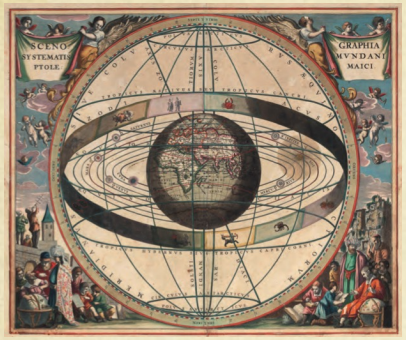
Kosmische Fabriken für die Elemente unseres Lebens

Roland Diehl

Kosmische Nukleosynthese: Fragen…

- Woher kommt eigentlich der Sauerstoff, den wir atmen?
- Woher kommt Kohlenstoff, die Basis organischen Lebens?
- Wieso ist Silizium so reichlich vorhanden, aber Gold so selten und kostbar?
- Warum stellen wir uns nicht die gewünschten "Elemente" her?

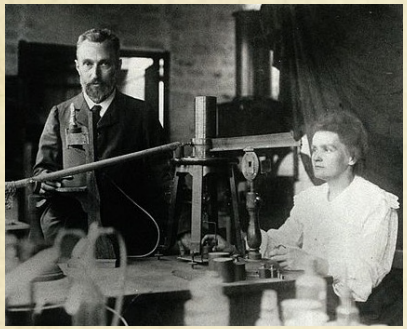
Historischer / gesellschaftlicher Kontext



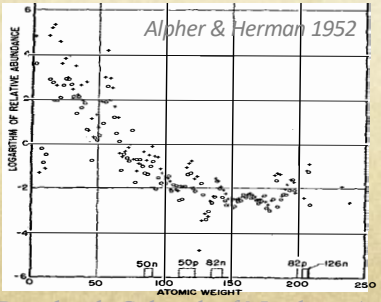
- Logik, Mathematik, Naturforschung in der Antike ... ... Aufklärung
- Natur-Beobachtung, Analyse um Erkenntnisse zu erwerben; Naturwissenschaft als akzeptiertes Denkmodell (16.-18.Jh)
  - Kopernikus, Newton, Galileo, v.Humboldt, ...
- Chemie als Feld technologischer/medizinischer/... Hoffnung (19.Jh)
  - Spektral-Analyse Kirchhoff 1859, Valenzlehre, Atom-Begriff... Benzol als Bestandteil 1865, Gruppierung chemische Elemente (Mendeleev)

Reihen	Gruppo I. — R^2O	Gruppo II. — RO	Gruppo III. — R^2O^3	Gruppo IV. RH^4 RO^2	Gruppo V. RH^3 R^2O^5	Gruppo VI. RH^2 RO^3	Gruppo VII. RH R^2O^7	Gruppo VIII. — RO^4
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Mendeleev 1871 (Wikipedia)



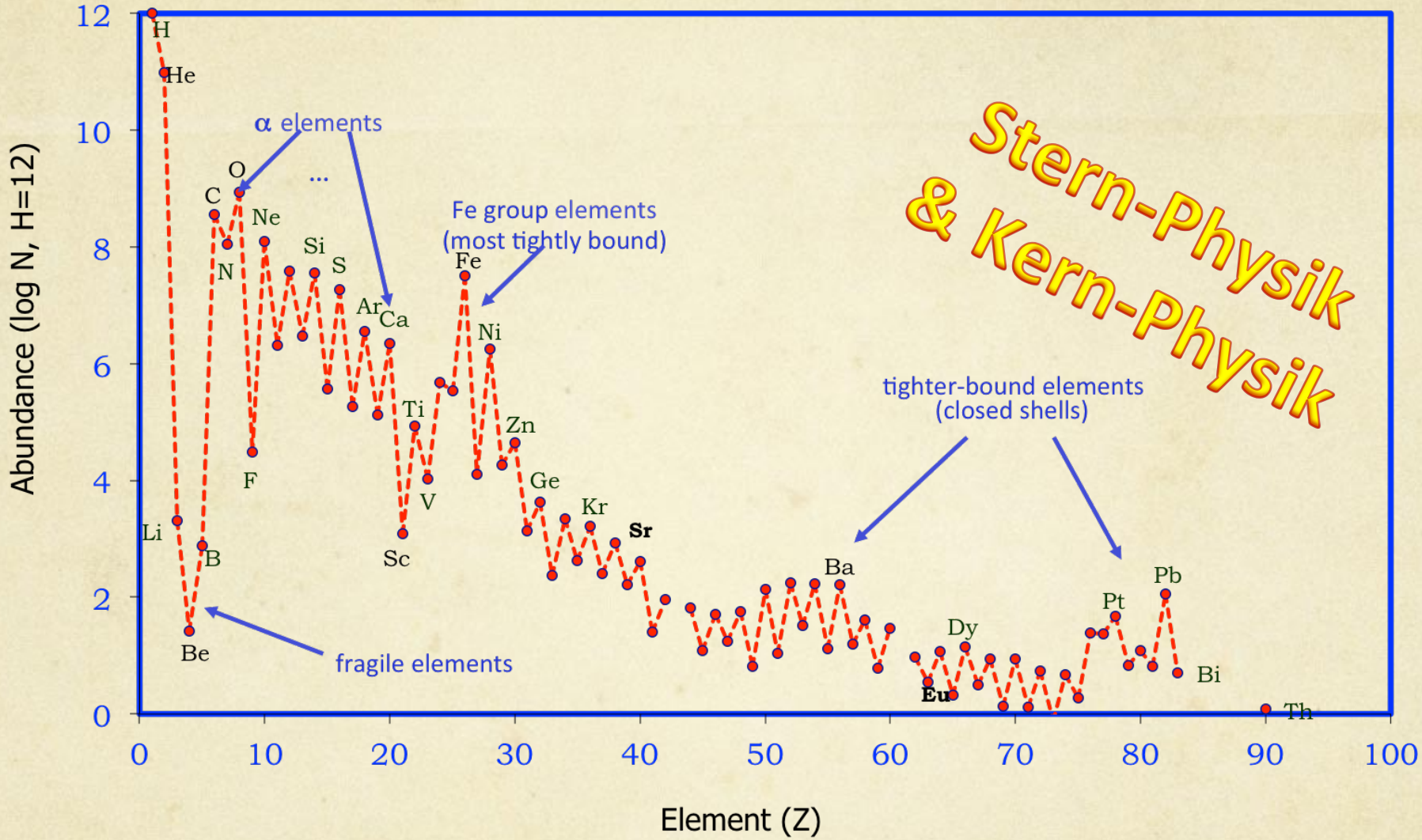
- "Naturwissenschaften" entwickeln subatomare Physik (ab ~1900)
  - Entdeckung der Radioaktivität (Becquerel 1896, Marie Curie 1898), Strahlungsarten (α,β,γ) (Rutherford 1898, Villard 1900); Elektronenkonfiguration der Atome und Periodensystem (Bohr 1913); Herstellung von Radium (I. Curie/F.Joliot-Curie 1934), Kernreaktion an Teilchenbeschleuniger (Cockroft-Walton/Van de Graaf 1938); Kernphysik, starke und schwache Wechselwirkung (Yukawa 1949)



Alpher & Herman 1952

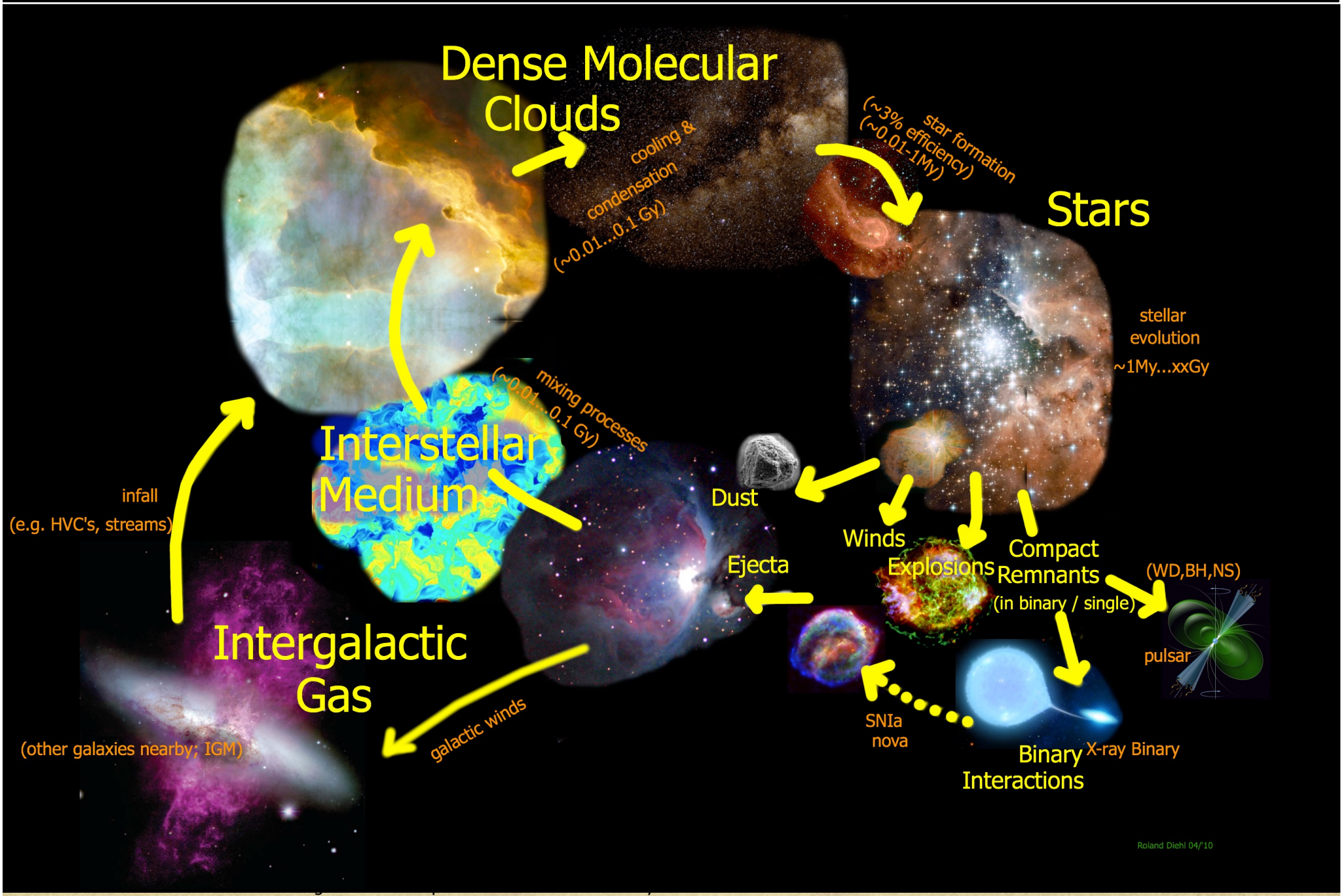
- astrophysikalische Diskussionen nehmen Fahrt auf (ab ~1920)
  - Sub-atomare Energiequelle des Sternenlichts (Eddington 1920), Geochemie der kosmischen Elemente (Goldschmitt 1930), Wasserstoff-Fusion in der Sonne: Bethe-Weizsäcker Zyklus 1938; Kern/astrophysikalische Beschreibung der kosmischen Elementhäufigkeiten (Suess & Urey 1956), Beschreibungen kosmischer Nukleosynthese (Cameron 1957; Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle 1957)

Kosmische Element-Häufigkeiten

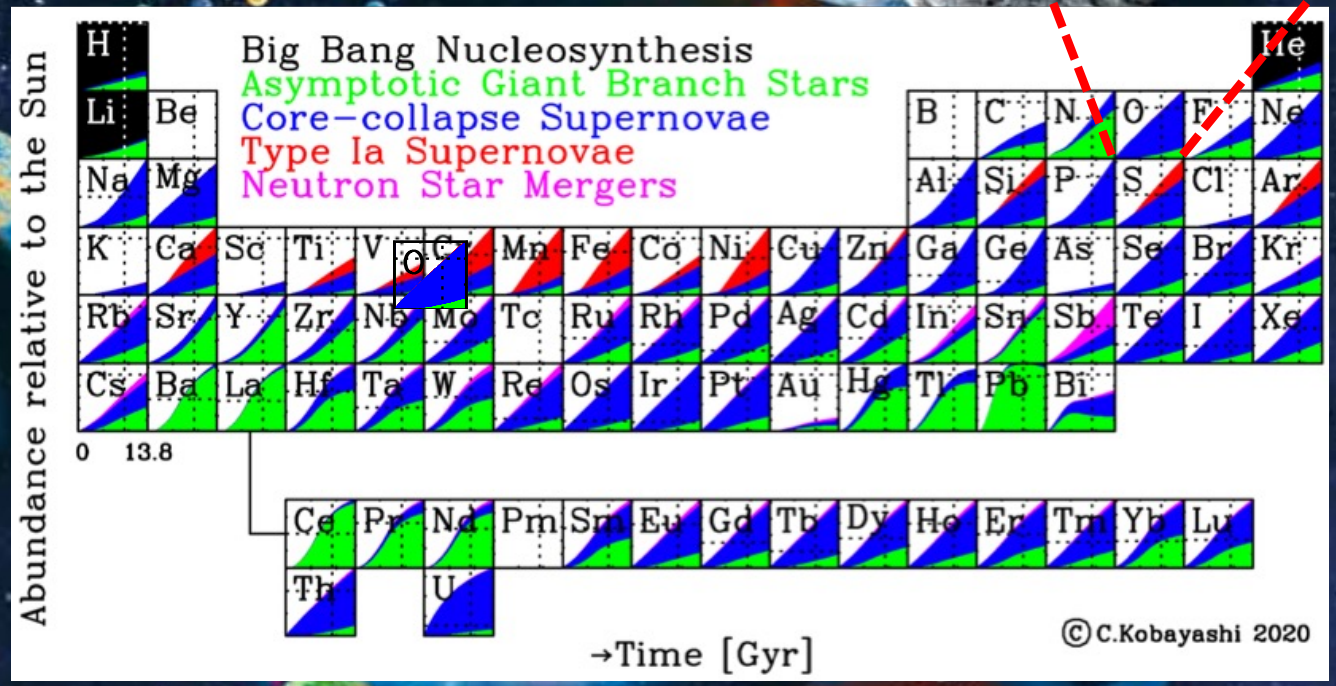


- Signaturen aus den Eigenschaften von…
  - Atomkernen (welche Kerne werden leicht/mehr erzeugt?)
  - kosmischen Quellen (welche Fusionsreaktions-Umgebungen sind häufiger?

Der kosmische Materie-Kreislauf: Stern-Generationen



Ursprung der chemischen Elemente



Vorsicht: In diesem Resultat stecken Modellvorstellungen über die kosmischen Quellen, über die Kernfusions-Reaktionen, über die kosmischen Mischprozesse....

→ Es lohnt sich hier genauer hinzuschauen...

Die chemischen Elemente

Key: atomic number **Symbol** name abridged standard atomic weight

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 **H** hydrogen 1.0080 ± 0.0002																	2 **He** helium 4.0026 ± 0.0001
3 **Li** lithium 6.94 ± 0.06	4 **Be** beryllium 9.0122 ± 0.0001											5 **B** boron 10.81 ± 0.02	6 **C** carbon 12.011 ± 0.002	7 **N** nitrogen 14.007 ± 0.001	8 **O** oxygen 15.999 ± 0.001	9 **F** fluorine 18.998 ± 0.001	10 **Ne** neon 20.180 ± 0.001
11 **Na** sodium 22.990 ± 0.001	12 **Mg** magnesium 24.305 ± 0.002											13 **Al** aluminium 26.982 ± 0.001	14 **Si** silicon 28.085 ± 0.001	15 **P** phosphorus 30.974 ± 0.001	16 **S** sulfur 32.06 ± 0.02	17 **Cl** chlorine 35.45 ± 0.01	18 **Ar** argon 39.95 ± 0.16
19 **K** potassium 39.098 ± 0.001	20 **Ca** calcium 40.078 ± 0.004	21 **Sc** scandium 44.956 ± 0.001	22 **Ti** titanium 47.867 ± 0.001	23 **V** vanadium 50.942 ± 0.001	24 **Cr** chromium 51.996 ± 0.001	25 **Mn** manganese 54.938 ± 0.001	26 **Fe** iron 55.845 ± 0.002	27 **Co** cobalt 58.933 ± 0.001	28 **Ni** nickel 58.693 ± 0.001	29 **Cu** copper 63.546 ± 0.003	30 **Zn** zinc 65.38 ± 0.02	31 **Ga** gallium 69.723 ± 0.001	32 **Ge** germanium 72.630 ± 0.008	33 **As** arsenic 74.922 ± 0.001	34 **Se** selenium 78.971 ± 0.008	35 **Br** bromine 79.904 ± 0.003	36 **Kr** krypton 83.798 ± 0.002
37 **Rb** rubidium 85.468 ± 0.001	38 **Sr** strontium 87.62 ± 0.01	39 **Y** yttrium 88.906 ± 0.001	40 **Zr** zirconium 91.224 ± 0.002	41 **Nb** niobium 92.906 ± 0.001	42 **Mo** molybdenum 95.95 ± 0.01	43 **Tc** technetium [97]	44 **Ru** ruthenium 101.07 ± 0.02	45 **Rh** rhodium 102.91 ± 0.01	46 **Pd** palladium 106.42 ± 0.01	47 **Ag** silver 107.87 ± 0.01	48 **Cd** cadmium 112.41 ± 0.01	49 **In** indium 114.82 ± 0.01	50 **Sn** tin 118.71 ± 0.01	51 **Sb** antimony 121.76 ± 0.01	52 **Te** tellurium 127.60 ± 0.03	53 **I** iodine 126.90 ± 0.01	54 **Xe** xenon 131.29 ± 0.01
55 **Cs** caesium 132.91 ± 0.01	56 **Ba** barium 137.33 ± 0.01	57-71 lanthanoids	72 **Hf** hafnium 178.49 ± 0.01	73 **Ta** tantalum 180.95 ± 0.01	74 **W** tungsten 183.84 ± 0.01	75 **Re** rhenium 186.21 ± 0.01	76 **Os** osmium 190.23 ± 0.03	77 **Ir** iridium 192.22 ± 0.01	78 **Pt** platinum 195.08 ± 0.02	79 **Au** gold 196.97 ± 0.01	80 **Hg** mercury 200.59 ± 0.01	81 **Tl** thallium 204.38 ± 0.01	82 **Pb** lead 207.2 ± 1.1	83 **Bi** bismuth 208.98 ± 0.01	84 **Po** polonium [209]	85 **At** astatine [210]	86 **Rn** radon [222]
87 **Fr** francium [223]	88 **Ra** radium [226]	89-103 actinoids	104 **Rf** rutherfordium [267]	105 **Db** dubnium [268]	106 **Sg** seaborgium [269]	107 **Bh** bohrium [270]	108 **Hs** hassium [269]	109 **Mt** meitnerium [277]	110 **Ds** darmstadtium [281]	111 **Rg** roentgenium [282]	112 **Cn** copernicium [285]	113 **Nh** nihonium [286]	114 **Fl** flerovium [290]	115 **Mc** moscovium [290]	116 **Lv** livermorium [293]	117 **Ts** tennessine [294]	118 **Og** oganesson [294]

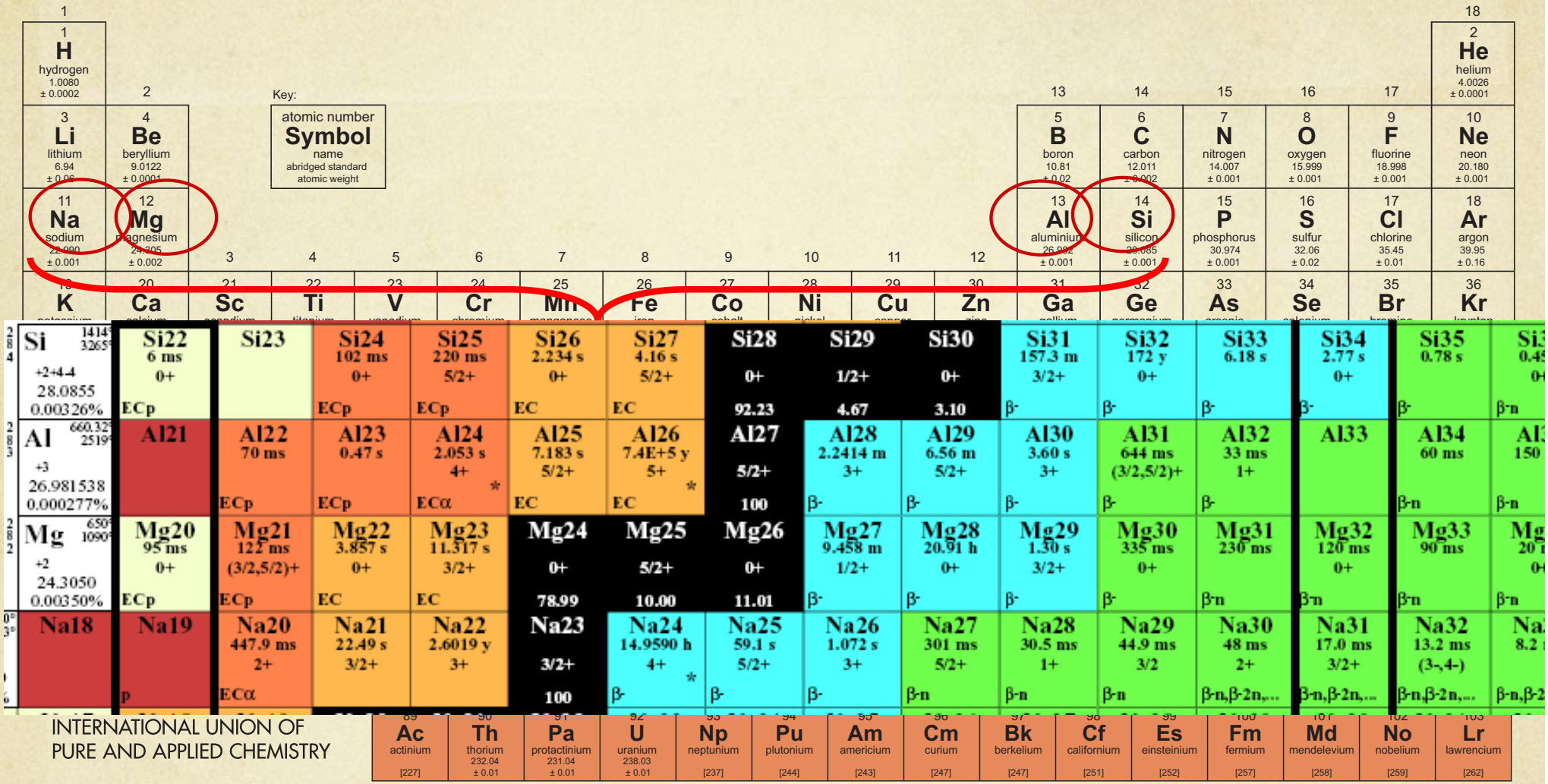
INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY

57 **La** lanthanum 138.91 ± 0.01	58 **Ce** cerium 140.12 ± 0.01	59 **Pr** praseodymium 140.91 ± 0.01	60 **Nd** neodymium 144.24 ± 0.01	61 **Pm** promethium [145]	62 **Sm** samarium 150.36 ± 0.02	63 **Eu** europium 151.96 ± 0.01	64 **Gd** gadolinium 157.25 ± 0.03	65 **Tb** terbium 158.93 ± 0.01	66 **Dy** dysprosium 162.50 ± 0.01	67 **Ho** holmium 164.93 ± 0.01	68 **Er** erbium 167.26 ± 0.01	69 **Tm** thulium 168.93 ± 0.01	70 **Yb** ytterbium 173.05 ± 0.02	71 **Lu** lutetium 174.97 ± 0.01
89 **Ac** actinium [227]	90 **Th** thorium 232.04 ± 0.01	91 **Pa** protactinium 231.04 ± 0.01	92 **U** uranium 238.03 ± 0.01	93 **Np** neptunium [237]	94 **Pu** plutonium [244]	95 **Am** americium [243]	96 **Cm** curium [247]	97 **Bk** berkelium [247]	98 **Cf** californium [251]	99 **Es** einsteinium [252]	100 **Fm** fermium [257]	101 **Md** mendelevium [258]	102 **No** nobelium [259]	103 **Lr** lawrencium [262]

For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 4 May 2022.
Copyright © 2022 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

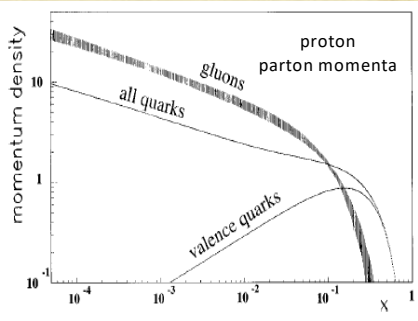
..sortiert nach den Elektronen-Eigenschaften der Atomhülle – diese bestimmen die chemischen Eigenschaften

Die Vielfalt der Atomkerne

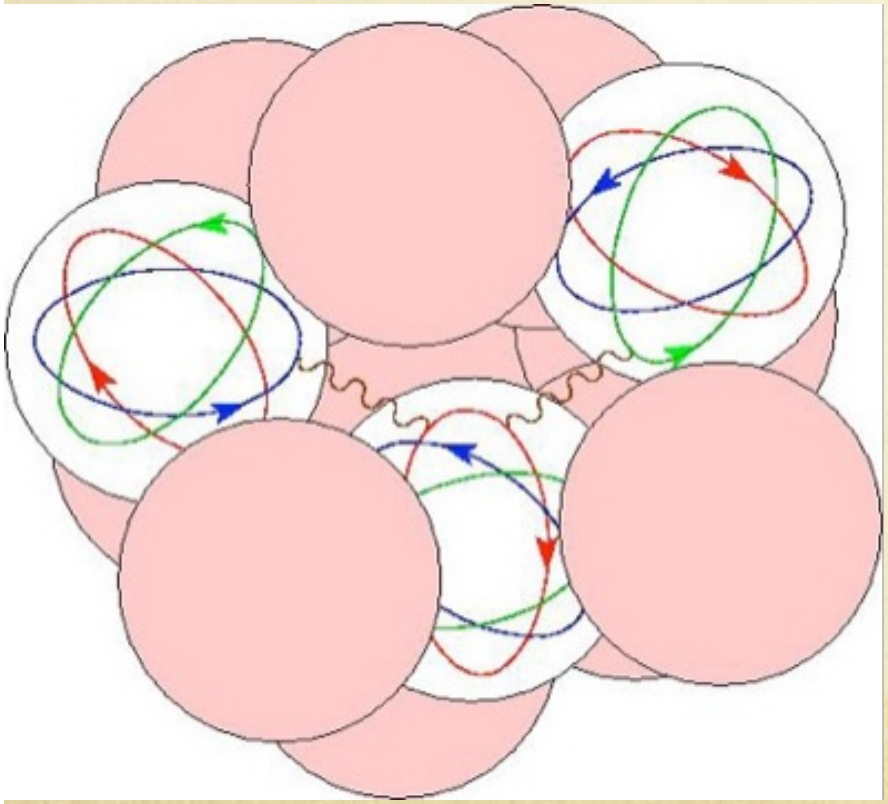


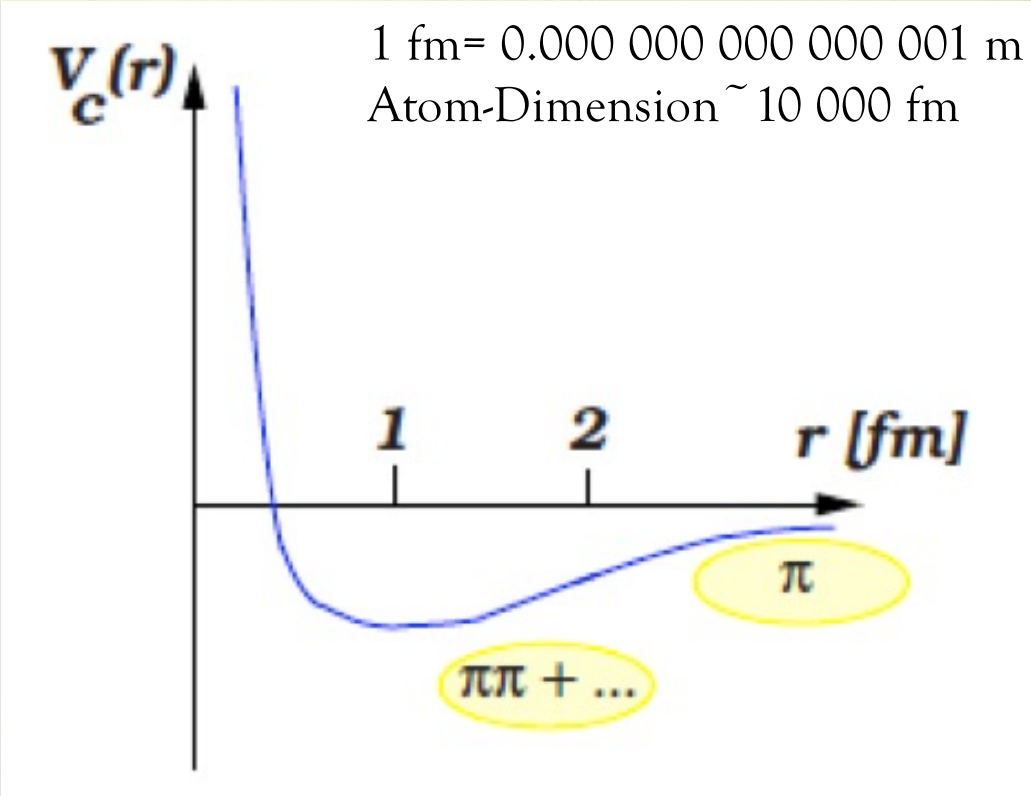
Das "Innere" der Atomkerne: die Nukleonen

- Nukleonen = komplexe Vielteilchen-Systeme
- Starke Kernkraft → Bindung zwischen Nukleonen
- Schwache Kernkraft → Umwandlung n←→ p



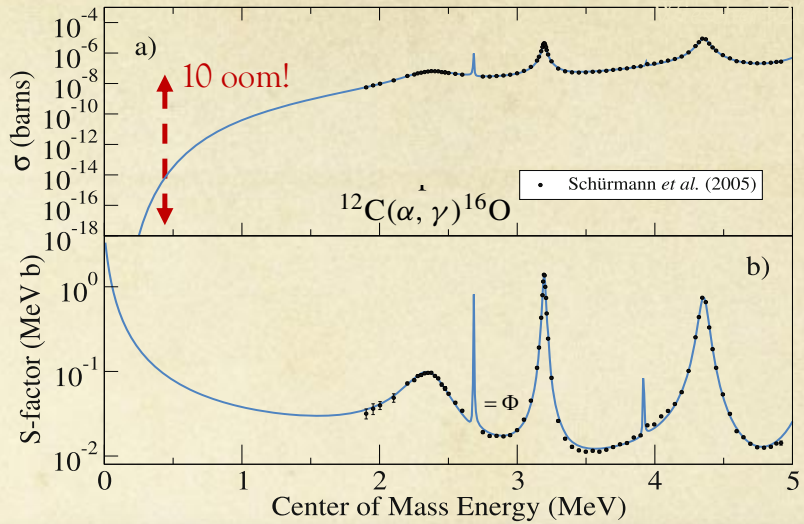
→ χEFT

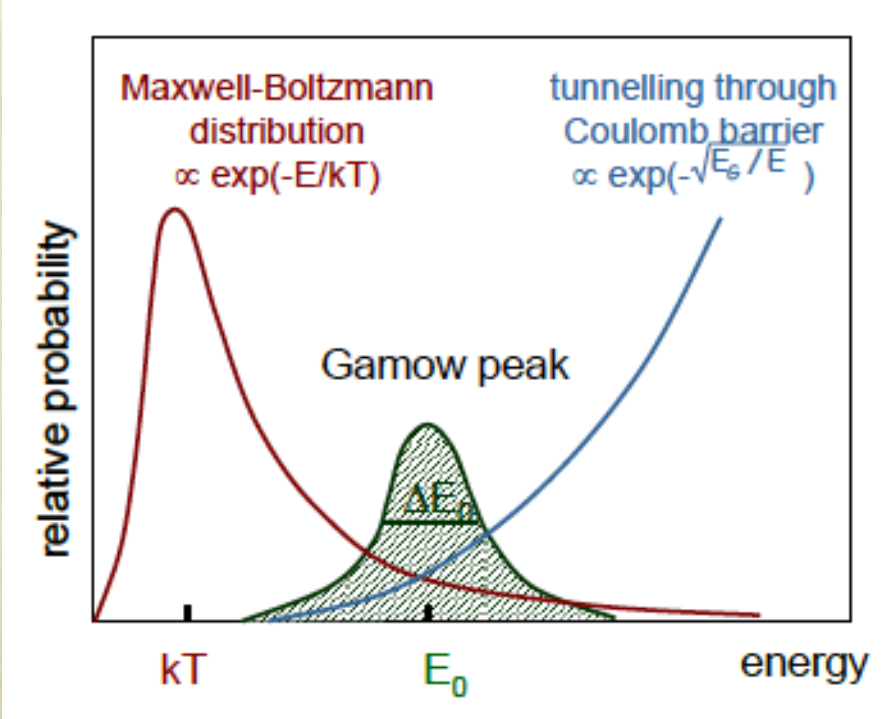




Kernreaktionen in kosmischer Umgebung

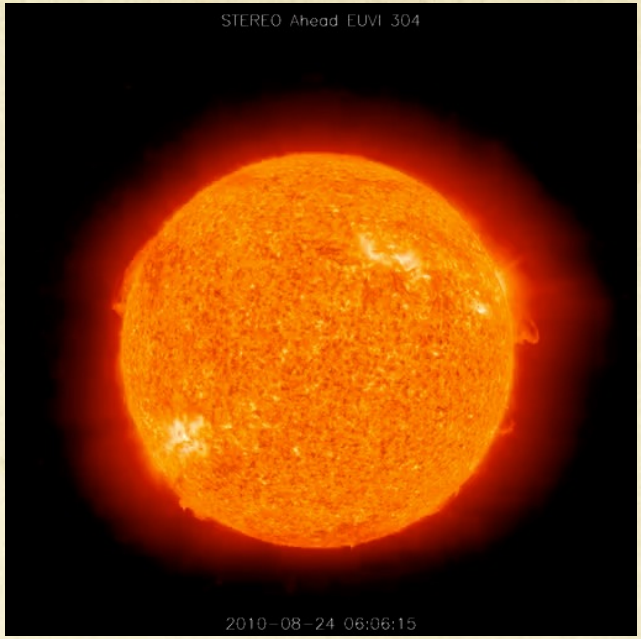
- Plasma im Universum ist
  - zusammengesetzt aus unterschiedlichen Teilchensorten
  - hat eine thermische (=breite) Verteilung der Energien
- Teilchenenergien liegen weit unter der Coulomb-Schwelle
  - Quanten-Tunnel-Effekt dominiert kosmische Reaktionen
  - diese sind sehr selten
- Produkt der Maxwell-Boltzmann Energieverteilung mit dem exponentiellen Tunneln
  → Gamov Peak relevanter Energien
- 'S-Faktor' spiegelt die Kernkraft-Anteile wieder
  (Herausrechnen der Coulomb-Wirkungen)





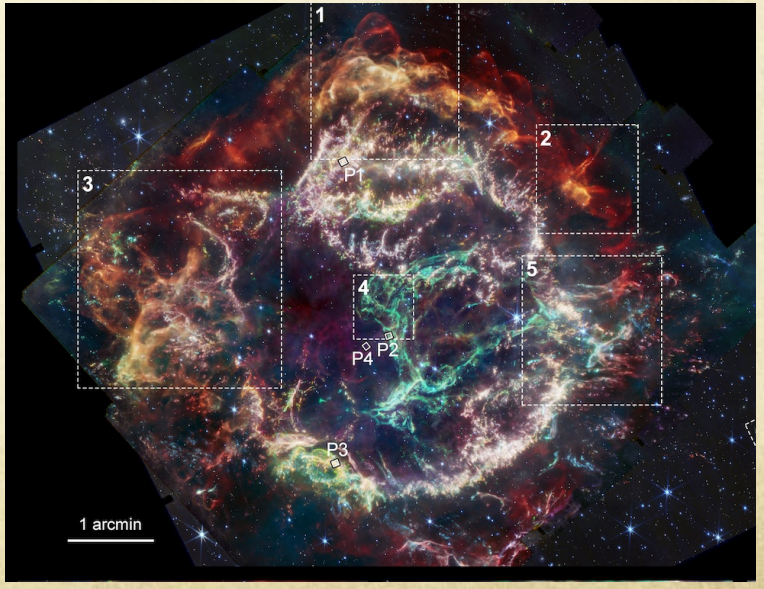
Was wissen wir über Nukleosynthese-Quellen?

- Sterne fusionieren Atomkerne in ihrem Innern



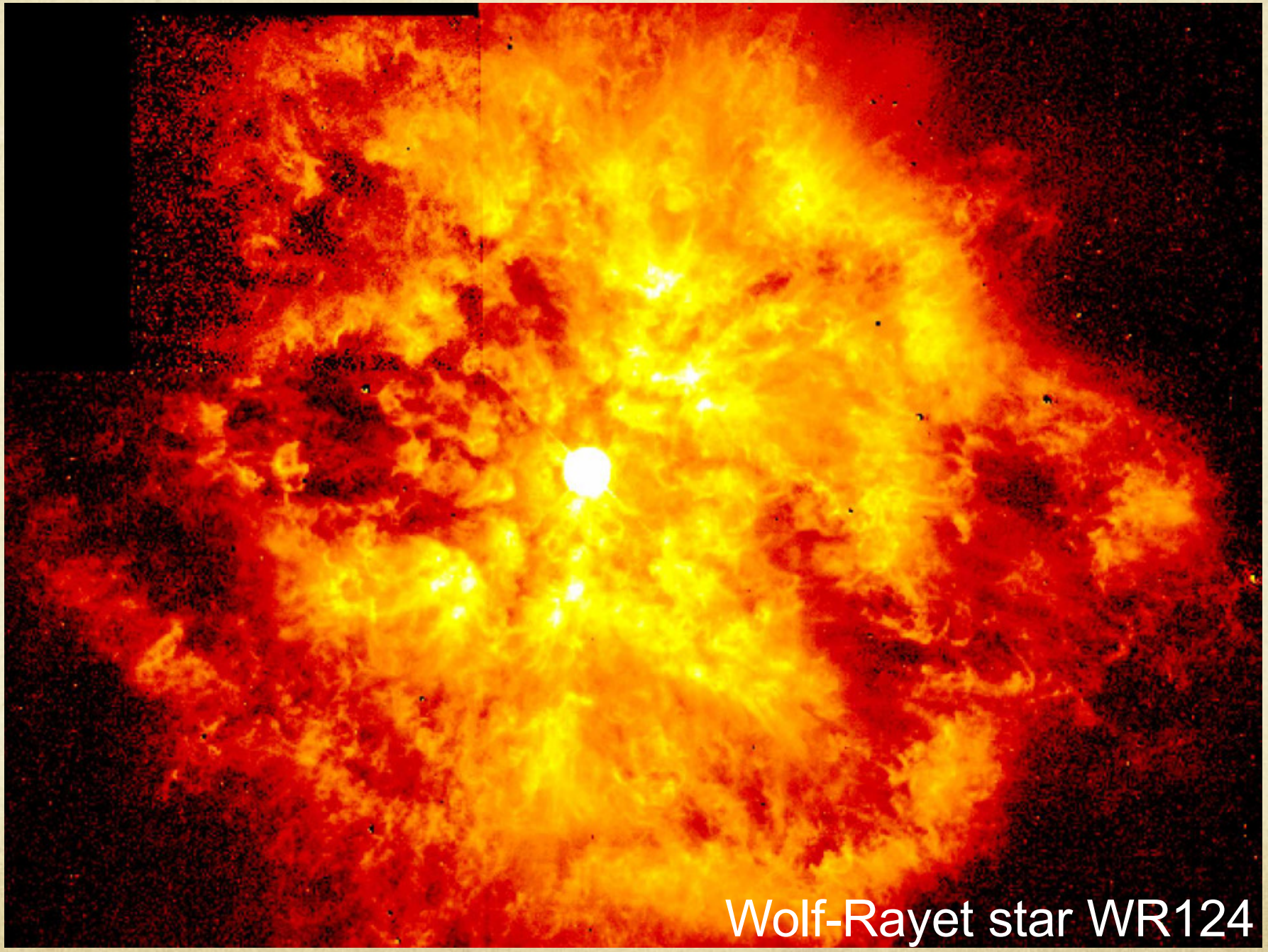
unsere Sonne

- Stern-Explosionen erreichen auch Fusionsbedingungen

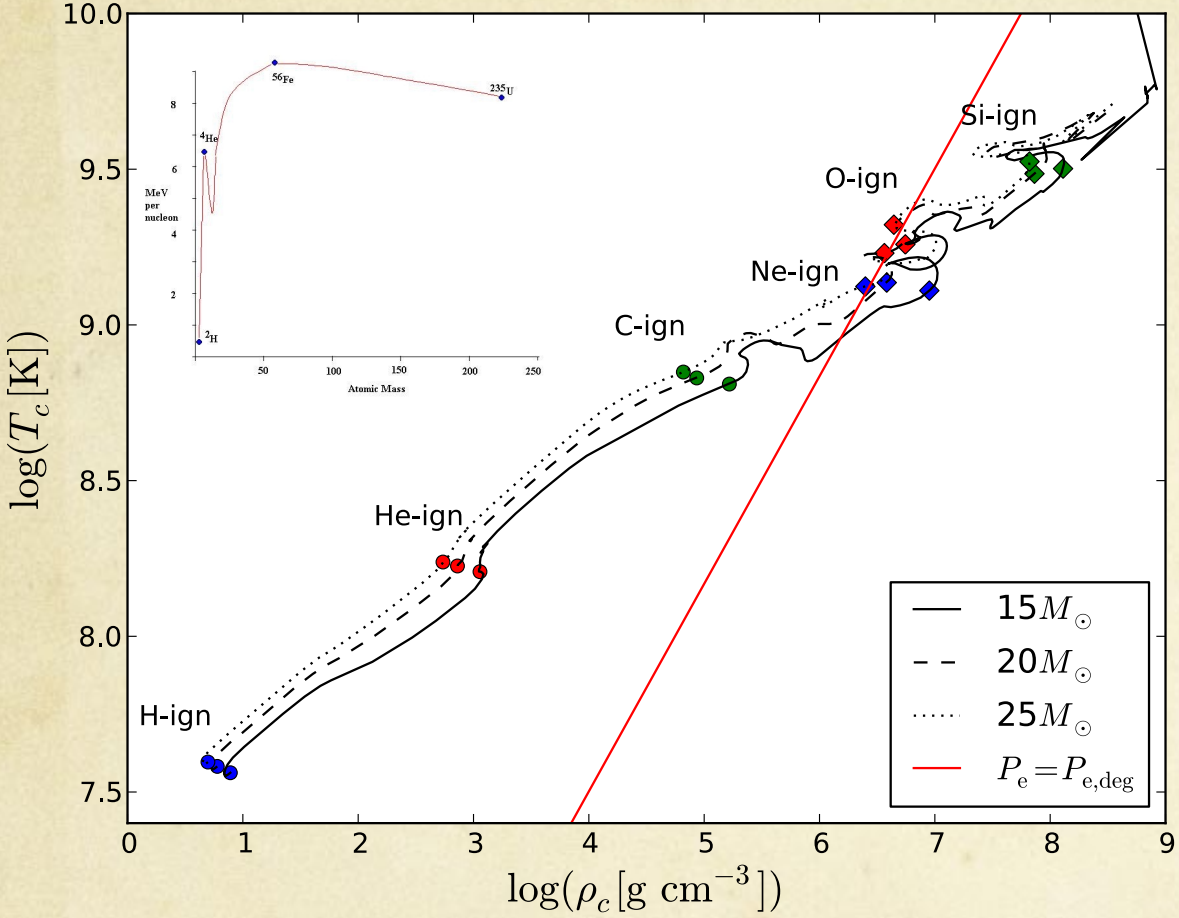


der Cas A Supernova-Überrest

Sterne: Ein massereicher Stern



Was ist ein (massereicher) Stern?



Sterne sind gravitativ zusammengehaltene Kernreaktoren

Gravitation hält Sternengas zusammen

Kernfusion setzt Bindungsenergie der Nukleonen frei

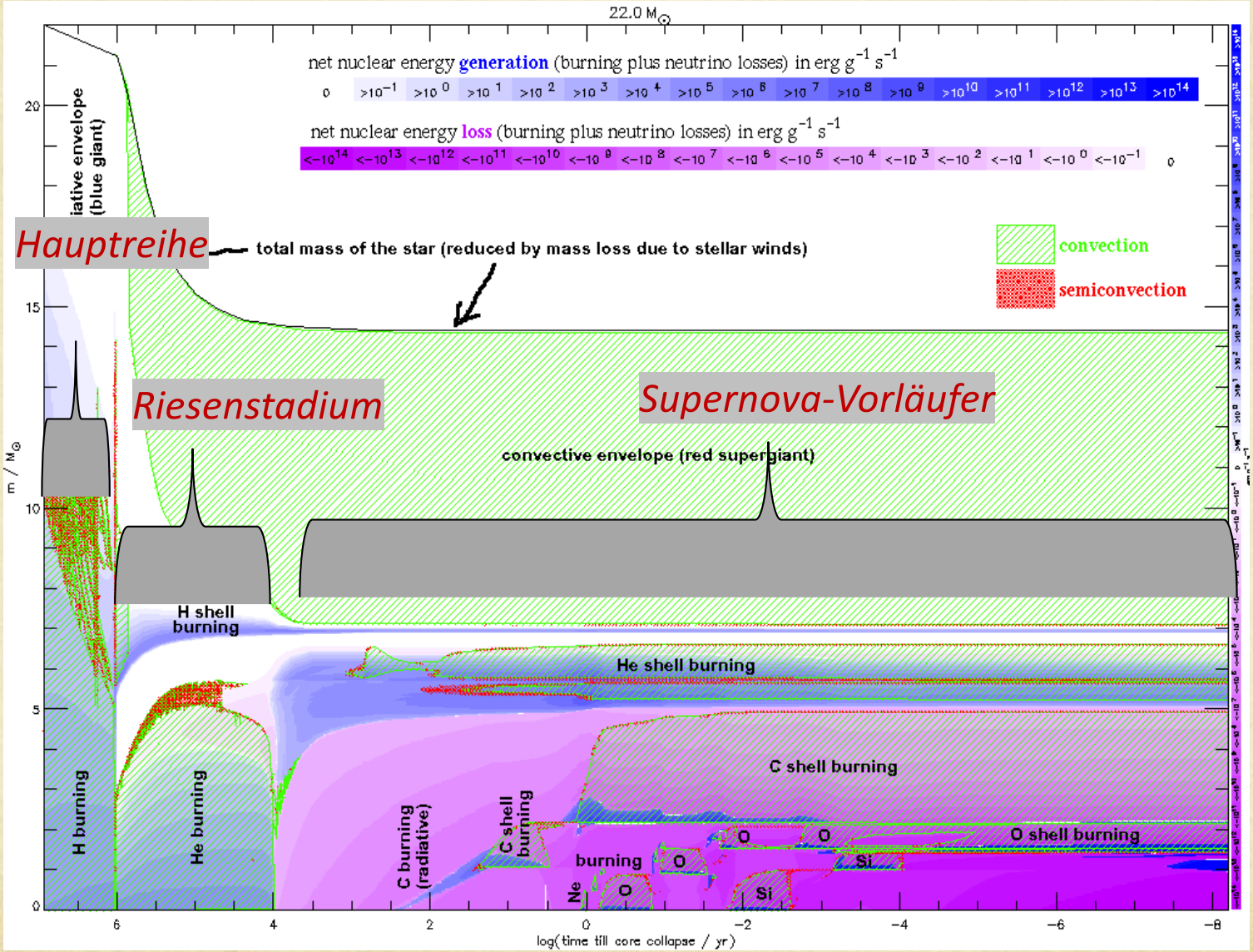
Diese Energie wirkt der Schwerkraft entgegen: statt Kollaps ein lange Zeit stabiles Gleichgewicht

Wenn ein Brennstoff zur Neige geht erfolgt Kollaps bis es heiss genug für die nächste Fusionsreaktion ist

courtesy SEWoosley

Stern-Struktur und ihre Entwicklung, im Detail...

Radius (relative Masse [Sonnen-Massen])

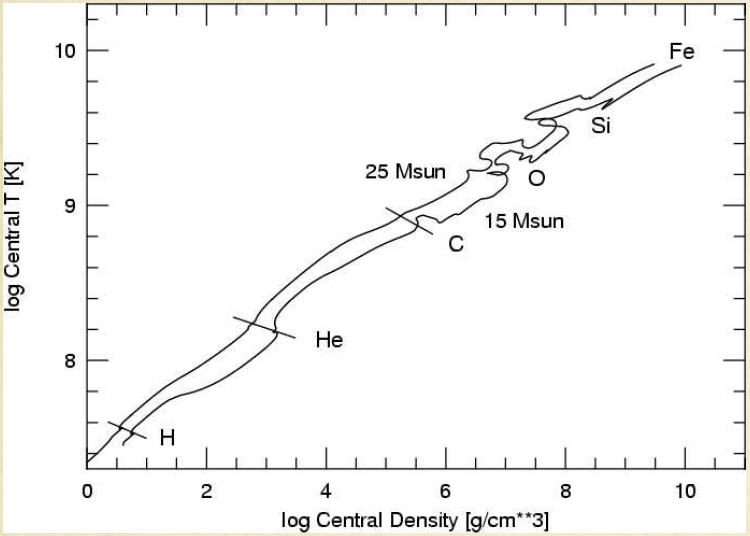


log(Zeit)[Jahre]

Das "Kippenhahn Diagramm"

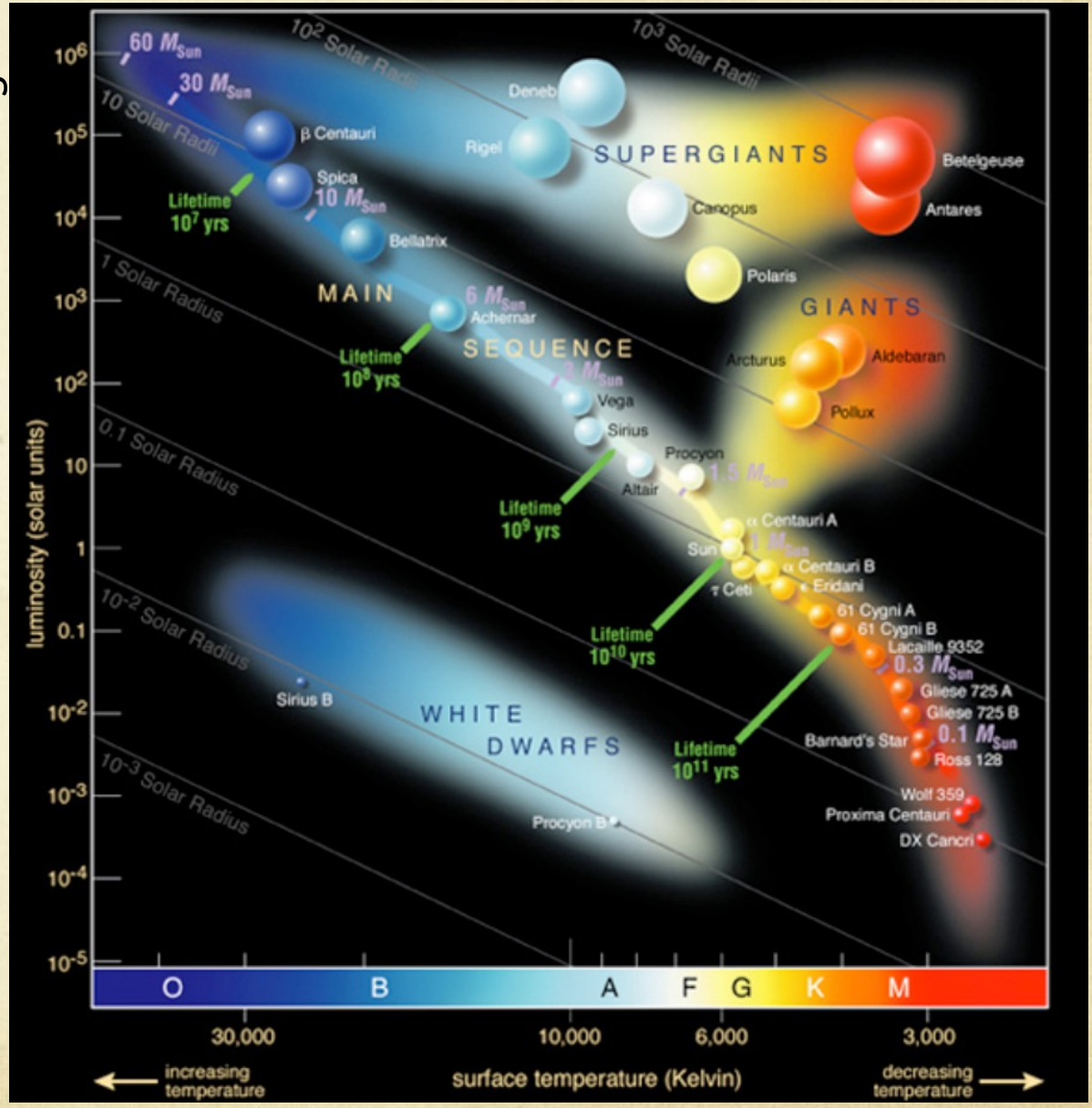
Erinnerung: die Vielfalt der Sterne

- Stern-Entwicklung hängt von der Sternmasse ab:
  - rasch für massereiche, langsam für massearme Sterne



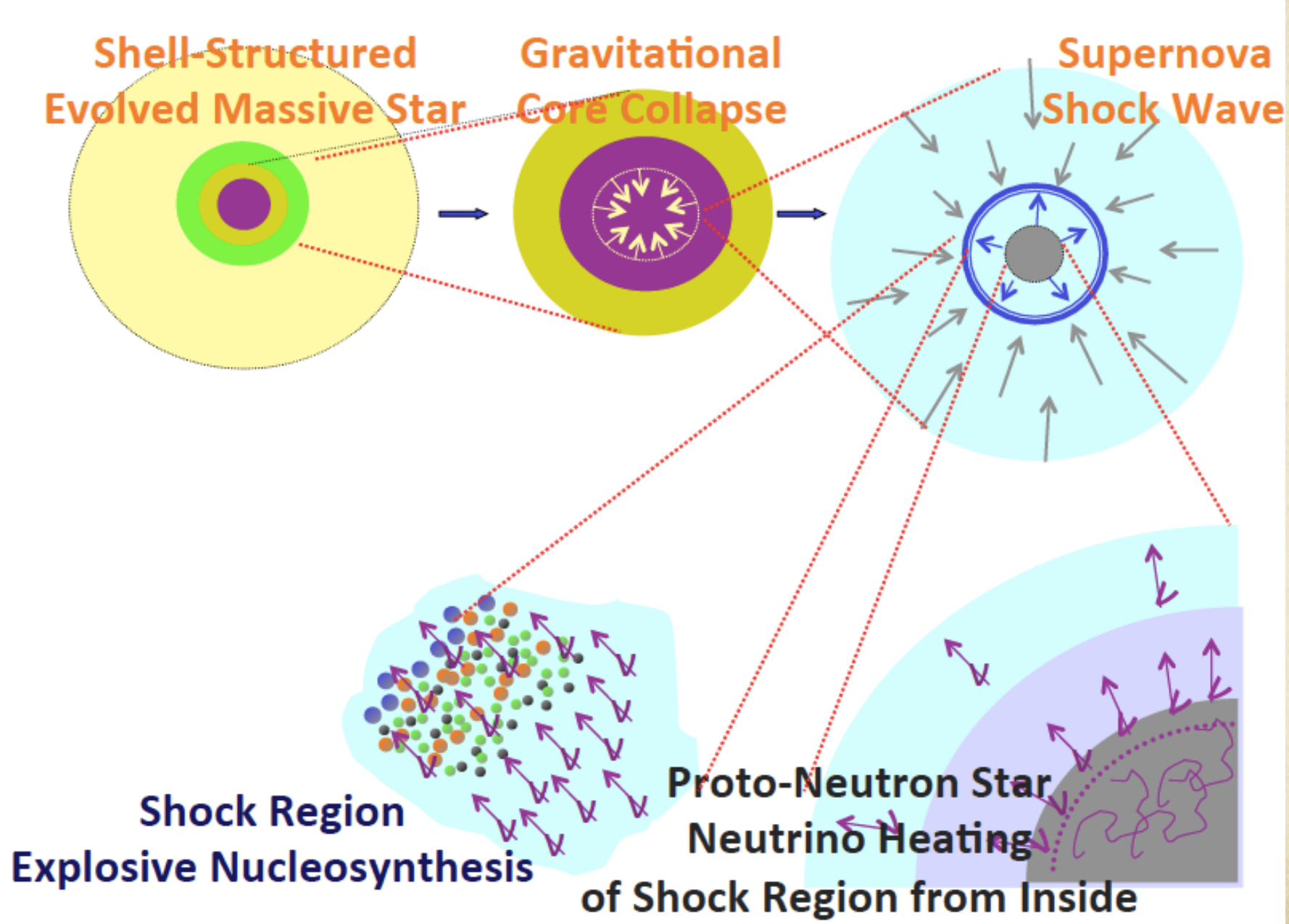
  - Hauptreihe (H)
  - Riesensterne (He)
  - kompakte Reststerne

Helligkeit

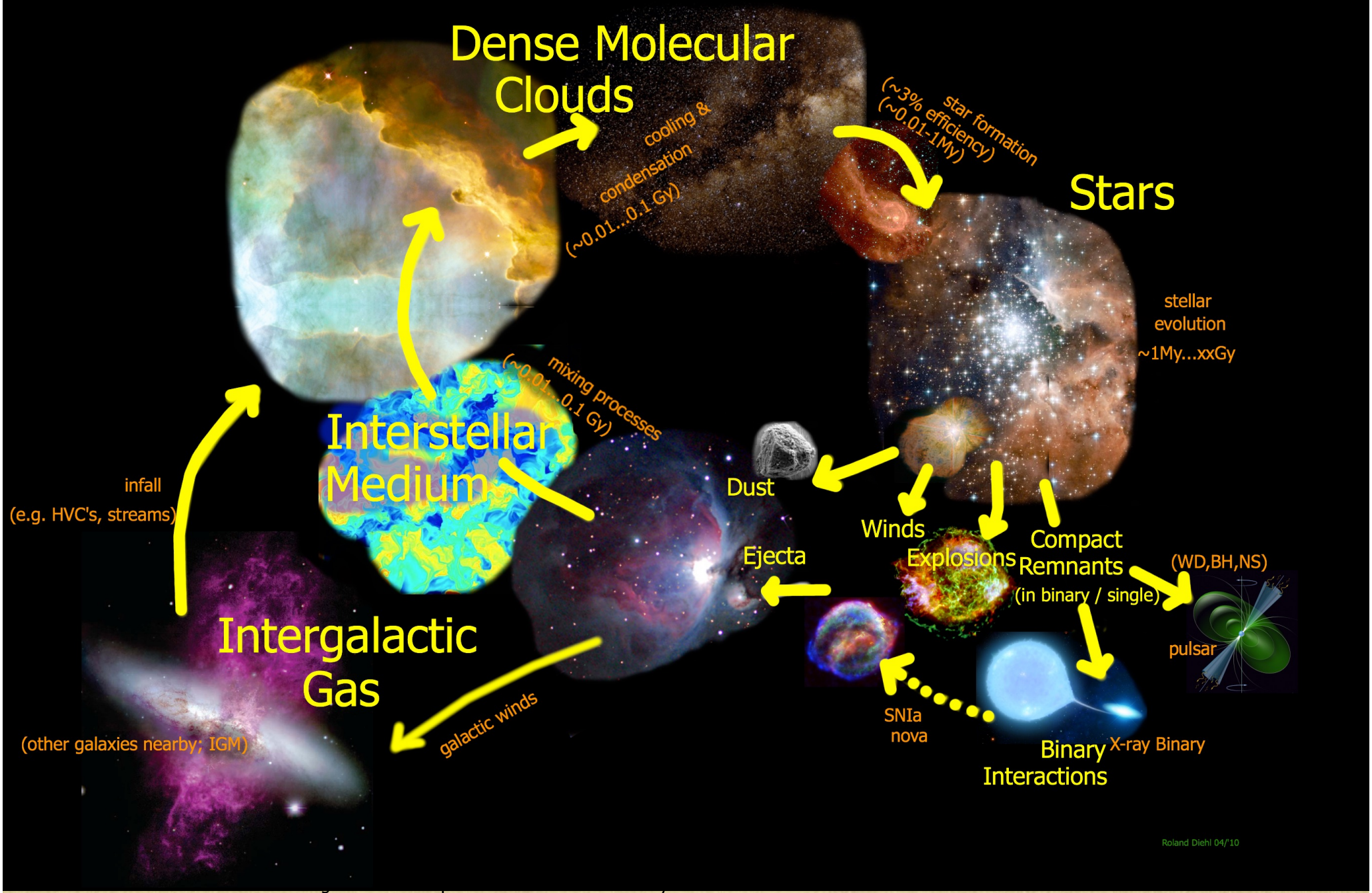


Farbe

Gravitativer Kollaps und Supernova



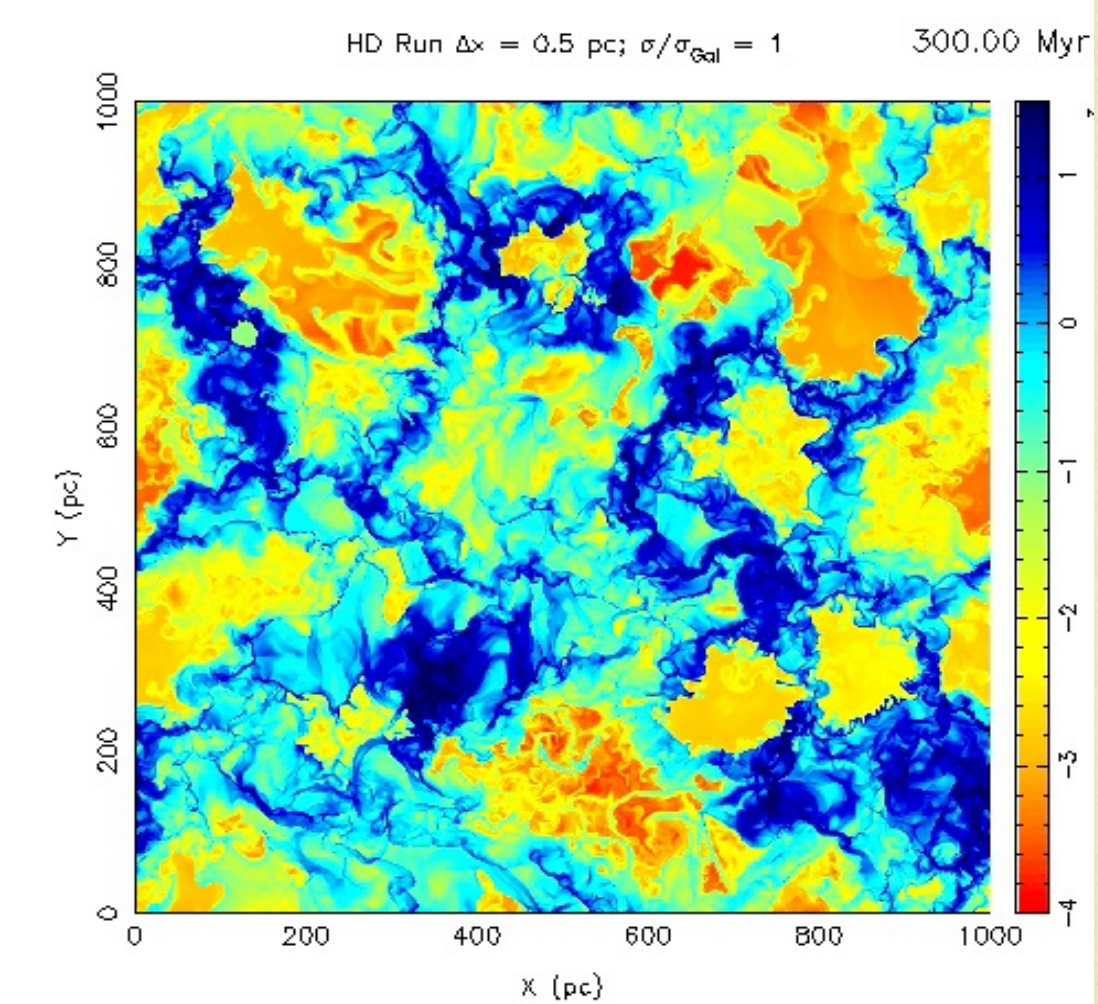
Der kosmische Materie-Kreislauf: Stern-Generationen



Das dynamische interstellare Medium

- 100 Million Jahre in 30 sec -

- Sterne entstehen, ihre Winde und Explosionen hinterlassen deutliche Spuren
- Simulationen erhellen diese inhärent komplexen Vorgänge



courtesy Miguel deAvillez

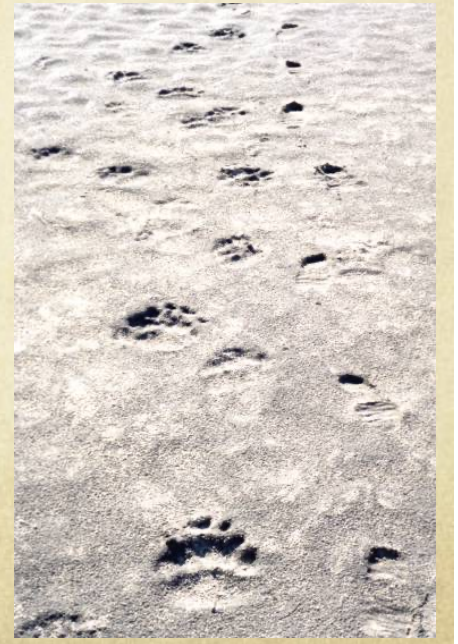
100 Mj, 1 kpc Volumen, MHD Simulation der Gasdynamik, mit Sternbildung und Supernova-Explosionen

…astrophysikalische Forschung…

- Die "Natur" ist unfaßbar vielfältig.
  Wir sind neugierig auf "Gesetzmäßigkeiten" der Natur

- Im Forschen wenden wir Methoden an, die uns systematisches, gut kommunizierbares, gemeinsames Lernen erleichtern,
  und reflexives (statt habituelles) Denken praktizieren.

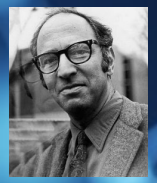
☆ Unsere Situation in der Astrophysik ist etwa so:
"Wir versuchen, aus dem, was wir am Strand finden, etwas über das Geschehen in den Tiefen des Ozeans herauszufinden …"
(→ Spuren-Leser)



Forschung: Methodisches

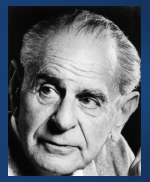
Wie arbeiten wir richtig, im Sinn von "wissenschaftlich"?

Wo steht "nukleare Astrophysik" hierbei?



Thomas Kuhn (1922-1996):

"Wissenschaft besteht aus routinemäßigem Arbeiten an Details eines Themas ('normal'), und aus großen Veränderungen die eine Frage / ein Feld in neuem Licht erscheinen lassen (Paradigmen-Verschiebungen). Beides ist 'Wissenschaft'. Die wissenschaftliche Gemeinschaft findet einen Konsens, denn es gibt keine objektiven Kriterien. "

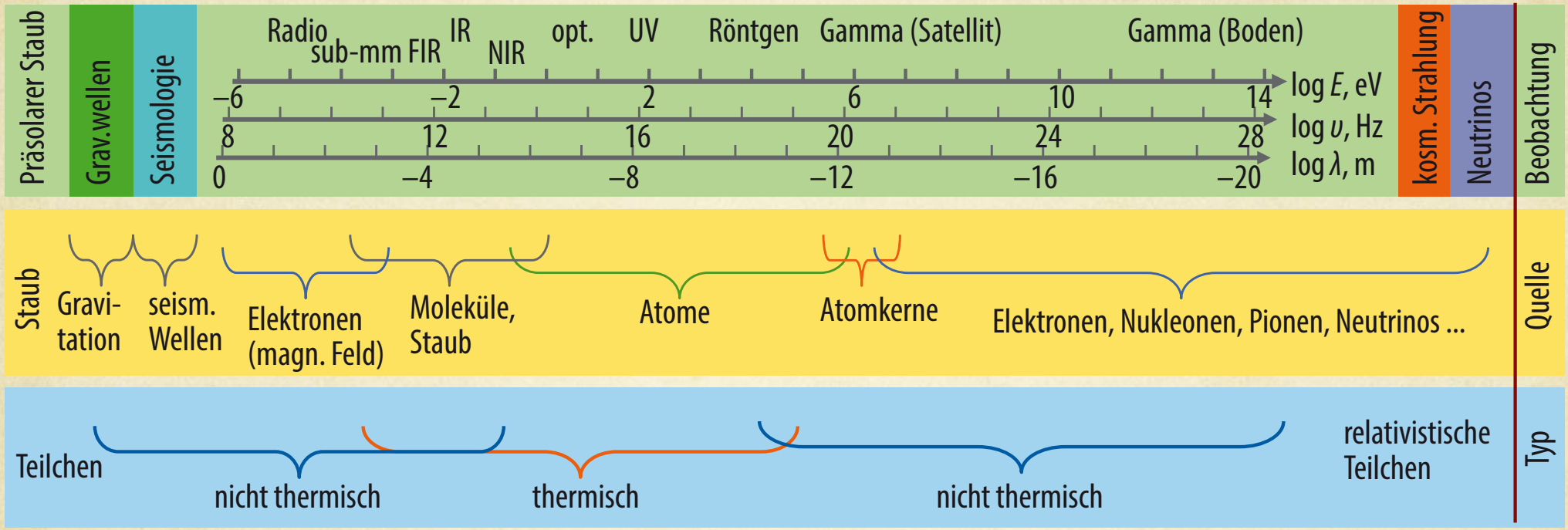


- Karl Popper (1902-1994):

"Eine wissenschatliche Theorie muss Mindest-Anforderungen erfüllen um als 'wissenschaftlich' anerkannt zu sein: Klar formuliert inklusive Voraussetzungen, Grenzen, und Vorhersagen, und sie muss durch Tests falsifizierbar sein. Nur das Befassen mit solchen Theorien und ihrer Tests gilt als 'wissenschaftliches Arbeiten'. "

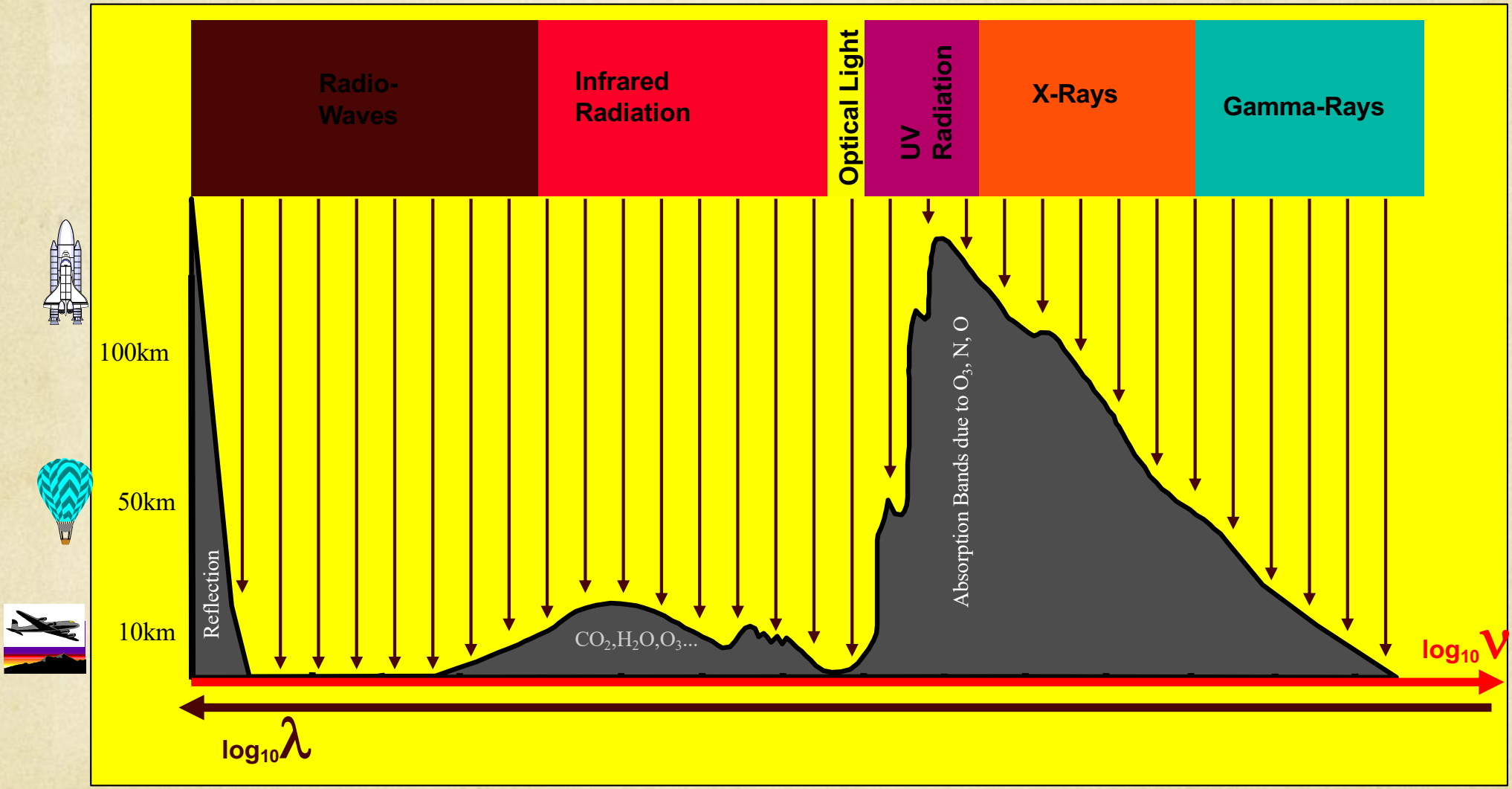
- Was meinen Sie ??

Astronomische Boten



- Für kosmische Kernreaktionen:
  Elektromagnetische Strahlung (γ), Materieproben, neue Astronomien, klassische Astronomie/Spektroskopie

Astronomische Beobachtungs-Fenster im e.m. Spektrum



Astronomische Instrumente