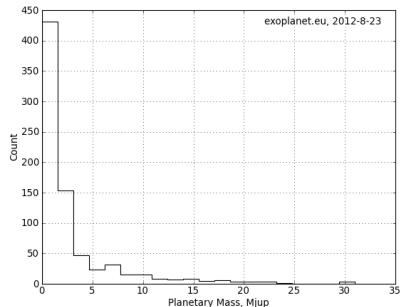
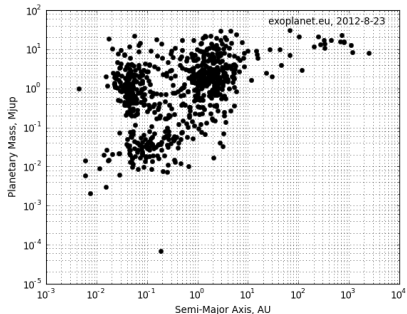
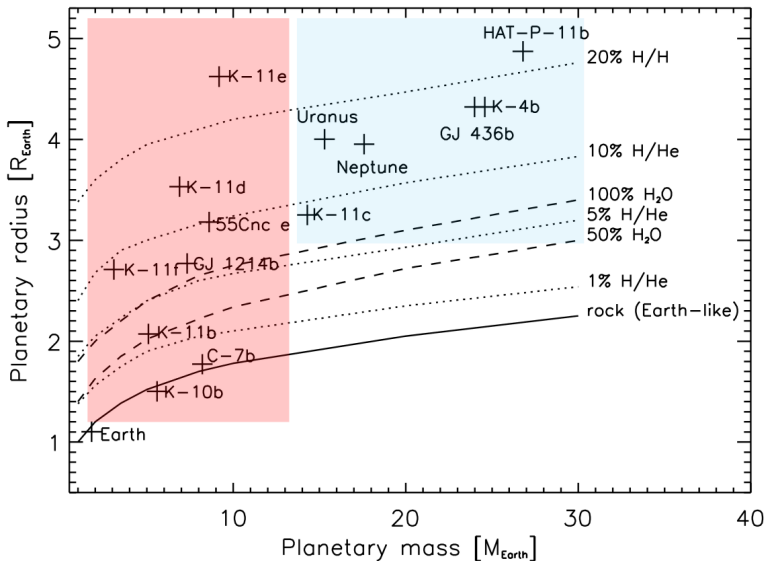


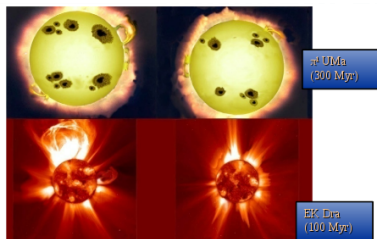
Atmosphärenforschung von Exoplaneten mittels Beobachtungen und Modellstudien

Kristina G. Kislyakova

Institut für Weltraumforschung (IWF),
Österreichische Akademie der Wissenschaften, Graz, Austria



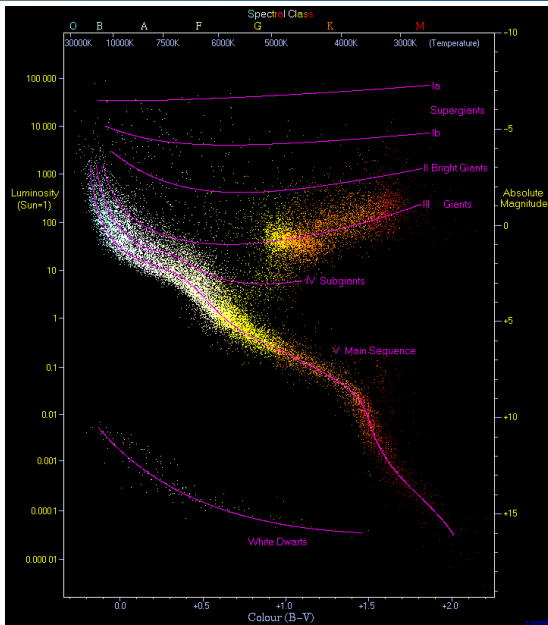


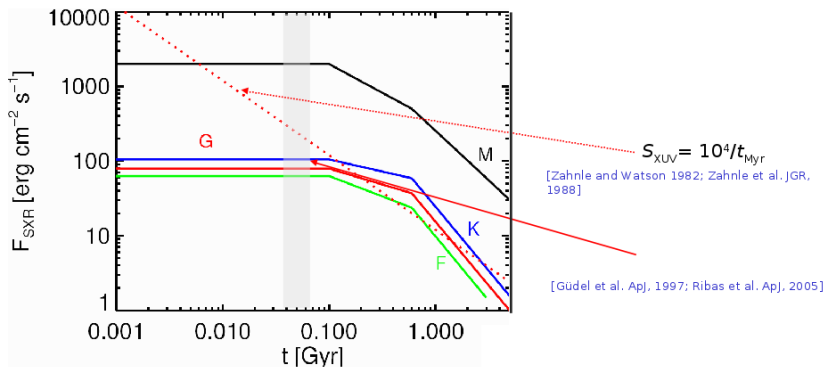


Solar age [Gyr]	L/L_{Sun}	T/T_{Sun}	R/R_{Sun}
0	~ 0.7	~ 0.9	~ 0.85
~ 2	~ 0.8	~ 0.95	~ 0.9
~ 4	~ 0.9	~ 0.97	~ 0.93
~ 4.5	1	1	1
~ 6	~ 1.05	~ 1	~ 1.05
~ 8	~ 1.3	~ 1	~ 1.15
~ 10	~ 1.95	~ 0.98	~ 1.5

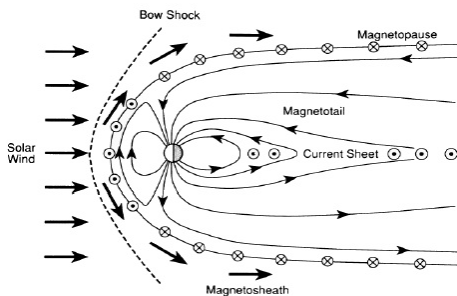
Solar age [Gyr]	t b.p. [Gyr]	X-ray [1–20Å]	SXR [20–100Å]	EUV [100–920Å]	FUV [920–1180Å]	Lyman- α [1200–1300Å]	UV [1300–1700Å]
0.7	3.9	37	11	8.6	5	3.9	–
0.65	3.95	43	12	9.4	5.3	4.1	5.8
0.6	4.0	50	13	10	5.7	4.3	–
0.55	4.05	59	15	11	6.1	4.6	–
0.5	4.1	71	17	13	6.6	4.9	–
0.45	4.15	87	19	14	7.2	5.3	–
0.4	4.2	109	22	17	8	5.8	–
0.35	4.25	141	26	19	9	6.4	–
0.3	4.3	189	32	23	10	7.1	10.6
0.25	4.35	268	40	28	12	8.1	–
0.2	4.4	412	54	37	14	9.6	–
0.15	4.45	715	77	51	18	11.8	–
0.1	4.5	1558	129	82	26	15.8	40.5

[Ribas et al. ApJ, 2005; Güdel 2007; Lammer et al. EPS, 2012]

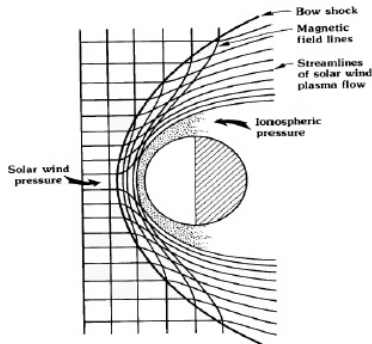




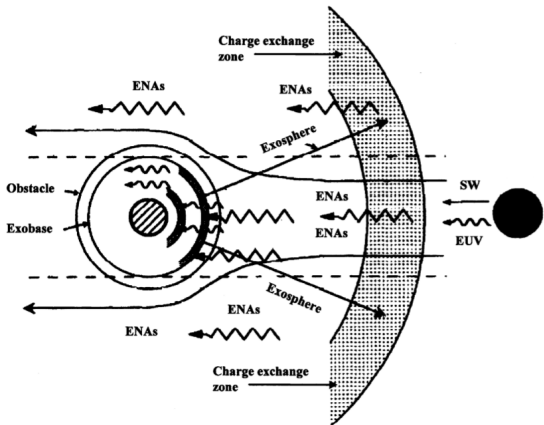
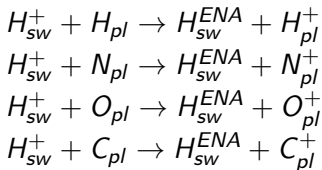
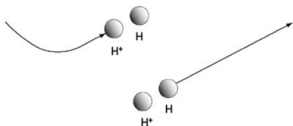
Magnetized Planets



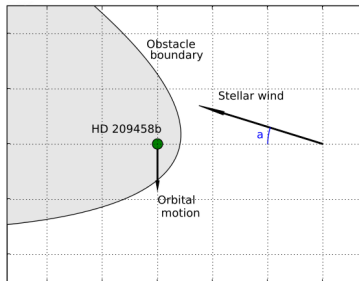
Non-Magnetized Planets



[Kivelson and Russel]



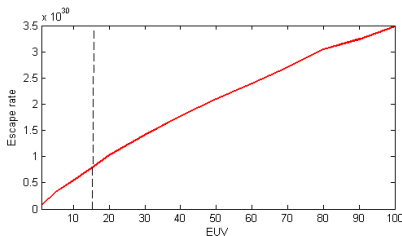
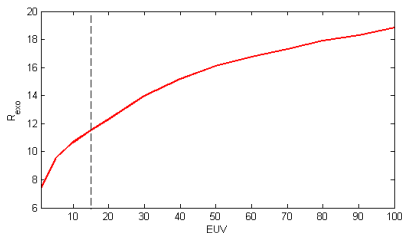
Energetische neutrale Atome wurden im Sonnensystem bei jedem Planeten beobachtet, wo die entsprechenden Anlagen zur Verfügung standen



Das Zentrum des Koordinatensystems befindet sich im Zentrum des Planeten, die x-Achse verweist auf dem Stern, die y-Achse ist gegen die Orbitalgeschwindigkeit vom Planeten gerichtet, die z-Achse vollendet das rechthändige Koordinatensystem. Die angenommene magnetische Oberfläche wird von der folgenden Formel beschrieben:

$$X = R_s \left(1 - \frac{\rho^2}{R_t^2} \right)$$

wo R_s und R_t bezeichnen dementsprechend den substellaren Punkt und die Breite der Oberfläche.



Basiert auf dem folgenden Gleichungssystem (Penz, T., Erkaev, N.V., Kulikov, Yu.N., et al.: Planet. Space Sci. 56, 1260, 2008):

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial nvr^2}{\partial r} &= 0 \\ n \frac{\partial n}{\partial t} + nv \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{m} \frac{\partial p}{\partial r} &= nF_{grav} \\ nm \left(\frac{\partial E}{\partial t} + v \frac{\partial E}{\partial r} \right) &= \\ q - p \frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2 v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \chi \frac{\partial T}{\partial r} \right) & \end{aligned}$$

wo

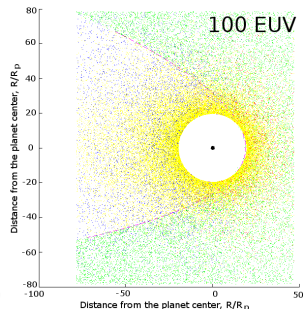
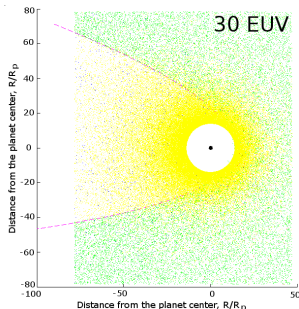
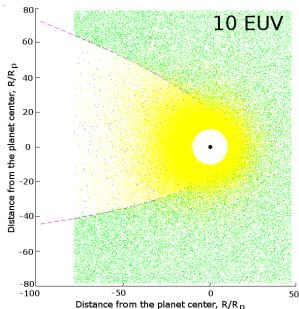
$$p = nkT, E = \frac{1}{\gamma-1} \frac{p}{nm}$$

- die hydrodynamischen Gleichungen beschreibend

Massen-, Impuls- und Energieerhaltung

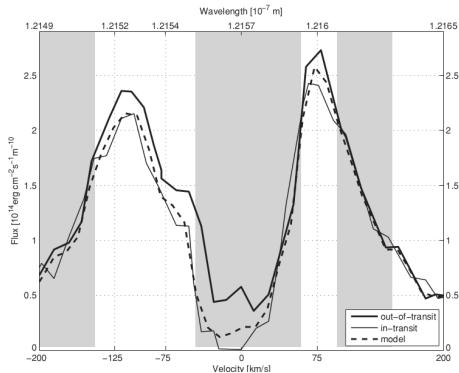
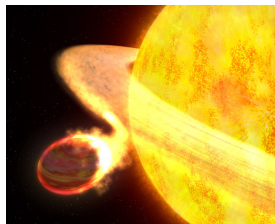
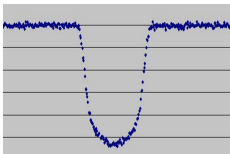
Ein erdähnlicher Planet mit der Masse und Grösse von der Erde wird betrachtet, der sich in der habitablen Zone von einem M3 Stern (Gliese 436 als Basis) befindet. Parameter des Sterns:

- Sternmasse = $8.99 \times 10^{29} \text{ kg} \approx 0.45 M_{\odot}$
- Orbitaldistanz (habitable Zone) = $3.6 \times 10^{10} \text{ m} \approx 0.24 \text{ a.u.}$
- Sternwinddichte = $2.5 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$
- Sternwindgeschwindigkeit = 330 km/s
- Sternwindtemperatur = 10^6 K

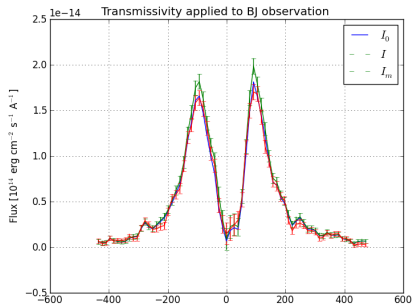


Parameter	10 EUV	30 EUV	100 EUV
Distanz der Exobase, R_p	10.6	14.1	19
Temperatur der Exobase, K	485	960	2300
Dichte der Exobase, m^{-3}	4.85×10^{10}	3.8×10^{10}	2.77×10^{10}

Die roten und blauen Punkte stellen die ENAs dar, die sich dementsprechend zu und weg von dem Stern bewegen. Die grünen Punkte sind die Protonen des stellaren Winds, die gelben - langsame planetarische Wasserstoffatome mit Geschwindigkeiten < 10 km/s.



K.G. Kislykova (IWF)



Verhältnis zwischen der beobachteten und Ausgangsintensität und die Durchlässigkeit:

$$I(f) = I_0(f)e^{-\tau(f)}; \quad T = I/I_0 = e^{-\tau(f)} = e^{-\sigma(f)Q}$$

Hier $\tau = \sigma(f)Q$ ist die frequenzabhängige optische Dichte, $\sigma(f)$ ist die Kollisionsschnitt und Q ist die Säulendicke von Wasserstoffatomen.

Frequenzabhängige optische Dichte:

$$\sigma(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \check{u}(v) \sigma_N((1 + v/c)f) dv [m^2],$$

wo $\check{u}(v)$ ist das normierte Geschwindigkeitsspektrum, so dass $\int_{-\infty}^{+\infty} \check{u}(v) dv = 1$, c - die Lichtgeschwindigkeit.

Der natürliche Absorptionkollisionsschnitt im Koordinatensystem von dem zerstreuten Wasserstoffatom ist

$$\sigma_N(f) = \frac{3\lambda_\alpha^2 A_{21}^2}{8\pi} \frac{(f/f_\alpha)^4}{4\pi^2(f-f_\alpha)^2 + (A_{21}/4)(f/f_\alpha)^6} [m^2]$$

Hier $f_\alpha = c/\lambda_\alpha$ with $\lambda_\alpha = 1.21576 \times 10^{-7}$ m ist Ly- α Resonanzwellenlänge und $A_{21} = 6.265 \times 10^8$ s $^{-1}$ die Rate von dem Radiationzerfall von dem 2p zu dem 1s Energieniveau

Mittels Multiplikation $\sigma(f)$ mit Q kann die optische Dichte direkt kalkuliert werden ohne die

Geschwindigkeitsspektrum zu normalisieren: $\tau(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(v) \sigma_N((1 + v/c)f) dv.$

- Die Entwicklung des Sterns spielt eine grosse Rolle in der Evolution des Planeten
- Während den ersten Phasen der Evolution können erdähnliche Planeten möglicherweise über eine grosse Wasserstoffhülle verfügen
- Die Aktivität des Sterns bestimmt, ob diese Protoatmosphäre verloren geht
- Zur Zeit gibt es indirekte Hinweise, dass Planeten von diesem Typ existieren können (siehe die Masse-Radius Diagramm). In der Zukunft könnten die Beobachtungen von diesen Körpern in der Ly- α Linie ergänzliche Informationen bringen
- Die Beobachtungen der Exoplaneten können auch für Verständnis von der Evolution des Sonnensystems sehr behilflich sein.