

ASTRONOMISCHE ÜBUNGSREIHE DER ESA/ESO

Astronomische Schülerübungen basierend auf
Beobachtungsdaten des NASA/ESA
Hubble Weltraumteleskops
und der ESO Teleskope.



Werkzeuge



Inhaltsverzeichnis

Werkzeuge

Astronomische Werkzeuge

- Magnituden (Helligkeiten) Seite 2
- Scheinbare Helligkeit Seite 2
- Absolute Helligkeit Seite 3
- Verschiedene Farben, und Helligkeiten Seite 3
- Vom B-V Farbindex zur Temperatur Seite 5
- Die Distanzgleichung Seite 5
- Kurze Übungsaufgaben Seite 6
- Leuchtkraft und Intensität Seite 7

Mathematische Werkzeuge

- Kleine Winkel und große Distanzen Seite 8
- Einheiten und andere Naturkonstanten Seite 8

Für den Lehrer

- Für den Lehrer Seite 9

Astronomische Werkzeuge

Magnituden (Helligkeiten): Ein Konzept, das schon 120 v. Chr. entwickelt wurde

Wenn wir in einer klaren Nacht den Himmel betrachten, sehen wir Sterne. Manche erscheinen von der Erde aus hell, andere leuchten scheinbar nur sehr schwach. Manche dieser schwachen Sterne sind an sich sehr hell, aber sehr weit entfernt. Manche der hellsten Sterne am Himmel leuchten an sich nur sehr schwach, sind aber der Erde sehr nahe. Wenn wir den Himmel beobachten, müssen wir auf oder nahe der Erde bleiben und können nur die Intensität des Lichtes messen, das uns erreicht.

Dies sagt aber leider unmittelbar nichts über die inneren Eigenschaften eines Sterns aus. Wenn wir mehr über den Stern wissen wollen, zum Beispiel über seine Größe oder seine physikalische/eigentliche Helligkeit, müssen wir seine Entfernung von der Erde kennen.

Aus historischen Gründen wurden die Sterne, die mit dem bloßen Auge sichtbar waren, in sechs verschiedene Größenklassen, Magnituden genannt, eingeteilt. Dieses System wurde ursprünglich vom griechischen Astronom Hipparch um 120 v. Chr. erdacht und wird heute immer noch in einer leicht abgewandelten Form verwendet. Hipparch wählte die Einteilung, dass der hellste Stern die Magnitude 1 und der schwächste die Magnitude 6 bekam.

Die Astronomie hat sich seit den Zeiten von Hipparch sehr verändert! Anstatt nur das bloße Auge zu verwenden, wird das Licht nun mithilfe großer Spiegel gesammelt: entweder mit erdgebundenen Teleskopen wie dem VLT in der Atacama-Wüste in Chile, oder mit dem Hubble Weltraum Teleskop außerhalb der Erdatmosphäre. Das gesammelte Licht wird dann mit Instrumenten analysiert, die Objekte wahrnehmen können, die milliardenfach schwächer sind als das menschliche Auge sehen kann.

Auch heutige Astronomen verwenden immer noch eine leicht abgewandelte Form von Hipparchs Helligkeitsschema, genannt scheinbare Helligkeiten. Die moderne Definition der Magnituden wurde so gewählt, dass die Magnitudenmessungen, die schon in Gebrauch waren, nicht geändert werden mussten.

Die Astronomen verwenden zwei verschiedene Arten von Helligkeiten: *scheinbare Helligkeiten* und *absolute Helligkeiten*.

Scheinbare Helligkeit

Die scheinbare Helligkeit m eines Sternes ist ein Maß dafür, wie hell ein Stern von der Erde oder nahe der Erde aus erscheint.

Anstatt die scheinbare Helligkeit durch die Anzahl der beobachteten Photonen zu definieren, wird sie relativ zur Helligkeit und Intensität eines Vergleichssterne definiert. Das bedeutet,



Abbildung 1: Hipparch von Nicea (ca. 190-120 v. Chr.) bei der Arbeit.

Hipparch, ein griechischer Astronom, erfand den ersten Maßstab, um die Helligkeit der Sterne festzulegen.

Astronomische Werkzeuge

dass ein Astronom die Helligkeiten eines Sterns messen kann, indem er die Messungen mit den Helligkeiten von Standardsternen vergleicht, die schon auf absolute (im Gegensatz zur relativen) Art bestimmt wurden.

Die scheinbare Helligkeit m ist gegeben durch:

$$m = m_{\text{ref}} - 2.5 \log_{10} (I/I_{\text{ref}})$$

wobei m_{ref} die scheinbare Helligkeit des Vergleichssterne, I die gemessene Intensität des Lichts vom Stern und I_{ref} die Intensität des Lichts vom Vergleichssterne ist. Der Skalierungsfaktor 2.5 gleicht die moderne Definition an die historische, mehr subjektive Definition der scheinbaren Helligkeiten an.

Es ist interessant zu bemerken, dass die Skalierung, die Hipparch intuitiv benutzte, indem er nur das bloße Auge verwendete, schon logarithmisch ist, da unsere Augen auf diese Weise auf das Licht reagieren.

Zum Vergleich: Die scheinbare Helligkeit des Mondes ist -12.7 Magnituden, die Helligkeit der Venus kann bis zu -4 betragen, und die Sonne hat eine Helligkeit von -26.5 .

Absolute Helligkeit

Wir haben nun eine genaue Definition der

scheinbaren Helligkeit. Sie ist ein nützliches Werkzeug für die Astronomen, aber sie sagt uns nichts über die intrinsischen Eigenschaften eines Sterns aus. Wir müssen eine gemeinsame Eigenschaft einführen, die wir verwenden können, um verschiedene Sterne zu vergleichen und statistische Analysen zu betreiben. Diese Eigenschaft ist die absolute Helligkeit.

Die absolute Helligkeit M eines Sterns ist definiert als die relative Helligkeit, die ein Stern hätte, wenn er sich in einer Entfernung von 10 Parsec von der Sonne befinden würde (mehr über Parsec findet man im Kapitel über Mathematische Werkzeuge).

Da nur sehr wenige Sterne genau 10 Parsec von der Sonne entfernt sind, kann man eine Gleichung benutzen, die es erlaubt, die absolute Helligkeit von Sternen zu berechnen, die sich in verschiedenen Entfernungen befinden. Diese Gleichung funktioniert auch in der anderen Richtung — wenn man die absolute Helligkeit kennt, kann die Entfernung berechnet werden.

Verschiedene Farben, verschiedene Helligkeiten

Im späten 19. Jahrhundert, als die Astronomen Photographien verwendeten, um den Himmel zu erfassen und die scheinbare Helligkeit von Sternen zu messen, ergab sich ein neues Problem. Manche Sterne, die scheinbar die gleiche Hel-

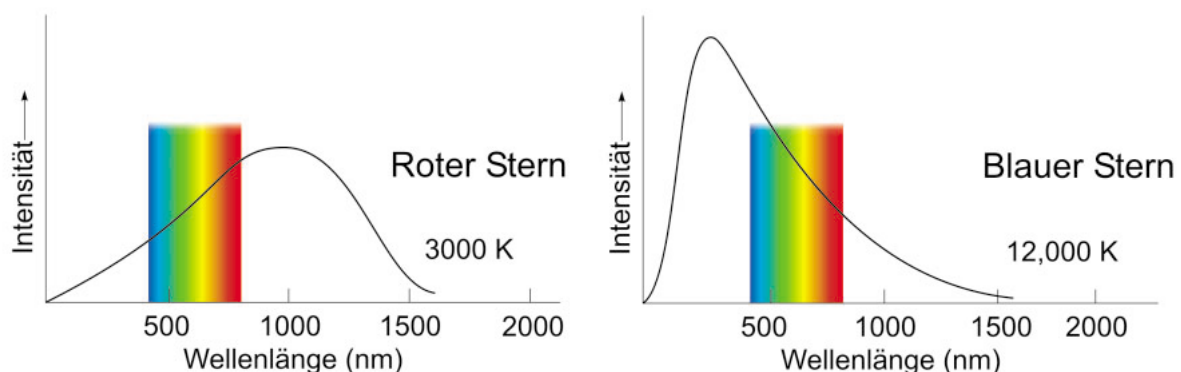


Abbildung 2: Temperatur und Farbe von Sternen

Dieses schematische Diagramm zeigt die Beziehung zwischen der Farbe eines Sterns und dessen Oberflächenhelligkeit. Gezeigt werden Intensität gegenüber der Wellenlänge für zwei hypothetische Sterne. Der sichtbare Teil des Spektrums ist dargestellt. Die Farbe des Sterns wird dadurch bestimmt, in welchem Teil des sichtbaren Spektrums die Spitze der Intensitätskurve liegt.

Astronomische Werkzeuge

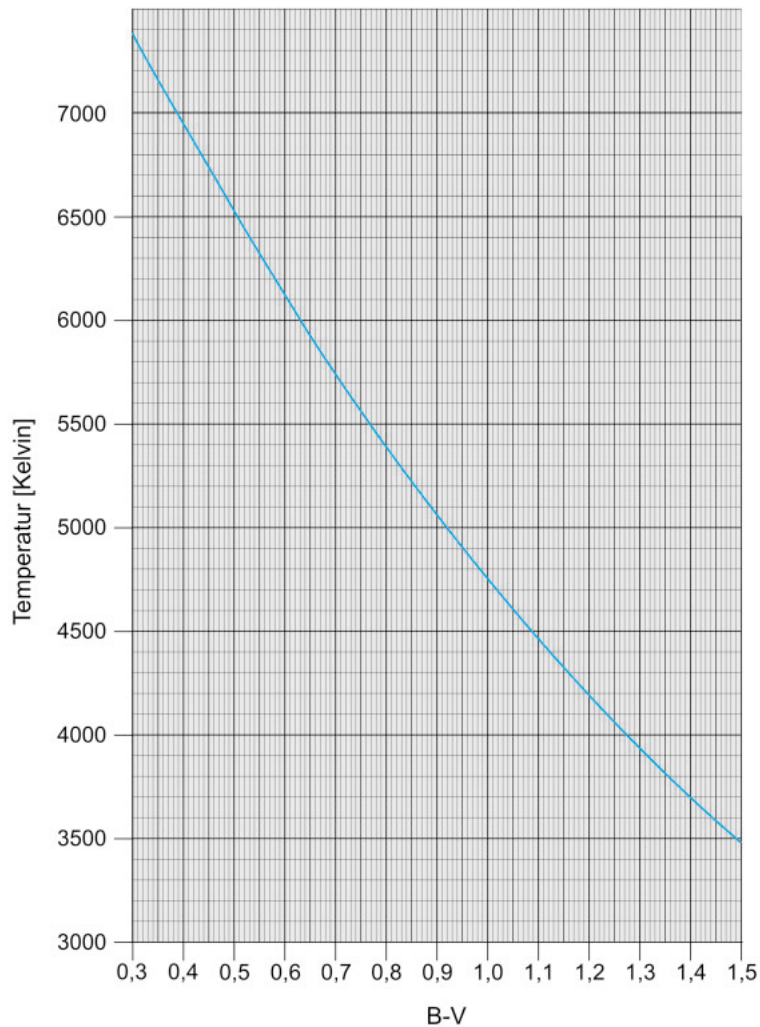


Abbildung 3: Oberflächen­temperatur gegen B-V Farbindex

Dieses Diagramm zeigt die Beziehung zwischen der Oberflächen­temperatur eines Sterns, T , und dessen B-V Farbindex. Indem man entweder die Oberflächen­temperatur oder den B-V Farbindex kennt, kann man den jeweils anderen Wert aus diesem Diagramm ablesen.

lichkeit hatten, wenn man sie mit dem bloßen Auge beobachtete, schienen verschiedene Helligkeiten auf dem photographischen Material zu haben — und umgekehrt. Im Vergleich mit dem Auge waren die photographischen Emulsionen empfindlicher auf blaues Licht und weniger empfindlich auf rotes.

Dementsprechend wurden zwei verschiedene Maßstäbe eingeführt:

Die visuelle Helligkeit, oder m_{vis} , die beschreibt, wie der Stern mit dem Auge beobachtet aussieht, und die photographische Helligkeit, oder m_{phot} , die Messungen beschreibt, die mit blau — empfindlichem Schwarzweißfilm

gemacht wurden. Diese werden nun mit m_v und m_p abgekürzt. Allerdings unterscheiden sich verschiedene Arten von photographischen Emulsionen in ihrer Empfindlichkeit für verschiedene Farben. Ebenso sind die Augen der Menschen unterschiedlich empfindlich! Helligkeitssysteme für verschiedene Wellenlängenbereiche mussten besser kalibriert werden.

Heute werden genaue Helligkeiten mittels Messungen eines Standard — photoelektrischen Photometers durch Standard-Farbfiler angegeben. Mehrere photometrische Systeme wurden eingeführt. Das bekannteste ist das UBV-System, benannt nach den drei am meisten

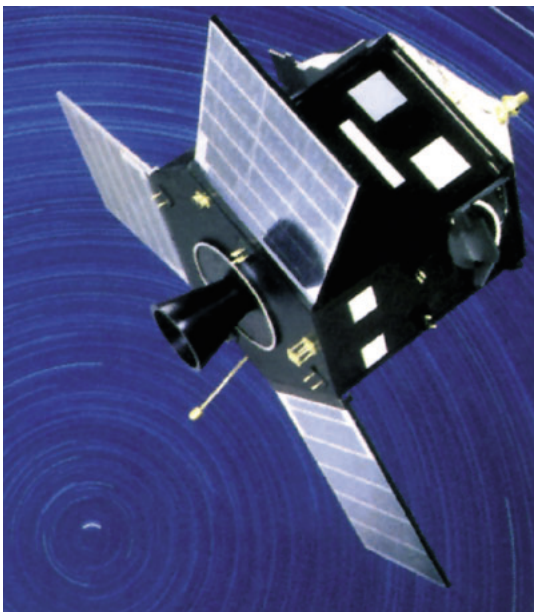
Astronomische Werkzeuge

verwendeten Filtern. Der U-Filter ist durchlässig für Licht des nahen Ultraviolett, B hauptsächlich für blaues Licht, und V entspricht ziemlich genau der älteren visuellen Helligkeit; sein breiter Peak liegt im gelb-grünen Band, in dem das Auge am empfindlichsten ist. Die entsprechenden Helligkeiten in diesem System heißen m_U , m_B and m_V .

Vom B–V Farbindex zur Temperatur

Der Begriff *B-V colour Farbindex* (von Astronomen *B-V* genannt) ist definiert als die Differenz in den zwei Helligkeiten, $m_B - m_V$ (gemessen im UBV System). Ein weißer Stern hat einen B–V Farbindex von etwa 0,2, unsere gelbe Sonne 0,63, die orange-rote Betelgeuze 1,85, und der blauest-mögliche Stern soll einen B–V Farbindex von -0.4 haben. Eine Möglichkeit sich den Farbindex vorzustellen ist: Je blauer ein Stern ist, desto negativer ist seine B-Helligkeit, und desto kleiner wird daher seine $m_B - m_V$ Differenz sein. Es gibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur T eines Sterns und seines B–V Farbindexes (vergleiche Reed, C., 1998, *Journal of the Royal Society of Canada*, 92, 36-37). So können wir die Oberflächentemperatur des Sterns finden, indem wir ein Diagramm T gegen $m_B - m_V$ benutzen (siehe Abbildung 3).

$$\log_{10}(T) = (14,551 - (m_B - m_V)) / 3.684$$



Die Distanzgleichung

Die Distanzgleichung lautet:

$$m - M = 5 \log_{10} (D/10 \text{ pc}) = 5 \log_{10}(D) - 5$$

Diese Gleichung setzt den Zusammenhang zwischen der scheinbaren Helligkeit m , der absoluten Helligkeit M und der Distanz D , gemessen in Parsec, fest. Der Wert $m - M$ wird auch *Entfernungsmodul* genannt und kann verwendet werden, um die Distanz zu einem Objekt zu bestimmen.

Mit ein wenig Algebra kann diese Gleichung in eine äquivalente Form gebracht werden, die manchmal praktischer zu verwenden ist (probiert es doch einmal selbst aus):

$$D = 10^{(m - M + 5)/5}$$

Wenn wir die Entfernungen zu Objekten im Universum bestimmen, messen wir zuerst die scheinbare Helligkeit m . Wenn wir auch die intrinsische Helligkeit eines Objektes kennen (die absolute Helligkeit M), können wir dessen Distanz D berechnen. Eine der schwierigsten Aufgaben bei der Berechnung von astronomischen Distanzen ist es, die absoluten Helligkeiten bestimmter astronomischer Objekte zu bestimmen. Absolute Helligkeiten wurden zum Beispiel vom ESA-Satelliten HIPPARCOS vermessen. HIPPARCOS ist ein Satellit, der unter anderem genaue Entfernungen und scheinbare Helligkeiten einer großen Anzahl naher Sterne vermessen hat.

Abbildung 4: Der ESA HIPPARCOS Satellit

Der HIPPARCOS Satellit wurde in der Nacht vom 8. August 1989 von einer Europäischen Ariane 4 Rakete gestartet. Das hauptsächliche Ziel der ESA HIPPARCOS-Mission war die Erstellung eines Sternkataloges mit bisher unerreichter Genauigkeit. Die Positionen und Entfernungen von etwa 120 000 ausgewählten Sternen mit Helligkeiten bis zu $m_B = 13$ Magnituden wurden mit hoher Genauigkeit bestimmt. Die HIPPARCOS-Mission endete 1993, und der endgültige Sternkatalog wurde 1997 veröffentlicht.

Astronomische Werkzeuge



Foto 1: Betelgeuze (Orion-Der Himmelsjäger)



Foto 2: Wega (Lyra-Die Leier)



Foto 3: Das Sommerdreieck: (im Uhrzeigersinn) Deneb (Cygnus-Der Schwan), Wega (Lyra-Die Leier), Altair (Aquila-Der Adler)

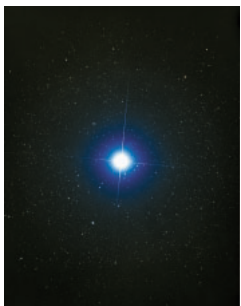


Foto 4: Sirius (Canis Major-Der Große Hund)

Kurze Übungsaufgaben

Diese kurzen Übungsaufgaben sollen dich mit den verschiedenen physikalischen Größen, die gerade eingeführt wurden, vertraut machen.

Aufgabe AW1

Der Stern alpha Orionis (Betelgeuze) hat eine scheinbare Helligkeit von $m=0,45$ Magnituden und eine absolute Helligkeit $M=-5,14$ Magnituden.

? Finde die Distanz zu Betelgeuze.

Betelgeuze ist der rote Stern an der rechten Schulter des Orion (von der Erde aus gesehen) und ist ein roter Überriese. Wenn man ihn mit dem bloßen Auge betrachtet, hat er eine klare orange-rote Färbung.

Aufgabe AW2

Der Stern alpha Lyrae (Wega) mit einer absoluten Helligkeit von $0,58$ Magnituden befindet sich in einer Entfernung von $7,76$ Parsec.

? Berechne die scheinbare Helligkeit von Wega.

Wega ist der hellste Stern in der Konstellation Lyra (Leier) und der obere rechte Stern im Sommerdreieck.

Aufgabe AW3

alpha Cygni (Deneb) ist der obere linke Stern im Sommerdreieck und der Hauptstern im Schwan. Seine scheinbare Helligkeit beträgt $1,25$ Magnituden, und die Entfernung zu Deneb ist 993 Parsec.

? Berechne die absolute Helligkeit.
• Was sagt sie über die Eigenschaften von Deneb aus?

Aufgabe AW4

Der Stern alpha Canis Majoris (Sirius) ist der hellste Stern am Himmel. Er befindet sich in einer Entfernung von $2,64$ Parsec, und seine scheinbare Helligkeit beträgt $-1,44$ Magnituden.

Astronomische Werkzeuge

- ? Berechne die absolute Helligkeit von Sirius.
- Wenn man diese mit der absoluten Helligkeit der drei anderen Sterne vergleicht, wie kann man die physikalische oder intrinsische Helligkeit von Sirius beurteilen?

Aufgabe AW5

- ? Wenn sich die Sterne Wega, Sirius, Betelgeuze und Deneb in einer Entfernung von 10 Parsec von der Erde befinden würden (in der gleichen Himmelsgegend), was würden wir sehen?

Aufgabe AW6

Die absolute Helligkeit M ist definiert als die scheinbare Helligkeit, die ein Stern hätte, befände er sich in einer Entfernung von 10 Parsec von der Sonne.

- ? Wäre es nicht korrekter, diese Entfernung von der Erde aus zu messen? Warum macht es keinen Unterschied, ob man diese Entfernung von der Erde oder der Sonne aus misst?

Leuchtkraft und Intensität

Bis jetzt wurde von Helligkeiten der Sterne gesprochen, aber es wurde nicht erwähnt, wieviel Lichtenergie wirklich vom Stern ausgesandt wird. Die totale Energie, die als Licht vom Stern jede Sekunde ausgesandt wird, wird Leuchtkraft, L , genannt und in Watt (W) gemessen. Dies entspricht der ausgestrahlten Leistung.

Leuchtkraft und Helligkeit sind miteinander verknüpft. Ein entfernter Stern mit einer großen Leuchtkraft kann die gleiche scheinbare Helligkeit besitzen wie ein naher Stern mit einer geringen Leuchtkraft. Wenn wir die scheinbare Helligkeit und die Distanz eines Sterns wissen, können wir seine Leuchtkraft bestimmen.

Der Stern strahlt Licht in alle Richtungen ab, diese Abstrahlung wird also über eine Kugeloberfläche verteilt. Um die Intensität I des Lichts eines Sterns an der Erde zu finden (die Intensität ist die Abstrahlung pro Einheitsfläche), dividieren wir seine Leuchtkraft durch die Fläche der Kugeloberfläche, mit dem Stern im Zentrum und dem Radius gleich der Entfernung des Sterns von der Erde, D (vergleiche Abbildung 5).

$$I = L / (4\pi D^2)$$

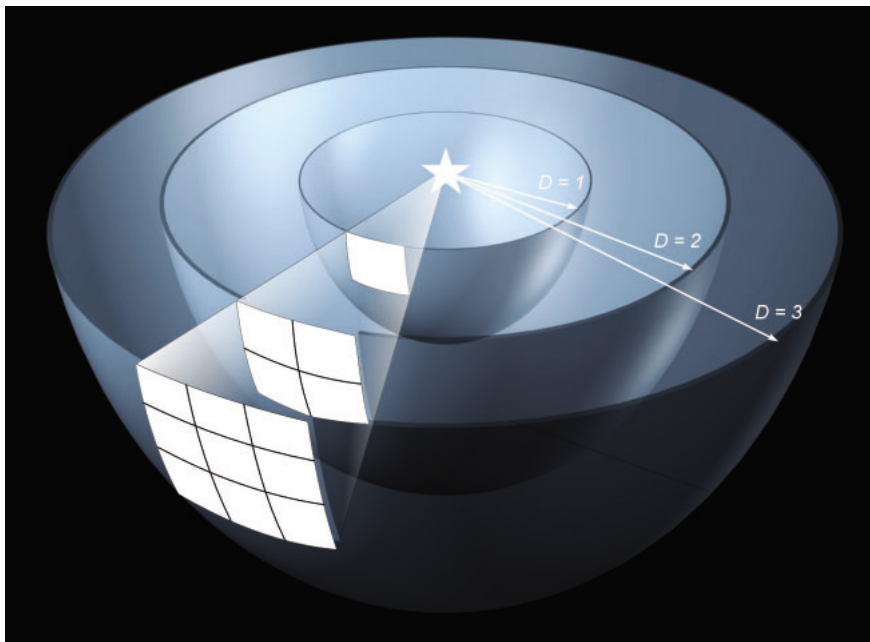


Abbildung 5: Intensität des Lichts

Diese Zeichnung beschreibt, wie der gleiche Betrag von Strahlung von einer Lichtquelle eine immer größer werdenden Fläche beleuchten muss, wenn die Entfernung von der Lichtquelle wächst. Die Fläche wächst mit dem Quadrat der Entfernung von der Quelle, folglich vermindert sich die Intensität pro Flächeneinheit verkehrt proportional zum Quadrat der Entfernung.

Mathematische Werkzeuge

Die Leuchtkraft eines Sterns kann auch in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft gemessen werden, mit $L_{\text{Sonne}} = 3.85 \times 10^{26}$ W. Da die Sonne 'unser' Stern ist und auch der am besten bekannte, wird sie meistens als der Referenzstern verwendet.

Mithilfe von etwas Algebra finden wir die Formel, um die Leuchtkraft L eines Sternes relativ zur Sonnenleuchtkraft zu berechnen:

$$L/L_{\text{Sonne}} = (D/D_{\text{Sonne}})^2 \cdot I/I_{\text{Sonne}}$$

Das Verhältnis I/I_{Sonne} kann bestimmt werden, indem man die Formel vom Kapitel "Scheinbare Helligkeiten" verwendet ($m_{\text{Sonne}} = -26.5$).

Kleine Winkel und große Distanzen

Man betrachte Abbildung 6: Wenn b klein ist im Vergleich zu c , können wir annehmen, dass die zwei längeren Seiten des Dreiecks, c , die gleiche Länge haben wie die zentrale Linie.

Mit den üblichen Gleichungen für ein rechtwinkliges Dreieck finden wir:

$$\sin(\beta/2) = (b/2)/c$$

Wenn wir es mit sehr kleinen Winkeln zu tun haben, können wir die Näherung für kleine Winkel, $\sin x = x$, verwenden (aber nur, wenn der Winkel im Bogenmaß gemessen wird). Diese Näherung mag vielleicht weniger gerechtfertigt erscheinen, aber es kann mathematisch bewiesen werden, dass sie eine sehr gute Annäherung für kleine Winkel ist.

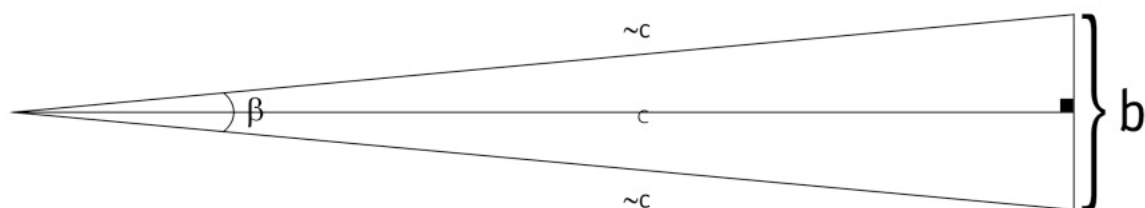
Aufgabe MW1

? Versuche diese Annäherung selbst zu bestimmen, indem du $\sin(1^\circ)$, $\sin(1')$, $\sin(1'')$ berechnest. Beachte das man zuerst die Winkel von Grad ins Bogenmaß umrechnen muss.

Nun hast du ein einfaches Verhältnis zwischen b , c und β ohne der trigonometrischen Funktion:

$$\beta/2 = (b/2)/c$$

$$c = b/\beta$$



Einheiten und andere Naturkonstanten

- 1 Bogenminute = $1' = 1/60$ eines Grads = 2.9089×10^{-4} Radian
- 1 Bogensekunde = $1'' = 1/3600$ eines Grads = 4.8481×10^{-6} Radian
- 1 Millibogensekunde (mas) = $1/1000$ Bogensekunde
- Lichtgeschwindigkeit (c) = 2.997×10^8 m/s
- 1 parsec (pc) = 3.086×10^{13} km = 3.26 Lichtjahre
- 1 Kiloparsec (kpc) = 1000 parsec
- 1 Megaparsec (Mpc) = 10^6 parsec
- 1 Nanometer (nm) = 10^{-9} m

Abbildung 6: Umgang mit kleinen Winkeln

Wenn b klein ist im Vergleich zu c , dann folgt, dass β ein kleiner Winkel ist. Daher können wir eine Beziehung zwischen b , c und β ohne trigonometrische Funktionen aufstellen.

Für den Lehrer

Dieses Kapitel enthält die Lösungen der kurzen Übungsaufgaben.

Aufgabe AW1: $D = 131$ parsecs

Aufgabe AW2: $m = 0,03$

Aufgabe AW3: $M = -8,73$

Das ist ein ungewöhnlich heller Stern.

Aufgabe AW4: $M = 1,45$

Im Vergleich mit Deneb ($M = -8,37$), Betelgeuze ($M = -5,14$) und Wega ($M = 0,58$) ist Sirius eigentlich ein recht schwacher Stern. Dies zeigt, dass unsere Sinne nicht immer gut ausgestattet sind, um die physikalische Realität der Welt um uns zu erkennen.

Aufgabe AW5:

In einer Distanz von 10 pc wären Wega und Sirius etwas schwächer, aber immer noch unter den hellsten Objekten am Himmel. Die Sterne Deneb und Betelgeuze wären beide viel heller als irgendwelche anderen Sterne, die wir am Nachthimmel von der Erde aus sehen können.

Aufgabe AW6:

Es gibt keinen Grund, zwischen Distanzmessungen von der Erde und der Sonne aus zu unterscheiden, da die Entfernung der Erde von der Sonne sehr klein ist im Vergleich zu 10 parsec. Wenn man den Unterschied in scheinbaren Helligkeiten berechnet, indem man die Entfernung von der Erde beziehungsweise von der Sonne nimmt, ergibt sich ein maximaler Unterschied in der Größenordnung von 10^{-6} Magnituden.

Aufgabe MW1:

$$\sin(1^\circ) = \sin(0,017453293 \text{ rad}) = \mathbf{0,017452406}$$

$$\sin(1') = \sin(0,000290888 \text{ rad}) = \mathbf{0,000290888}$$

$$\sin(1'') = \sin(4,84814 \times 10^{-6} \text{ rad}) = \mathbf{4,84814 \times 10^{-6}}$$

www.astroex.org

