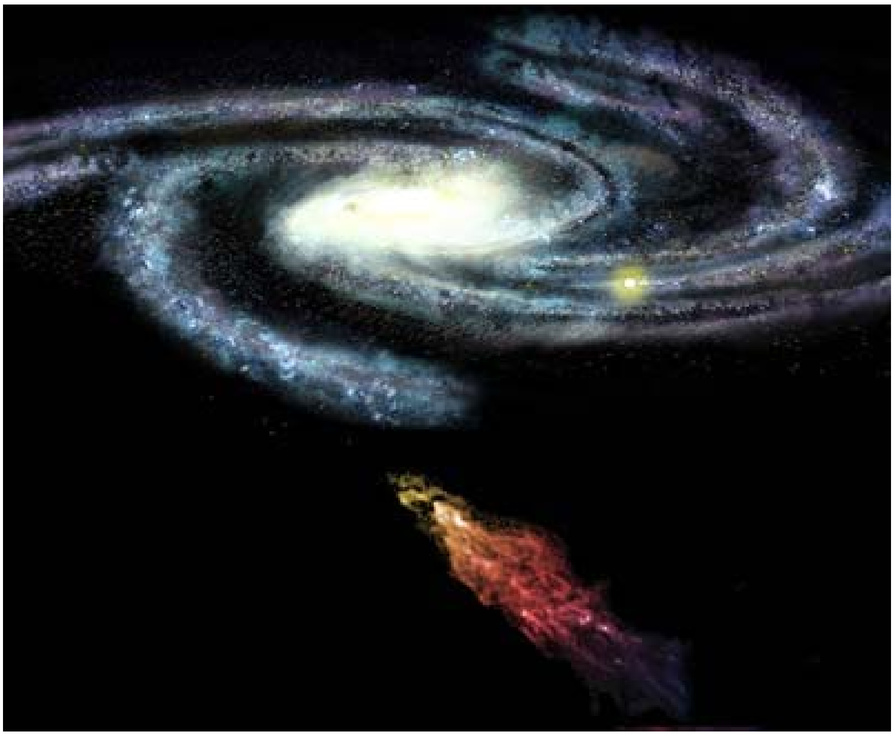
wissenschaft in die schulen!

# Kosmisches Gas

Oliver Schwarz

Obgleich in der Schulphysik alle Aggregatzustände der Materie gleichberechtigt eingeführt werden, beziehen sich doch viele Beispiele aus Gründen der leichteren experimentellen Handhabbarkeit lediglich auf feste und flüssige Stoffe. Der gasförmige Aggregatzustand bleibt oftmals das, als was er für die Schüler im Schulunterricht häufig erlebbar ist – geruchslose, farblose, transparente „Luft“, mit der man Modellkolben in Zylindern bewegen kann oder einen Fahrradschlauch aufpumpt.
Astrophysikalische Beispiele können die überraschenden Eigenschaften von Gasen verdeutlichen. Das bekannteste hierzu stammt immer noch aus der Sonnenphysik. Trotz einer mittleren Dichte von etwa dem Anderthalbfachen der Dichte des Wassers ist die Sonne eine Gaskugel, deren Materie sogar in sehr guter Näherung die Modellvorstellung des einfachsten aller Gase erfüllt, nämlich die des idealen Gases.
Nachfolgend werden Hilfestellungen für einen entwickelnden Unterricht geboten, der sich eng an den Text des Artikels „Kosmisches Gas - Das neue Bild des interstellaren und intergalaktischen Mediums“ (SuW- 9/09) anlehnt. Als Variante könnte man in der gymnasialen Oberstufe das gemeinsame Lesen und Verstehen dieses Textes im Klassenverband nutzen, um die Lesekompetenz der Schüler zu fördern. Aber auch in diesem Fall sollte die physikalische Seite des Artikels anhand von Gleichungen und Diagrammen erörtert werden.

| Übersicht der Bezüge im WIS!-Beitrag | | |
|---|---|---|
| Physik | Mechanik<br>Quantenphysik<br>Thermodynamik | Druck, Gravitationskraft, potentielle Energie, kinetische Energie, Gleichung des idealen Gases, Ionisation, thermodynamische Energie |
| Astronomie | Astropraxis, Galaxien, diffuses Medium | Radiostrahlung, 21 cm Strahlung des neutralen Wasserstoffs, Modelle der Galaxis |
| Verknüpfungen | Astro/Ph/Ma | Volumen- und Dimensionsberechnungen, Ablesen von Längen, Verhältnisgleichungen, Interpretation von Diagrammen, Potenzrechnung |



**Smith`s Cloud – eine gewaltige kosmische Gaswolke bewegt sich auf unser Milchstraßensystem zu (hier illustriert) und wird etwa in 40 Mio Jahren auf dieses stoßen. (© Bill Saxton, NRAO / AUI / NSF)**

**Einstieg:**
**Leichte Aufgaben (Volumenberechnung, Massenberechnung, Angabe von Größenverhältnissen)**

***Frage 1:***
Berechne die Gesamtmasse des Gases im koronalen Halo des Milchstraßensystems. Gehe für eine *Abschätzung* davon aus, dass der Durchmesser des Halos ca. 600000 Lichtjahre und die mittlere Dichte des Gases etwa 30 Wasserstoffatome pro Kubikmeter beträgt. Vergleiche diese Masse mit der Masse der leuchtenden Sterne im Milchstraßensystem.
Gegebene Größen:
Teilchen pro Kubikmeter: $n=30m^{-3}$
Radius des Halos: $600000ly=5{,}68\cdot10^{21}$ m
(Weitere Größen wie die Protonenmasse, die Sonnenmasse und die ungefähre Masse der in der Galaxis leuchtenden Sterne sind aus dem Internet oder Tabellenwerken zu besorgen.)

*Lösung:* Annahme eines Kugelvolumens

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

$V=7{,}68\cdot10^{65}m^3$

Anzahl der Teilchen in diesem Volumen:

$$N = nV$$

$N=2{,}3\cdot10^{67}$

Im Wesentlichen liefern die Atomkerne der Wasserstoffatome (Protonen) einen Beitrag zu dieser Teilchenzahl. Für eine genauere Abschätzung müsste man die Anteile von molekularem und atomarem Wasserstoff genau kennen. Wir gehen von atomarem Wasserstoff aus:

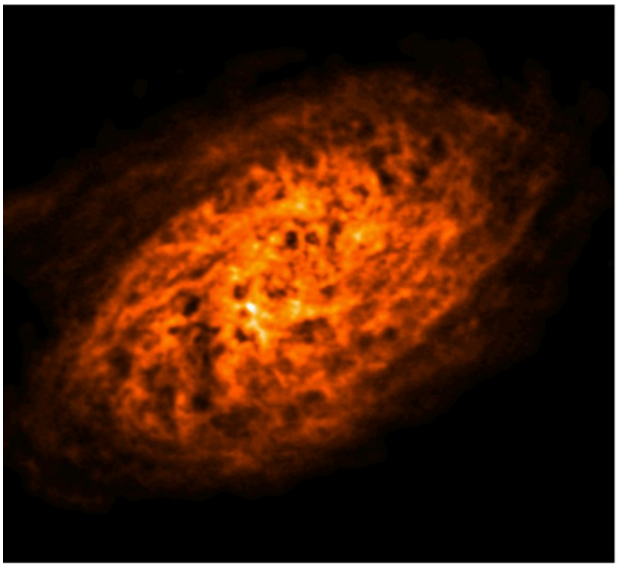
$$M = Nm_p$$

$M=3{,}8\cdot10^{40}$kg (=19 Mrd. Sonnenmassen)

Die Masse des koronalen Gases beträgt in dieser Schätzung ca. 19% von der Gesamtmasse der in der Galaxis leuchtenden Sterne.

*Frage 2:*

Im SuW-Artikel finden sich zwei Bilder der Galaxie NGC 2403. Diese Bilder besitzen den gleichen Maßstab. Eine Aufnahme zeigt die Galaxie im sichtbaren Licht, das hauptsächlich von Sternen stammt. Das andere Bild entstand aus Beobachtungen von Radiostrahlung, die neutraler Wasserstoff aussendet.
Um welchen Faktor ist die aus neutralem Wasserstoffgas bestehende Scheibenstruktur größer als die Scheibe, in der die Sterne leuchten?




**Credit: Image courtesy of NRAO/AUI and Tom Oosterloo, Astron, The Netherlands(for details, see Image Use Policy).**

*Lösung:* Hier ist ein einfaches Ausmessen mithilfe eines Lineals erforderlich. Eine geeignete Strecke zum Ausmessen dürfte dabei die in beiden Bildern leicht auffindbare Hauptachse der elliptisch verzerrten Scheibenstruktur sein.
Man erhält: Die Wasserstoffscheibe ist etwa 3 Mal größer als die Scheibe, in der Sterne leuchten.

**Physikalische Kernüberlegungen:**
**Ionisation der interstellaren Materie, stabile und instabile Zustände neutraler Wasserstoff-wolken**

Sterne, die in interstellares Wasserstoffgas eingebettet sind, ionisieren das sie umgebende Medium. Als Folge hiervon bildet sich eine – nachfolgend als kugelförmig idealisierte – Region um den Stern, in der es nur ionisierten Wasserstoff gibt. Man bezeichnet diese Region als Strömgren-Sphäre. Das zu Grunde liegende Prinzip ist recht einfach zu verstehen:
Von allen Photonen, die der Stern aussendet, können solche, deren Energie über der Ionisierungsenergie von Wasserstoff liegt, die Elektronen aus den Atomhüllen herauslösen. Aus der Strahlungsverteilung im Sternspektrum (die im Wesentlichen aus der Sterntemperatur an der Oberfläche folgt) und dem Sternradius kann man die Gesamtanzahl N aller Photonen berechnen, die den Stern je Sekunde verlassen und die eine Wasserstoffionisation bewirken können. Würde es nur den Ionisationsprozess geben, dann müsste sich die ionisierte Wasserstoffumgebung um den Stern immer weiter in den Raum hinaus ausdehnen. Doch es existiert auch ein gegenläufiger Prozess: Durch Rekombination können die Wasserstoffionen Elektronen einfangen und wieder zu neutralen Atomen werden. Rekombinieren allerdings Elektronen unmittelbar in das erste Energieniveau, dann wird dabei ein Photon frei gesetzt, das neutralen Wasserstoff erneut ionisieren kann. Daher tragen nur solche Rekombinationen zur Bildung neutralen Wasserstoffs bei, bei denen nicht in das erste Niveau rekombiniert wird. Man vermag aus statistischen und quantenphysikalischen Betrachtungen den Koeffizienten C dieser Rekombinationen zu berechnen. Diese Berechnung ist hier nicht von Interesse, wohl aber die folgende grundlegende Gleichgewichtsüberlegung:
Das Volumen V der Strömgren-Sphäre ist gerade so groß, dass die Zahl der in einer Sekunde vom Stern freigesetzten Photonen N (also die, welche Ionisation bewirken können!) gleich der Zahl der in einer Sekunde erfolgenden Rekombinationsvorgänge ist.
Die Zahl dieser Rekombinationen in der Sphäre ist proportional zur Anzahl der Rekombinationspartner pro Kubikzentimeter (das sind Protonen und Elektronen), zum Rekombinationskoeffizienten C und natürlich zum gesamten Volumen V der Kugel:

$$N = \frac{4}{3}\pi R^3 C n_p n_e = \frac{4}{3}\pi R^3 C n_p^2$$

N ist eine Funktion des Sternradius und seiner Oberflächentemperatur. Weil es etwa gleich viele Elektronen und Protonen im ionisierten Wasserstoffgas gibt, kann man die Unterscheidung zwischen diesen Teilchen auch fallen lassen.

Durch Umstellung nach R (Radius der Strömgren-Sphäre) folgt für ein und denselben Stern:

$$R = konst \cdot n_p^{-\frac{2}{3}}$$

Für ein und dieselbe Sternklasse ist der Radius der Strömgren-Sphäre eine Funktion der Protonendichte in der Wasserstoffwolke.

**_Frage 3:_**
Ein Hauptreihenstern der Spektralklasse B3 ist von einer Strömgren-Sphäre umgeben, die einen Radius von 17 Parsec besitzt. Dabei ist im Mittel pro Kubikzentimeter etwa 1 H-Atom im umgebenden Gas enthalten. Wie groß wäre die Sphäre, wenn die Dichte in der Sternumgebung stattdessen 2 H-Atome pro Kubikzentimeter betragen würde?

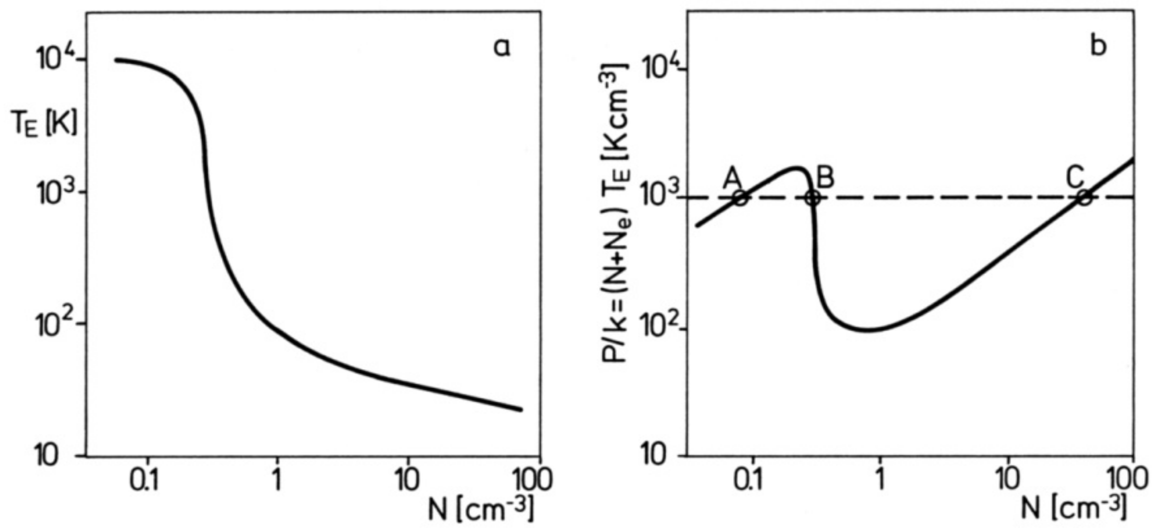
*Lösung:*

Es gilt der Ansatz: $\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{n_{P1}}{n_{P2}}\right)^{\frac{2}{3}}$

$$R_2 = 0.5^{\frac{2}{3}} \cdot R_1 = 10{,}7[pc]$$

Die Sphäre des ionisierten Wasserstoffs verkleinert sich auf 10,7 Parsec.

Kann kosmisches Gas bei seiner Kontraktion abkühlen? Diese Frage scheint auf den ersten Blick widersinnig zu sein. Schließlich wandelt sich bei der Kontraktion einer Gaswolke potentielle Energie in kinetische Energie der Teilchen um – und diese ist nichts anderes als ein Ausdruck für die Temperatur des Gases. Diese für das hydrostatische Gleichgewicht geltende Aussage ist allerdings nicht verallgemeinerungsfähig. Die Temperatur des Gases im All stellt sich nämlich in der Nähe eines Gleichgewichtes von wärmenden und kühlenden Einflüssen auf das Gas ein. Wärmend sind beispielsweise Stoßprozesse, in deren Folge sich die Geschwindigkeit der Teilchen (ihre Temperatur) erhöht, kühlend wirken Stoßprozesse, bei denen Atome so angeregt werden, dass sie die Energie dann als elektromagnetische Strahlung (Photonenemission) abgeben (die Schüler der gymnasialen Oberstufe sollten den Franck-Hertz-Versuch kennen, bei dem ein analoger Prozess abläuft) oder bei denen kosmische Staubteilchen erhitzt werden, die anschließend ebenfalls Wärmestrahlung aussenden.
Wie und ob sich das Gleichgewicht zwischen Kühlung- und Erwärmung einstellt, hängt von der Dichte und dem Gasdruck ab. Die Berechnungen hierzu sind relativ kompliziert, lassen sich aber mithilfe von Diagramm veranschaulichen.
Die Abbildungen unten zeigen, die Gleichgewichtstemperatur $T_E$ in Abhängigkeit von der Teilchendichte der Gasatome (linkes Diagramm) und den Gasdruck in Abhängigkeit von der Teilchendichte (rechtes Diagramm) für neutrales Wasserstoffgas.




**Quelle: Scheffler, Elsässer, Bau und Physik der Galaxis, 2. Aufl. Bi-Wissenschaftsverlag, Mannheim, S.348**

***Frage 4:***
Die beiden Diagramme enthalten eine Antwort auf die Frage, warum es zwei stabile Zustände interstellarer neutraler Wasserstoffwolken gibt, die sich häufig sogar in benachbarten Regionen des Alls befinden können – nämlich „heiße“ und kalte Wasserstoffwolken. Interpretiere die Diagramme und erläutere Gründe, die für die Existenz dieser beiden Gaszustände sprechen.

*Lösung:*
Die Gleichgewichtstemperatur fällt in dem im Diagramm gezeigten Dichtebereich mit wachsender Teilchendichte. Beträgt die Dichte etwa $0{,}1\text{cm}^{-3}$, dann führen kleine Dichteerhöhungen zu einer Druckzunahme (rechtes Diagramm, Punkt A) und die Wasserstoffwolke kann sich gegen die Dichteerhöhung stabilisieren. Die Gleichgewichtstemperatur beträgt bei dieser Dichte ca. $10^4$K. Steigt die Dichte aber über einen Wert von ca. $0{,}3\text{cm}^{-3}$ (rechtes Diagramm Punkt B) dann fällt der Druck sehr schnell ab, obwohl die Dichte zunimmt. Im linken Diagramm sieht man, dass in diesem Bereich die Gleichgewichtstemperatur extrem schnell fällt. Erst bei einer Dichte von etwa $1\text{cm}^{-3}$ „verlangsamt“ sich der Temperaturabfall im linken Diagramm. Dadurch kann der Druck, der ja von Dichte und Temperatur des Gases (Gleichung des idealen Gases!) abhängt, mit wachsender Dichte wieder langsam zunehmen. Eine kontrahierende Wolke kann sich wieder stabilisieren, allerdings erst bei einer Temperatur kleiner als $10^2$K. Es gibt also einerseits heißes und verdünntes, andererseits kaltes und dichtes neutrales Wasserstoffgas.