

**Institut für Theoretische Physik und Astrophysik  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel**

**Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene, Teil IIe**

Radioastronomische Aufgaben

## Aktuelle Semesterinformationen

Wintersemester 2024/25

Abgabetermin für die Protokolle: wie für den 'optischen' Teil

### Kontakt

Name	Zimmer	Telefon	email
Joachim Köppen	328	880-4119	koeppen@astrophysik.uni-kiel.de
Tobias Illenseer	139	880-5110	tillense@astrophysik.uni-kiel.de

# Inhaltsverzeichnis

## Allgemeines

- Ziele und Ablauf des Praktikums
- Hinweise zum praktischen Betrieb
- Kriterien für die Scheinvergabe
- Protokoll

## Allgemeines zur Radioastronomie

- Der Radiohimmel, Radioteleskope, Strahlungsgrößen

## Instrumentierung und Software

- Messungen mit RoenneRadiometer (RRM)
- Messungen mit RoenneSpektrometer (RSM)

## Profil des Himmelsvordergrunds

- Grundlagen, Beobachtung, Auswertung, Fehlerbetrachtung
- Weitergehende Fragestellungen: Wetterabhängigkeit, Absorption der Erdatmosphäre

## Oberflächentemperatur der Sonne

- Grundlagen, Beobachtung, Auswertung, Fehlerbetrachtung
- Weitergehende Fragestellungen: Auflösungsvermögen, Solarer Radiofluss

## Oberflächentemperatur des Mondes

- Grundlagen, Beobachtung, Auswertung, Fehlerbetrachtung
- Weitergehende Fragestellungen: Monatliche Variation des Radiofluss, Monatliche Variation der Oberflächentemperatur

## Radioflüsse anderer Himmelsquellen

## Rotationskurve der Milchstraße

- Grundlagen, Beobachtung, Auswertung, Fehlerbetrachtung
- Weitergehende Fragestellungen: Annahme: Kreisbahnen, Rotationsgeschwindigkeit bei  $l=90^\circ$ , Vergleich mit einem Massenmodell der Milchstraße, Rotationskurve nahe des Galaktischen Zentrums, Kartierung der Spiralarme, Zerlegung der Spektren in Komponenten: Spiralarme, Deprojektion der Spiralarme

## Literatur

- Lehrbücher, Artikel, Weblinks

# Allgemeines

## Ziele und Ablauf des Praktikums

Ziel dieses Praktikums ist es, einen Einblick in die Radioastronomie zu geben und wichtige Beobachtungsmethoden kennenzulernen. Mit einem Teleskop, das außerhalb von Kiel steht (nähere Information unter <https://sat-sh.lernnetz.de/>), fern von der Stadt mit ihrem hohen Störpegel von elektrischen und elektronischen Geräten, werden Messungen der Radiostrahlung von Sonne, Mond und unserer Milchstraße durchgeführt. Die Messung der Stärke der Kontinuumsstrahlung (Radiometrie) erlaubt die Bestimmung der Oberflächentemperaturen von Sonne und Mond, die Spektrometrie in der Milchstraße erlaubt die Ableitung des galaktischen Rotationsgesetzes, eines der Hinweise auf die Existenz der 'Dunklen Materie'.

Die Benutzung des wirklichen Teleskops ist zwar per Fernsteuerung möglich, aber es hat sich im Lauf der Zeit herausgestellt, dass das Gerät gewisse Eigenheiten aufweist, die einen unbeaufsichtigten Betrieb durch die Praktikanten nicht zuließen. Daher werden die Beobachtungen mit Simulationssoftware durchgeführt, die das Verhalten des Teleskops und die Qualität der Daten in sehr realistischer Weise (basierend auf Erfahrungen mit dem wirklichen Instrument) wiedergeben. Die Software produziert Daten, die auf echten Beobachtungen mit dem wirklichen Gerät beruhen und deren Rauschanteil wirklichkeitsgetreu simuliert wird. Die Simulatoren sind über das Internet jederzeit erreichbar und erlauben somit eine vollständig selbständige Handhabung des Instruments. Darüber hinaus führt keine Fehlbedienung zu irgendwelchen Problemen oder Schaden am Gerät. Allerdings gibt es leider auch keine unvorhersagbaren Probleme wie Stromausfall oder Versagen der Empfangselektronik!

Trotz der ausführlichen Anleitung in diesem Skriptum ist es vor Beginn der Messungen zu jeder der Teilaufgaben sehr empfehlenswert, sich mit dem Betreuer zu besprechen, um anstehende Fragen zur Aufgabenstellung, der Benutzung des Radioteleskops und der Datenreduktion schon im Voraus sich klarer zu machen! Das erspart Fehlmessungen und verlorene Zeit ...

Weitere Informationen zum Praktikum sowie einige nützliche Weblinks und Zusatzmaterial finden sich auf dieser Webseite des **Instituts für Theoretische Physik und Astrophysik**  
<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/praktikum>

## Hinweise zum praktischen Betrieb

Es ist sehr empfehlenswert, während der Beobachtungen – wie bei jedem anderen Experiment oder Messung – ein möglichst genaues Protokoll zu führen. Damit später bei der Auswertung keine Unklarheiten entstehen, ist es von Vorteil, alle Tätigkeiten und Reaktionen schriftlich festzuhalten, ebenso etwaiges Auftreten von unerwarteten Ereignissen. Etwaige Fehler lassen sich so besser rekonstruieren. Man verlasse sich nie auf das eigene Gedächtnis, so gut es auch sein mag, um später entscheiden zu müssen was diese oder jene Stelle in den Daten gewesen sein könnte. In den Dateien werden Zeit, Position des Teleskops und Messwert registriert, sowie einige Befehle. Nichtsdestotrotz kann man sich auch Ergebnisse notieren, ebenso wie Überschlagsrechnungen, Eindrücke, Ideen, Planungen. Papier oder eine Textdatei sind sehr geduldig ... eine nicht notierte Zahl ist unter Umständen unwiederbringlich verloren!

## **Kriterien für die Scheinvergabe**

Zur Erlangung des Praktikumsscheins sollten die folgenden Aufgaben erfolgreich absolviert und im Protokoll dokumentiert sein:

- ein- oder mehrmalige Messung des Profils des Himmelsvordergrundes, möglichst bei unterschiedlichem Wetter, und Vergleich derselben
- ein oder mehrere Driftscans der Sonne mit Ableitung der Oberflächentemperatur und mit Vergleich mit NOAA Flüssen
- ein oder mehrere Driftscans des Mondes mit Bestimmung von Oberflächentemperatur und Radiofluss
- Beobachtungen des ersten Quadranten der Milchstraßenebene mit Ableitung des galaktischen Rotationsgesetzes und Modellierung der Rotationskurve (weiterf.Aufgabe 3)
- optional: andere Positionen des galaktischen Äquators

## **Protokoll**

Das Protokoll zu jedem Versuch sollte unbedingt enthalten:

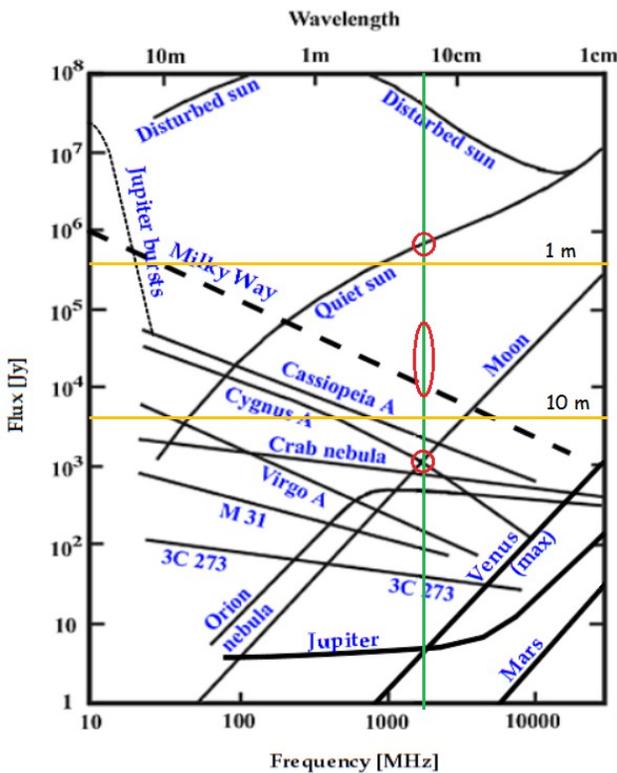
- Den Zeitpunkt der Messungen und die Beobachtungsbedingungen (Elevation und Azimut, gegebenenfalls die Position der Sonne)
- Sicherheitshalber sollten die vorherrschenden Wetterverhältnisse vermerkt und gegebenenfalls bei der Auswertung berücksichtigt werden.
- Die Daten, Grafiken oder Bilder (ggf. Angabe des Pfadnamens, wo im Praktikumsverzeichnis die Bilder zu finden sind)
- Eine Erklärung, um was für Messdaten es sich handelt (dabei müssen keine Kapitel aus Büchern abgeschrieben werden – kurz und knapp, aber präzise reicht), wie diese gewonnen wurden und eine Beschreibung der Parameter, die in die Messung eingehen
- Eine Interpretation der Ergebnisse (dies ist der wichtigste Teil!). Dazu gehört eine Identifikation der Fehlerquellen und deren Abschätzung, ihre Auswirkung auf die Ergebnisse, und ein Vergleich mit theoretischen Werten, mit abschließender kritischer Diskussion.

Der Umfang des Radioastronomie-Teils darf insgesamt 20 Seiten nicht überschreiten. Man achte also darauf, den Platz gut zu nutzen um Messungen und Analysen genau, klar und verständlich darzustellen. Es ist selbstverständlich, dass der Text ausschließlich auf eigenen Gedanken beruht und diese in einem logischen Zusammenhang verständlich macht. Man sollte nicht übersehen, dass man selber mit allen Einzelheiten des Versuchs vertraut ist, der Leser aber nicht. Daher müssen ihm alle diejnigen Details und Parameter mitgeteilt werden (kurz und knapp, aber präzise), die er zu seinem Verständnis braucht.

# Allgemeines zur Radioastronomie

Ziel dieses Praktikums ist es, einen Einblick in die Radioastronomie zu geben und wichtige Beobachtungsmethoden kennenzulernen. Mit einem Teleskop, das außerhalb von Kiel steht, fern von der Stadt mit ihrem hohen Störpegel von elektrischen und elektronischen Geräten werden Messungen der Radiostrahlung von Sonne, Mond und unserer Milchstraße durchgeführt. Die Messung der Stärke der Kontinuumsstrahlung (Radiometrie) erlaubt die Bestimmung der Oberflächentemperaturen von Sonne und Mond, die Spektrometrie in der Milchstraße erlaubt die Ableitung des galaktischen Rotationsgesetzes.

## Der Radiohimmel



**Fig.1:** Spektrale Energieverteilung von Himmelsobjekten im Radiobereich (nach J.D.Kraus). Die gelben horizontalen Linien deuten die Grenzempfindlichkeit von Teleskopen mit 1 und 10 m Durchmesser bei einer Detektionsschwelle von 100 K in Antennentemperatur. Die grüne vertikale Linie markiert die 21 cm-Spektrallinie des neutralen Wasserstoffs bei 1420 MHz, die roten Ellipsen deuten die Objekte an, die im Rahmen des Praktikums beobachtet werden.

Für die Milchstraße ist das Kontinuumspektrum angegeben, zu dem die 21cm Linie hinzukommt.

**Hinweis:** Dieser Plot steht auch als interaktive Graphik zur Verfügung unter <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/KrausPlot.html>

Wären unsere Augen für Radiostrahlung empfindlich, so würde sich uns folgendes Bild bieten: Erdboden, Gebäude, Bäume und Menschen erschienen hell, durch die von ihnen abgegebene Wärmestrahlung, da der Radiobereich die langwellige Fortsetzung des Infrarotbereichs ist. Der Himmel wäre sehr dunkel, da von dort aus lediglich die Strahlung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds (CMB = Cosmic Microwave Background) mit einer Temperatur von 2.7 K. Dazu käme noch ein etwa gleichstarker Beitrag von der Wärmestrahlung der Erdatmosphäre, wobei der Unterschied von Tag und Nacht wesentlich geringer ist als im Optischen. Die Sonne erschiene als sehr helles Scheibchen, der Mond und die Planeten als schwache Scheibchen, etwa ähnlich wie im Optischen. Sterne wären nicht zu sehen, dafür aber einzelne Quellen wie Gasnebel und Galaxien. Bei einer Wellenlänge von 21 cm würde die Milchstraße als helles Band erscheinen, mit einer deutlichen Aufhellung in Richtung galaktischen Zentrum.

Die elektromagnetische Radiostrahlung von Himmelskörpern ist im Frequenzbereich 30 MHz bis etwa 30 GHz, entsprechend Wellenlängen von 10 m bis 1 cm, vom Boden aus beobachtbar. Die untere Frequenzgrenze ist durch die Ionosphäre bedingt, die obere durch die Absorption der Moleküle in der Luft.

In diesem Radiofenster sind eine Reihe von Himmelsobjekten beobachtbar (Fig. 1): Die Sonne ist das weitaus hellste Objekt am Himmel; sie sendet neben einer ruhigen Komponente der thermischen Strahlung von Photosphäre, Chromosphäre und Korona in aktiven Phasen auch eine wesentlich erhöhte Emission aus. Mond und Planeten emittieren thermische Strahlung, entsprechend dem Schwarzkörperspektrum.

Die Ebene der Milchstraße und externe Galaxien (M31), sowie Supernovaüberreste (CasA), Quasare (3C273) und Radiogalaxien (Cygnus A, Virgo A) haben einen mit steigender Frequenz abfallenden Radiofluss. Hier ist Synchrotronemission verantwortlich, die von Elektronen produziert wird, die von einem Magnetfeld auf kreis- oder spiralförmige Bahnen gezwungen werden.

Das Plasma in HII Regionen (Orion) ist bei hohen Frequenzen transparent, und das Kontinuumspektrum hat einen flachen Verlauf. Bei niedrigen Frequenzen wird die Region optisch dick, und weisen dort ein mit steigender Frequenz ansteigendes Schwarzkörperspektrum auf.

### **Radioteleskope**

Ein derartiges Instrument besteht aus einer Antenne zum Auffangen der Radiowellen und ihrer Umwandlung in ein elektrisches Signal, dem Empfänger zum Verstärken und Filtern der Signale, und einem Computer zur weiteren Datenverarbeitung und -aufzeichnung, sowie zur Steuerung der Antenne.

Als Antennenanlage wird oft ein Parabolspiegel verwendet, der die Radiowellen im Brennpunkt auf ein Dipol (oder Hornstrahler) fokussiert. Im Dipol entsteht durch das Wechselfeld der elektromagnetischen Welle eine Wechselspannung, die von einem rauscharmen Vorverstärker verstärkt dem Empfänger zugeführt wird. Der Parabolspiegel hat dieselbe Aufgabe wie bei einem optischen Teleskop: einerseits das Auffangen von möglichst viel Leistung, andererseits Auswahl eines genügend kleinen Ausschnitts vom Himmel. Die Speiseantenne im Brennpunkt eines Spiegels mit dem (geometrischen) Durchmesser  $D_{\text{geo}}$  leuchtet einen (möglichst großen) Teil aus, mit Effektivdurchmesser  $D_{\text{eff}}$ . Die Antenne hat daher eine wirksame Fläche  $A_{\text{eff}} = \pi (D_{\text{eff}}/2)^2$  und fängt von einem Objekt mit Strahlungsfluss  $F_v$  (siehe unten) in einer Empfängerbandbreite  $B$  die Leistung auf:

$$P = B F_v A_{\text{eff}}/2$$

Der Faktor 2 ist dadurch bedingt, dass ein Dipol nur elektrische Felder parallel zu seiner Längsausdehnung registriert. Aufgrund der Wellennatur der Strahlung besitzt dieser Spiegel ein endliches Winkelauflösungsvermögen. Im Radiobereich wird dieses durch die Halbwertsbreite der Antennenkeule (HPBW = Half-Power Beam Width) charakterisiert, die für einen gleichmäßig ausgeleuchteten kreisförmigen Spiegel ist

$$\text{HPBW} = 58.957^\circ \lambda/D_{\text{eff}}$$

Wie vergleicht sich dieser Wert mit dem Rayleigh-Kriterium bei optischen Instrumenten?

Eine weitere wichtige Größe ist der effektive Raumwinkel der Antenne, in dem sie empfindlich ist:

$$\Omega_A = \lambda^2 / A_{\text{eff}} = \lambda^2 / (\pi D_{\text{eff}}^2 / 4) = \lambda^2 / (\pi / 4 (58.957^\circ \lambda / \text{HPBW})^2) = 4 / \pi * (\text{HPBW} / 58.957^\circ)^2$$

Sie läßt sich aus der messbaren Keulenbreite HPBW ermitteln.

### Strahlungsgrößen

Die Emission von Himmelskörpern ist lediglich ein mehr oder weniger breitbandiges Rauschen, dessen Stärke mit der Zeit variieren kann. Aufgabe des Teleskops ist es, die Stärke des unmodulierten Signal zu messen. Die Empfangselektronik – und insbesondere der Vorverstärker – produzieren ihrerseits ein breitbandiges Rauschsignal durch thermische Bewegungen der Leitungselektronen und Rauschen in den aktiven Halbleiterkomponenten (Transistoren).

Es ist üblich und nützlich, die vom Teleskop aufgefangene Leistung durch die Temperatur zu charakterisieren, deren thermisches Rauschen dieselbe Stärke besitzt. Letztere beträgt bei einer Bandbreite B:  $kTB$ . Somit ergibt sich die Definition der “Antennentemperatur” als

$$k T_{\text{ant}} B = P$$

Jeder (Himmels)körper mit der physischen Temperatur T emittiert Wärmestrahlung, deren Intensität (spezifische Intensität, Flächenhelligkeit, ...) durch ein Schwarzkörperspektrum gegeben ist

$$I_\nu = B_\nu(\nu, T) = 2h\nu^3/c^2 / (\exp(h\nu/kT) - 1) \approx 2kT \nu^2/c^2 = 2kT/\lambda^2 = 2760 T/\lambda^2$$

mit der Einheit  $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{sr}^{-1}$ . Bei den vorkommenden Temperaturen kann im Radiobereich (wegen  $h\nu/kT \ll 1$ ) die Planckfunktion durch die Rayleigh-Jeans Näherung ersetzt werden. Verwendet man außerdem die in der Radioastronomie sinnvolle Einheit 1 Jy (Jansky) =  $10^{-26} \text{Wm}^{-2}$  für den Strahlungsfluss (s.u.), so ergibt sich der einfache numerische Ausdruck mit Temperatur in Kelvin und Wellenlänge im Meter. Die Intensität ist also direkt proportional der Temperatur, worin die zweckmäßige Gewohnheit, in Temperaturen zu denken, begründet ist.

Die Intensität ist die Leistung, die der Körper pro Raumwinkeleinheit abstrahlt, und die wir von ihm aus einer Raumwinkeleinheit erhalten. Füllt der Körper, von uns aus gesehen, den Raumwinkel  $\Omega$  aus, so ist der Strahlungsfluss (Flussdichte, oft mit  $S_\nu$  bezeichnet)

$$F_\nu = I_\nu \Omega$$

der von der Entfernung abhängt. Ein kugelförmiges Objekt mit Radius R hat aus dem Abstand r gesehen den Winkeldurchmesser  $D_{\text{obj}} = 2 \arctan(R/r)$  und nimmt den Raumwinkel  $\Omega = \pi (R/r)^2$  [in sterad] ein. Handelt es sich um eine Punktquelle ( $\Omega < \Omega_A$ ), die vom Teleskop nicht aufgelöst wird, ist die mit der Bandbreite B gemessene Leistung

$$P = B F_\nu A_{\text{eff}} / 2 = B I_\nu \Omega A_{\text{eff}} / 2$$

Die Antennentemperatur ist dann die um den Füllfaktor  $\Omega/\Omega_A$  reduzierte physische Temperatur der Quelle:

$$T_{\text{ant}} = T \Omega / \Omega_A$$

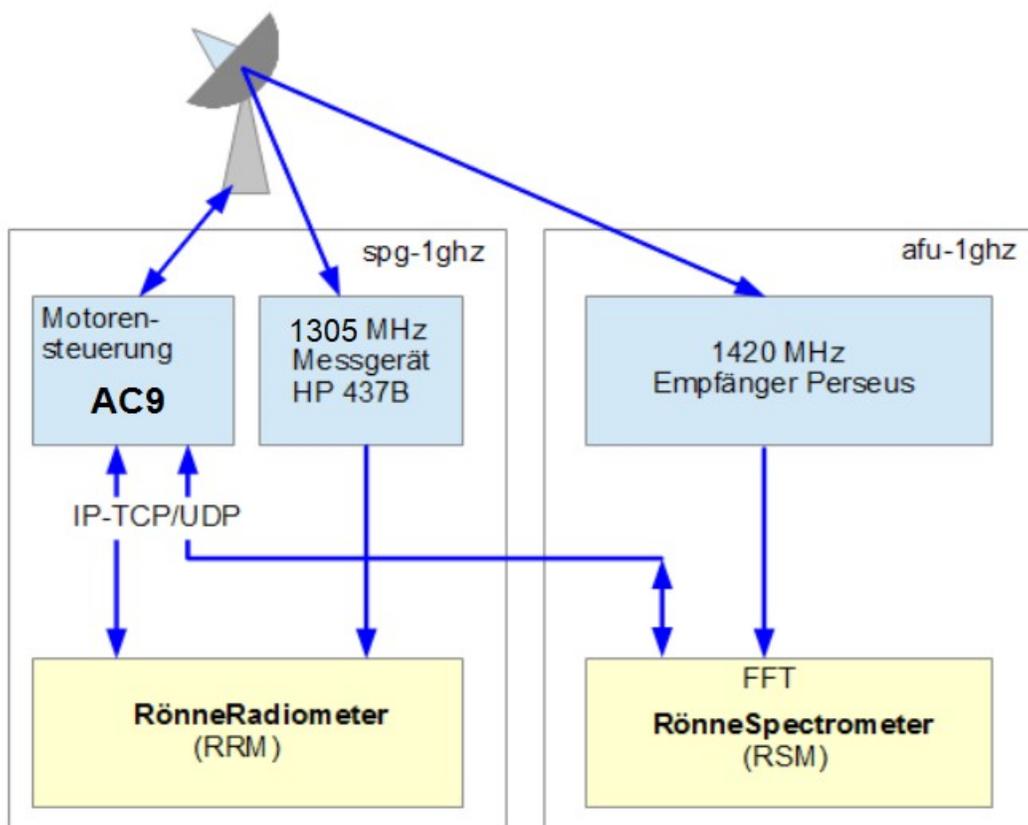
Handelt es sich hingegen um eine ausgedehnte Quelle, deren Emission also die Antennenkeule völlig ausfüllt, so wird nur der Anteil gemessen, der von der Antennenkeule aufgefangen wird:

$$P = B I_v \Omega_A A_{\text{eff}}/2 = B I_v \lambda^2/2 = B 2760 T$$

Die Antennentemperatur ist dann also gleich der physischen Temperatur des Objekts. Diese Eigenschaft machten wir uns bei der Flusskalibrierung zunutze: Die Antennentemperatur des Erdbodens oder eines genügend großen Hauses ließe sich mit einem Thermometer messen, und beträgt etwa 290 K.

## Instrumentierung und Software

Hier einige prinzipielle Informationen über den 9m Spiegel in Rönne, den wir auf 1 GHz benutzen. Jede der Antennenanlagen – <https://sat-sh.lernetz.de/> – ist gleichermaßen aufgebaut, wie in Fig.2 gezeigt:

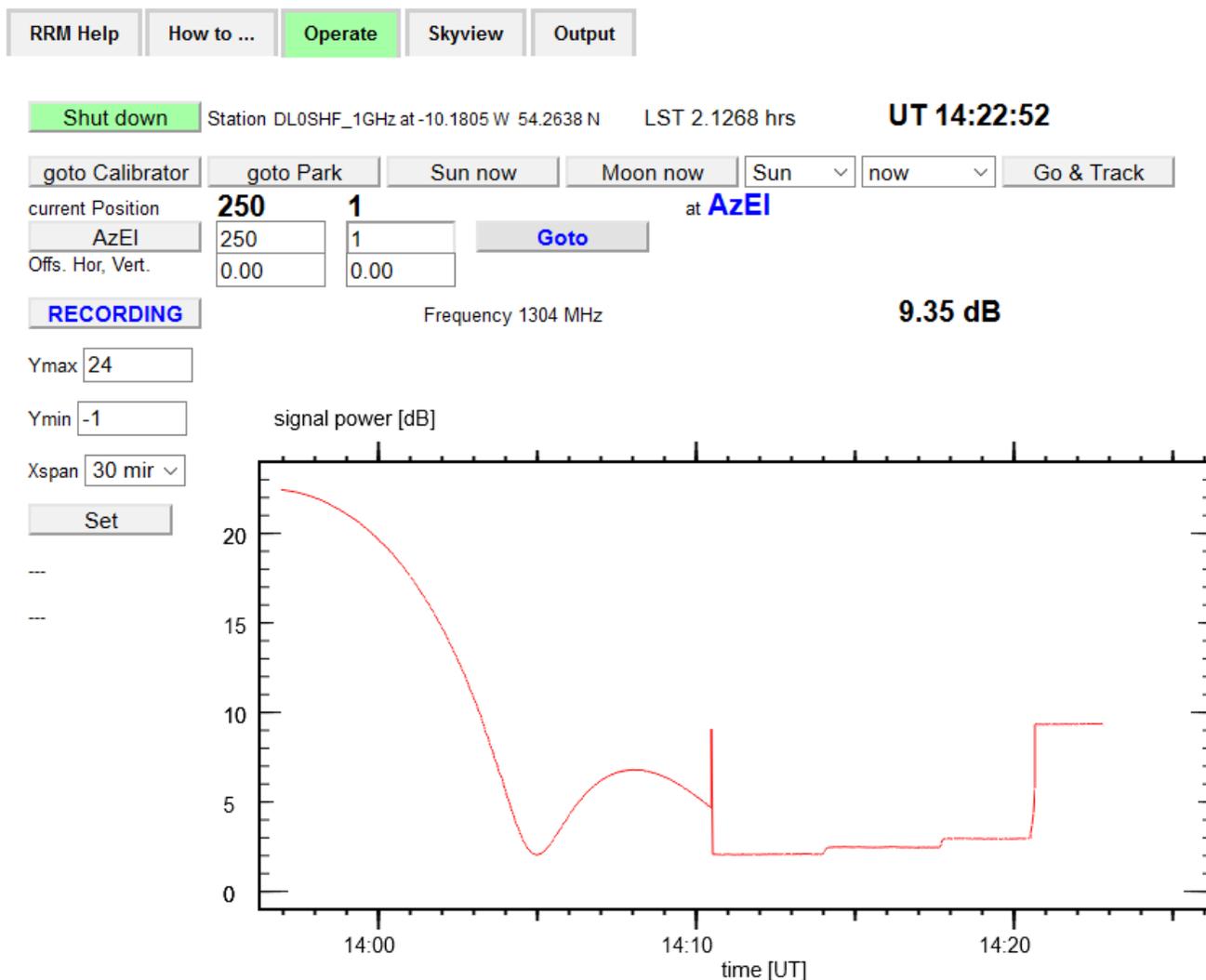


**Fig.2:** Übersicht über das Steuerungs- und Mess-System einer Antennenanlage.

Ein Computer ('spg') ist für die Steuerung der Motoren zuständig, mit dem AntennaController AC9. Auf derselben Maschine befindet sich auch der Zugang zu einem HP437B Leistungsmesser, mit dem die Stärke des Empfangssignals bei 1305 MHz mit einer Bandbreite von etwa 1.4 MHz gemessen wird. Das digitalisierte Signal wird von unserem Programm RoenneRadiometer (RRM) übernommen, angezeigt und nach Wunsch aufgezeichnet. Beim Start von RRM wird auch die Verbindung mit AC9 hergestellt, um somit die aktuelle Position der Antenne zu erhalten sowie durch Kommandos an die Motorensteuerung die Antenne an eine neue Position zu fahren.

Ein zweiter Computer ist dem Betrieb eines Empfängers gewidmet. Auf der 1GHz Anlage erfolgt der Empfang im 1420 MHz Band mit einem Software-Defined Radio vom Typ Perseus. Dieses Gerät digitalisiert die Signale innerhalb einer Bandbreite von 2 MHz, zentriert um 1420.405750 MHz, der theoretischen Frequenz des Hyperfeinübergangs im Wasserstoffatom. Das Signal wird als Datenstrom von ca. 2 Millionen Samples pro Sekunde an das Programm RoenneSpectrometer (RSM) übermittelt, in dem dann eine Spektralanalyse (mit FFT = fast fourier transform) durchgeführt wird, und das Spektrum der weiteren Verarbeitung bereit steht.

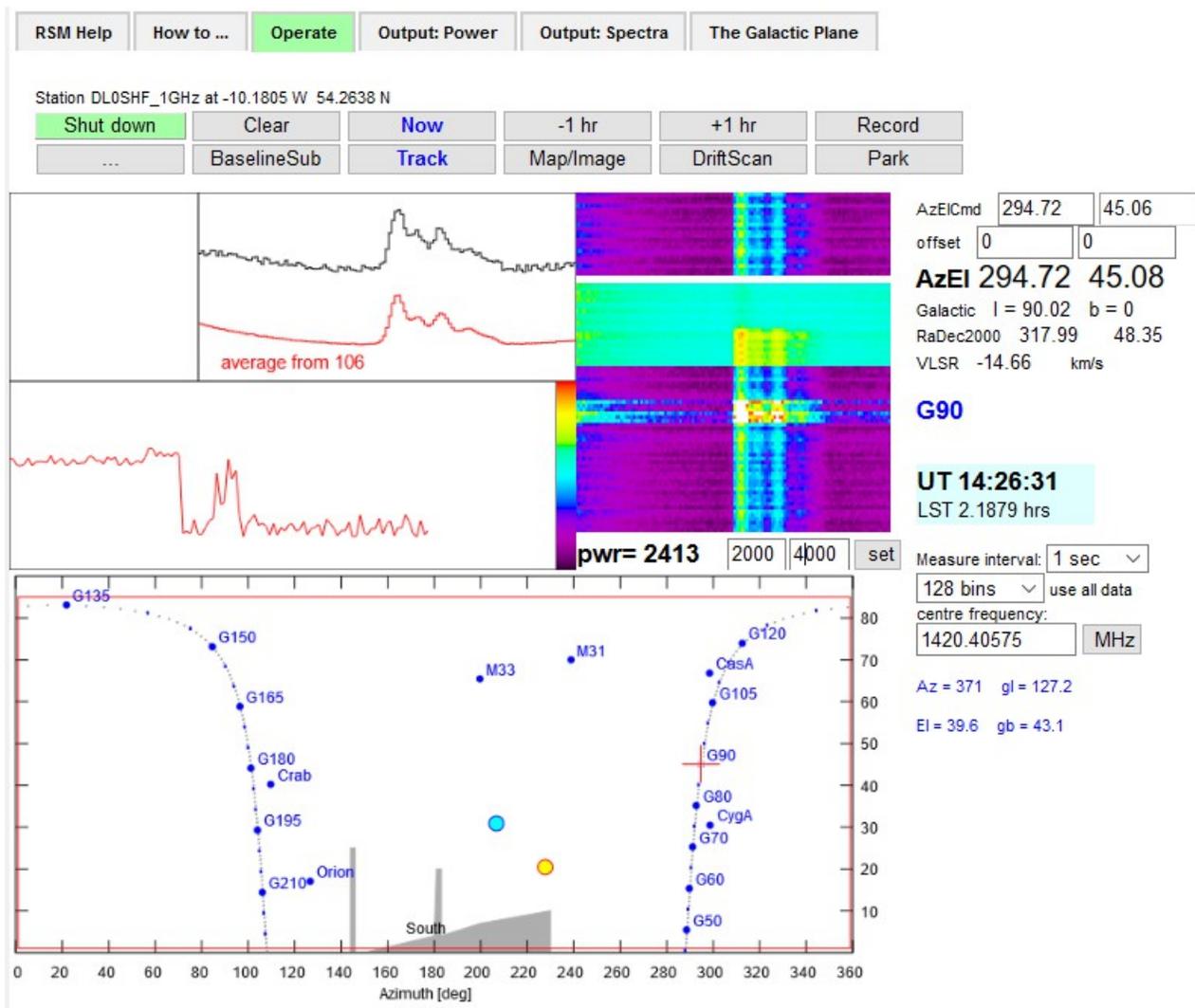
## Messungen mit RoenneRadiometer (RRM)



**Fig.3:** Ansicht der 'Operate' Seite von RoenneRadiometer (<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/RRM/RRM.html>), von der aus alle nötigen Tätigkeiten ausgeführt und überwacht werden können. Hier ein Beispiel eines Driftscans der Sonne mit nachfolgender Messungen des 'leeren' Himmels und der Flusskalibrierung mit dem Rauschen des Erdbodens. Ein Klick mit der Maus auf eine Stelle des Plots zeigt die Koordinaten des Punkts an.

- Die 'Operate' Seite enthält alle Bedienelemente zum Positionieren des Teleskops und Anzeigen der Position und der Messergebnisse.
- Die 'Skyview' Seite enthält eine Ansicht des Himmels und der gegenwärtig sichtbaren Objekte, was z.B. zur Planung der nächsten Schritte nützlich sein kann.
- Die 'RRM Help' Seite enthält eine Kurzfassung aller Optionen.
- Auf der 'How to' Seite finden sich einige Hinweise zur Bedienung
- Die Beobachtungssitzung beginnt mit 'Start up' und wird mit 'Shut down' beendet.
- Im Betrieb bei aktueller Zeit können die Daten mit 'Record' aufgezeichnet werden:
- Auf der 'Output' Seite werden die Beobachtungsdaten abgespeichert, die dann mit copy&paste in eine Textdatei kopiert werden können!

## Messungen mit RoenneSpectrometer (RSM)



**Fig.4:** Die Benutzeroberfläche des Programms RoenneSpectrometer (<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/RSM/RSM.html>) zeigt die Karte des gegenwärtig sichtbaren Himmels über dem Teleskop, Radioquellen, der Galaktischen Ebene (mit Markierungen G... der galaktischen Länge) und

*Erdobjekten (in grau). In der Mitte oben ist eine Falschfarbendarstellung der gemessenen Spektren im Wasserfalldiagramm, links daneben das aktuelle Spektrum (schwarz) und das über die bisher erhaltenen Spektren gemittelte Spektrum (rot), sowie der zeitliche Verlauf der Signalstärke. Rechts finden sich alle wichtigen numerischen Informationen, und Meldungen. Der Betrieb des Programms erfolgt fast ausschließlich über die graphischen Elemente.*

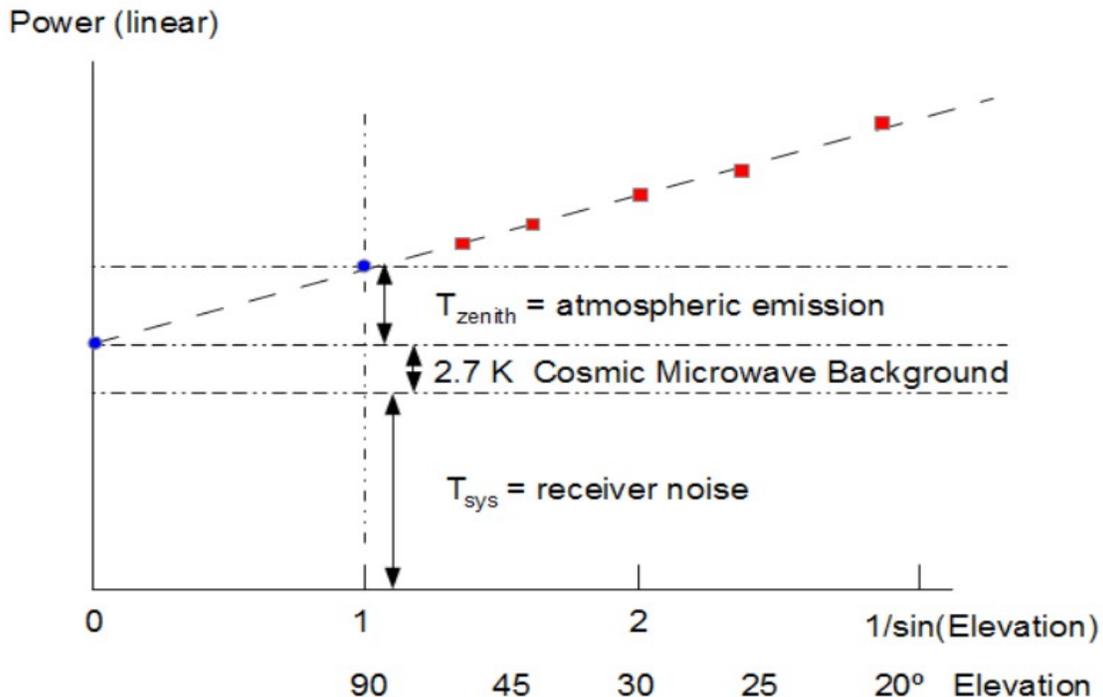
- Die Beobachtungssitzung wird mit dem Knopf 'Start up' gestartet und mit 'Shut down' beendet.
- Im Betrieb bei aktueller Zeit können die Daten mit 'Record' aufgezeichnet werden:
- in 'Output: Power' wird die über das Spektrum gemittelte Leistung gespeichert
- in 'Output: Spectra' finden sich die Spektren jedes Zeitpunktes
- Die Daten können von diesen Seiten mit copy&paste in eine Textdatei kopiert werden.

# Profil des Himmelsvordergrunds

## Grundlagen

Radiostrahlung von astronomischen Objekten ist inkohärente Strahlung im Kontinuum und in Linien, da die die Anregung durch Vielteilchenprozesse (thermische Anregung bzw. Synchrotronemission) erfolgt. Zu diesem Rauschsignal kommt die Schwarzkörperstrahlung von 2.7 K des kosmischen Mikrowellenhintergrunds (CMB = cosmic microwave background), aber vor allem das Rauschen des Empfängers hinzu, und auch die thermische Emission der Erdatmosphäre hinzu, so dass das gemessene Signal sich aus mehreren Bestandteilen zusammensetzt, die durch geeignete Beobachtungstechniken zu trennen sind.

- Das Objekt selber ist durch seine Position und Ausdehnung am Himmel charakterisiert
- Die CMB Strahlung ist überall am Himmel gleich
- Das Empfängerrauschen ist völlig unabhängig von der Position auf die das Teleskop schaut.
- Die Wärmestrahlung der Erdatmosphäre liegt zusätzlich auf dem Signal jedes Himmelsobjekts. Bei 1 GHz ist die Atmosphäre nahezu vollständig transparent, so dass sich die Signale einfach addieren.
- Die atmosphärische Emission hängt von der Elevation ab: Da die Erdatmosphäre nur eine relativ dünne Schicht (8 km gegenüber dem Erdradius 6370 km) darstellt, kann man sie durch ein plan-paralleles Modell wiedergeben. Die Luftmasse, die ein Sehstrahl in Elevation  $\epsilon$  durchläuft, ist proportional  $1/\sin(\epsilon)$ . Weil die Erdatmosphäre im Radiobereich optisch dünn ist, ist die Rauschleistung durch die einfache Formel  $p(\epsilon) = p_{\text{zenit}} / \sin(\epsilon)$  beschrieben.



**Fig.5:** Abhängigkeit des gemessenen Himmelsvordergrunds (rote Quadrate) von der Elevation. Die verschiedenen Bestandteile werden durch Extrapolation auf Zenit und außerhalb der Erdatmosphäre ermittelt.

Der Rauschuntergrund von Empfänger, Himmelsemission und Mikrowellenstrahlung kommt bei der Messung am eigentlichen Objekt hinzu, und muss entsprechend abgezogen werden. Dazu ist die genaue Kenntnis der Einzelkomponenten erforderlich. Diese lassen sich durch die Messung eines Himmelsprofils von einander trennen:

- Das Rauschen des 'leeren' Himmels wird bei einer Reihe von Elevationen gemessen
- Die Daten werden an das plan-parallele Atmosphärenmodell angepasst
- Die gefundene lineare Beziehung zwischen Messwert und Luftmasse= $1/\sin(\varepsilon)$  wird auf den Zenit und auf den (geometrisch unerreichbaren) Wert  $1/\sin(\varepsilon) = 0$  extrapoliert.
- Aus diesen Werten am Zenit und außerhalb der Erdatmosphäre lassen sich alle Parameter bestimmen.

Im Prinzip muss eine solche Beobachtung und Analyse vor jeder eigentlichen Beobachtung durchgeführt werden. Allerdings sind auf 1 GHz die Eigenschaften der Erdatmosphäre nur schwach veränderlich. Aber ein anderer Tag kann den Himmel und die Empfängerelektronik in einem anderen Zustand finden ... Ohne die volle Kalibration mit Himmelsprofil ist eine Messung ohne Wert!

## Beobachtung

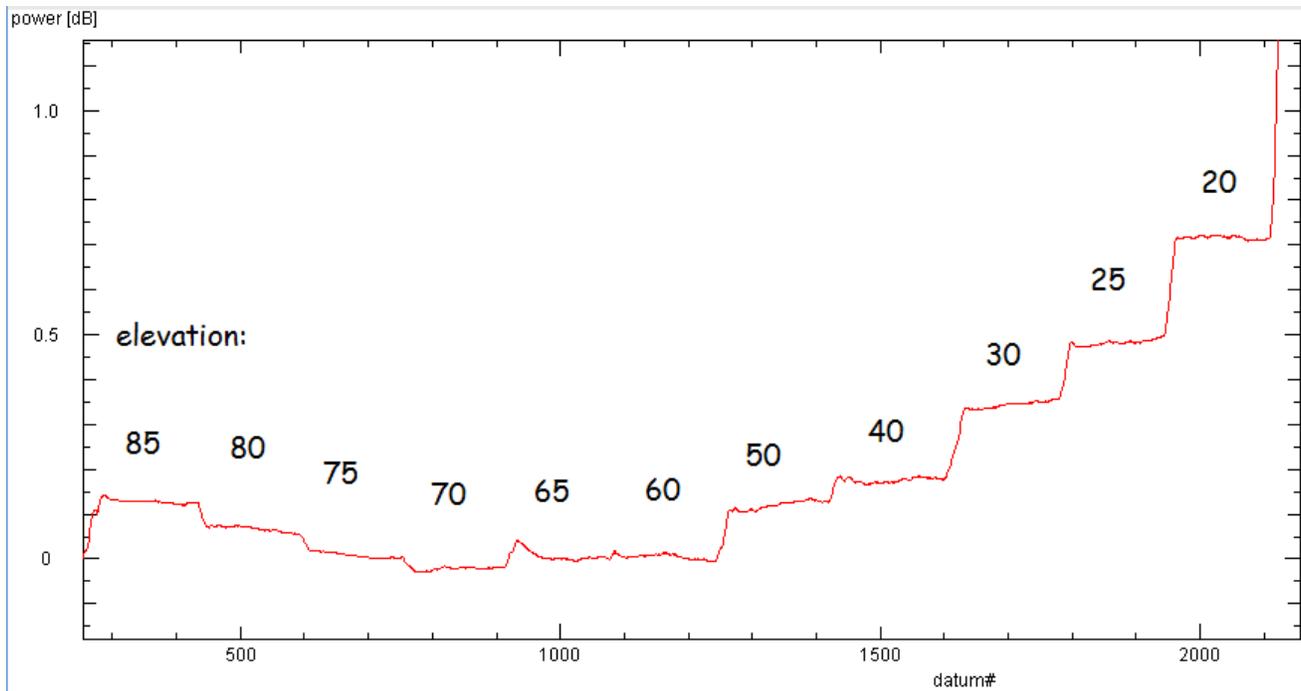
Der Himmelsvordergrund wird bei einem Azimut gemessen, der mindestens  $20^\circ$  von der Sonne entfernt ist, um die Einstrahlung dieser sehr hellen Quelle durch die Nebenkeulen der Antenne (vgl. Fig.8) zu vermeiden. Eine Reihe von Elevationen werden nacheinander beobachtet. Da das Rauschen von  $1/\sin(\varepsilon)$  abhängt, ist es günstig die Elevationen so zu verteilen, dass sie etwa äquidistant in  $1/\sin(\varepsilon)$  sind. Es macht allerdings wenig Sinn, höher als  $70^\circ$  zu gehen, da eine Parabolantenne in der Nähe des Zenits zusätzliches Rauschen erhält, die vom Erdboden am Rande des Spiegels vorbei zum Erreger im Fokus gelangt ("spill-over"), wie das Beispiel in Fig.6 zeigt.

Nicht vergessen, zu Beginn die Registrierung der Daten (record) zu starten! Auf dem Plot wird sich eine rote Kurve zeigen. [Beim direkten Betrieb mit Rönne: Durch die Fernübertragung werden manchmal nicht alle Pixel des Bildschirms rechtzeitig erneuert: Refresh-Knopf benutzen oder mit dem Cursor über die Stelle fahren.]

Es wird die jeweils neue Position in die Felder neben **AzEl** eingegeben, und dann der **Goto** Knopf gedrückt (oder die Enter-Taste betätigt). Die Antenne braucht eine gewisse Zeit (etwa 1 Minute pro  $10^\circ$ ) um auf die Position zu gelangen. Während der Bewegung wird die augenblickliche Position angezeigt, und mit einem blauen Feld hinterlegt. Da während des Betriebs der Motoren es zu erhöhtem Rauschen oder gar Störsignalen kommen kann, sollte man die Messwerte erst wieder als gültig ansehen, nachdem das Feld wieder weiß geworden ist, und auch danach noch ein Weilchen warten.

Bei jeder Position sollte man lang genug messen, einerseits um einen gut definierten Mittelwert bilden zu können, andererseits um etwaige systematische Pegeländerungen zu erkennen. Diese können durch das Vorbeiziehen der (doch zu nahen) Sonne oder Regenwolken verursacht werden.

Vor oder nach den Himmelmessungen wird der Flusskalibrator ebenfalls genügend lang registriert.



**Fig.6:** Registrierung einer Messung des Himmelsvordergrunds. Der Anstieg des Rauschens von 70° zum Zenit ist durch das 'spill-over' der Antenne verursacht. Beim Fahren zur nächsten Position ist manchmal (z.B. 65 → 70°) erhöhtes Rauschen zu bemerken. Das Signal vom Flusskalibrator beträgt 8dB, also weit außerhalb des dargestellten Bereichs.

## Auswertung

Die Daten liegen in einer Textdatei vor, als eine Serie von Datentupeln, bestehend aus Zeitangabe (in UT), Position in Azimut und Elevation, horizontaler und vertikaler Offset (hier ohne Bedeutung) und dem Meßwert in dB. Es bietet sich an, die Auswertung mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Excel) durchzuführen. Erfahrungsgemäß dauert das Schreiben eines auch kleinen Programms oftmals länger als es einem lieb ist ...

In Excel sind folgende Schritte empfehlenswert:

- importieren der Datei. Leerzeichen werden hier als Trennzeichen verwendet.
- zur Übersicht wird ein Plot der Meßwerte als Funktion der Zeit erstellt
- da die Meßwerte als logarithmisches Maß (dB) vorliegen, müssen diese in lineare Leistung konvertiert werden:  $p = 10.0^{(p_{dB}/10)}$
- anhand der Elevationen werden die einzelnen Positionen identifiziert
- für jede Position bildet man den Mittelwert über die Einzelmessungen – man versichere sich, dass keine Störimpulse miteinbezogen werden, z.B. durch erhöhtes Rauschen während der Positionsänderung, das durchaus noch eine Weile anhalten kann.
- Anpassen einer Geraden im Leistung –  $1/\sin(\epsilon)$  Diagramm durch lineare Regression.

Aus den Parametern des Fits – Steigung  $m$  und  $y$ -Achsenabschnitt  $b$  – lassen sich Systemtemperatur und Antennentemperatur des Himmels im Zenit berechnen:

Die Leistung ist in irgendwelchen, durch Apparatur und Software gegebenen Einheiten gemessen. Um die bei einer beliebigen Radioquelle gemessenen Leistungswerte  $p$  in Antennentemperatur umzurechnen, benötigen wir die Kenntnis des Skalierungsfaktors  $a$ :

$$p_{\text{quelle}} = a (T_{\text{quelle}} + T_{\text{sky}}(\epsilon) + T_{\text{sys}} + T_{\text{CMB}})$$

Hierbei sind alle Beiträge der Quelle, des Himmelsvordergrunds, des Empfängers und des Mikrowellenhintergrunds zu berücksichtigen.

Die Messung des Flusskalibrators ergibt einen Signalpegel, der der (physischen) Temperatur des Kalibrators entspricht, hier also etwa 290 K der Temperatur der Bäume und des Erdbodens, weil diese Quelle die Antennenkeule vollständig mit ihrer thermischen Emission ausfüllt.

Nach Fig. 5 ergibt der  $y$ -Achsenabschnitt – der die Daten auf den Wert  $1/\sin(\epsilon) = 0$  extrapoliert, also auf einen Punkt außerhalb der Erdatmosphäre – die Summe des Rauschens vom Empfänger und dem Mikrowellenhintergrund:

$$b = a (T_{\text{sys}} + T_{\text{CMB}}) = p(1/\sin(\epsilon) = 0)$$

Wenn das Teleskop auf den Kalibrator gerichtet ist, entfällt der Anteil von Himmel und CMB:

$$p_{\text{cal}} = a (T_{\text{cal}} + T_{\text{sys}})$$

Aus diesen beiden letzten Gleichungen zusammen mit der als bekannt vorauszusetzenden  $T_{\text{cal}}=290$  K bestimmt man nun die beiden unbekannt GröÙen: Skalenfaktor  $a$  und Systemtemperatur ...

Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Emission der Erdatmosphäre. Sie lässt sich zweckmäßigerweise als die Antennentemperatur im Zenit ausdrücken. Man erhält:

$$T_{\text{zenit}} = m / a$$

Am 1 GHz Spiegel beträgt die Systemtemperatur etwa 50 K. Die Zenittemperatur ist etwa 5 K bei 1GHz und anscheinend recht unabhängig von Regen und Sonnenschein. Da sich außerdem das System als sehr stabil erwiesen hat, ist – jedenfalls für unsere Zwecke – es nicht unbedingt erforderlich, vor und nach jeder Beobachtung eine sonst zeitaufwändige Kalibrierung durchzuführen.

Wenn wir die Wärmestrahlung der Atmosphäre und den Mikrowellenhintergrund vernachlässigen, können wir einen Schätzwert für die Systemtemperatur erhalten (man leite die Formeln einmal ab!):

$$T_{\text{sys}} \approx T_{\text{cal}} / (p_{\text{cal}} / p(60^\circ) - 1) \quad \text{z.B. bei einer Messung bei } 60^\circ \text{ Elevation.}$$

Damit ergibt sich auch:

$$a \approx (p_{\text{cal}} - p(60^\circ)) / T_{\text{cal}}$$

Dies kann schon während der laufenden Messungen einen ersten Eindruck geben, sowie bei der Beurteilung der Datenqualität hilfreich sein. Aber dies ist nur eine Näherung, die nicht die volle Information aus dem Himmelsprofil berücksichtigt.

Es ist sehr empfehlenswert, sich schon vor den eigentlichen Messungen z.B. mit einem Tabellenkalkulationsprogramm eine Seite zu erstellen, in der die Messwerte gleich bei der Beobachtung eingetragen werden können, und die die Anpassung und die restliche Auswertung bewerkstelligt. So kann man schon während der Beobachtung sich einen Eindruck von der Qualität der Daten verschaffen und über eine eventuell notwendige Wiederholung entscheiden.

## **Fehlerbetrachtung**

Bei einer sorgfältiger Betrachtung der Fehler in System- und Zenittemperatur ist es erforderlich, alle Unsicherheiten zu identifizieren, die sich bei den Messwerten ergeben. Im Idealfall sollten die Stufen des Himmelsprofils eben sein, also die Messwerte bei einer Elevation nur um einen Mittelwert schwanken. Wie Fig.7 zeigt, kann es nicht nur passieren, dass die Antennenmotoren Störsignale produzieren, aber auch dass das Signalniveau sich langsam verändert, aufgrund von Änderungen des Empfangssystems oder des Wetters, d.h. durch vorbeiziehende Wolken. Daneben können auch schwache oder starke kurze Störsignale auftreten, von elektrischen und elektronischen Geräten, Radar, und auch vorbeifliegenden Vögeln. Ein Blick aus dem Fenster ist durchaus nützlich, auch wenn das Teleskop außerhalb von Kiel steht. Bei der Mittelwertbildung lässt sich der statistische Fehler ermitteln, ebenso wie bei der linearen Regression. Schließlich besteht eine gewisse Unsicherheit in der Annahme der Kalibratortemperatur von 290 K.

Alle diese Fehlerquellen sind quantitativ zu erfassen und ihr Einfluss auf das Ergebnis ist zu ermitteln. Daraus ergibt sich, welche Einzelfehler am wichtigsten sind, und bei welcher Messung man besser auf größte Sorgfalt achten muss, falls dies möglich ist ...

## **Weitergehende Projekte**

### **1. Wetterabhängigkeit:**

Messungen des Himmelsvordergrunds bei unterschiedlicher Bedeckung des Himmels (blauer Himmel ... dunkle Regenwolken) zeigen, wie stark die Zenittemperatur vom Wetter abhängig ist. Im Simulator ist zwar kein richtiges Wetter simuliert, allerdings wird die Änderung der Eigenschaften der Empfangselektronik angedeutet. Das bedeutet, dass kein Tag wie der Andere ist!

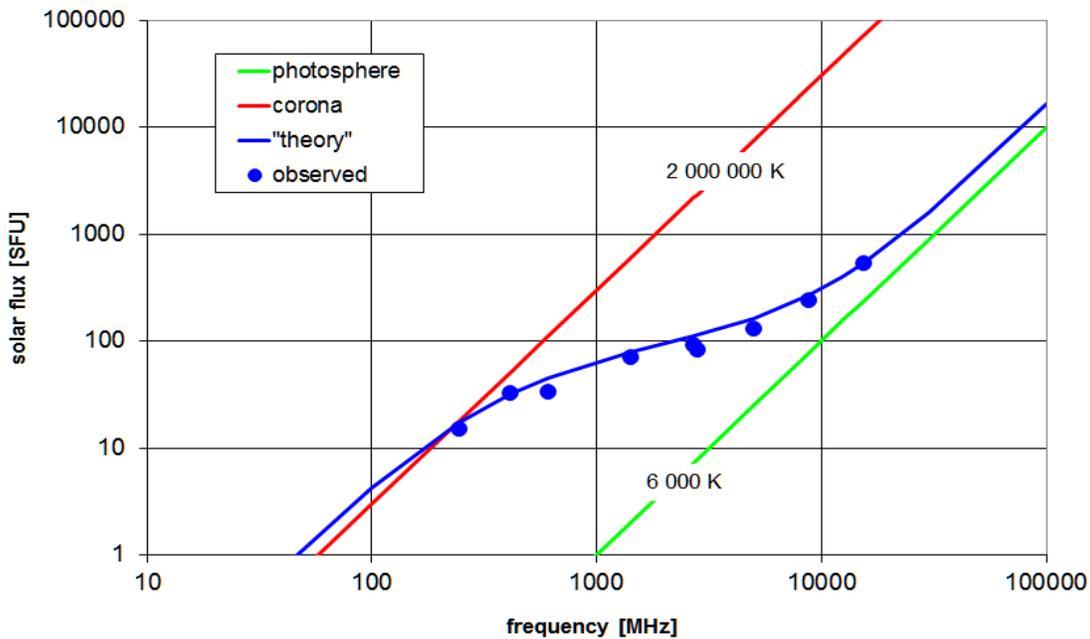
### **2. Absorption der Erdatmosphäre:**

Es könnte sein, dass wir auch den 24 GHz Spiegel benutzen. Bei dieser Frequenz ist die Emission des Himmels wesentlich stärker, wofür vor allem der Wasserdampf verantwortlich ist, was eine starke Wetterabhängigkeit mit sich bringt.

# Oberflächentemperatur der Sonne

## Grundlagen

Die Sonne strahlt im Radiobereich thermische Kontinuumsstrahlung ab, als langwellige Fortsetzung ihres optischen und infraroten Spektrums. Da die Opazität des Sonnenplasmas mit fallender Frequenz ansteigt, entsteht das Radiokontinuum bei über 30 GHz noch in der Photosphäre, bei 10 GHz schon im unteren Teil der Übergangsschicht (Transition Layer) zwischen Chromosphäre und Korona, und bei unter 1 GHz in der Korona. Weil die Temperatur zur Korona hin stark ansteigt, prägt diese Schichtenfolge das Radiospektrum der Sonne (Fig.7):



**Fig.7:** *Spektrale Flussverteilung der Sonne, wie sie täglich von einer weltweiten Kette von Stationen gemessen und von NOAA veröffentlicht wird (siehe Webseiten). Im Vergleich dazu die Schwarzkörperspektren mit Photosphären- und Koronatemperatur.*

Der Fluss der solaren Radiostrahlung variiert darüber hinaus mit der Aktivität auf der uns zugewandten Seite der Sonne ab. Da solare Aktivität und Eruptionen Einfluss auf Radioverbindungen auf dem Erdboden und mit Satelliten hat, wird die Sonne regelmäßig beobachtet und der Radiofluss gemessen.

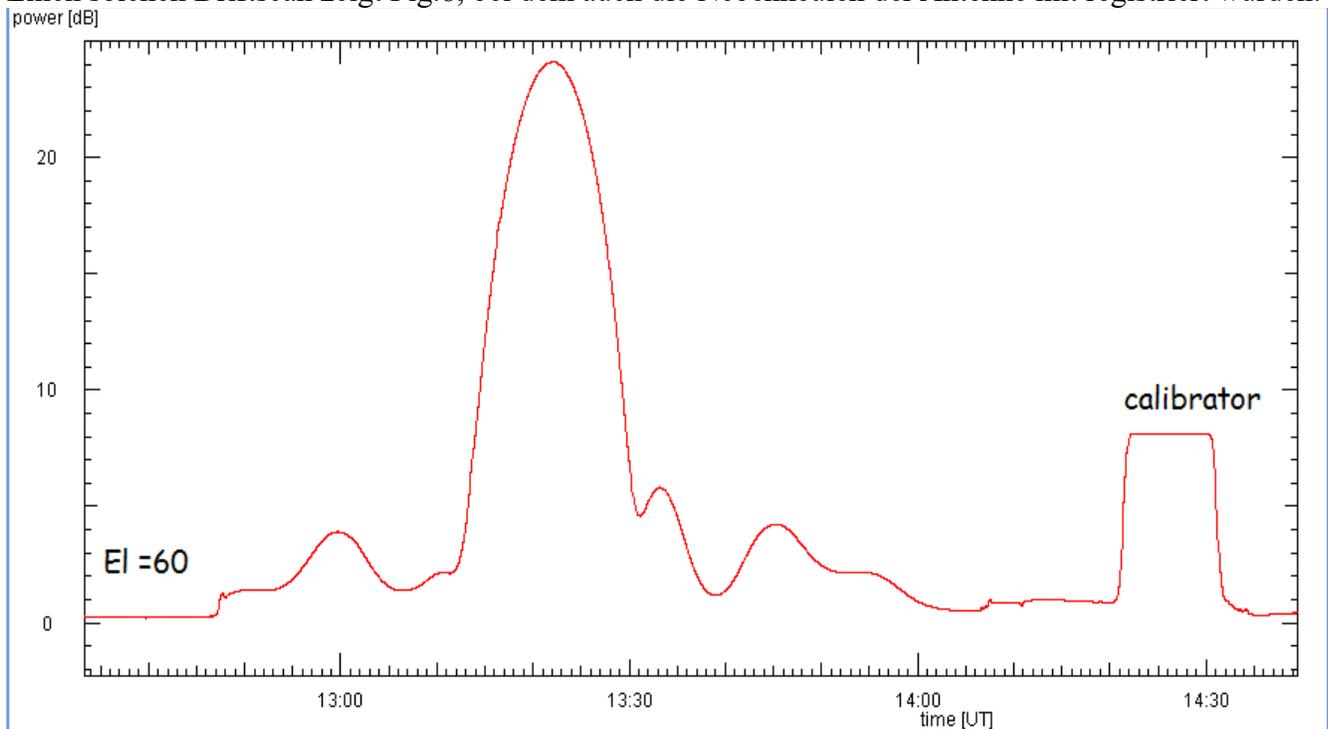
Der Radiofluss bei 1.4 GHz lässt Aussagen über den Zustand der unteren Korona zu, insbesondere die Temperatur in dieser Schicht. Da zur Interpretation der gemessenen Empfangsleistung auch eine genaue Kenntnis der Systemparameter notwendig ist, ist es vorteilhaft, die Sonne mit einem Driftscan zu beobachten: Hierbei wird das Teleskop auf eine Position gesetzt, in der die Sonne in ca. 10 Minuten sein wird. Das Teleskop wird in dieser Stellung belassen, so dass die Sonne im Laufe der Zeit durch die Antennenkeule wandert, und diese somit vermisst. Die Messung des Himmelsvordergrunds (auf derselben Elevation) und eine Flusskalibrierung – vorher oder/und nachher – vervollständigen die Messung. In dieser Weise wird die sehr präzise Erdrotation zum Durchfahren der Antennenkeule verwendet, so dass sich dieses Verfahren auch für Teleskope eignet, die über keine so genaue Positionierung verfügen.

## Beobachtung

Nach den Vorbereitungen (siehe Zugang und Bedienung der Teleskope), wird dazu etwa folgende Prozedur durchgeführt:

- Aufzeichnung starten
- Himmelsprofil und Flusskalibrierung (in angemessener Länge, könnte auch nach dem Sonnendurchgang erfolgen – aber: wenn die Stufen des Himmelsprofils (Fig. 6) nicht horizontal und eben sind, oder sonst Verdacht besteht, dass das Rauschniveau schwankt, Himmel und Kalibrator vor und nach Sonnendurchgang messen...)
- Sonne und +XX min geeignet auswählen. Mit Goto auf diese Position gehen. Sicherheitshalber nachschauen, ob die Nachführung (track) aus ist...
- Es ist nicht nötig, den gesamten Durchgang zu beobachten, weil die Antenne Nebenkeulen hat, und das Instrument empfindlich genug ist, diese noch in 15 oder 20° Abstand sicher zu messen. Daher würde es also ziemlich lange dauern, bis man auf den 'leeren' Himmel stößt, und leider ohne wichtige Information gewonnen zu haben. Wie in Fig.9 gezeigt, würde es auch ausreichen, den oberen Teil der Kurve zu erfassen (bis ca. 10 dB unterhalb des Maximumwertes)
- Danach zur Kontrolle den Himmelsvordergrund auf derselben Elevation nochmal messen, mindestens 20..30° nach 'links'.

Einen solchen Driftscan zeigt Fig.8, bei dem auch die Nebenkeulen der Antenne mit registriert wurden:

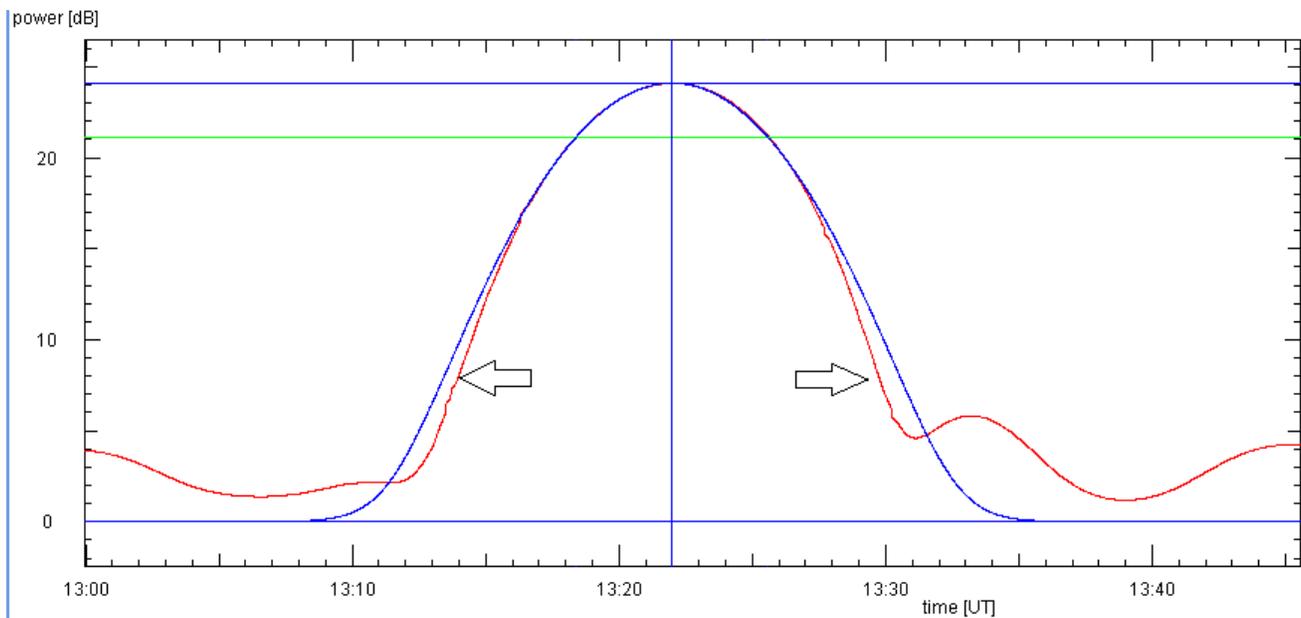


**Fig.8:** Ein Driftscan der Sonne, mit Registrierung des Himmelsvordergrundes und des Flusskalibrators. Das Teleskop wird auf eine Position gestellt, in der die Sonne 10 Minuten später sein wird. Während die Sonne durch die Antennenkeule zieht, vermisst sie die winkelabhängige Empfindlichkeit der Antenne (Antennendiagramm). Hier sind neben der Hauptkeule mehrere Nebenkeulen zu sehen, die mindestens 20 dB schwächer sind, d.h. um einen Faktor 100.

## Auswertung

Auch hier bietet sich die Verwendung eines Programms zur Tabellenkalkulation an.

- importieren der Datei
- Umwandlung aller dB-Werte in lineare Leistungswerte
- mit einem Plot der Signalleistung as Funktion der Zeit verschafft man sich einen Überblick
- identifizieren von Kalibrator, Sonnenmaximum, und leerem Himmel
- Bilden der Mittelwerte für Kalibrator und leerer Himmel:  $p(\text{calibrator})$ ,  $p(\text{himmel})$
- Berechnen des zeitlichen Verlaufs des kalibrierten Signals, d.h. die Antennentemperatur für alle Zeitpunkte mit
  - entweder  $T_{\text{ant}}(t) = (p(t) - p_{\text{sky}})/a$
  - oder:  $T_{\text{ant}}(t) = (p(t) - p_{\text{sky}}) / (p_{\text{cal}} - p_{\text{sys}}) * 290 \text{ K}$  mit dem Systemrauschpegel  
 $p_{\text{sys}} = a * T_{\text{sys}} = p_{\text{cal}} * T_{\text{sys}} / (T_{\text{cal}} + T_{\text{sys}})$ , weil  $p_{\text{cal}} = a * (T_{\text{cal}} + T_{\text{sys}})$
- Man sollte auch das Niveau des Himmelsvordergrunds überprüfen anhand der Voraussage aus der vorigen Aufgabe:  
 $p_{\text{sky}} = ? = p(\epsilon) = \dots T_{\text{zenit}} / \sin(\epsilon)$
- Bestimmen der Zeitpunkte von Sonnenmaximum und den beiden Zeiten, an denen das Signal auf die Hälfte des Maximalwerts abgefallen ist. Dies gibt die Halbwertsbreite der Antennenkeule (Half Power Beam Width):  
 $\text{HPBW} = (t(-1/2) - t(+1/2)) * 15^\circ/\text{h} * \cos(\text{deklination\_sonne})$   
Der letzte Faktor berücksichtigt, dass die Winkelgeschwindigkeit der Sonne entsprechend ihrer gegenwärtigen Entfernung vom Himmelsäquator kleiner ist als  $360^\circ/24 \text{ h}$ .  
Wieso verwenden wir hier  $15^\circ/\text{h}$  anstatt  $360^\circ/\text{siderischer Tag} = 15.04107^\circ/\text{h}$ ?
- Eine alternative Methode besteht im Anpassen eines Gaussprofils an die  $T_{\text{ant}}(t)$  Kurve. Hier ist die volle Breite auf halber Höhe ( $\text{FWHM} = \text{HPBW} = 2.3548 \sigma$ ). Hinzu kommt die Korrektur für die Sonnendeklination
- Diese Bestimmung der HPBW setzt voraus, dass das beobachtete Objekt eine Punktquelle ist. Die Sonne stellt aber eine Scheibe von etwa gleichmäßiger Helligkeit mit einem Winkeldurchmesser von ca.  $0.5^\circ$  dar. Dadurch wird das gemessene Profil etwas verbreitert. Mit dem JavaScript Programm <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/Blurring.html> kann man nachprüfen, in wieweit sich dies auf die Bestimmung der wahren HPBW auswirkt.



**Fig.9:** Beispiel der Anpassung eines Gaussprofils (blau) an die Daten des Driftscans. Die horizontalen blauen Linien markieren den Maximalwert und den Himmelsvordergrund. Die grüne Linie markiert das Niveau der halben Höhe der (linearen) Differenz von Maximal- und Hintergrundwert, und damit die Halbwertsbreite des Profils. Das gemessene Profil der Hauptkeule ist im unteren Bereich schmaler als eine Gausskurve. Da zur Bestimmung der Halbwertsbreite der untere Teil und die Nebenkeulen nicht erforderlich sind, kann ein Driftscan sich auf den durch Pfeile angedeuteten Teil um das Maximum beschränken, also auf insgesamt 20 Minuten. Aber man messe auch den Himmelsuntergrund bei gleicher Elevation!

Deklination und Winkeldurchmesser der Sonne kann man dem Skript <http://www.astrophysik.uni-kiel/~koeppen/JS/SunMoon.html> entnehmen.

Da der Winkeldurchmesser der Sonne kleiner ist als die Halbwertsbreite der Antennenkeule, füllt die Sonne nur einen kleinen Teil der Keule aus. Daher ist der Maximalwert der Antennentemperatur kleiner als die wahre (physische) Temperatur der Sonne, und zwar ungefähr um das Verhältnis der Raumwinkel von Sonne und Antennenkeule. Schätzt man diesen Füllfaktor ganz grob mit der Annahme, dass sowohl die Intensitätsverteilung der Sonnenscheibe als auch die Antennenkeule Rechteckprofile haben, ergibt sich für die Temperatur in der Schicht auf der Sonne, aus der die Radiostrahlung kommt:

$$T_{\text{sonne}} = \max(T_{\text{ant}}) * (\text{HPBW} / \text{Durchmesser}_{\text{Sonne}})^2$$

Berücksichtigen wir aber, dass die Antennenkeule ein realistisches Profil hat, gibt es eine ganz ähnliche Form:

$$T_{\text{sonne}} = \max(T_{\text{ant}}) * \Omega_A / \Omega_{\text{sonne}} = \dots \max(T_{\text{ant}}) * (\text{HPBW} / \text{Durchmesser}_{\text{Sonne}})^2$$

mit einem Proportionalitätsfaktor, den man aus den Grundgleichungen auf den Seiten 7 und 8 bestimmen sollte. Diese Näherung ist allerdings nur gültig solange die Radioquelle sehr viel kleiner als die Breite der Antennenkeule ist. Da bei Sonne und Mond diese Werte von vergleichbarer Größe sind,

ergibt sich der Füllfaktor aus dem Faltungsintegral von Helligkeitsprofil der Sonne und der Form der Antennenkeule. Dies kann mit dem Scripts <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/Blurring.html> berechnet werden. Auch kann man hiermit überprüfen, wie gut ist die Annahme ist, dass die Sonne als Punktquelle behandelt werden kann.

## Fehlerbetrachtung

Identifizierung und Ermittlung der Größe aller Fehlerquellen und Unsicherheiten. Berechnung der Standardfehler. Wie groß ist der Fehler bei den Temperaturen? Welche Messung ist die kritischste?

## Weiterführende Fragen

### 1. Auflösungsvermögen des Teleskops (HPBW):

Ein Spiegel wird von der Antenne im Brennpunkt ("Feed") ausgeleuchtet – wenn man ihn im Sendebetrieb verwendet. Daher wird nicht die gesamte geometrische Fläche gleichmäßig bestrahlt. Wenn man vom Rayleigh Kriteriums ausgeht, wie groß ist die HPBW unseres Parabolspiegels mit dem Durchmesser von 9 m? Die Messung der HPBW gestattet es, umgekehrt den effektiven Durchmesser des Spiegels zu bestimmen, d.h. den Durchmesser des beleuchteten Teils des Spiegels zu bestimmen, und die Aperturreffizienz = Verhältnis von effektiver und geometrischer Fläche.

### 2. Solarer Radiofluss:

Da die Ergebnisse der täglichen Radioflussmessungen von NOAA erhältlich sind, lohnt es sich, die eigenen Ergebnisse damit zu vergleichen. Bei der Simulation ist dieser Vergleich natürlich nicht streng durchführbar, aber da derzeit die Sonne sehr ruhig ist, ist er durchaus sinnvoll.

Aus der Antennentemperatur  $T_{\text{ant}}$  lässt sich mit der Kenntnis der effektiven Fläche des 1 GHz Spiegels von  $A_{\text{eff}} = 40 \text{ m}^2$  der von uns gemessene Fluss  $F$  berechnen. Die Daten von NOAA (<http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/radio/>) sind in Solar Flux Units angegeben:  $1 \text{ SFU} = 10^4 \text{ Jy}$ . Radioflüsse werden täglich auf mehreren Frequenzen zwischen 245 MHz und 15.4 GHz gemessen. Es dauert erfahrungsgemäß einige Stunden bis die neuesten Daten vorliegen. Die Flüsse zeigen neben einer kurzzeitigen Variation auch einen Gang mit der Sonnenrotation wegen der unterschiedlichen Verteilung der aktiven Gebiete auf der Sonne.

Da zur Interpretation die Kenntnis der Antenneneigenschaften erforderlich sind, kann man auch umgekehrt aus dem Vergleich der eigenen Messungen mit den NOAA Daten die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  unserer Antenne bestimmen, sowie die Effizienz der Antenne, das Verhältnis aus effektiver und geometrischer Fläche (unsere Antenne besitzt einen Durchmesser von 9 m).

# Oberflächentemperatur des Mondes

## Grundlagen

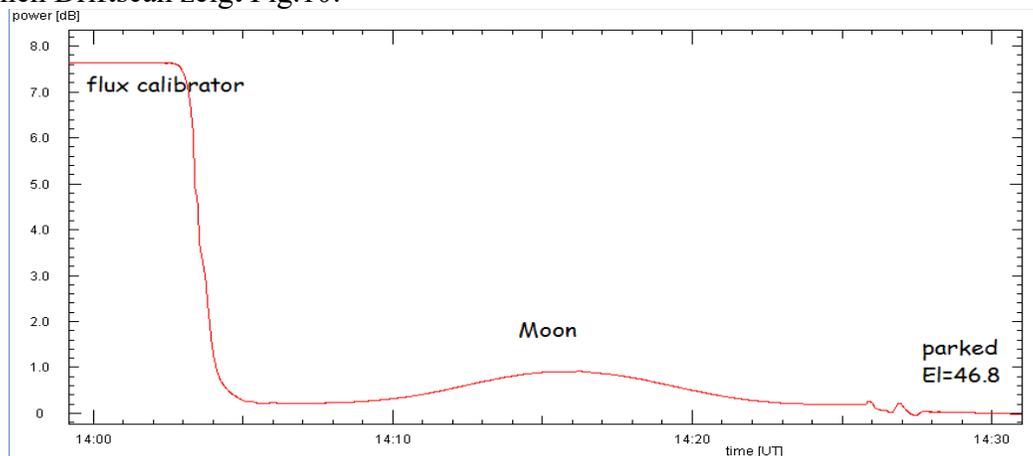
Die Mondoberfläche wird durch die Einstrahlung der Sonne aufgeheizt, und emittiert thermische Strahlung im Infraroten und im Radiobereich. Wie bereits 1949 (Piddington und Minnitt) nachgewiesen, besteht eine Abhängigkeit des Radioflusses von der Mondphase. Die höchste über die Mondscheibe gemittelte Temperatur findet man allerdings nicht bei Vollmond, wie man annehmen könnte, sondern etwa 4 oder 5 Tage später. Diese Zeitverzögerung ließ bereits vor den Mondlandungen erkennen, dass die Mondoberfläche nicht aus soliden Felsgestein besteht, sondern eher von bröseliger Konsistenz ist, wie Staub und kleine Gesteinsbrocken. Wegen des geringen gegenseitigen thermischen Kontakts können sich die unterhalb der Oberflächen liegenden Schichten nur langsam aufheizen. Dieser Temperaturgang kann übrigens bereits mit einer handelsüblichen Fernsehsatellitenanlage nachgewiesen werden (Monstein, 2001).

## Beobachtung

Ganz ähnlich wie bei der Sonne, geht man so vor:

- Aufzeichnung starten
- Himmelsprofil und Flusskalibrierung von angemessener Dauer (oder nach dem Monddurchgang – aber: wenn die Stufen des Himmelsprofils (Fig. 6) nicht horizontal und eben sind, oder sonst Verdacht besteht, dass das Rauschniveau schwankt, Himmel und Kalibrator vor und nach Monddurchgang messen...)
- Mond und +XX min geeignet auswählen. Mit Goto auf diese Position gehen. Sicherheitshalber nachschauen ob die Nachführung (track) aus ist...
- Den gesamten Durchgang beobachten. Auf jeden Fall warte man ab, bis sich das Signalniveau des leeren Himmels wieder einstellt und auch konstant bleibt!
- Vorher und nachher findet sich auch ein Stück konstanten Niveau vom Himmelsvordergrunds. Es empfiehlt sich, das konstante Signal noch einige Minuten länger zu messen.

Einen solchen Driftscan zeigt Fig.10:



**Fig.10:** Driftscan des Mondes, 4 Tage nach Neumond. Vorausgehend die Flusskalibrierung, nachfolgend der leere Himmel auf Parkposition. Direkt vor und nach dem Durchgang des Mondes ist der Himmelsvordergrund messbar.

## Auswertung

Die Datenreduktion und -analyse erfolgt genau wie bei der Sonne. Lediglich könnte man sich die Mühe sparen, die Halbwertsbreite der Antenne zu bestimmen ... aber da die Daten des 1 GHz Instruments außerordentlich gut und stabil sind, lohnt es sich durchaus nachzuprüfen, ob man mit den Mondaten auf den gleichen Wert für die HPBW kommt!

Da das Mondsignal sich nur um einen kleinen Betrag vom Himmelsvordergrund abhebt, ist eine genaue Messung des Vordergrunds für eine zuverlässige Subtraktion desselben wichtig. Wenn der gemessene Vordergrund deutlich abweicht von dem Wert, den man aus den Messungen des Himmelsprofils erwarten würde, könnte das auf eine andere Wetterlage oder eine Veränderung im System zurückzuführen sein? Wie könnte man darüber entscheiden?

## Weiterführende Fragen

### 1. Wenn der gemessene Himmelsuntergrund vom vorhergesagten abweicht ...

Obwohl die Beobachtungsbedingungen bei 1 GHz weitgehend wetterunabhängig sind, kann es durchaus vorkommen, dass der gemessene Pegel des leeren Himmels sich von dem aus dem Fit des Himmelsprofils berechneten unterscheidet. Man sollte sich nicht blind darauf verlassen, dass der Fit für alle Zeiten gültig ist. Abhängig von der geforderten Genauigkeit kann eine zeitliche Änderung der Wetterlage oder der Dichte der Wolken durchaus merkbare Folgen haben. Daher sollte man immer diese beiden Werte kontrollieren.

Um auch gegen möglicherweise auftretenden Problemen gewappnet zu sein, ist es empfehlenswert, nach einem Driftscan nicht bloß den leeren Himmel bei der Elevation der Radioquelle zu messen, sondern auch bei einer etwas anderen Elevation (5 oder 10° tiefer oder höher). In dieser Weise kann man im Bedarfsfall das Himmelsprofil zum Zeitpunkt der Beobachtung überprüfen und teilweise rekonstruieren, ohne eine vollständige Neumessung zu machen. Denn: stellt man erst später bei der Auswertung fest, dass es ein Problem mit dem Himmelsuntergrund gibt, ist eine fehlende Messung nicht mehr möglich, und es bliebe nur noch eine vollständige Wiederholung!

Liegen Flusskalibration, Messungen der Radioquelle und des leeren Himmels bei Elevation  $\epsilon_1$ , und Himmel bei einer weiteren Elevation  $\epsilon_2$  vor, so kann man aus den drei Gleichungen

$$p_{\text{cal}} = a (T_{\text{sys}} + T_{\text{cal}})$$

$$p_{\text{sky1}} = a (T_{\text{sys}} + T_{\text{CMB}} + T_{\text{zen}}/\sin(\epsilon_1))$$

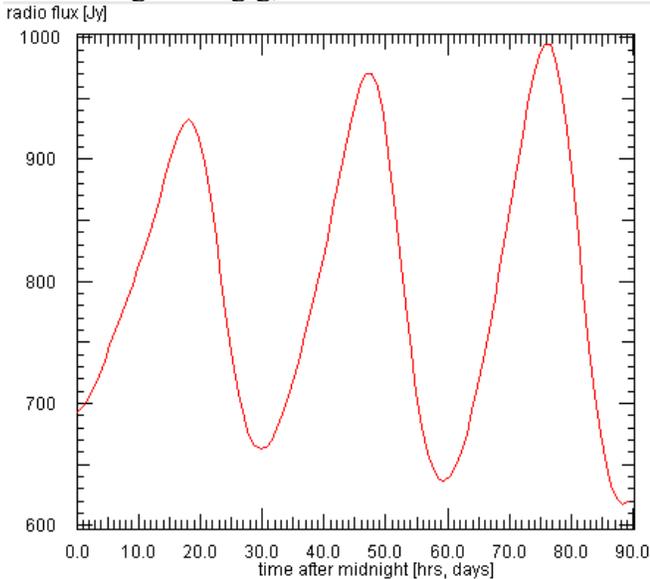
$$p_{\text{sky2}} = a (T_{\text{sys}} + T_{\text{CMB}} + T_{\text{zen}}/\sin(\epsilon_2))$$

alle drei Unbekannten:  $a$ ,  $T_{\text{sys}}$  und  $T_{\text{zen}}$  eindeutig bestimmen. Anschließend ergibt sich die Antennentemperatur der Radioquelle aus:

$$p_{\text{quelle}} = a (T_{\text{sys}} + T_{\text{CMB}} + T_{\text{zen}}/\sin(\epsilon_1) + T_{\text{quelle}})$$

## 2. Monatliche Variation des Radiofluss

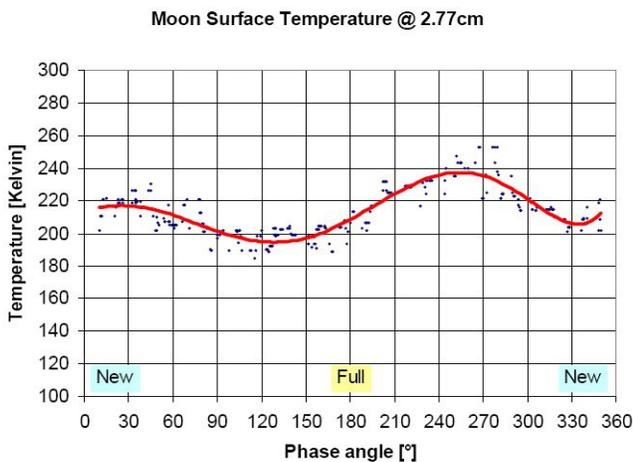
Wie bei der Sonne kann aus den Ergebnissen der Radiofluss des Mondes berechnet werden. Da der Mond zu klein ist, um die Antennenkeule auszufüllen, ist die Signalstärke vom Fluss und damit von der Entfernung abhängig, die im Laufe eines Monats sich verändert:



**Fig.11:** Der vorausgesagte Radiofluss für die ersten 90 Tage des Jahres 2015. Da die Antennenkeule des 1 GHz Teleskops größer als der Monddurchmesser ist, wird im wesentlichen der Fluss gemessen, der sich mit der Entfernung verändert.

Das script <https://portia.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/SunMoon.html> berechnet den Radiofluss des Mondes auf 1420 MHz mit demselben Modell wie obige Vorhersage...

## 3. Monatliche Variation der Oberflächentemperatur



**Fig.12:** Die über die Mondscheibe gemittelte Temperatur ändert sich mit der Mondphase. Hier Ergebnisse von Messungen mit einer TV-Satellitenanlage auf 10 GHz (Monstein, 2001).

Man kann auch den Fit von Piddington und Minnitt (1949) verwenden:

$$T_{\text{mond}} = 239 \text{ K} + 40.3 \text{ K} * \cos(\text{Mondphase} + 225^\circ)$$

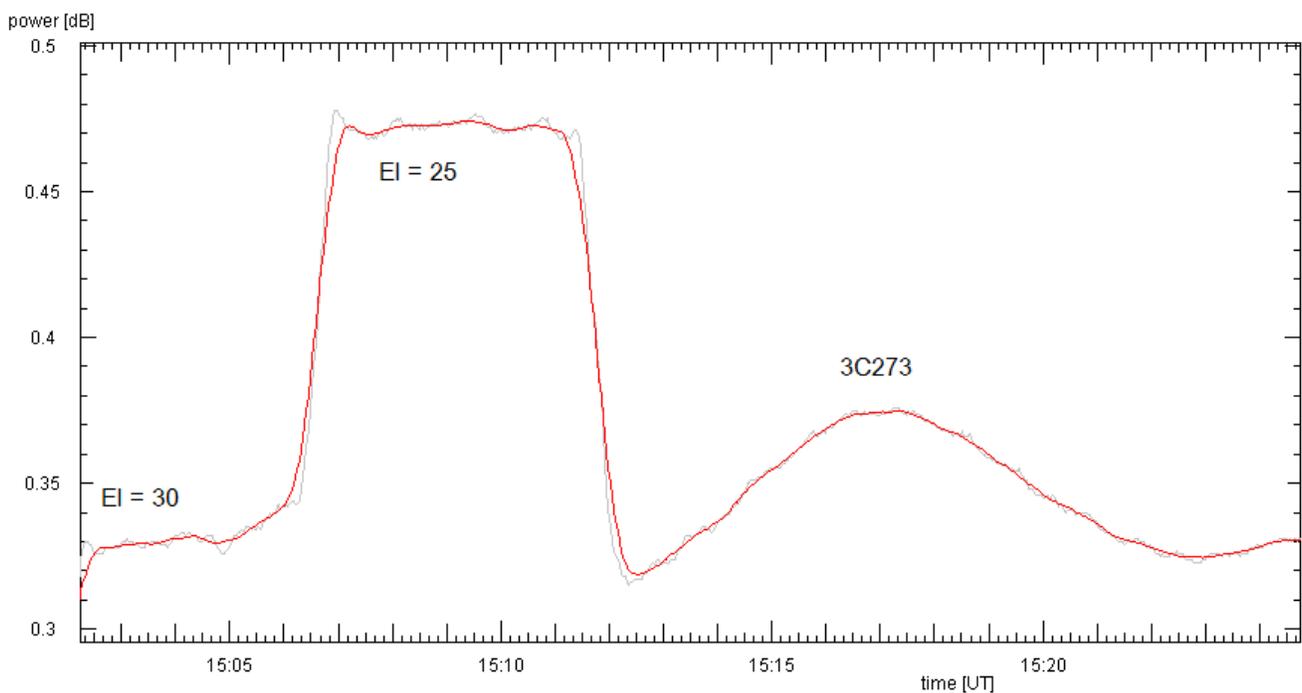
Vielleicht kann man sich untereinander so absprechen, dass Beobachtungen zu unterschiedlichen Mondphasen erfolgen können ...

## Radioflüsse anderer Himmelsquellen

### Grundlagen

Außer dem Mond sind bei 1300 MHz noch einige weitere Radioquellen erreichbar, wie der Supernovaüberrest Cas A, die Radiogalaxien Cyg A und M87, sowie der Quasar 3C273. Diese (oder eines der) Objekte kann mit einem Driftscan beobachtet werden. Alle diese Objekte sind schwache Quellen. Daher ist besonders auf eine sorgfältige Messung und Kontrolle des Himmelsuntergrundes sehr zu empfehlen (siehe Punkt 1 beim Mond). Es handelt sich hierbei um Quellen mit nicht-thermischem Spektrum (Synchrotronemission), woraus eine abgeleitete Temperatur für die Quelle keine physikalische Bedeutung hätte. Es kann aber der Radiofluss der Quelle bestimmt werden und mit Literaturwerten verglichen werden.

Da es außerdem Punktquellen sind, ist aus der erhaltenen Kurve auch die Antennenkeule ermittelbar – aber stimmt sie mit der Sonnenbeobachtung überein?

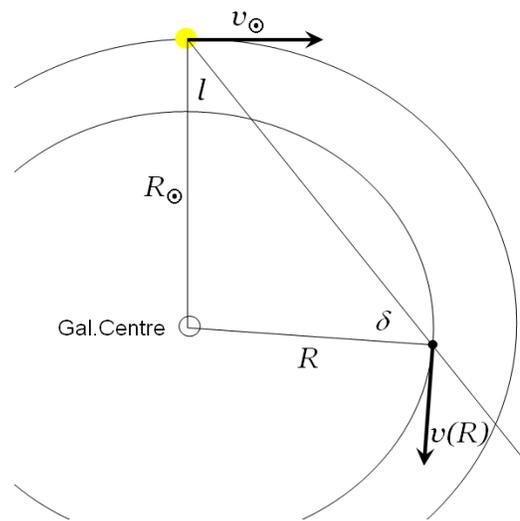


**Fig.13:** Driftscan des Quasars 3C273 zusammen mit vorausgehender Messung des Himmelsuntergrundes bei 30 und 25° Elevation, erhalten mit dem 9m Spiegel auf 1304 MHz.

# Rotationskurve der Milchstraße

## Grundlagen

Das Sonnensystem ist ein kleines Objekt, das an der Rotation der galaktischen Scheibe um das Zentrum teilnimmt. Wir befinden uns in etwa  $R_{\odot} = 8.5$  kpc Entfernung vom Zentrum, näherungsweise auf einer Kreisbahn mit einer Geschwindigkeit von etwa  $v_{\odot} = 210$  km/s. Da man in der Linie des Hyperfeinübergangs des Wasserstoffatoms auf 1420.405750 MHz – entsprechend einer Wellenlänge von ca. 21 cm – Wolken von neutralem Gas in der gesamten Milchstraße (optisch dünn!) beobachten kann, und aus der Dopplerverschiebung der Linie die Radialgeschwindigkeit messen kann, ist es nicht nur möglich das interstellare neutrale Gas der galaktischen Scheibe zu kartieren sondern auch die Rotation der Scheibe zu vermessen:



**Fig.13:** Geometrie bei der Beobachtung einer Gaswolke in der Galaktischen Scheibe

Beobachtet man in Richtung galaktischer Länge  $l$  so wird nach Fig.13 eine Gaswolke, die im Abstand  $R$  vom Zentrum sich auf einer Kreisbahn mit Geschwindigkeit  $v(R)$  befinden möge. Die von uns messbare Radialgeschwindigkeit ergibt sich dann aus dem Sinussatz als

$$V_{rad} = (v(R) * R_{\odot}/R - v_{\odot}) * \sin l$$

Das gemessene Spektrum ist dann die Überlagerung der Emission aller Wolken entlang des Sehstrahls. Da das interstellare Gas der Scheibe in Spiralarmen konzentriert ist, heben diese sich als stärkere Strukturen heraus.

Für Sichtlinien, die durch das Innere der Sonnenbahn gehen, also  $0^{\circ} < l < 90^{\circ}$  und  $270^{\circ} < l < 360^{\circ}$ , gibt es eine Besonderheit: die messbare Radialgeschwindigkeit hat einen Maximalwert, der durch die Wolken auf dem Schnittpunkt der Sichtlinie mit derjenigen Kreisbahn, für den sie Tangente ist, bestimmt ist. Man überzeuge sich davon anhand der obigen Formel. Eine Visualisierung ermöglicht das Script <https://portia.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/MWGrotation/>.

Damit lässt sich aus der Bestimmung der maximalen Radialgeschwindigkeit  $v_{max}$  bei galaktischer Länge  $l$  die Rotationsgeschwindigkeit für den Abstand  $R = R_{\odot} \sin l$  vom Zentrum ermitteln:

$$v(R) = v_{max} + v_{\odot} * \sin l$$

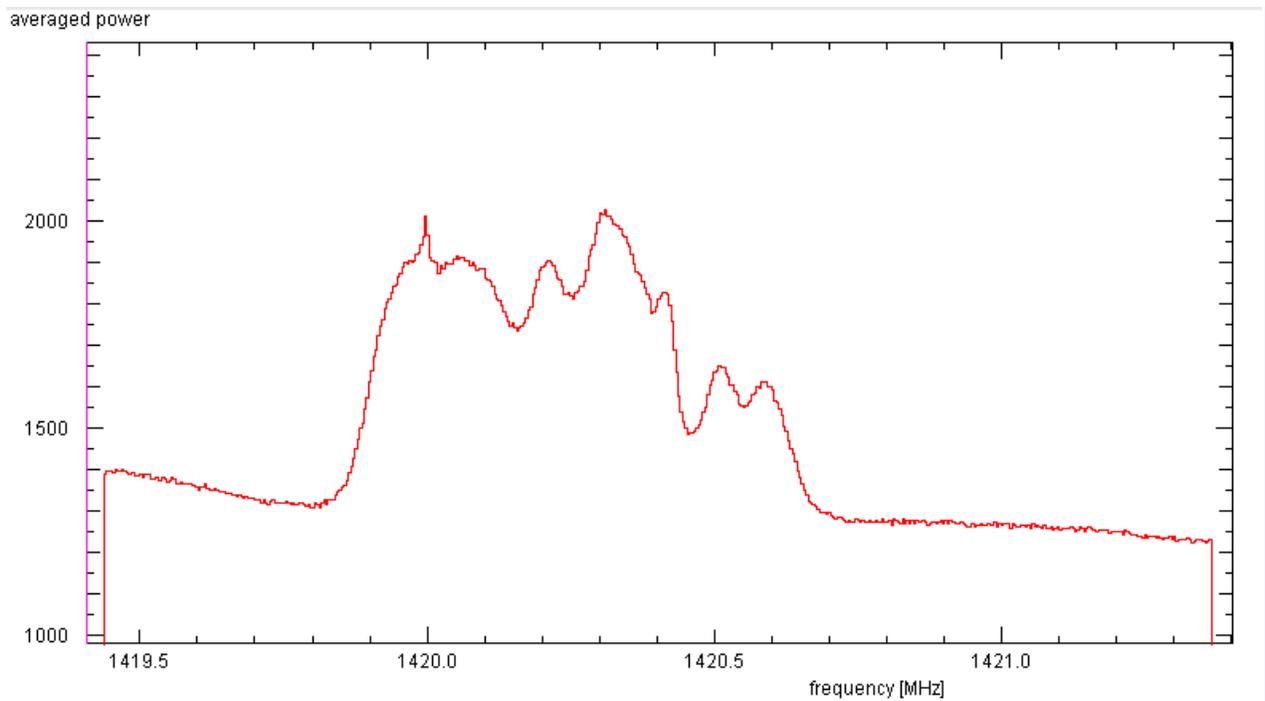
Diese Methode funktioniert nur im ersten und vierten Quadranten, weil auf anderen Sichtlinien die Radialgeschwindigkeit monoton verläuft. Dort muss die Information über die Entfernung eines Objekts auf andere Weise erlangt werden. Für uns auf der Nordhalbkugel der Erde bedeutet dies ferner, dass nur Beobachtungen des ersten Quadranten zur Bestimmung der Rotationskurve der Milchstraße geeignet sind.

## Beobachtung

Mit Hilfe eines der Simulatoren oder dem Planungs-Applet wird der Zeitpunkt der Beobachtungen so ausgesucht, dass die Positionen G20...G90 – also der erste Quadrant über dem Horizont steht. Die Beobachtungen sind dann einfach:

- Wahl der Anzahl der Frequenzpunkte der Spektren (128 sind völlig ausreichend, mehr Punkte bringen feinere Auflösung als es die Strukturen erfordern, sehen schöner aus, aber machen nur mehr Arbeit)
- Frequenz: 1420.405750 MHz
- Record: Einschalten der Registrierung (sollte man nicht vergessen ;-)
- auf der Himmelskarte von RSM eine Position G20...G90 anklicken, so dass die Antenne dort hinfährt, und diese Position automatisch nachführt ('Track' in blauer Schrift)
- jede Position lang genug messen, um ein für die Analyse hinreichend gutes Signal-zu-Rauschverhältnis zu erzielen.
- nach einigen Spektren sieht man dass die rote Spektralkurve (=gemitteltes Spektrum) hinreichend rauschfrei ist, oder dass auf dem Wasserfalldiagramm die Struktur stabil ist:
  - **Kurzauswertung:**
  - klicken auf das linke Ende der Emissionsstruktur, wo sie in den flachen Vordergrund übergeht – oder klicken auf die entsprechende Stelle im Wasserfall
  - ergibt Anzeige der maximalen Radialgeschwindigkeit (korrigiert für Erd- und Sonnenbewegung bezüglich dem Local Standard of Rest (LSR), dem theoretischen Inertialsystem am Ort der Sonne)
  - daraus die Rotationsgeschwindigkeit (wie oben)
- galaktische Längen bis einschliesslich 90
- $l=90$  gibt keine direkte Information, aber ... (siehe Punkt 2 unten).
- Unter  $l=20$  zu messen ist etwas schwierig, da einerseits in Kiel diese Positionen bestenfalls recht niedrig am Himmel stehen, so dass Einstreuung vom Kontinuum des Erdbodens erfolgt. Aber vor allem ist die für die Rotationsgeschwindigkeit maßgebliche HI Emission hoher Radialgeschwindigkeit nur sehr schwach, weil vom innerhalb von etwa 3 kpc nur wenig neutrales Gas zu finden ist (siehe aber auch Punkt 4 unten).

Wie ein über 5 Minuten gemessenes Spektrum (mit 512 bins) aussehen kann, zeigt Fig.14:



**Fig.14:** Das gemittelte Spektrum aus Rohdaten der Milchstraße bei  $l=30^\circ$   $b=0^\circ$ . Die Spitze bei 1420.0 MHz ist ein terrestrisches Störsignal, sehr wahrscheinlich von der Elektronik vor Ort. Zu beiden Seiten der Linienemission der Milchstraße ist der glatte Verlauf des Empfängerrauschens sichtbar, mit einem kleinen Anteil von galaktischem Kontinuum (thermische und Synchrotronemission).

## Auswertung

Die Daten liegen als Textdatei vor, in der jede Zeile ein Spektrum enthält, zusammen mit Zeitpunkt, Position (Azimut und Elevation), Positionsoffsets (hier ohne Bedeutung), der Korrektur VLSR der Radialgeschwindigkeit für den LSR, Anzahl der Frequenzpunkte, der Frequenz des ersten Punkts (in MHz), die Schrittweite (in MHz), gefolgt von den Messwerten aller Punkte des Spektrums. Kommentarzeilen beginnen mit einem Sternchen und geben Auskunft über die Kommandos des Benutzers, wie die Quelle, die als nächstes angefahren wurde.

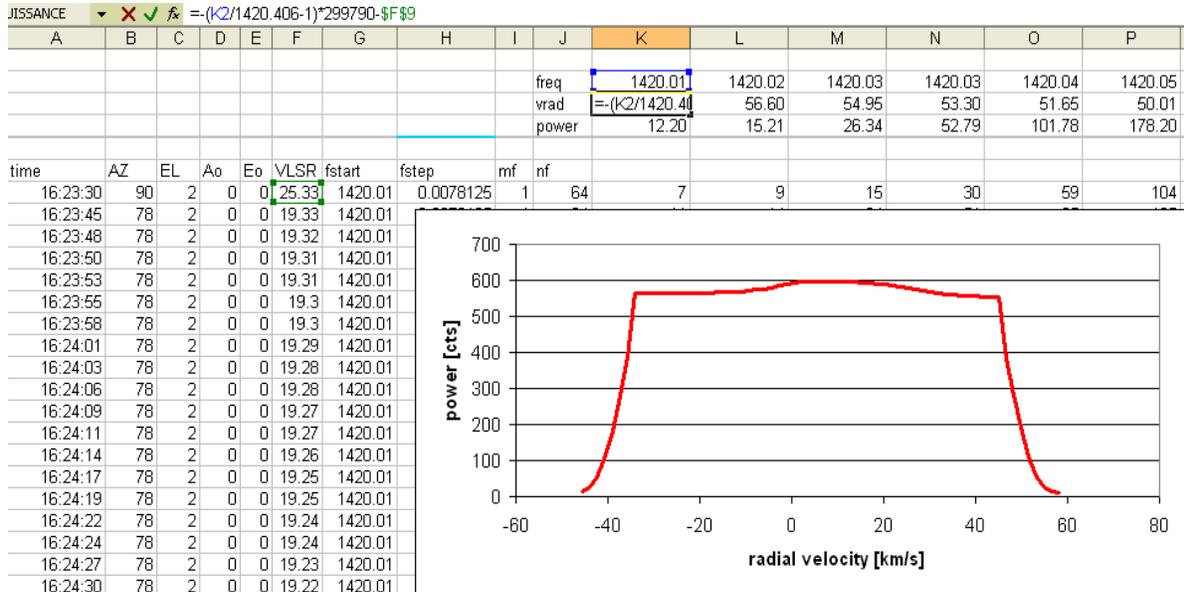
Auch hier ist eine Auswertung mit einem Tabellenkalkulationsprogramm die rationellste Lösung (Fig.15 zeigt ein Beispiel in Excel mit einer Datei in einem etwas anderen Format):

- importieren der Datei
- für alle Positionen vollzieht man diese Operationen:
  - Identifikation der Datenstücke die zu dieser Position gehören
  - man ignoriere die Daten während des Fahrens der Antenne auf Position
  - für jede Frequenz: Mittelwerte über alle diese Spektren und Abspeichern in eine vorbereitete

Zeile

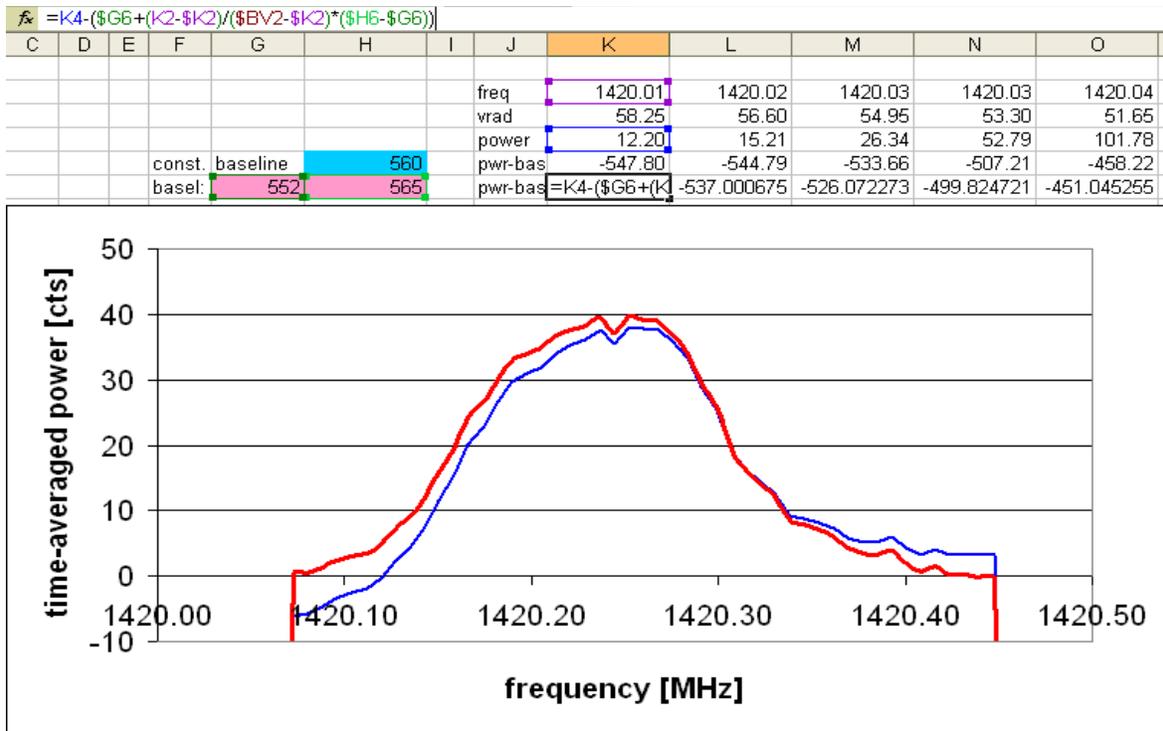
- Umrechnen der Frequenzen in Radialgeschwindigkeit, mit der Korrektur auf den LSR  

$$v_{\text{rad}} = -V_{\text{LSR}} - (f/1420.405750\text{MHz} - 1) \cdot 299792.5 \text{ km/s}$$
- zur Übersicht einen x-y Plot des gemittelten Spektrums erzeugen:



**Fig.15:** Beispiel einer Datenreduktion mit Excel: Erzeugung eines Plots des gemittelten Signals als Funktion der Radialgeschwindigkeit

Weil wir uns ausschließlich für die HI Linienemission, in der Mitte des Spektrums, interessieren, stellen die 'leeren' Teile links und rechts der galaktischen Komponenten nur Untergrundrauschen dar. Dieses ist die Summe aus dem Rauschen von Empfänger, Erdatmosphäre, kosmischer Hintergrundstrahlung sowie Kontinuumsemission der Milchstraße, die alle über den schmalen betrachteten Frequenzbereich eine konstante Intensität haben. Um die galaktische Linienemission davon zu trennen, approximiert man diesen Untergrund ('Baseline' genannt) durch eine geeignete frequenzabhängige Funktion. Die Differenz aus gemitteltem Rohspektrum und der Baseline ist das Spektrum der Linienemission. Fig.16 zeigt den Ansatz für eine konstante (blaue Kurve) und eine lineare Baseline (rot). Die lineare Baseline wird durch die an zwei Ankerpunkten gegebenen Messwerte definiert. In einem Plot des von der Baseline subtrahierten Spektrums erlaubt dann die manuelle Anpassung der beiden Parameter, bis die linken und rechten Enden auf nahe Null kommen. Entsprechend kann man mit anderen Baselinetypen umgehen. Zweckmäßigerweise nimmt man ein Polynom möglichst niedrigen Grades, mit dem der Untergrund links und rechts des interessierenden Bereichs möglichst 'flach' auf Null gedrückt werden kann (Fig.17)



**Fig.16:** Beispiel der Anpassung einer linearen Baseline: durch geeignete Wahl der Ordinaten an den zwei Stützpunkten in der Nähe der Spektrumsenden kann die emissionsfreien Bereiche des reduzierten Spektrums (rot) auf Null gebracht werden. Wegen des geringen Frequenzbereichs dieses Datensatzes lassen sich nur die Randpunkte auf Null bringen. Die blaue Kurve wird mit einer konstanten Baseline erhalten, die lediglich den Untergrund in der Mitte des Spektrums auf Null reduziert.

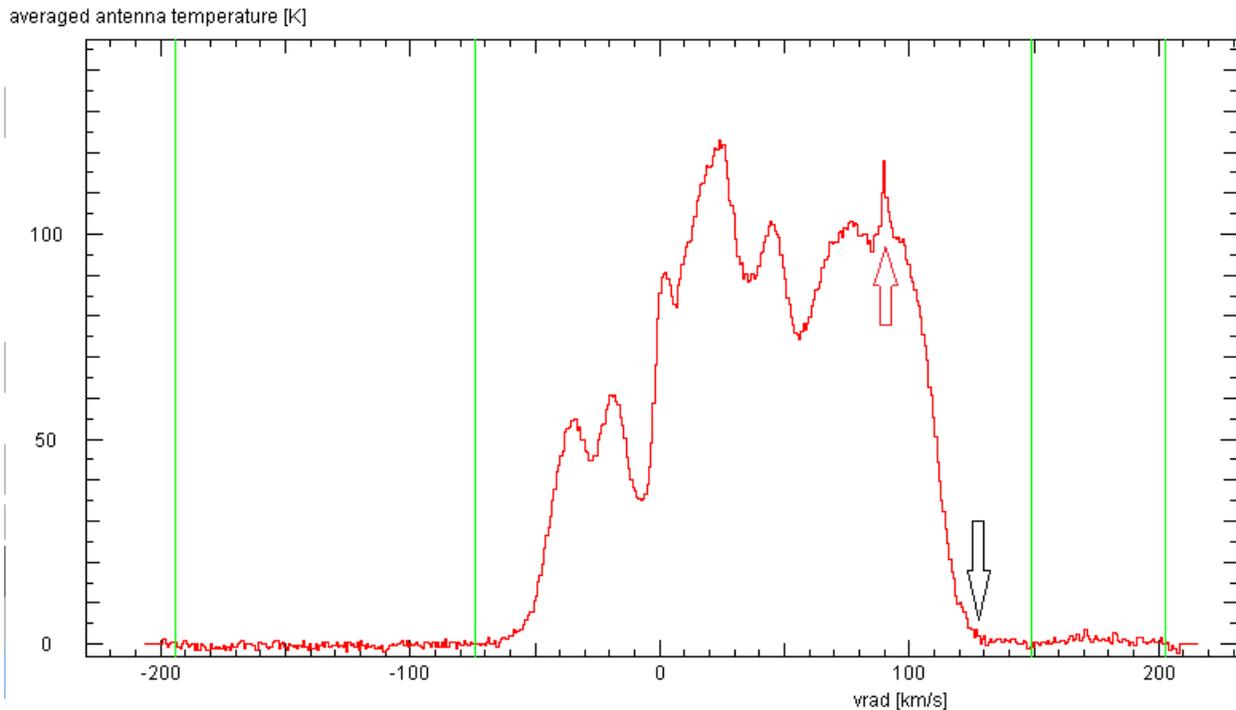
Bei jedem dieser reduzierten Spektren der einzelnen Positionen lässt sich nun in einheitlicher Weise die maximale Radialgeschwindigkeit bestimmen, und daraus die Rotationsgeschwindigkeit in entsprechender Entfernung vom Milchstraßenzentrum. d.h. die Rotationskurve.

Welches Kriterium soll man für die maximale Radialgeschwindigkeit nehmen? Egal für welches man sich entscheidet, man sollte es dann bei allen Position in derselben Weise anwenden. Eine Überprüfung des gewählten Verfahrens ist bei  $l=90^\circ$  möglich (siehe Punkt 2 unten). Die Genauigkeit sollte man aber auch nicht übertreiben, denn wie die Daten zeigen, haben die im Spektrum erkennbaren Strukturen der Wolkenkomplexe und Spiralarme Breiten von mehreren km/s Geschwindigkeitsdispersion.

Man kann noch einen Schritt weiter gehen, und das Spektrum in Antennentemperatur eichen: Die Baseline ist die Summe aus dem Rauschen von Empfänger, Erdatmosphäre, kosmische Hintergrundstrahlung – deren Temperaturen wir kennen – sowie einem unbekanntem Anteil von Kontinuums-emission der Milchstraße. Da das Empfängerrauschen oft den größten Anteil bildet, kann man näherungsweise die Antennentemperatur der Baseline mit der Systemtemperatur gleichsetzen. Daher ergibt sich für die gesamte Datenreduktion bei jeder Frequenz

$$T_{\text{ant}}(f) = (p(f) - p_{\text{Baseline}}(f)) * T_{\text{sys}} / p_{\text{Baseline}}(f)$$

mit dem unreduzierten Messwert  $p(f)$ , den Wert der Baseline  $p_{\text{Baseline}}(f)$  und  $T_{\text{sys}}$ . Da bei Spektroskopie ein anderer Empfangszweig benutzt wird, ist die Systemtemperatur nicht dieselbe. Ein Schätzwert aus älteren Messungen ist 100 K. Man kann auch eine Flusskalibration durchführen, siehe Punkt 6 unten). Somit erhält man ein vollständig reduziertes und kalibriertes Spektrum (Fig. 18):



**Fig.17:** Das reduzierte Spektrum der HI Emission der Milchstraße bei  $l=30^\circ$   $b=0^\circ$ . Die Abszisse ist in Radialgeschwindigkeit relativ zum Local Standard of Rest. Die Ordinate ist eine provisorische Kalibrierung in Antennentemperatur, basierend auf einer angenommenen Systemtemperatur von 50 K. Die grünen Linien markieren die Stützpunkte zur Berechnung einer kubischen Baseline zum Abziehen des Hintergrunds. Der rote Pfeil zeigt das Störsignal bei 1420.0 MHz, der schwarze Pfeil deutet auf das Maximum der Radialgeschwindigkeit.

## Fehlerbetrachtung ...

## Weiterführende Projekte

### 1. Annahme: Kreisbahnen

Wie gut ist die Annahme von Kreisbahnen bei der Interpretation der Daten? Dies kann durch Beobachtung in Richtung  $l=180^\circ$  direkt überprüft werden: da dort alle auf Kreisbahnen befindlichen Gaswolken von der Sonne aus gesehen keine radiale Komponente der Geschwindigkeit haben, sollte man eine Radialgeschwindigkeit = 0 km/s messen, unabhängig von der Entfernung. In der Tat

beobachtet man eine schmale Linie, deren Breite durch die zufällig verteilten Eigenbewegungen, d.h. der Abweichungen von der Kreisbahngeschwindigkeit bestimmt ist. Man messe die Linienbreite und bestimme die Geschwindigkeitsdispersion, die eine obere Grenze für Abweichungen von der Kreisbahn darstellt.

## 2. Rotationsgeschwindigkeit bei $l=90^\circ$ :

Wie bestimmt man die maximale Radialgeschwindigkeit? Wenn wir diese – wie oben angedeutet – durch den Frequenzpunkt ermitteln, bei der sich die Emissionsstruktur vom Hintergrundrauschen abhebt, kann es zu einer systematischen Überschätzung kommen. Dies wird beim Spektrum bei  $l=90^\circ$  ersichtlich: aus der verwendeten Formel erhält man

$$v(R = R_0) = v_{max} + v_\odot * \sin 90^\circ = v_{max} + v_\odot$$

was nach Definition der Rotationsgeschwindigkeit am Ort der Sonne gleichbedeutend sein sollte mit dem angenommenen Wert

$$v(R_0) = v_\odot$$

Das heißt, dass man diejenige Stelle im Spektrum verwenden sollte, die bei  $l=90^\circ$  einer Radialgeschwindigkeit von 0 km/s entspricht. Wie sollte man vorgehen?

## 3. Vergleich mit einem Massenmodell der Milchstraße

Die erhaltene Rotationskurve kann mit den Erwartungen verglichen werden, die sich aus einem (hier: vereinfachten) Modell der Massenverteilung in der Milchstraße ergeben: Die Geschwindigkeit für eine Kreisbahn mit Radius  $R$  berechnet sich aus der Gesamtmasse  $M(R)$ , die in einer Kugel mit diesem Radius enthalten ist

$$v(R) = \sqrt{R * g(R)} = \sqrt{G * M(R) / R}$$

mit der Gravitationskonstanten  $G = 6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ .

Die sichtbare Masse der Milchstraße liegt im Bulge als alte Sterne und in der Scheibe als Sterne verschiedenen Alters und interstellarem Gas, sowie alte Sterne und Kugelsternhaufen im Halo vor. Den Bulge kann man durch die (Raum-)Dichteverteilung einer Plummerkugel wiedergeben:

$$\rho(r) = 3 M / (4\pi a^3) * (1 + (r/a)^2)^{-5/2}$$

mit einer Masse von  $1.3 \cdot 10^{10} M_\odot$  und dem Parameter  $a = 0.4 \text{ kpc}$ .

Der sichtbare sphärische Halo (Feldsterne und Kugelsternhaufen) ist stark auf das Zentrum konzentriert:

$$\rho(r) \sim (a + r)^{-3.1}$$

mit einer Gesamtmasse  $M = 4 \cdot 10^9 M_\odot$  innerhalb von ca. 50 kpc vom Zentrum und  $a = 0.5 \text{ kpc}$ , und ist nur von geringer Bedeutung.

Die Scheibe lässt sich grob durch eine Exponentialverteilung der Flächendichte darstellen:

$$\Sigma(r) = M / (2\pi a^2) * \exp(-r/a)$$

mit einer Masse von  $10^{11} M_{\odot}$  und der radialen Skalenlänge  $a = 4$  kpc.

Für die Masse innerhalb einer Kugel mit Radius R werden die Dichteverteilungen numerisch integriert. Auch dies lässt sich in einer Tabellenkalkulation durchführen, durch eine einfache Riemannsumme mit einer hinreichend klein gewählten Schrittweite  $\Delta r$

$$M(R) = \sum (4\pi r^2 \rho(r) + 2\pi r \Sigma(r) + \dots)\Delta r$$

wobei die Summe von  $r = 0$  bis  $r = R$  geht. Der erste Term ist die Summierung für die Raumdichte bei Bulge und Halo, der zweite über die Flächendichte bei der Scheibe.

Es wird sich – wie bei allen Scheibengalaxien – herausstellen, dass die gemessene Rotationskurve durch die sichtbare Masse nicht erklärbar ist. Dies führt zum Postulat der Gegenwart eines sphärischen Verteilung von 'Dunkler Materie'. Diesen dunklen Halo kann man wie den Bulge mit einer Plummerkugel ansetzen.

Wieviel Masse M und welcher Parameter a sind für eine befriedigende Wiedergabe der gemessenen Rotationskurve nötig? Wie groß sind die Bereiche, in denen diese beiden Parameter variieren dürfen?

#### Hinweise:

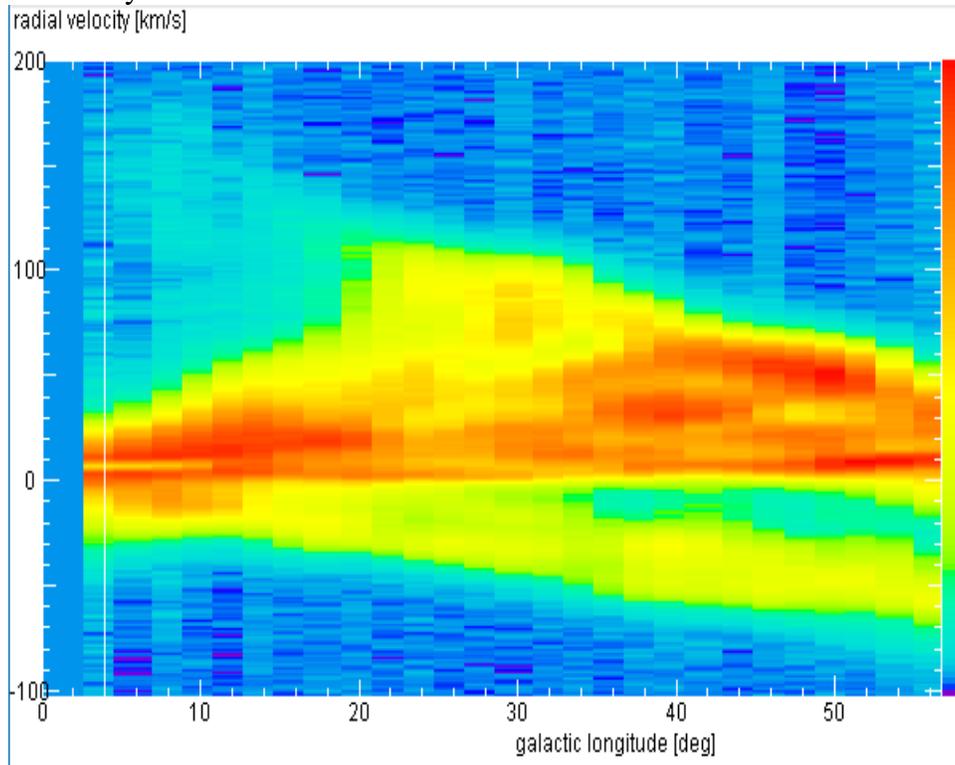
- Bei der Modellierung der Rotationskurve sollte man annehmen, dass außerhalb der Sonnenbahn ( $r > R_{\odot}$ ) die Rotationsgeschwindigkeit konstant ist, wie es von anderen Beobachtungen bekannt ist. Was passiert, wenn die Geschwindigkeit bis 20 kpc perfekt konstant wäre?
- Es ist bekannt, dass in Spiralgalaxien der Halo dunkler Materie deutlich größer als die Galaxie selber ist, so dass man zur Bestimmung der Gesamtmassen das Volumen bis zu einem Radius von etwa 50 kpc betrachten sollte. Der Anteil an dunkler Materie innerhalb der Sonnenbahn ist recht unbedeutend.

Da bisher noch kein experimenteller Nachweis der Existenz von Elementarteilchen gelungen ist, die mit anderer Materie nur durch Gravitation wechselwirken, können andere Erklärungen nicht ausgeschlossen werden, wie Abweichungen der Gravitation von Newton's Formulierung ... (vgl. <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/Haystack/docs/GalacticRotation.pdf>)

#### 4. Rotationskurve nahe des Galaktischen Zentrums:

Die Gasscheibe unserer Milchstraße hat im Zentrum ein Loch, d.h. bis zu einem Radius von etwa 3 kpc ist die Dichte neutralen Wasserstoffs stark reduziert im Vergleich zur restlichen Scheibe. Dies führt zu einer verminderten Emission bei hohen Radialgeschwindigkeiten bei galaktischen Längen unter etwa  $25^{\circ}$ . Diese schwache Emission ist beim durch das Instrument vorgegebenen Signal/Rauschverhältnis nur mit längeren Integrationszeiten messbar. Außerdem kommt von Kiel aus gesehen der innerste Teil der Milchstraße nur knapp über den Horizont, so dass vermehrte Einstrahlung des Bodenrauschen zum Problem wird. Es ist noch nicht klar, ob es mit dem 9m Spiegel möglich ist, diese Emission zu messen und mit welcher Genauigkeit. Es wäre daher den Versuch wert, die inneren  $20^{\circ}$  galaktischer Länge zu

beobachten und zu analysieren.



**Fig.18:** Falschfarbenkarte der Spektrum der HI Emission in der Ebene der Milchstraße bis  $l=60^\circ$ . Die spektrale Intensität ist mit der Farbskala rechts kodiert. Die schwache Emission bei hohe Radialgeschwindigkeiten unterhalb von  $l=25^\circ$  stammt von der Region geringer HI Dichte in den inneren 3 kpc vom Zentrum.

## 5. Kartierung der Spiralarme

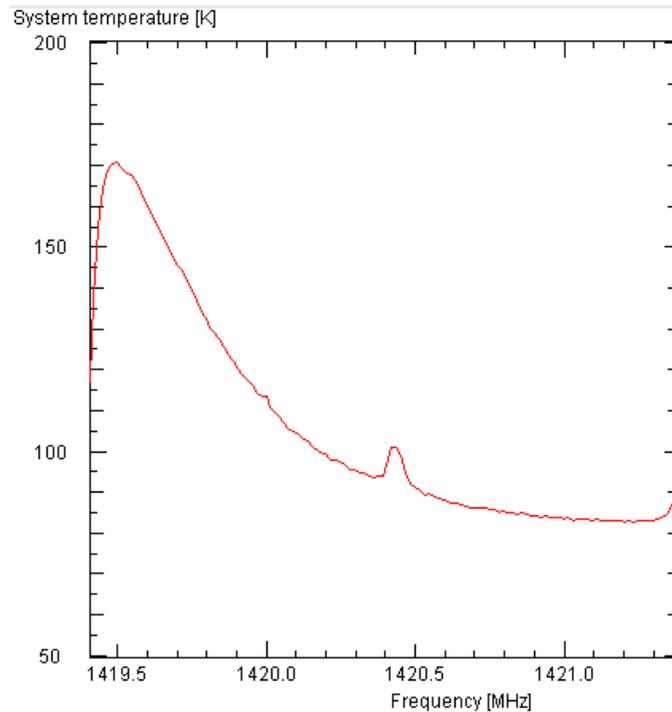
Die Buckel im Spektrum einer Position lassen auch im Spektrum der benachbarten Positionen identifizieren. Wenn man Beobachtungen in der Galaktischen Ebene mit einem Abstand von  $5^\circ$  in Galaktischer Länge macht, und die Daten z.B. als eine Falschfarbenkarte darstellt, ist eine Verfolgung der Spiralarme leicht möglich ...

## 6. Flusskalibration der Spektren:

Genau wie bei der Kalibration der Radiometrie werden hier Spektren vom Kalibrator und von einer oder mehrerer Positionen am leeren Himmel aufgenommen, von jeweils ein paar Minuten Dauer. Die Systemtemperatur erhält man nun als Funktion der Frequenz (Fig. 19) durch Anwendung der analogen Formeln wie bei der Messung des Himmelsvordergrunds, aber auf jeden einzelnen Frequenzpunkt. Unter Vernachlässigung der Emission der Erdatmosphäre ergibt sich näherungsweise:

$$T_{\text{sys}}(f) = (T_{\text{cal}} - (P_{\text{cal}}(f)/P_{\text{sky}}(f))T_{\text{CMB}}) / (P_{\text{cal}}(f)/P_{\text{sky}}(f) - 1)$$

Etwas aufwändiger aber genauer ist es, das oben beschriebene Verfahren zur Bestimmung von System- und Zenittemperatur für jeden Punkt der Spektren anzuwenden, was sich mit etwas Programmierarbeit ausführen lässt.



**Fig.19:** Flusskalibration der Spektren, aus den Spektren von Kalibrator und des leeren Himmels bei Elevation 60°. In der Mitte eine schwache Emission der Milchstrasse.

## 7. Zerlegung der Spektren in Komponenten: Spiralarme

Die reduzierten Spektren können einer genaueren Interpretation unterzogen werden, indem versucht wird, das Spektrum durch eine Summe von Gaussprofilen verschiedener Radialgeschwindigkeit, Höhe und Breite bestmöglich wiederzugeben, und somit das Spektrum in seine Emissionskomponenten – d.h. Spiralarme – zu zerlegen. Die Breite der Komponenten gibt Aufschluss über die Geschwindigkeitsdispersion innerhalb des Arms. Welche Breite braucht man? Kommt man mit einem einheitlichen Wert aus? Wie steht es mit der Eindeutigkeit des Verfahrens?

## 8. Deprojektion der Spiralarme

Hat man eine Karte der HI Emission der Galaktischen Ebene, und nimmt man eine Rotationskurve – im einfachsten Fall: konstante Rotationsgeschwindigkeit – so kann man aus der gemessenen Radialgeschwindigkeit durch Umkehrung der allgemeinen Formel die galaktozentrischen Radius der Emission bestimmen, und somit den Ort in der Scheibe. Wenn man diesem Ort der Einfachheit halber die gemessene Intensität zuordnet, kann man eine Karte der Galaktischen Scheibe erhalten ...

# Literatur

## Radioastronomie Lehrbücher

- *T.L. Wilson, K.Rohlf, S.Hüttemeister*, Tools of Radio Astronomy, Springer (mehrere Auflagen) sehr gutes Lehrbuch, umfasst sehr detailliert alle Aspekte
- *B.F.Burke, F.Graham-Smith*, An Introduction to Radio Astronomy, Cambridge University Press, 1997: gute Einführung und Lehrbuch
- *G.L.Verschuur, K.I.Kellermann*, Galactic and Extragalactic Radio Astronomy, Springer, 1974 (auch ältere Auflagen): obwohl etwas veraltet, gibt es einen guten Überblick über Methoden und Beobachtungsergebnisse
- *J.L.Pawsey, R.N.Bracewell*, Radio Astronomy, Clarendon Press, Oxford, 1955: obzwar veraltet, führt dieses gute Lehrbuch aus der Anfangszeit in die Grundlagen ein.

## Artikel

- *C.Monstein*, Messungen der Mondtemperatur auf 10 GHz  
[http://www.e-callisto.org/GeneralDocuments/Moon\\_Temperatur/Mond2001V2German.pdf](http://www.e-callisto.org/GeneralDocuments/Moon_Temperatur/Mond2001V2German.pdf)  
oder <http://www.pa0ehg.com/extra/moontemp.pdf>
- *J.H.Piddington, H.C.Minnett*, Microwave Thermal Radiation from the Moon, 1949, Australian Journal of Scientific Research A, vol. 2, p.63

## Weblinks

- NOAA Solar Radiofluxes: [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/radio/30day\\_rad.html](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/radio/30day_rad.html)
- Radiometrie auf 10 GHz: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/10GHz/>
- Spektrometrie auf 1420 MHz: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/Haystack/>
- Simulator für RoenneRadiometer:  
<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/RRM/RRM.html>  
mit fast identischer Bedienoberfläche und erzeugt Daten in sehr ähnlicher Qualität wie das Originalinstrument. Der Zeitpunkt der Beobachtung kann beliebig gewählt werden.
- Simulator für Radiometrie auf 10 GHz:  
<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/10GHz/applets/trainer/>
- Simulator für Spektroskopie auf 1420 MHz: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/RSM/RSM.html> mit einer Bedienoberfläche ähnlich wie RoenneSpektrometer. Die simulierten Daten sind ähnlicher Qualität wie das Original. Der Zeitpunkt der Beobachtung kann beliebig verändert werden.
- Beobachtungsplanung: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/Scheduler.html> gibt eine Übersicht wann eine Quelle oder Position sich oberhalb des Horizonts aufhält
- Galaktische Rotation: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/MWGrotation/>
- Spiralarme: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/Haystack/spirals.html>
- Position und Durchmesser von Sonne und Mond: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/SunMoon.html>
- Körper des Sonnensystems: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/orrery/> JAVA Applet berechnet Position, Winkeldurchmesser und andere Eigenschaften.

## Allgemein

- *A. Unsöld, B. Baschek*, Der neue Kosmos, Springer, 7. Aufl., 2002
- *H.H. Voigt*, Abriß der Astronomie, Wiley-VCH, 6. Aufl., 2012; auch ältere Auflagen