

Sterne sind weit weg – wie weit eigentlich?

In Bezug zum Beitrag „Präzise Messung der Entfernung eines Pulsars“ in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ (SuW 9/2013)

Dr. Reiner Hennig

Ein internationales Forscherteam um Adam T. Teller hat den Abstand des Pulsars PSR J2222-137 von der Erde sehr genau vermessen. Dieser Pulsar, eine besondere Art von Stern, ist 871,4 Lichtjahre von uns entfernt. Wenn man zu den Sternen aufsieht, sieht man ja nur die Richtung, aus der das Licht eines Sterns zu uns kommt, aber nicht, wie weit er von uns entfernt ist. Wie kann man nun trotzdem die Entfernung eines solchen Sterns bestimmen? Wie genau muss man dabei messen? Das Verfahren, das man hier zur **Entfernungsmessung** verwendet, beruht darauf, dass Objekte vor einem weit entfernten Hintergrund vor verschiedenen Stellen erscheinen, wenn man sie von zwei verschiedenen Orten aus betrachtet. Diese unterschiedlichen Stellen des Hintergrunds entsprechen zwei verschiedenen Sehrichtungen. Der Winkel zwischen diesen Sehrichtungen heißt **Parallaxe**.

Für die Mittelstufe werden Aufgaben bereitgestellt, mit denen man die Entfernungsmessung mit Hilfe der Parallaxe erleben und verstehen kann.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Astropraxis	Entfernungsmessung, Parallaxe
Mathematik	Trigonometrie	kleine Winkel, Konstruktion von Dreiecken, Tangensfunktion
Lehre allgemein	Kompetenzen, Unterrichtsmittel	Bestimmung von Winkeln durch Messung, aus maßstabsgerechter Zeichnung, aus Bogenlänge und Radius, Abschätzung von Seh winkeln



Der Hintergrund einer Flasche sieht anders aus,



wenn man sie von links ...



oder von rechts aus betrachtet.

Wie weit ist der Pulsar PSR J2222-137 von uns entfernt?

1) Die Entfernung des Pulsars wird mit 871,4 Lichtjahren angegeben. Das Licht legt in der Sekunde knapp 300 000 km zurück. Schätze ab, wie viele Kilometer dieser Stern von uns entfernt ist!

Der Daumensprung

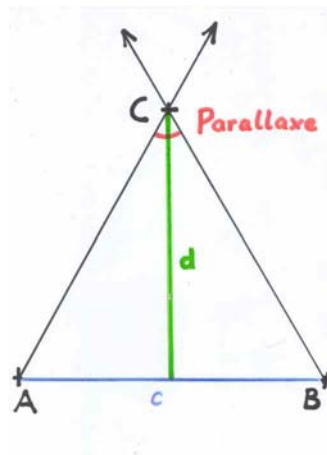
2) Um zu verstehen, wie die Entfernungsmessung hier funktioniert, machen wir zuerst ein Freihandexperiment. Nimm ein Lineal und halte es mit ausgestrecktem Arm so, dass es quer zur Sehrichtung steht. Halte den Daumen der anderen Hand senkrecht vor das Lineal, schließe dein linkes Auge und betrachte ihn mit dem rechten Auge. Danach schließe dein rechtes Auge und sieh mit dem linken Auge auf den Daumen. Er steht dann vor einer anderen Stelle des Lineals. Diese scheinbare Bewegung des Daumens wird als "Daumensprung" bezeichnet. Du kannst feststellen, wie groß die scheinbare Verschiebung ist, wenn du auf der Skala des Lineals siehst, wo sich der linke Rand des Daumens jeweils befindet. Behalte den Ort des Lineals bei, aber halte nun deinen Daumen in die Nähe deiner Augen und stelle den scheinbaren Abstand zwischen den beiden Stellungen des Daumens fest. Was beobachtest du?



3) Bitte einen Freund, dass er dir dabei hilft. Er soll den Abstand deiner Augen messen, den Abstand des Lineals von deinen Augen und den beiden Abstände deines Daumens von deinen Augen. Notiert alle gemeinsamen Werte und macht zwei maßstäbliche Zeichnungen eures Versuches.

4) Die scheinbare Bewegung kommt dadurch zu Stande, dass das linke Auge den Daumen in einer anderen Richtung sieht als das rechte. Dadurch erscheint der Daumen für das linke Auge vor einem anderen Hintergrund als das rechte Auge. Der Winkel zwischen diesen beiden Blickrichtungen wird als "Parallaxe" bezeichnet. Bestimme diese Winkel für beide Fälle.

Im Klassenzimmer



5) Zeichne auf dem Fußboden mit Kreide eine gerade Strecke mit der Länge c von 5 m. Am einen Endpunkt dieser Strecke zeichnen wir eine dazu senkrechte Strecke AB. Die Strecke AB liegt symmetrisch zur 5 m langen Strecke und hat die Länge $c = 1$ m. Zeichne nun auf der 5 m langen Strecke den Punkt C im Abstand $d = 1$ m, 2 m, 3 m, 4 m und 5 m von der Strecke AB. Für jeden dieser Punkte C miss die Parallaxe, den Winkel zwischen den Sehrichtungen.

Hinweis zur Messung: Ein Lineal von über 5 m Länge gibt es nicht in der Schule. Um eine so lange gerade Linie darzustellen, spannen 2 Menschen einen Faden, der länger ist als die zu zeichnende Linie, und halten ihn dann so, dass er durch den Anfangspunkt A und den Endpunkt C der Strecke geht. Es empfiehlt sich, einen Handfaden zu verwenden, der stabiler ist als ein normaler Nähfaden. Zwei andere spannen einen zweiten langen Faden und legen ihn durch die Punkte B und C. Die beiden Fäden kreuzen sich im Punkt C, und man kann dort den Winkel zwischen ihnen leicht mit dem Winkelmesser messen.

2

Auf dem Schulhof

6) Wiederhole diesen Versuch auf dem Schulhof. Mache nun aber die Strecke $c = AB$ 2 m lang und setze den Punkt C in einen Abstand $d = 1$ m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m und 20 m. Notiere in einer Tabelle die gemessenen Abstände und Winkel. Was fällt dir auf, wenn du die Winkel in beiden Versuchen vergleichst? Wie verhält sich die Parallaxe, wenn der Abstand zu AB größer wird? Was erwartest du für die Parallaxe, wenn der Abstand d sehr groß wird? Berechne für alle Messungen das Verhältnis von $(c/2) / d$. Dieses Verhältnis wird in der Mathematik als **Tangens** des Winkels bezeichnet.

Kleine Winkel

7) Nimm eine Papierrolle, wie sie für druckende Rechenmaschinen verwendet wird. Zeichne auf sie mit Hilfe von gespannten Fäden ein Dreieck, bei dem $c = 1$ cm und $d = 5$ m. Wie groß ist hier die Parallaxe? Ein normaler Winkelmesser ist hier nicht genau genug. Du kannst dir aber dadurch helfen, dass du dieses Dreieck als Teil eines großen Kreises betrachtest. Dieser Kreis hat einen Radius von 5 m und einen Umfang $u = 2 \cdot \pi \cdot 5$ m. Der Winkel wäre dann $360^\circ \cdot 1 \text{ cm} / u$

Anforderung für die Entfernungsbestimmung aus der Parallaxe

8) Bisher haben wir die Entfernung d benutzt, um dadurch die Parallaxe zu ermitteln. In der Beobachtung von Sternen misst man die Parallaxe und bestimmt dadurch die Entfernung eines Sterns. Sehr viele Sterne sind so weit von uns entfernt, dass man ihre Parallaxe nicht mehr messen kann. Sie bilden deshalb einen festen Hintergrund, vor dem man die scheinbare Verschiebung von nahen Sternen beobachten kann, wenn man sie von verschiedenen Orten aus beobachtet. Wenn man den Abstand d möglichst genau messen will, was muss dann für c , den Abstand zwischen A und B gelten?

Winkelabschätzung am Himmel

9) Größere Winkel am Himmel können wir mit der Hand abschätzen, hierzu reicht der Blick mit einem Auge. Strecke deinen Arm aus. Unter welchem Winkel erscheinen dir nun die Dicke deines kleinen Fingers, die Breite deines Daumens, die Breite deiner Hand und deine Handspanne? (Hinweis: Miss den Abstand d zwischen deinem Auge und dem kleinen Finger. Miss dann die Breite deines kleinen Fingers und teile sie durch den Umfang eines Kreises mit dem Radius d . Multipliziere dieses Verhältnis mit 360° und du erhältst den gesuchten Winkel. Verfahre entsprechend mit dem Daumen, der Hand und der Handspanne.)

Winkel am Himmel und auf der Erde

10) Wie genau kannst du einen Winkel mit dem Geodreieck messen? Wie kann man am Himmel Winkel messen, die kleiner sind als 1 Bogensekunde? Bei einer Fotografie wird alles, was dabei aufgenommen wird, auf eine ebene Fläche abgebildet. Dabei kommt es nur darauf an, aus welcher Richtung das Licht zum Fotoapparat geflogen ist, aber nicht, welche Strecke es dabei zurückgelegt hat.

Wenn wir den Sternhimmel ansehen, können wir ebenfalls nur feststellen, aus welcher Richtung sein Licht zu uns gekommen ist, aber wir sehen diesem Licht nicht an, wie weit es dabei geflogen ist. Von der Erde aus gesehen sieht der Sternhimmel genau so aus, als ob er eine große Hohlkugel wäre, an der die Sterne befestigt sind. Auf die Erdkugel kann man ein gedachtes Gradnetz legen und so jeden Ort auf der Erde durch zwei Winkel angeben, die geographische Länge und die geographische Breite. Vom Äquator bis zum Nordpol hat man einen Winkel von 90 Grad. Wie viel muss man vom 50. Breitengrad, der zum Beispiel durch die Stadt Mainz verläuft, nach Norden gehen, wenn man 1 Bogensekunde weiter nördlich sein will? (Hinweis: Die Erde hat einen mittleren Radius von 6371 km.) Entsprechend kann man jeden Ort an der Himmelskugel durch zwei Winkel angeben.

Parallaxen von 2 Punkten auf der Erde aus

11) Welche Parallaxe erwartet man für den Mond, wenn man ihn von zwei Stellen von der Erde aus betrachtet, die einen Abstand von 10 000 km haben, wenn der Mond eine Entfernung von ungefähr 300 000 km hat? Wie groß wäre in diesem Fall die Parallaxe für den Planeten Neptun, der bis zu 4650 Millionen km von uns entfernt ist?

Bestimmung der Entfernung eines Sterns

12) Für Fixsterne ließen sich damit keine Parallaxen nachweisen, sie sind alle sehr weit weg. F. W. Bessel, T. Henderson und F. G. W. Struve konnten erstmals im Jahre 1838 die Parallaxen von Sternen messen. Den großen Abstand c der Beobachtungspunkte A und B erhielten sie dadurch, dass die Erde die Sonne in einem Abstand von knapp 150 Millionen km umkreist. Wenn man im Abstand von 6 Monaten einen Stern betrachtet, wie lang ist dann die Strecke AB? Die erste Parallaxe, die sie fanden, war die für den Stern Nr. 61 im Sternbild Schwan. Sie betrug 0,293 Bogensekunden. (Eine Bogensekunde ist der 60. Teil einer Bogenminute, und eine Bogenminute ist der 60. Teil eines Winkels von 1°). Wie viele Kilometer ist dieser Stern von uns entfernt?

Die Einheit Parsec

13) Für kleine Winkel unter einer Bogensekunde gilt für die Parallaxe: Bei doppelter Entfernung ist die Parallaxe halb so groß, bei dreifacher Entfernung ein Drittel und bei vierfacher Entfernung ein Viertel. Wenn man die Parallaxe φ eines Sterns kennt, kann man dann leicht die Entfernung d bestimmen, wenn man weiß, wie weit ein Objekt von uns entfernt ist und eine Parallaxe von $1'' = 1$ Bogensekunde hat. Ist die Parallaxe $\varphi = 0,5''$, so ist die Entfernung d doppelt so groß, mit $\varphi = 0,1''$ ist d dann 10-mal so groß. Der Abstand d , für den $\varphi = 1,0''$ ist, beträgt $d = 3,26$ Lichtjahre $= 3,086 \cdot 10^{16}$ m. Dieser Abstand wird als 1 Parsec bezeichnet, abgekürzt 1 pc. (Das Wort Parsec wurde gebildet aus den Bestandteilen Par für Parallaxe und sec für Bogensekunde). Diese Längeneinheit wird bei den Astronomen gern verwendet, weil man damit die gemessenen Parallaxen φ ganz leicht in Entfernungen umrechnen kann: $d = 1 / \varphi$. Der Stern Nr. 61 im Schwan hat deshalb die Entfernung $d = 1 / \varphi = 1 / 0,293'' = 3,413$ pc. Die Fixsterne mit der geringsten Entfernung sind die Sterne α Centauri mit $\varphi = 0,75''$ und Proxima Centauri mit $\varphi = 0,76''$. Wie viele Parsec sind sie von uns entfernt?

Zur Entfernung des Pulsars PSR J2222-137

14) Inzwischen kann man sehr genau Parallaxen bestimmen. 1989 wurde der Satellit Hipparcos gestartet, der die Parallaxen von über 100 000 Sternen mit einer Genauigkeit von $1/1000''$ gemessen hat. Wie groß ist die Parallaxe des Pulsars PSR J2222-137? Welche Entfernung des Pulsars würde man erhalten, wenn seine Parallaxe 10 % größer oder 10 % kleiner wäre? Welche Abstände erhielte man, wenn die Parallaxe um $1/1000''$ größer oder kleiner wäre?

Verwendete Quellen

Unsöld, A. und Baschek, B.: Der neue Kosmos. Berlin Heidelberg. 6. Auflage 1999.

www.rssd.esa.int/index.php?project=HIPPARCOS&page=background

Die Darstellung kleiner Winkel mit Hilfe von gespannten Fäden fand ich in: Wagenschein, Martin: Verstehen Verstehen lehren. Weinheim, Berlin und Basel, 1968. S. 69 – 73.

Die Fotografien wurden von meiner Frau und von mir aufgenommen, die Zeichnung von mir erstellt.