

SALSA Radioteleskop Remote

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 hydrogen clouds in the Milky Way and additionally to characterize the used radio telescope. Therefore, a radio telescope in Onsala, Sweden was used remotely. As a first step the main characteristics of the telescope 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 assumptions that the SALSA-telescope behaves as a circular aperture and that the sun can be idealized as a point source the expected defraction pattern is given by a sinc-function, therefore 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 $1420,4$ MHz (H1 line; $\lambda = 21$ cm) result in an almost constant velocity for all observed hydrogen clouds 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 literature. At least three different spiral arms of the galaxy are visible with the calculated data.

Beide Autoren haben zu jedem Abschnitt wesentliche Beiträge geleistet. Die Autoren bestätigen, dass sie die Ausarbeitung selbstständig verfasst haben und alle genutzten Quellen angegeben wurden.

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	7
4.2	Beobachtung der Milchstraße	11
4.2.1	Belichtungszeit	11
4.2.2	Verarbeitung der Daten	13
4.2.3	Rotationsgeschwindigkeit	14
4.2.4	Kartografie der Milchstraße	16
5	Fehlerdiskussion und Fazit	20
	Anhang	23

1 Einleitung

Die Astrophysik beschreibt ein großes Feld physikalischer Forschungsmöglichkeiten. Mithilfe des Wissens über die Stabilität und den Ursprung des 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 muss beispielsweise die in diesem Versuch gemessene Strahlung die Distanz mehrerer Lichtjahre durch das Universum zurücklegen, 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 Zusammenhang mit der Milchstraße und 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 – bei den Sonnenmessungen genügen bereits 10 s – beachtet werden. Eine Betrachtung unterhalb dieser Höhe und Zeit würde ein zu großes Rauschen in den Spektren erzeugen. Zudem können aufgrund der geographischen

Lage des Teleskops nicht alle Bereiche der Milchstraße vermessen werden, da von diesen keine Strahlung zum Teleskop gelangt. 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. Hierfür wurde stets eine Messdauer von 60 s veranschlagt. 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. Dabei wurde stets eine Messdauer von 10 s beachtet. 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 andere Größe wurde auf 0° Offset gesetzt.

4 Auswertung

Im Folgenden werden die Auswertung der gewonnenen Daten sowie 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 diese bei einer Frequenz von 1410 MHz für jeweils 10 s durchgeführt. Genauer wurde der Messprozess bereits in Abschnitt 3 beschrieben. Beispielhaft zeigt Abbildung 4.1 ein solches Spektrum. Aus den gewonnenen Spektren wurde anschließend stets der Intensitätswert bei der Messefrequenz 1410 MHz ausgelesen, um eine Grundlage für die Vergleichbarkeit der Daten zu schaffen. Diese Frequenz ist in Abbildung 4.1 hervorgehoben und zeigt, dass durch dieses Vorgehen mit guter Genauigkeit das Maximum des jeweiligen Spektrums erhalten wurde. Dieses Verfahren wurde sowohl beim 5×5-Raster-Scan als auch bei den Kreuz-Scans angewendet. Die Intensitätswerte wurden in den entsprechenden Abbildungen 4.2 bis 4.4 geplottet.

Zur Einheit der Intensität sei angemerkt, dass diese stets in „arbitrary units“ bzw. in Kelvin (K) angegeben wurden, da eine Kalibrierung des Teleskops für Absolutwerte vom ONSALA 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° Azimut- (azimuth) und Höhenwinkelversatz (altitude) in 5° -Schritten durchgeführt. Die entsprechenden jeweiligen Intensitätsmaxima wurden in Abbildung 4.2 über den Relativwinkeln zur Sonne bei 0° aufgetragen. Die Interpolation zwischen den 25 Messwerten wurde dabei mittels GNUPLOT durchgeführt. GNUPLOT verwendet hierbei den „Qnorm-Algorithmus“, welcher einen gewichteten Mittelwert der

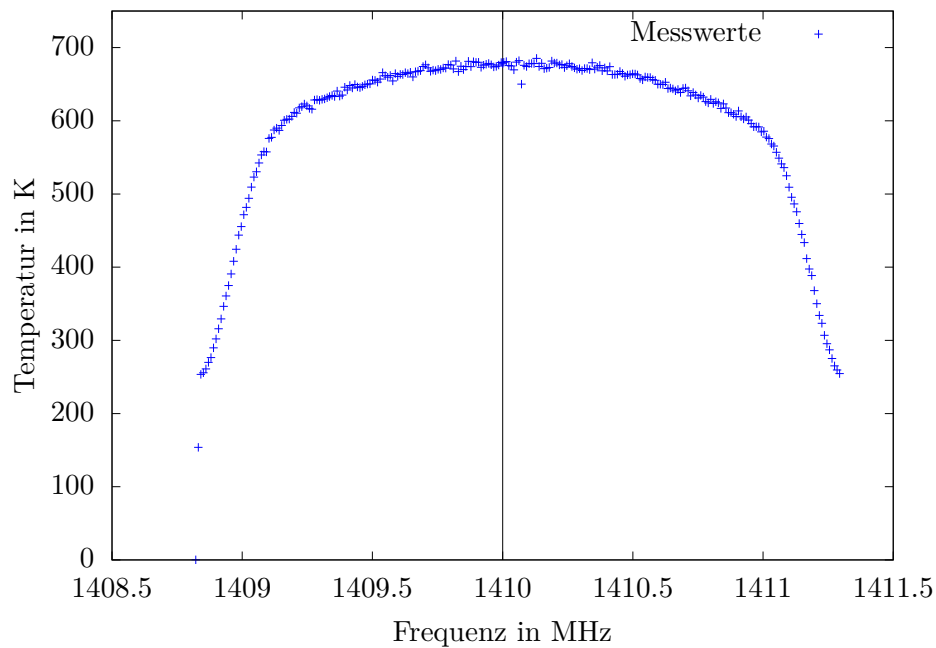


Abbildung 4.1: In dieser Abbildung ist beispielhaft ein aufgezeichnetes Sonnenspektrum gezeigt. Es handelt sich um die Messung, bei welcher sowohl Höhen- wie auch Azimutwinkelversatz gleich null sind. Dabei ist die Intensität über der Frequenz aufgetragen. Zudem wurde die Frequenz 1410 MHz markiert, bei welcher der zugehörige Intensitätswert ausgelesen wurde, da diese als Messfrequenz eingestellt wurde. Entsprechend wurden alle aufgezeichneten Spektren der Sonnenmessung analysiert.

Messdaten an jedem Gitterpunkt berechnet. Dabei wird jeder Messwert mit dem Inversen seines Abstands zum jeweiligen Gitterpunkt gewichtet. Diese Gewichtung wird zudem mit der Ordnung der Norm des Abstands potenziert. Als zusätzliche Parameter können optional die Lage des erwarteten globalen Maximums und die erwartete Standardabweichung angegeben werden. Die Lage wurde im Zentrum bei jeweils 0° Azimutal- und Höhenwinkelversatz erkannt. Auf die Angabe einer Standardabweichung wurde verzichtet.

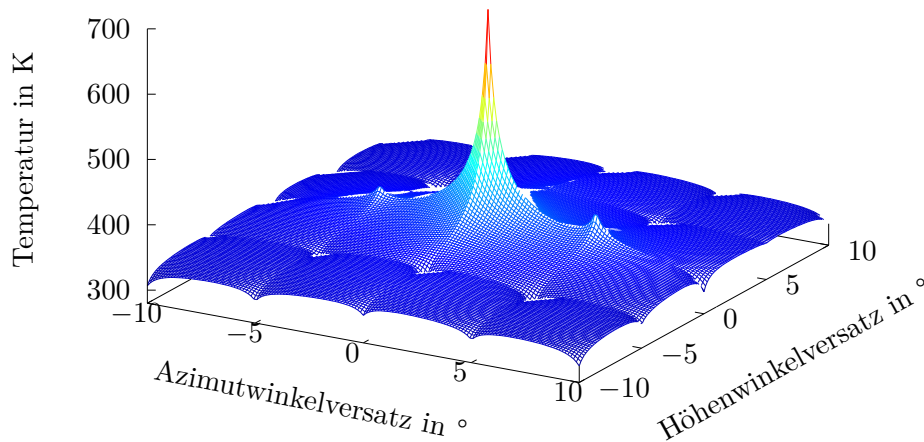


Abbildung 4.2: Diese Abbildung zeigt den 5×5 -Raster-Scan der Sonne. Dabei wird deutlich, dass in den dunkelblau gefärbten Bereichen von $> |5^\circ|$ Offset sowohl in Höhen- als auch in Azimutwinkel eine Grundintensität – hier in K gemessen – vorliegt. Die Sonne als Punktquelle aufzufassen, wird durch 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 bei entsprechendem Höhenwinkelversatz nicht zu erkennen ist. Dies lässt vermuten, dass es sich um ein sinc-Profil handelt, die entsprechenden Maxima im Höhenwinkelversatz allerdings fehlen. Somit deutet dies ebenfalls auf eine Punktquelle hin.

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, die Sonne hier als Punktquelle aufzufassen, da das in Abbildung 4.2 zu sehende Beugungsbild einem dreidimensionalen sinc-Profil gleicht. Wobei die Nebenmaxima in Richtung des Höhenwinkelversatzes fehlen. Dieses Beugungsbild erhält man, sofern sich das Radioteleskop wie eine Kreisblende und die Sonne wie eine Punktquelle verhalten. Auf Grundlage dieser Erkenntnis lassen sich im Folgenden daraus Standardabweichung, FWHM und das Auflösungsvermögen des Teleskops bestimmen.

Auf die Darstellung von Unsicherheiten wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Da nur qualitative Aussagen getroffen werden, sind Unsicherheitsbetrachtungen 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 zwei genauere Kreuzscans der Sonne aufgenommen. Hierfür wurde der Azimut- und Höhenoffset jeweils von -16° bis 16° in 2° -Schritten variiert, wobei die jeweils andere Koordinate auf 0° fixiert wurde. Die ausgelesenen Intensitätsmaxima wurden gegen den relativen Offset, bezogen auf die Sonne, aufgetragen.

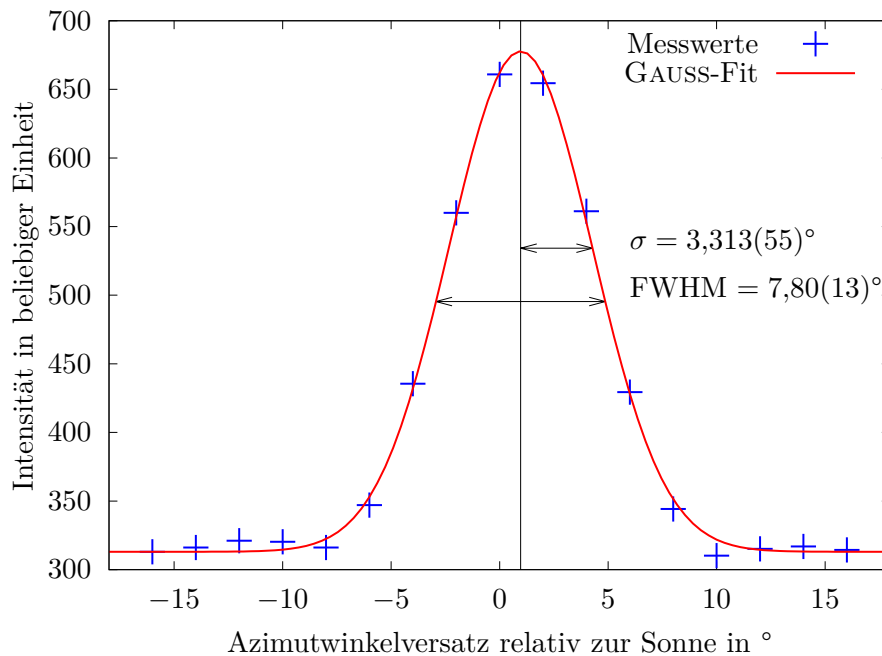


Abbildung 4.3: Die Abbildung verdeutlicht den Verlauf der Datenpunkte gemäß einer sinc-Funktion. Dies bestätigt die Annahme, das Radioteleskop als Lochblende aufzufassen, deren Öffnungsfunktion einer sinc-Funktion entspricht. Zudem lassen sich mittels GAUSS-Fit drei charakteristische Größen ermitteln: 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 Teleskops, welche auch als intrinsische Unsicherheit d verstanden wird, abgelesen werden. Sie beziffert sich auf $d = 0,968(47)^\circ$.

Die entsprechenden Darstellungen finden sich in Abbildung 4.3 (azimutaler Offset) und Abbildung 4.4 (Höhenoffset). In beiden Abbildungen ist der charakteristische Verlauf der sinc-Funktion zu erkennen. Dies bestätigt, dass sich das Teleskop wie eine Kreisblende verhält. Dabei bilden sich leichte lokale Maxima im Bereich von $|10^\circ|$ bis $|15^\circ|$ (Abb. 4.3) bzw. von $|6^\circ|$ bis $|10^\circ|$ (Abb. 4.4) aus.

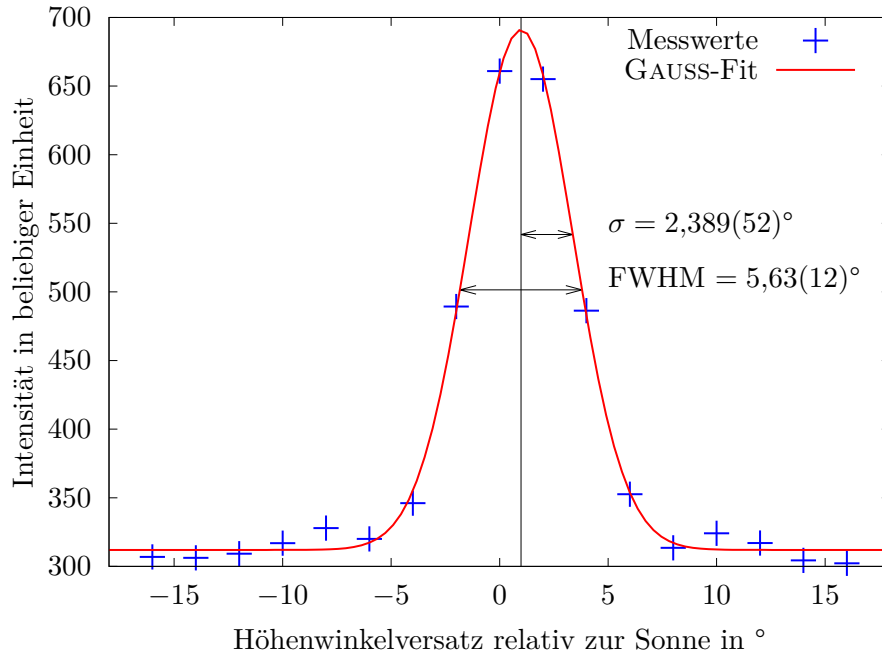


Abbildung 4.4: Analog zu Abbildung 4.3 ist hier die Messung bei variiertem Höhenwinkelversatz dargestellt. Die Standardabweichung (σ), FWHM sowie die intrinsische Unsicherheit ($d = 0,984(48)^\circ$) berechnen sich entsprechend.

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 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 kurzen Messzeiten oder starkem Wind. Zudem ist das Teleskop bereits seit mehreren Jahren der örtlichen Witterung ausgesetzt. Dies könnte trotz Wartungsarbeiten zu leichten Schäden der Mechanik oder einer leicht fehlerhaften Justierung des Teleskops geführt haben.

Möglichkeiten, um noch präzisere Ergebnisse zu erhalten, wären in Bezug auf die Messung selbst die Anzahl und Integrationszeit der Messungen zu erhöhen, um mehr Daten zu generieren. Um eine fehlerhafte Justierung oder Schäden an der Mechanik zu beheben, könnten regelmäßige Wartungsarbeiten Potenzial bergen. Wohingegen auf das Wetter kein Einfluss genommen werden kann.

Nun soll das spektrale Auflösungsvermögen genauer berechnet und mit der in der Literatur angegebenen „tracking accuracy“ verglichen werden. Aus der beim GAUSSschen Fit gewonnenen Standardabweichung σ konnte zunächst die Halbwertsbreite FWHM nach [Wei]

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

berechnet werden. Diese kann direkt als spektrales Auflösungsvermögen verstanden werden. Die entsprechenden Werte sind den beiden Abbildungen 4.3 und 4.4 zu entnehmen. Hierbei wurden ebenfalls der gewichtete Mittelwert gebildet und die zugehörige 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 Positioniergenauigkeit deutlich und unterstreicht somit, dass diese im Vergleich zum spektralen Auflösungsvermögen vernachlässigbar ist.

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.

Dabei ergaben sich die Werte $D_{\text{az}} = 1,895(32)$ m und $D_{\text{alt}} = 2,625(56)$ m für die azimutale (az) und Höhenkomponente (alt). Die jeweilig zugehörigen kombinierten Standardunsicherheiten wurden dabei nach

$$u_c(D) = \frac{dD(\theta)}{d\theta} \cdot u(\theta) \quad (4.4)$$

berechnet. Hierbei fällt im Hinblick auf den Literaturwert $D = 2,3$ m ([HJVK]) auf, dass beide Werte auf Grundlage ihrer Unsicherheiten nicht mit diesem vereinbar sind. Zudem deuten die erhaltenen Werte auf ein nicht kreisförmiges oder unsymmetrisches Teleskop hin. Dafür bestehen mehrere Erklärungsansätze. Zum einen könnte ein durch den Wind verursachtes Wackeln des Teleskops die Messungen beeinflusst haben, dies würde allerdings eher den größeren Wert von D_{alt} erklären. Dahingehend könnten die Messungen beispielsweise durch noch kleinschrittigere Variationen in Azimut- und Höhenwinkelversatz verbessert werden. Wiederum könnten auch mechanische Schäden Einfluss auf die Messungen genommen haben. Zum anderen ist in Betracht zu ziehen, dass das Teleskop nach mehreren Jahren der Nutzung einige kleine Defekte aufweisen könnte. So könnten Elemente des Parabolspiegels womöglich nicht mehr zu den Messungen beitragen und damit die effektive Messleistung verringern. Sollten sich diese Defekte auf einen bestimmten Bereich des Teleskops konzentrieren, könnte dies den geringen Wert der azimutalen Komponente erklären. Auch könnte die Positioniergenauigkeit des Teleskops in eine Richtung größer sein als in die andere. Um solchen Defekten entgegenzuwirken, wären Wartungen am Teleskop oder eine verbesserte Justierung unter Berücksichtigung der Defekte hilfreich. Zudem könnten Testmessungen durchgeführt werden, um zu ergründen, worauf der Unterschied in den beiden Komponenten zurückzuführen ist.

Zuletzt sei erwähnt, dass die zugehörigen Unsicherheiten sowohl von D_{az} wie auch von D_{alt} recht gering ausfallen. Dies liegt im kleinen Wert der Unsicherheit der FWHM begründet, welcher GNUPLOT entnommen wurde.

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 recht gering ausfallenden kombinierten Unsicherheit die Standardabweichung der erhaltenen Teleskopdurchmesser berechnet und als sinnvoll erachtet. Somit konnte der Durchmesser des Ra-

dioteleskops „Brage“ aus den erhaltenen Daten bestimmt werden und beziffert sich auf $D = 2,23(37)$ m. Dieser Wert liegt in guter Übereinstimmung zu dem in der Projektdokumentation [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 der Wasserstoffwolken in der Milchstraße zu ermitteln und die Milchstraße zu kartografieren.

Hierfür wurden Radiowellen bei 1420 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. Hierfür wird der rauschminimierende *Switched*-Modus eingestellt. Mit einer Bandbreite von 2 MHz, 256 Kanälen und somit einer Frequenzauflösung von 7,8 kHz pro Kanal [HJVK] wird nun zunächst die Belichtungszeit variiert.

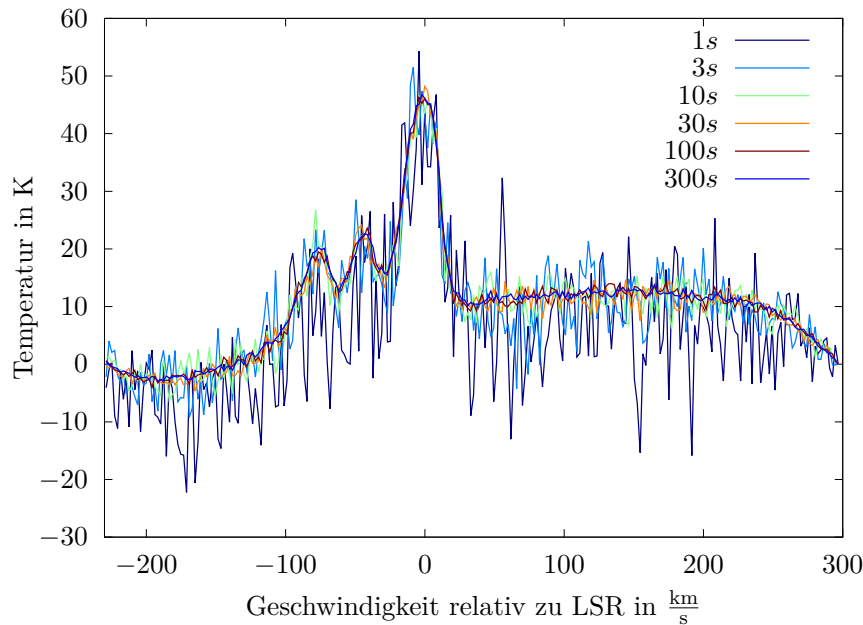


Abbildung 4.5: Mithilfe dieser Abbildung lässt sich erkennen, wie sich die gemessenen Spektren mit der Belichtungszeit verändern. Bei einer Belichtungszeit von 1 s ist ein sehr ausgeprägtes Rauschen des Signals zu verzeichnen. Maxima sind bei dieser Belichtungszeit kaum ausmachbar. Das Rauschen ist allerdings schon bei einer Belichtungszeit von 10 s deutlich reduzierter ausgeprägt. Maxima lassen sich bei dieser Belichtungszeit deutlich genauer ausmachen.

Abbildung 4.5 zeigt die gemessenen Spektren für sechs verschiedene Belichtungszeiten. Die Geschwindigkeiten werden dabei relativ zu der *local standard of rest*-Geschwindigkeit (LSR) aufgetragen. Dieser Punkt ist ein fiktiver Bezugspunkt, ausgewählt am Ort der Sonne. Im Mittel bewegt sich dieser Punkt mit einer Geschwindigkeit von $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Mithilfe der Abbildung 4.5 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 verringert 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.

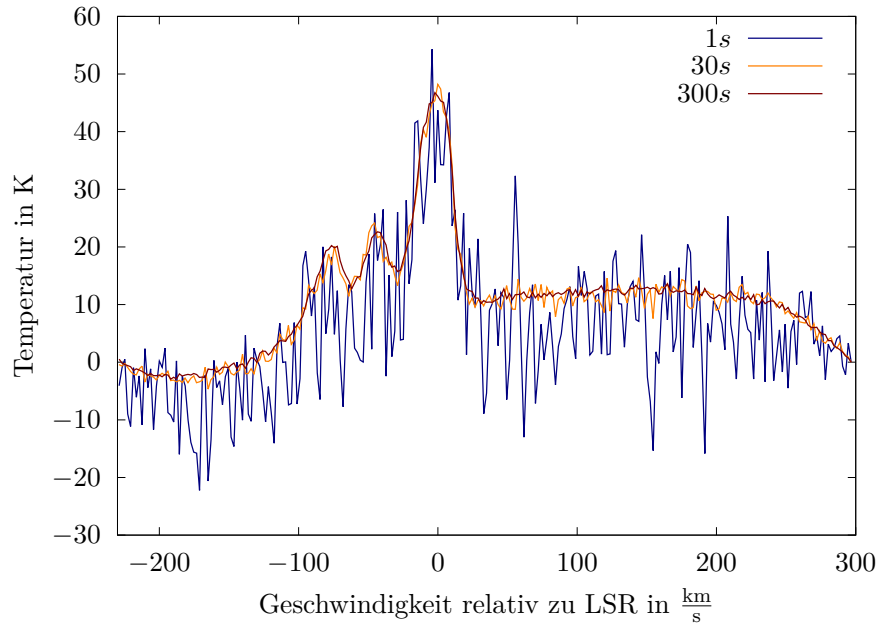


Abbildung 4.6: Diese Abbildung soll noch einmal die eindeutigen Unterschiede der Spektren bei verschiedenen Belichtungszeiten verdeutlichen. Da sich das Spektrum bei einer Belichtungszeit von 30 s und 300 s nur noch minimal unterscheidet, wurde eine Belichtungszeit für die Spektren von 60 s gewählt. Bei dieser Dauer waren alle Maxima deutlich ausmachbar und der zeitlich begrenzte Versuchszeitraum wurde nicht gesprengt.

Abbildung 4.6 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 folgenden Messungen stets mit einer Belichtungszeit von 60 s aufgenommen. Somit wurden Spektren mit merklich weniger Rauschen als bei einer Integrationszeit von 30 s erhalten. Zudem wurde eine im Rahmen der zeitlich begrenzten Versuchsdurchführung vertretbare Messdauer gewählt, was bei einer Integrationszeit von jeweils 300 s nicht der Fall gewesen wäre.

4.2.2 Verarbeitung der Daten

Mithilfe eines MATLAB-Skripts werden das Untergrundrauschen der einzelnen Spektren geglättet und die auftretenden Peaks mittels GAUSSfunktionen gefittet. Somit lassen sich die Maxima sehr präzise bestimmen. Abbildung 4.7 zeigt dieses Vorgehen exemplarisch. Dabei liegen die Maxima bei $27,9 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $7,3 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $-42,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $-64,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ relativ zu LSR, gemessen bei einer galaktischen Länge $l = 58^\circ$ und einer galaktischen Breite von $b = 0^\circ$. Um

eine aussagekräftige Karte der Milchstraße zu erstellen, sind Messungen vom ersten Quadranten bis in den dritten Quadranten hinein vorgenommen worden. Weitere galaktische Längen sind aufgrund der geographischen Lage Onsals zu diesem Zeitpunkt beziehungsweise grundsätzlich von dieser Ortslage nicht betrachtbar.

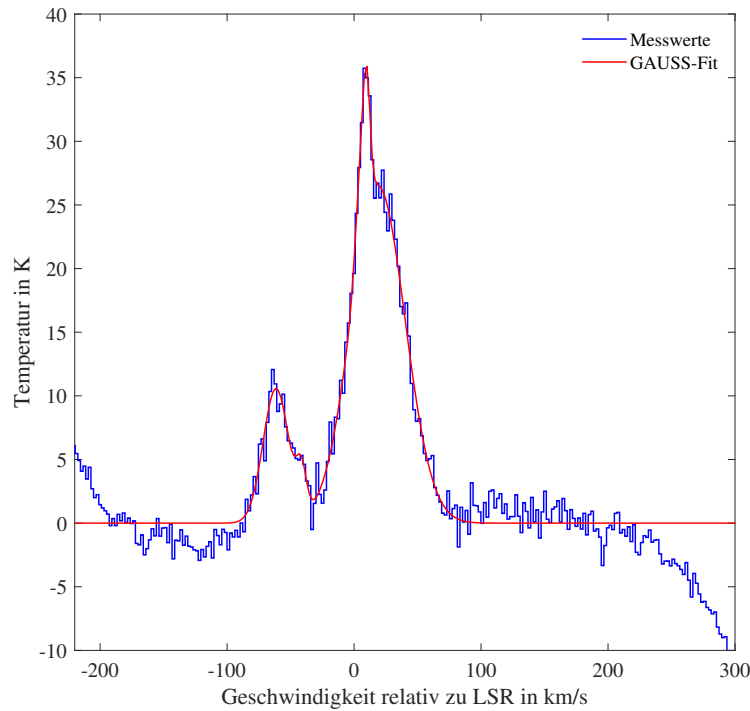


Abbildung 4.7: Gemessenes Beispielspektrum zur Darstellung der Verarbeitung der Daten. Da bei den Messungen stets ein Untergrundrauschen mitgemessen wurde, wird dieses mithilfe eines MATLAB-Skripts herausgefiltert. Anschließend wurden die Spektren jeweils noch mit GAUSSfunktionen gefittet. So lassen sich die Maxima deutlich erkennen und auslesen. In diesem Fall handelt es sich um eine Messung bei $l = 58^\circ$, $b = 0^\circ$ und die Maxima liegen bei $27,9 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $7,3 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $-42,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ 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 wurde aus den maximal verschobenen Maxima $V_{r,max}$ der Geschwindigkeiten aus dem ersten Quadranten jeweils die

Geschwindigkeit relativ zu LSR ausgelesen. Diesen Maxima sind Tangentialpunkte. Daher kann der Radius R zum Zentrum der Milchstraße wie folgt ermittelt werden [HJV]:

$$R = R_0 \cdot \sin(l) . \quad (4.5)$$

Hierbei ist $R_0 = 8,5 \text{ kpc}$ der Abstand der Sonne zum Zentrum der Milchstraße. Mithilfe von R und der Geschwindigkeit der Sonne um das galaktische Zentrum $V_0 = 220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ lässt sich nun auch die Geschwindigkeit mit folgender Gleichung ermitteln [HJV]:

$$V = V_{r,max} + V_0 \cdot \sin(l). \quad (4.6)$$

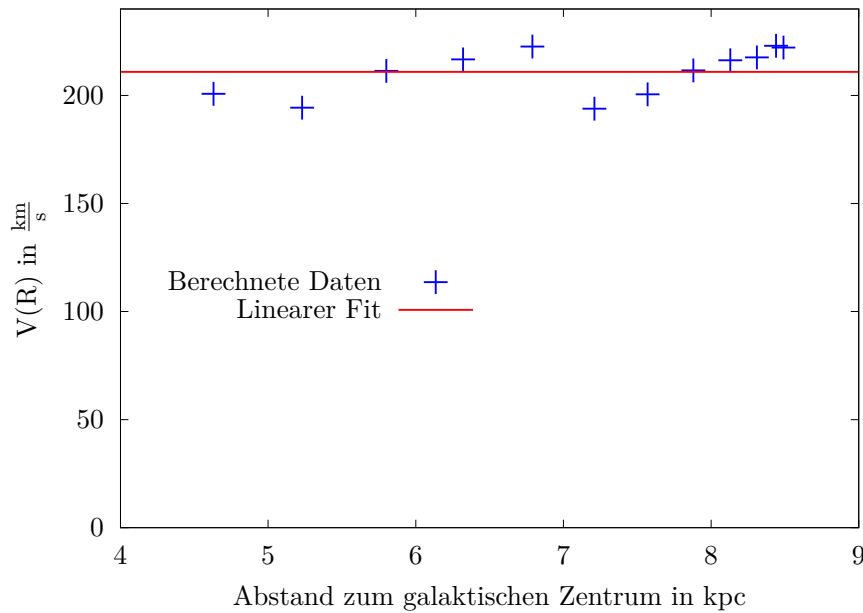


Abbildung 4.8: Dargestellt ist eine Rotationskurve der Milchstraße. Die eingetragenen Datenpunkte wurden jeweils aus dem Peak der maximal verschobenen Geschwindigkeitskomponente der gemessenen Geschwindigkeitsspektren aus dem ersten Quadranten gewonnen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeit $V(R)$ 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 und für R können aus der Tabelle 6.1 entnommen werden. Abbildung 4.8 zeigt die Rotationsgeschwindigkeiten, aufgetragen über den 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 der Wasserstoffwolken 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. Die gemessene radiusunabhängige Rotationsgeschwindigkeit deutet daher auf eine nicht mess- beziehungsweise nicht sichtbare Masse hin. Diese wird in der Physik als schwarze Materie bezeichnet.

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]:

$$R = \frac{R_0 \cdot V_0 \cdot \sin(l)}{V_0 \cdot \sin(l) + V_r} . \quad (4.7)$$

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]:

$$r_{\pm} = \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \cdot \sin(l)^2} + R_0 \cdot \cos(l) . \quad (4.8)$$

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. Dies ist der Fall, da die Milchstraße die Form einer Scheibe hat. Wenn die Blickrichtung nun in vertikaler Richtung variiert wird, befinden sich Punkte, welche weiter weg sind, nicht mehr in dem Sichtfeld.

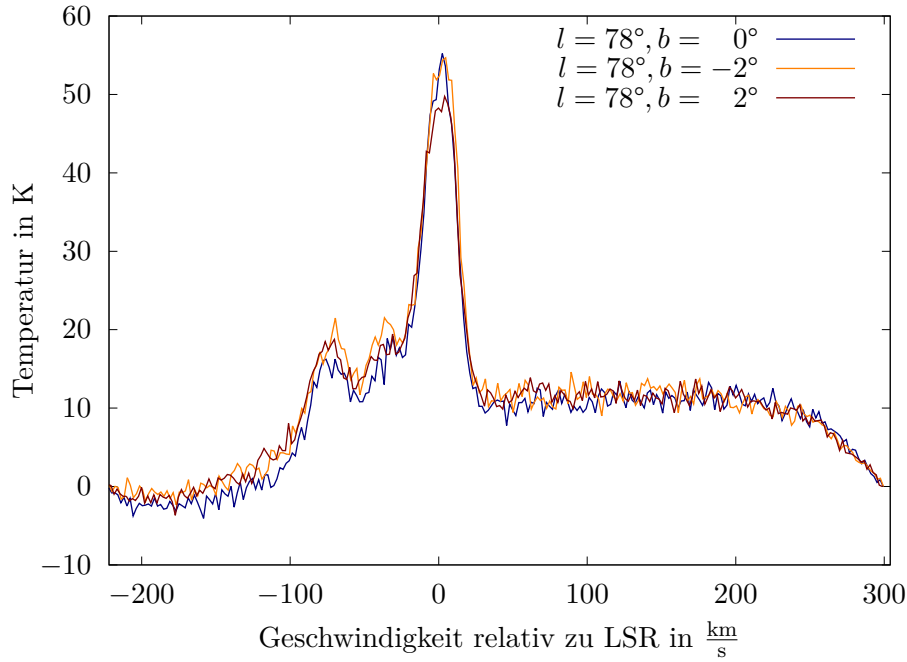


Abbildung 4.9: Diese Abbildung zeigt Spektren für verschiedene galaktische Breiten b . Erkennbar ist, dass in allen Spektren stets bei allen gewählten galaktischen Breiten b die Maxima bei $2,4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $-30,6 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $-69,7 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ erkennbar 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 zugunsten der besseren Lesbarkeit verzichtet.

Die Abbildung 4.9 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. Denn r_{\pm} sind beide sinnvolle Lösungen und es kann nicht näher ermittelt werden, welche die korrekte Lösung ist. 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]:

$$x = r \cdot \cos(l - 90^\circ), \quad (4.9)$$

$$y = r \cdot \sin(l - 90^\circ). \quad (4.10)$$

Die so gewonnenen 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 4.10 erkennbar. In dieser Abbildung sind teilweise deutliche Strukturen der Milchstraße analog zur Literatur (siehe Abbildung 4.11) zu sehen. Zu beachten ist, dass Abbildung 4.11 galaktische Koordinaten verwendet und die erstellte Abbildung 4.10 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.

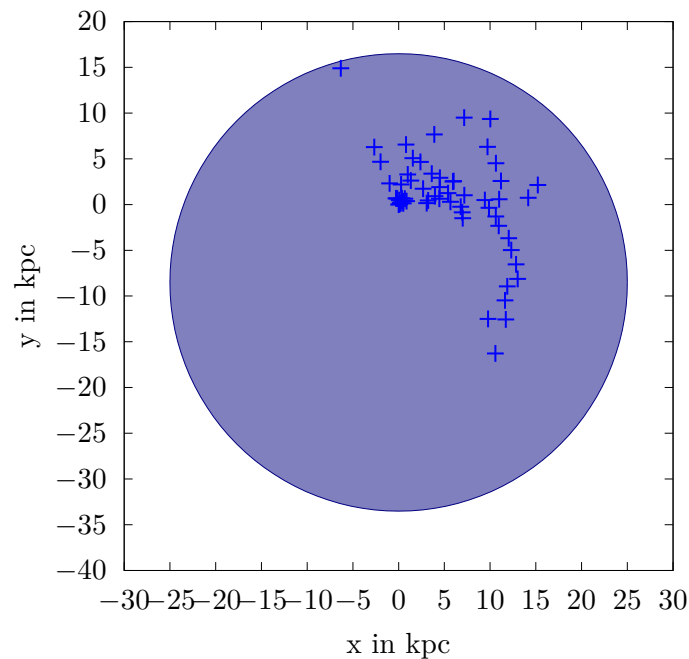


Abbildung 4.10: In dieser Abbildung ist die Milchstraße mithilfe der Daten aus den Frequenzspektren kartografiert. Es ist ein Seitenarm der Milchstraße im Bereich um $(x, y) = (10, -10)$ deutlich ersichtlich. Ein weiterer Galaxiearm ist im Bereich $(x, y) = (10, 5)$ erkennbar, wobei dieser deutlich schwächer 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 dargestellt.

Da in diesem Bericht nur in einem Bereich von $33^\circ \leq l \leq 203^\circ$ gemessen wurde, sind keine Datenpunkte im vierten Quadranten und nur wenige Datenpunkte im dritten Quadranten zu sehen. Werden allerdings die Datenpunkte des ersten Quadranten genauer betrachtet, so ergibt ein Vergleich mit der Literatur, dass es sich dabei vermutlich um den *Cygnus-Arm* handelt. Bei den Datenpunkten um den Koordinatenursprung ist es 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 erkennbar sind. Die blau markierte Fläche in Abbildung 4.10 charakterisiert die gesamte Fläche der Galaxie, welche annähernd einen Kreis mit einem Radius von etwa 25 kpc entspricht.

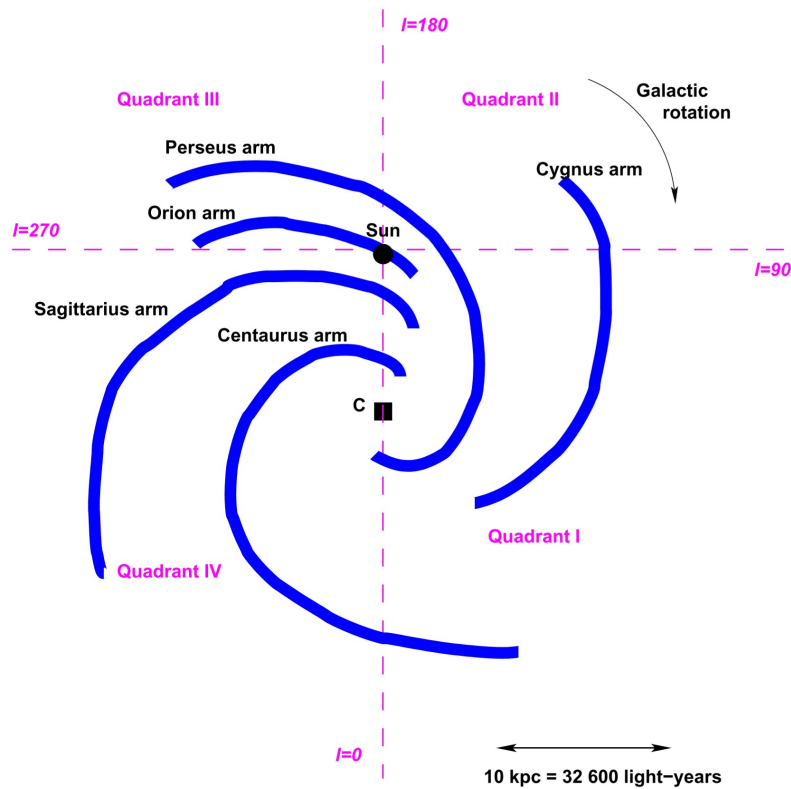


Abbildung 4.11: Literaturbeispiel zur Abbildung der Milchstraße. Zu sehen sind die einzelnen Seitenarme (blau markiert) der Milchstraße, welche mit ihren Namen gekennzeichnet sind, und die Rotationsrichtung der gesamten Milchstraße. Für die Einordnung der Größenverhältnisse ist ein Maßstab angegeben. [HJV]

5 Fehlerdiskussion und 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 $0,5^\circ$ [HJVK] – und den beiden Durchmessern – $D_{az} = 1,895(32)$ m und $D_{alt} = 2,625(56)$ m gegenüber $D = 2,3$ m [HJVK] – des Teleskops liegen alle ermittelten Charakteristika auf Grundlage der Unsicherheiten in guter Übereinstimmung mit den Werten der Projekt-Dokumentation [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 Mittelwert des Teleskopdurchmessers ($2,23(37)$ m zu $2,3$ m [HJVK]) zeigen wie erwähnt gute Übereinstimmungen.

Die Unsicherheiten der betrachteten Werte liegen allesamt in sinnvollen Größenordnungen und lassen darauf schließen, dass kein systematischer Fehler während der Durchführung und Auswertung des Versuchs auftrat und auch mögliche Defekte oder äußere Einflüsse keine zu große Beeinträchtigung der Messung darstellten. Auffällig war, dass stets bei der Variation des Höhenversatzwinkels schmalere sinc-Profile respektive GAUSS-Kurven auftraten. Hierfür wurden verschiedene Ansätze diskutiert. Zum einen wurden Witterung und äußere Verhältnisse am Versuchstag in Erwägung gezogen. Da das Teleskop allerdings in verschiedenen Ausrichtungen Messungen vornahm, könnte ein stets aus einer Richtung wehender Wind zwar Einfluss auf die Positioniergenauigkeit haben, aber keine solche kontinuierlich auftretende Abweichung erklären. Eventuell vorliegende Defekte des Parabolspiegels, welche den effektiven Beitrag bestimmter Teleskopareale zur Messung schmälern, sowie daraus resultierende Abweichungen der Justierung oder Schäden der Mechanik des Teleskops sind hierbei deutlich plausiblere Fehlerquellen. Mögliche Verbesserungen hinsichtlich der Messgenauigkeit könnten durch eine größere Zahl Messungen oder beispielsweise kleinschrittigere Variation der Versatzwinkel in Azimut und Höhenkomponente erreicht werden. Die Defekte am Teleskop könnten durch regelmäßige Wartungen minimiert werden. Zudem könnten diese bei der Justierung berücksichtigt werden, um die Messergebnisse zu verbessern.

Auch die Messungen und Berechnungen der Milchstraße lieferten sehr gute Werte, welche stets in guter Übereinstimmung mit der Literatur sind. Ausschlaggebende Erfolgsfaktoren dieses Versuchsteils sind 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, zum anderen die sehr präzise Kartografie der Milchstraße. Hier sind die Seitenarme *Cygnus*, *Perseus* und *Orion* anhand eines Vergleichs mit der Literatur bestimmbar. Somit war ein hinreichend präzises Vermessen der Milchstraße gewährleistet. Wenn allerdings noch bessere Ergebnisse erzielt werden sollen, so müssen einige Unsicherheitsquellen und deren Folgen in Betracht gezogen werden. Eine Unsicherheitsquelle, welche Auswirkungen auf den gesamten Versuchsteil hat, ist die Integrationszeit der vermessenen Spektren. Denn wenn das Spektrum stärkeres Rauschen aufweist, so liefern die GAUSS-Funktionen eine größere Unsicherheit und die Maxima sind schlechter auswertbar. Wie bereits diskutiert, verbessert sich das Rauschen des Spektrums bei längeren Integrationszeiten. Wenn also präzisere Messwerte erreicht werden wollen, so muss die Integrationszeit erhöht werden. Des Weiteren kann die konstante Geschwindigkeit der Wasserstoffwolken durch eine Ergänzung von zusätzlichen Messwerten genauer analysiert werden. Denn je mehr Messwerte vorhanden sind, desto genauer lässt sich ein Mittelwert ermitteln. Viele Messwerte sind auch für die Kartografie der Milchstraße von Vorteil. Denn somit fallen Fehlerpunkte nicht mehr so stark ins Gewicht und die Galaxiearme sind noch besser identifizierbar.

Trotz aller diskutierten Unsicherheiten ist dieser Versuch mit den verwendeten Parametern eine sehr gute Möglichkeit, gute Ergebnisse zu erzielen. Wenn allerdings noch genauere Ergebnisse erreicht werden sollen, so müssen die genannten Verbesserungen bezüglich der Unsicherheiten in Betracht gezogen werden.

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>.
- [Wei] Weisstein, Eric: *Full Width at Half Maximum*. <https://mathworld.wolfram.com/FullWidthatHalfMaximum.html>, [Online; Stand 25. Juni 2020].

Abbildungsverzeichnis

3.1	Radioteleskope	2
4.1	Beispielspektrum der Sonnenmessungen	5
4.2	Raster-Scan der Sonne	6
4.3	Kreuz-Scan der Sonne, Azimutwinkelversatz	7
4.4	Kreuz-Scan der Sonne, Höhenwinkelversatz	8
4.5	Gemessene Spektren bei verschiedenen Belichtungszeiten	12
4.6	Eindeutige Unterschiede der Spektren bei verschiedenen Belichtungszeiten .	13
4.7	Gemessenes Beispielspektrum zur Darstellung der Verarbeitung der Daten .	14
4.8	Rotationskurve der Milchstraße	15
4.9	Spektren für verschiedene galaktische Breiten b	17
4.10	Abbildung der Milchstraße	18
4.11	Literaturbeispiel zur Abbildung der Milchstraße	19

Tabellenverzeichnis

6.1	Berechnete Werte für den ersten Quadranten in galaktischen Koordinaten (GK).	24
6.2	Berechnete Werte für den zweiten Quadranten in galaktischen Koordinaten (GK).	25
6.3	Berechnete Werte für den zweiten und dritten Quadranten in galaktischen Koordinaten (GK).	26

Anhang

Tabelle 6.1: Berechnete Werte für den ersten Quadranten in galaktischen Koordinaten (GK).

GK in ° (b=0) 1	velocity in $\frac{\text{km}}{\text{s}}$	R in kpc	r₊ in kpc	r₋ in kpc	x in kpc	y in kpc	R_{Tangente} in kpc	V(R) in $\frac{\text{km}}{\text{s}}$
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		
58	27.9	7.39	6.15	2.86				
58	-42.2	11	12.2	-3.78	10.4	-6.74		
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 in galaktischen Koordinaten (GK).

GK in ° (b=0) l	velocity in $\frac{\text{km}}{\text{s}}$	R in kpc	r₊ in kpc	r₋ in kpc	x in kpc	y in kpc
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 in galaktischen Koordinaten (GK).

GK in ° (b=0) l	velocity in $\frac{\text{km}}{\text{s}}$	R in kpc	r₊ in kpc	r₋ in kpc	x in kpc	y in kpc
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