• **21 cm Srahlung** wird erzeugt, wenn sich der **Spin** des **Elektrons**, relativ zum **Proton** im Atomkern umdreht (verbotene Hyperfeinstruktur)

$$\uparrow\uparrow \xrightarrow{\text{Emission}} \uparrow\downarrow \; + \gamma\,(6\cdot 10^{-6}\ \text{eV})$$

	$p \quad e^-$	$p \quad e^-$
Drehimpuls:	$F = 1$	$F = 0$
Statistisches Gewicht:	$g = 3$	$g = 1$

$$\boxed{\begin{aligned}\nu &= 1.420405751786(30)\ \text{GHz}\\ \lambda &= 21.106114\ \text{cm}\end{aligned}}$$

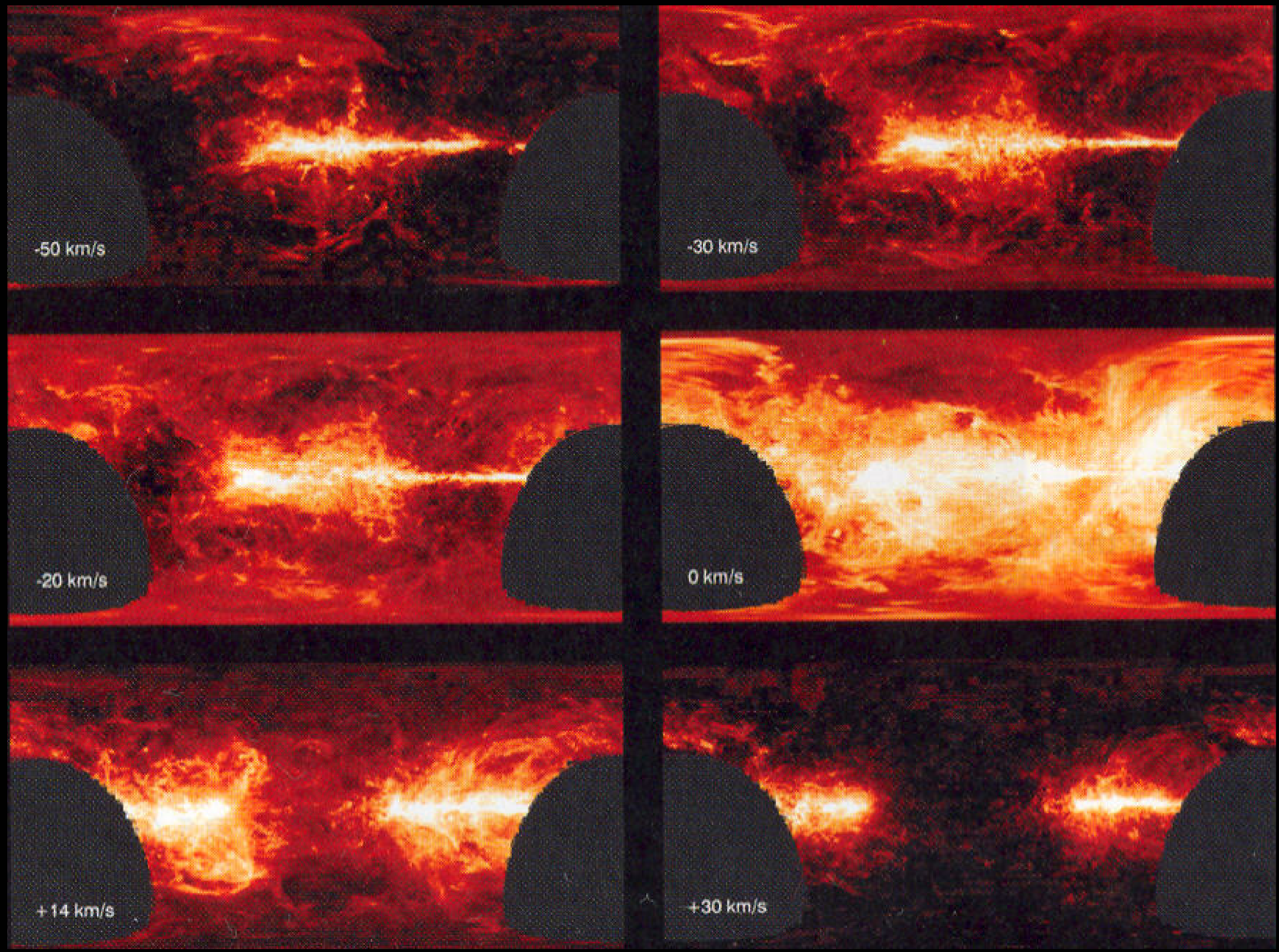
• **Verbotener Übergang:** Lebensdauer des angeregten Zustands **= 11 Million Jahre**.

• Auf der **Erde** hat selbst das beste Vakuum Gasdichten, die so hoch sind, dass alle Atome durch **Stöße** abgeregt werden, bevor sie 21 cm Strahlung emittieren.

• Im **ISM** sind die **Stoßzeitskalen** jedoch lang genug, dass viele H Atome **21 cm Strahlung** emittieren.

• **Beachte:** Obwohl das H-Atom im ISM sehr häufig ist führt die Tatsache, dass die 21 cm Emission nur **selten stattfindet** dazu, dass diese Linie **optisch dünn** bleibt.

Die HI-Emission der Milchstraße in der 21 cm Linie



Die fundamentale Strahlungstransportgleichung im Radiobereich

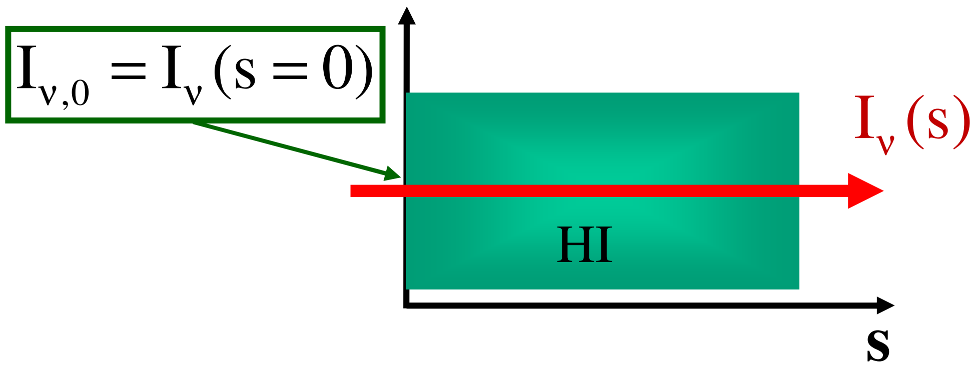
$$\boxed{I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)\, e^{-\tau_\nu} + \frac{2k_B T \nu^2}{c^2}\left(1 - e^{-\tau_\nu}\right)}$$

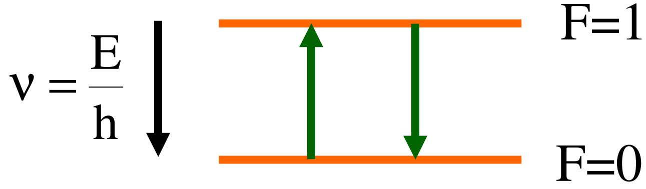
Intensität

Optische Dicke

HI Säulendichte
im Grundzustand

$$\tau_\nu = \frac{c^3 A_{ul}}{8\pi\nu^2}\,\frac{g_u}{g_l}\,\frac{h}{k_B T}\,\frac{1}{\Delta v}\, N_l$$





Anregungswahrscheinlichkeit:

Einstein Absorption

$$R_{0\to1} = B_{0\to1} \cdot I_\nu$$

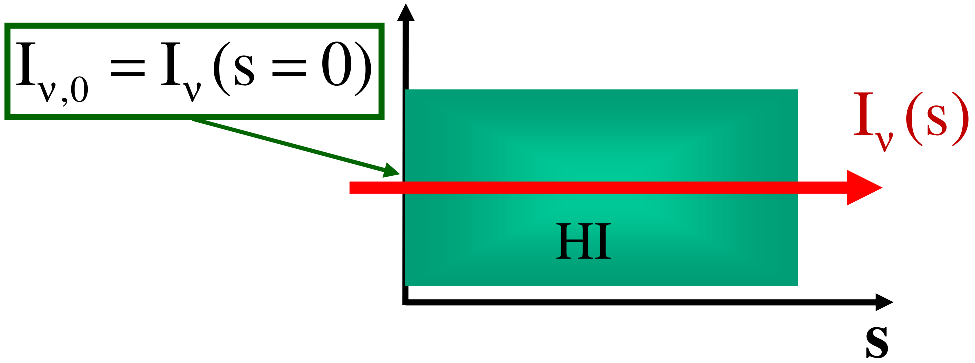
Abregungswahrscheinlichkeit:

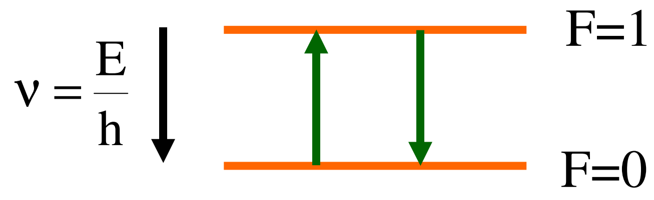
$$R_{1\to0} = A_{1\to0} + B_{1\to0} \cdot I_\nu$$

Spontane Emission

Stimulierte Emission

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \frac{h\nu}{4\pi}\left(n_1 R_{1\to0} - n_0 R_{0\to1}\right) = \frac{h\nu}{4\pi}\left(n_1 A_{1\to0} + \left(n_1 B_{1\to0} - n_0 B_{0\to1}\right) I_\nu\right)$$





$$\boxed{\frac{dI_\nu}{ds} = \frac{h\nu}{4\pi}\left(\cancel{n_1 A_{1\to 0}} + \left(n_1 B_{1\to 0} - n_0 B_{0\to 1}\right) I_\nu\right)}$$

Absorptionskoeffizient:

$$\kappa_\nu(s) \equiv \frac{h\nu}{4\pi}\left(n_0(s) B_{0\to 1} - n_1(s) B_{1\to 0}\right)$$

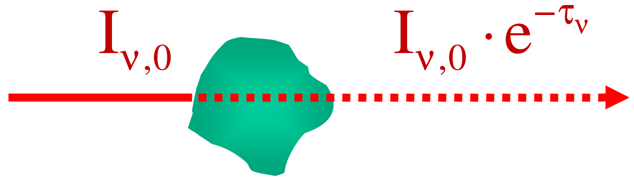
Optische Dicke:

$$\tau_\nu \equiv \int \kappa_\nu(s)\, ds$$

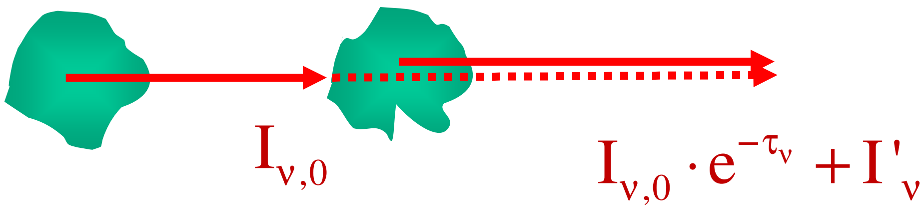
Keine Emission:

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu \cdot I_\nu \quad \rightarrow \quad I_\nu(s) = I_{\nu,0} \cdot e^{-\int \kappa_\nu ds} = I_{\nu,0} \cdot e^{-\tau_\nu(s)}$$

• Ohne **spontane Emission** würde man nur die hinter der Wolke emittierte, **verdünnte Strahlung** sehen.

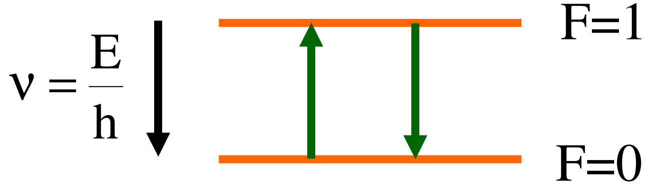


• Mit **spontaner Emission** wird die Hintergrundstrahlung **verdünnt** und gleichzeitig **neue Strahlung** erzeugt.



$$\frac{dI_\nu}{ds} = \frac{h\nu}{4\pi}\left(n_1 A_{1\to 0} + \left(n_1 B_{1\to 0} - n_0 B_{0\to 1}\right) I_\nu\right)$$

$$\kappa_\nu \equiv \frac{h\nu}{4\pi}\left(n_0 B_{0\to 1} - n_1 B_{1\to 0}\right)$$



$$d\tau_\nu = \kappa_\nu ds$$

$$\boxed{\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = \frac{n_1 A_{1\to 0}}{n_0 B_{0\to 1} - n_1 B_{1\to 0}} - I_\nu = S_\nu - I_\nu}$$

$$\boxed{\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = S_\nu - I_\nu}$$

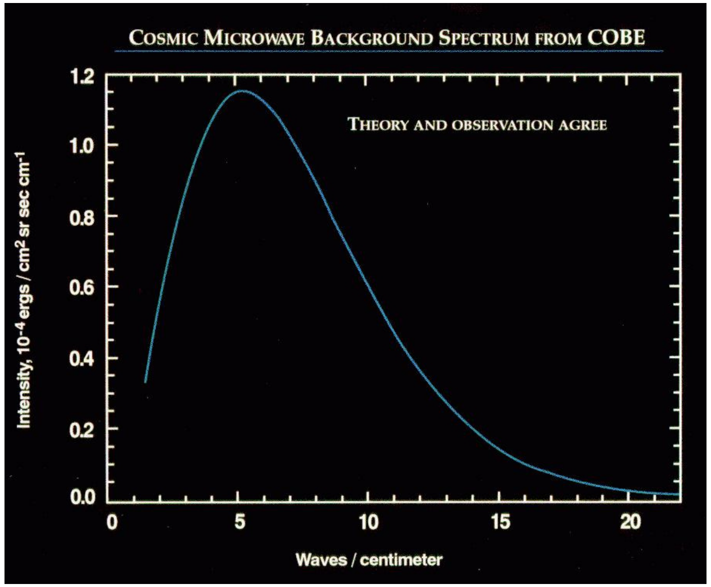
• Falls $S_\nu = \text{konstant}$ gilt:

$$\boxed{I_\nu(\tau_\nu) = I_{\nu,0}\, e^{-\tau_\nu} + S_\nu\left(1 - e^{-\tau_\nu}\right)}$$

• Große optische Tiefe $\tau_\nu \gg 1$:

$$I_\nu = S_\nu = B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2}\,\frac{1}{\exp\left(\dfrac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

Planck´scher Strahler



Bei **großer optischer Tiefe** erhalten wir **keine Information** über die Verteilung des HI in der Milchstraße.

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_{\nu,0}\, e^{-\tau_\nu} + B_\nu\left(1 - e^{-\tau_\nu}\right)$$

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \rightarrow \frac{2k_B T\nu^2}{c^2}$$

Radiobereich:

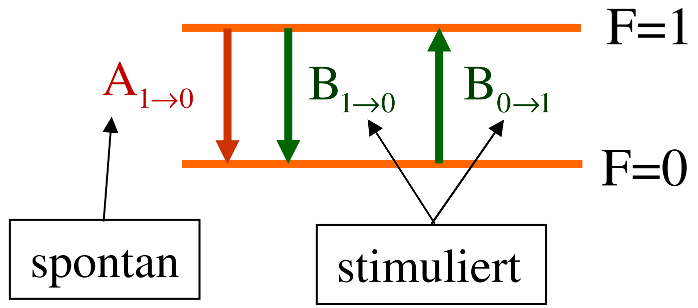
$$\boxed{\nu \ll 1 \quad \rightarrow \quad \exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) \approx 1 + \frac{h\nu}{k_B T}}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)\, e^{-\tau_\nu} + \frac{2k_B T\nu^2}{c^2}\left(1 - e^{-\tau_\nu}\right)}$$

(Strahlungstransportgleichung)

Der Absorptionskoeffizient:

$$\kappa_\nu \equiv \frac{h\nu}{4\pi}\left(n_0 B_{0\to1} - n_1 B_{1\to0}\right)$$



Es gilt:

Spontaner Emissionskoeff: $A_{1\to0} = \frac{2h\nu^3}{c^2} B_{1\to0}$ **und** $g_0\, B_{0\to1} = g_1\, B_{1\to0}$

$$\longrightarrow \quad \kappa_\nu = \frac{c^2}{8\pi\nu^2}\frac{g_1}{g_0} A_{1\to0}\, n_0 \left(1 - \frac{g_0}{g_1}\frac{n_1}{n_0}\right)$$

Radiobereich

Thermodynamisches Gleichgewicht: $\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0}\exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right) \approx \frac{g_1}{g_0}\left(1 - \frac{h\nu}{k_B T}\right)$

$$\longrightarrow \quad \boxed{\kappa_\nu = \frac{c^2}{8\pi\nu}\left(\frac{g_1}{g_0}\right) A_{1\to0}\frac{h}{k_B T}\, n_0 > 0}$$