

Schwarze Löcher in Kugelsternhaufen: A black hole love story

Anna Sippel (Max-Planck Institut für Astronomie)

sippel@mpia.de





Bild: Alex Cherney (Terraastro)

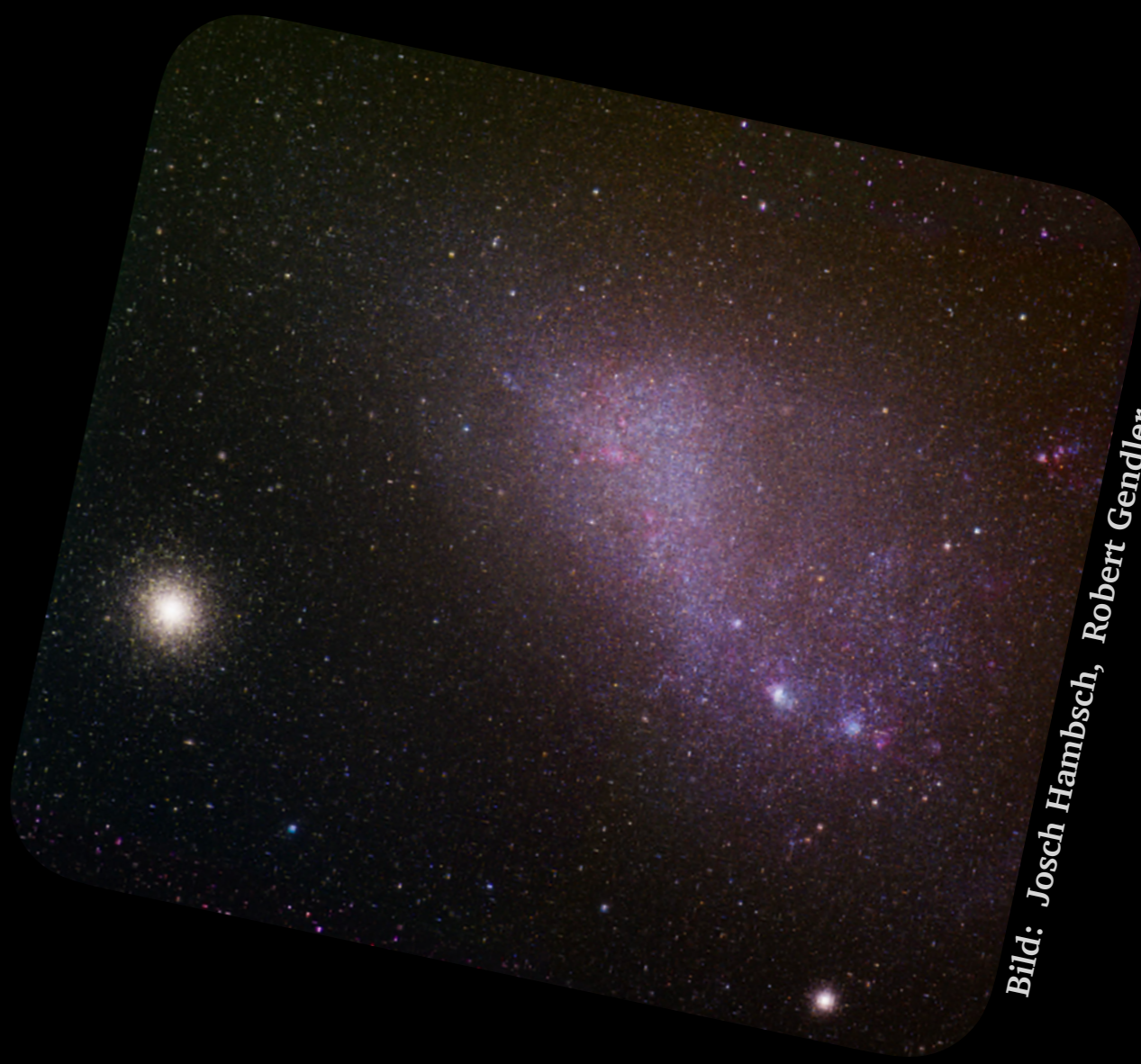


Bild: Josch Hamsch, Robert Gendler



Bild: Dieter Willasch
(Astro-Cabinet)



Bild: NASA, ESA, Hubble Heritage Team (STScI / AURA)
J. Mack (STScI) and G. Piotto (U. Padova)

Kugelsternhaufen

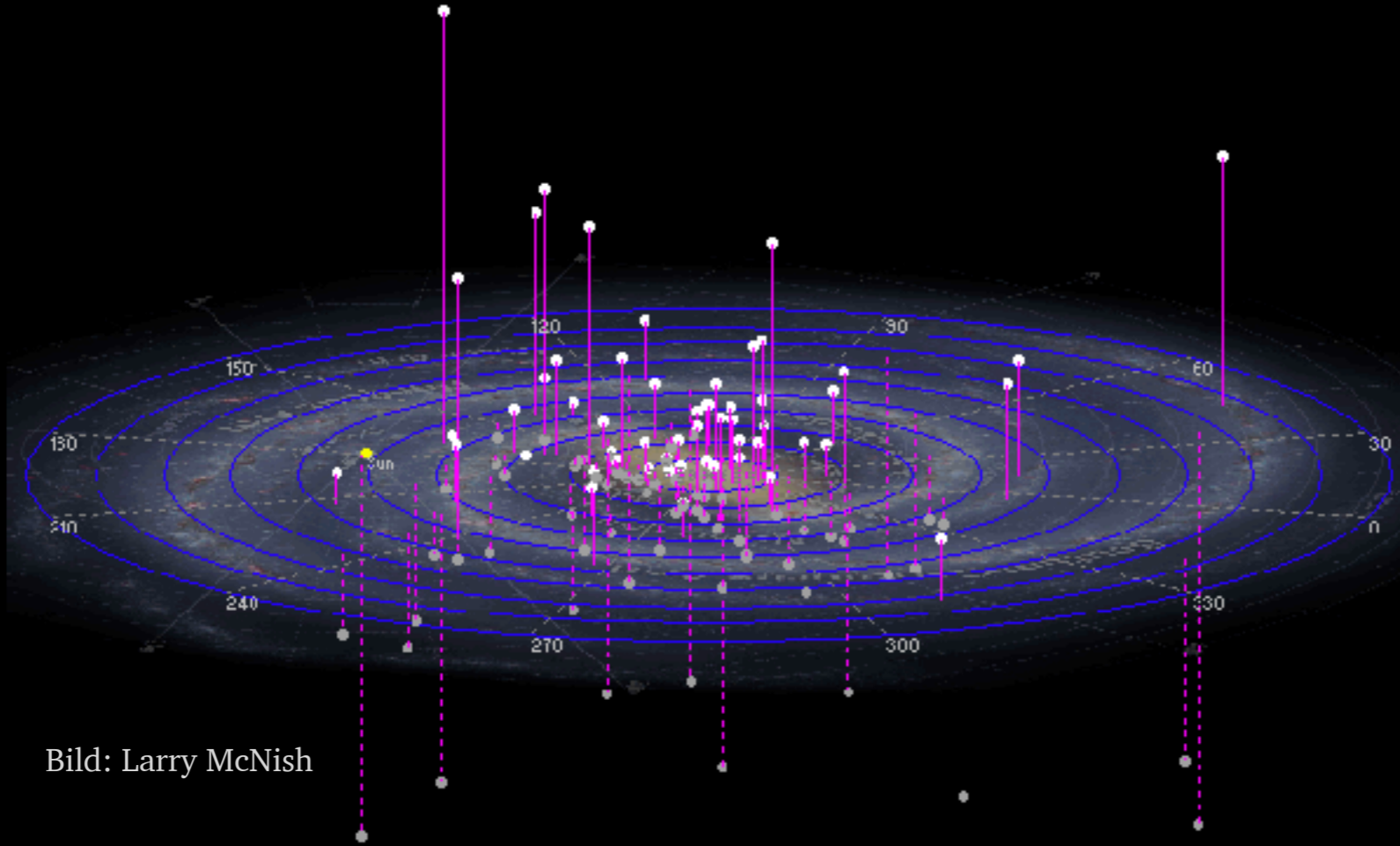
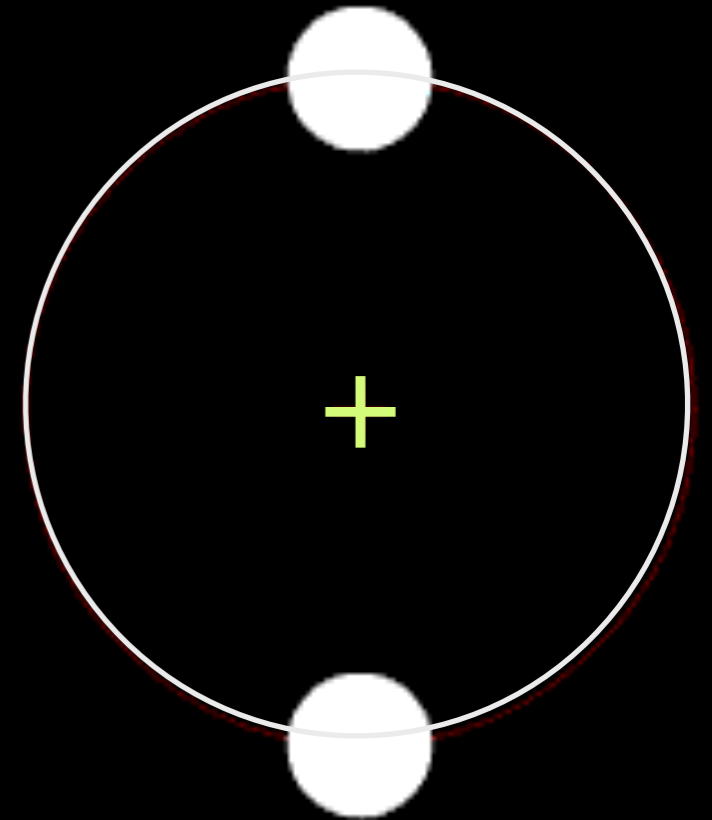


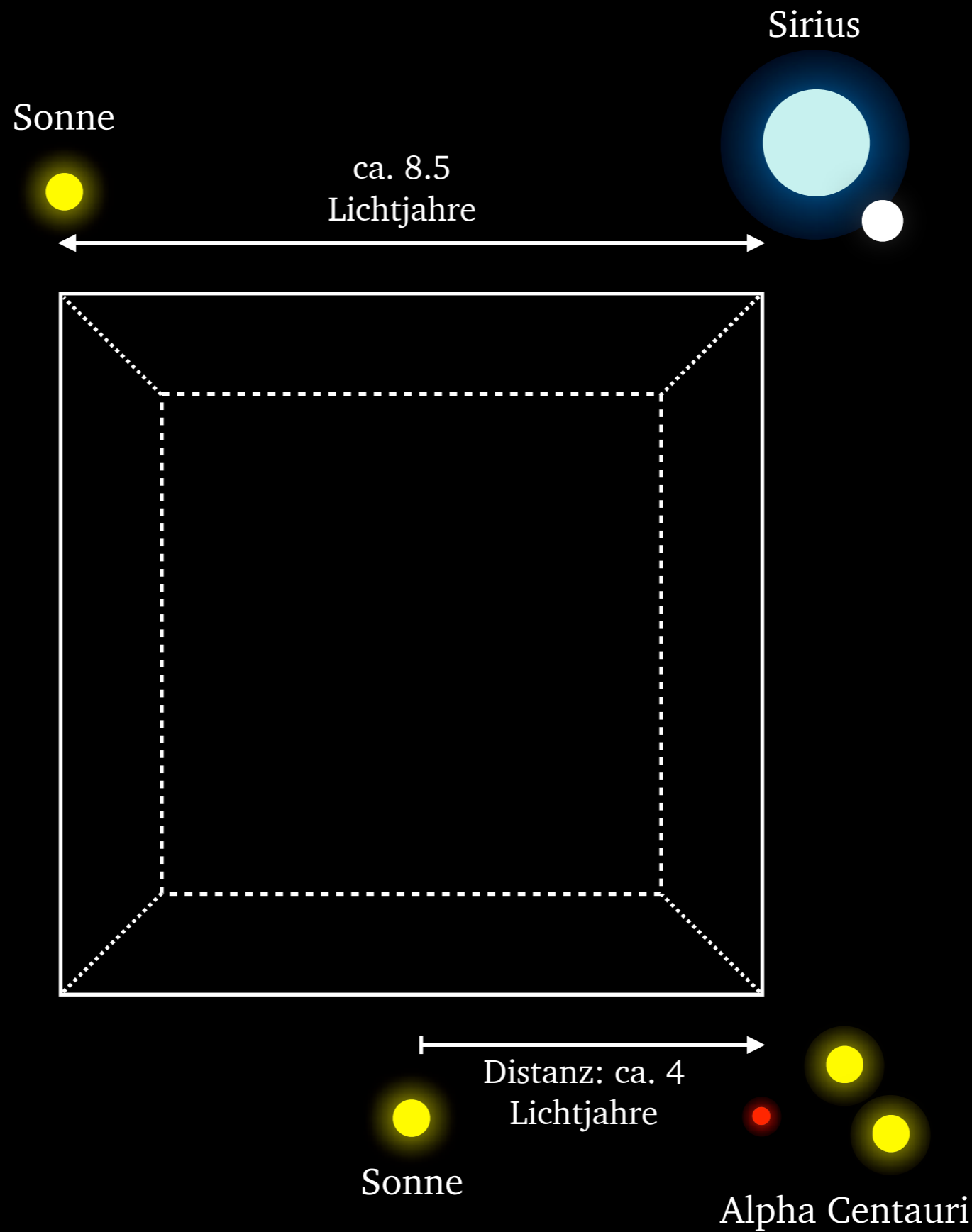
Bild: Larry McNish



- 160 in der Milchstrasse
- 500'000 Sterne
- 12 Milliarden Jahre alt
- Wenige Doppelsterne
- $\varnothing = 20$ Lichtjahre



Bild: Bernhard Hubl (CEDIC)



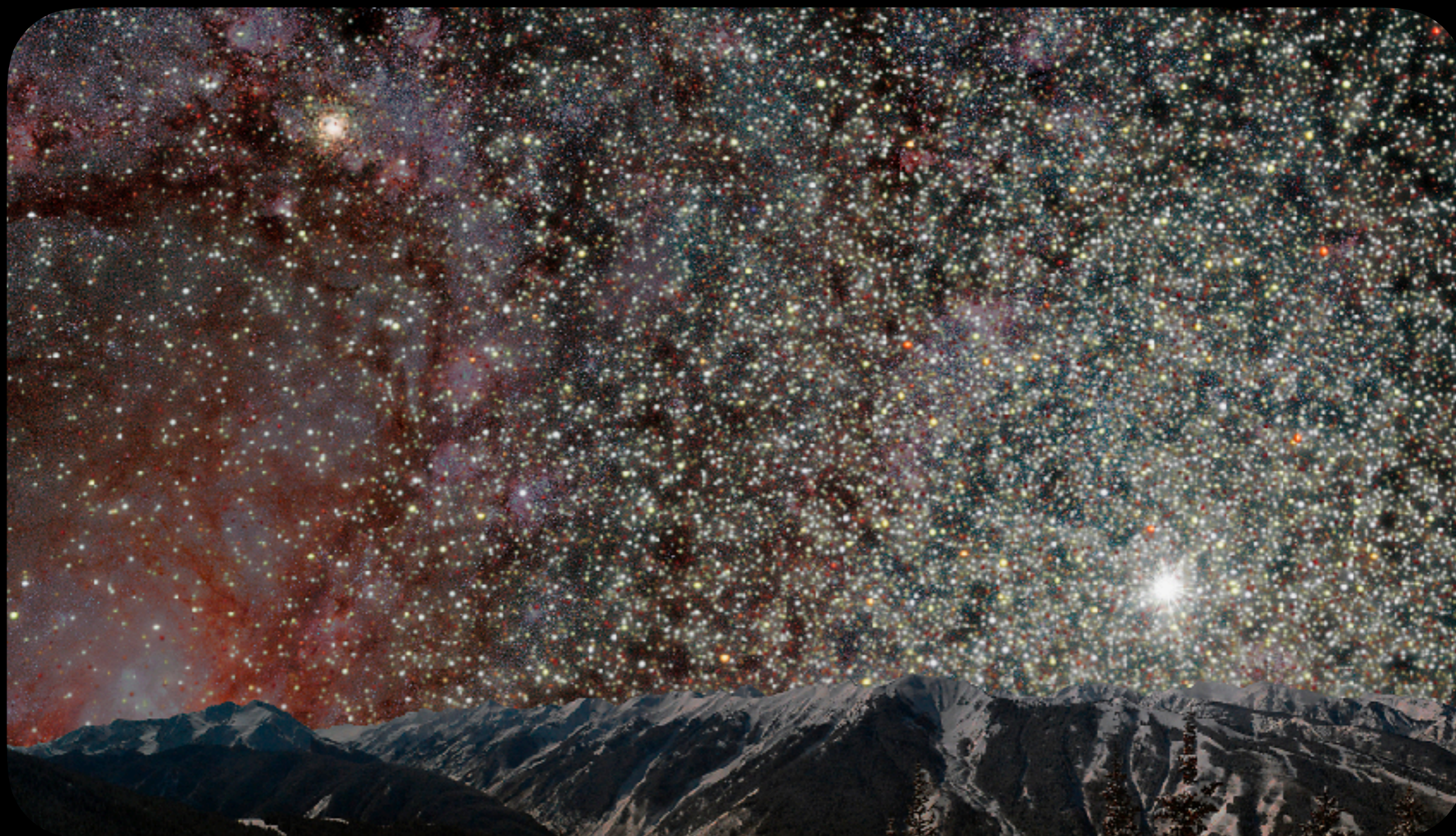
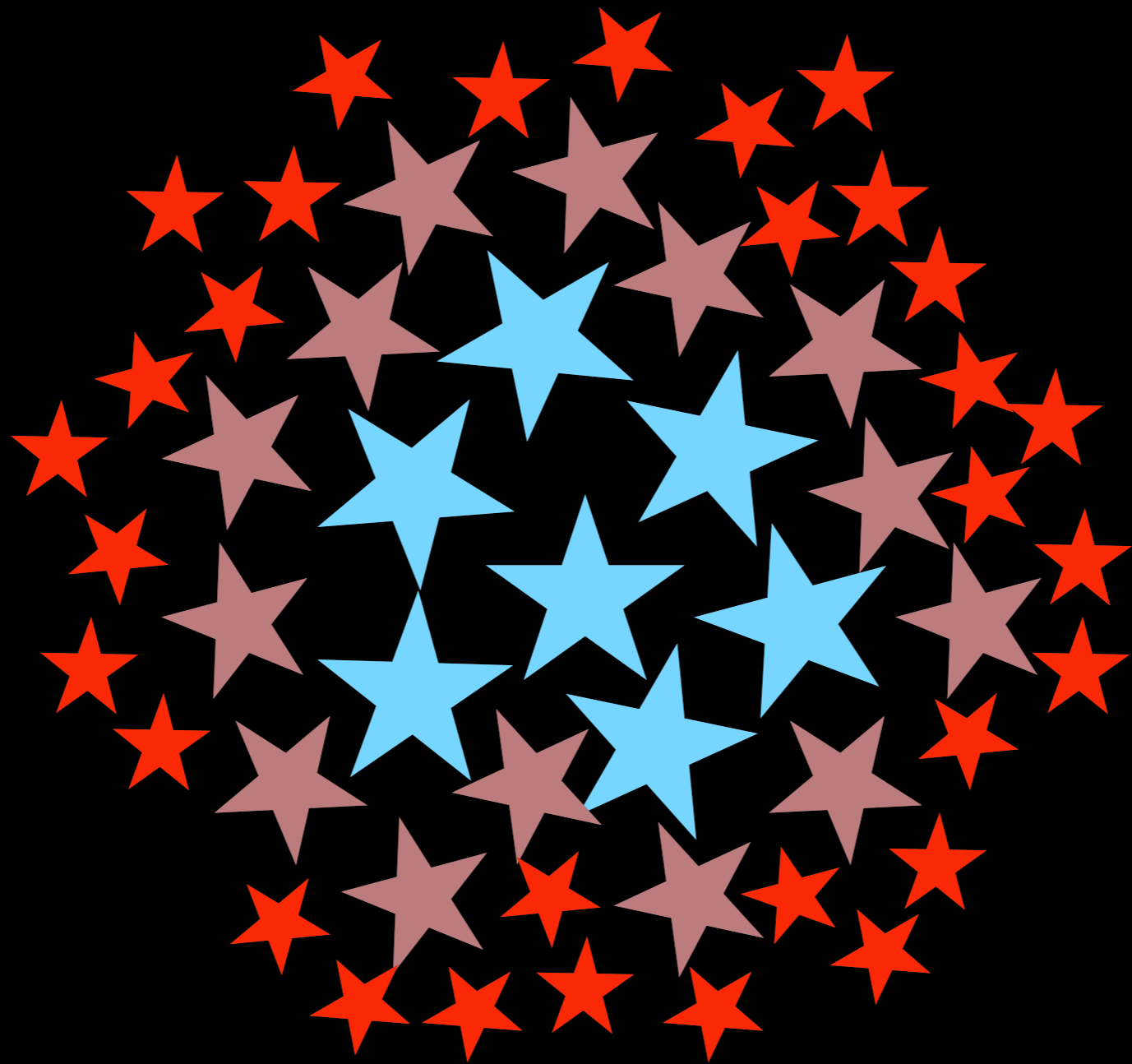


Bild: William Harris & Jeremy Webb (McMaster)

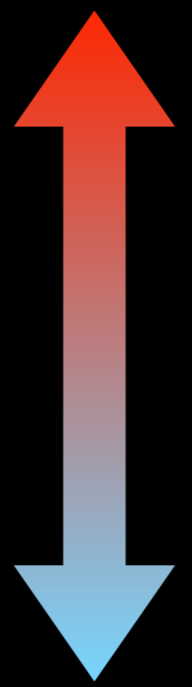
Mehr als 10'000 Sterne heller als die hellsten 30 Sterne die wir sonst mit blossem Auge sehen.



Zooming in on Star Cluster Terzan 5 (apod videos)
Image Credit: Nick Risinger (skysurvey.org), DSS, Hubble, NASA, ESA, ESO

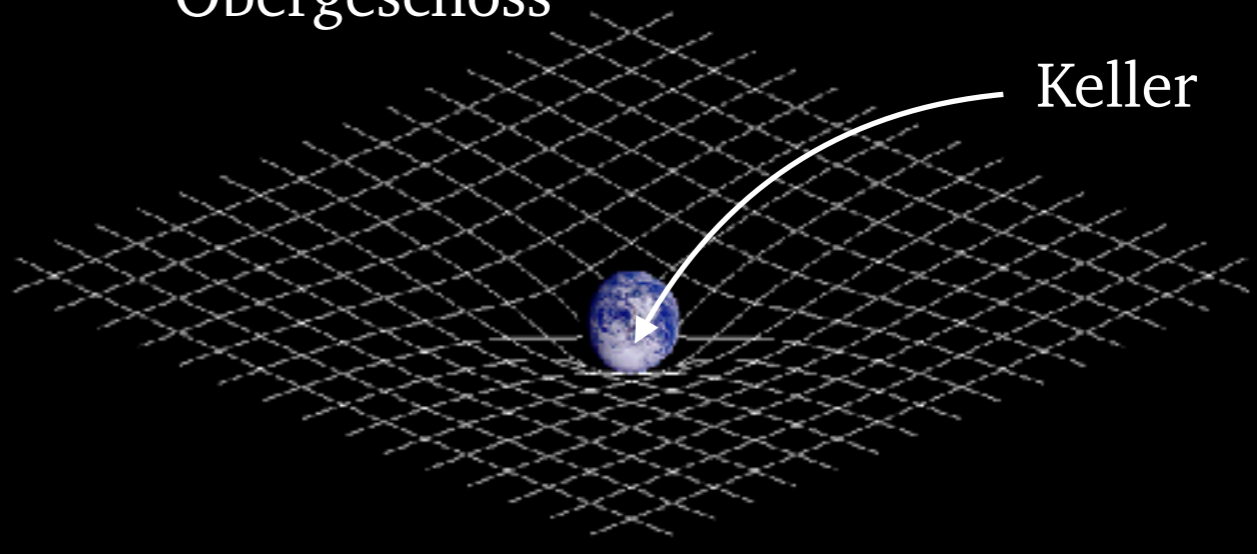


Dynamik

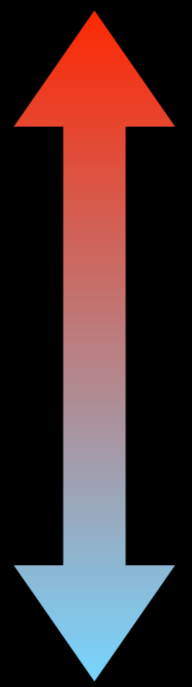


Obergeschoss

Keller

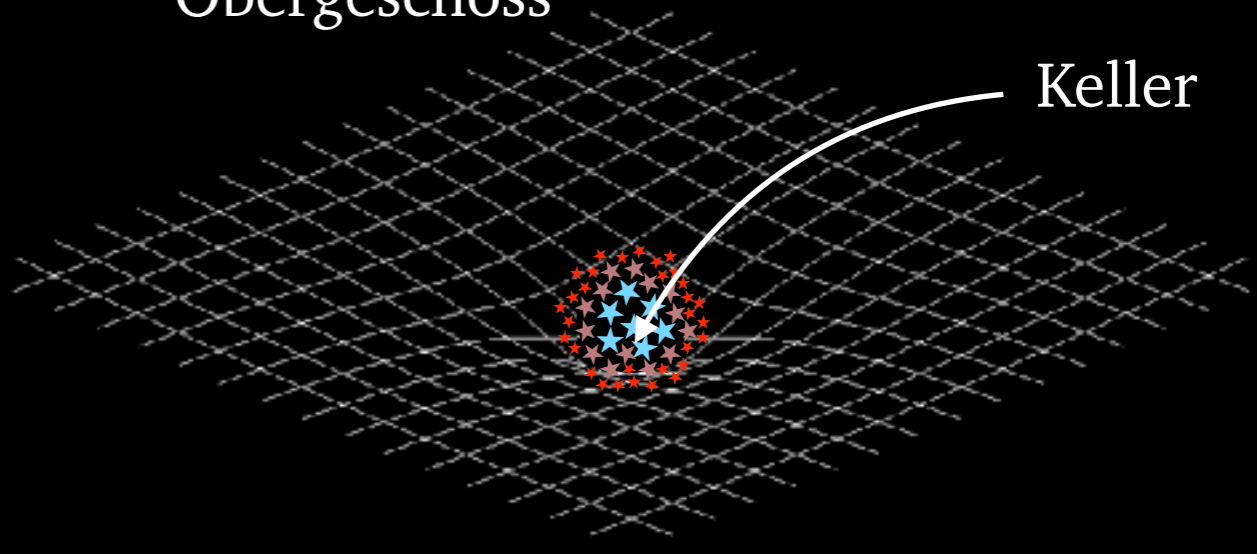


Gravitationspotential

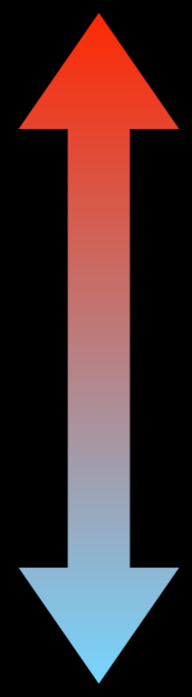
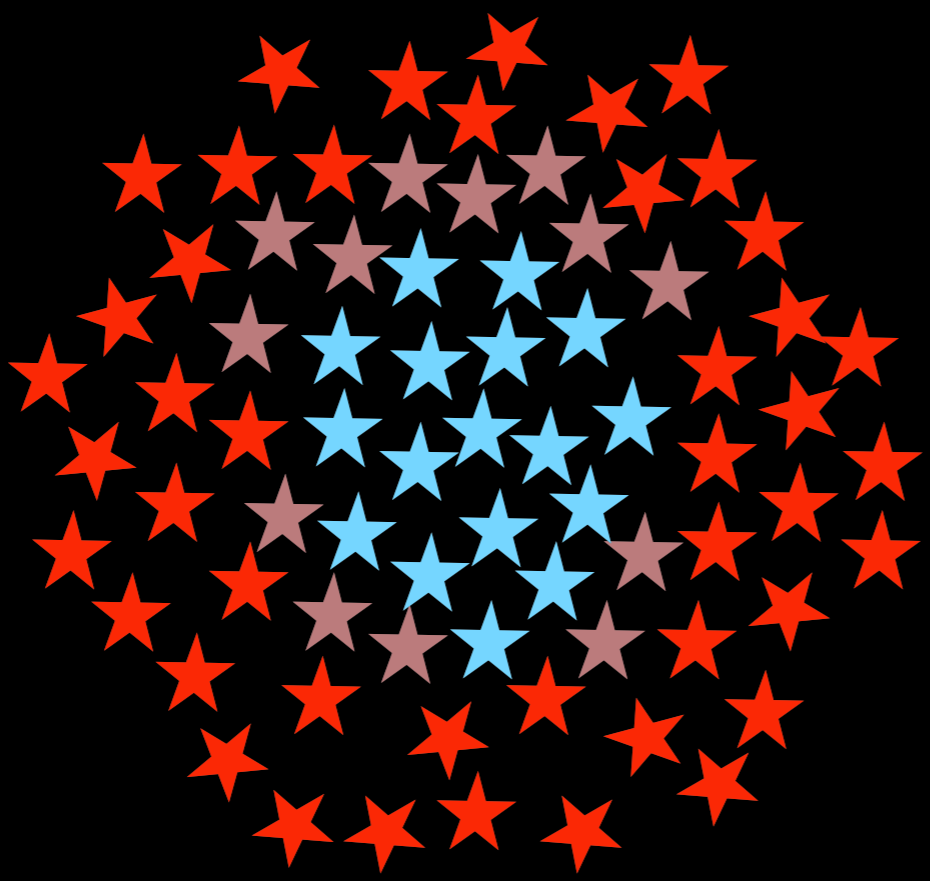


Obergeschoss

Keller



Gravitationspotential

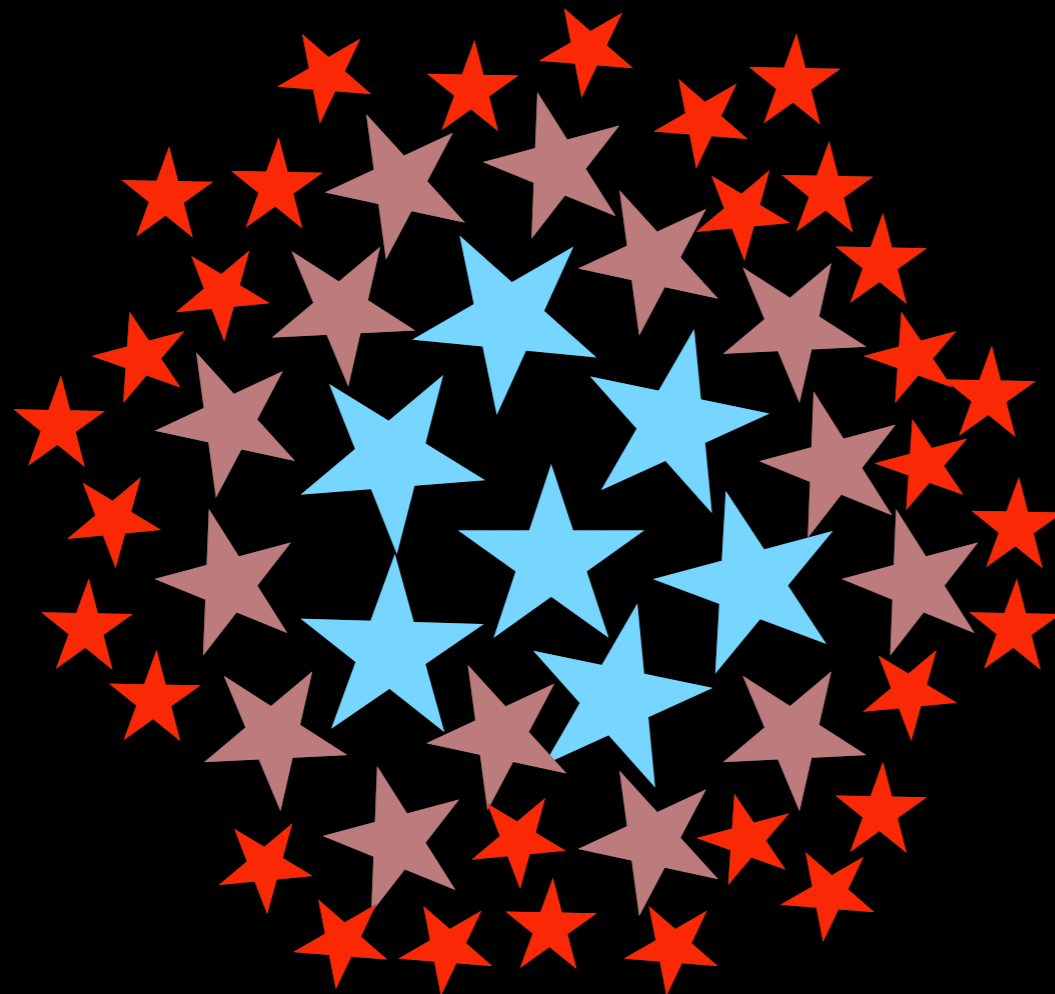


Schnell

Langsam

Gleichverteilungssatz / Äquipartitionstheorem:

Im thermischen Gleichgewicht haben alle Teilchen die gleiche kinetische Energie $E_{\text{kin}} = 0.5 \cdot mv^2$.



$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{1}{2}m_2v_2^2$$



Schwerer
Stern →
langsamer



Leichter
Stern →
schneller

→ Massen-Segregation



Kugelsternhaufen sind
klein & dicht genug!

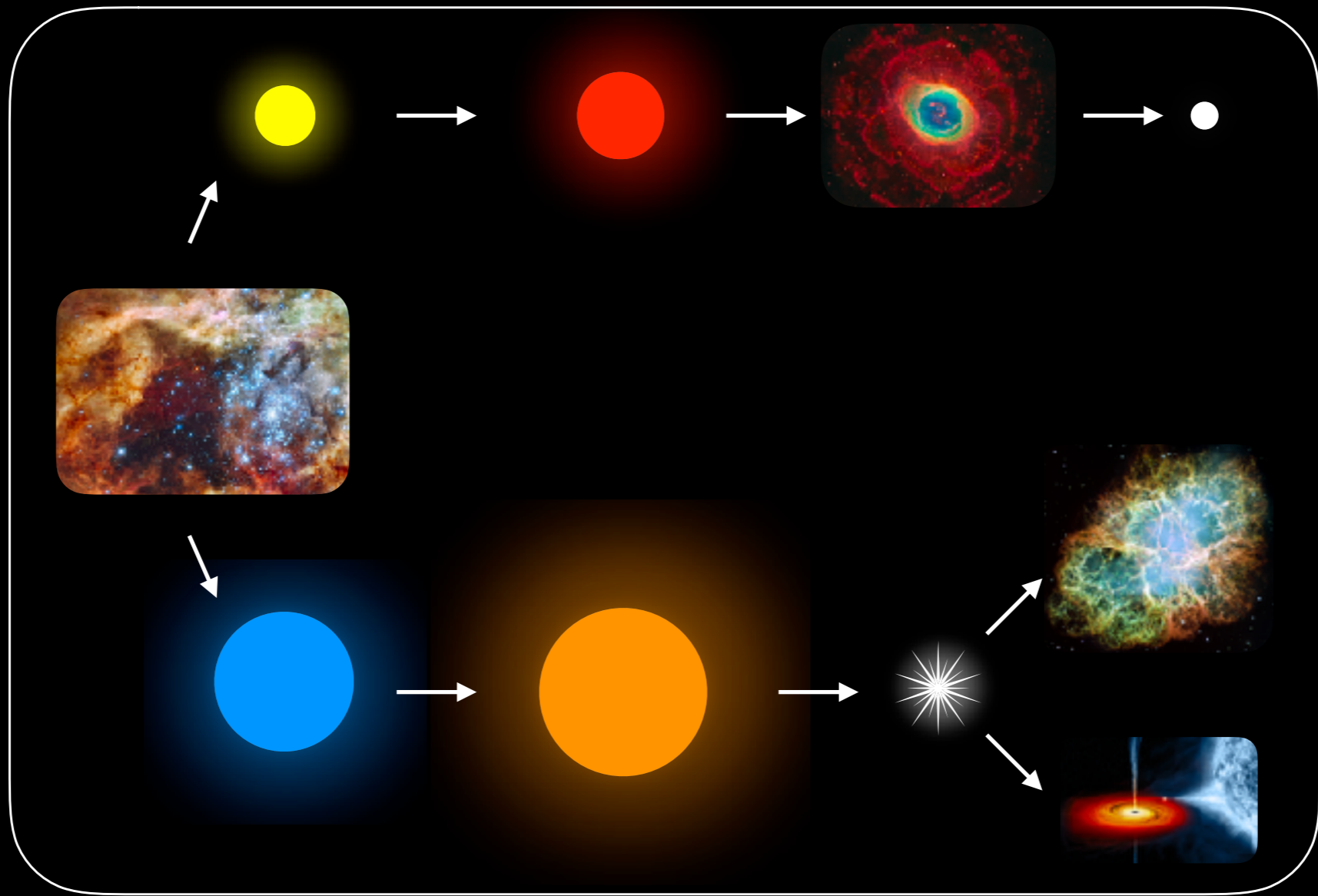
Bild: Bernhard Hubl (CEDIC)



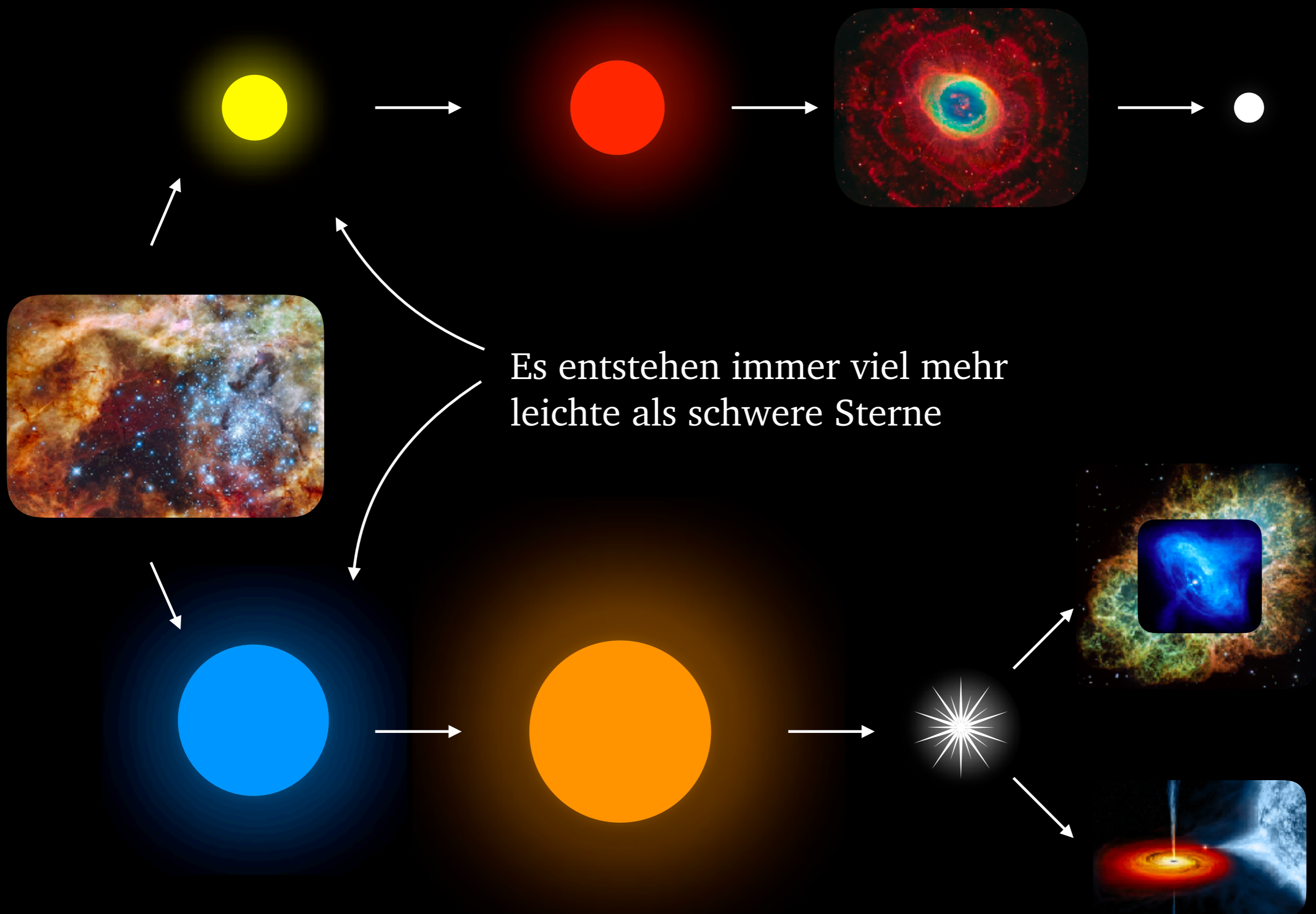
Bild: Canada-France-Hawaii Telescope, J.-C. Cuillandre (CFHT), Coelum

Austausch von Energie
benötigt Begegnungen

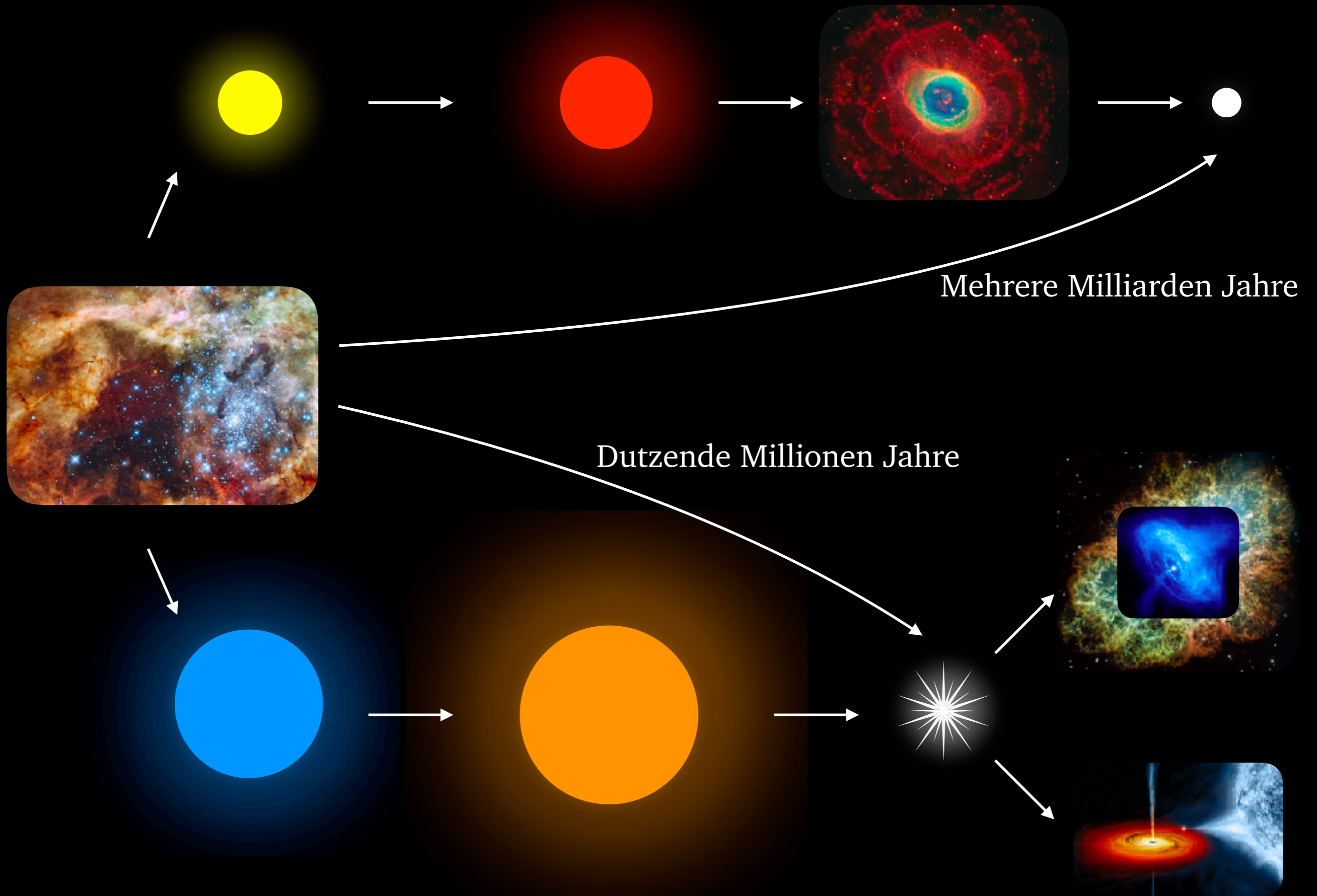




Sternentwicklung



Bilder: **Tarantulanebel:** NASA, ESA, & F. Paresce (INAF-IASF), R. O'Connell (U. Virginia), & the HST WFC3 Science Oversight Committee; **Ringnebel:** Hubble, Large Binocular Telescope, Subaru Telescope; Composition & Copyright: Robert Gendler; **Krebsnebel:** NASA, ESA, Hubble, J. Hester, A. Loll (ASU); **Krebspulsar:** NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.; **Schwarzes Loch:** NASA, CXC, M. Weiss



Bilder: **Tarantulanebel:** Credit: NASA, ESA, & F. Paresce (INAF-IASF), R. O'Connell (U. Virginia), & the HST WFC3 Science Oversight Committee; **Ringnebel:** Hubble, Large Binocular Telescope, Subaru Telescope; Composition & Copyright: Robert Gendler; **Krebsnebel:** NASA, ESA, Hubble, J. Hester, A. Loll (ASU); **Krebspulsar:** NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.; **Schwarzes Loch:** NASA, CXC, M. Weiss

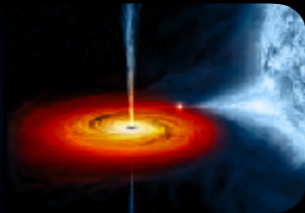
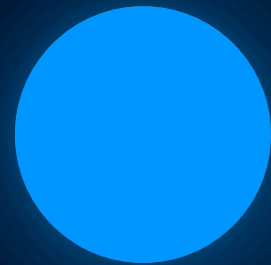


Bilder: **Tarantulanebel:** Credit: NASA, ESA, & F. Paresce (INAF-IASF), R. O'Connell (U. Virginia), & the HST WFC3 Science Oversight Committee; **Ringnebel:** Hubble, Large Binocular Telescope, Subaru Telescope; Composition & Copyright: Robert Gendler; **Krebsnebel:** NASA, ESA, Hubble, J. Hester, A. Loll (ASU); **Krebspulsar:** NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.; **Schwarzes Loch:** NASA, CXC, M. Weiss

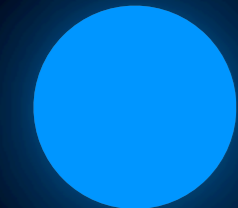
Kontinuierliche Umverteilung: Schwere Sterne ins Zentrum, leichtere ausserhalb

Vor 12 Milliarden Jahren

Heute



Stellare Schwarze Löcher, 3(?) - 60(?) mal so schwer wie die Sonne



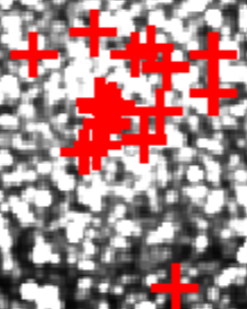
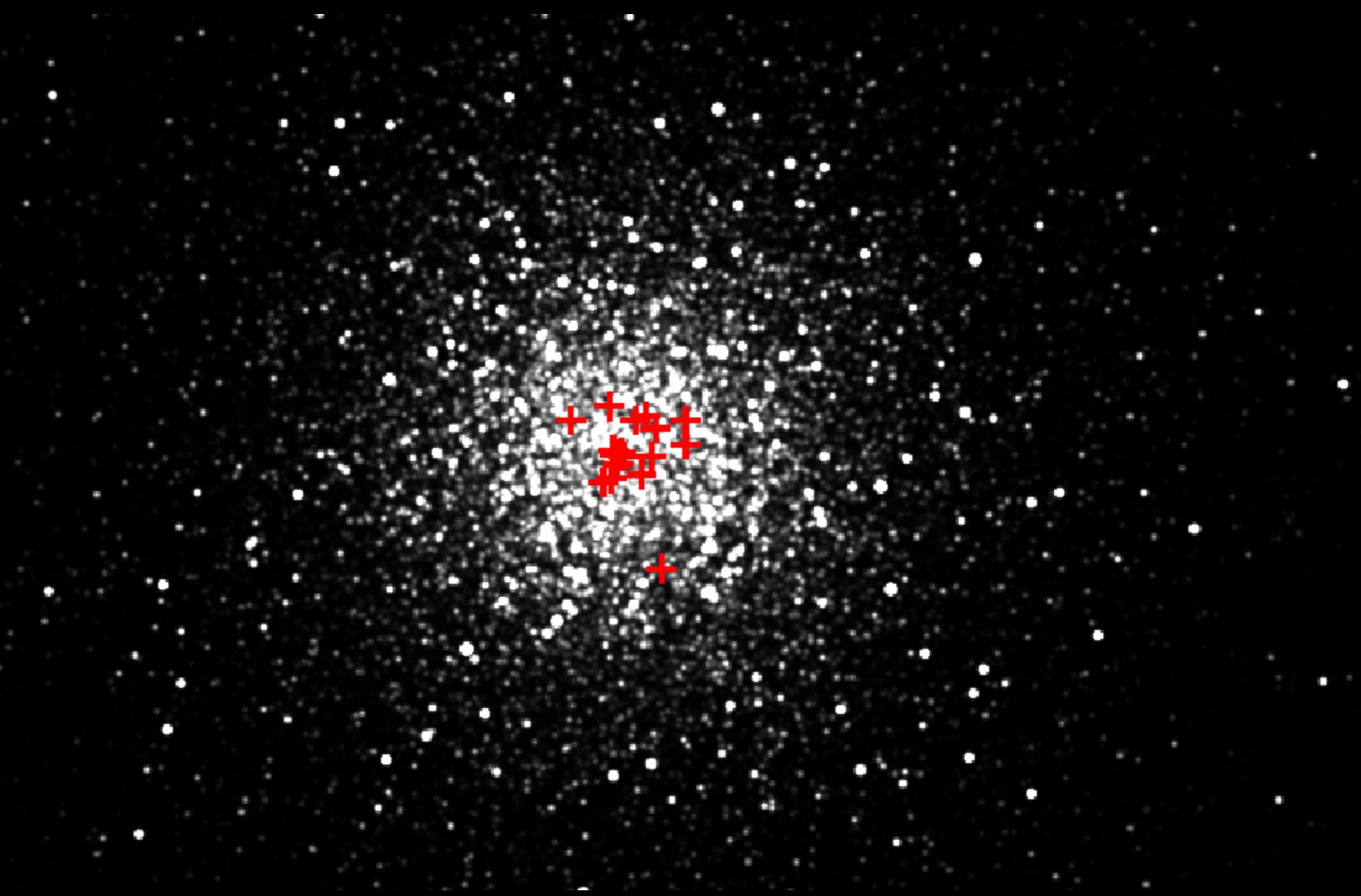
Neutronensterne, ca. 2 mal so schwer wie die Sonne



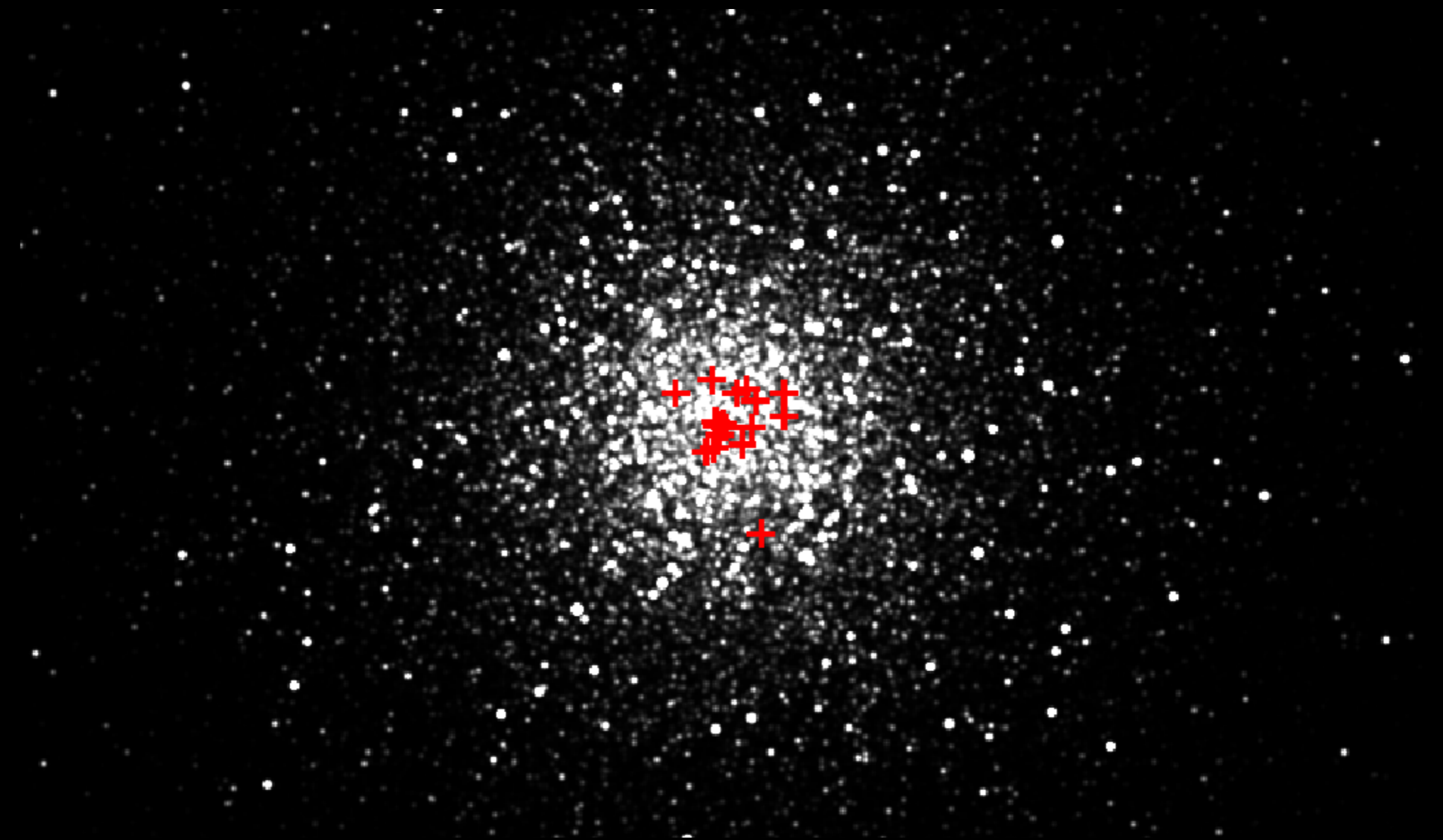
Weisse Zwerge, ca. 60% so schwer wie die Sonne



'Leichte' Sterne < 80% so schwer wie die Sonne



+ Schwarzes Loch



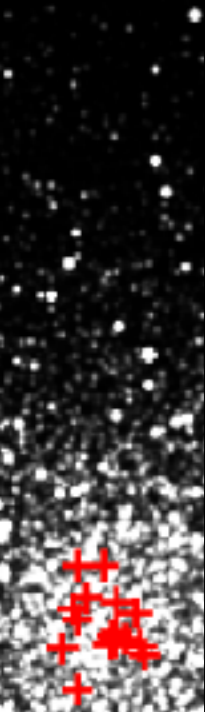
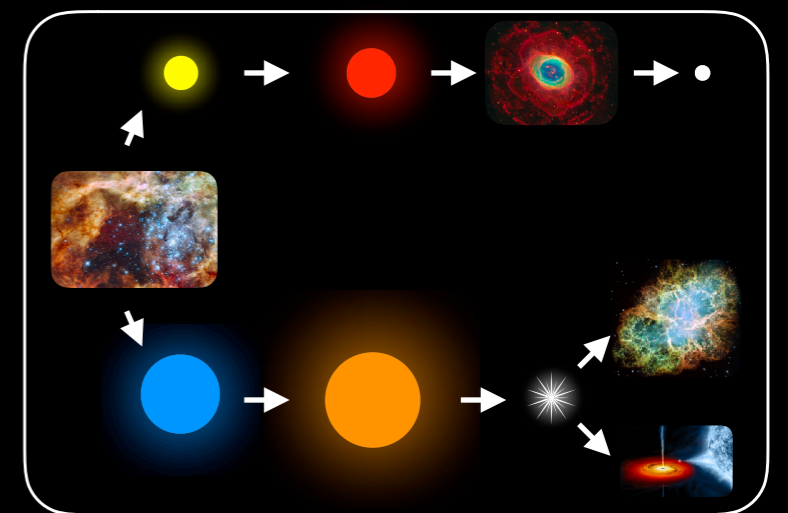
Simulationen von
Kugelsternhaufen

Simulationen von Kugelsternhaufen



Anfangs-
bedingungen

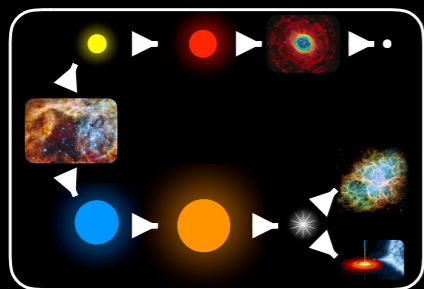
$$\vec{F}_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}|^3} \vec{r}$$



Simulationen von Kugelsternhaufen

- Je mehr Sterne, umso komplexer und länger dauern die Berechnungen.
- Supercomputer mit GPUs.
- 200'000 Sterne inkl. 5000 Doppelsternen.
- 380 Schwarze Löcher entstehen, ca. 80 verbleiben.

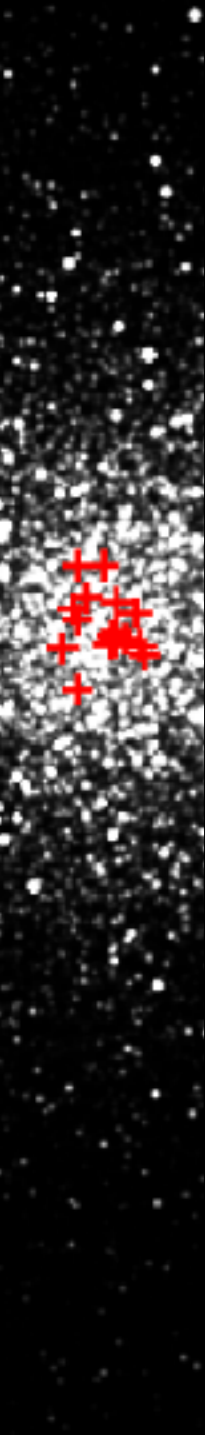
$$\vec{F}_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}|^3} \vec{r}$$



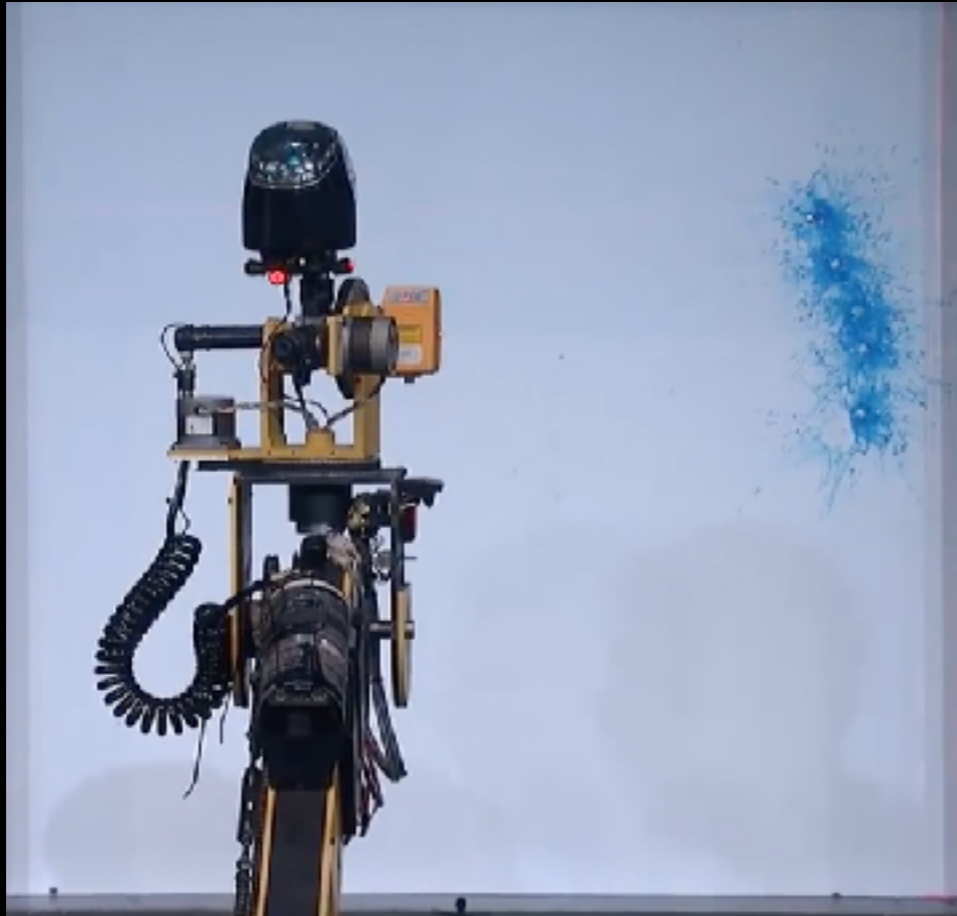
NBODY6
Sverre Aarseth
(Cambridge)



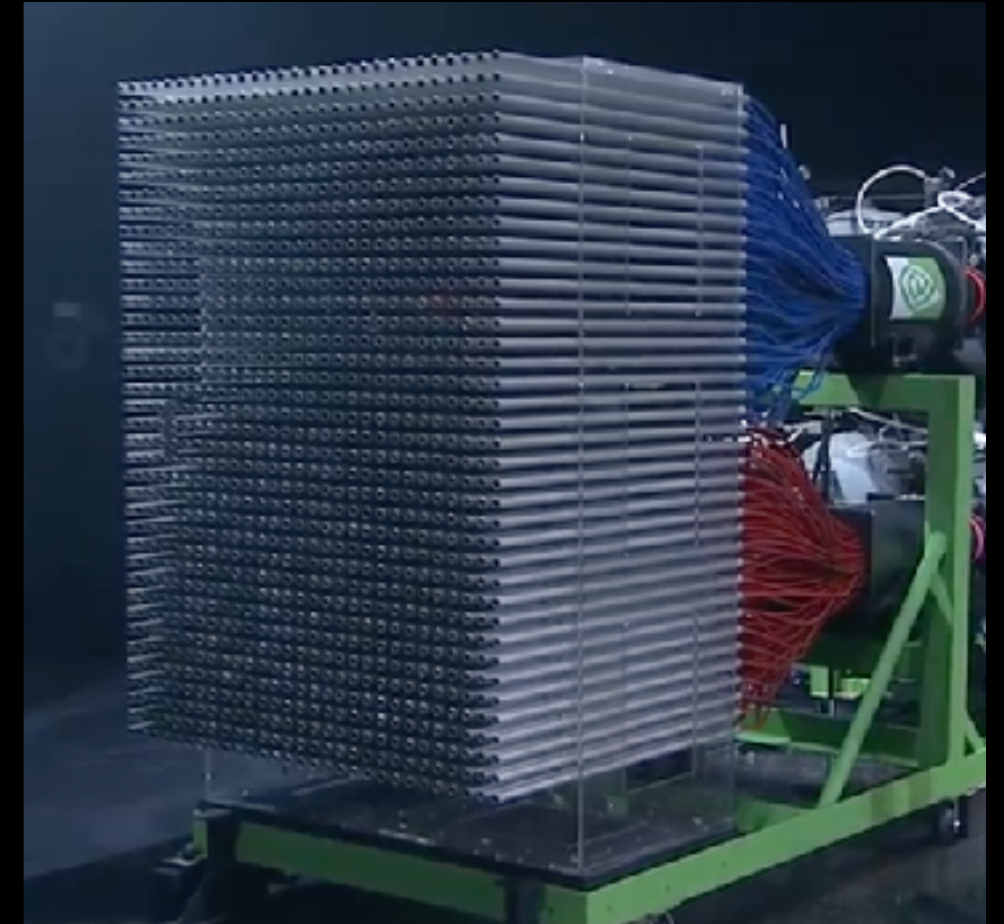
Central / Graphics Processing Unit



Central / Graphics Processing Unit



flexibel, Denker
→ Sternentwicklung,
komplexe Doppelsterne....



unflexibel, Arbeitstier
→ Beschleunigung,
Positionsbestimmung

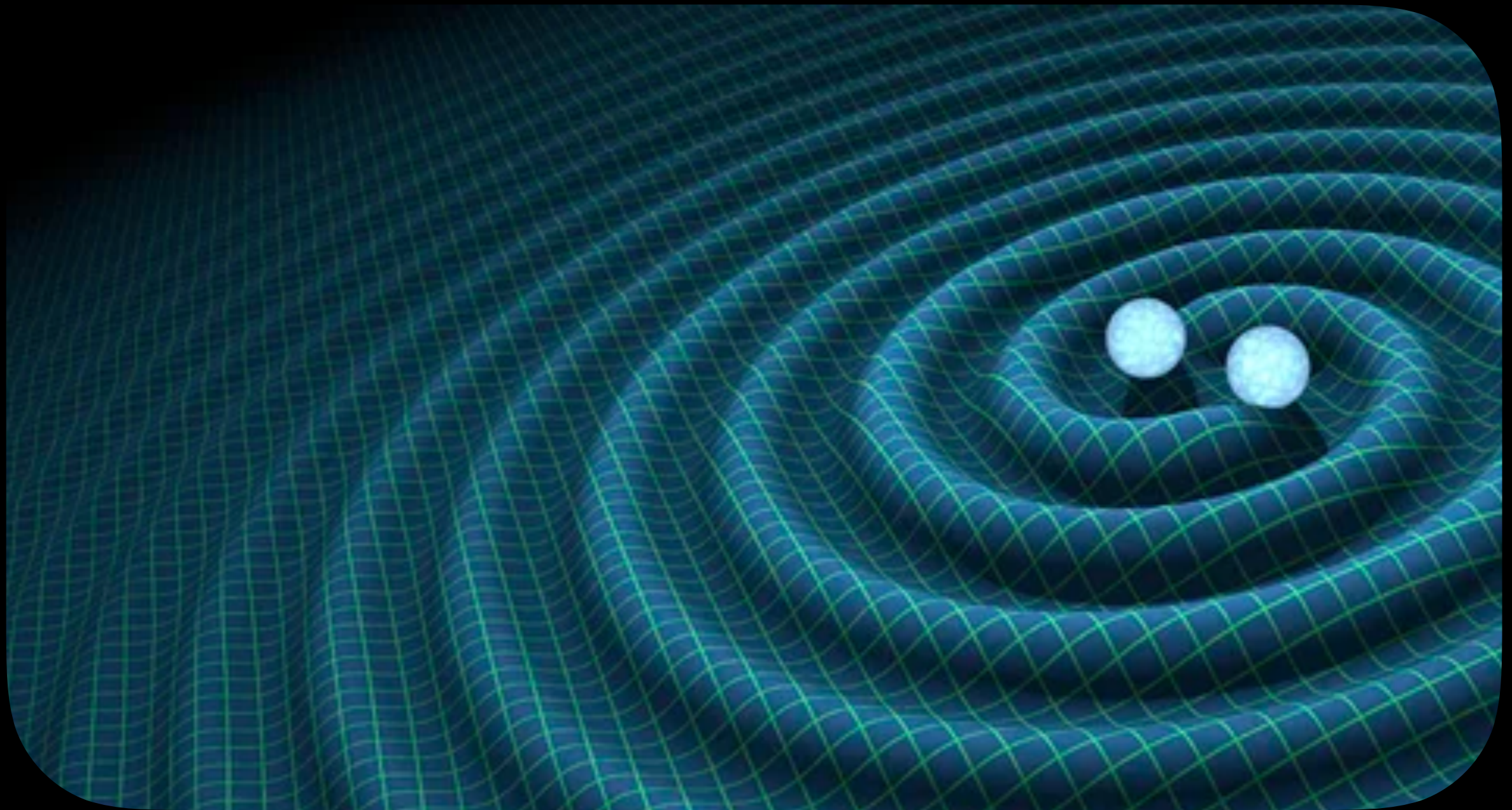


Bild: Caltech

Gravitationswellen & LIGO

LIGO → aLIGO

- Laser Interferometer Gravitationswellen Observatorium
- Zwei Arme im rechten Winkel, 4km lange Tunnel
- aLIGO: weiter entwickeltes LIGO
- Präzisestes Gerät jemals gebaut: Misst Schwankungen von bis zu 10^{-18} m (Vergleich: Atom 10^{-10} m)
- Virgo: Europäisches Gravitationswellen Observatorium

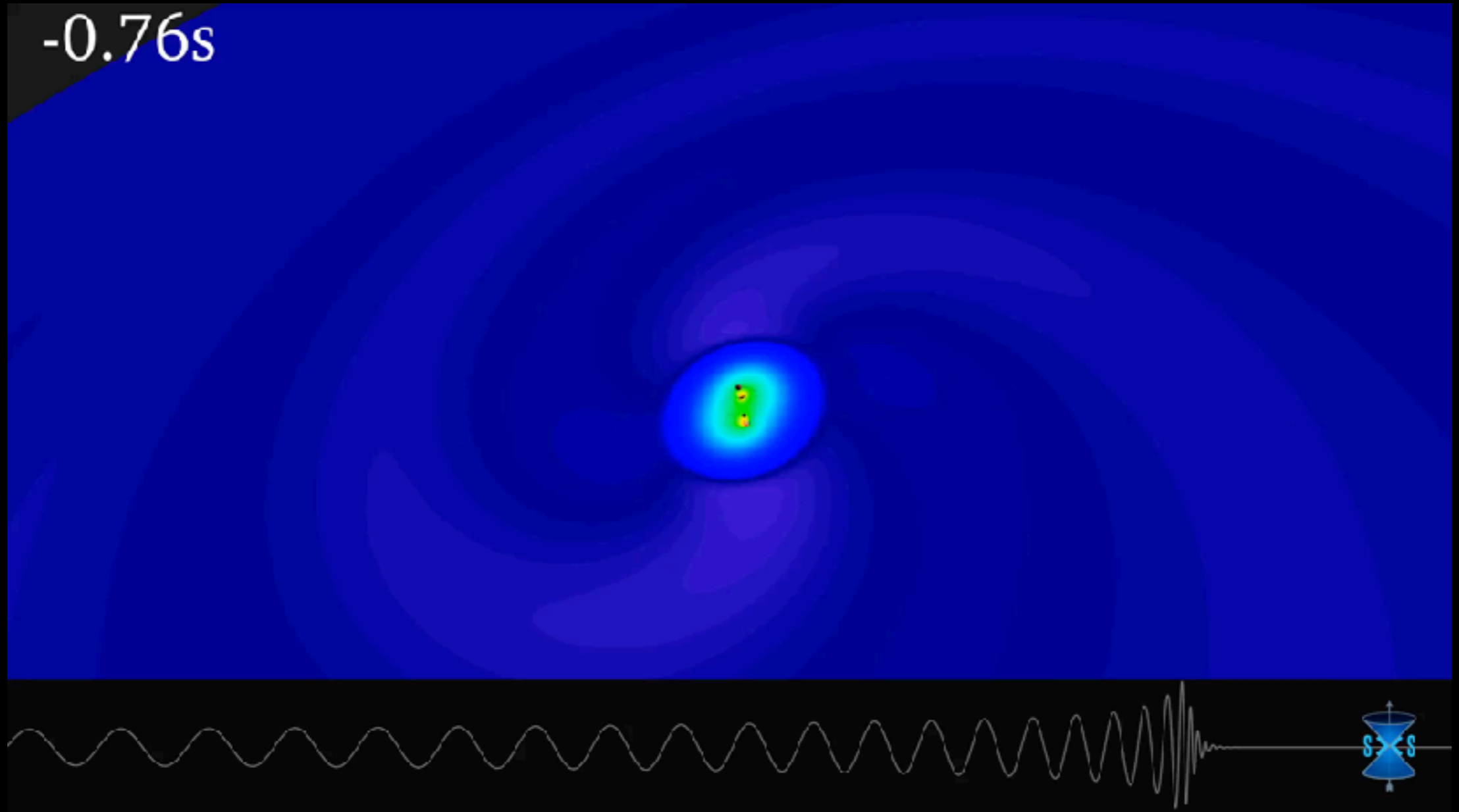




Revolutionär: GW150914

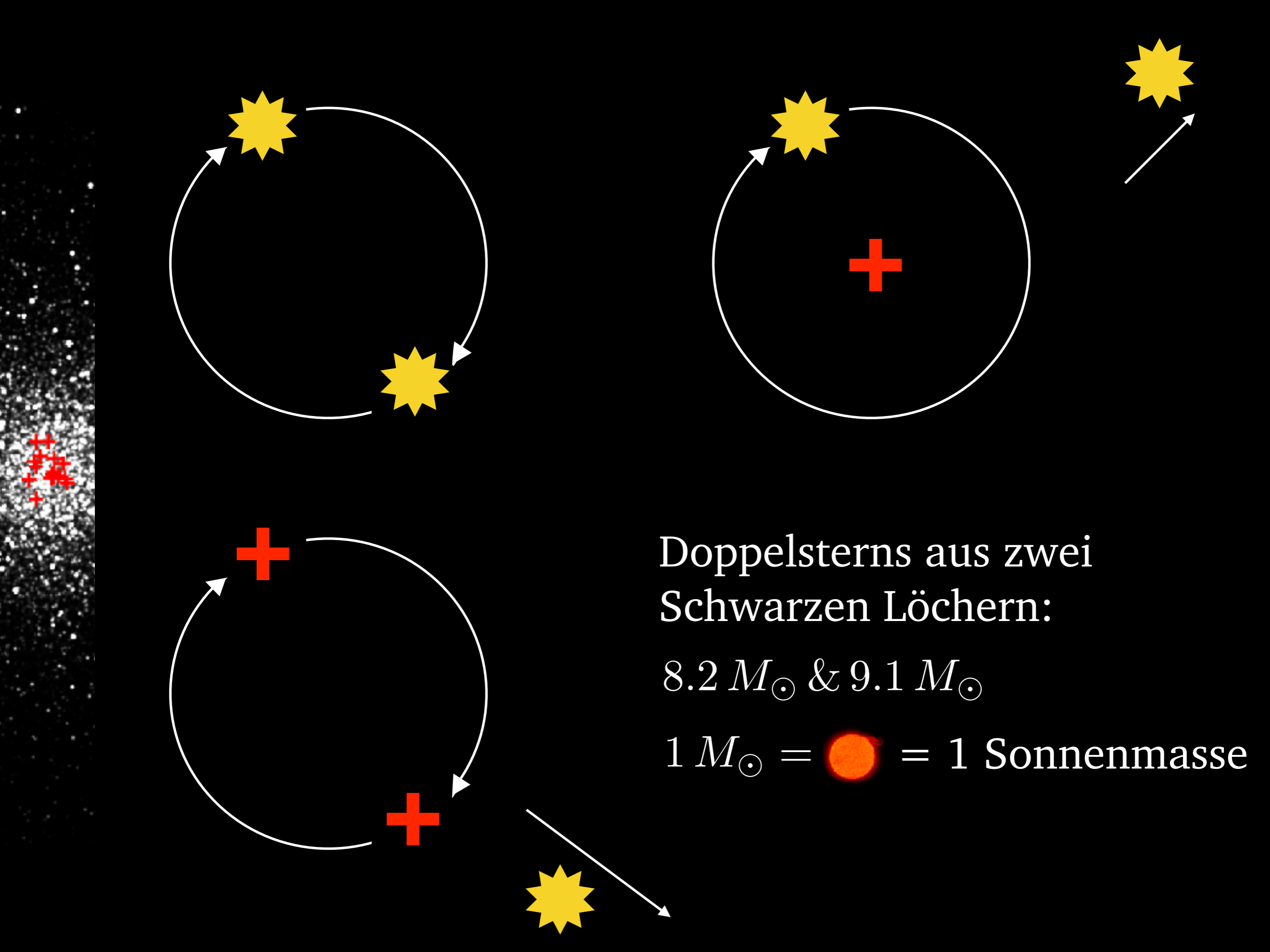
1. Erste direkte Entdeckung von Gravitationswellen.
2. Erste Beobachtung von einem Doppelstern aus Schwarzen Löchern.
3. Erste Beobachtung von der Kollision von zwei stellaren Schwarzen Löchern.

Gravitationswellen





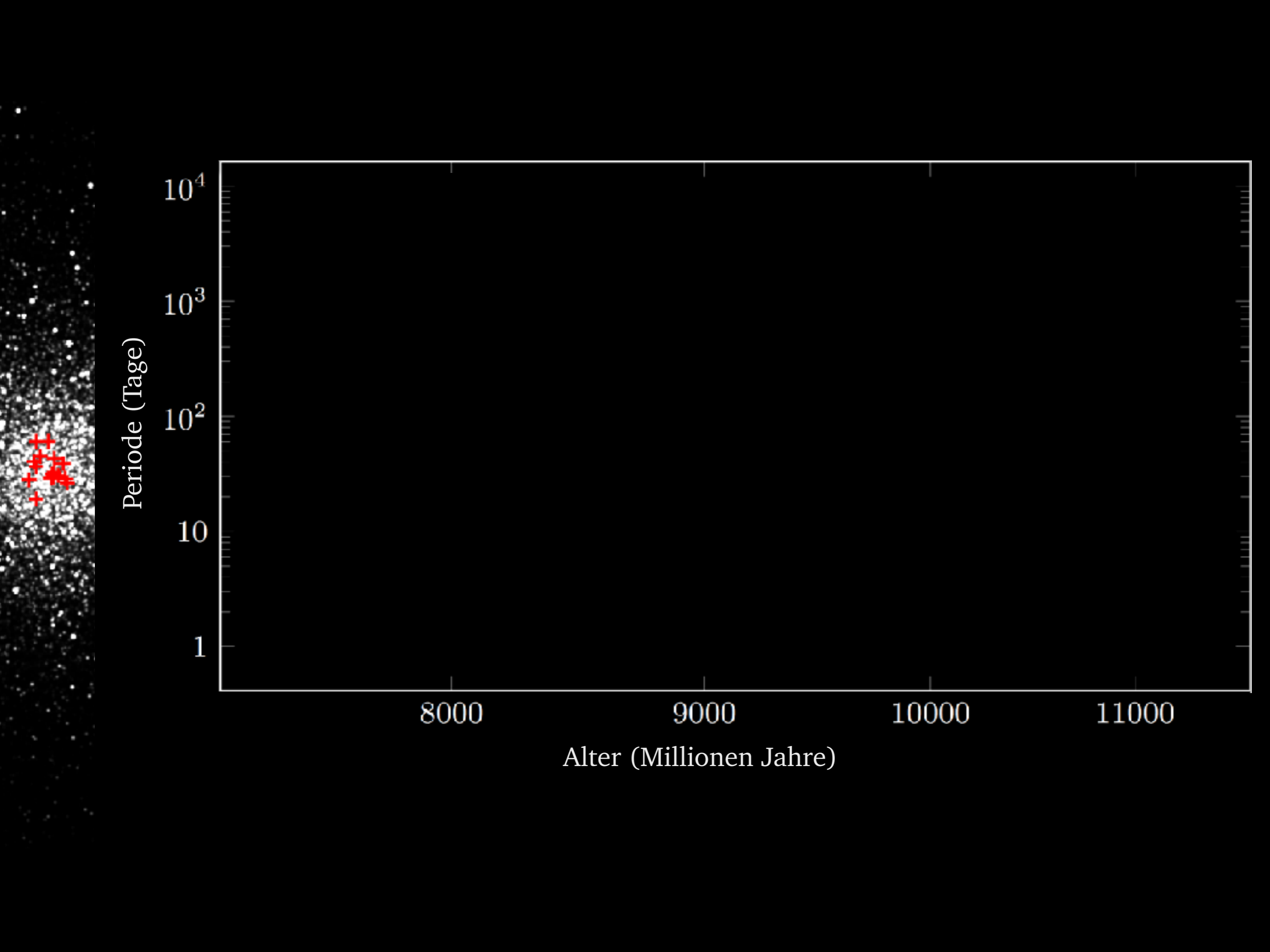
Wie können enge Doppelsterne
aus Schwarzen Löchern
entstehen?

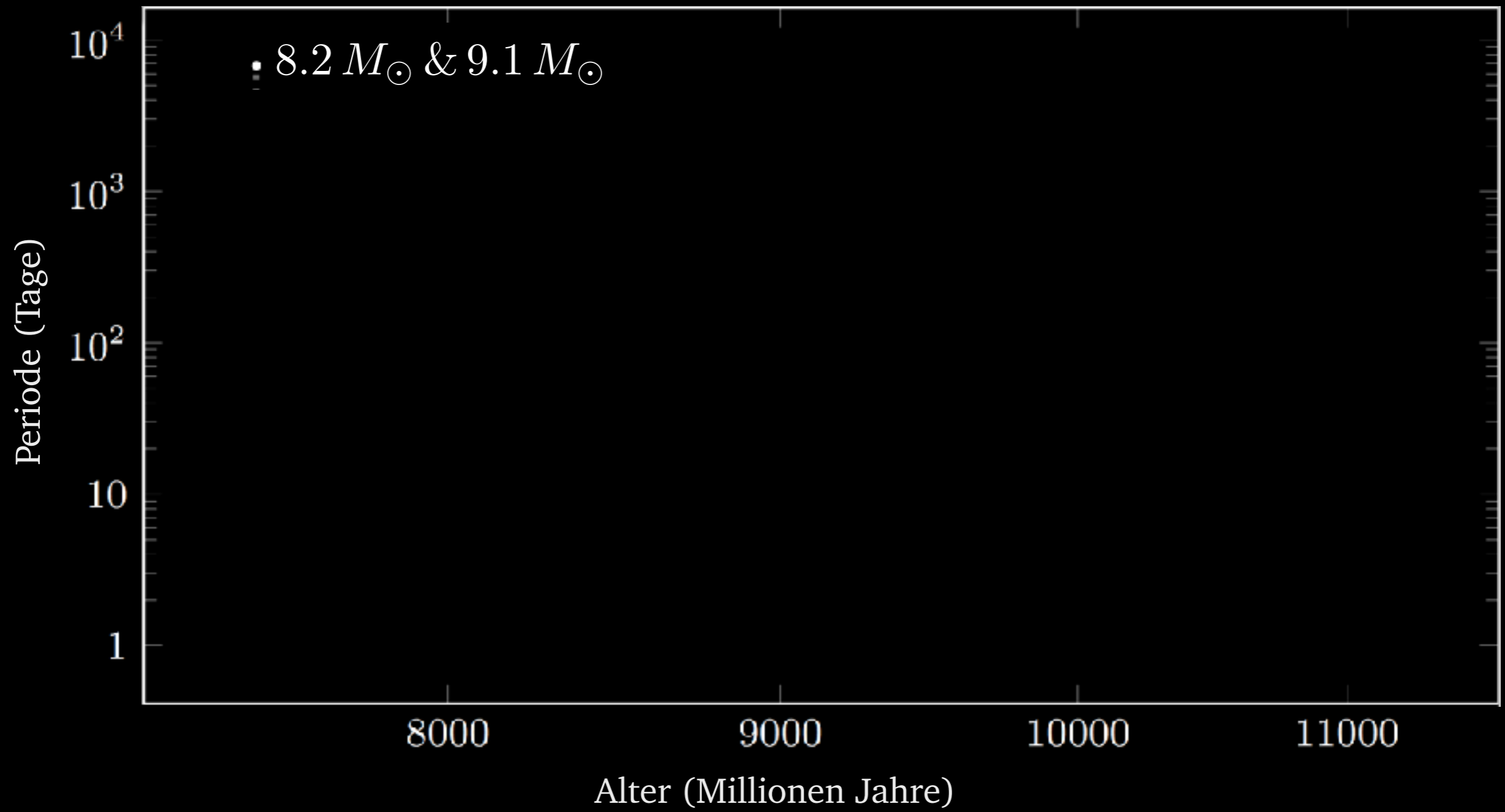
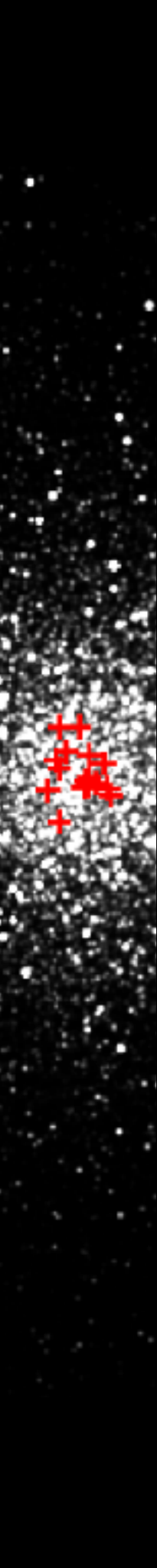


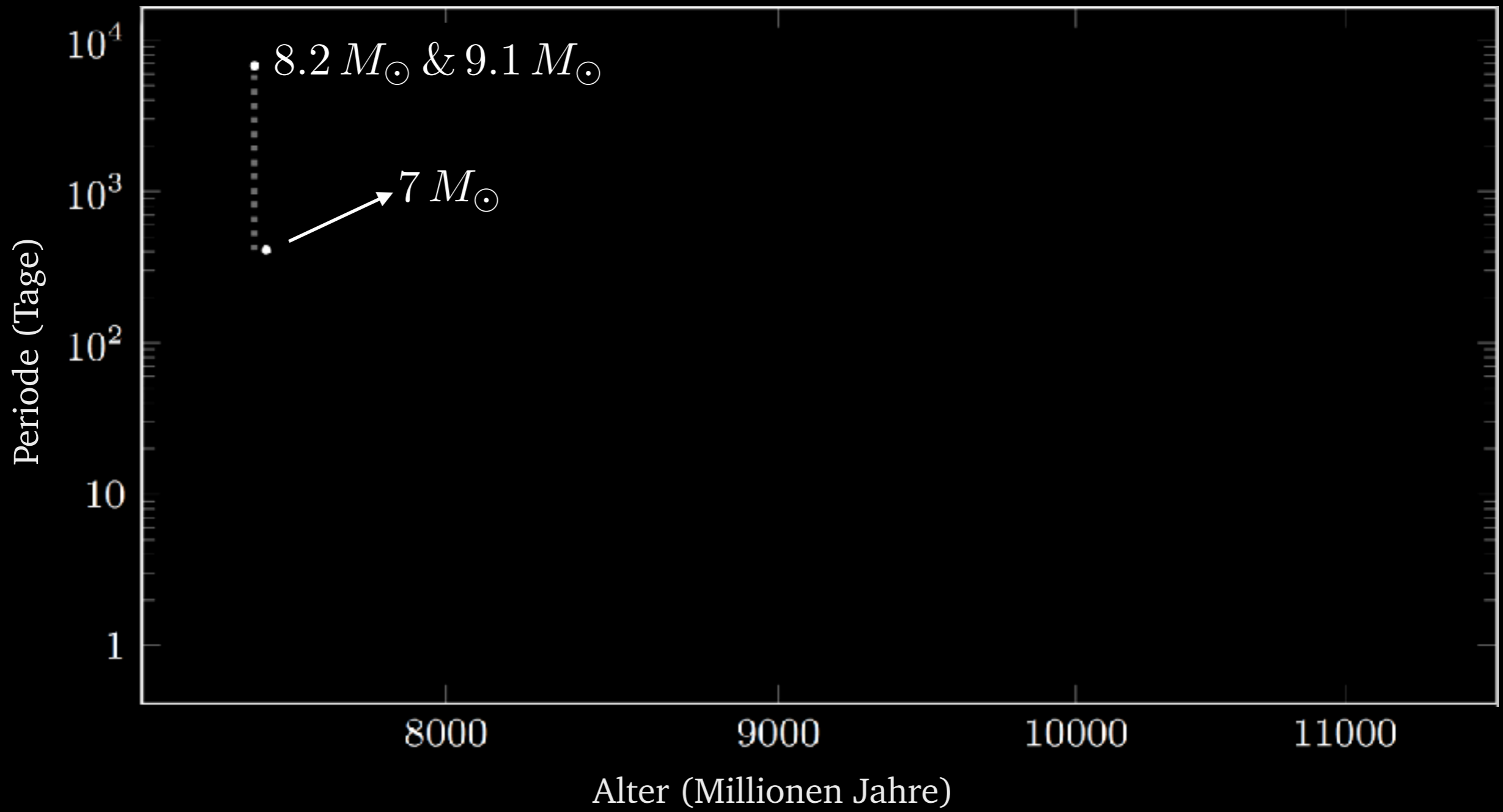
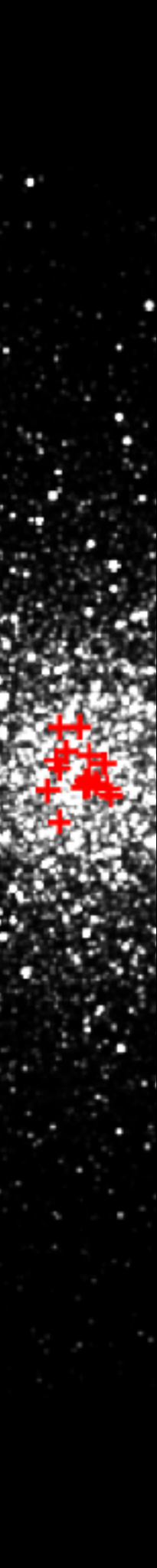
Doppelsterns aus zwei
Schwarzen Löchern:

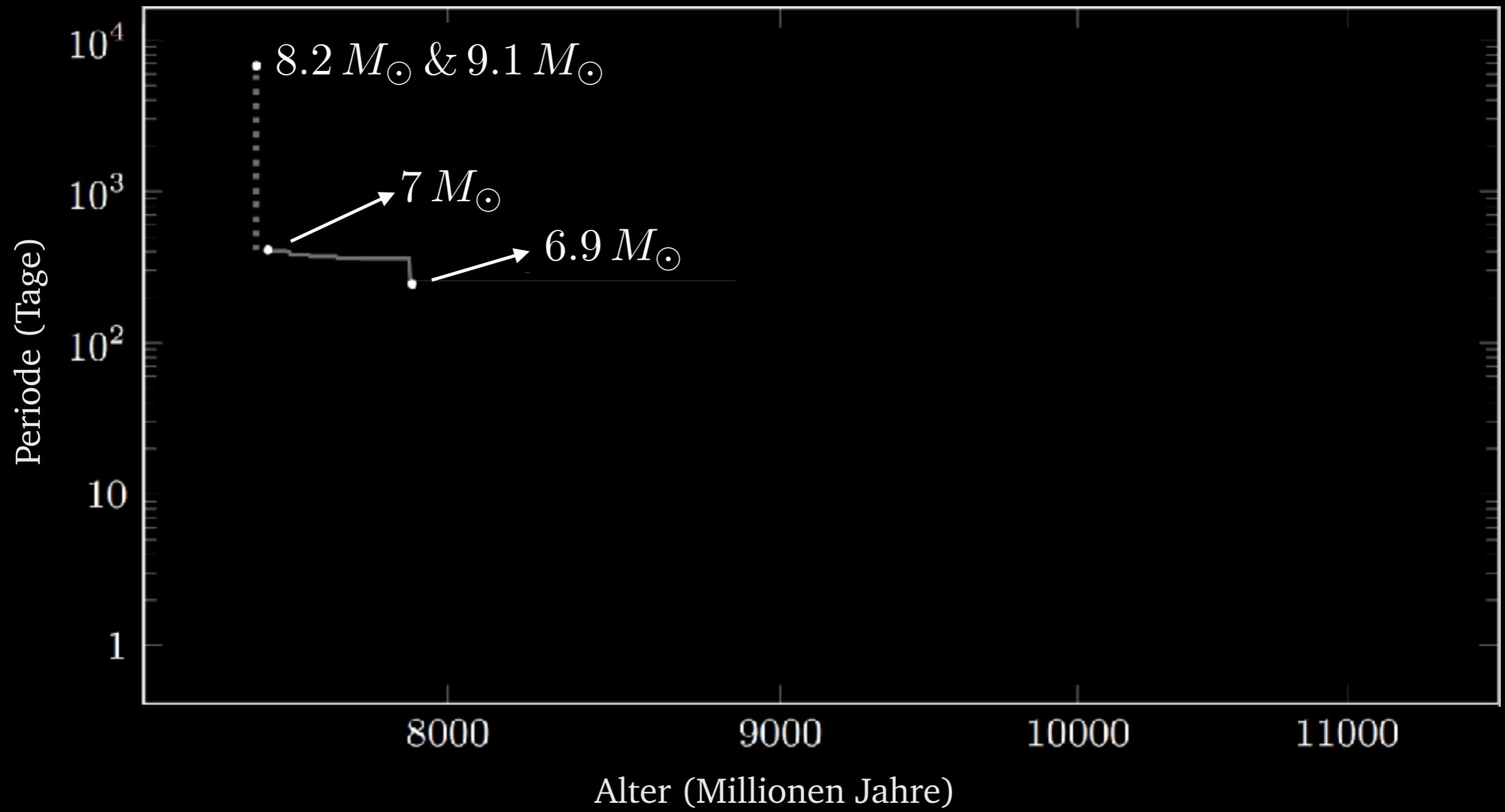
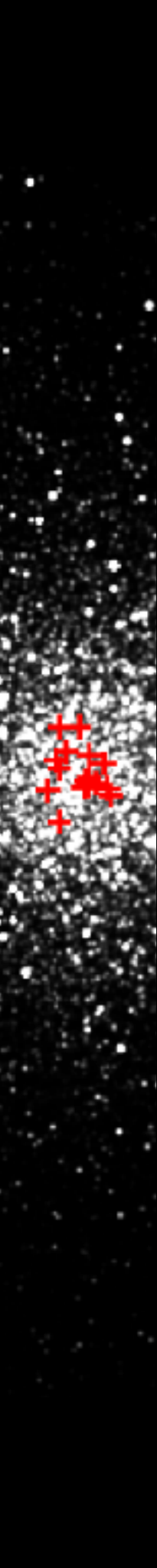
$8.2 M_{\odot}$ & $9.1 M_{\odot}$

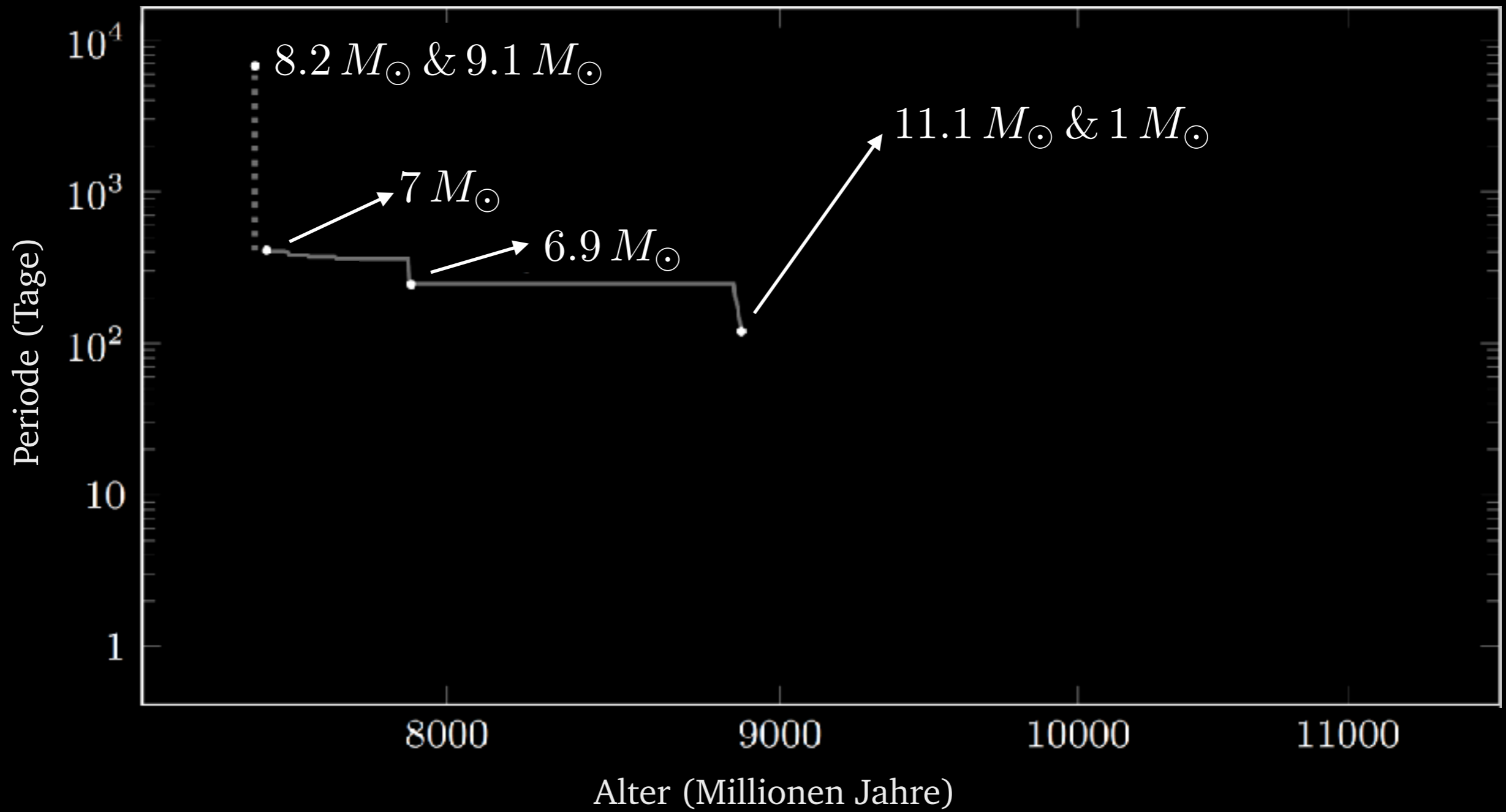
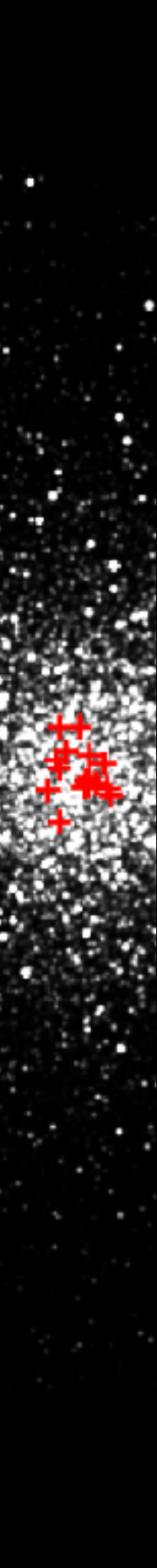
$1 M_{\odot} =$  $= 1$ Sonnenmasse

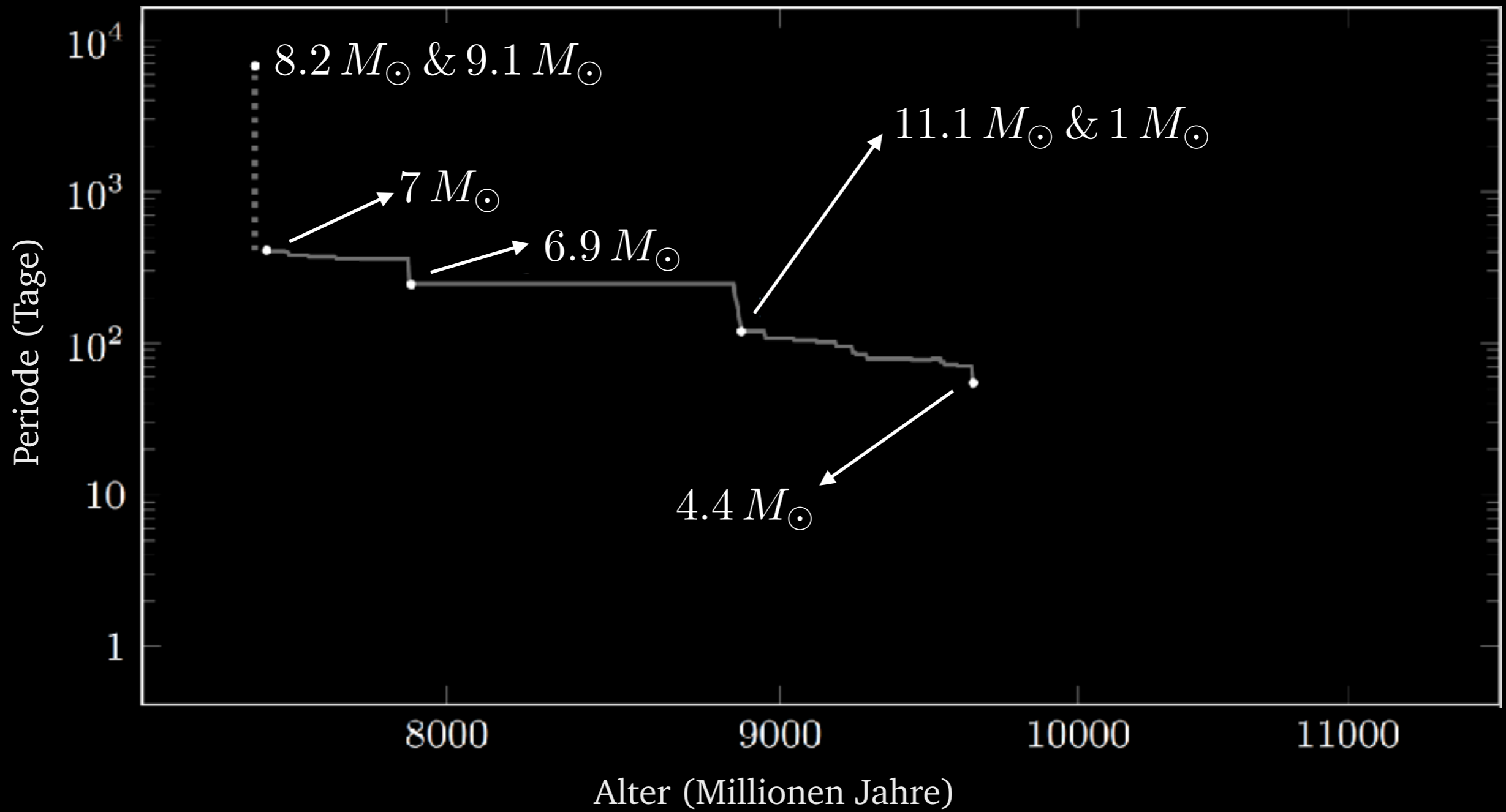
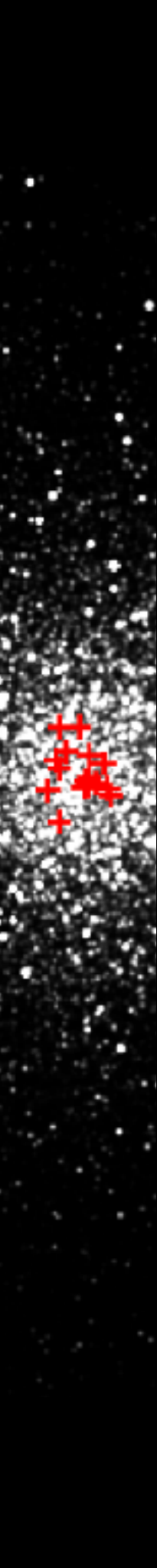


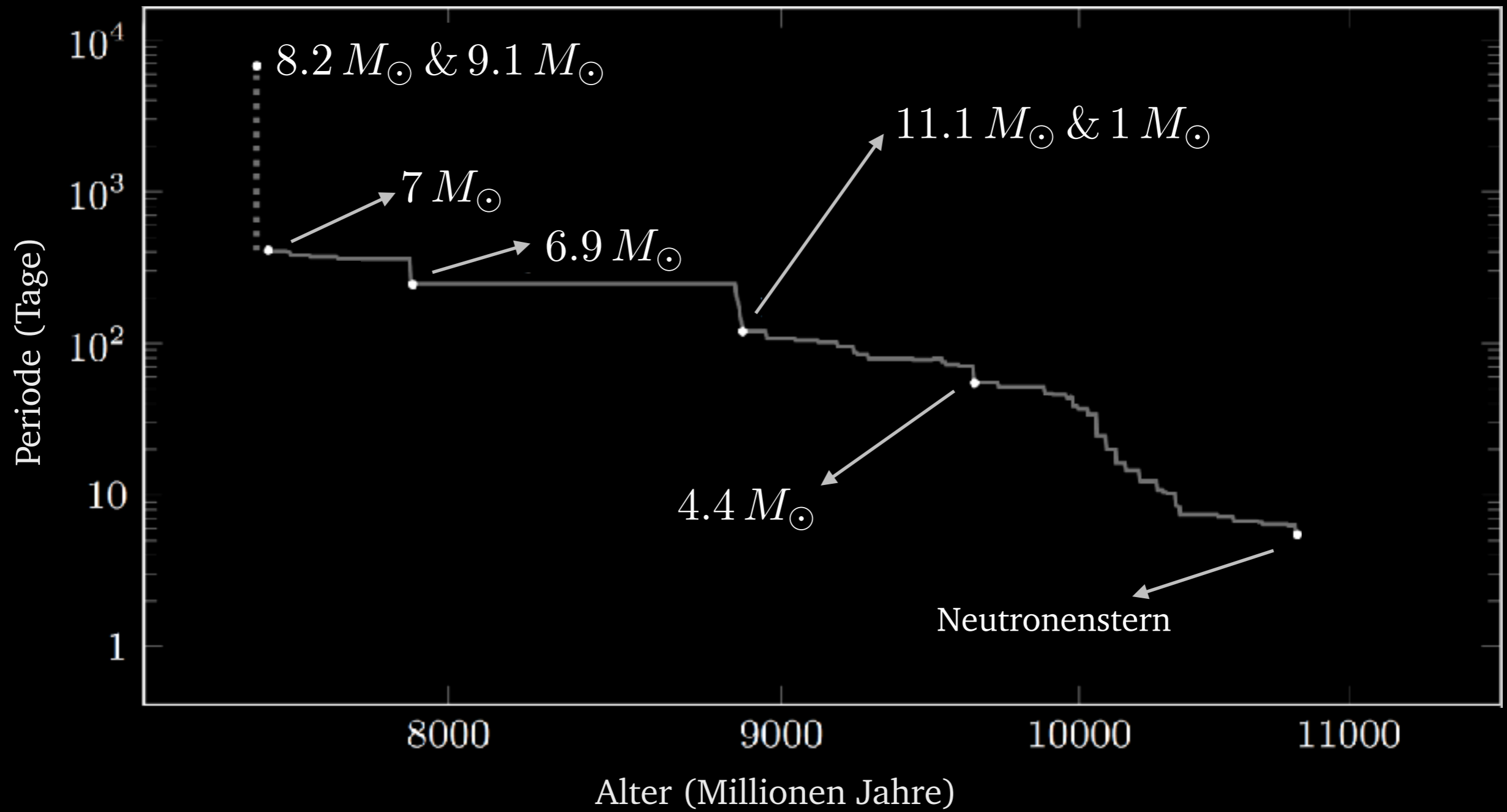
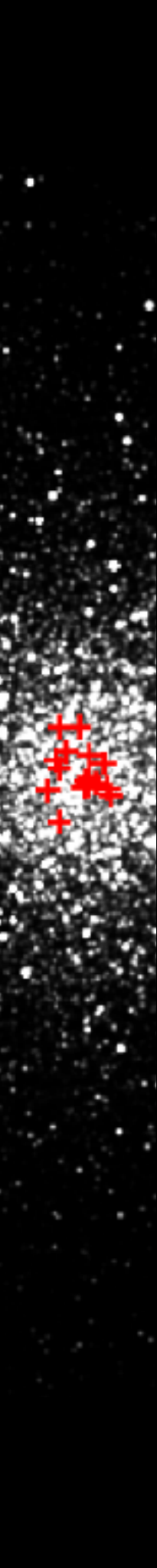




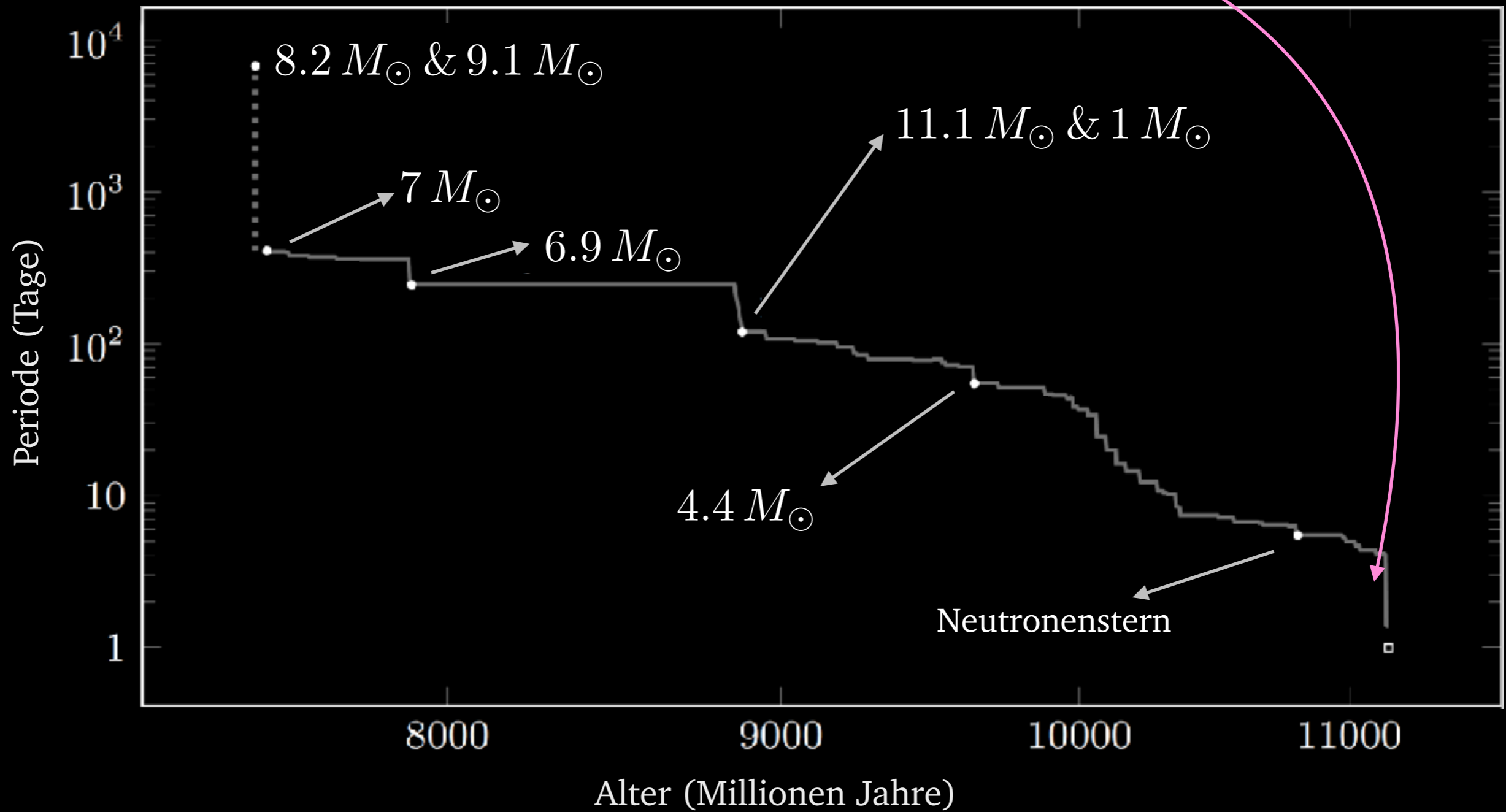




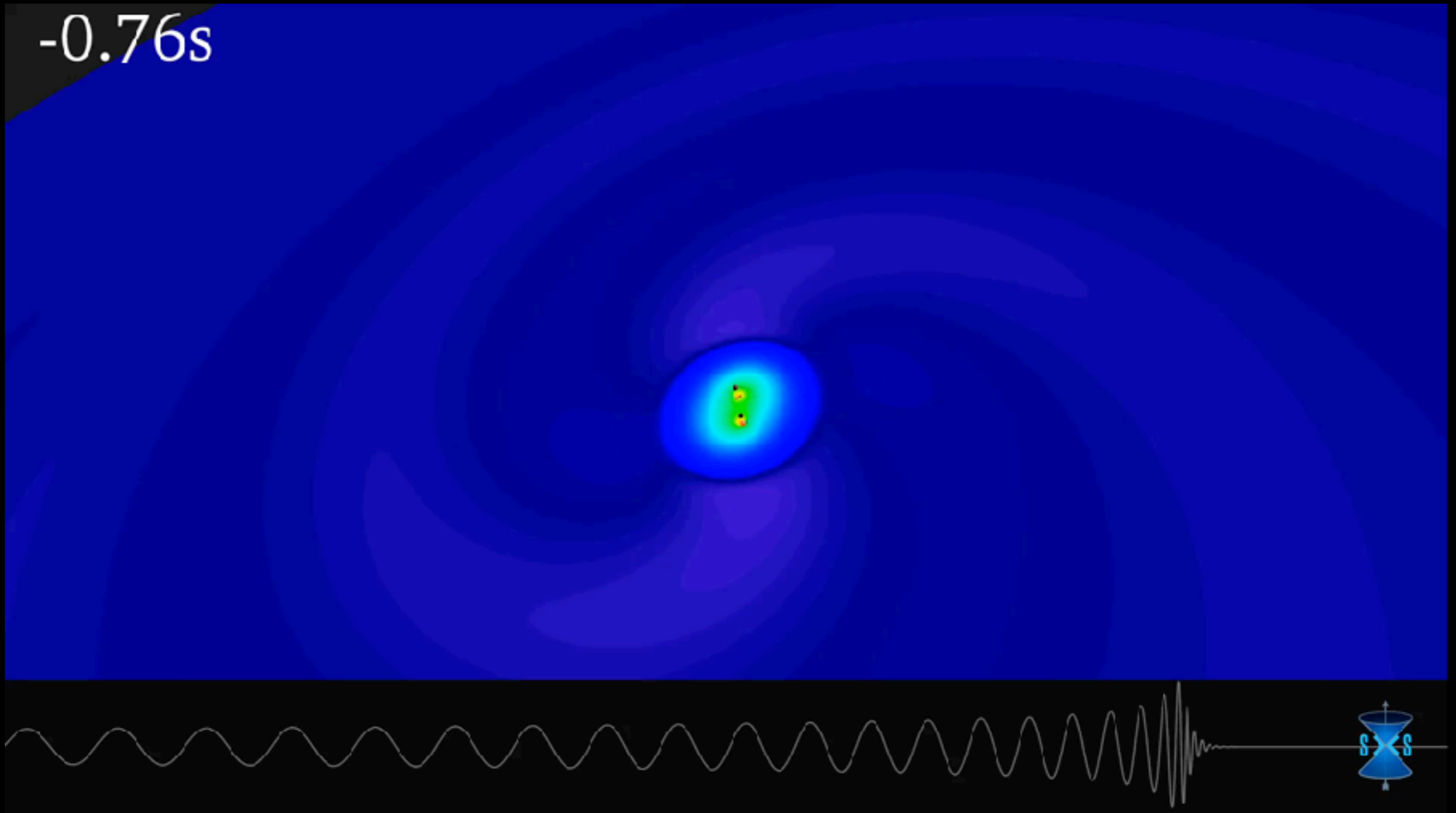


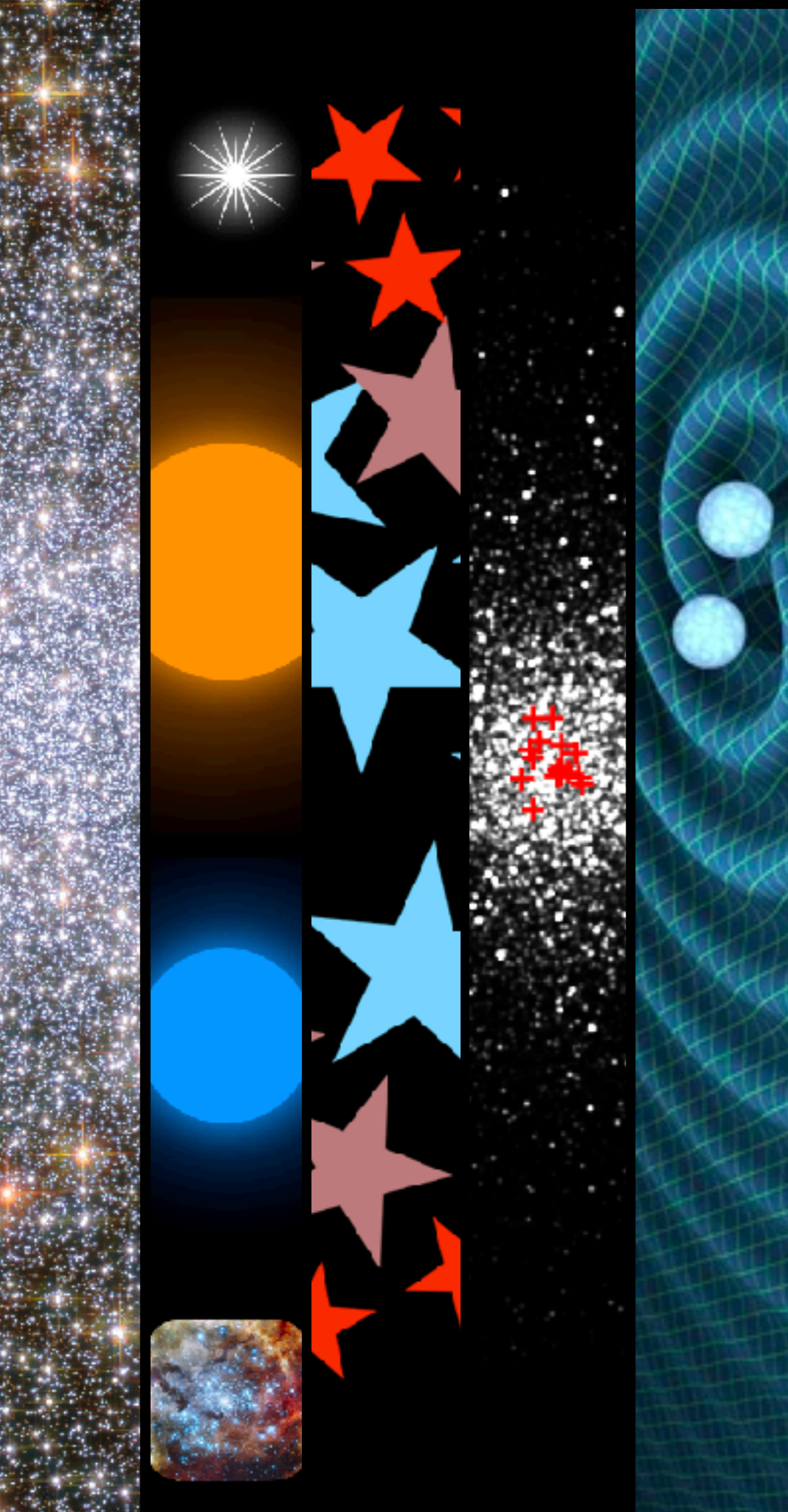


Kollision der beiden Schwarzen Löcher



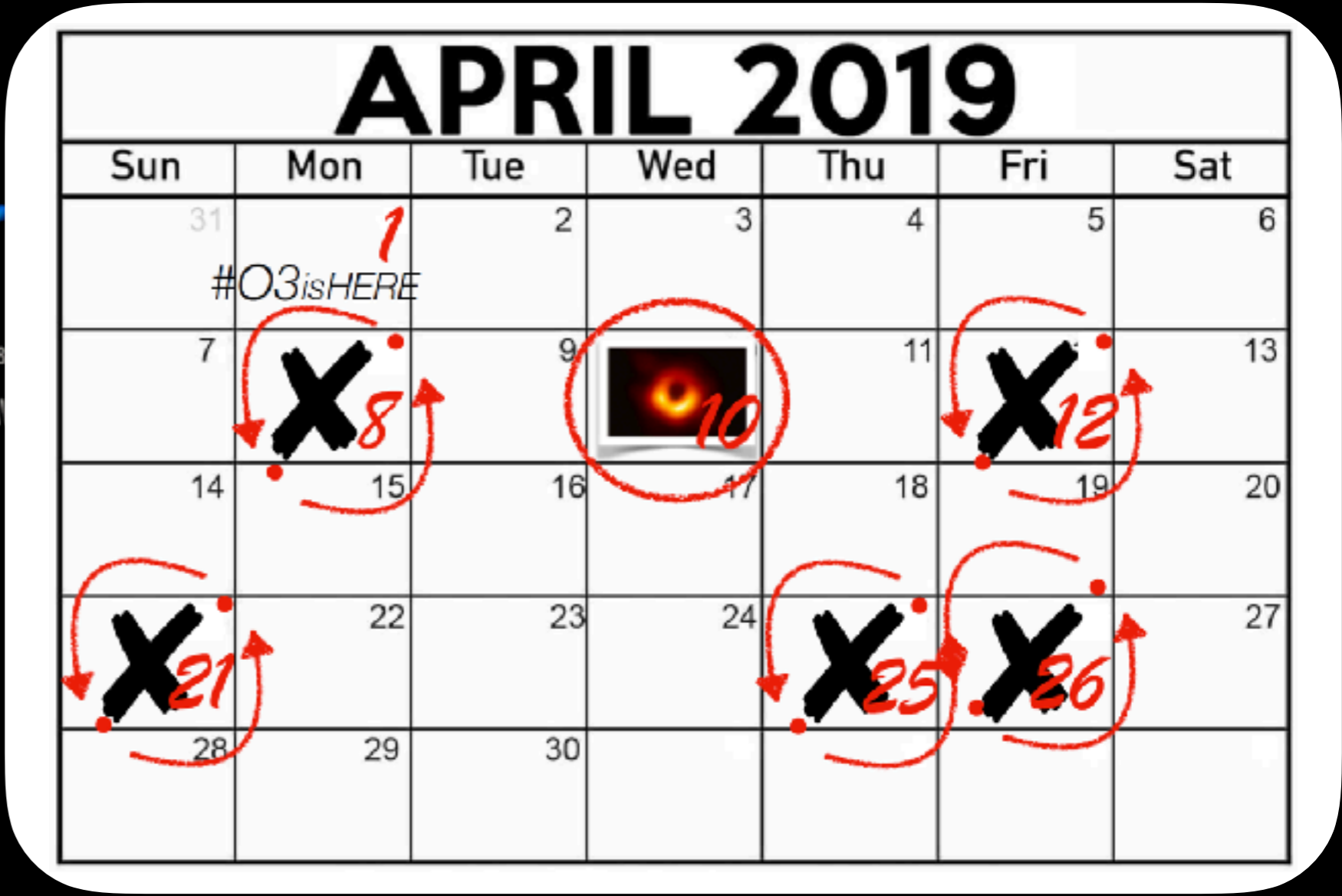
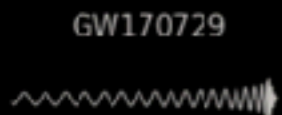
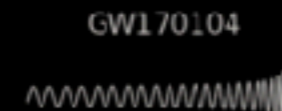
-0.76s

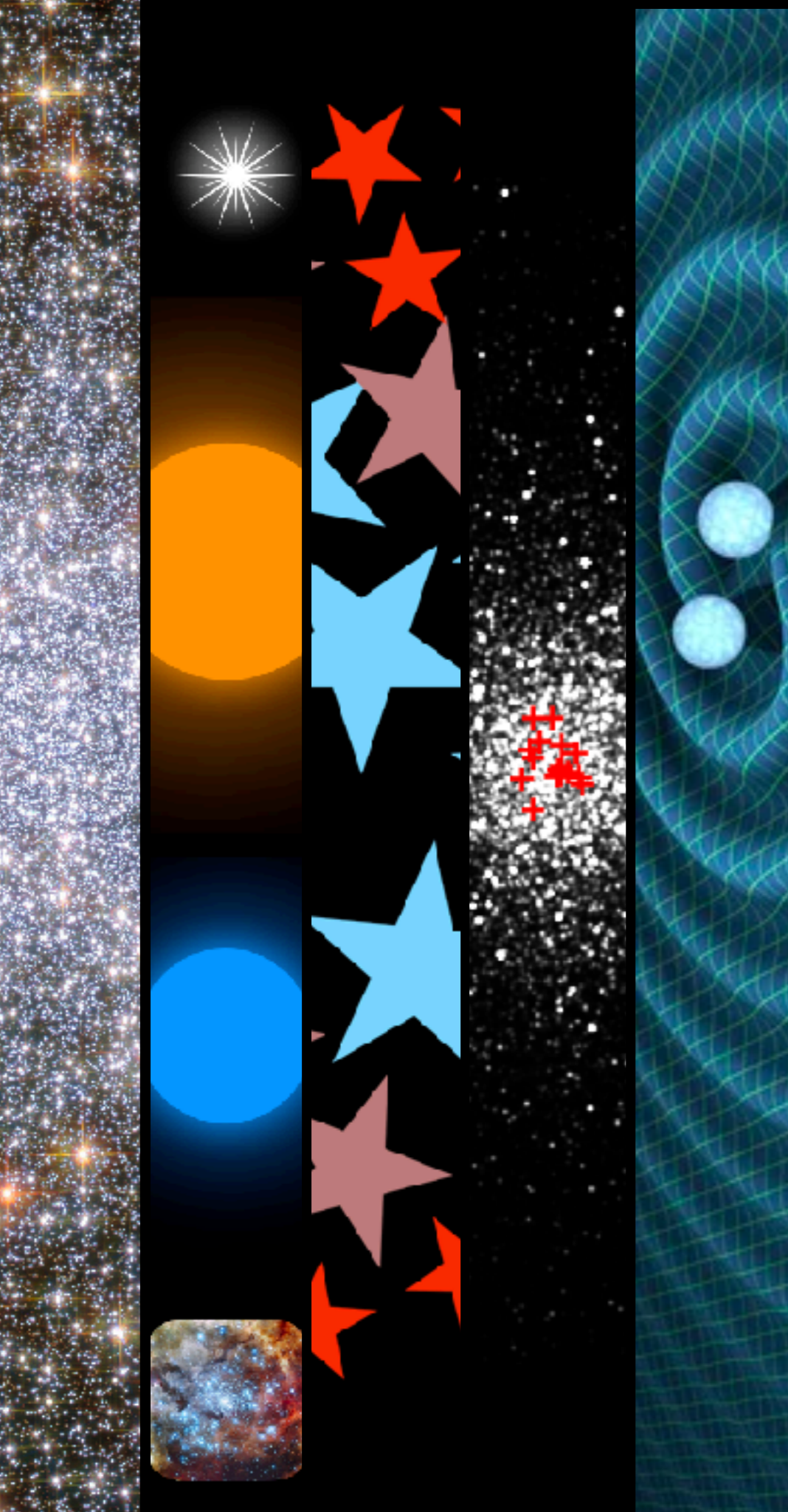




- Kugelsternhaufen sind sehr dichte Objekte, die sich Massgeblich von der Nachbarschaft um unsere Sonne unterscheiden.
- Die Evolution von Sternen liefert automatisch Stellare Schwarze Löcher.
- Kugelsternhaufen sind klein und dicht genug → Schwarze Löcher wandern ins Zentrum und treffen unweigerlich aufeinander.
- Realistische Computer Simulationen zeigen dass Begegnungen mit anderen Sternen Doppelsterne näher zusammen bringen.
- Gravitationswellen können so ganz natürlich durch die Kollision zweier schwarzer Löcher entstehen.
- Andere Szenarien existieren, welches dominiert ist nach wie vor unklar.

Seit 01. April 2019: aLIGO+Virgo O3





- Kugelsternhaufen sind sehr dichte Objekte, die sich Massgeblich von der Nachbarschaft um unsere Sonne unterscheiden.
- Die Evolution von Sternen liefert automatisch Stellare Schwarze Löcher.
- Kugelsternhaufen sind klein und dicht genug → Schwarze Löcher wandern ins Zentrum und treffen unweigerlich aufeinander.
- Realistische Computer Simulationen zeigen dass Begegnungen mit anderen Sternen Doppelsterne näher zusammen bringen.
- Gravitationswellen können so ganz natürlich durch die Kollision zweier schwarzer Löcher entstehen.
- Andere Szenarien existieren, welches dominiert ist nach wie vor unklar.