sich bei dieser Belichtungszeit deutlich genauer ausmachen.

Abbildung 4.4 zeigt die gemessenen Spektren für sechs verschiedene Belichtungszeiten. Dabei ist deutlich erkennbar, dass bei einer Belichtungszeit von lediglich 1 s ein sehr großes Rauschen auftritt und Maxima im Spektrum nicht genau genug ausgemacht werden können. Jedoch glättet sich das Rauschen schon bei einer Belichtungszeit von 10 s deutlich. Ab einer Belichtungszeit von 30 s ist kaum ein signifikanter Unterschied zu längeren Belichtungszeiten mehr erkennbar. Auf Einzeichnung der Unsicherheiten in den Abbildungen wurde in diesem Abschnitt verzichtet, da dies die Abbildung unleserlich machen würde. Jedoch werden die auftretenden Unsicherheiten diskutiert und somit dennoch berücksichtigt.

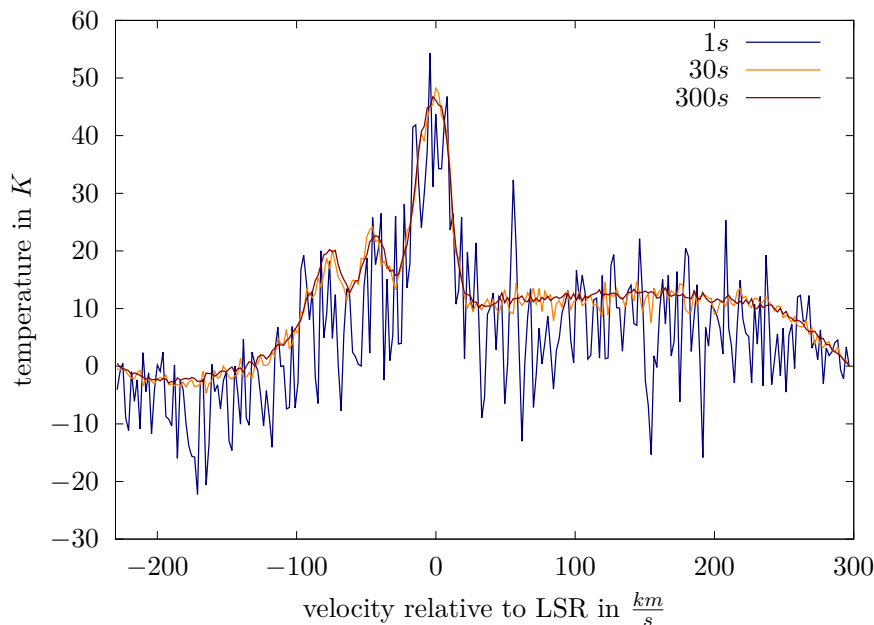


Abbildung 4.5: Diese Abbildung soll noch einmal die eindeutigen Unterschiede der Spektren bei verschiedenen Belichtungszeiten verdeutlichen. Da sich das Spektrum bei einer Belichtungszeit von 30 s und 300 s nur noch minimal unterscheidet, wurde eine Belichtungszeit für die Spektren von 60 s gewählt. Bei dieser Zeit waren alle Maxima deutlich ausmachbar und der zeitlich begrenzte Versuchszeitraum wurde nicht gesprengt.

Abbildung 4.5 zeigt die extremalen Belichtungszeiten für eine genauere Analyse der Spektren. Da sich das Spektrum ab einer Belichtungszeit von 30 s nicht mehr merklich verändert, sind die Messungen stets mit einer Belichtungszeit von 60 s aufgenommen. Somit ist es nochmal genauer als eine Messung bei 30 s, sprengt aber nicht den zeitlichen Rahmen des begrenzten Versuchszeitraums, was bei einer Messung bei jeweils 300 s der Fall wäre.

4.2.2 Verarbeitung der Daten

Mithilfe eines MATLAB-Skripts werden das Untergrundrauschen der einzelnen Spektren geglättet und die auftretenden Peaks mittels einer GAUSSfunktion gefittet. Somit lassen sich die Maxima sehr präzise bestimmen. Abbildung 4.6 zeigt dieses Vorgehen exemplarisch. Dabei liegen die zwei Maxima bei $7,3 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $-64,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ relativ zu LSR, gemessen bei $l = 30^\circ$, $b = 0^\circ$. Um eine aussagekräftige Karte der Milchstraße zu erstellen, sind Messungen vom ersten Quadranten bis in den dritten Quadranten hinein vorgenommen worden.

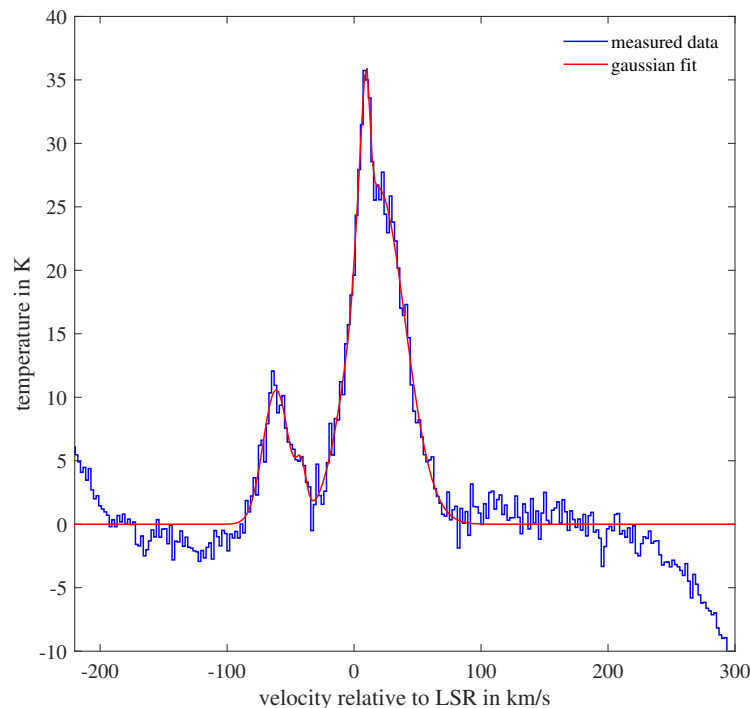


Abbildung 4.6: Gemessenes Beispielspektrum zur Darstellung der Verarbeitung der Daten. Da bei den Messungen stets ein Untergrundrauschen mitgemessen wurde, musste dieses mithilfe eines Computerprogramms herausgefiltert werden. Mittels eines MATLAB-Skripts wurden die Spektren jeweils noch mit GAUSSfunktionen gefittet. So lassen sich die Maxima deutlich erkennen und auslesen. In diesem Fall handelt es sich um eine Messung bei $l = 30^\circ$, $b = 0^\circ$ und die beiden Maxima liegen bei $7,3 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $-64,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ relativ zu LSR.

4.2.3 Rotationsgeschwindigkeit

Bevor die Milchstraße kartografiert wurde, sollte zunächst die Rotationsgeschwindigkeit einzelner Punkte in der Galaxie untersucht werden. Hierfür wurden aus den maximal verschobenen Maxima $V_{r,max}$ der Geschwindigkeiten aus dem ersten Quadranten hin zu positiven Werten jeweils die Geschwindigkeit relativ zu LSR ausgelesen. Da es sich bei diesen Maxima um Tangentenpunkte handelt, kann der Radius R zum Zentrum der Milchstraße

wie folgt ermittelt werden [HJV]:

$$R = R_0 \cdot \sin(l) . \quad (4.4)$$

Hierbei ist $R_0 = 8,5 \text{ kpc}$ der Abstand der Sonne zum Zentrum der Milchstraße. Die Werte für R lassen sich aus der Tabelle 6.1 entnehmen. Mithilfe von R lässt sich nun auch die Geschwindigkeit mit folgender Gleichung ermitteln [HJV]:

$$V = V_{r,max} + V_0 \cdot \sin(l). \quad (4.5)$$

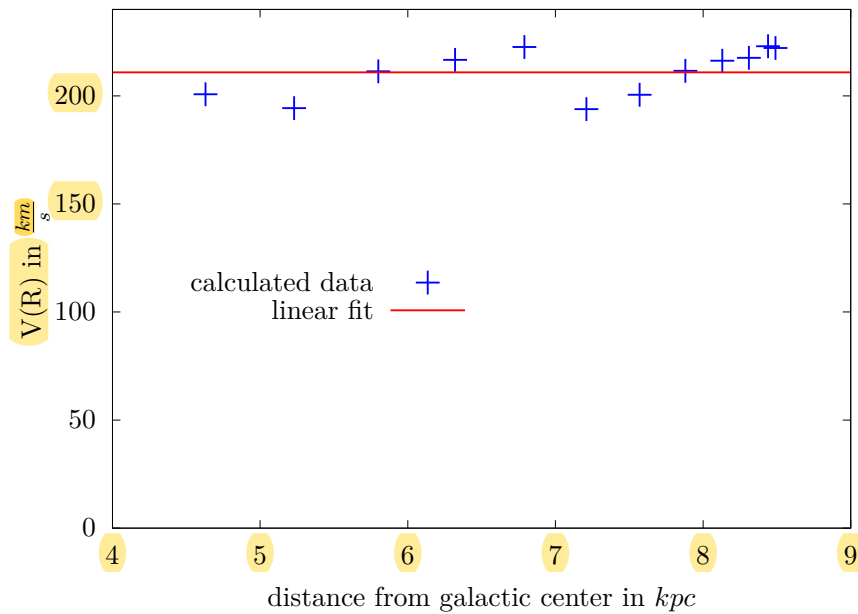



Abbildung 4.7: Dargestellt ist eine Rotationskurve der Milchstraße. Die eingetragenen Datenpunkte wurden jeweils aus dem Peak der maximal verschobenen Geschwindigkeitskomponente der gemessenen Geschwindigkeitsspektren aus dem ersten Quadranten gewonnen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeit $V(R)$ nahezu unabhängig von dem Bahnradius ist. Mit einem linearen Fit wurde dies in der Abbildung nochmals verdeutlicht. Der Ordinatenabschnitt kennzeichnet dabei den Mittelwert der gemessenen Geschwindigkeiten. Dieser beträgt $210,9(31) \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und kommt einem Literaturwert von $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ [WC07] sehr nahe. Einen exakten Literaturwert für die Geschwindigkeit zu finden, ist nicht möglich, da dieser bei verschiedenen Quellen unterschiedlich angegeben wird. Jedoch wird immer ein Wert um $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ angegeben.

Die Werte dafür können ebenfalls der Tabelle 6.1 entnommen werden. Abbildung 4.7 zeigt die Rotationsgeschwindigkeiten, aufgetragen über dem korrespondierenden Bahnradius. Dabei ist ersichtlich, dass diese nahezu linear angeordnet sind. Mithilfe eines linearen Fits lässt sich der Mittelwert von $210,9(31) \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ausmachen, welcher beinahe in Übereinstimmung mit dem Literaturwert von $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ [WC07] ist. Ein linearer Verlauf ist für Rotationsgeschwindigkeiten von Planeten ungewöhnlich, da entweder ein linearer Zusammenhang ($V \sim R$) wie bei einem starren Körper oder ein $V \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$ wie bei einer Zentralmasse zu erwarten ist. Ohne diesen Zusammenhang wäre die Milchstraße nicht stabil. Die konstante Geschwindigkeit lässt sich nur auf eine unbekannte Energie und Materie (schwarze Energie/Materie) zurückführen, welche die Massen zusammenhält. 

4.2.4 Kartografie der Milchstraße


Da die Rotationsgeschwindigkeit nahezu konstant ist, wird im Folgenden eine Geschwindigkeit von $V(R) = V_0 = 220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ angenommen. Mithilfe dieser Annahme kann nun für jedes Maxima aus den Spektren der jeweilige Radius R wie folgt ermittelt werden [HJV]:

$$R = \frac{R_0 \cdot V_0 \cdot \sin(l)}{V_0 \cdot \sin(l) + V_r} . \quad (4.6)$$

Hierbei ist V_r das jeweilige Maximum im Spektrum relativ zu LSR.

Mit R kann nun mithilfe des Cosinussatzes ein Ausdruck für r (Abstand Sonne-Wasserstoffwolke) ermittelt werden [HJV]:

$$r_{\pm} = \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \cdot \sin(l)^2} + R_0 \cdot \cos(l) . \quad (4.7)$$

Negative Werte für r können vernachlässigt werden, da dies bedeutet, dass sie sich hinter der Sonne befinden würden [HJV]. Da es im ersten Quadranten ($0^\circ \leq l \leq 90^\circ$) allerdings mehrere positive Lösungen für r gibt, muss eine genauere Untersuchung der Beobachtungsrichtung gemacht werden. Hierfür wird die galaktische Breite b variiert. Somit sollten Wasserstoffwolken, welche weiter entfernt liegen, nicht mehr als Peak im Spektrum sichtbar sein, da sie dann außerhalb des Beobachtungsfensters liegen. 

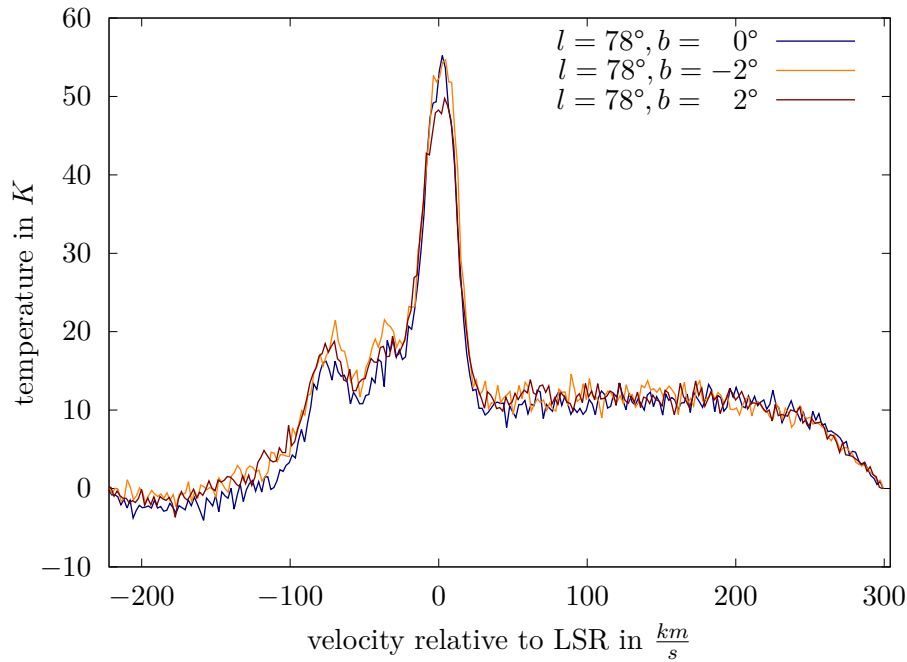


Abbildung 4.8: Diese Abbildung zeigt Spektren für verschiedene galaktische Breiten b . Erkennbar ist, dass in allen Spektren stets bei allen gewählten galaktischen Breiten b die Maxima bei $2,4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $-30,6 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $-69,7 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ erkennbar sind. Die Werte für b sind offenbar zu klein gewählt worden. Bei größeren galaktischen Breiten sollte mindestens ein Peak weniger auftreten. Auf Fits mittels GAUSS-Funktionen wurde bei dieser Abbildung zu Gunsten der besseren Lesbarkeit verzichtet.

Die Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch eine Aufnahme bei $b \neq 0$. Es ist erkennbar, dass trotz der Wahl von $b = \pm 2$ alle Maxima ersichtlich sind. Somit kann keine weitere Aussage über r getroffen werden. Da am Versuchstag allerdings nur Untersuchungen bis $b = \pm 2$ gemacht worden sind, wurde auf alle Werte, für die zwei positive Ergebnisse für r existieren, verzichtet. Für alle anderen Werte lassen sich die Ergebnisse für r_{\pm} aus den Tabellen 6.1, 6.2 und 6.3 entnehmen.

Die ermittelten Koordinaten r lassen sich nun noch in kartesische Koordinaten transformieren. Dies geschieht mit nachfolgenden Gleichungen [HJV]:

$$x = r \cdot \cos(l - 90^\circ) \quad (4.8)$$

$$y = r \cdot \sin(l - 90^\circ) \quad (4.9)$$

Die so ermittelten Werte lassen sich wieder aus den Tabellen 6.1, 6.2 und 6.3 entnehmen.

Nun können alle ermittelten Werte in eine zweidimensionale Abbildung eingetragen werden, wie in Abbildung 4.9 zu sehen. In dieser Abbildung sind teilweise deutliche Strukturen der Milchstraße analog zur Literatur (siehe Abbildung 4.10) zu sehen. Zu beachten ist, dass Abbildung 4.10 galaktische Koordinaten verwendet und die ertellte Abbildung 4.9 das kartesische Koordinatensystem verwendet. Da allerdings die Milchstraße stets eine galaktische Breite von $b = 0^\circ$ aufweist, können die beiden verschiedenen Koordinatensysteme in einer zweidimensionalen Abbildung miteinander verglichen werden.

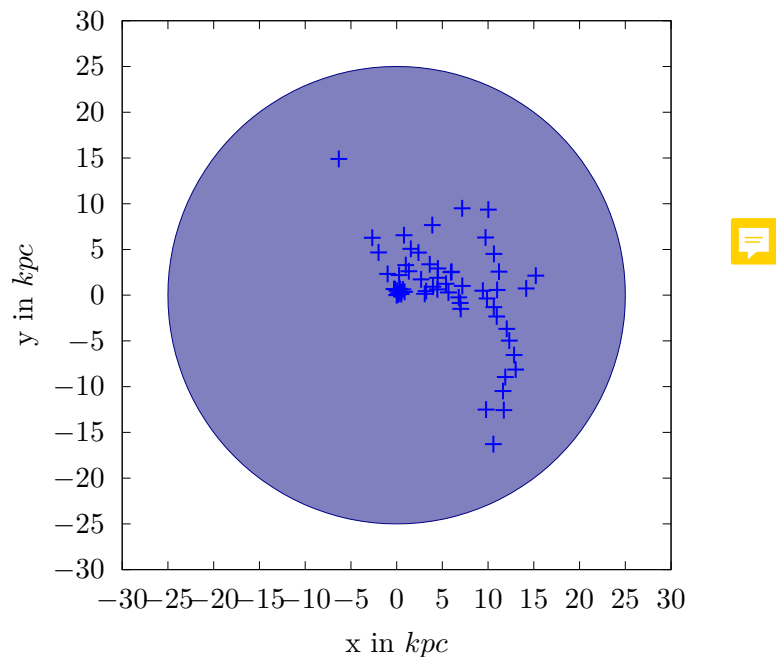


Abbildung 4.9: In dieser Abbildung ist die Milchstraße mithilfe der Daten aus den Frequenzspektren kartografiert. Bei der Abbildung ist ein Seitenarm der Milchstraße im Bereich um $(x, y) = (10, -10)$ deutlich ersichtlich. Ein weiterer Galaxiearm ist im Bereich $(x, y) = (10, 5)$ erkennbar, wobei dieser schon deutlich schwächer ausgeprägt ist. In dem Bereich um den Ursprung sind die Datenpunkte sehr dicht angehäuft. Somit ist in diesem Bereich leider keine eindeutige Aussage über etwaige Galaxiearme zu machen. Mithilfe des eingefärbten Kreises mit dem Radius von 25 kpc ist die Größe der gesamten Galaxie **ersichtlich**.

Da in diesem Bericht nur in einem Bereich von $33^\circ \leq l \leq 203^\circ$ gemessen wurde, sind keine Datenpunkte im vierten Quadrant und nur wenige Datenpunkte im dritten Quadrant zu sehen. Werden allerdings die Datenpunkte des ersten Quadranten genauer betrachtet, so ergibt ein Vergleich mit der Literatur, dass es sich vermutlich um den *Cygnus-Arm* handelt. Bei den Datenpunkten um den Koordinatenursprung ist es deutlich schwieriger, eine eindeutige Aussage zu treffen, da hier die Galaxiearme sehr dicht beieinanderliegen. Jedoch sind Tendenzen der Galaxiearme *Perseus* und *Orion* zu erkennen. Bei den einzelnen Messpunkten bei $(x, y) = (-12.96, 30.54)$, $(x, y) = (48.82, 159.69)$ und $(x, y) = (-6.32, 14.89)$ handelt es sich vermutlich um Messpunkte, die „falsch“ sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Maxima in den Spektren nicht immer deutlich **ersichtlich** sind. Die blau markierte Fläche in Abbildung 4.9 charakterisiert die gesamte Fläche der Galaxie, welche einen Kreis mit einem Radius von etwa 25 kpc einnimmt.

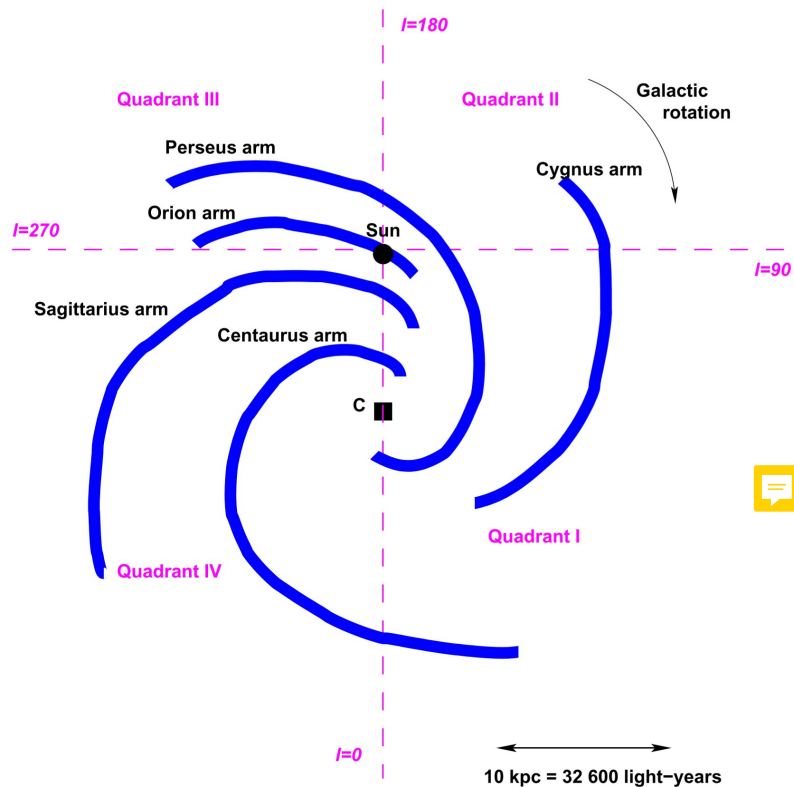


Abbildung 4.10: Literaturbeispiel zur Abbildung der Milchstraße. Zu sehen sind die einzelnen Seitenarme (blau markiert) der Milchstraße, welche mit ihren Namen gekennzeichnet sind, und die Rotationsrichtung der gesamten Milchstraße. Für die Einordnung der Größenordnung ist noch ein Maßstab angegeben. [HJV]

5 Fazit

In Bezug auf die Beobachtung der Sonne kann ein durchweg positives Fazit gezogen werden. Einige Annahmen – die Sonne als Punktquelle oder das Teleskop als Lochblende aufzufassen – und daran anknüpfende Folgerungen wie das Erhalten der sinc-Funktion oder das Berechnen des Auflösungsvermögens mittels FWHM wurden durch die guten Ergebnisse und anschaulichen Grafiken legitimiert. Bis auf die Positioniergenauigkeit – $0,976(34)^\circ$ gegenüber $0,5^\circ$ – des Teleskops liegen alle ermittelten Charakteristika des Teleskops auf Grundlage der Unsicherheiten in guter Übereinstimmung mit den Werten der Projektdokumentation [HJVK]. Auch die Positioniergenauigkeit liegt in derselben Größenordnung und widerspricht somit nicht gänzlich der Erwartung. Das Auflösungsvermögen ($6,6(11)^\circ$ zu 6° [HJVK]) und das Rückrechnen auf den Teleskopdurchmesser ($2,23(37)$ m zu $2,3$ m [HJVK]) zeigen wie erwähnt gute Übereinstimmungen.

Auch die Messungen und Berechnungen der Milchstraße liefern sehr gute Werte, welche stets in guter Übereinstimmung mit der Literatur sind. Ausschlaggebende Erfolge dieses Versuchsteils ist zum einen die nahezu konstante Geschwindigkeit der Körper in der Milchstraße von $210,9(31) \frac{\text{km}}{\text{s}}$ (Literaturwert $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ [WC07]), was deutlich auf eine unbekannte Energie und Materie im Universum hindeutet, und die sehr präzise Kartografie der Milchstraße. Hier sind die Seitenarme *Cygnus-Arm*, *Perseus* und *Orion* anhand eines Vergleichs mit der Literatur bestimmbar. Somit war ein hinreichend präzises Vermessen der Milchstraße gewährleistet.



Literatur

- [HJV] Horellou, Cathy, Daniel Johansson und Eskil Varenius: *SALSA project documentation: Mapping the Milky Way*. https://github.com/varenius/salsa/blob/master/Lab_instructions/HI/English/SALSA-HI_English.pdf?raw=true, letztes Update: 2015-12-09 11:53.
- [HJVK] Horellou, Cathy, Daniel Johansson, Eskil Varenius und Grzegorz Klopotek: *SALSA user manual: Telescope control and data analysis*. https://github.com/varenius/salsa/blob/master/User_manual/English/SALSA-USERMANUAL_English.pdf?raw=true, letztes Update: 2018-04-01 20:36.
- [KKO⁺13] Karttunen, Hannu, Pekka Kröger, Heikki Oja, Markku Poutanen und Karl J. Donner: *Fundamental Astronomy*. Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-662-03215-2.
- [Var] Varenius, Eskil: *SALSA project documentation: Antenna response using the Sun*. https://fp.physik.uni-konstanz.de/docs/SALSAre mote/SALSA-BEAM_English.pdf, letztes Update: 2014-12-24 19:49.
- [WC07] Wada, K. und Combes, F.: *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*. Astrophysics and Space Science Proceedings. Springer, New York, 2007, ISBN 9780387727684. <https://books.google.de/books?id=bP9hZqoIfhMC>.
- [Wik18] Wikipedia: *Halbwertsbreite* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*, 2018. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Halbwertsbreite&oldid=182539858>, [Online; Stand 26. Mai 2020].

Abbildungsverzeichnis

3.1	Radioteleskope	2
4.1	Raster-Scan der Sonne	5
4.2	Kreuz-Scan der Sonne, Azimutaler Offset	6
4.3	Kreuz-Scan der Sonne, Altitude Offset	7
4.4	Gemessene Spektren bei verschiedenen Belichtungszeiten	10
4.5	Eindeutige Unterschiede der Spektren bei verschiedenen Belichtungszeiten .	11
4.6	Gemessenes Beispielspektrum zur Darstellung der Verarbeitung der Daten .	12
4.7	Rotationskurve der Milchstraße	13
4.8	Spektren für verschiedene galaktische Breiten b	15
4.9	Abbildung der Milchstraße	16
4.10	Literaturbeispiel zur Abbildung der Milchstraße	17

Tabellenverzeichnis

6.1	Berechnete Werte für den ersten Quadranten	21
6.2	Berechnete Werte für den zweiten Quadranten	22
6.3	Berechnete Werte für den zweiten und dritten Quadranten	23

Anhang

Tabelle 6.1: Berechnete Werte für den ersten Quadranten

GK (b=0) 1	velocity $\frac{km}{s}$	R	r+	r-	x	y	Radius Tangente	$V(R)$
33	6.7	8.05	13.71	0.54			4.63	200.72
33	41.7	6.31	11.41	2.85				
33	80.9	5.07	9.21	5.05				
33	-46	13.80	19.42	-5.87	10.58	-16.28		
38	5.3	8.18	12.99	0.41			5.23	194.35
38	32.1	6.87	11.15	2.24				
38	58.9	5.92	9.47	3.92				
38	-33.9	11.34	15.87	-3.36	9.77	-12.50		
43	5.7	8.19	12.00	0.43			5.80	211.34
43	30.4	7.07	10.26	2.17				
43	61.3	6.03	7.89	4.54				
43	-52	13.01	17.17	-5.43	11.71	-12.56		
48	3.7	8.31	11.09	0.29			6.32	216.69
48	53.2	6.41	6.80	4.58				
48	-45.7	11.80	15.65	-4.28	11.63	-10.47		
53	7.7	8.14	9.61	0.62			6.79	222.60
53	-50	11.88	14.87	-4.64	11.87	-8.95		
58	7.3	8.18	8.37	0.64			7.21	193.87
58	-64.8	13.02	15.35	-6.34	13.02	-8.13		
63	4.5	8.31	7.28	0.44			7.57	200.52
63	-67.7	12.98	14.41	-6.69	12.84	-6.54		
68	7.6	8.19	5.43	0.94			7.88	211.58
68	-68.6	12.81	13.28	-6.91	12.31	-4.97		
73	5.9	8.27	4.00	0.97			8.13	216.29
73	-72.4	12.96	12.58	-7.61	12.03	-3.68		
78	2.4	8.41	3.01	0.53			8.31	217.59
78	-30.6	9.91	7.16	-3.62	7.00	-1.49		
78	-69.7	12.57	11.20	-7.66	10.95	-2.33		
83	-38.7	10.33	7.00	-4.93	6.95	-0.85	8.44	222.96
83	-73.7	12.83	10.70	-8.63	10.62	-1.30		
88	-45.1	10.69	6.79	-6.20	6.79	-0.24	8.49	222.17
88	-74	12.81	9.89	-9.29	9.88	-0.35		

Tabelle 6.2: Berechnete Werte für den zweiten Quadranten

GK (b=0) 1	velocity $\frac{km}{s}$	R	r+	r-	x	y
93	0	8.50	0.00	-0.89	0.00	0.00
93	-41.3	10.47	5.68	-6.57	5.67	0.30
93	-16.5	9.19	3.08	-3.97	3.07	0.16
93	-76.3	13.02	9.43	-10.32	9.42	0.49
93	-88.70	14.26	11.01	-11.90	10.99	0.58
93	-109.3	16.92	14.19	-15.08	14.17	0.74
98	-35.6	10.16	4.51	-6.87	4.46	0.63
98	-62.4	11.91	7.25	-9.61	7.18	1.01
98	-23.3	9.52	3.26	-5.63	3.23	0.45
98	-118.10	18.56	15.36	-17.73	15.21	2.14
103	-3.3	8.63	0.52	-4.35	0.51	0.12
103	-50.8	11.14	5.54	-9.36	5.40	1.25
103	-98.7	15.75	11.49	-15.31	11.19	2.58
103	-36.2	10.23	4.09	-7.91	3.98	0.92
113	-9.4	8.91	0.95	-7.59	0.87	0.37
113	-50.6	11.33	4.88	-11.52	4.49	1.90
113	-65	12.52	6.45	-13.09	5.94	2.52
113	-100.1	16.81	11.55	-18.20	10.64	4.51
113	-65.80	12.59	6.54	-13.19	6.02	2.56
113	-1.1	8.55	0.12	-6.76	0.11	0.05
123	-7.4	8.86	0.62	-9.88	0.52	0.34
123	-3.3	8.65	0.28	-9.54	0.23	0.15
123	-36.2	10.57	3.18	-12.44	2.67	1.73
123	-56.9	12.29	5.38	-14.64	4.51	2.93
123	-96.00	17.72	11.59	-20.85	9.72	6.31
133	-3.4	8.68	0.27	-11.86	0.19	0.18
133	-11.6	9.16	0.93	-12.53	0.68	0.64
133	-50.8	12.42	4.96	-16.55	3.63	3.38
133	-94.1	20.47	13.71	-25.30	10.03	9.35
143	-6.3	8.92	0.52	-14.10	0.32	0.42
143	-74.3	19.37	11.89	-25.47	7.16	9.50
153	-7.6	9.20	0.78	-15.93	0.35	0.69
153	-24.1	11.20	2.94	-18.09	1.34	2.62
153	-36.4	13.37	5.23	-20.38	2.38	4.66
153	-48.8	16.62	8.59	-23.74	3.90	7.66

Tabelle 6.3: Berechnete Werte für den zweiten und dritten Quadranten

GK (b=0) l	velocity $\frac{km}{s}$	R	r+	r-	x	y
163	-18.1	11.83	3.44	-19.69	1.00	3.29
163	-24.3	13.66	5.30	-21.56	1.55	5.07
163	-55.2	59.94	51.76	-68.01	15.13	49.50
163	-61.20	175.14	166.99	-183.25	48.82	159.69
173	-5.5	10.69	2.21	-19.08	0.27	2.19
173	-1.4	8.97	0.47	-17.34	0.06	0.47
173	-11.7	15.08	6.61	-23.48	0.81	6.56
193	3.5	9.15	0.66	-17.23	-0.15	0.65
203	6.4	9.18	0.74	-16.39	-0.29	0.68
203	18.7	10.86	2.52	-18.17	-0.98	2.32
203	31.1	13.32	5.07	-20.72	-1.98	4.67
203	37.3	15.02	6.82	-22.47	-2.66	6.28
203	55.80	24.23	16.17	-31.82	-6.32	14.89
203	68.2	41.14	33.18	-48.83	-12.96	30.54