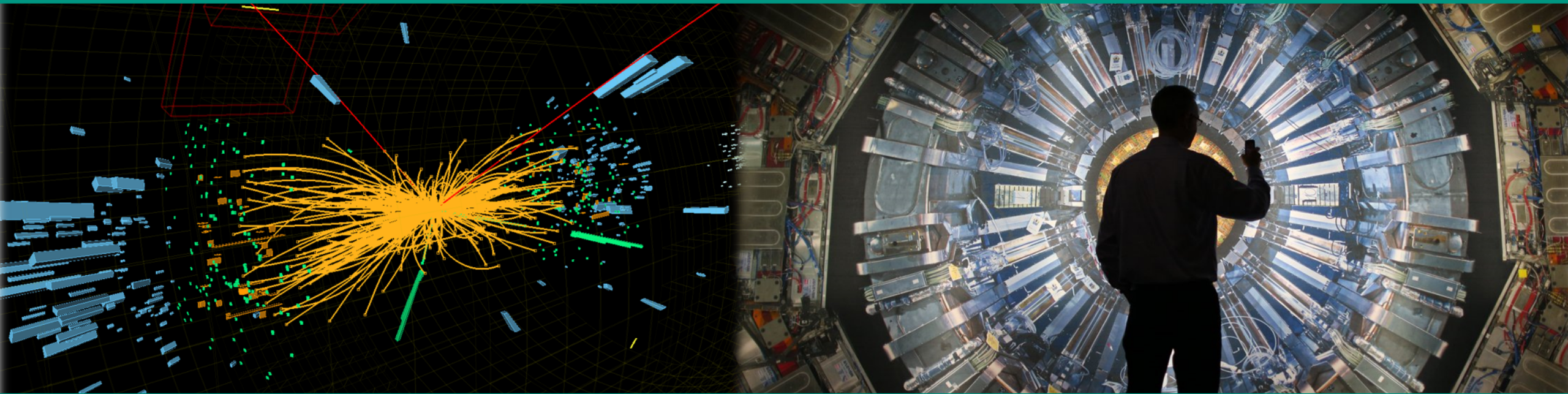


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 10

23.5.2023

Guido Drexlin & Markus Klute



Programm heute

Kapitel 4 - Anwendungen in der Kernphysik

4.2 - Kernspaltung und Kernfusion

4.3 - Nukleare Astrophysik

Kapitel 5 - Symmetrien und Erhaltungssätze

Recap: β -Zerfall & Kernspaltung

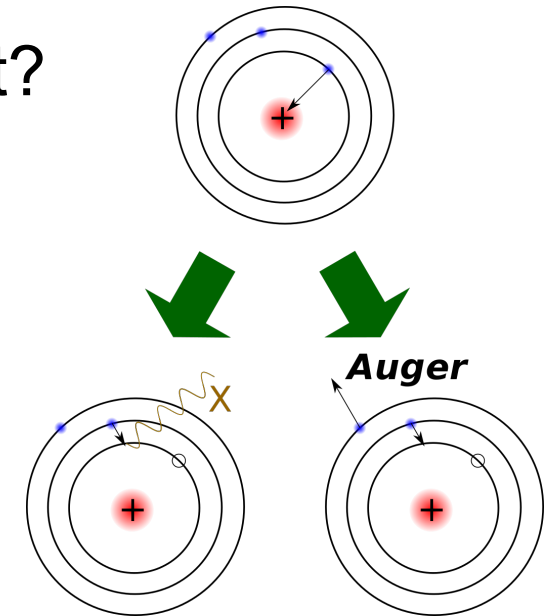
- **β -Zerfälle in ug-/uu- und gg-Kernen**
 - **ug-Kerne**: 1 Massenparabel, **uu-/gg-Kerne**: 2 Massenparabeln
 - **gg-Kerne**: Doppelbetazerfall ($2\nu\beta\beta$), Prozess 2. Ordnung – sehr selten
- **Fermi's Goldene Regel: Phasenraum dN/dE bestimmt Energiespektrum**
 - **4-Fermion-Punktwechselwirkung**: Kopplungskonstante G_F , Matrixelement M_{fi}
 - Phasenraumfaktor: $dN/dE_e \sim p_e^2 \cdot (E_0 - E_e)^2$
- **Spaltprozesse schwerer Kerne**
 - **spontane Spaltung**: **Durchtunneln** der Spaltbarriere (Oberfläche / Coulomb)
 - **induzierte Spaltung**: thermisches n an ^{235}U induziert Spaltung (Reaktor)

Konzept Fragen

■ Wie heissen solche Reaktionen und was ist das Resultat?

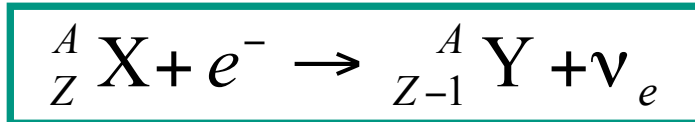
■ Kann man Kernreaktionen simulieren?

■ Wie lautet Fermi's Goldene Regel



Konzept Fragen

■ Wie heissen solche Reaktionen und was ist das Resultat?



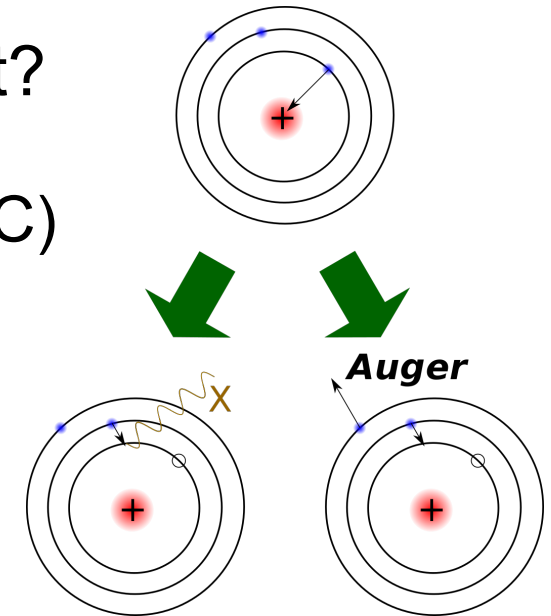
Elektroneneinfang (EC)

■ Kann man Kernreaktionen simulieren?



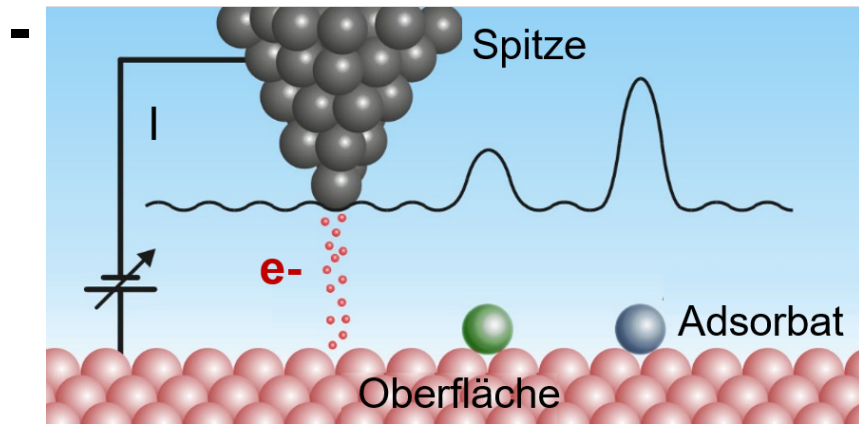
■ Wie lautet Fermi's Goldene Regel

$$\boxed{\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}}$$

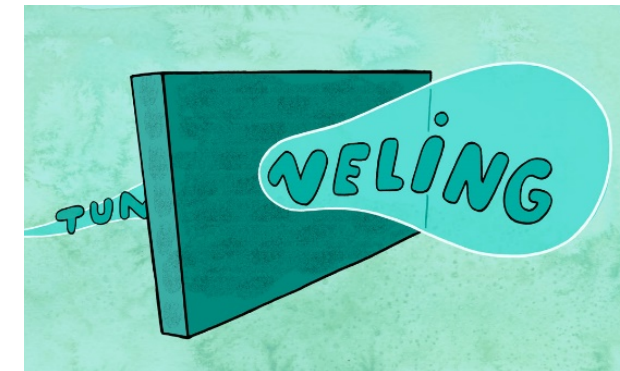


Recap: Tunnelprozesse- α -Zerfall, Spaltung, & ...

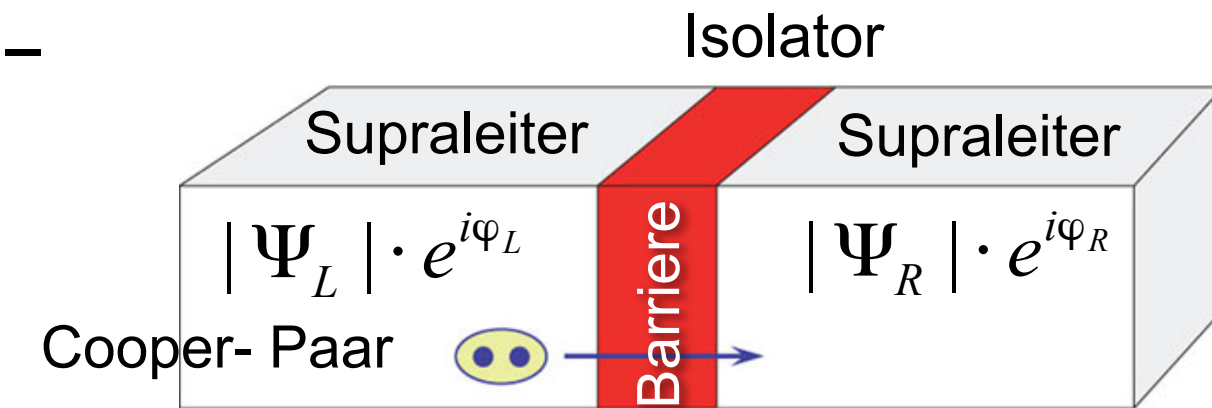
■ Beispiel aus Mod. Ex. Phys. I ... Rastertunnelmikroskop



Prinzip: Messung des
Tunnelstroms zwischen
Sondenspitze &
Substratoberfläche



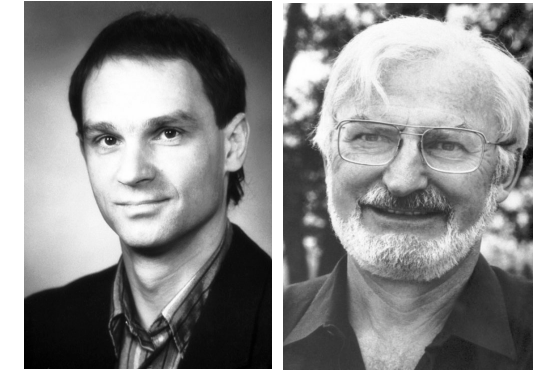
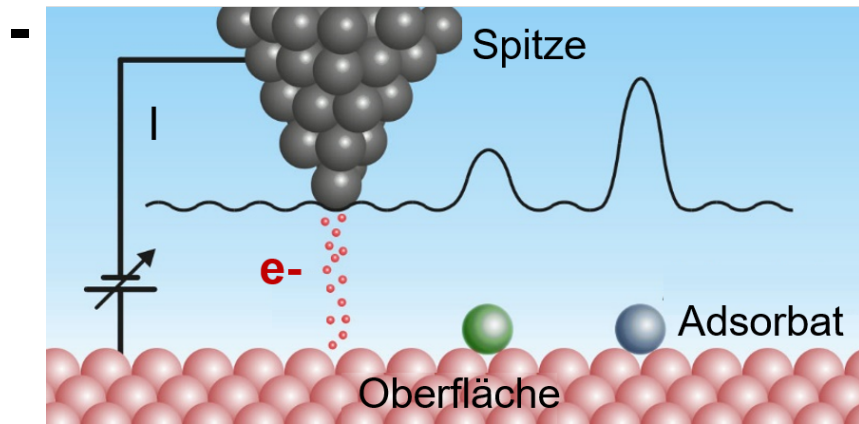
■ Beispiel aus Mod. Ex. Phys. II ... Josephson-Kontakt



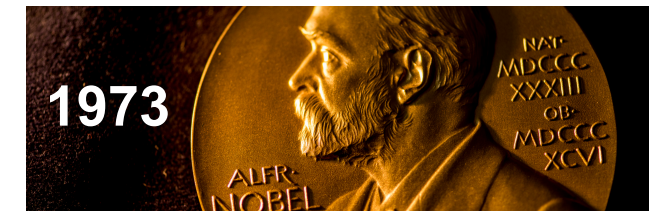
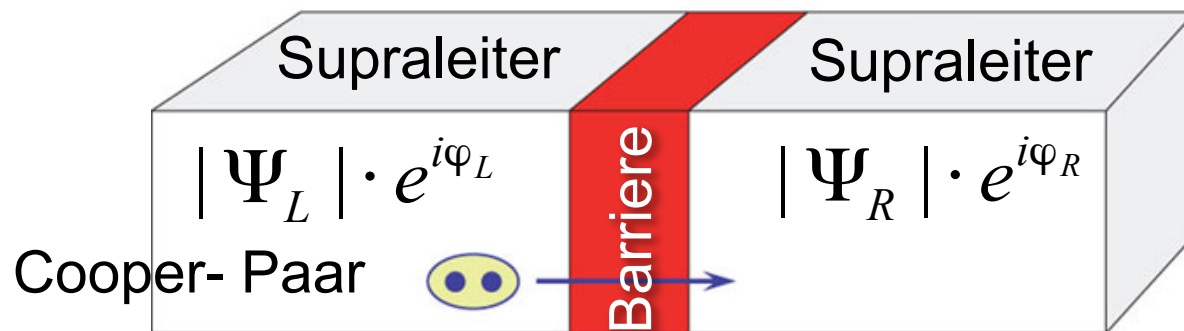
Prinzip:
Tunneln von
Cooper-Paaren durch
isolierende Barriere

Recap: Tunnelprozesse- α -Zerfall, Spaltung, & ...

■ Gerd Binnig / Heinrich Rohrer ... Rastertunnelmikroskop



■ Brian D. Josephson – Isolator ... Josephson-Kontakt



14.07. 15:45

Prof. Dr. Hartmut Zohm

Leiter des Bereichs Tokamak-Szenario-Entwicklung



Hartmut Zohm, geboren am 2. November 1962 in Freiburg, ist seit 1999 wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik und Leiter des Bereichs Tokamak-Szenario-Entwicklung (früher Experimentelle Plasmaphysik 2). Für seine Doktorarbeit "Investigation of Magnetic Modes in the ASDEX Tokamak" wurde er 1991 mit der Otto-Hahn-Medaille der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet. Nach einem Auslandsaufenthalt in San Diego bei General Atomics habilitierte Hartmut Zohm 1996 an der Universität Augsburg im Fach Experimentalphysik. Von 1996 bis 1999 lehrte er als Professor für Elektrotechnik und Plasmaforschung an der Universität Stuttgart.

1999 kehrte er als Wissenschaftliches Mitglied an das IPP zurück. Seit 2003 ist er Honorarprofessor (Physik) an der Ludwig-Maximilians-Universität München. 2014 wurde er mit dem John Dawson Award der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft

ausgezeichnet, 2016 mit dem Hannes-Alfvén-Preis der Europäischen Physikalischen Gesellschaft. Seit 2016 ist Hartmut Zohm Fellow der American Physical Society.

Tunnelprozesse: Fusion leichter Kerne

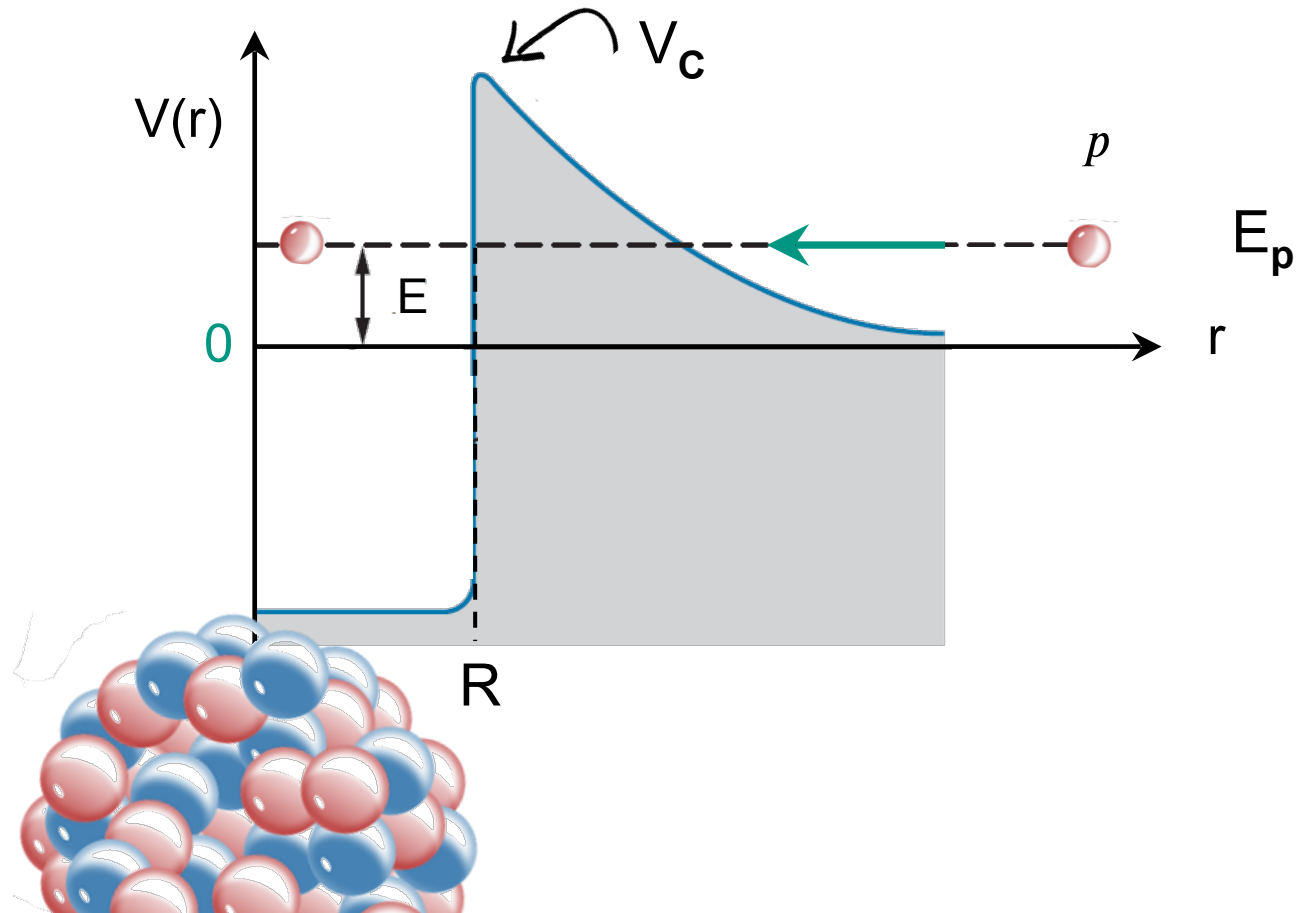
■ Tunneln durch die Coulomb-Barriere

- Kern mit stark **repulsivem Coulomb-Potenzial** V_C

$$V_C = \frac{Z \cdot Z' \cdot e^2}{R + R'}$$

Kern mit Radius R , Ladung Z

Projektil mit Radius R' , Ladung Z'



Tunnelprozesse: Fusion leichter Kerne

■ Tunneln durch die Coulomb-Barriere in Sternen: 2 Kerne mit $A = 8$, $Z = 4$

- klassische Abschätzung der erforderlichen **Temperatur T** im Innern von Sternen

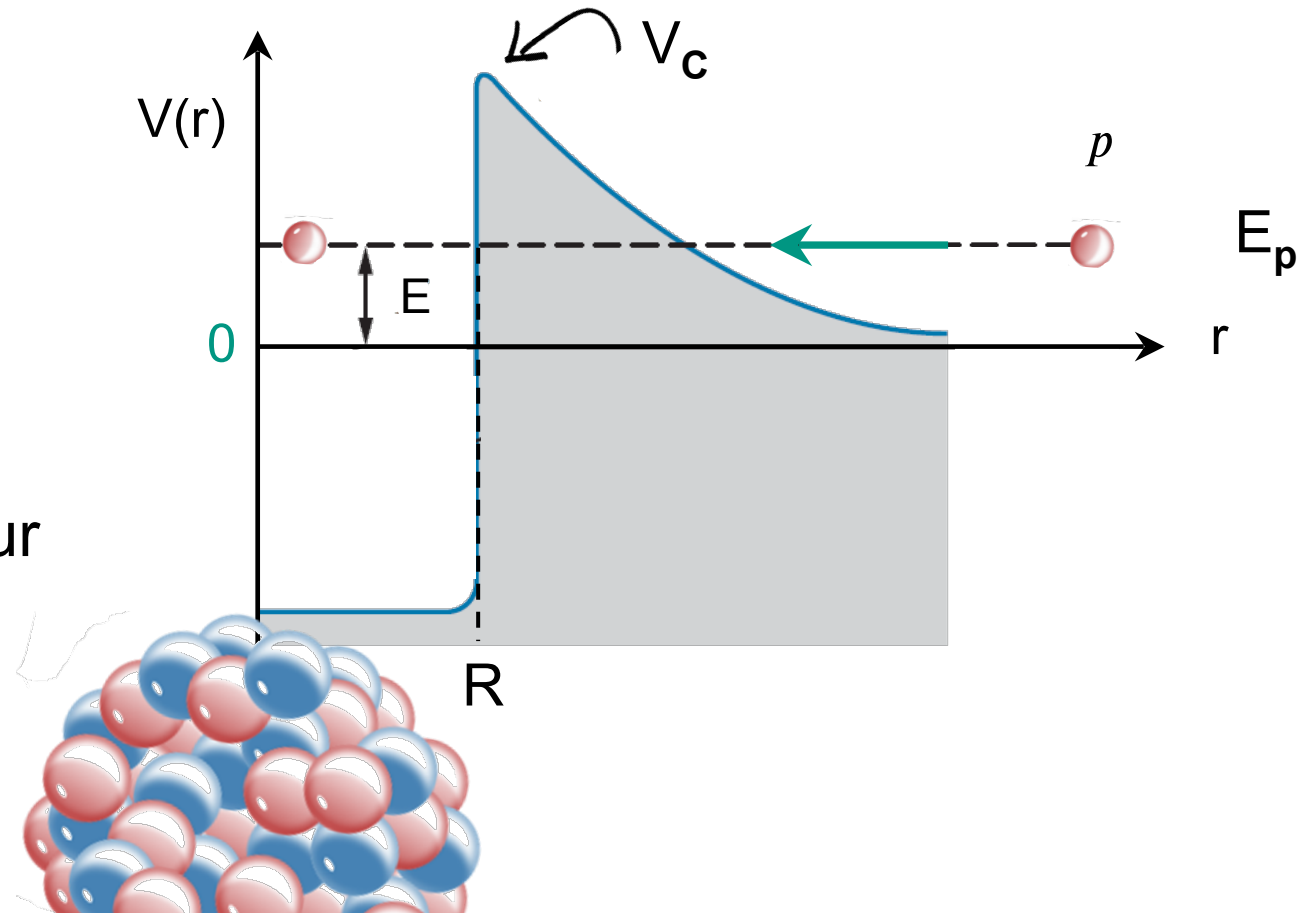
$$\text{jeweils } E_{\text{kin}} = 2,4 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow T = 5,6 \cdot 10^{10} \text{ K}$$

- Modellierung der Stern-Temperatur mit Tunnelprozessen:

$$\langle E_{\text{kin}} \rangle = 1 - 10 \text{ keV}$$

$$\Rightarrow T = 10^7 \dots 10^8 \text{ K}$$



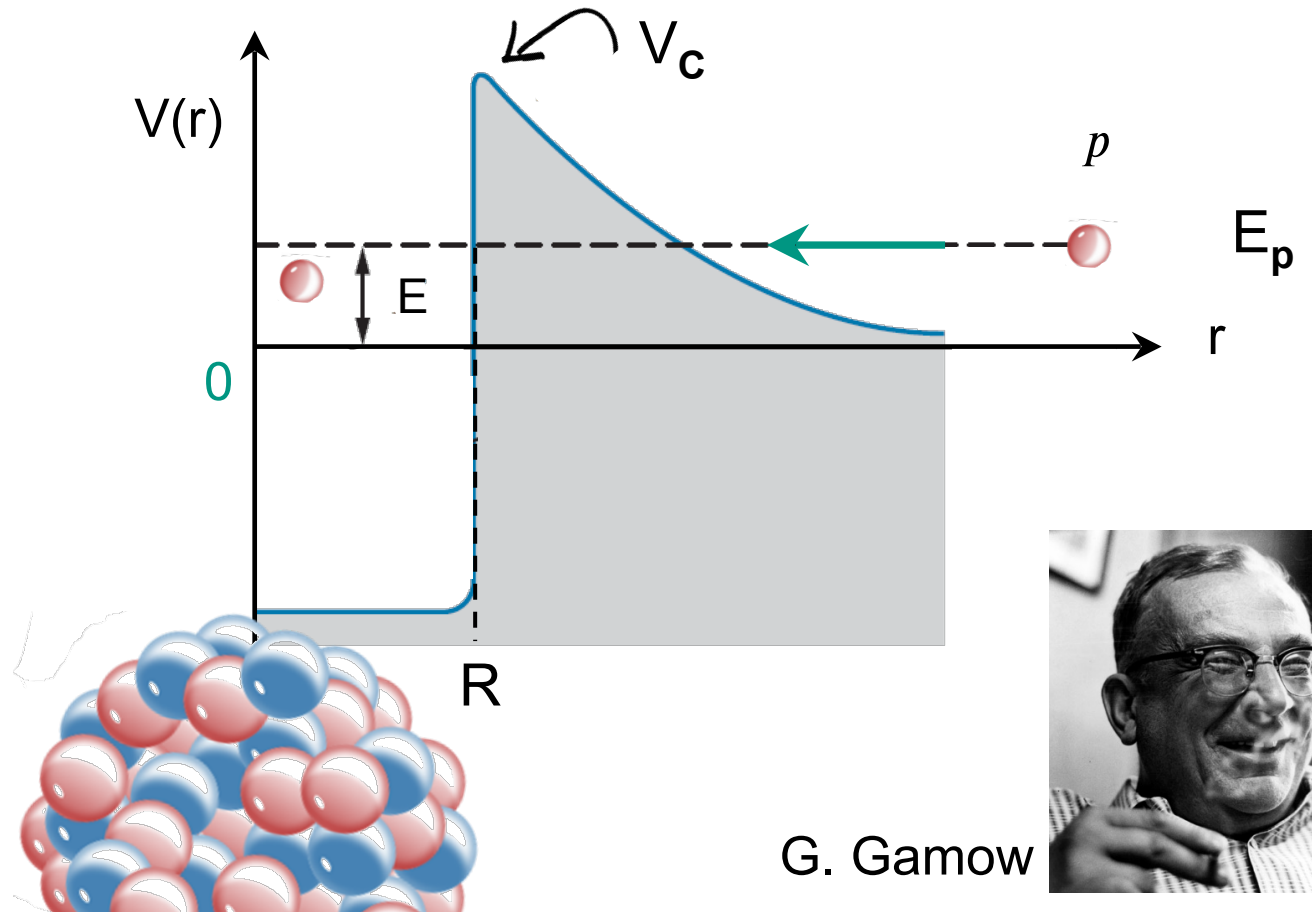
Tunnelprozesse: Fusion leichter Kerne

■ Tunneln durch die Coulomb-Barriere

- Transmissionskoeffizient T für quantenmechanisches Tunneln (analog zum α -Zerfall*)

$$T \sim e^{-G(E)}$$

Gamow-Faktor G

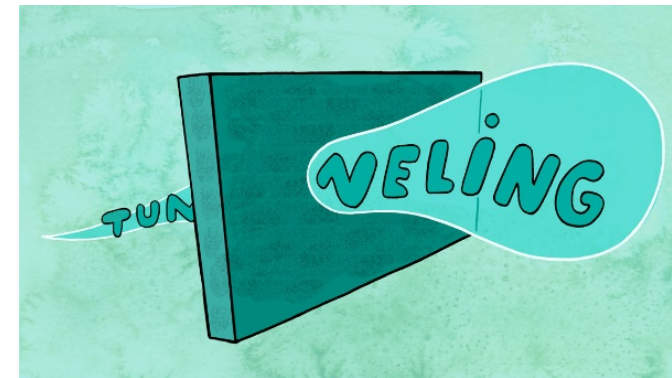
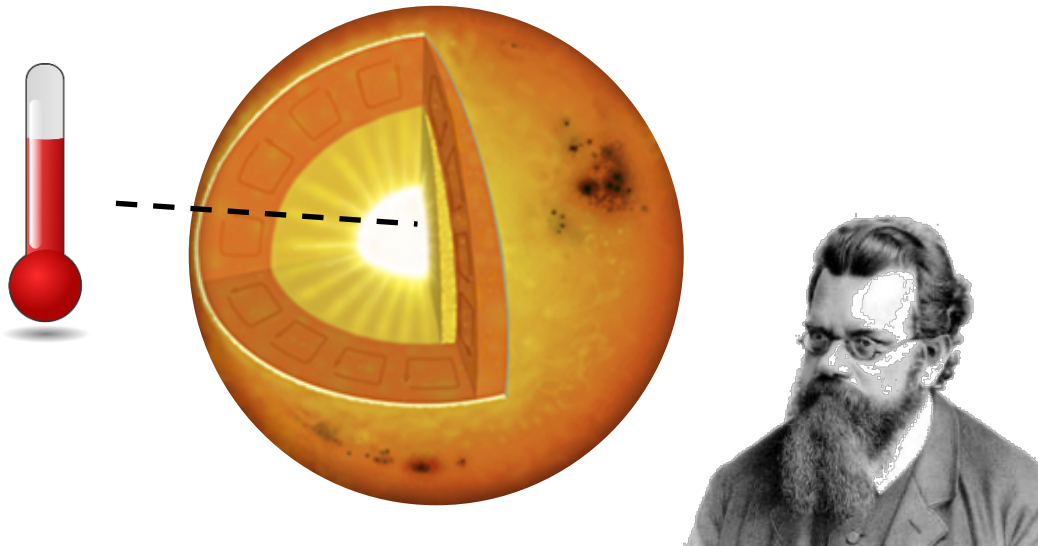


G. Gamow

Tunnelprozesse: Fusion leichter Kerne

- Tunneln durch die Coulomb-Barriere im Zentrum von Sternen
 - Fusionsprozesse in Sternen charakterisiert durch **Gamow-Kurve**:
Faltung aus **Boltzmann-Verteilung** mit **Tunnelwahrscheinlichkeit**

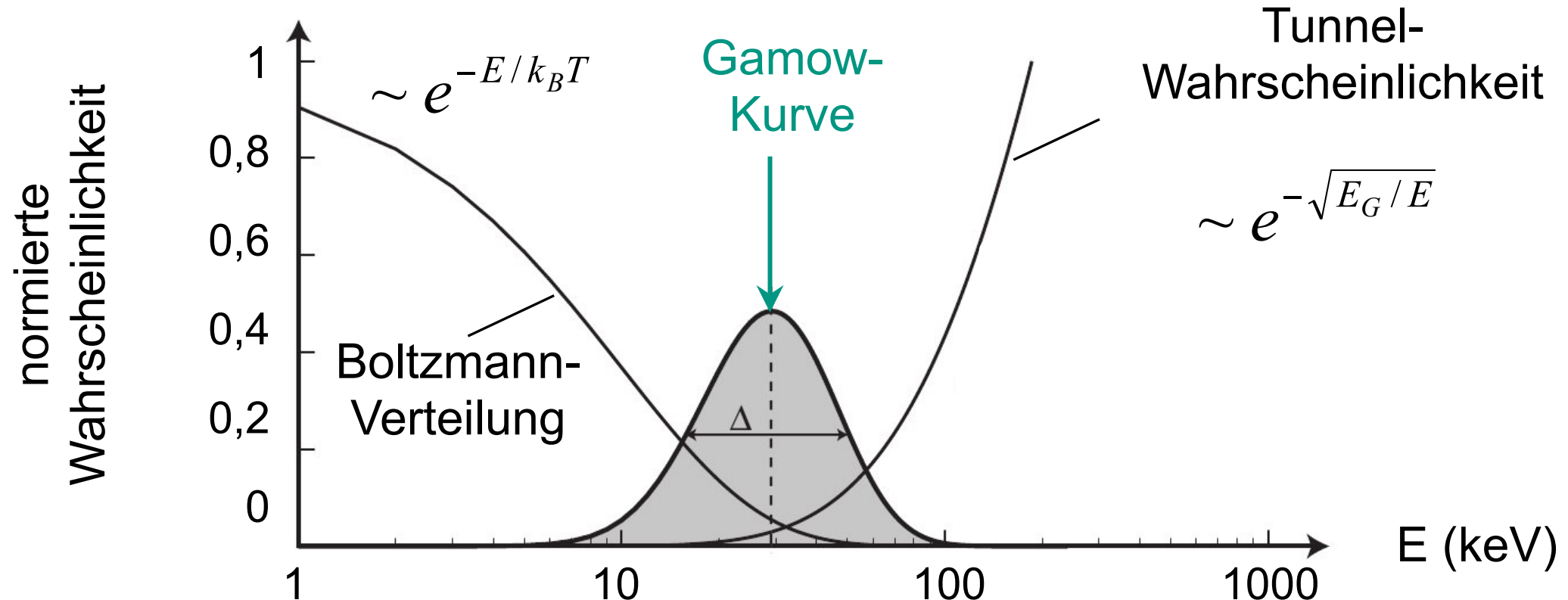
$$\sim e^{-E/k_B T} \quad \otimes \quad \sim e^{-\sqrt{E_G/E}}$$



Tunnelprozesse: Fusion leichter Kerne

- Tunneln durch die Coulomb-Barriere im Zentrum von Sternen

- Fusionsprozesse in Sternen charakterisiert durch **Gamow-Kurve**:



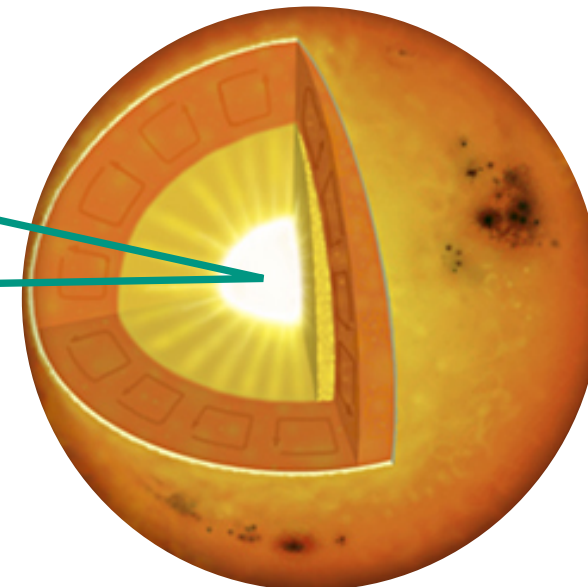
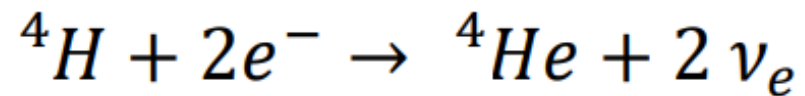
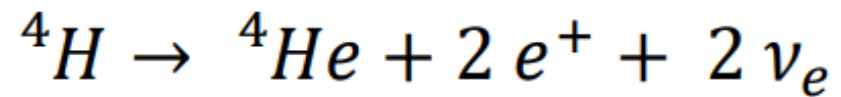
Fusion leichter Kerne in der Sonne

■ Proton-Proton Fusion im Sonnenzentrum

- Hauptenergiequelle: **pp-Fusionskette** hin zu He-4 bei $T = 15 \cdot 10^6 \text{ K}$

Energiegewinn pro Kette: $\Delta E = +26,2 \text{ MeV}$

Gesamtbilanz:



Hans Bethe

Q: wikipedia, M. Garlick

Fusion leichter Kerne in der Sonne

■ Proton-Proton Fusion in Sternen: pp-Fusion & beyond

MARCH 1, 1939
PHYSICAL REVIEW
VOLUME 55

Energy Production in Stars*

H. A. BETHE
Cornell University, Ithaca, New York
(Received September 7, 1938)

It is shown that the *most important source of energy in ordinary stars is the reactions of carbon and nitrogen with protons*. These reactions form a cycle in which the original nucleus is reproduced, viz. $C^{12}+H=N^{13}$, $N^{13}=C^{12}+e^+$, $C^{12}+H=N^{14}$, $N^{14}+H=O^{16}$, $O^{16}=N^{15}+e^+$, $N^{15}+H=C^{12}+He^4$. Thus carbon and nitrogen merely serve as catalysts for the combination of four protons (and two electrons) into an α -particle (§7).

The carbon-nitrogen reactions are unique in their cyclical character (§8). For all nuclei lighter than carbon, reaction with protons will lead to the emission of an α -particle so that the original nucleus is permanently destroyed. For all nuclei heavier than fluorine, only radiative capture of the protons occurs, also destroying the original nucleus. Oxygen and fluorine reactions mostly lead back to nitrogen. Besides, these heavier nuclei react much more slowly than C and N and are therefore unimportant for the energy production.

The agreement of the carbon-nitrogen reactions with observational data (§7, 9) is excellent. In order to give the correct energy evolution in the sun, the central temperature of the sun would have to be 18.5 million degrees while

integration of the Eddington equations gives 19. For the brilliant star Y Cygni the corresponding figures are 30 and 32. This good agreement holds for all bright stars of the main sequence, but, of course, not for giants.

For fainter stars, with lower central temperatures, the reaction $H+H=D+e^+$ and the reactions following it, are believed to be mainly responsible for the energy production. (§10)

It is shown further (§5-6) that *no elements heavier than He⁴ can be built up in ordinary stars*. This is due to the fact, mentioned above, that all elements up to boron are disintegrated by proton bombardment (α -emission) rather than built up (by radiative capture). The instability of Be⁸ reduces the formation of heavier elements still further. The production of neutrons in stars is likewise negligible. The heavier elements found in stars must therefore have existed already when the star was formed.

Finally, the suggested mechanism of energy production is used to draw conclusions about astrophysical problems, such as the mass-luminosity relation (§10), the stability against temperature changes (§11), and stellar evolution (§12).

§1. INTRODUCTION

THE progress of nuclear physics in the last few years makes it possible to decide rather definitely which processes can and which cannot occur in the interior of stars. Such decisions will be attempted in the present paper, the discussion being restricted primarily to main sequence stars. The results will be at variance with some current hypotheses.

The first main result is that, under present conditions, no elements heavier than helium can be built up to any appreciable extent. Therefore we must assume that the heavier elements were built up *before* the stars reached their present state of temperature and density. No attempt will be made at speculations about this previous state of stellar matter.

The energy production of stars is then due entirely to the combination of four protons and two electrons into an α -particle. This simplifies the discussion of stellar evolution inasmuch as

the amount of heavy matter, and therefore the opacity, does not change with time.

The combination of four protons and two electrons can occur essentially only in two ways. The first mechanism starts with the combination of two protons to form a deuteron with positron emission, viz.

$$H+H=D+e^+ \quad (1)$$

The deuteron is then transformed into He⁴ by further capture of protons; these captures occur very rapidly compared with process (1). The second mechanism uses carbon and nitrogen as catalysts, according to the chain reaction

$$\begin{aligned} C^{12}+H &= N^{13}+\gamma, & N^{13} &= C^{12}+e^+ \\ C^{12}+H &= N^{14}+\gamma, & & \\ N^{14}+H &= O^{15}+\gamma, & O^{15} &= N^{14}+e^+ \\ N^{15}+H &= C^{12}+He^4. & & \end{aligned} \quad (2)$$

The catalyst C¹² is reproduced in all cases except about one in 10,000, therefore the abundance of carbon and nitrogen remains practically unchanged (in comparison with the change of the number of protons). The two reactions (1) and

434

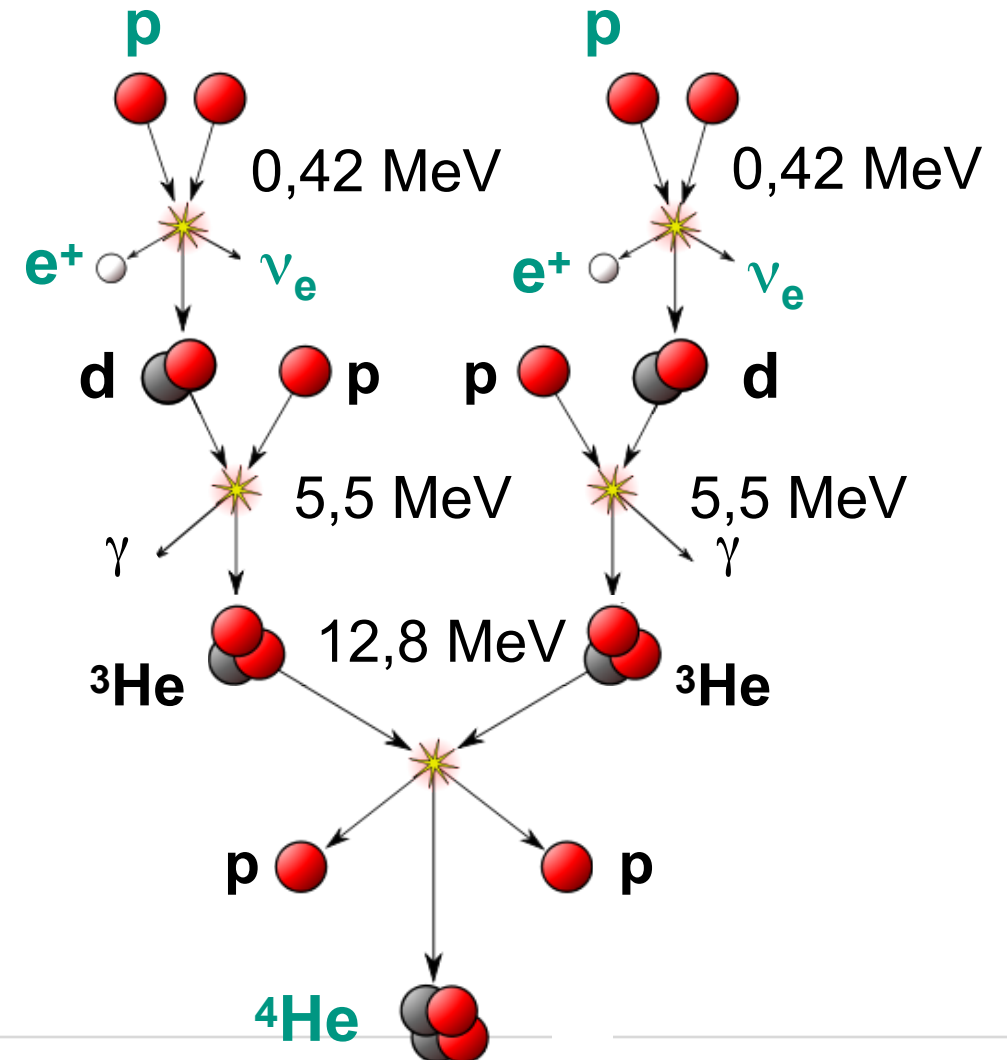


Hans Bethe

Fusion leichter Kerne in der Sonne

■ Proton-Proton Fusion im Sonnenzentrum

- **Schritt 1:**
zwei Protonen fusionieren zu Deuterium
über die schwache Wechselwirkung
(pro p nach $5 \cdot 10^9$ Jahren)
- **Schritt 2:**
Deuterium fusioniert nach $1,4$ s mit Proton
zu He-3 Kern, hohe Energiefreisetzung
- **Schritt 3:**
zwei He-3 Kerne fusionieren zu He-4,
2 Protonen wieder frei (nach $\sim 10^6$ Jahren)



Fusion leichter Kerne in der Sonne, nachgefragt

■ Warum fusioniert die Sonne noch heute Wasserstoff zu Helium-4?

A) σ_{tot} des 1. Fusionsschritts $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ ist sehr klein !

B) die Coulomb-Barriere im 3. Schritt
ist sehr hoch (kleine Tunnelrate) !

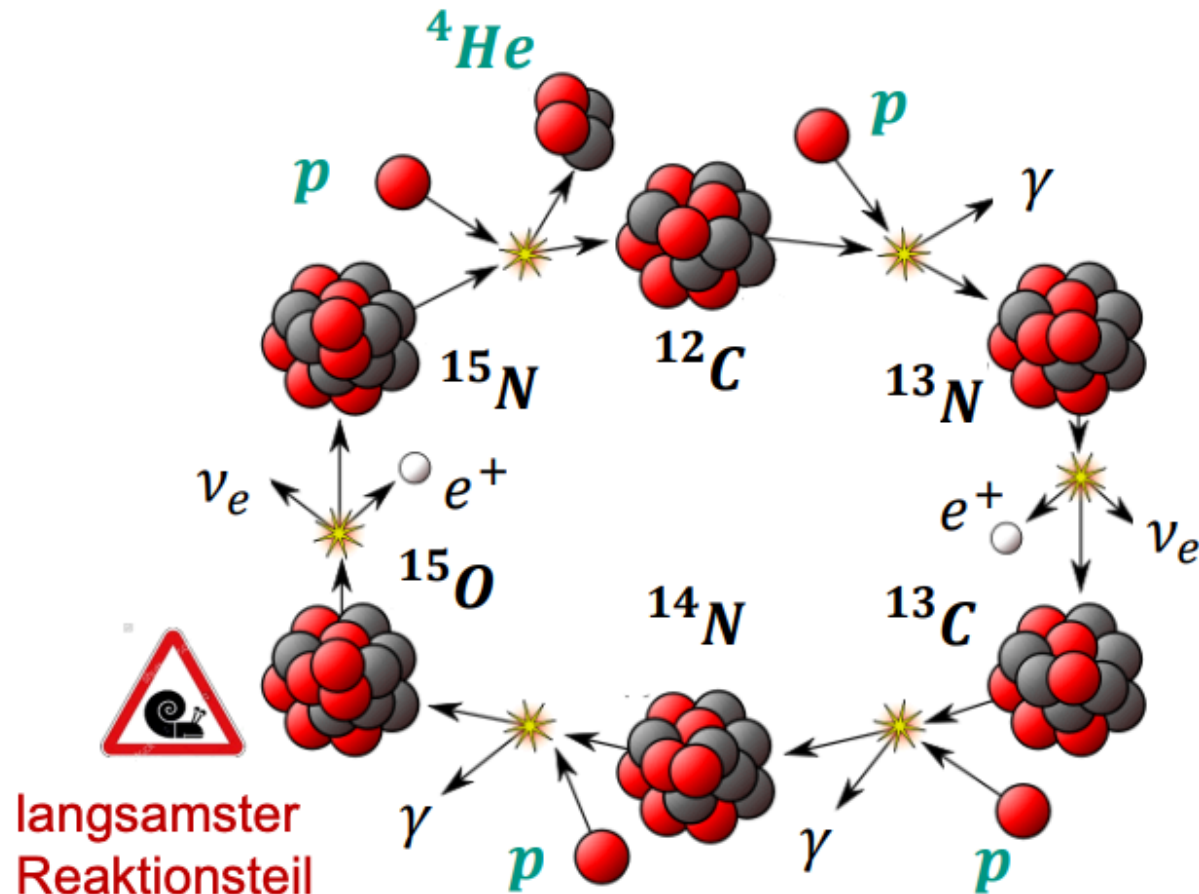
C) die 2 Protonen im 3. Schritt
werden ja wieder freigesetzt !

D) die Masse $M = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ der Sonne ist ausreichend groß !



Fusion leichter Kerne in der Sonne: CNO-Zyklus

■ Bethe-Weizsäcker Zyklus in massereichen Sternen



- wichtige Fusionsquelle für schwere Sterne (hohe zentrale $T > 2\text{-}3 \times 10^7 \text{ K}$):
 C, N, O dienen katalytisch

- Energieerzeugung E_{Fus} via CNO stark abhängig von Sterntemperatur T :

$$E_{Fus} \sim T^{18}$$

Fusion leichter Kerne im Labor: D und T

■ Kernfusionsprozesse in einem Plasma: hohe Temperaturen erforderlich

- Magnetischer Einschluss des Plasmas:

Tokamak-Prinzip

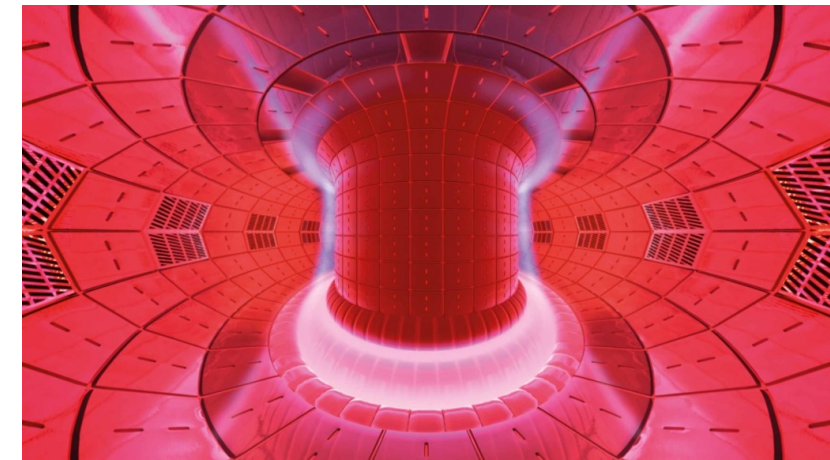
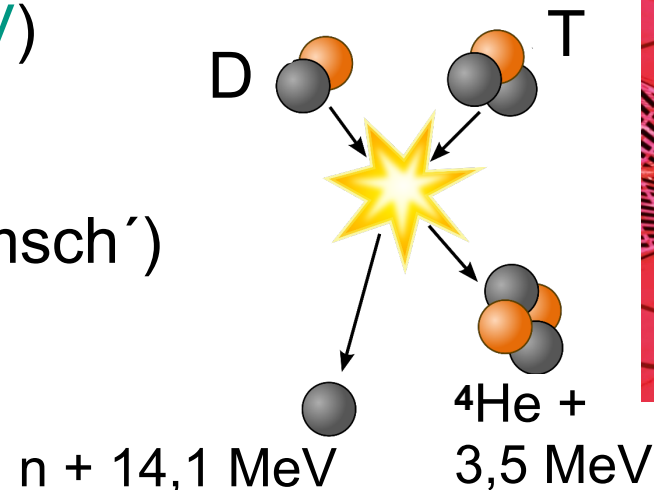
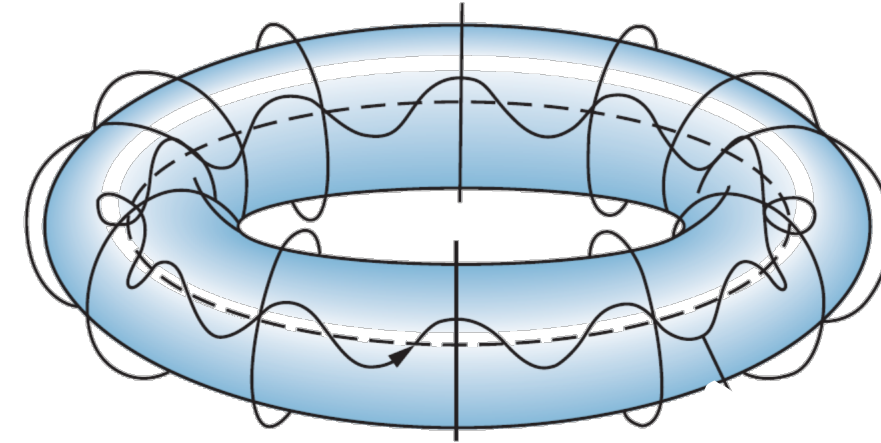
(Helix-förmiges B-Feld um Torus)

- Temperatur des Deuterium-Tritium Plasmas:

$T \sim 150 \dots 300 \text{ Mio. K}$ (**10 keV**)

- Plasma-Heizung:

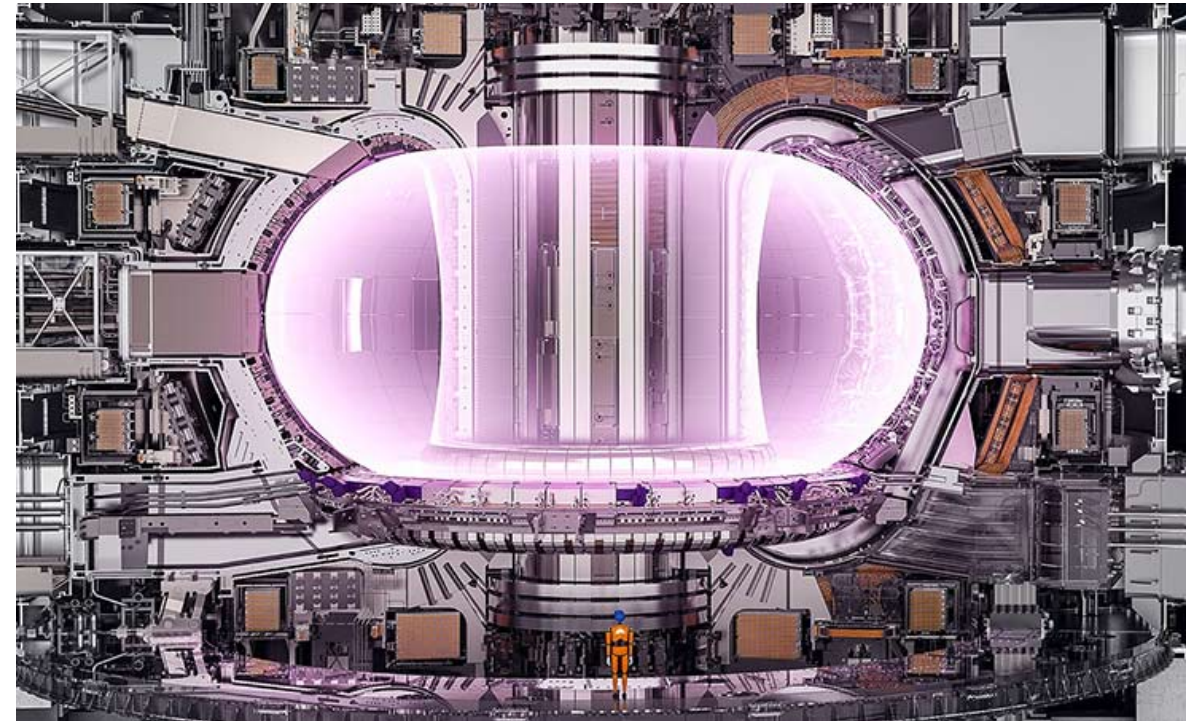
- induziert via Strom ('ohmsch')
- Neutralteilchen-Injektion
- RF*-Heizung

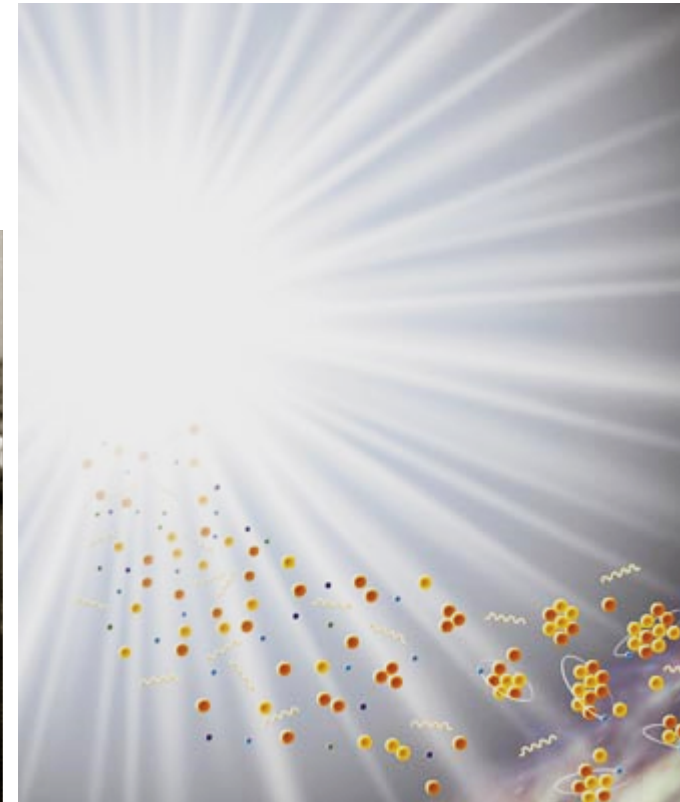
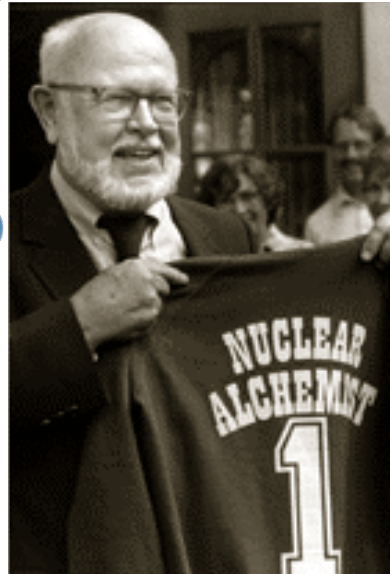
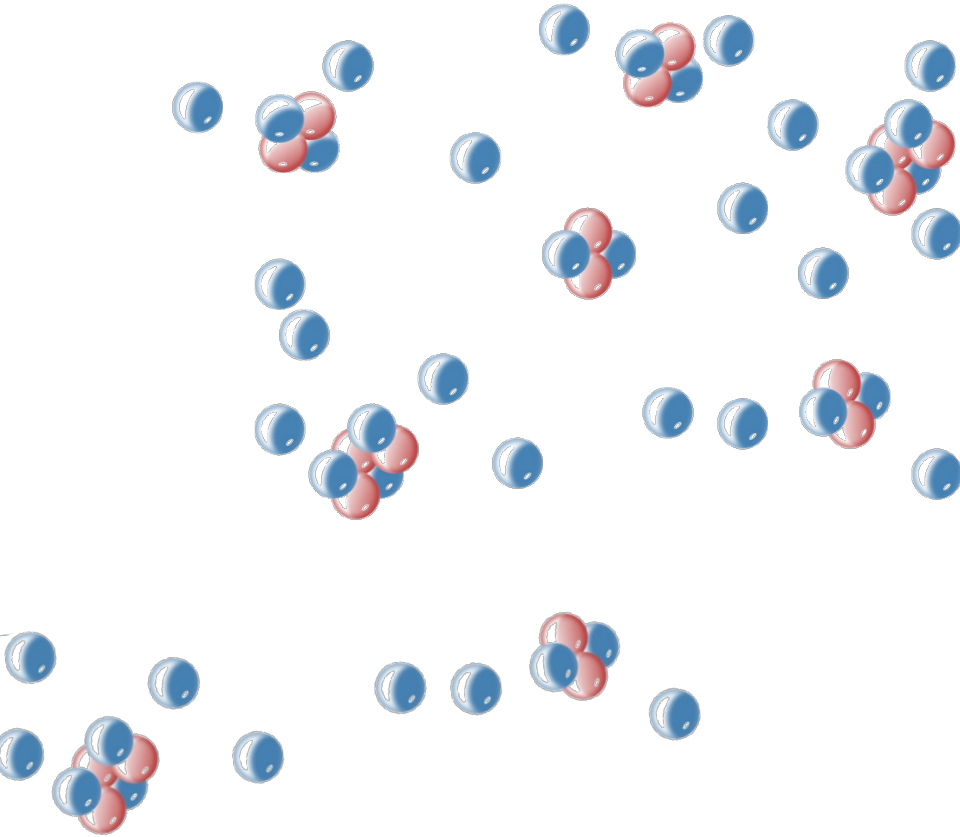


Fusion leichter Kerne im Labor: ITER

■ International Thermonuclear Experimental Reactor

- Internationales Megaprojekt: FuE* zur Plasma- Heizung, -Diagnostik, -Kontrolle, ... , Ziel: $Q > 10$ ($= P_{\text{fusion,th}} / P_{\text{heiz,th}}$)
- Standort: Cadarache (F)
- Tokamak-Prinzip, ab 2026: H-Plasma-Betrieb, ab 2035: mit D-T-Plasma
- keine Erzeugung elektr. Energie, ausgelegt auf $P_{\text{fusion,th}} = 500 \text{ MW}$ für $\Delta t \sim 10 \text{ min.}$, dabei Plasma – Heizung via Strom mit $P_{\text{heiz,el}} = 300 \text{ MW}$ ($\Leftrightarrow P_{\text{heiz,th}} = 50 \text{ MW}$)





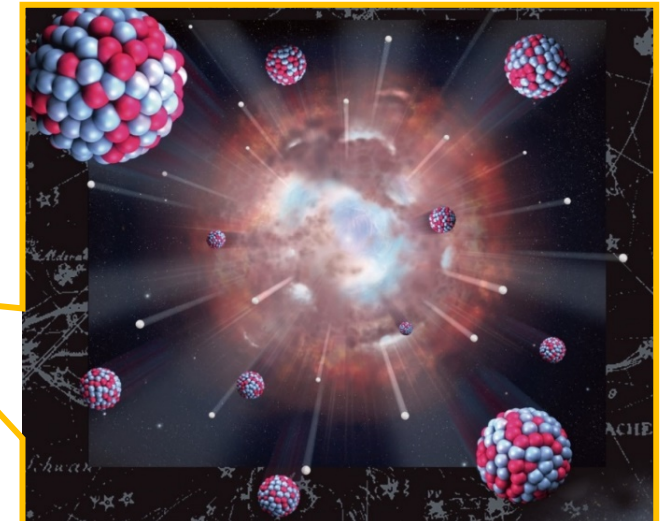
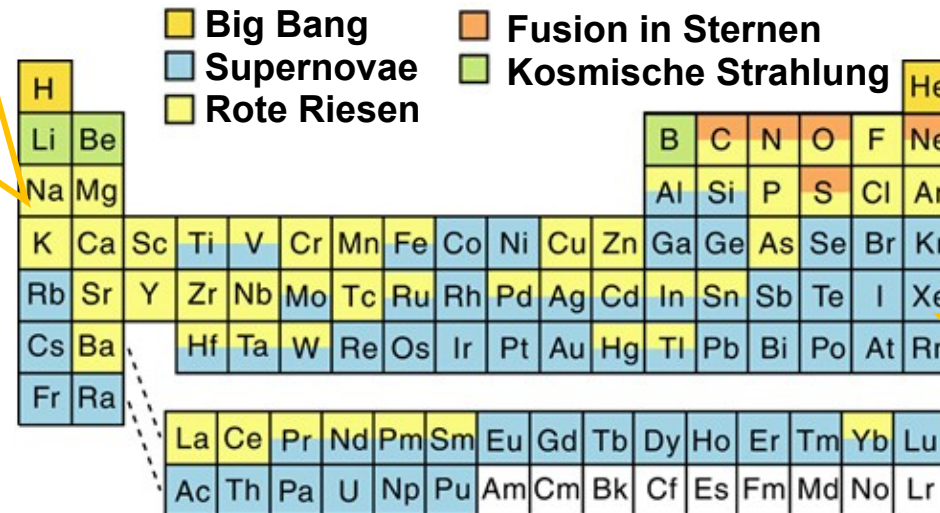
KAPITEL 4.3 – NUKLEARE ASTROPHYSIK

... und dann gibt es Katzen



KIT
Karlsruhe Institute of Technology

- Big Bang Nukleosynthese
- stellare Fusionsprozesse
- SNaE: s-Prozess & r-Prozess



Big Bang Nukleosynthese - BBN

- Entstehung der leichten Elemente in den ersten 3 Minuten

- **BBN**: eine wichtige Stütze des modernen **Big Bang Modells**
- **BBN**: erklärt die Bildung der leichten Elemente: **Deuterium**, **Helium-4**, **Lithium-7** (korrekte Vorhersage der Häufigkeiten über 10 Größenordnungen!)
- **BBN**: Reaktionsraten im frühen Universum als wichtiger Testfall von Theorien jenseits des SM (**B**eyond the **S**tandard **M**odell, **BSM**)



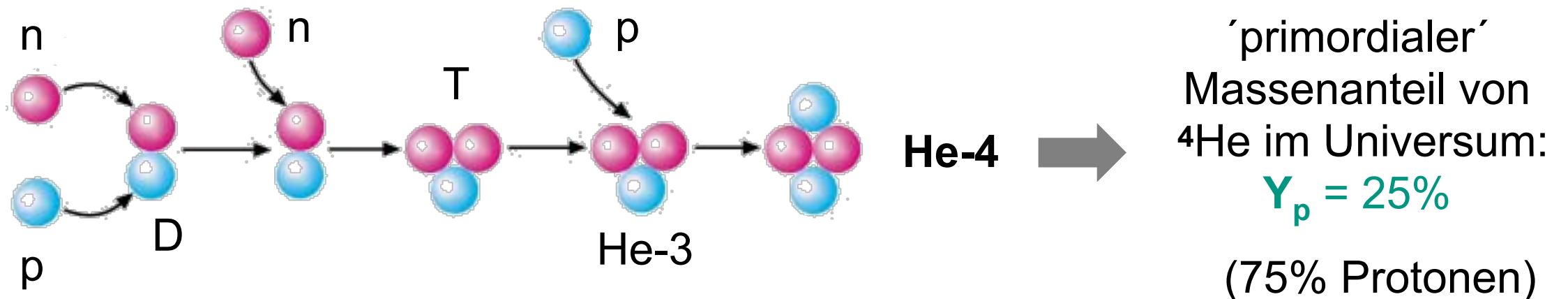
Steven Weinberg
The first three minutes
Spektrum, 2009



Big Bang Nukleosynthese - BBN

■ Entstehung von Helium-4 in den ersten 3 Minuten – Grundlagen der BBN:

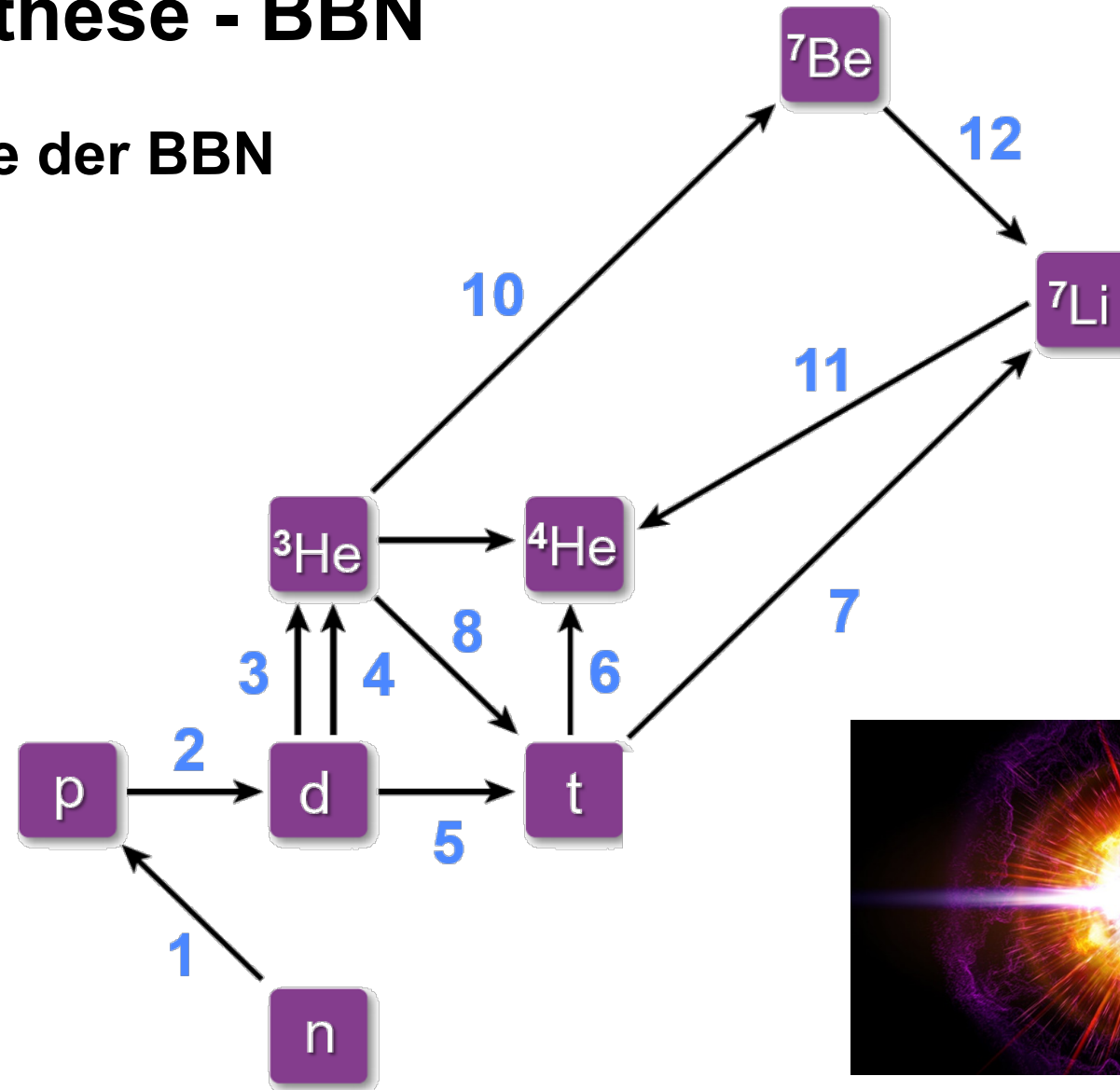
- startet mit einem Verhältnis $n/p \sim 1/7$ nach ca. 1 Minute
- alle n werden eingebunden in **Deuterium**-Kerne ($E_B = 2,2 \text{ MeV}$)
- **Deuterium**-Kerne werden weiter fusioniert zu **Helium-4**
- Fusionsprozesse enden i.a. bei **Helium-4** (doppelt magisch, sehr stabil)



Big Bang Nukleosynthese - BBN

■ 12 Haupt-Reaktionspfade der BBN

- 1 $n \rightarrow {}^1\text{H} + e^- + \bar{\nu}$
- 2 ${}^1\text{H} + n \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$
- 3 ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
- 4 ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n$
- 5 ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$
- 6 ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$
- 7 ${}^3\text{H} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$
- 8 ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$
- 9 ${}^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H}$
- 10 ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$
- 11 ${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$
- 12 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^7\text{Li} + {}^1\text{H}$



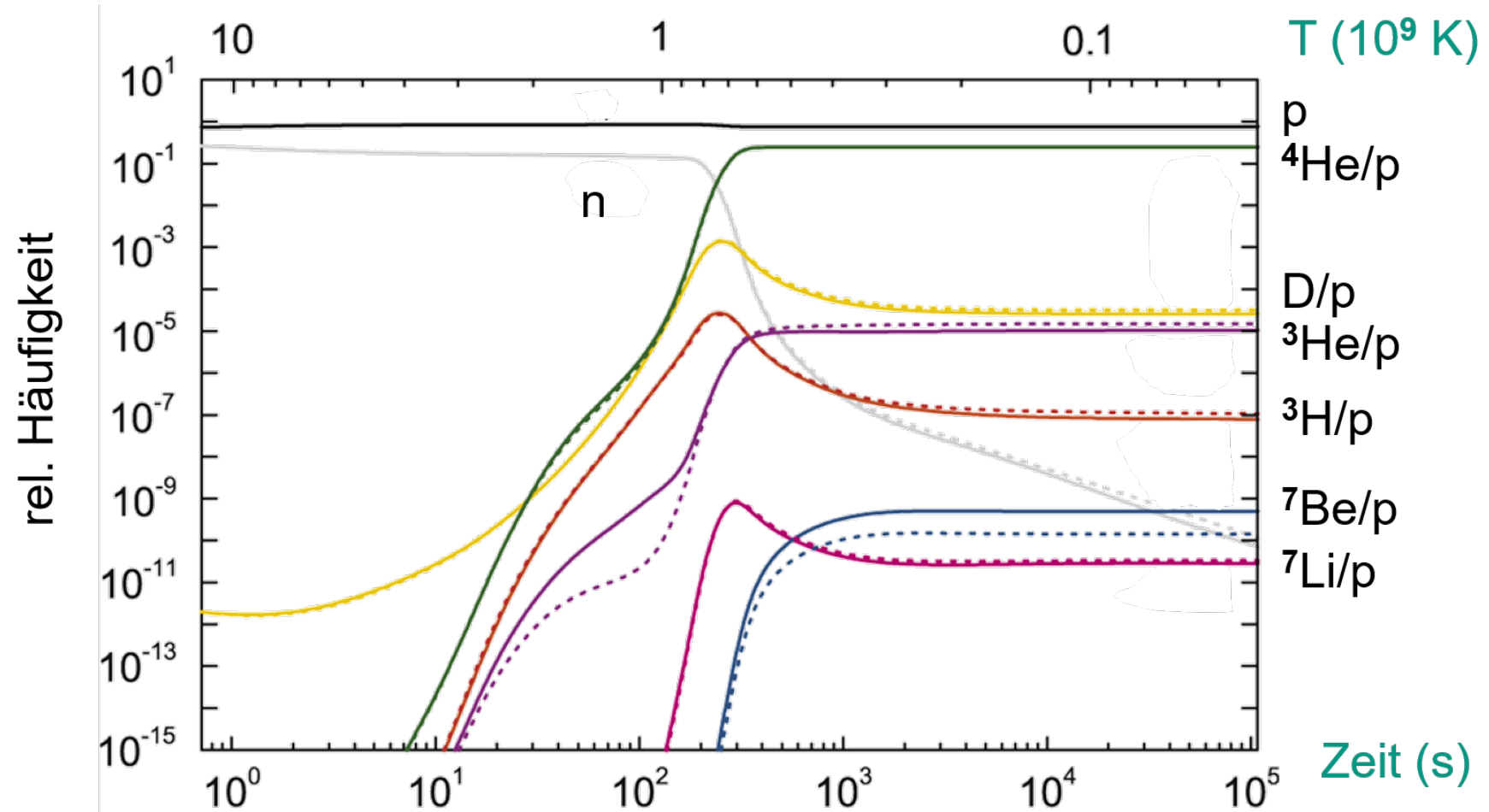
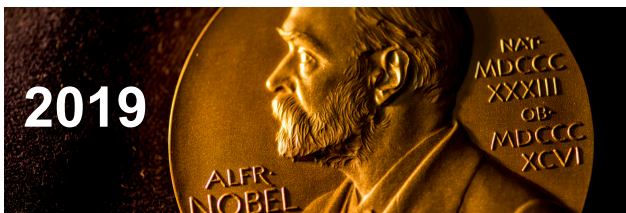
Big Bang Nukleosynthese - BBN

- Modellierung der Bildung von leichten Elementen: **fast alles zu He-4!**

- BBN-Rechnungen von James Peebles



“for theoretical discoveries in physical cosmology”



Big Bang Nukleosynthese, nachgefragt

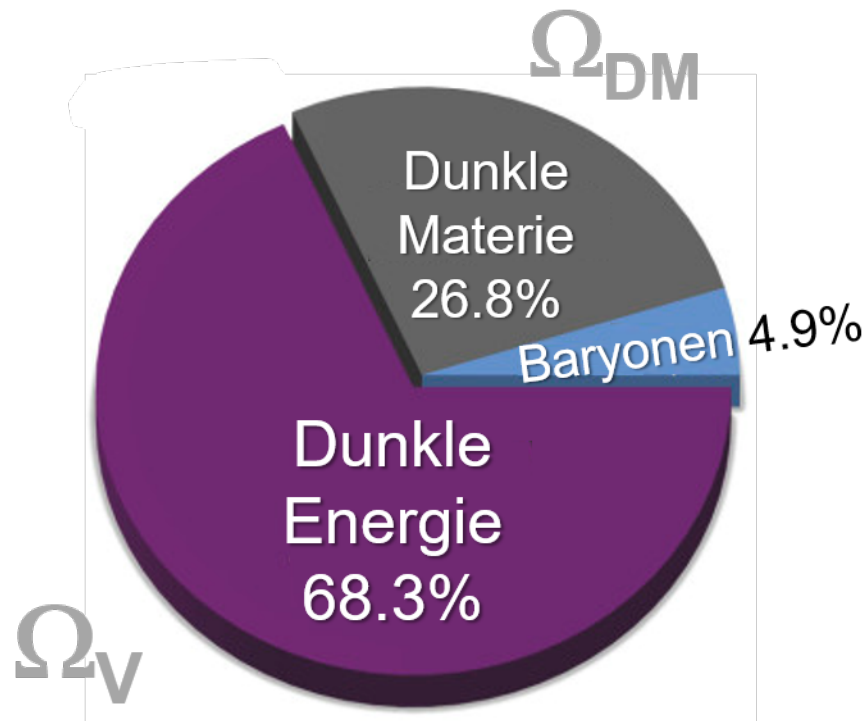
■ Warum endet die BBN bereits nach 3 Minuten?

- A) das **expandierende Universum** trennt die Kerne rasch voneinander...
- B) Die **rasch fallende Temperatur** im Universum reduziert die kinet. Energie der Kerne & Tunnelprozesse sind nicht länger möglich...
- C) Die **zeitliche Entwicklung** des Universums schreitet voran: nach 3 Min. sind die zunächst vorhandenen Neutronen alle zerfallen...

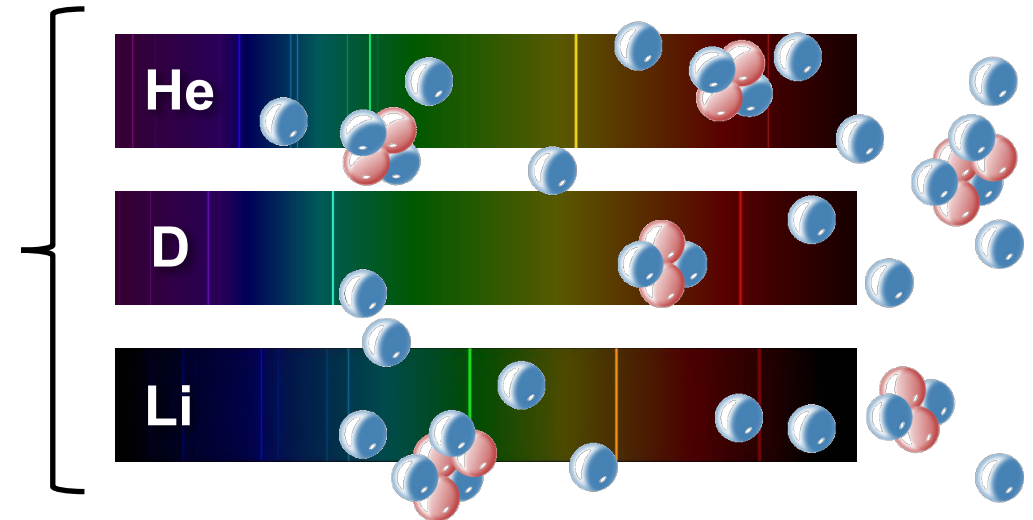


Bestimmung der Baryonendichte Ω_b

- **BBN sensitiv auf die Dichte der Baryonen Ω_b im Universum**
 - Bestimmung von Ω_b aus der **Analyse von Elementhäufigkeiten** ($t = 3$ min.)



Ω_b



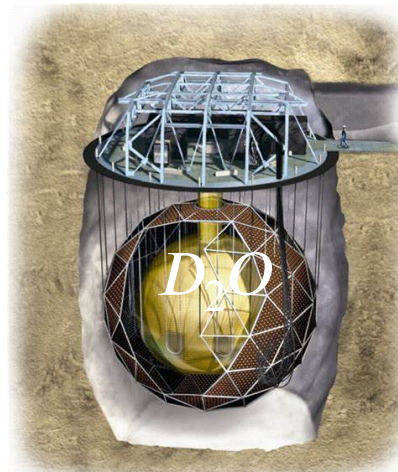
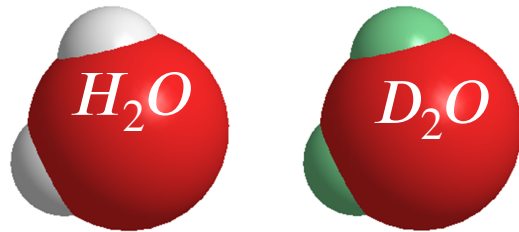
s. Master Vorlesung: **Kosmologie** im WS

Big Bang Nukleosynthese - BBN

- BBN – Konsequenzen: kleine Anteile von Deuterium & Lithium-7

Deuterium

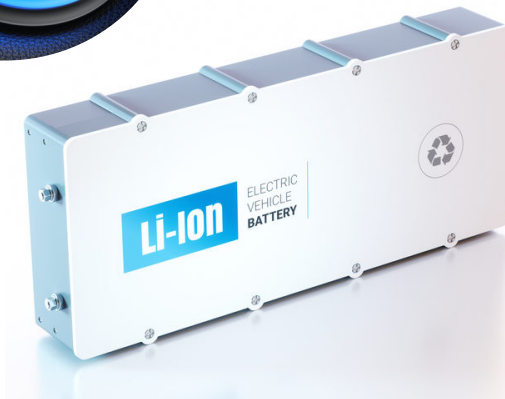
$$\frac{D}{H} = (25.47 \pm 0.25) \cdot 10^{-6}$$



Lithium-7

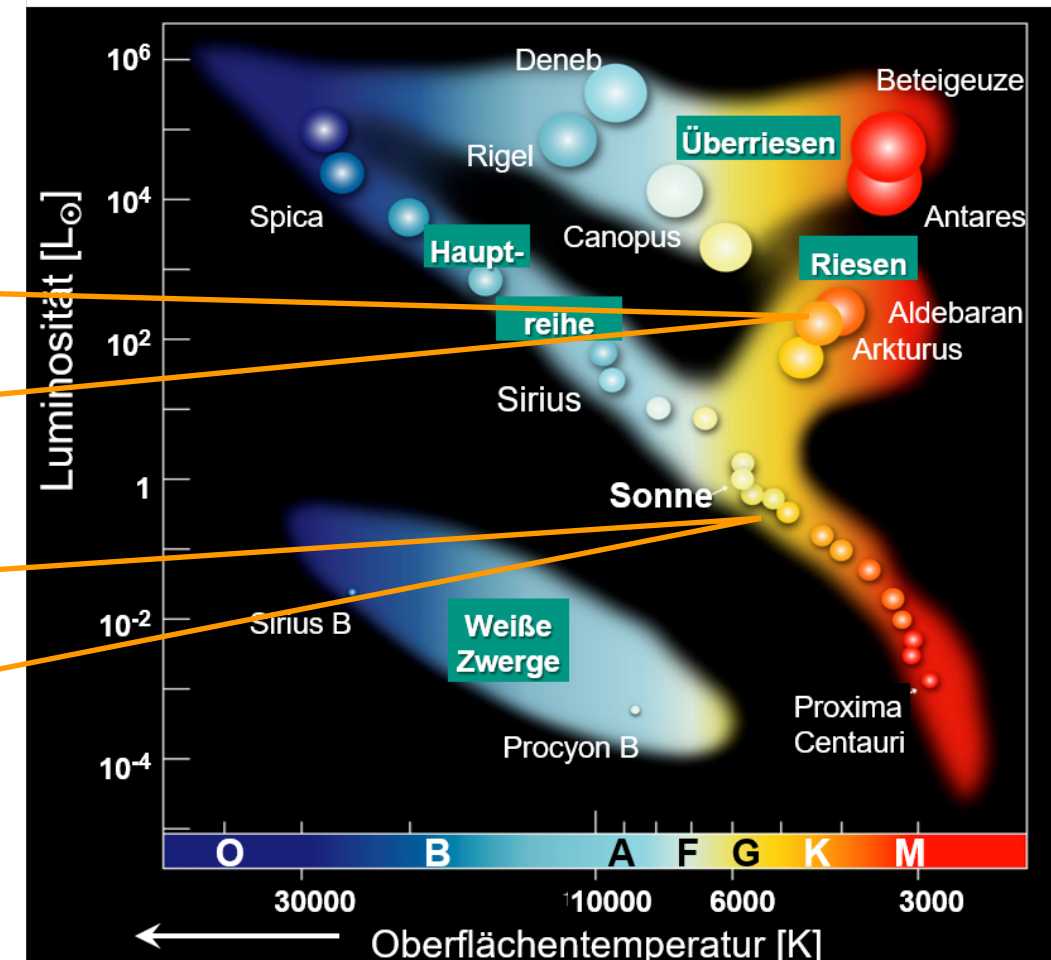
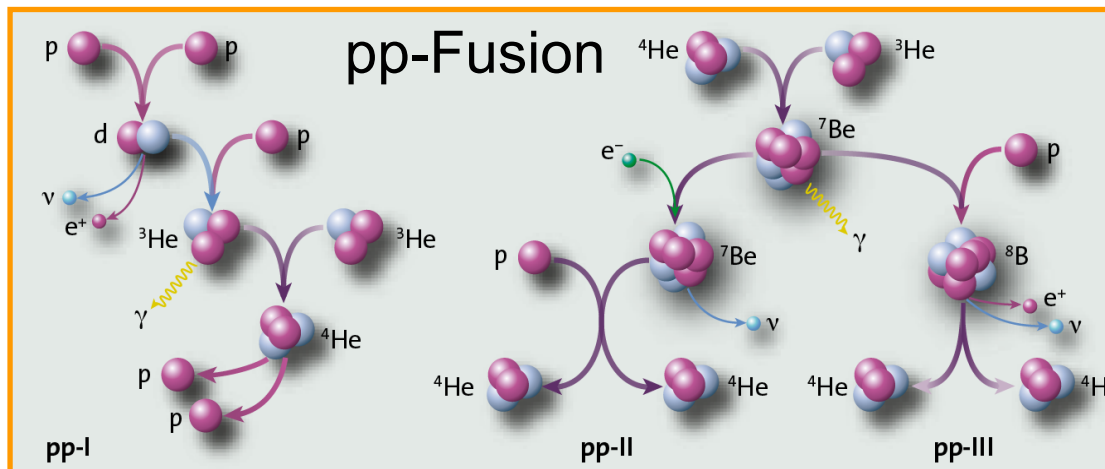
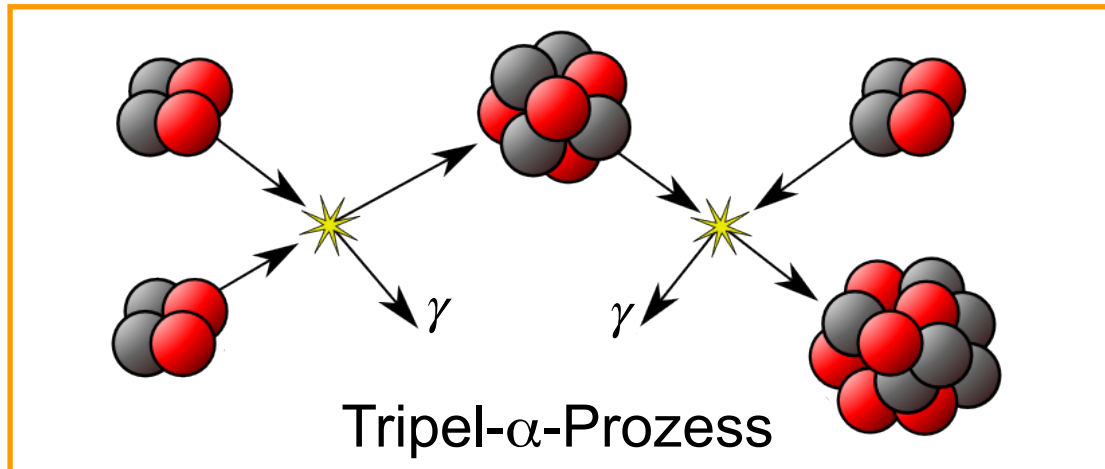


$$\frac{Li}{H} = (1.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-10}$$



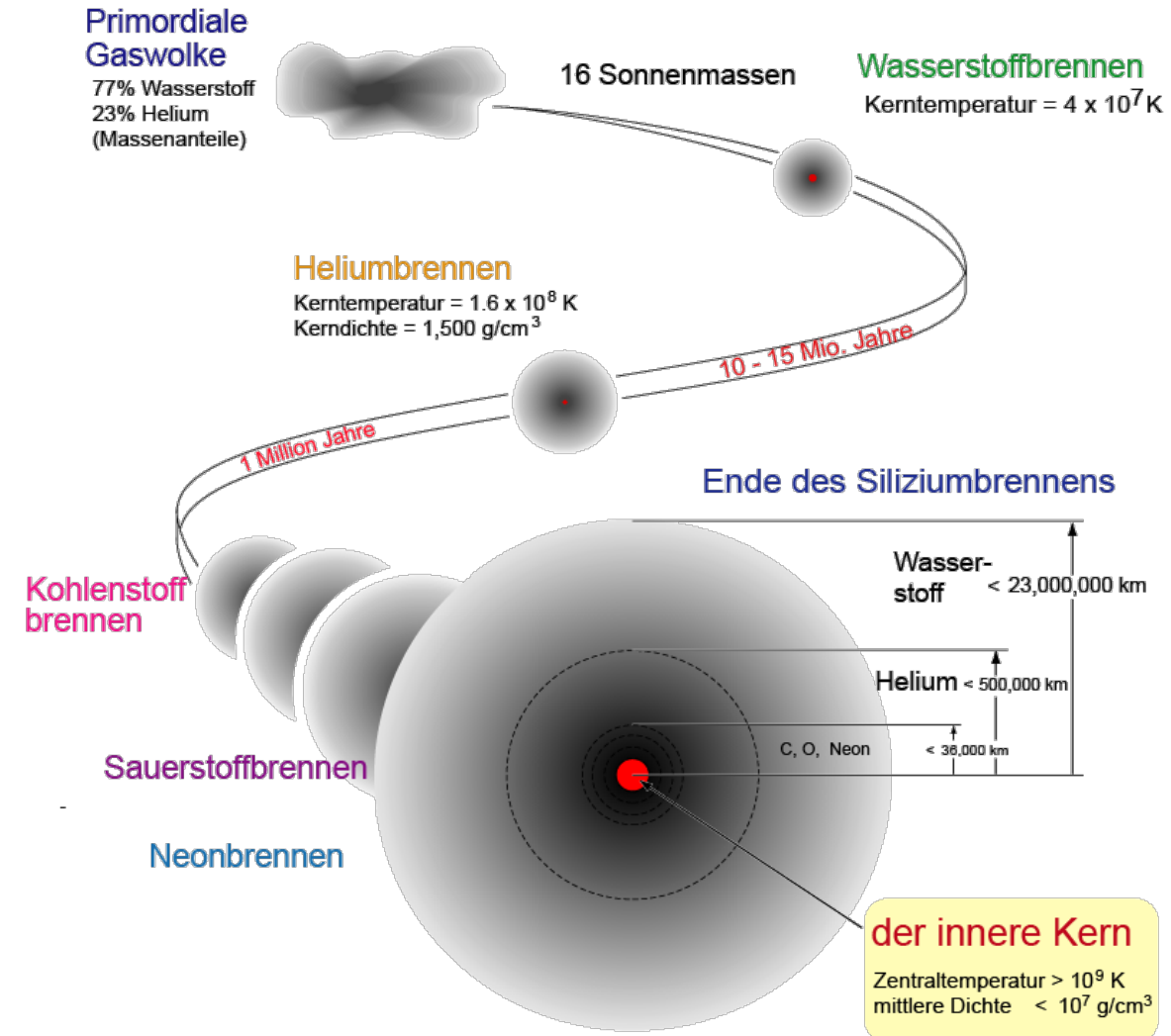
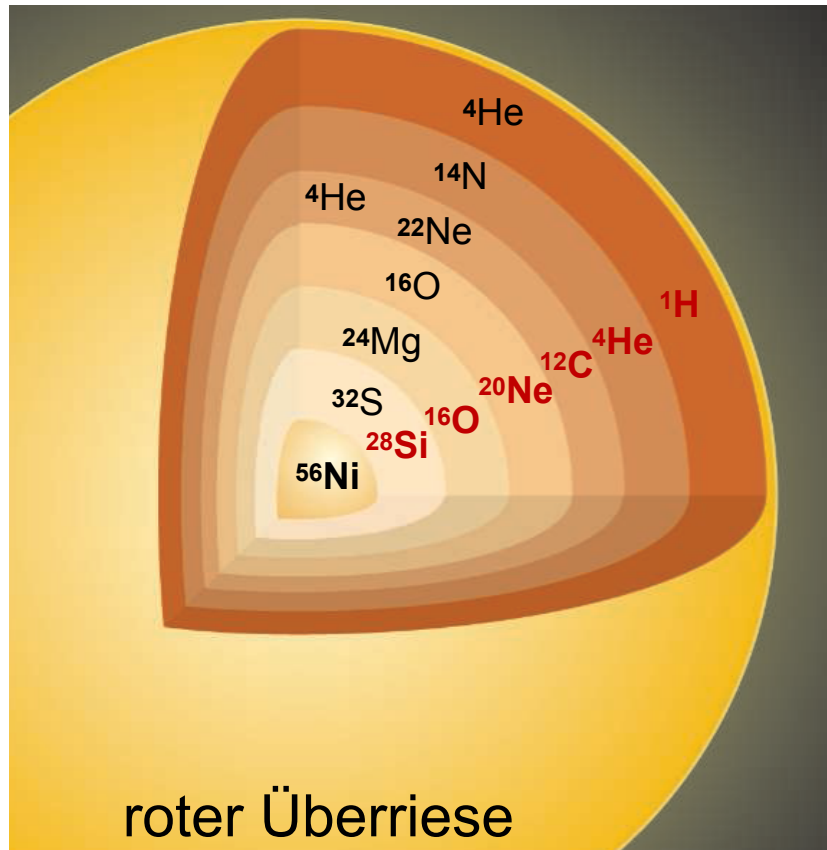
Nukleosynthese in Sternen

- **Stellare Entwicklungspfade: festgelegt durch interne Fusionsprozesse**



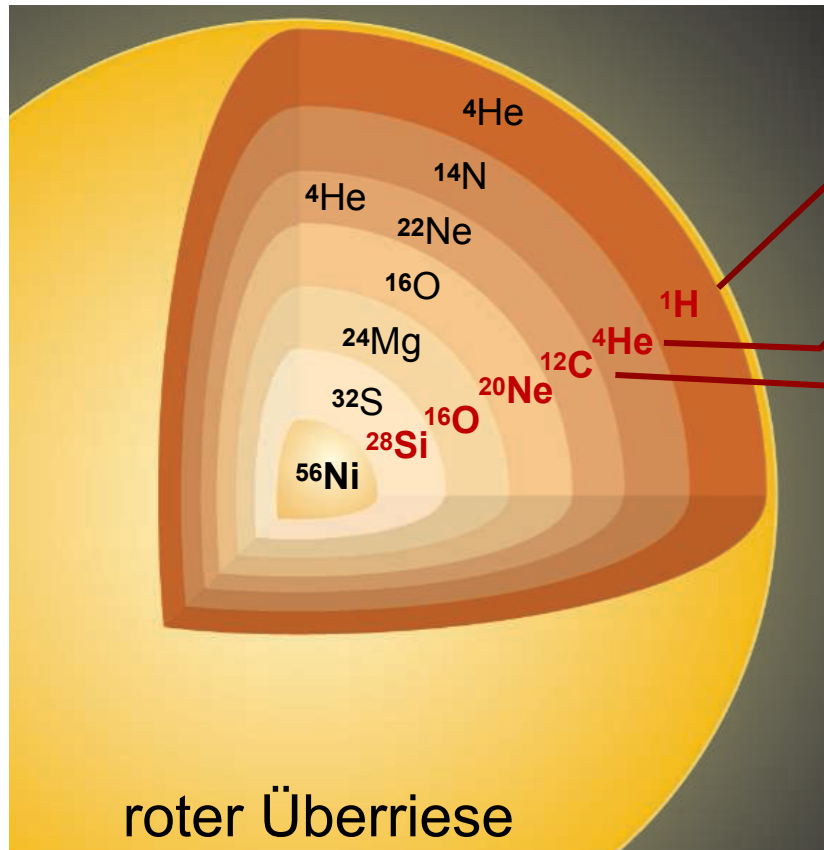
Kernfusion bis ^{56}Fe : massereiche Sterne

- Bildung von Elementen mit immer höherer Ordnungszahl Z



Entwicklung massereicher Sterne

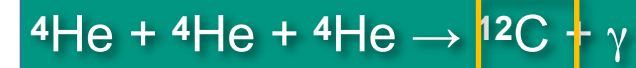
- Fusion von Elementen mit immer höherer Ordnungszahl Z



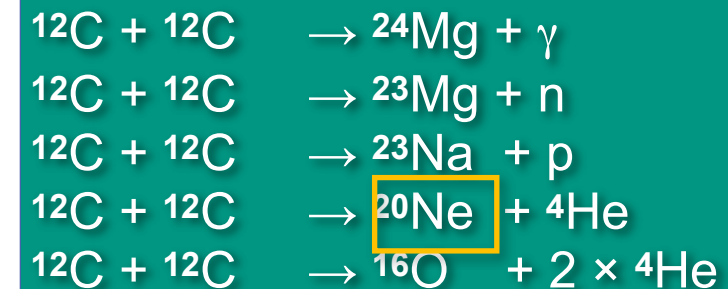
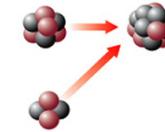
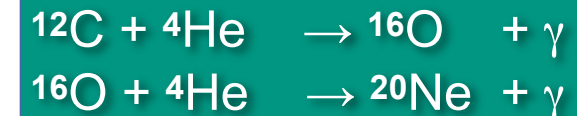
- Wasserstoffbrennen



- Heliumbrennen (3α) ($T = 2 \times 10^8 \text{ K}$)



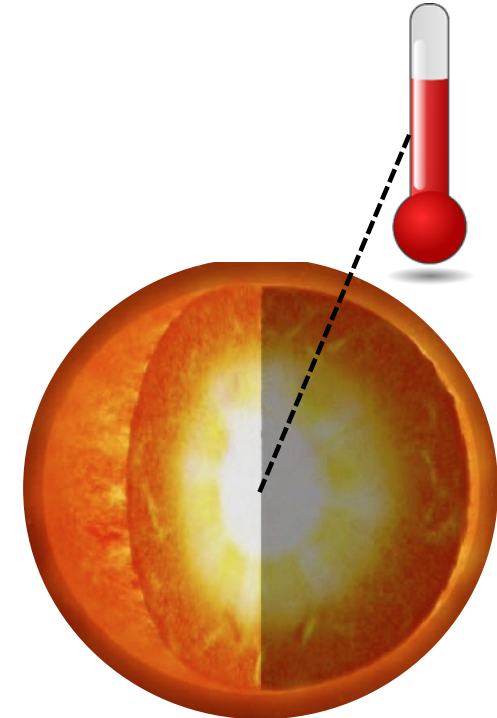
- Kohlenstoffbrennen ($T = 5\text{-}8 \times 10^8 \text{ K}$)



Stellare Fusionsprozesse, nachgefragt

- Warum wird die Zentraltemperatur der Sterne bei der Fusion schwerer Elemente immer höher?

- A) die **ansteigenden Zentraltemperaturen** entstehen durch den höheren Energiegewinn bei der Fusion...
- B) die **ansteigenden Zentraltemperaturen** im Sterninnern entstehen durch die vielen Gammas aus den Fusionsprozessen...
- C) die **ansteigenden Zentraltemperaturen** im Sterninnern erhöhen die kinetische Energie der Kerne & damit die Rate von Tunnelprozessen...



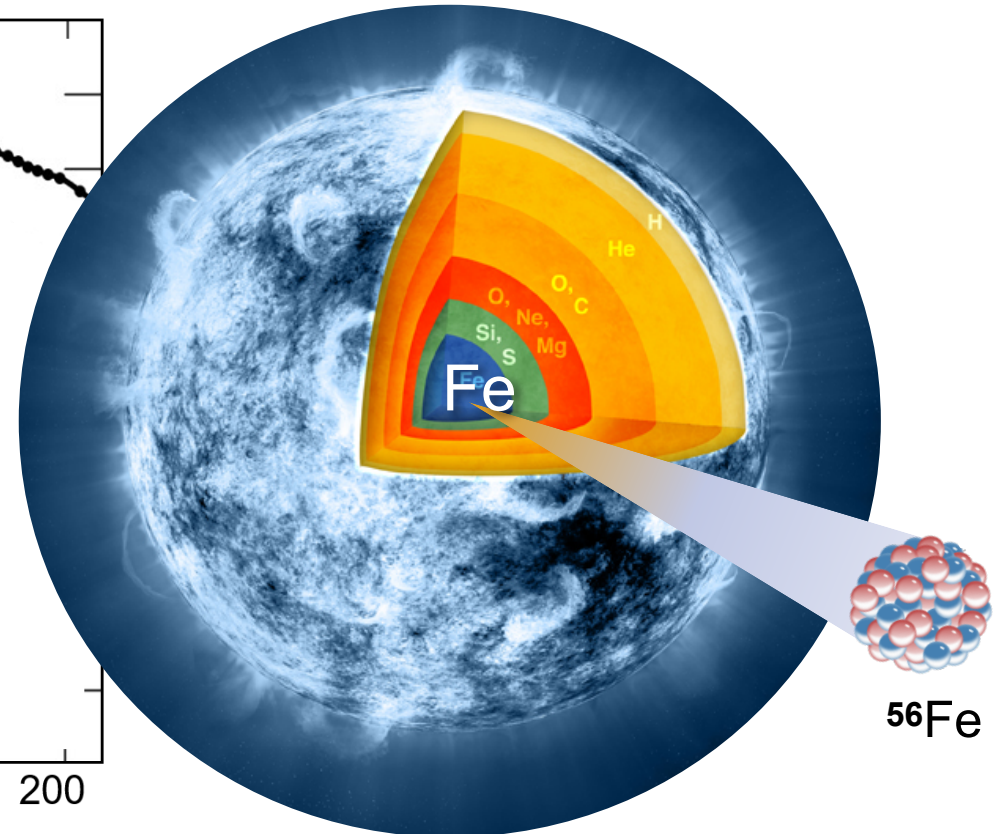
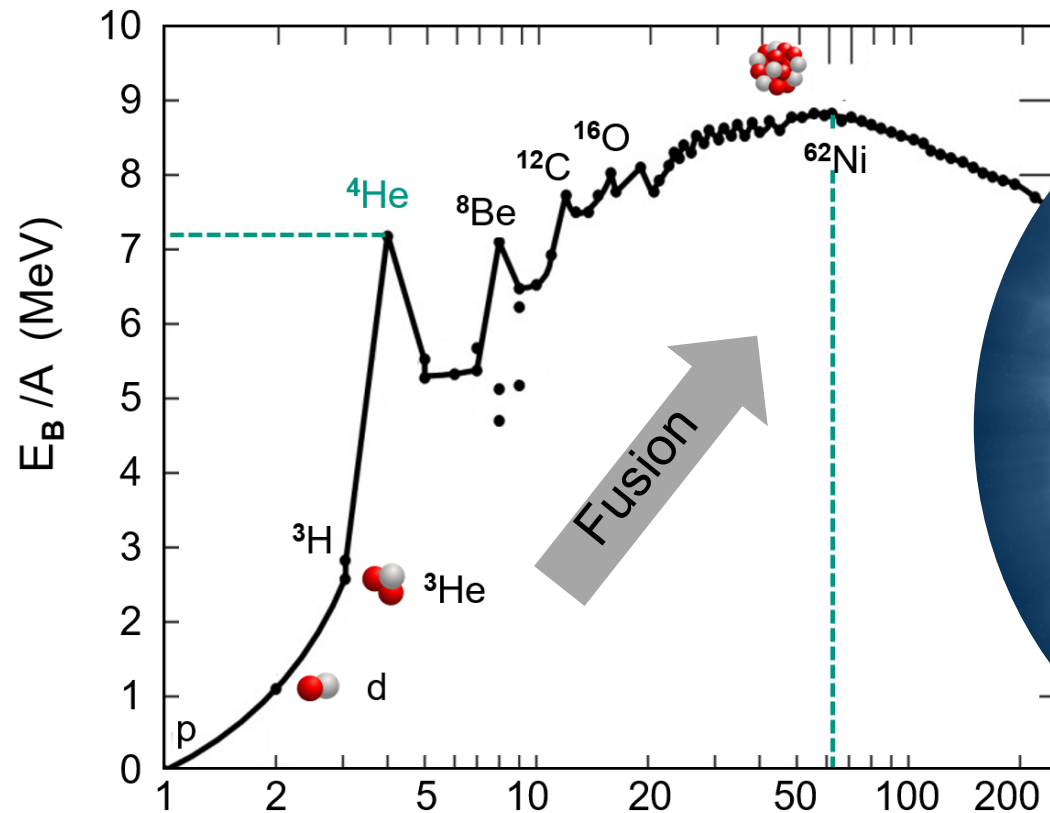
Elemente jenseits von Eisen: Supernovae!

- Kernkollaps: B/A erreicht sein Maximum bei $A \sim 56 \dots 62$

- keine weiteren Fusionsprozesse jenseits Nickel/Eisen: **Supernova-Explosion Typ II**



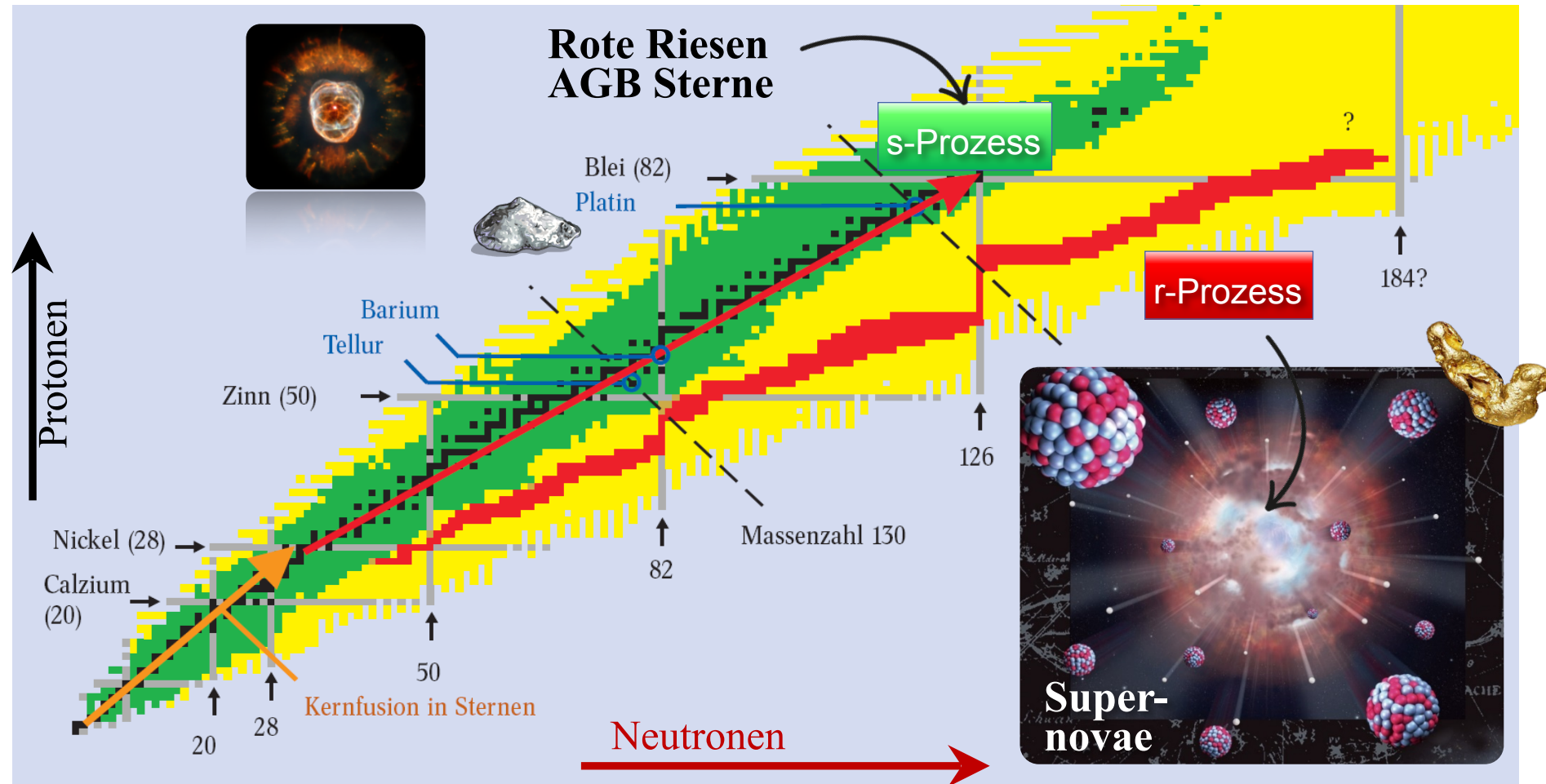
Willy Fowler



Elemente jenseits von Eisen: Supernovae!

■ 2 separate Nukleosynthese-Pfade über Einfang von Neutronen (r-, s-Prozess)

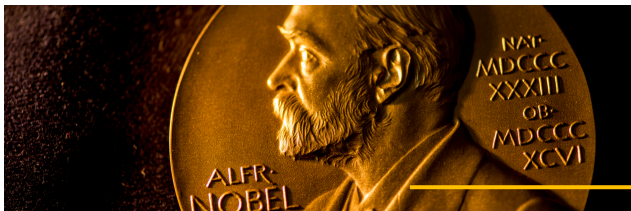
- **s-Prozess***:
langsamer n-
Einfang
- **r-Prozess****:
schneller n-
Einfang



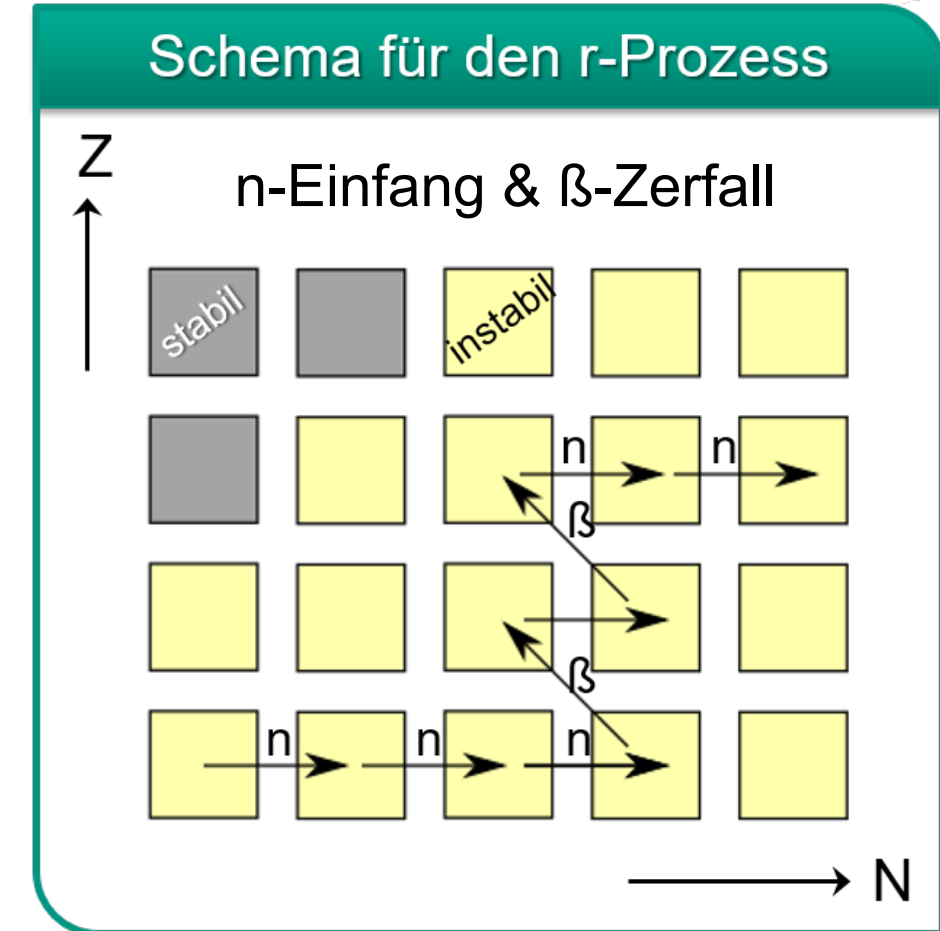
Elemente jenseits von Eisen: r-Prozess

■ Nukleosynthese-Pfad über 'rapid neutron capture'

- Saatkern für r-Prozess ist ^{56}Fe
- Abfolge von schnellen n-Einfängen (0,1 ms) bei hohen n-Flüssen $\Phi \sim 10^{22} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, noch bevor ein β -Zerfall stattfinden kann
- erzeugt $\sim 50\%$ der neutronenreichen Elemente $> \text{Fe}$



Gold (Au-197):
erzeugt im r-Prozess



Elemente jenseits von Eisen: r-Prozess

■ Nukleosynthese-Pfad über 'rapid neutron capture'

- Astrophysikalische Orte:

Kernkollaps-Supernovae

Merger von Neutronensternen

- Erstmalige Beobachtung eines Mergers mit **Gravitationswellen** (GW170817) & weitere Nachbeobachtungen:

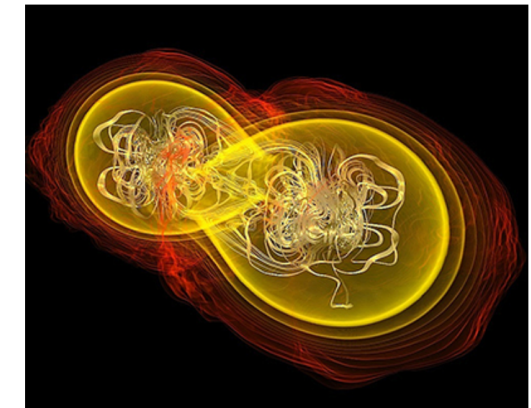


~ 2 Erdmassen an Au gebildet

First multimessenger observation of a neutron-star merger is *Physics World* 2017 Breakthrough of the Year

Dec 11, 2017 4 comments

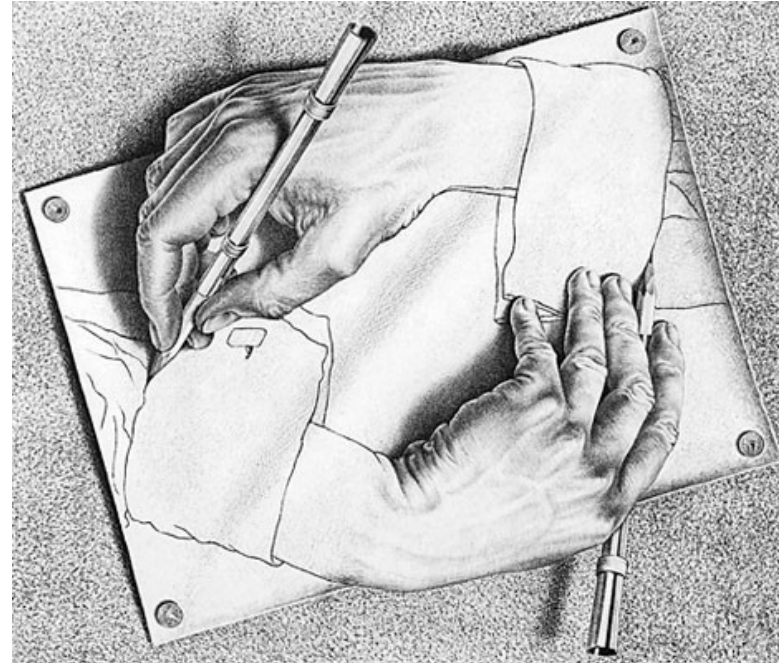
The *Physics World* 2017 Breakthrough of the Year goes to the international team of astronomers and astrophysicists that ushered in a new era of astronomy by making the first ever multimessenger observation involving gravitational waves. Nine other achievements are highly commended and cover topics ranging from topological physics to Egyptology and more.



Multiple messages: a neutron-star merger's effects on gravity (left) and matter

On 17 August 2017 the LIGO–Virgo gravitational-wave detectors and the Fermi Gamma-ray Space Telescope detected signals separated by just 2 s. They came from the **merger of two neutron stars** – an object now called GW 170817. This was the first time that LIGO–Virgo scientists had seen a neutron star merger, but five hours later they had already worked out the location of the source in the sky. Over the next hours and days, more than 70 telescopes were pointed at GW 170817 and a wealth of observations were made in the gamma-ray, X-ray, visible, infrared and radio portions of the electromagnetic spectrum. Astrophysicists also searched for neutrinos, but none were seen.



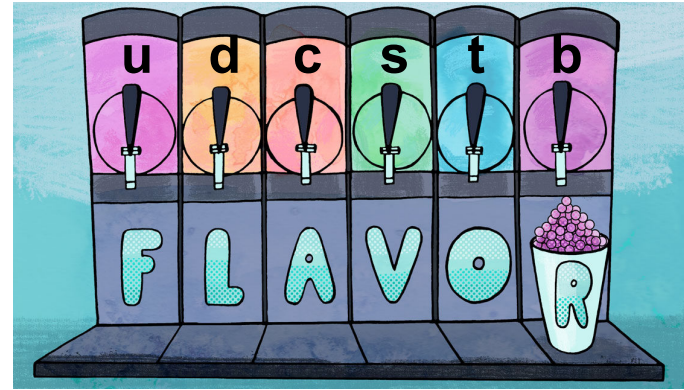
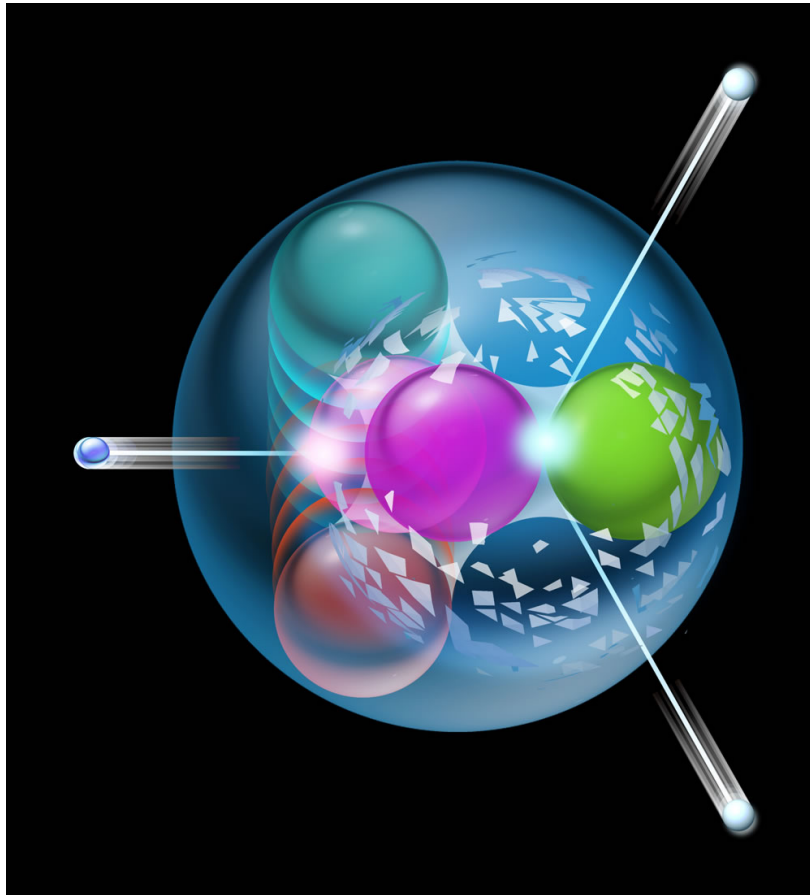


KAPITEL 5: SYMMETRIEN UND ERHALTUNGSSÄTZE

... und dann gibt es Katzen



- **Symmetrieprinzipien** und **Erhaltungssätze** sind zentrales Element von modernen physikalischen Theorien
 - Klassische Physik: Hamilton-Formalismus
 - Quantenmechanik: Phase und Parität der Wellenfunktion Ψ
 - Festkörperphysik: Symmetrie von Kristallen
 - **Teilchenphysik**: Verallgemeinerung bekannter Konzepte aus der klassischen Physik & Quantenmechanik
 - ⇒ **Eichsymmetrien**, z.B. Farb-SU(3)
 - innere Symmetrien** von Teilchen: Parität **P**, **C**, **CP**...
 - neue Quantenzahlen**: Flavours von Quarks: **u**, **d**, ..



KAPITEL 5.1 SYMMETRIEN UND ERHALTUNGSZAHLEN

Klassische kontinuierliche Symmetrien

■ Noether-Theorem (Emmy Noether, 1918):

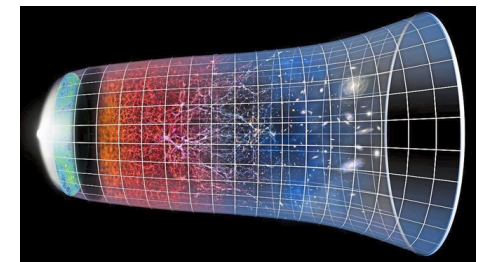
„zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße“ → **klassische Raum-Zeit-Symmetrien**



Emmy
Noether

Symmetrieoperation	unbeobachtbare Größe	Erhaltungsgröße
Translation im Raum	absoluter Ort	Impuls
Drehung im Raum	absolutes Koordinatensystem	Drehimpuls
Translation in der Zeit	absolute Zeit	Energie

- **Homogenität & Isotropie** des Raumes: Erhaltung von p , J
- **Translationsinvarianz** der Zeit : Erhaltung von E



Q: wikipedia, ESO

Klassische kontinuierliche Symmetrien

- **Noether-Theorem** (Emmy Noether, 1918):

„zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße“ → **klassische Raum-Zeit-Symmetrien**



Emmy
Noether

#5

$$\{H, I\} = \frac{dH}{dt_I} = 0 \Rightarrow \{I, H\} = \frac{dI}{dt} = 0$$

PI

Noether's theorem

Stated simply, Noether's theorem shows that symmetries in nature are intrinsically linked to conservation laws. This profound insight has guided every branch of modern physics.

Perimeter Institute (Ontario):
März/April 2022

*the all-time greatest
equation in physics ...*

#1: Noether's Theorem!

Gleichungen in der Physik, nachgefragt

■ Welche Gleichung ist (neben Noether's Theorem) die Eleganteste, für mich?

- ideal für Diskussionen, hier eine Auswahl

#3

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

PI

Schrödinger equation

The bread and butter of quantum mechanics, the Schrödinger equation describes the wave function of any quantum system and therefore tracks the system's observable properties over time.

#1

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

PI

Energy-momentum relation

This relation simplifies to the famous $E=mc^2$ for objects at rest, illustrating that mass and energy are two sides of the same coin and can be converted from one form to another.

#9

$$i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc\psi = 0$$

PI

Dirac equation

If quantum physics describes the tiniest particles, and special relativity describes the fastest things, what of tiny, fast-moving particles? Enter the Dirac equation, which also predicted the existence of antimatter.

#16

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

PI

Stefan-Boltzmann law

Star light, star bright, the first star you see tonight ... can be described by this equation, which relates a star's luminosity to its temperature and radius.

#6

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

PI

Uncertainty principle

A prime example of the quirks of quantum physics, the uncertainty principle says that there is a fundamental limit to how well we can pin down certain pairs of quantities, such as a particle's position and momentum.

#8

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

PI

Einstein field equations

Believe it or not, there are 10 equations formulating the general theory of relativity – all packed into this tidy expression of how matter, energy, and the geometry of spacetime interact to produce gravity.

Globale und lokale Symmetrien

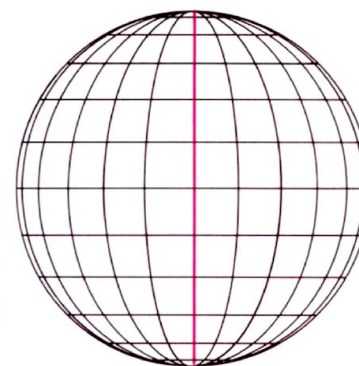
- **globale Symmetrie:** identische Symmetrieoperation an jedem Raum-Zeit Punkt x

globale Phase α : identische Physik bei $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha}$

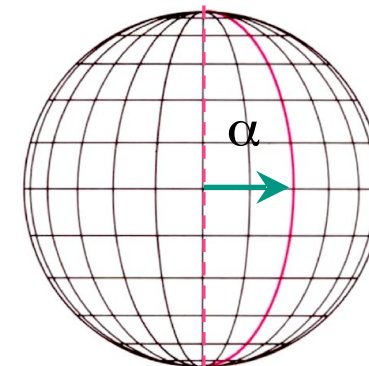
- **lokale Symmetrie:** Symmetrieoperation ist Funktion von $x = (\vec{r}, t)$ } stärkere Anforderung!
lokale Phase α : identische Physik bei $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha(x)}$

- Symmetrie wird auf ein System angewandt:
System bleibt invariant, d.h. transformierter Zustand kann nicht vom untransformierten Zustand unterschieden werden

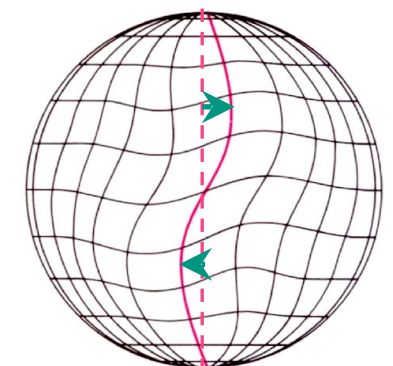
Q: Spektrum



globale
Transformation



lokale
Transformation



$\alpha(x)$

$\alpha(x')$

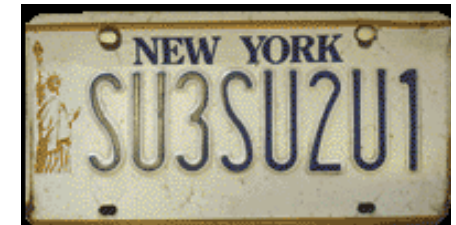
Standardmodell & Eichsymmetrien

- Standardmodell beruht auf lokalen Eichsymmetrien
zwei Eichgruppen

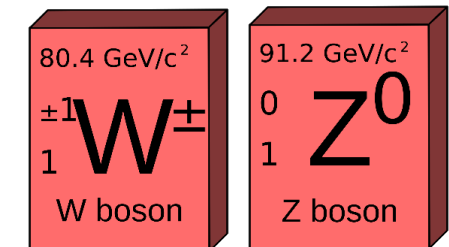
$$\underbrace{SU(2)_I \times U(1)_Y}_{\text{elektroschwacher Bereich}} \quad \underbrace{SU(3)_C}_{\text{starker Bereich}}$$

I: Isospin **Y**: Hyperladung **C**: Colour (Farbe)

- Invarianz bei lokaler Eichsymmetrie:
Einführung von neuen Feldern / Wechselwirkungen



Vektorbosonen



Additive & multiplikative Quantenzahlen

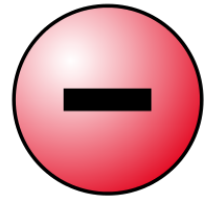
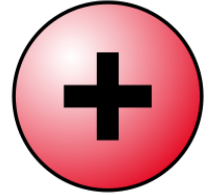
■ Additive Quantenzahlen (ladungsartig)

- **Summe** der Quantenzahlen in einem Prozess ist erhalten

kontinuierliche Symmetrien:

elektrische Ladung Q , Hyperladung Y

Leptonenzahl L , Baryonenzahl B ,...

 Σ 

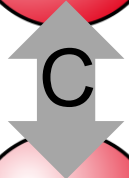
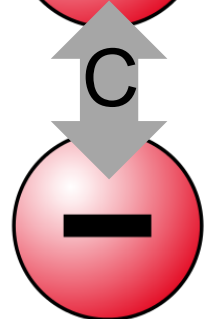
■ Multiplikative Quantenzahlen

- **Produkt** Π der Quantenzahlen in einem Prozess ist erhalten:

diskrete Symmetrien:

Parität P

Ladungskonjugation C

 Π 

Intrinsische Quantenzahlen: Baryonenzahl B

- **Hadronen (Quarks) & Leptonen: intrinsische Quantenzahlen**
 - Ladung Q , Farbladung, Flavour, schwache Hyperladung Y ,...
- **Baryonenzahl B**
 - B ist eine erhaltene (additive) Quantenzahl im Standardmodell
 - Definition
$$B = \frac{1}{3} \cdot [N(q) - N(\bar{q})]$$

$N(q), N(\bar{q})$ Anzahl der Quarks, Antiquarks

Beispiel: Nukleon $B = 1$, Quark $B = \frac{1}{3}$, Antiquark $B = -\frac{1}{3}$

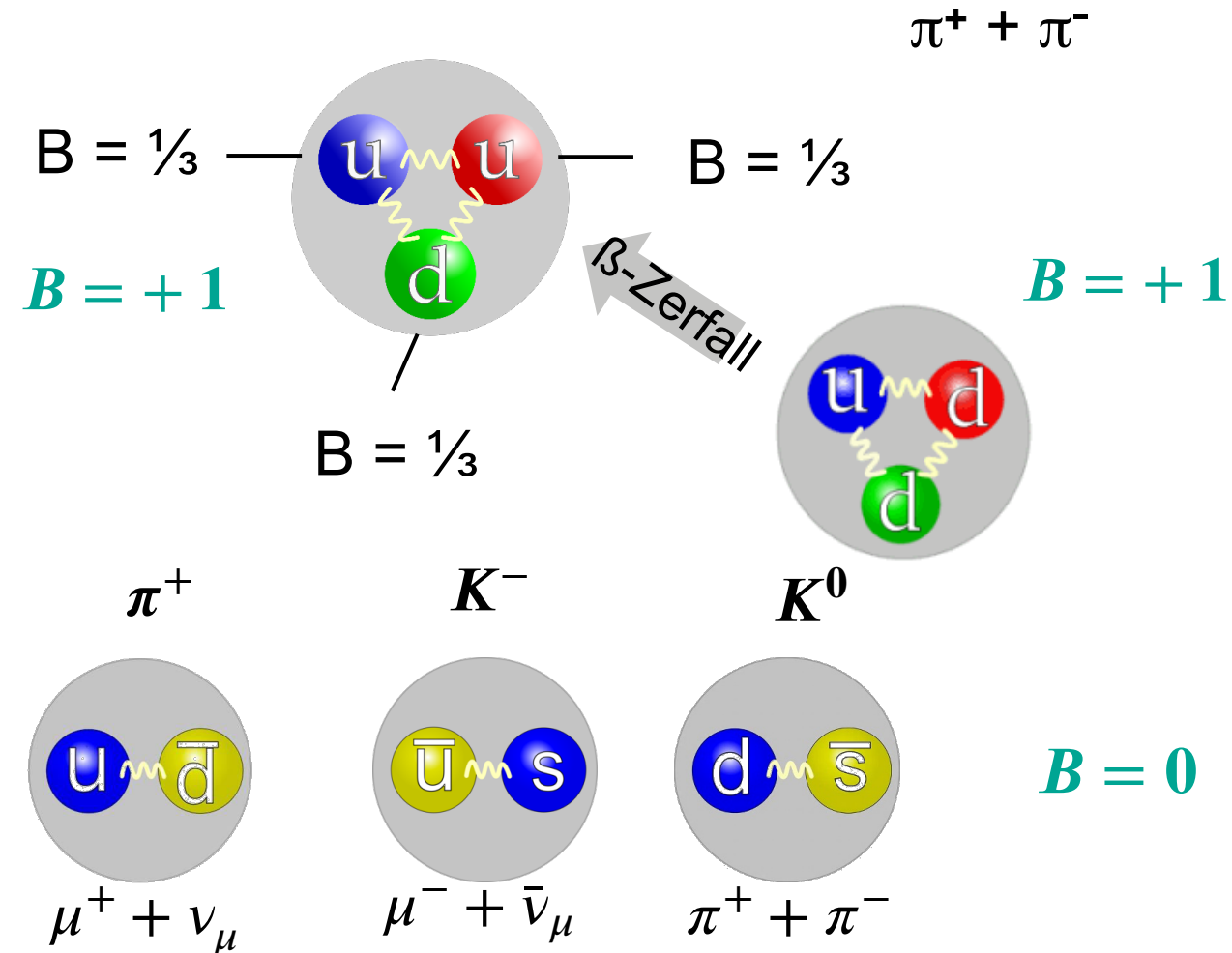
SM: exakte Erhaltung der Baryonenzahl B

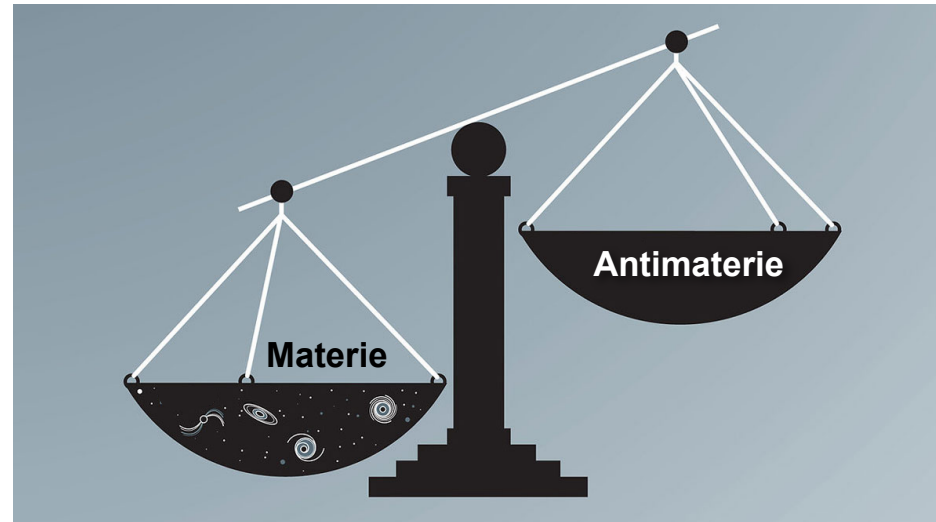
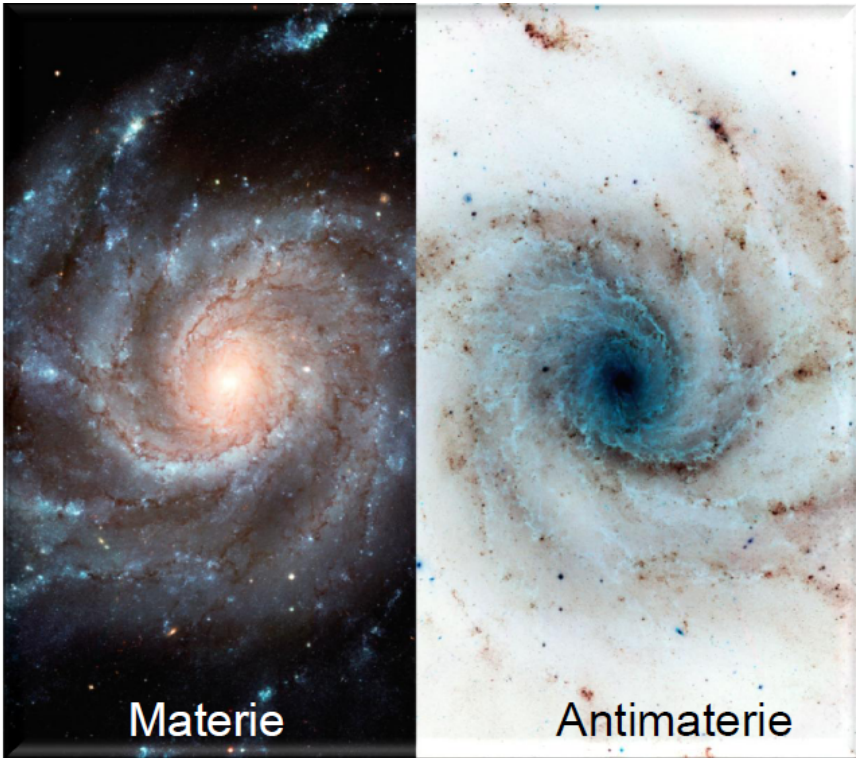
- Proton als leichtestes Baryon im Standardmodell ist **stabil**

Masse (p) = 938,272 MeV

- bisher **keine** Baryonenzahl-verletzenden Prozesse beobachtet!

- **Meson: gebundenes System**
aus Quark & Antiquark
Bsp: Pion, Kaon,...





EINSCHUB – VERLETZUNG DER BARYONENZAHL

Erhaltung der Baryonenzahl & Kosmologie*

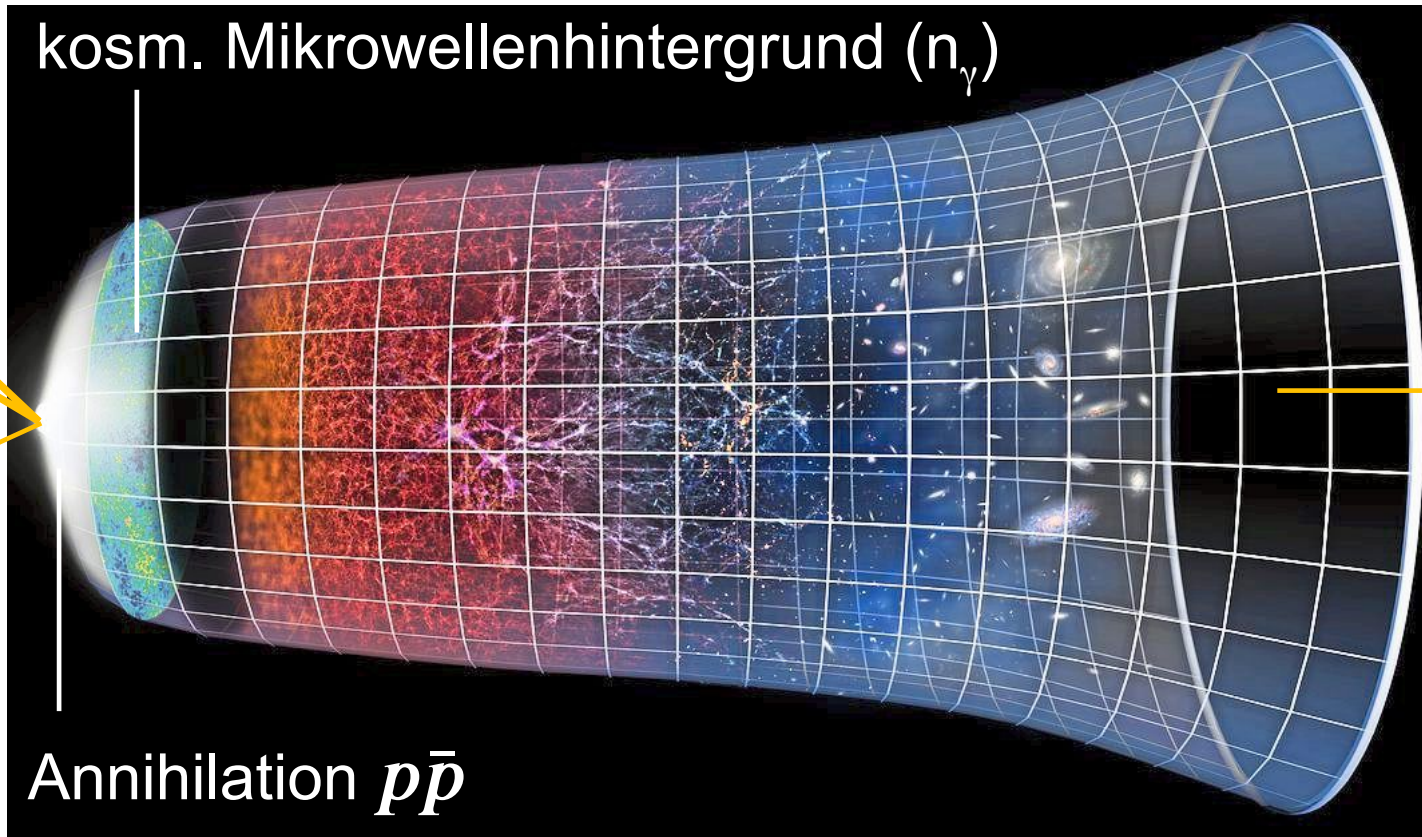
■ Universum zeigt **Baryon-Asymmetrie**

- beobachtete **Baryon-Asymmetrie** $\eta = (6,14 \pm 0,24) \cdot 10^{-10}$

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma}$$



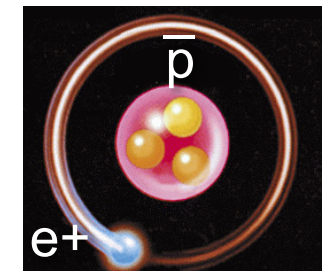
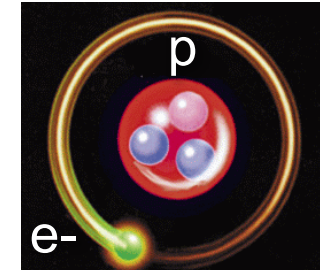
kosm. Mikrowellenhintergrund (n_γ)



Verletzung der
Baryonenzahl

Annihilation $p\bar{p}$

Wasserstoff

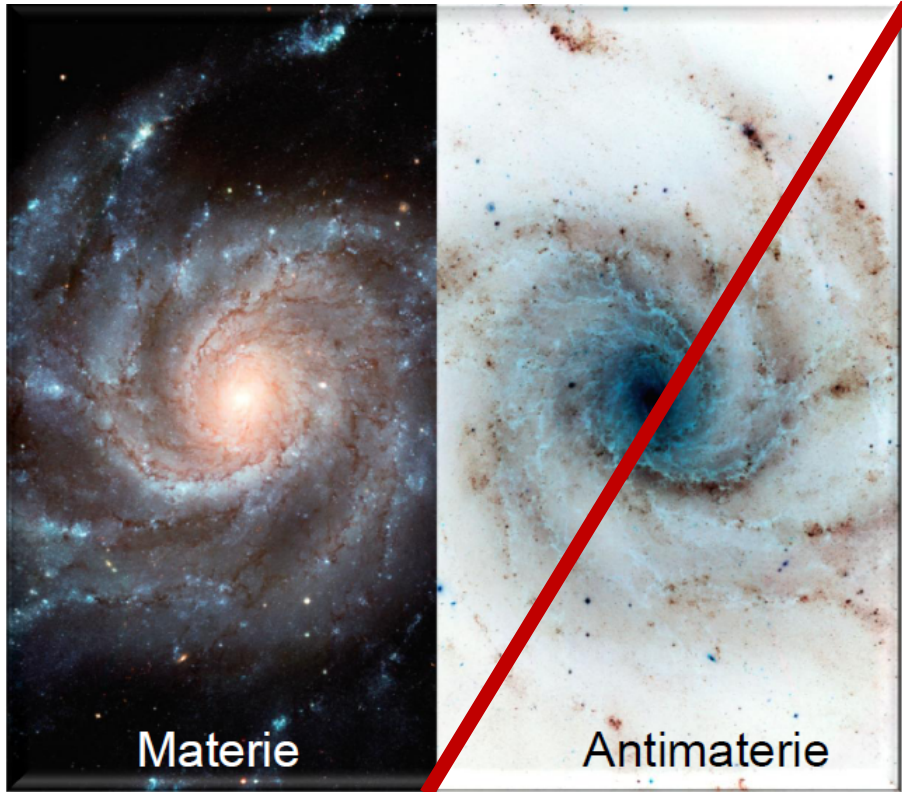


Anti-
Wasserstoff

Sacharov-Kriterien für Baryon-Asymmetrie

- Universum zeigt Baryon-Asymmetrie: **nur Materie, keine Antimaterie**

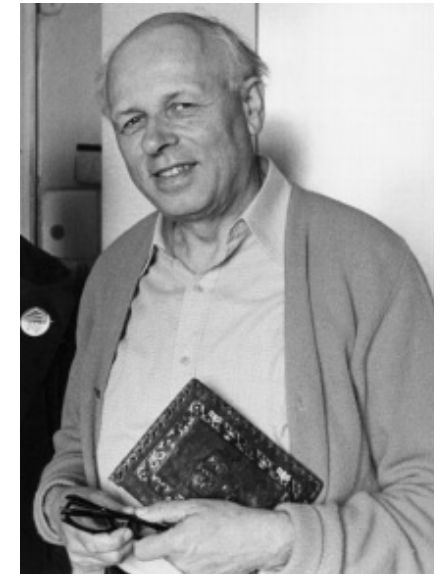
- drei Sacharov-Kriterien für eine erfolgreiche Baryogenese:



1. Verletzung der
Baryonenzahlerhaltung

2. Verletzung der CP-Invarianz*

3. kein thermodynamisches
Gleichgewicht



Q: spektrum, wikipedia

Andrej Dmitrijewisch Sacharov (1921-1989)

1967: **Baryon-Asymmetrie**

GUTs: Baryonenzahlverletzende Prozesse!

■ Proton-Zerfall in GUT-Szenarios

hypothetischer Zerfall

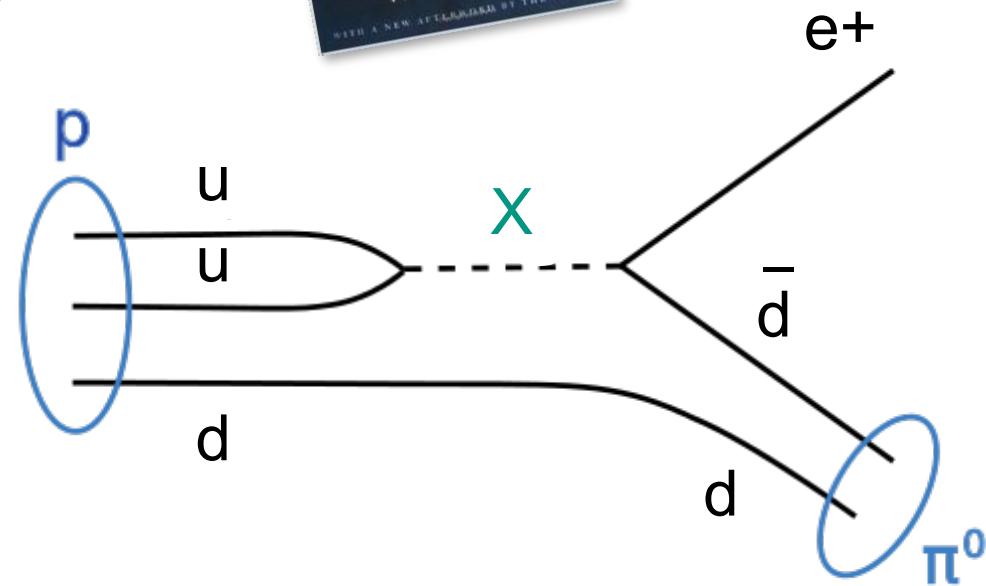
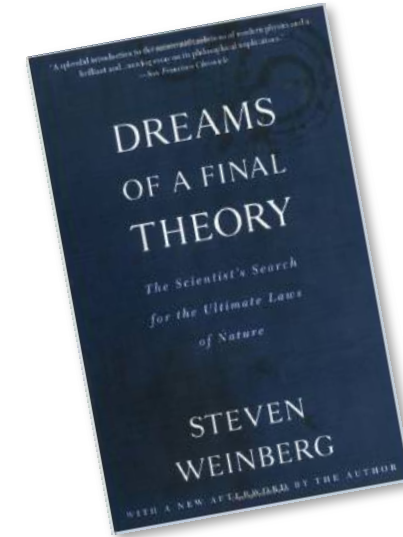
eines Protons in ein
Positron & neutrales Pion
erwartet in **GUT** = **G**rand **U**nified **T**heory*
über ein superschweres sog. **X-Boson**
(erzeugt Kopplung Quark-Lepton)



S. Glashow



H. Georgi

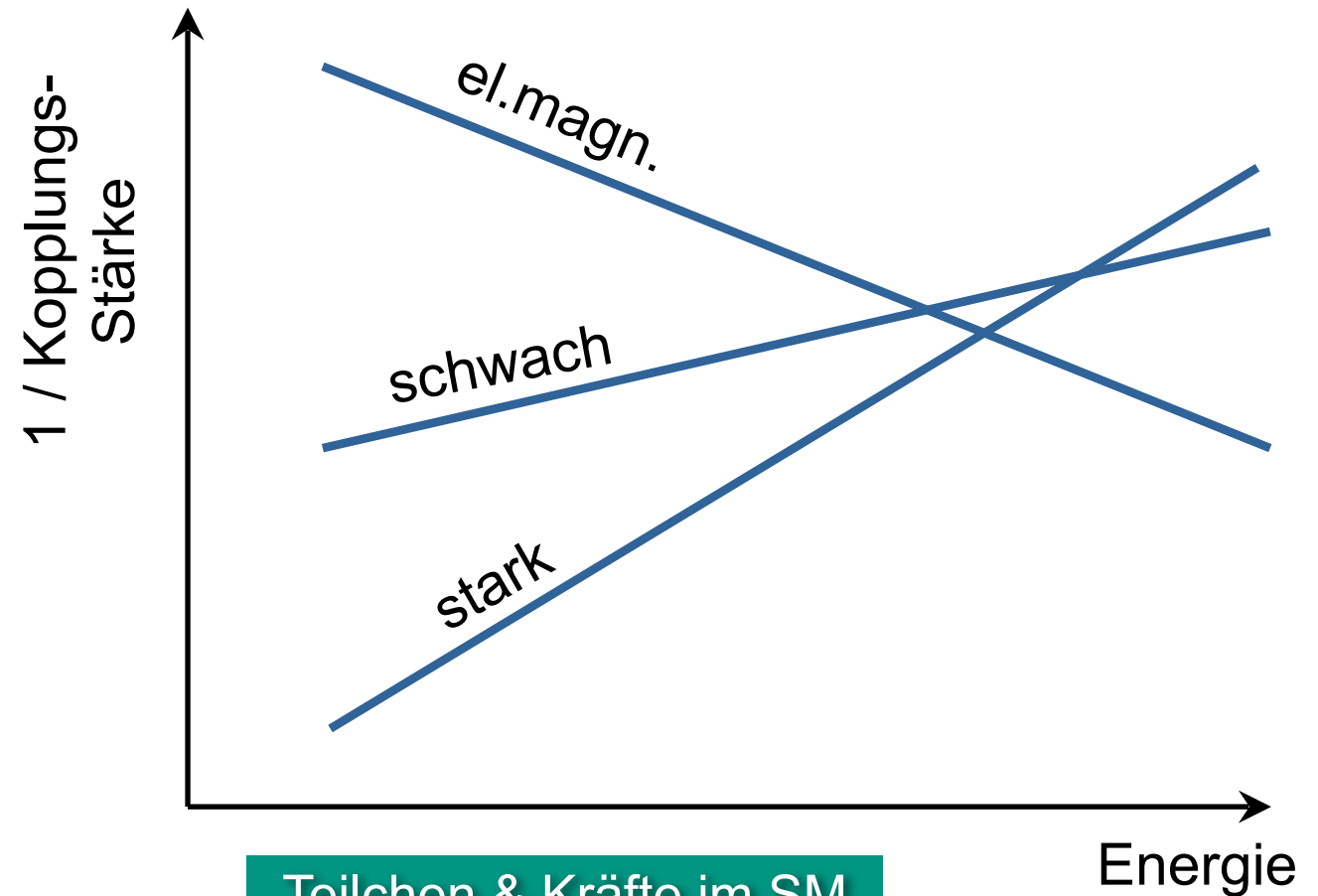


Motivation für GUTs: das SM ist 'unvollkommen'

■ GUT-Szenarios: keine „Große Vereinheitlichung“ im Standardmodell

- Entwicklung der Stärke der Kopplungskonstanten als Funktion der Energie:

kein gemeinsamer
Schnittpunkt ☹



Teilchen & Kräfte im SM



W. De Boer (KIT)



U. Amaldi

Q: wikipedia, KIT

SUSY: mit starkem Karlsruher Bezug

■ GUT-Szenarios: „Große Vereinheitlichung“ in der Supersymmetrie

- Supersymmetrie (**SUSY**)*:
alle Kräfte treffen sich bei
einer Energieskala 😊
- erste SUSY Theorie durch
J. Wess & B. Zumino (1974)



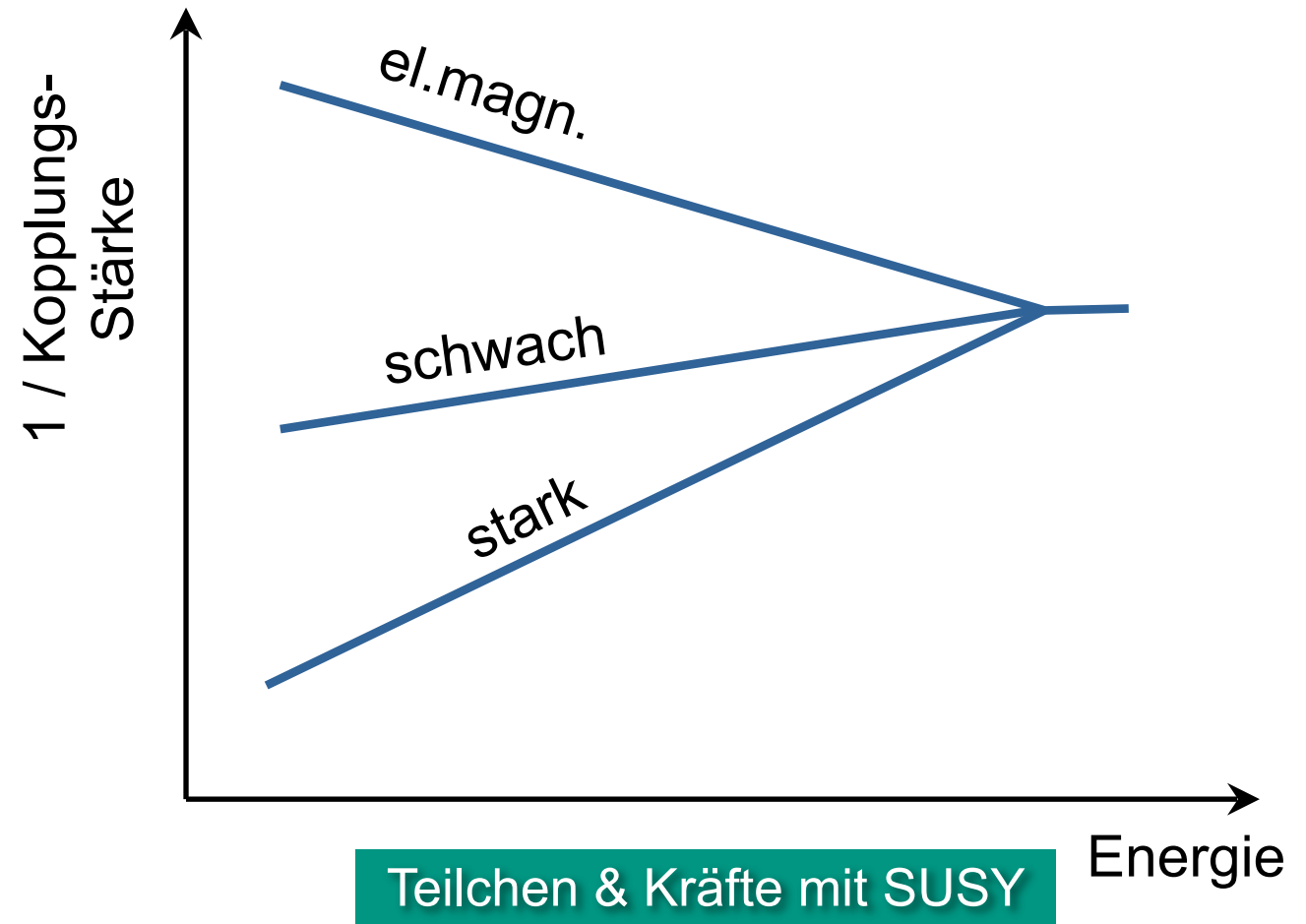
W. De Boer (KIT)



U. Amaldi



J. Wess (KIT)



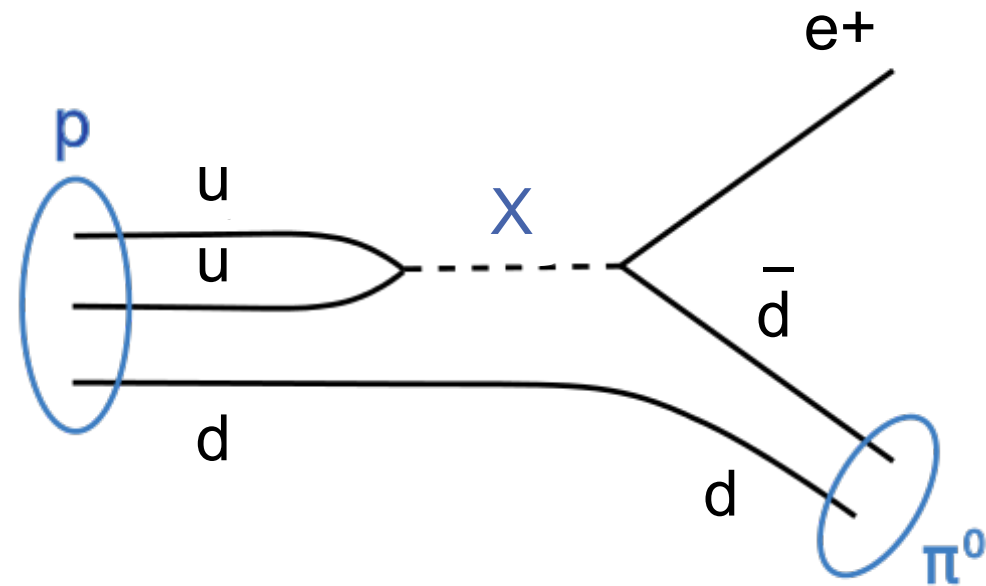
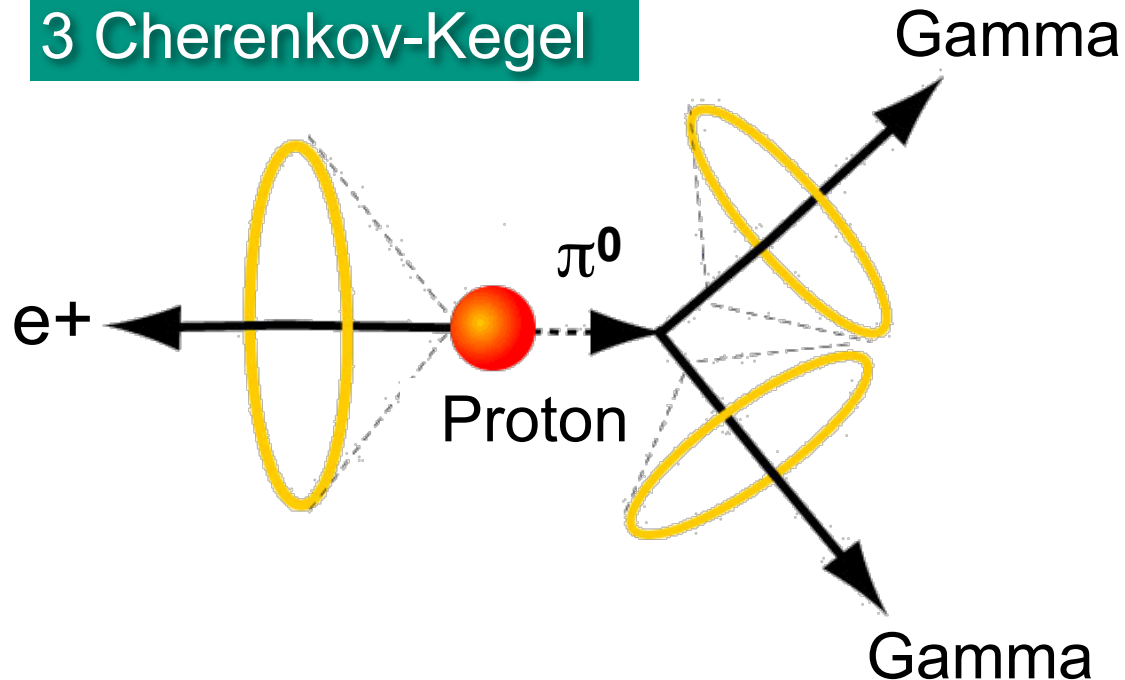
Q: physics.stackexchange.com, wikipedia

Zerfall des Protons in Positron e^+ & Pion π^0

- Protonmasse definiert die Energieskala $E \sim 1 \text{ GeV}$ bei Suche nach Zerfall

- heutige untere Grenze für Lebensdauer $t_{1/2} > 1,67 \cdot 10^{34} \text{ a}$

3 Cherenkov-Kegel



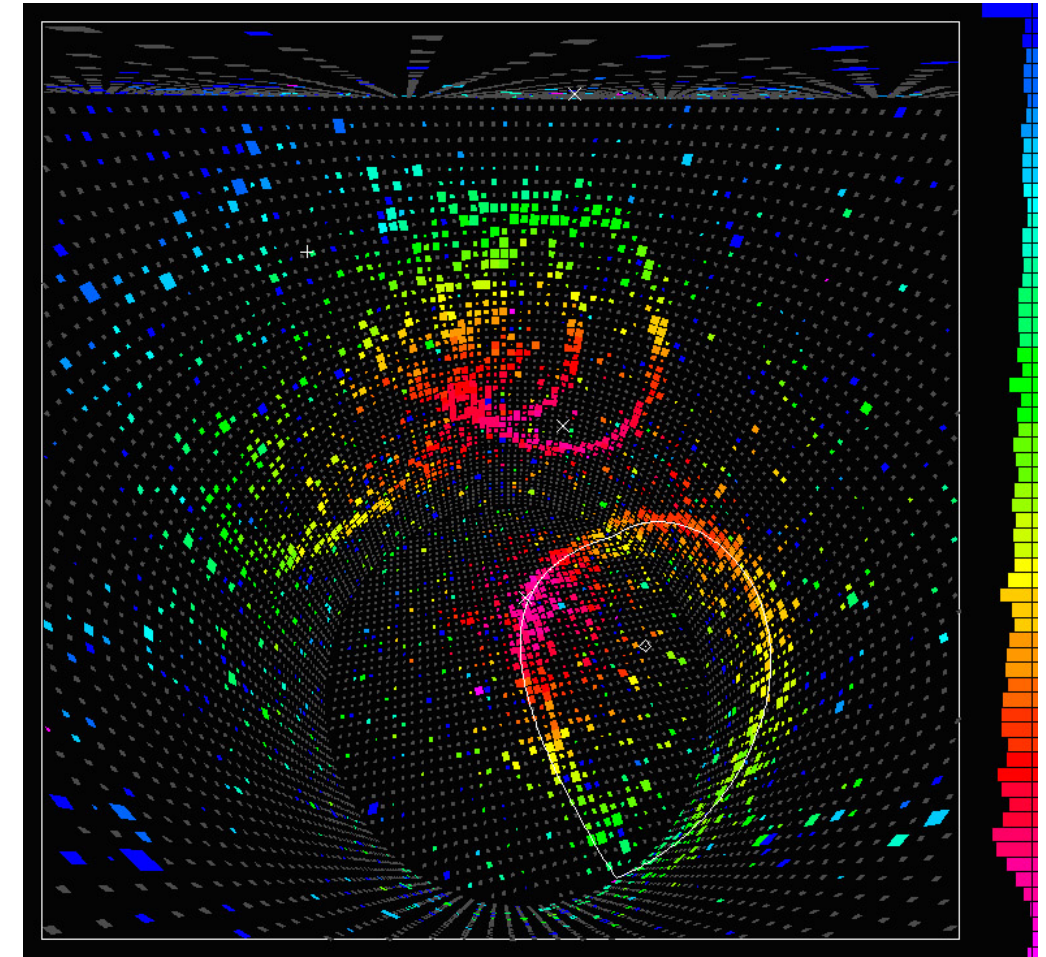
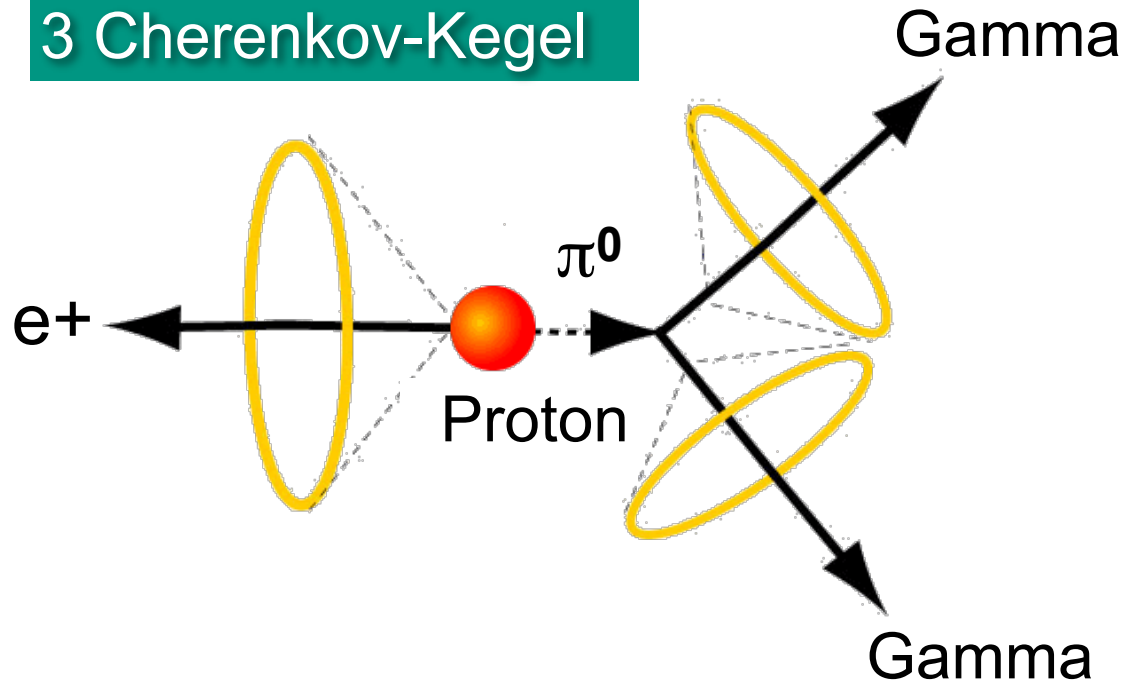
Q: physics.stackexchange.com, wikipedia

Erwartete Zerfalls-Signatur in Super-Kamiokande

- Protonenzerfalls-Experimente: große H_2O -Cherenkov-Detektoren*

- **Super-Kamiokande:** Simulation eines Protonen-Zerfalls mit 3 Cherenkov-Ringen

3 Cherenkov-Kegel



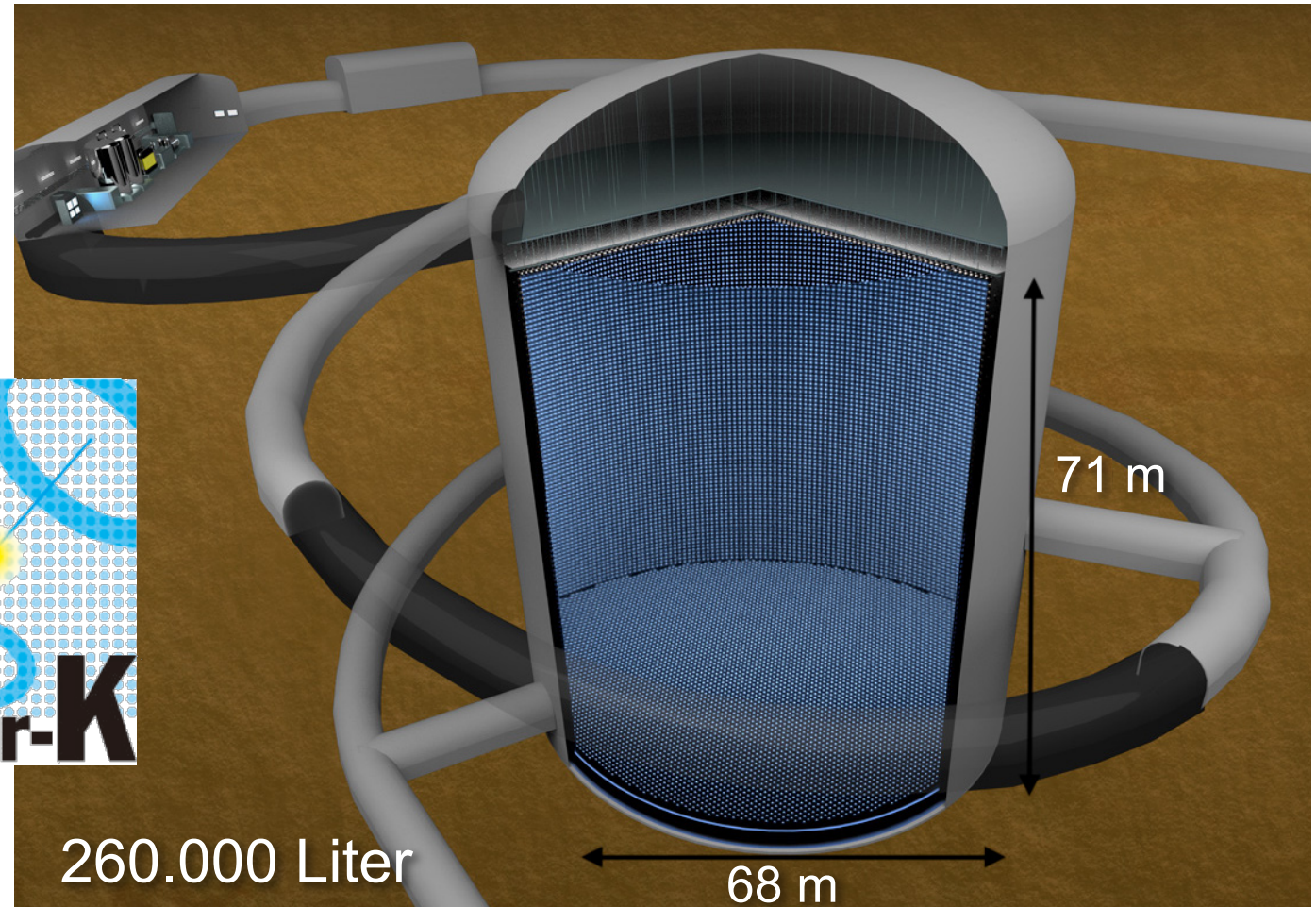
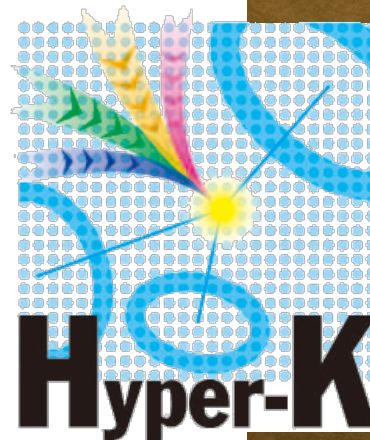
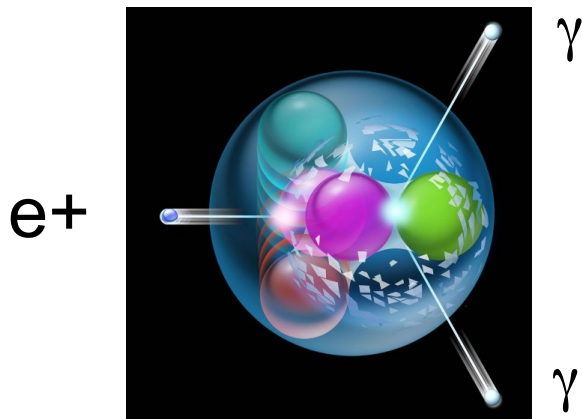
Q: Super-Kamiokande,

Hyper-Kamiokande: 'ultimate' Sensitivität

■ Protonenzerfalls-Experimente: Hyper-Kamiokande in Japan (ab 2027)

- ein neues Observatorium für
 - Neutrino-Oszillationen
 - **Suche nach Protonzerfall**

$\sim 10^{35}$ Jahre



Q: Hyper-Kamiokande, CHIPP

Standardmodell: Erhaltung der Leptonenzahl L

- Leptonenzahl L für geladene (e , μ , τ) & neutrale (ν_e , ν_μ , ν_τ) Leptonen

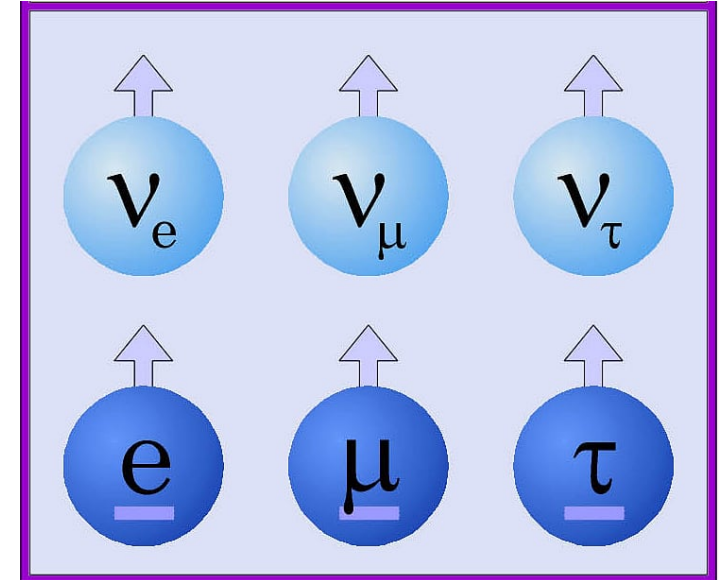
- Definition:

$$L = N(\ell) - N(\bar{\ell})$$

ℓ = Lepton

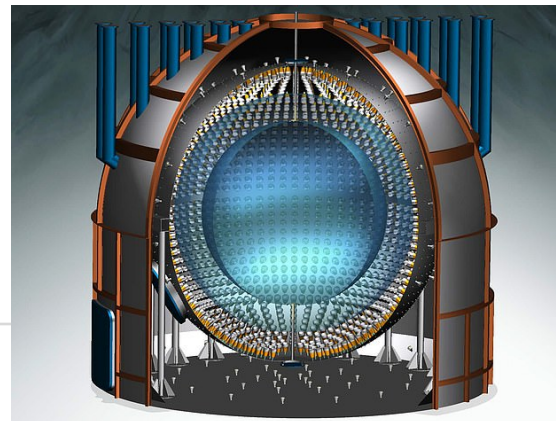
$\bar{\ell}$ = Antilepton

$L = +1$



- Elektron** als leichtestes (geladenes) Lepton im Standardmodell mit $L = +1$ ist **stabil**

➔ e- Lebensdauer*
 $t_{1/2} > 6,6 \cdot 10^{28} \text{ a}$



*Limit vom
Borexino-Detektor

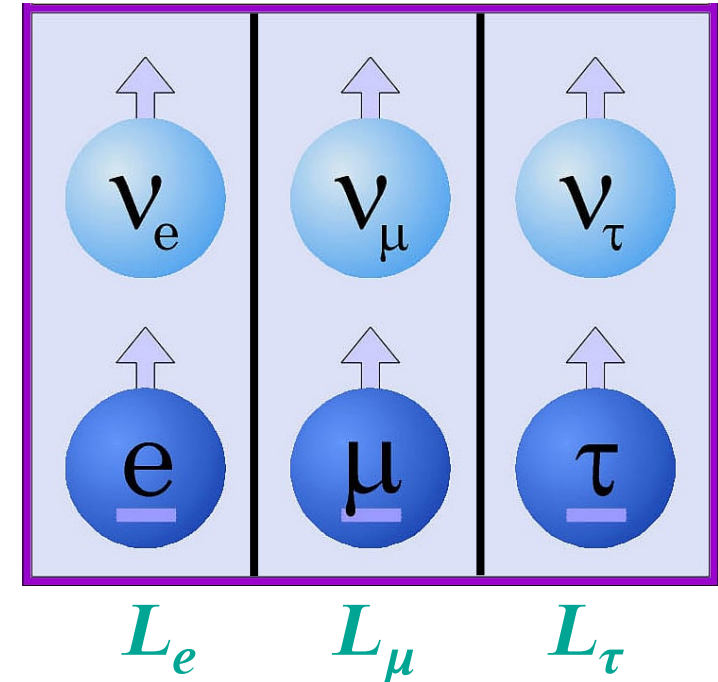
Standardmodell: Erhaltung von Familien- L_i

- jede der drei Leptonenfamilien $i = (e, \mu, \tau)$ besitzt separate Quantenzahl

- Beispiele: $L_e = +1$ für (e^-, ν_e)
 $L_e = -1$ für $(e^+, \bar{\nu}_e)$
 $L_\mu = +1$ für (μ^-, ν_μ)
 $L_\mu = -1$ für $(\mu^+, \bar{\nu}_\mu)$

- Leptonenzahl $L = L_e + L_\mu + L_\tau$

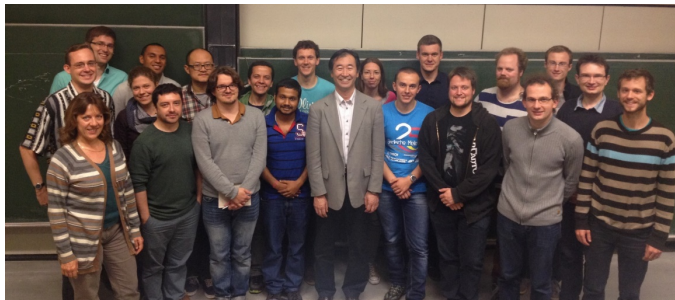
- Erhaltung von L_e , L_μ und L_τ
verletzt durch masse-behaftete
Neutrinos (**ν -Mischung**)



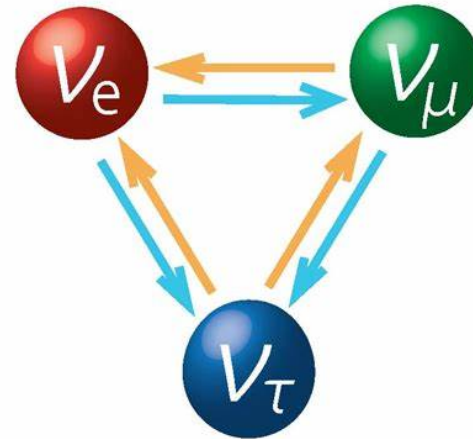
Experiment: Erhaltung von L_i ist verletzt!

■ keine Erhaltung von Leptonen-Familienzahl $i = (e, \mu, \tau)$!

- Beobachtung* von ν -**Oszillationen**, z.B.
von $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ (Neutrinos aus der Sonne)
von $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ (Neutrinos aus der Atmosphäre)
- Implikation: **Neutrinos haben Masse!**
- erste Physik jenseits des Standardmodells!!



2014: Takaaki Kajita im kl. HS A



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Takaaki Kajita
Prize share: 1/2



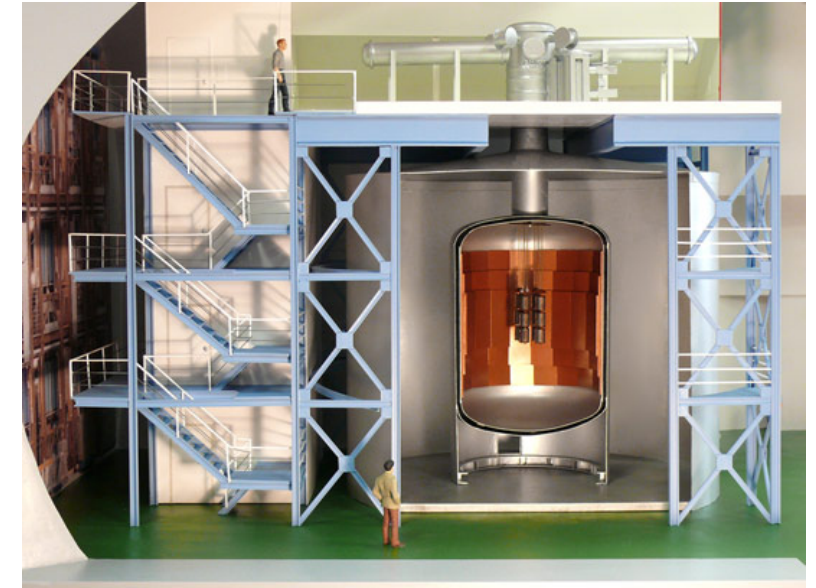
© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

atmosphärische ν 's

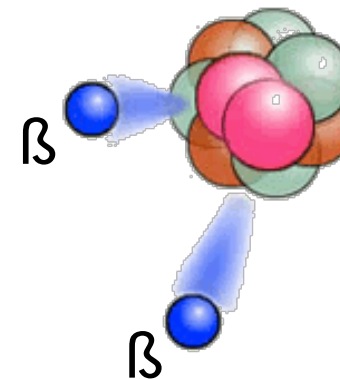
solare ν 's

Leptonenzahl: Verletzung von L jenseits des SM

- Leptonenzahl L : kann genau wie Baryonenzahl B in erweiterten Theorien verletzt sein
 - ist das Konzept von L bei Neutrinos sinnvoll?
- Suche nach **Verletzung der Leptonenzahl-Erhaltung** in seltenem Zerfallsprozess*: „neutrinoloser Doppel-Betazerfall“
 - zwei Neutronen in einem Kern zerfallen simultan **ohne Emission von Neutrinos**
 - $0\nu\beta\beta$ -Ereignisse mit $\Delta L = 2$



GERDA Experiment
am LNGS**



$$\Delta L = 2$$