

Interstellares Medium

Interstellarer Staub

Grundlagen aus dem ersten Semester:

10-Interstellares Medium (Seite 5)

07-Eigenschaften der Sterne (Seite 7 - 8)

Der Großteil des interstellaren Mediums ist gasförmig. Vereinzelt haben sich jedoch auch Teile des interstellaren Mediums zu festen Staubteilen verbunden. Diese Teile machen 1% des interstellaren Mediums aus.

1 Endteckung

Wir wissen von der Existenz des interstellaren Staubs, weil er zwei Arten von elektromagnetischen Wellen besonders stark extinktiert: Wellen mit einer hohen Frequenz (Rötung) und Wellen die normal zur galaktischen Ebene schwingen (Polarisation).

Polarisation

Der Staub absorbiert vorwiegend Wellen, die normal auf die galaktische Ebene schwingen (je größer der Winkel zwischen galaktischer Ebene und Lichtwelle ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie absorbiert werden). Die meisten Lichtwellen, die durch eine Dunkelwolke kommen, sind also parallel auf die galaktische Ebene polarisiert.

Als Grund für die Polarisation vermutet man, dass der interstellare Staub durch Magnetfelder so ausgerichtet ist, dass die längste Seite normal auf die galaktische Ebene steht. Lichtwellen, die normal auf die galaktische Ebene schwingen, treffen daher mit höherer Wahrscheinlichkeit auf den Staub als Lichtwellen, die parallel dazu schwingen.

Um anzugeben wie stark die Polarisierung ist, definiert man den Polarisationsgrad. Er gibt an, um wie viel Prozent die Intensität der zur galaktischen Ebene parallelen Lichtwellen schwächer ist, als die Intensität der auf die galaktischen Ebene normalen Strahlen. Um den Polarisationsgrad auszurechnen, muss man daher die Differenz zwischen parallelen und normalen Strahlen ausrechnen und diese (um es prozentuell anzugeben) durch die Intensität der parallelen und normalen Strahlen zusammen dividieren.

$$P = \frac{I_{parallel} - I_{normal}}{I_{parallel} + I_{normal}} \quad (1.1)$$

Der Polarisationsgrad ist von der gesamten Absorption der Strahlung abhängig. Wenn der Polarisationsgrad viel kleiner als 1 ist, ist dieser Zusammenhang linear mit $P=0,03A_V$. Das bedeutet, dass in dem Fall 51,5% der absorbierten Strahlen mit der visuellen Wellenlänge 548nm normal und nur 48,5% der absorbierten Strahlen parallel zur galaktischen Ebene stehen.

Rötung

Der Staub absorbiert in allen Wellenlängen Licht. Wie viel Licht der Staub absorbiert, gibt man mit dem Farbindex (A_λ) an:

$$A_\lambda = L_{\text{Scheinbar}}(\text{ohne ISM}) - L_{\text{Scheinbar}}(\text{mit ISM}) \quad (1.2)$$

Der Farbindex ist wichtig, wenn man die absolute Helligkeit eines Sterns hinter einer Dunkelwolke wissen möchte: In dem Fall muss man diesen zur Formel für das Entfernungsmodul dazurechnen:

$$m_\lambda - M_\lambda = 5 \log d - 5 + A_\lambda \quad (1.3)$$

Der Farbindex nimmt mit der Menge des Staubs und der Energie der Welle zu. Da rote Wellen weniger Energie haben, erscheint alles hinter der Dunkelwolke rötlicher. Dieser Eindruck wird Rötung genannt. Die Stärke der Rötung wird mit dem Farbexzess angegeben:

$$A_\lambda(\text{oberes Band}) - A_\lambda(\text{unteres Band}) \quad (1.4)$$

Die Stärke der Rötung hängt vom gewählten Filter ab. Meistens wird das interstellare Medium mit dem B-V-Filter gemessen. Hier gilt:

$$A_\lambda(\text{B-Band}) - A_\lambda(\text{V-Band}) \approx 3,1 \quad (1.5)$$

2 Eigenschaften

Aus den Eigenschaften der Polarisierung und der Rötung kann man auf einige Eigenschaften des interstellaren Staubes schließen:

Staubgröße

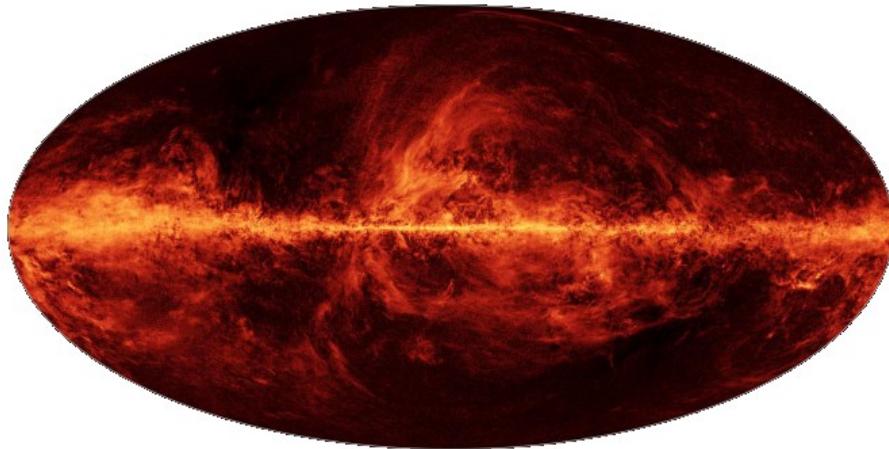
Wir wissen, dass die Rötung nur bei Teilchen auftritt, die kleiner als die Wellenlänge der geröteten Strahlung sind. Dadurch wissen wir, dass die Teilchen auf jeden Fall kleiner als $1\mu\text{m}$ groß sein muss.

Staubverteilung

Wenn man den B-V-Filter verwendet und die Absorption bei der Wellenlänge V misst, erhält man im Großteil der Milchstraße ungefähr den Wert 3,1. An einzelnen

Stellen gibt es lokal eine andere Absorption.

Aus dieser konstanten Absorption kann man schließen, dass auch die Staubverteilung in der Milchstraße annähernd konstant ist. Man kommt auf einen Wert von 10^{-23} Staubteilchen pro cm^2 . Da die Staubteilchen immer ungefähr 1% des interstellaren Mediums ausmacht, kommt man auf einen Gasanteil von 10^{-21} Gasatome pro cm^2



In dieser Grafik ist die Staubverteilung im Vergleich zur Beobachtungsrichtung in galaktischen Koordinaten dargestellt. In den rot dargestellten Gebieten befindet sich viel Staub in den schwarz dargestellten Gebieten befindet sich wenig Staub.

Staubdichte

Auf die Staubdichte kann man direkt aus der Extinktion schließen (je größer die Staubdichte, desto höher ist die Extinktion).

In den meisten Fällen messen wir eine Staubdichte von $1 \frac{mag}{kpc}$. Um diesen Wert in die Formel 1.9. aus dem Skript über Strahlungsänderungen einzusetzen, müssen wir ihn in Prozent pro Meter umrechnen. Eine Abnahme von 1mag bedeutet laut Definition, dass man die Anfangshelligkeit durch 2,512 dividieren muss um die Endhelligkeit zu erhalten. Um die prozentuelle Abnahme zu erhalten, muss man 100 durch 2,512 dividieren und erhält eine Abnahme um 40% pro Kiloparsec.

Wir können jetzt in Formel 1.9. aus dem Skript über Strahlungsänderungen für $N(s) = 0,4N_0$ und für $s = 1000pc = 3 \times 10^{21}cm$ einsetzen und erhalten dadurch:

$$0,4N_0 = N_0 e^{-\frac{\ln(\frac{1}{2})}{l_a} 3 \times 10^{21}} \quad (2.1)$$

Um die mittlere freie Weglänge zu berechnen, muss man die Formel nach l_a umformen.

$$I_a = -3 \times 10^{21} \frac{\ln(0,5)}{\ln(0,4)} \quad (2.2)$$

Durch Ausrechnen der Logarithmen kommt man auf eine mittlere freie Weglänge von $2,3 \times 10^{21}$ m. In einem Flächenelement mit einer Länge von $2,3 \times 10^{21}$ m und einer Breite von einem klassischen Photonendurchmesser ($2,8 \times 10^{-13}$ m). Insgesamt hat dieses Flächenelement $6,4 \times 10^{-8}$ cm².

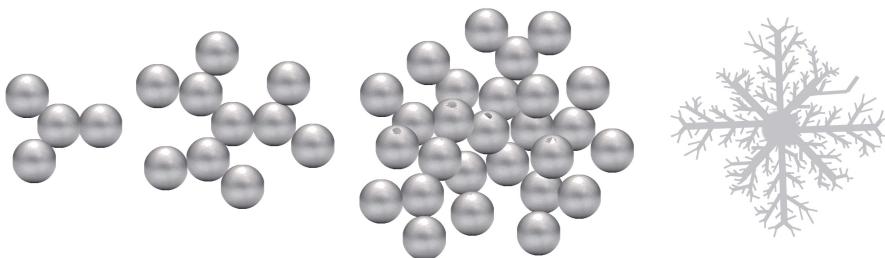
Um auszurechnen, wie viele Teilchen sich auf 1cm² befinden, muss man eins (weil sich in diesem Flächenelement genau ein Teilchen befindet) durch das Flächenelement dividieren. Daraus ergibt sich eine Dichte von $1,6 \times 10^7$ Photonen pro cm².

Wenn man das Ergebnis mit der Anzahl der Gasteilchen im ISM vergleicht, kommt man zu dem Schluß, dass der Staub nur 1% des ISM ausmacht. Da der Extinktionskoeffizient von Staub im visuellen Bereich um so vieles größer als der Extinktionskoeffizient von Gas ist, dominiert der Staub dennoch bei der Rötung.

Staubform

Von der Form wissen wir nur, dass die Staubteilchen in Richtung des Magnetfeldes länger sind, weil sie das Licht sonst nicht polarisieren würden.

Wenn man davon ausgeht, dass die Gasteilchen zufällig von allen Seiten kommen, erhält man die Form eines Fraktals: In die Richtungen, aus der die Atome zuerst kommen bildet sich ein Arm von einem Atomdurchmesser Länge. An diesen Armen bleiben weitere Atome haften und bilden ihrerseits Arme. In der Mitte bleiben so viele Atome haften, dass alle Richtungen abgedeckt werden und die Arme verbreitern sich, während sich nach außen hin an jedem Arm weitere immer dünnerne Arme bilden. Die dünnsten Arme sind jeweils nur so dick wie ein Atom.



Staubzusammensetzung

Die Extinktion kann man aus der Staubform, der Staubgröße und der Staubzusammensetzung berechnen. Wenn man diese Formel nach der Staubzusammensetzung umformt, und die bekannte Extinktion, sowie die Form eines Fraktals einsetzt, hängt diese Formel nur von der Staubgröße ab. Man kennt jedoch nur eine Maximalgröße. Aus dieser, aus den Spektrallinien und aus der Entwicklung des ISM, kann man abschätzen, welche Materialien im Staub vorkommen könnten: Man vermutet Silikate, Graphit und Eisformen.

Staubtemperatur

Die kinetische Temperatur ist als die mittlere kinetische Teilchenenergie definiert. Wenn der Staub ein Photon emmitiert, erhält er kinetische Energie, wenn er ein Photon extinktiert, gibt er kinetische Energie ab. Um die Temperatur des Staubes auszurechnen, muss man daher die extinktierten Photonen von den emmitierten Photonen abziehen.

Der Extinktionskoeffizient gibt nur die Menge des extinktierten Lichts im Verhältnis zum einfallenden Licht an. Um die Menge des extinktierten Lichts zu messen, muss man daher den Extinktionskoeffizienten mit dem einfallenden Licht (Gesamtstrahlungsstrom mal Fläche) multiplizieren.

$$FAk_{\nu} \quad (2.3)$$

Für den Gesamtstrahlungsstrom kann man das Integral des Strahlungsstromes über alle Frequenzen einsetzen. Die Fläche können wir als kreisförmig nähern. (Die Arme der Fraktale werden durch Zufallsverteilung in alle Richtungen gleich lang und die Abstände dazwischen werden durch die Verästelung vernachlässigbar gering). Die Streuung ist vernachlässigbar gering, also kann man statt des Extinktionskoeffizienten den Absorptionskoeffizienten einsetzen.

$$\int_0^{\infty} F_{\nu} r^2 \pi \kappa_{\nu} \quad (2.4)$$

Der Emmissionskoeffizient ist im thermodynamischen Gleichgewicht laut kirchhoff'schem Gesetz

$$j_{\nu} = B_{\nu} \kappa_{\nu} \quad (2.5)$$

Die Emmission findet auf der gesamten Oberfläche des Staubkorns statt, das heißt man muss dieses Ergebnis mit der Oberflächenformel der Kugel multiplizieren. Um vom Strahlungsstrom auf den Gesamtstrahlungsstrom zu kommen, muss man wieder über alle Frequenzen integrieren.

$$j_{\nu} = \int_0^{\infty} 4r^2 \pi B_{\nu} \kappa_{\nu} \quad (2.6)$$

Damit die Temperatur gleich hoch bleibt, muss die extinktierte Strahlung gleich hoch wie die emmitierte Strahlung sein. Man kann also (2.4) und (2.6) gleichsetzen

$$\int_0^{\infty} F_{\nu} r^2 \pi \kappa_{\nu} = \int_0^{\infty} 4r^2 \pi B_{\nu} \kappa_{\nu} \quad (2.7)$$

Diese Gleichung kann man auf beiden Seiten nach der Frequenz ableiten und durch $r^2 \pi k_{\nu}$ kürzen. Für F_{ν} , kann man das Stefan-Boltzmann-Gesetz einsetzen (Formel 4.5. im Skriptum über Strahlungsänderungen)

$$\sigma T^4 = 4B_\nu \quad (2.8)$$

Diese Formel kann man nach der Temperatur umformen und erhält damit

$$T = \sqrt[4]{\frac{4B_\nu}{\sigma}} \quad (2.9)$$

Normalerweise haben die Staubeilchen eine Temperatur zwischen 15K und 30K. In der Nähe von Sternen können die Staubeilchen Temperaturen von bis zu 100K erreichen und damit auch im mittleren Infrarot strahlen. Im heißen interstellaren Medium kann es gar keinen Staub geben, weil die Staubeilchen bei Temperaturen zwischen 1500K und 1800K verdampfen.

Da kaum Stöße zwischen den Staubeilchen und dem Gas stattfinden, wirkt sich die Temperatur der Staubeilchen überhaupt nicht auf die Temperatur des Gases aus und umgekehrt.