

Radiowellen greifbar gemacht!

Timo Stein

Normalerweise verbindet man die Astronomie mit Bildern des sichtbaren Lichts, doch auch bei wesentlich längeren Wellenlängen gibt es spannende Phänomene am Himmel. Dieser WiS!-Beitrag soll sie dem Radiobereich theoretisch (Wissensteil) und praktisch (Praktikumsteil) näher bringen. Einfache Experimente können auch von Schülern unter geringem Aufwand durchgeführt werden, wobei das Interesse für die Astronomie in diesem sonst unbekanntem Bereich geweckt werden kann – so z. B. mit dem „Hörbarmachen“ von Radiosignalen aus dem Kosmos. Die Experimente münden in der Herausforderung, die kosmische Hintergrundstrahlung selbst nachzuweisen.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Schwingungen und Wellen, Thermodynamik, Quantenphysik	Radiowellen, Mikrowellen, Wellenlänge-Frequenz-Beziehung, Auflösungsvermögen, thermische Strahlung, Strahlungsleistung, Rayleigh-Jean-Gesetz
Astronomie	Astropraxis, Raumfahrt, Kosmos	Radioastronomie, kosmologische Parameter, geostationäre Satelliten, Äquatorkoordinaten, Zenitwinkel, Airmass
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma, Astro- Informatik	Trigonometrische Funktionen, Sekans, Bogen- und Winkelmaß; Audioausgabe von Daten, Datenspeicherung

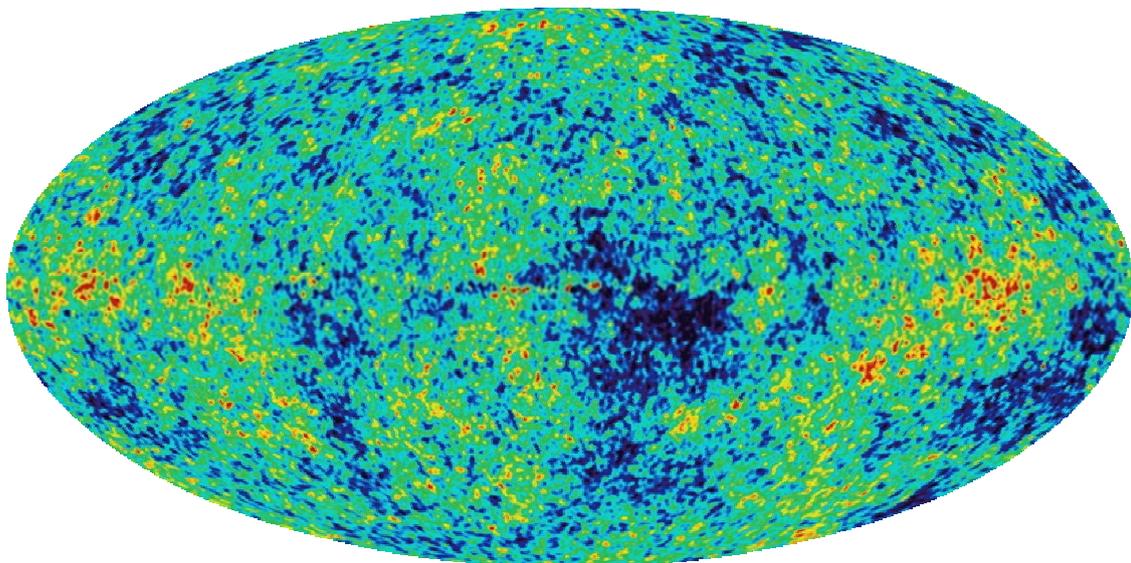
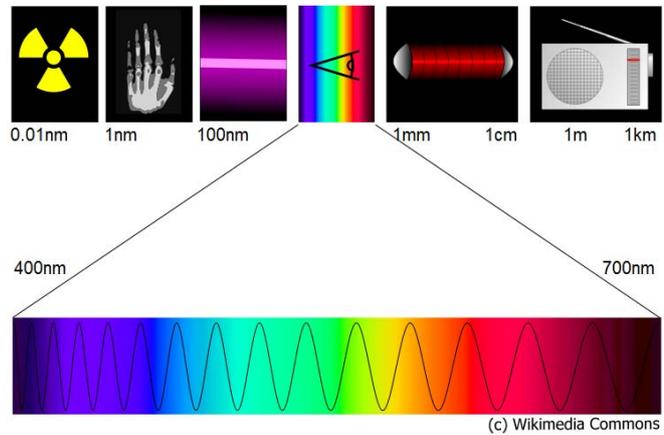


Abbildung 1: In der Anisotropie der 3K-Hintergrundstrahlung – aufgenommen im Radiobereich vom WMAP-Satelliten – sind viele Parameter des Universums verschlüsselt.

Wissensteil

Natur der Radiowellen

Das Licht, welches wir mit dem Auge wahrnehmen können, hat Wellenlängen zwischen 400 und 700 Nanometern (nm: 10^{-9} m). Radiowellen haben eine im Vergleich zum sichtbaren Licht wesentlich größere Wellenlänge zwischen wenigen Zentimetern bis hin zu Kilometern ($10^{-1} - 10^3$ m). So hat z. B. ein Radiosender mit einer Frequenz von 100 Megahertz (MHz) – 100 Millionen Schwingungen pro Sekunde – eine Wellenlänge von ca. 3 m, oder bei einer Wellenlänge von etwa 2,7 cm überträgt ein Satellit Fernsehsignale zu den uns allen bekannten Satellitenschüsseln (11 GHz). Dies folgt aus der Wellenlänge-Frequenz-Beziehung:



$$c = \lambda \cdot f$$

Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge und f die Frequenz.

Die Frequenzskala umfasst einen sehr großen Bereich, so dass man verschiedene Einheitenvorsätze verwendet, die in der folgenden Tabelle in Erinnerung gebracht werden:

Einheit	Symbol	Frequenz	Faktor
Hertz	Hz	1 Hz	10^0
Kilohertz	kHz	1000 Hz	10^3
Megahertz	MHz	1000 000 Hz	10^6
Gigahertz	GHz	1000 000 000 Hz	10^9
Terahertz	THz	1000 000 000 000 Hz	10^{12}

Eine erste kleine Übung:

Bestimme für die unten stehenden Objekte oder Quellen die Wellenlänge bzw. Frequenz.

Objekt / Quelle	Frequenz	Wellenlänge
Mensch		~ 1,75 m
Radiosender I	103,4 MHz	
Radiosender II	88,8 MHz	
W-LAN	2,4 GHz	
Mobilfunk (D-Netz)	1,8 GHz	
Ameise		2 mm

Lösung:

Objekt / Quelle	Frequenz	Wellenlänge
Mensch	171,31 MHz	~ 1,75 m
Radiosender I	103,4 MHz	2,90 m
Radiosender II	88,8 MHz	3,38 m
W-LAN	2,4 GHz	12,49 cm
Mobilfunk (D-Netz)	1,8 GHz	16,66 cm
Ameise	149,90 GHz	2 mm

$$c = \lambda \cdot f$$

→ umgestellt nach λ :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

→ umgestellt nach f :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Vorstellung von der Radiowelt – eine Übung

Wie würde der Blick in einen Klassenraum im Radiobereich aussehen, der folgende Dinge beinhaltet: Tafel, Stühle, Tische, Mobiltelefone (teilweise abgeschaltet), eingeschalteter Laptop auf einem Tisch (W-LAN eingeschaltet!)? Die Antwort zeigt die folgende Abbildung.

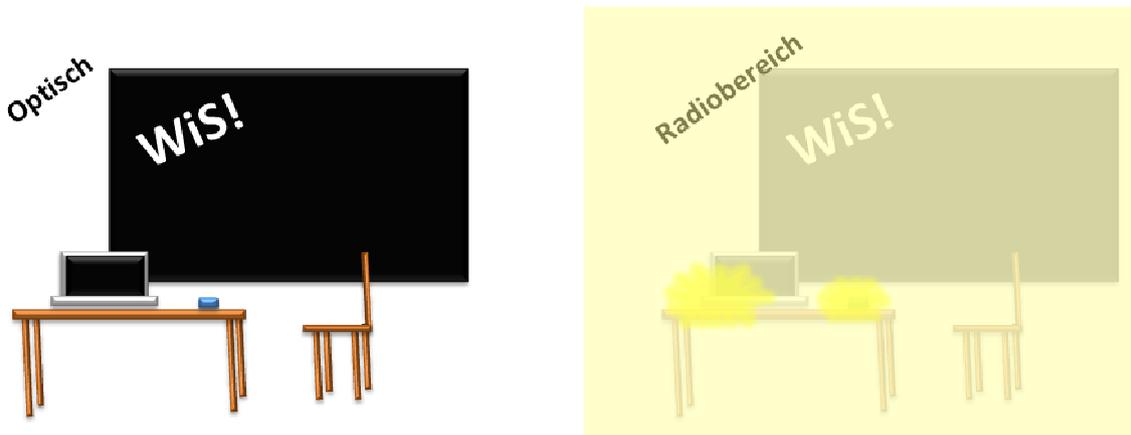


Abbildung 2: Zu erkennen sind im Radiobereich die deutlichen Radiostrahler – das Handy und die W-LAN-Karte des Notebooks. Ferner wird durch alle Gegenstände eine thermische Radiostrahlung emittiert, die als diffuser Nebel zu erkennen ist.

Radiowellensender beobachten – Aufgabe 1

Zum Beobachten von Radiowellensendern werden Radioantennen verwendet. Es gibt verschiedene Antennensysteme, wobei in der Astronomie meist die Parabolantenne zur Anwendung kommt. Bereits bei handelsüblichen Satellitenschüsseln fällt auf, dass diese im Vergleich zu optischen Teleskopen wesentlich größer sind.

Hat ein Radioteleskope mit typischerweise 30 m Durchmesser ($\lambda_{\text{Radio}} = 10 \text{ cm}$) deshalb auch ein höheres Auflösungsvermögen als ein 1-m-Teleskop für den visuellen Bereich ($\lambda_{\text{Optisch}} = 500 \text{ nm}$) – können damit „schärfere“ Bilder gewonnen werden? Wie hoch ist dazu im Vergleich das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges?



Abbildung 3: Radioteleskop in Effelsberg mit 100m Durchmesser

Tipp:

Das Auflösungsvermögen eines Teleskops kann durch die unten stehende Gleichung errechnet werden.

$$d \text{ [rad]} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Die Größe d steht für das Auflösungsvermögen im Bogenmaß [rad] ist, λ ist die Wellenlänge und D die Öffnung des Teleskops. Um d in das Winkelmaß zu überführen, kann man folgende Gleichung anwenden:

$$d \text{ [°]} = \frac{d \text{ [rad]} \cdot \pi}{180}$$

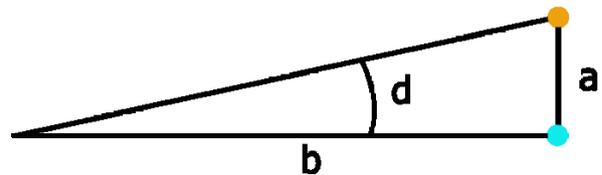
Lösung:

Instrument	D	λ	d [rad]	d [°]
Radioteleskop	30 m	10 cm	0,00406666	838''
Optisches Teleskop	1 m	500 nm	0,00000061	0,126''
Menschliches Auge	7 mm	500 nm	0,000087266	18''

Es zeigt sich, dass trotz des um den Faktor 30 größeren Durchmessers des Radioteleskops im Radiobereich noch ein weitaus schlechteres Auflösungsvermögen erzielt wird, als mit unserem Auge im visuellen Bereich.

Aufgabe 2

Welchen Mindestdurchmesser muss ein Radioteleskop haben, um im so genannten K_u -Band bei etwa 11 GHz zwei Radioquellen mit einem Abstand von $a=35$ m aus einer Entfernung von $b=2$ km auflösen zu können?



Lösung:

$$d = \tan^{-1} \frac{a}{b} = \tan^{-1} \frac{35 \text{ m}}{2000 \text{ m}} \approx 1^\circ \approx 0,0175 \text{ rad.}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{11 \cdot 10^9 \text{ Hz}} \approx 0,027 \text{ m.}$$

$$D = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d} = 1,22 \cdot \frac{0,027 \text{ m}}{0,0175} \approx 1,9 \text{ m.}$$

Das Radioteleskop muss einen Durchmesser von mindestens 1,9 m haben, um 1° im K_u -Band aufzulösen!

Hintergrund zum kosmischen Hintergrund

“Tune your television to any channel it doesn't receive, and about 1 percent of the dancing static you see is accounted for by this ancient remnant of the Big Bang.

The next time you complain that there is nothing on, remember that you can always watch the birth of the universe.”

(Bill Bryson)

Dieses sehr schöne Zitat stellt eine alltägliche Beziehung zur kosmischen Hintergrundstrahlung (auch als Cosmic Microwave Background (CMB) oder 3 K-Strahlung bezeichnet) heraus. Diese stellt ein direktes Überbleibsel des Urknalls dar. Man kann auch von dem „Echo des Urknalls“ sprechen.

Nach der Urknalltheorie expandiert das Universum wie ein Luftballon, den man aufpustet. Demnach müsste es im Umkehrschluss in seiner Frühphase sehr kompakt gewesen sein. Daraus folgt auch, dass die Temperatur sehr hoch war - so hoch, dass der Raum von einem Plasma erfüllt war. In einem solchen besteht eine enge Kopplung zwischen Licht und Materie. Dadurch werden Photonen, die durch das heiße Gas emittiert werden, andauernd gestreut oder absorbiert. Deshalb ist es auch nicht möglich, durch eine Kerzenflamme zu sehen (→ Abbildung rechts).

Der undurchsichtige Kosmos dehnte sich weiter aus, und die Temperatur fiel rapide ab. Etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall, als die Temperatur auf unter 3000 K gesunken war, konnten Elektronen und Atomkerne wieder rekombinieren und das Universum wurde transparent.

Bei der Kerzenflamme tritt ein analoges Verhalten auf: Sobald es zu kühl wird, erkennt man eine scharfe Schnittkante am äußeren Rand der Flamme – der Hintergrund ist wieder zu erkennen.

Mitten im „Ballon“ erscheint uns noch immer diese mittlerweile stark abgekühlte kosmische Kerzenflamme als eine von allen Seiten gleichmäßig einfallende Strahlung. Der Raum hat sich seit dem Urknall ungemein vergrößert, und die Wellenlänge der ursprünglich im visuellen Wellenlängenbereich abgegebenen Strahlung wurde immer mehr rotverschoben (vergrößert), so dass man heute die CMB im Mikrowellenbereich suchen muss. Daher auch der Name kosmischer Mikrowellenhintergrund.

Wenn man aber die Temperatur der CMB über den Himmel mit sehr empfindlichen Instrumenten analysiert, so fallen kleine Änderungen von ca. 1/100 000stel Grad in der sonst sehr gleichförmig erscheinenden Strahlung auf (siehe Titelbild). Genau jene kleinen Schwankungen in der Hintergrundstrahlung sind der Grund dafür, dass es zur Bildung von Galaxien und schlussendlich auch von Sternen und von uns Menschen kam.

Bis zum heutigen Tage begleitet uns das „Echo“ des Urknalls in Form eines leichten Rauschens im Radiobereich. Der Nachweis der 3 K-Strahlung gestaltete sich als äußerst schwierig, jedoch lohnenswert, da es sich um den Schlüsselbeweis für die Urknalltheorie handelt.



Praktikumsteil

Bei den folgenden Experimenten geht es darum, mit relativ einfachen Mitteln den Radiohimmel greifbar zu machen. Dazu werden verschiedene Instrumentarien verwendet. Hier ein Überblick:

- **Extremly Easy Radio Telescope (EERT – ein handelsübliches FM/AM-Radio):**
Hierbei handelt es sich um ein handelsübliches Radio, welches optional an einen PC (Mikrophoneingang) oder Kassettenrekorder angeschlossen werden kann.
- **LNB-Radioteleskop (LNB-RT):**
Bei diesem Modell wird ein normaler Low-Noise-Block Converter (LNB) an einen Sat-Finder bzw. Detektor angeschlossen. Dieses Teleskop verfügt über ein sehr schlechtes Auflösungsvermögen. Weitere Informationen sind in [2] zu finden.
- **Satellitenschüsselteleskop (- Advanced Student Radio Telescope – ASRT):**
Das obige Teleskop wird mit einer Satellitenschüssel ergänzt und hat so eine höhere Empfindlichkeit, aber auch eine bessere Winkelauflösung. Weitere Informationen in [5] und [2] verfügbar.

Experimente:



Versuch 1 (EERT):

Blitzlichtgewitter im Radiobereich

Nicht nur im visuellen Bereich sind Blitze als Naturerscheinung zu bewundern, sondern auch im Radiobereich sind diese noch gut nachweisbar. Dazu ist es einzig nötig bei Gewitter ein handelsübliches Radio im AM-Modus (AM := Amplitudenmodulation) zwischen zwei Kanälen zu betreiben. Bei jedem Aufblitzen ertönt neben dem gleichmäßigen Rauschen ein schwaches Knistern. Dieses entsteht durch die extrem heiße, ionisierte Luft. Es ist auch möglich, die „Radioblitze“ hörbar zu machen. Möchte man die Ereignisse später noch weiter analysieren (z.B. die Anzahl von Blitzen), so kann man diese einfach auf Kasette

oder direkt auf den PC (verbunden mit dem Mikrophoneingang des PCs) aufzeichnen.

Der Versuch kann bei verschiedenen Frequenzen wiederholt werden, um zu überprüfen, ob Blitze im Gegensatz zu Radiosendern kontinuierliche Radiostrahler sind, welche in einem breiten Spektrum emittieren.

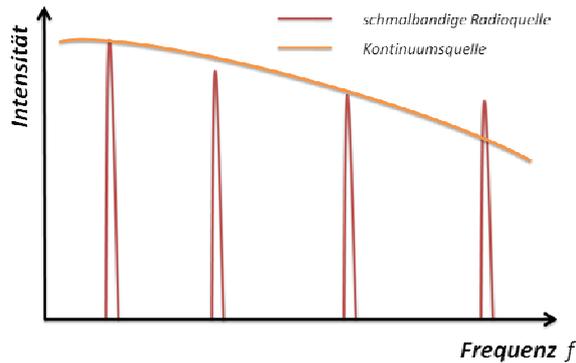
Versuch 2 (EERT):

Haben Radiosender ein breites Spektrum?

Im Anschluss an Versuch 1 kann man sich weiter mit dem Spektrum von Radioquellen auseinander setzen. Dazu ist es einzig notwendig, ein Radio im AM-/ FM-Modus (FM := frequenzmoduliert) durch den gesamten Empfangsbereich „durchzuhören“. Optional kann man dies wie oben bereits beschrieben aufzeichnen und als „Spektrum“ darstellen.



(c) jazzradio.com



Man stellt fest, dass im gesamten Frequenzband viele einzelne Sendefrequenzen auftauchen, die jedoch relativ scharf begrenzt sind. Somit haben Radiosender kein breites „Spektrum“, sondern sind auf wohl definierte Frequenzen eingestellt, damit es nicht zur Überlagerung kommt (rote Linien).
Vergleicht man nun das Spektrum von thermischen Quellen wie Blitzen, so stellt man bei diesen einen sehr breitbandigen, so genannten kontinuierlichen Verlauf fest (orange Linie).

**Versuch 3 (EERT / LNB-RT / ASRT):
Nachweis von extraterrestrischen Quellen**

Neben den irdischen Quellen gibt es eine Vielzahl von extraterrestrischen Quellen, die deutlich am Radiohimmel strahlen. Wir wollen uns nun Schritt auf Schritt weiter von unserem Heimatplaneten entfernen.

3.1 Meteoriten

Sternschnuppen kennt jeder von uns – die Leuchtspuren, welche sich über den Himmel ziehen. Es handelt sich dabei um kleinste Staubteilchen, die in der Hochatmosphäre verglühen und dort ein hell leuchtendes Plasma erzeugen. Dieses wirkt wie ein Spiegel für Radiowellen, wodurch es möglich ist, auch sehr weit entfernte Radiostationen zu hören. Dieses Phänomen lässt sich besonders gut zu Zeiten starker Meteorstürme wie den Perseiden beobachten. Am besten ist, wenn man sich dazu aus dem Internet die Frequenz eines weit entfernten Senders heraus sucht und versucht ein Signal zu empfangen.



3.2 Satelliten

Der Anblick von Satellitenschüsseln ist uns vertraut. Satelliten in der Erdumlaufbahn spielen eine Schlüsselrolle in der globalen Kommunikation und Navigation. Von besonderem Interesse sind hier die geostationären Fernsehsatelliten wie Astra oder Sirius. Diese befinden sich in einem speziellen Orbit, der es ihnen erlaubt, genau der Erdrotation zu folgen und daher vom Erdbeobachter aus gesehen an einer Stelle am Himmel zu verharren.

Man kann eine Satellitenschüssel auf einen solchen Satelliten richten und versuchen, ein Signal mit Hilfe eines Sat-Finders oder eines gewöhnlichen Satelliten-Receiver zu empfangen. Die genauen Positionen sämtlicher Satelliten unter Berücksichtigung des eigenen Standortes findet man im Internet.

Man stellt fest, dass es gar nicht so einfach ist, das kleine Radioteleskop zu justieren. Weiter wird man erkennen, dass es sich um eine recht lokale Radioquelle handelt, die also nicht diffus (wie die Milchstraße), sondern diskret am Himmel erscheint. Hat man alles richtig gemacht, so kann man bei Nutzung eines Satellitenreceivers nun auch Fernsehkanäle „sehen“. Bewegt man die Schüssel auch nur leicht, so kann man drastische Änderungen in der Bildqualität feststellen.

3.3 Mond & Sonne

Im visuellen Bereich ist er uns allen bekannt – der Mond. Mal zur Hälfte und manches Mal in voller Pracht kann man unseren Erdtrabanten im reflektierten Licht der Sonne bewundern. Im Radiobereich ist dies anders. Dort wird ein Großteil der Emission durch den Mond selbst abgegeben! Mit Hilfe einer Satellitenschüssel, einem LNB sowie einem so genannten Sat-Finder kann man sich nun auf die Suche begeben, genau diese Strahlung zuerspüren.

Dazu richtet man zunächst die Schüssel auf den Himmel und bringt den Zeiger des Sat-Finders auf die Nullposition. Nun wird der höchste Ausschlag gesucht und notiert. Bereits mit kleineren Schüsseln ist es möglich, so den Mond ins Visier zu nehmen. Sehr interessant ist auch, dass der „Radiomond“ ein ganz anderes Phasenverhalten – abhängig von der Wellenlänge – aufweist!

Auch die Sonne ist im Radiobereich deutlich zu beobachten. Sie strahlt noch wesentlich mehr als der Mond. Die Positionierung ist hier noch einfacher, da man sich den Schattenwurf des Instrumentariums zu Nutze machen kann.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist die Variabilität der solaren Radiostrahlung. Dieses lässt sich einfach durch den zeitlichen Verlauf über einen Zeitraum von typischerweise einigen Monaten leicht nachweisen.

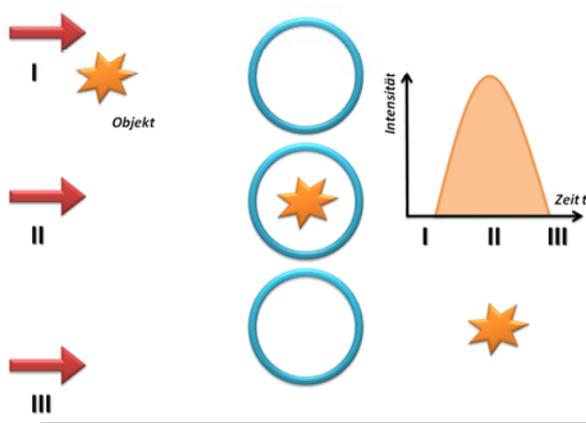
3.4 Weitere Radioquellen

Neben den oben vorgestellten Radioquellen des Sonnensystems gibt es viele Strahler in unserer Galaxie, wie Supernovaüberreste oder außerhalb (extragalaktische Objekte) wie die Radiogalaxie Cygnus A. Die leuchtkräftigsten Objekte sind in der unteren Tabelle zu entnehmen.

Objekt	Typ	Position (2000) α [h min], δ [° ']
Milchstraßenzentrum (Sagittarius A)	Galaxie	17 45,7 -29 00
Cassiopeia A	Supernovaüberrest	23 23,4 +58 50
Krebsnebel (Taurus A)	Supernovaüberrest	05 34,5 +22 01
Cygnus A	Radiogalaxie	19 59,5 +40 44

Doch diese sind im Vergleich so schwach, dass man sie nicht sofort erkennen kann. Um Objekte dieser Art dennoch nachzuweisen, kann man die so genannte „Drift“-Methode verwenden. Diese basiert darauf, dass sich ein astronomisches Objekt mit dem Himmelszelt bedingt durch die Rotation der Erde gleichermaßen mitbewegt.

Wichtiger Hinweis: Dieses Experiment kann nur mit etwas höheren Aufwand betrieben werden und muss gut organisiert sein!



Hierzu wird die Satellitenschüssel vor die Position des Objektes eingestellt (s. Graphik [I]). Mit der Zeit schiebt sich das Objekt vor den sichtbaren Bereich des Radioteleskops (blauer Ring). Dabei erhöht sich die gemessene Intensität leicht, um dann wieder beim Verlassen des Blickfeldes abzunehmen (s. Graphik [I-II]). Ist das Gerät empfindlich genug gewesen, so müsste ein leichter „Buckel“ im Intensitätsverlauf zu erkennen sein. Bei besonders vielen Messpunkten bietet es sich an, über mehrere Werte zu mitteln, um ein zufälliges Rauschen zu unterdrücken.

Diese Methode ist noch immer Neuland für Radioastronomieamateure, und so ist es umso spannender, diesen Versuch zu wagen.

Sonne und Mond sind mit dieser Methode sehr gut nachweisbar. Sinnvoll wird diese Methode bei Objekten außerhalb des Sonnensystems aber erst ab einer Schüsselgröße von etwa 1m. Es bietet sich weiter an, die Daten mit Hilfe eines einfachen Detektors auf einem PC zu speichern. Ein Beispiel für einen solchen ist im SuW-Artikel „Kosmologie mit Kaninchendraht und Wasser“ zu finden oder auch in [8].

Aufgabe:

Bei einer Satellitenschüssel mit 1m Durchmesser hat man eine Antennenkeule mit $1,9^\circ$. Wie lange dauert es bis das Objekt mit der „Drift“-Methode durch das Blickfeld bewegt hat?

Lösung:

sidertischer Tag $\cong 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4,09 \text{ s}$

$360^\circ \cong 1436 \text{ min}$

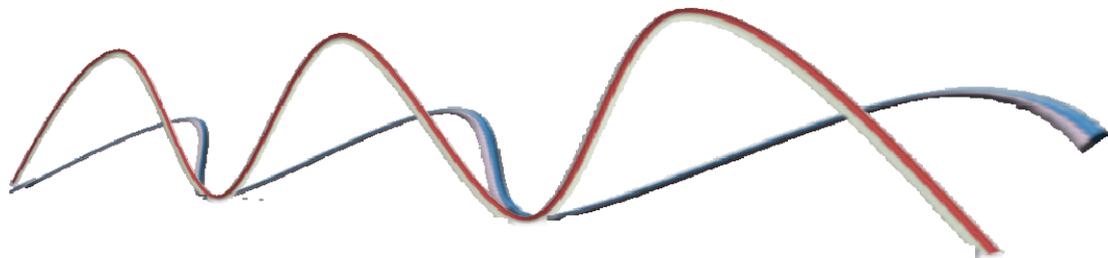
$1^\circ \cong 4 \text{ min}$

$1,9^\circ \cong 7 \text{ min } 36 \text{ s}$

Der Durchgang des Objektes dauert ca. 8 Minuten.

Versuch 4:

Polarisation – Optisch vs. Radio



Eine Eigenschaft von Licht ist dessen Schwingungsrichtung – die Polarisation. So genannte Polarisationsfilter lassen nur Licht mit einer bestimmten Schwingungsrichtung durch. Nimmt man einen solchen Filter und dreht diesen vor einem Taschenrechnerdisplay, so stellt man fest, dass das Bild immer dunkler wird bis sich der Prozess nach einer halben Drehung wieder umkehrt. Wiederholt man dieses kleine Experiment bei einer Glühbirne, so fällt kein signifikanter Unterschied auf. Daraus kann man darauf schließen, dass es sich um eine nicht polarisierte Strahlungsquelle handelt, die ihr Licht in alle Richtungen schwingend emittiert. Die klassische Vertreter solcher Strahlungsquellen sind thermische Strahler.

Analog zum Versuch m Visuellen kann man ihn auch im Radiobereich durchführen. Richtet man z. B. eine Schüssel auf einen Fernsehsatelliten aus und dreht den LNB in seiner Halterung, so stellt man eine deutliche Intensitätsänderung (mit dem Sat-Finder) fest, d. h. diese Satelliten senden polarisierte Radiostrahlung aus! Wiederholt man das Experiment bei der Sonne, so stellt man genau den gegenteiligen Effekt fest – keine Änderung in der Intensität. Somit handelt es sich bei ihr auch im Radiobereich um einen thermischen Strahler.

Versuch 5:

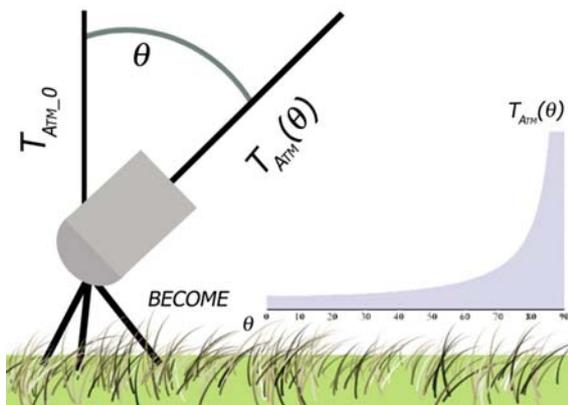
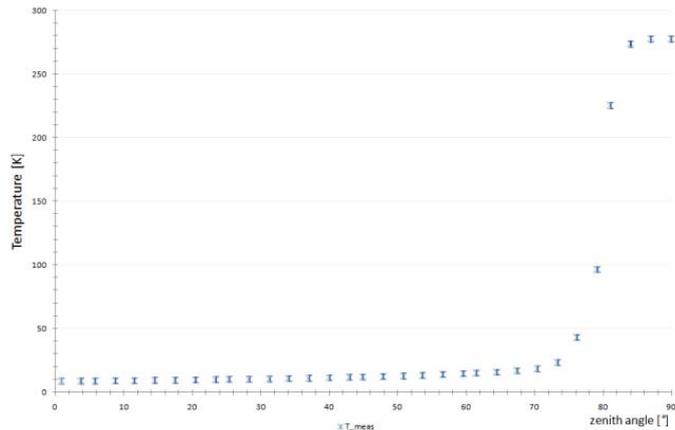
Luft ist nicht gleich Luft! – das Atmosphärenmodell

Die Erde ist von einer schützenden Atmosphäre umgeben, die sich auch im Radiobereich bemerkbar macht.

Obwohl die Atmosphäre nur sehr dünn ist, strahlt sie schwach im Radiobereich. So ist es möglich, beim Messen der Intensitäten bei verschiedenen Höhen über dem Horizont deutliche Ausschläge eines Sat-Finders im Vergleich zum Zenit festzustellen.

Am besten ist dieses Phänomen zu beobachten, wenn man mit gleichbleibender Geschwindigkeit den Himmel vom Zenit ausgehend in Richtung Horizont „abscannt“. Die sich ergebende Kurve beginnt mit einer sehr schwachen Intensität und endet bei der Umgebungstemperatur.

(→ Hierzu gibt es auch ein Hörbeispiel bei den Online-Materialien [atmosphäre.wav] + Flash-Animation [atmosphärenmessung.swf].)



Doch wie erklärt sich dieser Verlauf? Bei verschiedenen Winkeln sieht man auch durch verschieden lange „Luftschläuche“ hindurch, die jeder für sich Strahlung emittieren. Je länger der Schlauch ist, desto stärker ist die Emission. Aus dem oberen Diagramm kann man nun herauslesen, dass im Zenit die kleinste Luftmasse (der kürzeste Schlauch) und im Horizont die größte Luftmasse vorliegt.

Um den Verlauf präzise vorhersagen zu können, ist es hilfreich, diesen durch eine Funktionsgleichung abhängig vom Winkel θ zu beschreiben. Dabei ist θ der so genannte

Zenitwinkel, wobei 0° dem Zenit und 90° dem Horizont entspricht. Im Zenit hat man eine gewisse Ausgangstemperatur mit dem Wert T_{Atm_0} , wobei die Temperatur hier direkt proportional zu einer Intensität ist ($T \sim I \rightarrow$ Rayleigh-Jean-Gesetz). Mit Hilfe der Trigonometrie kann die Luftmassendicke (Airmass) $T_{Atm}(\theta)$ in Abhängigkeit von θ wie folgt bestimmt werden:

$$T_{atm} \propto T_{atm_0} \cdot \sec \theta$$

Hierbei ist $\sec \theta$ der sogenannte Sekans, eine trigonometrische Funktion, die als Kehrwert des Kosinus definiert ist.

Man sieht, dass T_{Atm_0} recht einfach aus einer Messung direkt ableitbar ist. Sobald man nämlich die gemessenen Intensitäten nicht mehr über den Zenitwinkel θ , sondern über den Sekans von θ aufträgt, ergibt sich ein linearer Zusammenhang – aus der Kurve wird eine Gerade, an Hand derer man direkt T_{Atm_0} aus der Steigung der Messung bestimmen kann. Um zu überprüfen, ob das Modell stimmt, kann man Theorie und Messung miteinander vergleichen. Bei Zenitwinkeln von über 70° , d. h. nahe dem Horizont passt das Modell bedingt durch die geometrische Vereinfachung (planparalleles Atmosphärenmodell) nicht mehr.

Abschlussaufgabe:

Entwickle ein Konzept, um die kosmische Hintergrundstrahlung nachzuweisen! Nutze dazu Dein hier neu erworbenes Wissen! Es handelt sich um eine sehr diffizile Angelegenheit, also mache Dir zunächst viele Gedanken und suche nach einen kreativen Lösungsweg!

Tipps:

- Atmosphärentemperaturmodell (Sekans verwenden)
- Vergleich zwischen Modell und Messung
- eine gleichmäßige Reststrahlung bleibt übrig

Zusatzaufgabe:

Nachdem man eine Reststrahlung gefunden hat, wie könnte man sie näher bestimmen und welche Schritte wären notwendig dafür?

Lösung Abschlussaufgabe:

Hier gibt es mehrere Möglichkeiten.

Im Weltraum:

Hier gibt es keine störende Atmosphäre, sondern einzig die Aufgabe mit einem Gerät direkt die Temperatur der Hintergrundstrahlung im Radio- bzw. Mikrowellenbereich zu bestimmen. Dies wird zumeist durch den direkten Vergleich mit einem thermischen Strahler (Schwarzer Körper) mit einer wohl definierten Temperatur an Bord eines Raumfahrzeugs vollzogen.

Vom Erdboden aus:

Hier kommt neben der „einfachen“ Messung der Strahlung die Kontamination durch die Strahlung der Erdatmosphäre hinzu. Diese lässt sich aber mit Hilfe des Atmosphärenmodells sehr präzise herausrechnen. Nun muss man im nächsten Schritt die Modellparameter aus der Messung ableiten (→ T_{Atm_0}) und den so gebildeten Verlauf im Schritt 3 von der realen Messung abziehen und überprüfen, ob eine (gleichmäßige) Reststrahlung verbleibt.

Lösung Zusatzaufgabe:

Eigenschaften der Reststrahlung:

→ *Isotropie (gleichmäßig über den Himmel verteilt) oder Anisotropie:*

Zwischen Messung und Modell müsste eine gleichmäßige Intensitätsdifferenz ($I \sim \text{Temperatur}$) über den gesamten Himmel verteilt übrigbleiben (→ z. B. nicht nur in einer Richtung messen). Bei lokalen Rauschquellen wie einem Satelliten treten eine deutliche Anisotropie / räumliche Beschränkungen auf.

→ *Polarisation*

Änderung der Intensität der Reststrahlung beim Verändern der Detektorpolarisation (z. B. durch Drehen des LNB) würde auf eine polarisierte nichtthermische (!) Strahlung hinweisen, bei der CMB sollte dagegen keine Änderung auftreten, da es sich hierbei um den besten bekannten Schwarzkörper handelt!

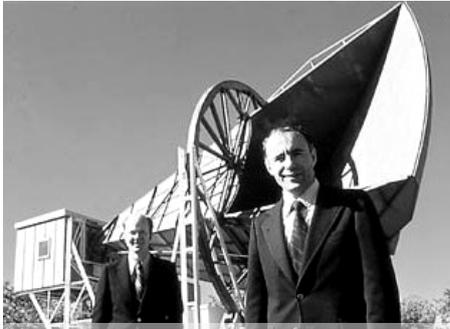
→ *Zeitliche Änderung*

Die Reproduzierbarkeit von Experimenten bzw. Messungen muss immer gegeben sein, um wirklich zu zeigen, dass es sich um eine reale Quelle handelt. Weiterhin muss gezeigt werden, dass es sich im Falle einer zeitlichen Invariabilität der Reststrahlung (i) wirklich um eine isotrope Verteilung handelt und (ii) vermutlich nicht aus der näheren „Umgebung“ entsprungen ist, sondern extragalaktischen Ursprung hat (→ möglichst viele Messungen zu verschiedenen Zeiten und über einen möglichst großen Bereich vornehmen).

Lückentext:

Nachdem Du Dein eigenes Konzept entwickelt hast, lese einen Zeitungsartikel über die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung im Jahre 1964 und fülle die Lücken aus.

Echo des Urknalls auf die Schliche gekommen



Die Entdecker der kosmischen Hintergrundstrahlung: Arno Penzias (r.) und Robert Wilson (l.) vor ihrer 20feet-Hornantenne der Bell-Labs in New Jersey.

Stockholm, Dezember 1978 Die beiden Physiker Arno Penzias und Robert Wilson der Bell-Labs in New Jersey erhielten letzte Woche den Nobelpreis für Physik für die Entdeckung der [redacted].

Diese stellt den ersten Augenblick des Universums dar, als der Raum für elektromagnetische Strahlung [redacted]

[redacted] wurde und sich die enge Kopplung zwischen Licht und Materie aufhob, Dieses »Echo« des Urknalls spiegelt sich bis zum heutigen Tage in Form einer Feuerwand mit kosmischen Ausmaßen wieder, die uns als

leichtes Rauschen im [redacted] erscheint und gilt als ein Schlüsselbeweis für die Urknalltheorie.

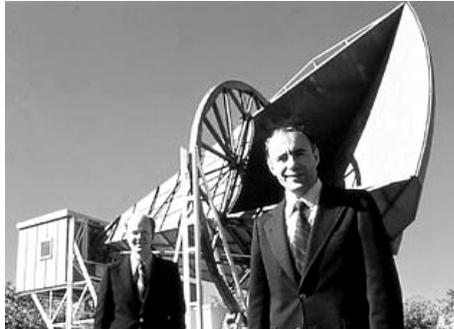
Mit ihren hochempfindlichen Geräten fiel den beiden Physikern 1964 auf, dass das [redacted] ihrer 20 feet-Hornantenne leicht über den anzunehmenden Wert lag. Um den Grund dafür auf die Spur zu kommen, prüften sie die Versuchsanordnung auf Herz und Nieren und stellten ein „weißes, dielektrisches“ Material fest, welches sich in der riesigen Antenne befand – gemeinhin bekannt als Taubenmist. Darüber nicht sehr erfreut entfernten sie die gedachte Fehlerquelle und warteten das gesamte System nochmals, doch die mysteriöse [redacted] blieb.

Dadurch sehr verblüfft machten die beiden Bell-Mitarbeiter einige Tests, um das Rauschen zu charakterisieren. Das Ergebnis klang irrwitzig: es handelt sich um eine extraterrestrische, thermische Strahlung, die isotrop mit einer Temperatur von etwa 3,5 Kelvin über den gesamten [redacted] verteilt war und sich nicht mit der Zeit zu [redacted] vermochte.

Zur selben Zeit arbeitete eine Forschergruppe der Princeton University an Nachweismethoden für die theoretisch vorhergesagte kosmischen Hintergrundstrahlung, die als Resultat des [redacted] folgte. Doch alle Bemühungen schlugen fehl. Durch einen Glücksfall kamen die beiden Bell-Physiker in Kontakt mit der [redacted]-Gruppe. Diese erkannten sofort, was vor ihnen lag – nicht mehr und nicht weniger als der [redacted] für den Urknall!

Lösung Lückentext:

Echo des Urknalls auf die Schliche gekommen



Die Entdecker der kosmischen Hintergrundstrahlung: Arno Penzias (r.) und Robert Wilson (l.) vor ihrer 20feet-Hornantenne der Bell-Labs in New Jersey.

Stockholm, Dezember 1978 Die beiden Physiker Arno Penzias und Robert Wilson der Bell-Labs in New Jersey erhielten letzte Woche den Nobelpreis für Physik für die Entdeckung der **kosmischen Hintergrundstrahlung**. Diese stellt den ersten Augenblick des Universums dar, als der Raum für elektromagnetische Strahlung **durchsichtig** wurde und sich die enge Kopplung zwischen Licht und Materie aufhob, Dieses »Echo« des Urknalls spiegelt sich bis zum heutigen Tage in Form einer Feuerwand mit kosmischen Ausmaßen wieder, die uns als

leichtes Rauschen im **Radiobereich** erscheint und gilt als ein Schlüsselbeweis für die Urknalltheorie.

Mit ihren hochempfindlichen Geräten fiel den beiden Physikern 1964 auf, dass das **Rauschen** ihrer 20 feet-Hornantenne leicht über den anzunehmenden Wert lag. Um den Grund dafür auf die Spur zu kommen, prüften sie die Versuchsanordnung auf Herz und Nieren und stellten ein „weißes, dielektrisches“ Material fest, welches sich in der riesigen Antenne befand – gemeinhin bekannt als Taubenmist. Darüber nicht sehr erfreut entfernten sie die gedachte Fehlerquelle und warteten das gesamte System nochmals, doch die mysteriöse **Reststrahlung** blieb.

Dadurch sehr verblüfft machten die beiden Bell-Mitarbeiter einige Tests, um das Rauschen zu charakterisieren. Das Ergebnis klang irrwitzig: es handelt sich um eine extraterrestrische, thermische Strahlung, die isotrop mit einer Temperatur von etwa 3,5 Kelvin über den gesamten **Himmel** verteilt war und sich nicht mit der **Zeit** zu ändern vermochte.

Zur selben Zeit arbeitete eine Forschergruppe der Princeton University an Nachweismethoden für theoretisch vorhergesagte kosmische Hintergrundstrahlung, die als Resultat des **Urknalls** folgte. Doch alle Bemühungen schlugen fehl. Durch einen Glücksfall kam die beiden Bell-Physiker in Kontakt mit der **Princeton-Gruppe**. Diese verstand sofort, was vor ihnen lag – nicht mehr und nicht weniger als der **Beweis** für den Urknall!

Einige Quellen:

- [1] <http://apwww.stmarys.ca/~lonc/radiotel.html>
(Anleitung für ein einfaches Radioteleskop)
- [2] <http://www.astronomie-heute.de/sixcms/media.php/767/radioastronomie.pdf>
(WiS!-Beitrag Radioastronomie von Olaf Fischer)
- [3] Wright, Peter: Ein Radioteleskop für Einsteiger, SuW 9/1999, S. 787-789
- [4] Wright, Peter; Neumann, Martin: Signale aus dem Kosmos, SuW Basics 1 (Astronomie für alle), S. 124-127
- [5] Stein, Timo; Förster, Christopher: Kosmologie mit Kaninchendraht und Wasser, SuW 7/2008, S. 84-90
- [6] <http://www.astroscience-berlin.org>
(BECOME-Projekt-Homepage)
- [7] http://www.monstein.de/astronomypublications/Moon_html/Mond2001V2German.htm
(Mondtemperatur bei 2,77 cm)
- [8] <http://www.astrosurf.com/luxorion/radioastronomy-rt.htm>
(Radioamateurseite – Detektor / „Drift“-Methode)