Zur Astro-Physik und -Chemie bei Kometen

Dr. Richard WERNER
Klimatologe und Physiker

Übersicht zu Vortrag

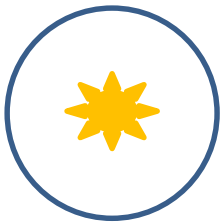
- Kometen sind …
- Bahnen der Kometen
- Farben der Kometen
- Der Sonnenwind
- Wechselwirkung
- Elektronen und Licht
- Das Spektrum für C=C (chemisch: C_2)

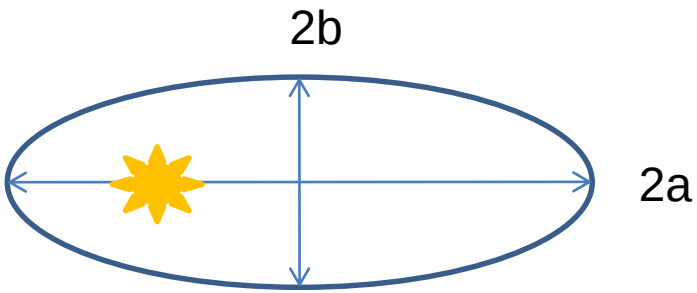
Ellipsen als Bahnen für Kometen

- Weit draußen im Planetensystem bewegt sich ein Komet auf einer Bahn, die als Ellipse zu bestimmen ist.
- In einem Brennpunkt der Ellipse steht die Sonne. Die Ellipse ist ein einseitig gedehnter Kreis

Ellipsen als Bahnen für Kometen

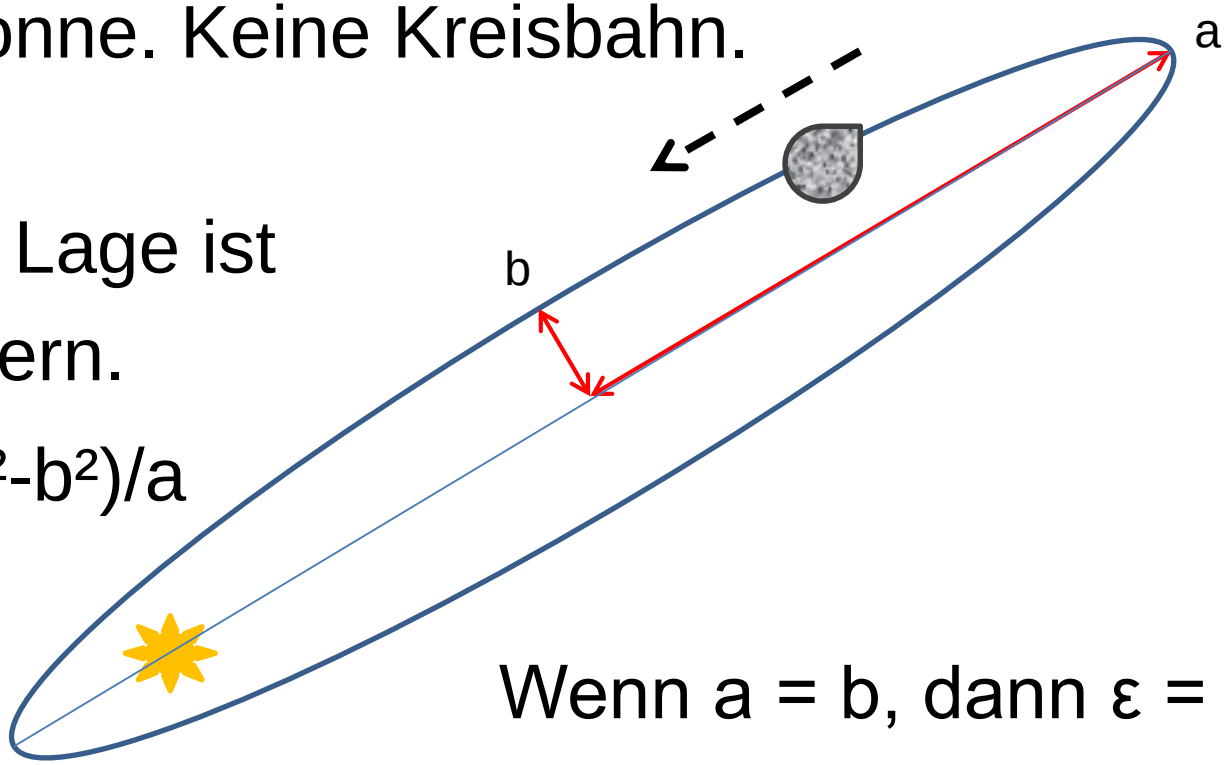
- Mit etwas Geometrie kommen wir weiter: wir werden die Ellipse mit bekannten Längen a und b bestimmen
- In einem Brennpunkt der Ellipse steht die Sonne. Die Ellipse ist ein einseitig gedehnter Kreis. Das Verhältnis b:a wird wichtig





Ellipsen als Bahnen für Kometen

- Mit etwas Geometrie kommen wir weiter: Der Komet bewegt sich gegen den Uhrzeigersinn um die Sonne. Keine Kreisbahn.



- Diese Lage ist sonnenfern.

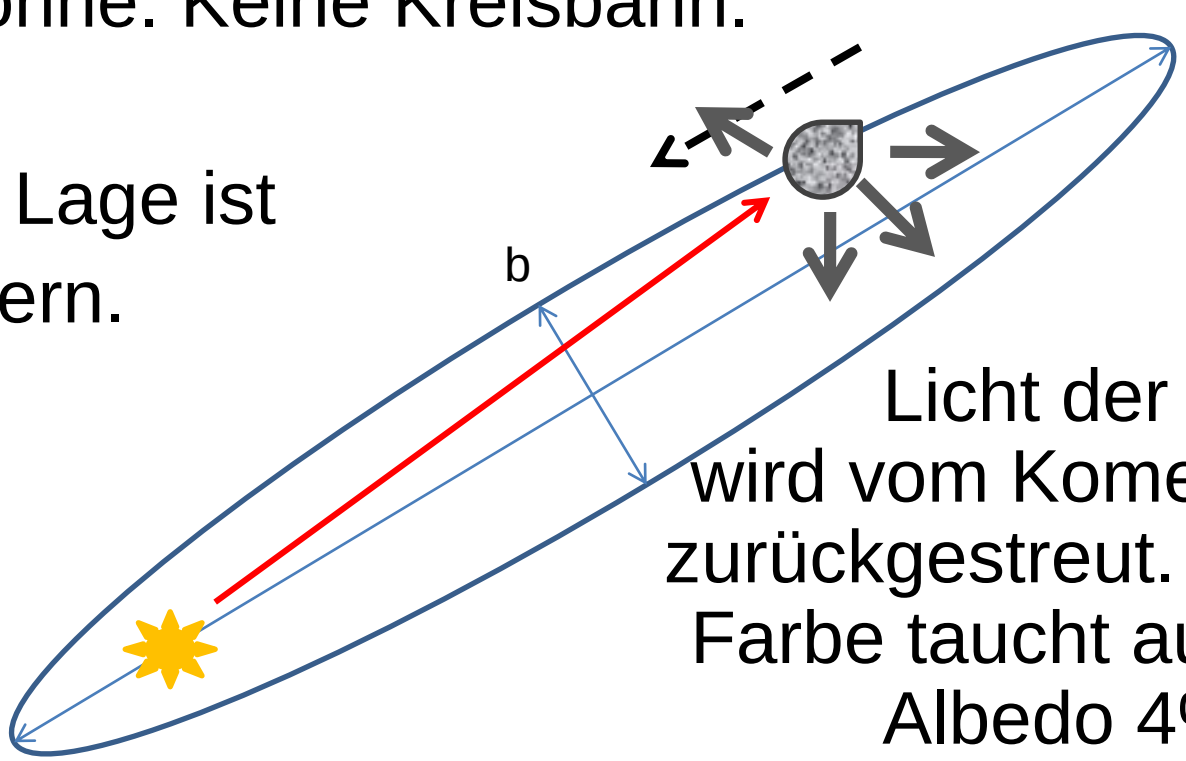
$\varepsilon = \sqrt{(a^2-b^2)}/a$

Wenn a = b, dann ε = 0,0

Ellipsen als Bahnen für Kometen

- Mit etwas Geometrie kommen wir weiter: Der Komet bewegt sich gegen den Uhrzeigersinn um die Sonne. Keine Kreisbahn.

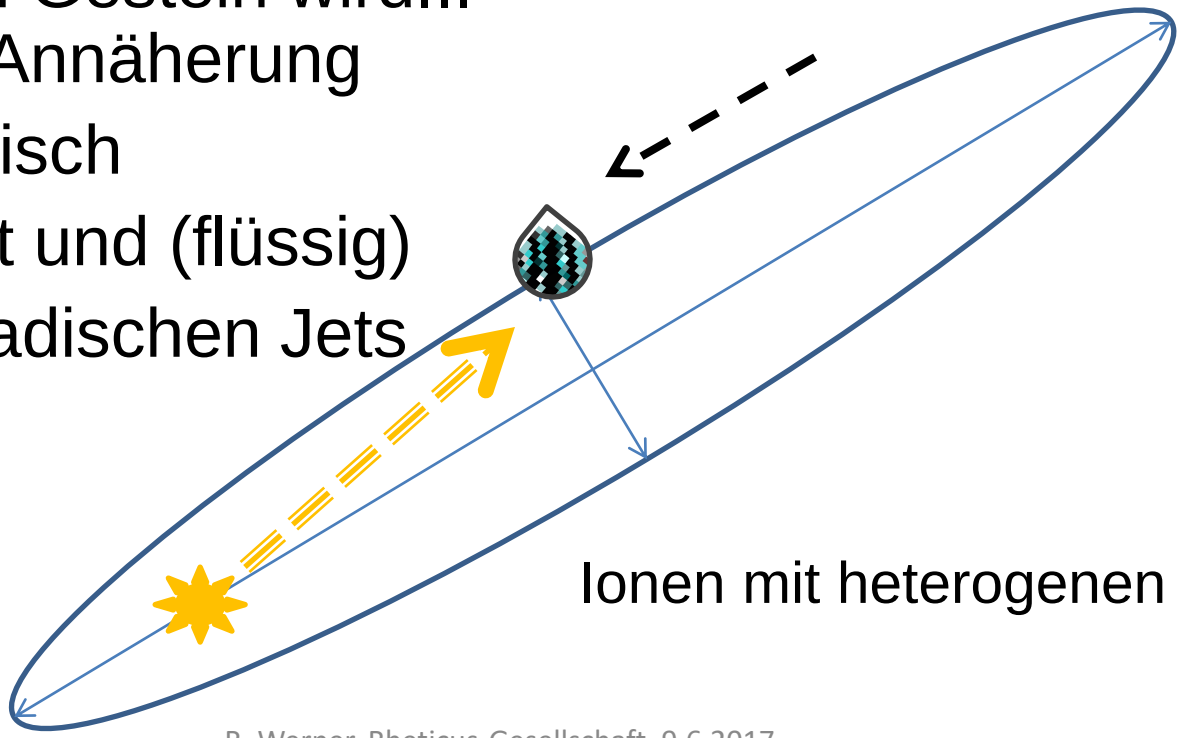
- Diese Lage ist sonnenfern.



Licht der Sonne wird vom Kometen zurückgestreut. Graue Farbe taucht auf . Albedo 4%

Sonnenwind an den Bahnen von Kometen

- Diese Lage ist sonnenmittig und der Sonnenwind bläst zum Kometen hin. Licht, Protonen, Wasserstoff und Helium treffen den Kometen. Erwärmung
- Aus dem Gestein wird...
  bei Annäherung
- ein Gemisch
- Gas, fest und (flüssig)
- Mit sporadischen Jets



Ionen mit heterogenen Zonen

Geschichte der Kometenforschung 1

Chronologie	Forscher / Team	Interpretation, Aspekte
ca. 450 v. Chr.	Aristoteles	Kometen als feurige Ausdünstungen in der Atmosphäre, Lit: Meteorologica
ca. 63	Seneca	vermutet: Kometen bewegen sich innerhalb der Mondbahn
ca. 78	Plinius der J.	beschreibt 10 Typen von Kometenformen
1532	Peter Apian	Kometenschweife zeigen von der Sonne weg
1664	Giovanni Borelli	Kometen auf parabellförmiger Bahn ??
1705	Edmund Halley	Kometen 1531 = 1607 = 1682 ; Prognose für 1758, Ellipse
1758	Johann Palitzsch	erste Wiederfindung eines Kometen nach Prognose
1812	Heinrich Olbers	Schweif als Partikelfahne, die von Repulsivkräften der Sonne weggetrieben
1864	Giovanni Donati	Erste spektroskopische Beobachtung eines Kometen

Geschichte der Kometenforschung 2

Chronologie	Forscher / Team	Interpretation, Aspekte
1868	William Huggins	Kohlenstoff (C) im Kometen nachgewiesen
1910	Nicholas Dobrovnikoff	Nachweis CN, CH, C2 in der Koma von 1P/Halley
1935	Karl Wurm	Erklärung der aktiven Tochter-Moleküle im Koma aus Mutter-Molekülen (unbeobachtet)
1948	Pol Swings	Muttermoleküle als: Wasser, Kohlendioxid (CO2), Methan (CH4) und Ammoniak (NH3)
1950	Fred Whipple	Kometenkerne als Eis-Konglomerat-Modell vorgestellt
1970		Entdeckung Wasserstoff-Hydroxyl-Wolke (OH) um Kometen C/1969 TI (Tago-Sato-Kosaka)
1986		Erste Kometen-Raumsonde ICE bei 21P/Giacobini-Zinner
2009		Aminosäure Glycin wird im Kometenstaub nachgewiesen
2014		erste Sonde landet auf Kometenkern , ROSETTA

Licht und Protonen; v = ??

- Geschwindigkeit
- v … velocitas = s/t = [Entfernung/Zeit]

- VON DER SONNE kommen : Licht und Teilchen

- Lichtgeschwindigkeit … 300.000 km/s … v
- Protonen-Geschwindigkeit … 800 km/s … vp
- Sonnenwind mit 400 km/s…. vs
- Verhältnis v / vp = 300.000/800 ~ 400

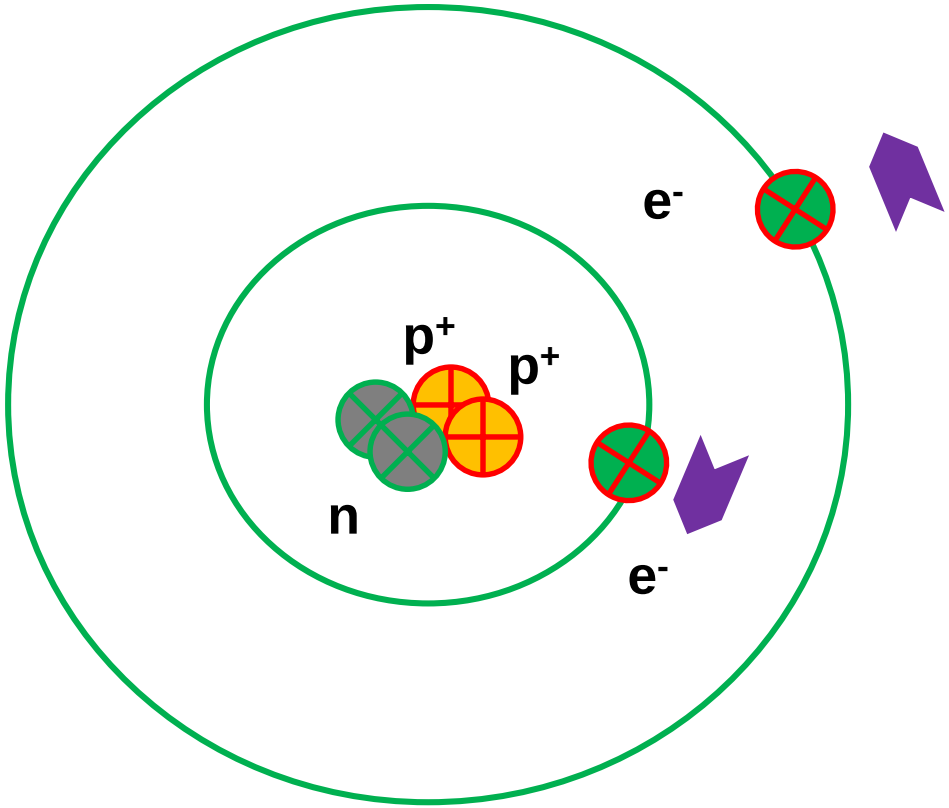
Wechselwirkung 1

- Atome und Moleküle bestehen aus
  - Kern
  - Elektronenhülle

  - Kern: Protonen (+) und Neutronen
  - Elektronenhülle: mehrere Elektronen (-) auf verschiedenen Bahnen - Abstand vom Kern in 1,2,3 usw. Niveaus

Elektronen-Bahnen

- 1. Ansatz- kreisförmige Bahnen bei angeregtem Helium (He*) um Kern



Ein Exkurs: Verwandtschaft der Forschung

- Das Modell von Niels Bohr ist gedanklich mit dem Heliozentrum des Mittelalters und den Vorstufen von Keppler verwandt.

1. Die Bahnen der Planeten sind nahezu kreisförmig
2. Die Bahnen der Elektronen sind nahezu kreisförmig

Jedoch beide Thesen entwickeln sich anders …

Wechselwirkung 2

- Atome und Moleküle können zerlegt werden
  - Kerne werden zu Protonen und Neutronen
  - Elektronenhülle verliert ein Elektron (Fall 1), es entsteht dann ein Ion (positiv geladen); dieses folgt den magnetischen und gravitativen Gesetzen im All
  - Es entsteht auch ein freies Elektron (negativ geladen)
  - Bei Bewegung gilt die Magneto-Hydrodynamik
  - Zum Plasma als 4te Phase der Stoffe ?!

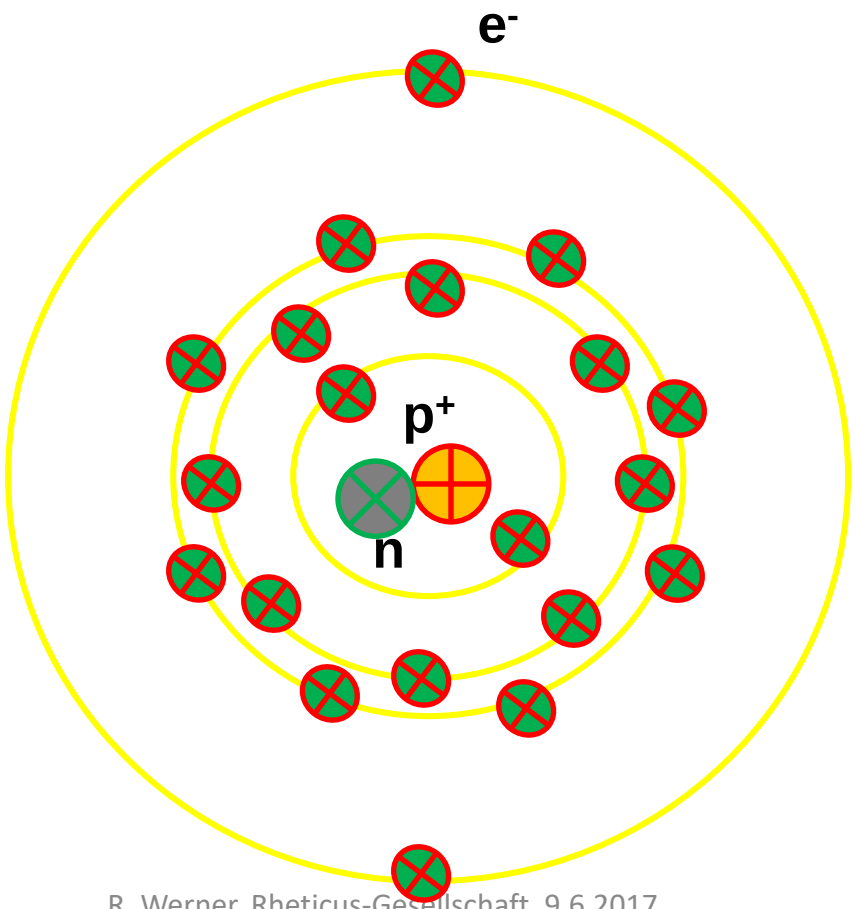
  - Kern: Protonen und Neutronen, kommt ein Neutron dazu, dann entsteht ein Isotop mit mehr Masse C^{12} –> C^{14}
  - Mehr Energie auf Elektronenhülle: mehrere Elektronen auf verschiedenen Bahnen - springen auf mehr Abstand vom Kern in 1,2,3 auf 1,2,3,4 Niveaus – Banden entstehen

Wechselwirkung 3

- Atome und Moleküle können spezielles Licht aussenden
  - Mehr Energie auf Elektronenhülle: mehrere Elektronen auf verschiedenen Bahnen - springen auf mehr Abstand vom Kern in 1,2,3 auf 1,2,3,4 Niveaus
  - Springt das Elektron aus der Schale 4 zurück auf Schale 3, dann gibt es eine Wellenlänge, in der Licht ausgestrahlt wird
  - Diese Wellenlänge (lambda λ)ist von der Molekülart (z.B. C_2) abhängig

Viele Protonen führen zu Elektronen-Bahnen

- 2. Ansatz- 4 kreisförmige Bahnen bei Ca um Kern (20p + 20n) - vereinfacht



Wechselwirkung 4

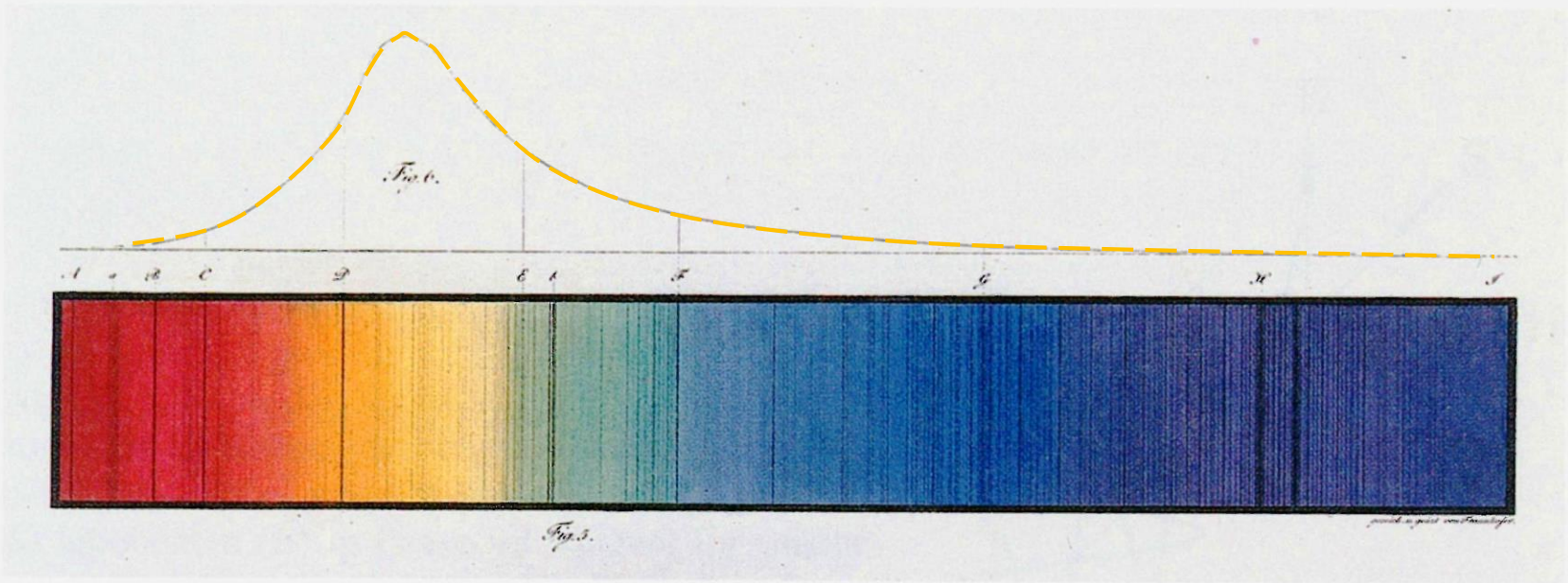
- Atome und Moleküle können spezielles Licht aussenden
  - Springt das Elektron aus der Schale 4 zurück auf Schale 3, und eines von 3 nach 2 dann gibt es zwei Wellenlängen, in denen Licht ausgestrahlt wird
  - Es können mehrere Elektronen zeitgleich von mehreren Bahnen zurückspringen
  - Mehrere Wellenlängen (Emissionlinien) im Spektrum hervorgehoben
  - Die Emissionslinien sind auch die Absorptionslinien (Auslöschung der Wellenlänge)

Frauenhofers große Leistungen

Tafel III. Erstes Gitterspektrometer, Fraunhofer, 1821 (mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums)

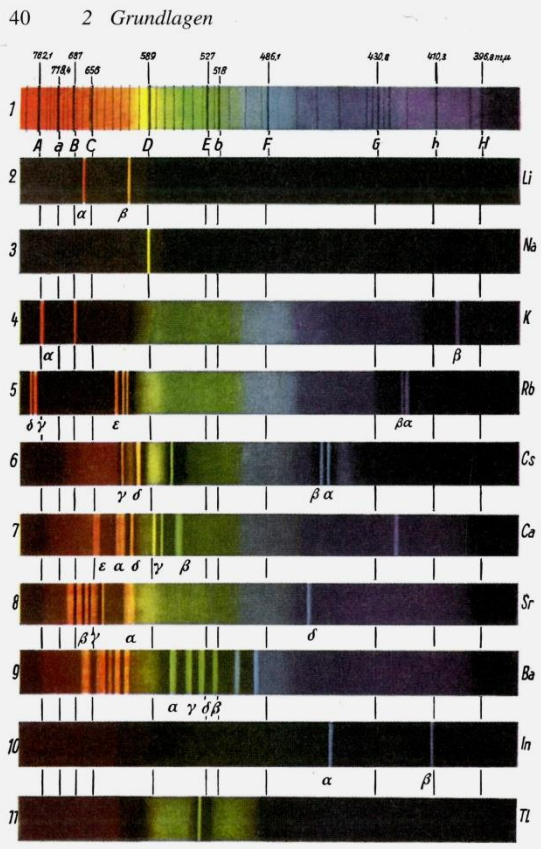
Sonnenspektrum

A B C D E F G H I



Tafel IV. Sonnenspektrum mit Fraunhoferschen Linien. Kupferstich, 1814, aus: Denkschriften der kgl. Akademie der Wissenschaften zu München für die Jahre 1814 und 1815, Band 5, Tab. II, München 1817. Das durchgezogene Spektrum gibt die Augenempfindlichkeit an (mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums).

Sonne mit Absorption, Stoffe mit Emissionslinien



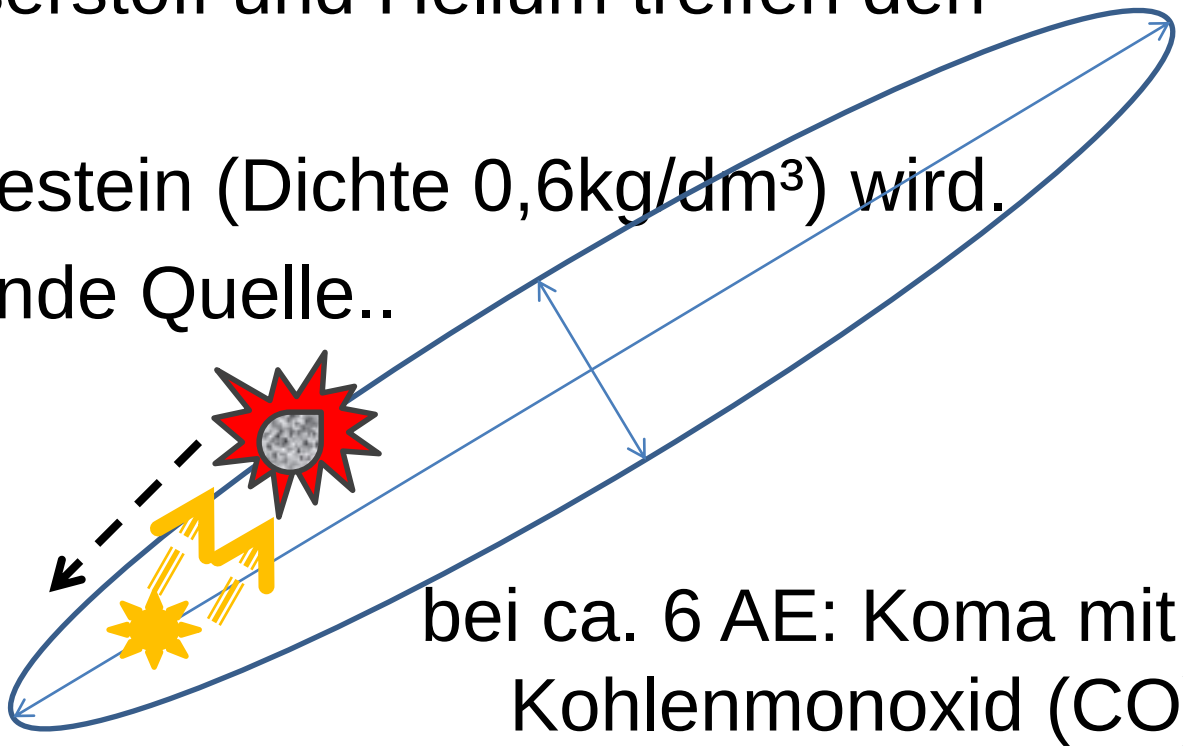
Tafel V. Linienspektren verschiedener Elemente im sichtbaren Spektralbereich, mit einem Gitterspektrometer aufgenommen. Das (kontinuierliche) Sonnenspektrum zeigt eine Reihe dunkler Linien, die durch Absorption des Sonnenlichts in der Chromosphäre der Sonne entstehen. Z.B. sind die Fraunhofer-Linien **C** und **F** die ersten beiden Linien der Balmerserie des Wasserstoffs, **D** die Natrium-D-Linie (Doppellinie, Abb. 2.13), **E** und **G** sind zwei der sehr zahlreichen Eisenlinien (vgl. Abb. 2.10), **A** und **B** sind O_2-Sauerstofflinien (vgl. Abb. 2.18).

1 SONNE
2 Li … Lithium
3 Na … Natrium
4 K … Kalium
5 Rb
6 Cs
7 Ca … Calcium
8 Sr
9 Ba … Barium
10 In
11 Tl

Sonnenwind an den Bahnen von Kometen

- Diese Lage ist sonnennah und der Sonnenwind bläst zum Kometen hin. Protonen, Licht, UV-Licht, Wasserstoff und Helium treffen den Kometen.
- Aus dem Gestein (Dichte 0,6kg/dm³) wird.

eine ausgasende Quelle..



bei ca. 6 AE: Koma mit Kohlenmonoxid (CO)

Teil 2

- Kometen im Sonnensystem
- Entfernungen : Astronomische Einheit (AE)
- Umlaufzeit in Jahren = Periode
- Kurzperiodisch unter 30 Jahren
- Langperiodisch mehr als 30 Jahre
- Spektrum unserer Sonne und der Kometen
- Spektrum im sichtbaren Bereich
- Von << rot orange grün blau violett >>

Entfernungen AE = 150 Millionen km große Weiten

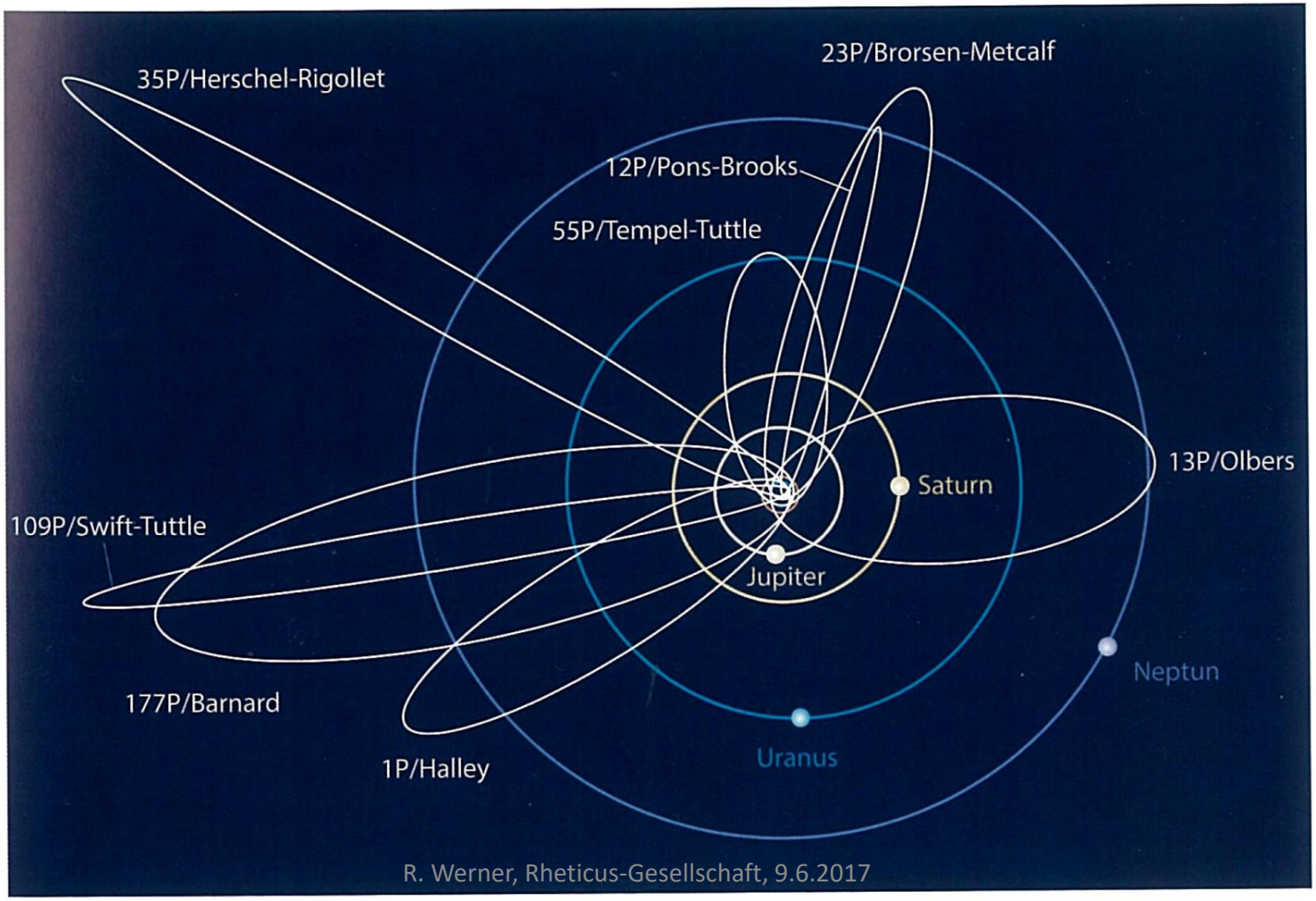
1 AE	150 000 000 km = Erde	8,3 Lichtminuten
5 AE	Jupiter	43 Lichtminuten
30 AE	Neptun	4,2 Lichtstunden

Erdnächste Kometen

Bezeichnung	Erdnähe Tag	Abstand in AE
D/1770 L1 (Lexel)	1.7.1770	0,015
55P/Temple-Tuttle	26.10.1366	0,023
1P/Halley	4.10.837	0,033
209P/LINEAR	29.5.2014	0,055
C/1853 (Schweizer)	29.4.1853	0,084
45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova	11.2.2017	0,084
C/1797 P1 (Bouvard-Herschel)	16.8.1797	0,088

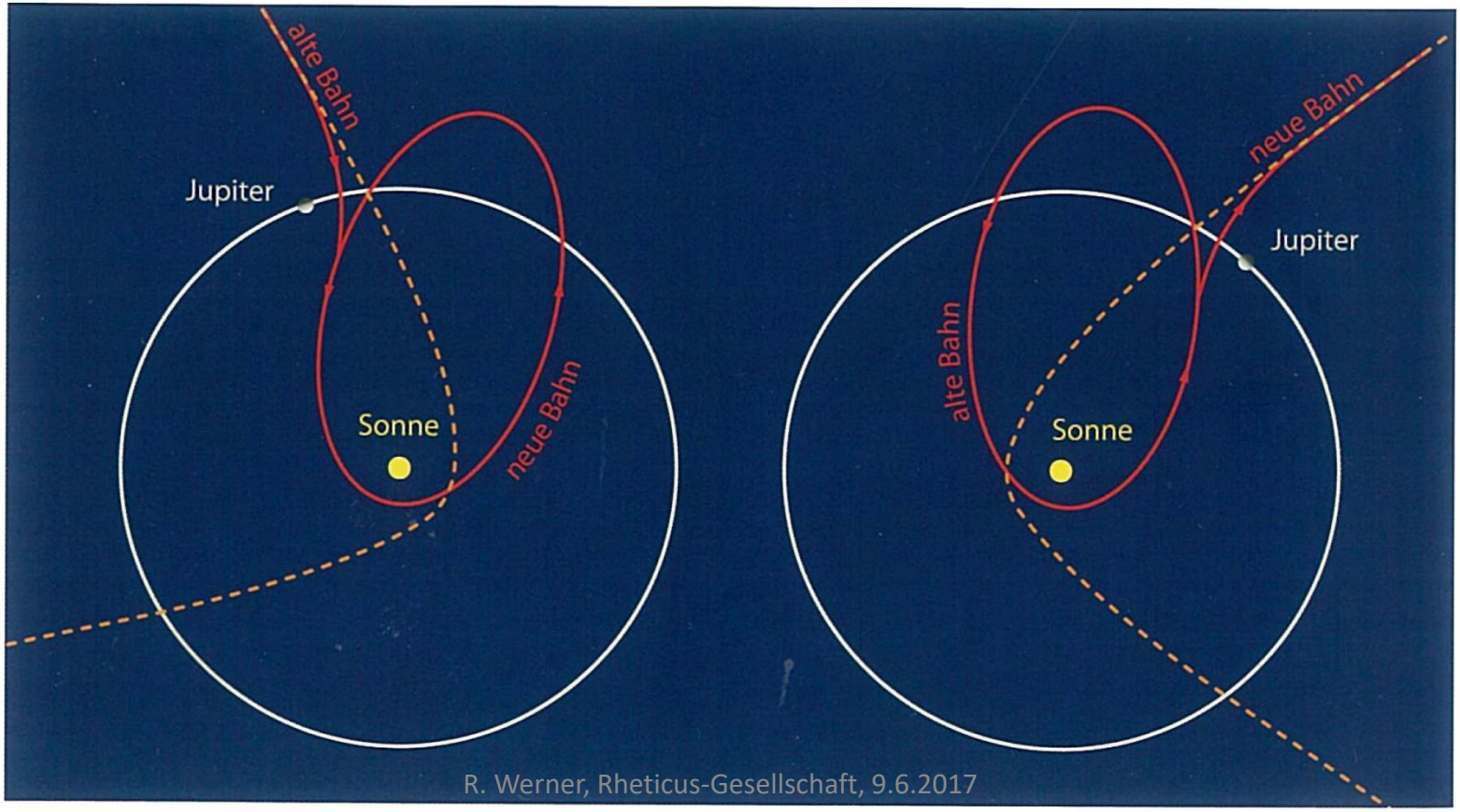
Kometenbahnen Halley Familie

▼ **Bahnen** der bekanntesten Kometen der Halley-Familie.



Bahnen als Varianten kurze Ellipse zu langer Ellipse und umgekehrt

▼ **Bahngenese von Jupiterfamilie-Kometen:** Durch eine Annäherung an den Planeten wird der Komet eingefangen und in eine Ellipsenbahn mit einem Aphel nahe der Jupiterbahn gezwungen. Rechts: Umgekehrt kann der Komet aus einer Ellipsenbahn in eine langperiodische Ellipsenbahn oder eine Hyperbel umgelenkt werden.



Durchmesser (km) von einigen Kometen

Komet	Durchmesser	
Name	**von**	**bis**
1P/Halley	4,5	5,6
2P/Encke	1,3	2,9
9P/Temple	2,3	3,1
29p/Schwassmann - Wachmann	13,2	19,5
103P/Hartley	0,6	5,9
C/1995 O1 (Hale Bopp)	13,5	56,0
95P/Chiron		200

Chronologie der langperiodischen Kometen
Umlaufzeit = Periode

KOMET	Entdeckung	Umlaufzeit (Jahre)	Letzter Perihel	Nächster Perihel
1P/Halley	mehrfach	76,1	1986	2061
23P/Brorsen-Metcalf	1847	70,5	1989	2059
27P/Crommeln	1818	27,4	2011	2039
109p/Swift Tuutle	1862	135,0	1992	2126
177P/Barnard	1889	119,6	2006	2117

Atomare Bildung 1

- Spektrum unserer Sonne und der Kometen
- Sonnenspektrum enthält viel Wasserstoff (H), Helium (He), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Natrium (Na), Kalzium (K) und Eisen (Fe).
- Wie wird Helium zum Baustein der Materie ?

Atomare Bildung 2

- Spektrum unserer Sonne und der Kometen
- He enthält 2 Protonen, 2 Neutronen, und 2 Elektronen in der Hülle mit elliptischen Bahnen in x&y und x&z >>
- These Atombau: Kohlenstoff (C, 12) entsteht in mehreren Schritten aus 3 Heliumatomen (He, 4)

Elemente im Periodensystem

1.Gr	2.Gr	3.Gr	4.Gr	5. Gr	6.Gr	7. Gr	8. Gr	
			H o1				He o2	1. Periode
Li o3	Be o4	B o5	C o6	N o7	O o8	F o9	Ne o10	2.Periode
Na o11	Mg o12	Al o13	Si o14	P o15	S o16	Cl o17	Ar o18	3. Periode

Erklärung: o ….. Ordnungszahl
NUR 3 Zeilen mit 18 Elementen !
Die o geben die Zahl der Protonen an, die ist gleich groß wie die Zahl der Elektronen. o Protonen (+) sind mit o Elektronen (-) verknüpft.

Atomare Bindung und Spektrum

- Kometenspektrum enthält viel Wasserstoff (H), Helium (He), kurzzeitig Beryllium (Be), Kohlenstoff (C – o6), Sauerstoff (O – o7), CO_2 (kristallin) und H_2O (kristallin)

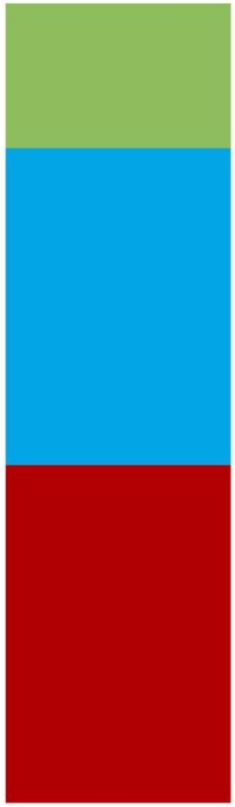
- These Atombindung: Kohlenstoff (C, 4-wertig) geht mit 2 Elektronen von 6 Elektronen auf Nachbar-C-Atom ein. Es entsteht C_2 d.h. (C=C)

- Spektrallinien von C_2 bei 516 Nanometer (nm).

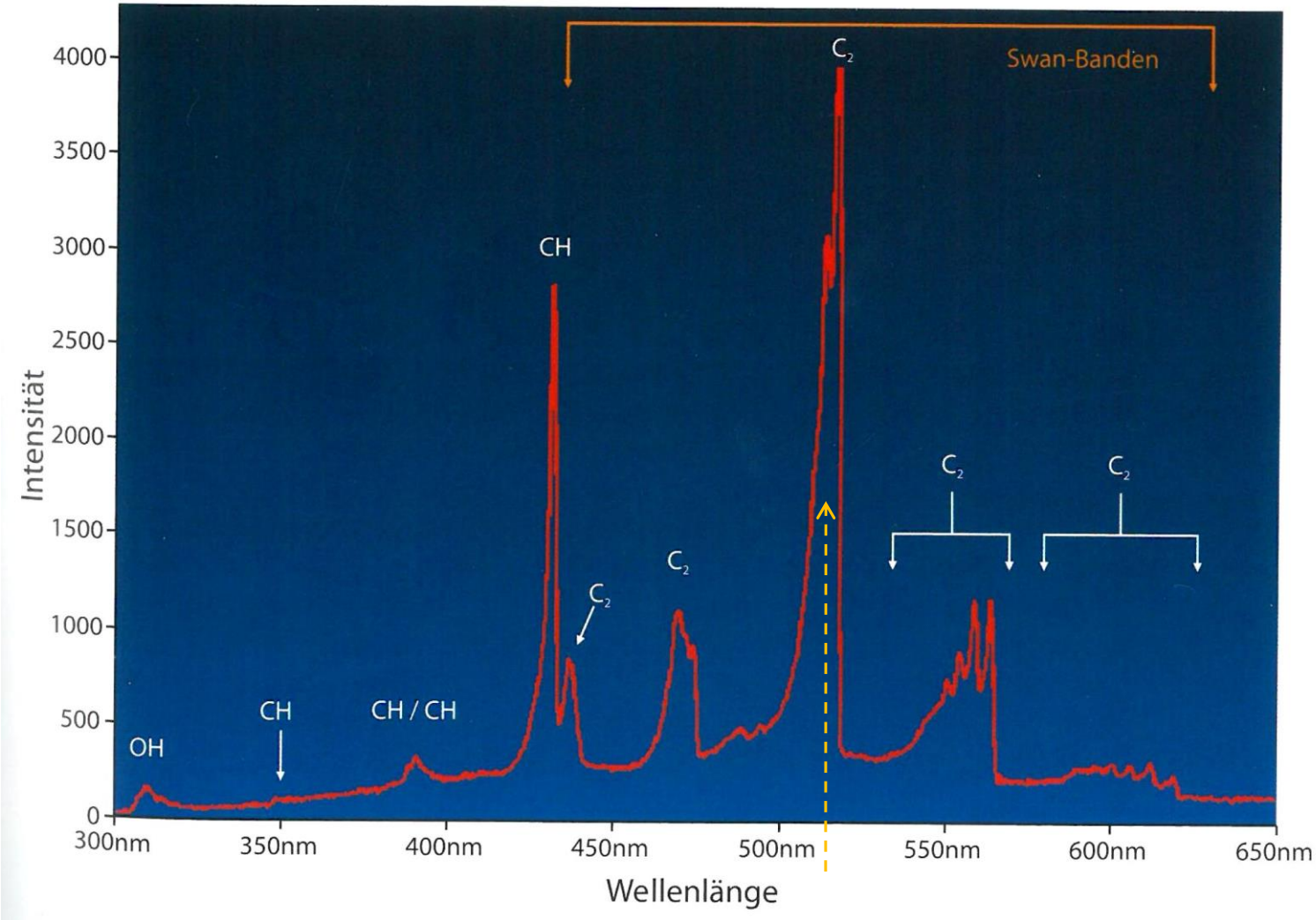
nm … Nanometer (1/1.000.000.000 m) o. [10^{-9} m]

16 Moleküle im Koma der Kometen

Element Name	Element	Molekül	Anteil %	Bezeichnung
Wasserstoff	H	H2O	61,0	Wasser
Kohlenstoff	C	CO	23,0	Kohlenmonoxid
Kohlenstoff	C	CO2	6,0	Kohlendioxid
Kohlenstoff & Wasserstoff	C & H	CH4	1,5	Methan
	C & H	C2H6	0,6	Ethan
	C & H	C2H2	0,2	Acetylen
Kohlenstoff & Sauerstoff & Wasserstoff	C & H & O	CH3OH	2,4	Methanol
	C & H & O	HCOH	1,1	Formaldehyd
	C & H & O	C2H6O2	0,3	Ethylenglykol
Stickstoff & …	N & H & C	NH3	1,5	Ammoniak
Stickstoff & …	N & H & C	HCN	0,3	Cyanwasserstoff
Schwefel & …	S & H	H2S	1,5	Schwefelwasserstoff
Schwefel & …	S & C & O	OCS	0,4	Carbonylsulfid
Schwefel & …	S & O	SO	0,3	Schwefelmonoxid
Schwefel & …	S & O	SO2	0,2	Schwefeldioxid
Schwefel & …	S & C	CS2	0,2	Kohlenstoffdioxid



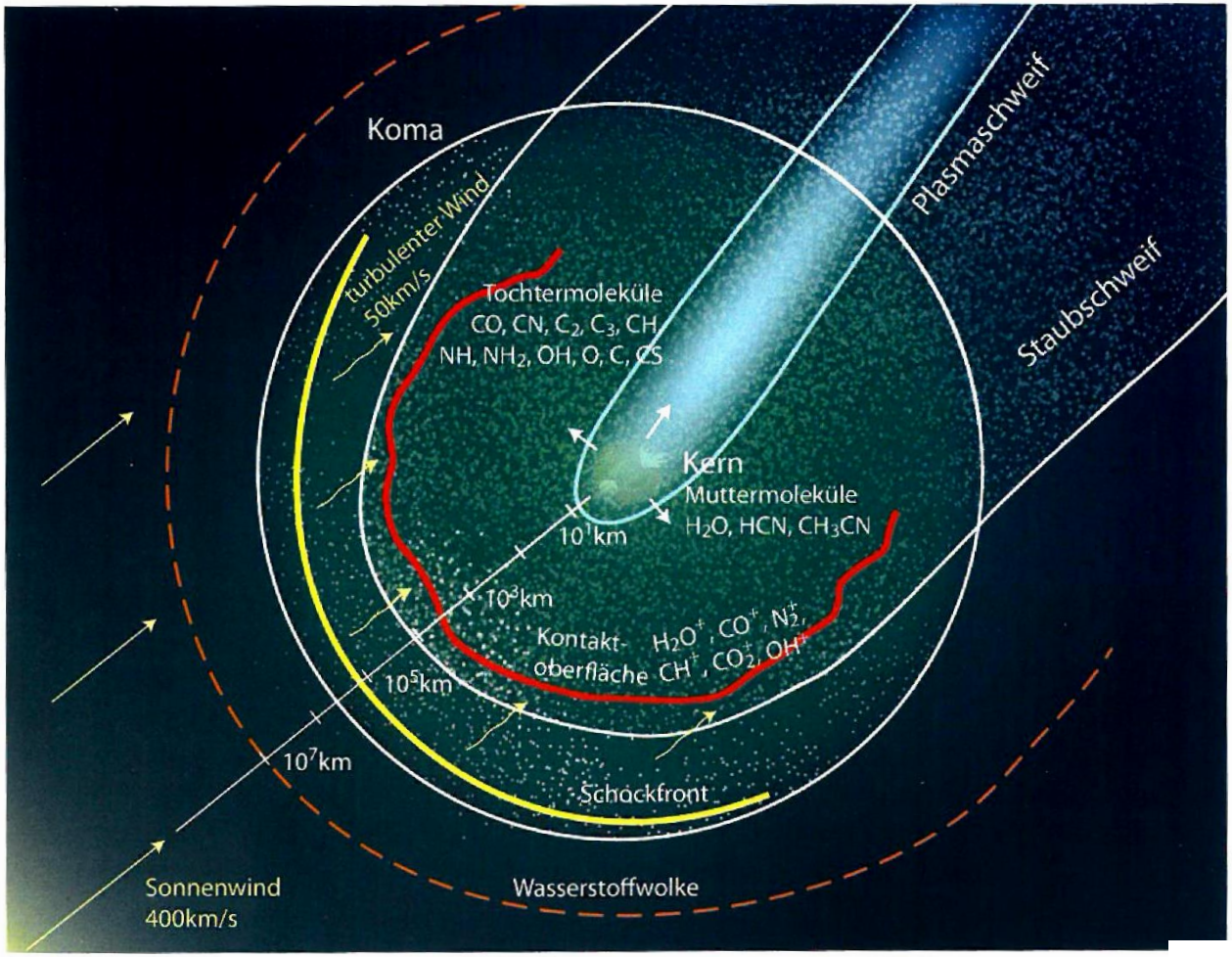
Spektrum, max. Intensität C_2 bei 516 nm



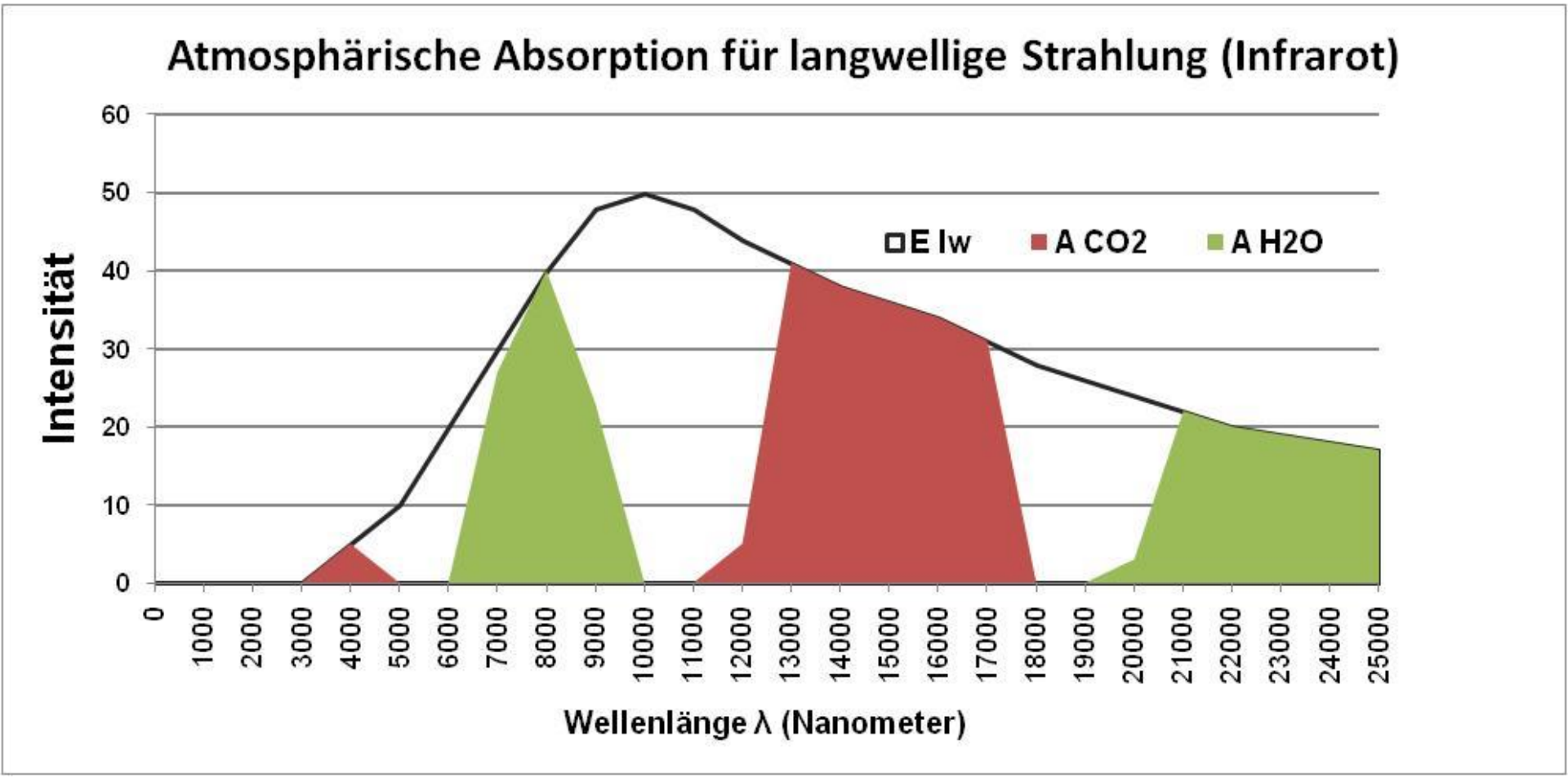
Das menschliche Auge

Typ	p10	Mittel	P90
Tagsehen	470 nm	550 nm	650 nm
Nachtsehen	420 nm	505 nm	590 nm

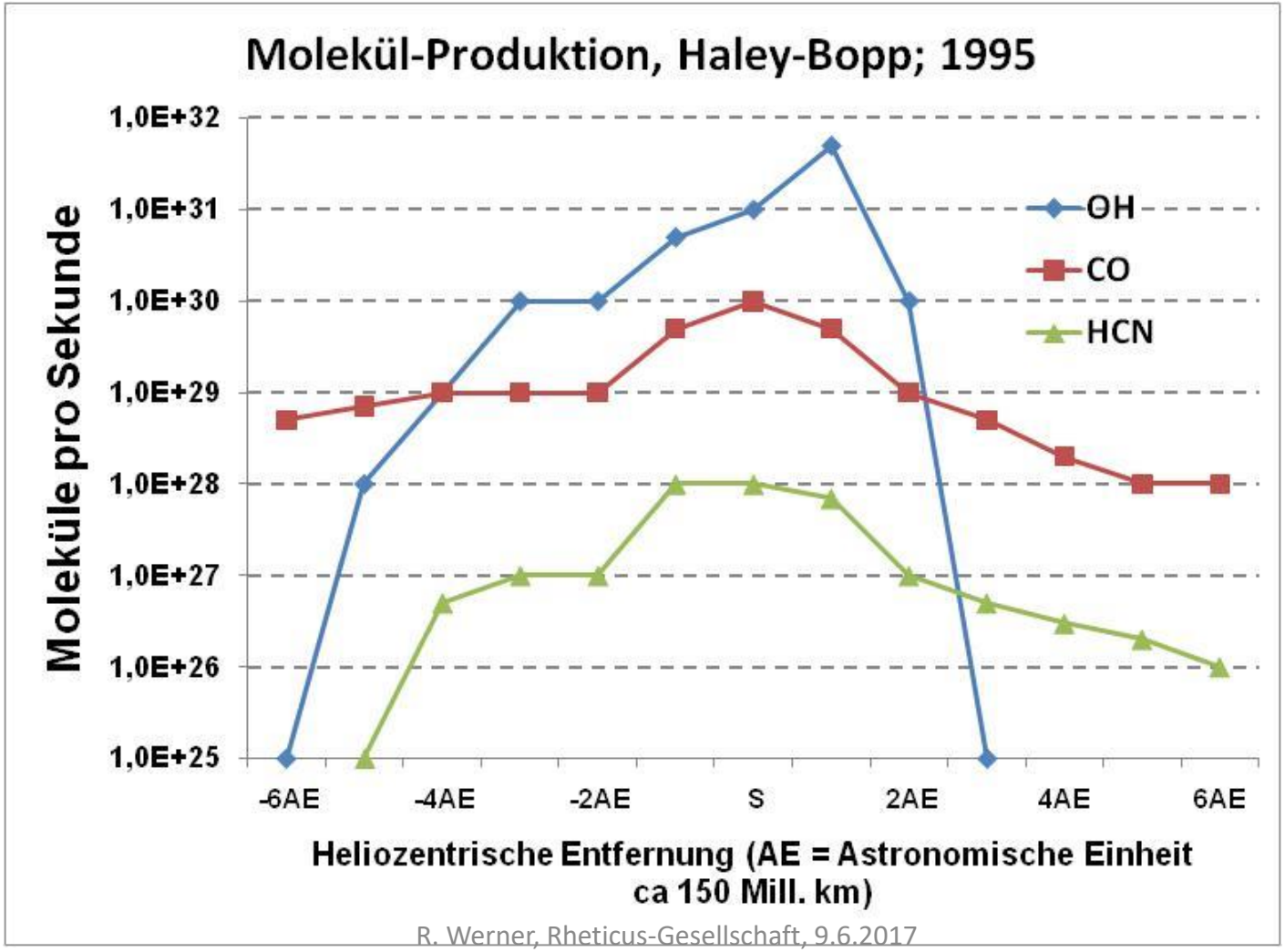
Koma mit einigen Hüllen



Spektroskopie von der Erde aus: 4 Banden und 3 Fenster im Infrarot



3 Moleküle bei Annäherung (Perihel) und danach



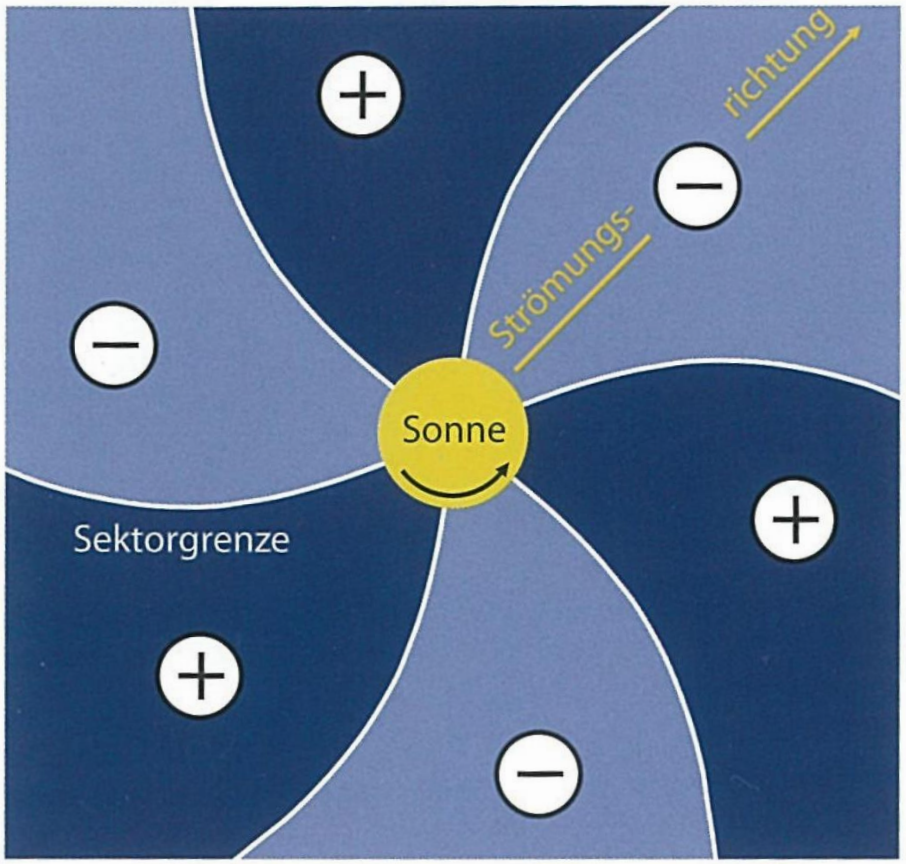
Kometen und Beobachtungen

- Kometen-Chronologie
- Die Augenbeobachtungen und die Fernrohre
- Die elektromagnetische Messung – Empfänger (z.B. Germanium)
- Fernrohre von der Erde zum Satelliten verlagert (Hubble-Fernrohr in 600 km über Grund)

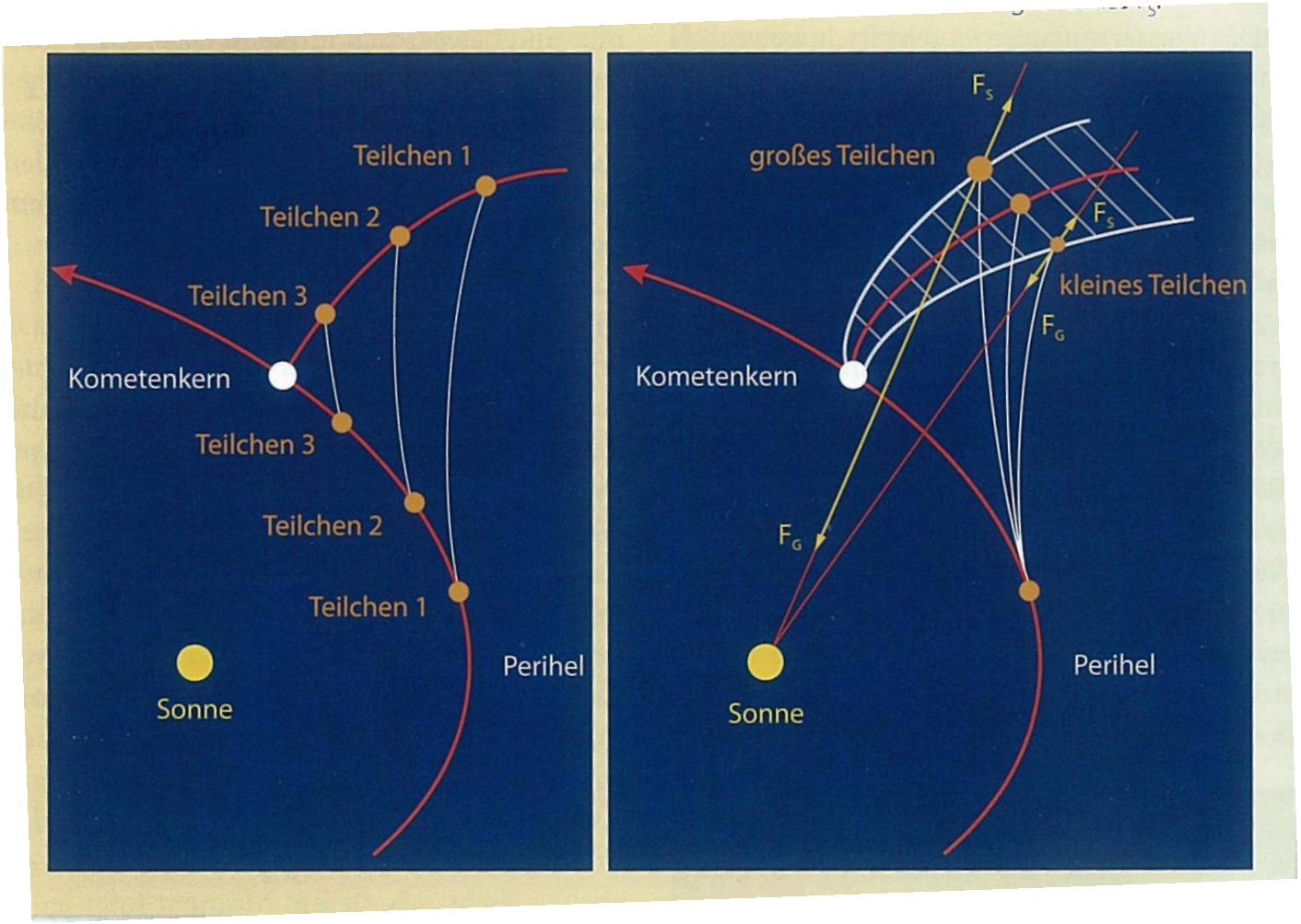
Chronologie der Spektralforscher

- Kometen-Chronologie 1/4 Jahrhundert
- bis 1850 Vermutungen und Spekulation, Wollatston 1802 dunkle Linien im Sonnenspektrum, Frauenhofer misst hunderte Linien aus, Christian Doppler erklärt verschobene Spektrallinien
- bis 1875 Kirchhoff und Bunsen entdecken die Spektroskopie im Labor, ionosiertes Gas
- bis 1925 V. Slipher 1912 entdeckt Rotverschiebung der Galaxien
- bis 1975 Standard-Labore mit Gasmessung IR in der Erde – URAS2 für Kohlenmonoxid, in Messwagen und an Messstationen in Vorarlberg
- bis 2000 Miniaturisierung der CO und CO_2-Messung, Plasma im Labor (siehe Exkursion Dr. Kalb, Feldkirch und Umweltanalytik am UI in Bregenz)

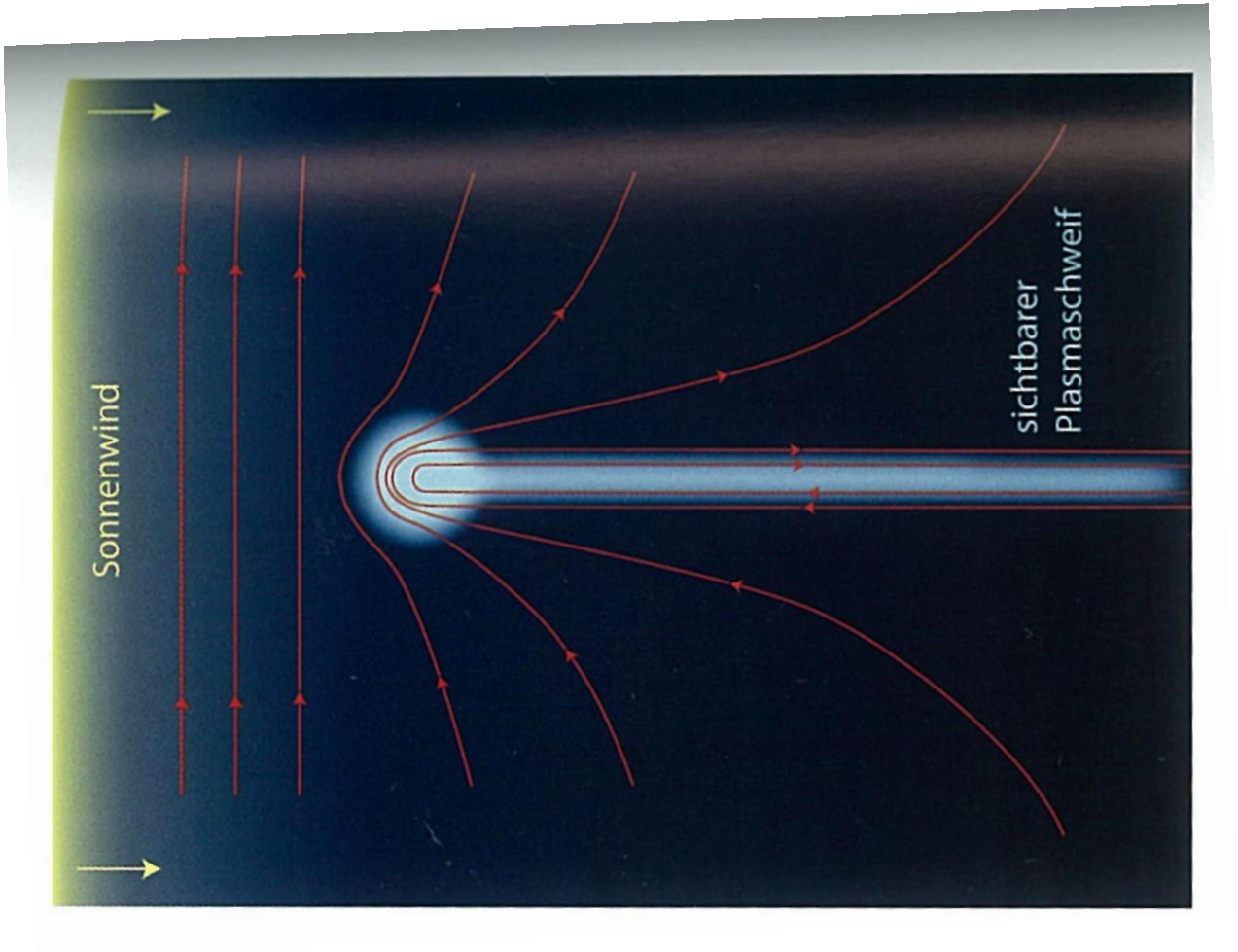
Rotierende Sonne und Magnetfeld



Schweifbildung bei Gravitation (F_G) und Strahlungsdruck (F_S)

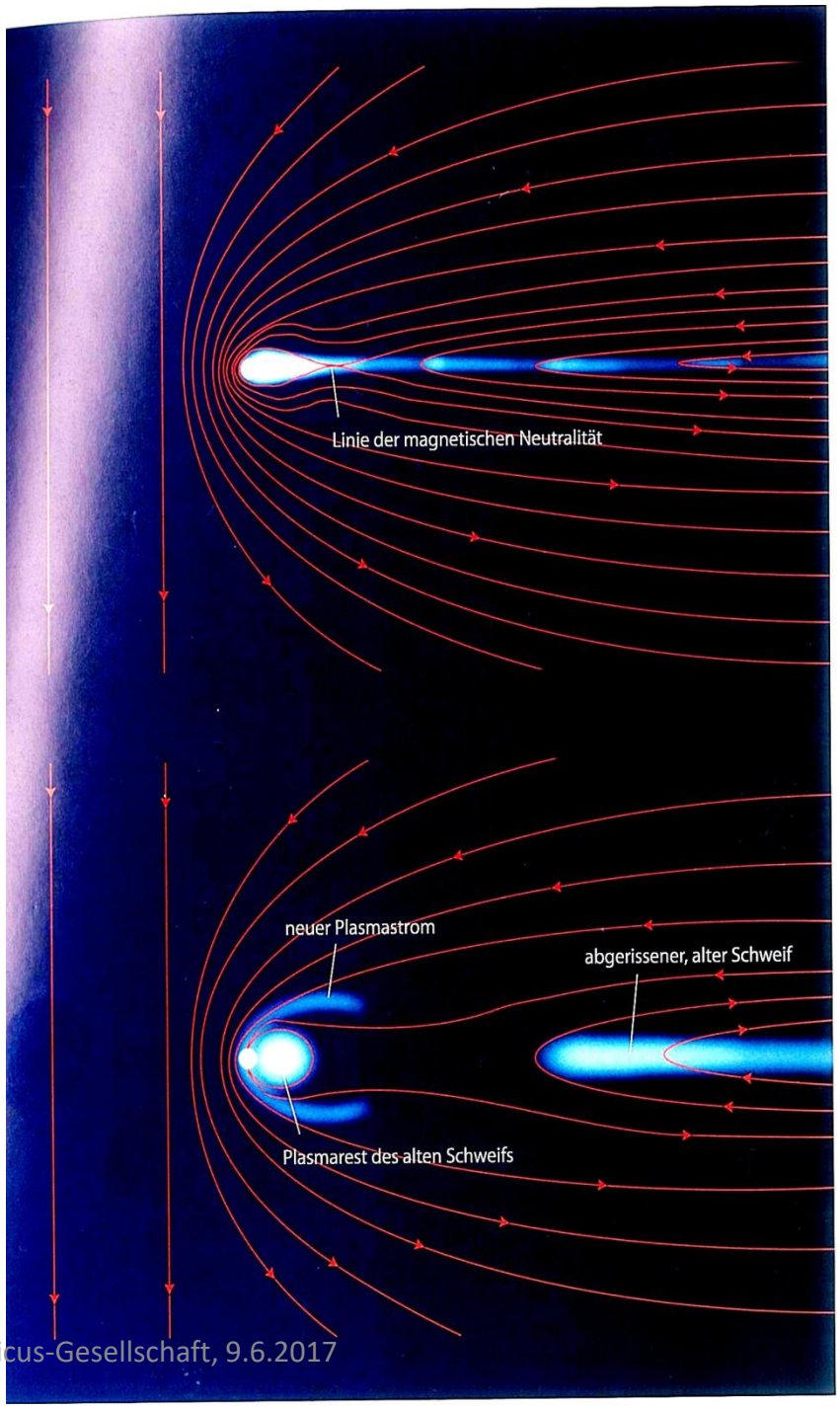


Plasma verändert Magnetfeld und „rückgekoppelt“



Hubble Teleskop 600km Höhe

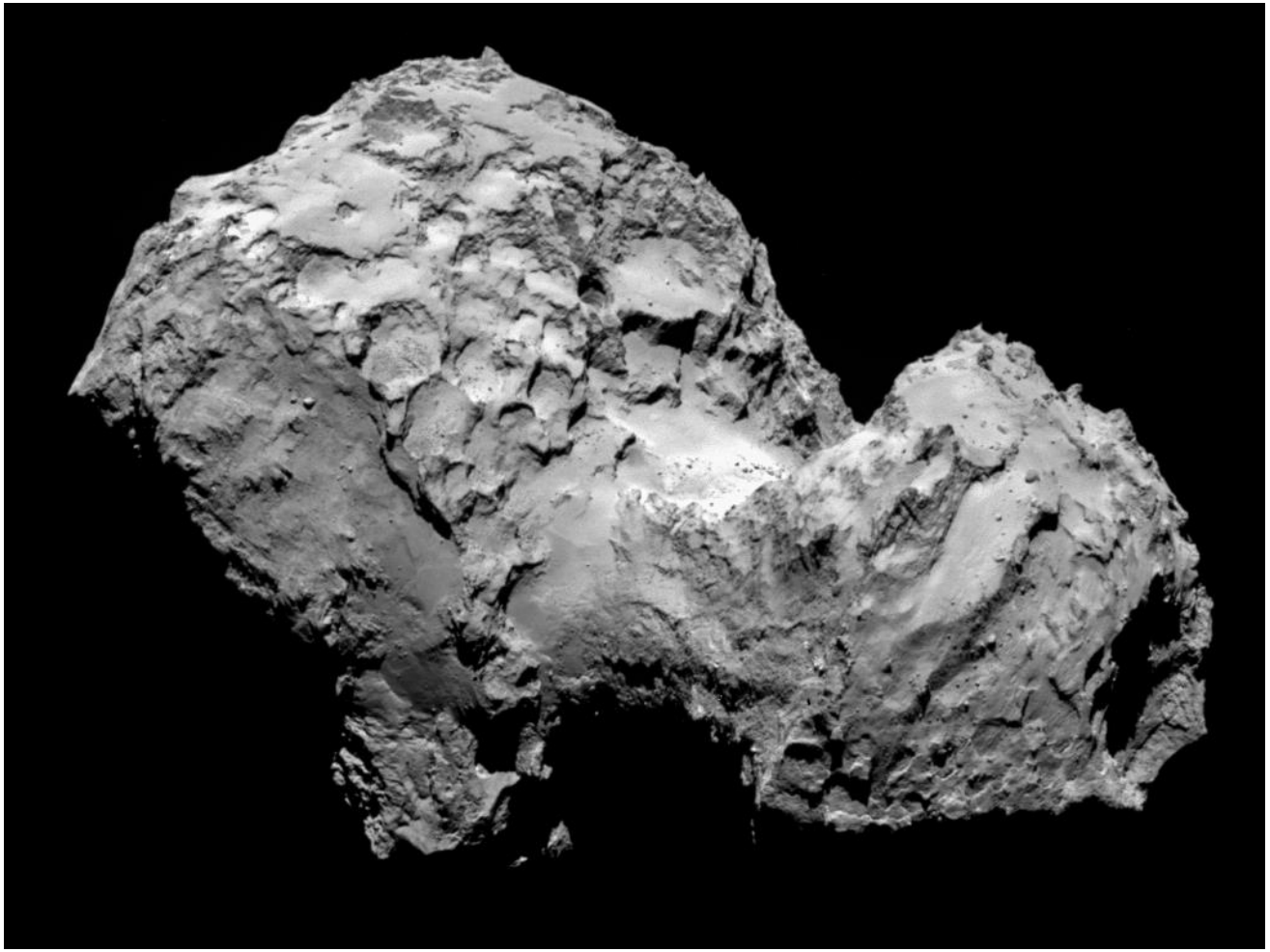
Magnetfeld der Sonne mit Umkehr



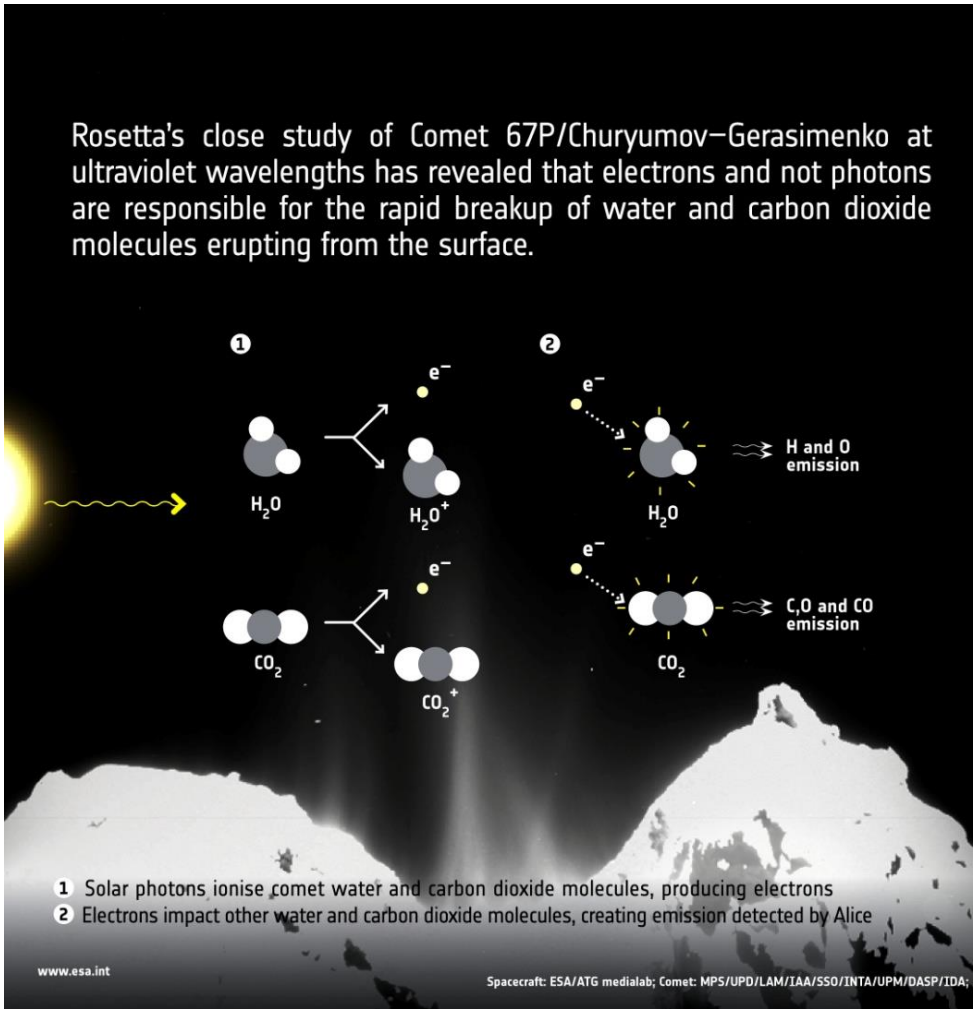
Chronologie der Kometen-Substanzen

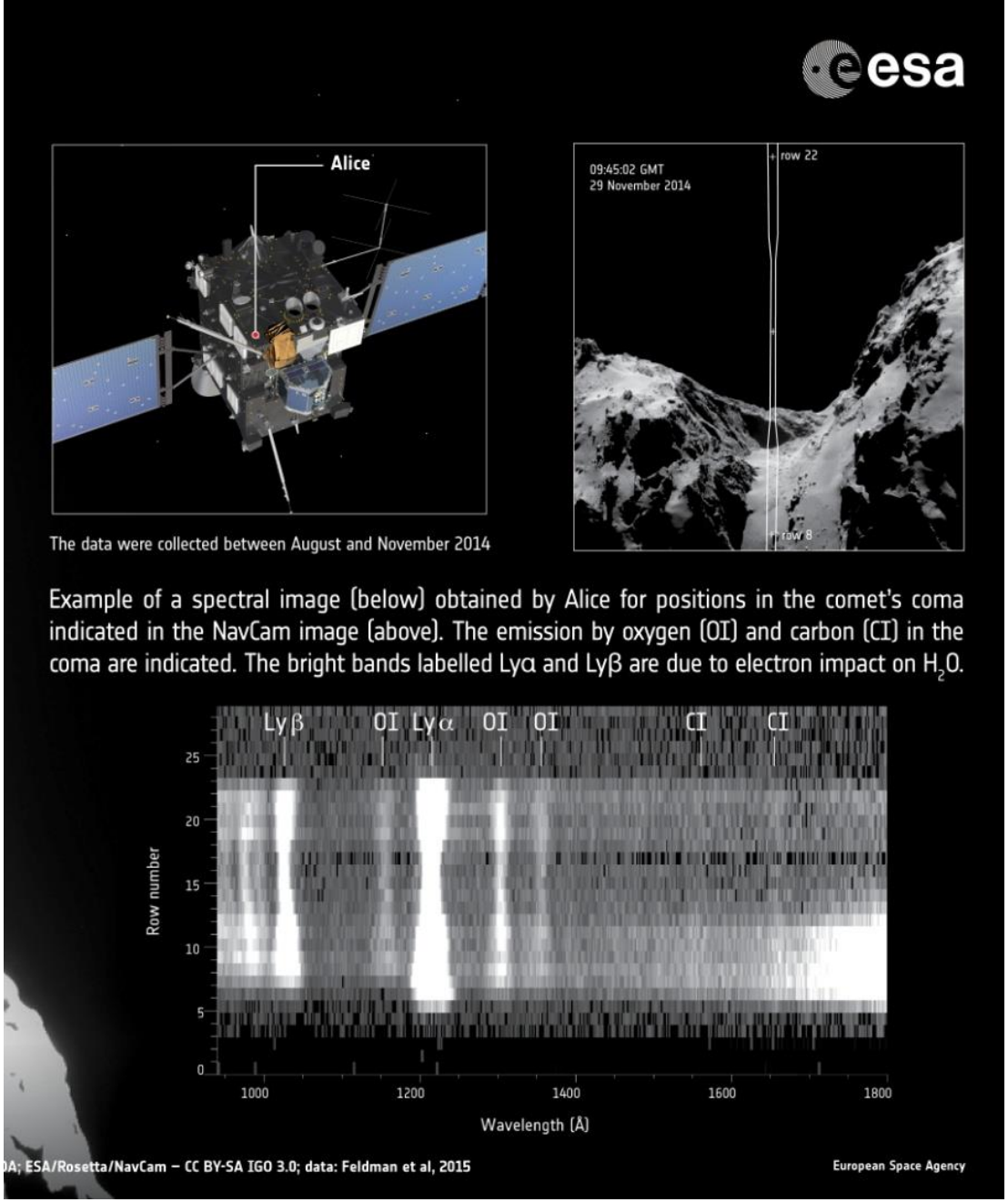
- Kometen-Spektrallinien ½ Jahrhundert
- bis 1800 weiß und farbig (rötlich etc)
- bis 1850 Wasserstoff, Wasser (H, H_2, D, OH)
- bis 1900 Kohlenstoff, Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2)
- bis 1950 ….
- bis 2000 ….
- bis 2050 Glycin: eine einfache Aminosäure: Formel : H-$CHNH_2$-COOH

Erkundung um und auf 67P/Churyumov-Gerasimenko



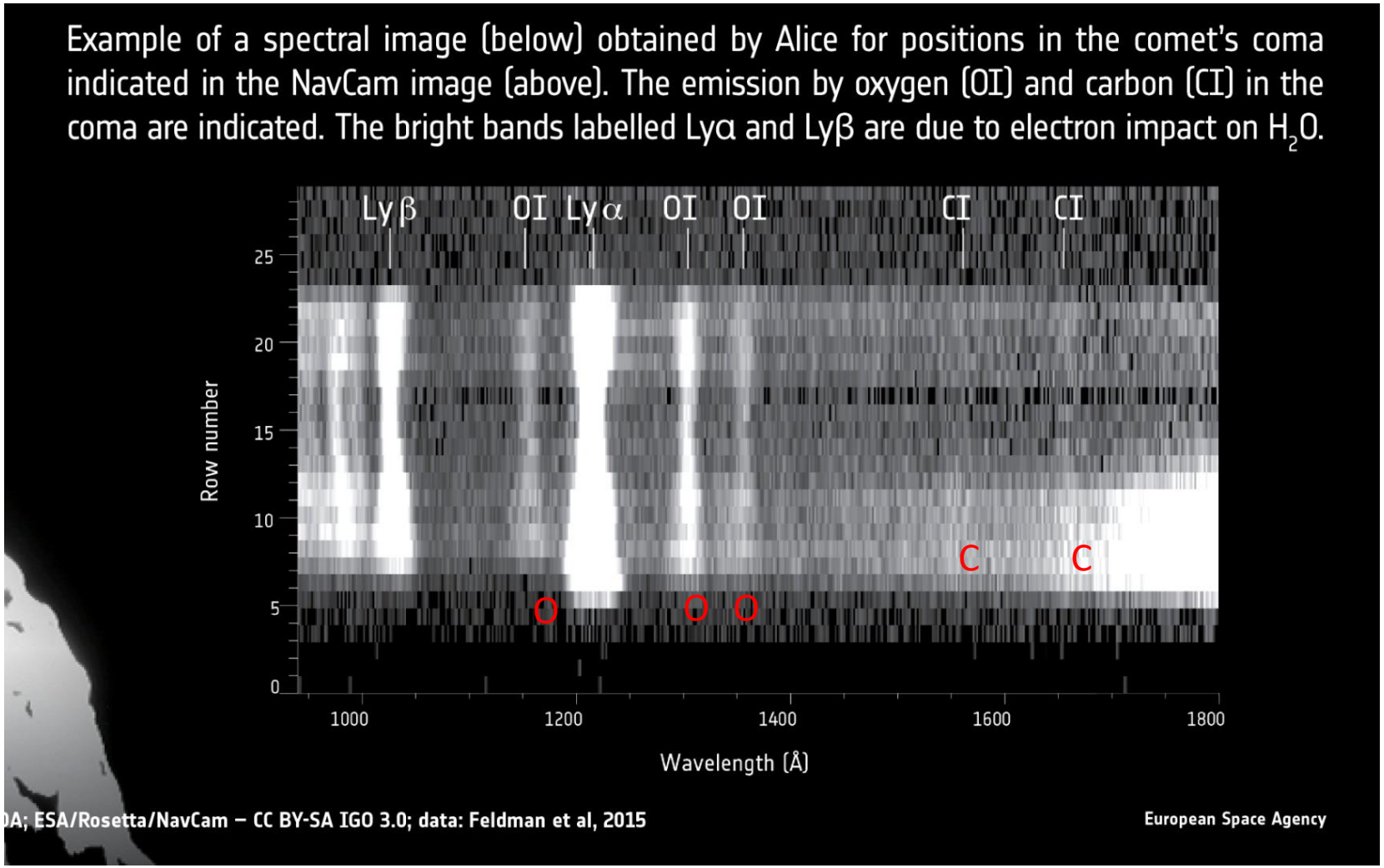
Zerlegung und Ionisierung von Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2)




esa
Alice
09:45:02 GMT
29 November 2014
row 22
row 8
The data were collected between August and November 2014
Example of a spectral image (below) obtained by Alice for positions in the comet's coma indicated in the NavCam image (above). The emission by oxygen (OI) and carbon (CI) in the coma are indicated. The bright bands labelled Lyα and Lyβ are due to electron impact on H_2O.
Lyβ
OI
Lyα
OI
OI
CI
CI
Row number
0
5
10
15
20
25
1000
1200
1400
1600
1800
Wavelength (Å)
A; ESA/Rosetta/NavCam – CC BY-SA IGO 3.0; data: Feldman et al, 2015
European Space Agency

Komet Rosetta / Alice im fernen All:

Wellenlänge in Angström, 1 Å = 0,1 nm, UV-Licht



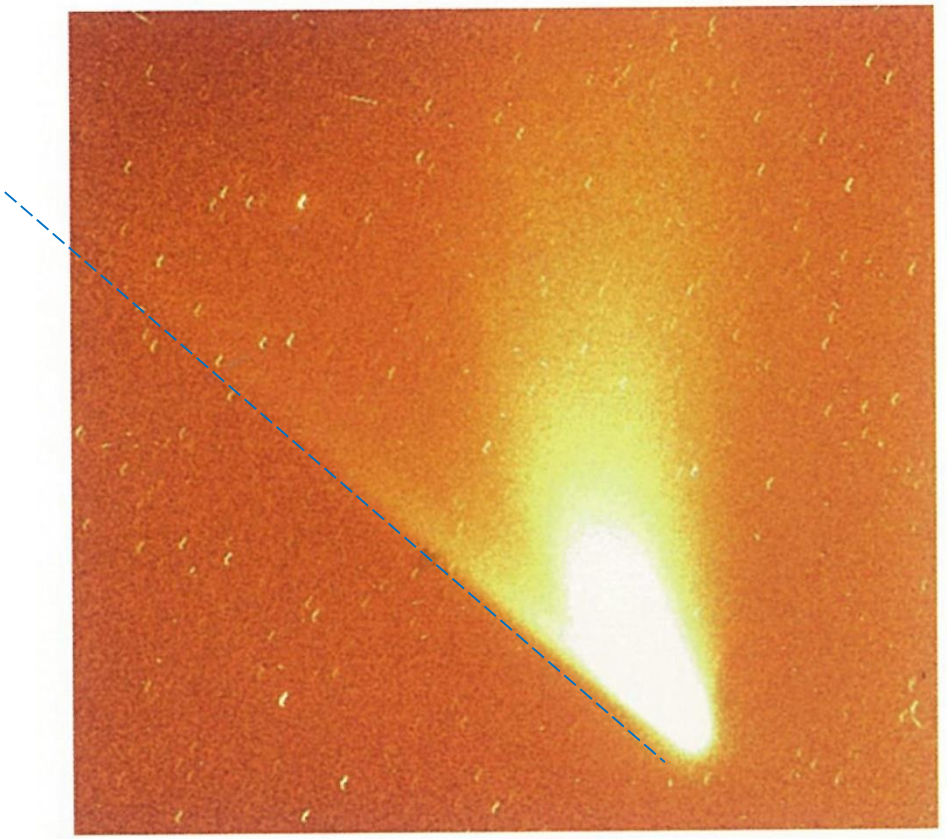
C/1995 O1 Hale-Bopp

Na … Natrium

Ein Alkali-Metall

Gelbe Flamme

590 nm

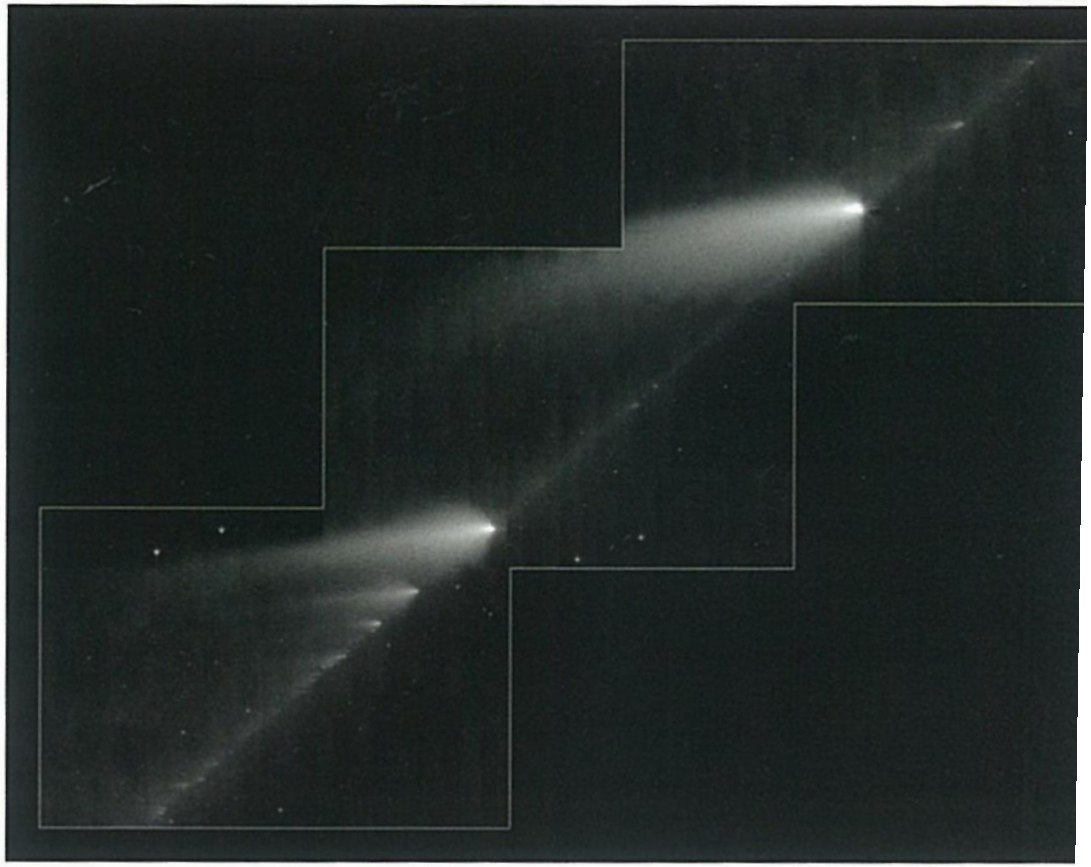


▲ **Der Komet C/1995 O1 (Hale-Bopp)** war einer der staubreichsten Kometen überhaupt. Er bildete einen Natriumschweif heraus, welcher auf einer speziell gefilterten Aufnahme nachweisbar war. Der Natriumschweif ist die schmale Struktur, die links vom Kern entspringt.

Kometen und das Beobachtungsende

- Die Ausgasungen sind nach 100 Umläufen gering; die Kometenmasse beträgt rund 90%
- Nach 500 Umläufen: Kometenmasse gering; rund 35%
- Teile des Eises (mit vielen Poren - cirka 50%) bleiben im All und treffen auf Planeten mit Atmosphären, wo sie für uns unsichtbar emittieren
- Die Jets zerlegen den Kometenkörper ebenso wie seine Rotation

Kometen-Ende = Fragmente + Spuren



▲ **Die zahlreichen Fragmente** des Kometen 73P/ Schwassmann-Wachmann konnten im Jahr 2006 mit dem Spitzer-Weltraumteleskop aufgenommen werden.

21 Fragmente als Ende,

▼ **Die Bruchstücke des Kometen D/1993 F2 (Shoemaker-Levy)** auf einer Panorama-Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops. Insgesamt erstreckte sich die Kette von 21 Fragmenten über eine Länge von 1,1 Mio. Kilometer.

Zusammenschau

- Kometen sind Begleiter der Sonne, die auch flüchten oder in die Sonne stürzen oder in den Jupiter (Gasplanet).
- Sie reflektieren in der Aus-Gasungszeit - mit Teilchen und Gashüllen - das Sonnenlicht oder sind ionisiert (Plasma); somit erzeugen sie selbst elektro-magnetische Strahlung .
- Sie strahlen im UV, sichtbaren und infraroten Licht (über 3000 Nanometer)
- Die Chemie im Plasma ist von Ionen geprägt, dauerndes Werden und Vergehen von Stoffen: (C_2 + $\mathbf{h}\nu$ = C + C) sowie (C + C = C_2 + $\mathbf{h}\nu$)
- mit den außerirdischen Teleskopen können viele chemische Fragen erklärt werden. Fast wie im Labor.
- Von einem automatischen Messgerät auf einem Kometen – wie seit 2014 - hatte im Jahr 1968 noch keiner eine Vorstellung.

DANKE FÜR

IHRE AUFMERKSAMKEIT

Literatur-Vorschlag

- Astronomie, Memo, Band 77
- Kometen, Einführung für Hobby-Astronomen
- Internet
  - Nahe Objekte, Kometen und Koma
  - http://spaceguard.rm.iasf.cnr.it/NScience/neo/neo-what/what1.htm
- Weltraumteleskop Hubble
  - http://www.br.de/themen/wissen/hubble-weltraum-teleskop102.html
- http://hubblesite.org/
- Amstetten Hochbärneck, Movie von Kometen
- http://www.astrostation.at/