

# NEUTRALE WASSERSTOFFLINIE HI BEI DER WELLENLÄNGE VON 21 CM

Schon seit längerer Zeit beobachte ich die Sonne im Radiobereich und stelle die aufgezeichneten Daten der e-CALLISTO-Community (International Network of Solar Radio Spectrometers, a Space Weather Instrument Array) zur Verfügung. Hier hatte ich die ersten Erfahrungen mit Radioastronomie, Antennen und Verstärker gemacht. Mir schien es realistisch mit etwas Geschick bei der Detektierung der neutralen

Wasserstofflinie HI bei der Frequenz 1'420 MHz (21 cm Linie) erste Versuche zu machen.

## BESCHREIBUNG DER HARDWARE UND SOFTWARE

Das Kernstück eines jeden Radioteleskops ist die Antenne. Für mein Vorhaben wählte ich eine Parabolantenne mit einem Durchmesser von 1.9 m, gross

# DIE MILCHSTRASSE IM RADIOBEREICH BEOBACHTEN

Neutrale Wasserstofflinie HI bei der Wellenlänge von 21cm

Von der Pracht der Milchstrasse ist in der Schweiz wegen der Lichtverschmutzung nur wenig zu sehen. Der Autor beobachtet deshalb die Galaxis im Frequenzbereich der Radiostrahlung. Ein altes Milchkesseli dient dem Amateur-Radioastronom als Hardware. Damit schliesst sich der Kreis wieder: Denn einer Sage nach hat sich die Milchstrasse am Firmament gebildet, als die Götter Milch verschüttet hatten.

---

**DER AUTOR** Peter Hirt

*Der gelernte Elektroingenieur begeistert sich seit frühester Kindheit für Astronomie. Heute betreibt Peter Hirt eine eigene Sternwarte, ist Mitglied der Vereine AVA und RWG und Leiter der Fachgruppe Radioastronomie in der SAG.*

genug, um die Radiostrahlung der Milchstrasse zu detektieren, klein genug, um sie noch vernünftig handhaben zu können. Die Antenne besteht aus einem Gerippe von Aluminiumprofilen und einem eng vermaschten Drahtgeflecht, welches eine Radiostrahlung bis zu 10 GHz reflektieren lässt. Ein wichtiges Element des Radioteleskops ist das Antennenhorn im Primärfokus. Es enthält den Dipol. Die Länge des Dipols muss auf die zu empfangende Frequenz abgestimmt sein, in meinem Falle der Radiostrahlung des neutralen Wasserstoff-Atoms bei der Wellenlänge von 21 cm resp. der Frequenz von 1420 MHz. Die Abmessungen des Horns mit dem Dipol sind entscheidend für den Wirkungsgrad der ganzen Anlage. Das Radiosignal ist so schwach, dass der Frontend-Verstärker so nahe wie möglich am Dipol angeordnet sein muss. In meinem Fall wurde der Frontend-Verstärker der Firma NooElec eingesetzt und wird über das Koaxialkabel von einem BiasTee mit Strom versorgt. Generell ist auch wichtig, dass gute Koaxialkabel mit möglichst wenig Dämpfung eingesetzt werden.

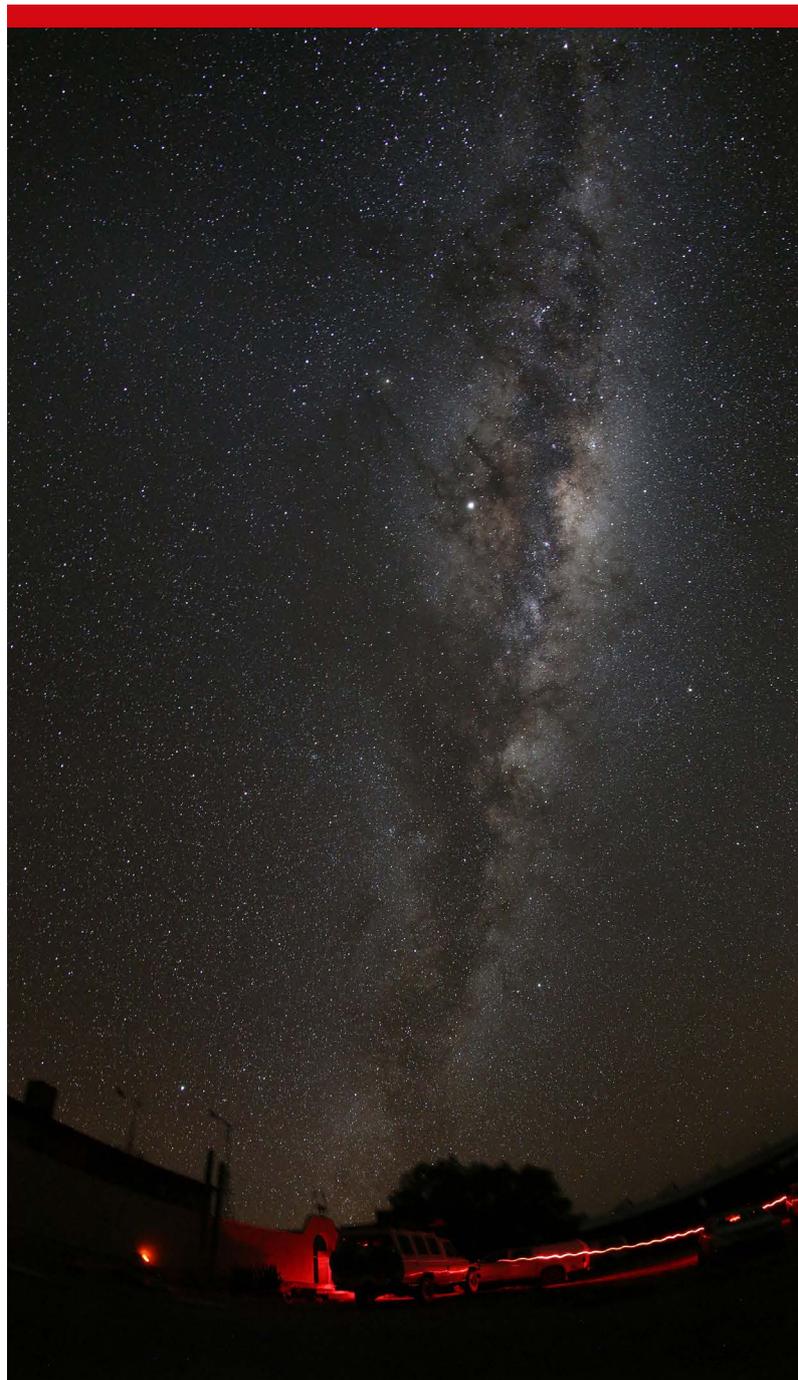
Die Antenne ist auf einer azimutalen Montierung befestigt. Die Montierung (SPID) ist mit Hilfe der Koordinaten von Azimut und Elevation mit einem Computer zu steuern. Die Antenne kann genauer als auf ein Grad gesteuert werden, welches hier in der Radioastronomie völlig ausreicht.

Das Radiospektrometer ist ein herkömmliches SDR (Software Defined Radio). In meinem Fall wurde das SDRplay mit den folgenden Eigenschaften eingesetzt: 1 kHz - 2 GHz, 14 Bit SDR Receiver und mit Radio Spektrum-Prozessor.

Das Radiospektrometer wird durch einen Raspberry Pi 4 Computer gesteuert. Der Raspberry Pi 4 ist ein Kleinstrechner mit viel Rechenleistung. Dieser kleine Rechner wird heutzutage für viele Steuerungsaufgaben verwendet, weil er es erlaubt, auf einfache Art und Weise diverse Hardware anzusteuern. Auf dem Raspberry Pi 4 läuft das Betriebssystem Debian, eine Distribution von Linux. Für dieses Betriebssystem wurde eine Spektrometer-Software durch die Community Astropeiler Stockert (Radioteleskop mit Parabolantenne von 25 Meter auf dem Stockert) entwickelt und wird auch in meinem Fall eingesetzt. Im Weiteren kann ich auch auf professionelle Radioastronomie-Software wie z.B. CLASS (Continuum and Line Analysis Single-Dish Software, IRAM (Institut de radioastronomie millimétrique)) auf dem Rechner laufen lassen. Diese Software ist sehr hilfreich zum Normieren der Radiospektren. Der Raspberry Pi 4 kann auch über ein Netzwerk gesteuert werden, so dass auch von der Windows-Welt das Radioteleskop, also die

Montierung sowie das Spektrometer, bedient werden kann.

Je nach Aufgabenstellung muss man auch Software selber entwickeln. Auf dem Raspberry sind Software-Entwicklungswerkzeuge erhältlich, vornehmlich verwende ich die Programmiersprache Python sowie Lazarus Pascal für komplexere Programme. So habe



**Bild: Milchstrasse über den Hakosbergen in Namibia (Mai 2019). Anders als in Namibia ist in der Schweiz von der Pracht der Milchstrasse nur wenig zu sehen.**

**Bild: Peter Hirt**

ich ein Programm entwickelt, mit welchem Script-Dateien automatisch erstellt werden, welche dann die Montierung und das Radiospektrometer steuern. So ist es nun möglich den Radiohimmel automatisch zu scannen, wobei sich das Radioteleskop wie von Geisterhand geführt über den Himmel bewegt. Solche Scans können mehrere Stunden lang dauern.

### GEOMETRIE IN DER MILCHSTRASSE

In den letzten Jahren hat die Wissenschaft das Bild der Milchstrasse stark verändert. Wie man heute weiss ist die Milchstrasse eine Balkenspirale mit zwei Hauptarmen und einigen Nebenarmen, so wie die folgende Abbildung zeigt. Die Sonne befindet sich dabei im Orion-Arm.

Da sich die Gasmassen in der Milchstrassen-Scheibe differentiell bewegen, sind auch die Radialgeschwindigkeiten zur Sonne verschieden. Mit Hilfe des Dopplereffektes kann die Radialgeschwindigkeit anhand von Linienverschiebungen bestimmt werden. In der Radioastronomie ist die HI-Linie des neutralen Wasserstoffatoms bei der Frequenz von 1420MHz (21 cm) sehr wichtig.

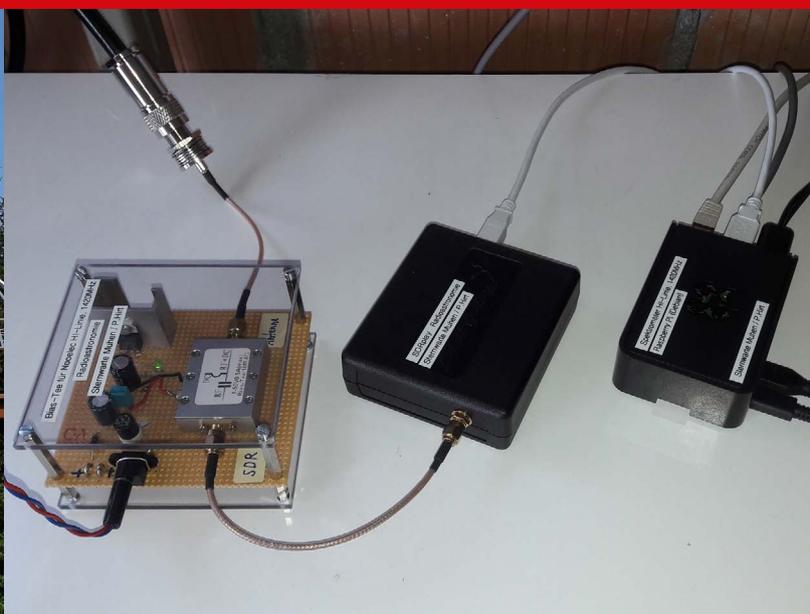
Die Grafik auf Seite 25 veranschaulicht, wie man sich die verschiedenen Radialgeschwindigkeiten bei der Durchsicht durch verschiedene Spiralarme in der galaktischen Ebene vorstellen kann. Der Beobachter (Observer) schaut in der Milchstrasse nach innen. Dabei sind in diesem Beispiel 3 Gasmassen in verschiedenen Spiralarmen eingezeichnet, welche sich vom Beobachter entfernen, weil die Gasmassen näher am galaktischen Zentrum sind und demzufolge eine grössere Umlaufgeschwindigkeit haben als der Beobachter. Dabei hat die Gasmasse mit dem schwarzen Pfeil die grösste Radialgeschwindigkeit. Die Gaskomponente mit dem grünen Pfeil weist eine kleinere Radialgeschwindigkeit auf und die Gasmasse mit dem roten Pfeil hat die kleinste Radialgeschwindigkeit.

Die drei Gasmassen bestehen aus neutralen Wasserstoffatomen. Die resultierende gemessene Radiostrahlung ist dann eine Überlagerung der einzelnen Radiostrahlung der einzelnen Gasmassen. Im unteren Teil der Grafik sieht man für alle drei Gasmassen die Profile der HI-Linien (schwarz, grün, rot). Ein Radioteleskop bei der Messung der HI-Linie bei 1420 MHz registriert dann die Radiostrahlung der blauen Kurve.



**Bild: Parabolantenne (D1m9) mit einem Durchmesser von 1.9 Meter und mit einem Horn – einem ausgedienten Milchkesseli – abgestimmt auf die Frequenz des neutralen Wasserstoffs bei 1420 MHz. Direkt am Horn ist auch der Frontend-Verstärker (Nooelec SAWbird) montiert. Damit möglichst wenig Störungen eingekoppelt werden, ist es wichtig dieser Frontend-Verstärker so nahe wie möglich am Dipol anzuordnen.**

Bild: Peter Hirt



**Bild: Elektronik: Das linke Gerät (BiasTee) wird gebraucht, um den Frontend-Verstärker mit Spannung zu versorgen. Das mittlere Gerät ist das eigentliche Spektrometer (SDRplay (Software Defined Radio)) und das rechte Gerät ist der Computer, hier ein Raspberry Pi 4 mit dem Betriebssystem Debian, der Spektrometer-Software, Auswerte-Software sowie der Software mit welcher die Parabolantenne gesteuert werden kann. Der Raspberry Pi 4 kann mit Tastatur und Maus und Bildschirm bedient werden sowie über einen LAN-Anschluss via Remote.**

Bild: Peter Hirt

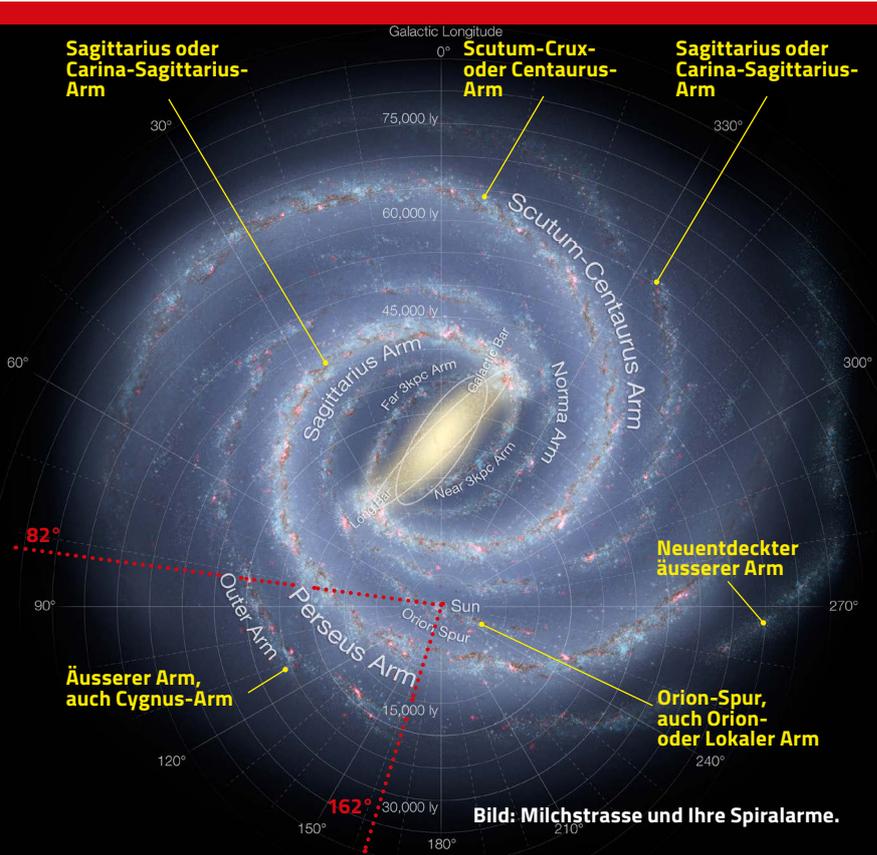
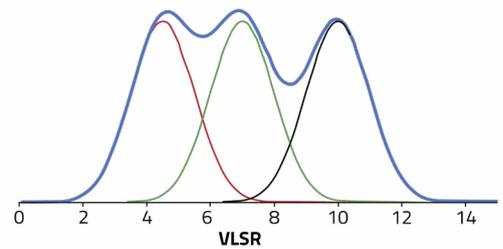
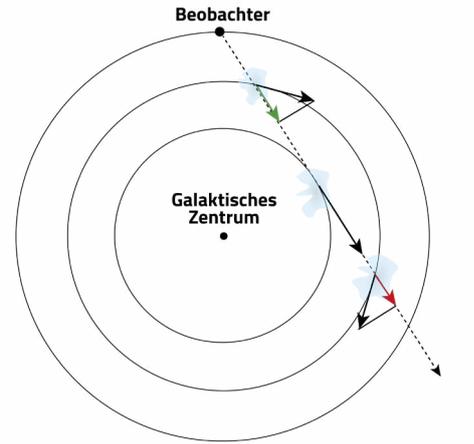


Bild: Milchstrasse und Ihre Spiralarme.



Grafik: Beispiel eines empfangenen Spektrums und der entsprechenden Geometrie der Gasmassen in der Milchstrasse. Die VLSR ist in diesem Beispiel eine fiktive Grösse.

Grafik: Peter Hirt

Die Kunst der Analyse besteht nun darin, die blaue Kurve zu zerlegen und auf die Geometrie der Milchstrasse zu schliessen.

### BOBACHTUNG DER MILCHSTRASSE MIT HILFE EINES TRANSITS

Wird die Parabolantenne auf den Himmel gerichtet, ohne nachgeführt zu werden, dann durchqueren die Radioobjekte die Antennenkeule wegen der Drehung der Erde. Am 8. Dezember 2020 wurde die Antenne auf die Position Azimut  $270^\circ$  und Elevation  $70^\circ$  eingestellt. Während 24 Stunden wurden knapp 300 Radiospektren aufgenommen mit jeweils einer Integrationszeit von 200 Sekunden. Mit Hilfe eines Python-Programmes wurden diese Radiospektren zusammengefasst. Dabei überstreifte die galaktische Ebene zweimal die Empfangskeule der Parabolantenne bei den Positionen mit den Rektaszensionen 4.8 h und 20.1 h (die Deklination war dabei ca.  $43.6^\circ$ ). Die Radiostrahlung des neutralen Wasserstoffs (HI-Line) stieg dann entsprechend an, siehe Abbildung rechts.

Der Radiohimmel kann mit Hilfe des Programmes Radio-Eyes von Jim Sky dargestellt werden. Dabei kann auch das azimuthale Koordinatensystem eingezeichnet werden. Für die Planung von radioastronomischen Messungen hat mir das Programm grossen Nutzen gebracht. Der Transitzpfad ist in der Radiokarte

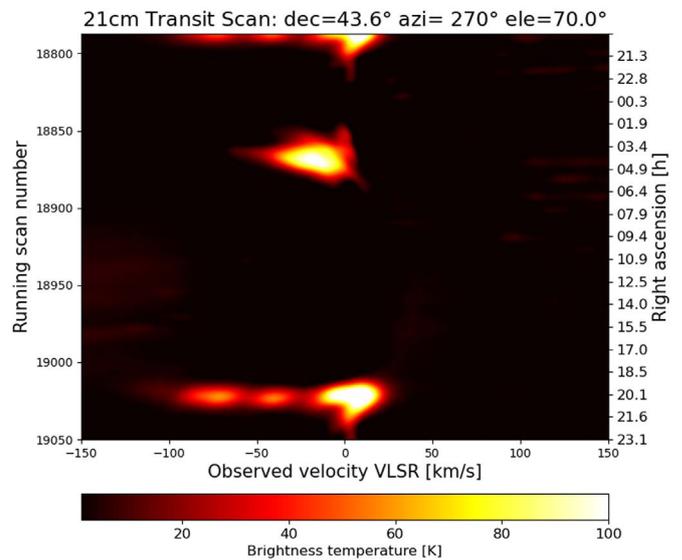
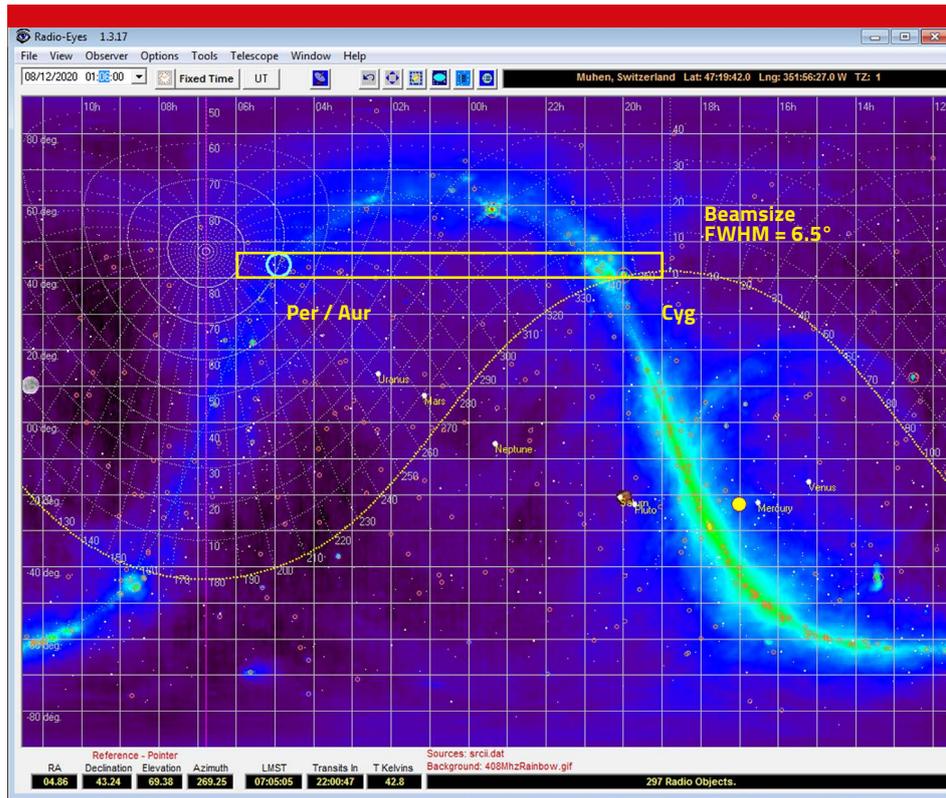


Bild: Transit der galaktischen Ebene durch die Antennenkeule, dabei war die Parabolantenne auf eine feste Position gerichtet. Die Deklination war  $43.6^\circ$ . Die Aufzeichnung dauerte etwas mehr als 24 Stunden. Die Temperatur in Kelvin ist eine grobe Abschätzung.

Bild: Peter Hirt

te ebenfalls eingezeichnet. Das Radioteleskop D1m9 mit einem Antennendurchmesser von 1.9 m hat eine theoretische Beamsize von ca.  $6.5^\circ$ , diese Beamsize ist ebenfalls in der Radiokarte eingezeichnet, siehe in der folgenden Abbildung.

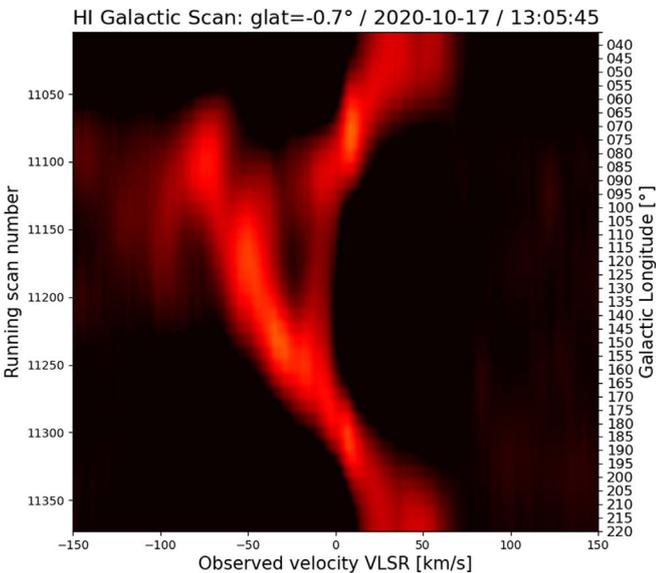
**Bild:** In dieser Radiokarte wurde die Zone des Transit-Scan eingezeichnet. Die Position RA=4.88 h entspricht dem Grenzgebiet zwischen den Sternbilder Perseus und Aurigae. Die Position RA = 20.55 h entspricht dem Gebiet im Cygnus. Die Horizontlinie gehört zur Messung mit der Running Sky Number 18870. (Radio-Eyes von Jim Sky)



**Bild:** Peter Hirt

### SONDIERUNG DER MILCHSTRASSE IN GALAKTISCHER LÄNGE

Fährt man mit dem Radioteleskop die galaktische Ebene der Milchstrasse entlang der galaktischen Länge ab und wird alle 5 Grad eine Beobachtung mit einer Integration von 200 Sekunden durchgeführt, dann erhält man ein Bild der Milchstrasse wie unten dargestellt ist. In dieser Darstellung erkennt man die radialen Geschwindigkeiten der Gasmassen relativ zum Beobachter. Ein negativer Wert der VLSR bedeutet, dass sich die Gasmassen auf den Beobachter zu bewegen. Ein positiver Wert der VLSR bedeutet, dass sich die Gasmassen vom Beobachter entfernen.



### FAZIT

Die Messung der Wasserstofflinie HI hat gezeigt, dass schon mit recht einfacher Hardware kosmische Radioastronomie möglich ist. Die Sonne und die Milchstrasse sind für den Amateur-Radioastronomen die dankbarsten kosmischen Objekte, welche im Radiobereich registriert werden können. Damit können Amateur-Radioastronomen in die Fussstapfen der Pioniere der Radioastronomie wie *Karl Jansky* und *Grote Reber* treten.

### ERKLÄRUNG ZUM BEGRIFF VLSR (VELOCITY OF THE LOCAL STANDARD OF REST)

Da die Erde rotiert und sich um die Sonne bewegt, hat der Beobachter auf der Erde je nach Tageszeit und Jahreszeit eine unterschiedliche Geschwindigkeit in Bezug auf ein Objekt in der Milchstrasse. Aus diesem Grund werden diese Geschwindigkeits-Komponenten aus der Radialgeschwindigkeit (Messung durch Dopplereffekt) entfernt. Die resultierende Geschwindigkeit wird dann VLSR genannt. ◀

**Bild:** Die Abbildung zeigt die Intensität der 21 cm-Radiostrahlung als Funktion der beobachteten Relativgeschwindigkeit der Gaswolken und der galaktischen Länge. Die Messung wurde am 17. Oktober 2020 durchgeführt.

**Bild:** Peter Hirt

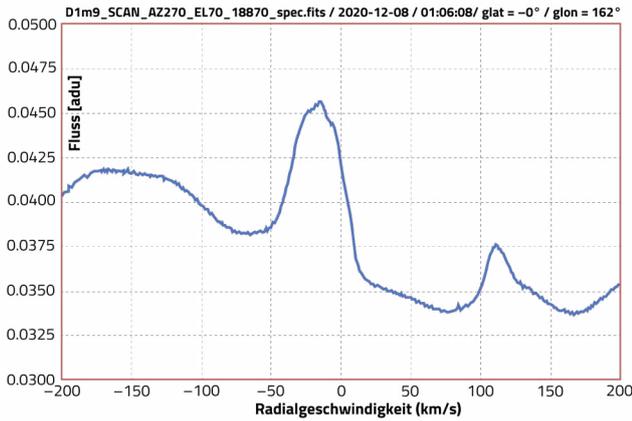


Diagramm: Radiospektrum zwischen Perseus und Aurigae registriert am 8. Dezember 2020 mit einer Integrationszeit von 200 Sekunden (Running Number 18870). Dem rechten Peak ist teilweise eine Störung (RFI) aufgeprägt.

Quelle: Peter Hirt

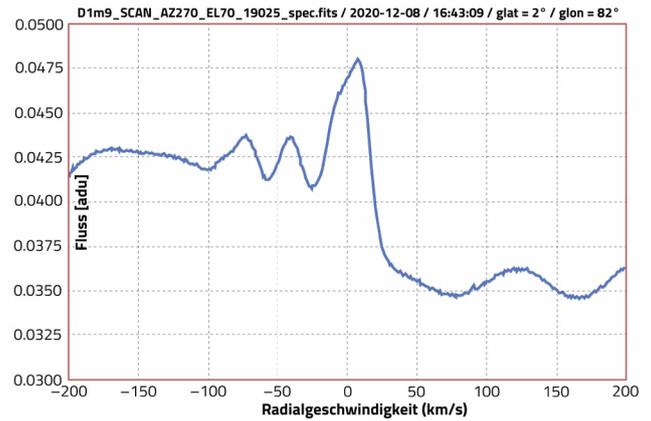


Diagramm: Radiospektrum von Cygnus registriert am 8. Dezember 2020 mit einer Integrationszeit von 200 Sekunden (Running Number 19025).

Quelle: Peter Hirt

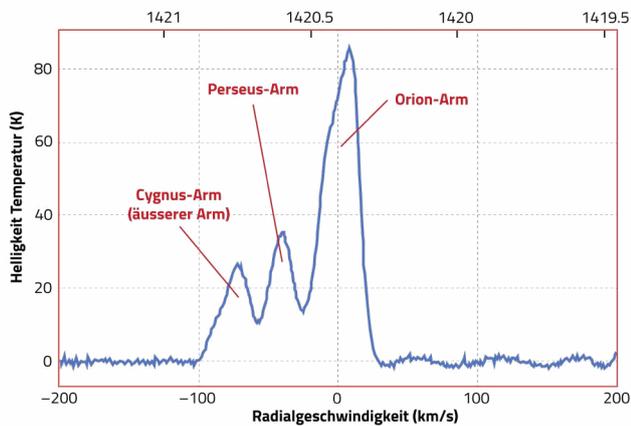


Diagramm: Mit dem Programm CLASS kann das Spektrum normiert werden. Der erste Schritt besteht darin, dass der Untergrund-Anteil vom Spektrum subtrahiert wird. Das Programm fitet zuerst eine Kurve, hier ein Polynom 11. Grades, welches den Untergrund darstellt. Nach der Subtraktion des Untergrundes und der Skalierung erhält man ein normiertes Spektrum. Die y-Achse zeigt nun die Temperatur in Kelvin an. Wegen der differentiellen Rotation der Galaxis bewegen sich die Gasmassen mit unterschiedlichen Radialgeschwindigkeiten. Dies wird im Radiospektrum durch die 3 Peaks repräsentiert. Die Peaks zeigen die Spiralarme der Milchstrasse an. Die Sonne befindet sich im Orion-Arm und bewegt sich mit ähnlicher Geschwindigkeit wie die Gasmassen im Orion-Arm, deshalb haben die Gasmassen nur eine kleine radiale Geschwindigkeit. Ganz anders ist es mit den Gasmassen im Perseus- und Cygnus-Arm, welche sich mit ca. 40 km/s resp. 80 km/s auf die Sonne zubewegen. Zur Illustration sind in der Abbildung 4 rote Linien eingezeichnet, welche die Richtungen  $82^\circ$  (Orion-, Perseus- und Cygnus-Arm) und  $162^\circ$  (Orion- und Perseus-Arm) anzeigen.

Quelle: Peter Hirt

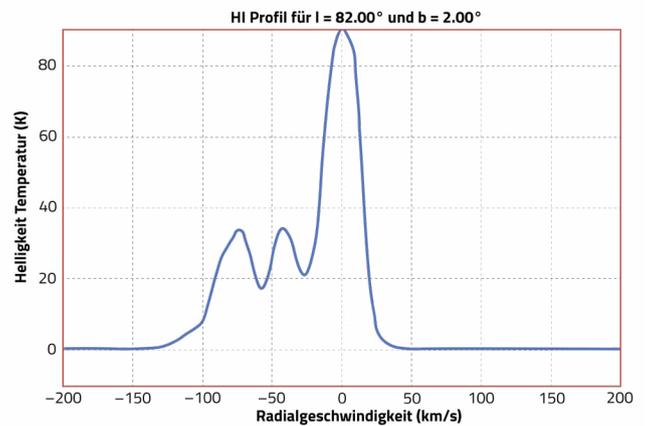


Diagramm: Die Milchstrasse wurde von grossen Radioteleskopen genau untersucht. Die HI-Profile (Leiden-Arentine-Bonn-Survey) können im Internet angesehen werden. Auf der Webseite (Argelander Institute für Astronomie) kann die Beamsize (also im Prinzip der Durchmesser der Parabolantenne) eingegeben werden; für die Parabolantenne mit einem Durchmesser von 1.9m ergibt sich eine Beamsize FWHM von ca. 6.5 Grad. Als Ergebnis erhält man das Radiospektrum der HI-Linie. Wie man sieht entspricht das normierte Radiospektrum demjenigen Spektrum, welches von Radioteleskopen der 25-Meter-Klasse aufgenommen worden ist.

Quelle: Peter Hirt