

---

# Lexikon

der



**Astrophysik**

von



**Andreas Müller**

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

<http://www.mpe.mpg.de/~amueller>

*April 2007*

---



# 16 Lexikon O

## 16.1 Öffnung

Öffnung ist auch ein Fachbegriff der Astronomie und bezeichnet den *Objektivdurchmesser*, also den Durchmesser desjenigen Teils eines Teleskops, der zum Himmel gewandt ist. Die Öffnung ist entscheidend für die **Lichtstärke** einer astronomischen Aufnahme. Auch das **Auflösungsvermögen** ist umgekehrt proportional zur Öffnung.

## 16.2 Olbers-Paradoxon

Eines der berühmten Paradoxa der Astronomie, benannt nach dem Arzt und Amateurastronomen *Wilhelm Olbers* (1758 - 1840).

### 16.2.1 Die Ausgangsfrage

Olbers stellte sich die Frage, warum der Nachthimmel eigentlich dunkel ist, wenn doch das unendlich große Universum angefüllt ist mit Abertausenden kosmischen Lichtquellen.

Das Paradoxe ist also, warum es auf der Nachtseite der Erde dunkel ist, obwohl sehr viele Sterne (die vielfach hintereinander stehen, wie das **Band der Milchstraße** belegt) und andere kosmische Quellen die Nachtseite der Erde beleuchten.

### 16.2.2 Erster Ansatz: Fehlschlag

Mit mehr mathematischem Aufwand für eine Begründung, könnte man darauf kommen, dass der Strahlungsstrom einer Quelle am Himmel mit dem Entfernungskadrat abnimmt; allerdings nimmt ebenso die Zahl der Sterne (bei vorausgesetztem unendlichen, homogenen Universum) mit dem Entfernungskadrat zu. Somit würde der Nettostrahlungsstrom gemessen auf der Erde konstant bleiben! Warum ist es nachts also nicht hell?

### 16.2.3 Die Auflösung

Die Lösung des Paradox besteht darin, dass die Ausbreitung des Sternenlichts mit extrem hoher, aber dennoch mit *endlicher* Geschwindigkeit, nämlich der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  von fast 300 000 km/s, geschieht. Die Konsequenz: Nicht das Licht **aller** kosmischen Quellen hat also die Erde bereits erreicht, seitdem sie entstanden sind bzw. seitdem sie emittieren. Die Strahlung ist noch unterwegs in den Weiten des Alls. Es gibt also einen Beobachtungshorizont: Nicht alle Objekte des Universums können *auf einmal* erfasst werden. Die beobachtete **Expansion des Universums** (Hubble-Effekt), getrieben durch die Dunkle Energie, schränkt die Beobachtung weiter ein. Denn durch die anhaltende Expansion entfernen sich entfernte Objekte von der Erde noch mehr, dadurch dass sie mit der expandierenden Raumzeit 'schwimmen'. Andererseits nimmt gleichermaßen der Beobachtungsradius zu, und zwar mit einer Lichtsekunde pro Sekunde bzw. einem Lichtjahr pro Jahr.

#### 16.2.4 Rötung gibt es zwar, löst aber nicht das Paradoxon

Der oft angeführte Effekt der Extinktion reicht **nicht** als Erklärung aus. Durch Extinktion findet jedoch nur eine Verschiebung des Lichts im Spektrum statt, beispielsweise vom optischen Bereich in den infraroten oder Radiobereich. Die Strahlung der Sterne sollte also nach wie vor, jedoch nur in anderen Wellenlängenbereichen detektierbar sein: Es wäre für Detektoren, die einen größeren Spektralbereich abdecken, als das menschliche Auge, demnach trotz Extinktion 'hell'.

#### 16.2.5 Fazit

Extinktion löst nicht das Olbers-Paradoxon! Das Paradoxon verschwindet bei der Berücksichtigung der Endlichkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht. Der Kern der Lösung ist also in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie zu finden - die kannte *Wilhelm Olbers* freilich nicht.

### 16.3 O-Prozess

Der O-Prozess, meist eher **Sauerstoff-Brennen** genannt, ist ein wichtiger Mechanismus zur Energieumwandlung durch thermonukleare Fusion (siehe unter diesem Eintrag für Details) in mittelschweren bis schweren Sternen.

Das *O* bezieht sich auf das chemische Symbol des Elements Sauerstoff (engl. *oxygen*), das in Form des Isotops O-16 bei diesen Reaktionen fusioniert wird. Die 'Asche' dieser Prozesse sind im Wesentlichen Silizium (*Si*), Schwefel (*S*), Phosphor (*P*) und Magnesium (*Mg*).

### 16.4 Oppenheimer-Volkoff-Grenze

Die Oppenheimer-Volkoff-Grenze ist eine wichtige Grenzmasse in der Astrophysik kompakter Objekte. Die beiden Physiker *J.R. Oppenheimer* und *G.M. Volkoff* berechneten 1939 erstmals diese charakteristische Masse, indem sie ein **relativistisches, entartetes Fermionengas** betrachteten. Sie waren daran interessiert zu zeigen, wie schwer eine Ansammlung aus Neutronenmaterie werden kann, ohne im Gravitationskollaps zu einem kompakteren Objekt zu werden, z. B. zu einem Schwarzen Loch. In der Astrophysik ist die Oppenheimer-Volkoff-Grenze ein wesentliches Element bei der Untersuchung von Fermionensternen.

#### 16.4.1 Quantendruck vs. Gravitationsdruck

Da Neutronen einen Spin  $1/2$  haben, gehören sie zur Teilchengruppe der Fermionen und unterliegen dem Pauli-Prinzip. Das unterscheidet sie grundsätzlich von den Bosonen. Der Entartungsdruck der Fermionen vermag dem Gravitationsdruck standzuhalten, allerdings nur unterhalb der Oppenheimer-Volkoff-Grenze.

#### 16.4.2 Grenzmasse und Grenzradius im Oppenheimer-Volkoff-Modell

Bei der Entwicklung eines physikalischen Modells geht man ähnlich vor, wie bei der Betrachtung von **Bosonensternen**. Auch bei den Fermionen unterscheiden die Physiker, ob sie (über das Pauli-Prinzip hinaus) miteinander wechselwirken können oder nicht. Die

Oppenheimer-Volkoff-Grenze basiert auf *nicht wechselwirkenden Neutronen*. Eine numerische Berechnung liefert folgende Oppenheimer-Volkoff-Grenzmasse  $M_{OV}$  und zugehörigen Radius  $R_{OV}$  (entnommen aus *Bilic & Viollier 1999*):

$$M_{OV} \simeq 0.7 M_{\odot} \left( \frac{1 \text{ GeV}}{m} \right)^2 \sqrt{\frac{2}{g}}$$

$$R_{OV} \simeq 9.6 \text{ km} \left( \frac{1 \text{ GeV}}{m} \right)^2 \sqrt{\frac{2}{g}}$$

wobei  $m$  die Fermionenmasse und  $g$  der *Entartungsfaktor der Fermionen* ist. Für Neutronen gilt  $m = 939.565 \text{ MeV} \sim 1 \text{ GeV}$  und  $g = 2$ . Die Gleichungen sind für Neutronen spezifiziert worden und zeigen, dass ein Neutronenstern im Oppenheimer-Volkoff-Modell **höchstens 0.7 Sonnenmassen** schwer werden kann und dabei einen **Sternradius von nur knapp 10 Kilometern** hätte.

Diese beiden Gleichungen eignen sich auch, um die Oppenheimer-Volkoff-Grenzen für völlig andere Fermionenspezies zu berechnen (siehe dazu Beispiele im Eintrag Fermionenstern).

### 16.4.3 Grenzen des Modells

Das fast 70 Jahre alte Oppenheimer-Volkoff-Modell war ein physikalische Glanzleistung - dennoch handelt es sich um ein sehr einfaches Modell: Erstens werden ausschließlich Neutronen und keine anderen Teilchenspezies wie z. B. Kaonen oder Hyperonen oder Übergänge in andere Materiephasen wie z. B. dem Quark-Gluonen-Plasma betrachtet. Bei den hohen Dichten finden jedoch kernphysikalische Umwandlungsreaktionen, die eine solche Berücksichtigung erfordern. Zweitens werden Wechselwirkungen zwischen den Neutronen außer Acht gelassen - das wird jedoch gerade bei großen Dichten der kompakten Materie wichtig.

Modernere Modelle mit einer komplizierteren inneren Struktur werden im Eintrag Neutronenstern vorgestellt. Sie zeigen, dass realistische Maximalmassen von Neutronensternen **höher** sind als die Oppenheimer-Volkoff-Grenze, etwa zwischen 1.5 und 3.2 Sonnenmassen. Das deckt sich auch mit den astronomischen Beobachtungen, denn Neutronensterne oberhalb der Oppenheimer-Volkoff-Masse wurden bereits entdeckt..

### 16.4.4 wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ Pionierarbeit: *Oppenheimer, J.R. & Volkoff, G.M.*: On Massive Neutron Cores, Phys. Rev. 55, 374, 1939
- ◇ *Bilic, N. & Viollier, R.D.*: Gravitational Phase Transition of Fermionic Matter in a General-Relativistic Framework, Eur. Phys. J. C11, 173, 1999; Preprint: hep-ph/9809563

## 16.5 optische Tiefe

Die optische Tiefe ist eine bedeutsame Größe in der **Strahlungsphysik**. Bei der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie kommt es zur Streuung, Absorption, Emission und ggf. Reabsorption sowie Reemission.

Die Details sind von genereller Wichtigkeit in der Astronomie, um die kosmischen Quellen zu verstehen und die Beobachtung beurteilen zu können.

### 16.5.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Betrachtet man eine elektromagnetische Welle, die sich durch eine Materieschicht fortpflanzt, so verändert sich im Allgemeinen dabei ihre Strahlungsintensität und Richtung. Die Strahlung kann von der Schicht total absorbiert, gestreut, reemittiert, durchgelassen (*transmittiert*) oder polarisiert werden. Eine Sonnenbrille ist nichts anderes als ein Polarisationsfilter, der eine bestimmte Polarisationsrichtung des Lichts ausblendet und damit insgesamt die Intensität für unsere Augen angenehm schwächt.

### 16.5.2 Verschlucken von Licht

Die optische Tiefe eignet sich, um die Lichtdurchlässigkeit - oder eleganter formuliert das *Transmissionsvermögen* - einer Schicht zu charakterisieren. Eine weitere wichtige Größe der Strahlungsphysik, die damit zusammenhängt, ist der **Absorptionskoeffizient** (in der Regel mit  $\alpha$  bezeichnet). Im Allgemeinen ist er wellenlängenabhängig, weil die Farbe des Lichts/die Energie der Strahlung über die Stärke der Absorption entscheidet. Darüber hinaus hängt es natürlich von jeweiligen Strahlungsprozess ab: Absorption verhält sich bei thermischer Strahlung (Wärmestrahlung) anders, als z. B. bei Bremsstrahlung oder Synchrotronstrahlung.

### 16.5.3 Aufsummieren liefert optische Tiefe

Ist der Absorptionskoeffizient aus der Theorie der Strahlungsphysik bekannt, so ergibt sich die optische Tiefe aus dem Wegintegral über diesen Absorptionskoeffizient. Anschaulich gesagt summiert man über den Weg des Strahls durch das Medium, wo die Absorption stattfindet. Salopp formuliert, geht vorne eine Strahl bestimmter Intensität, Energie und Richtung in die Schicht hinein und kommt mit in der Regel anderer Intensität, Energie und Richtung heraus. Die Astrophysiker nennen das **Strahlungstransport**.

### 16.5.4 Beispiel Sonne

Genau das geschieht im Innern der Sonne: Im Kern der Sonne entstehen aus der thermonuklearen Fusion solare Photonen. Diese müssen sich nun einen Weg nach außen durch das dichte Sonnenplasma bahnen, werden gestreut, absorbiert und verlassen schließlich am Sonnenrand, der Photosphäre, die Sonne.

### 16.5.5 Zusammen gehen wir durch optisch dick und optisch dünn

Die aus dem Absorptionskoeffizient errechnete optische Tiefe wird üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben  $\tau$  bezeichnet. Für das jeweilige Strahlungsproblem wird die optische Tiefe - für Strahlung einer bestimmten Wellenlänge - diskutiert. Ist sie viel kleiner als 1, sprechen Astronomen von einer *optisch dünnen* Schicht mit guten Transmissionseigenschaften. Ist die optische Tiefe hingegen vergleichbar mit 1 oder gar viel größer, so bezeichnen die Astronomen die Schicht als *optisch dick*. Die Transmissionseigenschaften sind in diesem Fall schlecht und können dazu führen, dass die Strahlung von der Schicht 'verschluckt' wird.

In der theoretischen Astrophysik werden auch Akkretionsflüsse auf ihre Transmissionsfähigkeit untersucht. Das ist relevant bei der damit assoziierten Strahlungsphysik. So sind beispielsweise Standardscheiben optisch dick, ADAFs hingegen (in der Regel) optisch dünn.

### 16.5.6 Schlimme Lichtschlucker: Dunkelwolken

Starke Absorber in der Astronomie sind z. B. die **Dunkelwolken** in Sternentstehungsregionen. Man gibt ihr Absorptionsvermögen, die so genannte Extinktion, in Magnituden (<sup>mag</sup>) an (siehe auch Helligkeit). Dunkelwolken erreichen typischerweise Extinktionen von  $20^{\text{mag}}$ ! Das erklärt, weshalb Protosterne von den kalten, dunklen Molekülwolken zumindest im Bereich optischer Wellenlängen vollständig verhüllt werden. Astronomen weichen aus diesem Grund auf die energieärmere Infrarotstrahlung aus, um in die Dunkelwolken Einblicke zu bekommen.

Ein irdisches Beispiel hoher Extinktion ist Nebel. Die fein verteilten Wassertröpfchen lassen sichtbares Licht nicht mehr durch.

### 16.5.7 Olbers-Paradoxon

Das Olbers-Paradoxon wird allerdings nicht durch die Rötung der Strahlung gelöst, sondern durch die Relativitätstheorie. Unter dem Eintrag Extinktion befindet sich das Foto einer berühmten Dunkelwolke: des *Pferdekopfnebels* im Sternbild *Orion*.

### 16.5.8 Buchempfehlung

- ◇ Standardwerk der Strahlungsphysik in der Astronomie: **Radiative Processes in Astrophysics** von *Rybicki & Lightman* (1979)

## 16.6 Orthogonalität

Orthogonalität, Spezialität und Unitarität sind bestimmte Eigenschaften von Transformationsmatrizen - oder allgemeiner gesprochen von Operatoren.

### 16.6.1 Motivation

Operatoren sind besonders relevant in der Quantentheorie, weil sie dort in Form von Operatorgleichungen Quantensysteme beschreiben.

Transformationen können Gruppen oder Symmetriegruppen bilden und sind dann besonders wichtig in der Gruppentheorie der Physik, wie sie besonders in der Teilchenphysik angewandt wird.

### 16.6.2 Was ist nun Orthogonalität?

Die Eigenschaft Orthogonalität heißt im mathematischer Symbolik:

$$O^T = O^{-1}.$$

Sie besagt: Falls das Transponierte (hoch gestelltes  $T$ ) der quadratischen Matrix  $O$  gleich dem Inversen (hoch gestellte  $-1$ ) der Matrix entspricht, so heißt die Matrix  $O$  orthogonal.

Eine  $m \times n$ -Matrix ist eine Anordnung von  $m$  Spalten und  $n$  Zeilen. Ist  $m = n$  so heißt die Matrix quadratisch. Transponieren ist eine Matrixoperation, bei der man Spalten und Zeilen miteinander vertauscht. In der Matrizenrechnung ist genau definiert, wie man Matrizen miteinander multipliziert. Die inverse Matrix  $O^{-1}$  ist hier gerade diejenige Matrix,

die multipliziert mit der gegebenen Matrix  $O$  die Einheitsmatrix ergibt. Die Einheitsmatrix hat auf der Hauptdiagonalen 1 stehen und sonst nur 0.



# Kontakt

**Dr. Andreas Müller**

Technische Universität München (TUM)  
Exzellenzcluster Universe  
Boltzmannstraße 2  
D-85748 Garching  
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

[andreas.mueller@universe-cluster.de](mailto:andreas.mueller@universe-cluster.de)

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04