

Die scharfen Augen von ALMA & Co.

In Bezug auf den Beitrag „Im Herzen der Jupiterstürme“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 4/2020, Rubrik „Nachrichten“, WIS-ID: 1421036, Zielgruppe: Mittelstufe

Markus Nielbock, Haus der Astronomie Heidelberg

Radioteleskope sind interessante Beobachtungsinstrumente. Obwohl sie wie optische Teleskope das Weltall untersuchen, weisen sie doch einige Unterschiede auf, die sie besonders machen. In dieser kurzen Abhandlung sehen wir uns einige besondere Aspekte davon an. Wir lernen, welche Eigenschaften die räumliche Auflösung grundlegend beeinflussen und warum man mit ihnen sogar die räumliche Verteilung von Materie in drei Dimensionen rekonstruieren kann.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Astropraxis, Planeten	Radioteleskop , Interferometer , Jupiter
Physik	Optik, Quantenphysik	Beugung , Rotationsübergänge , Schwarzer Körper
Fächer- verknüpfung	Astro-Chemie	Moleküle
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnis), Lehr-/Sozialformen, Unterrichtsmittel	Berechnungen und Vergleiche durchführen , Arbeitsblatt



Abbildung 1: Das ALMA-Radiointerferometer. Das Radioteleskop wurde in einer internationalen Kooperation gebaut und wird von ESO, AUI/NRAO und NAOJ gemeinsam betrieben (Bild: Y. Beletsky/ESO, beschnitten durch WIS).

Inhalt

1	Hintergrundinformationen	3
1.1	<i>Radiokontinuumstrahlung.....</i>	3
1.2	<i>Diskrete Radioemission</i>	4
1.3	<i>Opazität.....</i>	5
1.4	<i>Geschwindigkeiten und spektrale Verschiebungen</i>	6
1.5	<i>Auflösung eines Teleskops.....</i>	6
1.6	<i>Aktueller Bezug.....</i>	7
2	Aufgaben.....	7
2.1	<i>Auflösungsvermögen des Hubble-Weltraumteleskops</i>	8
2.2	<i>Vergleich mit einem Radioteleskop.....</i>	9
2.3	<i>Beobachtung von Jupiter mit ALMA.....</i>	9
3	Lösungen.....	11
3.1	<i>Auflösungsvermögen des Hubble-Weltraumteleskops</i>	11
3.2	<i>Vergleich mit einem Radioteleskop.....</i>	11
3.3	<i>Beobachtung von Jupiter mit ALMA.....</i>	11
4	Literaturverzeichnis	12

1 Hintergrundinformationen

1.1 Radiokontinuumstrahlung

Jegliche Materie im All sendet elektromagnetische Strahlung aus. Der Bereich der Millimeterwellen, der neben den Submillimeterwellen von ALMA empfangen werden kann, gehört als Teilbereich zum großen Bereich der Radiostrahlung. Immer wenn dabei eine Mischung aus verschiedenen Wellenlängen bzw. Frequenzen oder Energie emittiert wird, spricht man von einem Kontinuum. Die physikalischen Ursachen können allerdings recht unterschiedlich sein.

So wie in anderen Spektralbereichen auch, ist eine Quelle des Radiokontinuums die Temperaturstrahlung. Im Idealfall emittiert ein sogenannter Schwarzer Körper Strahlung, die nur von seiner Temperatur abhängt. Sie besitzt dabei das charakteristische Planck-Spektrum. Bei entsprechend niedrigen Temperaturen sind auch die Anteile des Radiobereichs signifikant vorhanden (siehe Abbildung 2). Oft wird das reale Radiospektrum jedoch durch Eigenschaften der Materie modifiziert.

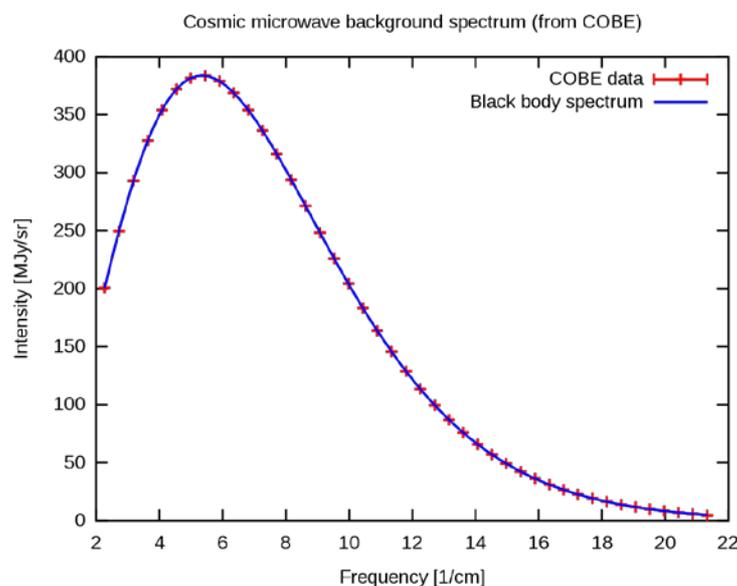


Abbildung 2: Kontinuierliches Radiospektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung gemessen mit COBE/FIRAS als Beispiel für ein nahezu perfektes Planck-Spektrum (Bild: Quantum Doughnut, gemeinfrei, Daten: Mather u. a. (1994); Fixsen u. a. (1996); Mather u. a. (1999)).

Eine wichtige weitere Quelle ist die Bremsstrahlung, die in der Astrophysik auch Frei-Frei-Strahlung genannt wird. Diese entsteht dann, wenn geladene Teilchen ihre Geschwindigkeit ändern. Dies geschieht beispielsweise in Röntgenröhren oder im Weltall in ionisierten, heißen Gaswolken. Hier werden die Elektronen durch das Coulombfeld von den positiv geladenen Atomkernen abgelenkt. Dieser Prozess stellt eine negative Beschleunigung dar, weswegen die Elektronen Strahlung abgeben müssen. Infolge dessen reduziert sich der Betrag ihrer Geschwindigkeit – sie werden gebremst.

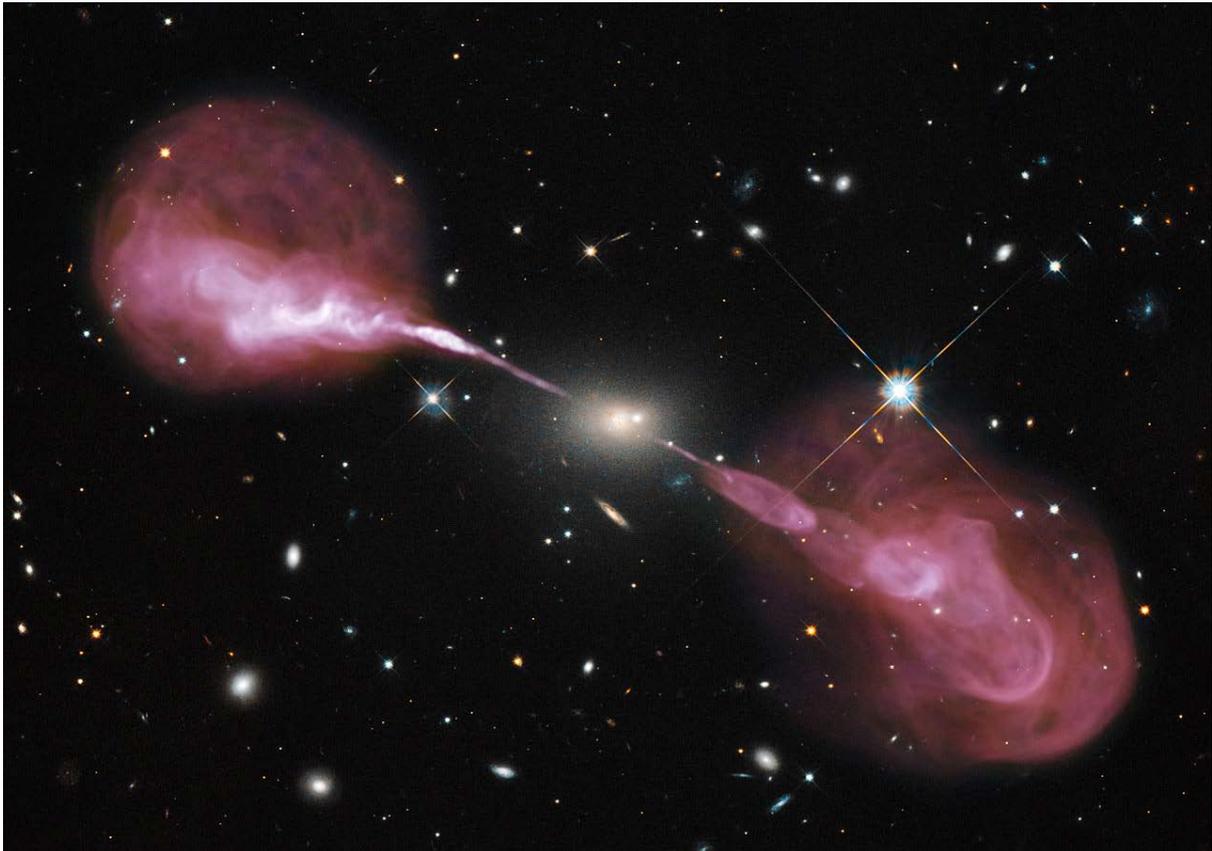


Abbildung 3: Aktive Galaxie Hercules A mit einem Radiojet (pink) (Bild: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)).

Ein Spezialfall ist die Synchrotronstrahlung. Typischerweise bewegen sich hierbei schnelle Elektronen in Schleifenbahnen durch ein Magnetfeld – wie z. B. bei Materiejets von entstehenden Sternen oder aktiven galaktischen Kernen (siehe Abbildung 3).

1.2 Diskrete Radioemission

Diskrete Spektrallinien entstehen bei quantisierten Übergängen. So wird das Balmerpektrum des Wasserstoffs im sichtbaren Licht durch spontane Zustandsänderungen eines Elektrons verursacht. Im Radiobereich sind die Energieübergänge geringer. Diese werden häufig von Änderungen des Rotationszustands von Molekülen erzeugt, die einen elektrischen Dipol besitzen. Die Rotation von Molekülen kann nur diskret aufgrund von quantenmechanischen Vorgängen variiert werden. Am häufigsten findet man im Universum das Molekül des Kohlenmonoxids. Die Rotationszustände werden durch Stöße mit Wasserstoffmolekülen angeregt und regen sich daraufhin unter Aussendung eines Photons ab. Diese Zustandsänderung durch Strahlung kann nur in diskreten Quanten erfolgen. Die Emission verrät sich daher stets durch eine charakteristische Wellenlänge. Auf diese Weise ist es möglich, die Chemie im Weltall zu studieren, da jedes Molekül sein eigenes Strahlungsspektrum besitzt.

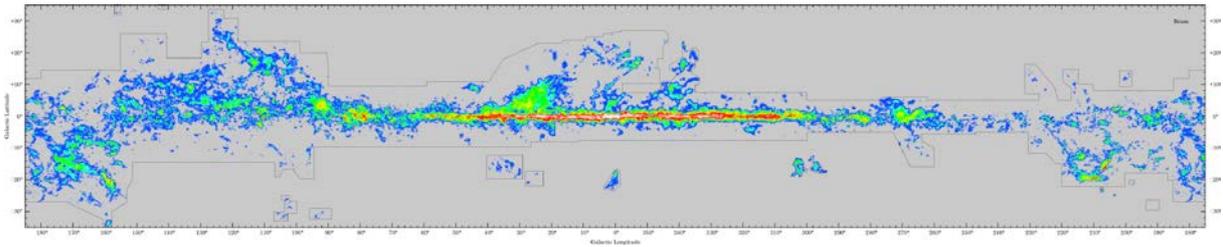


Abbildung 4: Karte der räumlichen Verteilung von Kohlenmonoxid (CO) in der Milchstraße bei einer Ruhefrequenz von 115 GHz (2,6 mm) nach Dame, Hartmann, und Thaddeus (2001).

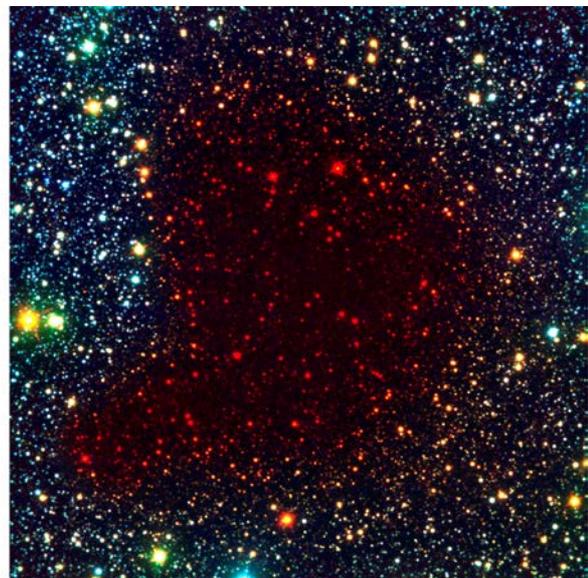
Weitere diskrete Spektren werden durch Hyperfeinübergänge produziert, wie die berühmte 21 cm-Linie des Wasserstoffs. Dieser Prozess beruht auf den unterschiedlichen Energieniveaus von parallelen und antiparallelen Spins von Proton und Elektron.

1.3 Opazität

Strahlung wird sowohl emittiert als auch absorbiert. Das gilt auch für Radiostrahlung. Besonders effektiv geschieht dies, wenn das absorbierende Material aus demselben Stoff besteht, welches die Strahlung emittiert. Dadurch werden gerade dieselben Wellenlängen besonders gut absorbiert, die vorher emittiert wurden. Wie stark diese Absorption die Strahlungsintensität reduziert, hängt davon ab, wieviel des absorbierenden Materials sich auf dem Sichtstrahl zwischen Quelle und Beobachter befindet. Ein Maß für die Undurchsichtigkeit, also das Vermögen, Strahlung zu schwächen, ist die Opazität. Sie hängt im Allgemeinen von der Beschaffenheit der Substanz und ihrer Dichteverteilung sowie der Wellenlänge der Strahlung ab.



B, V, I



B, I, K

Abbildung 5: Wolken aus Gas und Staub, die bei sichtbaren Wellenlängen undurchsichtig sind (links), werden mit zunehmender Wellenlänge (Infrarot, rechts) transparent (Bild: ESO)

So ist es in der Astrophysik möglich, Wolken aus Gas und Staub zu beobachten, die abhängig von der beobachteten Wellenlänge unterschiedlich transparent erscheinen. So schaut man je nach Wellenlänge bzw. Molekül unterschiedlich tief in eine Wolke hinein. Auf diese Weise ist es möglich, die dreidimensionale Struktur solcher Wolken zu ermitteln.

1.4 Geschwindigkeiten und spektrale Verschiebungen

Aufgrund des Doppler-Effekts verschieben sich Spektrallinien aufgrund der Radialgeschwindigkeit des emittierenden Mediums. Die Radialgeschwindigkeit ist die Komponente der Geschwindigkeit, die das Objekt mit dem Beobachter in einer geraden Linie verbindet. So lassen sich mit Molekülspektren im Radiobereich Geschwindigkeiten messen. In nicht-relativistischer Näherung gilt:

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Dabei sind v die gemessene Radialgeschwindigkeit, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit, λ_0 die Ruhewellenlänge und $\Delta\lambda$ die Wellenlängenänderung.

1.5 Auflösung eines Teleskops

Um Strukturen in einem astronomischen Objekt sichtbar zu machen, ist das Auflösungsvermögen des Teleskops entscheidend. Sie entspricht dem Winkel, unter dem zwei Objekte gerade noch getrennt wahrgenommen werden können. Sie folgt aus den Gesetzen der Wellenoptik. Teleskope werden demnach als Instrumente betrachtet, die die elektromagnetische Strahlung an ihrer Eingangsöffnung, der Apertur, beugen. Die Größe der Apertur definiert somit das Auflösungsvermögen gemäß:

$$\alpha = k \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Der Winkel α gibt somit die Trennschärfe im Bogenmaß an. Der Vorfaktor k folgt aus der Beugungstheorie und hängt von der Geometrie der Apertur ab, wird aber für eine Kreisblende mit dem Zahlenwert 1,22 gleichgesetzt. Das entspricht der Eintrittsöffnung eines Teleskops. Wir sehen auch, dass neben der Größe der Apertur D die beobachtete Wellenlänge eine Rolle spielt. Daher sind Radioteleskope sehr viel größer als optische Teleskope. Die größere Wellenlänge wird durch die Größe des Teleskops zum Teil kompensiert.

Für ein besonders gutes Auflösungsvermögen, wären riesige Teleskope nötig. Um die technischen Herausforderungen für den Bau solcher Instrumente zu meistern, nutzt man sogenannte Interferometer¹. Dabei werden mehrere Teleskope kohärent miteinander verbunden. Die räumliche Auflösung wird dann durch den Abstand zwischen den Teleskopen bestimmt. Der Nachteil dabei ist, dass das Auflösungsvermögen inhomogen über das Beobachtungsfeld verteilt ist und die Sammelfläche nicht der eines Einzelteleskops entspricht.

¹ Vgl. [WIS-Beitrag 12/2013](#)

1.6 Aktueller Bezug

In der Ausgabe 4/2020 der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ wird von Ergebnissen berichtet, die zeigen, dass während einer Eruption auf der Oberfläche des Planeten Jupiter Ammoniak aus den tieferen Atmosphärenschichten dieses Planeten an die Oberfläche getragen wird (de Pater u. a. 2019). Diese zeichnen sich auf Abbildungen im sichtbaren Wellenlängenbereich dadurch aus, dass die eher bräunlich verfärbte Bänder verblassen (siehe Abb. 6). Dabei wurden Spektrallinien von Ammoniakverbindungen im Radiobereich aufgezeichnet. Diese Beobachtungen erlauben aufgrund von Emissions- und Absorptionseigenschaften einen Blick Schichten, die bis zu 50 km tief in der Jupiteratmosphäre liegen.

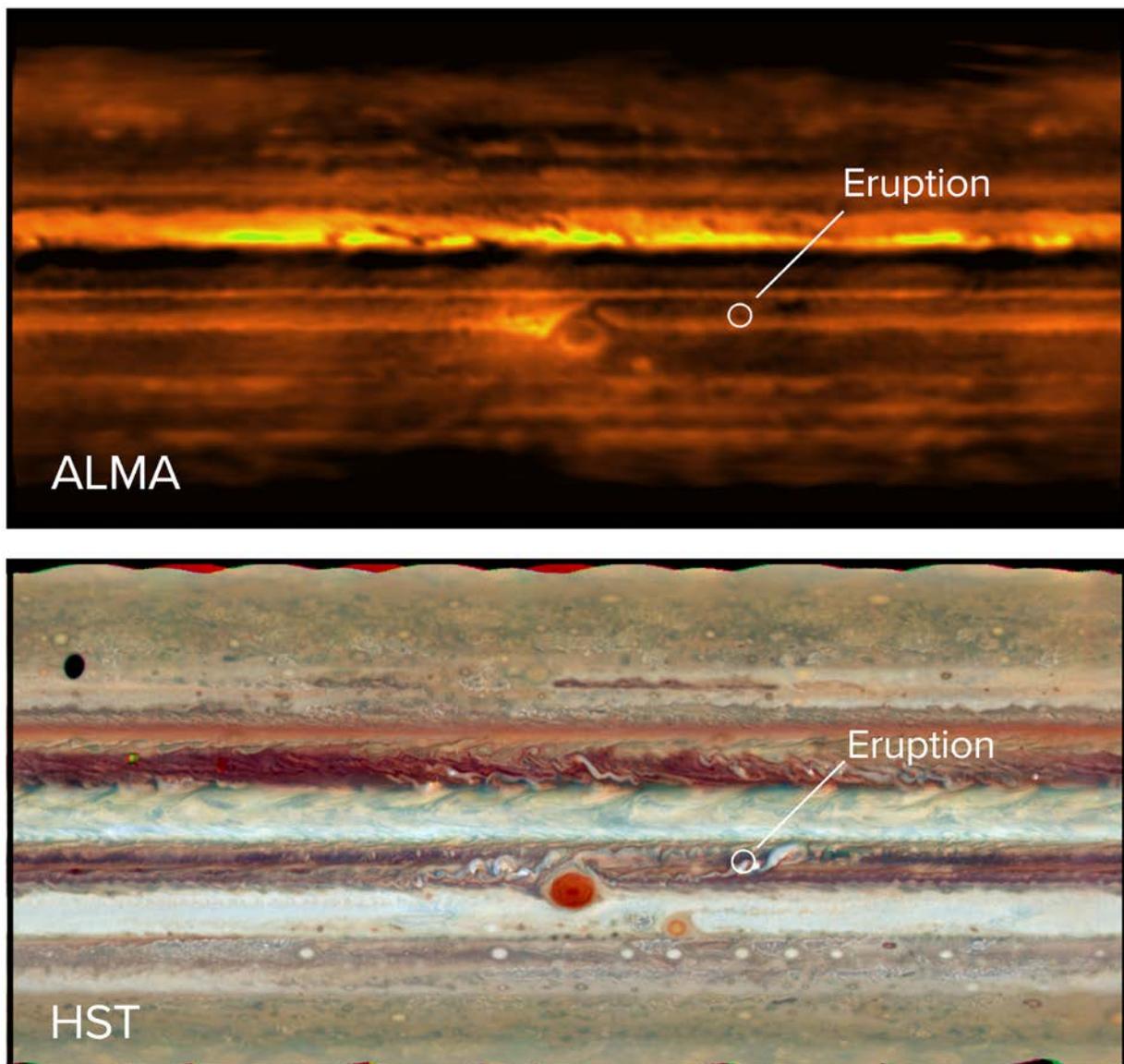


Abbildung 6: Oben: ALMA-Bild von Jupiter im Millimeterwellenbereich. Unten: Das zur gleichen Zeit aufgenommene Hubble Space Telescope-Bild (sichtbarer Spektralbereich) zeigt das gleiche Gebiet. Der Ausbruch im Bereich des südlichen Äquatorrings in der Jupiteratmosphäre ist in beiden Bildern erkennbar. ©: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), I. de Pater et al.; NRAO/AUI NSF, S. Dagnello; NASA/HubbleAufgaben.

2 Aufgaben

Verschaffen wir uns einen Überblick über den Zusammenhang zwischen dem Auflösungsvermögen verschiedener Teleskope und den beobachteten Wellenlängen.

In der Analyse der Jupiterbeobachtungen wurde Beobachtungen von verschiedenen Teleskopen und bei unterschiedlichen Wellenlängen kombiniert. Dabei ist es wichtig, dass die räumliche Auflösung der Beobachtungen möglichst vergleichbar ist, um einzelne Merkmale in allen Beobachtungen charakterisieren zu können.



Abbildung 7: Weltraumteleskop „Hubble“ (Bild: [STS081-E-5937](#), NASA)

Das Hubble-Weltraumteleskop (HST) steuerte Beobachtungen im sichtbaren Bereich (Wellenlänge um 500 nm) bei. Da die Aufnahmen durch keine Atmosphäre beeinträchtigt werden, sind sie beugungsbegrenzt, d. h. die räumliche Auflösung entspricht der einer kreisrunden Lochblende mit einer Apertur von 2,4 m.

2.1 Auflösungsvermögen des Hubble-Weltraumteleskops

Berechne das Auflösungsvermögen des HST gemäß der Gleichung:

$$\alpha = k \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Bedenke, dass α im Bogenmaß definiert ist. k beträgt 1,22. Gib α in Bogensekunden an!

2.2 Vergleich mit einem Radioteleskop

Das Radioteleskop „Effelsberg“ des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn gehört zu den größten der Welt. Der Hauptspiegel hat einen Durchmesser von 100 m.



Abbildung 8: Radioteleskop „Effelsberg“ (Bild: Dr.G.Schmitz, [Radioteleskop 20110820](#), beschnitten von Markus Niebock, [CC BY-SA 3.0](#)).

Die kleinste Wellenlänge, die dieses Teleskop beobachten kann, liegt bei 3 mm. Berechne das Auflösungsvermögen des Teleskops bei dieser Wellenlänge. Wie groß müsste das Teleskop sein, damit es dieselbe Auflösung wie das HST bei einer Wellenlänge von 500 nm erzielt?

2.3 Beobachtung von Jupiter mit ALMA

Die Wissenschaftler de Pater u. a. (2019) haben Jupiter unter anderem mit dem Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA²) beobachtet. Sie nutzen die Wellenlängenbereiche um 1 mm und 3 mm, in denen das Ammoniak (NH₃) zahlreiche Spektrallinien aufweist.

ALMA ist ein Radiointerferometer mit 66 einzelnen Teleskopen, deren Abstände variiert werden können (siehe Abb. 1). Dabei werden sie positioniert, dass die paarweisen Abstände, sog. Basislinien, zwischen den Teleskopen unterschiedliche Werte annehmen. Nur so ist gewährleistet, dass Strukturen des Objekts in möglichst vielen Winkelauflösungen registriert werden. Kleine Abstände sind empfindlich für großflächige Objekte, während große Abstände kleine Details wiedergeben können. Nur eine optimale Kombination von unterschiedlichen Basislinien stellt sicher, dass das Objekt möglichst realistisch abgebildet wird. Für die Beobachtungen werden dazu optimierte Konfigurationen der verfügbaren Teleskope angeboten.

² <https://www.eso.org/public/germany/teles-instr/alma/>

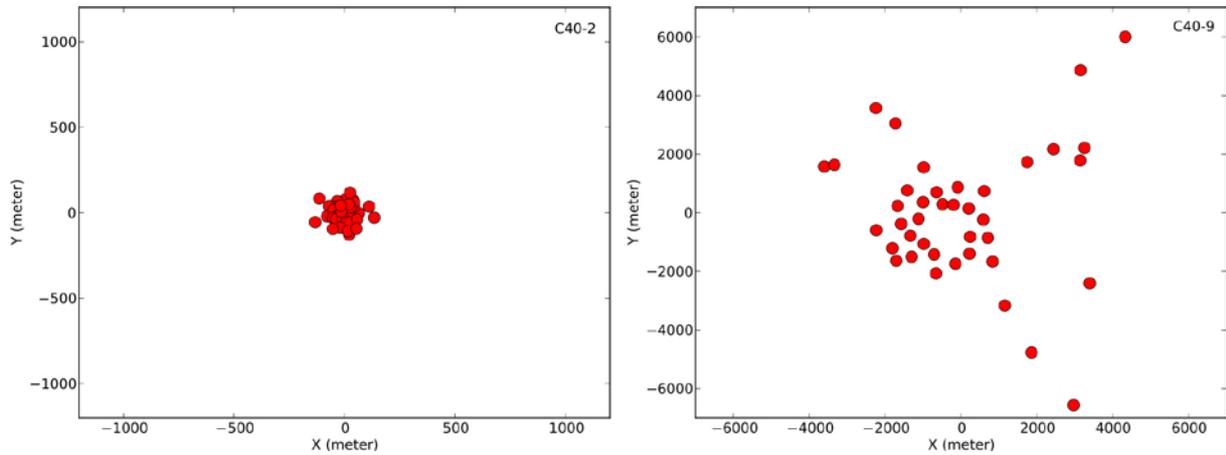


Abbildung 9: Konfigurationen des ALMA-Inferometers. Die einzelnen Teleskope können auf vordefinierte Positionen versetzt werden, um so Basislinien für unterschiedliche räumliche Auflösungen zu gewinnen. Gezeigt sind jeweils die Positionen der 66 einzelnen Teleskope in einem kartesischen Koordinatensystem. Die Jupiter-Beobachtung wurde mit einer sehr kompakten Konfiguration (links) durchgeführt. Die Konfiguration mit den größten Basislinien (rechts) erzielt die beste räumliche Auflösung.

Da Jupiter eine Winkelauflösung von etwa $35''$ besitzt, wurde eine relative kompakte Konfiguration mit Basislinien zwischen 15 m und 273 m gewählt, so dass seine ausgedehnte Emission gut wiedergegeben werden konnte.

Berechne aus diesen Werten die maximale Winkelauflösung für eine Wellenlänge von 1,3 mm.

Die geringste Entfernung von Jupiter zur Erde beträgt etwa 590 Millionen Kilometer. Berechne hierfür die Länge der Strukturen auf der Jupiteroberfläche, die mit solchen Beobachtungen noch erfasst werden können.

3 Lösungen

3.1

3.2 Auflösungsvermögen des Hubble-Weltraumteleskops

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} = 1,22 \cdot \frac{500 \text{ nm}}{2,4 \text{ m}} = 2,55 \cdot 10^{-7} = 2,55 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{3600''}{1^\circ} = 0,05''$$

3.3 Vergleich mit einem Radioteleskop

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} = 1,22 \cdot \frac{3 \text{ mm}}{100 \text{ m}} = 3,66 \cdot 10^{-5} = 3,66 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{3600''}{1^\circ} = 7,55''$$

$$\frac{\alpha_{\text{HST}}}{\alpha_{\text{Eff}}} = \frac{\lambda_{\text{HST}}}{D_{\text{HST}}} \cdot \frac{D_{\text{Eff}}}{\lambda_{\text{Eff}}} \stackrel{\text{def}}{=} 1 \Leftrightarrow D_{\text{Eff}} = \frac{\lambda_{\text{Eff}}}{\lambda_{\text{HST}}} \cdot D_{\text{HST}} = \frac{3 \text{ mm}}{500 \text{ nm}} \cdot 2,4 \text{ m} = 14,4 \text{ km}$$

3.4 Beobachtung von Jupiter mit ALMA

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} = 1,22 \cdot \frac{1,3 \text{ mm}}{273 \text{ m}} = 1,2''$$

$$\tan \alpha = \frac{r}{d} \Leftrightarrow r = d \cdot \tan \alpha = 5,9 \cdot 10^8 \text{ km} \cdot \tan 1,2'' \approx 3430 \text{ km}$$

4 Literaturverzeichnis

- Dame, T. M., Dap Hartmann, und P. Thaddeus. 2001. „The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey“. *The Astrophysical Journal* 547 (2): 792–813. <https://doi.org/10.1086/318388>.
- Fixsen, D. J., E. S. Cheng, J. M. Gales, J. C. Mather, R. A. Shafer, und E. L. Wright. 1996. „The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full *COBE* FIRAS Data Set“. *The Astrophysical Journal* 473 (2): 576–87. <https://doi.org/10.1086/178173>.
- Mather, J. C., E. S. Cheng, D. A. Cottingham, R. E. Eplee Jr., D. J. Fixsen, T. Hewagama, R. B. Isaacman, u. a. 1994. „Measurement of the Cosmic Microwave Background Spectrum by the *COBE* FIRAS Instrument“. *The Astrophysical Journal* 420 (Januar): 439. <https://doi.org/10.1086/173574>.
- Mather, J. C., D. J. Fixsen, R. A. Shafer, C. Mosier, und D. T. Wilkinson. 1999. „Calibrator Design for the *COBE* Far-Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS)“. *The Astrophysical Journal* 512 (2): 511–20. <https://doi.org/10.1086/306805>.
- Pater, Imke de, R. J. Sault, Chris Moeckel, Arielle Moullet, Michael H. Wong, Charles Goullaud, David DeBoer, u. a. 2019. „First ALMA Millimeter-wavelength Maps of Jupiter, with a Multiwavelength Study of Convection“. *The Astronomical Journal* 158 (4): 139. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab3643>.

Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden Sie unter der Adresse www.wissenschaft/schulen.de (Fachgebiet Astronomie).

Wir würden uns freuen, wenn Sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise Kritiken und Bewertungen an die Kontaktadresse des Autors senden könnten.

Markus Nielbock wird durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert.