

Was mich wirklich interessiert ist, ob Gott
eine Wahl hatte als er die Welt erschuf.

Albert Einstein

Von der Planckskala bis zum Horizont des Alls - die Größenordnungen im Universum

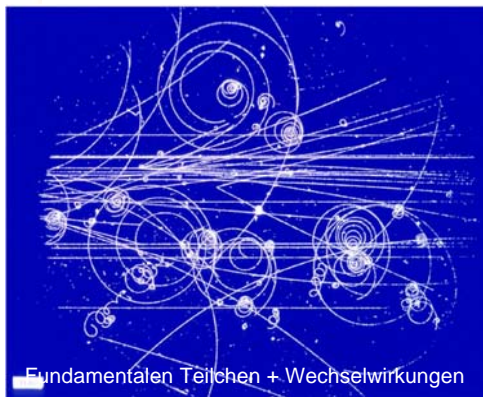
Thomas Nattermann
Universität zu Köln

„Das Weltbild der Physik“ unter:
<http://www.thp.uni-koeln.de/~ang/tn>

Das Weltbild der modernen Physik



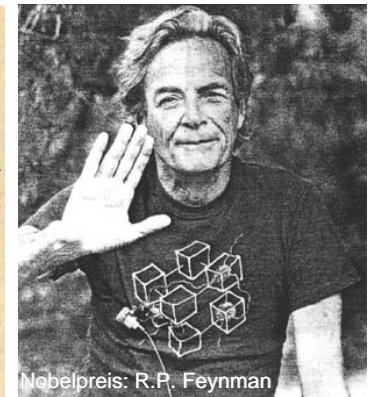
Krebsnebel: Rosetta-Stein der Astronomie



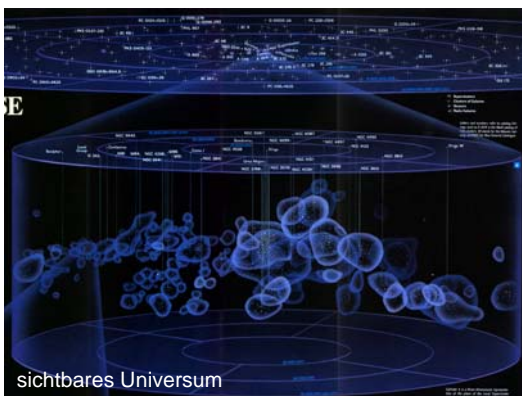
Elementarpartikeln + Wechselwirkungen



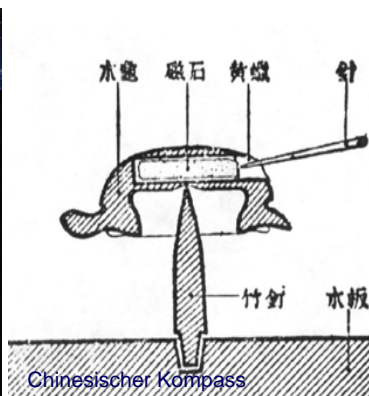
Warum hat die Zeit eine Richtung?



Nobelpreis: R.P. Feynman



sichtbares Universum



Chinesischer Kompass

Was mich wirklich interessiert ist, ob Gott eine Wahl hatte als er die Welt erschuf.
Albert Einstein

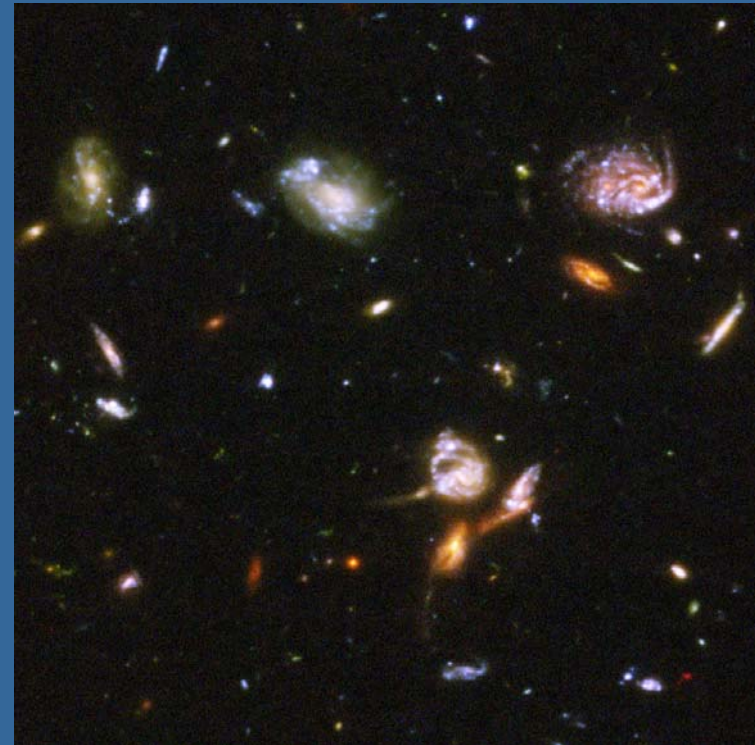
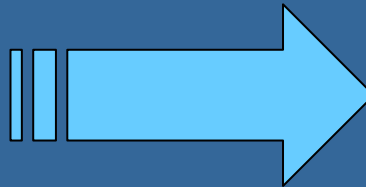
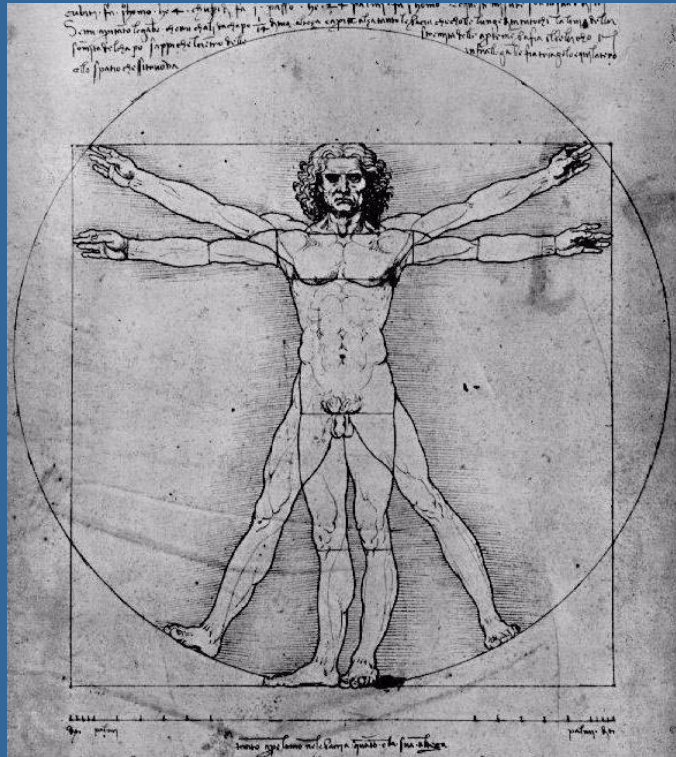
The image shows Raphael's fresco 'The School of Athens' set within a grand, classical architectural space. The scene is filled with numerous figures, including Plato and Aristotle in the center, surrounded by other philosophers. The architecture features a series of arches and columns, creating a sense of depth and grandeur. A white speech bubble with a blue border is overlaid on the left side of the fresco, containing the German text: 'Die Zahl ist die Natur und das Wesen der Dinge!'.

Die Zahl ist die
Natur und das
Wesen der
Dinge!

Größenordnungen im Universum

Wie weit entfernt ist der „Rand“ des Universums?

Ein Zoom über 26 Größenordnungen!





$$1 \text{ m} = 10^0 \text{ m}$$



100 m
= 10^2 m



10 000 m
= 10 km
= 10⁴ m



1 000 000m
= 1000 km
= 10^6 m

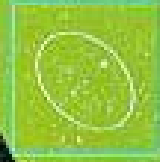
Michigensee

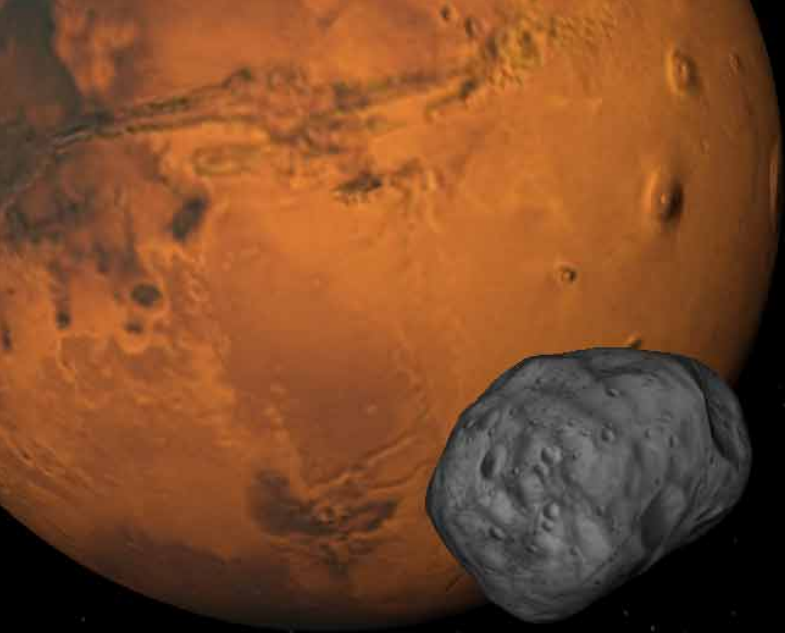


100 000 km
= 10^8 m



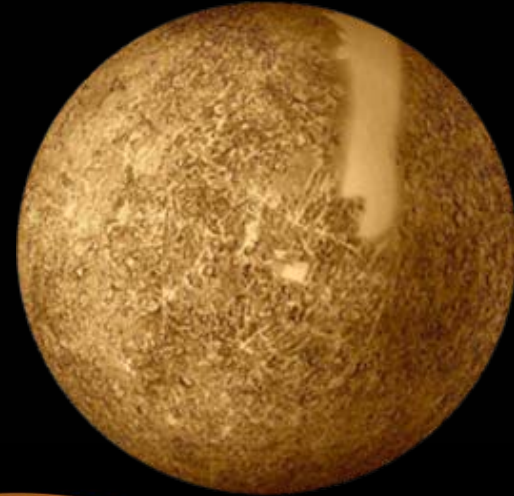
10 000 000 km
= 10^{10} m
(Erd- und
Mondbahn)





Mars

Merkur

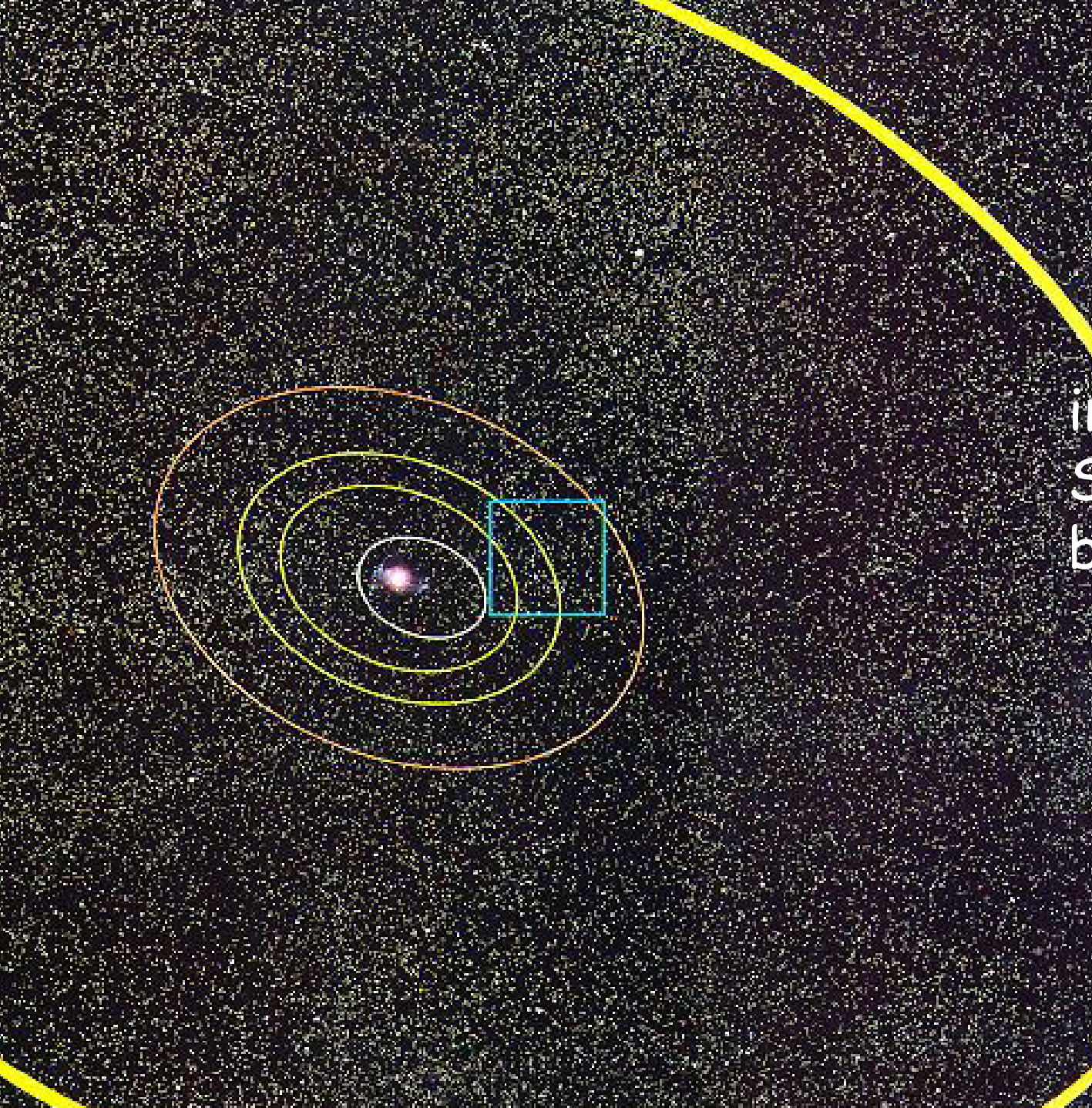


Venus



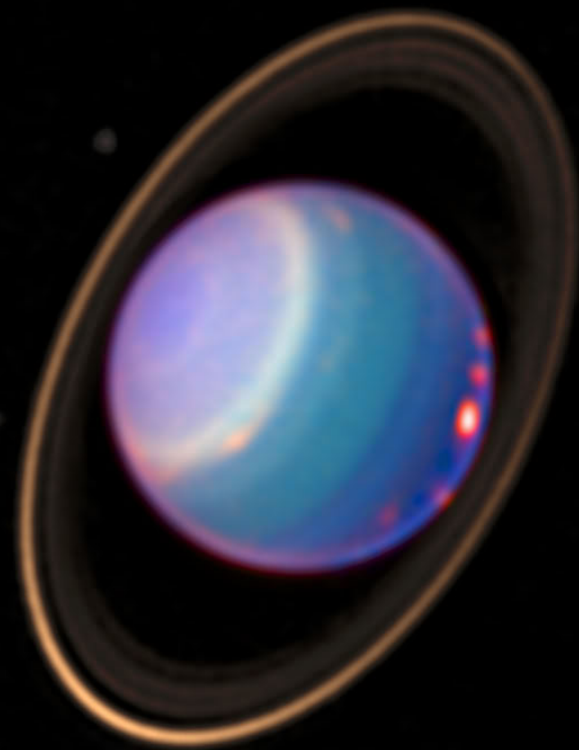
← 20cm →

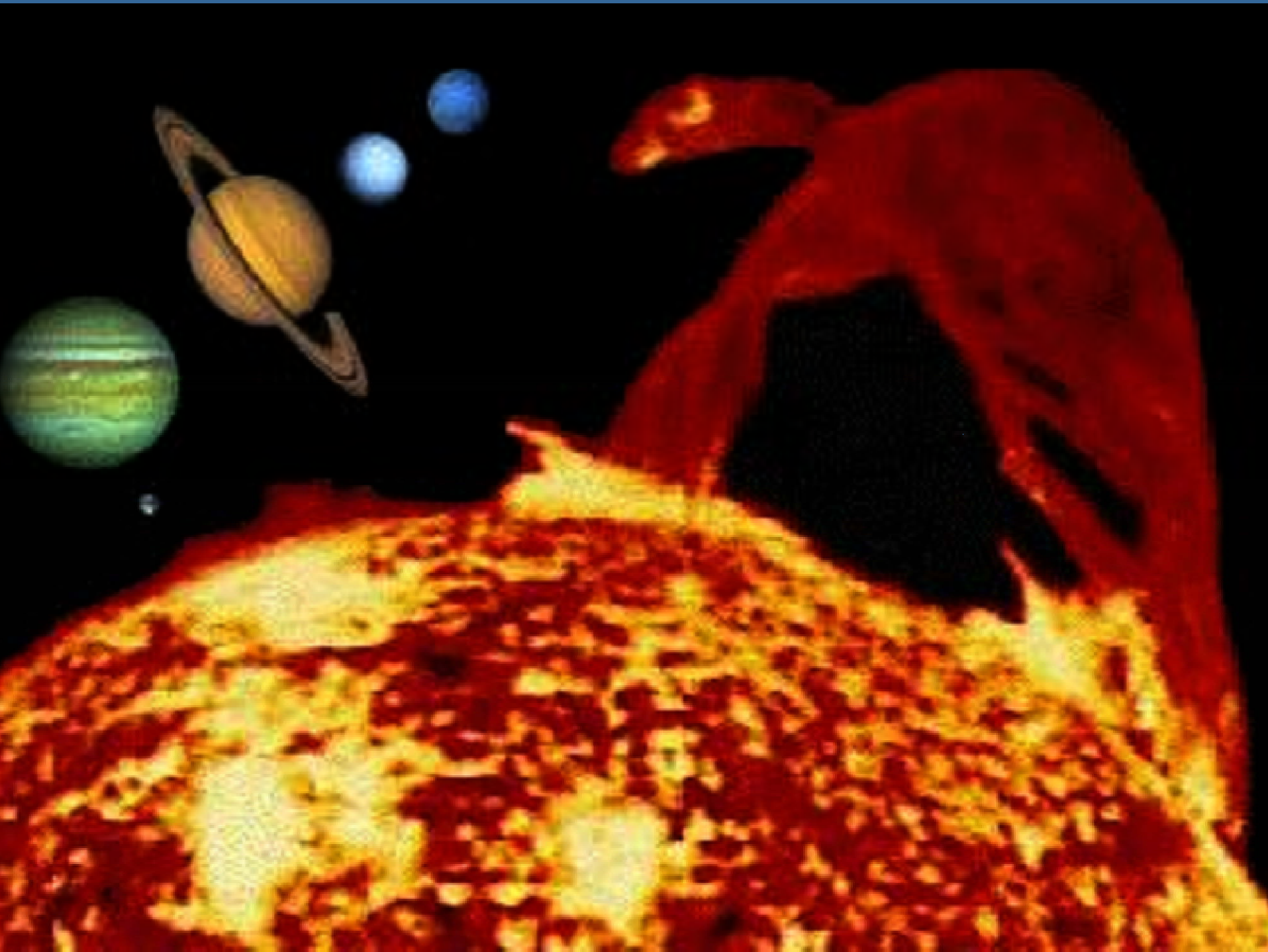




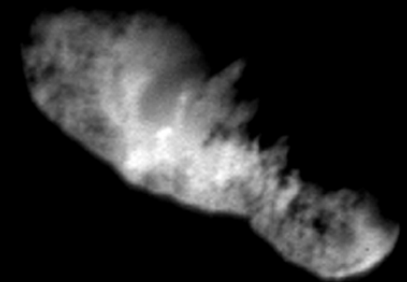
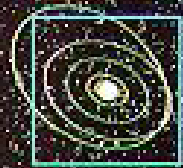
10^{12} m

innere Teil des
Sonnensystems
bis zur
Jupiterbahn

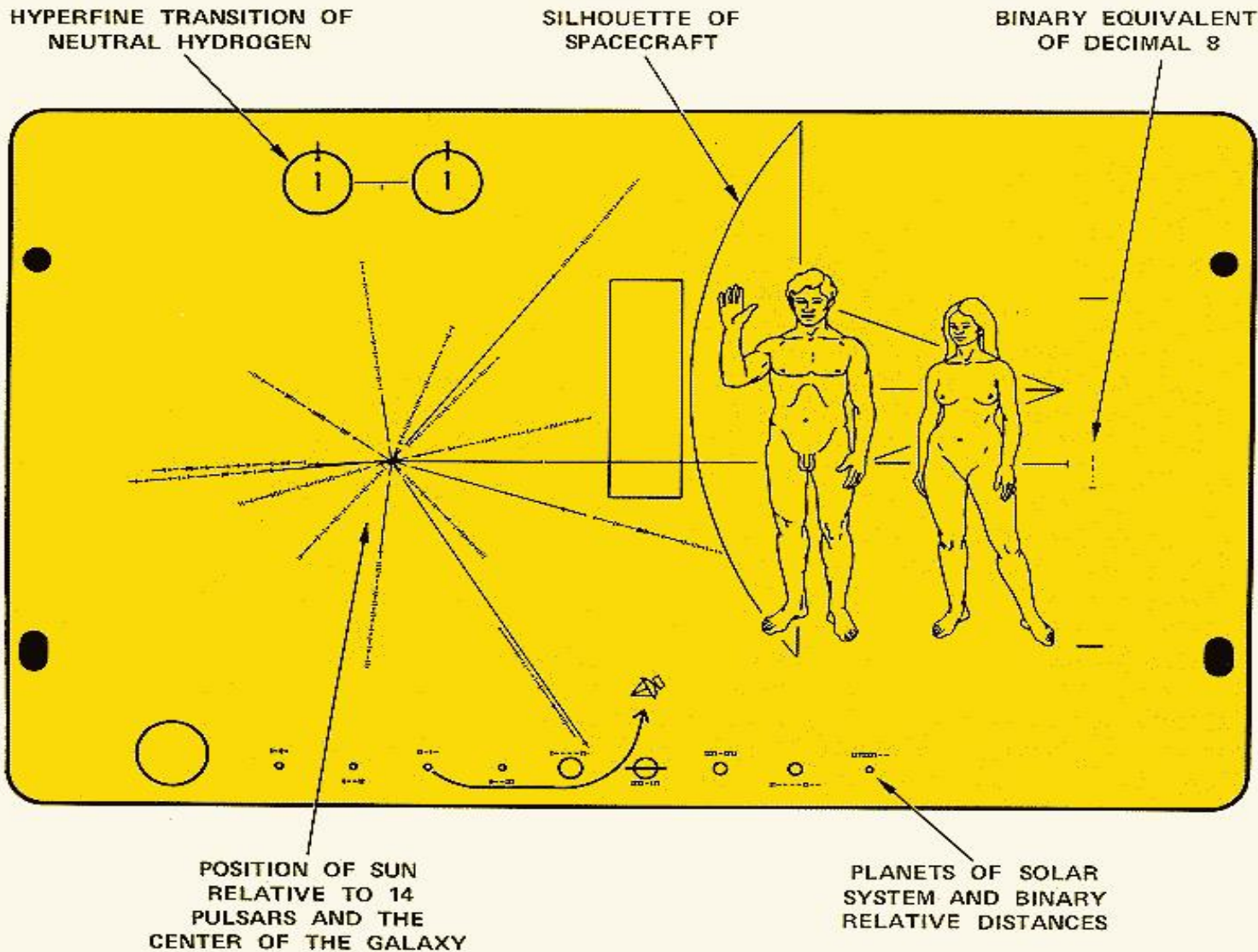




10^{14} m
Der Bereich
der Kometen

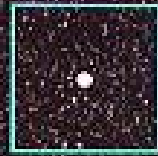


Pioneer 10 Start: 3.3.1972, letzte Nachricht: 23.1.2003
 Entfernung zur Sonne: 11 Lichtstunden



$10^{16} - 10^{17} \text{ m} \sim$
 $1-10 \text{ Lichtjahre}$

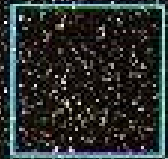
Interstellarer
Raum



Der uns nächste Stern,
Proxima Centauri, ist
 $4 \cdot 10^{16} \text{ m} = 40 \text{ Billionen}$
km entfernt, sein Licht
erreicht uns nach 4,3
Jahren!

10^{18} m =

100 Lichtjahre





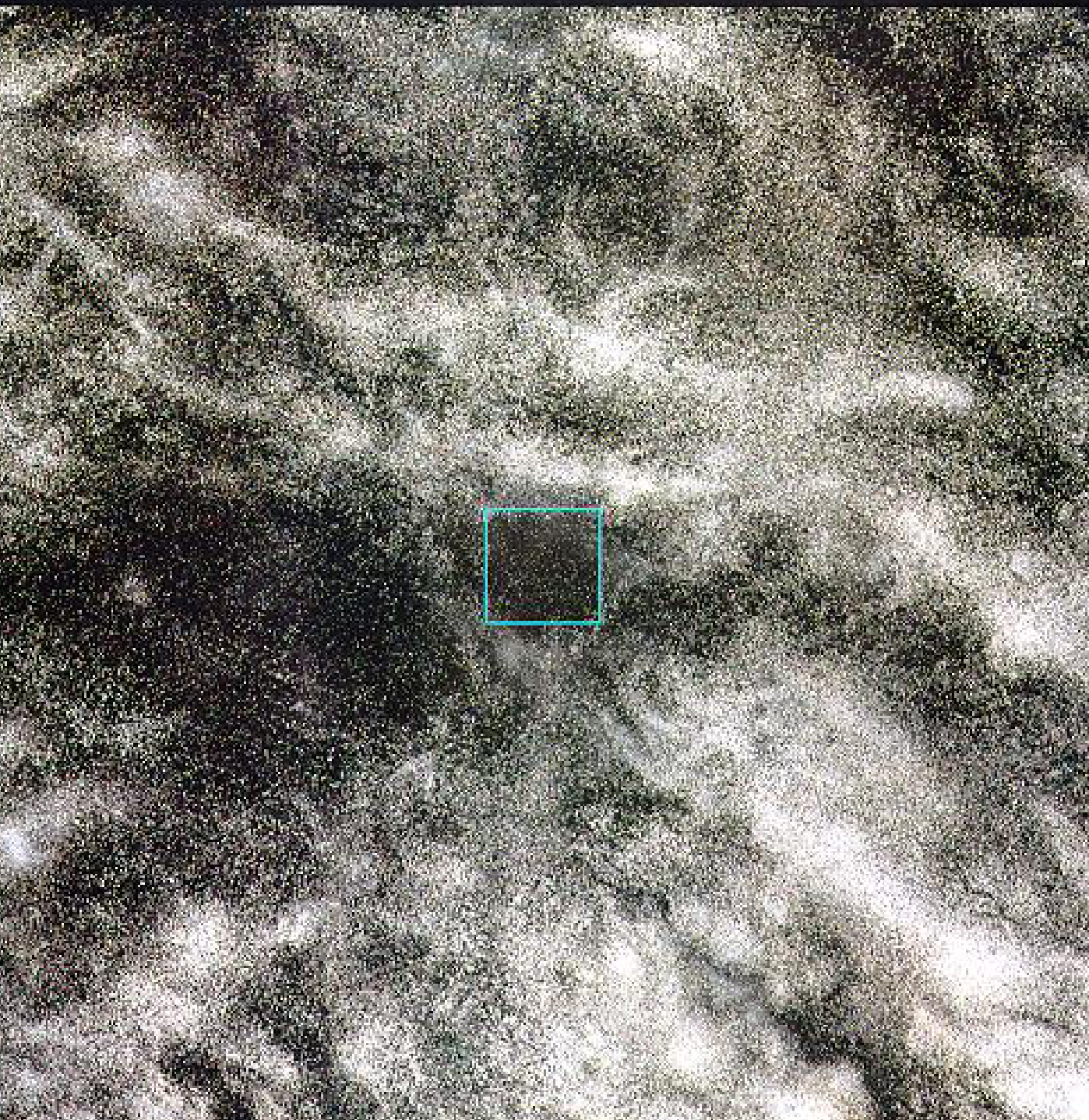
Gasknoten, Reste eines sterbenden Sterns, jeder hat die doppelte Größe unseres Sonnensystems, die Länge beträgt das 1000fache der Distanz Erde-Sonne, die Entfernung zum Sonnensystem beträgt ca 450 Lichtjahre.



Krebsnebel

Im Zentrum befindet sich ein Neutronenster von 15 km Durchmesser, der in einer Sekunde 30mal rotiert, die Entfernung zur Erde beträgt ca. 7000 Lichtjahre.





10^{20} m \sim

10 000

Lichtjahre

Sternwolken
und glühende
Gase

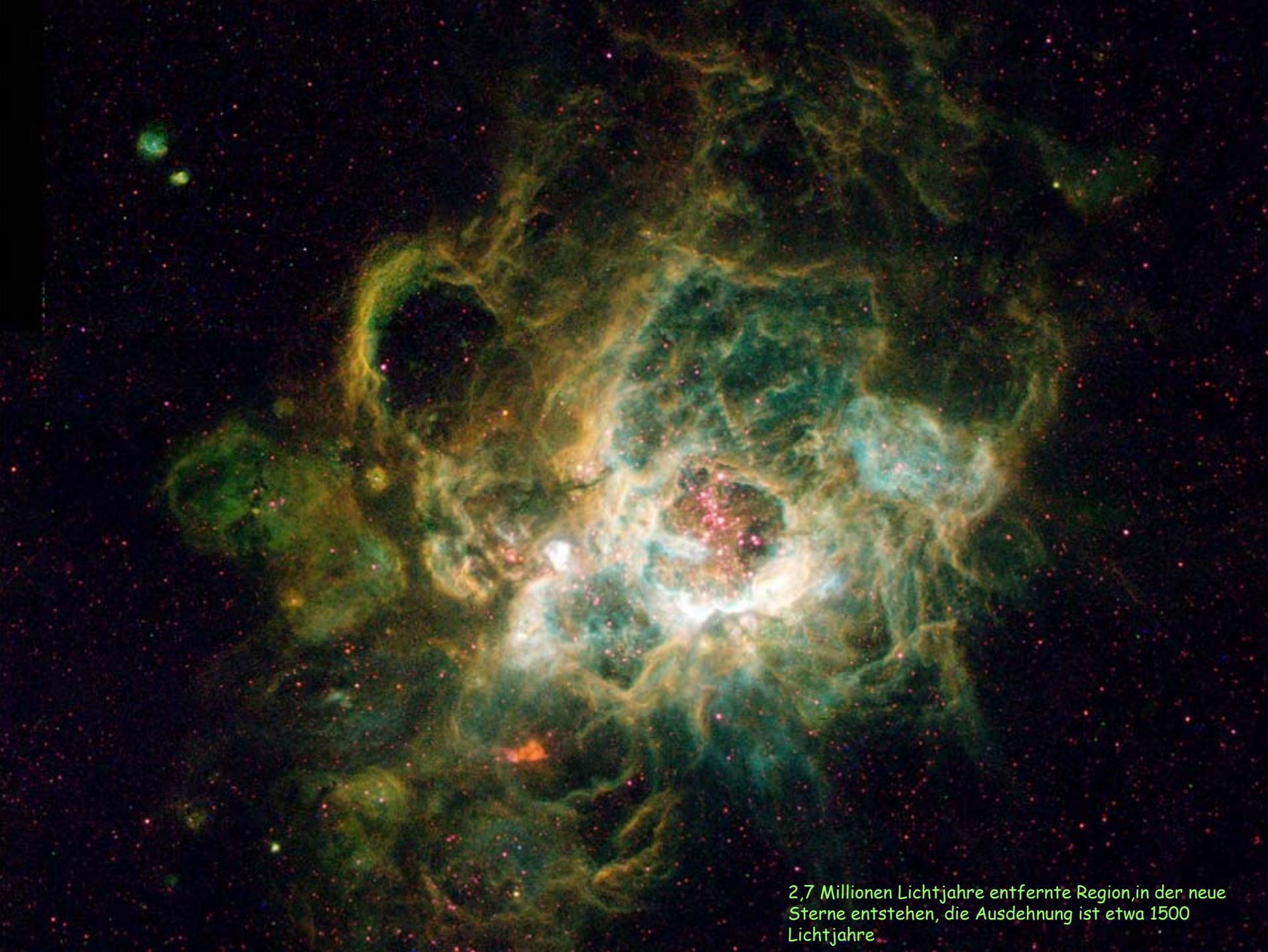




10^{22} m~

10^6 Lichtjahre

Milchstraße
aus der
Entfernung



2,7 Millionen Lichtjahre entfernte Region, in der neue Sterne entstehen, die Ausdehnung ist etwa 1500 Lichtjahre



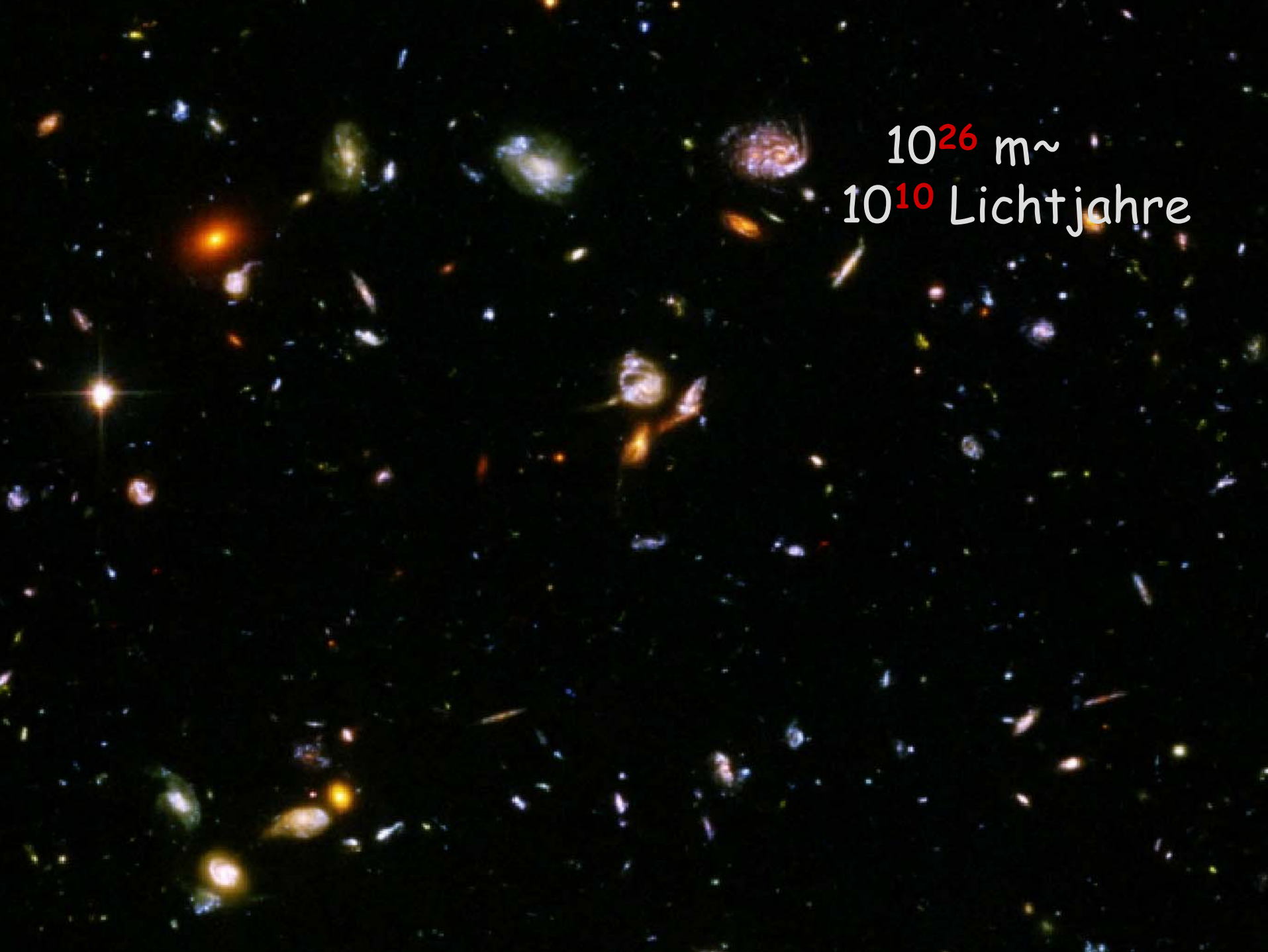
Kollisionen zweier Galaxien, 500 Millionen Lichtjahre entfernt, die Stosswelle dehnt sich mit 200 000 Meilen pro Stunde aus.

10^{24} m~
 10^8 Lichtjahre



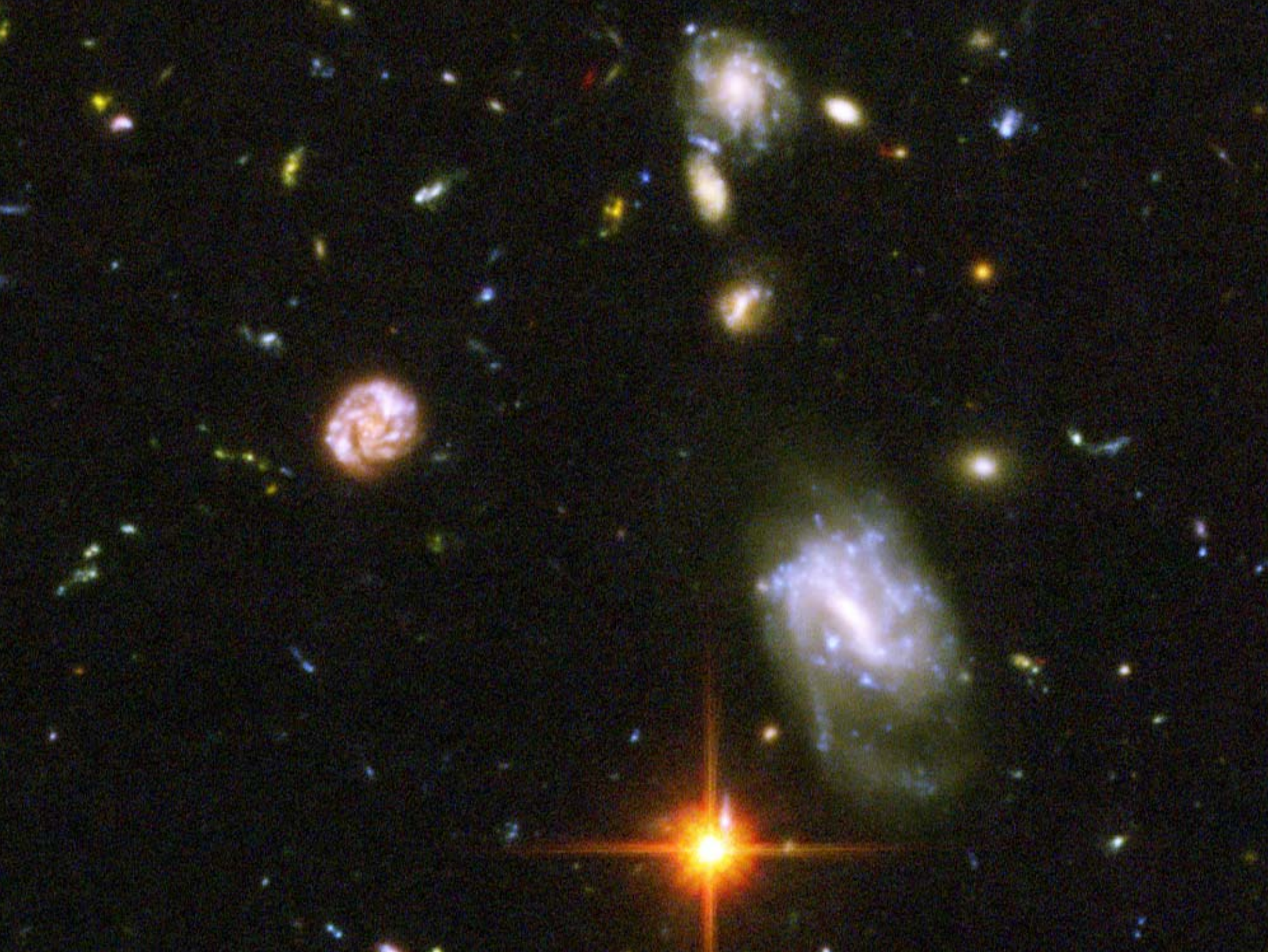


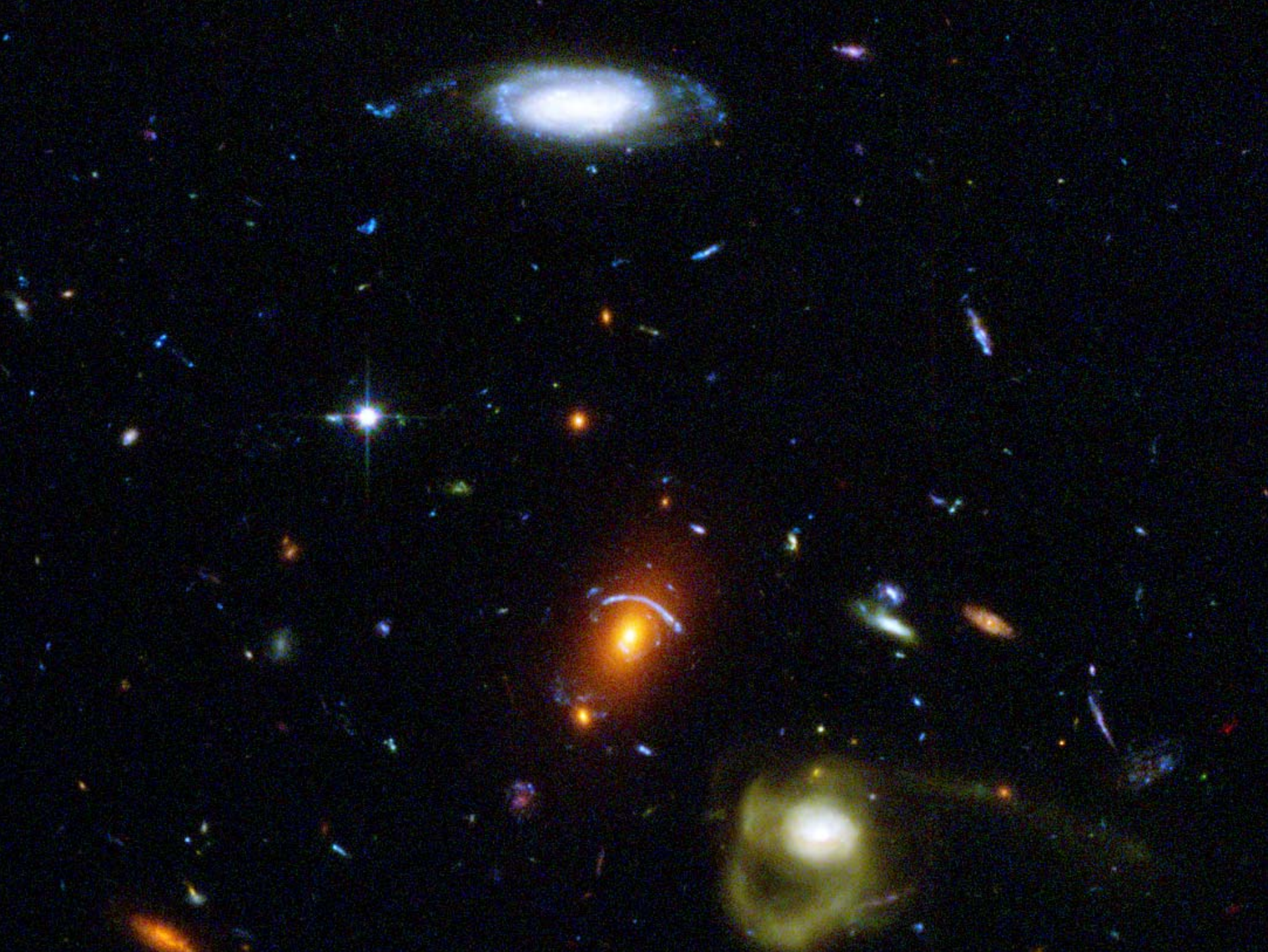
450 Millionen Lichtjahre entfernt im Sternbild Drachen



10^{26} m~
 10^{10} Lichtjahre



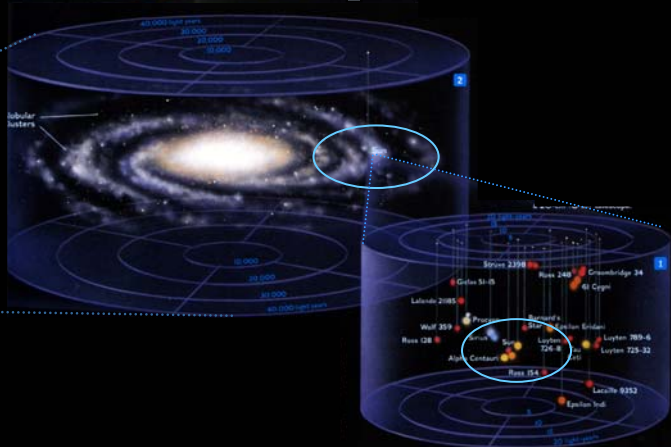
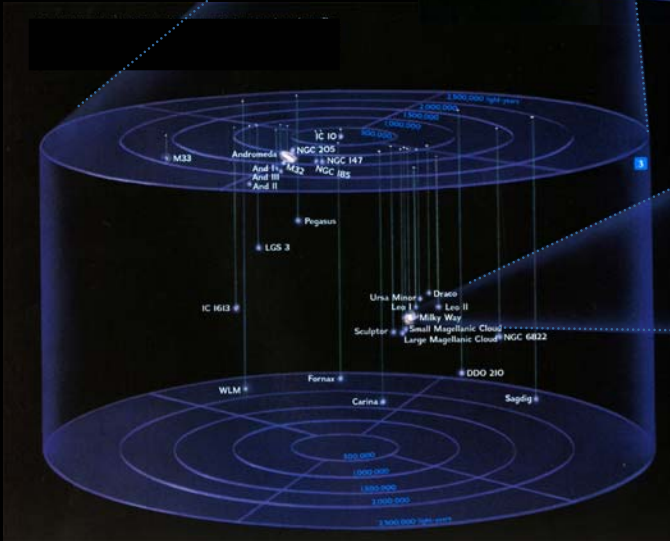
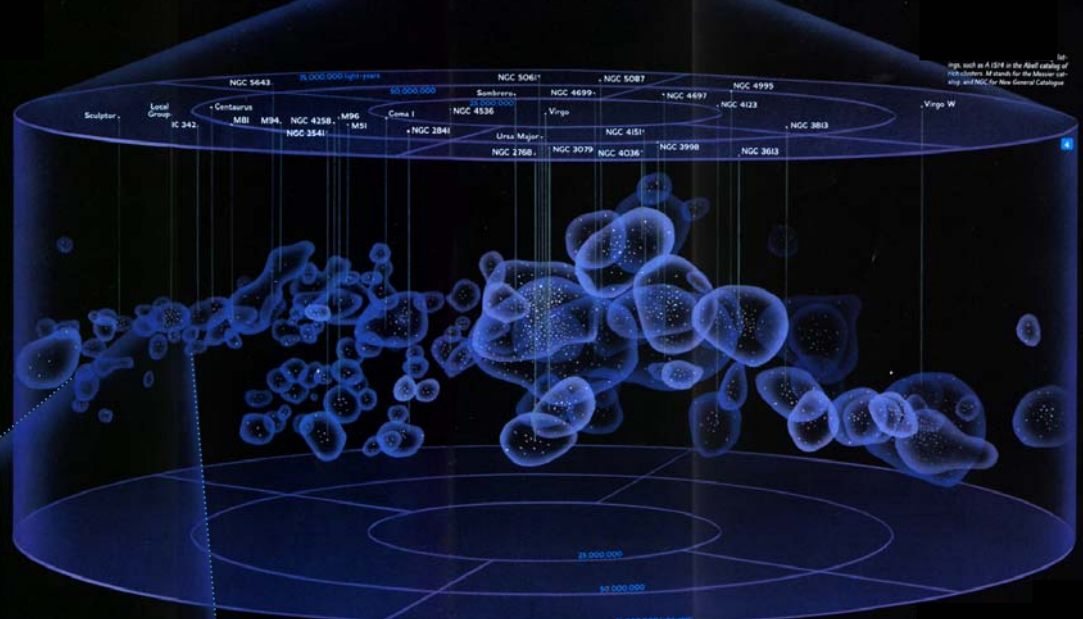


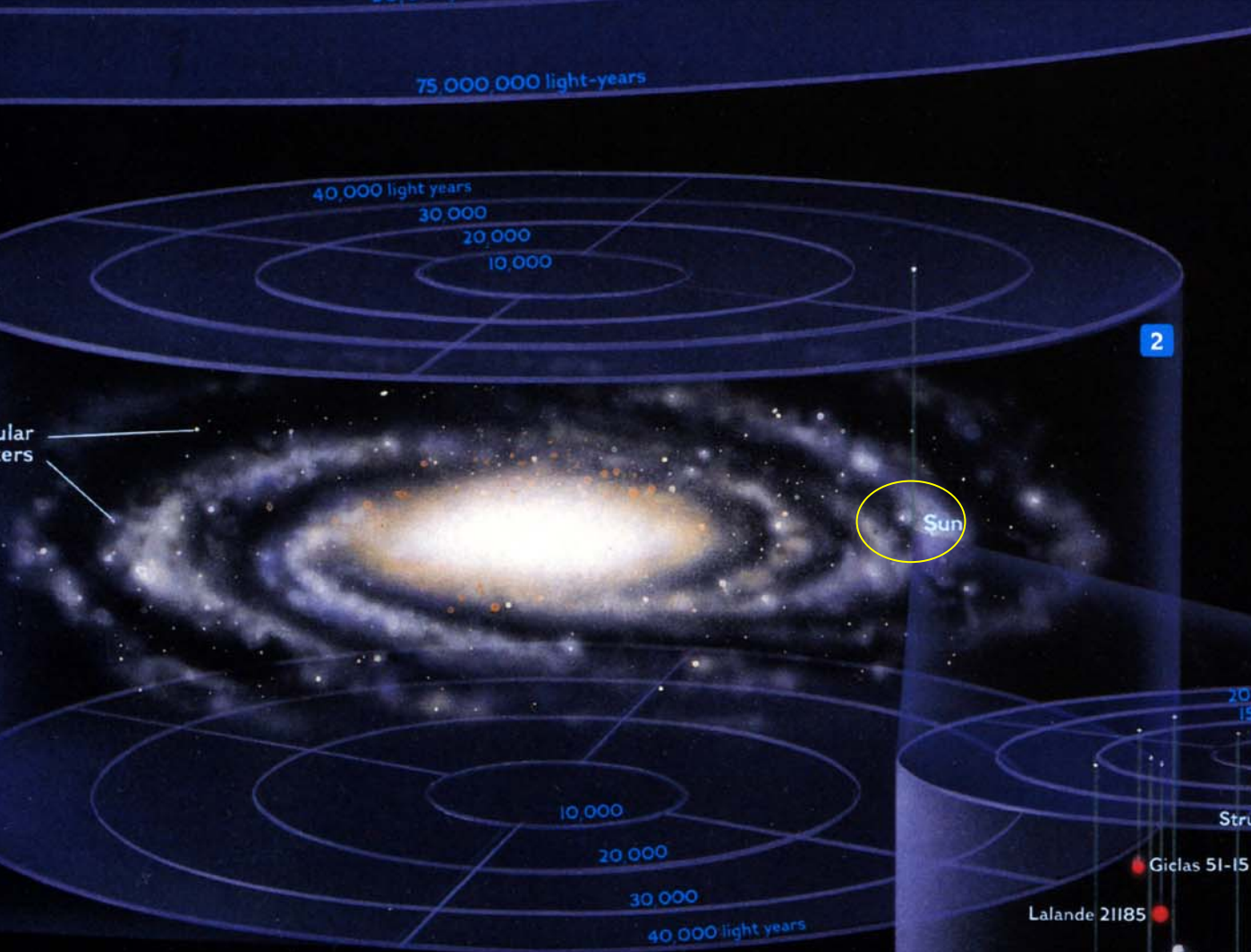


Das uns bekannte Universum

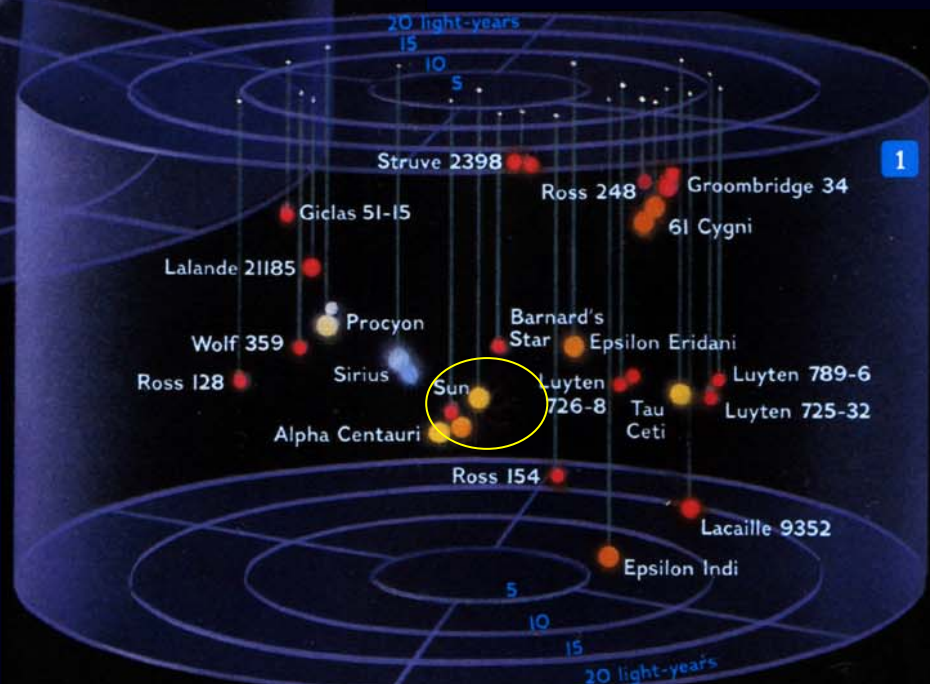


Der lokale Supercluster

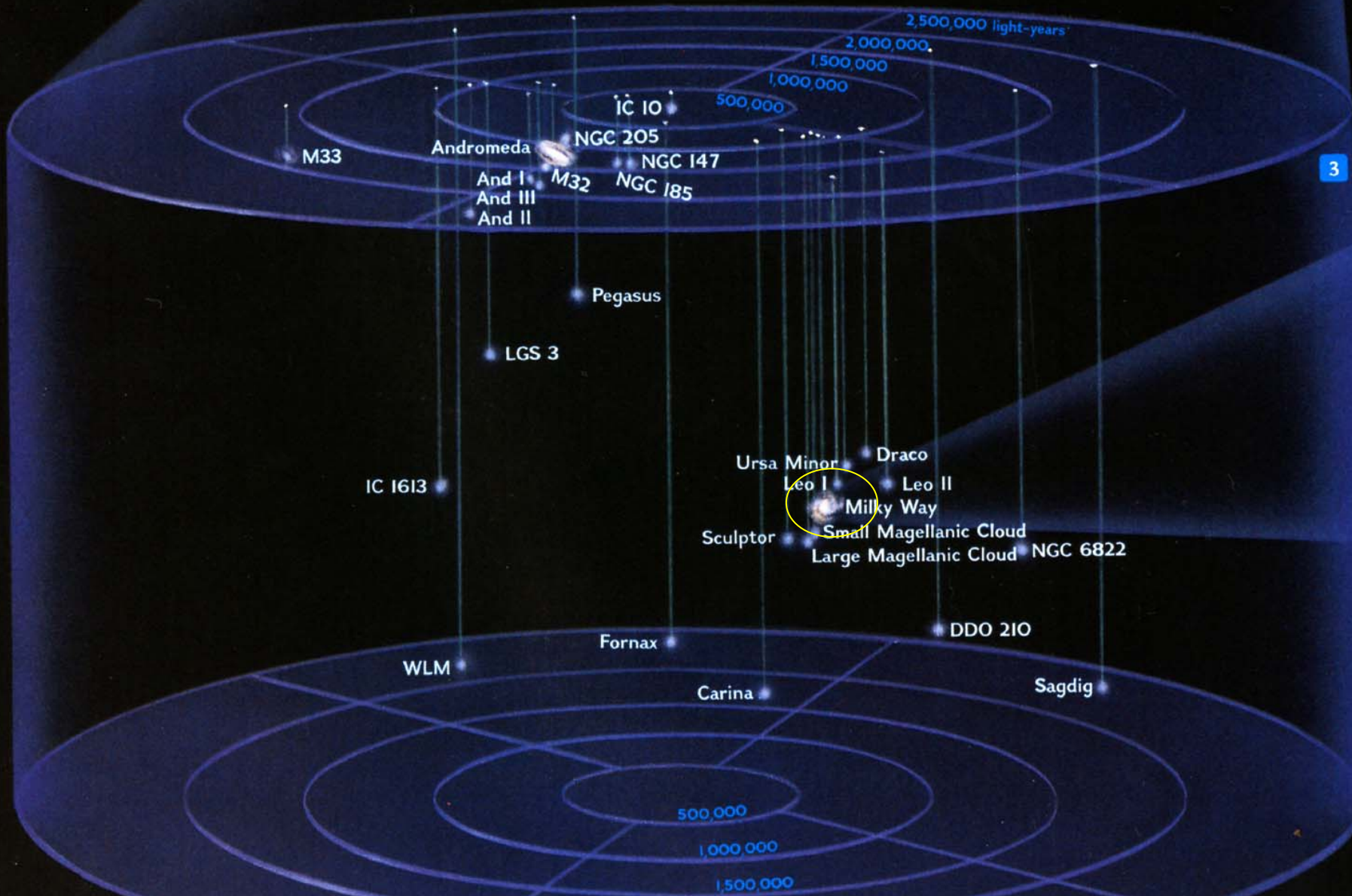


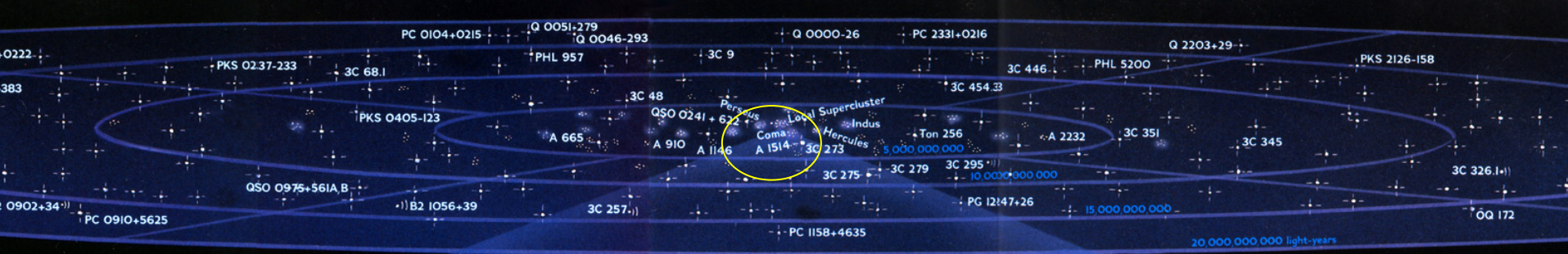


2. MILKY WAY GALAXY



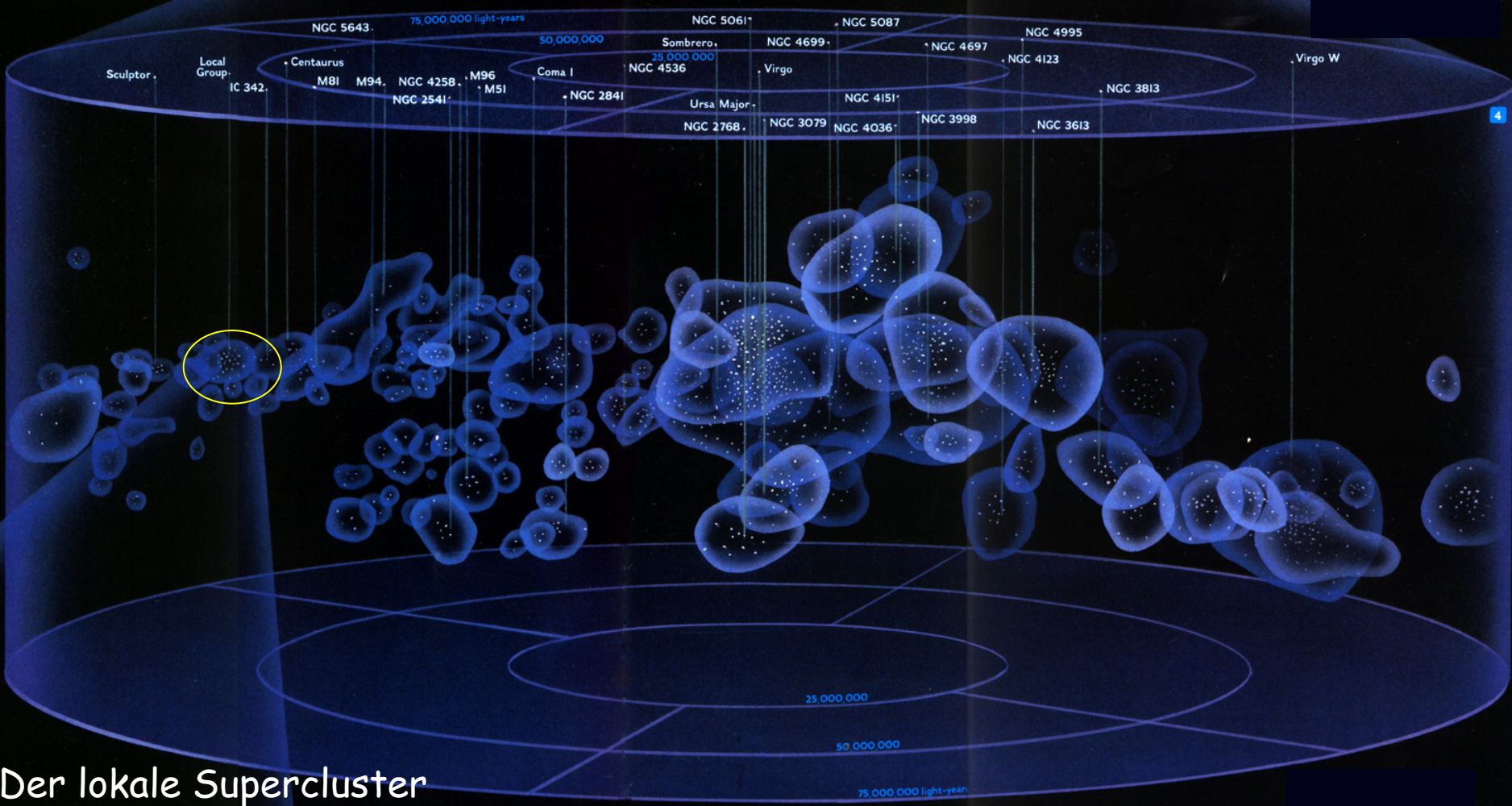
Die lokale Gruppe





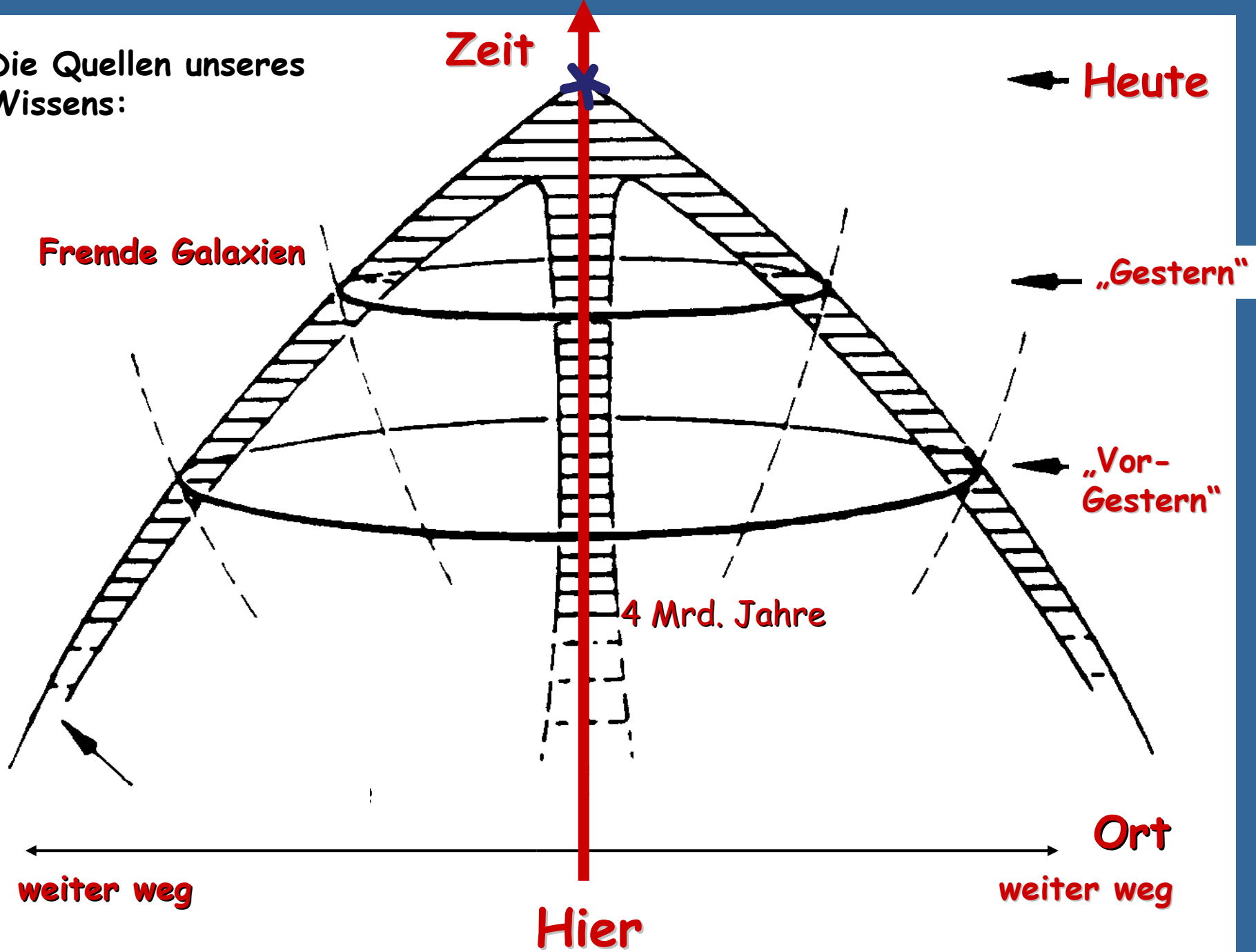
Das uns bekannte Universum

- ⊙ Superclusters
- ⊙ Clusters of Galaxies
- + Quasars
- + Radio Galaxies

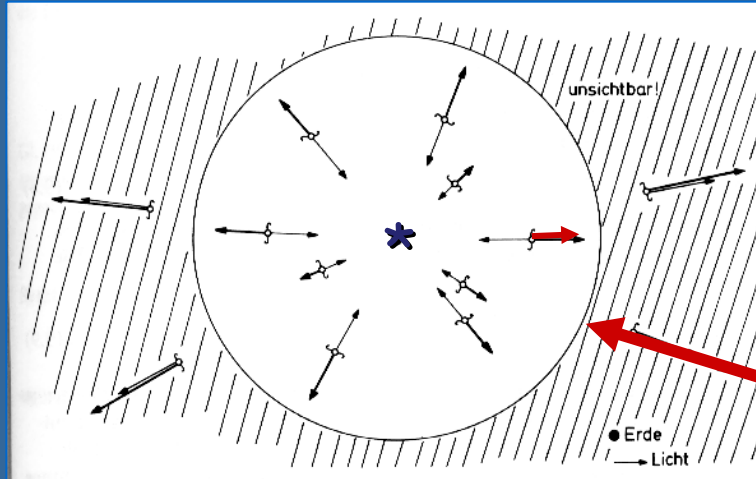


Der lokale Supercluster

Die Quellen unseres Wissens:



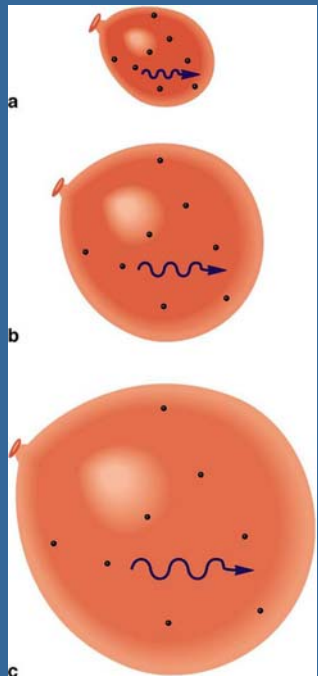
Expansion des Universums (Hubble 1929)



Fluchtgeschwindigkeit v
von Galaxien im Abstand R :

$$v = H \cdot R$$

„Horizont“



Hubble Konstante $1/H \sim 13,4$ Mrd. Jahre

Entfernteste Galaxien: $v \sim c$ (Rotverschiebung)

→ sichtbares Universum $R_U = c/H \approx 1,27 \times 10^{26}$ m

→ Weltalter $t_U = R_U/c \approx 1/H$

Was bestimmt die Größe

der Sterne,
der Planetensysteme
der Galaxien etc.?



Keplers „Weltgeheimnis“ 1596:

die Struktur des Universums folgt aus der Mathematik!

Sonne

Merkur

Oktaeder (8)

Venus

Ikosaeder (20)

Erde

Dodekaeder (12)

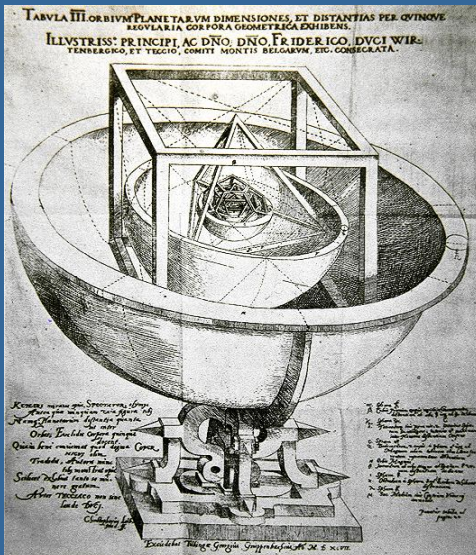
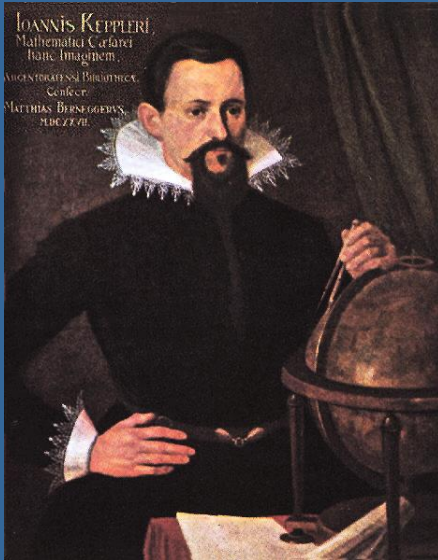
Mars

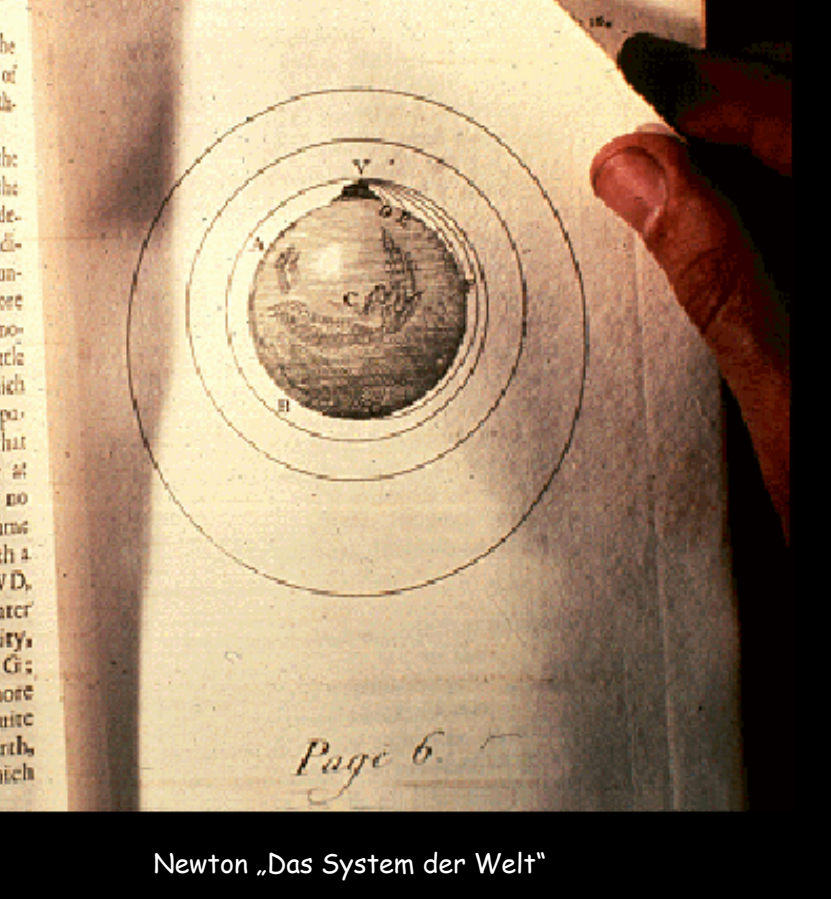
Tetraeder (4)

Jupiter

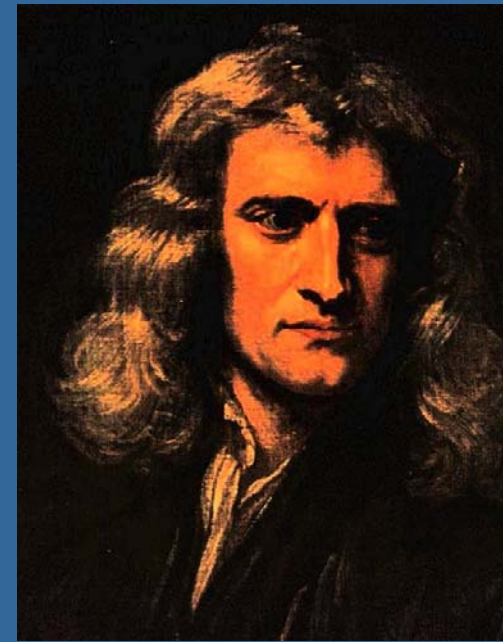
Kubus (6)

Saturn






Newton „Das System der Welt“



Isaac Newton 1665


$$\text{Beschleunigung}_{\text{Körper1}} = \frac{G_N \times \text{Masse}_{\text{Körper2}}}{(\text{Abstand}_{\text{Körper1-Körper2}})^2}$$

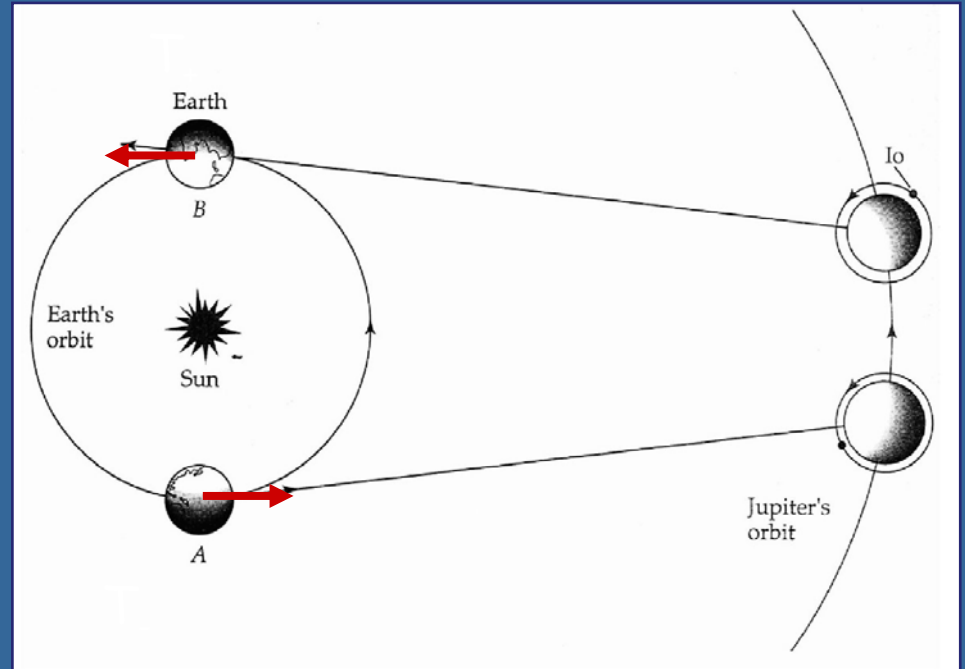
Cavendish 1798: $G_N \approx 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$

Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Römer (1675)

$$T_+ - T_- = 2 v T / c$$

= 30 Sekunden !

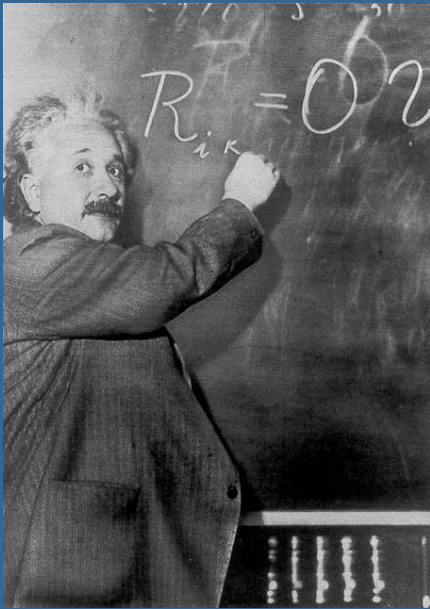
→ Lichtgeschwindigkeit c
= 10.000 x Erdgeschwindigkeit v



Einstein 1905: Es ist unmöglich einem Lichtstrahl hinterherzulaufen!

Die Lichtgeschwindigkeit hat in jedem (Trägheits-) System
den gleichen Wert

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s !}$$

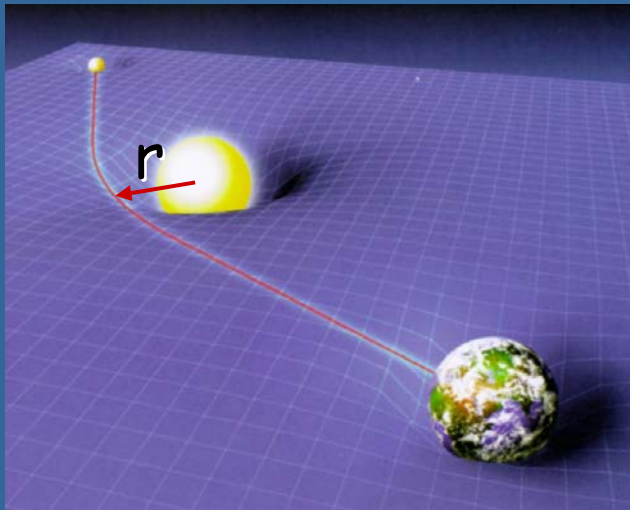


Einstein 1915:

Schwerkraft \Rightarrow

Materie krümmt die Raum-Zeit!

$$\begin{aligned} 1/(\text{Krümmungsradius } R)^2 &= \\ &= 8\pi/3 \times G_N / c^2 \times \text{Materiedichte} \end{aligned}$$

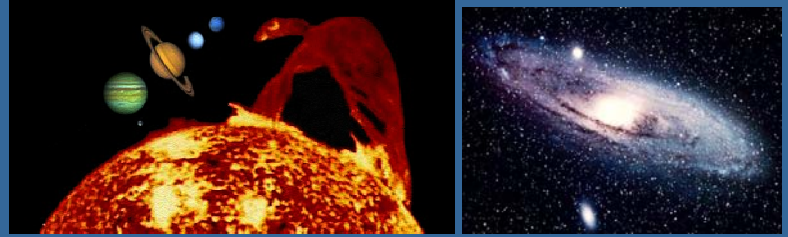


$$\text{Zeit}(r) = (1 - (r/R)^2)^{1/2} \times \text{Zeit}(\infty)$$

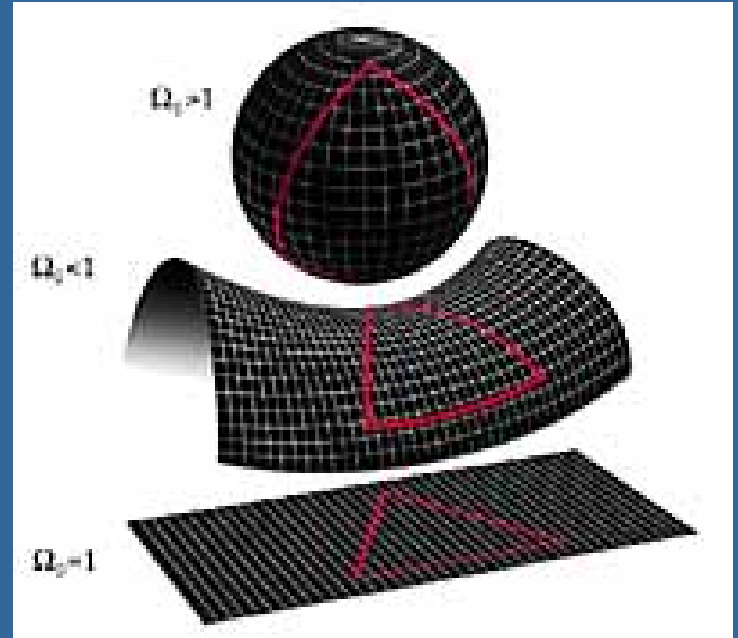
Newtons Welt	$r/R = 0$
Sonnenoberfläche:	$r/R \sim 1/1500$
Neutronenstern:	$r/R \sim 1/2$
Schwarzes Loch:	$r/R = 1$

Physik light I:

?



$$G_N \approx 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$$
$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$
$$1/H \approx 4,3 \times 10^{17} \text{ s (!)}$$

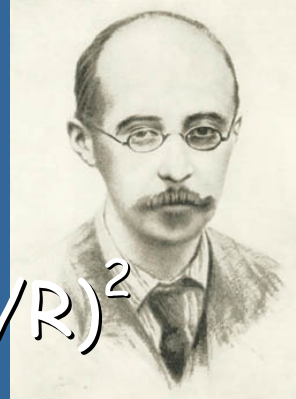


⇒ Weltalter
Welthorizont
kritische Masse ($R=R_U$)

$$1/H \sim 13,4 \text{ Mrd. Jahre}$$
$$c/H \sim 1,27 \times 10^{26} \text{ m}$$
$$c^3/G_N H \sim 10^{53} \text{ kg}$$

Fazit: nur Aussagen über die Welt als Ganzes möglich!

Die Friedmann-Gleichung



$$H^2 \equiv (\dot{R}/R)^2 = 8\pi/3 \times G_N \rho - k (c/R)^2 = H^2 \Omega - k(c/R)^2$$

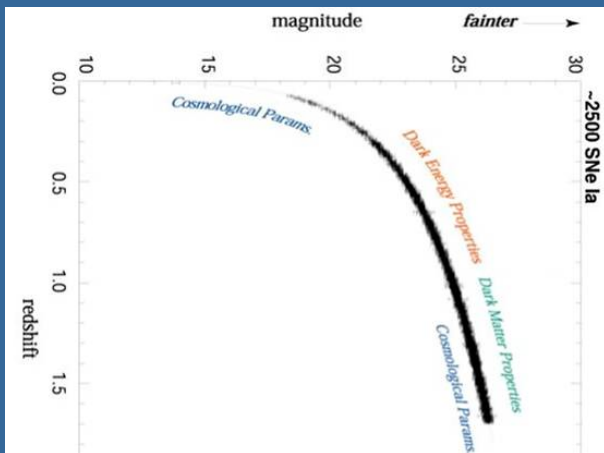
$$\Omega \equiv 8\pi G_N \rho / 3H^2 = \Omega_{\text{Stern}} + \Omega_{\text{dunkel (Baryon+Nichtbaryon)}} + \Omega_{\text{Strahlung}} + \Omega_{\Lambda}$$

$\Omega_{\text{Stern}} \approx 0,005$ Sterne

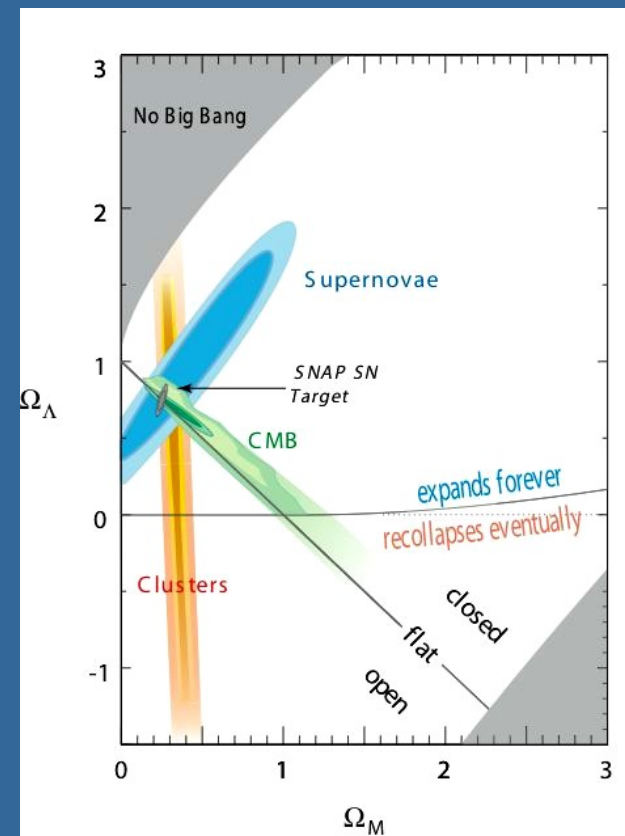
$\Omega_{\text{dunkel, Baryon}} \approx 0,05$ Gaswolken, braune Zwerge

$\Omega_{\text{dunkel, Nichtbaryon}} \approx 0,245$ Axions, Neutralinos?

$\Omega_{\Lambda} \approx 0,7$ dunkle Energie



There is strong and confirming evidence for the existence of a cosmological vacuum density. Plotted are the 68% and 95% confidence regions of the matter density Ω_M and vacuum energy density Ω_L for current data from supernovae (Knop et al. 2003), cluster measurements (based on Allen et al. 2003), and CMB data with H_0 priors (outer contours: Lange et al. 2001, inner: Spergel et al. 2003). These results rule out a simple flat $\Omega_M=1, \Omega_L=0$ cosmology, and indeed the supernovae data rule out cosmologies without vacuum energy. Their consistent overlap is a strong indicator for dark energy dominating the universe with some 70% of the energy density. Also shown is the expected confidence region from just the SNAP supernova program, for $\Omega_M=0.28, \Omega_L=0.72$.

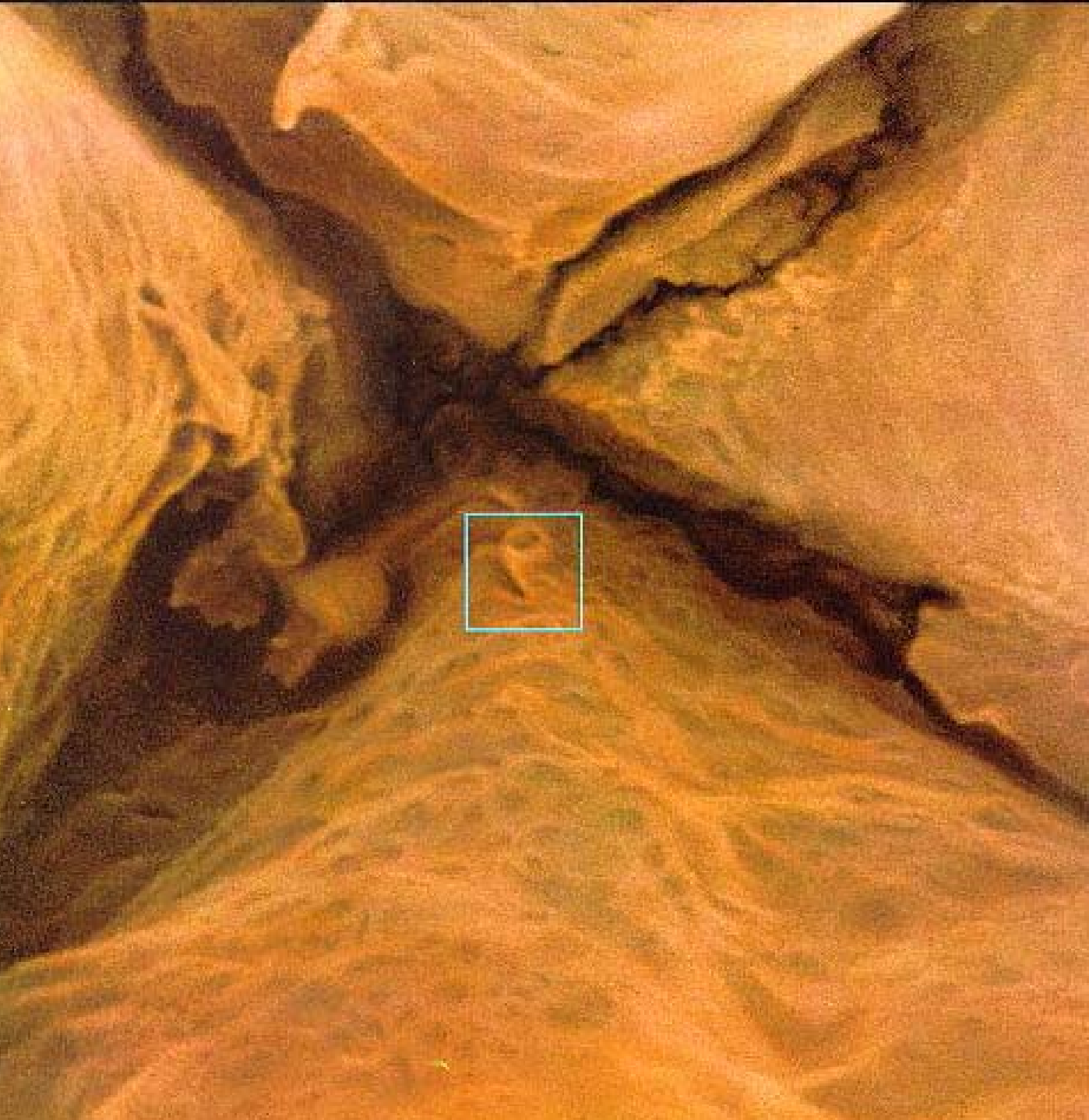




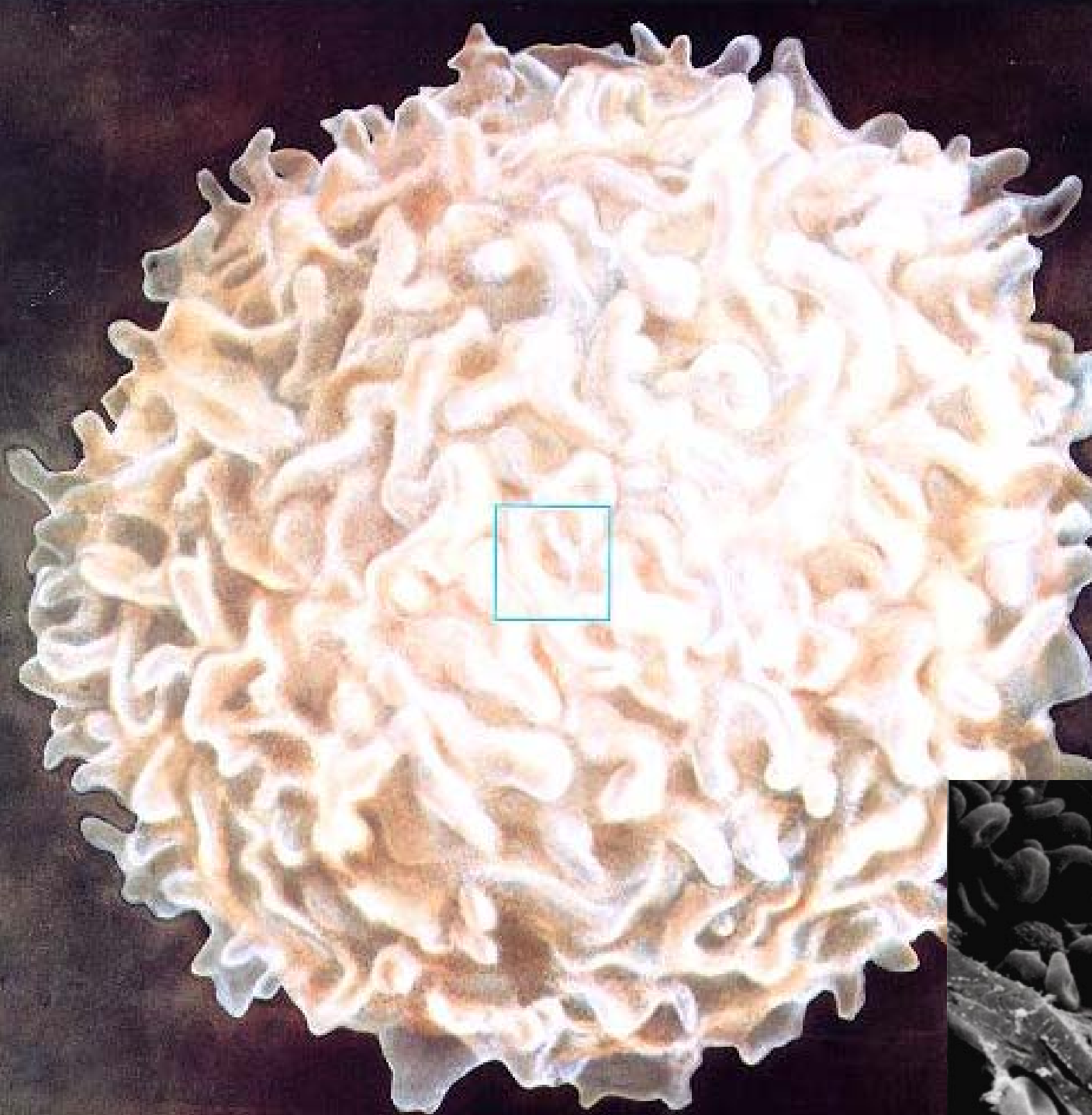
$$1 \text{ m} = 10^0 \text{ m}$$



1cm
=0,01m
=10⁻²m

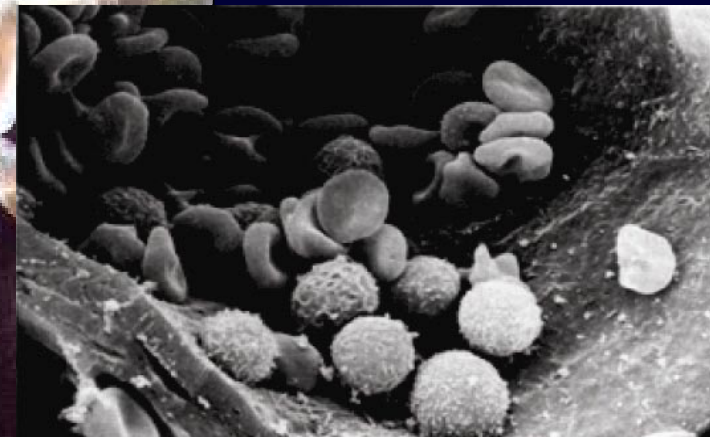


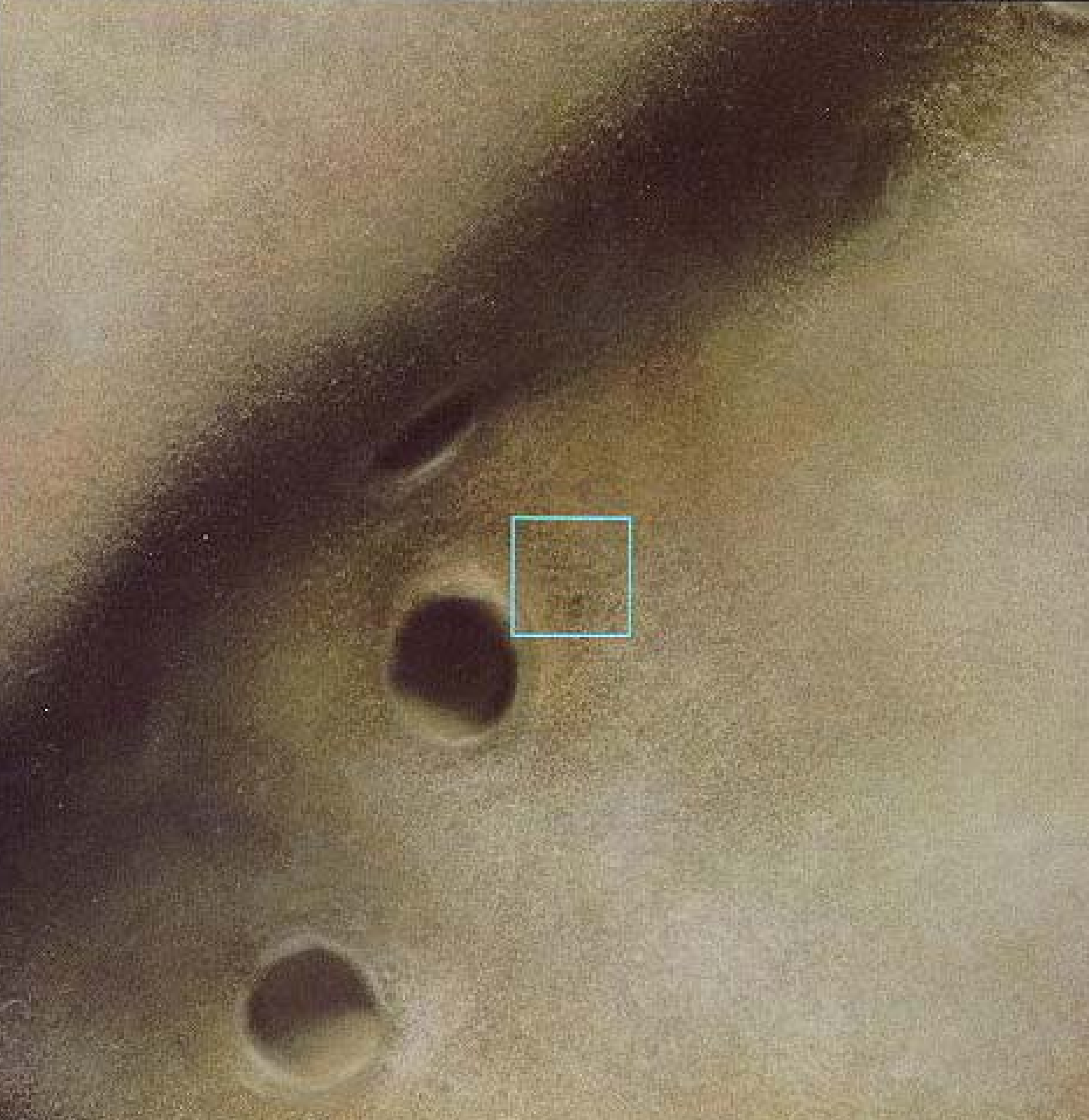
0,1 mm
= 0,0001 m
= 10^{-4} m



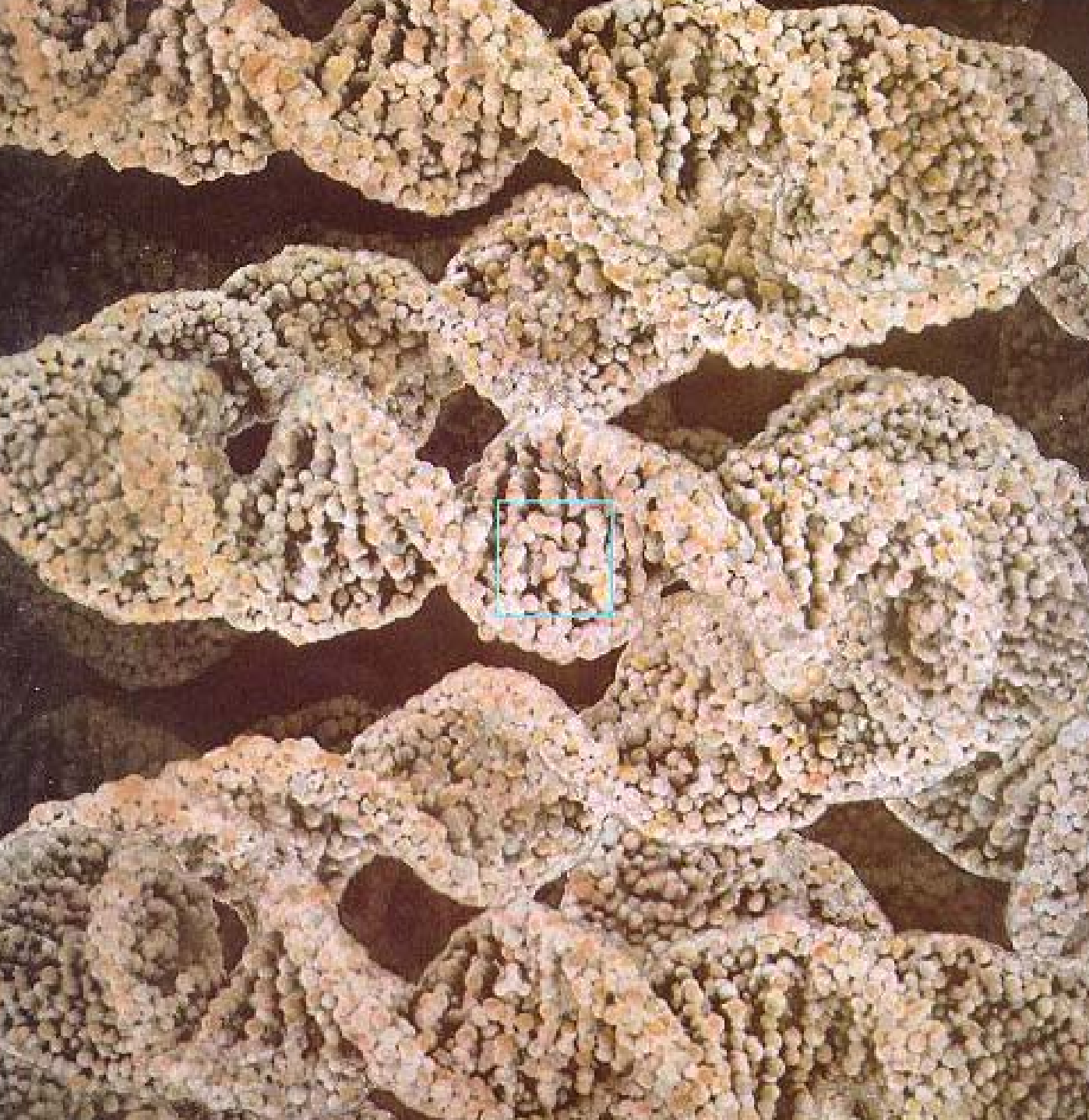
10 μm
= 0,00001 m
= 10^{-5} m

Lymphozyt

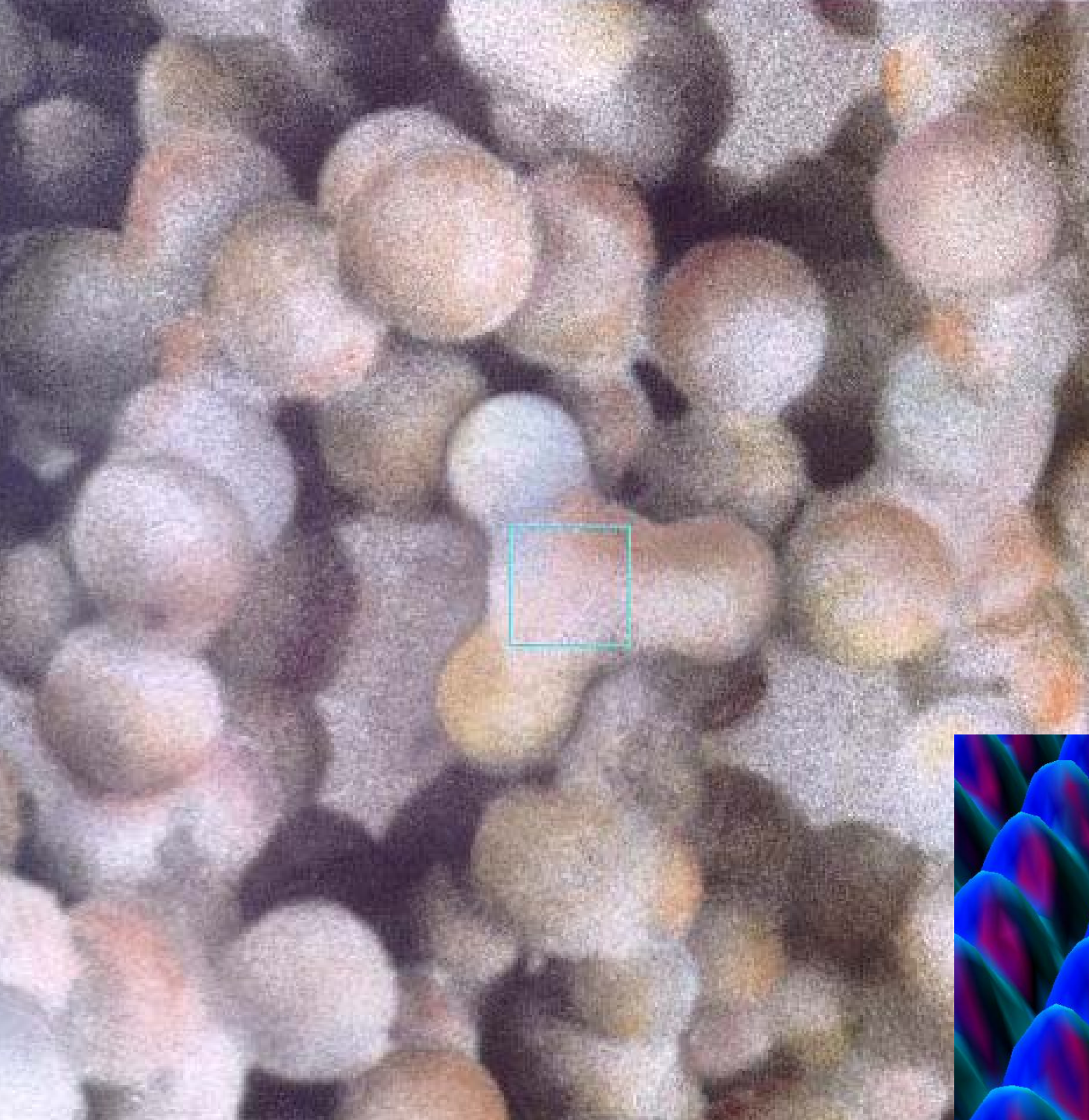




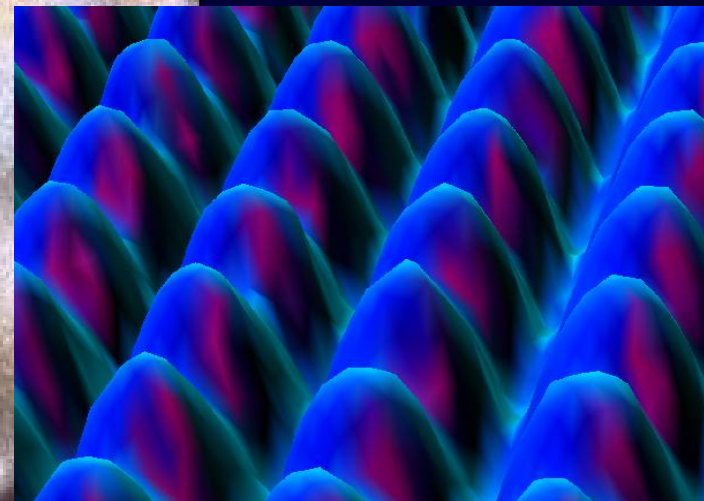
$1 \mu\text{m}$
 $= 10^{-6}\text{m}$



10 nm
= 10^{-8} m

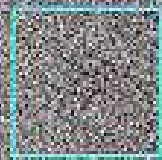


1 nm
= 10^{-9} m



10^{-10} m

Äußere
Elektronen
des
Kohlenstoff
atoms



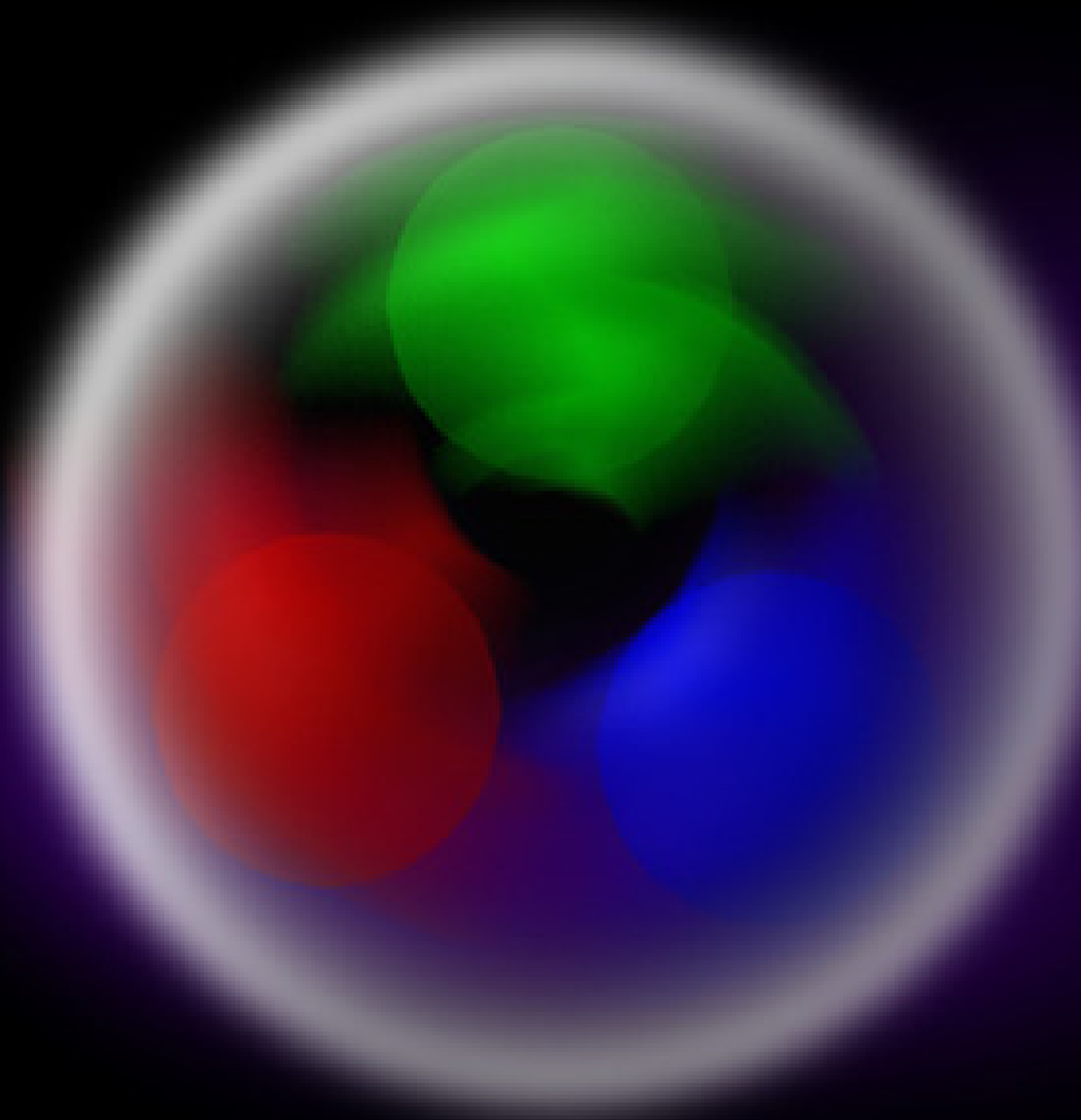
10^{-12} m





10^{-14} m

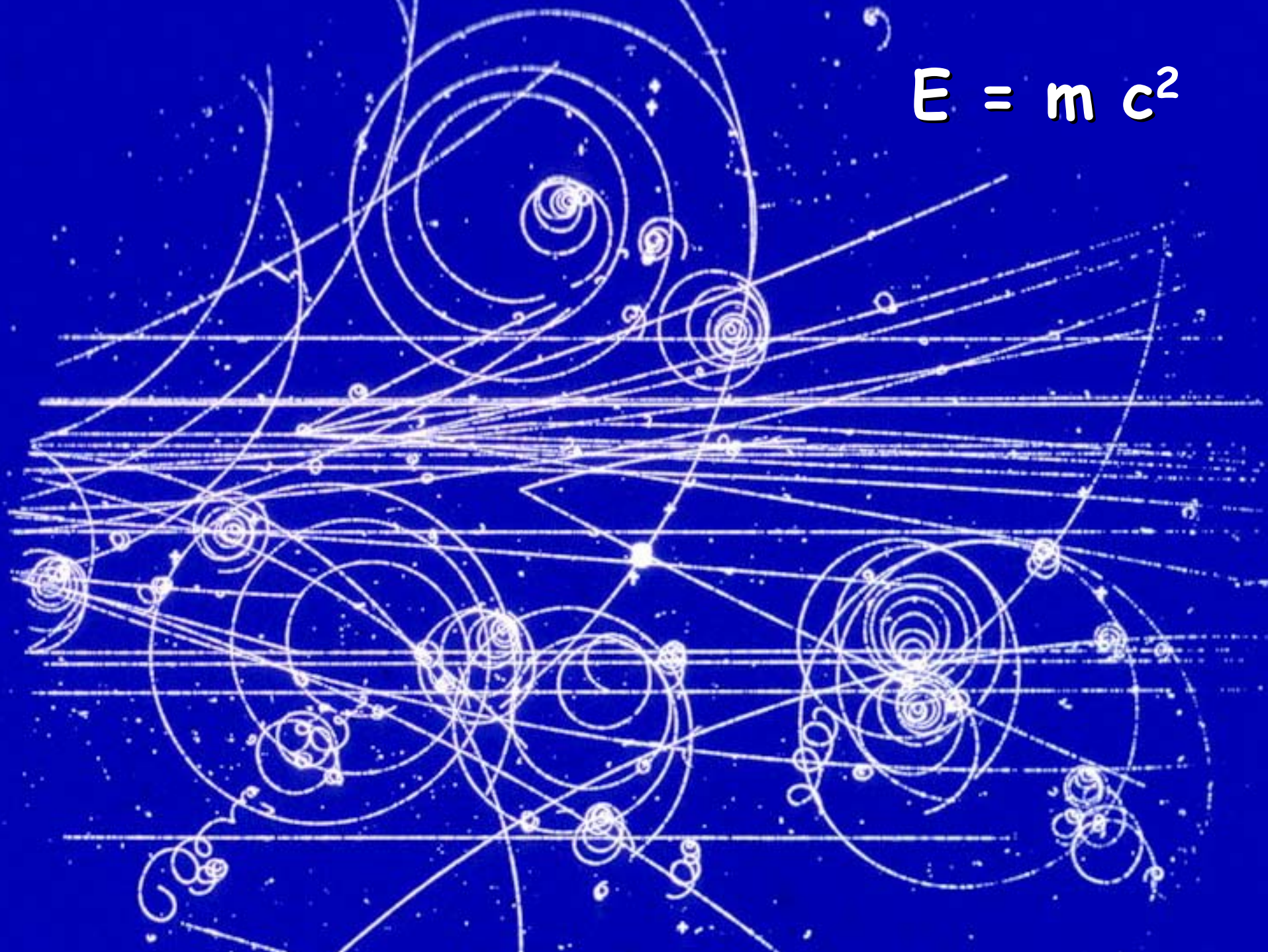
Atomkern
des
Kohlenstoff-
atoms

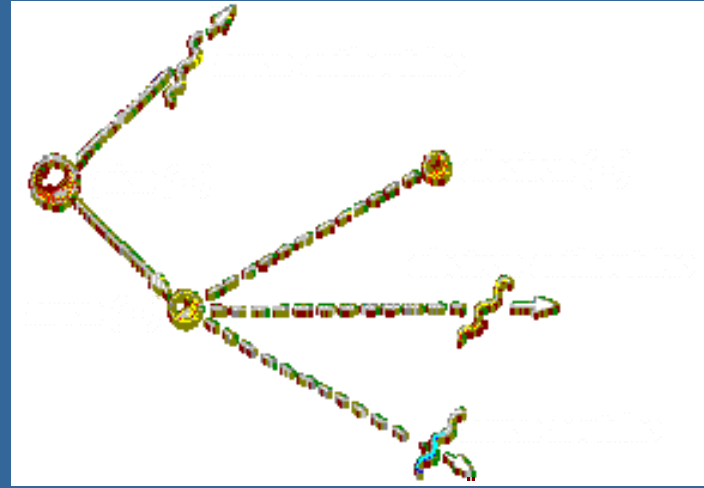
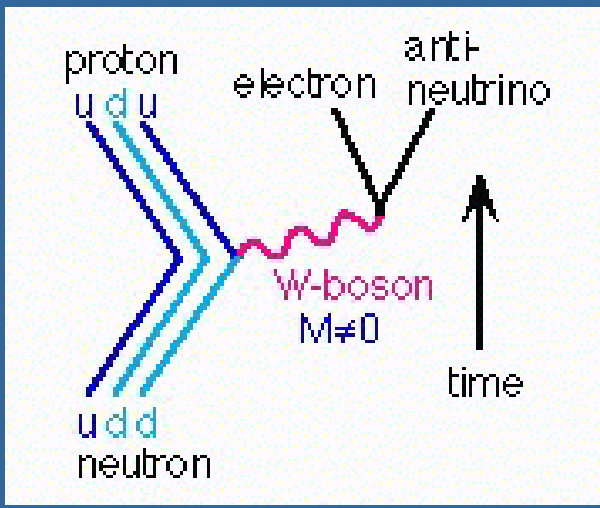


10^{-15} m

Quarks,
die
Bestandteile
des
Protons

$$E = m c^2$$





Reichweite der schwachen Kraft $\sim 10^{-18}\text{m}$

Kleinste heute im Experiment sichtbare
Längenskala: $\sim 10^{-19}\text{m}$

Physik light II: die Planck-Skala

$$a = 0.4818 \cdot 10^{-10} \text{ [sec} \times \text{Celsiusgrad]}$$

und daraus nach (57):

$$b = 6.885 \cdot 10^{-27} \text{ [erg} \times \text{sec]}.$$

§ 26. Natürliche Maasseinheiten.

Alle bisher in Gebrauch genommenen physikalischen Maasssysteme, auch das sogenannte absolute C. G. S.-System, verdanken ihren Ursprung insofern dem Zusammentreffen zufälliger Umstände, als die Wahl der jedem System zu Grunde liegenden Einheiten nicht nach allgemeinen, nothwendig für alle Orte und Zeiten bedeutungsvollen Gesichtspunkten, sondern wesentlich mit Rücksicht auf die speciellen Bedürfnisse unserer irdischen Cultur getroffen ist. So sind die Einheiten der Länge und der Zeit aus den gegenwärtigen Dimensionen und der gegenwärtigen Bewegung unseres Planeten hergeleitet worden, ferner die Einheit der Masse und der Temperatur aus der Dichte und den Fundamentalpunkten des Wassers, als derjenigen Flüssigkeit, die an der Erdoberfläche die wichtigste Rolle spielt, genommen bei einem Druck, der der mittleren Beschaffenheit der uns umgebenden Atmosphäre entspricht. An dieser Willkür würde principiell auch nichts Wesentliches geändert werden, wenn etwa zur Längeneinheit die unveränderliche Wellenlänge des Na-Lichtes genommen würde. Denn die Auswahl gerade des Na unter den vielen chemischen Elementen könnte wiederum nur etwa durch sein häufiges Vorkommen auf der Erde oder etwa durch seine glänzende Doppellinie, die keineswegs einzig in ihrer Art dasteht, gerechtfertigt werden. Es wäre daher sehr wohl denkbar, dass zu einer anderen Zeit, unter veränderten äusseren Bedingungen, jedes der bisher in Gebrauch genommenen Maasssysteme seine ursprüngliche natürliche Bedeutung theilweise oder gänzlich verlieren würde.

Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken, dass mit Zuhülfenahme der beiden in dem Ausdruck (41) der Strahlungsentropie auftretenden Constanten a und b die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche, unabhängig von speciellen Körpern oder Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und

¹ Diese Berichte, Sitzung vom 27. April 1899.

aussermenschliche Culturen nothwendig behalten und welche daher als »natürliche Maasseinheiten« bezeichnet werden können.

Die Mittel zur Festsetzung der vier Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur werden gegeben durch die beiden erwähnten Constanten a und b , ferner durch die Grösse der Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit c im Vacuum und durch die der Gravitationsconstante f . Bezogen auf Centimeter, Gramm, Secunde und Celsiusgrad sind die Zahlenwerthe dieser vier Constanten die folgenden:

$$a = 0.4818 \cdot 10^{-10} \text{ [sec} \times \text{Celsiusgrad]}$$

$$b = 6.885 \cdot 10^{-27} \left[\frac{\text{cm}^2 \text{gr}}{\text{sec}} \right] = h$$

$$c = 3.00 \cdot 10^{10} \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right] = c$$

$$f = 6.685 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{gr} \cdot \text{sec}^2} \right]^{\frac{1}{2}} = G$$

Wählt man nun die »natürlichen Einheiten« so, dass in dem neuen Maasssystem jede der vorstehenden vier Constanten den Werth 1 annimmt, so erhält man als Einheit der Länge die Grösse:

$$\sqrt{\frac{bf}{c^3}} = 4.13 \cdot 10^{-33} \text{ cm,}$$

als Einheit der Masse:

$$\sqrt{\frac{bc}{f}} = 5.56 \cdot 10^{-5} \text{ gr,}$$

als Einheit der Zeit:

$$\sqrt{\frac{bf}{c^5}} = 1.38 \cdot 10^{-43} \text{ sec.}$$

als Einheit der Temperatur:

$$a \sqrt{\frac{c^5}{bf}} = 3.50 \cdot 10^{32} \text{ } ^\circ \text{Cels.}$$

Diese Grössen behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vacuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben.

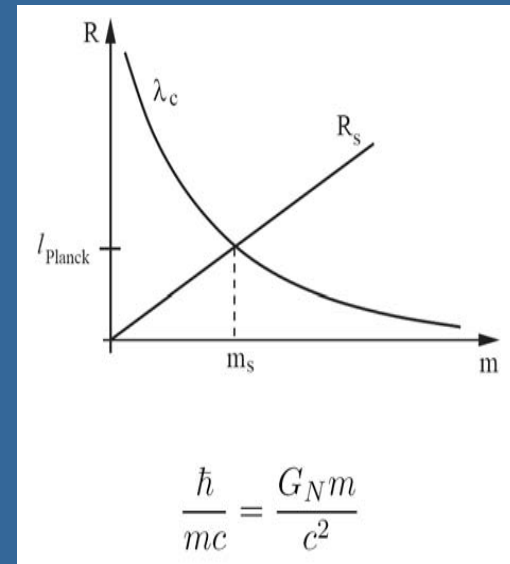
¹ F. RICHARZ und O. KRIGAR-MENZEL, Anhang zu den Abhandlungen dieser Akademie vom Jahre 1898 S. 110, im Auszug: Wied. Ann. 66, S. 190, 1898.

Physik light II: Die Planck-Skala

$$m_{\text{Planck}} = (\hbar c / G_N)^{1/2} = 2.18 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

$$l_{\text{Planck}} = (\hbar G_N / c^3)^{1/2} = 1.62 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_{\text{Planck}} = (\hbar G_N / c^5)^{1/2} = 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$$



In der Planckwelt: Krümmungsradius $R \approx l_{\text{Planck}}$
Comptonlänge $\lambda_c = \hbar / mc \approx l_{\text{Planck}}$

Raum-Zeit-Schaum aus Mini-Schwarze-Löcher, die sich bilden und wieder verdampfen?

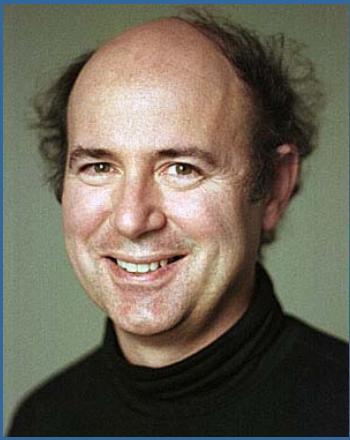
William von Ockham (1285-1349)



Wesenheiten soll man nicht über Gebühr vermehren ,
denn es ist eitel, etwas mit mehr zu erreichen, was mit
weniger zu erreichen möglich ist.

⇒ \bar{h} , G_N , c !

Frank Wilczeks Rezept für die Welt



$$G_N, c, \hbar +$$



Masse des Elektrons: $m_e = 0,9 \times 10^{-30} \text{ kg}$

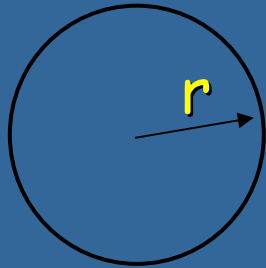
elektrische Ladung : $\alpha_e = e^2 / \hbar c = 1/137$

Fermi-Konstante : $\alpha_w = G_F m_e^2 / \hbar c \sim 10^{-11}$

Farbladung: $\alpha_s \approx 1$

Gravitation: $\alpha_G = G_N m_e^2 / \hbar c \sim 1,7 \times 10^{-45}$

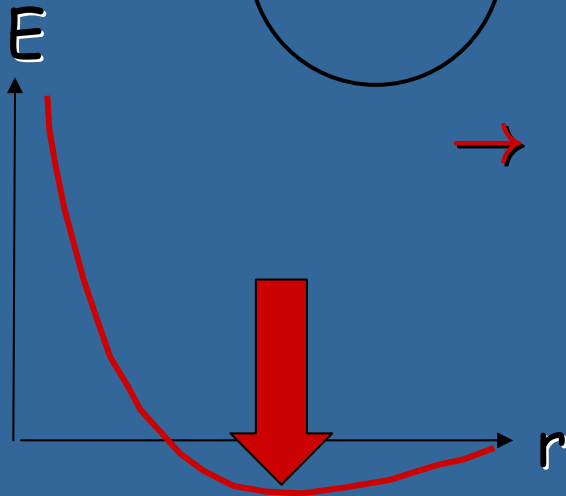
Physik light III $G_N, c, \hbar, + m_e, \alpha_e, \alpha_w, \alpha_s$



Heisenberg: $\Delta p \Delta x > \hbar$

→ Wie groß ist ein Atom?

$$\Delta x \approx r, \rightarrow \Delta p \approx \hbar/r$$



$$E \sim \frac{p^2}{2m} - \frac{Ze^2}{r} \approx \frac{\hbar^2}{mr^2} - \frac{Ze^2}{r} \rightarrow \text{Minimum}$$

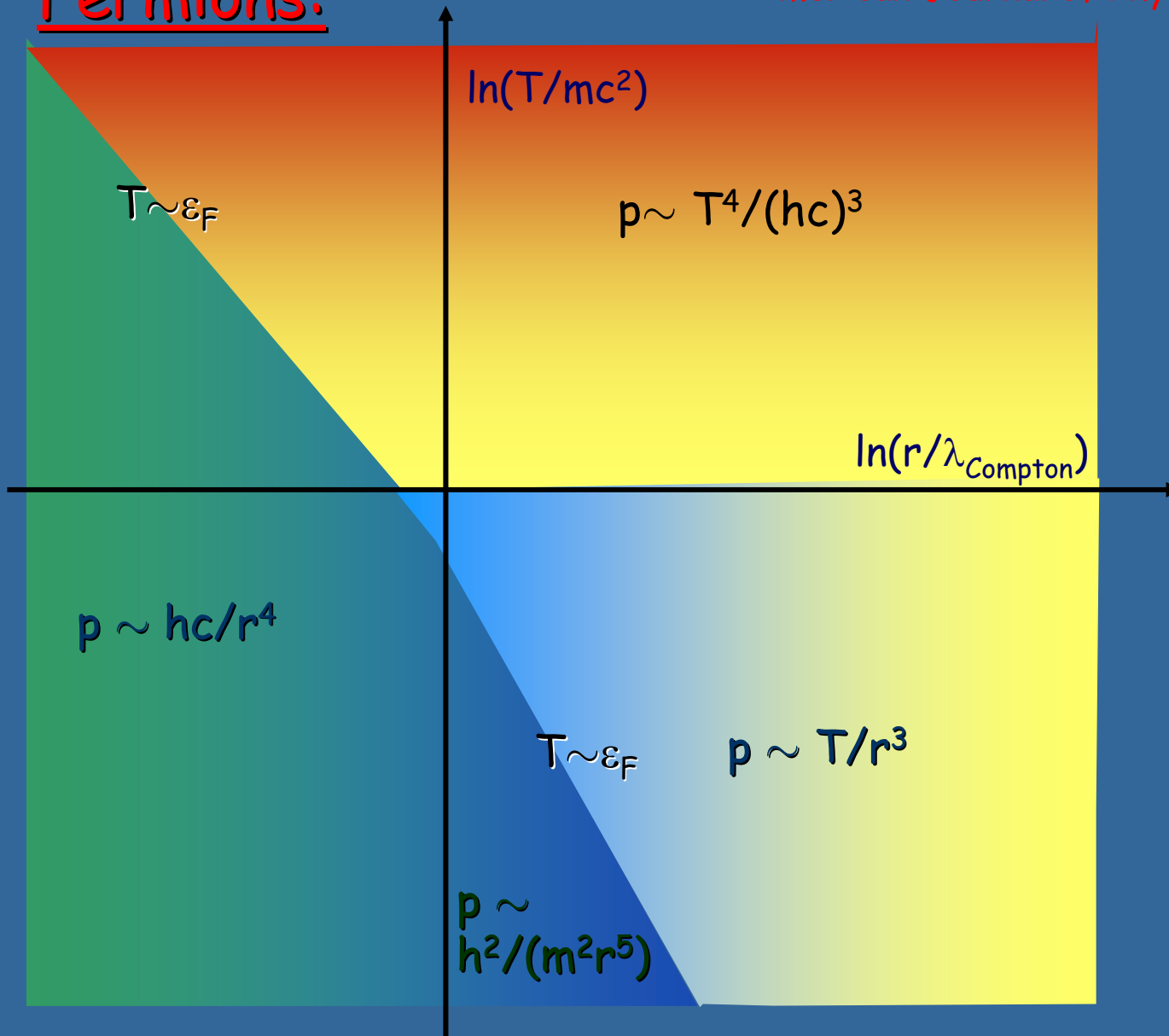


$1/\alpha_e \downarrow$

$$r_B \sim \frac{\hbar^2}{m_e e^2 Z} = \frac{\hbar c}{e^2} \frac{\hbar}{m_e c} \frac{1}{Z} \sim 10^{-11} m$$

Fermions:

* American Journal of Physics 73, 349 (2005)



Landau & Lifshitz
Vol. 5 Statistical Physics

- o (45.5)
- o (56.8)
- o (56.9)
- o (56.15)
- o (57.7)
- o (58.6)
- o (61.4)
- o (61.7)
- o (62.4)
- o (62.6)
- o (62.9)
- o (63.16)
- o (63.15)
- o (63.16)
- o (63.17)
- o (101.2)
- o (106.5)
- o +superfluids

Physik light IV $G_N, c, \hbar, + m_e, \alpha_e, \alpha_w, \alpha_s$

Wie groß ist ein Stern?

Gravitationsdruck < Gasdruck

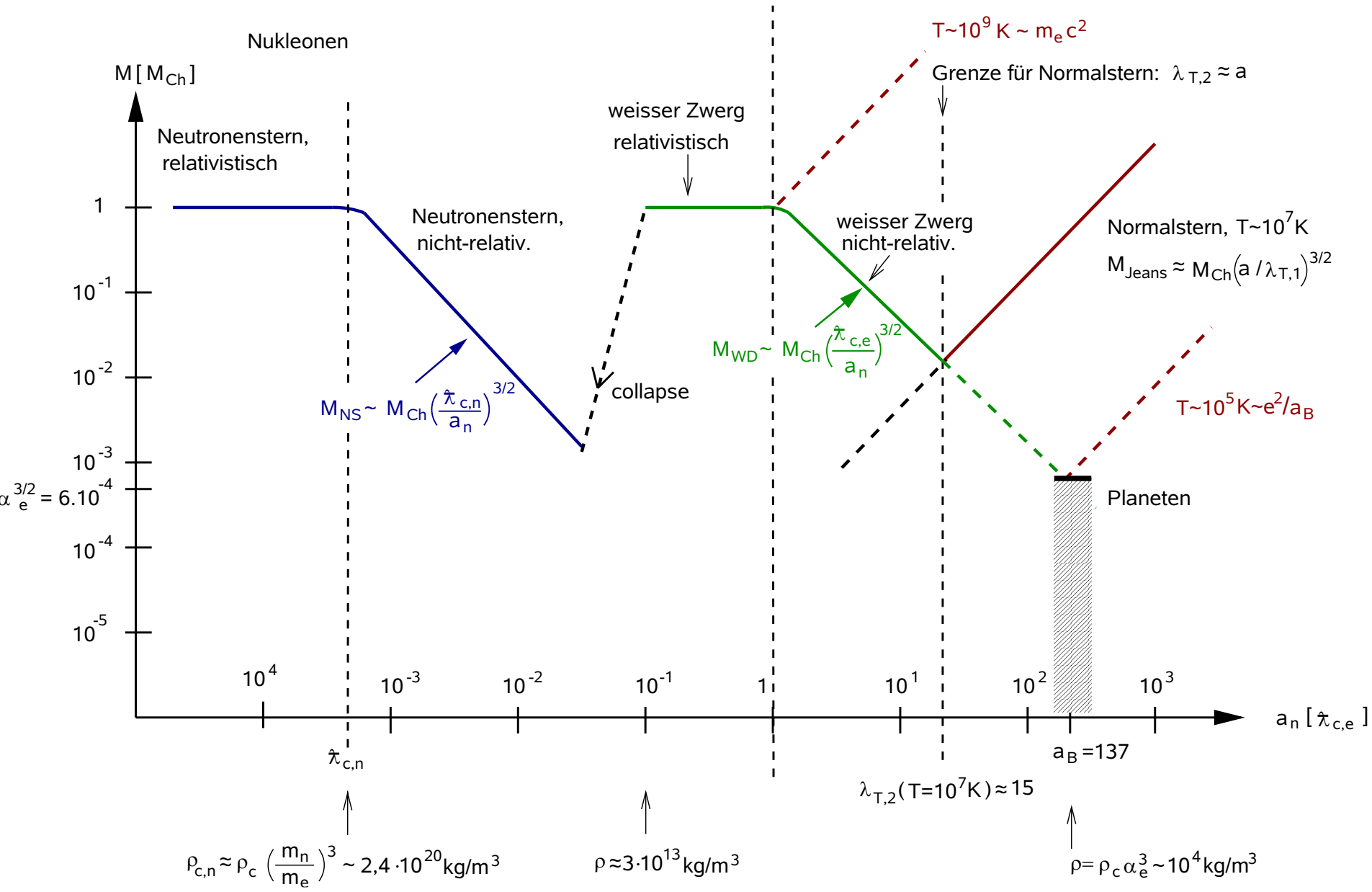
$$p_G \sim \frac{G_N M^2}{R \cdot R^3} < p_k \sim \frac{1}{r^3} \left(T + \frac{\hbar^2}{m_e r^2} + \frac{\hbar c}{r} \right)$$

$$R \sim N^{1/3} r, \quad M = N m_p$$

$$M_{\text{Stern}} < m_{\text{Planck}} \left(\frac{m_{\text{Planck}}}{m_p} \right)^2 \sim 3,8 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$m_{\text{Planck}} = (\hbar c / G_N)^{1/2}$$

$$M_{\text{Ch}} = m_p \alpha_G^{3/2}$$



Physik light V

$G_N, c, \hbar, + m_e, \alpha_e, \alpha_w, \alpha_s$

Wie groß ist ein Planet:

Gravitationsdruck $<$ 1/Kompressibilität

$$p_G \sim \frac{G_N M^2}{R \cdot R^3} \quad < \quad p_k \sim \frac{e^2}{r^4}$$

$$R \sim N^{1/3} r, \quad M = N m_p$$

$$M_{\text{Planet}} < \alpha_e^{3/2} M_{\text{Stern}} \quad \sim 2,4 \times 10^{27} \text{ kg}$$

Physik light II-V

$$G_N, c, \hbar, \quad + \quad m_e, \alpha_e, \alpha_w, \alpha_s$$

→

Atom: $E_{\text{Ryd}}/c^2 = m_e \alpha_e^2 \quad \sim 4,8 \times 10^{-35} \text{ kg}$

Stern: $M_{\text{Stern}} < m_{\text{Planck}} (m_{\text{Planck}}/m_p)^2 \quad \sim 3,8 \times 10^{30} \text{ kg}$

Planet: $M_{\text{Planet}} < \alpha_e^{3/2} M_{\text{Stern}} \quad \sim 2,4 \times 10^{27} \text{ kg}$

Galaxie: $M_{\text{Galaxie}} < \alpha_e^5 m_{\text{Planck}}^4 / m_p^{5/2} m_e^{1/2} \quad \sim 4,5 \times 10^{41} \text{ kg}$

Physik light VI: $M_{\text{Stern}} \gg m_{\text{Planck}}$ da $m_{\text{Planck}}/m_p \sim 10^{19}$!

⇒ Warum ist das Proton so leicht?

"Quantenchromodynamik light" $m_p \sim E_{\text{Bindung}}/c^2$

Betrachte der Einfachheit halber Meson als Bindungszustand zweier Quarks, vernachlässige die Quarkmassen, Mesonenmasse kommt aus Bindungsenergie = kinetische + potentielle Energie (die Abschätzung für Protonen, die aus 3 Quarks bestehen, verläuft analog).

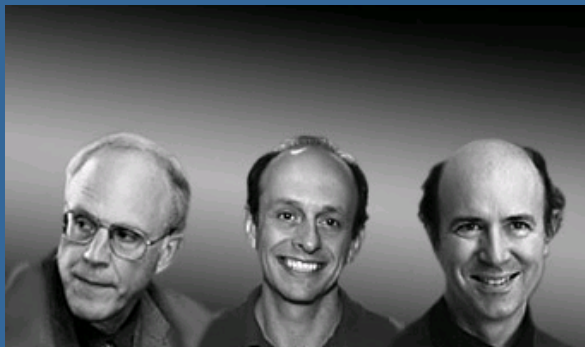
$$E_B \sim \frac{c\hbar}{r} - \frac{g^2(r)}{r} = \frac{c\hbar}{r} (1 - \alpha_S(r)) \quad \hbar/c = m_{\text{Planck}} \times l_{\text{Planck}}$$

$$m_B \sim E_B / c^2 = m_{\text{Planck}} \times l_{\text{Planck}} / r \times [1 - \alpha_S(r)]$$

Es ist wie beim Atom: die Lage des Minimums bestimmt die Masse, in unserem Fall muss α von der Ordnung 1 sein, damit ueberhaupt ein Minimum auftreten kann,

Essentiell: die Farbladung $g(r)$ ist - wie auch die elektrische und die schwache Ladung - abstandsabhängig: Durch Entstehung virtueller Fermionen (z.B. Quarks, Elektronen) und Bosonen (z.B. Gluonen) wird das "Vakuum" zwischen den Ladungen polarisiert. Bei der elektromagnetischen Wechselwirkung führt dies zur Abschirmung der Ladung durch Elektron-Positron-Paare, die Ladung nimmt mit dem Abstand bis hin zur Comptonlänge ab.

Bei der starken Wechselwirkung kommt es zur Abschirmung durch Quarks und zur Anti-Abschirmung durch die Gluonen, dabei dominiert die letztere: die effective Farbladung nimmt mit dem Abstand zu. Umgekehrt wird sie auf kleinen Skalen immer schwächer, dieses Verhalten nennt man **asymptotische Freiheit:**



$$\alpha_s(r) \approx 1/\ln(a/r) \quad r < a \approx 10^{-15} \text{ m}$$



Asymptotische Freiheit: Fortsetzung

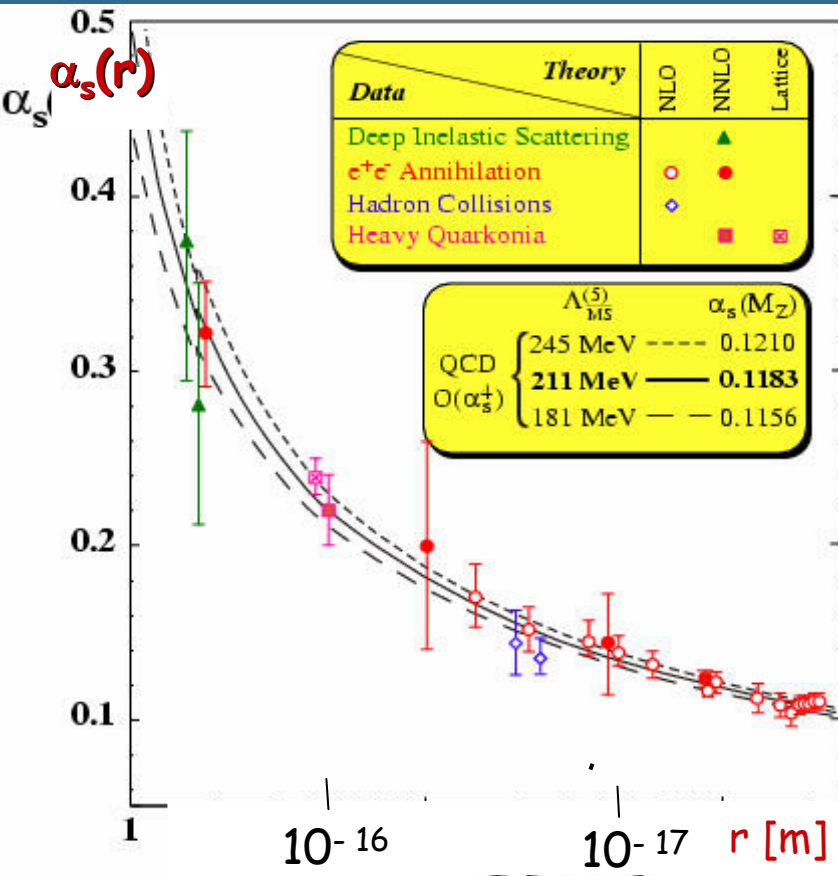
$$\alpha_s(r) \approx 1/\ln(a/r) \quad r < a \approx 10^{-15} \text{ m}$$



$$\alpha_s(l_{\text{Planck}}) \approx 0.0217$$



$$\alpha_s(3.6 \times 10^{-16} \text{ m}) \approx 1$$



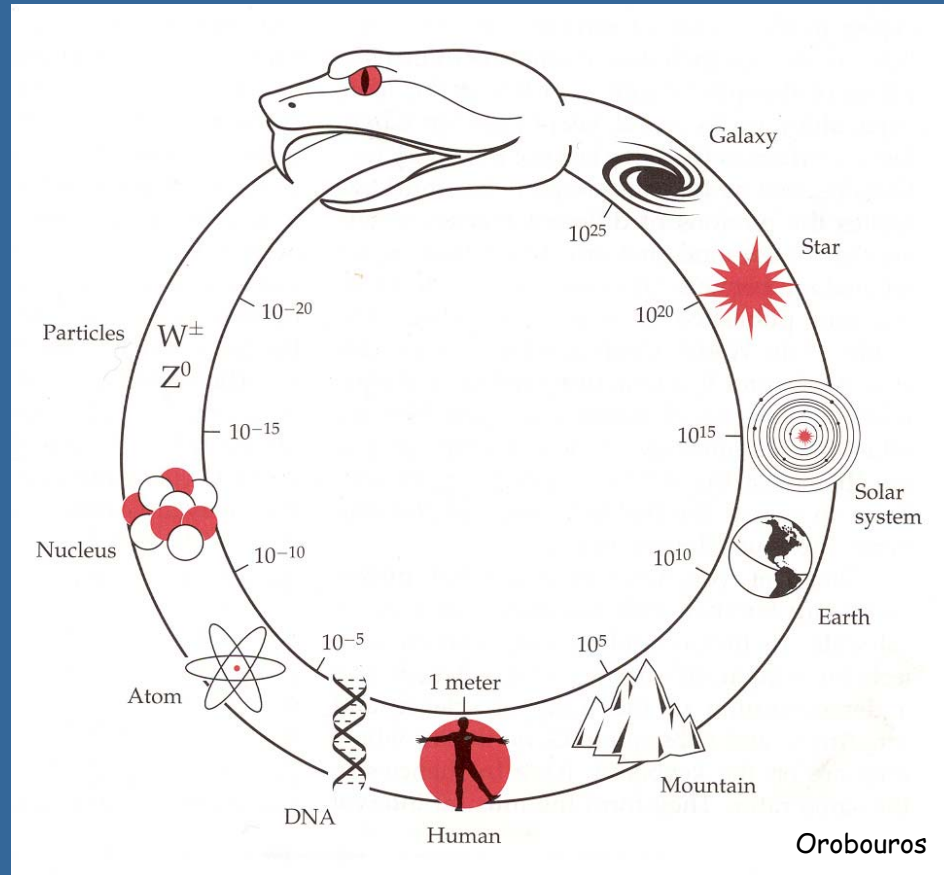
Die Bedingung $\alpha_s(r_s)=1$ lässt sich schreiben als

$$r_s \approx l_{\text{Planck}} \exp[1/\alpha_s(l_{\text{Planck}}) - 1].$$

Hätte daher Gott $\alpha_s(l_{\text{Planck}}) \approx 0.0250$ statt $\alpha_s(l_{\text{Planck}}) \approx 0.0217$ gewählt, dann wäre $r \approx 8.66 \cdot 10^{-19} \text{ m}$ und das Meson (und analog das Proton) hätte eine Masse von

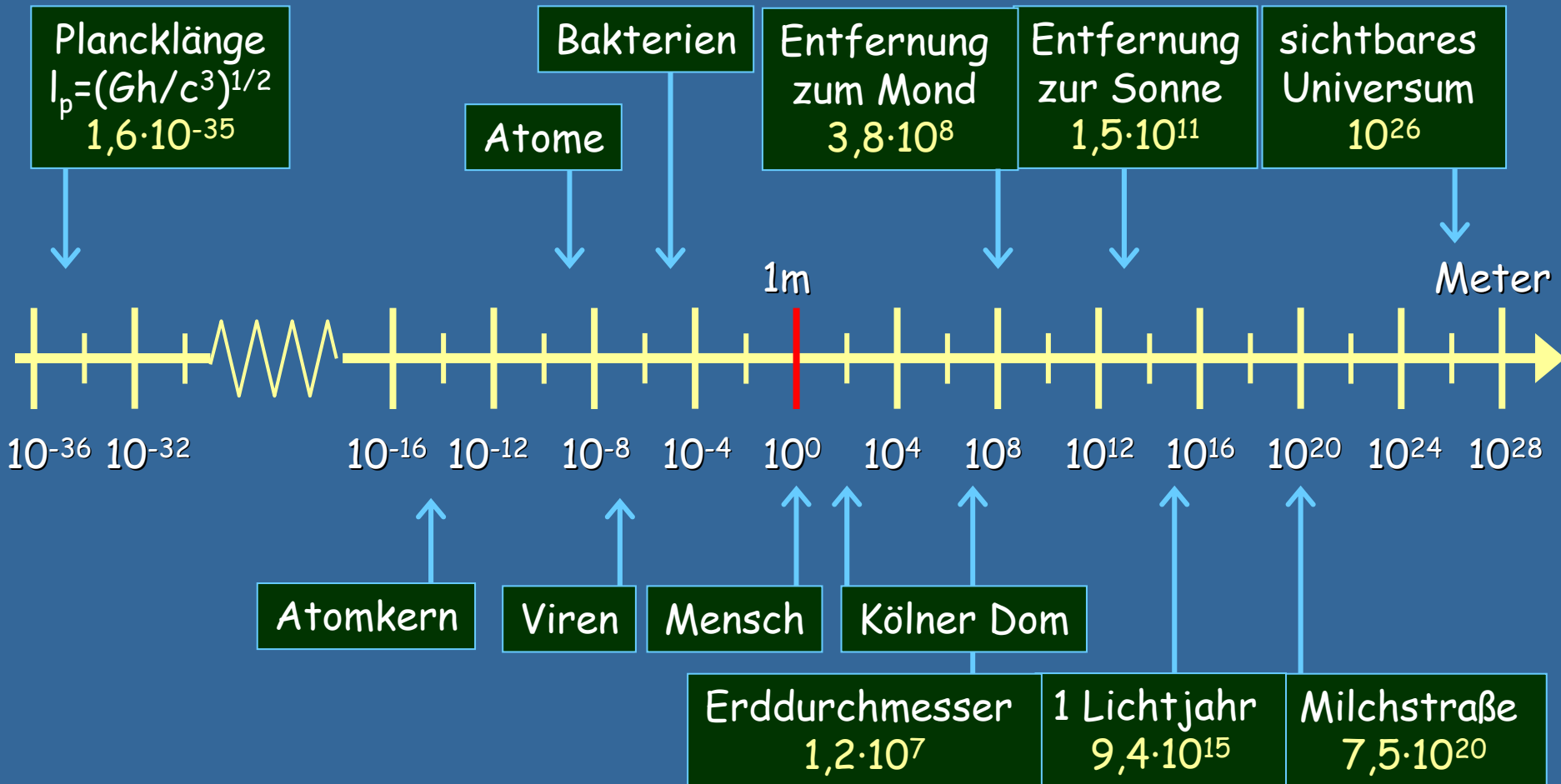
$$m_M = m_{\text{Planck}} \times l_{\text{Planck}} / r \approx 10^{-17} m_{\text{Planck}}$$

Sterne wären dann 10 000 mal kleiner als in unserem Universum und wir vermutlich nicht da!!

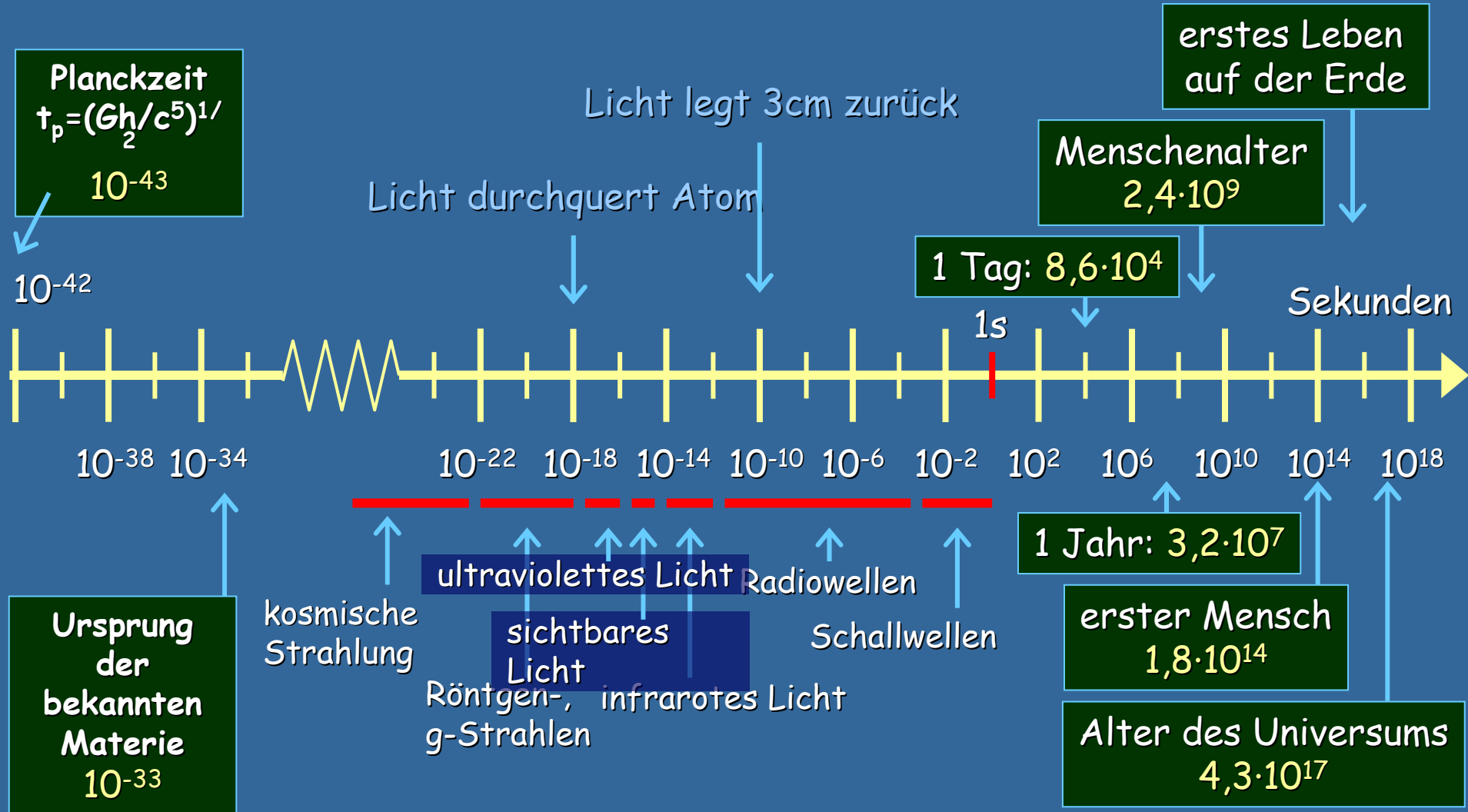


THE END

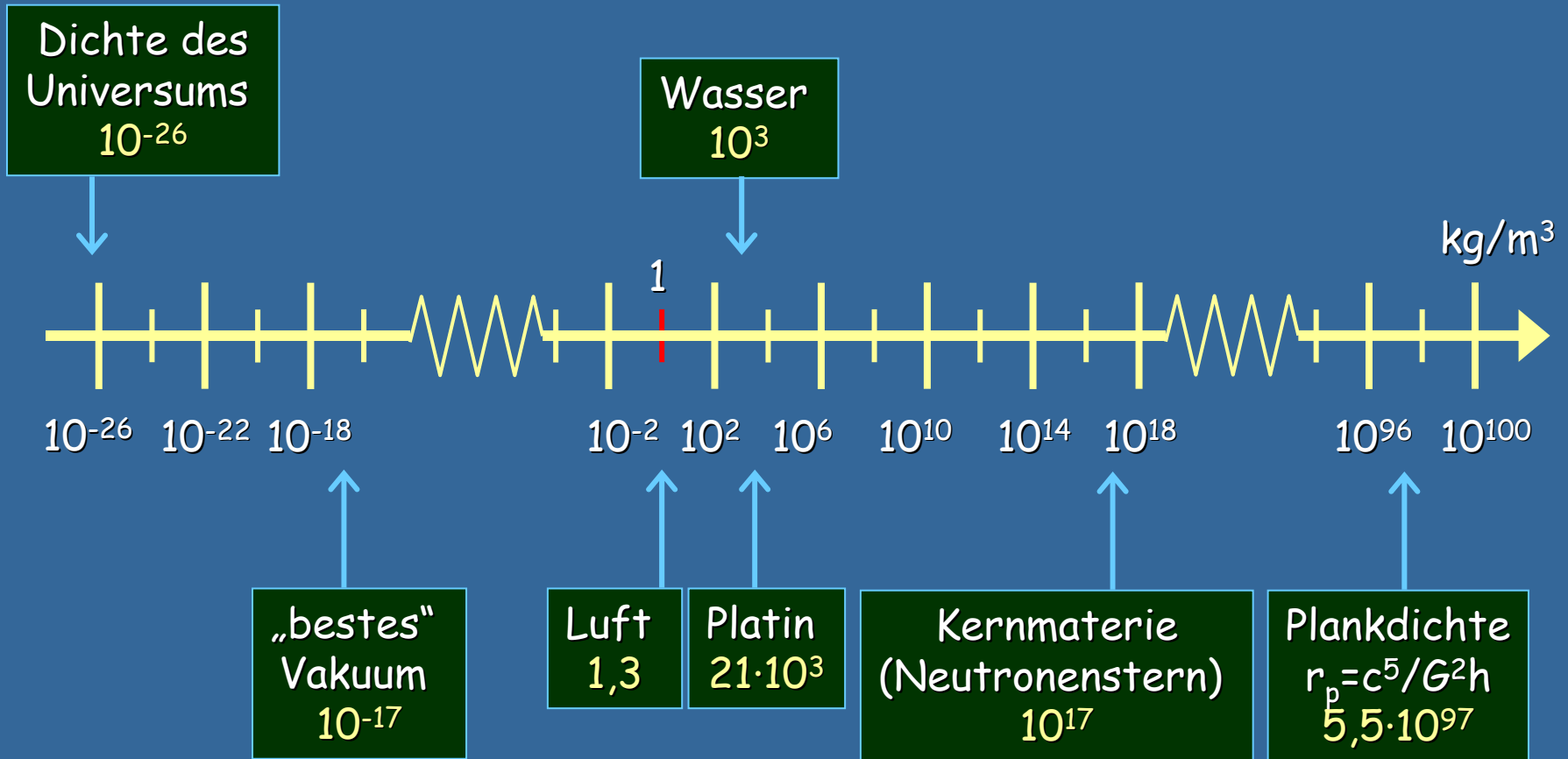
Längenskalen (logarithmische Darstellung)



Zeitskalen



Massendichte



Komplexität (Anzahl)

