



Kosmische Evolution für Nicht-Physiker:
Wie unser Weltall wurde, was es heute ist

2. Astronomischer Überblick: Was kosmische Evolution alles erklären soll

Knud Jahnke, MPIA

“Dinge sind passiert.”

(@delcantonJD auf Twitter)

“Dinge sind passiert.”

(@delcantonJD auf Twitter)

“Aber welche und wie?”

(die Menschheit)



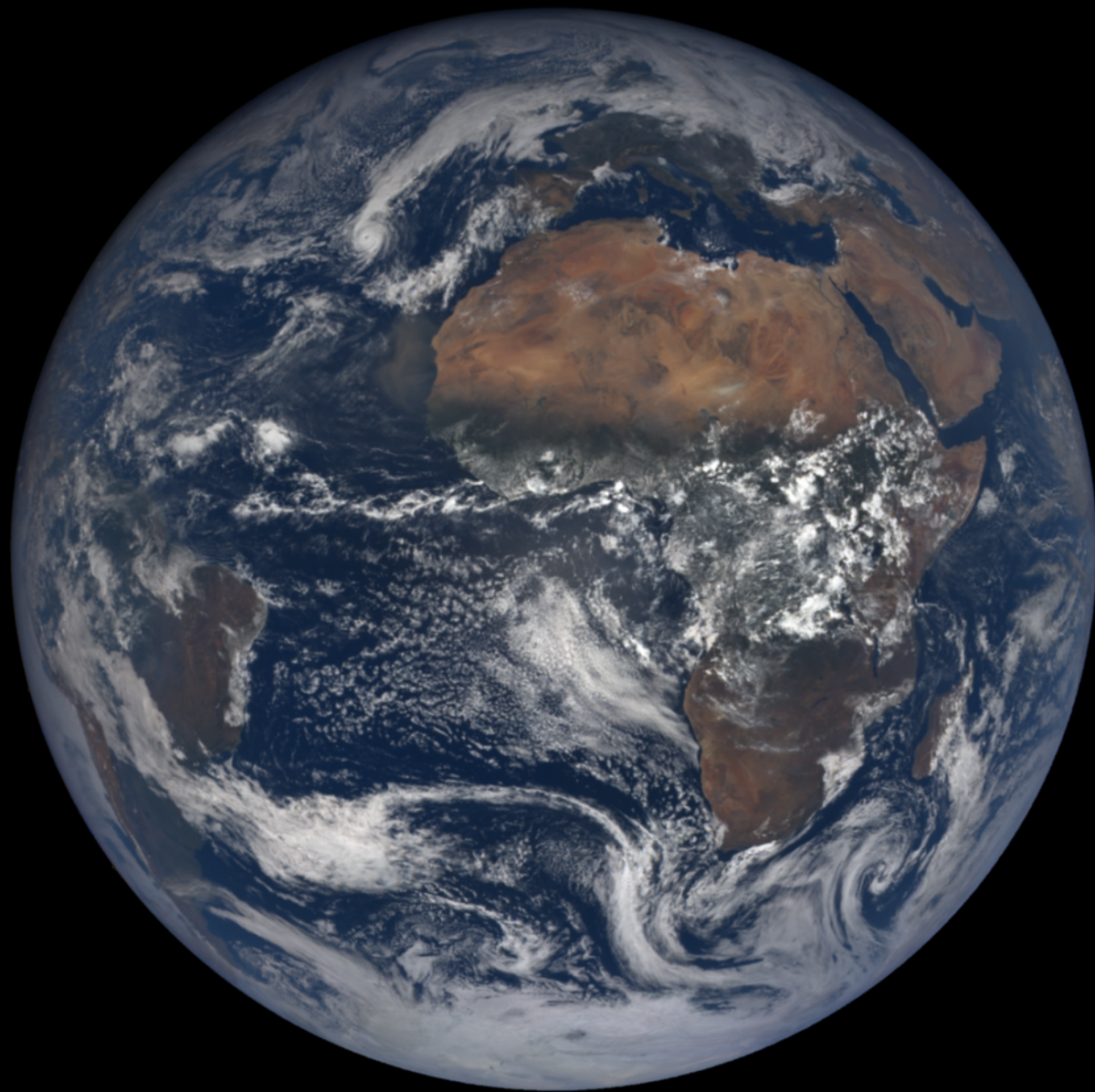
Was sind die Fragen?

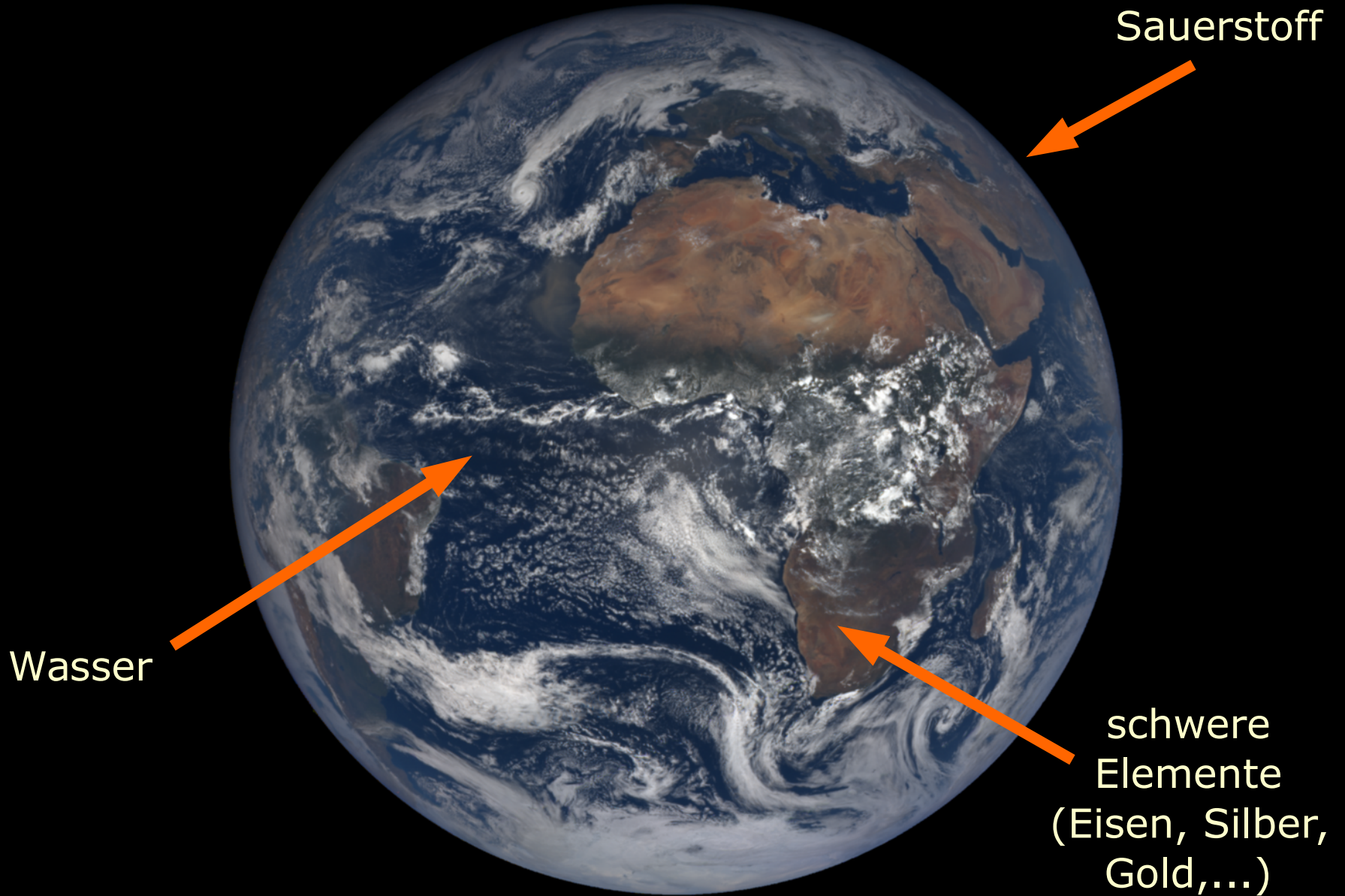


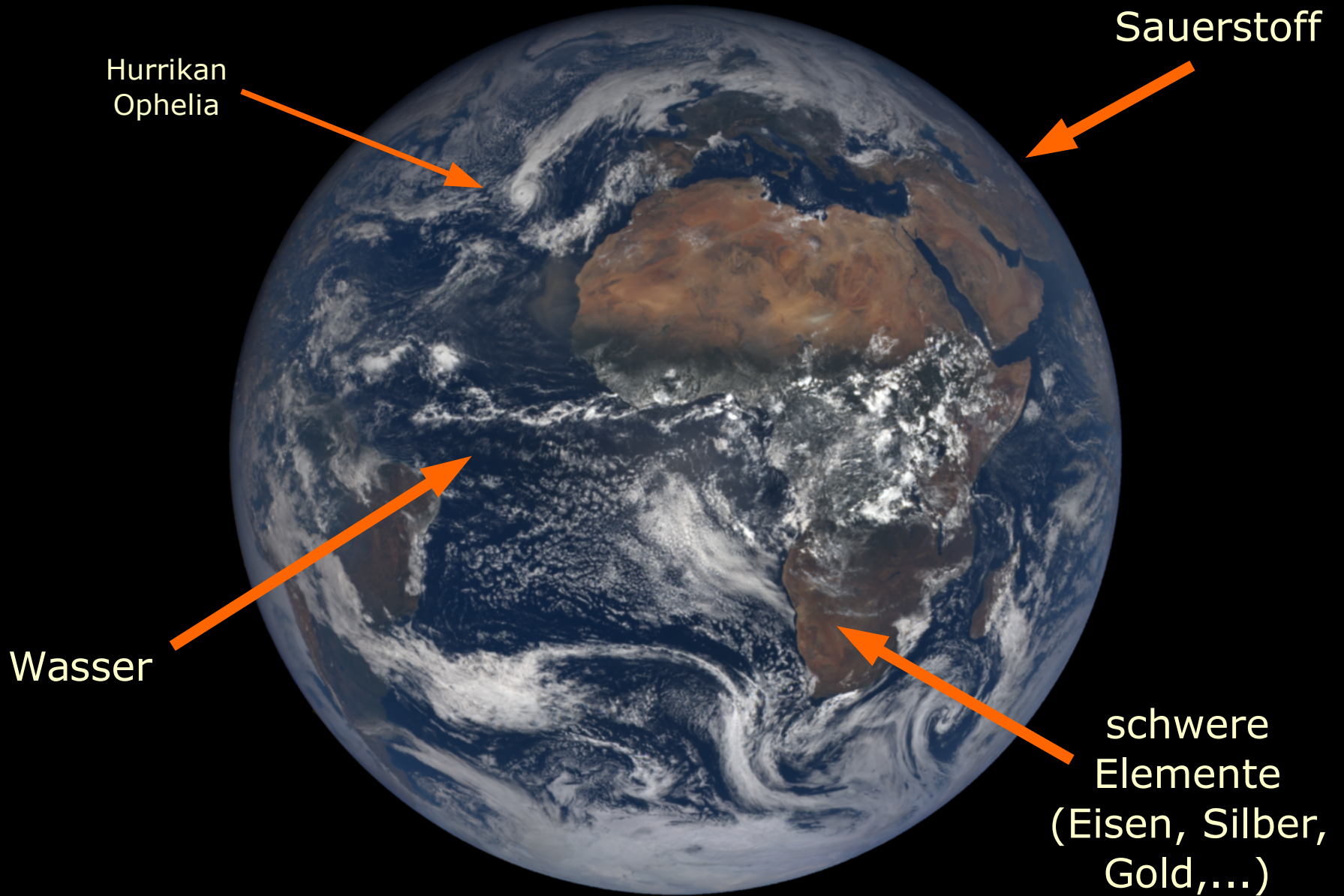
Was sind die Fragen?

Wie könnten wir sie beantworten?









Hurrikan
Ophelia

Sauerstoff

Wasser

schwere
Elemente
(Eisen, Silber,
Gold,...)

1. Wie ist die Erde entstanden?

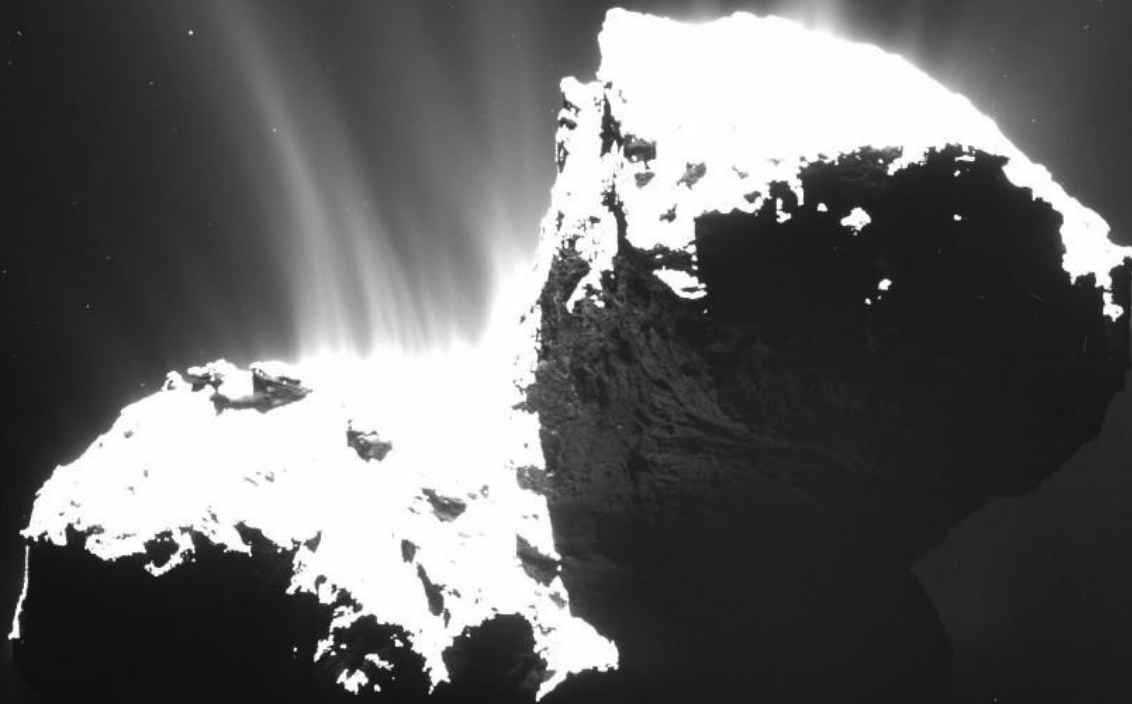
1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?

1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?

(Wie entstehen Wettersysteme? → Meteorologie)

1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?

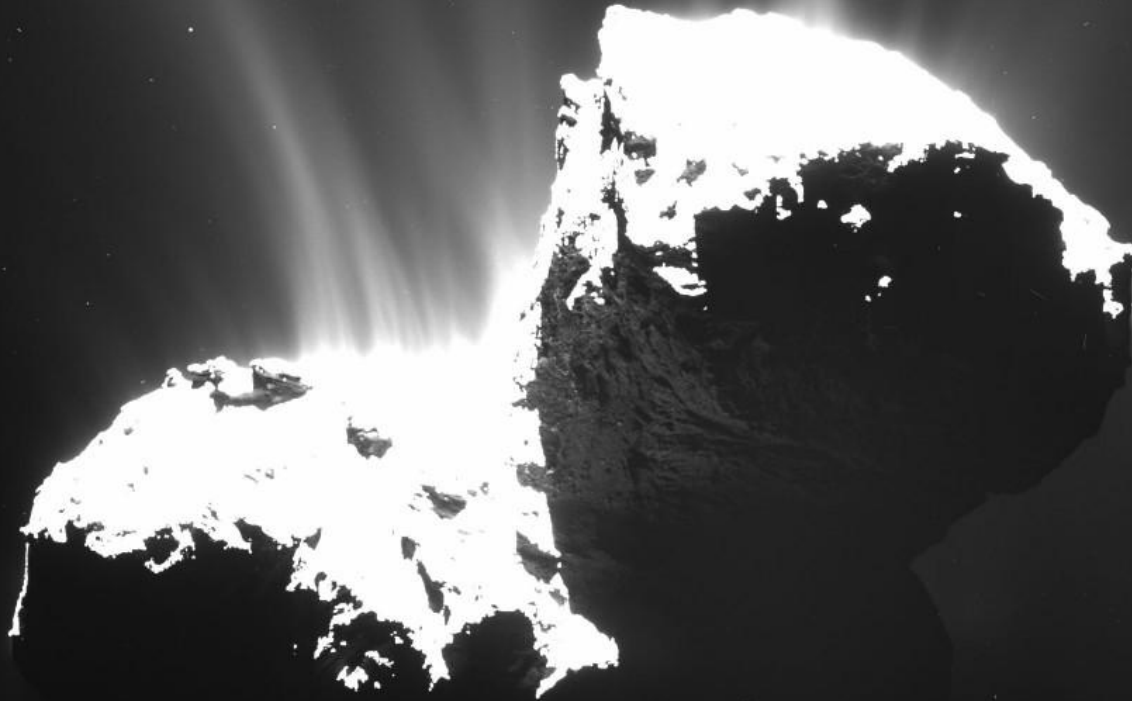
Komet 67P



ESA/Rosetta Osiris

Wasser-
"Jets"

Komet 67P



ESA/Rosetta Osiris

1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?

1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?

Komet 67P: 14–33% Wasser(eis); 1,4–3,3 km³
(~Starnberger See)

Geminiden Meteorstrom



NASA/JPL

1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?

Komet 67P: 14–33% Wasser(eis); 1,4–3,3 km³
(~Starnberger See)

1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?

Komet 67P: 14–33% Wasser(eis); 1,4–3,3 km³
(~Starnberger See)

Meteoriten: 16.000 Tonnen Material pro Jahr

Leben

Wasser + Energie + ??? = Leben?

Wasser + Energie + ??? = Leben?

Atmosphäre, Aminosäuren, DNA, RNA, Evolution,
habitable Zonen, Gravitation,
Sonneneinstrahlung, Gezeiten, Kontinente,
Polkappen, CO₂, Treibhauseffekt, Gamma-Ray-
Bursts, Aktive Galaxienkerne, UV-Strahlung,
Röntgenstrahlung, stabile Orbits,
Mehrfachsterne, Riesenplaneten, feste
Oberfläche,...

Leben

Wasser + Energie + ??? = Leben?

Atmosphäre, Aminosäuren, DNA, RNA, Evolution,
habitable Zonen, Gravitation,
Sonneneinstrahlung, Gezeiten, Kontinente,
Polkappen, CO₂, Treibhauseffekt, Gamma-Ray-
Bursts, Aktive Galaxienkerne, UV-Strahlung,
Röntgenstrahlung, stabile Orbits,
Mehrfachsterne, Riesenplaneten, feste
Oberfläche,...

→ das meiste: Biologie + Chemie, aber:

Wasser + Energie + ??? = Leben?

Atmosphäre, Aminosäuren, DNA, RNA, Evolution,
habitable Zonen, Gravitation,
Sonneneinstrahlung, Gezeiten, Kontinente,
Polkappen, CO₂, Treibhauseffekt, Gamma-Ray-
Bursts, Aktive Galaxienkerne, UV-Strahlung,
Röntgenstrahlung, stabile Orbits,
Mehrfachsterne, Riesenplaneten, feste
Oberfläche,...

→ das meiste: Biologie + Chemie, aber:

3. Was sind Mindestbedingungen für Leben?



K. Jahnke

Mond

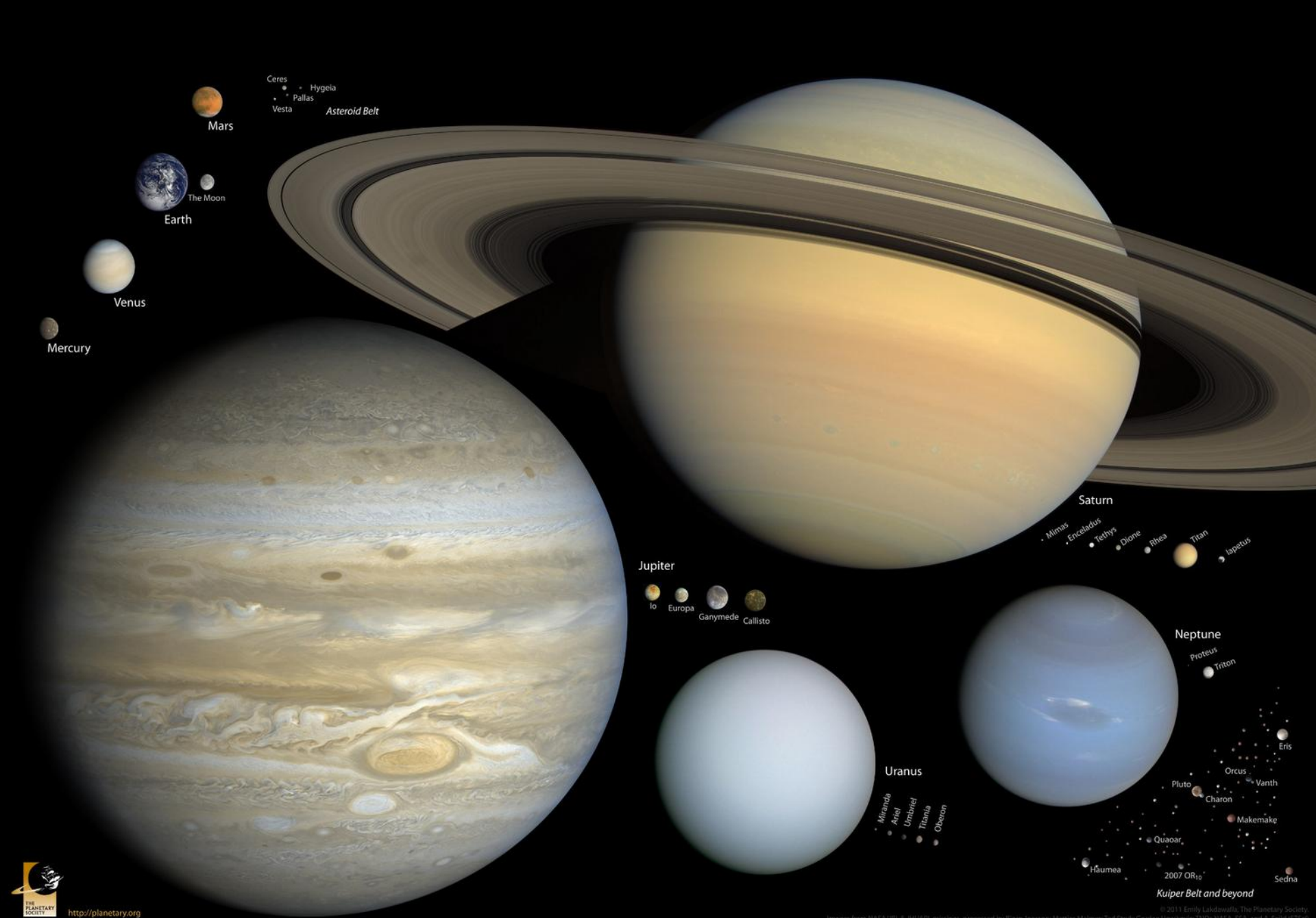


Mars



Venus





<http://planetary.org>

Images from NASA/JPL & JHUAPL missions, processed by Björn Jansson, Mattias Malmén, Ted Stryk, Gordan Ugarkovic; TNOs NASA, ESA, and A. Feldt (STScI)

Emily Lakdawalla/The Planetary Society

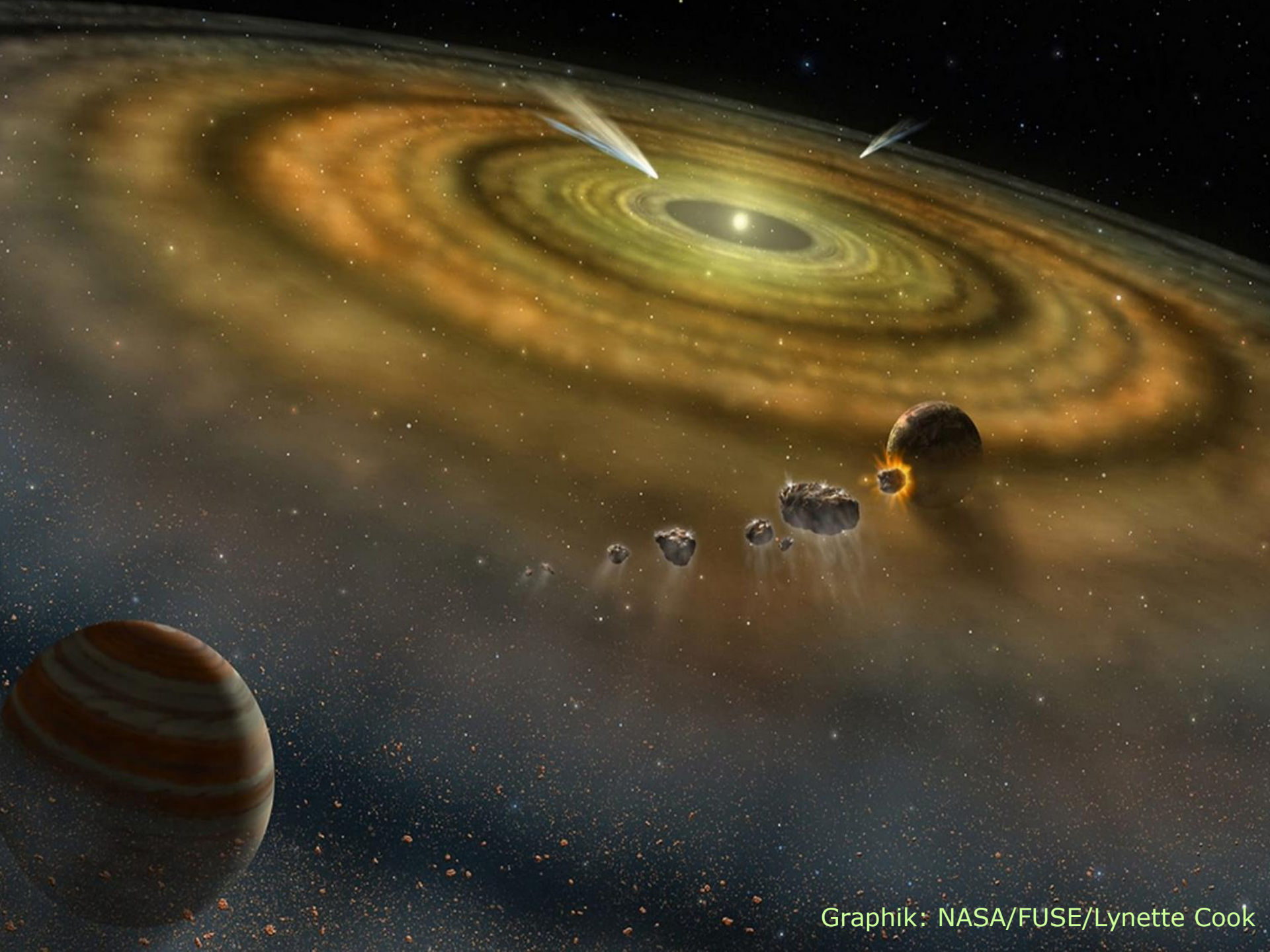
Planeten

Steinplaneten + Gasriesen + Asteroidengürtel

Planeten

Steinplaneten + Gasriesen + Asteroidengürtel

Sonnen-"System" = gemeinsame Entstehung

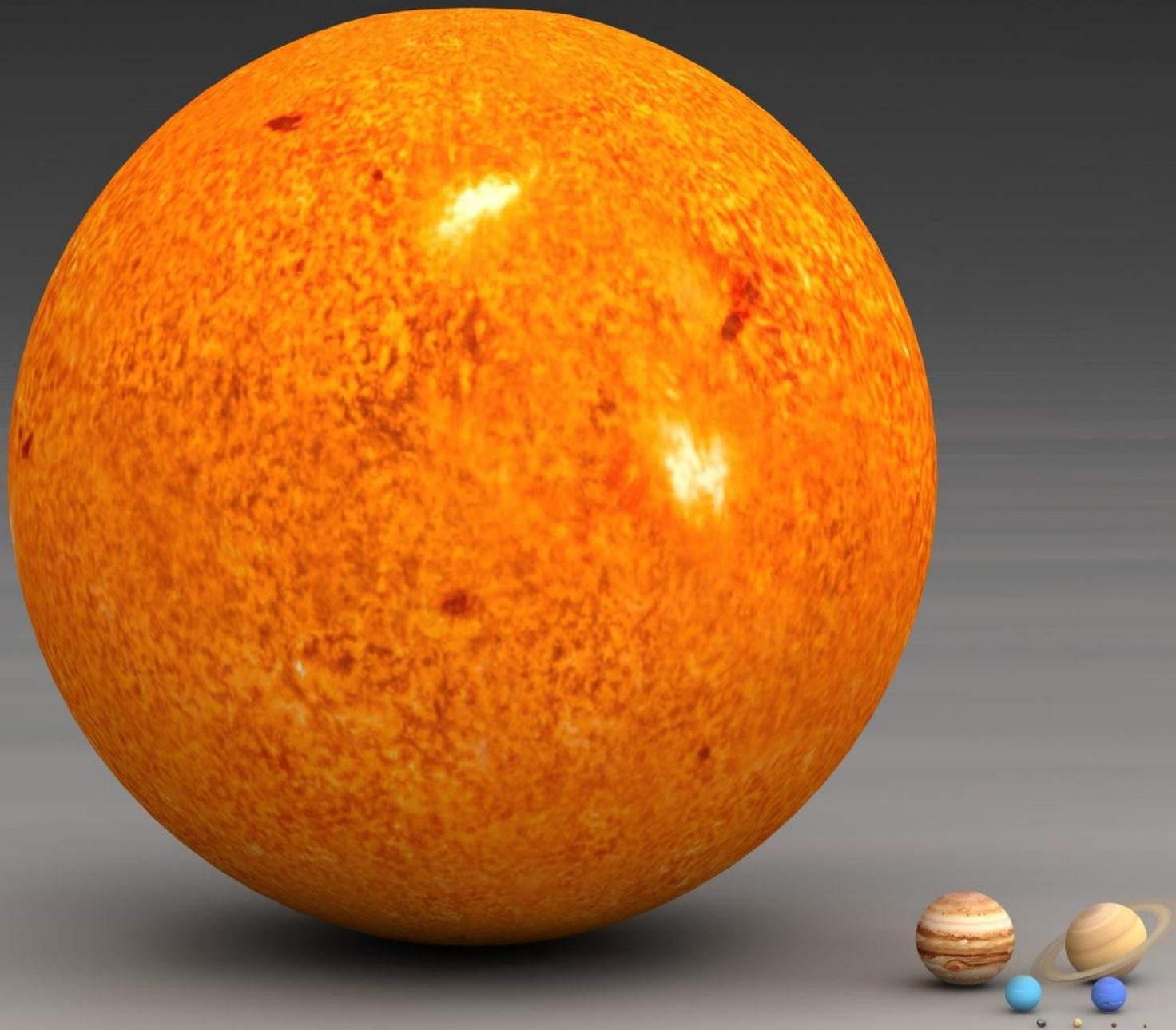


Graphik: NASA/FUSE/Lynette Cook

Was ist ein Planet?

Was ist ein Planet?

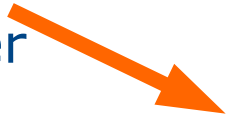
Was ist ein Stern?



Was ist ein Planet?

Was ist ein Stern?

leuchtet
nicht selber



Was ist ein Planet?

Was ist ein Stern?

leuchtet
nicht selber



Was ist ein Planet?

Was ist ein Stern?



Kernfusion,
leuchtet

Es gibt mehr Sterne als die Sonne...

Es gibt mehr Sterne als die Sonne...

im beobachtbaren Universum:

ca. 100.000.000.000.000.000.000.000 ($\sim 10^{23}$)

Es gibt mehr Sterne als die Sonne...

im beobachtbaren Universum:

ca. 100.000.000.000.000.000.000.000 ($\sim 10^{23}$)

4. Wie sind die Sterne entstanden?

Planeten

Andere Sterne, andere ... Planeten?

Planeten

Andere Sterne, andere ... Planeten?

→ Exoplaneten

Planeten

Andere Sterne, andere ... Planeten?

→ Exoplaneten

1988–91: erster bestätigter Nachweis

Planeten

Andere Sterne, andere ... Planeten?

→ Exoplaneten

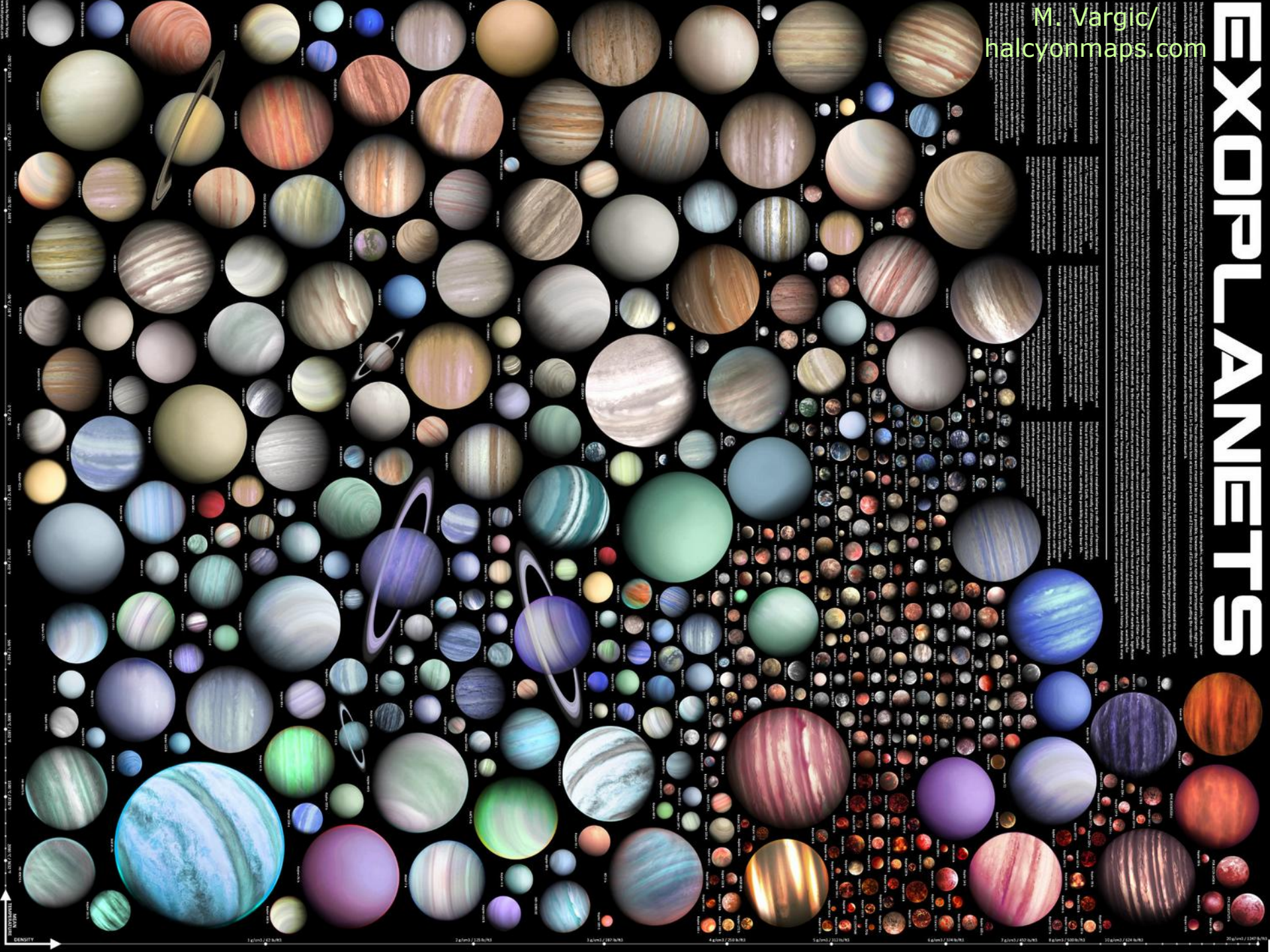
1988–91: erster bestätigter Nachweis

Heute:

3671 Exoplaneten in 2751 Sternsystemen
(Stand 1.10.2017)

EXOPLANETS

M. Vargic/
halcyonmaps.com



Sind dies Fotos?

“Beobachten” = Signale detektieren + analysieren

“Beobachten” = Signale detektieren + analysieren

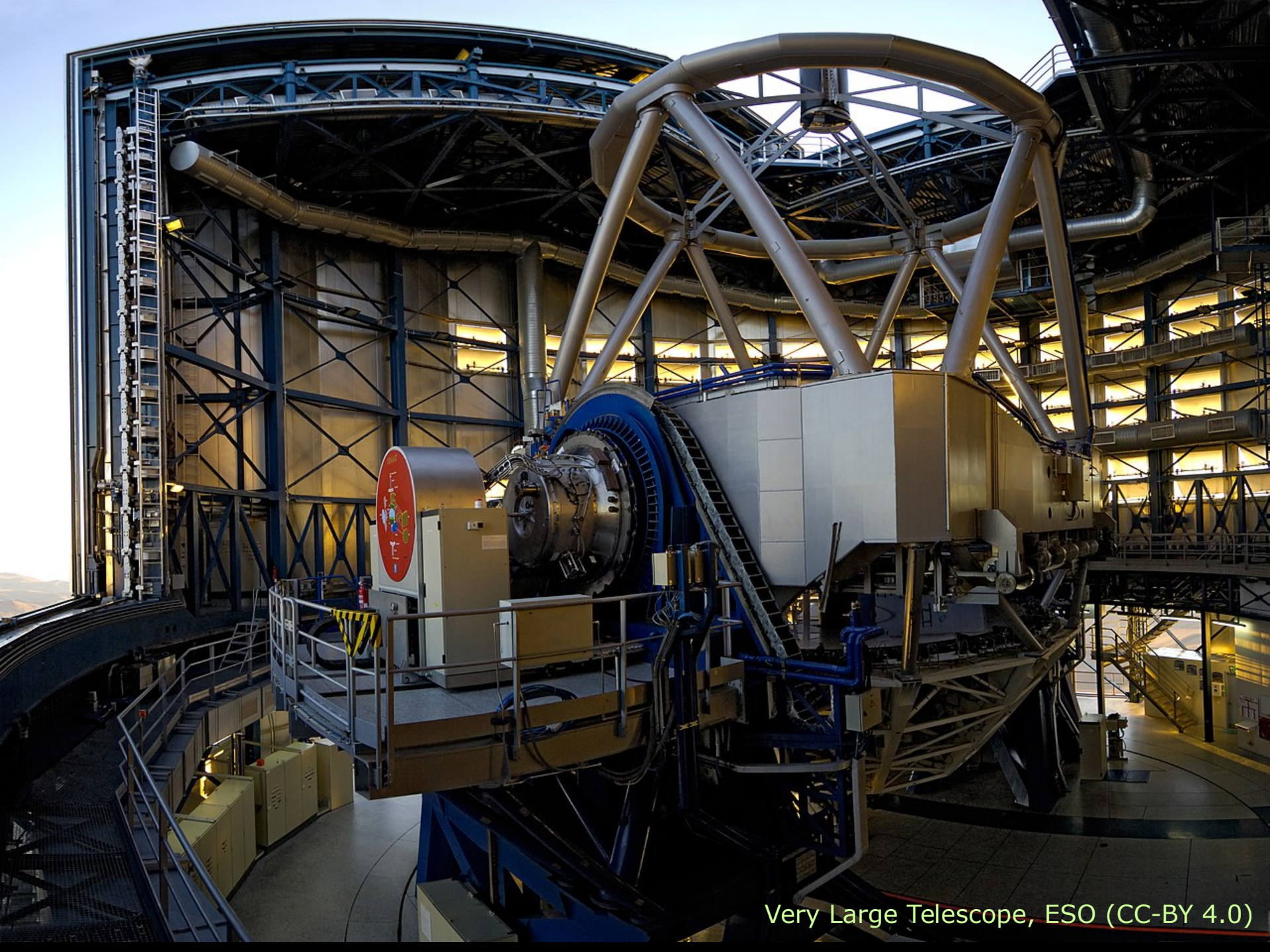
Elektromagnetische Signale = Licht (Astronomie)

Neutronen/Protonen (Astroteilchenphysik)

Gravitationswellen (Grav.-Wellenastronomie)



Very Large Telescope, ESO (CC-BY 4.0)



Very Large Telescope, ESO (CC-BY 4.0)



Extremely Large Telescope, ~2025 (ESO)

Hubble Weltraumteleskop (NASA/ESA)



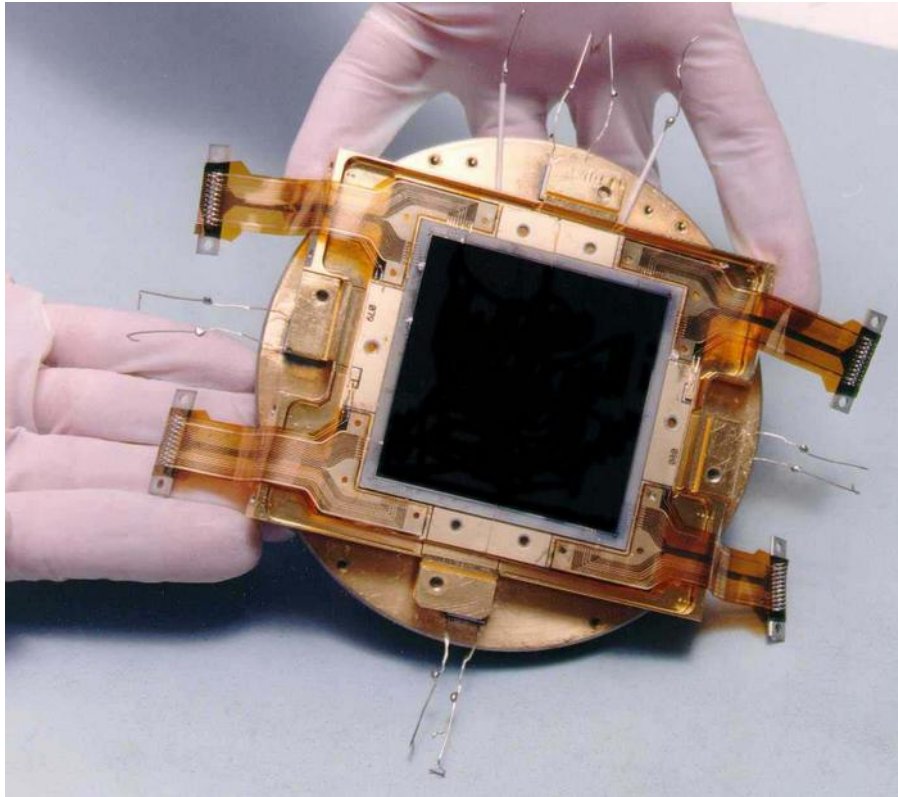
James Webb Space Telescope. 2019 (NASA)





ALMA, ESO/C. Malin (CC-BY 4.0))

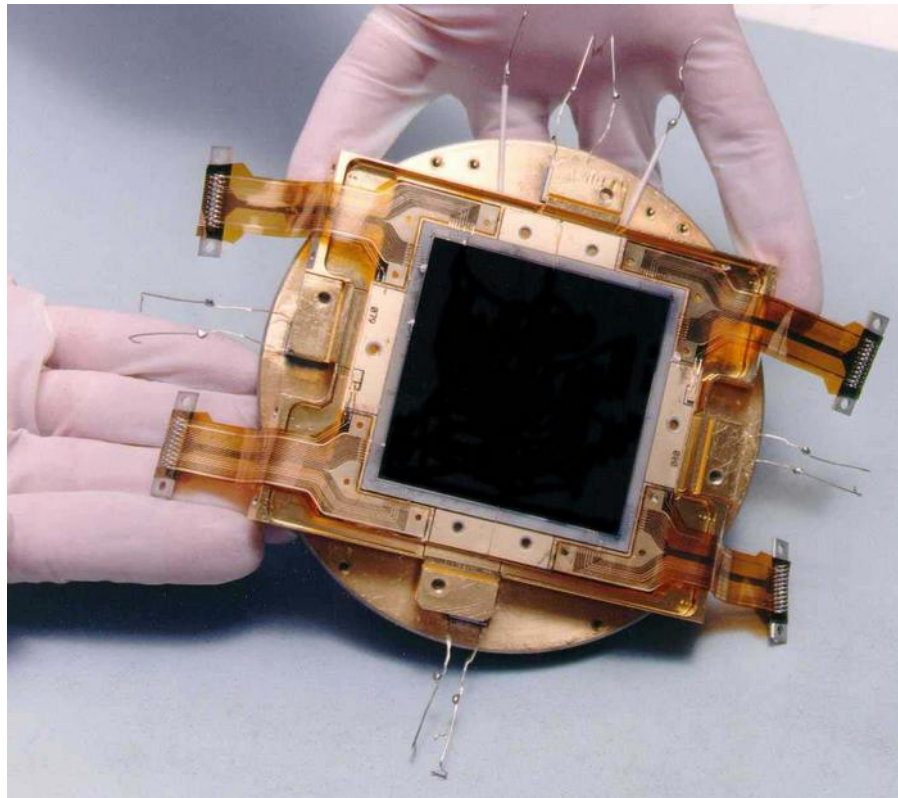
Elektromagnetische Signale = Licht (Astronomie)



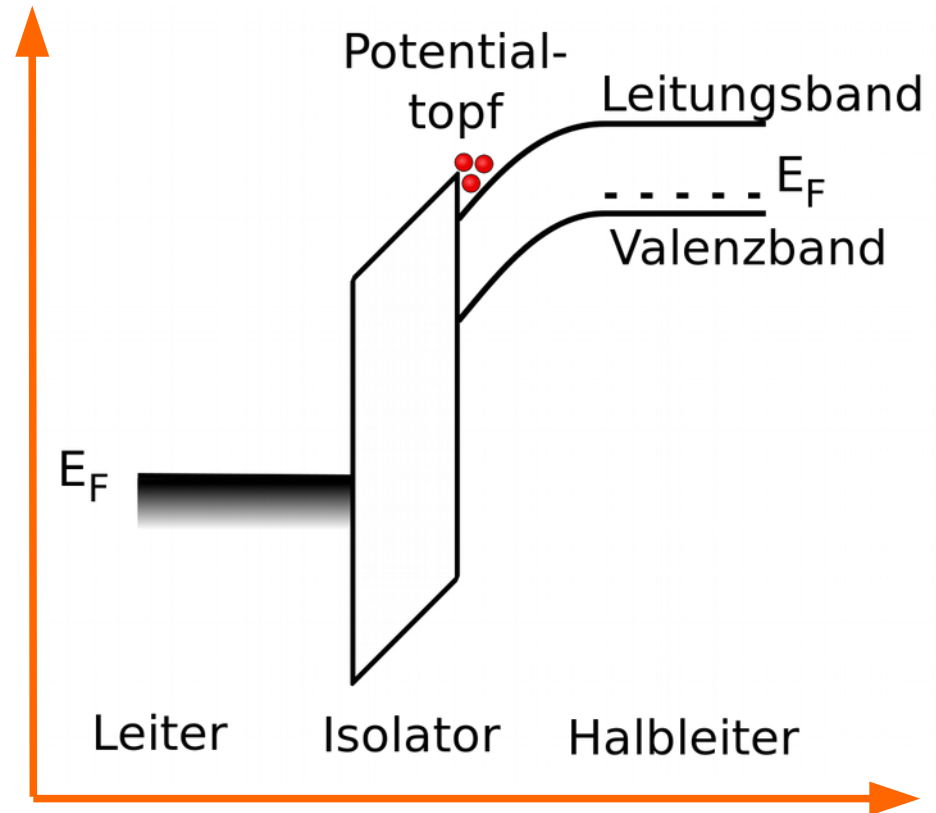
Teledyne-e2V

Elektromagnetische Signale = Licht (Astronomie)

Energie



Teledyne-e2V



Wikipedia (CC BY-SA 2.0)

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen



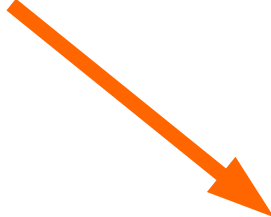
Photonen vom
astronomischen
Objekt

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen



Photonen vom
astronomischen
Objekt



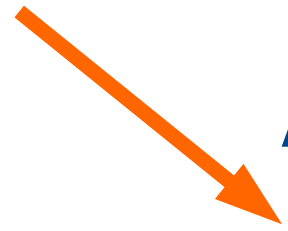
Ausleserauschen
Detektoren
Photonen Hintergrund

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen



Photonen vom
astronomischen
Objekt



Ausleserauschen
Detektoren
Photonen Hintergrund

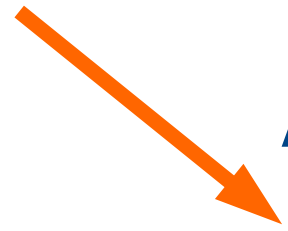
$$S/R = S / \sqrt{H+A^2}:$$

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen



Photonen vom
astronomischen
Objekt



Ausleserauschen
Detektoren
Photonen Hintergrund

$$S/R = S / \sqrt{H+A^2}:$$

$$S = 100 \text{ Photonen} \rightarrow 100 \text{ Elektronen}$$

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen



Photonen vom
astronomischen
Objekt

Ausleserauschen
Detektoren

Photonen Hintergrund

$$S/R = S / \sqrt{H+A^2}:$$

$S = 100$ Photonen $\rightarrow$ 100 Elektronen

$H = 100$ Photonen $\rightarrow$ 100 Elektronen

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen



Photonen vom
astronomischen
Objekt

Ausleserauschen
Detektoren
Photonen Hintergrund

$$S/R = S / \sqrt{H+A^2}:$$

$S = 100$ Photonen $\rightarrow$ 100 Elektronen

$H = 100$ Photonen $\rightarrow$ 100 Elektronen

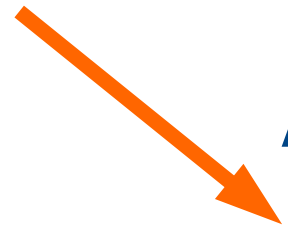
$A = 10$ Elektronen

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 1: Signal zu Rauschen



Photonen vom
astronomischen
Objekt



Ausleserauschen
Detektoren
Photonen Hintergrund

$$S/R = S / \sqrt{H+A^2}:$$

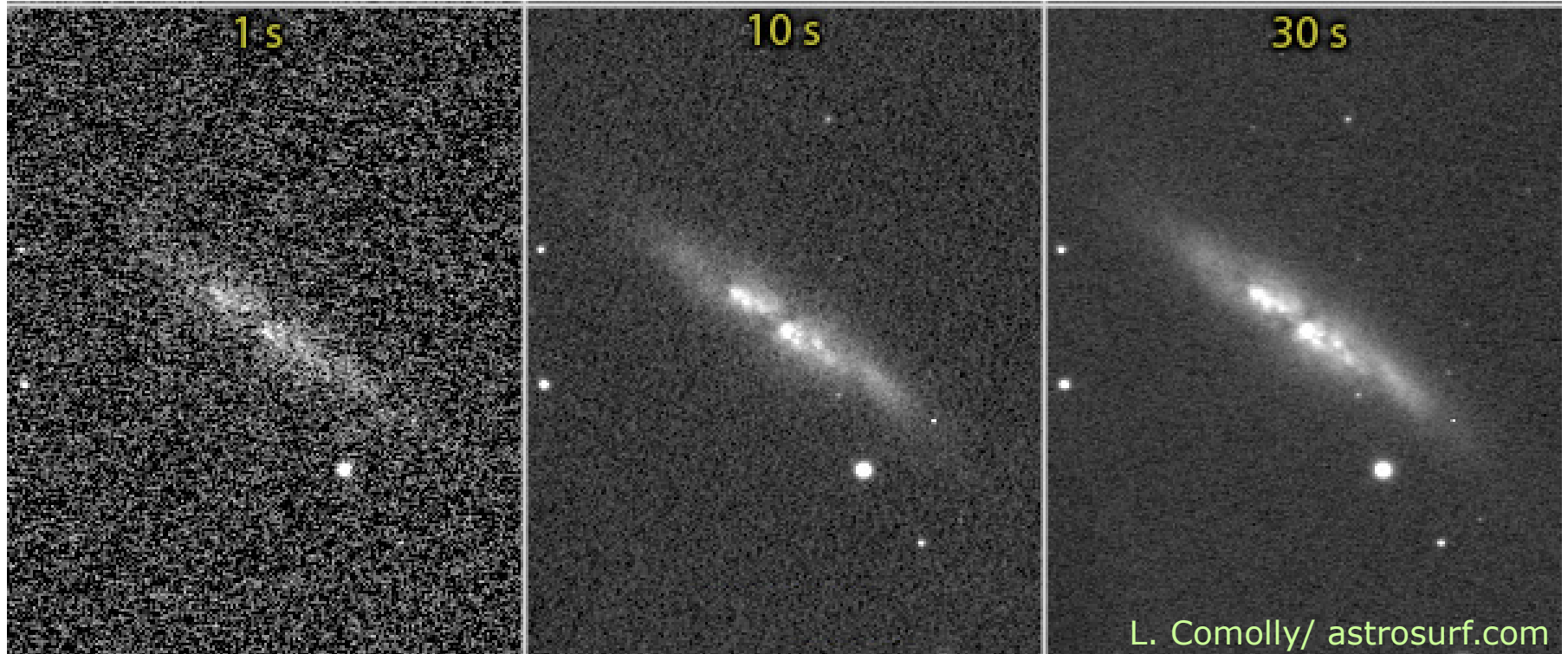
$$S = 100 \text{ Photonen} \rightarrow 100 \text{ Elektronen}$$

$$H = 100 \text{ Photonen} \rightarrow 100 \text{ Elektronen}$$

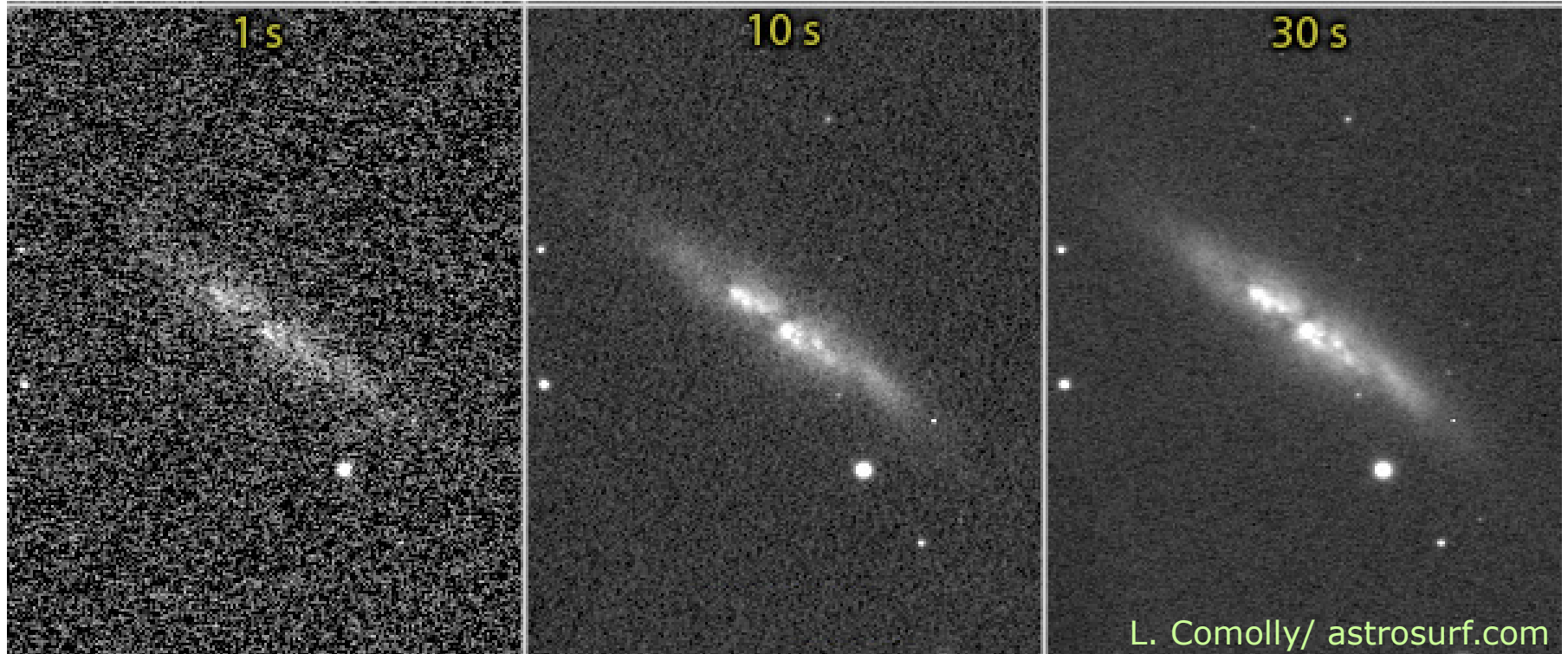
$$A = 10 \text{ Elektronen}$$

$$S/R = 100 / \sqrt{100+10^2} = 100/\sqrt{200} \sim 7$$

Was ist "beobachtbar"?



Was ist "beobachtbar"?



Bei $S=100$ ph/s, $H=100$ ph/s, $A=10$ e:

1s: $S/R = 100 / \sqrt{100 + 10^2} \sim 7$

10s: $S/R = 1000 / \sqrt{1000 + 10^2} \sim 30$

30s: $S/R = 3000 / \sqrt{3000 + 10^2} \sim 54$

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda/D$$

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda / D$$

φ = kleinster auflösbarer Winkel

λ = Wellenlänge

D = Durchmesser Teleskop

Hubble Weltraumteleskop (NASA/ESA)



Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda / D$$

φ = kleinster auflösbarer Winkel

λ = Wellenlänge

D = Durchmesser Teleskop

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda/D$$

φ = kleinster auflösbarer Winkel

λ = Wellenlänge

D = Durchmesser Teleskop

z.B.: Hubble, Weltraum

$\lambda = 500\text{nm}$, $D = 2,4\text{m} \rightarrow 0,05''$ (Bogensekunden)



ALMA, ESO/C. Malin (CC-BY 4.0))

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda / D$$

φ = kleinster auflösbarer Winkel

λ = Wellenlänge

D = Durchmesser Teleskop

z.B.: Hubble, Weltraum

$\lambda = 500\text{nm}$, $D = 2,4\text{m} \rightarrow 0,05''$ (Bogensekunden)

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda / D$$

φ = kleinster auflösbarer Winkel

λ = Wellenlänge

D = Durchmesser Teleskop

z.B.: Hubble, Weltraum

$\lambda = 500\text{nm}$, $D = 2,4\text{m} \rightarrow 0,05''$ (Bogensekunden)

z.B.: ALMA, sub-Millimeter

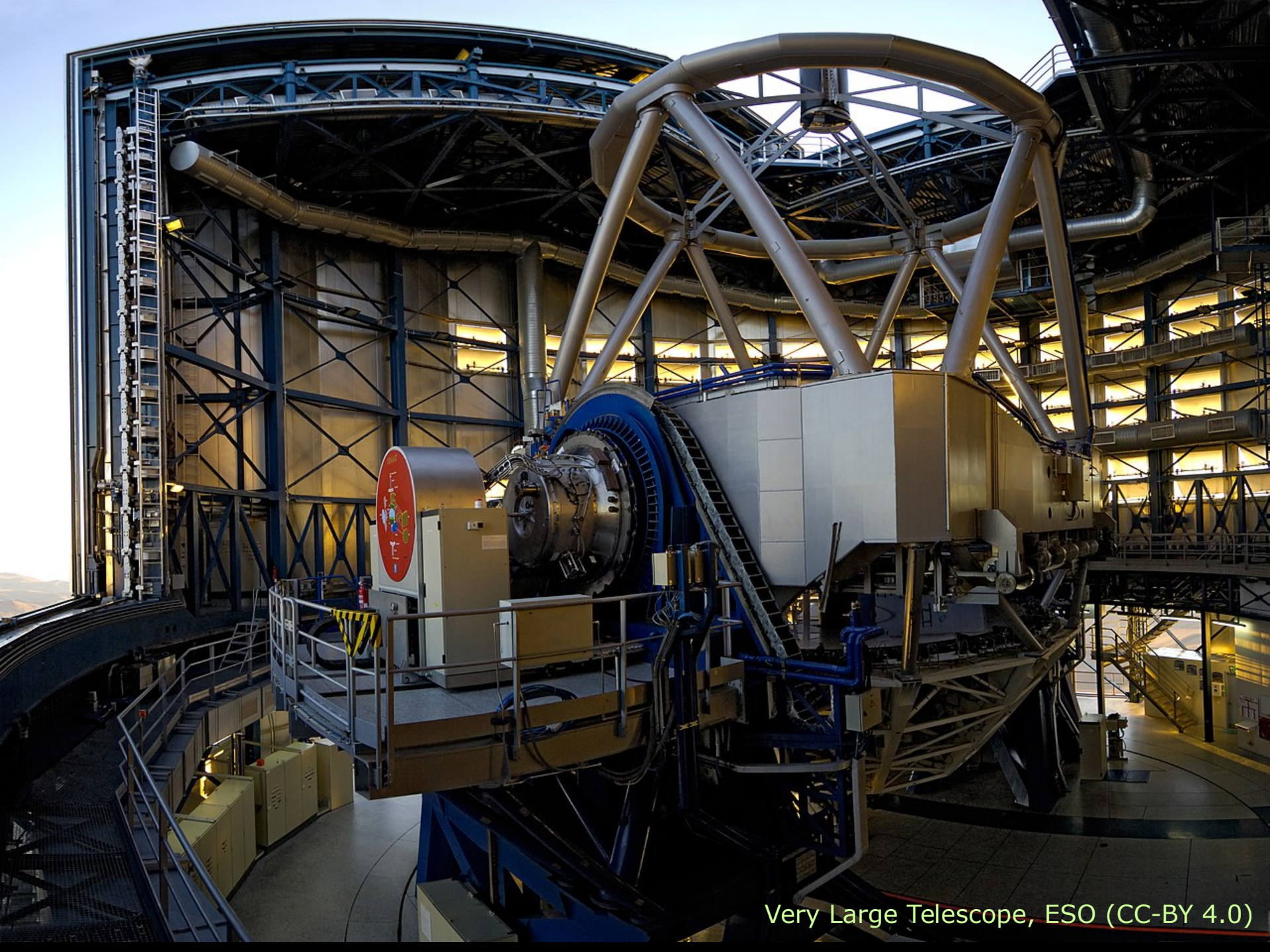
$\lambda = 0,3\text{mm}$, $D = 16\text{km} \rightarrow 0,005''$

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda/D$$

Grenze 2b: Unruhe der Atmosphäre ("Seeing")



Very Large Telescope, ESO (CC-BY 4.0)

Atmosphärisches "Seeing"

Einfallende ebene Lichtwellen

Warme
Luft

Kalte
Luft

Durch Brechungsindexvariationen (verursacht von warmer und kalter Luft) gestörte Lichtwellen

W. Brandtner/S. Hippler (MPIA)

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda/D$$

Grenze 2b: Unruhe der Atmosphäre ("Seeing")

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda/r_0$$

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda/D$$

Grenze 2b: Unruhe der Atmosphäre ("Seeing")

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda/r_0$$

$$r_0 \sim 10-20\text{cm}$$

Was ist "beobachtbar"?

Grenze 2a: Winkelauflösung (beugungsbegrenzt)

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda / D$$

Grenze 2b: Unruhe der Atmosphäre ("Seeing")

$$\sin(\varphi) = 1,22 \lambda / r_0$$

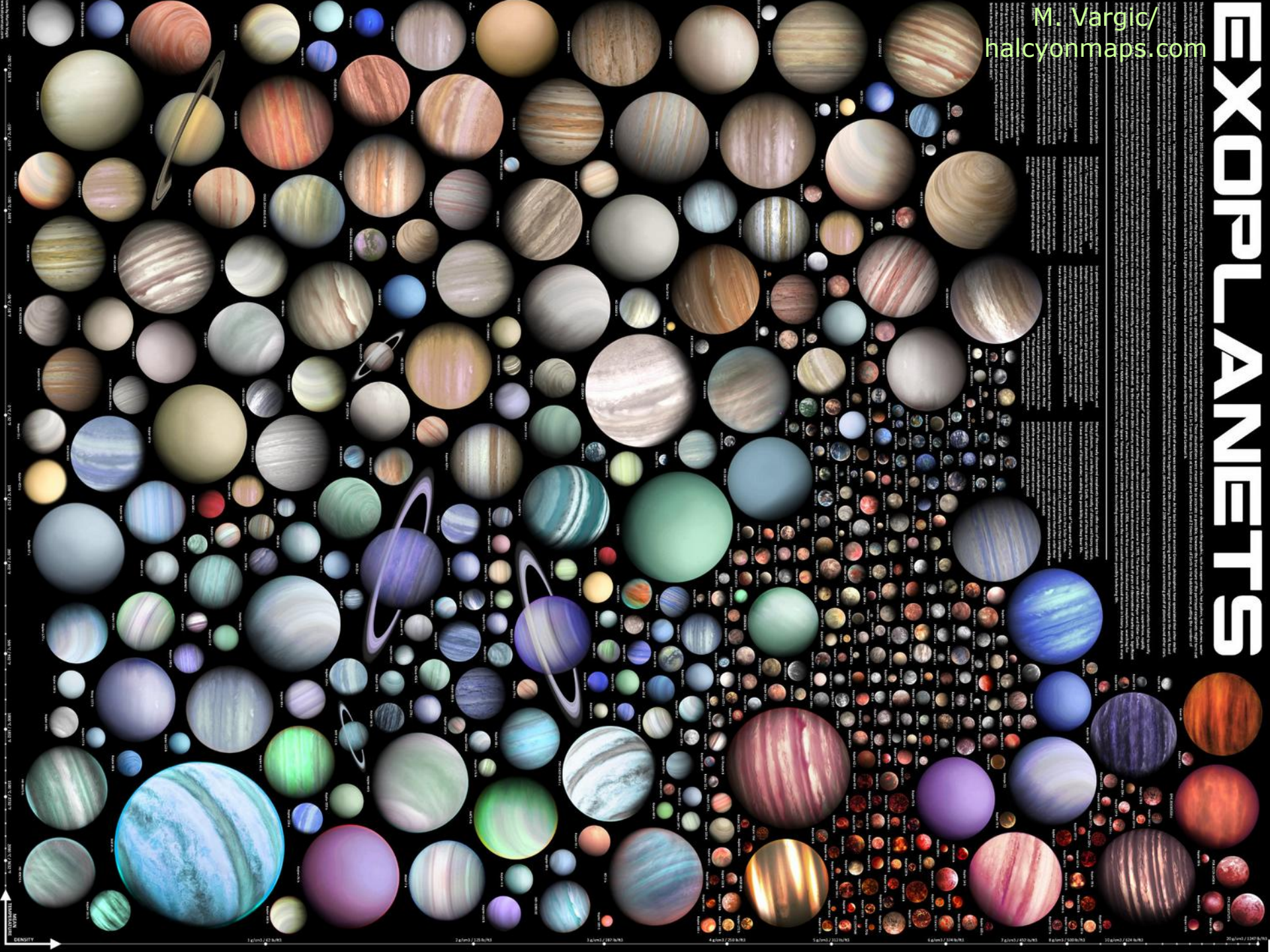
$$r_0 \sim 10-20 \text{ cm}$$

→ großes Teleskop: $> 20 \text{ cm} \rightarrow 0.65''$ Seeing

(nur mit Tricks besser: z.B. adaptive Optik)

EXOPLANETS

M. Vargic/
halcyonmaps.com



Sind dies Fotos?

Nein, weil:...

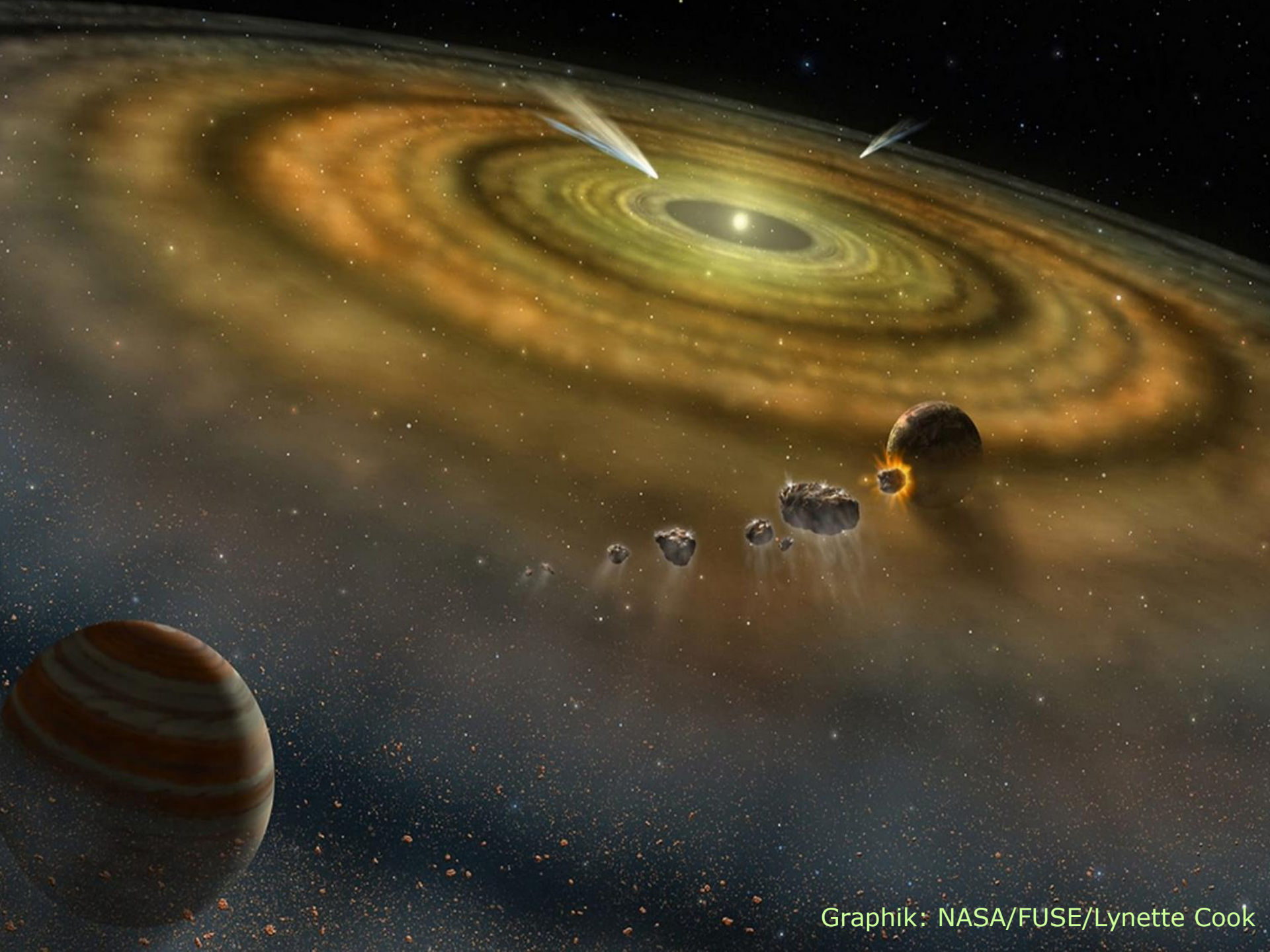
Sind dies Fotos?

Nein, weil:...

...zu kleiner Winkeldurchmesser

Sterne

Sonne ← ein Stern



Graphik: NASA/FUSE/Lynette Cook

Sterne

Sonne ← ein Stern

Sonne ← ein Stern

4. Wie sind die Sterne entstanden?

Sonne ← ein Stern

4. Wie sind die Sterne entstanden?

Wasserstoff-Wolke mit genug Masse → Kollaps
unter Schwerkraft → hoher Druck → hohe
Temperatur → Zündung Kernfusion → leuchten

Sonne ← ein Stern

4. Wie sind die Sterne entstanden?

Wasserstoff-Wolke mit genug Masse → Kollaps
unter Schwerkraft → hoher Druck → hohe
Temperatur → Zündung Kernfusion → leuchten

Wasserstoff + Gravitation = Kernfusion = Energie

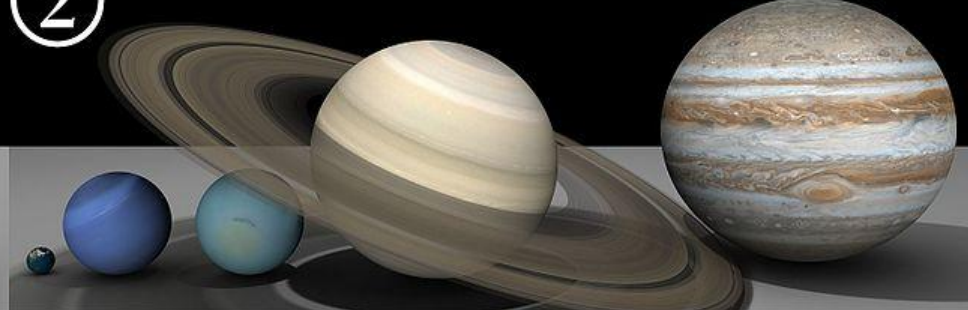
①

Mercury < Mars < Venus < Earth



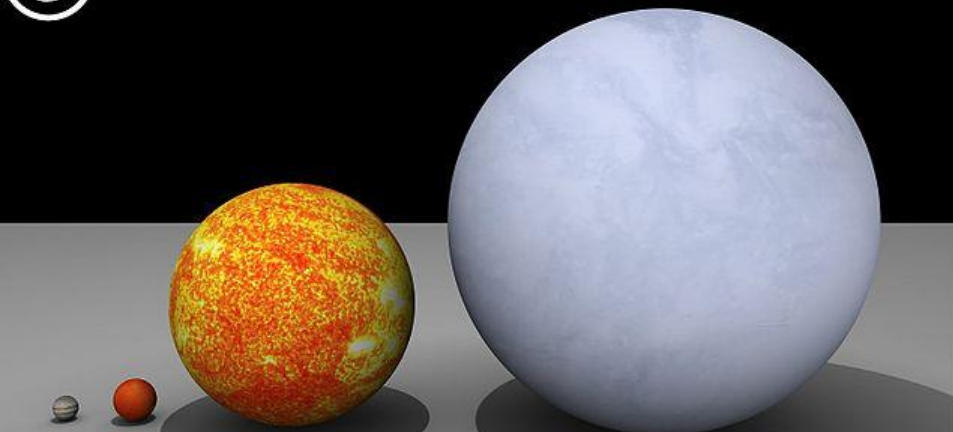
②

Earth < Neptune < Uranus < Saturn < Jupiter



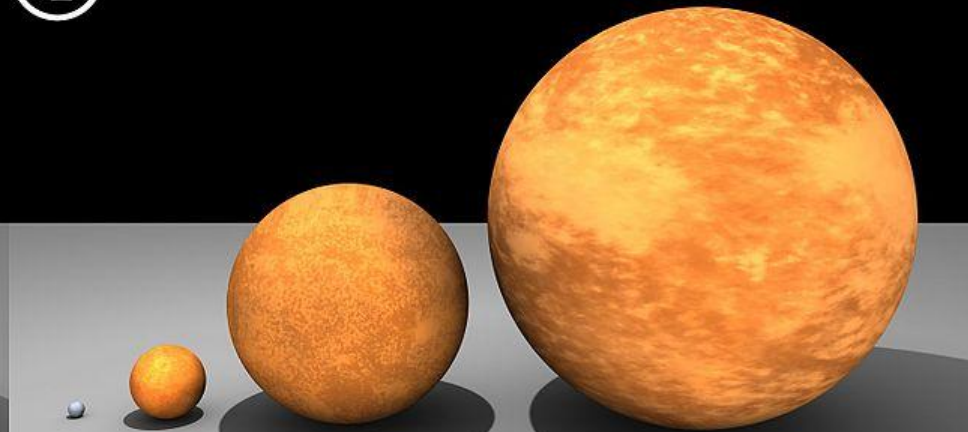
③

Jupiter < Wolf 359 < Sun < Sirius



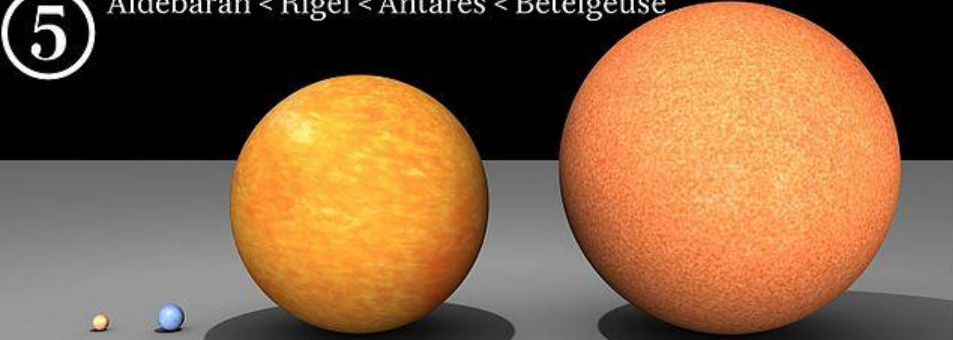
④

Sirius < Pollux < Arcturus < Aldebaran



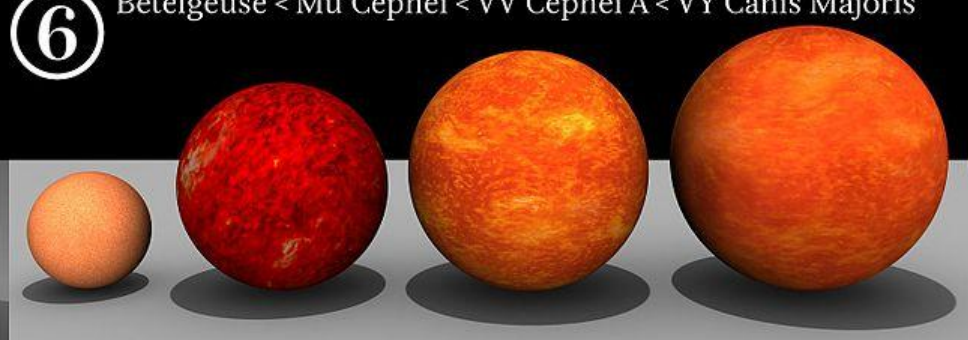
⑤

Aldebaran < Rigel < Antares < Betelgeuse



⑥

Betelgeuse < Mu Cephei < VV Cephei A < VY Canis Majoris



Unterschiede?

Unterschiede?

Entstehungszeit?

Lebensdauer?

Entwicklungsstadien?

Vorgänger?

Endprodukte?

OBAFGKM
Schwarzes
Kernfusion
Braune
Atmosphäre
Doppelsterne
Riesen
Riesenast
Alter
Molekülwolken
Weißer
Neutronenstern
asymptotischer
Population III
Loch
Hülle
Heliumbrennen
Schale
Leuchtkraft
Masse
Farbe
Wasserstoff
Rote
Supernova
Hauptreihe
Hayashilinie
Metallizität
Zwerge
Zwerg

Unterschiede?

Entstehungszeit?

Lebensdauer?

Entwicklungsstadien?

Vorgänger?

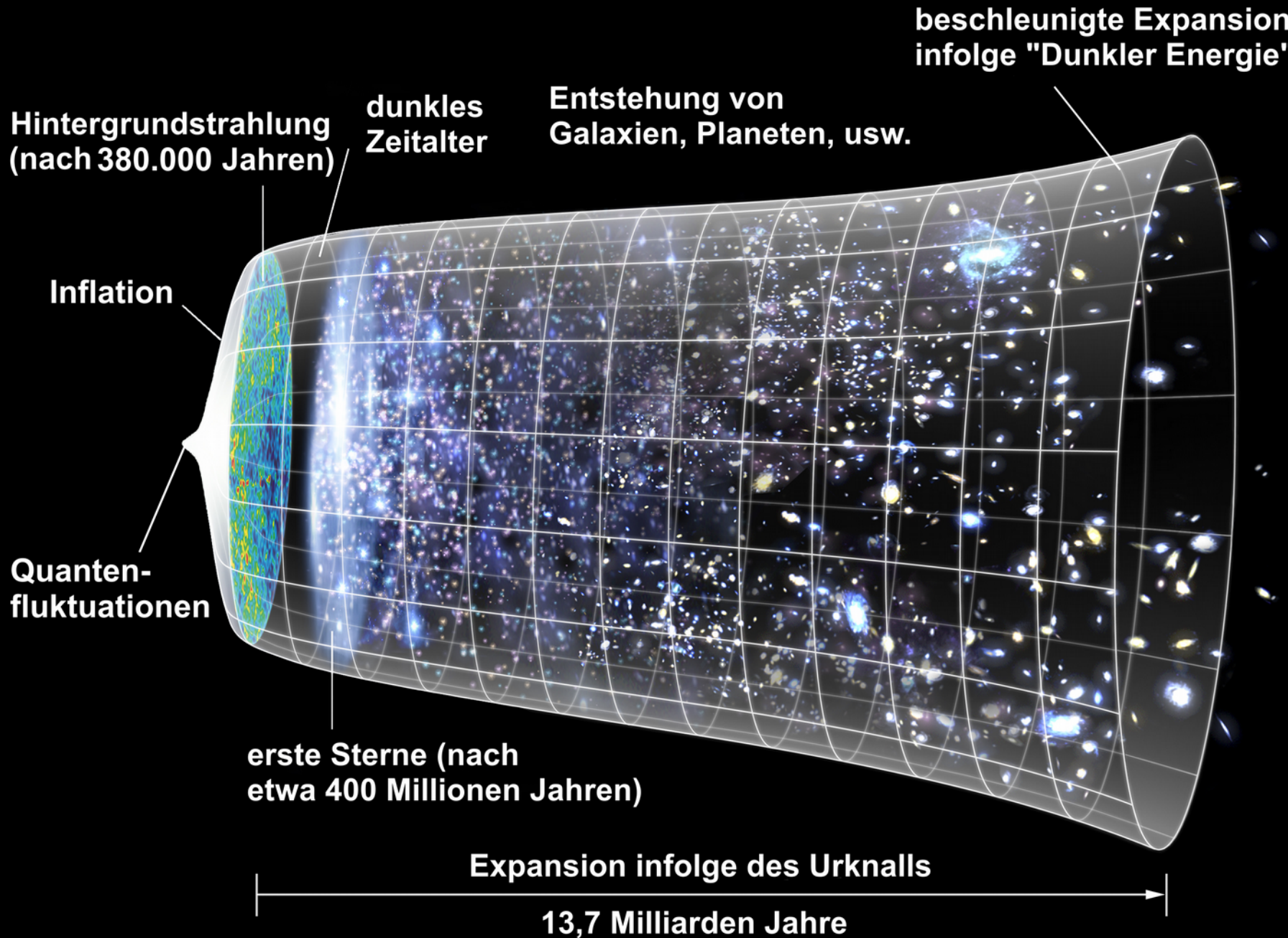
Endprodukte?

5. Welche unterschiedlichen Sterne gibt es und warum?

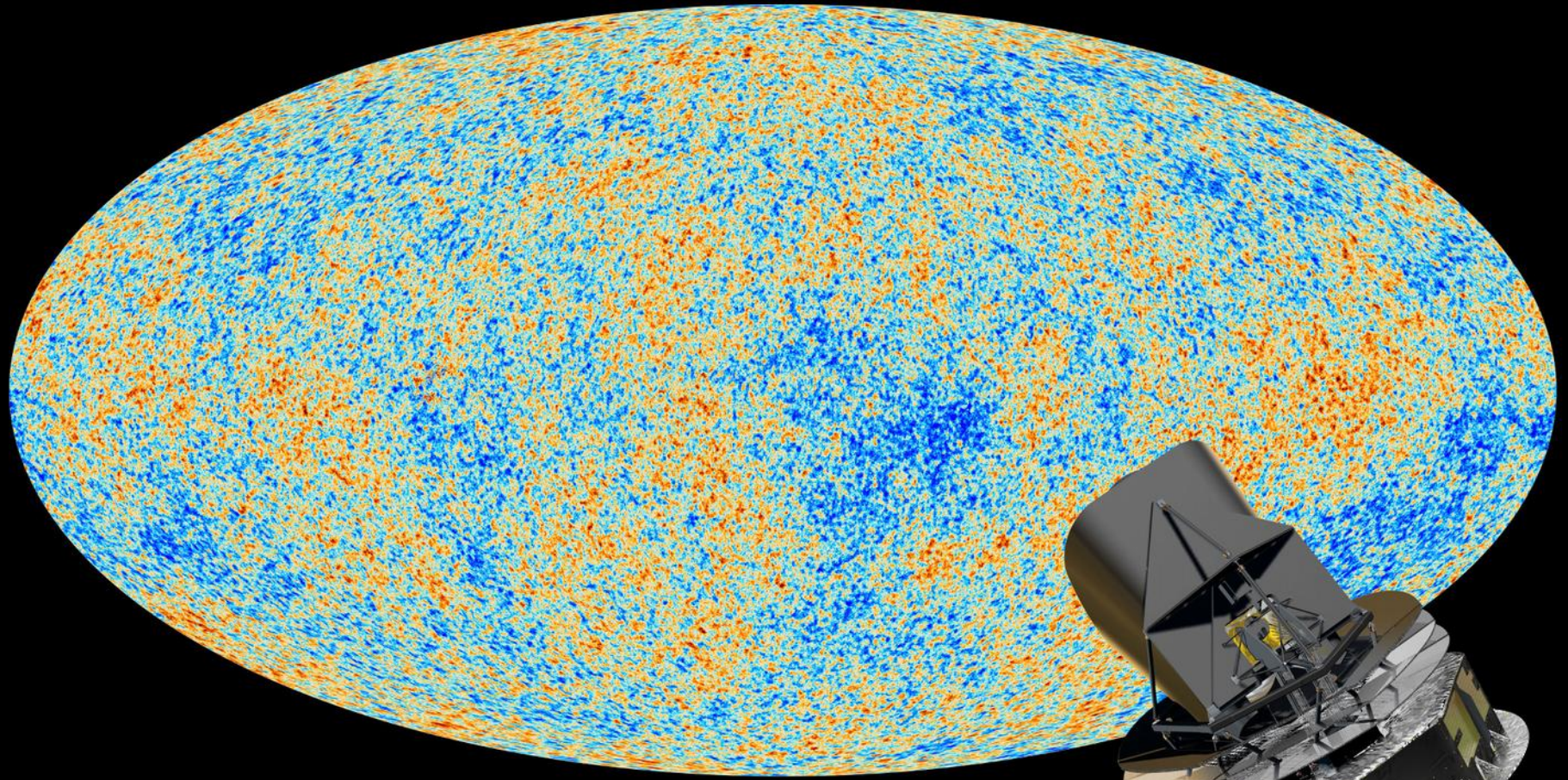
Der Urknall...

Der Urknall...

...seitdem: Expansion



2,7 Kelvin Hintergrundstrahlung



(~380.000 Jahre nach Urknall,
nur ca. 0,001% Variationen)

ESA Planck Mission

Urknall

6. Was war der Urknall? Was war davor?

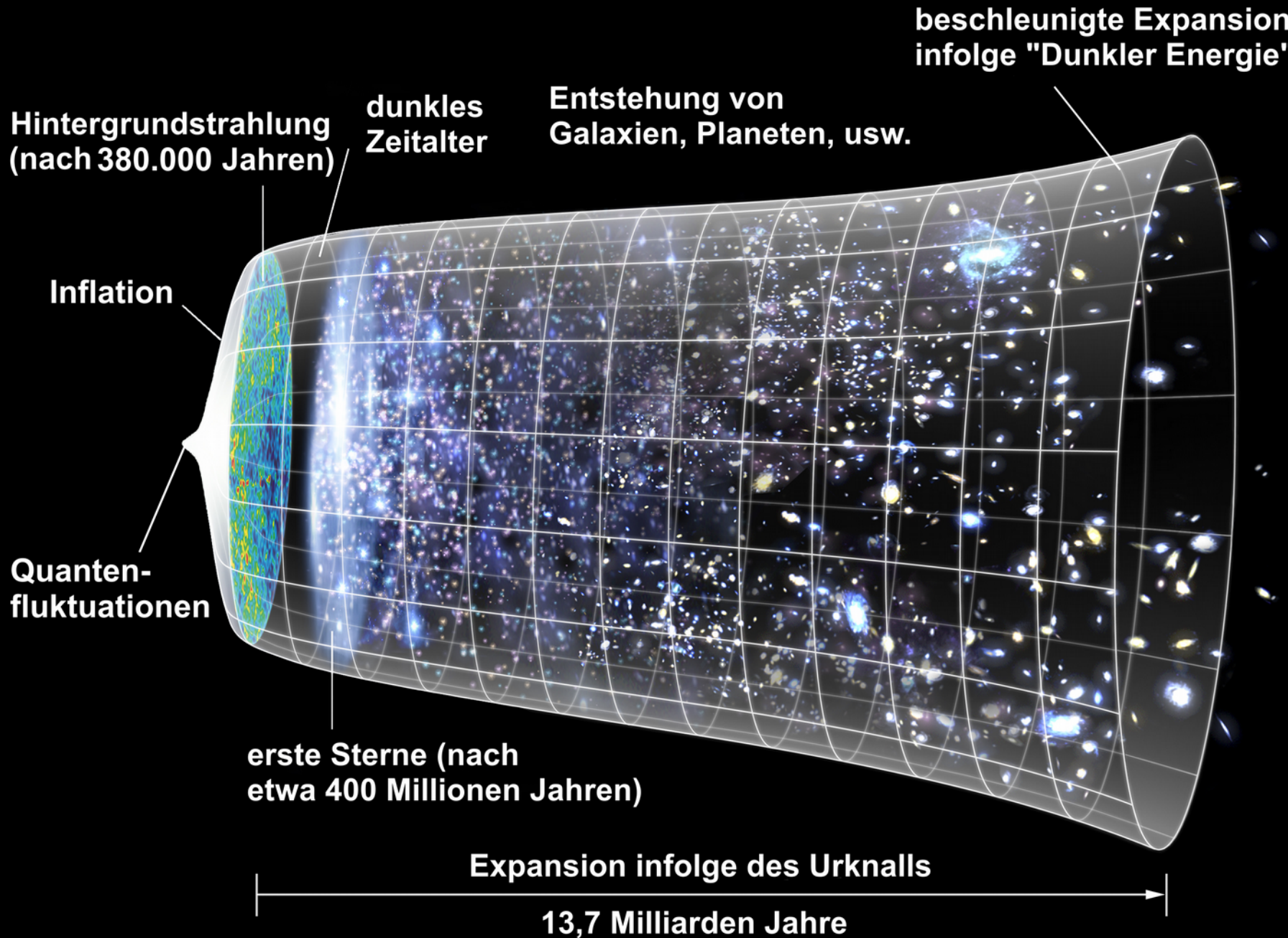
6. Was war der Urknall? Was war davor?

7. Warum war das Universum so gleichmäßig?

6. Was war der Urknall? Was war davor?

7. Warum war das Universum so gleichmäßig?

8. Warum dehnt sich das Universum aus und wie ist seine Geometrie und Geschichte?



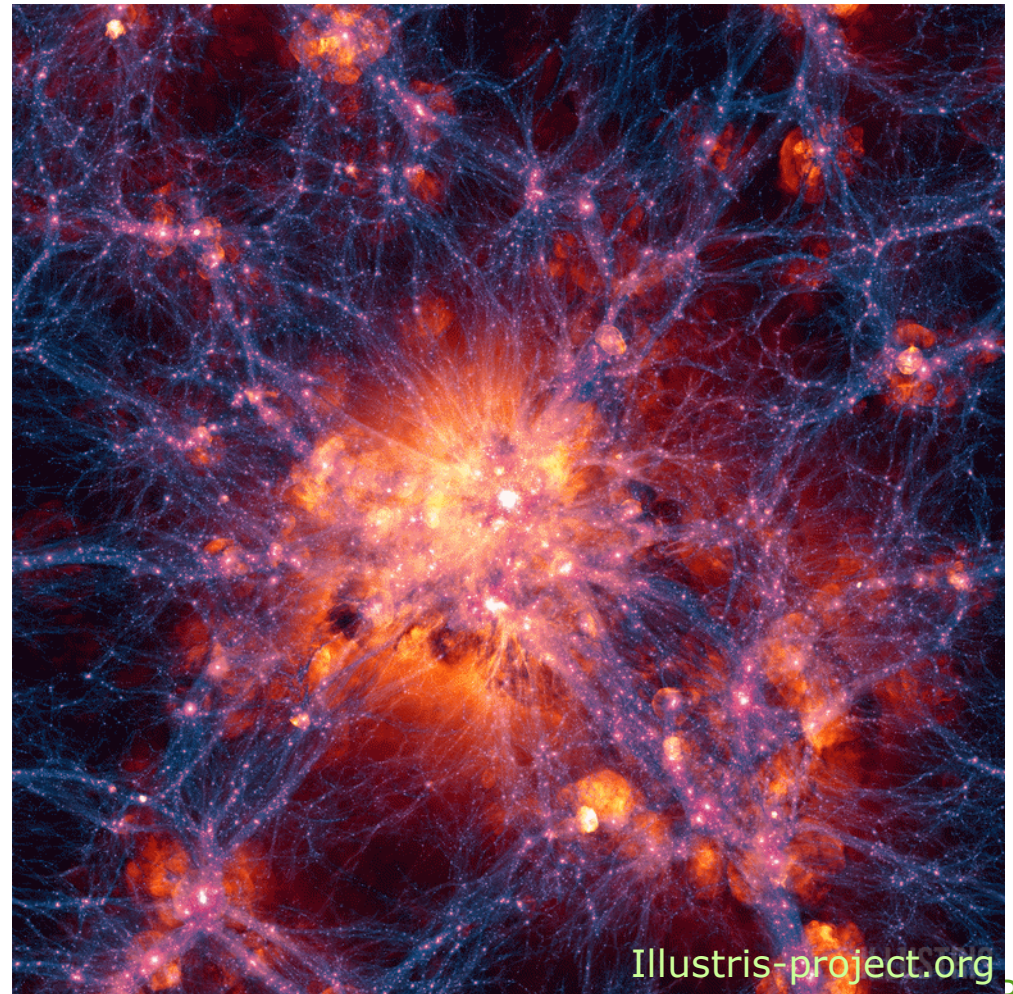
Großskalige Strukturen

Großskalige Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?

Großskalige Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?



Illustris-project.org
NASA/WMAP

Großskalige Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?

→ Bildung großskaliger Strukturen

Großskalige Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?

→ Bildung großskaliger Strukturen

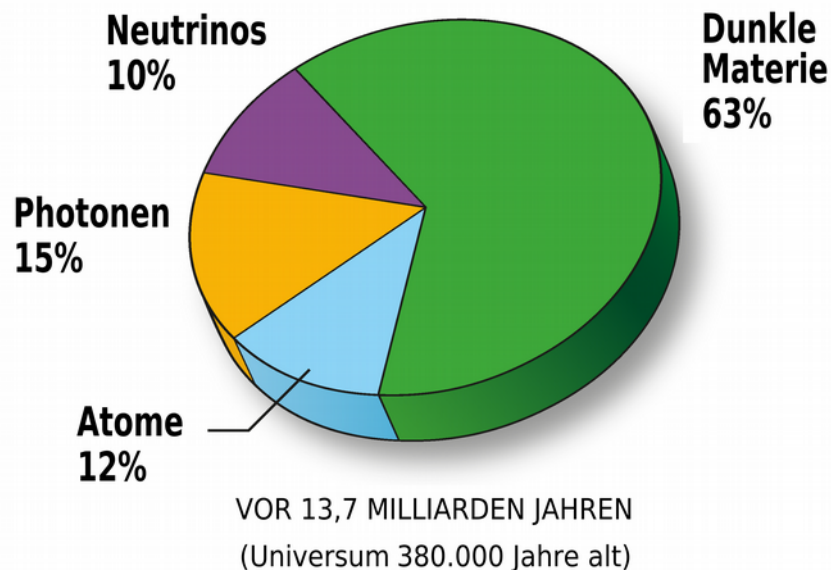
Materie im Universum: "leuchtende" + "dunkle"

Großskalige Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?

→ Bildung großskaliger Strukturen

Materie im Universum: "leuchtende" + "dunkle"



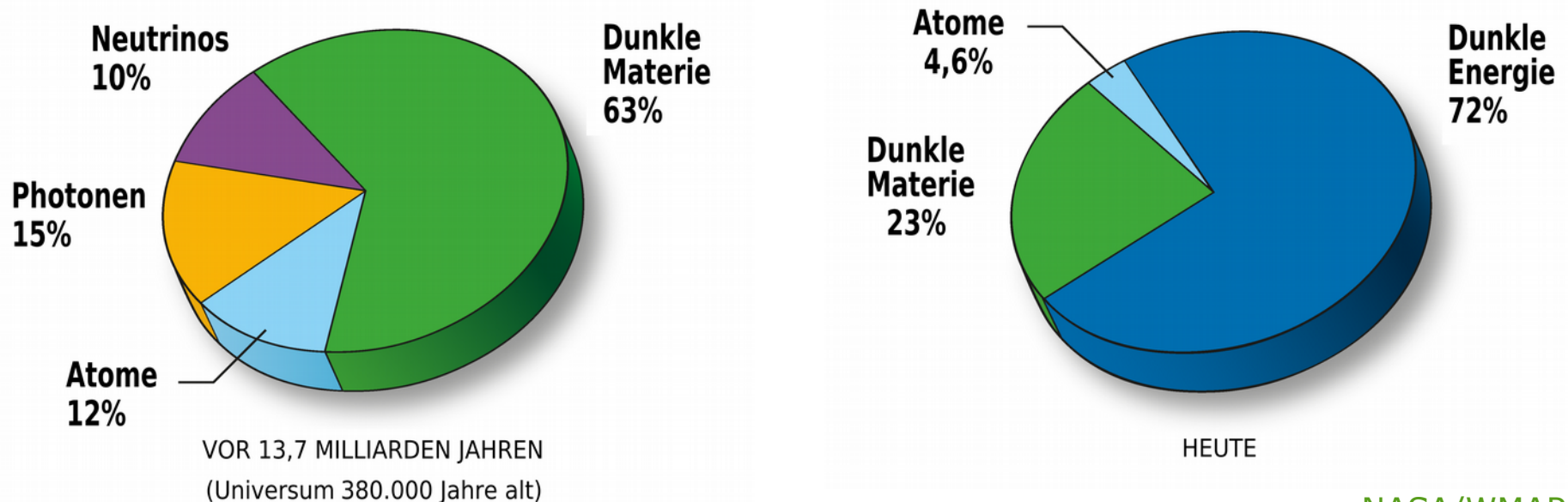
NASA/WMAP

Großskalige Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?

→ Bildung großskaliger Strukturen

Materie im Universum: "leuchtende" + "dunkle"

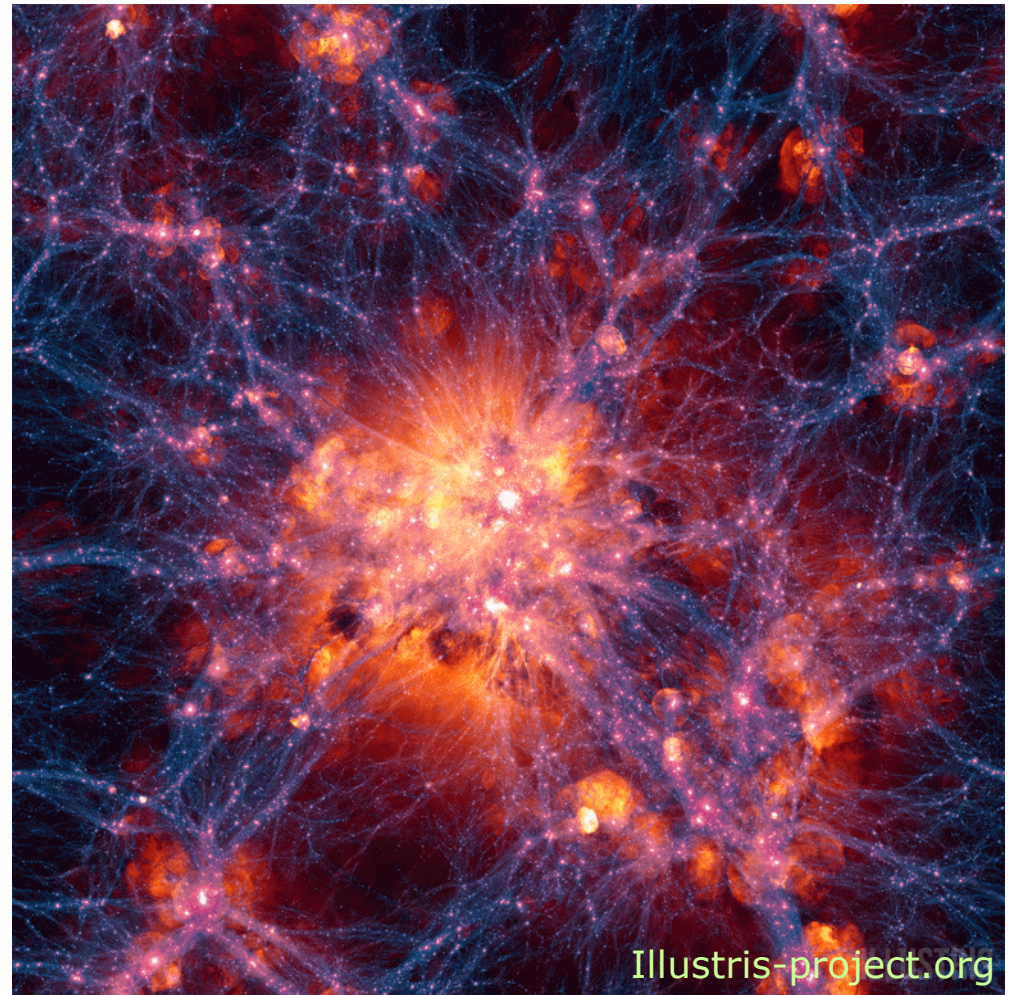


NASA/WMAP

9. Welche Arten von Energie und Materie gibt es?

Großskalige Strukturen

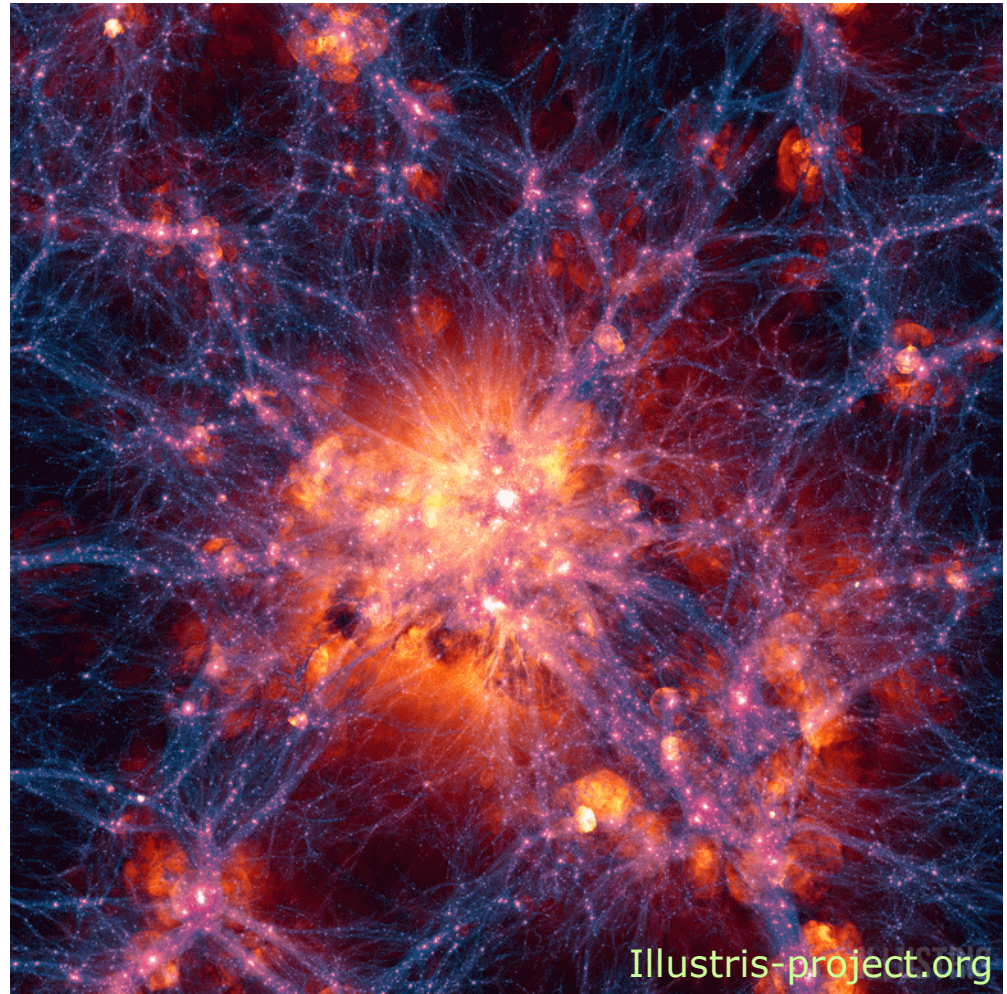
Dunkle Materie Halos + Filamente



Großskalige Strukturen

Dunkle Materie Halos + Filamente

Gas "kondensiert"
in Zentren von Halos

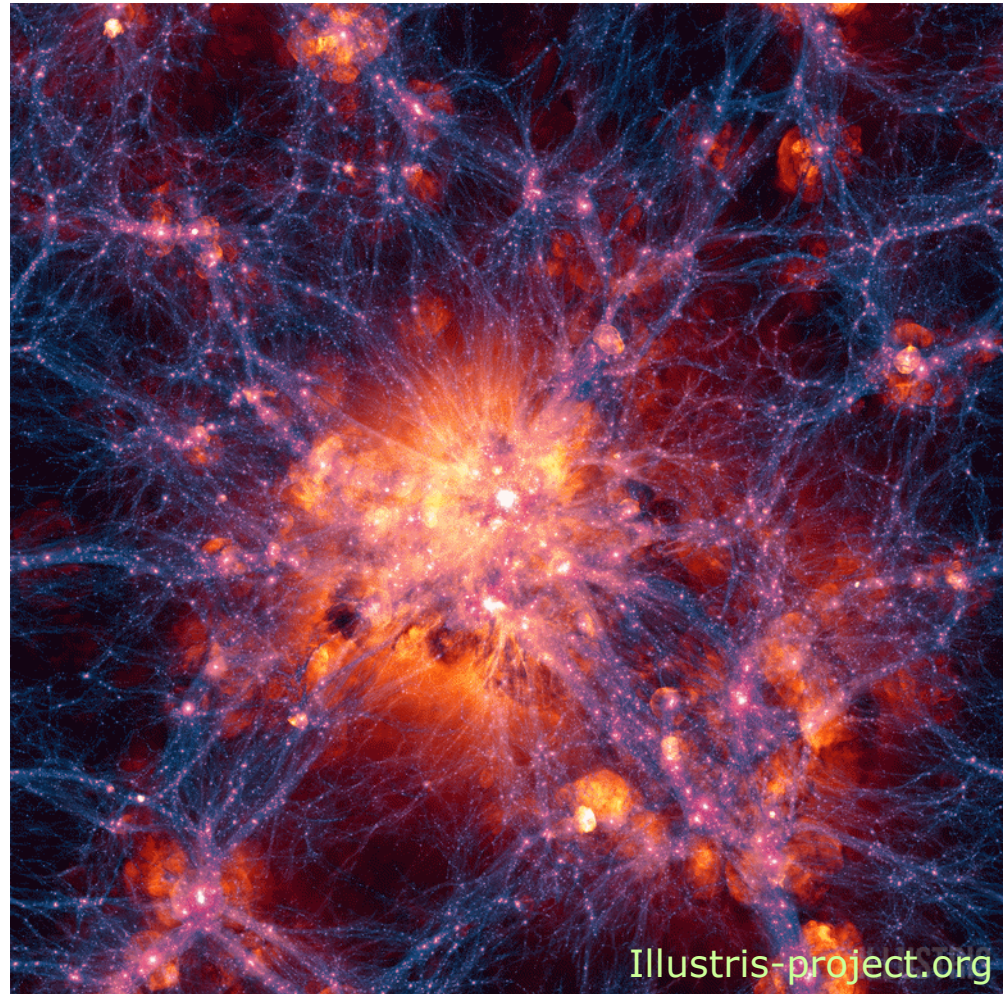


Illustris-project.org

Großskalige Strukturen

Dunkle Materie Halos + Filamente

Gas "kondensiert"
in Zentren von Halos
→ Sterne entstehen



Illustris-project.org

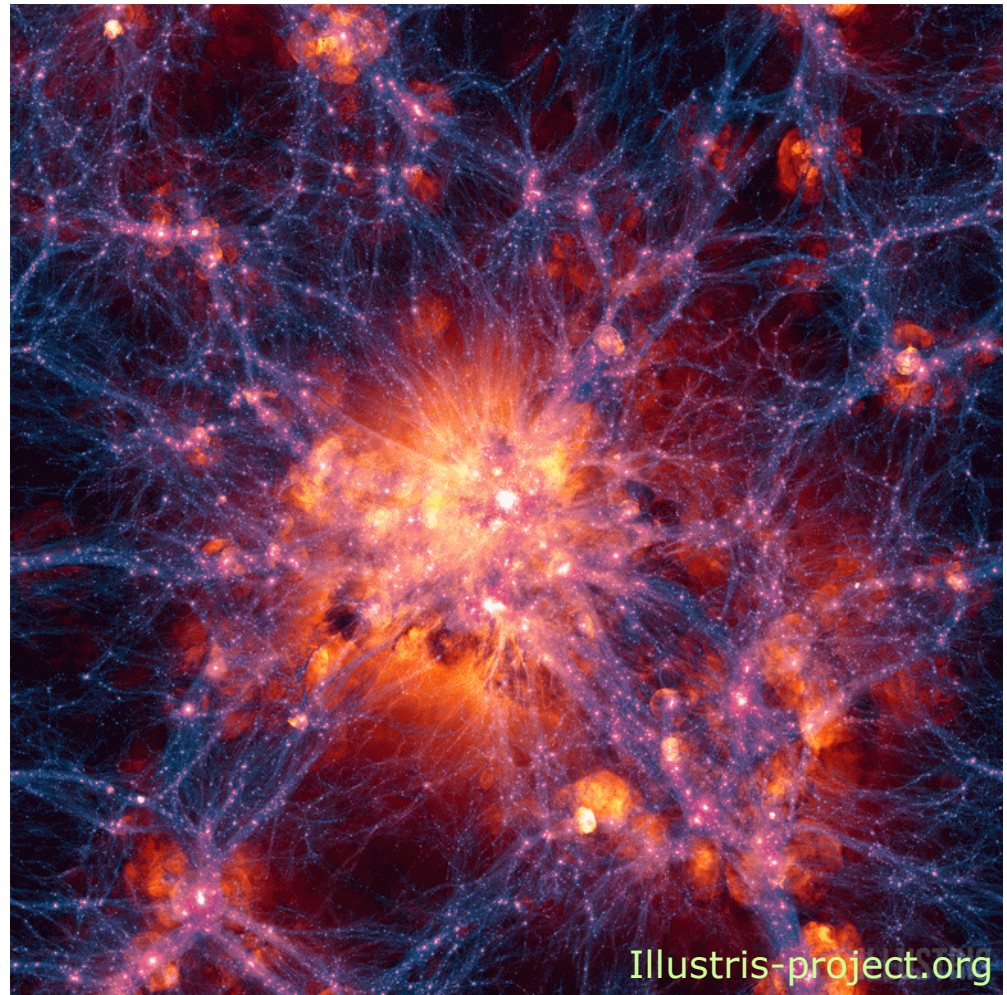
Großskalige Strukturen

Dunkle Materie Halos + Filamente

Gas "kondensiert"
in Zentren von Halos

→ Sterne entstehen

→ Galaxien



Illustris-project.org

Galaxien

Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

Galaxien

Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

Milchstraße: $\sim 200.000.000.000$ Sterne (2×10^{11})



ESO/Beletsky

Galaxien

Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

Milchstraße: $\sim 200.000.000.000$ Sterne (2×10^{11})

Größte Galaxien: $\sim 10^{14}$ Sterne



Hubble Ultra Deep Field / STScI / NASA

Galaxien

Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

Milchstraße: $\sim 200.000.000.000$ Sterne (2×10^{11})

Größte Galaxien: $\sim 10^{14}$ Sterne

Galaxien

Viele Sterne in Massehalo = Galaxie

Milchstraße: $\sim 200.000.000.000$ Sterne (2×10^{11})

Größte Galaxien: $\sim 10^{14}$ Sterne

10. Wie sind Galaxien entstanden?

11. Welche unterschiedlichen Galaxien gibt es?

Balken
Wachstum Winde
Strukturen Löcher
Drehimpuls Verteilung
irreguläre Molekulare
atomares Halo Ausflüsse
Bulge Farben kaltes
Galaxien Rückkopplungen
Gas Balkenspiralen
Größenverhältnisse Entwicklung
Core Sternentstehung
Spiralarme Spiralgalaxien
Schwarzes Loch
Zusammenstöße
Gastransport Emission
Regulierung Röntgen
Supernovae Cusp
Entstehung

Galaxien: Zusammenstöße



Galaxien: Aktive Galaxienkerne



12. Wie sieht die Zukunft des Universums aus?

A word cloud of German astronomical terms arranged in a triangular shape. The words are in various shades of blue and white. The most prominent word is 'Gravitation' in the center. Other large words include 'Galaxie' and 'Planet'. Smaller words include 'Sonne', 'Wasserstoff', 'Spiralgalaxie', 'Riesensterne', 'Molekülwolke', 'Filament', 'Schwarze', 'Helium', 'Komet', 'Void', 'Leben', 'Gasriese', 'Energie', 'Erde', 'Kosmologische', 'Halos', 'Haufen', 'Gas', 'Wachstum', 'Materie', 'Urknall', 'Dunkle', 'Staub', 'Konstante', 'Doppelstern', 'Löcher', 'Sternentstehung', and 'Sterne'.

Void
Leben
Sonne
Wasserstoff
Spiralgalaxie
Riesensterne
Molekülwolke
Filament
Schwarze
Helium
Komet
Galaxie
Planet
Gravitation
Gasriese
Energie
Erde
Kosmologische
Halos
Haufen
Gas
Wachstum
Materie
Urknall
Dunkle
Staub
Konstante
Doppelstern
Löcher
Sternentstehung
Sterne

Aufgeworfene Fragen

1. Wie ist die Erde entstanden?
2. Woher kommen Wasserstoff, Sauerstoff, schwere Elemente?
3. Was sind Mindestbedingungen für Leben?
4. Wie sind die Sterne entstanden?
5. Welche unterschiedlichen Sterne gibt es und warum?
6. Was war der Urknall? Was war davor?

Aufgeworfene Fragen

7. Warum war das Universum so gleichmäßig?
8. Warum dehnt sich das Universum aus und wie ist seine Geometrie und Geschichte?
9. Welche Arten von Energie und Materie gibt es?
10. Wie sind Galaxien entstanden?
11. Welche unterschiedlichen Galaxien gibt es?
12. Wie sieht die Zukunft des Universums aus?