

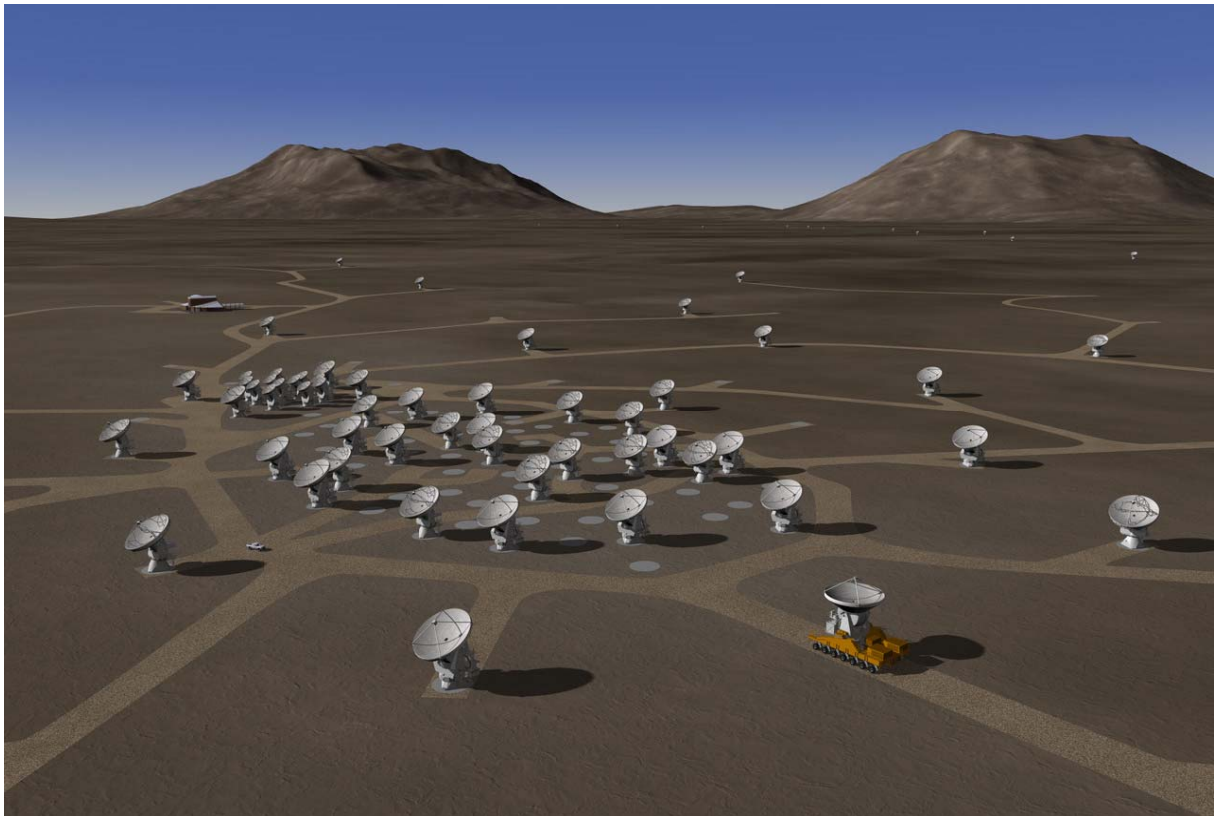
Mit ALMA zu neuen Horizonten der Astronomie

Michael Geffert (Argelander-Institut für Astronomie der Universität Bonn)

Einleitung

Das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) wird Strahlung aus anderen Wellenlängenbereichen, als wir sie von der visuellen Beobachtung kennen, empfangen. ALMA wird nicht nur erheblich schwächere Strahlung als je zuvor messen, sondern auch mit einer Schärfe Aufnahmen machen, die wir sonst nur von optischen oder Infrarotteleskopen kennen. In diesem Beitrag wollen wir ein wenig die Bedeutung deutlich machen, die diese Radioteleskopanordnung für die Zukunft der Astronomie haben wird.

Das ALMA-Projekt kann den Schüler zum Staunen bringen. Die Darstellung wesentlicher mit dem Projekt im Zusammenhang stehender physikalischer Zusammenhänge mündet in vier möglichen [Aufgaben](#) für die Schüler.

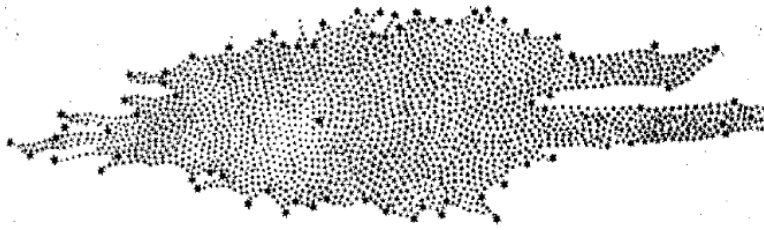


Künstlerische Darstellung von ALMA

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Quantenphysik, Schwingungen und Wellen	Schwarzer Körper, Planck'sches Strahlungsgesetz , Auflösungsvermögen , Interferenz
Astronomie	Planeten, Sterne, Galaxien	Extrasolare Planeten , frühe Galaxien

Einleitung - der Vorstoß zu neuen Wellenlängen

Als der berühmte deutsch-englische Astronom Wilhelm Herschel (1738-1822) sein erstes Modell der Milchstraße erstellte, war er der Meinung, dass die Sonne im Zentrum der Milchstraße liegen müsste. Herschel hatte durch Zählung der Sterne im Band der Milchstraße die Form unserer Heimatgalaxie bestimmt.



Herschels Modell der Milchstraße

Was Herschel damals aber noch nicht wusste, war, dass ihm der Blick in die Scheibe der Milchstraße durch Gas und Staub versperrt war, Herschel konnte nur die Sterne des Milchstraßenbandes in der Umgebung der Sonne beobachten und kam so zu dem falschen Schluss, dass die Sonne in der Mitte der Milchstraße liegt. Jahrelang blieb den Astronomen der Blick in die inneren Bereiche der Milchstraße versperrt, bis mit den ersten Beobachtungen im Radiobereich vor etwa 50 Jahren der erste Blick in die inneren Bereiche unserer Milchstraße gelang.

Immer dann, wenn Astronomen Strahlung aus einem neuen Wellenlängenbereich beobachteten, hat es in der Astronomie Überraschungen und wichtige neue Erkenntnisse gegeben. Die Röntgenastronomie hatte man zuerst als unwichtig abgetan, bis die ersten Beobachtungen z.B. Hinweise auf heiße Koronas der sonnenähnlichen Sterne gaben.

Es ist deswegen kein Wunder, dass sich Astronomen von einem neuen Teleskop, das im bisher noch nicht so erforschten Wellenlängenbereich des Submillimeterbereichs messen wird, viele neue Erkenntnisse versprechen.

Thermische Strahlung

Eine Kochplatte ist ein Gerät, das durch elektrischen Strom erwärmt wird. Eine Erwärmung führt normalerweise auch zu einer Abstrahlung von Energie. Diese Strahlung bei einer Kochplatte ist normalerweise so konzipiert, dass sie in dem Strahlungsbereich erfolgt, der gebraucht wird: Die Kochplatte sendet deswegen Wärmestrahlung aus, die an den Topf abgegeben wird, der dadurch ebenfalls auf eine höhere Temperatur gebracht wird. Wer die Kochplatte aber zu lange anlässt, weiß, dass diese nach einiger Zeit so heiß wird, dass sie anfängt, rot zu glühen. Die Strahlung verschiebt sich mit zunehmender Temperatur in den sichtbaren Spektralbereich.

Ein anderes Beispiel ist die Glühlampe in der Abbildung. Bei zu geringer Spannung führt die niedrigere Temperatur zu Licht, das sein Strahlungsmaximum im roten Spektralbereich hat.



Das Leuchten einer Glühlampe bei 700 °C (links) und 2500 °C (rechts). Deutlich sind die Farbunterschiede der Strahlung zu erkennen.

Für einen idealen Körper, dessen Energiebilanz durch die Abstrahlung eigentlich nicht wesentlich verändert wird, und der unabhängig von äußeren Einflüssen strahlen kann, beschreibt ein physikalisches Gesetz die Verteilung der Strahlung über die Wellenlänge. Es ist das Gesetz der Strahlung eines so genannten „Schwarzen Körpers“. Mit dem Begriff Schwarzer Körper wird dabei beschrieben, dass ein Körper so isoliert ist, dass er seine Strahlung unabhängig von seiner Umgebung aussendet. Die Strahlung eines Schwarzen Körpers verschiebt sich zu längeren Wellenlängen je kleiner die Temperatur ist.

Eine solche Idealisierung ist auf der Erde schwer zu realisieren. Im Weltall ist jedoch wegen der großen Entfernungen diese Bedingung bei vielen Körpern annähernd erfüllt! So lässt sich beispielsweise die Strahlung eines Sterns (auch unserer Sonne!) oder eines Planeten und ihre Verteilung über die Wellenlänge sehr gut mathematisch nach dem auf dem Modell des Schwarzen Körpers beruhenden Planck'schen Strahlungsgesetz beschreiben. Sterne sind im Prinzip chemisch nach dem gleichen Prinzip aufgebaut. Farbunterschiede bei Sternen bedeuten deswegen immer Temperaturunterschiede.

Aufgabe 1:

Suchen Sie im Winter am Himmel in südlicher Richtung die Gürtelsterne des Orions. Vergleichen Sie den hellen Stern links oberhalb (Beteigeuze) mit dem hellen Stern links unterhalb (Rigel) des Gürtels. Versuchen Sie die Farbunterschiede zu sehen! Im Sommer sieht man bei Anbruch der Dunkelheit vom Zenit aus in östlicher Richtung das Sternbild Leier mit dem hellen Hauptstern Wega, in westlicher Richtung steht Arktur im Sternbild Bootes. Beobachten Sie die Farbunterschiede von Wega und Arktur. (Den aktuellen Ausschnitt des Sternhimmels erhalten Sie z.B. über www.heavens-above.com)

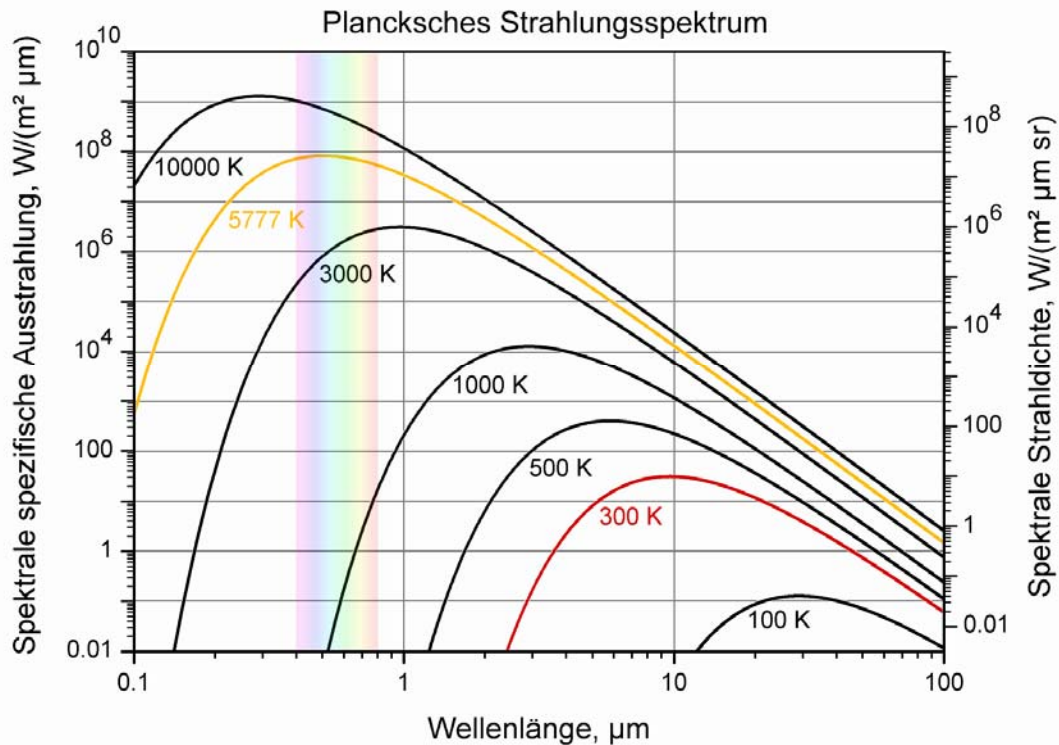
STERN	OBERFLÄCHENTEMPERATUR
Beteigeuze	3450 K
Rigel	12300 K
Arktur	4290 K
Wega	9500 K

Beteigeuze und Arktur erscheinen etwas rötlicher, da sie eine niedrigere Oberflächentemperatur besitzen.

Das Modell des Schwarzen Körpers hat deswegen eine große Anwendung in der Astronomie, weil es ermöglicht, aus den Intensitäten der Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen die Temperatur eines Objektes zu ermitteln.

Der wesentliche Punkt dabei ist, dass sich die Temperatur eines Sterns oder Planeten damit auch aus großer Entfernung bestimmen lässt!

Außerdem verschiebt sich das Strahlungsmaximum bei „kalten“ Objekten zu längeren Wellenlängen. Somit macht die Millimeter- und Submillimeter-Astronomie die Messung von bestimmten Objekten zum ersten Male überhaupt möglich! Auf **Seite 29** im Originalartikel von **SuW 5/2009** finden sich dazu unter dem Thema Submillimeter-Astronomie wichtige Hinweise.



Energieverteilung eines Schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen. Beachten Sie, dass wegen der logarithmischen Darstellung die Kurven nach unten eigentlich fortgesetzt werden müssten.

Max Planck, einer der Pioniere bei der Erforschung der Welt der Atome und ihrer Bauteile, konnte als erster die Verteilung der Intensitäten über die Wellenlängen eines Schwarzen Körpers berechnen. Aus diesem Grunde nennt man eine solche Verteilung auch das Plancksche Strahlungsspektrum.

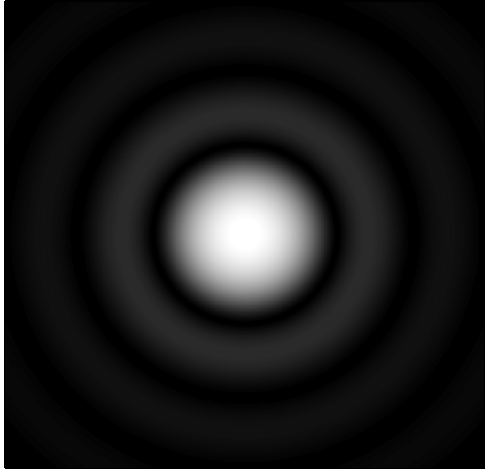
Was bedeutet ‚Auflösungsvermögen von Teleskopen‘?

Jeder, der in das Weltall blickt, weiß, dass er Objekte, die er beobachtet, mit zunehmender Entfernung schlechter sieht. Nahe Doppelsterne, die man in einem Fernrohr noch getrennt sieht, würden in größerer Entfernung für den Betrachter zu einem Objekt verschmelzen. Verantwortlich dafür ist entweder das so genannte Auflösungsvermögen des Teleskops oder die Unruhe der Erdatmosphäre (siehe dazu den WIS! Beitrag 3/2009 von Monika Maintz). Beide geben an, welchen kleinsten Winkelabstand zwei Sterne am Himmel haben dürfen, um gerade noch getrennt gesehen zu werden. Für kleinere Fernrohre (Linsendurchmesser < 10 cm) hängt dieser Winkel vom Durchmesser des Objektivs/Spiegels ab.

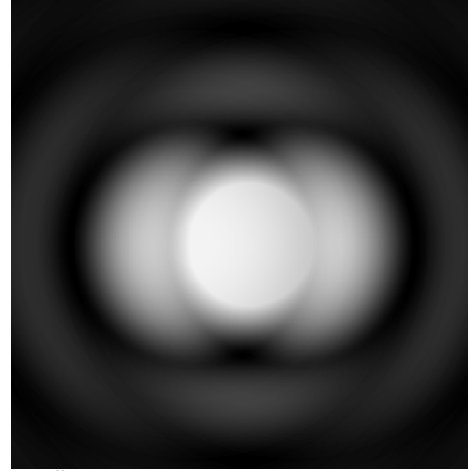
Die Winkel in der Astronomie sind übrigens häufig kleiner als 1 Grad. Kleinere Einheiten sind Bogenminuten (bezeichnet als (')); 60 Bogenminuten sind ein Grad) und Bogensekunden (bezeichnet als (")); 60 Bogensekunden sind eine Bogenminute). Ein Meterstab, betrachtet aus einer Entfernung von 200 km, entspricht einem Winkel von einer Bogensekunde. Oft wird heute in der Astronomie noch die Einheit Millibogensekunden (milli-arcsecond: mas) verwendet, wobei 1000 mas eine Bogensekunde sind.

Das Auflösungsvermögen lässt sich mit der Wellennatur des Lichts erklären: Wenn ein Stern in einem Fernrohr betrachtet wird, sieht man nicht einfach einen Punkt, sondern eine Helligkeitsverteilung, die durch die Beugung entsteht. Nach dem Huygens'schen Prinzip lässt sich die Ausbreitung der Welle beschreiben: Jeder Punkt auf einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer neuen elementaren Wellenfront angesehen werden. Die Überlagerung dieser Wellenfronten ergibt dann das Aussehen der sich ausbreitenden Welle.

Bei einer runden Blende (z. B. einem Teleskop) wird durch Beugung aus einem punktförmigen Lichtstrahl das Wellenmuster eines Beugungsscheibchens. Dieses enthält Wellenberge und Wellentäler (siehe Abbildung links). Nach Lord Rayleigh (1842-1919) kann man zwei Objekte gerade dann noch im Fernrohr trennen, wenn das Maximum des einen Objektes im ersten Wellental des anderen Objektes ist (siehe Abbildung rechte).



Beugungsscheibchen eines Sterns (Punktquelle)
(berechnet)



Überlagerung zweier Beugungsbilder
(berechnet)

Das Auflösungsvermögen ist eine wichtige Größe (ein Winkel), wenn man beurteilen will, welche Gegenstände man mit einem Teleskop in einer bestimmten Entfernung noch nachweisen kann. Jeder, der mit einem kleinen Fernrohr den Himmel beobachtet, versucht die „Grenze“ seines Teleskops an Hand von bekannten Doppelsternen zu finden.

Aufgabe 2:

Testen Sie das Auflösungsvermögen Ihres Auges mit Hilfe von Doppelsternen! Versuchen Sie folgende Doppelsterne am Himmel zu finden und beobachten Sie sie mit bloßem Auge und überprüfen Sie mit einem Fernglas: ξ Uma (11'), ε Lyra(2.3'), β Cyg(0.5, rote und blaue Komponente!).

Für ein ideales Teleskop lässt sich das Auflösungsvermögen nach folgender Formel berechnen:

$$\alpha = \arcsin \left(1,22 \frac{\lambda}{d} \right) \approx 1,22 \frac{\lambda}{d} .$$

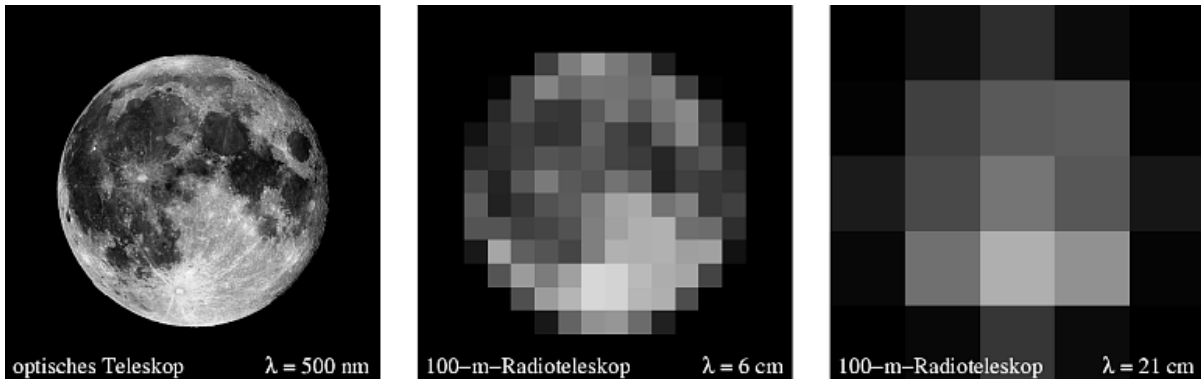
Dabei entspricht d dem Durchmesser der Öffnung des Teleskops und λ der Wellenlänge der Strahlung. Aus dieser Formel wird deutlich, dass das Auflösungsvermögen von der Wellenlänge der Strahlung abhängt. Man beachte, dass der Winkel α im Bogenmaß berechnet wird.

Aufgabe 3:

Wie groß müsste die Öffnung eines Fernrohrs sein, damit man den Fußabdruck von Neil Armstrong auf dem Mond noch entdecken kann? (Hinweis: Man schätze die Größe des Fußabdrucks ab, und ermittle über die ungefähre Entfernung des Mondes den Winkel des Fußabdrucks in Bogensekunden. Dann wende man obige Formel an. Sichtbares Licht hat eine Wellenlänge von etwa 500 nm.)

Die Unruhe der Luft setzt aber einer solchen Beobachtung vom Erdboden aus eine Grenze: Sie verbreitert die Sternbilder auf etwa 1 Bogensekunde. Teleskope, deren Öffnungen größer als etwa 10 cm sind, können deswegen bei normalen Beobachtungen ihr volles Auflösungsvermögen nicht nutzen.

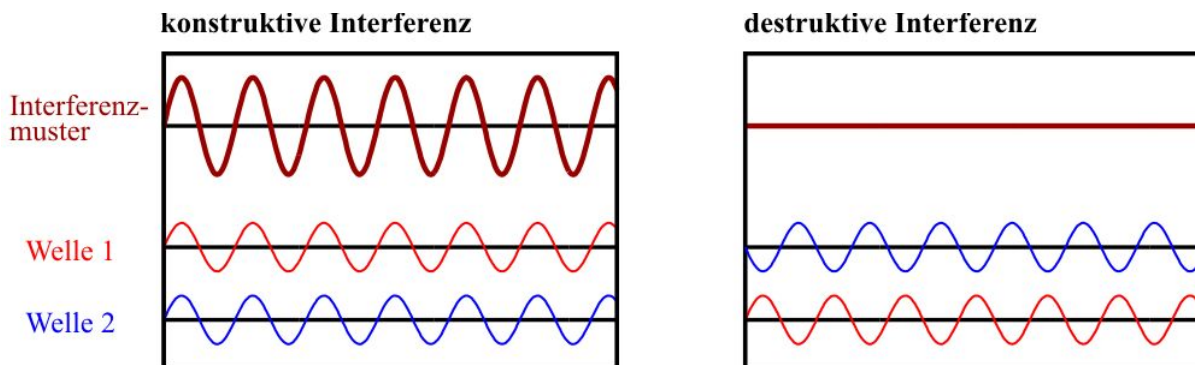
Nachdem klar war, dass die Radioastronomie wertvolle Beiträge zur Astronomie leisten kann, und man auch erkannte, dass bei den langen Wellenlängen im Verhältnis zu den optischen Wellenlängen das Auflösungsvermögen der Radioteleskope deutlich geringer war, wurde bald nach Techniken gesucht, die auch im Radiobereich gute Auflösungen liefern konnten.



Das Auflösungsvermögen des Radioteleskops in Effelsberg verdeutlicht an einer Mondaufnahme.
(http://www.astro.uni-bonn.de/english/public_radioastronomy.php)

Interferometer

Die geeignete Kombination zweier Wellenfronten, die von einem Sender ausgehen, die Interferometrie, ist der Schlüssel zu einem verbesserten Auflösungsvermögen in der Astronomie. Wenn Wellenfronten eines Senders, die an zwei Orten empfangen werden, überlagert werden, kann je nach Phasenunterschied der zu kombinierenden Wellenzüge an einem Ort eine Verstärkung oder eine Abschwächung entstehen. Der Phasenunterschied hängt aber sehr kritisch mit dem Abstand der beiden Orte und der Richtung, aus der die Strahlung kommt, zusammen. Im Grunde genommen arbeitet ein Interferometer wie ein Teleskop mit einer Öffnung, die dem Abstand der von einander entferntesten Einzelteleskope entspricht.



Prinzip der Interferometrie

Es soll aber auch nicht verschwiegen werden, dass der mathematische und beobachtungstechnische Aufwand zum Erreichen eines kompletten Bildes hoch ist. Auf diese Weise ist es aber dann möglich, auch in der Radioastronomie hohe Auflösungen zu erreichen. Mit einem maximalen Auflösungsvermögen von 10 Millibogensekunden wird ALMA schärfer als die normalen optischen Teleskope auf dem Erdboden sehen können. Das Auflösungsvermögen wird sogar zehnmal besser als das des Weltraumteleskops Hubble sein!

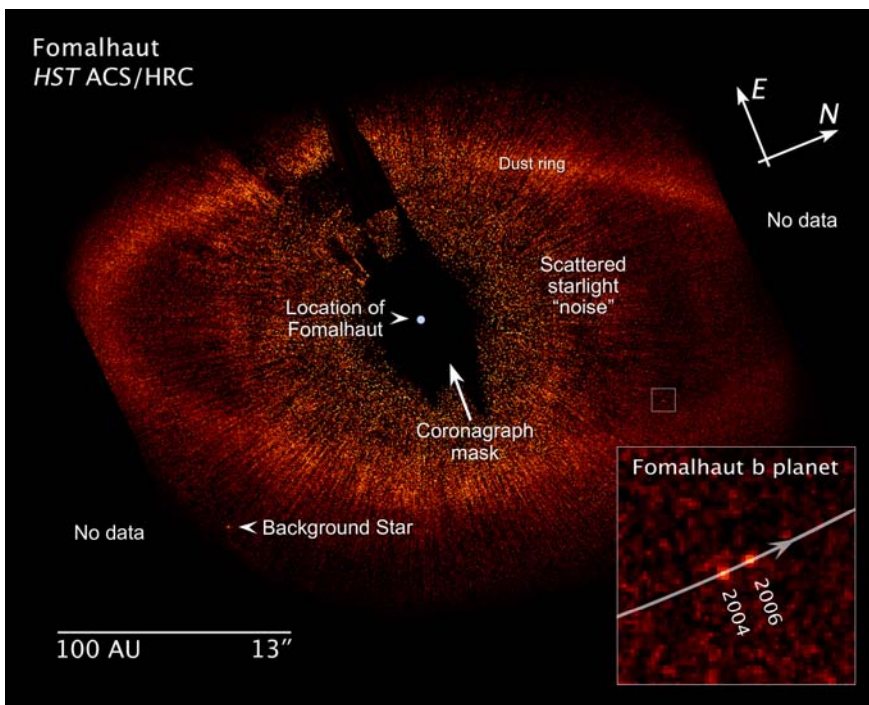
Welche neue Astronomie wird ALMA bringen?

Wie eingangs schon erwähnt wird der Vorstoß zu neuen Wellenlängen bzw. die verbesserte Empfindlichkeit und Auflösung generell neue Resultate bringen, die in ihrer Bedeutung vielleicht jetzt noch gar nicht abzusehen sind. Einige Themenbereiche, bei denen die Messungen mit ALMA aber jetzt schon absehbar neue aufregende Resultate bringen werden, kann man vielleicht jetzt schon angeben. Im Folgenden wollen wir zwei Beispiele angeben:

a) Planeten bei anderen Sternen

Wenn in der breiten Öffentlichkeit über Astronomie gesprochen wird, taucht fast immer die Frage nach außerirdischem Leben im Weltall auf. Auch wenn wir diese Frage wegen der großen Entfernungen vermutlich nie klären werden, haben Astronomen beim Nachweis von Planeten bei anderen Sternen in den letzten Jahren spektakuläre Ergebnisse erzielt. Im Herbst letzten Jahres gelangen schließlich die ersten direkten Aufnahmen von Planeten!

Bilder von Planeten bei anderen Sternen sind aus zwei Gründen schwierig mit visuellen Teleskopen zu erhalten: Zum einen ist der Winkelabstand eines Planeten von seinem Stern äußerst gering, zum anderen wird die Situation noch durch den extremen Helligkeitsunterschied im visuellem Licht verschärft. Mit Teleskopen, die im Submillimeterbereich arbeiten, wird das Intensitätsverhältnis von Planet zu Stern deutlich geringer, wie aus der folgenden Aufgabe 4 vielleicht ansatzweise deutlich wird. Damit wird die Entdeckung und Beobachtung von Planeten bei anderen Sternen in Zukunft deutlich erfolgreicher werden! betrachten Sie dazu die obere Abbildung in [SuW 5/2009 auf der Seite 34](#). Mit ALMA schaut man im Grunde zu, wie sich Planeten in mehr als 150 Lichtjahren



Entfernung von uns bilden! Aus der gleichzeitigen Beobachtung der verschiedenen Stadien der Planetenentstehung nebeneinander wird es vielleicht möglich sein, den zeitlichen Ablauf einer solchen Planetenbildung dann besser zu verstehen.

Das Foto des Planeten des Sterns Fomalhaut gehört zu den ersten Bildern von Planeten bei anderen Sternen. (www.phys.ncku.edu.tw/~apod/ap081114.html)

Aufgabe 4:

Bestimmen Sie aus der Grafik auf Seite 4 oben (Energieverteilung eines Schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen) das Intensitätsverhältnis der Strahlung zweier Schwarzer Körper, von denen einer eine Temperatur von etwa 300 K (Planet) und der andere eine Temperatur von 5777 K (Sonne) hat. Bestimmen Sie die Intensitätsverhältnisse für eine Wellenlänge von 100 μm und für eine Wellenlänge von 1,2 μm . Schätzen Sie grob das Intensitätsverhältnis für visuelles Licht ab. Hinweis: Zu Letzterem muss man die Grafik nach unten extrapolieren. Aussagen sind deswegen nur sehr grob möglich.

b) Galaxien aus der Frühzeit des Universums

Der Blick ins Universum ist im Grunde immer auch ein Blick in die Vergangenheit. Wenn wir Licht von unserer Sonne empfangen, ist dieses Licht vor etwa 8 Minuten von der Sonne ausgesendet worden. Bei den Nachbarsternen der Sonne beträgt diese Zeit schon ein paar Jahre. Im Verhältnis zur Lebensdauer eines Sterns ist das immer noch sehr klein. Das ändert sich aber bei den Galaxien. Das Licht vom Andromedanebel, eigentlich eine Nachbargalaxie von uns, braucht schon mehr als 2 Millionen Jahre. Die Laufzeit des Lichts kommt mit zunehmender Entfernung der beobachteten Objekte also mehr und mehr an das Lebensalter der Sterne heran. Wer etwas über die Frühgeschichte unseres Universums wissen will, muss deswegen die entfernten Objekte im Universum studieren.

Der Blick in große Entfernungen hat jetzt schon gezeigt, dass von dort ein überraschend großer Anteil an Submillimeterstrahlung kommt, der von warmem Staub in Galaxien stammen muss. Dieser Staub wird durch Sternentstehungsausbrüche in manchen Galaxien als Folge der Verschmelzung von Galaxien aufgeheizt. Solche Objekte werden ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien genannt. Allerdings ist es bis heute nur möglich, einzelne extrem leuchtstarke Objekte zu beobachten. Alle andere Strahlung kommt von dicht beieinander stehenden Galaxien, die derzeit nur als Untergrund wahrgenommen werden kann. Die verbesserte Empfindlichkeit und die höhere Auflösung von ALMA werden dann wesentlich mehr Einzelgalaxien sichtbar machen und damit die Untersuchung dieser alten Objekte aus der Frühzeit des Universums statistisch auf eine ganz neue Basis stellen.

Literatur

Offizielle Webseite von ALMA: <http://www.almaobservatory.org/index.php>
Homepage des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie Bonn

Grafiken

Grafiken aus Wikipedia unter der GNU Lizenz für freie Dokumentation
Offizielle Webseite von ALMA: <http://www.almaobservatory.org/index.php>
Webseite des Argelander Instituts für optische Astronomie:
http://www.astro.uni-bonn.de/english/public_radioastronomy.php

Danksagung

Herrn Norbert Junkes vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie Bonn danke ich für seine Diskussionsbeiträge.