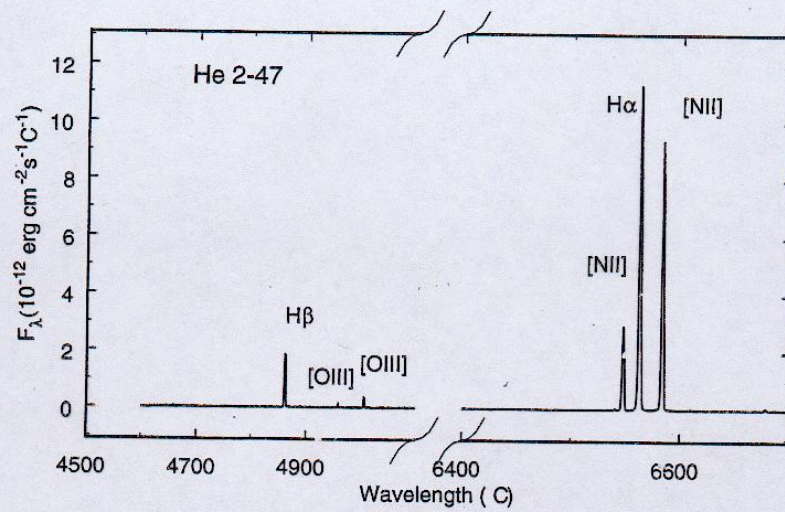
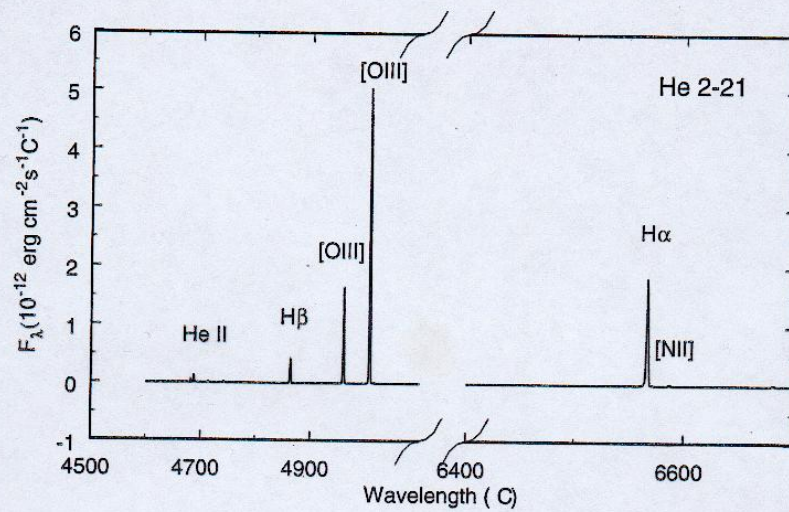




- Erlaubte Übergänge:

Übergangswahrscheinlichkeit : $A_{ul} = 10^8 \text{ sec}^{-1}$

Lebensdauer : $\tau = 10^{-8} \text{ sec}$

- "Verbotene" Übergänge:

Schreibweise: []

$A_{ul} \approx 1 \text{ sec}^{-1}$

$\tau \approx 1 \text{ sec}$

verboden nach Auswahlregeln der Quantenmechanik
(in 1. Näherung, el. Dipolstrahlung)

Beispiel: $[O\text{III}]$ 5007 Å

$[O\text{III}]$, 4959 Å

$A_{43} = 0.014 \text{ sec}^{-1}$

$A_{42} = 0.007 \text{ sec}^{-1}$

$\tau = 1/(A_{43} + A_{42}) = \underline{\underline{48s}}$

Extremes Beispiel: HI, 21 cm

Hyperfeinstrukturübergang

Grundzustand: $F=0 \rightarrow F=1$

$A_{10} = 2.85 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$

$\tau_1 = 1.1 \cdot 10^7 \text{ Jahre !!}$

beobachtet in IC 418

- beobachtete verbotene Linien stammen von Konfigurationen mp^n her, mit $m = 2 \text{ oder } 3$
 $n = 1 \dots 5$

Beispiel: $O\text{III} : 2p^2$ $O\text{II} : 2p^3$ $O\text{I} : 2p^4$

p^1 und p^5 - Konfiguration: 2 Niveaus $2p$

p^2, p^3, p^4 - Konfiguration: 5 Niveaus z.B. 0III

Nomenklatur:



Auswahlregeln: (LS-Kopplung) $\pi = \sum_i l_i$

erlaubte Ü.	el. Quadrupol	mag. Dipol
1.) Parität $\Delta\pi \neq 0$ nur odd-even even-odd	$\Delta\pi = 0$	$\Delta\pi = 0$
2.) $\Delta L = 0, \pm 1$	$\Delta l = 0, \pm 2$	$\Delta l = 0$
3.) $\Delta S = 0$		
4.) $\Delta j = 0, \pm 1$ nicht ($j=0 \rightarrow j=0$)	$\Delta j = 0, 1, \pm 2$ nicht: $0 \rightarrow 0, \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}, 1 \rightarrow 0$	$\Delta j = \pm 1, 0$ nicht ($j=0 \rightarrow j=0$)
5.) Δn beliebig	Δn beliebig	$\Delta n = 0$

Interkombinationslinien: "halbverbotene" Linien

Schreibweise $] \text{ z.B. } 0\text{III}]$, $1666 \text{ \AA}$

$\Delta S \neq 0$

Exkurs: Atomspektren

Schrödingergleichung: $\hat{H}\psi = E\psi$

Lösung: $\psi = \psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N, \alpha_1, \dots, \alpha_N, \alpha_1, \dots, \alpha_S)$

$\alpha_i = \text{Quantenzahlen}$ $S = 4N$

Bei N -Elektronen beschreiben $4N$ Quantenzahlen die Wellenfunktion

- Bsp. Wasserstoff: 1 Elektron n, l, m_l, m_s

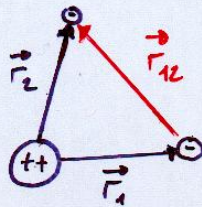
$$\hat{H} = -\frac{1}{2} \Delta - \frac{1}{r}$$

(atomare Einheiten:

$$\text{Länge} = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$$

$$\text{Energie} = \frac{m_e e^4}{2\hbar^2})$$

- Helium:



Hamiltonoperator für Mehrelektronensysteme:

$$\hat{H} = \underbrace{-\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} \Delta_i + \frac{1}{r_i} \right)}_{H_0} + \underbrace{\sum_{i < j} \frac{1}{r_{ij}} + \sum_{i=1}^N \{ (r_i) \vec{l}_i \vec{s}_i \}}_{\text{Störterme}}$$

ohne Störterme: gute Quantenzahlen:

$$n_1, l_1, m_{l_1}, m_{s_1}, \dots, n_N, l_N, m_{l_N}, m_{s_N}$$

"independent particle model"

mit Störtermen: m_{l_i}, m_{s_i} keine guten Quantenzahlen

wegen Drehmomenten zwischen $\vec{l}_i, \vec{l}_j$ bzw. $\vec{l}_i, \vec{s}_i$

"independent particle model" ψ_i :

$$\begin{aligned}\text{Energienmatrix: } \langle \psi_M | \hat{H}_0 | \psi_N \rangle &= \langle \psi_M | E | \psi_N \rangle \\ \text{ohne Störterme} &= E \cdot \langle \psi_M | \psi_N \rangle \\ &= E \cdot \delta_{MN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Energienmatrix} \\ \text{mit Störtermen: } \langle \psi_M | \hat{H} | \psi_N \rangle &\neq E \cdot \delta_{MN}\end{aligned}$$

Nichtdiagonalelemente zwischen Zuständen
verschiedener m_{l_i} und m_{s_i}

Ausweg: Diagonalisierung durch Basiswechsel

Kopplungsschemata (je nach Bedeutung
der Störterme)

1) **LS-Kopplung** (Russell-Saunders-Kopplung)

1. Störterm dominiert (leichte Atome, He, C, N, O...)

$$\left. \begin{aligned}\vec{L} &= \sum_{i=1}^N \vec{l}_i \\ \vec{S} &= \sum_{i=1}^N \vec{s}_i\end{aligned}\right\} \vec{L} + \vec{S} = \vec{J}$$

2 Elektronen $n_1 l_1 n_2 l_2 L S J M$

8 gute Quantenzahlen

Bezeichnung: Niveau $n_1 l_1 n_2 l_2^{2S+1} L_J$

Term $n_1 l_1 n_2 l_2^{2S+1} L$

z.B. Helium $n_1=1, l_1=0, n_2=2, l_2=1$

$L=1, S=1, J=1$ $1s 2p^3 P_1$

$2S+1$ heißt Multiplizität = 1 Singlet

2 Duplet

3 Triplet

⋮

2) j-j-Kopplung

2. Störterm dominiert (schwere Atome, z.B. Fe)

$$\vec{j}_i = \vec{l}_i + \vec{s}_i \rightarrow \vec{j} = \sum_{i=1}^N \vec{j}_i$$

2 Elektronen: $n_1 l_1 n_2 l_2 j_1 j_2 J M$

Komplikation: Mehr als 2 Elektronen: (LS-Kopplung)

$n_1 l_1 n_2 l_2 n_3 l_3 L S J M = 10$ Quantenzahlen

Wir brauchen 12 Quantenzahlen

$$\text{Alternativ: } \left. \begin{array}{l} \vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{L}_0 \\ \vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{S}_0 \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} \vec{L}_0 + \vec{l}_3 = \vec{L} \\ \vec{S}_0 + \vec{s}_3 = \vec{S} \end{array} \right\} \rightarrow \vec{L} + \vec{S} = \vec{J}$$

12 Quantenzahlen: $n_1 l_1 n_2 l_2 L_0 S_0 n_3 l_3 L S J M$

Pauli-Prinzip: Abgeschlossene Schalen

unwichtig für Kopplungsschema

Übergangswahrscheinlichkeit

a) $W \approx \langle \psi | \hat{d} | \varphi \rangle$ $\hat{d}$ Dipoloperator
Dipolstrahlung

b) $W \approx \langle \psi | \hat{Q} | \varphi \rangle$ $\hat{Q}$ Quadruoperator
Quadruopolstrahlung

$\hat{d}$ ist ein ungerader Operator $\hat{d}(-r) = -\hat{d}(r)$

z.B. 1dimensional $\hat{d} = e \cdot x$

$\hat{Q}$ ist ein gerader Operator $\hat{Q}(-r) = +\hat{Q}(r)$

- $\langle \psi | x | \varphi \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) x \varphi^*(x) dx \neq 0$

nur wenn Integrand $\psi x \varphi$ gerade Funktion ist
 x ist ungerade:

$W \neq 0$ nur für Übergänge gerade $\leftrightarrow$ ungerade

- Quadruopolstrahlung:

Übergänge gerade $\leftrightarrow$ gerade
oder ungerade $\leftrightarrow$ ungerade

Parität $\pi = \sum_{i=1}^N l_i$ (arithmetische Summe)

Die übrigen Auswahlregeln ergeben sich ebenfalls aus $W \neq 0$.

Interkombination: $\Delta S \neq 0$ Abweichung von LS-Koppl.
Übergangswahrscheinlichkeit wächst mit Atomgewicht.

Interkombination

1.5e

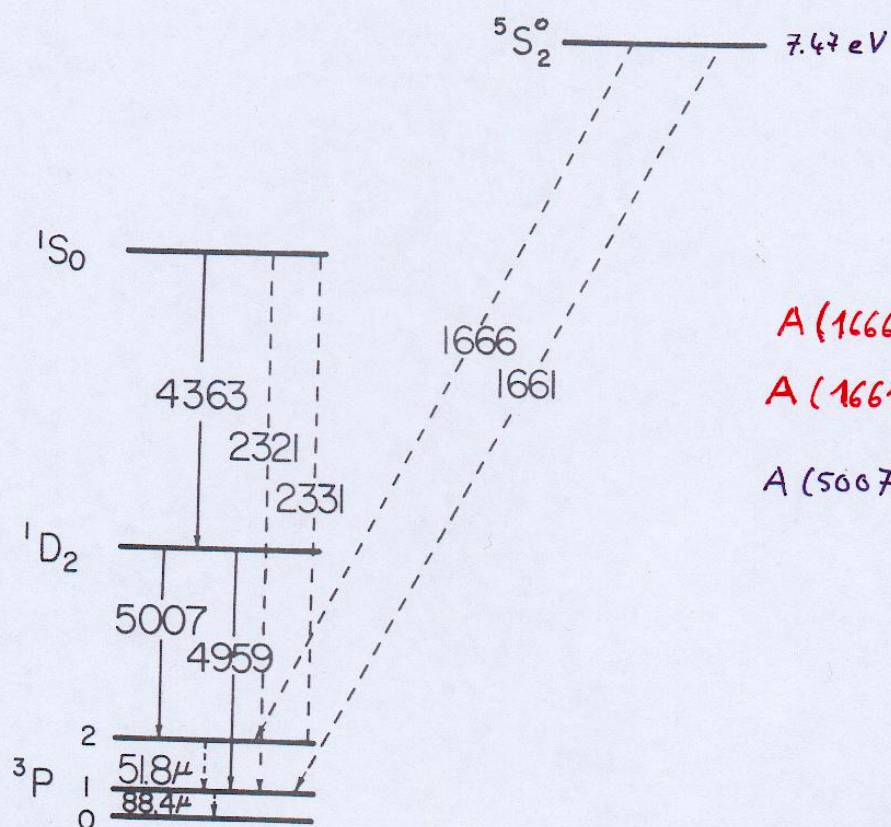
O III

Triplet - System

$2s^2 2p^2$

Quintett - System

$2s 2p^3$



$$A(1666) = 2.1 \cdot 10^2 s^{-1}$$

$$A(1661) = 5.2 \cdot 10^2 s^{-1}$$

$$A(5007) = 0.014 s^{-1}$$

FIG. 1—Energy-level diagram of O III. Optical forbidden lines identified by Bowen shown as solid lines; other forbidden transitions in the ultraviolet and infrared are shown as dashed lines.

2. Qualitative Interpretation der Nebelspektren

PN = ionisiertes Plasma aus:

Ionen (Atomen), Elektronen, Photonen

$$n_e \approx 10^4 \text{ cm}^{-3} \quad T_e = 10^4 \text{ K}$$

Wechselwirkungen

Zeitskalen τ/s
(pro Atom, El. bzw. Ion)

- | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| a) Stöße | Elektron-Elektron | 10^0 |
| b) " | Elektron-Ion (Anregung) | $\left. \begin{array}{l} \approx 10^4 \\ \end{array} \right\} (\sim n_e^{-1})$ |
| | Elektron-Ion (Abregung) | |
| c) Stöße | Elektron-Ion (Ionisation) | $\left. \begin{array}{l} 10^8 \\ \end{array} \right\} (\sim n_e^{-1})$ |
| | " (Rekombination) | |
| d) Photonen - Emission | (erlaubt) | 10^{-8} |
| | (verboten) | $10^0 - 10^4$ |
| e) Photoionisation (Sternphotonen) | | 10^8 (~ 3 Jahre) |
| | abh. vom Abstand zum Zentralstern | |

1. Folgerung: Elektronstöße am häufigsten

→ Elektronen thermalisieren

→ Gleichgewichtsverteilung

Maxwell:

$$f(v) = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp(-mv^2/2kT)$$

$$E_{th} = kT \quad T = 10^4 \text{ K} \rightarrow E_{th} \approx 1 \text{ eV}$$

$$E_{th} = \frac{T}{11604} [\text{K}]$$

2. Folgerung: Spontane Emission erlaubter Photonen

sehr effizient

→ Entvölkerung angeregter Niveaus mit erlaubten Kanälen nach unten

→ überbevölkerung des Grundzustands

ausgedrückt als Abweichung vom LTE:

- LTE: Ionisation: **Saha-Formel** n_k = Besetzungsdichte

$$\frac{n_e \cdot n_{up}}{n_{low}} = 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{g_{up}}{g_{low}} \exp \left\{ -\frac{\Delta E}{kT} \right\}$$

g_{up}, g_{low} : statistische Gewichte, $\Delta E = E_{up} - E_{low}$

z.B. Wasserstoff $n_{up} = n(H^+) = n_p$

$n_{low} = n_{1s}$ (Grundzustand)

$g_{up} = 1$ $g_{low} = 2$

- LTE: Anregung: **Boltzmann-Gleichung**

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} \exp \left\{ -\frac{E_i - E_j}{kT} \right\}$$

z.B. Wasserstoff

$n_i = n_{nL}$ $g_i = 2(2L+1)$

$n_j = n_{1s}$ $g_j = 2$

$$\frac{n_{nL}}{n_{1s}} = \frac{2(2L+1)}{2} \exp \left\{ -X_n/kT \right\}$$

X_n = Anregungsspannung

Wasserstoff: kombinierte Saha-Boltzmann-Gleichung
(Grundzustand eliminieren)

$$n_{nL} = (2L+1) \left(\frac{h^2}{2\pi m kT} \right)^{3/2} \exp \{ X_n / kT \} N_p \cdot N_e$$

$$X_n = h\nu_0 - X_n^*$$

Abweichungen vom LTE

"departure" Koeffizienten b_i

Wasserstoff

$$n_{nL} = b_{nL} (2L+1) \left(\frac{h^2}{2\pi m kT} \right)^{3/2} \exp \{ X_n / kT \} N_p \cdot N_e$$

$$b_{nL} = 1 \leftrightarrow \text{LTE}$$

Unter Gasnebelbedingungen:

$$b_{nL} \ll 1 \quad n > 1$$

$$b_{1S} \approx 10^6 \quad (\text{Grundzustand})$$

extreme NLTE-Bedingungen

3. Folgerung

Besetzung der Niveaus

- von oben: Rekombination
- von unten: Stoßanregung vom Grundzustand
nur Niveaus mit $X^* < 10 \text{ eV}$

Stoßanregung 10^4 mal effektiver als Rekombination

→ Stoßanregung dominiert niedrig liegende Niveaus

→ Hoch liegende Niveaus dünn besetzt (nur durch Rekombination)

Unterscheidung:

1) Rekombinationslinien: H, He

2) Stoßangeregte Linien: $[O II]$, $[O III]$, $E_{up} < 5 \text{ eV}$
 $C III]$, $C IV]$, ... $5 \text{ eV} \leq E_{up} \leq 10 \text{ eV}$

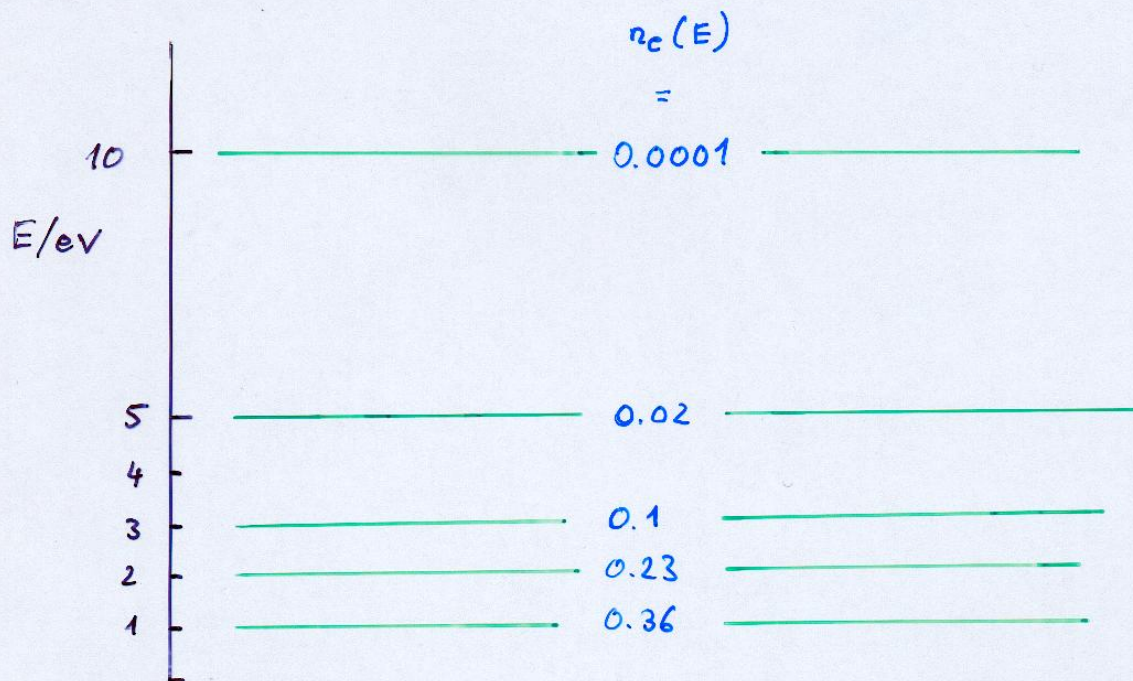
Rekombinationslinien der Metalle schwach, wegen geringer Häufigkeit ($n(O)/n(H) = 0.001$)

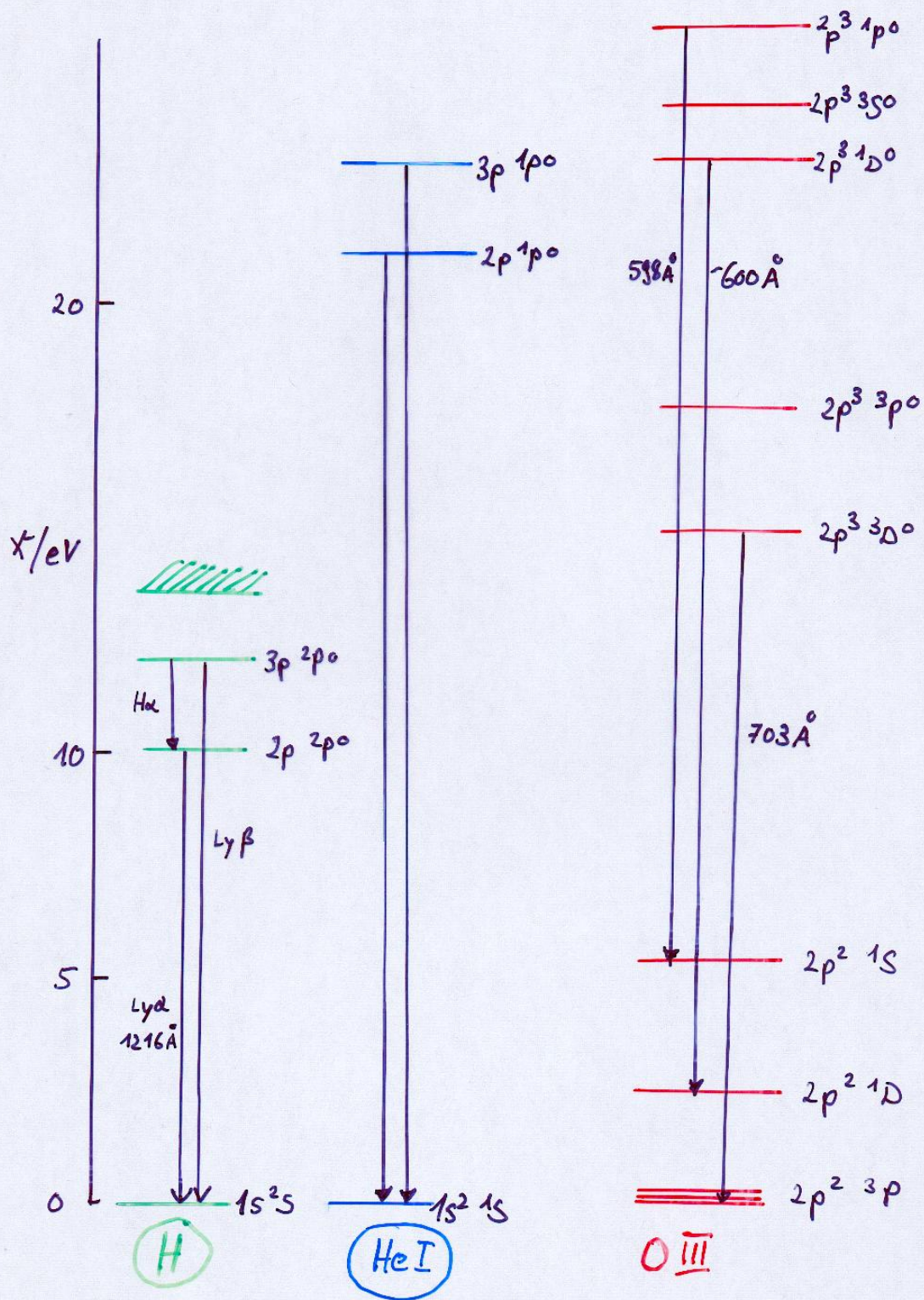
Ausnahme: Resonanzlinien (UV):

Maxwellverteilung der Elektronen

$$n_e(E) \sim E/E_{th} \cdot \exp(-E/E_{th})$$

$$T = 10000 \text{ K} \quad E_{th} = 0.862 \text{ eV}$$





Ursprung der stoßangeregten Linienemission

- verbotene Übergänge in np^q - Termschema

$$n = 2, 3 \quad q = 1, \dots, 5 \quad (\text{s. 1.4})$$

p^1, p^5 2 Niveaus

$p^{2,3,4}$ 5 Niveaus

- UV-Resonanz- + Interkombinationslinien (3 Niveaus)

- Der 2-Niveau Fall



Stoßanregungsrate (pro Einheitsvolumen und Zeit):

$$N_e \cdot N_1 \cdot q_{12}$$

Stoßabregungsrate (s.o.)

$$N_e \cdot N_2 \cdot q_{21}$$

Photoemissionsrate:

$$N_2 \cdot A_{21}$$

Bilanzgleichung:

$$N_e \cdot N_1 \cdot q_{12} = N_e \cdot N_2 \cdot q_{21} + N_2 \cdot A_{21}$$

$$\Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = \frac{q_{12}}{A_{21}} \left[\frac{N_e}{1 + \frac{N_e q_{21}}{A_{21}}} \right]$$

- Kühlungsrate:

$$\begin{aligned} L_c &= N_2 A_{21} h \nu_{21} \\ &= N_1 \cdot q_{12} h \nu_{21} \left[\frac{N_e}{1 + \frac{N_e q_{21}}{A_{21}}} \right] \end{aligned}$$

- Im Grenzfall $N_e \rightarrow \infty$:

$$[] = \frac{1}{1/N_e + q_{21}/A_{21}} \approx \frac{A_{21}}{q_{21}} \quad \text{d.h. } N_e \gg \frac{A_{21}}{q_{21}}$$

$$L_c = N_1 \frac{q_{12}}{q_{21}} A_{21} h \nu_{21}$$

- Im Grenzfall $N_e \rightarrow 0$:

$$[] \approx N_e \quad \text{d.h.} \quad \frac{N_e \cdot q_{21}}{A_{21}} \ll 1$$

$$N_e \ll \frac{A_{21}}{q_{21}}$$

$$L_c = N_1 \cdot N_e \cdot q_{12} h \nu_{21}$$

kritische Dichte: $N_c = \frac{A_{21}}{q_{21}}$

Stoßanregungskoeffizient q_{12} :

$$q_{12} = \int_0^{\infty} v \kappa_{12}(v) f(v) dv$$

κ_{12} nicht Rekomb.-
querschnitt!!

κ_{12} Stoßanregungsquerschnitt

$$\kappa_{21} = \frac{\pi \hbar^2}{m^2 v^2} \frac{\Omega(1,2)}{g_2} \quad \text{für } \frac{1}{2} m v^2 \geq X \quad \text{sonst } \kappa_{21} = 0$$

$\Omega(1,2)$ collision strength

komplizierte Funktion von v

in erster Näherung konstant, Größenordnung: 1

Gebraucht wird über $f(v)$ gemittelter Querschnitt.

- Beziehung zwischen Stoßanregungskoeffizient
und Stoßabregungskoeffizient

(Analog zur Milne-Relation):

$$\text{im TE gilt: } q_{21} = q_{12} \cdot \frac{g_2}{g_1} e^{-X/kT}$$

hängt nur von atomaren Daten ab $\rightarrow$ gilt immer

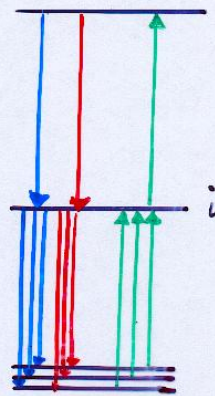
Damit wird Kühlungsrate für $N_e \gg N_c$:

$$L_c = N_1 \frac{q_{12}}{q_{21}} A_{21} h \nu_{21}$$

$$L_c = N_1 \frac{g_2}{g_1} e^{-X/kT} A_{21} h \nu_{21} \quad (\text{LTE})$$

Der 5-Niveau-Fall (z.B. O III)

5 Bilanzgleichungen



↑ Stoßanregung

↓ Stoßabregung

↓ Emission eines Photons

Gewinne eines Niveaus i :

$$\sum_{j \neq i} N_j \cdot N_e q_{ji} + \sum_{j > i} N_j A_{ji}$$

Verluste eines Niveaus i :

$$N_i \sum_{j \neq i} N_e \cdot q_{ij} + N_i \sum_{j < i} A_{ij}$$

Bilanz:

$$\sum_{j \neq i} N_j N_e q_{ji} + \sum_{j > i} N_j A_{ji} = N_i \left(\sum_{j \neq i} N_e q_{ij} + \sum_{j < i} A_{ij} \right)$$

+ Teilchenzahlerhaltung: $\sum_{j=1}^5 N_j = N$

→ Auflösen nach N_i

→ Kühlungsrate: $L_c = \sum_i N_i \sum_{j < i} A_{ij} h \nu_{ij}$

B) T_e und N_e aus stoßangeregten Linien

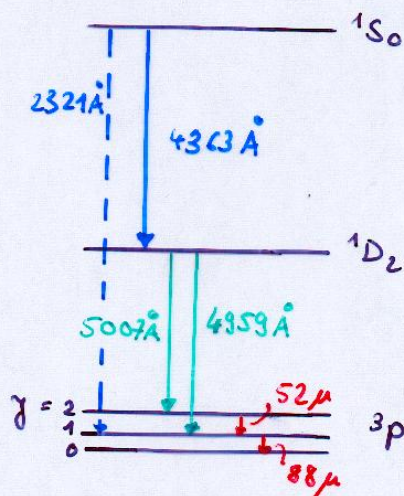
z.B. verbotene Linien z.B. OII , $OIII$

$(T_e) \quad j\nu = N_u \cdot A_{ul} \cdot h\nu$

$$j_1/j_2 = \frac{N_{u1} \cdot A_{u1} \cdot h\nu_1}{N_{u2} \cdot A_{u2} \cdot h\nu_2}$$

N_{u1}, N_{u2} aus statistischen Gleichgewichts-
bedingung für 5 Niveaus

z.B. $OIII$



T_e -empfindliche Intensitätsverhältnisse

$$\underbrace{I_{5007}/I_{4363}, I_{4959}/I_{4363}}_{(I_{4959} + I_{5007})/I_{4363}}, I_{52\mu}/I_{5007} \dots$$

$$(I_{4959} + I_{5007})/I_{4363} \approx N(1D_2)/N(1S_0)$$

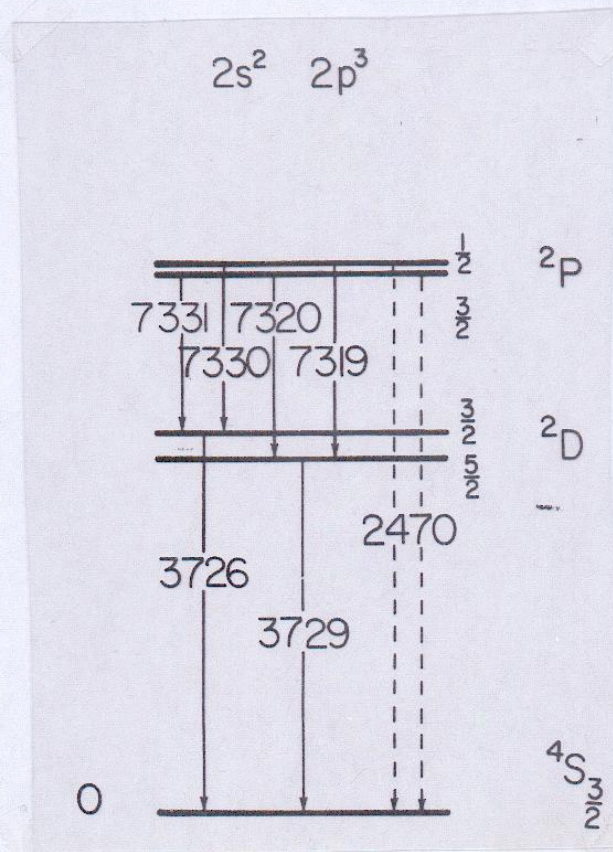
im Prinzip : gute T_e - Indikatoren:

Linienverhältnisse von UV-Linien zu optischen
Linien; z.B. $O\text{III}$, I_{2321} / I_{5007}

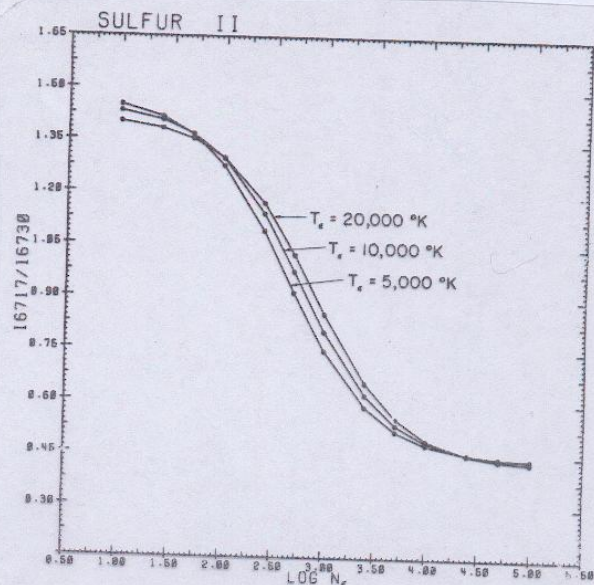
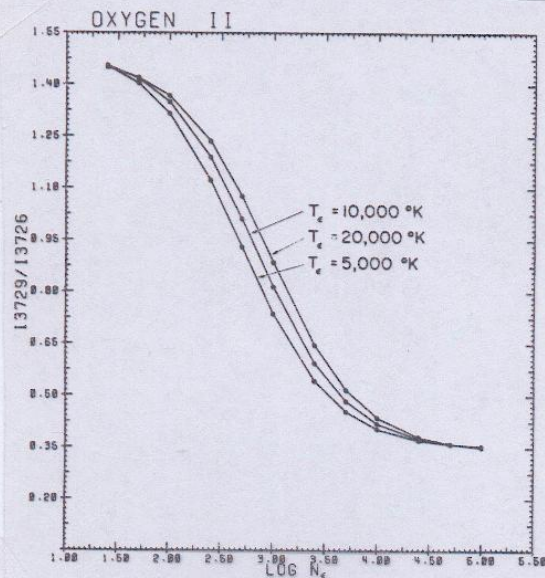
- Probleme:
- nur wenige Nebel beobachtet
(Satellitenbeobachtungszeit rar)
 - interstellare Extinktion schwierig
zu korrigieren

N_e - Indikatoren

Intensitätsverhältnisse energetisch eng
benachbarter Niveaus, z.B. $O\text{II}$, $S\text{II}$



Intensitätsverhältnisse von Linien, deren obere Niveaus eng benachbart sind: $O II, 3729, 3726 \text{ \AA}$; $S II, 6717, 6730 \text{ \AA}$



Temperaturabhängigkeit gering, da Boltzmannfaktor ≈ 1

Kurvendiskussion:

Asymptotisches Verhalten der Besetzungszahlen

1) $A_{ij} \ll C_{ij} \quad (n_e \rightarrow \infty)$

Bilanzgleichungen für 5 Niveaus (statistisches Gleichgewicht):

$$\sum_{i \neq j} n_i C_{ji} = n_i \sum_{j \neq i} C_{ij}$$

$$\sum_{j \neq i} n_j C_{ji} - n_i \sum_{j \neq i} \frac{g_j}{g_i} C_{ji} \exp(-\Delta E_{ij}/kT) = 0$$

$$\sum_{j \neq i} C_{ji} \left[\frac{n_j}{n_i} - \frac{g_j}{g_i} \exp(-\Delta E_{ij}/kT) \right] = 0$$

σ

$$\rightarrow \frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} \exp(-\Delta E_{ij}/kT) \quad \text{LTE}$$

Intensitätsverhältnisse : $O II : \lambda_{3729} / \lambda_{3726} = f_2 / f_3$

$$\frac{f_2}{f_3} = \frac{n_2 A_{21} h \nu_{21}}{n_3 A_{31} h \nu_{31}} = \frac{g_2}{g_3} \underbrace{\exp(-\Delta E_{32}/kT)}_1 \cdot \frac{A_{21}}{A_{31}}$$

$$= \frac{g_2}{g_3} \cdot \frac{A_{21}}{A_{31}}$$

2) $A_{ij} \gg C_{ij}, C_{ji} \quad (N_e \rightarrow 0)$

Überbevölkerung des Grundzustandes

Gewinne nur vom Grundzustand durch Elektronenstöße: $n_1 \cdot C_{1i}$; Verluste nur radiativ: $n_i \sum_{j < i} A_{ij}$

Bilanz für Niveau i: $n_1 \cdot C_{1i} = n_i \sum_{j < i} A_{ij}$

$$\frac{n_i}{n_1} = \frac{C_{1i}}{\sum_{j < i} A_{ij}}$$

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_1}{n_3} = \frac{C_{12}}{A_{21}} \cdot \frac{(A_{32} + A_{31})}{C_{13}}$$

$$\begin{aligned} + C_{ek} &= C_{ke} \cdot \frac{g_k}{g_e} e^{-E/kT} \quad (l < k) \\ + C_{ke} &= N_e \cdot \frac{8.629 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{T}} \cdot \frac{\Omega(l, k)}{g_k} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} + C_{ek} &= C_{ke} \cdot \frac{g_k}{g_e} e^{-E/kT} \\ + C_{ke} &= N_e \cdot \frac{8.629 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{T}} \cdot \frac{\Omega(l, k)}{g_k} \end{aligned}} \right\} \begin{array}{l} \text{s. Abschnitt} \\ 4.8 \end{array}$$

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{\Omega(1,2) e^{-E_{21}/kT}}{A_{21}} \cdot \frac{(A_{32} + A_{31})}{\Omega(1,3) e^{-E_{31}/kT}} = \frac{\Omega(1,2)}{A_{21}} \cdot \frac{(A_{31} + A_{32})}{\Omega(1,3)}$$

$$\frac{f_{21}}{f_{31}} = \frac{n_2}{n_3} \frac{A_{21}}{A_{31}} = \frac{\Omega(1,2)}{\Omega(1,3)} \frac{(A_{31} + A_{32})}{A_{31}} = \frac{\Omega(1,2)}{\Omega(1,3)} \left(1 + \frac{A_{32}}{A_{31}}\right)$$

Kritische Dichte für ein Niveau i : N_c

Verlustterme in der Bilanzgleich:

bei: $N_e = N_c$: radiative Verluste

=
Verluste durch Elektronenstoß

$$N_c(i) = \sum_{j < i} A_{ij} / \sum_{j \neq i} q_{ij} \quad \text{s. 4.10.}$$

Intensitätsverhältnisse sind Dichtesensitiv
nur in der Nähe von N_c

⇒ verschiedene Indikatoren für verschiedene
 N_e

Analyse von Nebelspektren mittels "Fitdiagrammen":

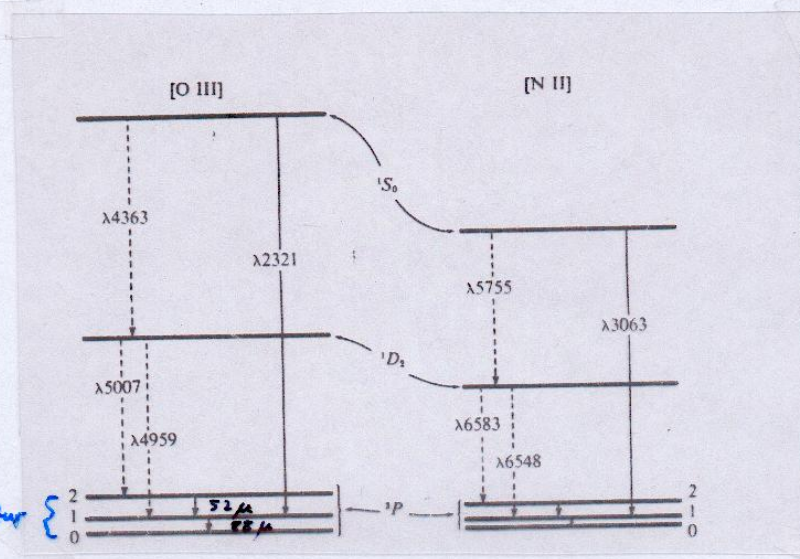
Gemessene Intensitätsverhältnisse für

T_e - und N_e -Indikatoren mittels

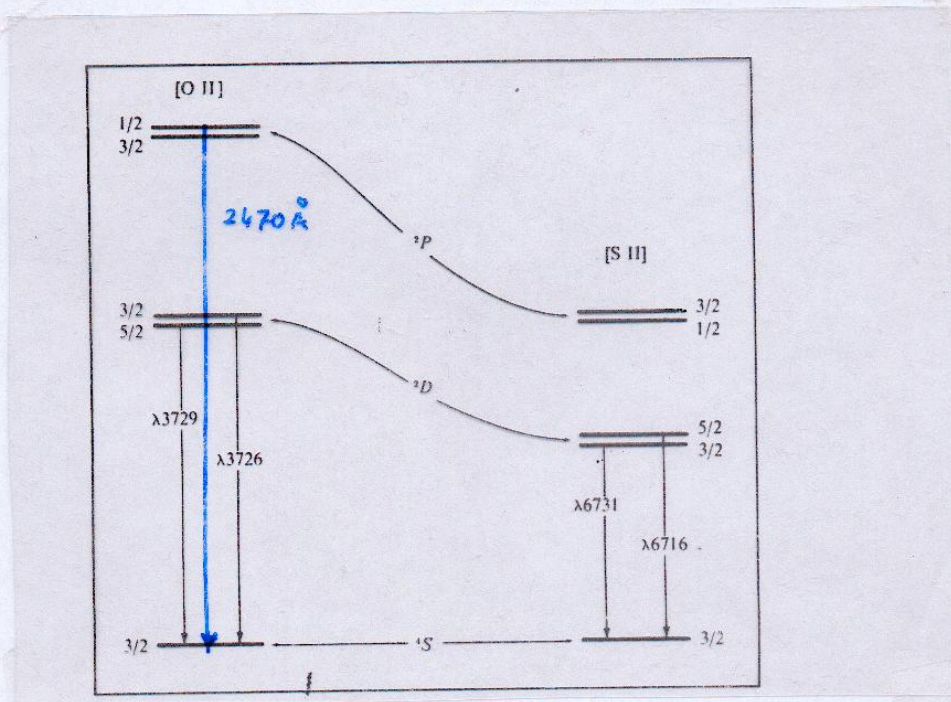
Diagnostikdiagrammen auswerten und als
"Fitlinien" in ein (T_e, N_e) -Diagramm eintragen

Termschemata $O\text{III}$, $N\text{II}$, $O\text{II}$, $S\text{II}$

Feinstruktur
Linien



Trans-
aurora



Merkzettel zur 4. Aufgabe: Bilanzgleichungen für ein 5-Niveau-Atom

Bezeichnungsweise: $P_{\text{up} \rightarrow \text{low}} = P_{ij}$ mit up = oberes Niveau, low = unteres Niveau

Für ein Niveau i sind die Verluste $= n_i \sum_{j \neq i} P_{ij}$

und die Gewinne $= \sum_{j \neq i} n_j P_{ji}$

Im stationären Gleichgewicht gilt: Verlust = Gewinn

$$n_i \sum_{j \neq i} P_{ij} = \sum_{j \neq i} n_j P_{ji}$$

$$\sum_{j \neq i} n_j P_{ji} - n_i \sum_{j \neq i} P_{ij} = 0$$

Matrixschreibweise: $n P = 0$

$$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5) \begin{pmatrix} -\sum_{j \neq 1} P_{1j} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & -\sum_{j \neq 2} P_{2j} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & -\sum_{j \neq 3} P_{3j} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & -\sum_{j \neq 4} P_{4j} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & -\sum_{j \neq 5} P_{5j} \end{pmatrix} = 0$$

Die Matrix enthält also: auf der Diagonalen: Verlustterme

obere Dreiecksmatrix: Gewinne von niedrigeren Niveaus

untere Dreiecksmatrix: Gewinne von höheren Niveaus

Da radiative Übergänge (spontane Emission) nur von höheren zu niedrigeren Niveaus möglich sind, gilt:

$$P_{ij} = A_{ij} + C_{ij} \quad \text{für } i > j$$

$$P_{ij} = C_{ij} \quad \text{für } i < j$$

Weiter gilt: $C_{ij} = N_e q_{ij}$

Mit $q_{ji} = 8.629 \cdot 10^{-6} / T^{1/2} \Omega(j, i) / g_j$ für $j > i$ (Stoßabregung)

und $q_{ij} = g_j / g_i q_{ji} \exp(-\Delta E / kT)$ für $i < j$ (Stoßanregung)

Jan 30, 07 15:17

pn.dat

Page 1/1

```

1 'DATENFILE FUER PN, KANN ZEILENWEISE IM *-FORMAT GELESEN WERDEN'
2 'O II'
3 'COLLISION STRENGTH'
4 .88 =  $\Omega_{24}$ 
5 .59 =  $\Omega_{31}$  1.16 =  $\Omega_{32}$ 
6 .30 .78 .44
7 .15 .32 .29 .28
8 'EINSTEIN COEFFICIENTS'
9 4.2E-5 =  $A_{21}$ 
10 1.8E-4 =  $A_{31}$  1.3E-7 =  $A_{32}$ 
11 6.0E-2 1.2E-1 6.1E-2
12 2.4E-2 6.1E-2 1.0E-1 6.0E-11
13 'STATISTICAL WEIGHTS'
14 4. 6. 4. 4. 2.
15 'ENERGY LEVELS'
16 0. 3.3229 3.3255 5.0159 5.01600 [eV]
17 'S II'
18 'COLLISION STRENGTHS'
19 3.08
20 4.62 10.06
21 1.02 2.05 2.27
22 2.03 3.14 5.52 3.35,
23 'EINSTEINS'
24 1.8E-3,
25 4.7E-4, 3.3E-7
26 1.3E-1, 2.0E-1, 8.7E-2,
27 3.4E-1, 1.7E-1, 2.1E-1, 1.0E-6,
28 'STATISTICAL WEIGHTS'
29 4., 4. 6., 2., 4.,
30 'ENERGY LEVELS'
31 0.000, 1.8409, 1.8448, 3.0398, 3.0458,
32 'OIII'
33 'COLLISION STRENGTHS'
34 0.39,
35 0.21, 0.95,
36 0.28, 0.83, 1.39,
37 0.03, 0.10, 0.17, 0.58,
38 'EINSTEINS'
39 2.62E-5,
40 3.5E-11, 9.75E-5,
41 1.9E-6, 7.1E-3, 2.1E-2,
42 0., 2.3E-1, 7.1E-4, 1.6,
43 'STATISTICAL WEIGHTS'
44 1., 3., 5., 5., 1.,
45 'ENERGY LEVELS'
46 0.000, 0.0141, 0.0380, 2.5126, 5.3526,
47 'N II'
48 'COLLISION STRENGTHS'
49 0.41,
50 0.28, 1.38,
51 0.33, 1.00, 1.66,
52 0.04, 0.12, 0.20, 0.39,
53 'EINSTEINS'
54 2.1E-6,
55 1.3E-12, 7.5E-6,
56 4.2E-7, 1.0E-3, 3.0E-3,
57 0.00, 3.4E-2, 1.6E-4, 1.1,
58 'STATISTICAL WEIGHTS'
59 1., 3., 5., 5., 1.,
60 'ENERGY LEVELS'
61 0.000, 0.0061, 0.0163, 1.8984, 4.0516,

```