Lernort Astropeiler

Florian Büttner und Daniel Reschetow

St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel

Jugend forscht 2012

Gliederung

1. Kurzfassung
2. Zielsetzung
3. Lernort Astropeiler
4. Messungen mit dem 10m-Spiegel
    4.1 Messung der Lichtgeschwindigkeit
    4.2 Messung der Mondtemperatur
    4.3 Dopplereffekte bei Erde-Mond-Erde-Messungen
5. Messungen mit dem 25m-Spiegel
    5.1 Erstellen von HI-Spektren
    5.2 Zuordnung der HI-Spektren zu den Spiralarmen
    5.3 Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße
6. Dunkle Materie in der Milchstraße?
7. Fazit und Ausblick
8. Danksagung
9. Link- und Literaturliste

1. Kurzfassung

Das Ziel unserer Arbeit „Lernort Astropeiler“ ist es, Schülern die Radioastronomie experimentell näher zu bringen. Dazu nahmen wir Kontakt mit dem nahegelegenen Astropeiler auf dem Stockert in der Nähe von Bad Münstereifel auf. Wir wollten aber nicht nur „just for fun“ forschen. Die von uns durchgeführten Experimente sollen Schülern helfen in die phantastische Welt der Radioastronomie einzudringen.

Den 10m-Spiegel auf dem Stockert benutzten wir zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, der Mondtemperatur und der Dopplereffekte, die sich durch die Bewegungen des Mondes ergeben. Mit dem 25m-Spiegel bestimmten wir die Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße mittels der dopplerverschobenen HI-Linie des neutralen Wasserstoffs. Ein Vergleich mit der anhand der sichtbaren Materie gewonnen Rotationskurve deutet auf die Existenz von Dunkler Materie hin. Zurzeit erstellen wir eine Homepage mit unseren Messergebnissen, sodass Schüler weltweit diese online abrufen und bearbeiten können.

2. Zielsetzung

„Obwohl sie nur an wenigen Schulen Unterrichtsfach ist, finden die Astronomie und ihre Forschungsergebnisse in der Öffentlichkeit viel Interesse; und als Amateurastronomie ist sie ein weit verbreitetes Hobby. Dies hängt einerseits mit dem „erhebenden“ Eindruck zusammen, den der Sternhimmel auch bei freisichtiger Beobachtung macht, andererseits mit ihrer thematischen Vielfalt, der Berührung philosophischer Fragen und der Verbindung zur Raumfahrt“ (Quelle: Wikipedia).

Aus dem obigen Zitat folgt das Ziel unserer Arbeit „Lernort Astropeiler“. Astronomie und Astrophysik gehören als *Kulturgut par excellence* in zahlreichen Bundesländern leider nicht zum Unterrichtsstoff. Deshalb wollen wir mit Hilfe unserer radioastronomischen Messungen Schülern und Interessierten Wege aufzeigen, wie man mit Schulwissen experimentell in diese spannende Naturwissenschaft eindringen kann. So wird das Weltbild der Schüler nicht nur erweitert, sondern auch der normale Unterrichtsstoff vertieft und gefestigt. Aus diesem Grund nahmen wir Kontakt mit dem nahegelegenen Astropeiler auf dem Stockert in der Nähe von Bad Münstereifel auf.

3. Lernort Astropeiler

Abb. 3.1: 25m-Spiegel (links) und 10m-Spiegel (rechts) auf dem Stockert bei Eschweiler
(Foto: Robert Spiess)

Am Stockert gibt es einen 25m- und einen 10m-Spiegel. Diese radioastronomische Empfangsanlange auf dem Stockert wird von der NRW-Stiftung finanziell unterstützt. Eine Auflage der NRW-Stiftung ist es, einen Lern- und Bildungsort aufzubauen. Diese Auflage passt hervorragend mit unserer Zielsetzung zusammen. Auf unsere Anfrage hin eröffnete uns somit der Förderverein Astropeiler sehr gerne die Möglichkeit mit beiden Spiegeln Messungen durchzuführen.

4. Messungen mit dem 10m-Spiegel

Als Beobachtungsobjekte kommen mehrere Himmelskörper in Frage. Zuerst dachten wir an radioastronomische Sonnenbeobachtungen, denn die Sonne ist der stärkste natürliche Radiostrahler am Himmel. Die Aufzeichnung und Auswertung von Sonnenstürmen ist zudem eine interessante und spannende Sache. Doch ereignet sich nicht unbedingt zur der Zeit ein Sonnensturm, wenn interessierte Besucher den Lernort auf dem Stockert besuchen. Ganz anders ist die Situation beim Mond. Der Mond ist nicht nur ein strahlender Schwarzer Körper, sondern er ist der Erde so nahe, dass man ihn mit dem 10m-Spiegel aktiv anfunken kann.

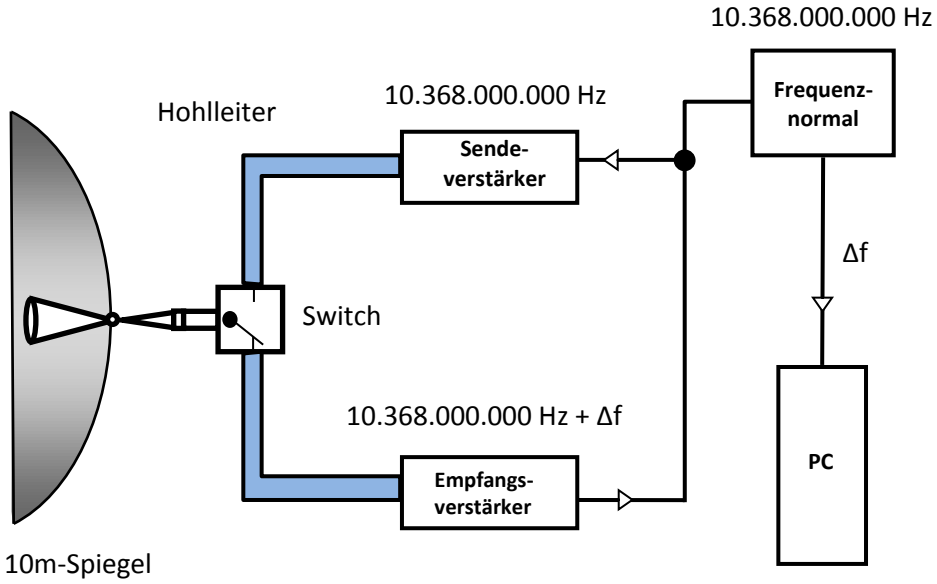


Abb. 4.1: Vereinfachte Darstellung der Sende- und Empfangsanlage

In Abbildung 4.1 sind die für uns relevanten Geräte dargestellt. Das Frequenznormal erzeugt ein Sendesignal von 10,368 GHz, das durch einen Sendeverstärker zum 10m-Spiegel gelangt. Ein gleichzeitiges Senden und Empfangen ist nicht möglich, da ein Switch zwischen Sende- und Empfangsverstärker hin und her schaltet. Da die Himmelskörper ständig in Bewegung sind, bekommt man mit größter Wahrscheinlichkeit ein dopplerverschobenes Signal zurück. Im Frequenznormal wird von der Empfangsfrequenz die Sendefrequenz abgezogen. Falls nötig, kann ein SDR (Software-Defined Radio) die Differenzfrequenz Δf zu einer für uns hörbaren Frequenz runtermischen. Dadurch kann dieses Signal mit der Soundkarte eines Computers aufgezeichnet werden.

4.1 Messung der Lichtgeschwindigkeit

Anhand unserer Experimente, die wir in dieser Arbeit aufführen, sollen die Schüler möglichst viel über Astronomie lernen und außerdem sollen die Experimente gut nachvollziehbar sein. Deshalb haben wir die Aufgaben nach dem folgenden Schema konstruiert. Da die vorliegende Jugend-forscht-Arbeit aber von der Seitenzahl begrenzt ist, können wir dieses Schema nur an einem Beispiel zeigen: *Messung der Lichtgeschwindigkeit.*

Vorüberlegung zur Messung der Lichtgeschwindigkeit

Bei diesem Experiment sollen die Schüler ein Radiosignal zum Mond senden und das reflektierte Signal wieder empfangen. Mittels einer Soundkarte und dem Freeware-Programm *Audacity* kann die Zeitdifferenz sehr genau bestimmt werden. Doch wie weit ist der Mond zum Zeitpunkt des Experiments vom Sendepunkt entfernt? Steht er während des Experiments überhaupt über dem Horizont? Welche astronomischen Koordinaten besitzt er zum Zeitpunkt der Messung? Diese Fragen können die Schüler mittels des Freeware-Programms *Stellarium* beantworten.

Da die Schüler in der Regel keine Sendelizenz besitzen, muss das Senden der Signale zum Mond unter Aufsicht eines lizensierten Funkamateurs erfolgen.

Was lernen die Schüler bei diesem Experiment?

1. Handhabung der Programme *Stellarium* und *Audacity*
2. Sie lernen astronomische Koordinatensysteme kennen
3. Bedienung der Sende- und Empfangsanlage des 10m-Spiegels unter Aufsicht eines lizensierten Funkamateurs
4. Sinnvolle Planung eines radioastronomischen Experiments
5. Fehlerrechnung und Fehlerbetrachtung

Aufgabenstellung für die Schüler

Bestimme die Lichtgeschwindigkeit möglichst genau, indem du die Zeit misst, die ein elektromagnetisches Signal für die Strecke Erde-Mond-Erde benötigt. Ermittle diese Strecke mit Hilfe der Software *Stellarium* und verwende diese beiden Faktoren zum Errechnen der gesuchten Geschwindigkeit.

Lösung mit Fehlerbetrachtung

Die Position des Mondes und den genauen Abstand zwischen Sendeort und Mond werden mittels *Stellarium* wie folgt ermittelt. Nachdem man die Ortskoordinaten des Beobachtungsortes und das Beobachtungsobjekt (hier Mond) eingegeben hat, erhält man die astronomischen Koordinaten und den Abstand des Mondes für den gewählten Beobachtungsort. Nun fährt man das Teleskop auf den Mond und schaltet die automatische Nachführung ein. Wie man dem Blockschaltbild entnehmen kann, erzeugt das Frequenznormal eine Frequenz von 10,368 GHz. Nun sendet man ein Signal als Morsecode zum Mond (siehe Abbildung 4.2, oberste Tonspur). Das vom Mond reflektierte Signal ist in Abbildung 4.2 in der mittleren Tonspur dargestellt.

Wir haben mit *Audacity* Sende- und Empfangsfrequenz auf je einer einzelnen Stereospur aufgenommen. Anschließend haben wir das Empfangssignal mit der Funktion *Equalizer* weitestgehend vom Rauschen befreit. Wenn man die Darstellung beider Signale zeitlich streckt, kann man das empfangene Signal sehr genau unter das Sendesignal verschieben (siehe Abbildung 4.2 + 4.3).

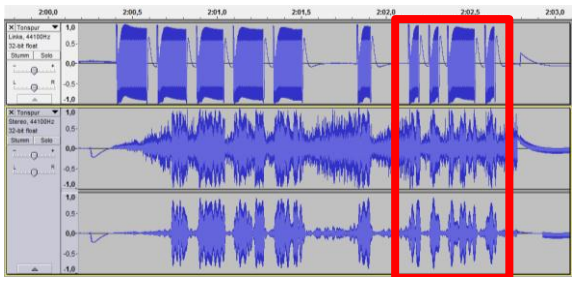


Abb. 4.2: Sendesignal (oben), ungefiltertes Empfangssignal (mittig) und gefiltertes Empfangssignal (unten)

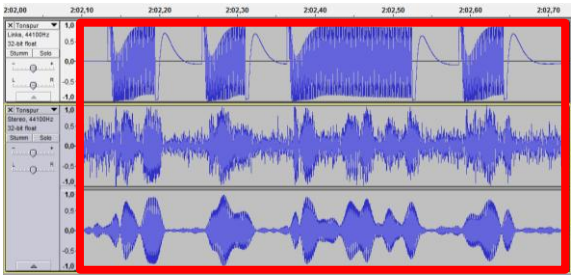


Abb. 4.3: Rot gekennzeichneter Bereich von Abb. 4.2 (Hochwertachse Intensität, Rechtswertachse Zeit)

Diese zeitliche Verschiebung Δt zwischen Sende- und Empfangssignal kann bei einer Samplerate von 44100 Samples pro Sekunde mit einer Genauigkeit von 23 µs bestimmt werden. Mit der Verwendung der von uns gemessenen Daten vom 01.11.2011 ergibt sich daraus eine Abweichung vom Literaturwert von nur 0,34 %.

$$c_{Mess} = \frac{382004146\,m \cdot 2}{2{,}5398\,s} \approx 300814352\,ms^{-1}$$

Dem aufmerksamen Leser wird aufgefallen sein, dass der Anfang des Empfangssignals nicht aufgezeichnet wurde. Dies ist dadurch zustande gekommen, dass unser gepulstes Sendesignal zu lang war, sodass der Anfang des reflektierten Signals schon an der Empfangsantenne ankam, bevor der S/E-Schalter von Senden auf Empfangen umgeschaltet hatte (siehe Blockschaltbild Abbildung 4.1). Dies ist für die Auswertung jedoch kein Problem, da unser Sendesignal eine strukturierte Pulsfolge besitzt.

4.2 Messung der Mondtemperatur

Wie ist es möglich die Temperatur des Mondes mit dem 10m-Spiegel zu messen?

In unserer Empfangsanlage zeigt ein analoges Messgerät den Empfangspegel in dB an. Ist der Spiegel auf ein Objekt mit hoher Schwarzkörperstrahlung (zum Beispiel Mond oder Sonne) ausgerichtet, ist das Rauschen stark, ist es auf den „Kalten Himmel“ ausgerichtet, ist es eher schwach.

Die Verhältniszahl Dezibel kennen die Schüler aus der Akustik.

$$L[dB] = 10\lg\frac{J}{J_0}$$

Dabei ist L der Schallpegel, J die Intensität der Schallwelle und J_0 die Intensität der Schwallwelle an der Hörgrenze. Wenn wir L nun in Empfangspegel umbenennen und J durch die Temperatur T und J_0 durch die Temperatur T_0 ersetzen, können wir schreiben:

$$L[dB] = 10\lg\frac{T}{T_0}$$

Aus der gemessenen Größe L und der Temperatur T_0 kann man die Temperatur T und hieraus die Temperatur T_M des Mondes berechnen.

T_0 ist durch die Systemtemperatur (120 K) und die Temperatur des „Kalten Himmels“ (2,7 K) definiert. Somit ergibt sich ein T_0 von 122,7 K. Stellt man nun die obige Formel für den Empfangspegel L nach T um, so erhält man: $T = T_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L}$

Bei einer Messung wird somit nicht nur die Strahlungstemperatur des jeweiligen Objekts, hier T_M, sondern auch die des eigenen Systems und des „Kalten Himmels“ erfasst. Also:

$$T = T_M + T_0 \Rightarrow T_M = T - T_0$$

Bedenken muss man aber jetzt noch, dass unsere Empfangsanlage nur linear polarisierte Strahlung empfängt. D.h., wir empfangen nur die halbe Leistung. Somit ergibt sich für die wirkliche Mondtemperatur:

$$T_M = 2 \cdot (T - T_0) \Rightarrow \boldsymbol{T_M = 2 \cdot (T_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L} - T_0)}$$

Am 10.12.11 überprüften wir diese Gleichung anhand einer Bodenmessung, bei der wir 3,3 dB bei einer Bodentemperatur T_B von 278 K (4,85 °C) maßen.

$$T_B(3{,}3\ dB) = 2 \cdot (122{,}7\ K \cdot 10^{0,1 \cdot 3,3\ dB} - 122{,}7\ K) = 279{,}3\ K$$

Dieser Wert stimmt recht gut mit dem gemessenen Wert überein, sodass wir unsere Gleichung als richtig betrachten können.

An demselben Tag maßen wir auch die thermische Strahlung des Mondes bei 10,368 GHz. Sie betrug 2,9 dB. Daraus ergab sich eine Mondtemperatur T_M von

$$T_M(2{,}9\ dB) = 2 \cdot (122{,}7\ K \cdot 10^{0,1 \cdot 2,9\ dB} - 122{,}7\ K) = 233{,}1\ K$$

Unsere Messung erfolgte kurz vor dem nächsten Vollmond. Da unsere Wellenlänge, bei einer Sendefrequenz von 10,368 GHz ca. 3 cm beträgt, kann man der Abbildung 4.4 entnehmen, dass unser Messergebnis (grüner Punkt in Abb. 4.4) sehr gut mit dem Literaturwert übereinstimmt.

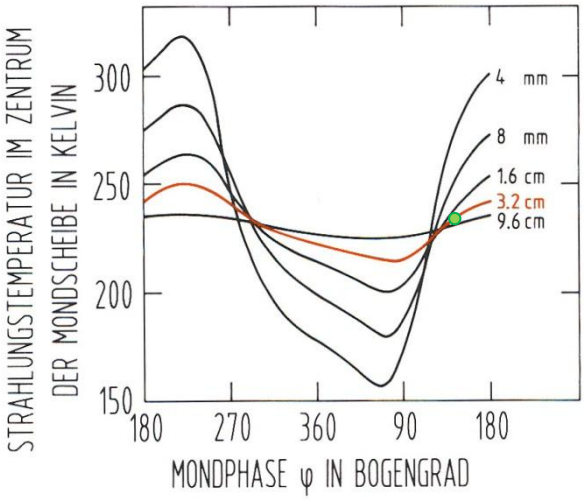


Abb. 4.4: Die thermische Radiostrahlung des Mondes in Abhängigkeit von der Mondphase
grüner Punkt = eigene Messung
φ = 180° entspricht dem optischen Vollmond
φ = 360° entspricht dem optischen Neumond
(Quelle: Mezger, P. G., 1992, Blick in das kalte Weltall, S. 39)

Der Abbildung 4.4 kann man weiterhin entnehmen, dass der Radioneumond und auch der Radiovollmond deutlich zeitverzögert nach dem optischen Neu- und Vollmond auftreten. Diese Zeitverzögerung ist am größten bei der größten Wellenlänge. Die Amplitude der Temperaturänderung nimmt dagegen mit zunehmender Wellenlänge ab. Daraus muss geschlossen werden, dass die langwelligere Strahlung von tieferliegenden Schichten des Mondgesteins ausgesendet wird.

4.3 Dopplereffekte bei Erde-Mond-Erde-Messungen

Am 01.11.11 fuhren wir den 10m-Spiegel vor den Mond und ließen den Mond dann durch die Antennenkeule laufen. Während nun der Mond durch die Antennenkeule lief, die ca. 1/3 des Mondes erfasst, sendeten wir immer wieder ein gepulstes 10,368GHz-Signal zum Mond. Nachdem wir die Differenz zwischen Sendesignal und Aufnahmesignale gebildet haben, konnten wir die reflektierten Echos mit der Soundkarte aufzeichneten. Um ein gut hörbares Signal zu erhalten, modulierten wir dem Empfangssignal noch ein zusätzliches Audiosignal auf. Als wir dieses Signal mit dem Programm *GoldWave* einer Frequenzanalyse unterzogen, bemerkten wir eine starke Frequenzdrift.

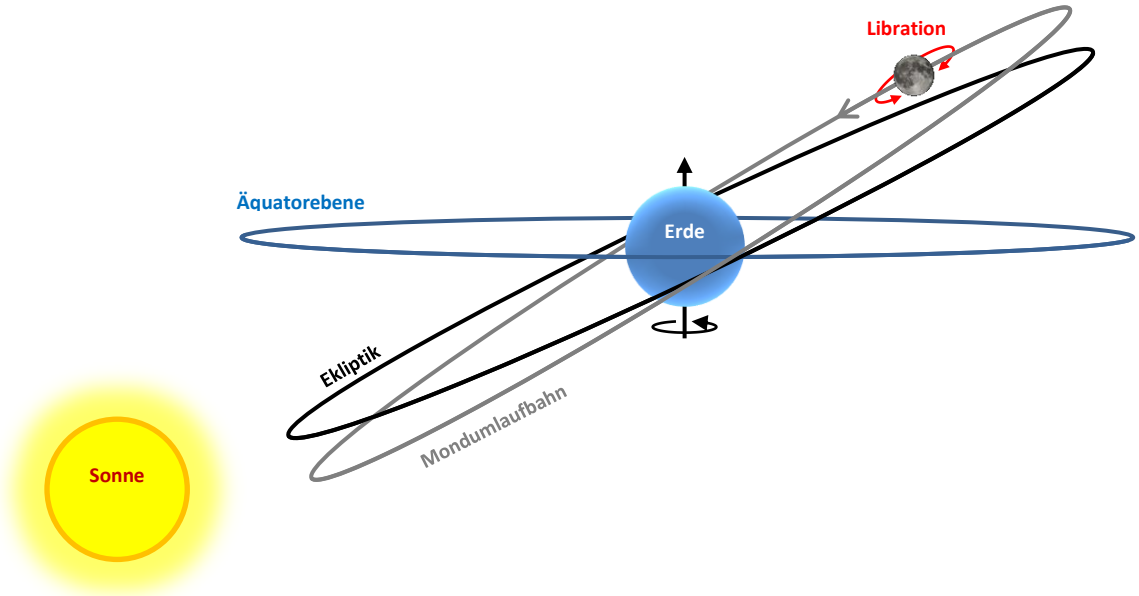


Abb. 4.5: Die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung zwischen Beobachtungsort und Mond ist ein komplexes, dreidimensionales und mehrschichtiges Problem

Während der Messzeit von ca. 3,5 Minuten hat eine Frequenzverschiebung in Richtung niedriger Frequenz stattgefunden. Dies kann folgende Ursachen haben: Eine Frequenzdrift in unserer Sende- und Empfangsanlage oder eine nicht konstante Abstandsänderung und damit eine Geschwindigkeitsänderung zwischen Mond und unserem 10m-Spiegel. Ursache hierfür könnte die Erddrehung, die Bahnbewegung des Mondes oder die Librationsbewegung des Mondes sein. Eine Frequenzdrift in unserer Empfangsanlage konnten wir experimentell ausschließen. Somit blieb die Frage zu beantworten, welche der oben genannten Geschwindigkeitsänderungen für die Frequenzverschiebung verantwortlich sein könnte. Die Suche nach einer Antwort ist ein komplexes, dreidimensionales und mehrschichtiges Problem (Abb. 4.5).

Berechnung der Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsänderung zwischen Beobachtungsort und Mond

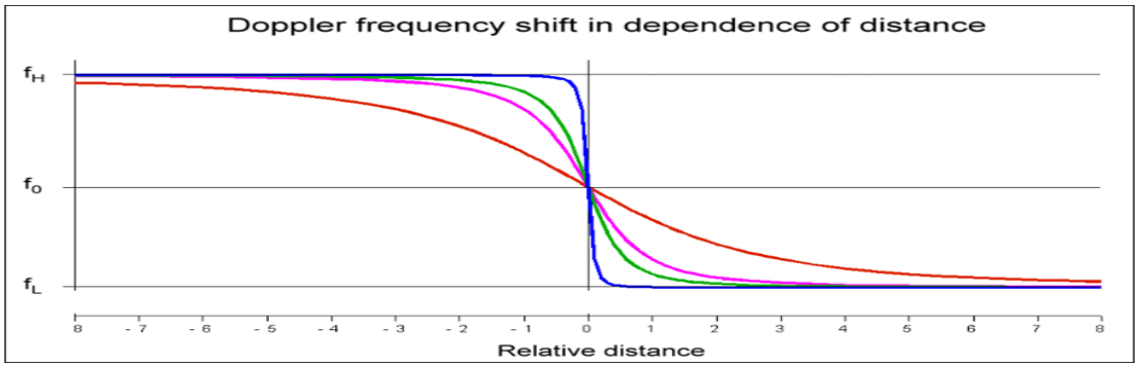
Um den Abstand vom Betrachtungsort auf der Erde zum Mond zu bestimmen, wählten wir nicht *Stellarium*, sondern das Freeware-Programm *Cartes du Ciel*, da dieses die Entfernung mit einer Genauigkeit von 100 m angibt. *Stellarium* liefert hingegen nur Werte mit einer Genauigkeit von 1500 m. Zum Errechnen der Geschwindigkeit muss man nur den Abstand in bestimmten Zeitabständen

ablesen. Weiterhin muss noch bedacht werden, dass wir eine doppelt dopplerverschobene Frequenz empfangen, da der Mond das Signal nicht sendet, sondern reflektiert (Radarkontrolle im Straßenverkehr). Mit der Gleichung für den optischen Dopplereffekt (1) oder mit der Radargleichung (2)

$$\Delta f = 2 \cdot (f' - f) = 2 \cdot (f \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - f) \; (1) \qquad \Delta f = \frac{2 \cdot f \cdot v}{c} \; (2)$$

kann man aus der Geschwindigkeit und der Sendefrequenz von 10,368 GHz die Frequenzdifferenz Δf berechnen.

Anhand der Werte aus *Cartes du Ciel* und den errechneten Geschwindigkeitswerten ergibt sich, dass sich der Mond während unserer Messung von uns entfernt und die Geschwindigkeit dabei innerhalb der 480 s = 8 min deutlich zunimmt. Das hat zur Folge, dass sich die Empfangsfrequenz im Laufe unserer Messung stetig verringert und so die Frequenzdifferenz Δf zunimmt. Man erhält also eine Frequenzdrift. Diese theoretisch berechnete Frequenzdrift liegt in der Größenordnung der von uns gemessenen Frequenzdrift (Abb. 4.8 rechts), wenn man bedenkt, dass hier keine lineare Änderung vorliegt. Etwas vereinfacht ist die Situation vergleichbar mit einem am Beobachter vorbeifahrenden Rennwagen (Abb. 4.6). Unsere Empfangsfrequenz und deren zeitliche Änderung hängen also entscheidend davon ab, ob man die Messung bei Mondaufgang oder Monduntergang durchführt, oder dann, wenn der Mond seinen Höchststand erreicht hat. Bei unserer Messung stand der Mond recht nah am Höchststand. Man kann also davon ausgehen, dass die Frequenzdifferenz - nicht die Frequenzdrift - bei Mondaufgang bzw. Monduntergang um ein Vielfaches höher ausfällt.



Mondaufgang **Höchststand** **Monduntergang**

Abb. 4.6: Änderung der Dopplerfrequenz in Abhängigkeit vom Abstand
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Dopplereffekt

Berechnung der Signalverbreiterung anhand der Libration des Mondes

Die meisten Leute wissen, dass man den Mond nur von einer Seite sieht. Viele wissen jedoch nicht, dass er von uns aus gesehen eine leichte Schaukelbewegung durchführt, wodurch wir etwas mehr als die Hälfte des Mondes sehen. Diese Bewegung wird Libration genannt.

Das gesendete Signal f_s = 10,368 GHz ist gegenüber dem empfangenen Signal f_E nicht nur dopplerverschoben, sondern es weist auch eine deutliche Signalverbreiterung auf. Das heißt - so unsere erste Vermutung - wir messen zuerst das Signal f_{EMR}, das von der rechten Seite des Mondes

reflektiert wird, dann das Signal f_{EMM}, das von der Mitte und schließlich das Signal f_{EML}, das von der linken Seite des Mondes reflektiert wird. Das Signal, das von der Mitte des Mondes reflektiert wird, erfährt nur eine Frequenzverschiebung gegenüber dem gesendeten Signal f_s. Zusätzlich bewirkt die Libration des Mondes aber an den Rändern des Mondes eine Verschiebung dieses Signals in Richtung niederer Frequenz (Rotverschiebung) und höherer Frequenz (Blauverschiebung). Dieses führt zu der Signalverbreiterung Δf_{Lib}, anhand der wir die Libration des Mondes vielleicht berechnen können.

Abb. 4.7: Aufgrund der Erddrehung wandert unser Sendesignal über den Mond

Der Mond lief innerhalb von 3,5 Minuten durch die Antennenkeule unseres 10m-Spiegels. In dieser Zeit haben wir den Mond 34-mal angefunkt. Alle 34 Empfangssignale wurden von uns mit *Audacity* einer Frequenzanalyse unterzogen. Die jeweilige Frequenz mit der höchsten Amplitude (siehe Abb. 4.8 links) wurde in das Diagramm von Abbildung 4.8 rechts eingetragen und ergaben somit den Verlauf der blauen Linie. Die rote Linie stellt, wie oben erläutert, die Frequenzdrift infolge der Änderung der Entfernungsgeschwindigkeit zwischen Beobachtungsort und Mond dar. Bei unserer Messung erhielten wir für die Dopplerverschiebung infolge der Libration des Mondes einen maximalen Wert von ca. 15 Hz (siehe Abb. 4.8 rechts, Abstand zwischen roter und blauer Linie).

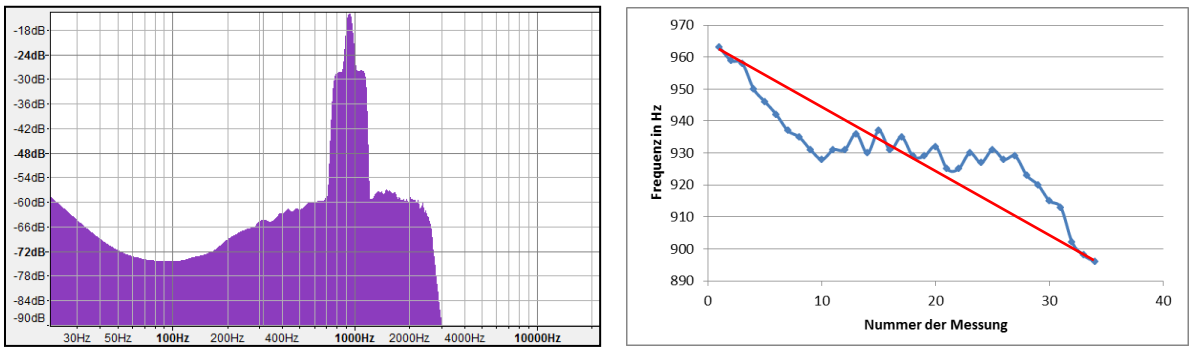


Abb. 4.8: Frequenzanalyse eines einzelnen Messvorgangs (links)
Aufgezeichnete Empfangsfrequenzen der einzelnen Messungen (rechts)

Wir wissen jedoch, dass die Libration zu diesem Zeitpunkt höher war. Da wir aber mit unserer Empfangskeule ein Drittel des Mondes erfassen und somit keine Werte für die äußerste Kante erhalten, fällt unser gemessener Librationswert natürlich zu niedrig aus. Es ist uns aber trotzdem gelungen die Librationsbewegung des Mondes nachzuweisen. Ein Erfolg, wenn man bedenkt, dass es sich dabei um eine relativ geringfügige Bewegung handelt.

Fazit zum Dopplereffekt

Die obigen Ausführungen zeigen, dass wir besonders interessante Aufgaben für den Lernort Astropeiler anhand des Dopplereffektes erstellen konnten.

5. Messungen mit dem 25m-Spiegel

Nachdem wir die experimentellen Aufgaben für den 10m-Spiegel erstellt hatten, erhielten wir die Erlaubnis auch mit dem 25m-Spiegel experimentelle Aufgaben für den Lernort Astropeiler zu erstellen.

Die Empfangsanlage des 25m-Spiegels ist auf eine Frequenz von f_0 = 1420 MHz (λ_0 = 21 cm) ausgelegt, was der Frequenz des neutralen Wasserstoffs entspricht, die durch das Umklappen des Elektronenspins entsteht (Abb. 5.1). Die 21cm-Linie kann kosmischen Staub recht gut durchdringen und ist somit für radioastronomische Beobachtungen sehr gut geeignet. Aus diesem Grund beschlossen wir die folgende Lernort-Aufgabe für Schüler zu entwickeln: *Messe die Dopplerverschiebung der 21cm-Linie und bestimme anhand der aufgezeichneten Spektren die Rotationsgeschwindigkeit unserer Galaxie in Abhängigkeit vom Radius.*

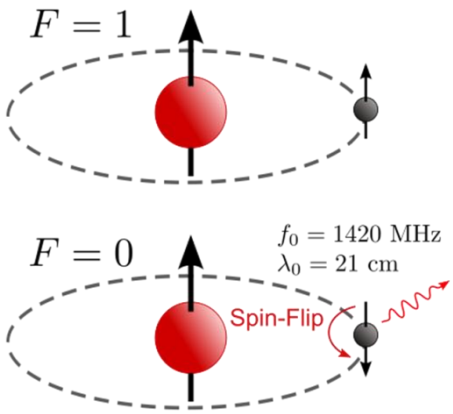


Abb. 5.1: Spin-Flip eines Elektrons des neutralen Wasserstoffs
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/HI-Linie

5.1 Erstellen von HI-Spektren

Um genügend Werte für unsere Aufgabe zu bekommen, führten wir 28 Messungen von 10° bis 200° galaktischer Länge und jeweils 0° galaktischer Breite durch. Unsere Messwerte lagen uns als CSV-Tabellen vor, aus denen wir die Intensität in Abhängigkeit von der Frequenz entnehmen konnten. Jedoch muss man dabei beachten, dass in die gemessenen Frequenzen auch Dopplereffekte einfließen, die die Erreichung des Zieles deutlich erschweren. Diese Frequenzverschiebungen entstehen durch die Eigenrotation der Erde, die Bewegung der Erde um die Sonne und die Eigenbewegung der Sonne. Zum Glück gibt es einen Algorithmus – der sogenannte *Local Standard of Rest* – mit dem man diese störenden Bewegungen raus rechnen kann. Mit der Formel für den optischen Dopplereffekt (1) rechneten wir die bereinigten Frequenzwerte in Geschwindigkeitswerte um.

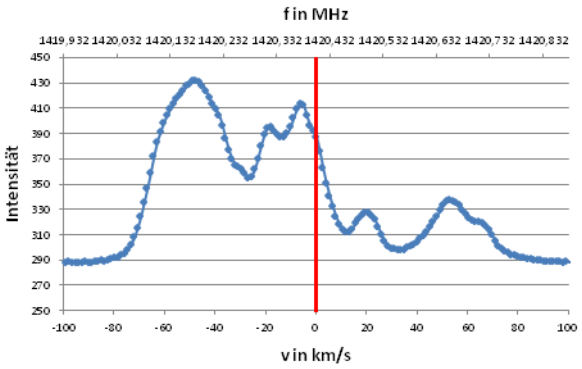


Abb. 5.2: Aufgezeichnetes Spektrum bei 50° galaktischer Länge

$$f = f_0 \cdot \sqrt{\frac{c \pm v}{c \mp v}} \quad (1)$$

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (2)$$

In der Radioastronomie ist es zwar üblich die Näherungsgleichung für kleine Geschwindigkeiten [Formel (2)] zu verwenden, jedoch fanden wir es für den Lern- und Bildungsort sinnvoller Gleichung

(1) zu benutzen, da diese in jeder Schul-Formelsammlung zu finden ist. Das hat den Effekt, dass unsere Spektren spiegelverkehrt sind, was für den weiteren Arbeitsprozess aber nicht von Nachteil ist.

Abbildung 5.2 zeigt ein fertiggestelltes Spektrum. Auf der Rechtswertachse sind Geschwindigkeit und Frequenz aufgetragen. Die rote Linie markiert die Frequenz der nicht verschobenen HI-Linie. Dadurch, dass wir nicht die Wellenlänge, sondern die Frequenz auftragen, befinden sich die blauverschobenen Spektrallinien rechts von der roten Linie und die rotverschobenen links von der roten Linie.

5.2 Zuordnung der HI-Spektren zu den Spiralarmen

Bevor man anhand unserer Spektren auf die Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße schließen kann, muss man den einzelnen Peaks konkrete Objekte in der Milchstraße zuordnen. Dies ist jedoch nicht einfach, wenn man bedenkt, dass wir uns selbst innerhalb der Galaxie befinden. Wir haben uns entschlossen, ein Bild der NASA (Abb. 5.4) für unsere Zuordnungen zu verwenden, da es zwar etwas geschönt, aber letztendlich doch recht realitätsnah ist. Dies überprüften wir mit einem Radiobild der Milchstraße, welches von der Erde aus gemessen wurde. Wir legten dieses Radiobild (Abb. 5.3) im Kreis um die Sonne und konnten so sehen, dass sich auf dem Radiobild helle Flecken genau dort befinden, wo sich auf der NASA-Karte der Milchstraße Spiralarme befinden.

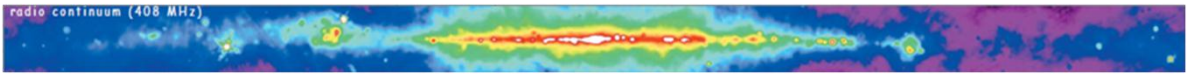


Abb. 5.3: Radiokontinuum der Milchstraße bei 408 MHz
Quelle: Jodrell Bank Mark I and Mark IA, Bonn 100-meter, and Parkes 64-meter

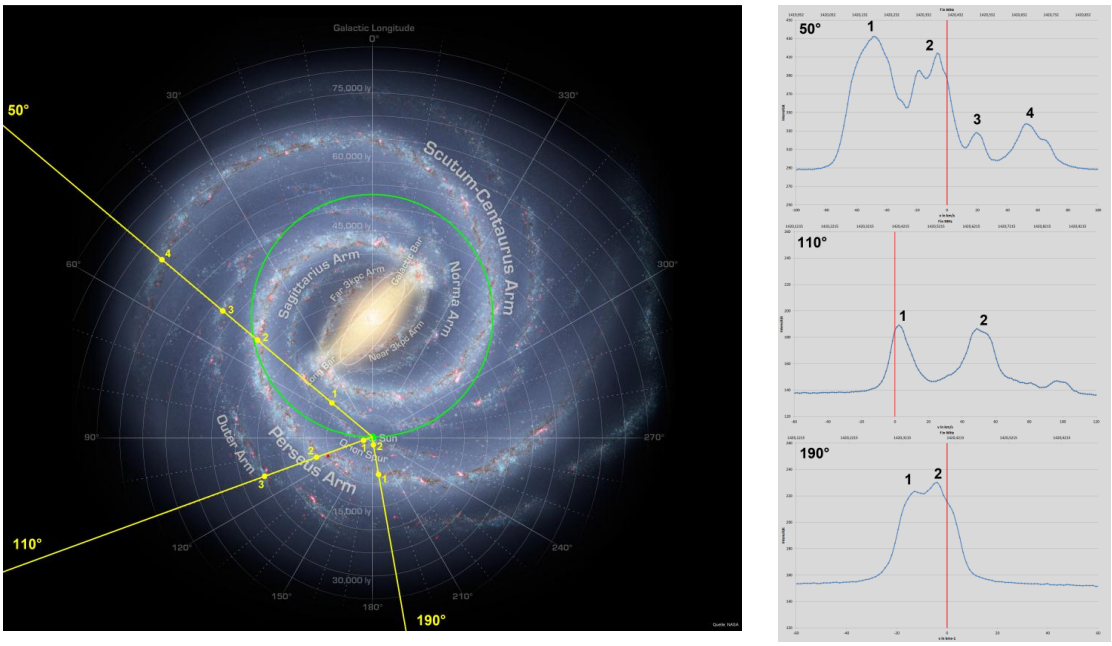


Abb. 5.4: Zuordnung der Spiralarme am Beispiel von drei Spektren (50°, 110° und 190°)

In das Bild der Milchstraße haben wir einen grünen Kreis eingezeichnet (siehe Abb. 5.4), der die Umlaufbahn der Sonne um das galaktische Zentrum anzeigt. Was sich innerhalb des grünen Kreises

befindet, bewegt sich nach *Kepler* schneller um das galaktische Zentrum als die Sonne, und alles was sich außerhalb befindet, bewegt sich langsamer. Dies hilft die Peaks zuzuordnen, da man durch die rote Linie in den Spektren leicht erkennt, ob eine Rot- oder Blauverschiebung vorliegt. Beobachtet man beispielsweise bei 50° galaktischer Länge ein Objekt (Peak 1) innerhalb des Kreises, so bewegt es sich von uns weg. Das heißt, wir messen eine Rotverschiebung. Bei Peak 2 stellt man hingegen kaum eine Dopplerverschiebung fest. Das Objekt muss sich also in der Nähe des grünen Kreises befinden. Die Peaks 3 und 4 sind blauverschoben und nicht so intensiv. Es ist also naheliegend, die Peaks den äußeren Armen zuzuordnen.

Nach diesem Schema haben wir schließlich auch die restlichen Spektren zugeordnet. Jedoch haben wir nur dort zugeordnet, wo es auch eindeutig war. Vor allem in Richtung galaktisches Zentrum überlagern sich viele Peaks und die Zuordnung gestaltet sich als äußerst schwierig. Jedoch haben wir am Ende recht viele Peaks den Spiralarmen zuordnen können, sodass wir nun deren Entfernung ablesen können.

5.3 Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße

Durch die Zuordnung der Peaks erhalten wir aber nicht direkt die Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße, sondern lediglich die jeweilige Relativgeschwindigkeit des gemessenen Objektes (z. B. Wasserstoffwolke) zum Beobachtungsort. Hieraus kann jedoch die Bahngeschwindigkeit v_{Bt} des Objekts anhand von geometrischen Betrachtungen berechnet werden (Abb. 5.5).

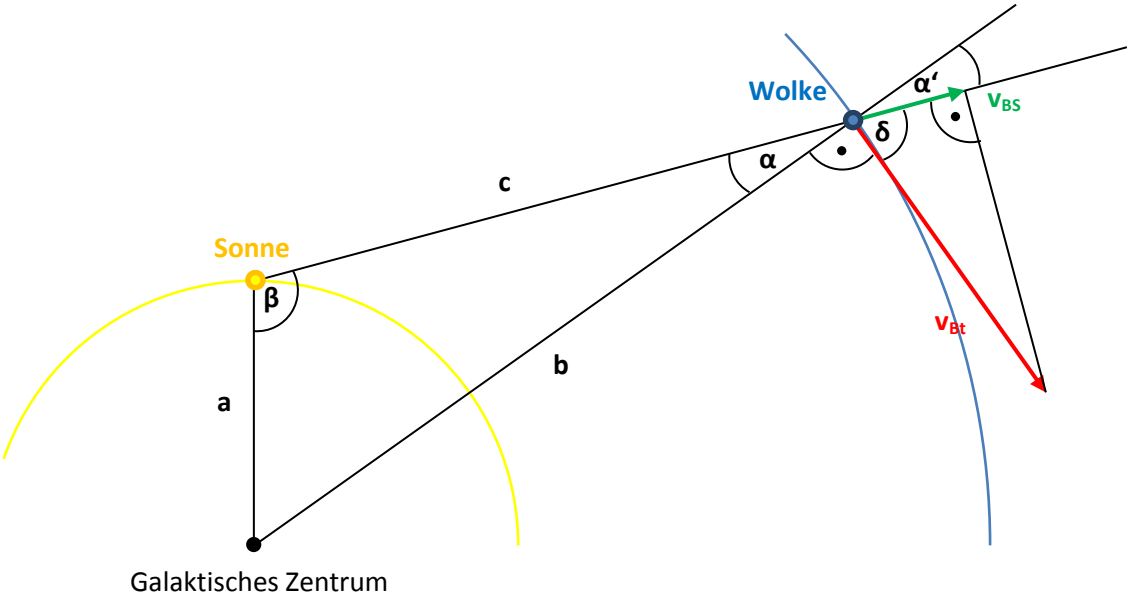


Abb. 5.5: Geometrische Betrachtung des Rotationsproblems

Uns bekannt sind folgende Werte: a ist die Strecke zwischen der Sonne und dem galaktischen Zentrum. Die Entfernung beträgt 8 kpc. Der Winkel β ist die galaktische Länge, nach der wir den Spiegel ausrichten. Die Strecke c ist uns durch die Zuordnungen bekannt und die Relativgeschwindigkeit v_{BS} können wir unseren Spektren entnehmen.

Da wir die Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Radius bestimmen wollen, müssen wir die Strecke b zwischen dem galaktischen Zentrum und dem gemessenen Objekt und zusätzlich die

Bahngeschwindigkeit v_{Bt} bestimmen. Dazu betrachteten wir zuerst ein rechtwinkliges Dreieck, das v_{BS} als Kathete und v_{Bt} als Hypotenuse hat. Hier gilt:

$$\cos\delta = \frac{v_{BS}}{v_{Bt}} \Rightarrow v_{Bt} = \frac{v_{BS}}{\cos\delta}$$

δ lässt sich durch α errechnen, da α' und δ sich zu 90° ergänzen.

$$\delta = 90° - \alpha \;\Rightarrow\; \cos\delta = \cos(90° - \alpha) = \sin\alpha \;\Rightarrow\; v_{Bt} = \frac{v_{BS}}{\sin\alpha} \;(1)$$

Mit dem Sinussatz kann man α berechnen. Setzt man den Term für α nun in (1) ein, so heben sich sin und $\sin^{-1}$ auf. Man erhält die Gleichung für v_{Bt}.

$$\frac{\sin\alpha}{a} = \frac{\sin\beta}{b} \;\Rightarrow\; \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\sin\beta \cdot a}{b}\right) \qquad v_{Bt} = \frac{v_{BS} \cdot b}{\sin\beta \cdot a}$$

a, β und v_{BS} sind uns bekannt, jedoch muss b noch berechnet werden, was mit dem Kosinussatz möglich ist. Dadurch haben wir den Vorteil, dass wir so auch den Radius des Objekts zum galaktischen Zentrum erhalten. Dieser Wert ist notwendig, um das gewünschte Rotationsdiagramm zu erstellen:

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2 \cdot a \cdot c \cdot \cos\beta \;\Leftrightarrow\; b = \sqrt{a^2 + c^2 - 2 \cdot a \cdot c \cdot \cos\beta}$$

Da die letzten beiden Gleichungen nur bekannte Werte enthalten, können wir also Radius und Bahngeschwindigkeit berechnen und so schließlich ein Rotationsdiagramm erstellen.

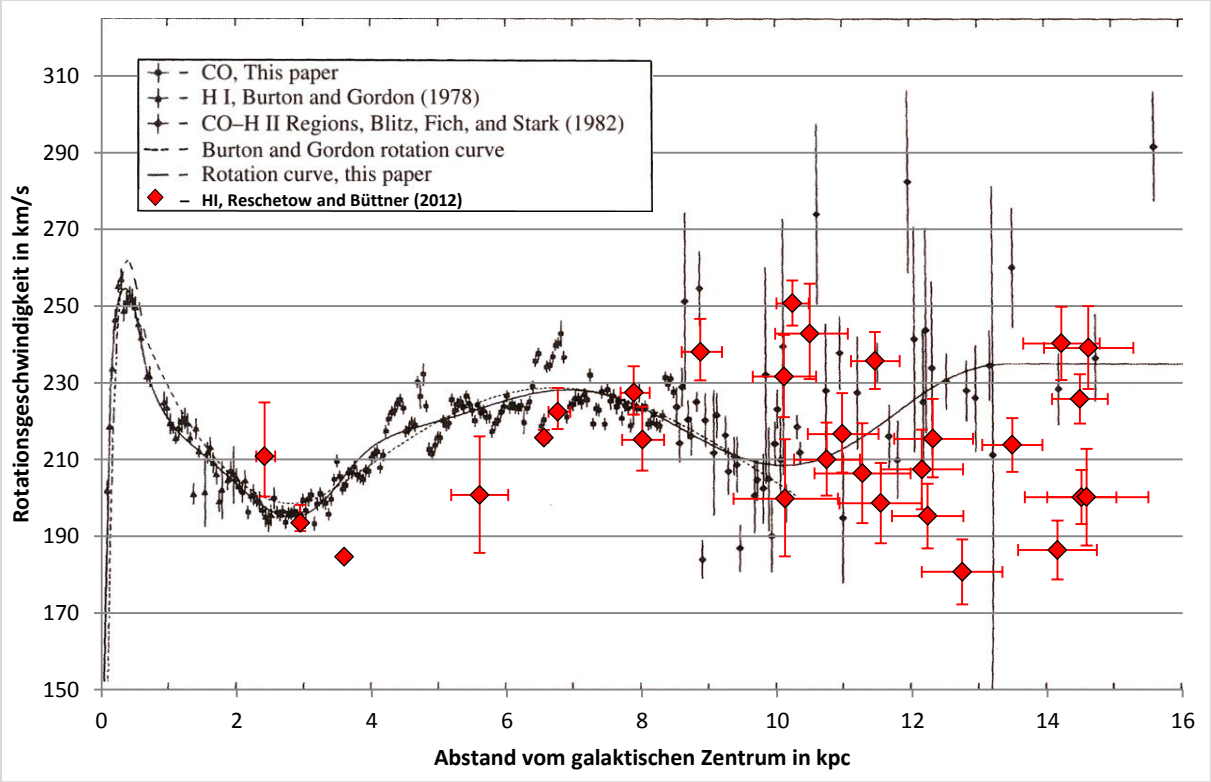


Abb. 5.6: Rotationskurve der Milchstraße mit unseren Werten (rote Rauten)

Quelle: Carroll, B. W., Ostlie, D. A., S. 915

Wir wollten natürlich wissen, inwiefern unsere errechneten Werte mit Profiwerten übereinstimmen und haben unsere Werte in ein entsprechendes Diagramm eingetragen (rote Rauten in Abb. 5.6). Wie man in Abbildung 5.6 sieht, stimmen unsere Werte im Rahmen der Fehlergrenzen sehr gut mit den Profiwerten überein.

Die Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße als Beitrag zum Lernort Astropeiler ist eine recht komplexe Aufgabe. Doch wir konnten anhand unserer Messungen zeigen, dass dies mit schulischem Wissen gelingen kann.

6. Dunkle Materie in der Milchstraße?

Abbildung 6.1 zeigt zwei verschiedene Rotationskurven der Milchstraße. Die obere Kurve ist über den Dopplereffekt ermittelt worden; die untere erhält man, wenn man die Rotationsgeschwindigkeit mittels der Werte für die sichtbare Materie berechnet. Auf der Abbildung ist mit zunehmendem Radius eine deutliche Differenz zwischen den beiden Graphen zu erkennen. Die Milchstraße rotiert also deutlich schneller, als sie es nach Kepler und Newton eigentlich sollte. Da die meisten Wissenschaftler jedoch von unseren physikalischen Gesetzen überzeugt sind, wurde zu ihrer Rettung die „Dunkle Materie“ eingeführt. Dieser Sachverhalt war für uns ein Anreiz es mal zu versuchen, ob es auch uns Schülern möglich ist, den anhand der sichtbaren Materie berechneten Graphen selber zu erstellen.

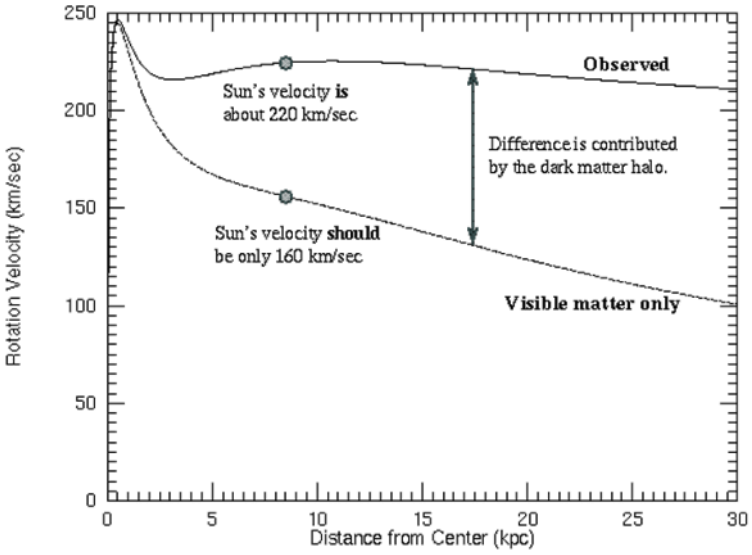


Abb. 6.1: Gemessene und anhand der sichtbaren Materie errechnete Rotationskurve der Milchstraße
Quelle: Blum, J. Astrophysik II, S. 22

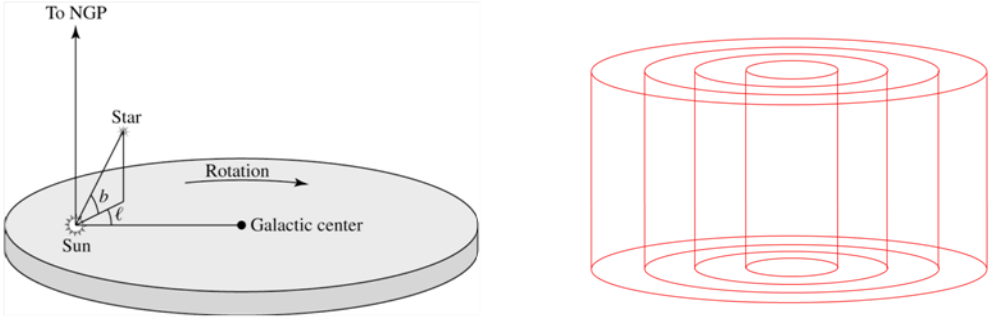


Abb. 6.2: Modellartige Zylindergliederung der Milchstraße
Quelle linke Grafik: Carroll, B. W., Ostlie, D. A., S. 899

Hierzu nahmen wir stark vereinfachend an, dass unsere Milchstraße ein einheitlicher flacher Zylinder ist. Diesen haben wir in sehr viele ineinander geschachtete Hohlzylinder und einen zentralen Zylinder

eingeteilt (Abb. 6.2). Kennt man die Massenverteilung und damit die Dichte in Abhängigkeit von Radius, so kann auf diese Weise mit dem Keplerschen Gesetz die Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Radius berechnet werden.

Die Erstellung einer Dichtefunktion erwies sich aber als großes Problem, da der aktuelle Wissenschaftstand nur Schätzungen und keine genauen Angaben über die Sternenanzahl der Milchstraße liefert. Schließlich sind wir in dem Buch *An Introduction to Modern Astrophysic* auf eine Formel gestoßen, mit der man die Sternenanzahl in Abhängigkeit von Scheibenhöhe und Radius annähernd berechnen kann.

$$n(z,R) = n_0(e^{-z/z_{thin}} + 0{,}02 \cdot e^{-z/z_{thik}}) \cdot e^{-R/h_R}$$

n = Anzahl der Sterne; z = Vertikale Höhe über der Mittelebene der Galaxis; R = Radiale Distanz vom galaktischen Zentrum; h_R = Skalenlänge der Scheibe; n_0 = Bezugswert

Mit dieser Gleichung und einer Standardsternenmasse gelang es uns die Rotationskurve nach Kepler $v = \sqrt{\frac{G \cdot m}{R}}$ auszurechnen (blauer Graph in Abbildung 6.3).

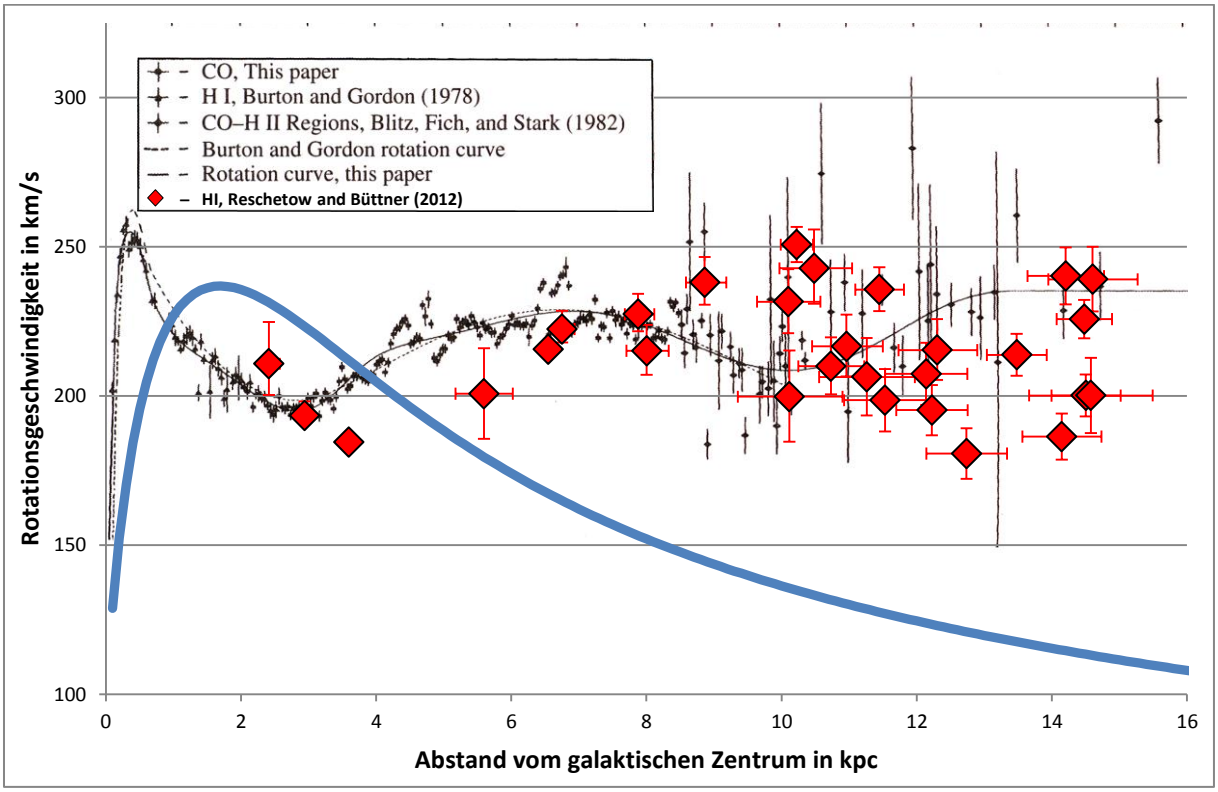


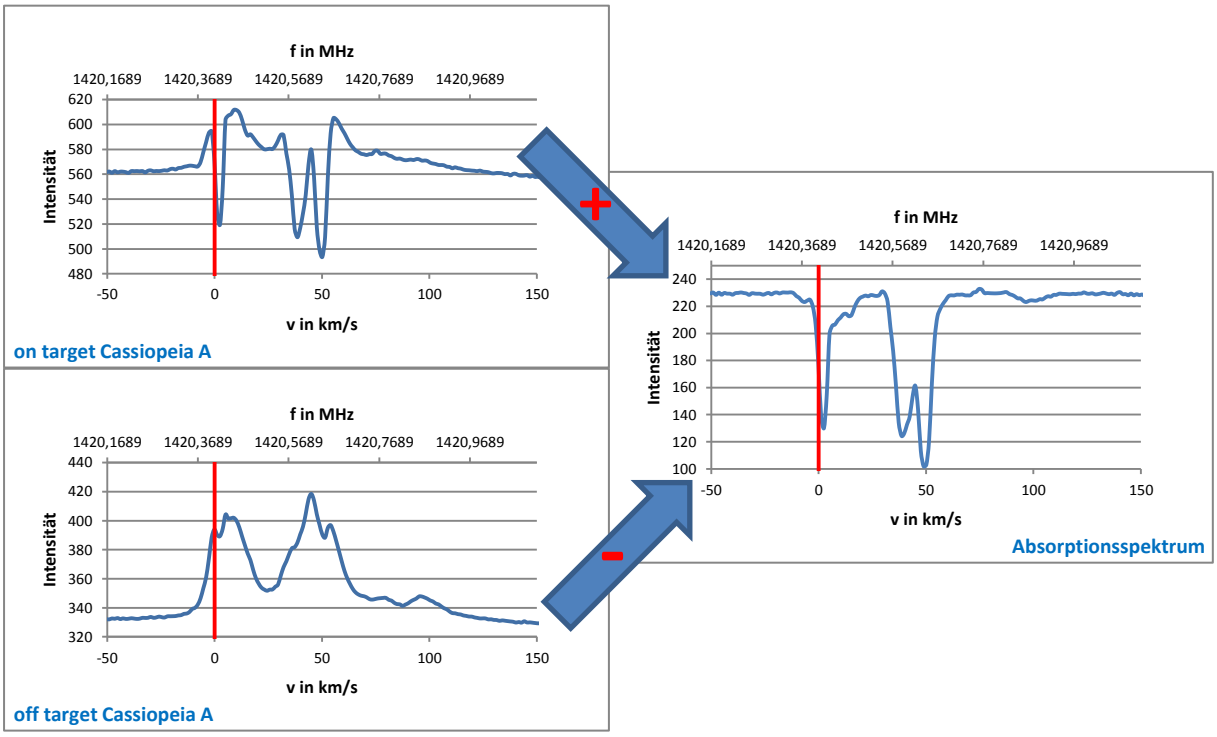
Abb. 6.3: Rotationskurve der Milchstraße (schwarz gemessen, blau anhand der sichtbaren Materie berechnet)

Die Graphen in Abbildung 6.3 deuten auf den ersten Blick auf die Existenz der Dunklen Materie hin. Allerdings ist unserer Meinung nach dieser Schluss nicht wirklich zwingend - auch wenn er noch so verlockend ist - denn zu viele Annahmen stecken in der Berechnung des blauen Graphen.

7. Fazit und Ausblick

Anhand vieler Beispiele konnten wir für den Lernort Astropeiler zeigen, dass man auch mit Schulwissen anhand konkreter Experimenten in die Welt der Astrophysik und insbesondere der Radioastronomie eindringen kann. Zurzeit entwerfen wir eine Homepage, damit Schüler auch weltweit unsere Messergebnisse online abrufen und bearbeiten können.

Da die Seitenzahl der schriftlichen Arbeit begrenzt ist, konnten wir viele interessante HI-Spektren nicht aufführen. Ein Spektrum wollen wir Ihnen jedoch nicht vorenthalten, das Absorptionsspektrum einer Wasserstoffwolke, welches wir mit Hilfe von Cassiopeia A aufgezeichnet haben. In der Abbildung oben links ist der 25m-Spiegel direkt auf Cassiopeia A ausgerichtet. In der unteren Abbildung 2,5° neben Cassiopeia A. Subtrahiert man das zweite Spektrum vom ersten, so erhält man das rechts aufgeführte Absorptionsspektrum des neutralen Wasserstoffs, der sich zwischen Cassiopeia A und dem Astropeiler auf dem Stockert befindet.



8. Danksagung

An erster Stelle möchten wir uns bei Herrn Horst-Günter Thum bedanken, der uns die Möglichkeit eröffnet hat, mit dem 10m-Spiegel Messungen durchzuführen. Er hat viel Zeit für uns geopfert und uns unsere Fragen stets ausführlich und mit viel Geduld beantwortet.

Ebenso verdient Herr Dr. Wolfgang Herrmann unseren Dank dafür, dass er uns bei den Messungen mit dem 25m-Spiegel mit Rat und Tat zur Seite stand.

Bedanken möchten wir uns auch bei unserem Betreuungslehrer Herrn Walter Stein, der uns motiviert hat und mit uns im Rahmen der Miniforschungs-AG am St. Michael-Gymnasium viele anregende Diskussionen geführt hat.

9. Link- und Literaturliste

Burkert, A. Kippenhahn, R.	1996	Die Milchstraße Beck Verlag
Carroll, B. W. Ostlie, D. A.	2007	An Introduction to Modern Astrophysics, Second Edition Pearson Education
Gondolatsch, F. Groschopf, G. Zimmermann, O.	1981	Astronomie II Klett-Verlag
Koller, J.	1997	Massenbestimmung der Milchstraße aus der Rotationskurve http://www.koller.info/science/docs/rotation.pdf
Mezger, P. G.	1992	Blick ins kalte Weltall Deutsche Verlags-Anstalt
Schweitzer, A.	2011	Einführung in die Astronomie und Astrophysik II http://www.hs.uni-hamburg.de/EN/Ins/Per/Schweitzer/milchstr_ss11.pdf
Verschuur, G. L.	1987	Die phantastische Welt der Radioastronomie Birkhäuser Verlag