

Schwächung, Rötung und Polarisation – das Schicksal des Sternenlichts auf seinem langen Weg

Gerhard Herms

Einleitend wird verständlich gemacht, wie die photometrische Entfernungsbestimmung von Kugelsternhaufen zur Erkenntnis führte, dass das Sternenlicht einer interstellaren Extinktion unterliegt. Die damit verbundene spektrale Veränderung kann weder durch gasförmige Materie noch durch kleine körperliche Hindernisse verursacht sein, sondern allein durch die Streuung des Lichtes an Teilchen, deren Abmessungen annähernd gleich der Lichtwellenlänge oder kleiner sind. An Hand eines Modellversuches mit Mikrowellen wird klargemacht, dass die Polarisation des Sternenlichtes dadurch entsteht, dass nichtkugelförmige, längliche Teilchen vorliegen, die sich im interstellaren Magnetfeld ausgerichtet haben.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag zu H.-U. Keller „Staub im Weltall“ in SuW 3/2008		
Astronomie	Diffuses Medium	Staubteilchen, kosmische Magnetfelder
Astronomie	Positions-astronomie	Astronomische Entfernungsbestimmung, Parallaxe , absolute und scheinbare Helligkeit
Physik	Schwingungen und Wellen, Optik	Streuung , Extinktion , Polarisation , Dipolschwingung, Sternfarben, Dopplereffekt
Fächerverknüpfung	Astro-Ph	Rötung des Sternenlichtes durch Streuung, Polarisation durch Streuung an länglichen Teilchen mit Vorzugsorientierung

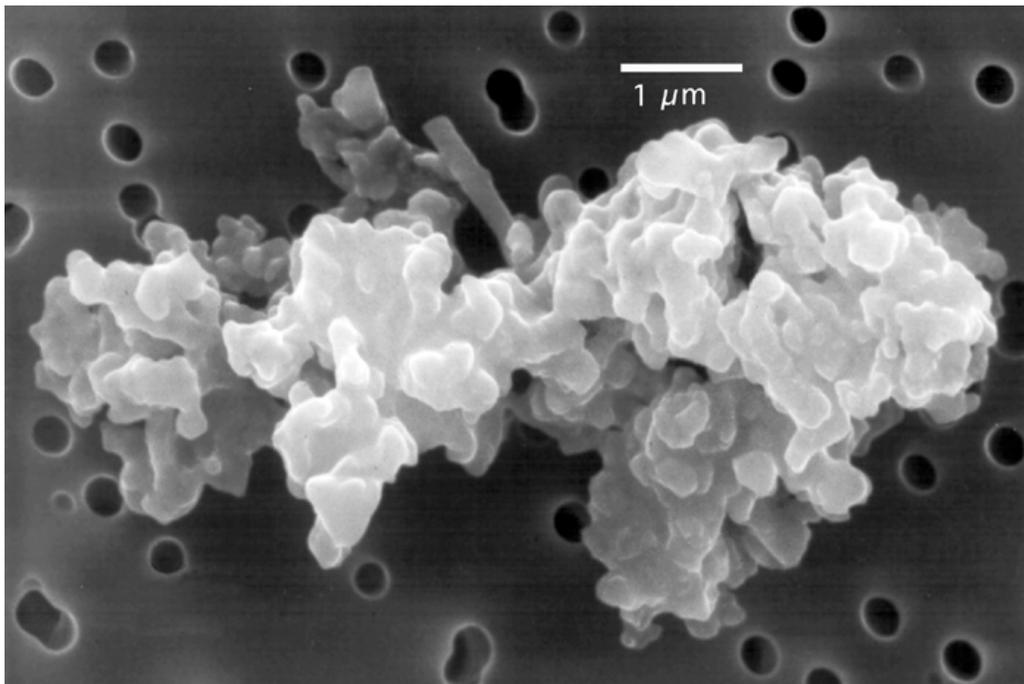


Abbildung 1: Poröses interplanetares Staubpartikel, bestehend aus chondritischem Material. ©: Von Der ursprünglich hochladende Benutzer war Amara in der Wikipedia auf Englisch - Übertragen aus en.wikipedia nach Commons durch Common Good mithilfe des CommonsHelper., CC BY 1.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6267225>.

Daniel: Hättest du jetzt Zeit für mich?

Jan: Komm herein und mach es dir bequem.

Daniel: Ich hatte dir die Kopie des Beitrages „Staub im Weltall“ in „Sterne und Weltraum 3/2008“ und einen Zettel mit Fragen in den Briefkasten geworfen...

Jan: ...und über die wollen wir jetzt sprechen!

Daniel: Wenn ich richtig verstanden habe, war es der Astronom Trümpler, der im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts entdeckt hatte, dass das Licht der Sterne auf seinem Wege durch den vermeintlich leeren Raum geschwächt wird. Mir ist aber nicht ganz klargeworden, wie Trümpler vorgegangen ist und was ihn zu dieser Schlussfolgerung bewegt hat.

Jan: Er hatte die Entfernungen von Kugelsternhaufen mittels sog. *photometrischer Parallaxen* ermittelt. Die Entfernung naher Sterne kann durch ihre optische Parallaxe, d. h. durch ihre scheinbare Verschiebung gegenüber sehr weit entfernten Sternen (entstanden durch die Bewegung der Erde um die Sonne), bestimmt werden. Bei weit entfernten Sternen jedoch liefert die Messung der Sternhelligkeiten den Zugang. Hätten alle Sterne dieselbe Strahlungsleistung - würden sie also alle gleich hell erscheinen, wenn man sie sich in derselben Entfernung r_0 aufgestellt denkt - dann könnte man ihre wirkliche Entfernung leicht berechnen, weil die Beleuchtungsstärke E einer senkrecht zum Strahl gestellten Fläche umgekehrt mit dem Quadrat der Entfernung von der punkt- oder kugelförmigen Lichtquelle abnimmt.

Daniel: Das ist mir klar. Aber in Wahrheit strahlen die Sterne doch recht unterschiedlich!

Jan: Wie du aber in dem Artikel gelesen hast, sind die sog. absoluten Helligkeiten einiger Sterntypen recht genau bekannt (z. B. der RR Lyrae-Sterne) und damit Entfernungen berechenbar. Lass mich das näher erklären: Denkt man sich zwei Sterne in die gleiche Entfernung r_0 von der Erde versetzt, so erzeugen sie bei uns auf der Erde im allgemeinen unterschiedliche Beleuchtungsstärken E_0 (Strahlungsleistung pro Flächeneinheit). Aus historischen Gründen benutzen die Astronomen für r_0 eine Entfernung von 10 Parsec, was $30,86 \cdot 10^{16}$ m oder 32,6 Lichtjahren entspricht. Die so festgestellte Größe E_0 wird als Maß für die **absolute Helligkeit** des Sterns betrachtet. Sie ist natürlich fiktiv, d. h. nur eine gedachte Größe. Die in Wirklichkeit von uns auf der Erde beobachtete Beleuchtungsstärke E ist fast immer kleiner - da es ja nur ein paar Sterne gibt, die uns näherliegen als 10 Parsec. Die Größe E bestimmt die **scheinbare Helligkeit** des Sterns.

Daniel: Das, was wirklich beobachtet wird, wird als scheinbar bezeichnet - ich muss schon sagen, die Astronomen machen es mir armen Würstchen nicht leicht.

Jan: Lass dich nur nicht durcheinanderbringen! Aber ich glaube, du verstehst jetzt, wie man Entfernungen bestimmen kann.

Daniel: Ich nehme an, dass die folgende Proportion besteht:

$$\frac{E_0}{E} = \frac{r^2}{r_0^2}, \quad (1)$$

E , E_0 und r_0 sind bekannt, also ist r berechenbar.

Jan: Genau so ist es. Der Stern erzeugt also bei uns eine Beleuchtungsstärke

$$E = E_0 r_0^2 \cdot \frac{1}{r^2}, \quad (2)$$

wenn sich das Licht völlig unbeeinträchtigt durch den leeren Raum ausbreitet. - Aber nun eine Frage an dich: Kennst du die Gesetzmäßigkeit, nach der die Lichtintensität in einem absorbierenden Medium der Dicke d abnimmt?

Daniel: Ich glaube: ja. Ist I_0 die in das Medium eintretende Intensität, so ist die vom Medium durchgelassene Intensität gegeben durch

$$I = I_0 \cdot e^{-\kappa \cdot d}, \quad (3)$$

wobei κ die Extinktionskonstante ist.

Jan: Sehr gut! Ist der Weltraum nicht leer, sondern ein Medium, in dem das Licht alle möglichen Wechselwirkungen erfährt, dann ist die Formel (2) durch die folgende zu

ersetzen:
$$E = E_0 r_0^2 \cdot \frac{1}{r^2} \cdot e^{-\kappa \cdot (r-r_0)}. \quad (4)$$

In dieser Formel berücksichtigt die e-Funktion die *interstellare Extinktion*, der die Astronomen vor Trümpfer überhaupt keine Beachtung geschenkt hatten. Dabei ist ihr Einfluss recht beachtlich. In meinen Aufzeichnungen fand ich, dass Trümpfer für κ den Wert 0,62 pro 1000 pc gefunden hatte. Das bedeutet, dass das Licht auf einer Strecke von 1000 pc um 46% geschwächt wird. Wie wir heute wissen, ist κ in der Symmetrieebene unseres Milchstraßensystems sogar noch dreimal größer.

Daniel: Ich beginne zu verstehen, worum es geht. Wenn die Schwächung des Lichtes durch das Medium zwischen den Sternen außer Acht gelassen wird, dann fallen die berechneten Abstände zu groß aus. Dabei wird die Verfälschung umso größer sein, je weiter die Sterne von uns entfernt sind.

Jan: Richtig. Ich habe nachgerechnet, dass beispielsweise ein Kugelsternhaufen, der 10 000 Parsec von uns entfernt ist, durch die Vernachlässigung der Extinktion in die vierfache Entfernung versetzt wird. Wenn im alltäglichen Leben die Entfernung eines Gegenstandes falsch geschätzt wird, dann gewinnt man auch ein falsches Bild von seinen Abmessungen. So ist es auch mit dem eben erwähnten Kugelsternhaufen; er scheint einen viermal so großen Durchmesser zu haben. Bei noch weiter entfernten Haufen ist der Effekt entsprechend größer. Die Größenzunahme der Kugelsternhaufen mit der Entfernung beobachtet man in allen Richtungen des Sternenhimmels. Hielte man die Zunahme für echt, so käme man zu einem eigenartigen Weltbild, in dem unser Sonnensystem eine zentrale Rolle einnähme.

Daniel: Das geozentrische Weltbild, das einst von Kopernikus widerlegt worden war, käme jetzt auf einer anderen Ebene wieder zur Hintertür herein. Jetzt habe ich verstanden, wie Trümpfer zu der Schlussfolgerung kam, dass es eine interstellare Extinktion geben müsse. - Ich habe aber noch eine ganz andere Frage. Muss es denn unbedingt Staub sein, was das Licht der Sterne schwächt? Könnte denn nicht gasförmige Materie dafür verantwortlich sein?

Jan: Dieser Gedanke liegt an sich nahe, ist doch die interstellare Materie vorwiegend gasförmig. Aber er trifft keineswegs zu. Das vom Stern kommende Licht, das ein kontinuierliches Spektrum besitzt, treffe auf ein Atom. Aus dem Wellengemisch können solche Lichtwellen, welche die richtige Frequenz besitzen, das Atom in einen angeregten Zustand versetzen, der seine Energie nach kurzer Zeit wieder mit der gleichen Frequenz nach allen Richtungen abstrahlt. Diese Energie fehlt in der ursprünglichen Strahlrichtung, d. h. im kontinuierlichen Spektrum treten sehr scharfe Absorptionslinien auf.

Daniel: Ich weiß, dass sich ein solcher Vorgang in der Sonne abspielt, und dass er der Grund ist für die Fraunhoferschen Linien im Spektrum der Sonne...

Jan: ...und der anderen Sterne. Aber im Unterschied zu diesen Linien sind die Absorptionslinien interstellaren Ursprungs viel schärfer. Sie konnten erst in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts mit Sicherheit nachgewiesen werden, als Spektrographen ausreichender Auflösung zur Verfügung standen. Die große Schärfe der interstellaren Absorptionslinien erklärt sich daraus, dass das interstellare Gas sehr niedrige Temperatur und sehr geringen Druck hat. Daher gibt es nicht die starke Linienverbreiterung durch Dopplereffekt und durch Zusammenstöße wie in den Sternatmosphären. Aber – worauf ich eigentlich hinauswollte – die interstellaren Absorptionslinien wirken sich auf die Gesamtintensität des Sternenlichtes nur sehr wenig aus. Extinktionskoeffizienten, wie wir sie vorhin genannt hatten, können damit nicht erklärt werden.

Daniel: Dann schlage ich eine andere extreme Erklärungsmöglichkeit vor: Abschattung durch erbsen- oder kartoffelgroße Steine, also durch Objekte, die sich unter Umständen als Sternschnuppen zu erkennen geben.

Jan: Auch diese Hypothese ist nicht haltbar, was sich ganz schnell zeigen lässt. Gleichgültig, ob die Strahlung wie bei schwarzen Körpern völlig absorbiert wird oder aber in bestimmten Spektralbereichen oder auch insgesamt reflektiert wird: Alle Bereiche des Spektrums würden in gleichem Maße geschwächt werden. Seine Form bliebe unverändert. In Wahrheit jedoch werden die blauen Anteile stärker geschwächt als die roten. Dadurch erscheinen fernere Sterne rötler.

Daniel: Wenn weder Absorption noch Reflexion zur Erklärung dieses Effektes in Frage kommen – was dann noch?

Jan: Die **Streuung** des Lichtes. Beim Streuprozess bleibt die Strahlungsenergie als solche erhalten. Sie wird nur vom streuenden Teilchen dem Strahlenbündel entzogen und in alle Richtungen ausgestrahlt, woraus eine Schwächung des weitergehenden Strahlenbündels resultiert.

Daniel: Ich stelle mir das so vor, dass das Licht an den Facetten der Teilchenoberfläche nach dem Gesetz „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“ in alle Richtungen reflektiert wird.

Jan: Diese Vorstellung wäre richtig bei deinen Erbsen und Kartoffeln. Streuung hingegen setzt voraus, dass die Teilchen in der Größenordnung der Lichtwellenlänge liegen oder sogar sehr klein gegen die Wellenlänge sind, und da versagt das Bild von reflektierenden Flächen. Das Wesen des Streuprozesses würde dir schnell klarwerden, wenn du dir einmal genau anschauen würdest, was passiert, wenn eine Welle gegen einen im Wasser stehenden Schilfhalm läuft: Vom Halm gehen kreisförmige Wellen aus.

Daniel: Das würde bedeuten, dass Energie nach allen Seiten abgestrahlt wird. Ist das bei der Streuung des Lichtes wirklich so?

Jan: Beim Schilfhalm haben wir den Fall, dass die Teilchendimension (der Durchmesser) sehr klein ist gegen die Wellenlänge. Bei solchen Bedingungen spricht man von Rayleigh-Streuung, und bei dieser ist es beim Licht so, dass nicht nur allseitig abgestrahlt wird, sondern Vorwärtsstreuung und Rückwärtsstreuung völlig gleich sind. In der Experimentalphysikvorlesung wurde uns auch gezeigt, was geschieht, wenn die Welle gegen Aggregate aus einigen dicht zusammenstehenden Zylindern läuft. Je mehr Zylinder, je größer also die Aggregate, desto stärker erfolgt die Streuung in Vorwärtsrichtung. Diese Art der Streuung wird als Miesche Streuung bezeichnet.

Daniel: Von der war im Artikel auch die Rede, und auch davon, dass zwischen den beiden Arten von Streuung irgendein weiterer Unterschied besteht.

Jan: Ja, und darauf wollte ich gerade eingehen. Es geht um die Stärke der Streuung. Sie ist bei der Mieschen Streuung umgekehrt proportional zu λ und bei der Rayleighschen umgekehrt proportional zu λ^4 . Das bedeutet also, dass kurzwelliges Licht stets stärker gestreut wird als langwelliges. Am wirkungsvollsten kommt dieser Effekt bei der Rayleigh-Streuung zur Geltung. Aber gleichgültig, welche von beiden Streuungen vorliegt: Das Sternenlicht, was uns nach langem Wege erreicht, hat weniger Blauanteil, ist also röter als bei seiner Aussendung.

Daniel: ...und damit ist erwiesen, dass in der Tat der Staub für die interstellare Extinktion verantwortlich ist. – Aber mich beschäftigt noch eine Frage, nämlich die, wodurch es zur *Polarisation* des Sternenlichtes kommt.

Jan: Bevor ich zur Sache komme, eine Frage an dich: Sind wir uns einig, dass der Streuprozess an kugelförmigen Teilchen nichts an der Schwingungsrichtung des Lichtes ändern kann?

Daniel: Wenn ich mir so vorstelle, wie eine Welle mit bestimmter Schwingungsrichtung auf ein kugelförmiges Teilchen trifft, dann sehe ich keinen Grund dafür, dass sich die Schwingungsrichtung ändern sollte, sind doch bei der Kugel alle Richtungen gleich berechtigt. Ganz anders wäre es, wenn das Teilchen ellipsoidförmig oder gar stäbchenförmig wäre.

- Jan: Das hast du richtig erkannt! Aber nun ist es wohl das Beste, noch etwas näher darauf einzugehen, was mit einem Atom des Staubteilchens geschieht, wenn es sich im ständig wechselnden elektrischen Feld eines Lichtwellenzuges befindet. Elektronenhülle und Atomkern vollführen gegenläufige Schwingungen im Takte der Lichtwellenschwingung (erzwungene Schwingungen), d. h. das Atom stellt einen schwingenden Dipol dar. Das gilt für alle Atome unseres Staubteilchens, mit anderen Worten: Das Staubteilchen selbst wird im elektrischen Wechselfeld zu einem schwingenden Dipol. Das ermöglicht Modellversuche, indem man stark vergrößerte Modelle der Staubteilchen mit Mikrowellen bestrahlt. Wird deren Wellenlänge so gewählt, dass das Verhältnis Wellenlänge zur Teilchenabmessung im Modellversuch dasselbe ist wie in der Realität, dann lassen sich die Messergebnisse quantitativ auf den Fall der Lichtstreuung übertragen.
- Daniel: Das ist ähnlich wie bei Versuchen mit Schiffs- oder Fahrzeugmodellen im Strömungskanal, wenn die Reynoldssche Zahl beachtet wird.
- Jan: Genau! Es ist schade, dass du die Mikrowellenversuche, wie ich sie im Hörsaal gesehen habe, nicht erlebt hast. Dann wären wortreiche Erklärungen überflüssig. Ich will dir nur von einem Experiment erzählen, das für unser Problem wichtig ist. Hier ist eine Zeichnung davon [siehe Abbildung 2]. Links sind der Sender S und der Sendedipol SD, rechts der zu ihm parallele Empfangsdipol ED mit einem Messgerät M. Der elektrische Vektor der Mikrowelle schwingt in der vom Dipol SD vorgegebenen Richtung.
- Daniel: Das ist mir klar! Aber was ist das in der Mitte?
- Jan: Das ist eine drehbar gelagerte Sperrholzplatte mit darauf befestigten parallelen Kupferstäben. Liegen sie so, wie in der Zeichnung dargestellt – also senkrecht zum E -Vektor der Mikrowelle – dann zeigt das Messinstrument fast dieselbe Signalstärke an wie bei entfernter Holzplatte. Dreht man sie jedoch um 90° , so dass die Stäbe dieselbe Richtung haben wie der E -Vektor, dann geht die Anzeige des Messinstruments stark zurück. Kannst du dir denken, warum?
- Daniel: Wenn die Kupferstäbe und der E -Vektor gleiche Richtung haben, dann werden die Elektronen in den Stäben in starke Schwingungen versetzt. Die Stäbe senden als Dipole Energie nach allen Richtungen aus, und die fehlt dann in der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung.
- Jan: Das hast du richtig erkannt. Übrigens: Deine Erklärung trifft auch dann noch zu, wenn die Abstände benachbarter Stäbe unterschiedlich wären, und auch dann noch, wenn sie nicht in einer Reihe nebeneinander befestigt wären.
- Daniel: Aber noch sehe ich nicht den Zusammenhang zum interstellaren Staub.
- Jan: Wenn wir annehmen, dass die Staubteilchen nicht kugelförmig, sondern eher stabförmig sind, und überdies eine Vorzugsrichtung aufweisen, dann haben wir dieselbe Situation wie in unserem Mikrowellen-Experiment.
- Daniel: Nur mit dem Unterschied, dass das vom Stern kommende Licht im Gegensatz zur Mikrowelle keine bevorzugte Schwingungsrichtung hat!

Jan: Wir können den E-Vektor jedes Wellenzuges in eine Komponente parallel und eine quer zur Längsachse der Teilchen zerlegen. Gemittelt über viele Wellenzüge, wird bei unpolarisiertem Licht die Längsschwingung ebenso stark sein wie die Querschwingung. Du musst die Erkenntnisse aus unserem Mikrowellenversuch auf jede von beiden übertragen!

Daniel: Aha! Die Wellen, die quer zur Längsausdehnung der Teilchen schwingen, werden kaum behindert, die anderen jedoch geschwächt. Das in unser Auge gelangende Licht ist folglich teilweise polarisiert. Das ist mir klargeworden. Aber weshalb sollten die länglichen Staubteilchen eine bestimmte Richtung bevorzugen?

Jan: Dafür sind schwache interstellare Magnetfelder verantwortlich...

Daniel: ... in denen sich die Teilchen wie Magnetnadeln ausrichten.

Jan: Ganz so ist es nicht; denn dann müssten die Teilchen aus ferromagnetischem Material bestehen. Die richtige Erklärung, die auch für paramagnetisches Material gilt, geht davon aus, dass die stäbchenförmigen Teilchen durch Stöße der interstellaren Gaspartikel in schnelle Rotation um die Querachse gebracht werden. Im Allgemeinen wird die Rotation durch das ständige Ummagnetisieren bald wieder abgebremst. Nur, wenn die Rotationsachse zufällig genau in Feldrichtung zeigt, können die Teilchen ungehindert und zeitlich praktisch unbegrenzt rotieren. Daher wird immer ein gewisser Anteil von Staubpartikeln in dieser speziellen Orientierung vorliegen.

Daniel: Vielen Dank für deine Erläuterungen. Mir ist vieles klargeworden.

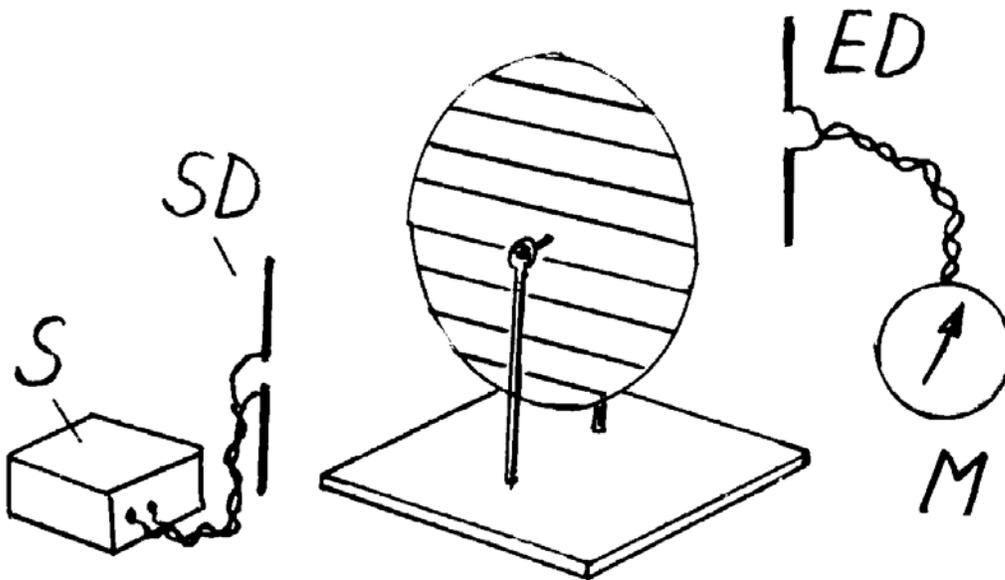


Abbildung 2: Modellexperiment mit Mikrowellen. ©: Gerhard Herms.