



# Das Leben, das Universum & der ganze Rest

Einführung in die Kosmologie und nukleare Astrophysik

**Forschung trifft Schule @home**

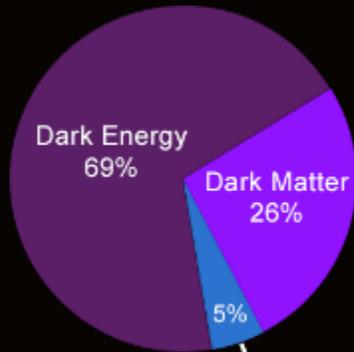
Online-Fortbildung für Lehrkräfte zur Astroteilchenphysik

## Steffen Turkat

Padova

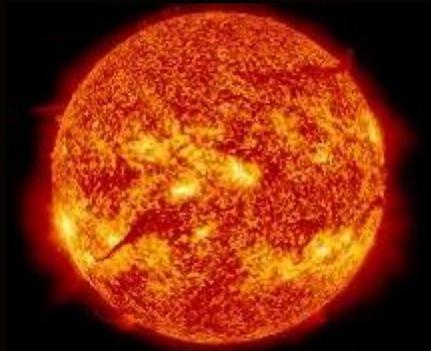
24. Oktober 2024





## Einführung in die Kosmologie

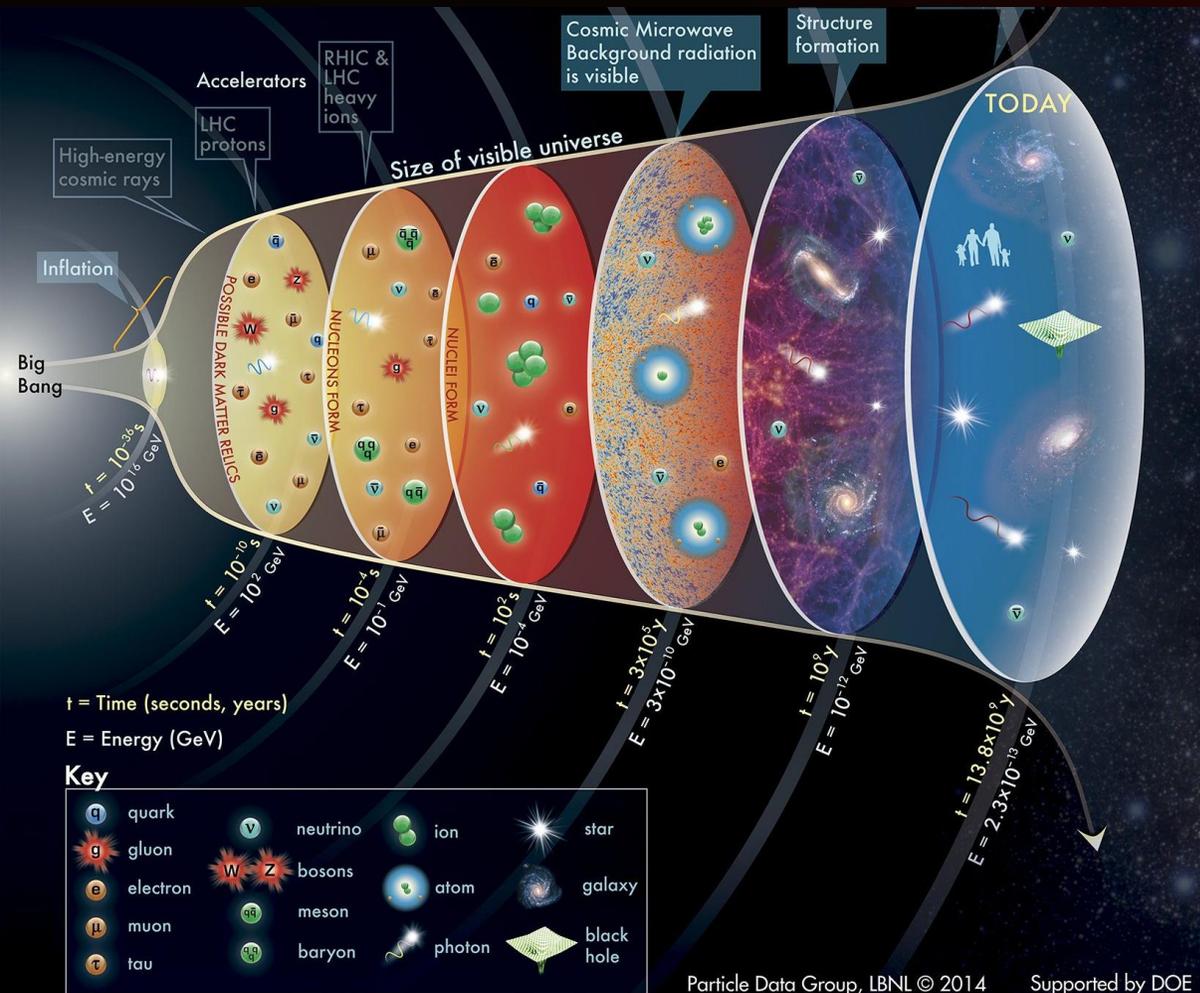
- Was wissen wir eigentlich über unser Universum?
- Und was hat das mit dunkler Materie zu tun?



## Nukleare Astrophysik

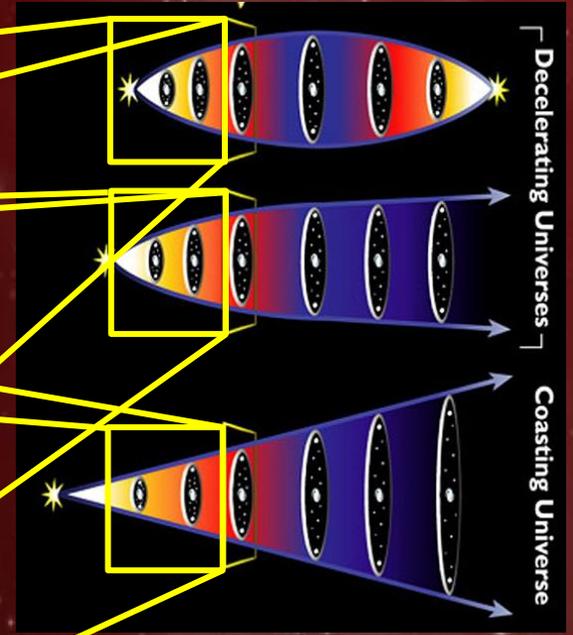
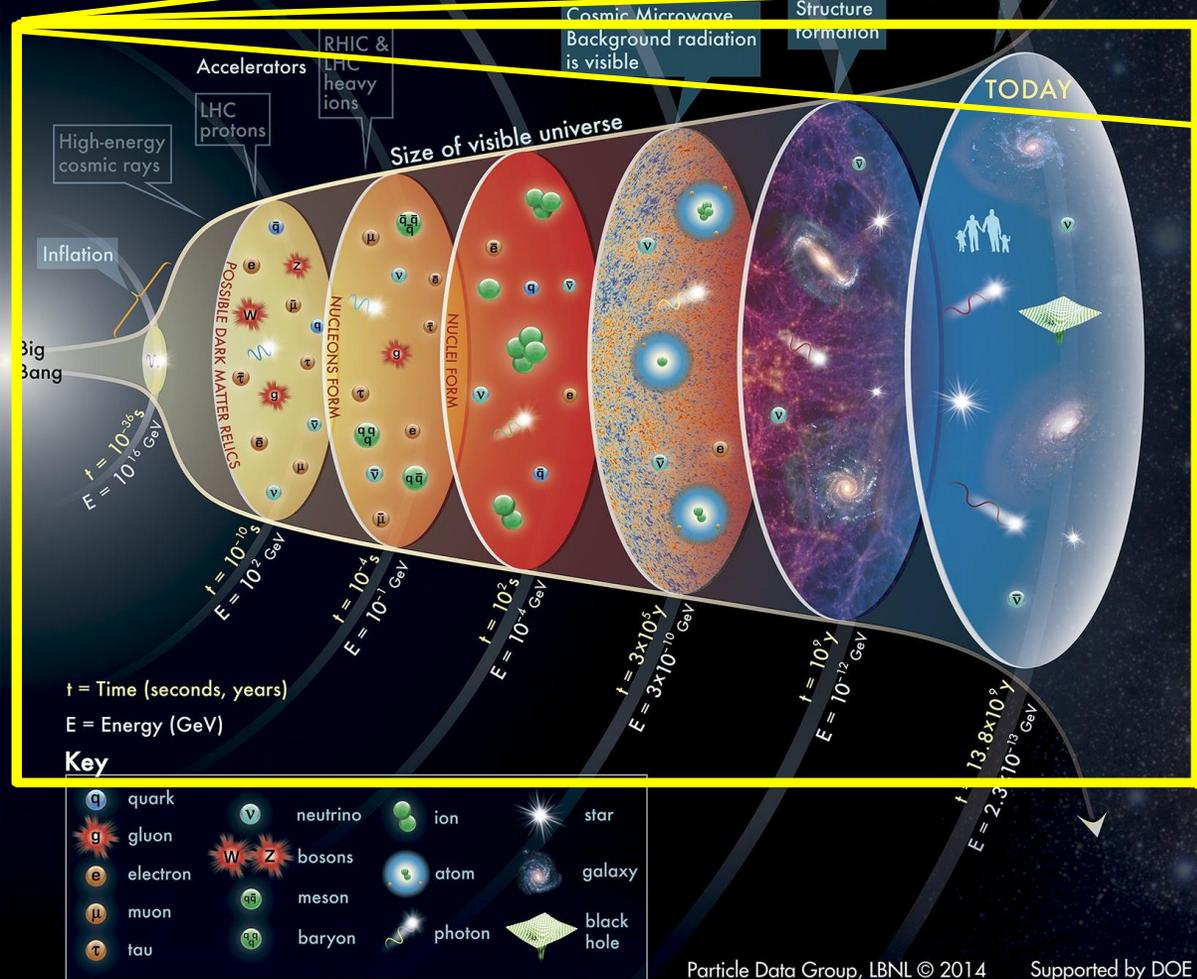
- Woher kommen all unsere chemischen Elemente?

# 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**
- 38000 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

$$E = mc^2$$

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

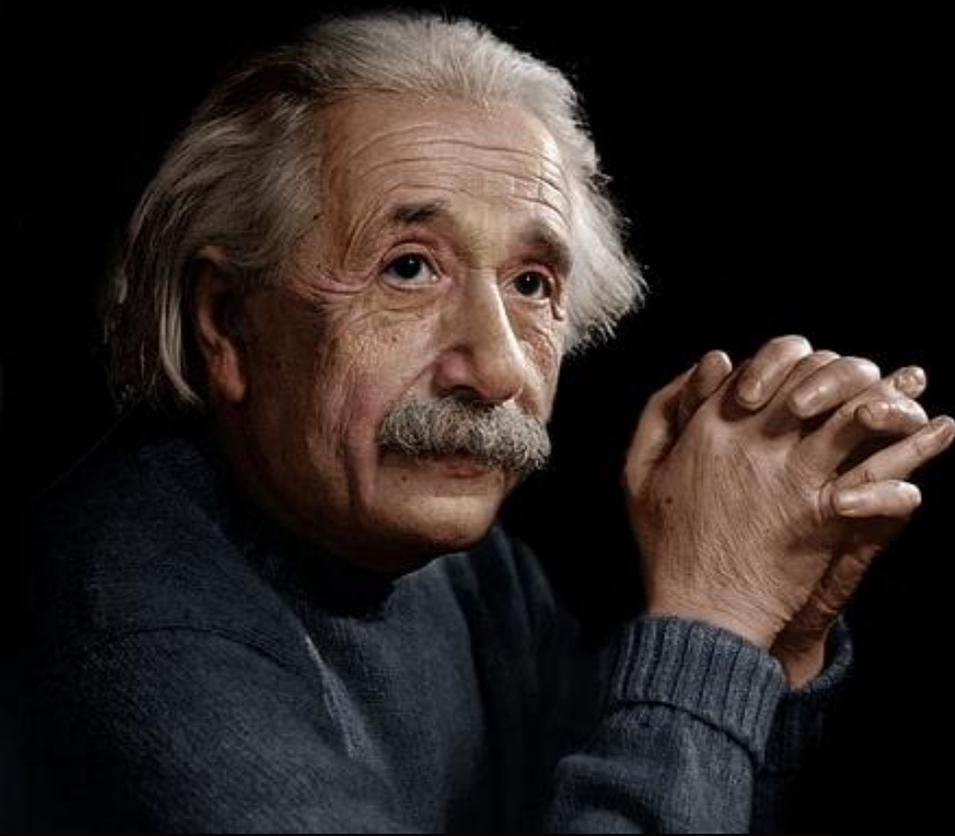
Massen haben Einfluss auf Krümmung der Raumzeit  
(Newton: "Gravitationspotential")

Masse



Raumzeitkrümmung

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



1915

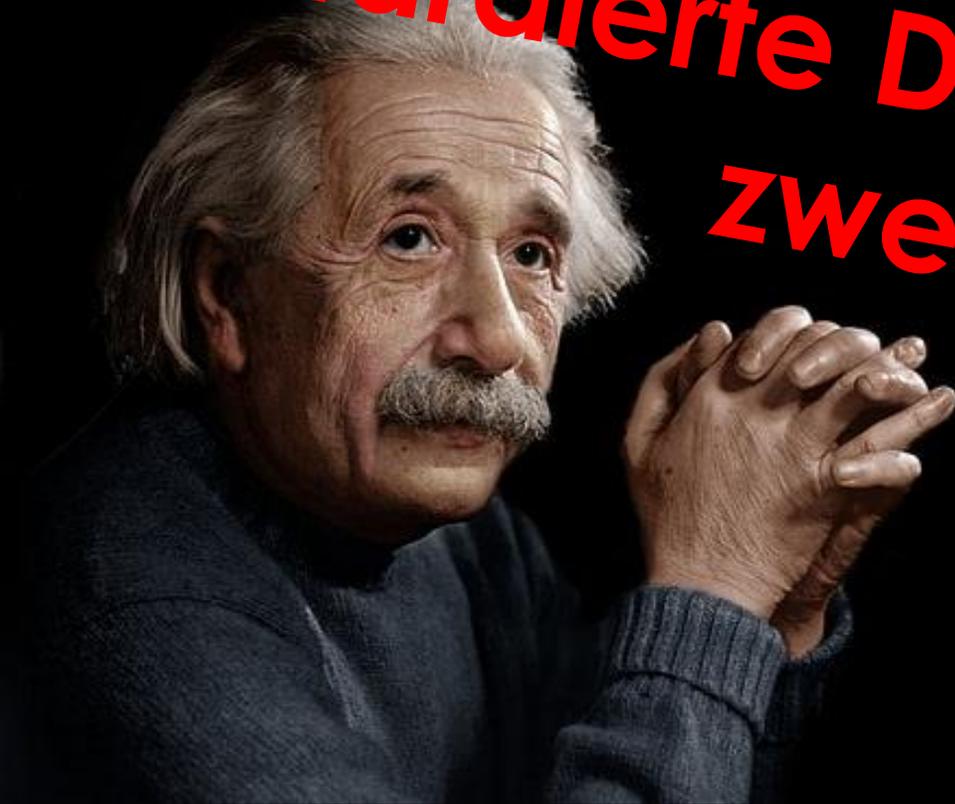
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

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

Masse  
↓  
Raumzeitkrümmung

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

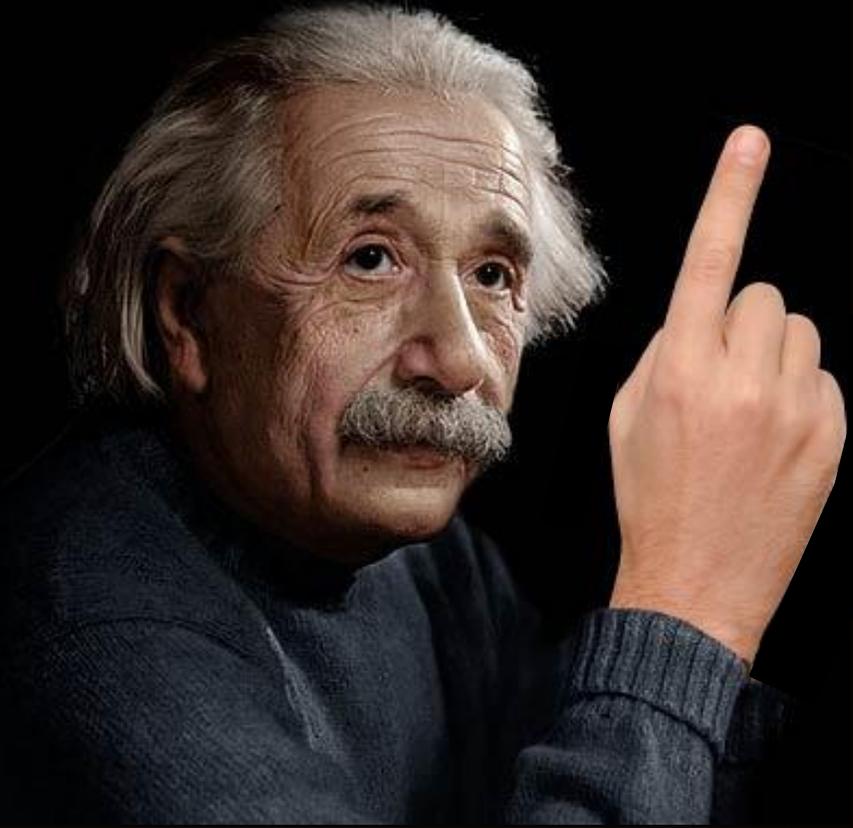
- Gravitation spielt nur Nebenrolle
- Gemäß Einstein keine Kraft, die im Universum wirkt
- Lediglich eine Eigenschaft der gekrümmten Raumzeit





1915

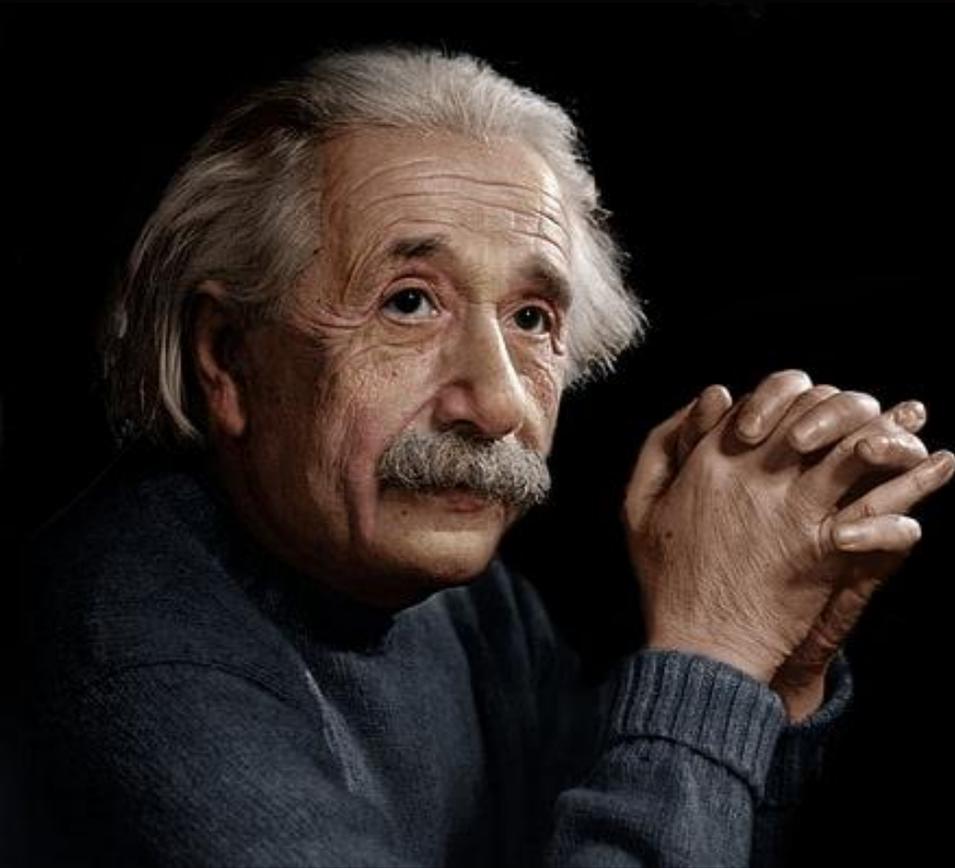
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- 
- 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

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



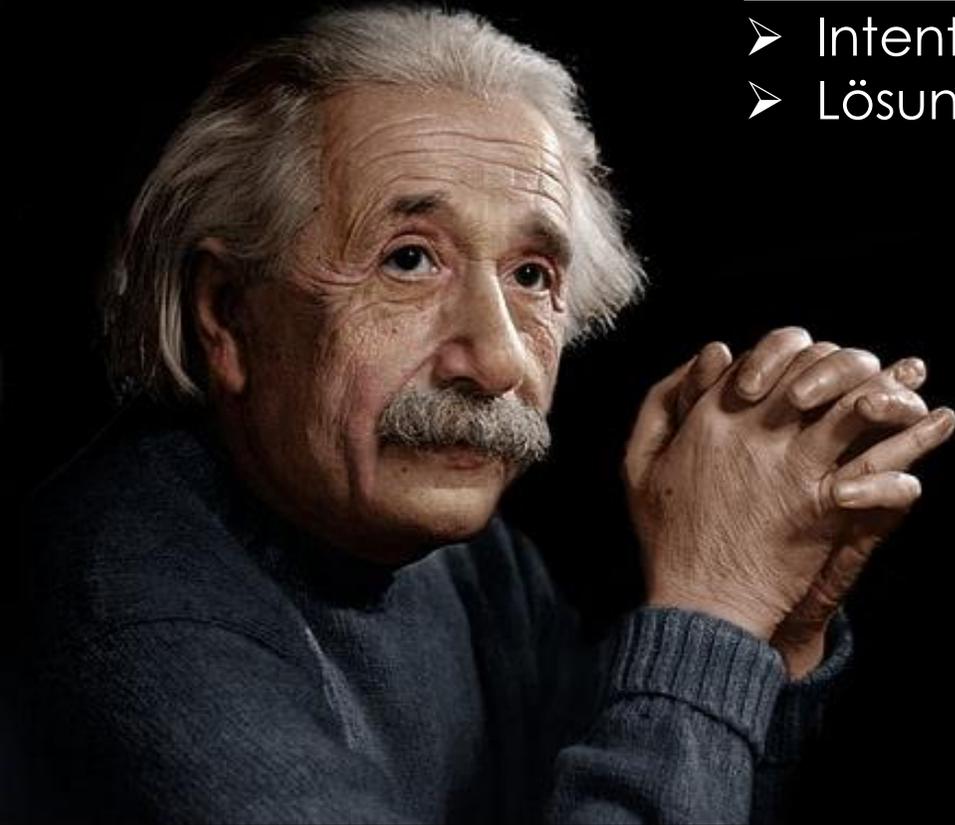


1917

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

### Einführung der kosmologischen Konstante

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



1927

### Georges Lemaître & Alexander Friedmann

- ART → Dynamisches Universum
- Rotverschiebung → Universum expandiert!



1929

### Edwin Hubble

- Rotverschiebung ~ Entfernung

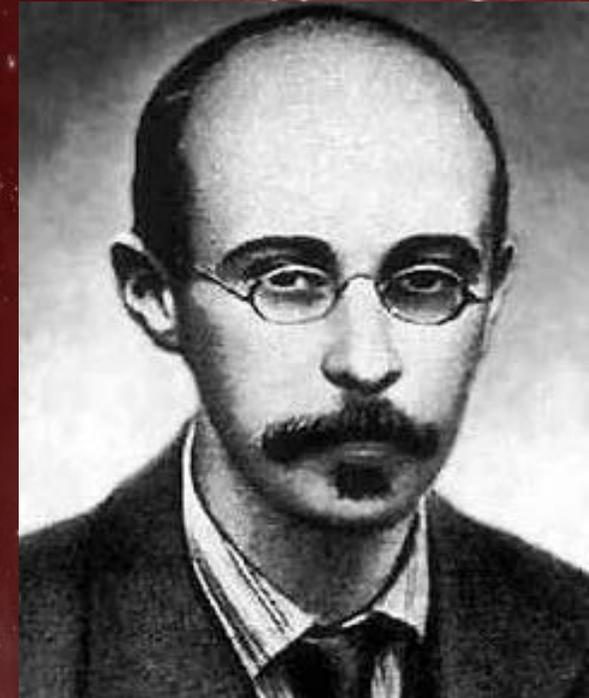
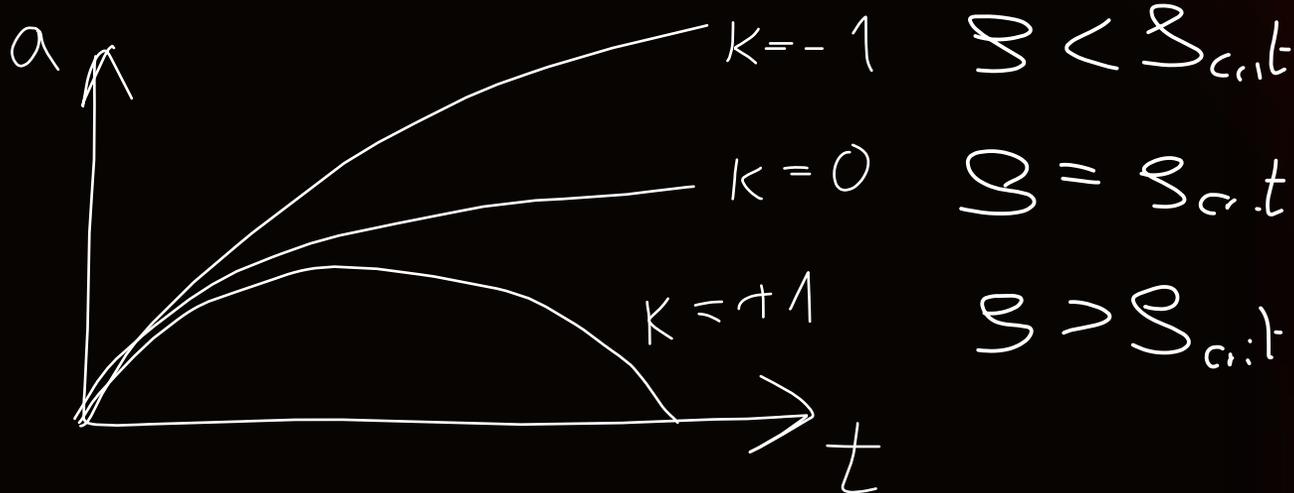
# Die Friedmann-Gleichungen

Änderung des Skalenfaktors

Krümmungsparameter

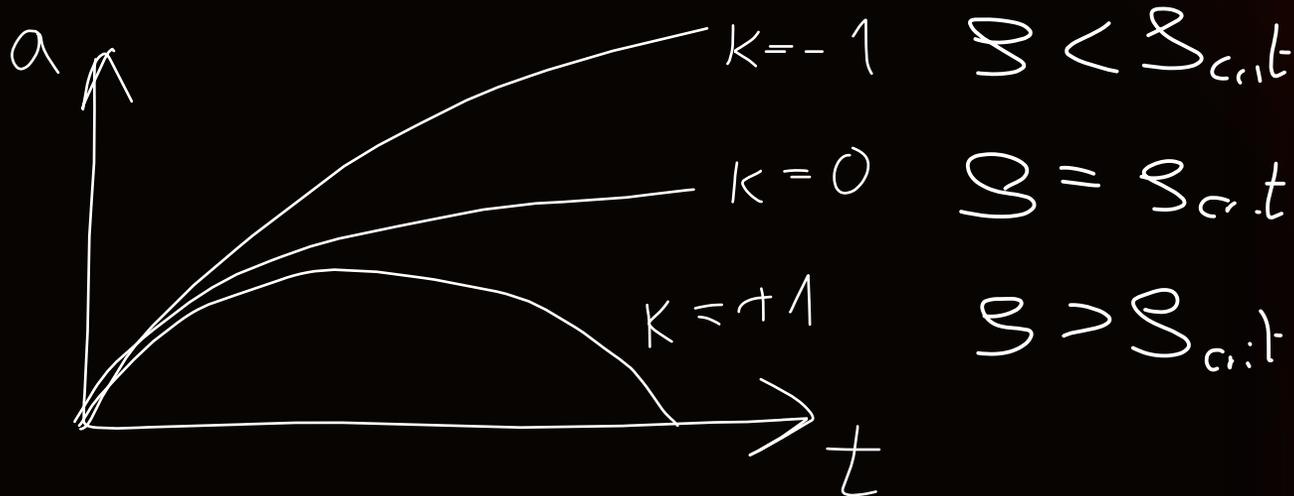
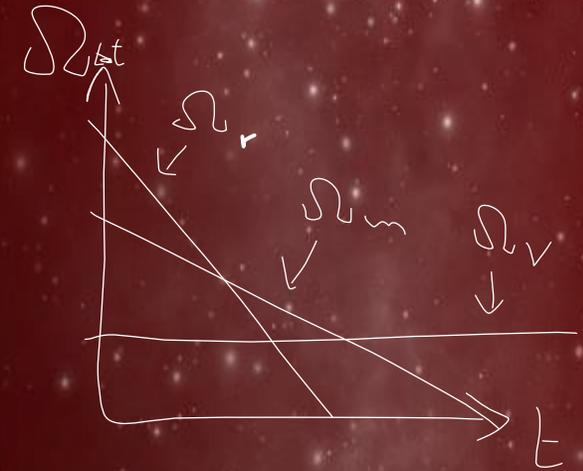
$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

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



# Formen der Energiedichte im Universum

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

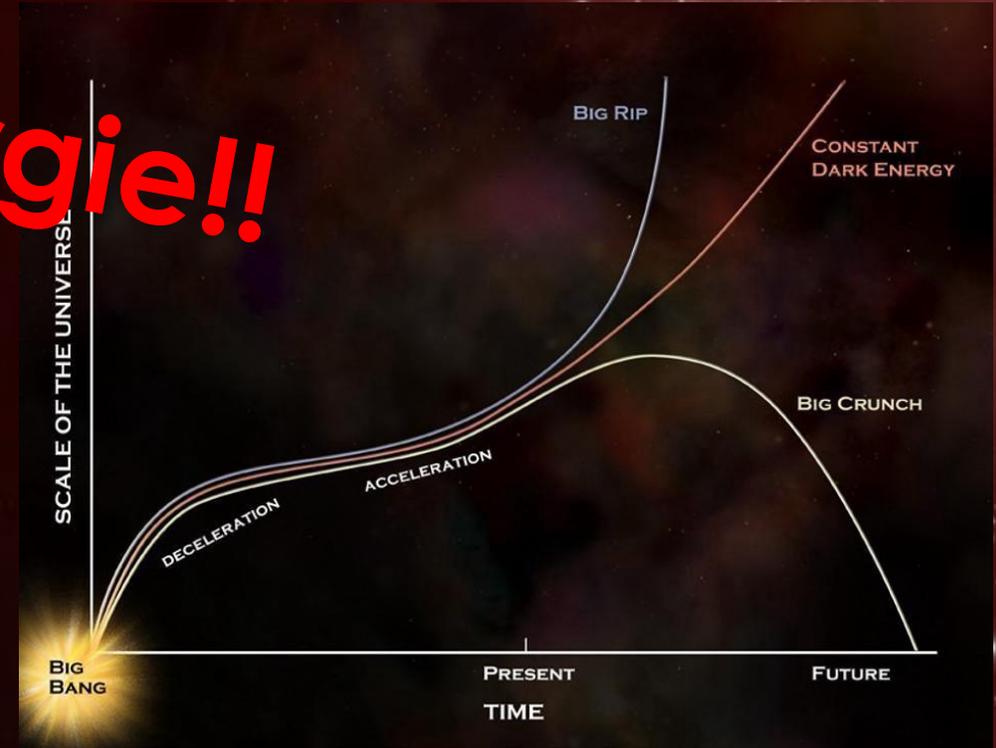
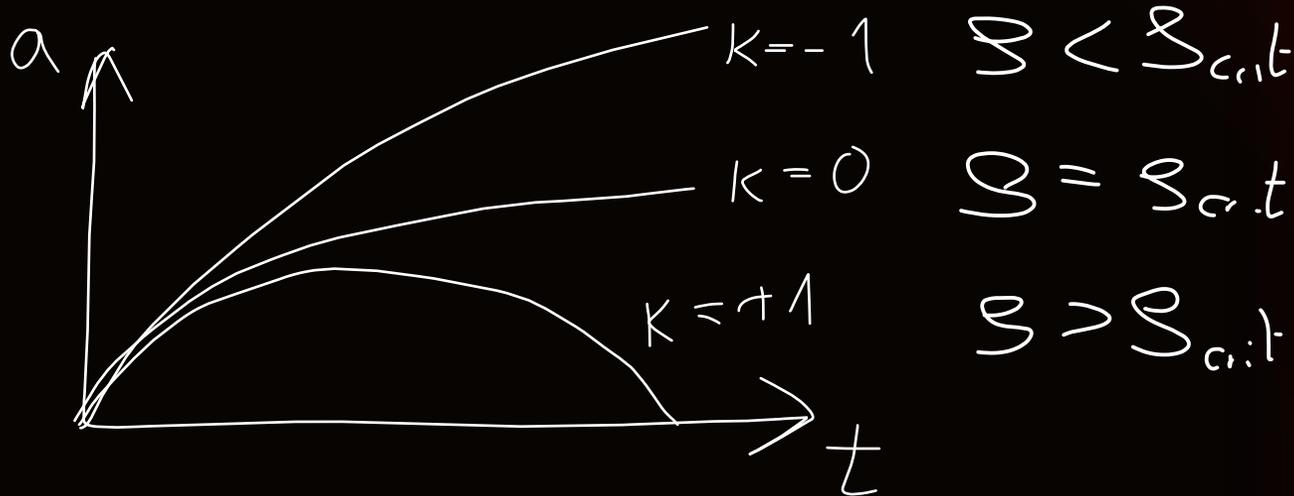


# Moderne Kosmologie

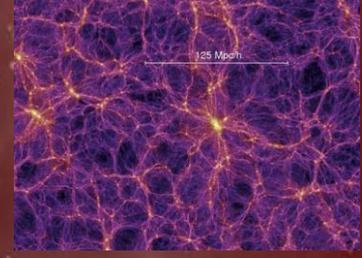
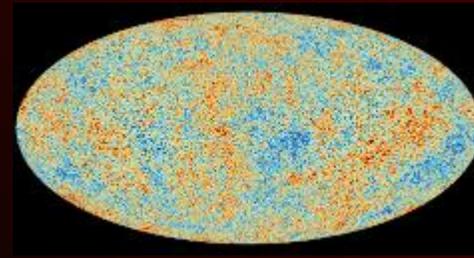
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- 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

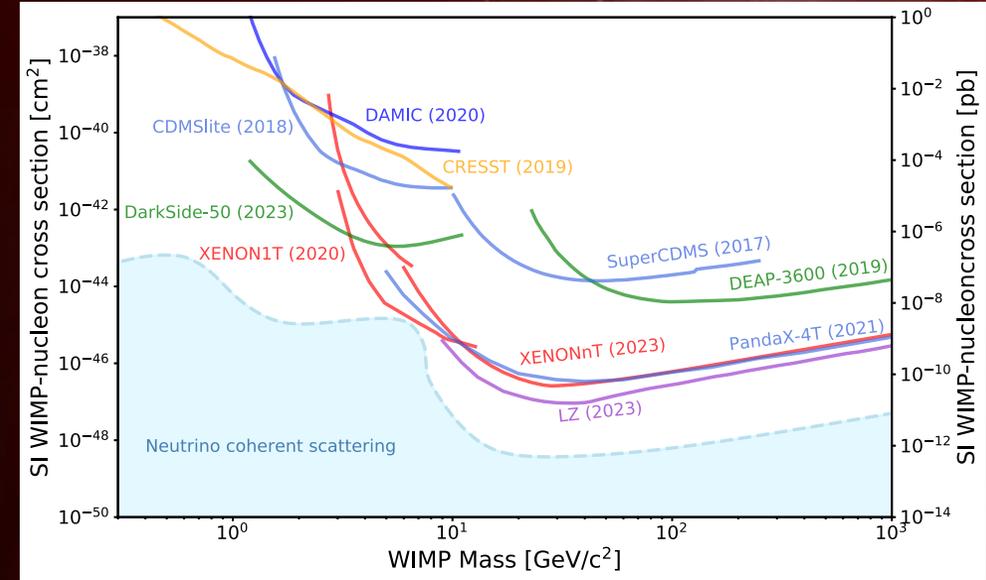
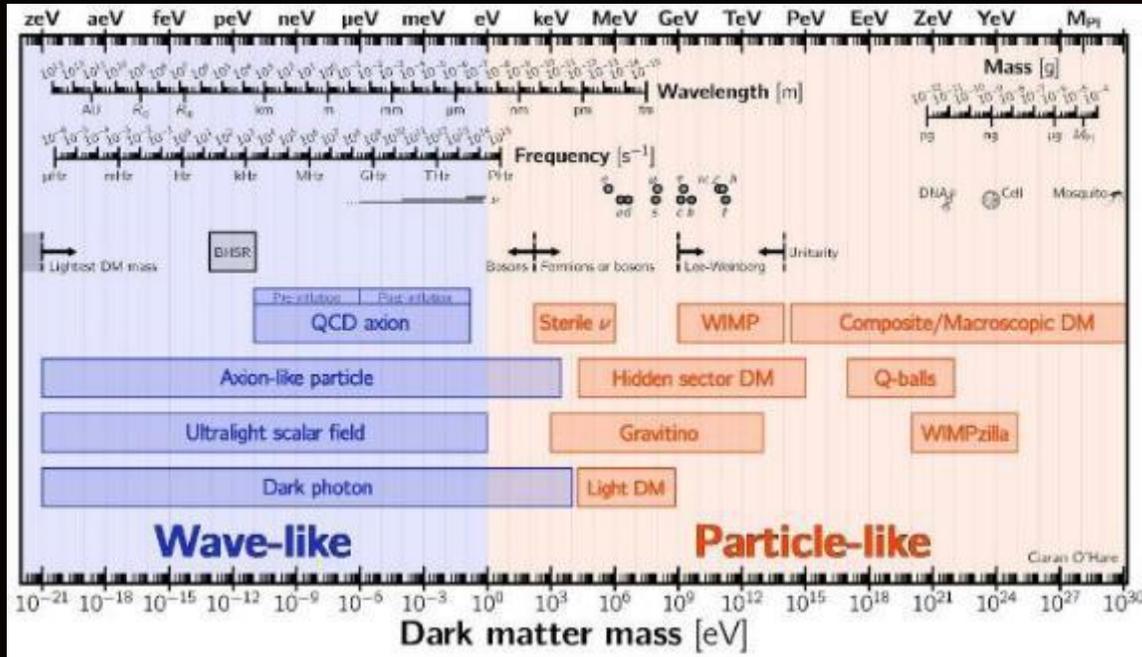
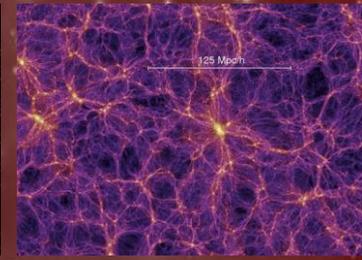
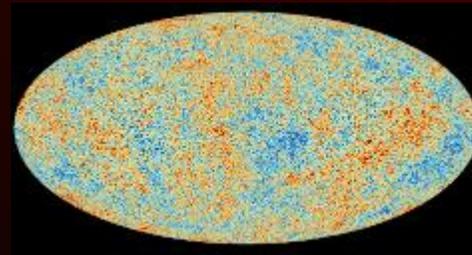
→ Wie ist DM bspw. innerhalb von Galaxien verteilt?

### Alternative Erklärungen

→ Sind es wirklich Teilchen?

→ Oder benötigen wir erweiterte Theorien?

# Dunkle Materie

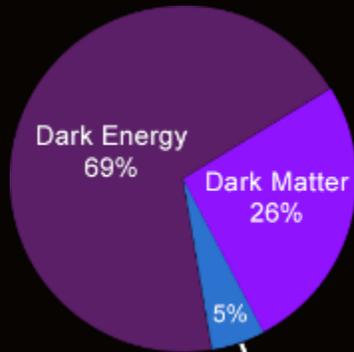


... ..

**Primordiale schwarze Löcher**

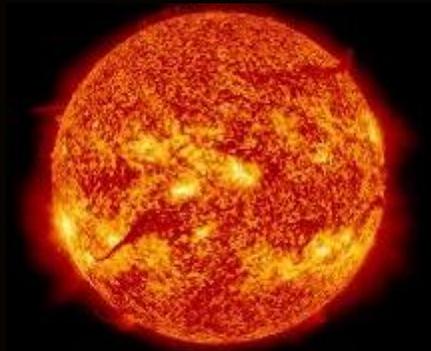
**~10<sup>67</sup> eV**





## Einführung in die Kosmologie

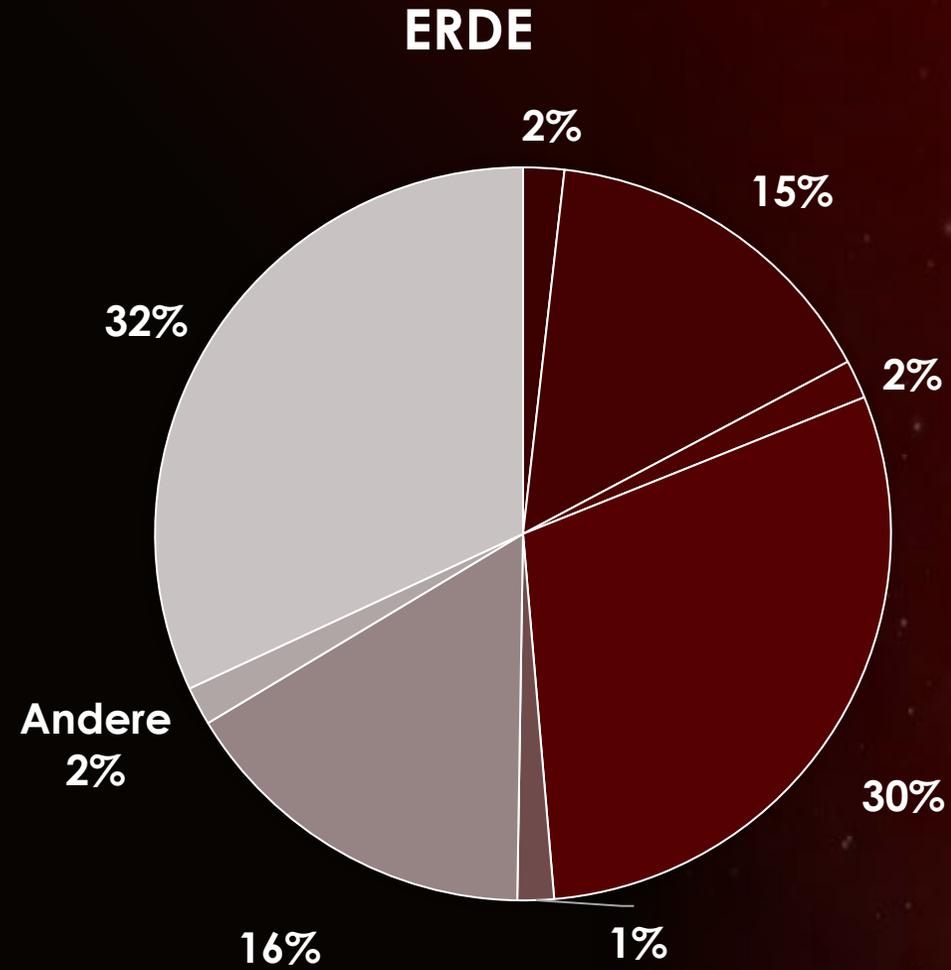
- Was wissen wir eigentlich über unser Universum?
- Und was hat das mit dunkler Materie zu tun?



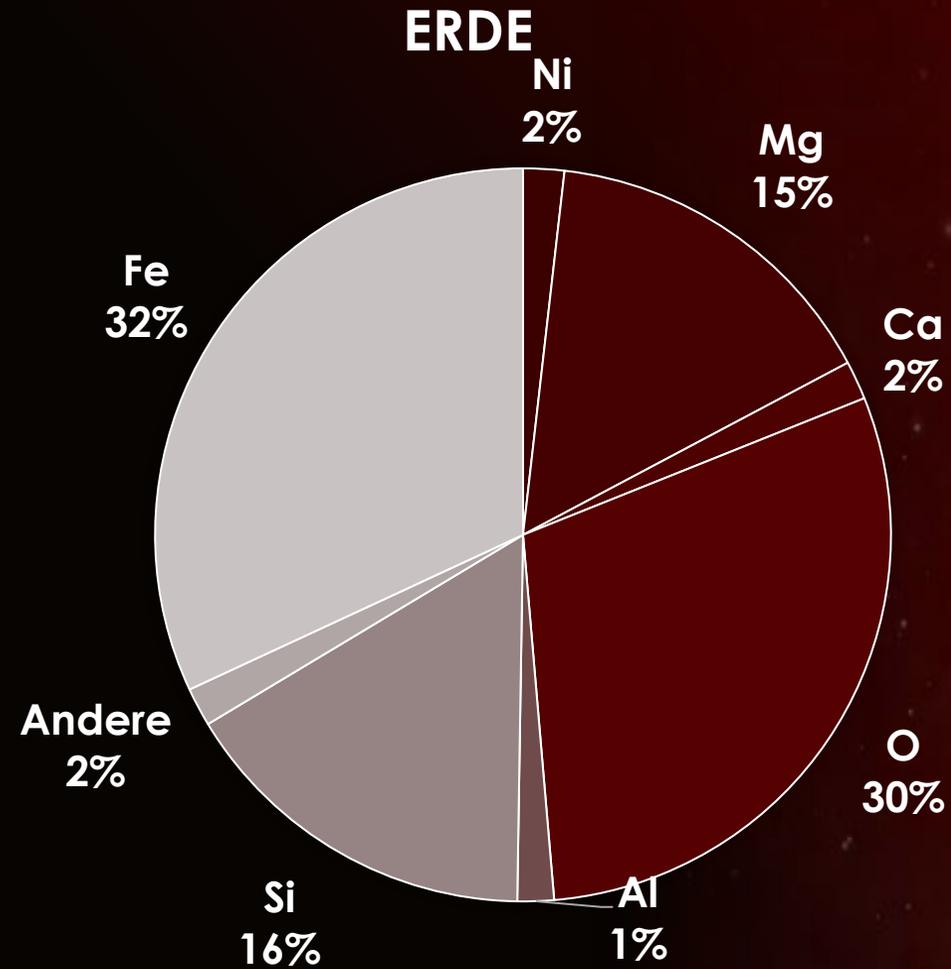
## Nukleare Astrophysik

- Woher kommen all unsere chemischen Elemente?

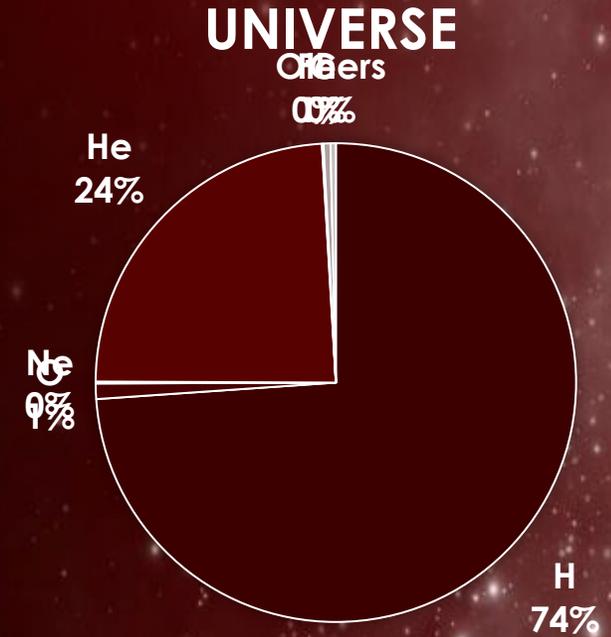
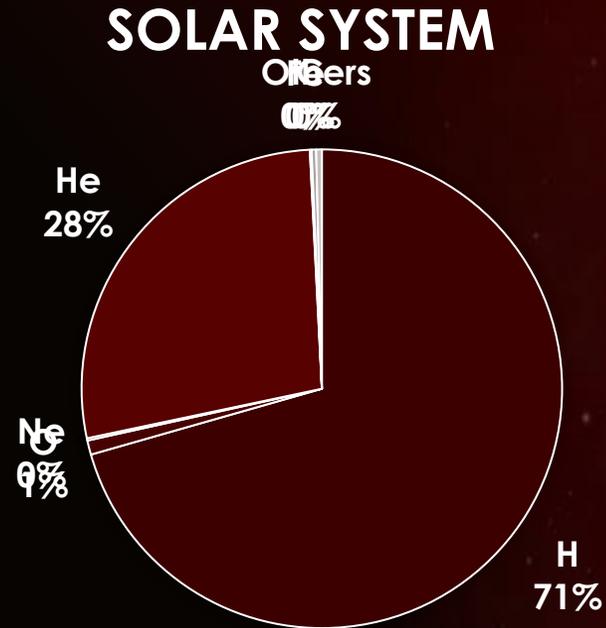
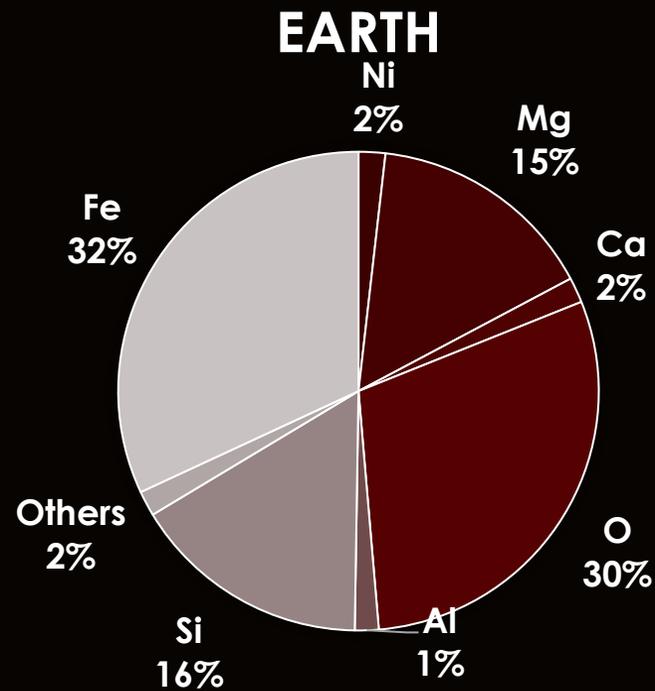
# Die Zusammensetzung unserer Erde



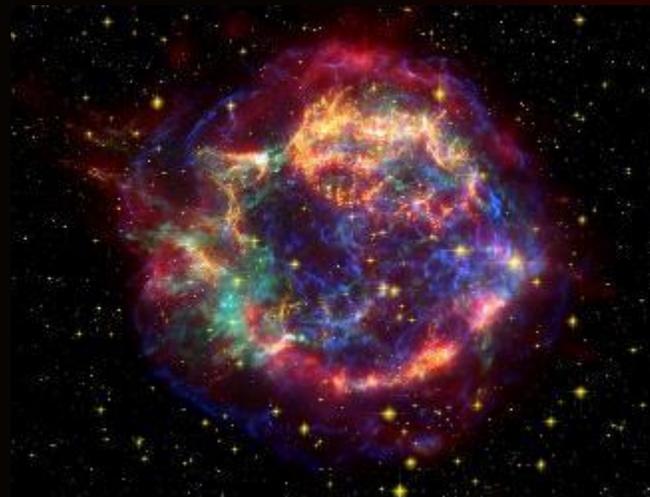
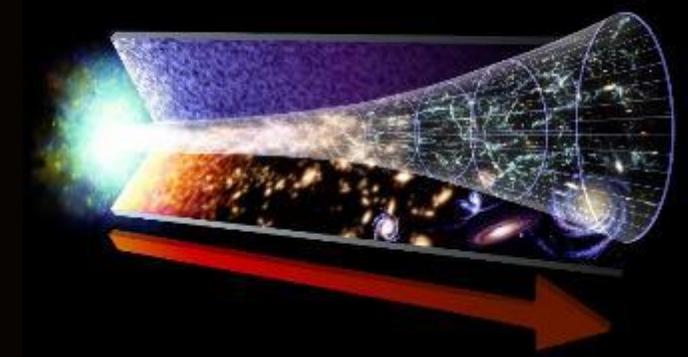
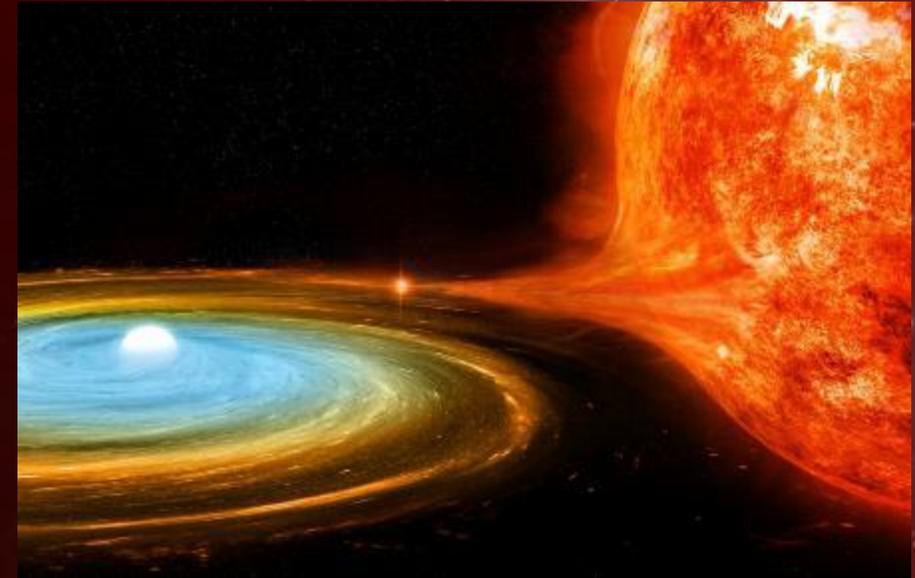
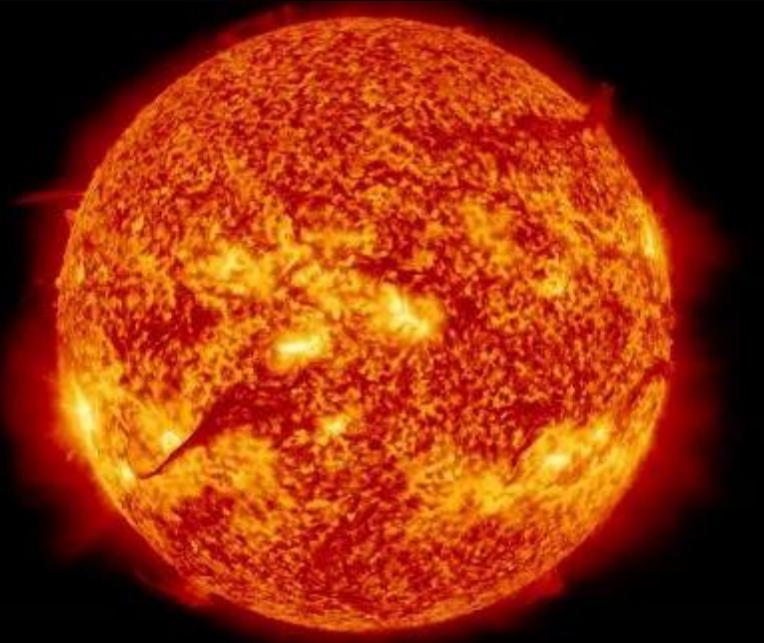
# Die Zusammensetzung unserer Erde



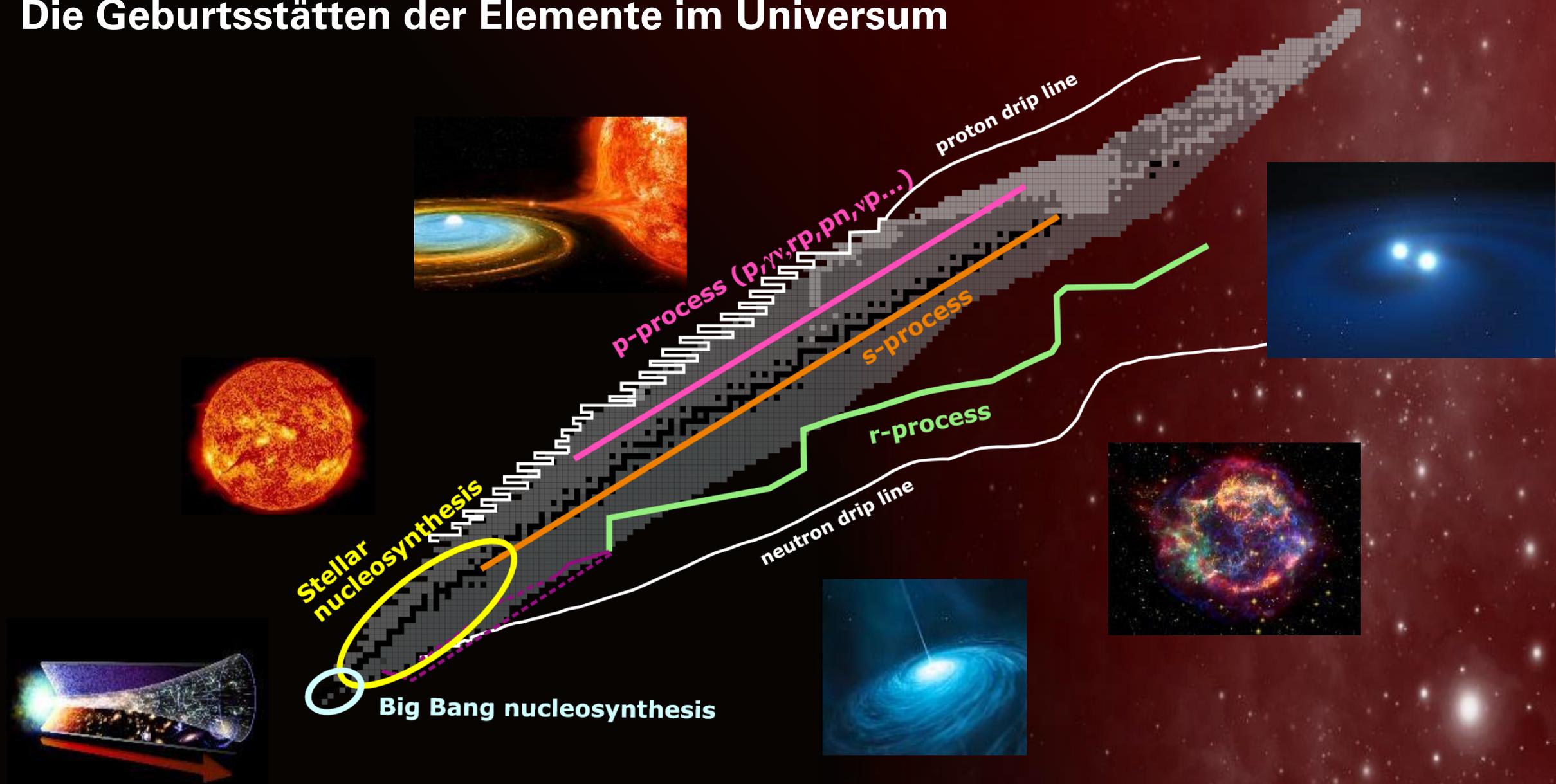
# Die chemische Zusammensetzung im Universum



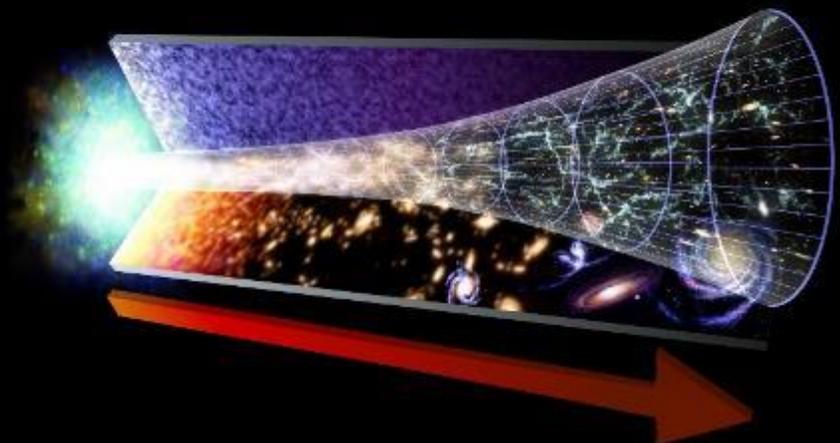
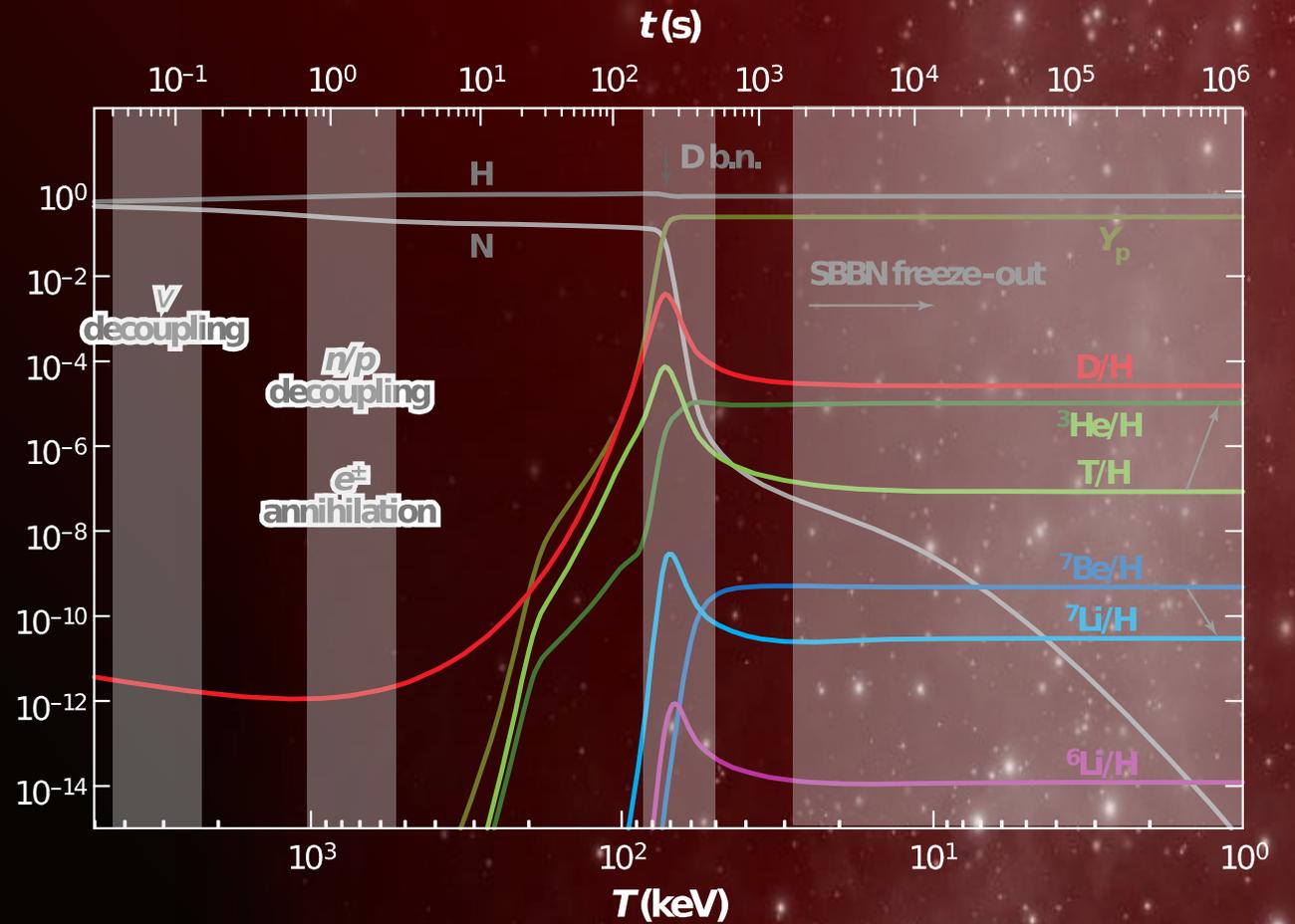
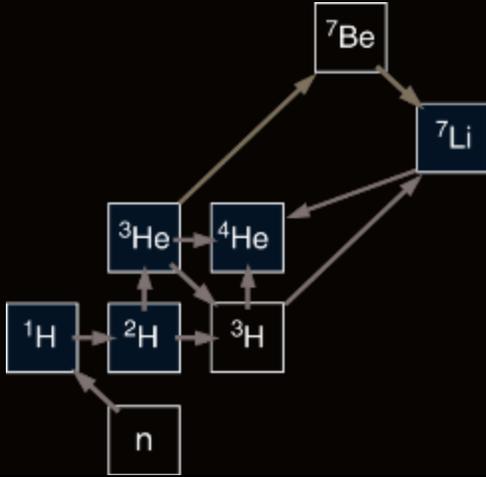
# Die Geburtsstätten der Elemente im Universum



# Die Geburtsstätten der Elemente im Universum

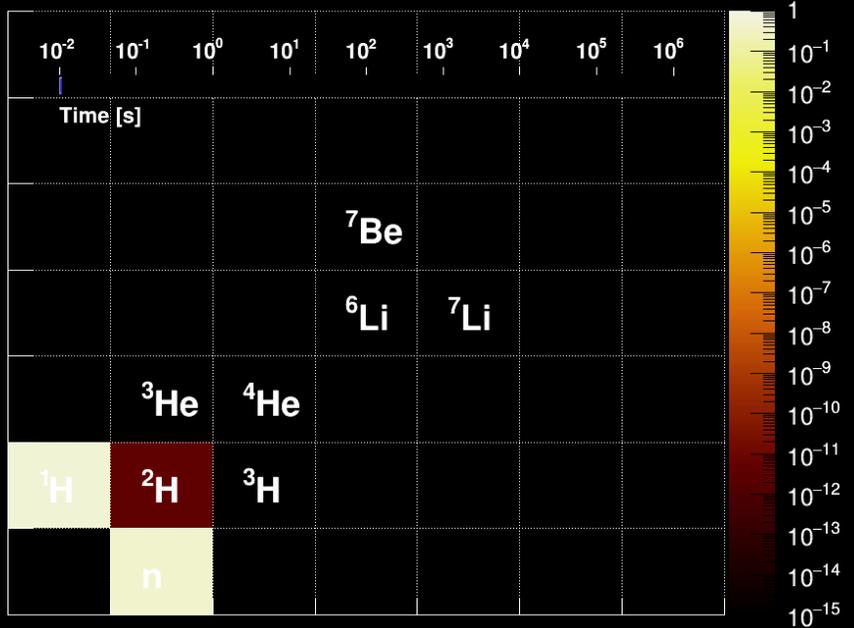
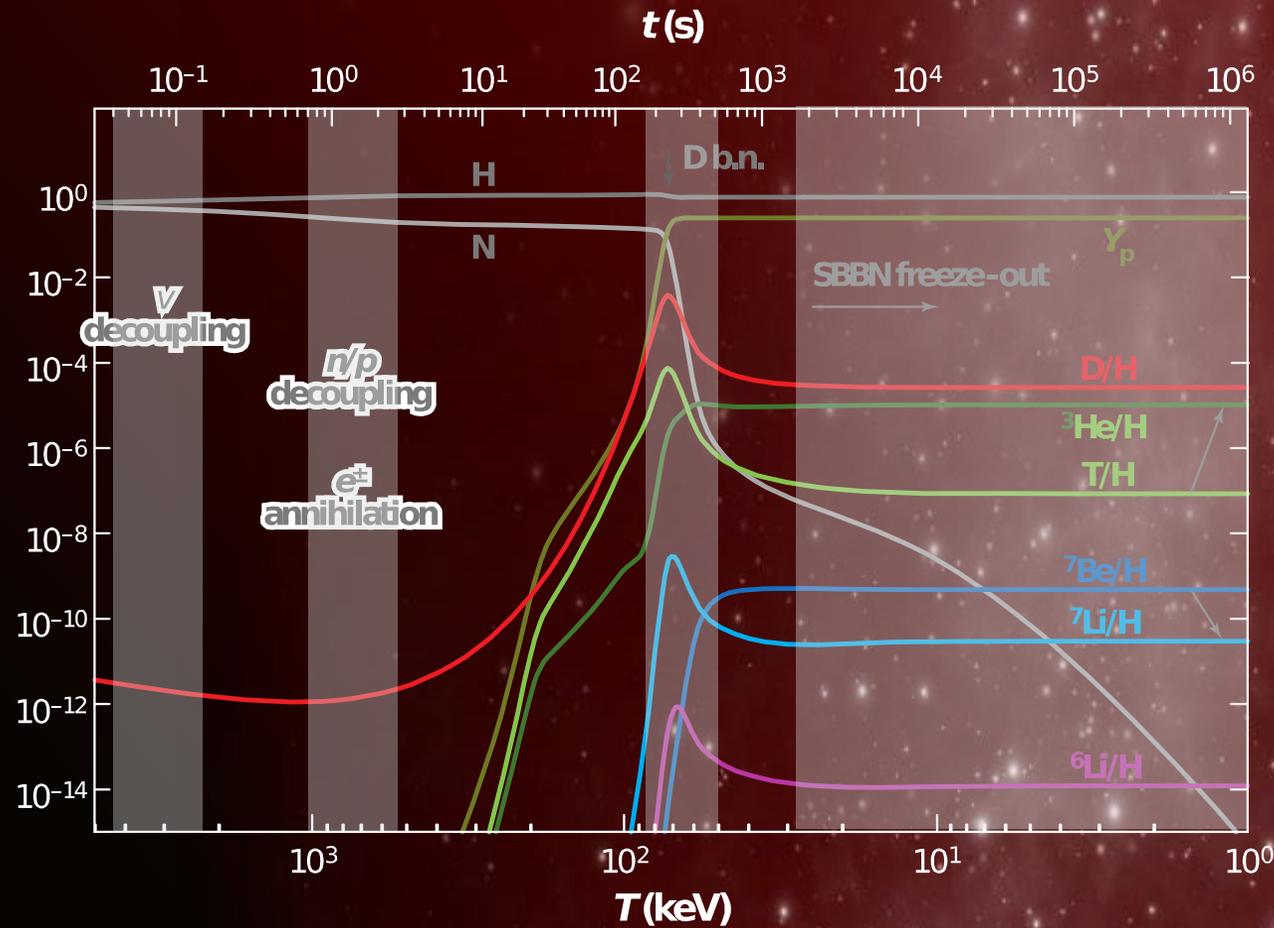


# Urknall-Nukleosynthese



- **Chromodynamische Bindungsenergie p/n:**  $\sim 1$  GeV
- **$^2\text{H}$  Flaschenhals:** Das ganze Universum wartete auf Deuterium

# Urknall-Nukleosynthese

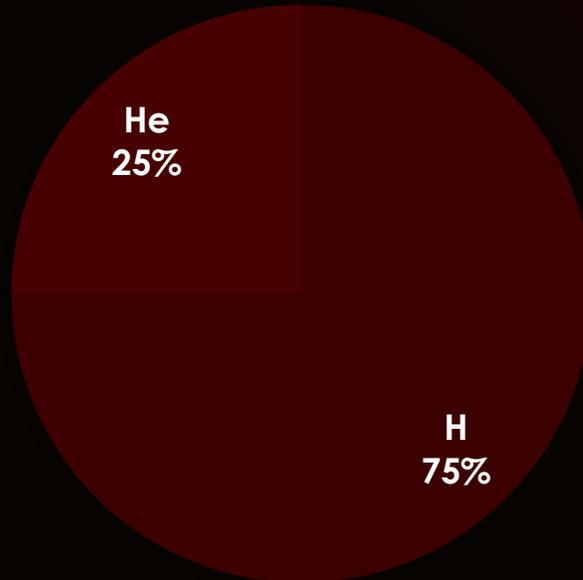


- **Chromodynamische Bindungsenergie p/n: ~1 GeV**
- **<sup>2</sup>H Flaschenhals:** Das ganze Universum wartete auf Deuterium

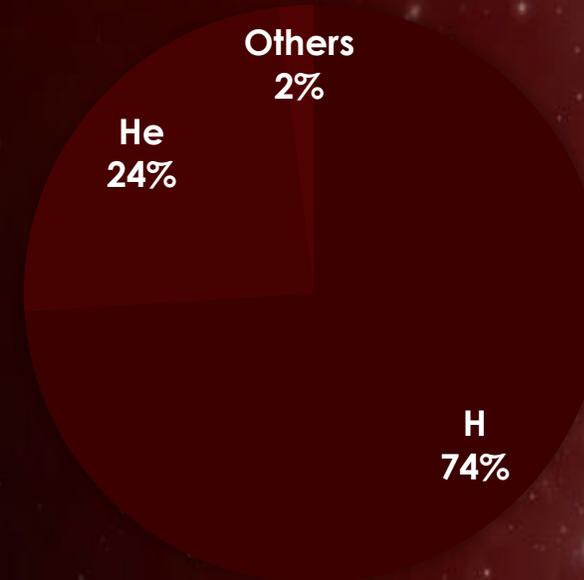


# Urknall-Nukleosynthese

## URKNALL-NUKLEOSYNTHESE

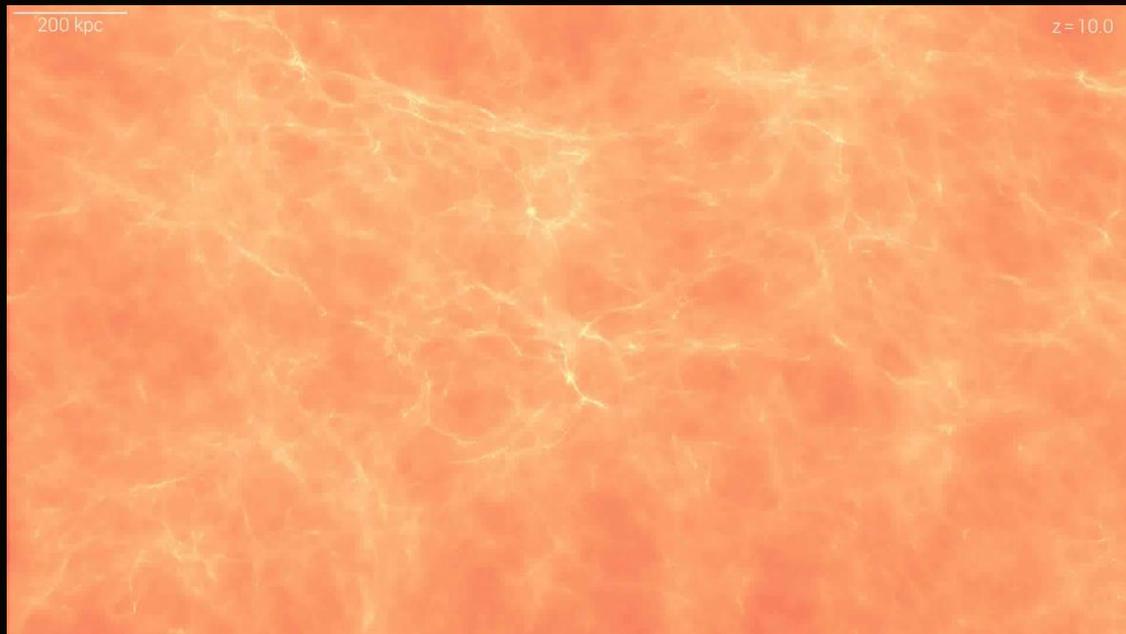


## DERZEITIGES UNIVERSUM



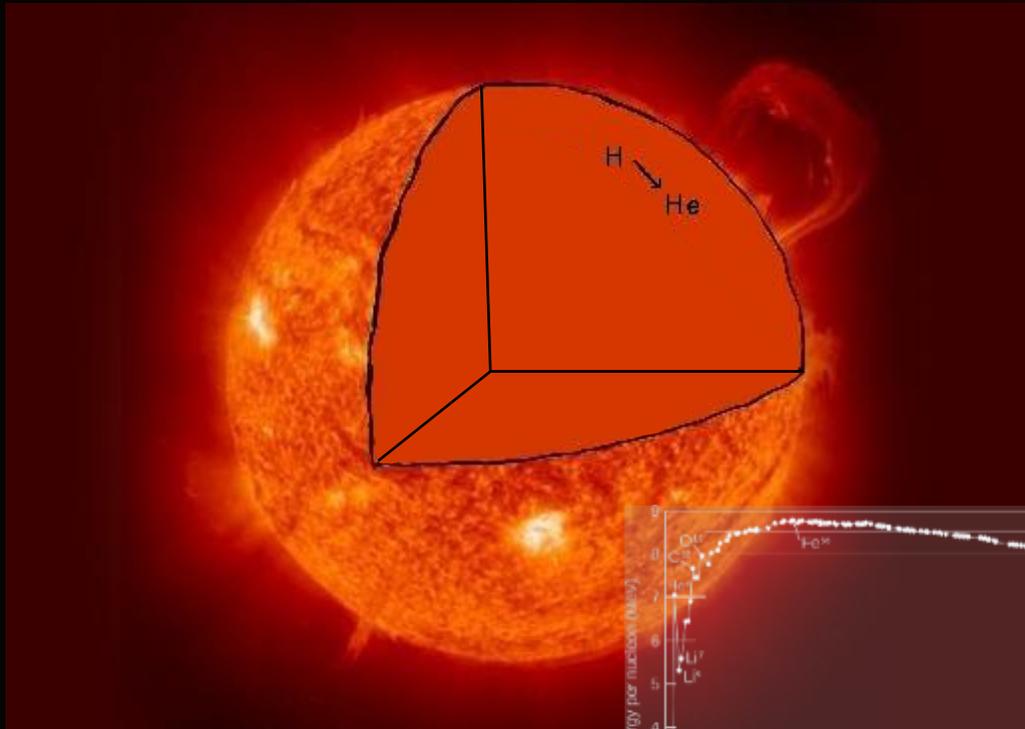
# Wiederherstellung von Nukleosynthese-Milieus

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

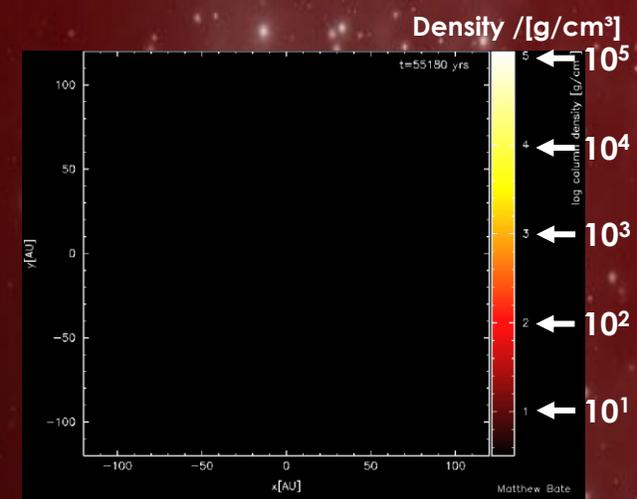


- Kleinskalige Simulation ~ (kpc)
- Simulation einer einzelnen Galaxie

# Protostern-Formation + Stellare Nukleosynthese

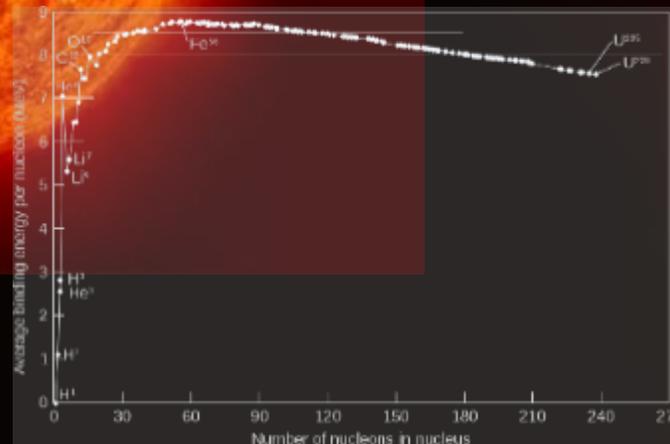


	$T_{\min}$ [K]	$\rho_{\min}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
H → He	13 E+6	100 E+0
He → C,O	100 E+6	100 E+3
C → O, Ne, Mg, Na	500 E+6	200 E+3
Ne → O, Mg	1.2 E+9	4 E+6
O → Mg, Si, S, P	1.5 E+9	10 E+6
Si → Ti, Fe, Ni ...	~ 3.0 E+9	30 E+6



[https://www.astro.ex.ac.uk/people/mbate/Animations/Beta0\\_01\\_RT\\_1M\\_DensSplash.mov](https://www.astro.ex.ac.uk/people/mbate/Animations/Beta0_01_RT_1M_DensSplash.mov)

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

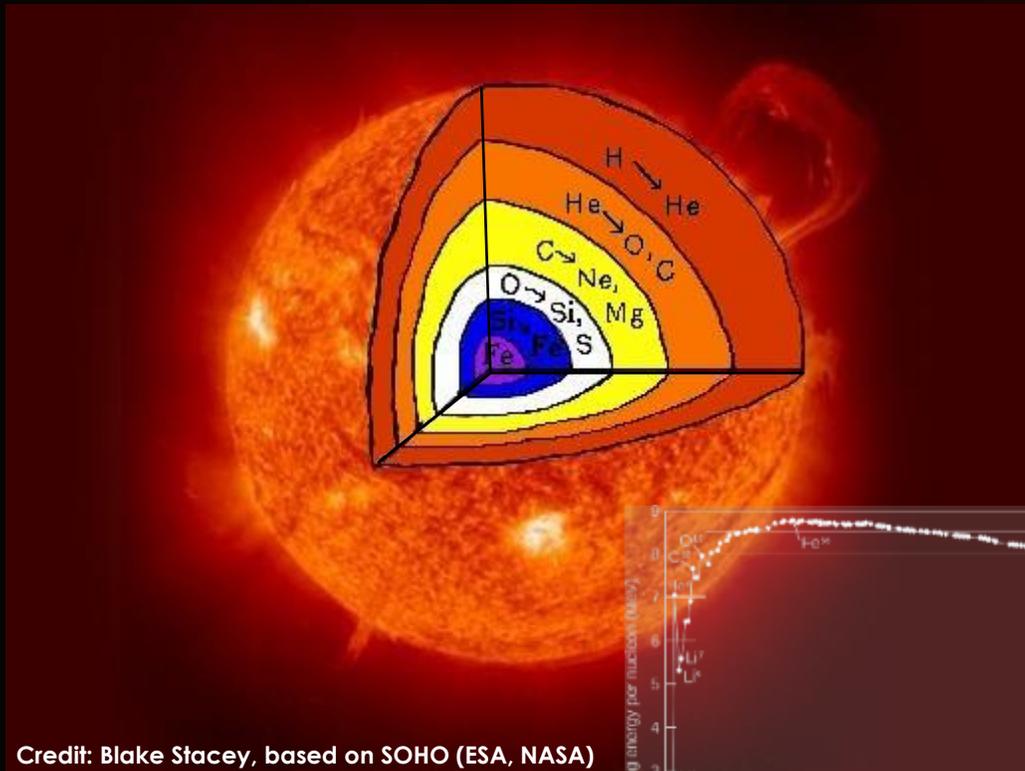


[https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_binding\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy)

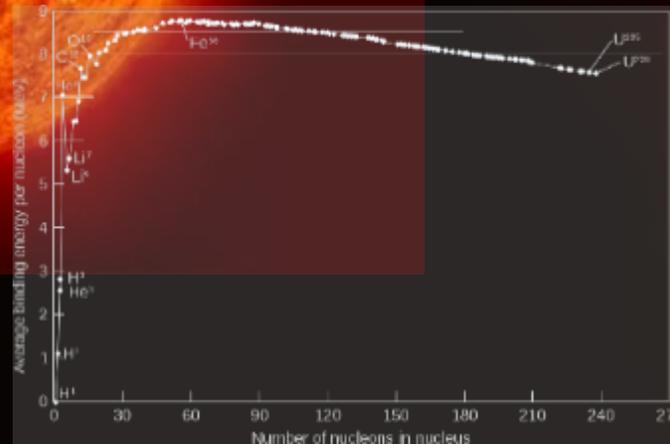


Courtesy: Matthew Bate (University of Exeter)

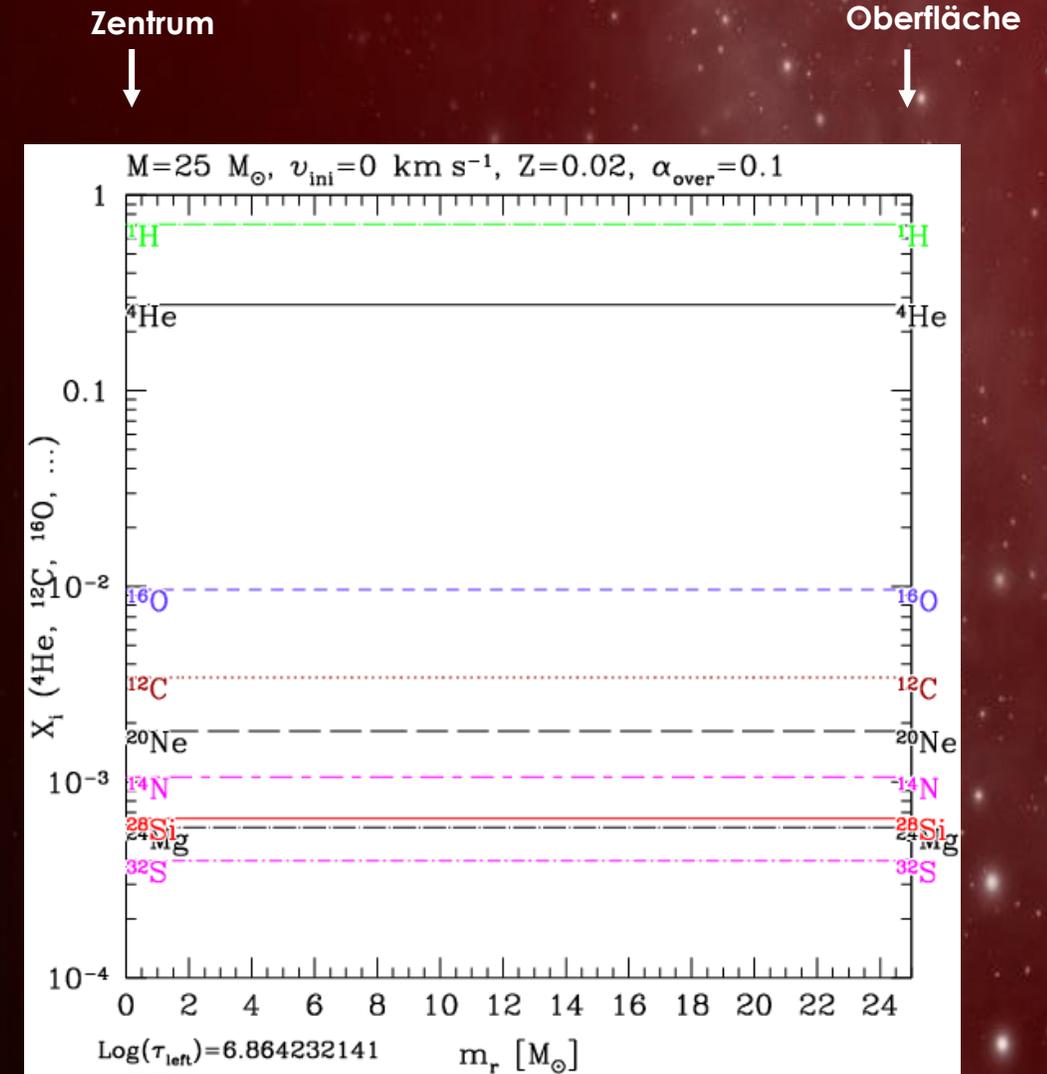
# Stellare Nukleosynthese



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

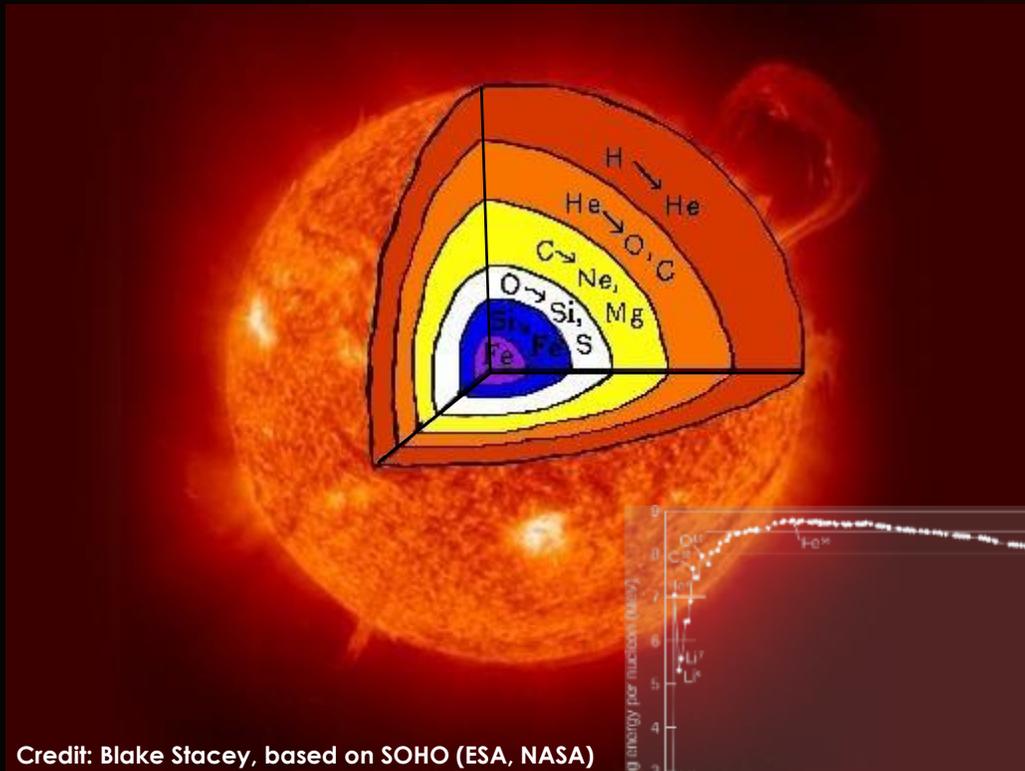


[https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_binding\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy)

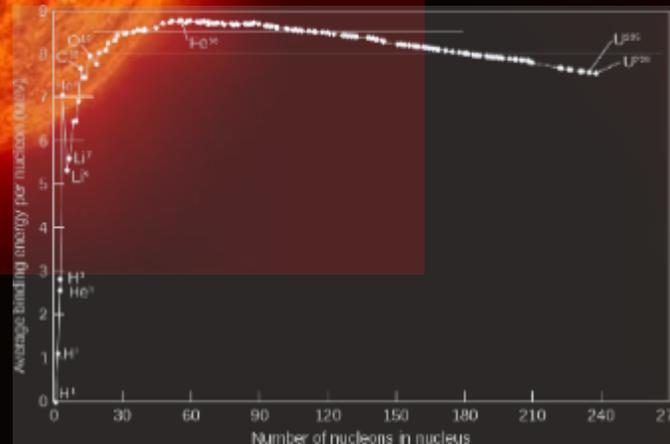


<https://www.astro.keele.ac.uk/~hirschi/animation/anim.html>

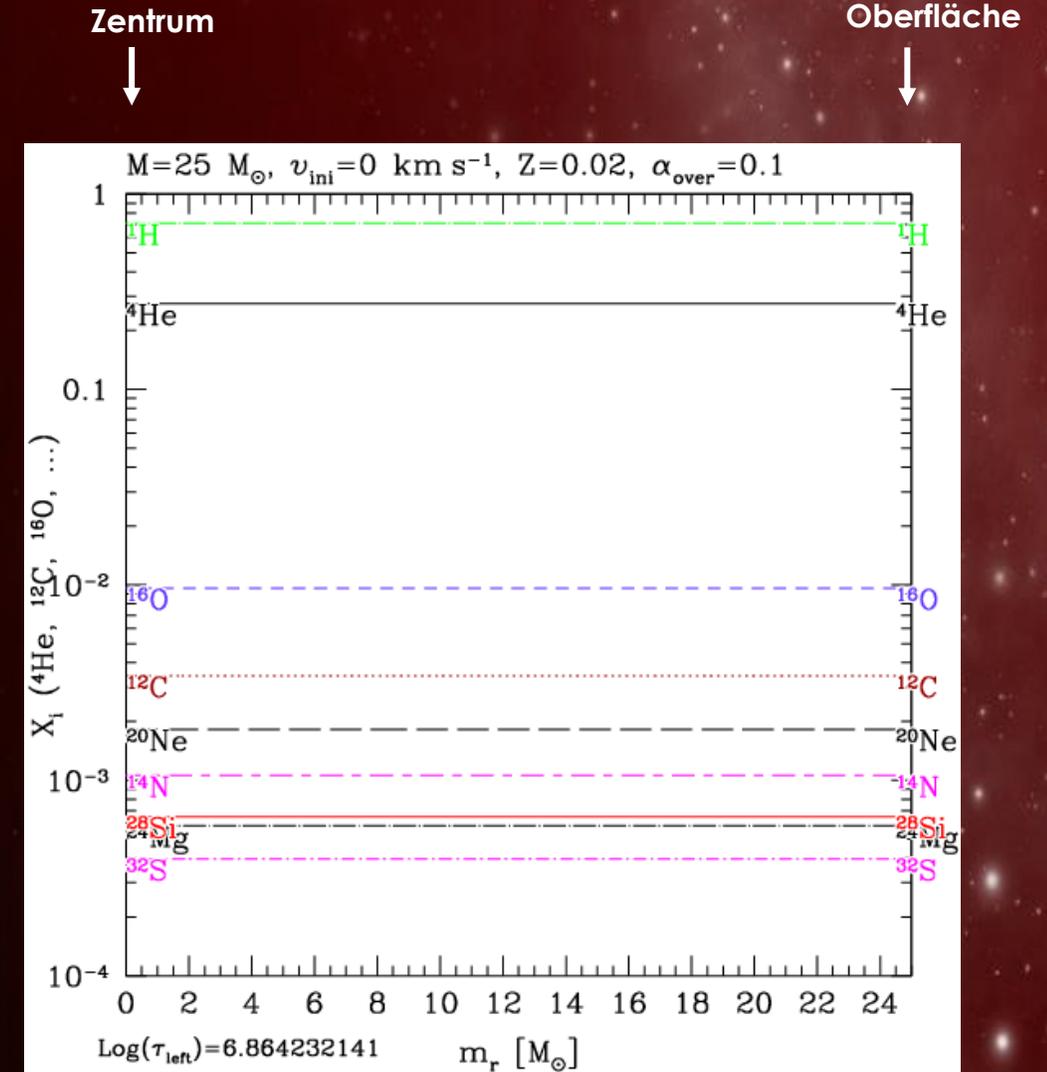
# Stellare Nukleosynthese



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

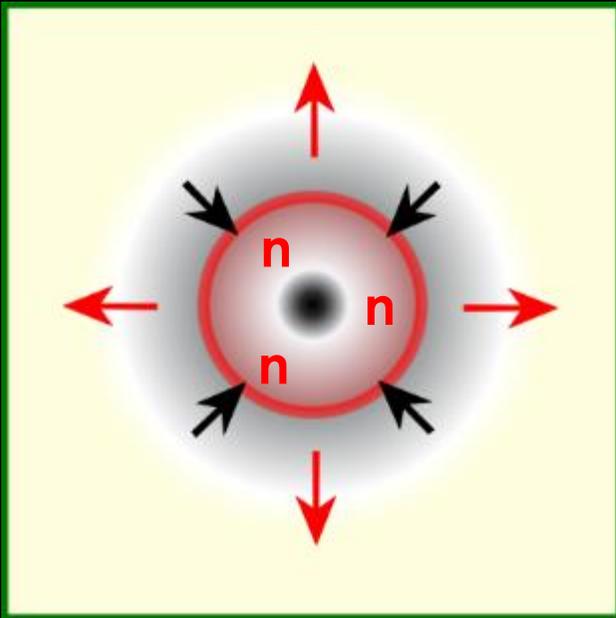


[https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_binding\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy)



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

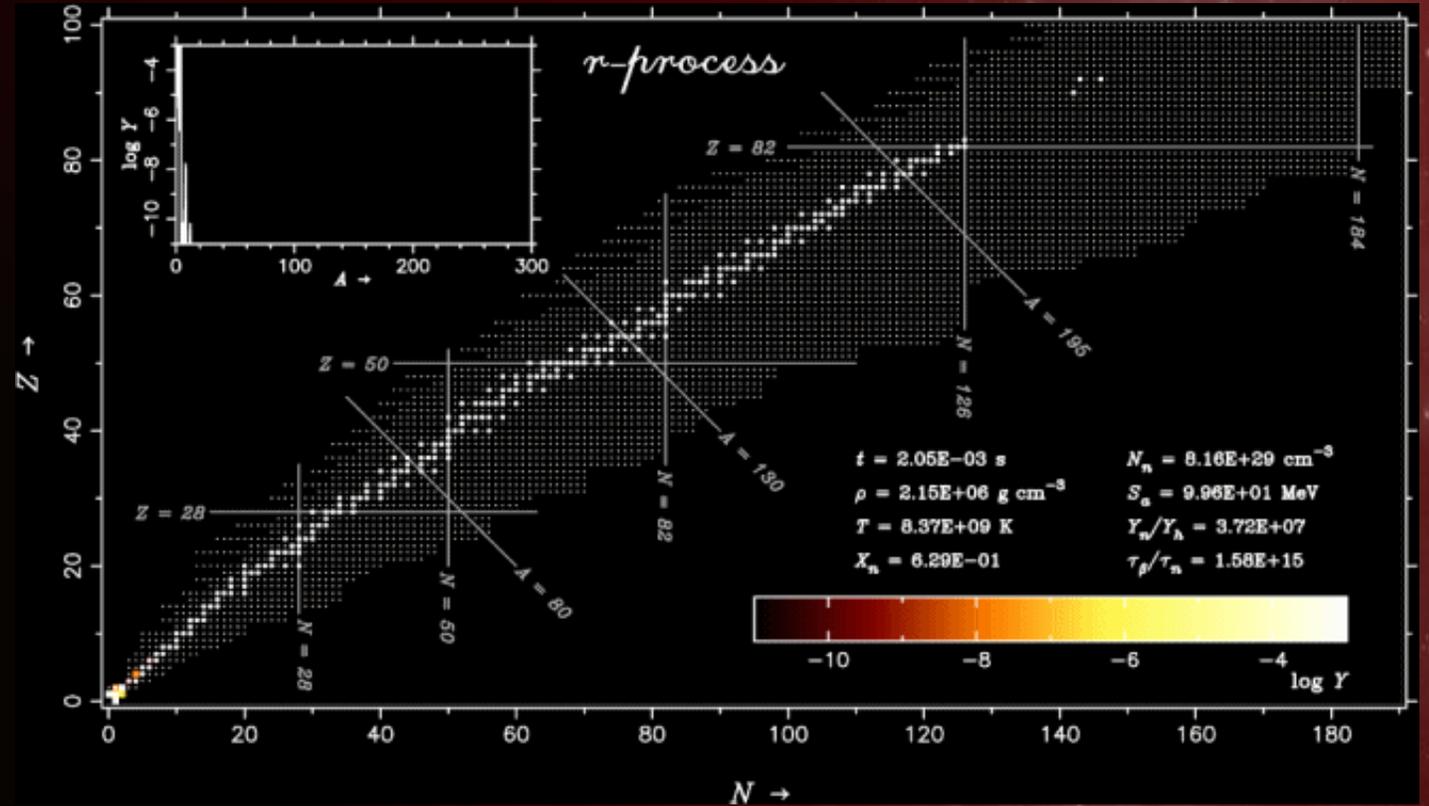
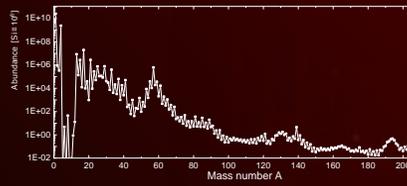
# Explosive Nukleosynthese



[https://en.wikipedia.org/wiki/Type\\_II\\_supernova](https://en.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova)

#

# Explosive Nukleosynthese

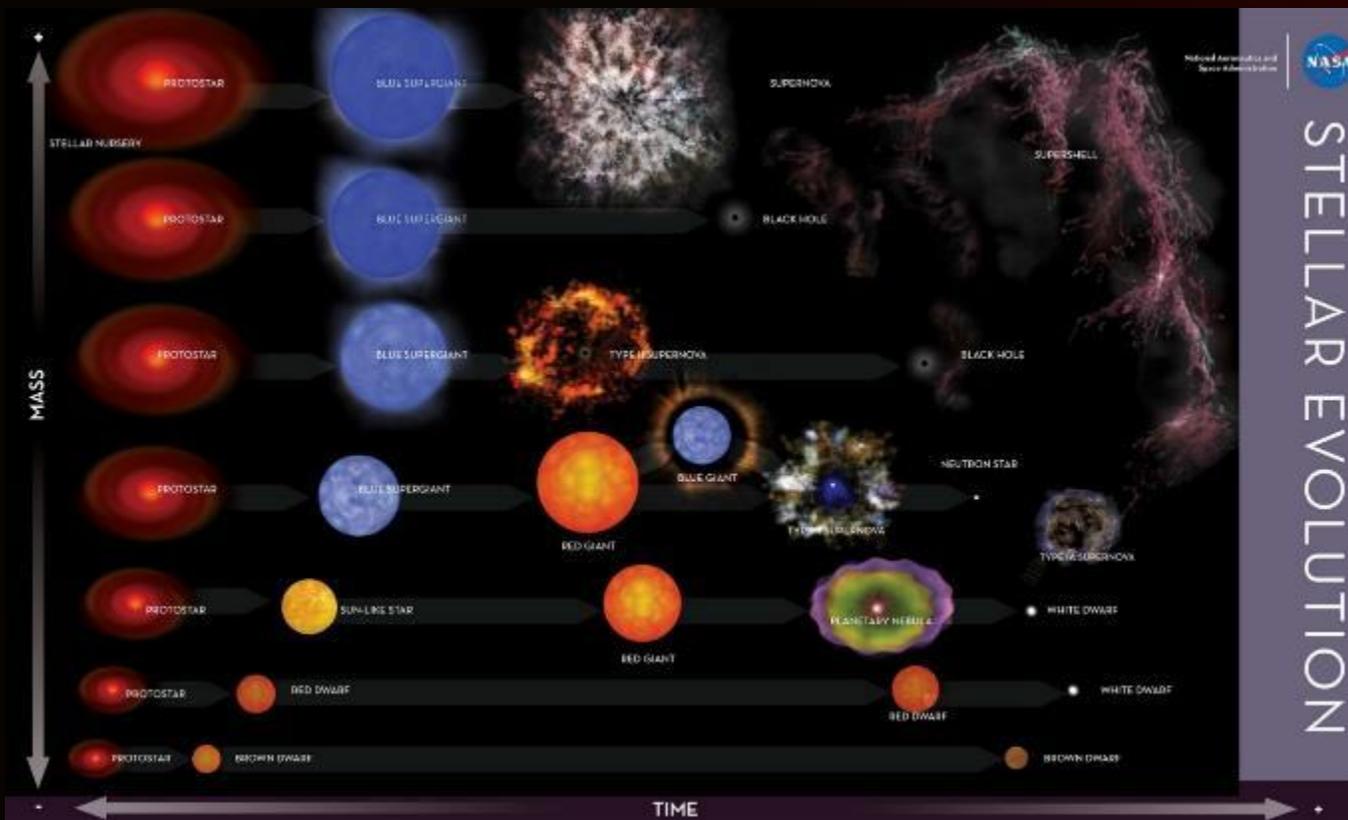


<http://www.ph.sophia.ac.jp/~shinya/research/research.html>

Credit: ESA ([https://www.esa.int/ESA/Media/Images/2005/09/790559\\_078pxst\\_Galiers0\\_A\\_Spitzer\\_Crop.jpg](https://www.esa.int/ESA/Media/Images/2005/09/790559_078pxst_Galiers0_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](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

