

Physik des interstellaren Mediums

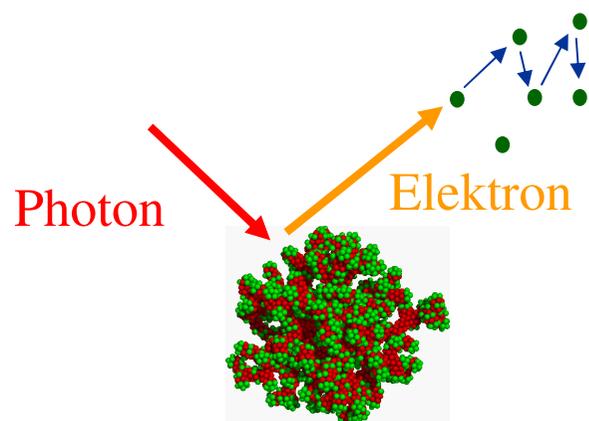


Evaluation:

www.physik.uni-muenchen.de/evaluation/

Heizungs- und Kühlungsprozesse im ISM

- **Heizung** beginnt mit der Ablösung eines **freien Elektrons** von einem interstellaren Teilchen (z.B. Gasatom, Molekül oder Staubkorn) durch **energiereiche Teilchen** oder **Photonen**.

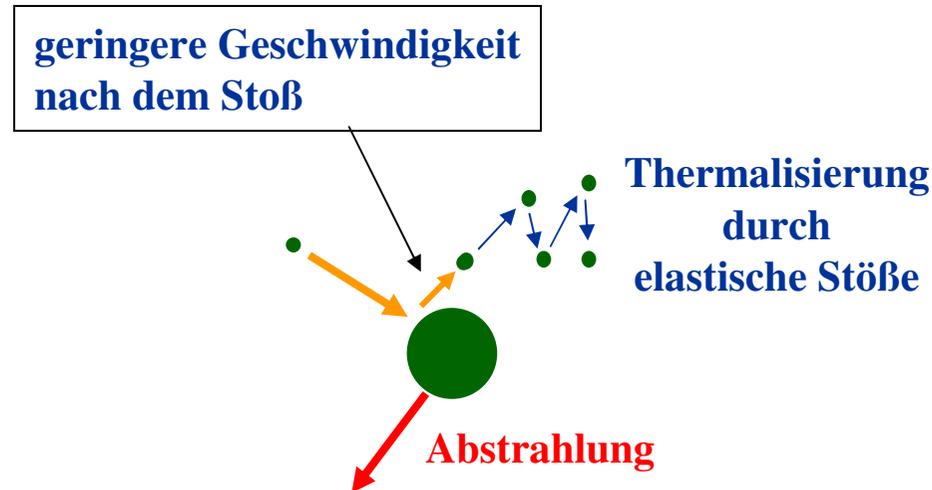


Thermalisierung
durch
elastische Stöße

Thermalisierungszeitskala: $\tau \approx 1000$ Jahre



- **Kühlung** erfolgt durch **elastische Streuung** zwischen einem leichten Teilchen (H,p,e,...) und einem schweren Teilchen



Heizungsrate: Γ : Energiegewinn pro Volumen und Zeit

Kühlrate: Λ : Energieverlust pro Volumen und Zeit

Thermisches Gleichgewicht: $\Gamma = \Lambda$

Heizungsprozesse im dichten und diffusen ISM:

- Kosmische Strahlung kann selbst in **dichte Molekülwolken** eindringen
→ **Heizung** und teilweise **Ionisation** des Gases

Ionisationsgrad: $\eta \approx 10^{-6}$

- Im **diffusen ISM** dominiert die stellare **UV Strahlung**, die Elektronen von interstellaren **Staubkörnern** ablöst.
Die **kinetische Energie** der Elektronen enthält einen Großteil der Energie des **UV-Photons**.

Photoelektrische Heizrate (Spitzer):

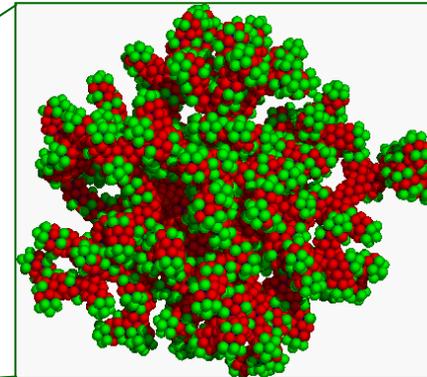
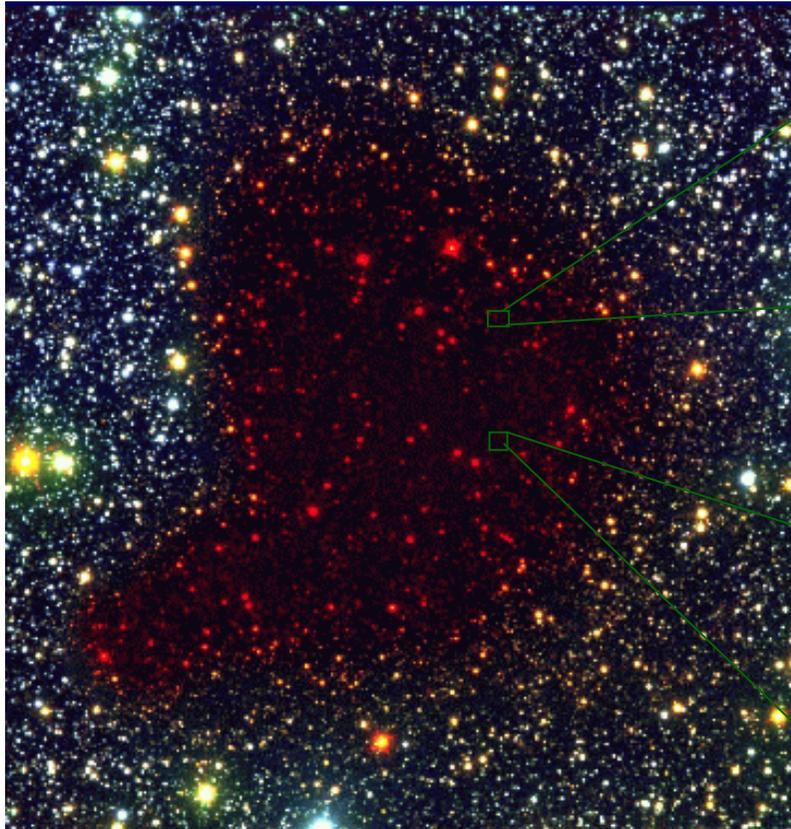
$$\Gamma_{\text{PE}} = 5 \cdot 10^{-26} \left(\frac{I_{\text{v}}}{I_{\text{v},\odot}} \right) n_{\text{H}} \text{ erg s}^{-1}$$

lineare Abhängigkeit

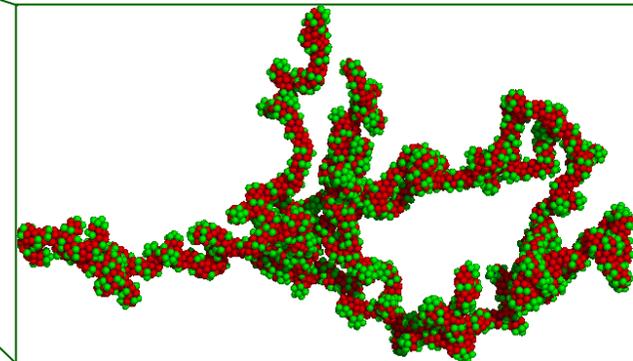
$n_{\text{Staub}} \sim n_{\text{H}}$

Interstellarer Staub

- Interstellarer Staub besteht aus Silikatkörnern und Ruß



C, Si, O



- Starke Absorption im **sichtbaren** und **UV-Bereich**
- Wenig Absorption im **Infrarot-** und **Radiobereich**

Der interstellare Staub:

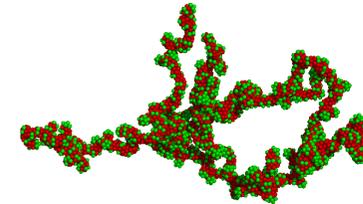
- Wellenlängenabhängigkeit der Absorption im optischen Bereich :

$$\tau_{\text{Staub}} \propto \lambda^{-1}$$

- **Mie-Streuung:** Größe der Teilchen entspricht der Wellenlänge des Lichts

$$a \approx 300 \text{ nm} = 0.3 \mu\text{m}$$

- Das durch den Staub gestreute Licht ist **teilweise polarisiert**
→ Staubteilchen sind **keine einfachen Kugeln**



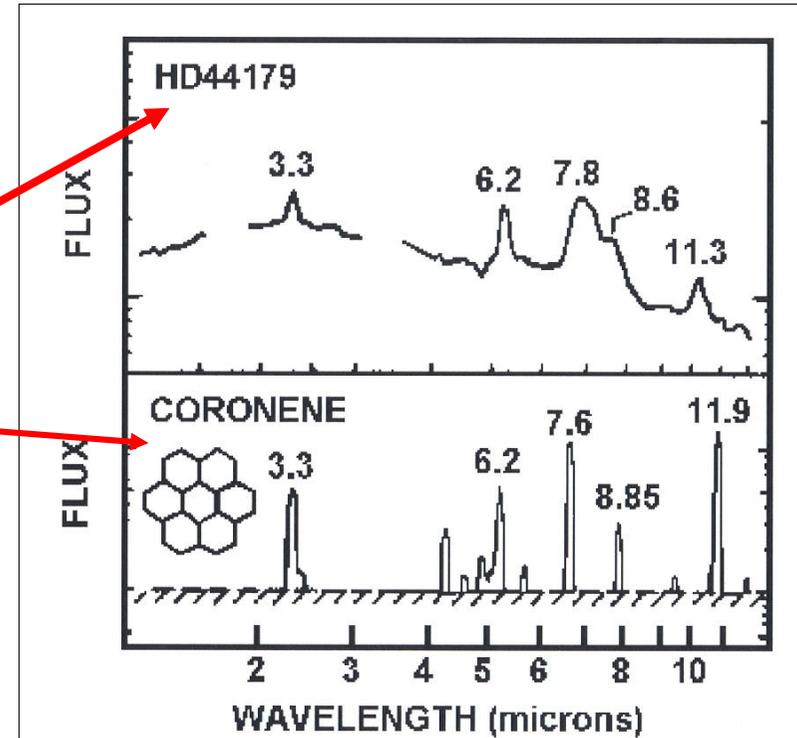
- **H-Oberflächendichte** und **Staubextinktion** sind korreliert

$$N_{\text{H}} = 1.9 \cdot 10^{21} A_{\text{V}} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$$

Absorption im V-band

Entstehung von Staub:

- Vergleich des **IR-Spektrums** der Atmosphäre eines **roten Riesen** mit dem Laborspektrum von **Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAHs)**.
- Moleküle aus mehreren **Benzolringen**:



Interstellarer Staub entsteht in den äußeren Atmosphären von Sternen mit einigen Sonnenmassen im roten Riesenstadium.

Kühlung im ISM:

- **Feinstruktur-Linienkühlung** (wie die 21 cm Linie) dominiert nahezu überall.
Ausnahme: heißes Gas und Molekülwolken
- Am wichtigsten sind die **Atome** und **Ionen**, die im ISM häufig vorkommen.
und deren **Feinstrukturzustände** nahe dem **Grundzustand** sind.

Neutrales Medium: C II, O I

- **Freie Elektronen** des ionisierten Kohlenstoffs **C II** regen das obere Feinstrukturniveau von **C II** an, wenn ihre kinetische Energie einer thermischen Energie mit Temperatur **91.2 K** entspricht.
- Das erste angeregte Feinstrukturniveau von **O I** entspricht einer thermischen Energie von **T=228 K**.

Beispiel:

e^- – Stoßquerschnitt $\sim 1/v \sim 1/\sqrt{T}$

$$\Lambda_{\text{CH}} = 1.23 \cdot 10^{-27} n_{\text{H}}^2 d_{\text{C}}^2 e^{-91.2\text{K}/T} \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{-1/2} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$$

$$n_{\text{C}} = 3.55 \cdot 10^{-4} n_{\text{H}}$$

Abreicherung von Kohlenstoff
durch Kondensation auf Staub

(Lequeux, 05)

Die Kühlkurve des ISM:

- Für $T < 10000 \text{ K}$, dominiert die Anregung von C II und O I.
- Für $T > 10000 \text{ K}$, dominiert die Anregung des H-atoms, sowie viele weitere Linien.

Die Kühlzeitskala:

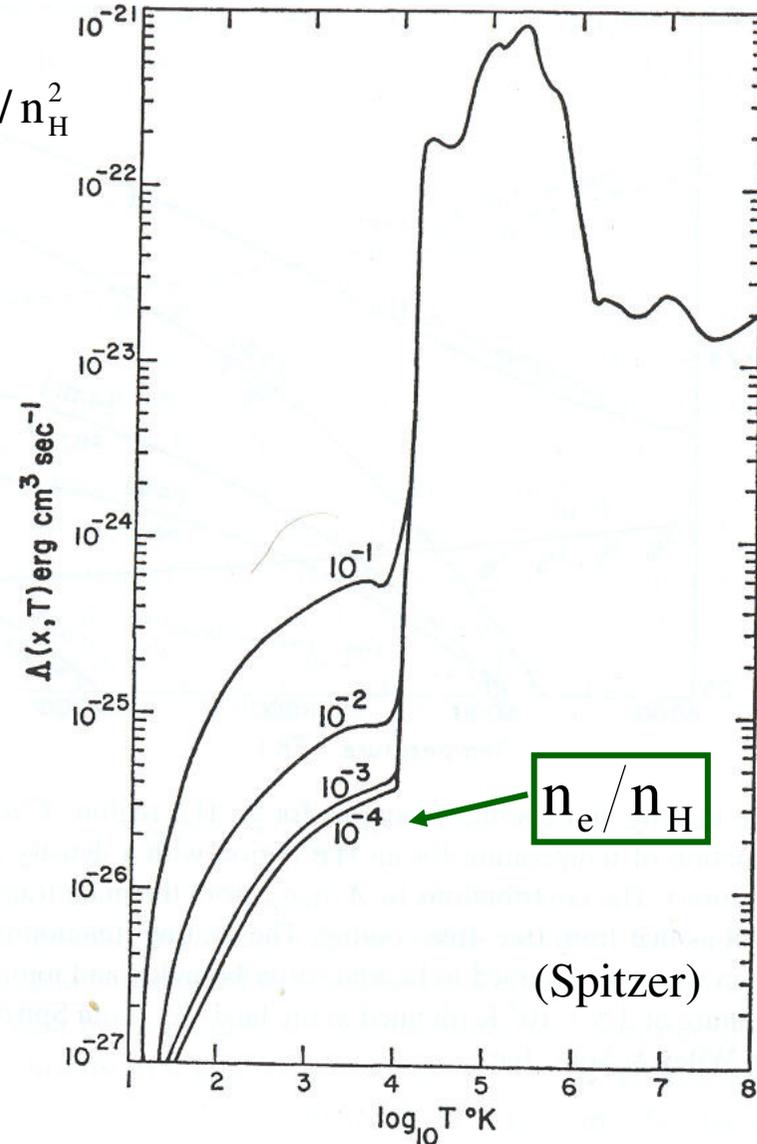
$$\frac{de}{dt} \approx -\Lambda_0 \cdot n_H^2 \quad e = \frac{3}{2} n_H k_B T$$

$$\rightarrow \frac{dT}{dt} = -\frac{2 \Lambda_0 n_H}{3 k_B} \approx -\frac{T}{\tau_c}$$

$$\Lambda_0 \approx 5 \cdot 10^{-26} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

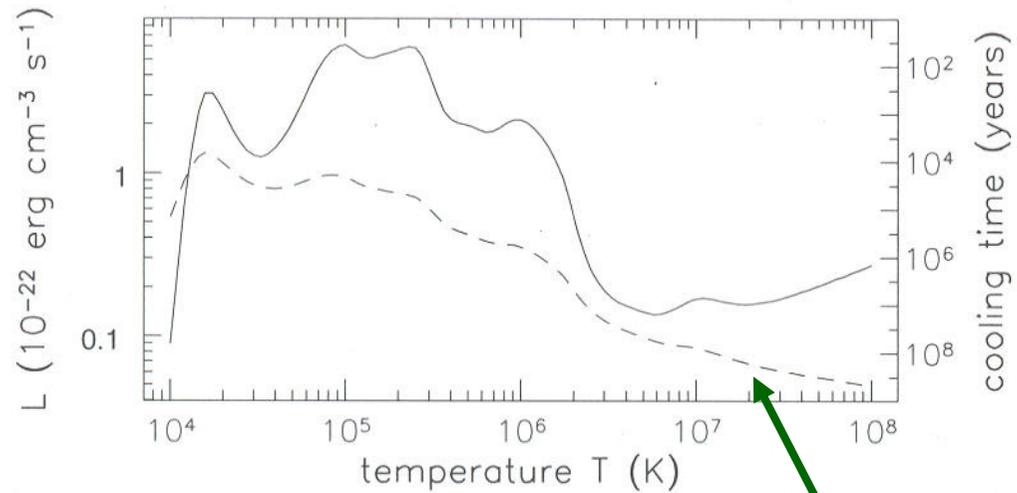
$$\tau_c = \frac{3 k_B T}{2 \Lambda_0 n_H} \approx 10^5 \left(\frac{T}{1000 \text{ K}} \right) \left(\frac{1 \text{ cm}^{-3}}{n_H} \right) \text{ Jahre}$$

$$\Lambda(T) / n_H^2$$



Galaxienentstehung:

- Galaxien können nur dort entstehen, wo das Gas effizient kühlen kann.



Kühlzeit für $n_{\text{H}} = 1 \text{ cm}^{-3}$

Bei **hohen Temperaturen** und **geringen Dichten** ist die Kühlzeit 1 Gyr.

Die Kühlkurve der Galaxien

