

# Interstellares Medium

## Überblick

### Grundlagen aus dem ersten Semester:

[10-Interstellares Medium \(Seite 2\)](#)

[07-Eigenschaften der Sterne \(Seite 7 - 8\)](#)

Ein absolutes Vakuum gibt es nicht, auch nicht im Universum. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Teilchen, die sich im Vakuum verstecken.

	Ort	Dichte
Interplanetares Medium (IPM)	In Sternsystemen	5 Teilchen pro $cm^3$
Intergalaktisches Medium (IGM)	In Galaxien	1 Teilchen pro $cm^3$
Intracuster-Medium (ICM)	In Galaxiehaufen	1 Teilchen pro $dm^3$
Interstellares Medium (ISM)	Außerhalb von Galaxiehaufen	10 Teilchen pro $m^3$

In dieser Tabelle sind die Teilchendichten in unterschiedlichen Teilen des Universums angegeben. Man erkennt, dass die Teilchendichte in den Bereichen höher ist, in denen sich auch mehr Himmelskörper befinden.

Das Vakuum im Universum ist übrigens viel dünner, als jedes Vakuum, das wir auf der Erde erzeugen können. Im dünnsten Vakuum, das auf der Erde erzeugt werden kann, befinden sich 2,5 Millionen Teilchen pro  $cm^3$ .

Dementsprechend ungewohnt sind für uns die Eigenschaften so dünner Medien. Einige für uns selbstverständliche Begriffe, wie die Temperatur, müssen daher für dieses Medium neu definiert werden.

Für das Verständnis dieses Abschnitts ist es notwendig, bereits das Skriptum über Strahlungsänderungen verstanden zu haben.

## 1 Beobachtung

Das interstellare Medium strahlt zwar nicht selber, man erkennt es aber dennoch an den Auswirkungen auf die elektromagnetische Strahlung.

In manchen Wellenlängenbereichen verschluckt das interstellare Medium die gesamte Strahlung. Die dahinterliegenden Sterne erscheinen dann alle rötlicher, weil es nur die kurzwelligeren Lichtwellen durch das Medium schaffen. Diesen Effekt nennt man Rötung. Ein bekanntes Beispiel für Rötung sind die sogenannten Dunkelwolken.

In anderen Bereichen werden nur diskrete Wellenlängen absorbiert und es entstehen Spektrallinien. Dadurch kann man auch auf die chemische Zusammensetzung schließen. Ein wichtiges Beispiel ist der neutrale Wasserstoff, der alle Lichtwellen mit einer Wellenlänge von 21cm absorbiert.

Manche Wellenlängen werden nicht absorbiert sondern gestreut. Dadurch bekommt man den Eindruck, das interstellare Medium würde selber leuchten. Diesen Effekt kann man zum Beispiel beim Orionnebel beobachten.

## 2 Eigenschaften

In der Nähe von Sternen und Planeten sind die Materialien sehr stark verdichtet, weil durch die Gravitation die Stoffe aus der Umgebung angezogen und zusammengedrückt werden. So kommt es, dass sich in unserer Atmosphäre auf nur  $1\text{mm}^3$  10-Billiarden Teilchen aufhalten.

Im interstellaren Medium gibt es diese Kraft nicht und die Teilchen sind viel weiter verteilt. An manchen Stellen befindet sich in einem Würfel mit  $10\text{mm}^3$  nur ein einziges Atom. Dadurch finden auch Stöße zwischen den Teilchen viel seltener statt. Aus diesem Grund sind die Eigenschaften des interstellaren Mediums ganz anders, als die der Atmosphäre, die wir gewohnt sind:

Energie wird fast ausschließlich durch Strahlung übertragen. Die Übertragung von Eigenschaften durch Teilchenstöße (wie z.B. beim Schall) funktioniert nicht. Die Energiedichte ist im gesamten interstellaren Medium konstant  $1 \frac{\text{eV}}{\text{cm}^3}$ .

Da sich die Teilchen kaum austauschen, bewegt sich das interstellare Medium auch nicht ins thermodynamische Gleichgewicht. Das bedeutet, dass sich Eigenschaften wie Volumen, innere Energie und Entropie laufend ändern.

Stoßanregung ist nur sehr selten möglich. Die meisten Atome befinden sich daher im Grundzustand. Wenn ausnahmsweise doch Atome ionisiert werden, sind Photonen dafür verantwortlich. Der Ionisationsgrad hängt daher ausschließlich vom Strahlungsfeld ab.

Der Druck durch Strahlung und Magnetfelder ist im Gegensatz zu dichten Objekten nicht vernachlässigbar klein im Vergleich zum Stoß- und Staudruck.

Die gewöhnliche Temperaturdefinition lässt sich nicht anwenden. Man definiert die Temperatur stattdessen als durchschnittliche kinetische Energie pro Teilchen. Um diese Definition von der normalen Temperatur zu unterscheiden, nennt man sie auch kinetische Temperatur.

Das interstellare Medium wird ausschließlich durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung erwärmt. Die Temperatur hängt also von der Verteilung der Strahlung und von der Energiedichte ab.

Auch die Effektivtemperatur hat dadurch andere Eigenschaften: Sie hängt nur davon ab, wie weit das interstellare Medium von einem Stern entfernt ist, und hat

nichts mit der Energiedichte zu tun.

### 3 Zusammensetzung

Das interstellare Medium besteht zu 90% aus Wasserstoff und zu 10% aus Helium. Die schweren Elemente machen weniger als 1% aus und sind vorwiegend im interstellaren Staub enthalten. 99% des interstellaren Mediums ist gasförmig, nur 1% liegt in Form von festem Staub vor. Das Gas besteht zum Großteil aus neutralen Atomen, nur ein kleiner Anteil ist ionisiert oder zu Molekülen verbunden.

Man stellt fest, dass sich das interstellare Medium nicht gleichmäßig im Universum verteilt, sondern dass die Dichte des interstellaren Mediums stark variiert. Damit die Wolken stabil bleiben, muss der Druck des interstellaren Mediums zwischen den Wolken gleich groß, wie der Druck des interstellaren Mediums in den Wolken sein. Es gilt daher

$$p = nkT = \text{const.} \quad (3.1)$$

Durch Division durch die ebenfalls konstante Boltzmannkonstante, erhält man

$$nT = \frac{p}{k} = \text{const.} \quad (3.2)$$

In den dichteren Teilen des interstellaren Mediums, muss die Temperatur daher niedriger sein.

Wenn sich das interstellare Medium erwärmt, muss es an einer anderen Stelle aufgrund des Energieerhaltungssatzes abkühlen und umgekehrt. Das heißt, man kann die Heizung  $H$  und die Kühlung  $K$  gleichsetzen.

$$H = K \quad (3.3)$$

Die Heizung des interstellaren Mediums kann durch die Formel  $H = nG$  beschrieben werden, wobei  $n$  die Dichte des interstellaren Mediums und  $G$  die Gravitationskonstante ist. Die Kühlung wird durch die Formel  $K = n^2\lambda$  beschrieben.  $\lambda$  ist dabei die Leistung mal dem Volumen. Durch Einsetzen dieser Formeln in 3.2. erhält man

$$nG = n^2\lambda \quad (3.4)$$

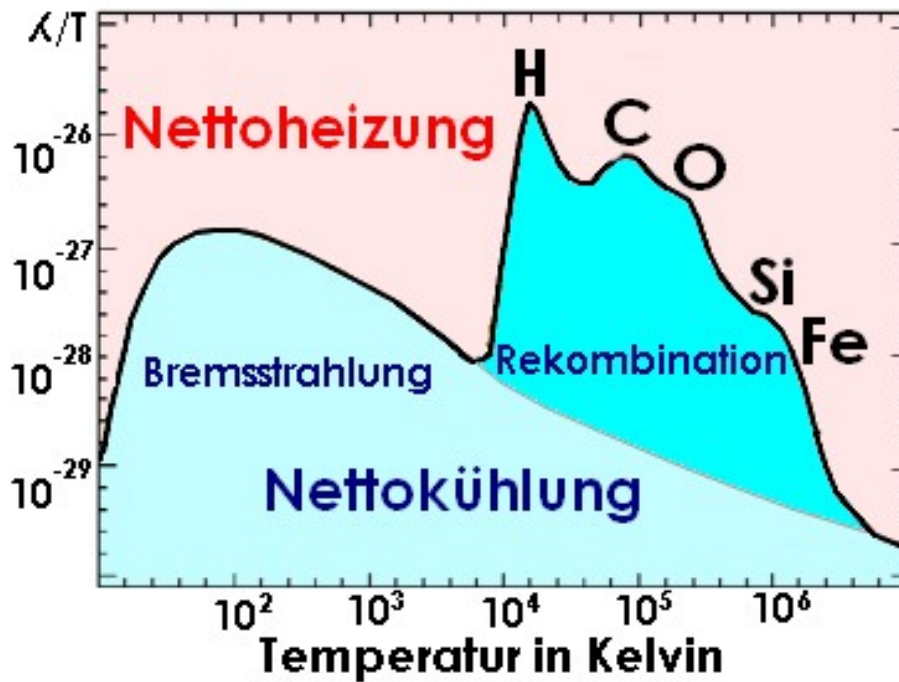
Wenn man diese Formel durch  $n^2T$  dividiert, erhält man

$$\frac{G}{nT} = \frac{\lambda}{T} \quad (3.5)$$

Die Gravitationskonstante ist konstant. Der Faktor  $nT$  ist laut 3.2. ebenfalls konstant. Somit folgt aus 3.5.

$$\frac{\lambda}{T} = \text{const.} \quad (3.6)$$

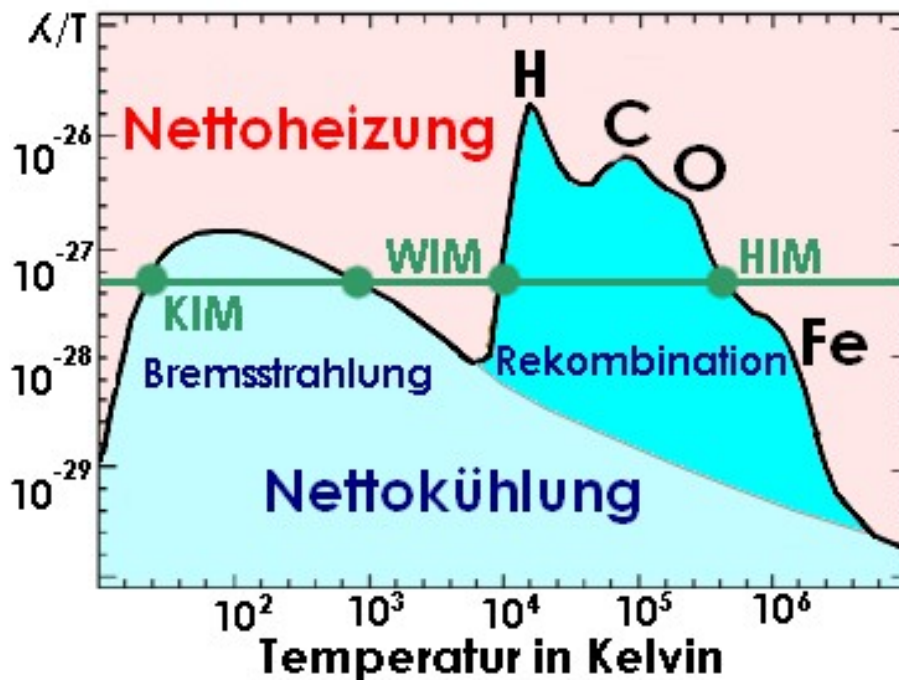
Um herauszufinden, für welche Temperaturen die Gleichung erfüllt wird, muss man beide Seiten der Gleichung in eine Grafik einzeichnen und den Schnittpunkt suchen.



In dieser Grafik ist  $\frac{\lambda}{T}$  im Verhältnis zur Temperatur aufgetragen. Unterhalb der schwarzen Linie ist die Kühlung stärker als die Heizung und das interstellare Medium kühlt ab (Es bewegt sich in der Grafik nach links). Oberhalb der schwarzen Linie tritt der gegenteilige Effekt auf. Das interstellare Medium befindet sich also immer irgendwo entlang der Linie.

Zusätzlich ist eingezeichnet, wie die Strahlungsleistung erzeugt wird. Bei weniger als 1000K wird sie nur von der Bremsstrahlung erzeugt, bei mehr als 1000K kommt die Rekombination der in der Grafik aufgetragenen Atome hinzu.

Um herauszufinden in welchen Phasen das interstellare Medium vorkommt, muss man einen konstanten Druck einzeichnen (grüne Linie) und die Schnittpunkte betrachten.



Man erkennt, dass es im wesentlichen drei Phasen gibt: Das heiße interstellare Medium (HIM), das warme interstellare Medium (WIM) und das kühle interstellare Medium (KIM) (Die zwei Schnittpunkte beim warmen interstellaren Medium unterscheidet man nicht, weil sie sehr nah beieinander liegen). Die unterschiedlichen Phasen können auch unmittelbar nebeneinander liegen, ohne dass sich deren Temperatur angleicht, weil sich die Nettokühlung der einen Phase und die Nettoheizung der anderen Phase ausgleichen.

Bei einem sehr hohen oder sehr niedrigen Druck hat die Linie weniger Schnittpunkte und es kommen nicht mehr alle Phasen vor. Den Druckbereich, bei dem alle Phasen vorkommen, bezeichnet man als Multiphasenzone.

Die genaue Höhe der schwarzen Linie hängt davon ab, in welchem Zustand die Atome des interstellaren Mediums sind: Je mehr Atome ionisiert sind, desto mehr Rekombination gibt es. In folgender Tabelle sind typische Daten für die einzelnen Phasen aufgetragen:

		Moleküle	neutrale Atome	ionisierte Atome
kühle Phase	Dichte	$600.000 \frac{T}{m^3}$	$600.000 \frac{T}{m^3}$	
	Temperatur	15K	100K	
	Druck	$1,3 \times 10^{-11} \text{bar}$	$8,4 \times 10^{-11} \text{bar}$	
warme Phase	Dichte		$1.100.000 \frac{T}{m^3}$	$20.000 \frac{T}{m^3}$
	Temperatur		5.000K	7.500K
	Druck		$7,7 \times 10^{-9} \text{bar}$	$3 \times 10^{-10} \text{bar}$
heiße Phase	Dichte			$15.000 \frac{T}{m^3}$
	Temperatur			1.000.000K
	Druck			$2 \times 10^{-8} \text{bar}$

Die leeren Zellen in der Tabelle bedeuten, dass die Atome in dieser Phase nie in diesem Zustand vorliegen.

## Felder

Im interstellaren Medium unterscheidet man zwischen mehreren Arten von Feldern  
**Strahlungsfelder:** Zu jedem Ort wird die Stärke der Strahlung angegeben. Durch Absorption, Emmission und Ionisation sind diese an unterschiedlichen Orten sehr stark verschieden.

**Geschwindigkeitsfelder:** Zu jedem Ort wird die durchschnittliche Geschwindigkeit der Teilchen angegeben. Es existieren sowohl großräumige Strömungen als auch kleinskalige Bewegungen.

**Magnetfelder:** Zu jedem Ort wird die Magnetkraft angegeben. Es kommen sowohl großräumige geordnete Magnetfelder, als auch turbulente Komponenten vor.

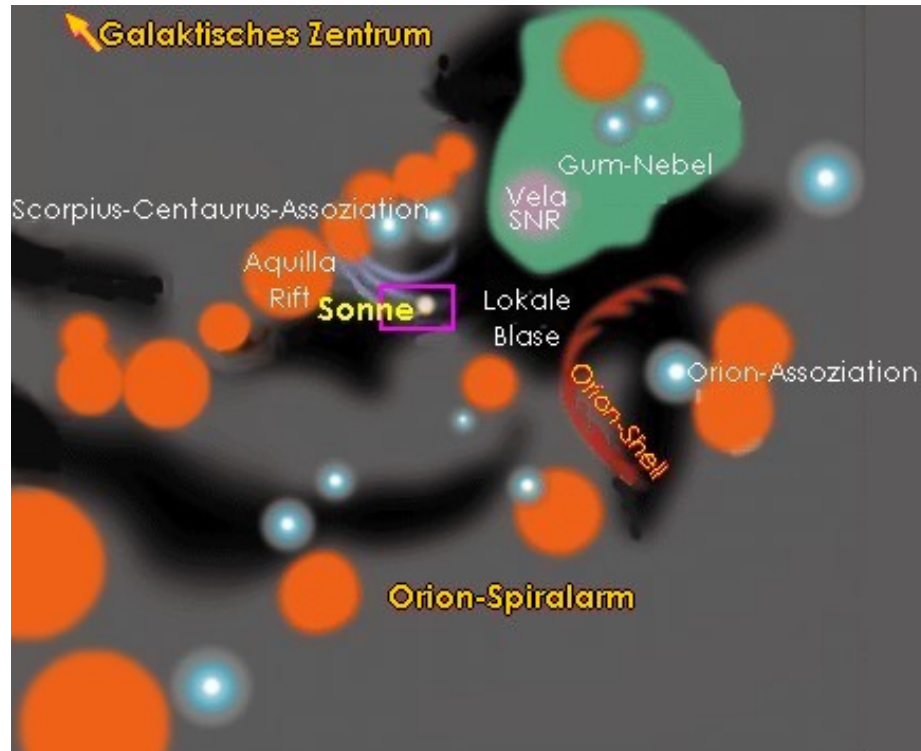
## Dynamisches Gleichgewicht

Alle Komponenten des interstellaren Mediums wechselwirken miteinander. Sie sind dabei im so genannten „dynamischen Gleichgewicht“, das bedeutet, dass die Wechselwirkungen in allen Richtungen gleich stark sind. Das ist notwendig, damit alle Komponenten langfristig vorhanden sind und nicht eine Komponente durch Wechselwirkung mit allen anderen Komponenten in diese aufgeht.

	<b>Plasma</b>	<b>Magnetfeld</b>	<b>Strahlung</b>
<b>Plasma</b>	Stoßwellen, Verdampfung, Kondensation	Instabilitäten, Kompression, Plasmawellen, Leitfähigkeit	Ionisation, HII-Region, Absorption, Rötung
<b>Magnetfeld</b>	Dissipation (Wellen), Magnetische Bremsung (Staubteilchen)	Rekonnektion, Turbulenz, Dissipation, Dynamoprozess	Faraday-Rotation, Dispersion (Wellen)
<b>Strahlung</b>	Heizung, Kühlung, Rekombination, H $\alpha$ -Linie	Synchrotron, Polarisation, Zeeman-Effekt	Comptoneffekt, Reemission (Staubteilchen)
<b>Kosmische Strahlung</b>	Heizung, Spallation, neutrale Pionen	Alf $\omega$ nwellen, Dissipation, Fermibeschleunigung	Bremsstrahlung, Gammastrahlung, Čerenkovstrahlung

Diese Tabelle stellt eine Übersicht der einzelnen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten dar. Durch diese Vorgänge gleichen sich die Energiedichten an, sie beträgt in allen Komponenten ungefähr  $1\text{eV pro cm}^3$ . Eine Erklärung der Wechselwirkungen kommt in den Skripten über die einzelnen Komponenten vor.

## Sonnenumgebung



In dieser Grafik ist die Verteilung des interstellaren Mediums in Sonnenumgebung schematisch dargestellt. Dabei ist diffuses Gas grau, Molekülwolken rot, Sternassoziationen blau-weiß, Emissionsnebel dunkelgrün und Supernovaüberreste rosa dargestellt. Die nächste Sternentstehungsregion (der Orionnebel) ist nicht mehr in der Grafik zu sehen.





Diese Grafik stellt die unmittelbare Sonnenumgebung genauer dar (im großen Plan rosa eingekastelt). In dieser Grafik ist auch die Bewegung der Sonne im Vergleich zur Bewegung des interstellaren Mediums eingezeichnet. Sie bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 16,5km/s.