



Das Leben, das Universum & der ganze Rest

Einführung in die Kosmologie und nukleare Astrophysik

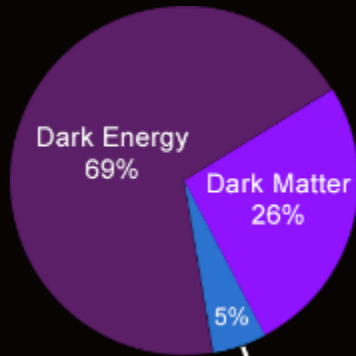
Forschung trifft Schule @home

Online-Fortbildung für Lehrkräfte zur Astroteilchenphysik

Steffen Turkat

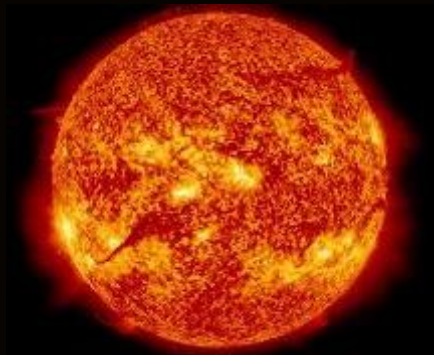
Padova

24. Oktober 2024



Einführung in die Kosmologie

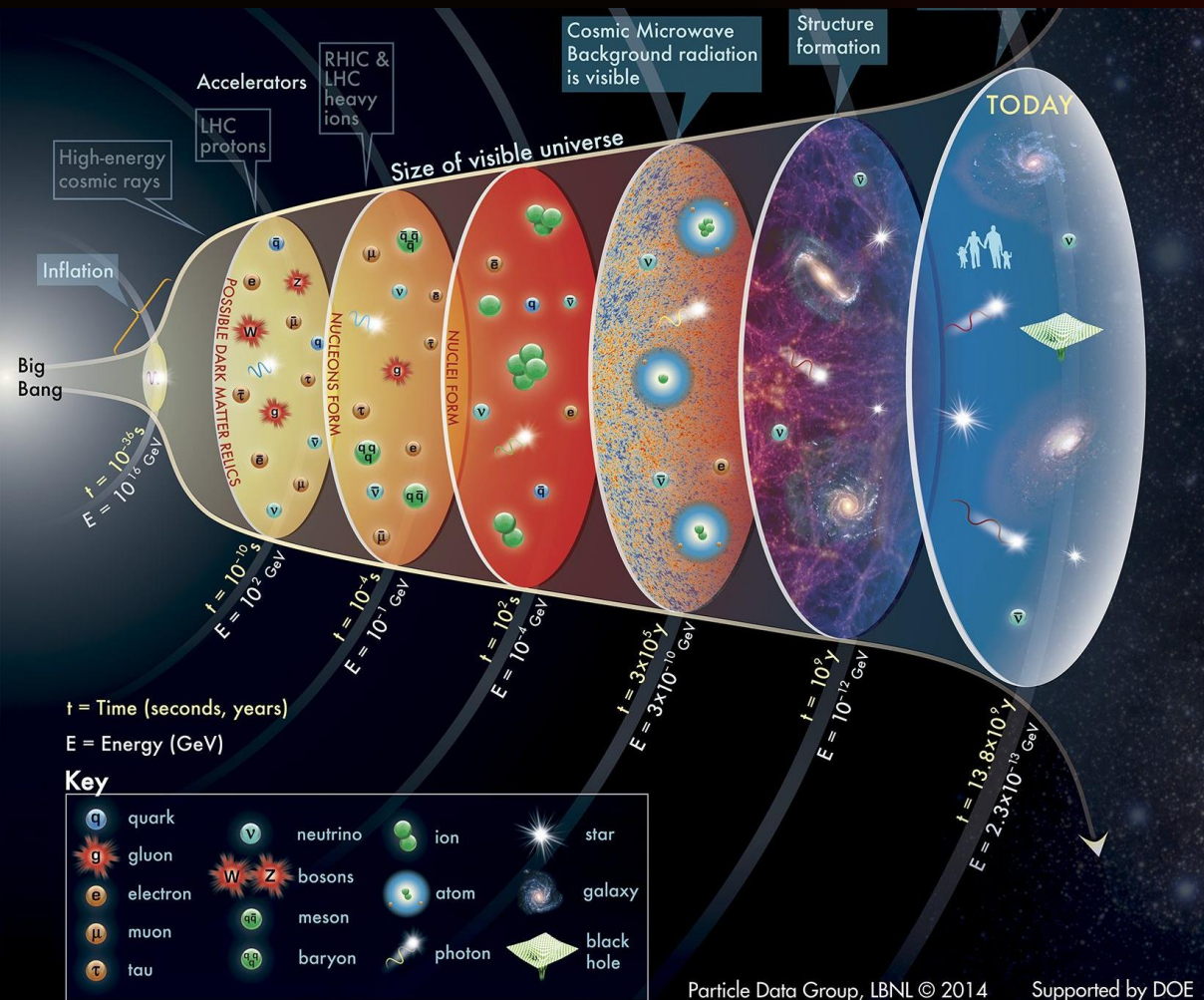
- Was wissen wir eigentlich über unser Universum?
- Und was hat das mit dunkler Materie zu tun?



Nukleare Astrophysik

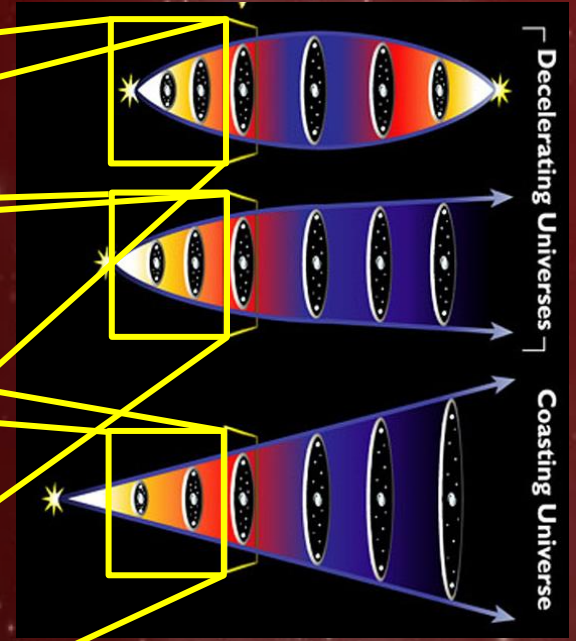
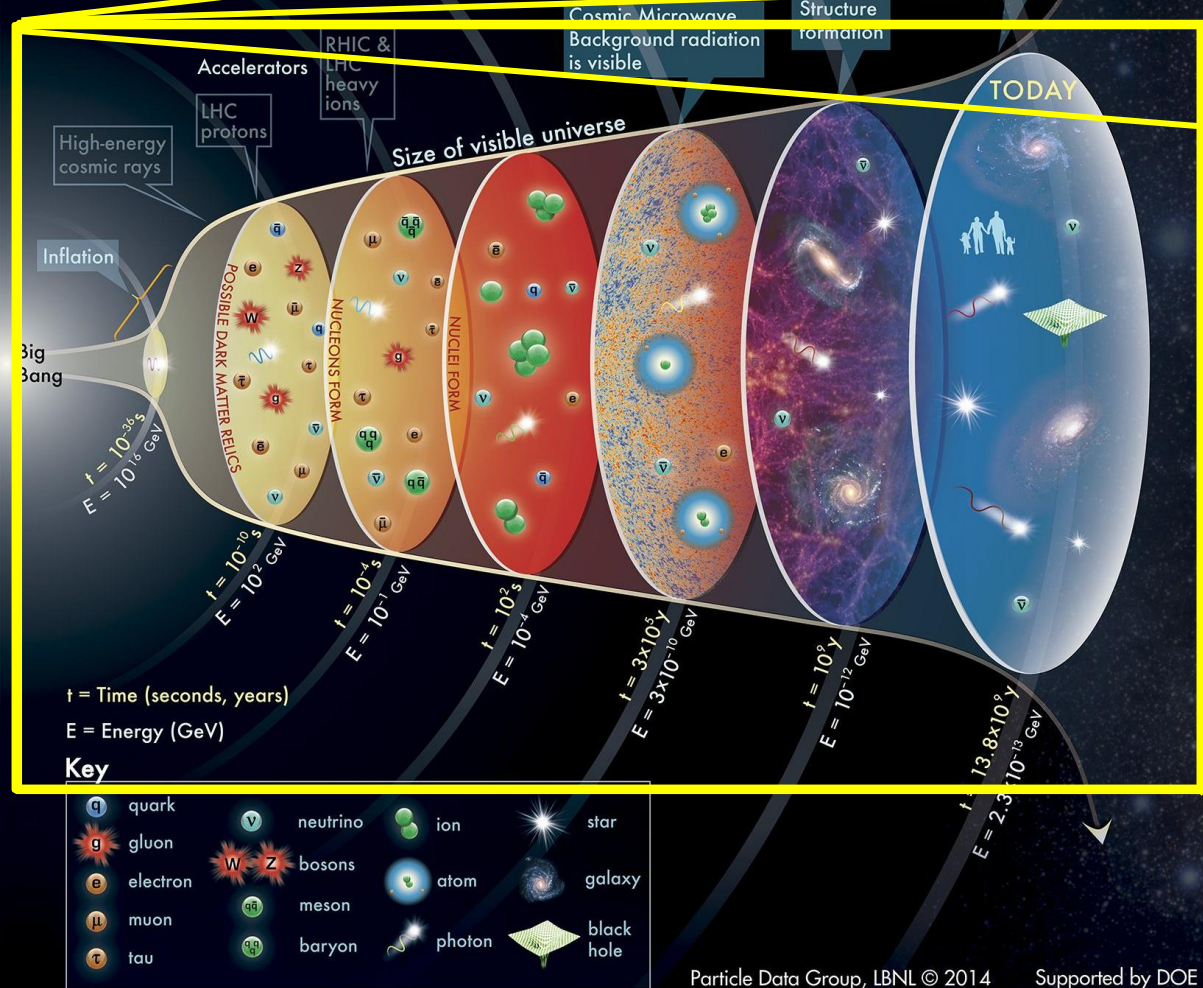
- Woher kommen all unsere chemischen Elemente?

Was ist in den letzten 13.6 Milliarden Jahren passiert?



- 0s Big Bang
- $10^{-44} s$ Planck-Zeit
- $10^{-32} s$ Inflation
- $10^{-6} s$ Bildungen von Proton & Neutron
- $10^0 s$ Urknall-Nukleosynthese
- 380000 y Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
- $10^8 y$ Erste Sterne
- $1.38 \cdot 10^{10} y$ Heute

Was ist in den letzten 13.6 Milliarden Jahren passiert?



- 0s **Big Bang**
- 10^{-44} s **Planck-Zeit**
- 10^{-32} s **Inflation**
- 10^{-6} s **Bildungen von Proton & Neutron**
- 10^0 s **Urknall-Nukleosynthese**
- 380000 y **Mikrowellen-Hintergrundstrahlung**
- 10^8 y **Erste Sterne**
- $1.38 \cdot 10^{10}$ y **Heute**



1915

Geometrie der Raumzeit kann Massen sagen, wie sie sich bewegen sollen (Energie-Impuls-Tensor)

Geometrie der Raumzeit

Energie-Impuls-Tensor

$$E = mc^2$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Massen haben Einfluss auf Krümmung der Raumzeit

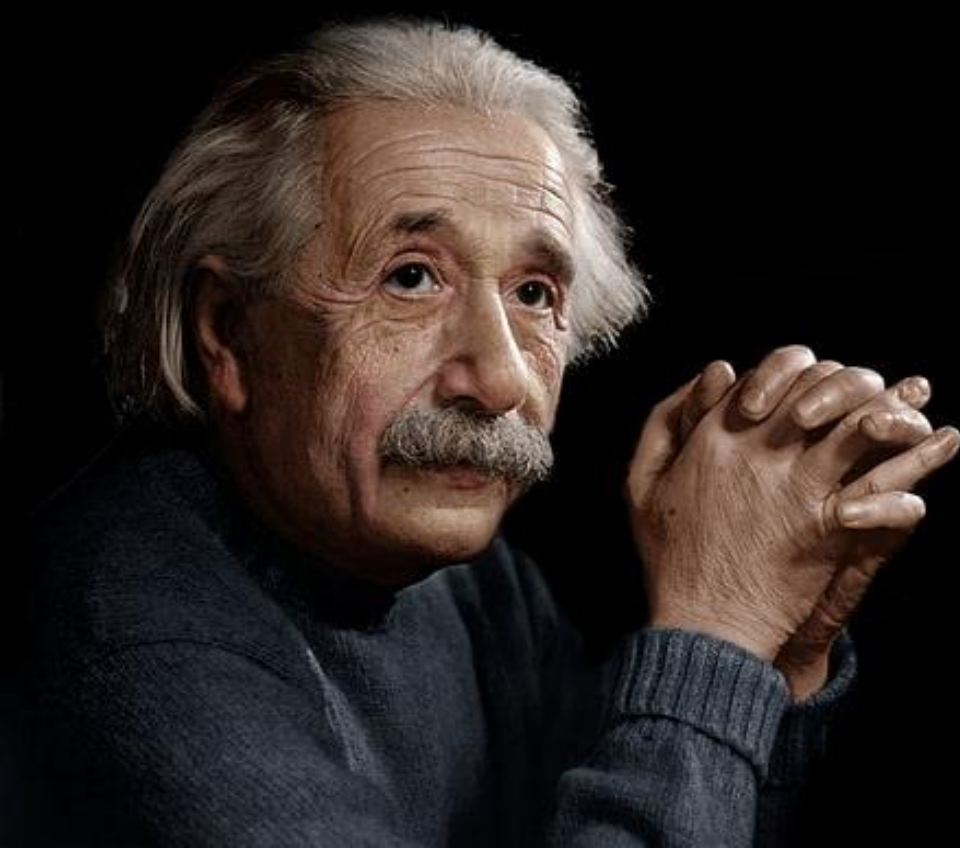
(Newton: "Gravitationspotential")

Masse



Raumzeitkrümmung

- Gravitation spielt nur Nebenrolle
- Gemäß Einstein keine Kraft, die im Universum wirkt
- Lediglich eine Eigenschaft der gekrümmten Raumzeit



1915

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Massen haben Einfluss auf Krümmung der Raumzeit
(Newton: "Gravitational potential")

**Zehn gekoppelte nichtlineare partielle
retardierte Differentialgleichungen
zweiter Ordnung**

Masse
↓
Raumzeitkrümmung

- Gravitation spielt nur Nebenrolle
- Gemäß Einstein keine Kraft, die im Universum wirkt
- Lediglich eine Eigenschaft der gekrümmten Raumzeit



1915

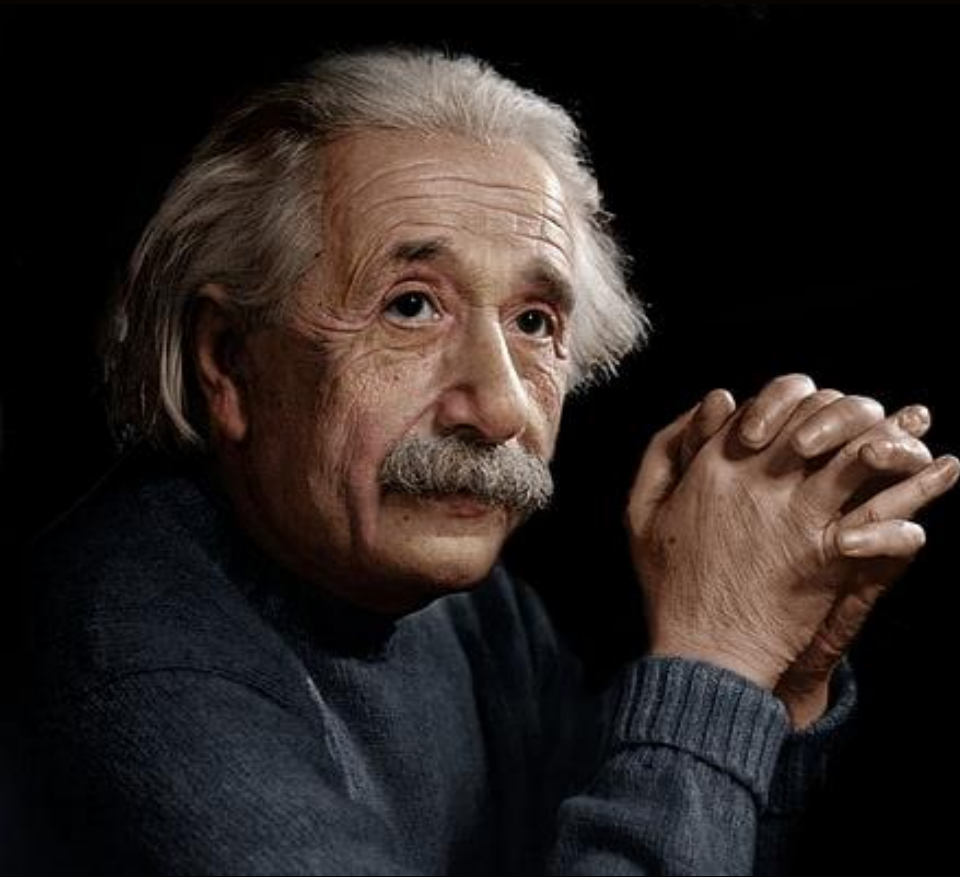
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- 
- Wie hat Einstein diese Gleichung gelöst?
 - Einführung von Symmetrien
 - Man erhält Metrik als Lösung der ART
 - (Minkowski, Schwarzschild, ...)
 - Symmetrien für die Kosmologie:
 - Kosmologisches Prinzip: **Homogenität, Isotropie**
 - Lösung:
 - **Das Universum ist instabil!**
 - Wichtig: Damaliges Verständnis vom Universum (1915)



1915

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

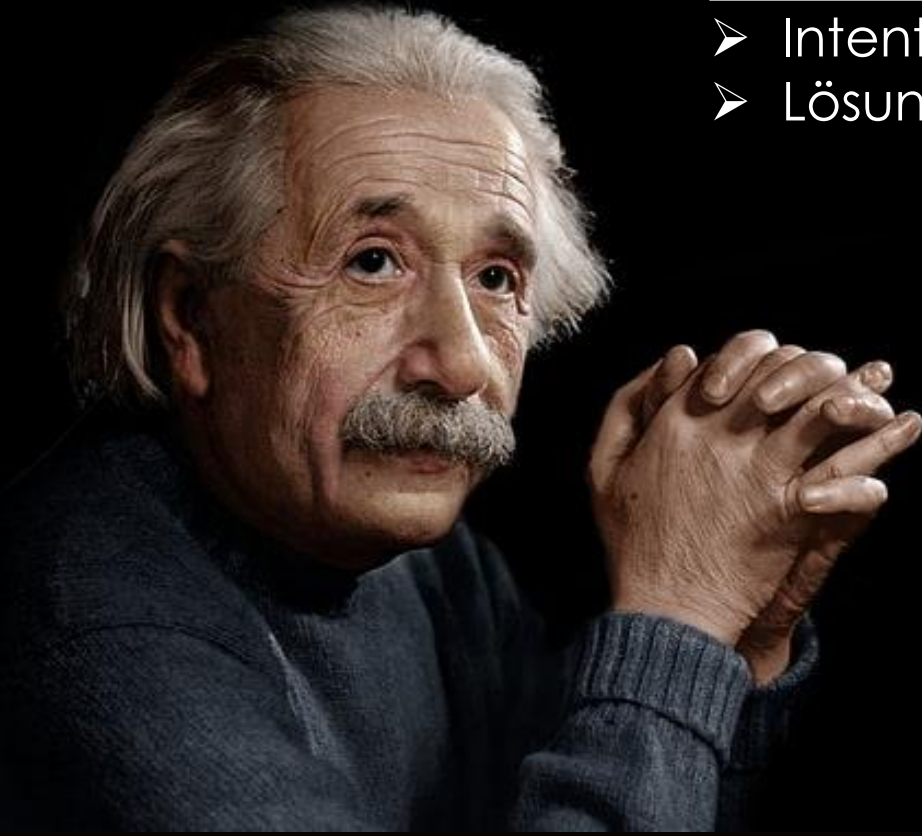




$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Einführung der kosmologischen Konstante

- Intention: Konstante kompensiert Expansion oder Zusammenfall
- Lösung: Statisches Universum



Georges Lemaître & Alexander Friedmann

- ART → Dynamisches Universum
- Rotverschiebung → Universum expandiert!



Edwin Hubble

- Rotverschiebung ~ Entfernung

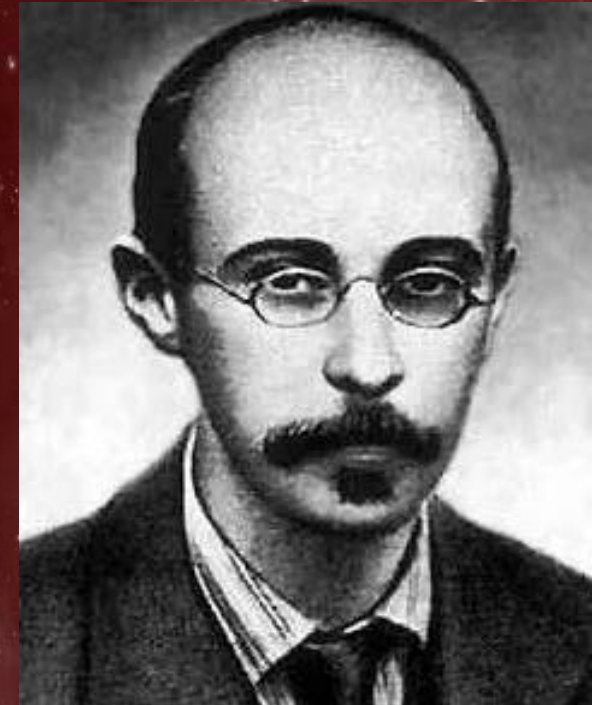
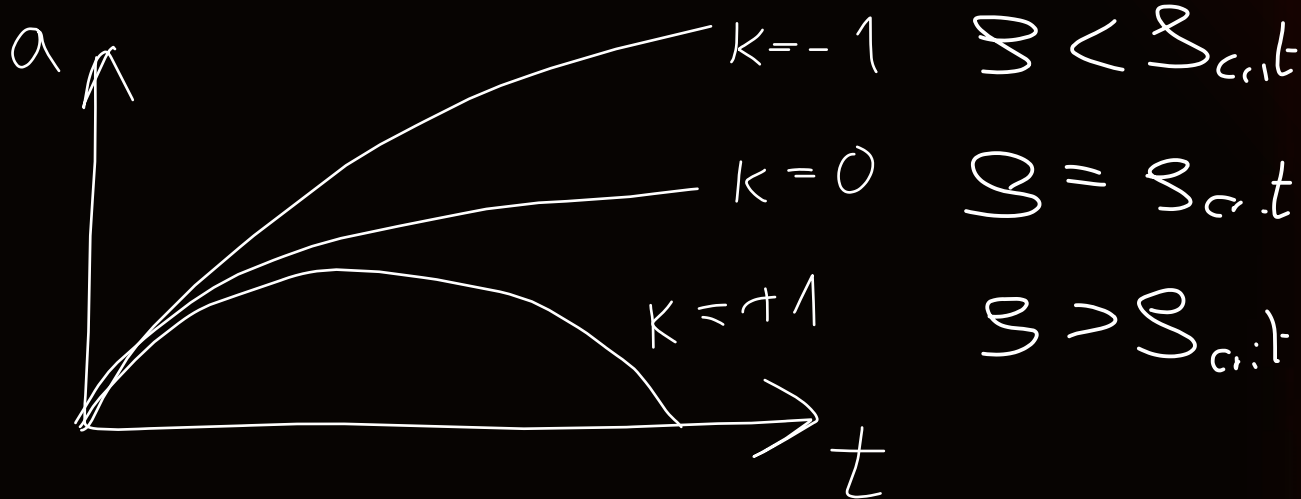
Die Friedmann-Gleichungen

Änderung des Skalenfaktors

Krümmungsparameter

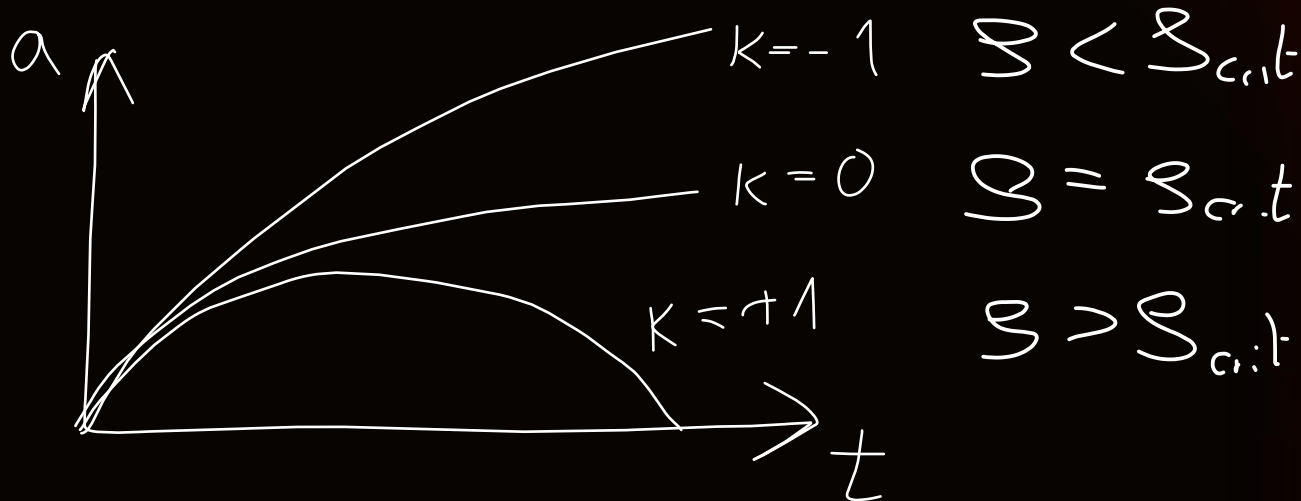
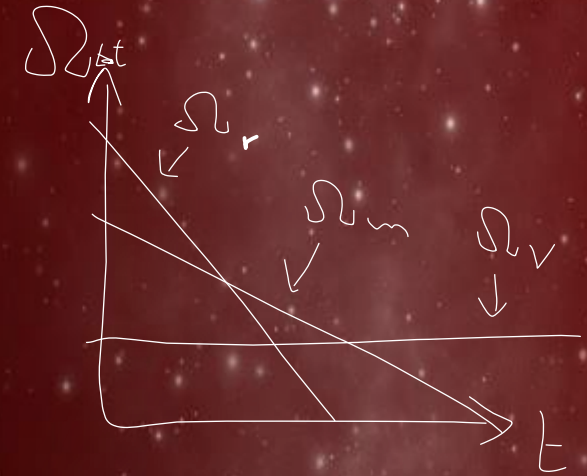
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3p)$$



Formen der Energiedichte im Universum

- **Materie (~32%)**
 - Dunkle Materie (~27%)
 - Baryonische Materie (~5%)
- **Strahlung (Relativistische Teilchen, 0%)**
- **Dunkle Energie (~68%)**

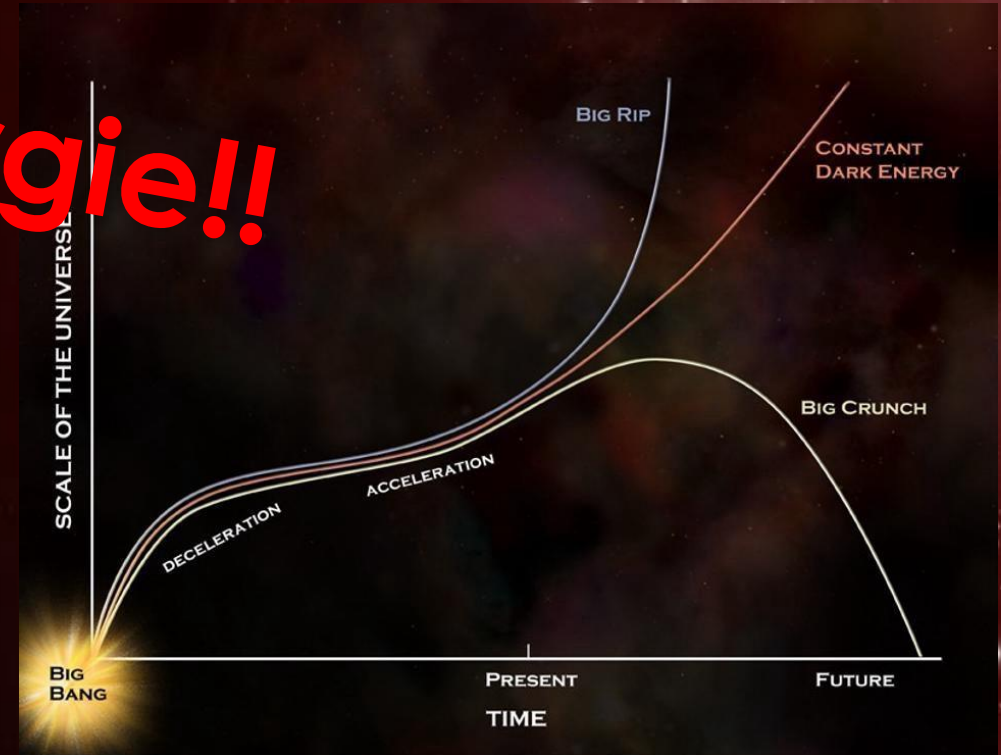
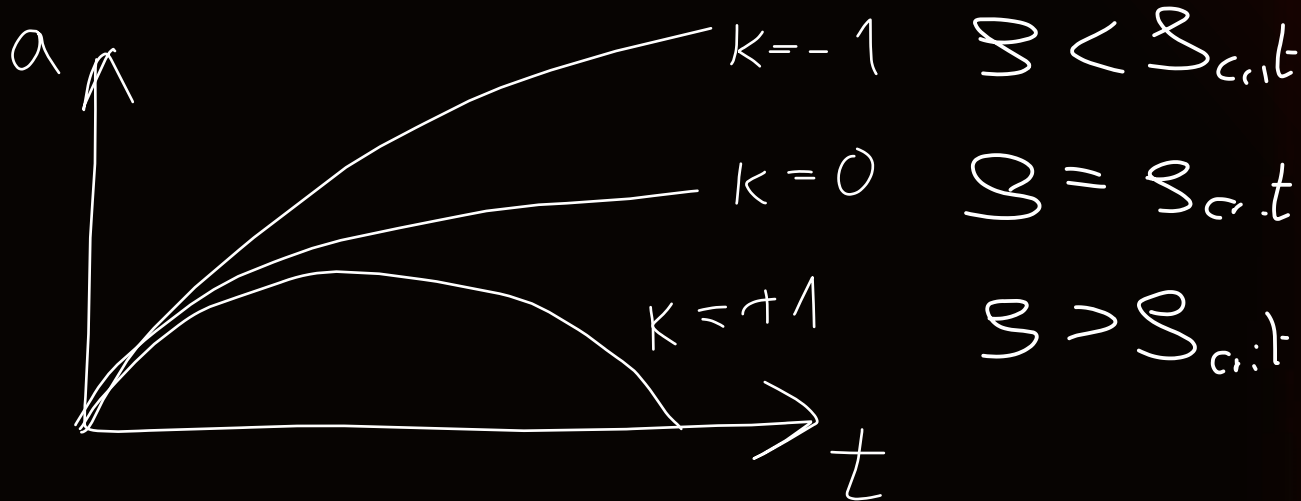


Moderne Kosmologie

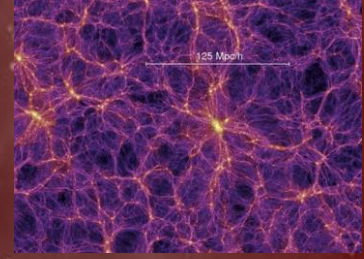
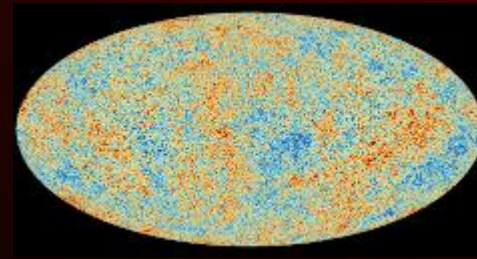
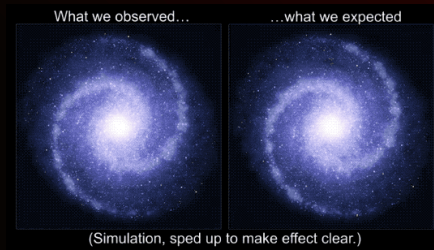
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- Dunkle Energie wird übernimmt derzeit die Überhand
- Diese Dominanz ist nicht mehr aufhaltbar...
- Unser Universum expandiert exponentiell!
- Warum? **Keine Ahnung...**

Dunkle Energie!!



Dunkle Materie



Was wissen wir?

Unsichtbar

→ Emittiert, reflektiert, absorbiert kein Licht

Gravitationswirkung

→ Existenz durch grav. WW bewiesen

Galaxienrotation

→ Es existiert mehr als nur unsere bekannte Materie

Kosmische Strukturbildung

→ Spielt zentrale Rolle bei der Bildung von Galaxien & Galaxienhaufen

Was wissen wir nicht?

Natur der Teilchen

→ WIMPs, Axionen, Sterile Neutrinos, MACHOs, primordiale schwarze Löcher, Gravitinos...

Wechselwirkungen

→ Wechselwirken sie außer mit Gravitation doch auch seeeehr schwach mit anderen Kräften?

Nachweis

→ Bisher nicht in direkten Experimenten nachgewiesen werden, trotz enormer Anstrengungen!!!

Verteilung

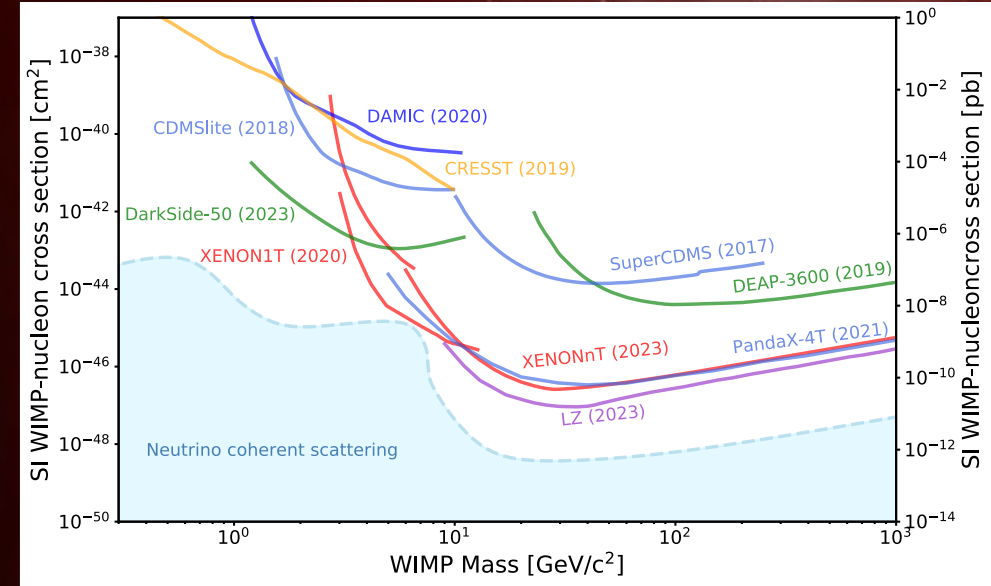
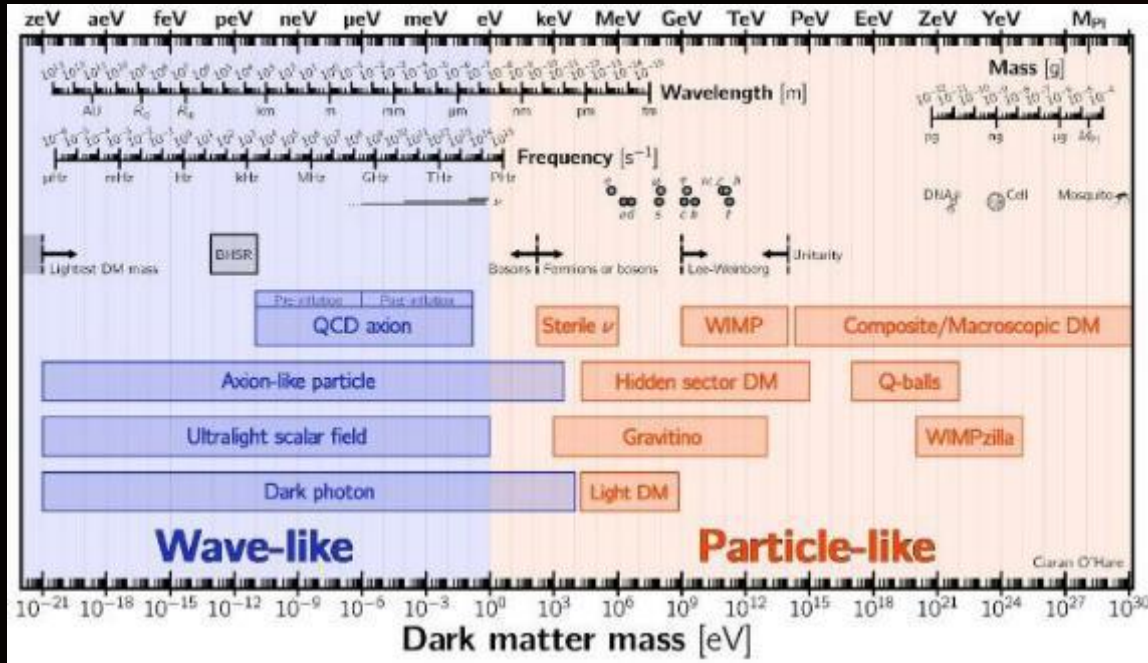
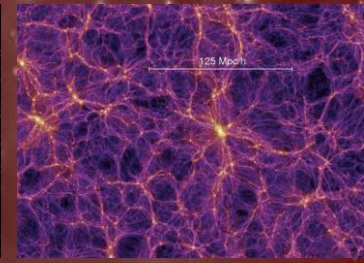
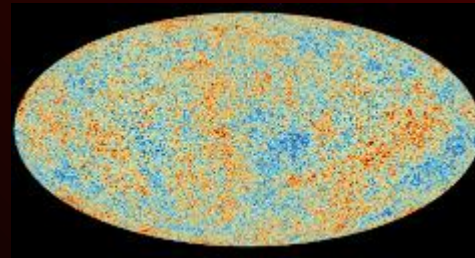
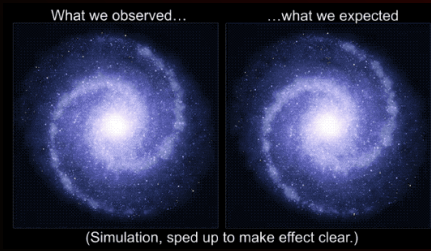
→ Wie ist DM bspw. innerhalb von Galaxien verteilt?

Alternative Erklärungen

→ Sind es wirklich Teilchen?

→ Oder benötigen wir erweiterte Theorien?

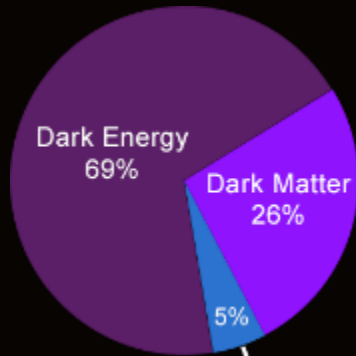
Dunkle Materie



... ..

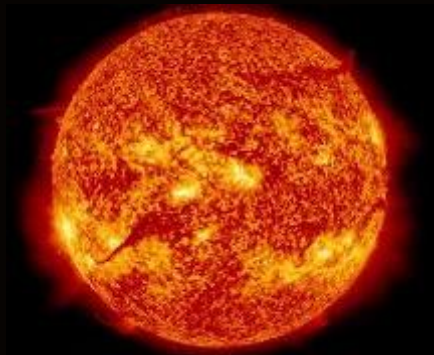
Primordiale schwarze Löcher

~10⁶⁷ eV



Einführung in die Kosmologie

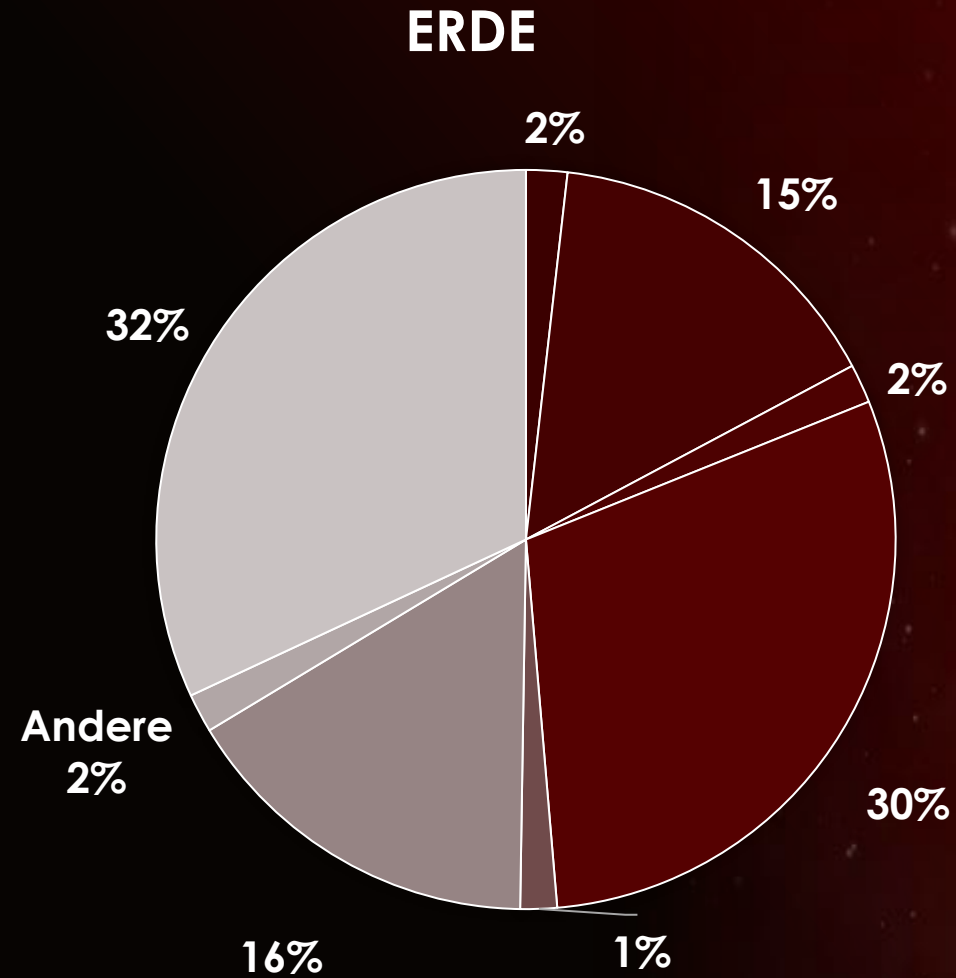
- Was wissen wir eigentlich über unser Universum?
- Und was hat das mit dunkler Materie zu tun?



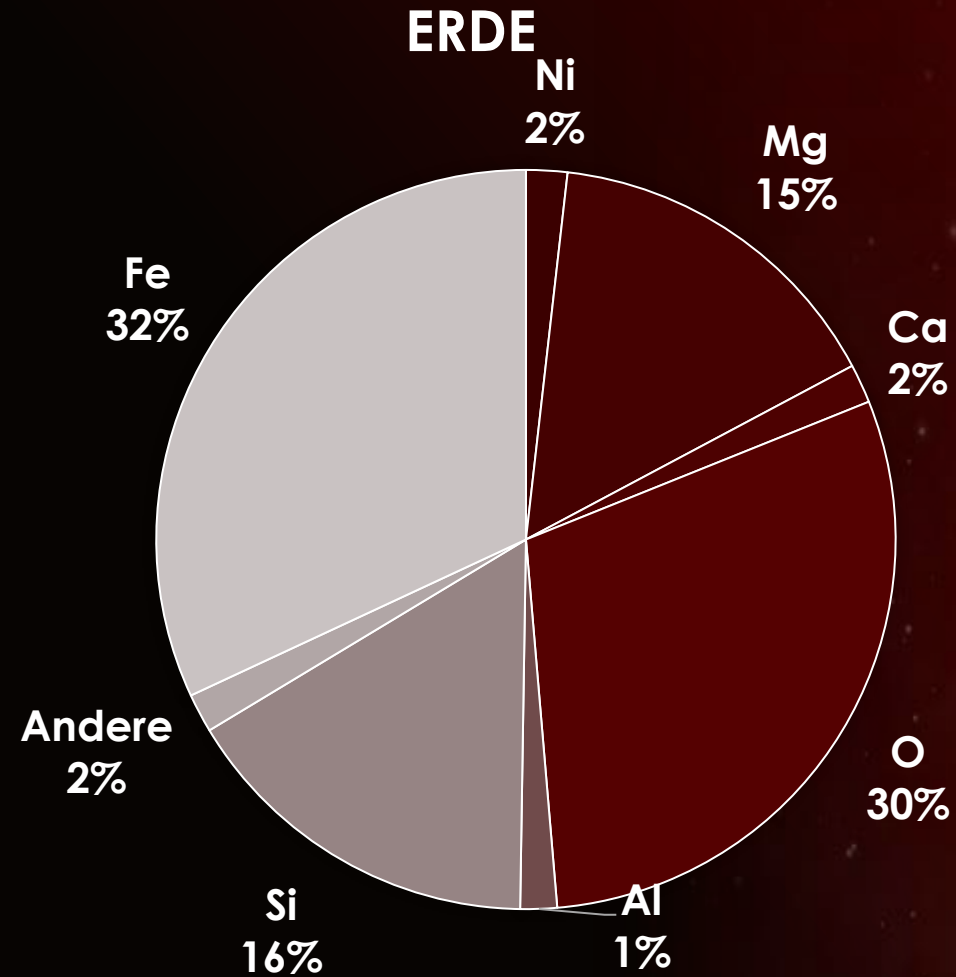
Nukleare Astrophysik

- Woher kommen all unsere chemischen Elemente?

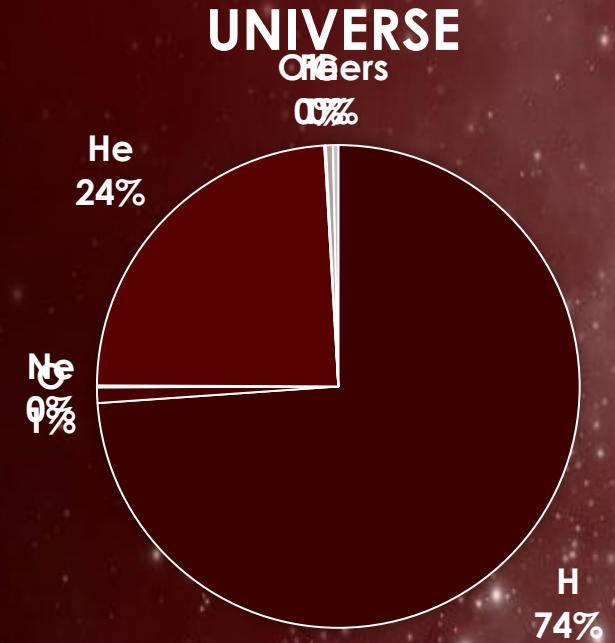
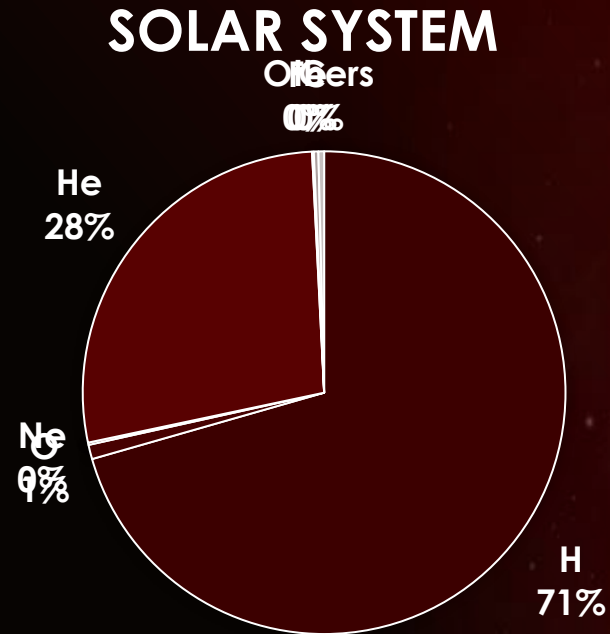
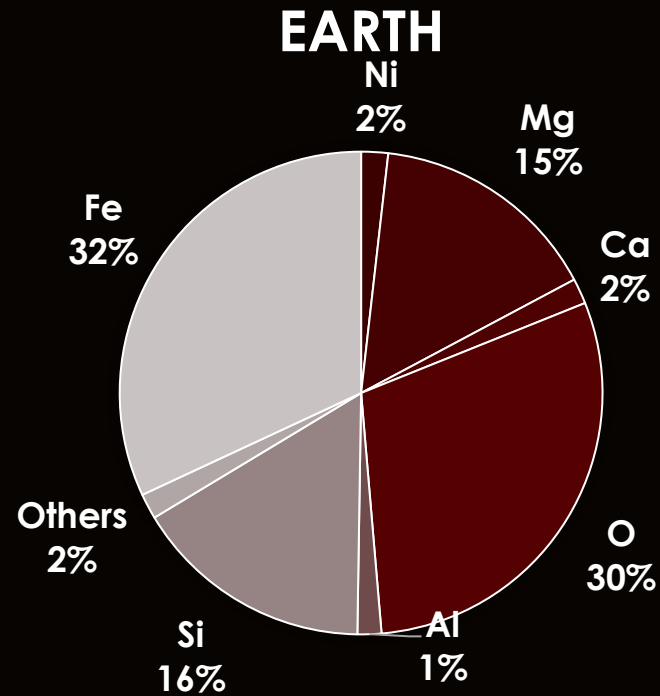
Die Zusammensetzung unserer Erde



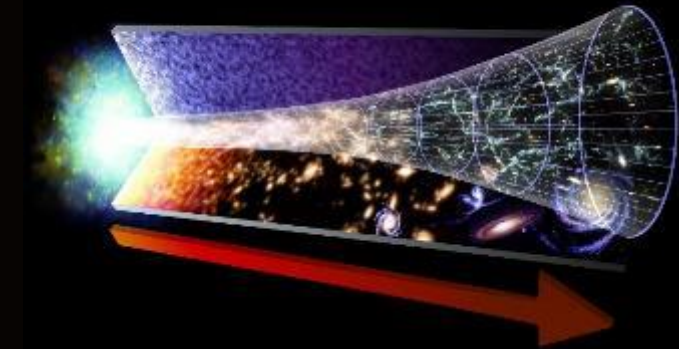
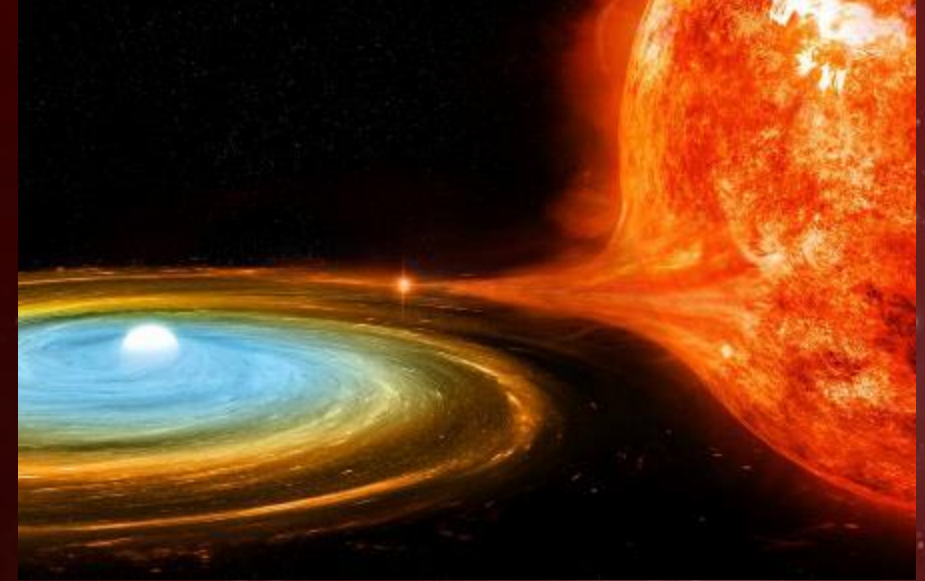
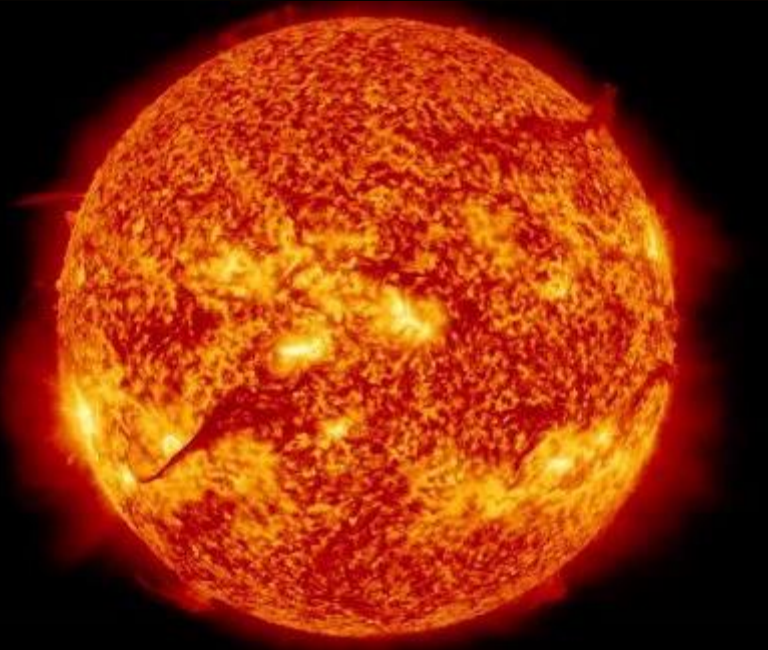
Die Zusammensetzung unserer Erde



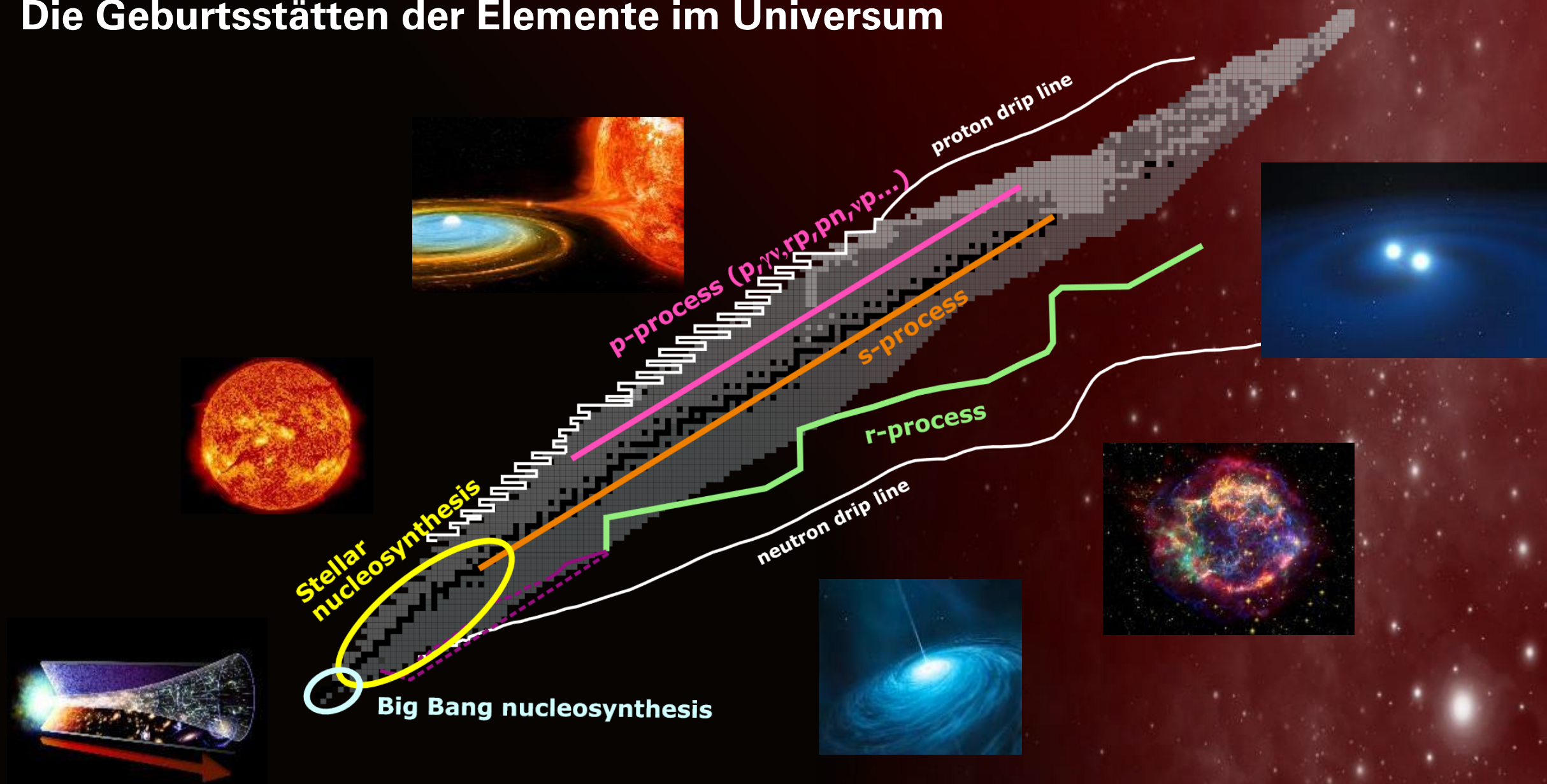
Die chemische Zusammensetzung im Universum



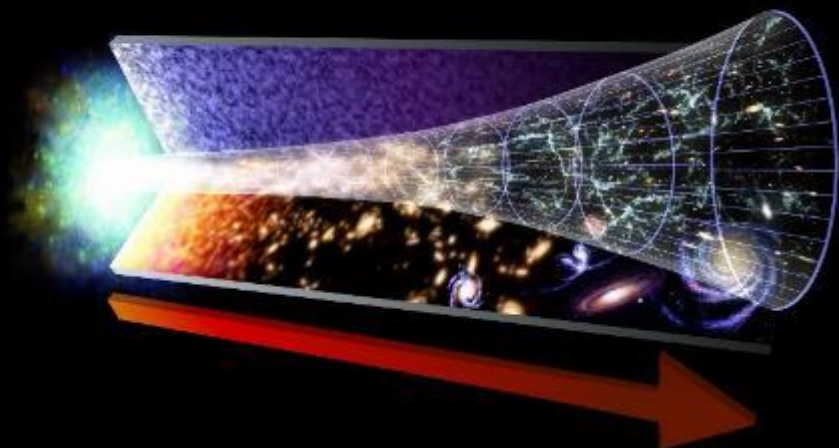
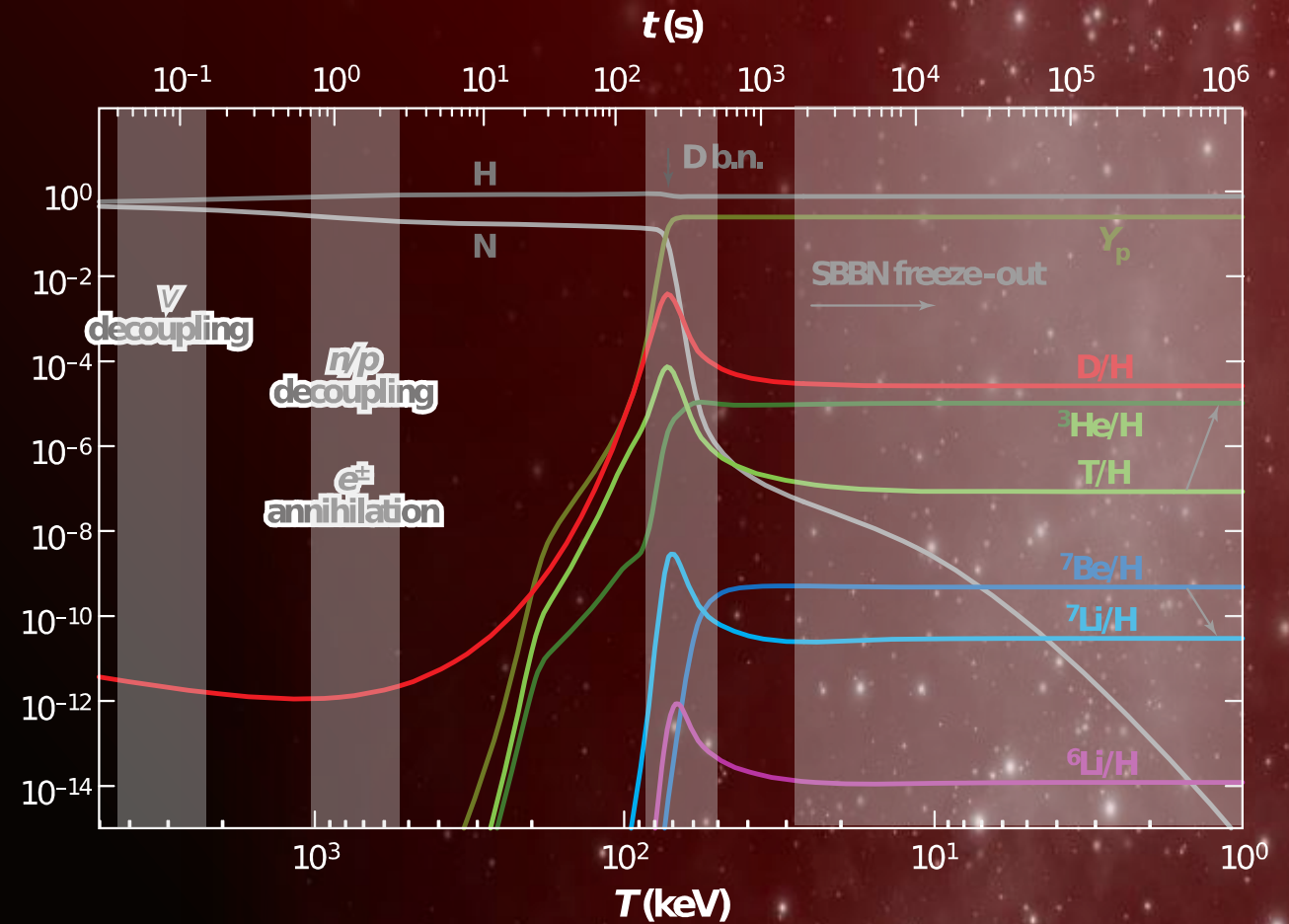
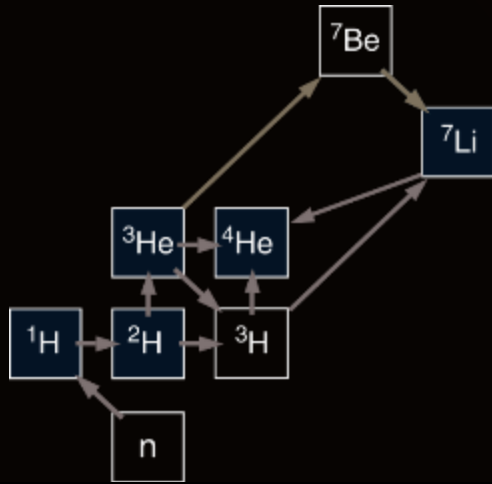
Die Geburtsstätten der Elemente im Universum



Die Geburtsstätten der Elemente im Universum

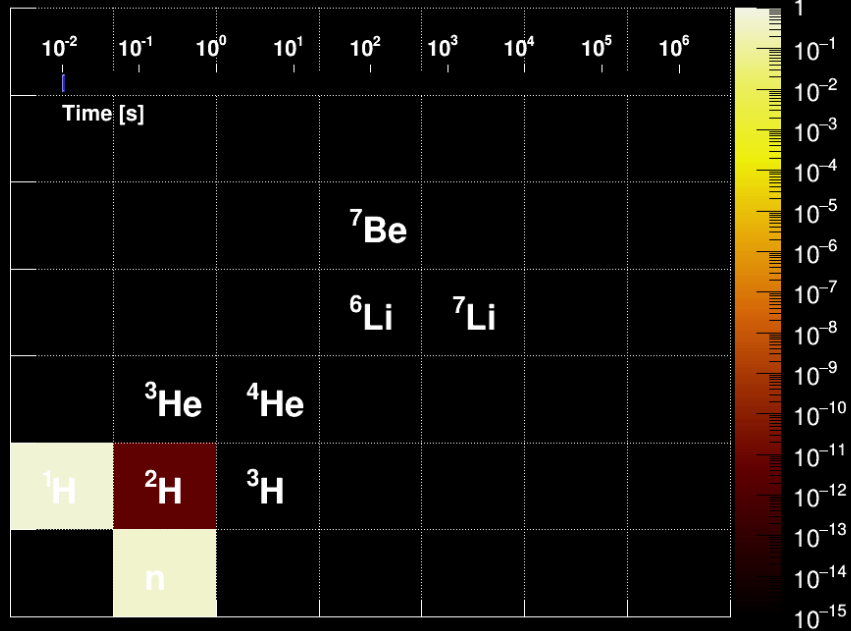
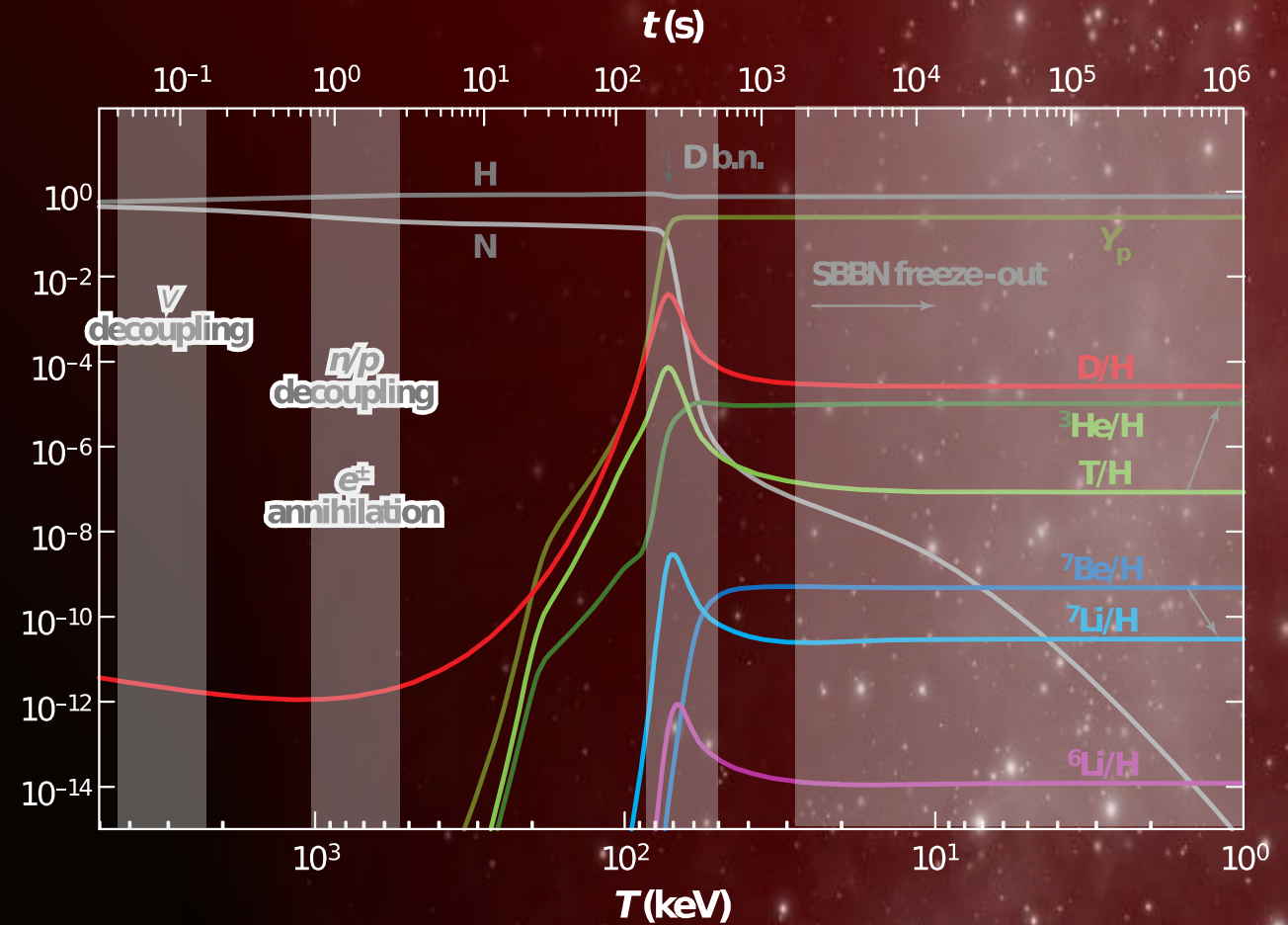


Urknall-Nukleosynthese



- Chromodynamische Bindungsenergie p/n: ~ 1 GeV
- ^2H Flaschenhals: Das ganze Universum wartete auf Deuterium

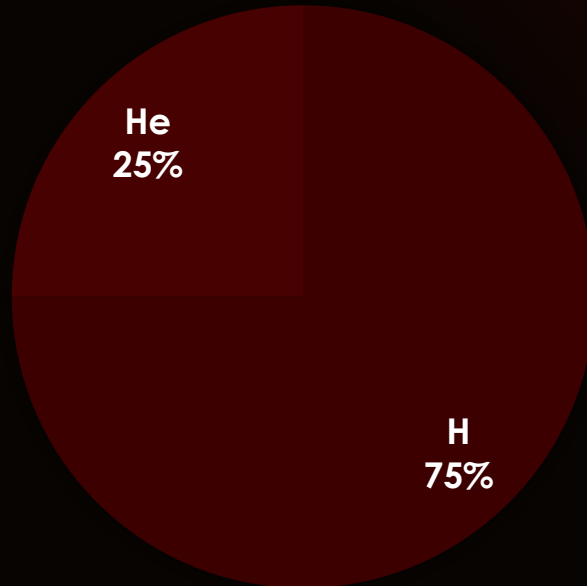
Urknall-Nukleosynthese



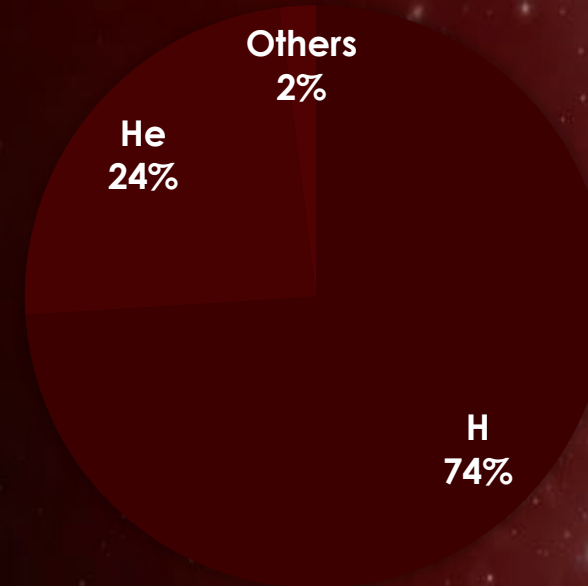
- **Chromodynamische Bindungsenergie p/n:** ~ 1 GeV
- **^2H Flaschenhals:** Das ganze Universum wartete auf Deuterium

Urknall-Nukleosynthese

URKNALL-NUKLEOSYNTHESE

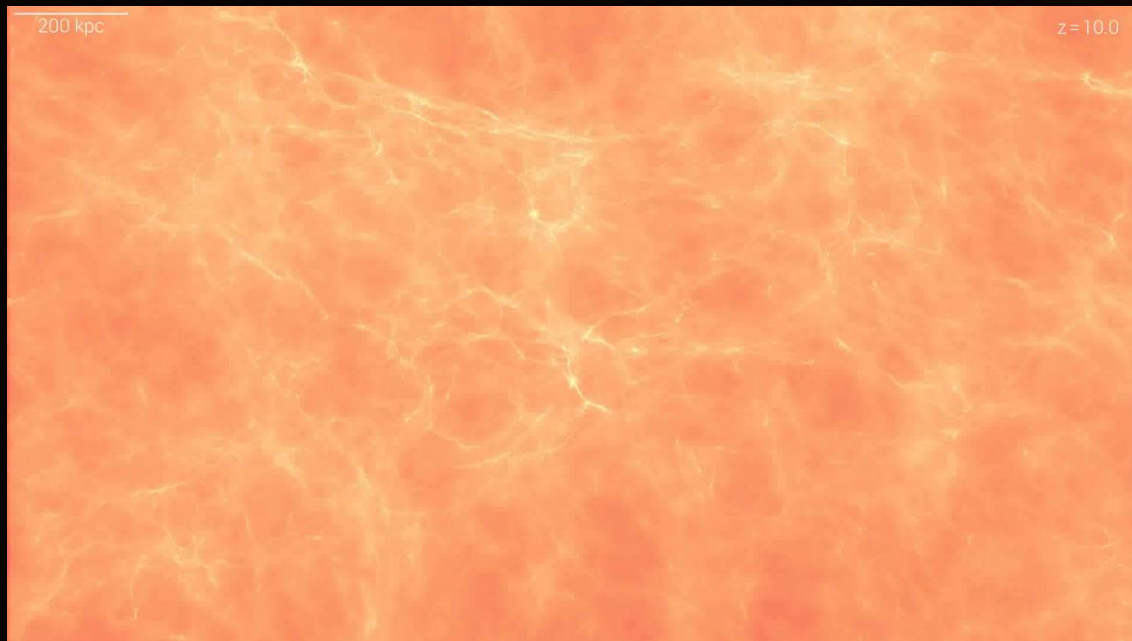


DERZEITIGES UNIVERSUM



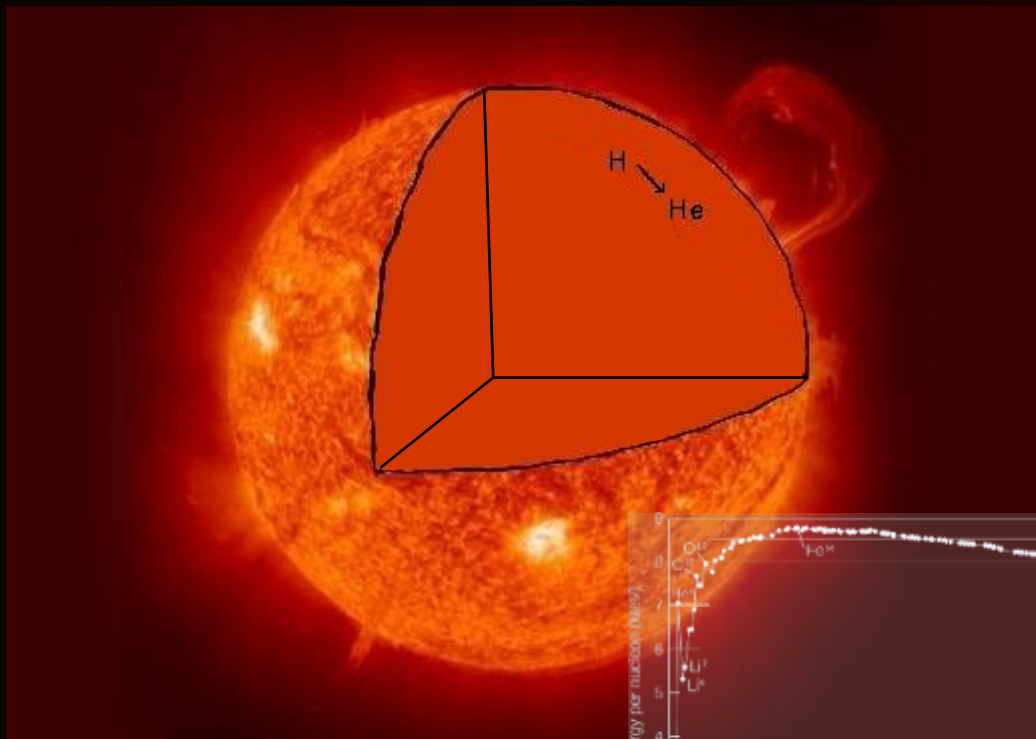
Wiederherstellung von Nukleosynthese-Milieus

- Große Simulation ~ (Mpc)
- Simulation von Galaxie-Superclustern

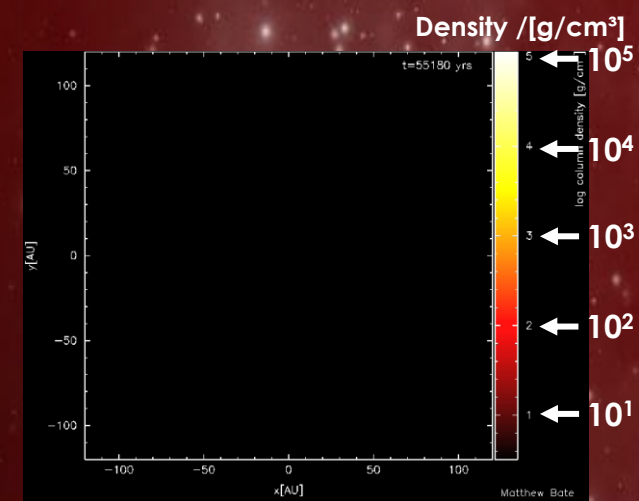


- Kleinskalige Simulation ~ (kpc)
- Simulation einer einzelnen Galaxie

Protostern-Formation + Stellare Nukleosynthese

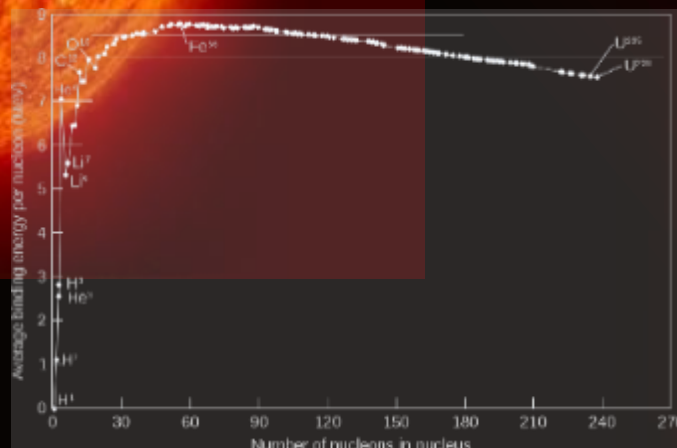


	T_{\min} [K]	ρ_{\min} [g/cm ³]
H → He	13 E+6	100 E+0
He → C,O	100 E+6	100 E+3
C → O, Ne, Mg, Na	500 E+6	200 E+3
Ne → O, Mg	1.2 E+9	4 E+6
O → Mg, Si, S, P	1.5 E+9	10 E+6
Si → Ti, Fe, Ni ...	~ 3.0 E+9	30 E+6



https://www.astro.ex.ac.uk/people/mbate/Animations/Beta0_01_RT_1M_DensSplash.mov

Credit: Blake Stacey, based on SOHO (ESA, NASA)

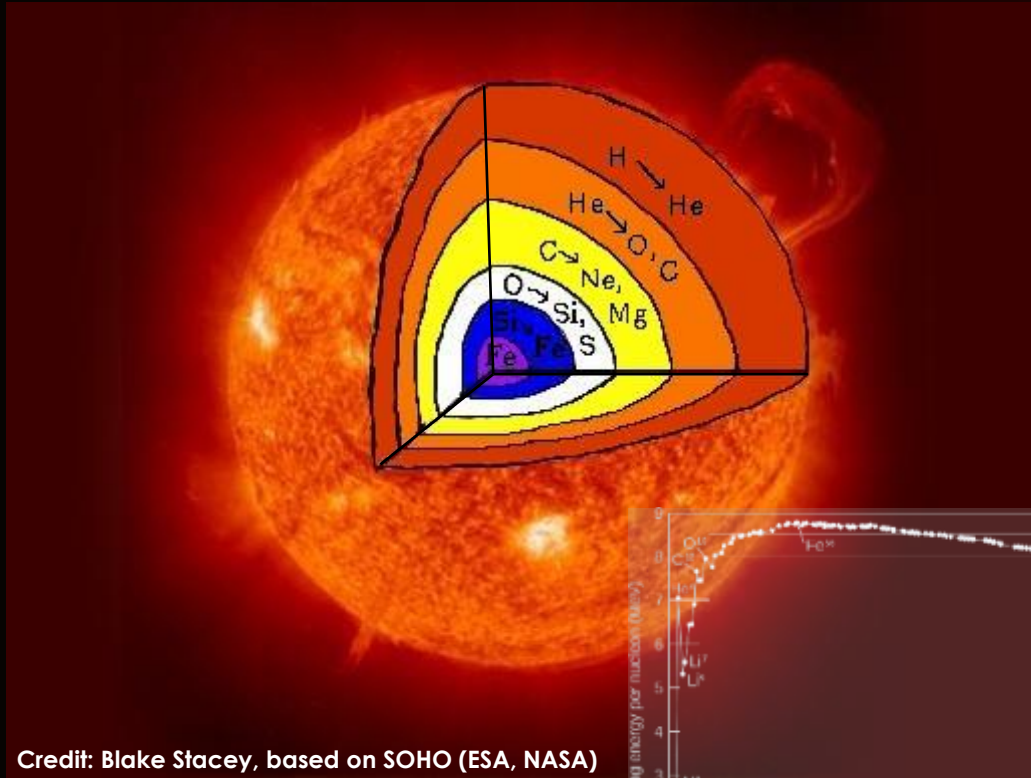


https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy

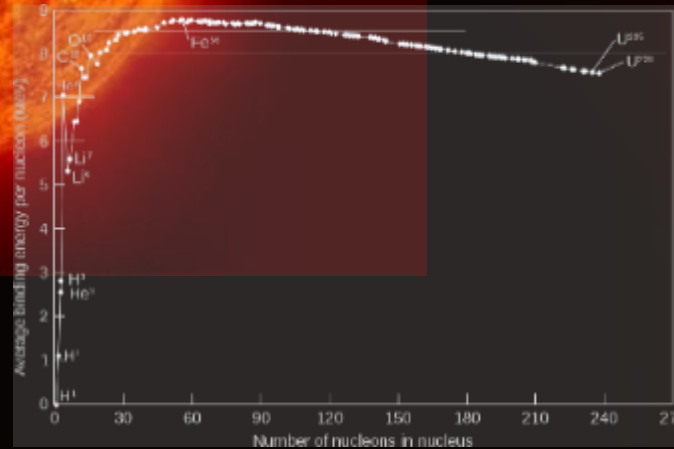


Courtesy: Matthew Bate (University of Exeter)

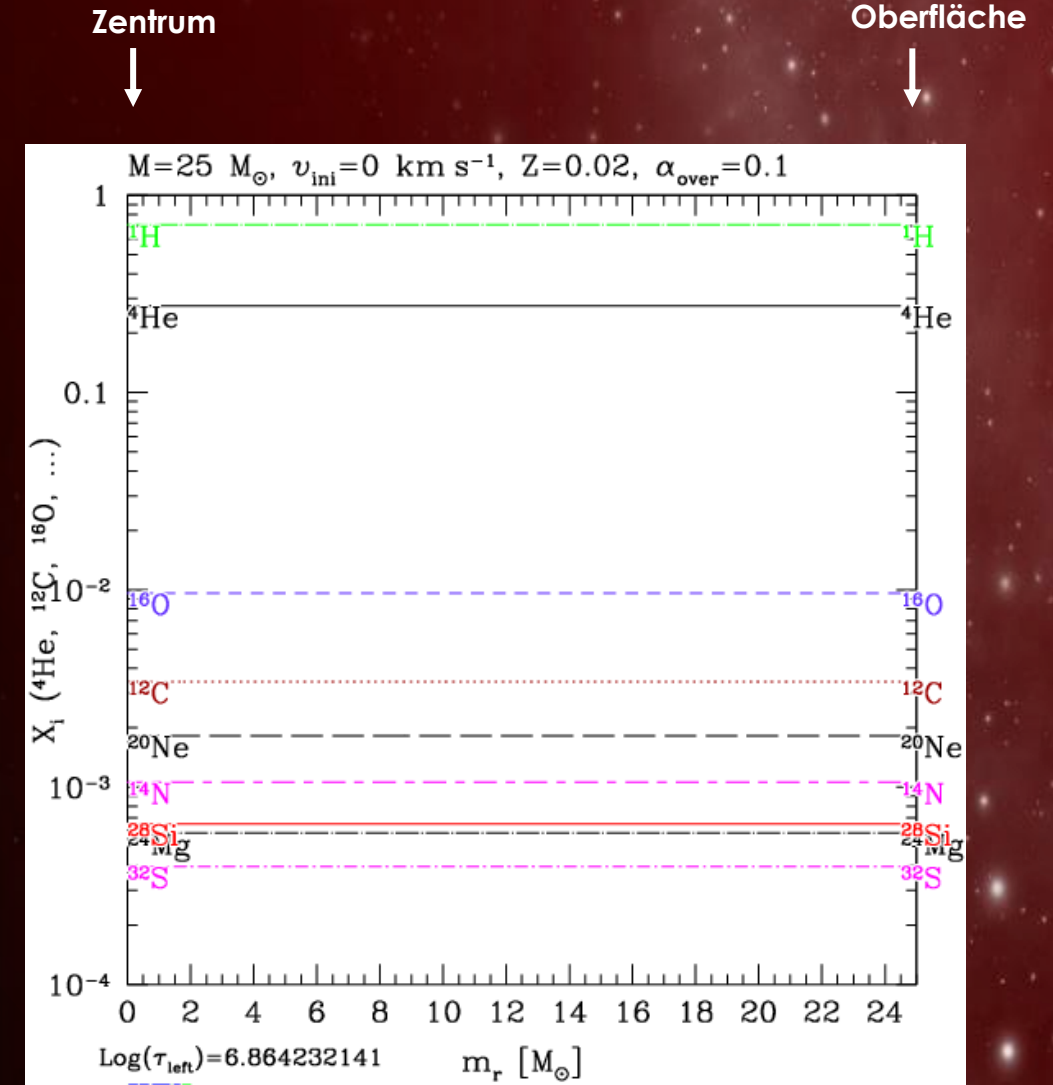
Stellare Nukleosynthese



Credit: Blake Stacey, based on SOHO (ESA, NASA)

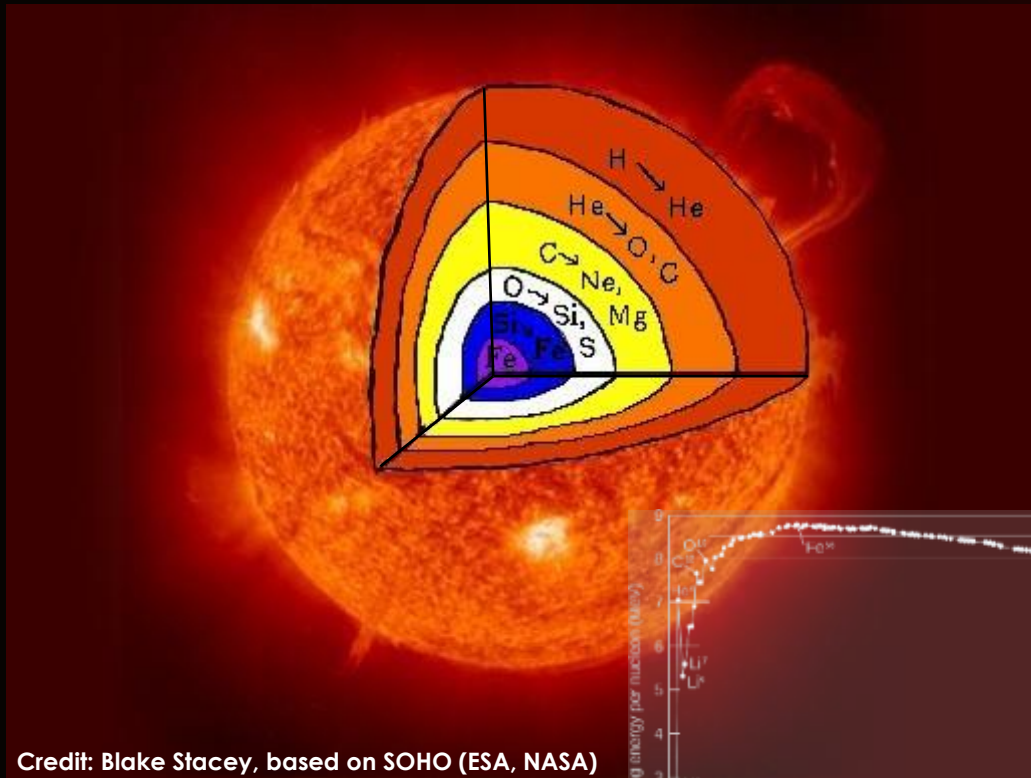


https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy

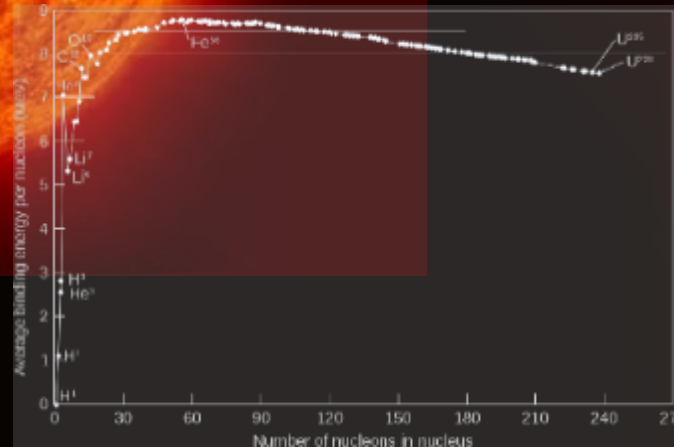


<https://www.astro.keele.ac.uk/~hirschi/animation/anim.html>

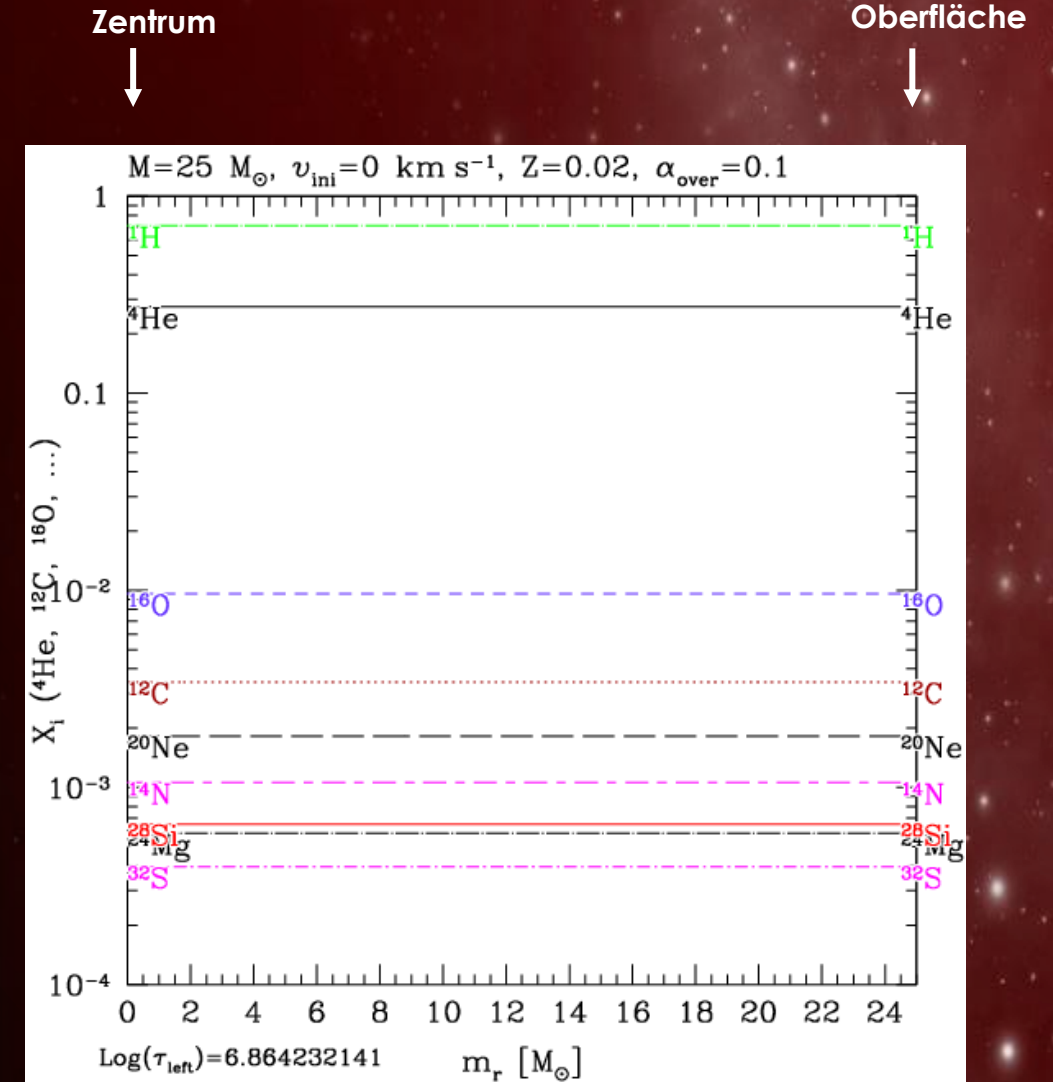
Stellare Nukleosynthese



Credit: Blake Stacey, based on SOHO (ESA, NASA)

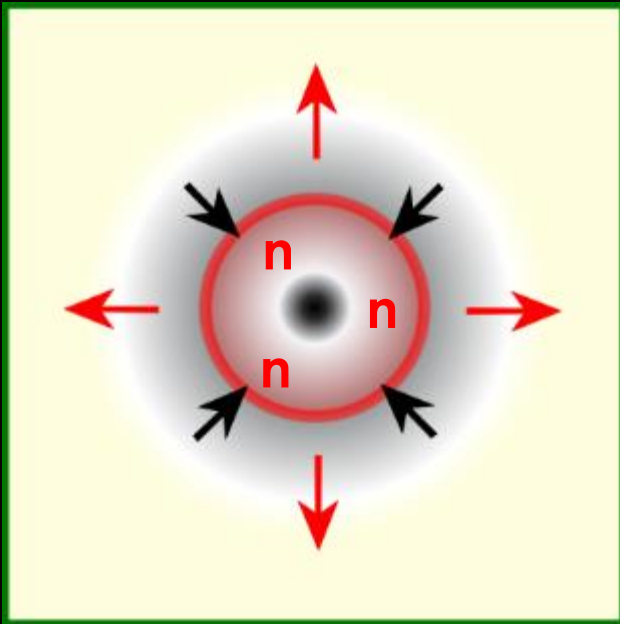


https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy



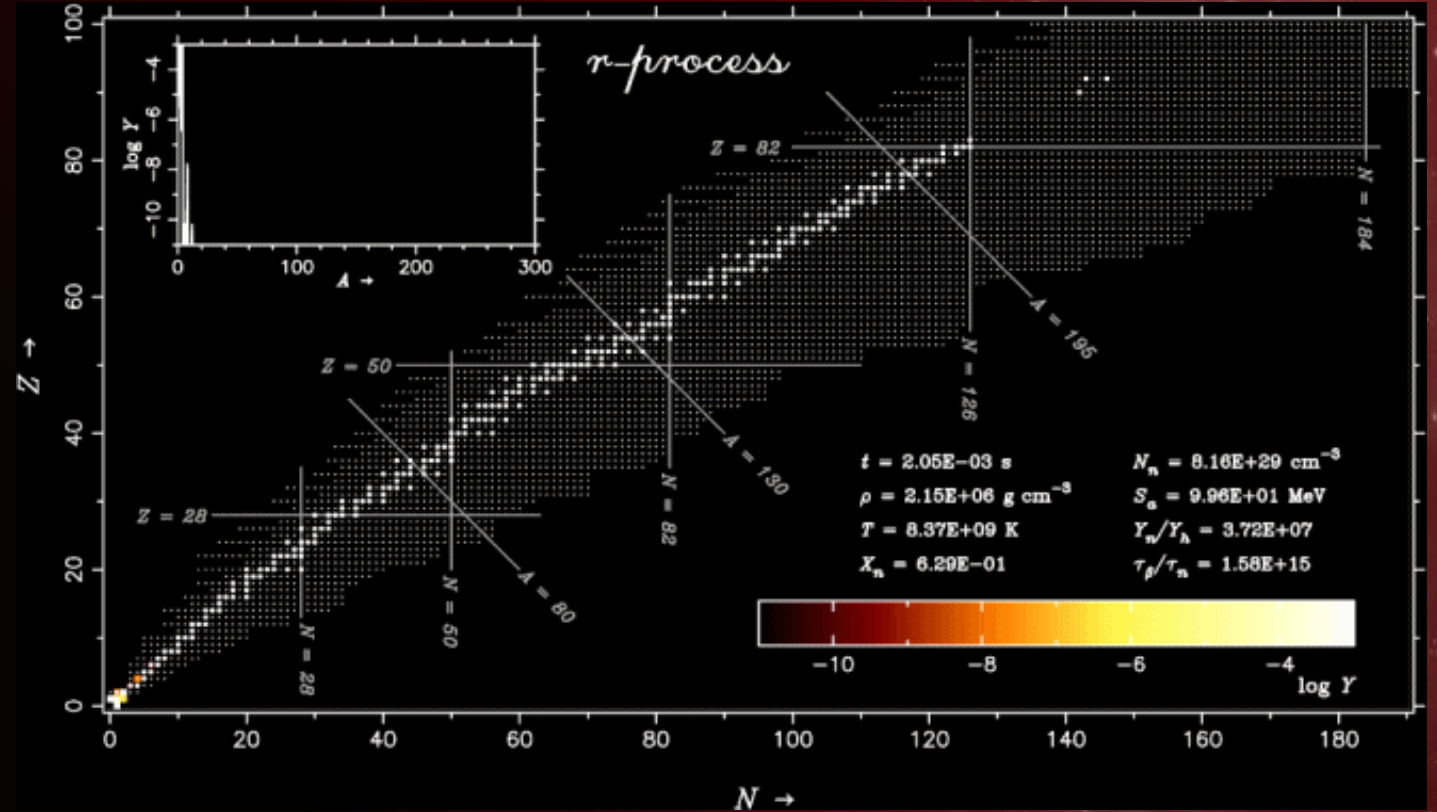
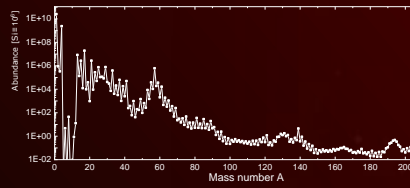
<https://www.astro.keele.ac.uk/~hirschi/animation/anim.html>

Explosive Nukleosynthese



https://en.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova
#

Explosive Nukleosynthese

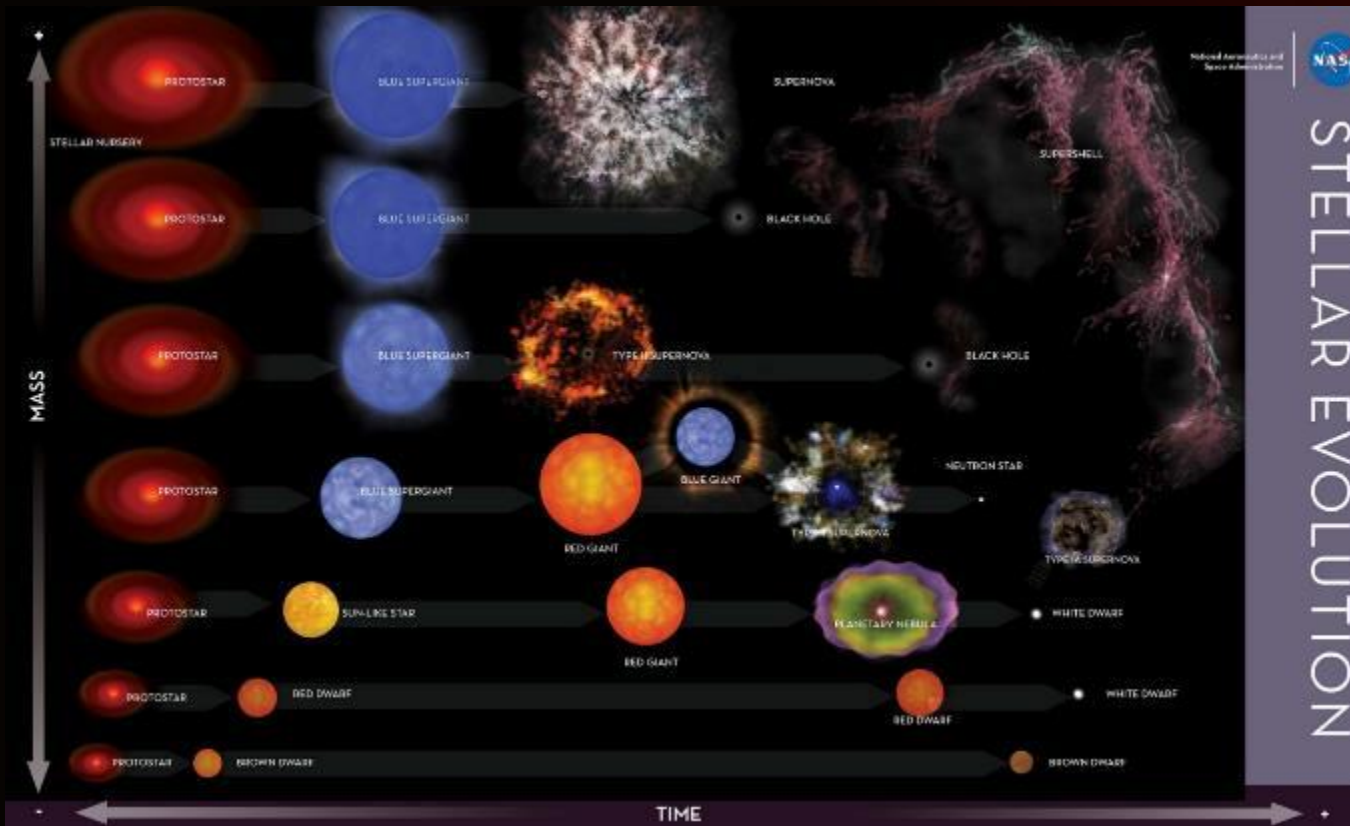


<http://www.ph.sophia.ac.jp/~shinya/research/research.html>

Credit: ESA (https://www.esa.int/ESA/Media/Images/2005/09/795591078pxst_Galiergs_A_Spitzer_Crop.jpg)



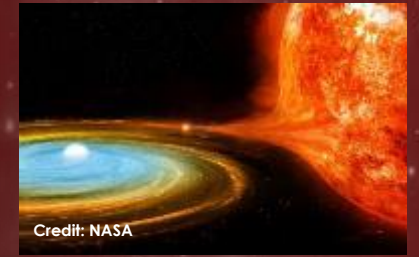
Nukleare Astrophysik in der Sternentwicklung



Credit: NASA (<https://www.accessscience.com/media/EST/media/654000FG0010.jpg>)



Credit: ESO/M.Kornmesser (<https://www.eso.org/public/germany/images/eso1229a/>)



Credit: NASA



Credit: ESA (https://www.cosmos.esa.int/documents/332075/979553/1788px-Cassiopeia_A_Spitzer_Crop.jpg)



Credit: NASA



Credit: ESO (<https://www.eso.org/public/images/eso1733a/>)

Experimentelle nukleare Astrophysik

