

Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig
13. Juni 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY

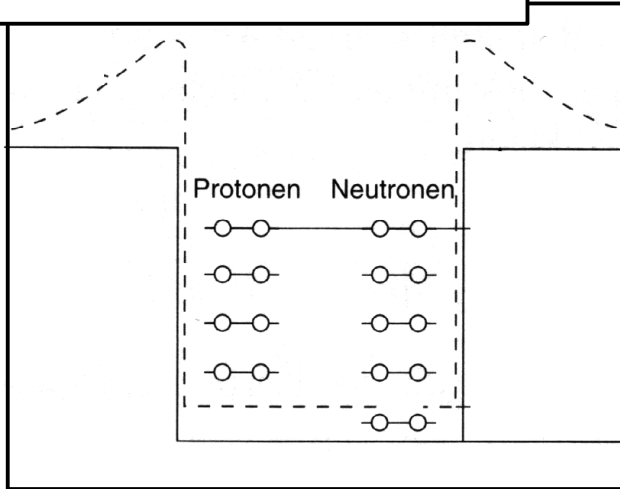


Kapitel 6.3: Nukleare Thermodynamik

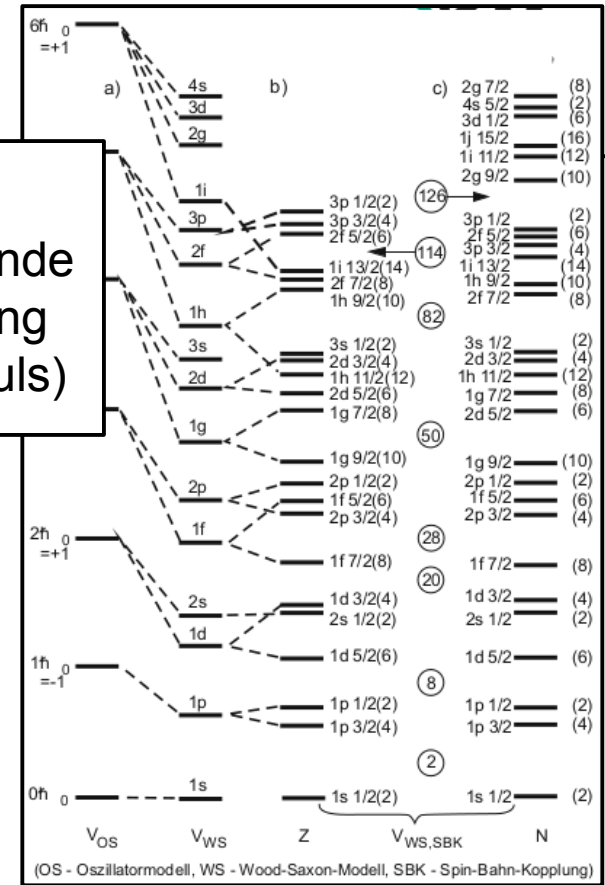
Energiezustände des Kerns

Tröpfchenmodell:

p und n als freies Fermionengas in Potentialtopf



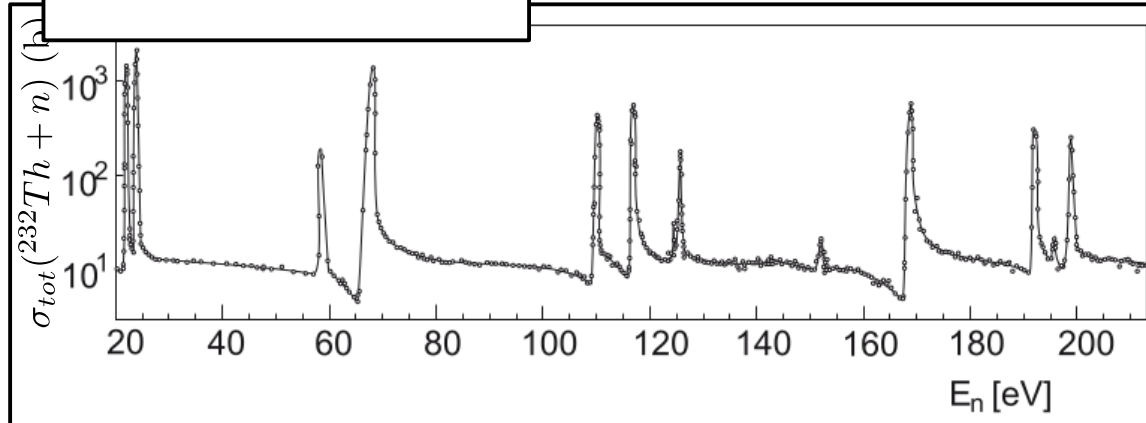
Schalenmodell:
Anregungszustände
(endl. Ausdehnung
Kern & Drehimpuls)



Compoundkern:
Sehr viele, schmale
und naheliegende
Resonanzen

Kontinuum:

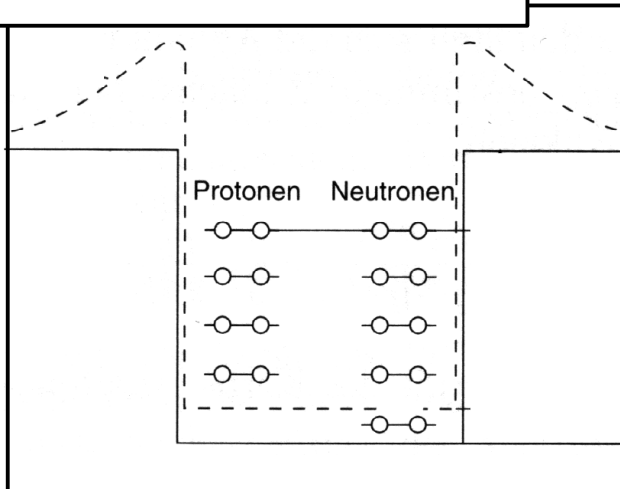
Kontinuierliche
Energie-/Impulsver-
teilung



Energiezustände des Kerns

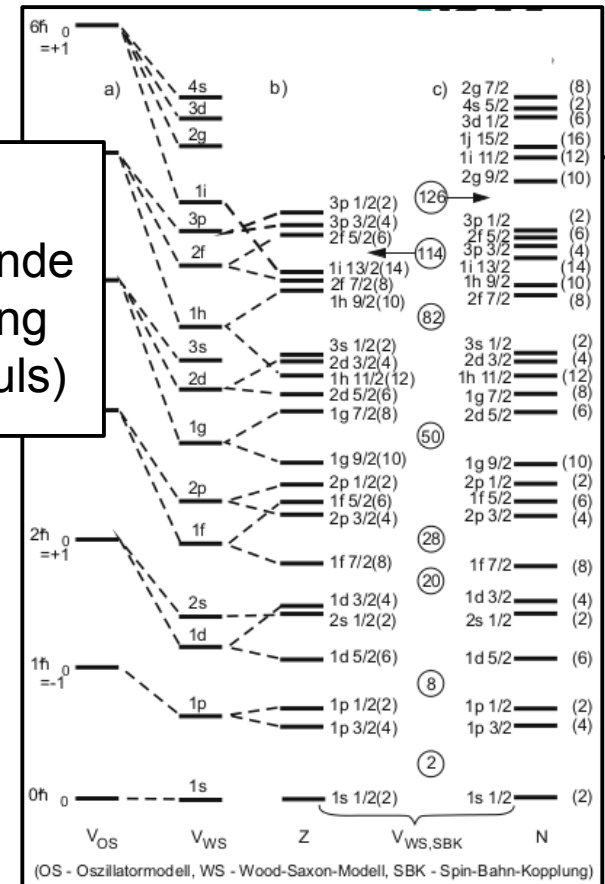
Tröpfchenmodell:

p und n als freies Fermionengas in Potentialtopf



Schalenmodell:

Anregungszustände
(endl. Ausdehnung
Kern & Drehimpuls)



- Grundzustand & niedrig liegende Anregungen (im MeV-Bereich)
- Anregung einzelner Teilchen (oder kollektive Bewegungen des Kerns als Ganzes)
- Beschreibung durch **Schrödinger-GL einzelner Nukleonen** (in effektivem Potential der anderen Nukleonen, siehe z.B. [VL-10 Folie 22](#))

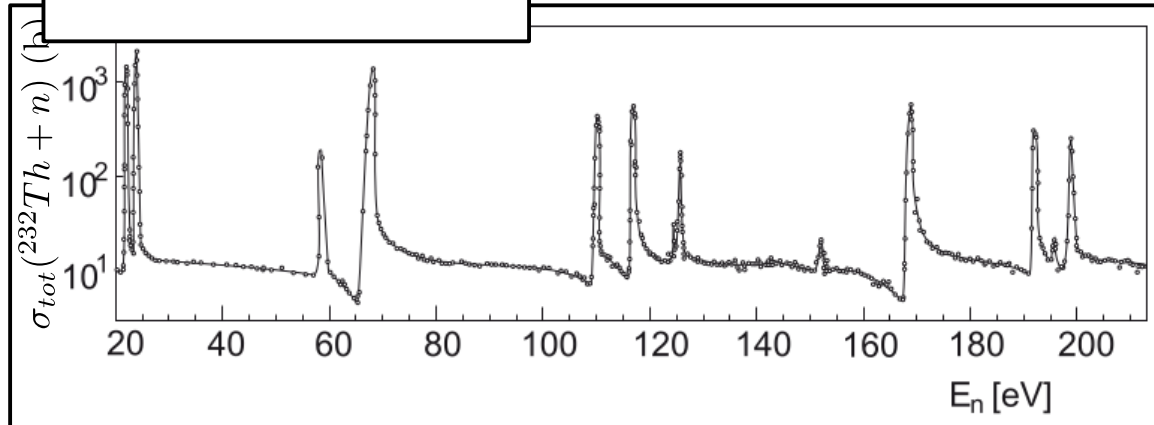
Energiezustände des Kerns

- Energie einzelner Nukleonen verteilt sich schnell auf andere Nukleonen
- Sehr scharfe Resonanzen mit langer Lebensdauer (siehe [Anhang VL-08](#))
- Beschreibung mittels Wellenfunktion die stochastisch aus Einteilchenwellenfunktionen zusammengesetzt ist → **Quantenchaos**, Methoden der **Thermodynamik**

Kontinuum:
Kontinuierliche
Energie-/Impulsver-
teilung

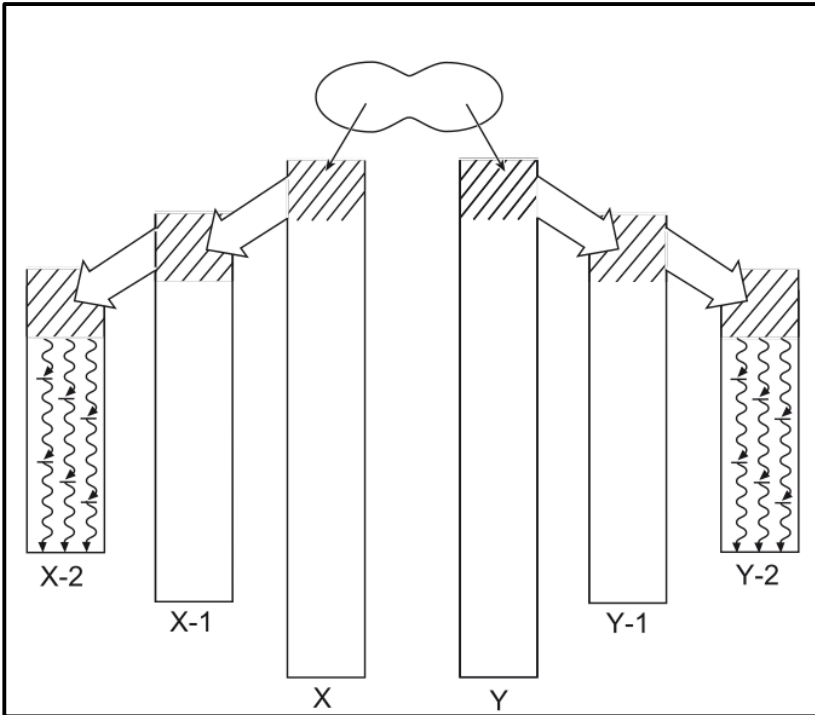


Compoundkern:
Sehr viele, schmale
und naheliegende
Resonanzen



Temperatur in der Kernphysik

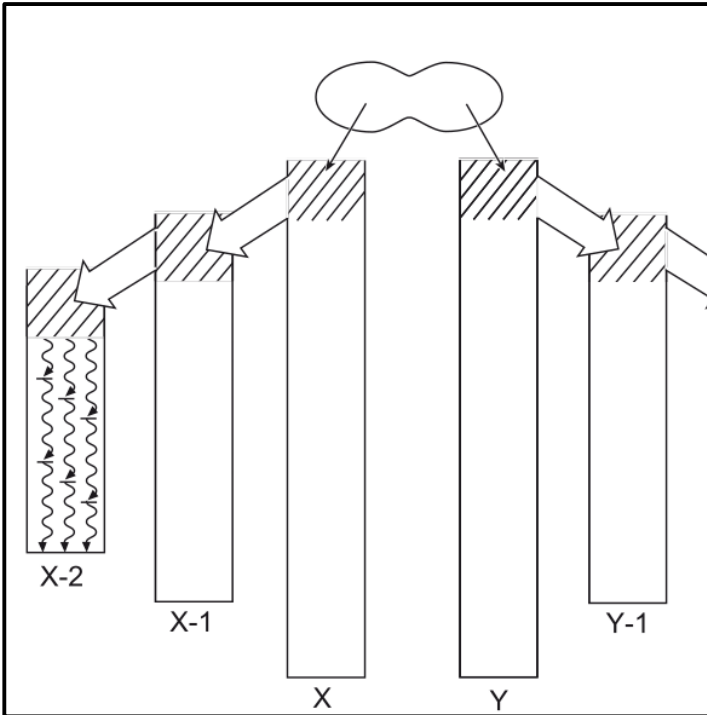
- Betrachte Zerfall des Kerns ^{252}Cf ($T_{1/2} = 2.6 \text{ a}$, in 3.2% aller Fälle durch spontane Spaltung, s. VL-13 Folie 3)



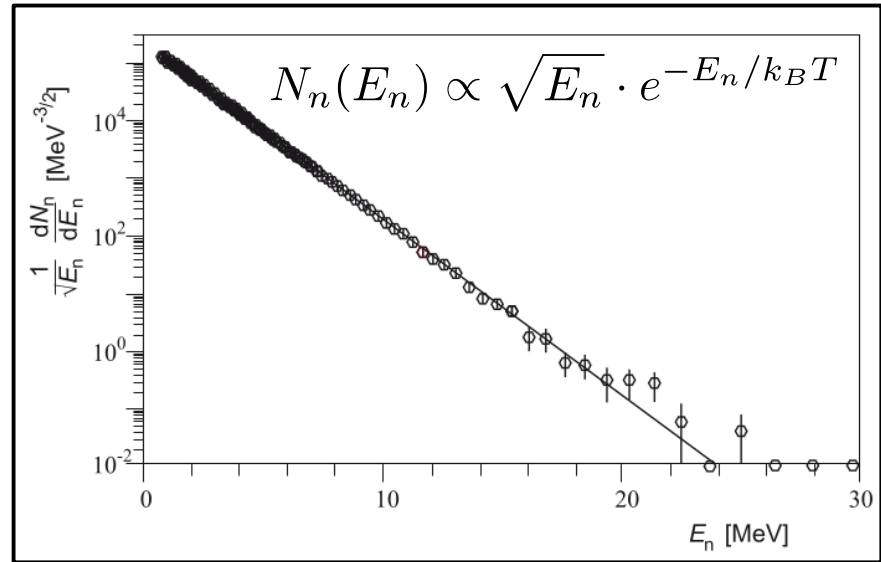
- Freigesetzte Energie:
- $\langle N_n \rangle = 4$, $\langle E_n \rangle = 2.1 \text{ MeV}$
- $\langle N_\gamma \rangle = 20$ in Folgeemissionen

Temperatur in der Kernphysik

- Betrachte Zerfall des Kerns ^{252}Cf ($T_{1/2} = 2.6 \text{ a}$, in 3.2% aller Fälle durch spontane Spaltung, s. VL-13 Folie 3)



Energiespektrum der Neutronen:

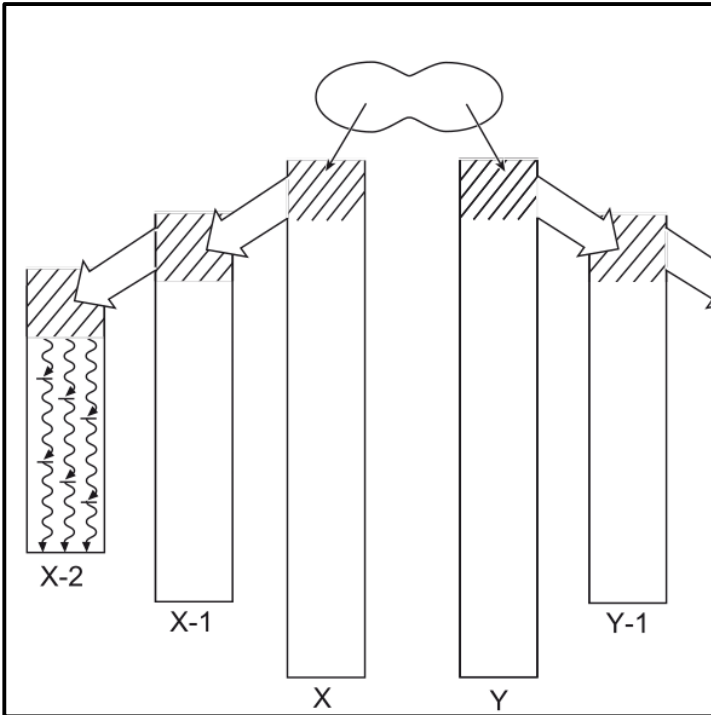


- Boltzmann-Vtlg. für $k_B T = 1.41 \text{ MeV}$

- Freigesetzte Energie:
- $\langle N_n \rangle = 4$, $\langle E_n \rangle = 2.1 \text{ MeV}$
- $\langle N_\gamma \rangle = 20$ in Folgeemissionen

Temperatur in der Kernphysik

- Betrachte Zerfall des Kerns ^{252}Cf ($T_{1/2} = 2.6 \text{ a}$, in 3.2% aller Fälle durch spontane Spaltung, s. VL-13 Folie 3)

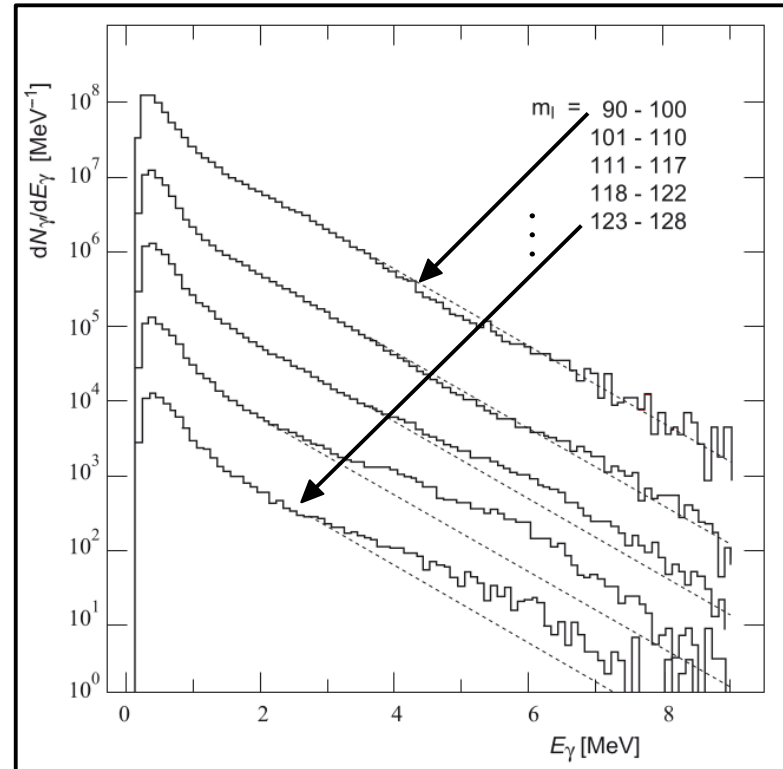


Energiespektrum der Neutronen:

$$\frac{1}{\sqrt{E_n}} \frac{dN_n}{dE_n} [\text{MeV}^{-3/2}]$$

• B

Energiespektrum der Photonen:



- Freigesetzte Energie:
- $\langle N_n \rangle = 4$, $\langle E_n \rangle = 2.1 \text{ MeV}$
- $\langle N_\gamma \rangle = 20$ in Folgeemissionen

- Ebenfalls nach Boltzmann verteilt

Phasenübergänge der Kernmaterie

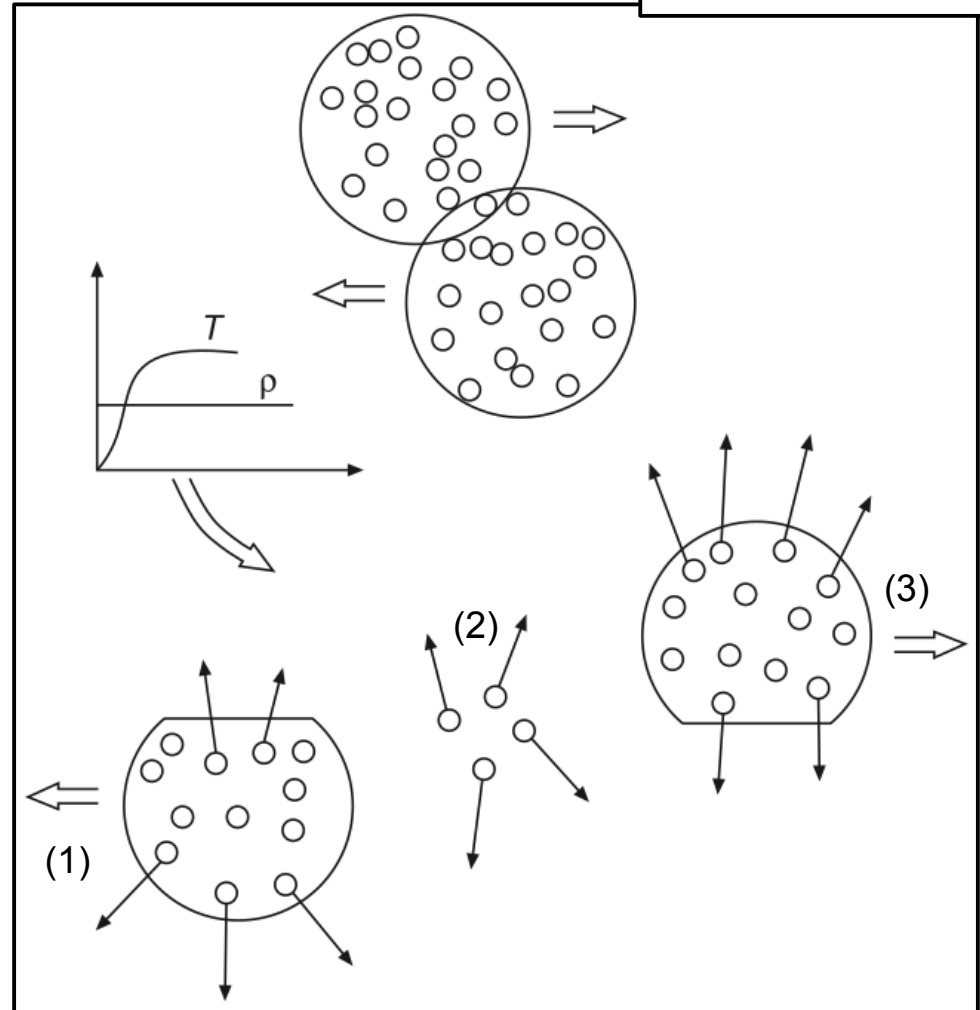
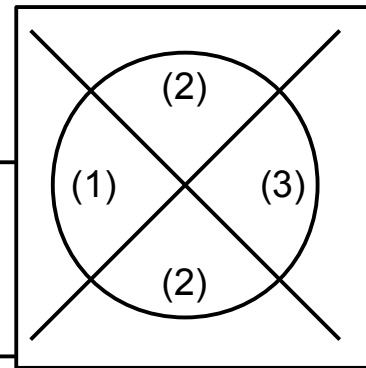
- Untersuchung in **Kollisionen schwerer Ionen** bei höchsten Energien (→ z.B. Pb-Pb oder Au-Au, Schwerionenphysik)
- Untersuche zentrale & periphere Stöße (→ Teilchenmultiplizität)
- Erhöhung der Temperatur der Kerne durch “innere Reibung”

- **Energiebilanz** pro Stoß:

$$E_{ges} = \sum_{\text{alle}} E_i \quad (\text{Gesamtenergie})$$

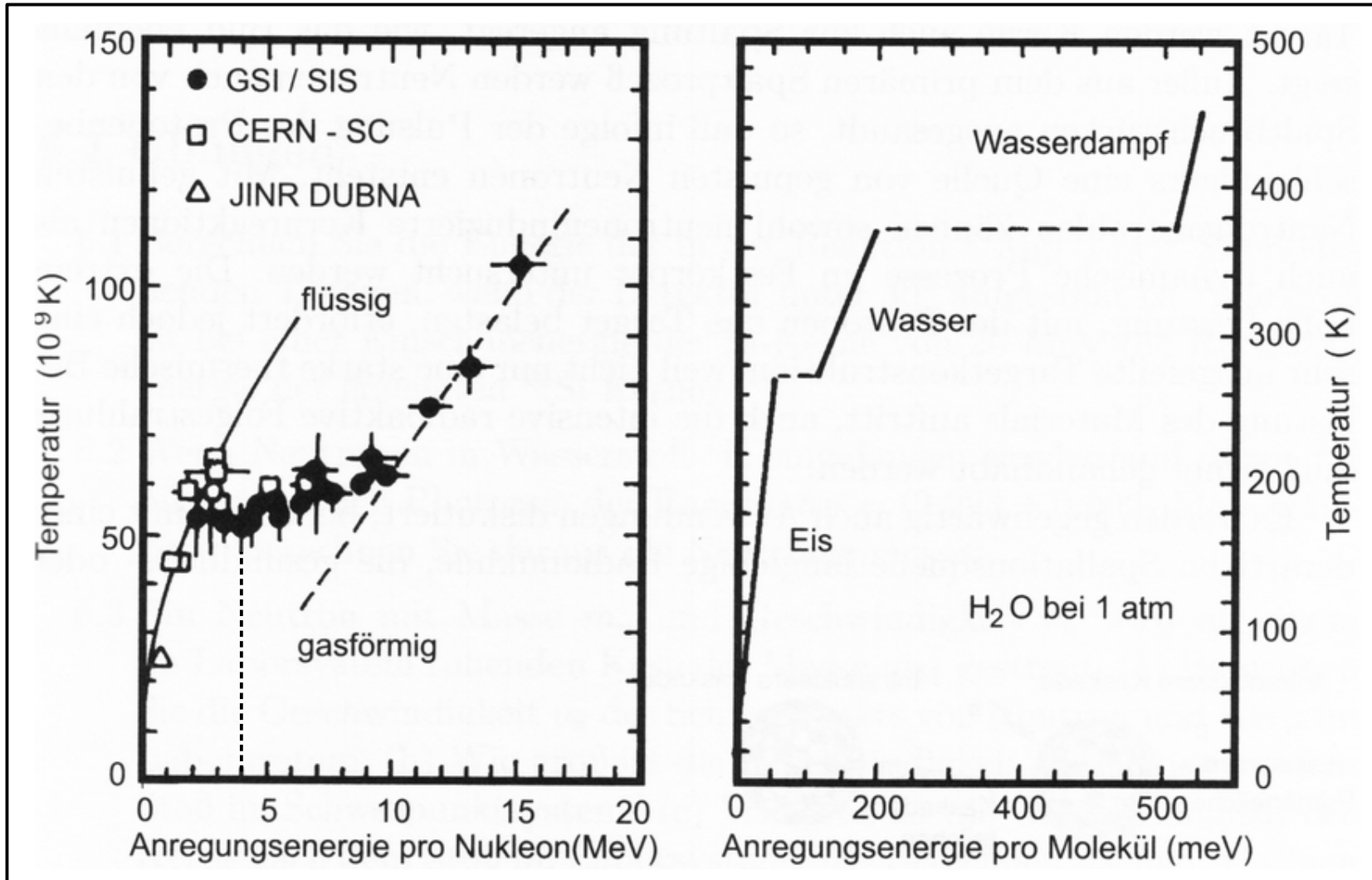
$$E_{ges} = \sum_{\substack{\text{Flugrichtung} \\ \text{Projektil/Target}}} E_i \quad (\text{Energie in “remnant”})$$

- **Temperatur** aus Verteilung der Energie einzelner Teilchen



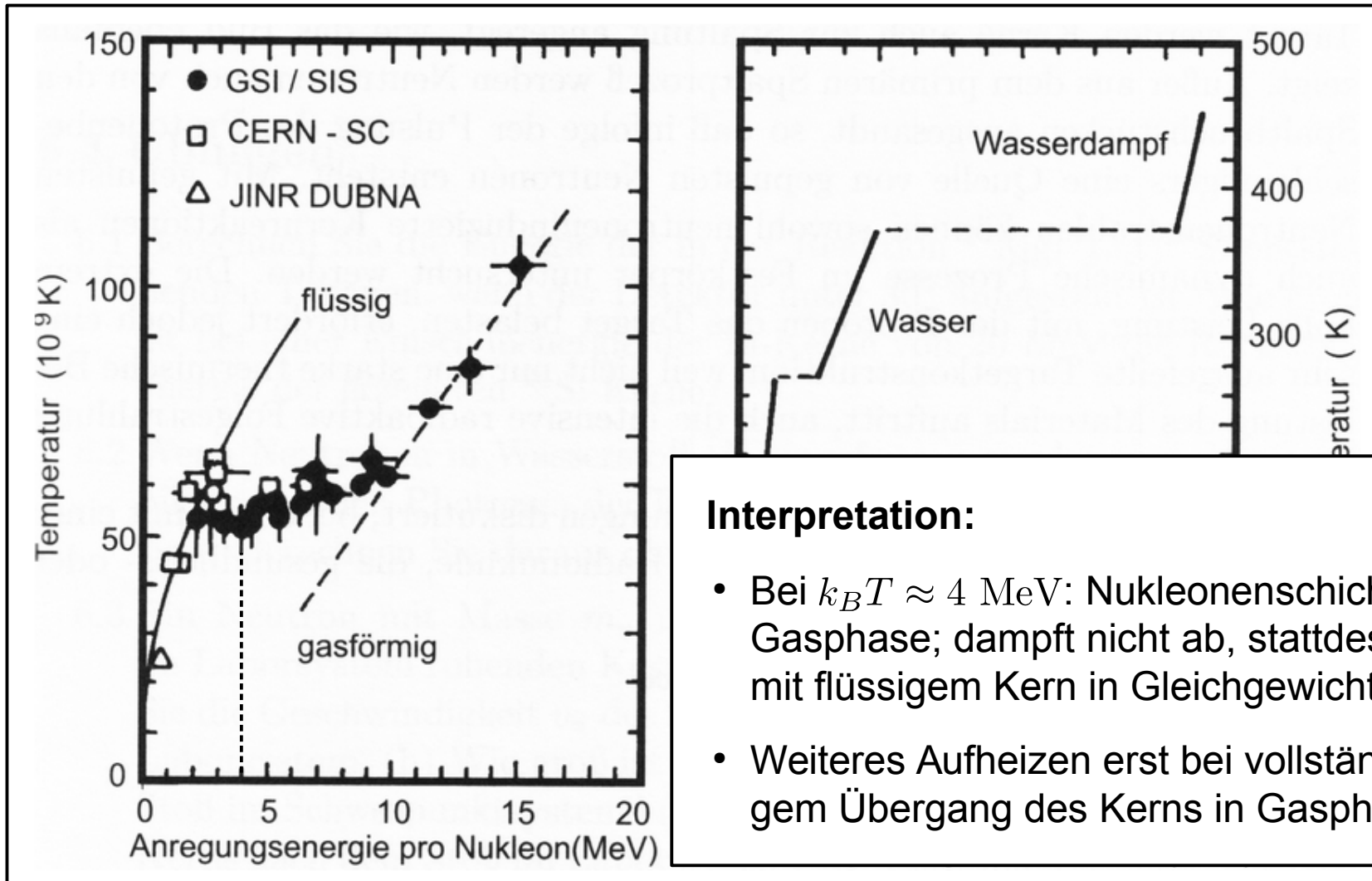
Phasenübergänge der Kernmaterie

- Temperatur der Fragmente bei streifender Kollision zweier ^{197}Au -Kerne als Funktion der Anregungsenergie pro Nukleon:



Phasenübergänge der Kernmaterie

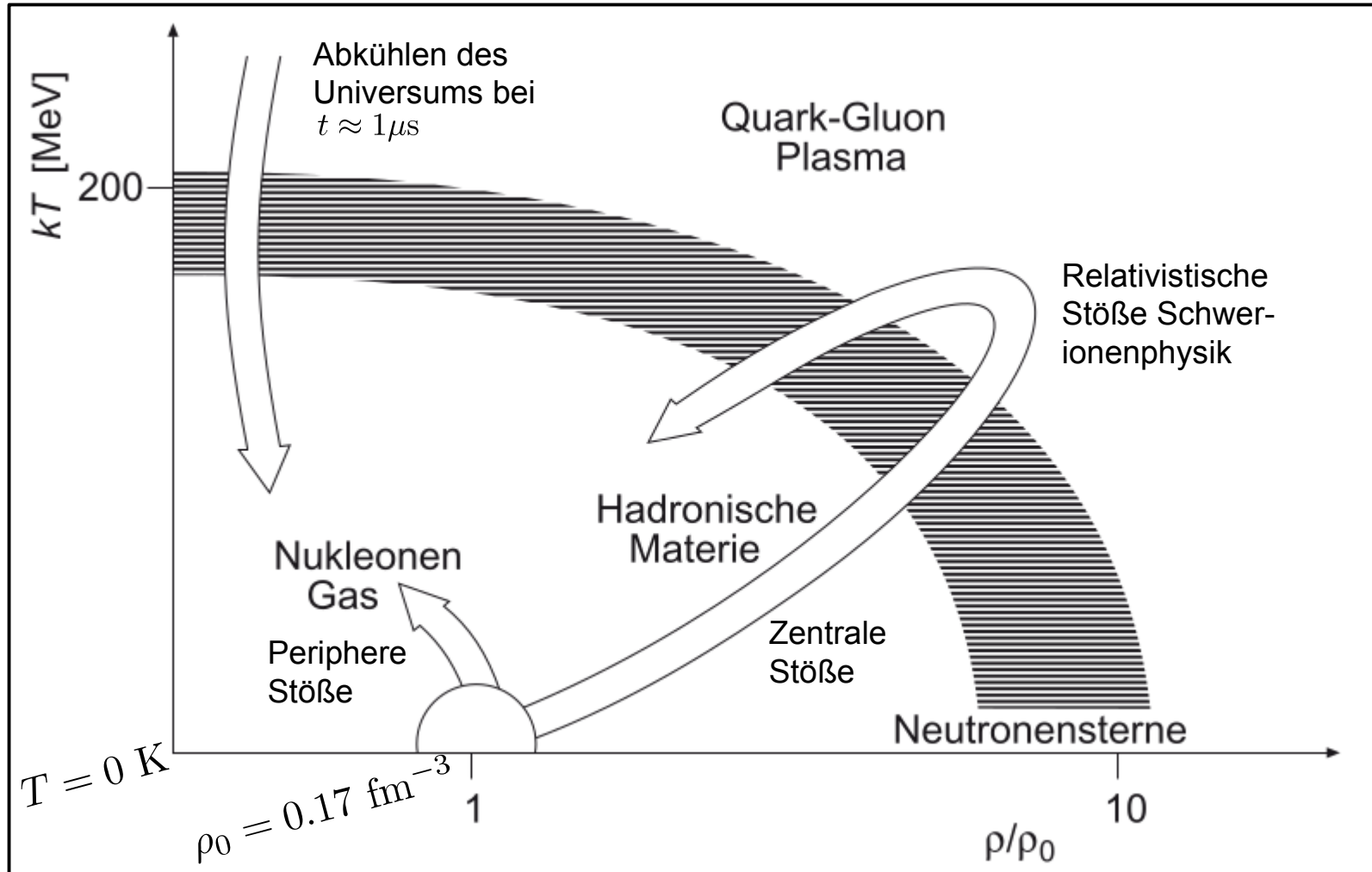
- Temperatur der Fragmente bei streifender Kollision zweier ^{197}Au -Kerne als Funktion der Anregungsenergie pro Nukleon:



Interpretation:

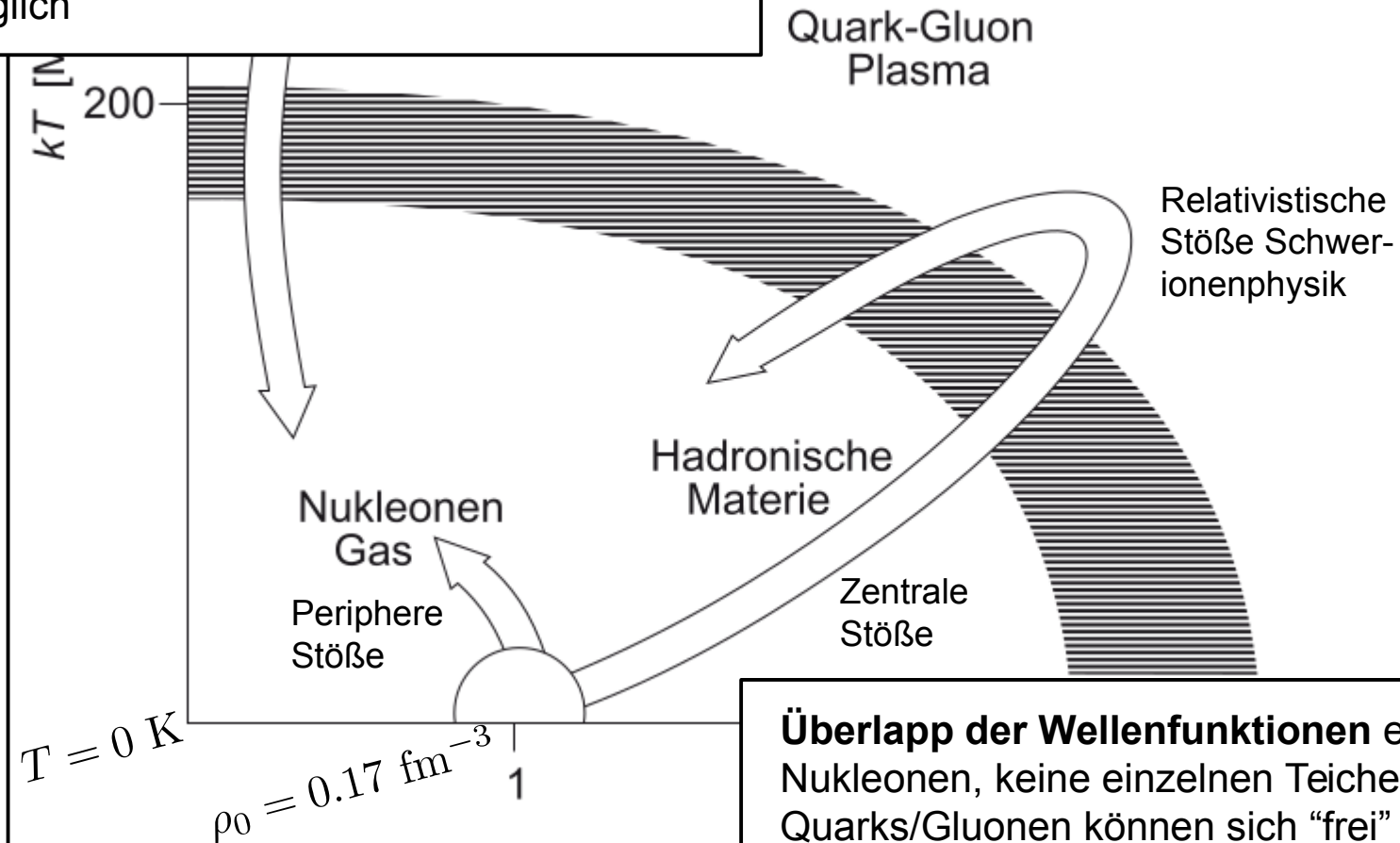
- Bei $k_B T \approx 4 \text{ MeV}$: Nukleonenschicht in Gasphase; dampft nicht ab, stattdessen mit flüssigem Kern in Gleichgewicht
- Weiteres Aufheizen erst bei vollständigem Übergang des Kerns in Gasphase

Phasendiagramm der Kernmaterie



Was ist Quark-Gluon-Plasma (QGP)?

Viele Nukleonstöße (Quark-/Gluonenaustausch) → **Zuordnung Quark/Gluon** zu einem gebundenen Zustand nicht mehr möglich



Überlapp der Wellenfunktionen einzelner Nukleonen, keine einzelnen Teilchen mehr → Quarks/Gluonen können sich "frei" im gesamten Kernvolumen bewegen

Was ist Quark-Gluon-Plasma (QGP)?

Viele Nukleonstöße (Quark-/Gluonenaustausch) → **Zuordnung Quark/Gluon** zu einem gebundenen Zustand nicht mehr möglich

kT [MeV]

200

Quark-Gluon
Plasma

Relativistische
Stöße Schwer-
ionenphysik

Hadronische
Materie

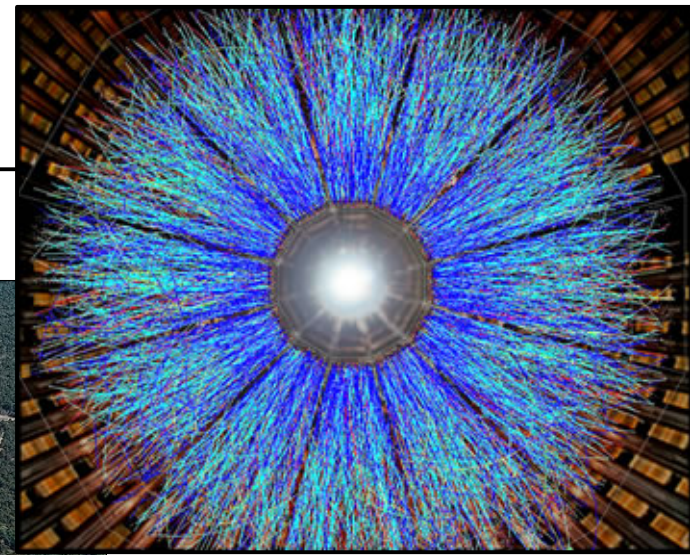
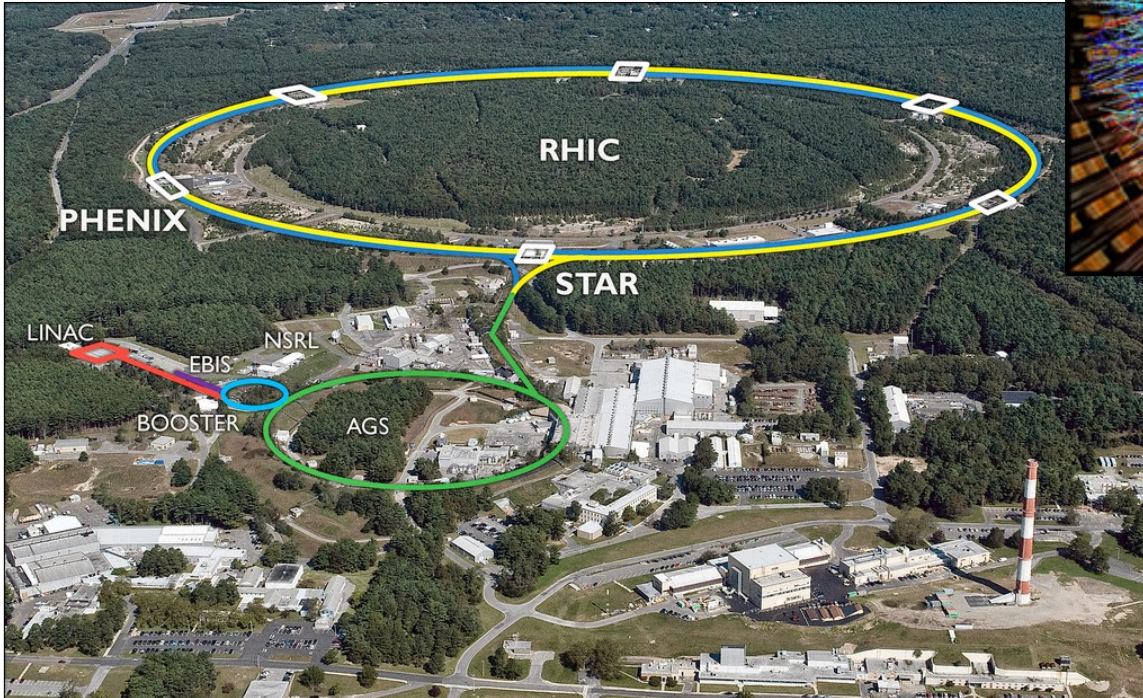
Zentrale
Stöße

- Phasenübergang zum QGP noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen
- QGP nicht hadronisch meßbar → auf dem Weg nach außen kühlen sich Quarks und Gluonen ab und hadronisieren
- Analogie: Temperatur im Inneren der Sonne nicht durch Photonen meßbar

Überlapp der Wellenfunktionen einzelner Nukleonen, keine einzelnen Teilchen mehr → Quarks/Gluonen können sich "frei" im gesamten Kernvolumen bewegen

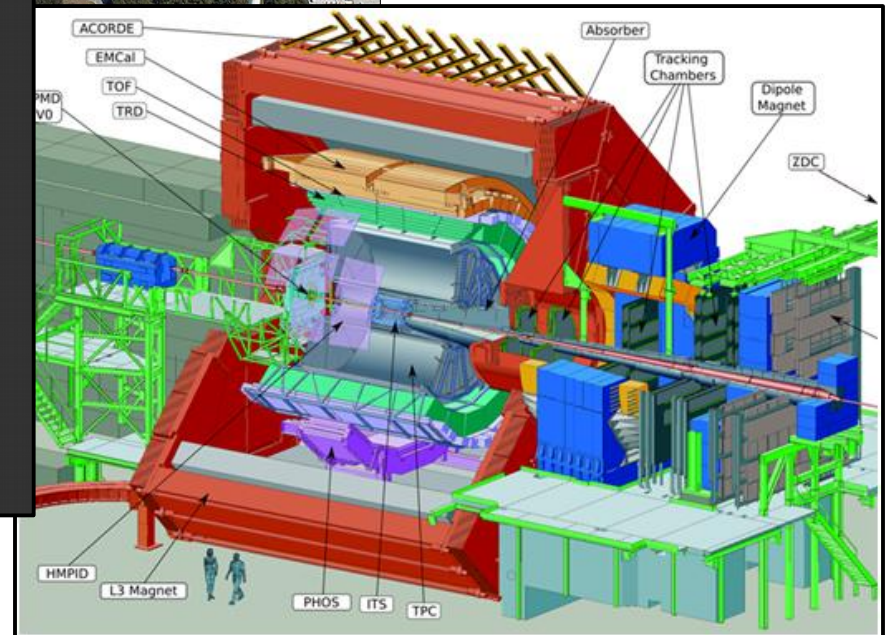
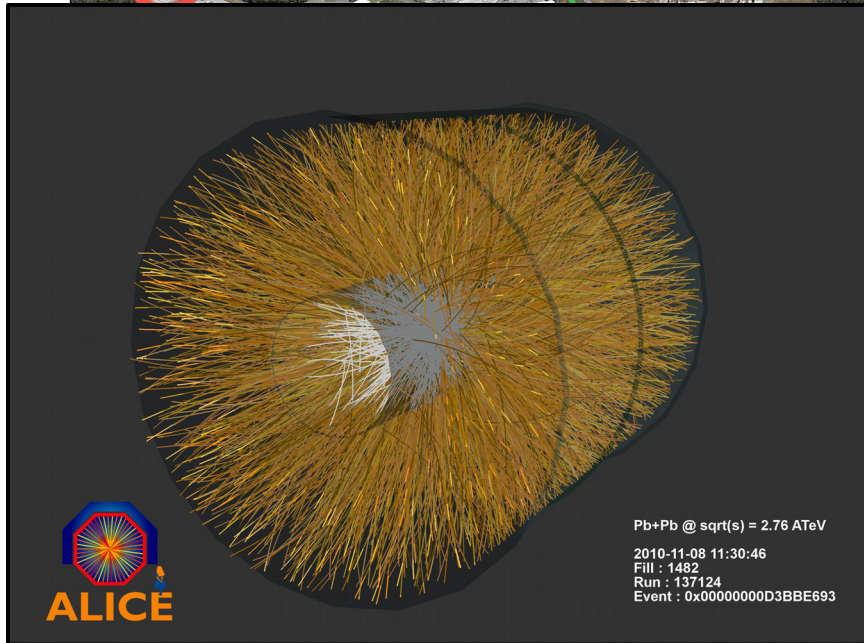
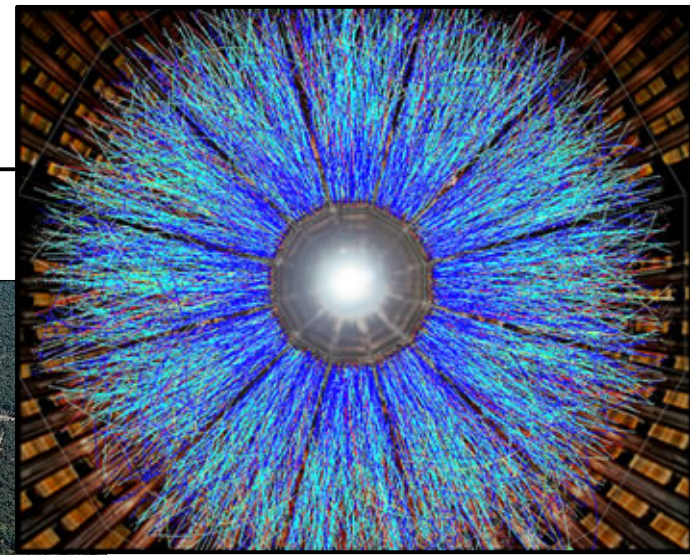
Experimente der Schwerionenphysik

- Experimente am **RHIC** in Brookhaven



Experimente der Schwerionenphysik

- Experimente am **RHIC** in Brookhaven



- ALICE** Experiment am LHC in CERN

Anmerkungen

- Anwendung thermodynamischer Begriffe (wie Temperatur!) nur zulässig:
 - Bei **großer Teilchenanzahl**
 - Im **thermischen Gleichgewicht**
- Verwendung dieser Begrifflichkeiten im Rahmen dieser Einschränkungen jedoch möglich und erfolgreich

Kapitel 6.4: Nukleare Astrophysik

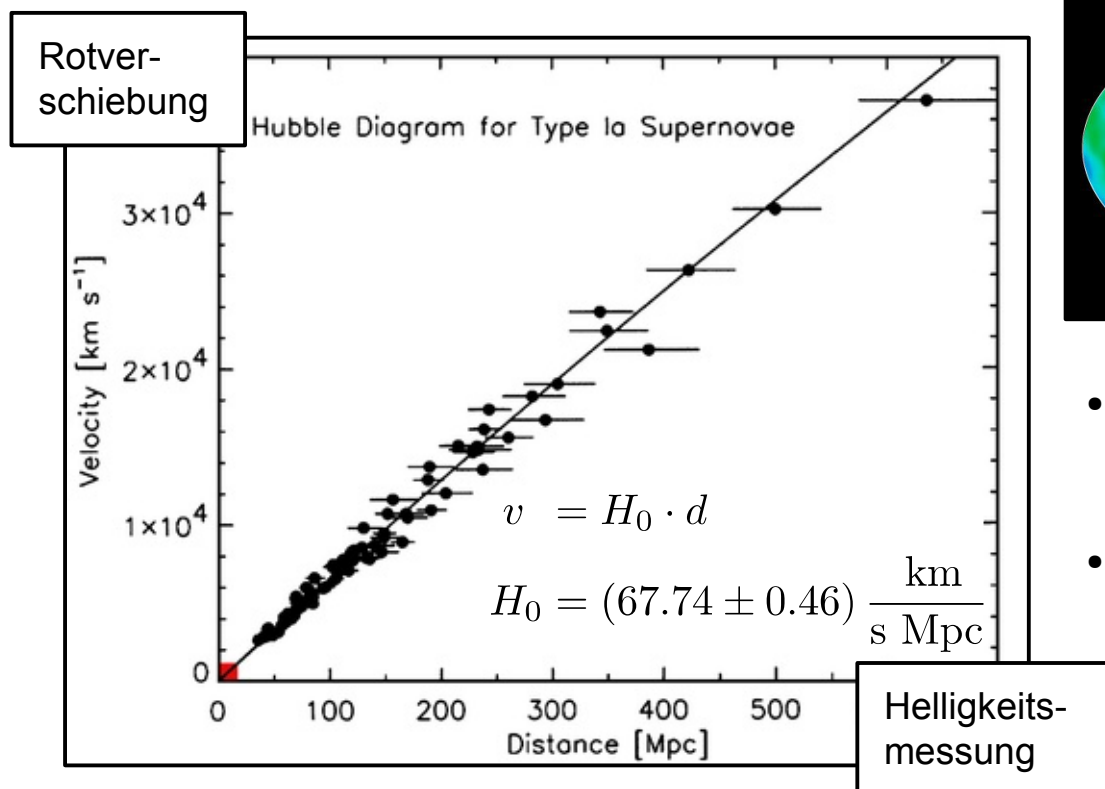


Urknall-Theorie

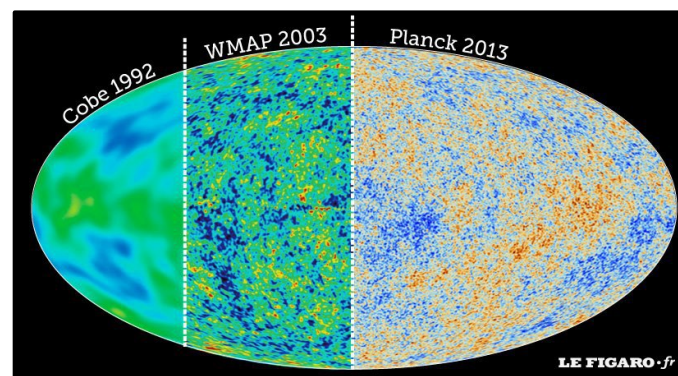
- Beginn des Universums aus **Urknall-Singularität** (vor $(13.81 \pm 0.04) \cdot 10^9$ Jahren)
- Gründet auf zwei bahnbrechenden Beobachtungen der Astronomie:

Galaxien entfernen sich von uns

- isotrop über Himmel verteilt

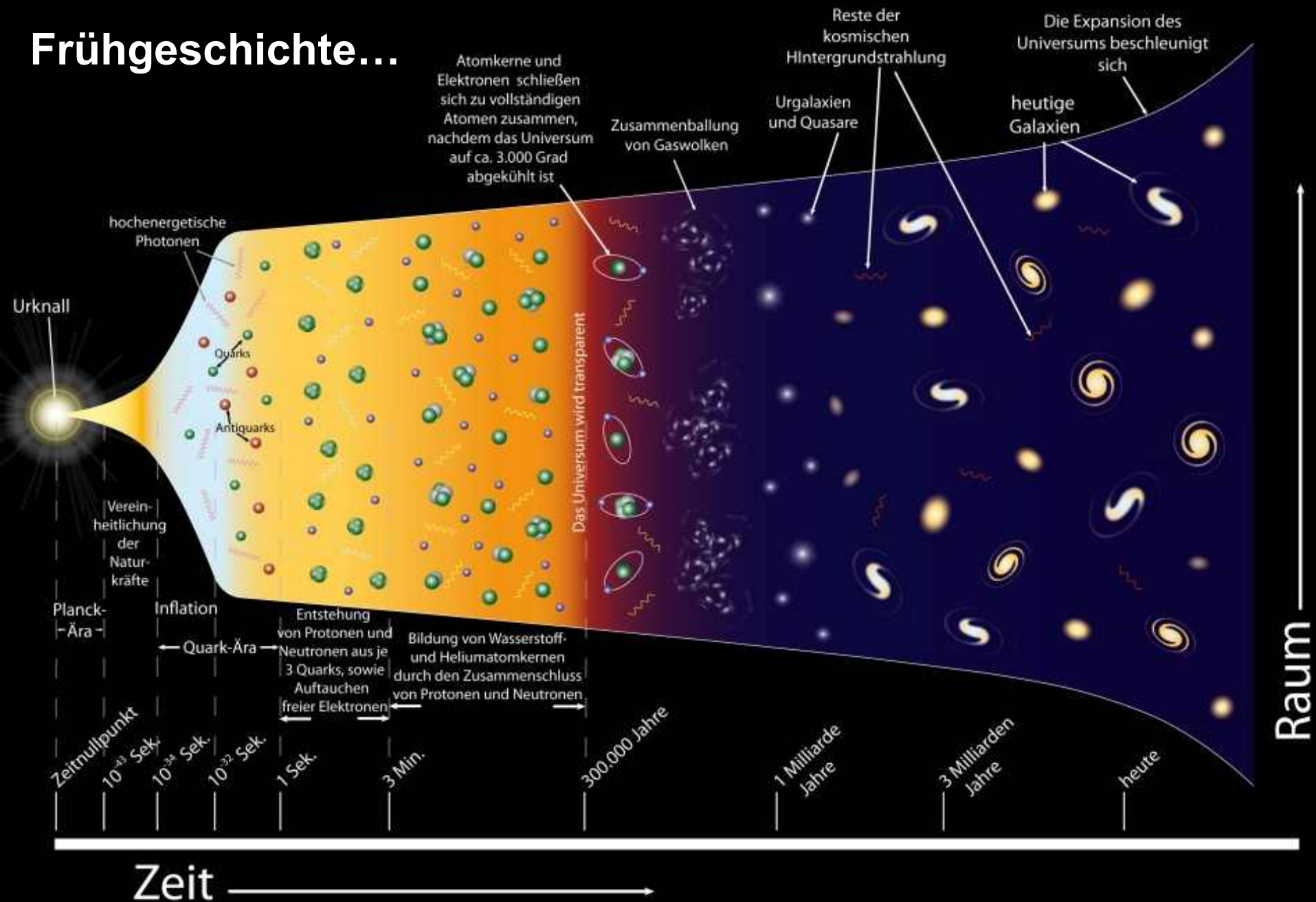


Kosmische Hintergrundstrahlung (CMB)



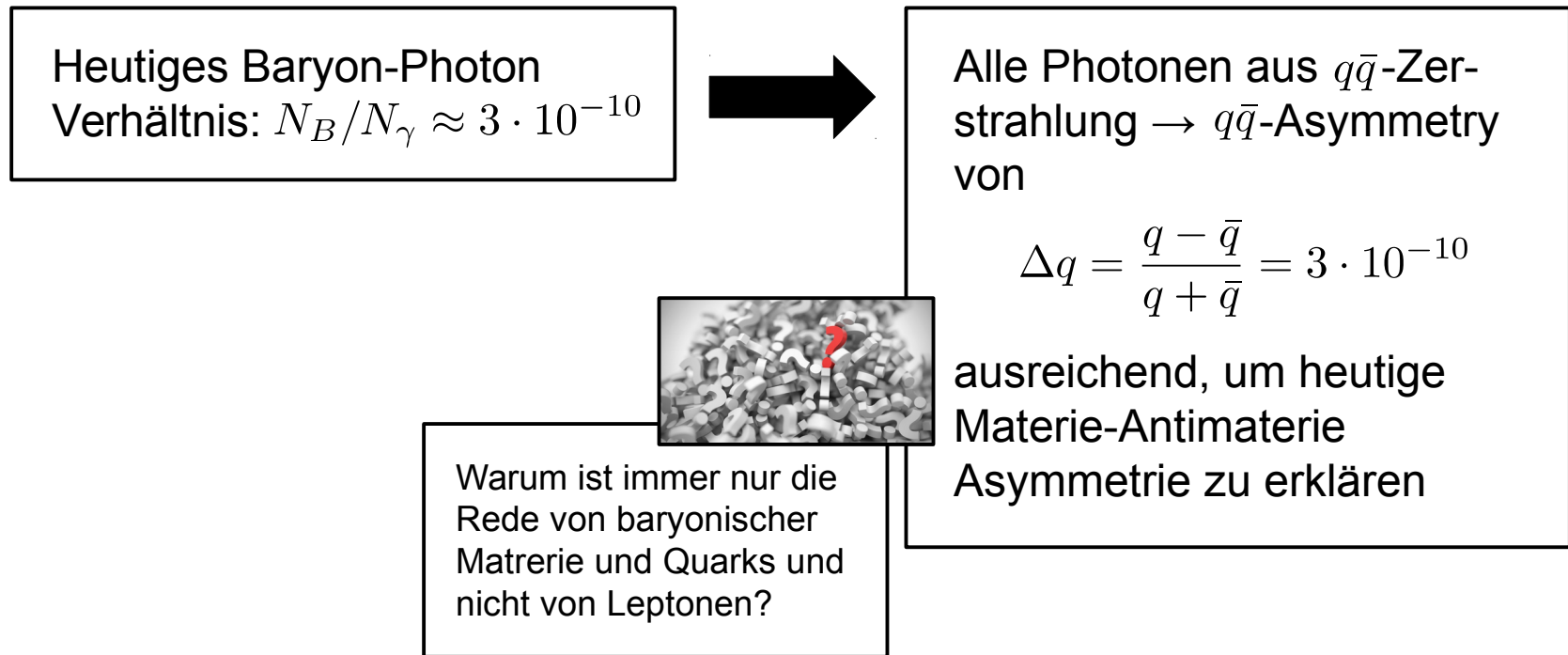
- Isotrope Schwarzkörperstrahlung von $T=2.7\text{ K}$
- Echo des Urknalls ($\rightarrow 380'000$ Jahre nach dem Urknall)

Frühgeschichte...



Materie-Antimaterie Asymmetrie

- Wir beobachten, dass unser **Universum aus Materie** und nicht aus Antimaterie besteht:
- Annahme: Fermionen und Antifermionen im frühen Universum im Gleichgewicht → Paarvernichtung zu Photonen



- **Voraussetzungen:** CP-Verletzung, Baryonzahlverletzung, thermisches Ungleichgewicht

Materie-Antimaterie Asymmetrie

$$t \approx 10^{-35} \text{ s}$$

- Vereinheitlichung aller Kräfte (z.B. in **GUT Theorien**
 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow SU(5)$)
- Alle Fermionen können ineinander übergehen z.B. $X \rightarrow eq$ (\rightarrow Baryonenzahl verletzend)
- CP-Verletzung: $\sigma(X \rightarrow eq) \neq \sigma(\bar{X} \rightarrow e^+ \bar{q})$
- Thermisches Gleichgewicht: Produktion und Zerfall von X und \bar{X} gleichen sich aus.
- Erst beim Abkühlen des Universums wird Gleichgewicht gestört und CP-verletzender Zerfall des X -Bosons erzeugt **Baryonasymmetrie**

Materie-Antimaterie Asymmetrie

$$t \approx 10^{-35} \text{ s}$$

- Vereinheitlichung aller Kräfte (z.B. in **GUT Theorien**
 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow SU(5)$)
- Alle Fermionen können ineinander übergehen z.B. $X \rightarrow eq$ (\rightarrow Baryonenzahl verletzend)
- CP-Verletzung: $\sigma(X \rightarrow eq) \neq \sigma(\bar{X} \rightarrow e^+ \bar{q})$
- Thermisches Gleichgewicht: Produktion und Zerfall von X und \bar{X} gleichen sich aus.
- Erst beim Abkühlen des Universums wird Gleichgewicht gestört und CP-verletzender Zerfall des X -Bosons erzeugt **Baryonasymmetrie**

CP-Verletzung:

- möglich und existiert in SM!
- Aber Betrag (bekannter CP-Verletzung) zu klein um Materie-Antimaterie-Asymmetrie erklären zu können

Materie-Antimaterie Asymmetrie

$$t \approx 10^{-35} \text{ s}$$

- Vereinheitlichung aller Kräfte (z.B. in **GUT Theorien** $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow SU(5)$)
- Alle Fermionen können ineinander übergehen z.B. $X \rightarrow eq$ (\rightarrow Baryonenzahl verletzend)
- CP-Verletzung: $\sigma(X \rightarrow eq) \neq \sigma(\bar{X} \rightarrow e^+ \bar{q})$
- Thermisches Gleichgewicht: Produktion und Zerfall von X und \bar{X} gleichen sich aus.
- Erst beim Abkühlen des Universums wird Gleichgewicht gestört und CP-verletzender Zerfall des X -Bosons erzeugt **Baryonasymmetrie**

Baryonenzahlverletzung:

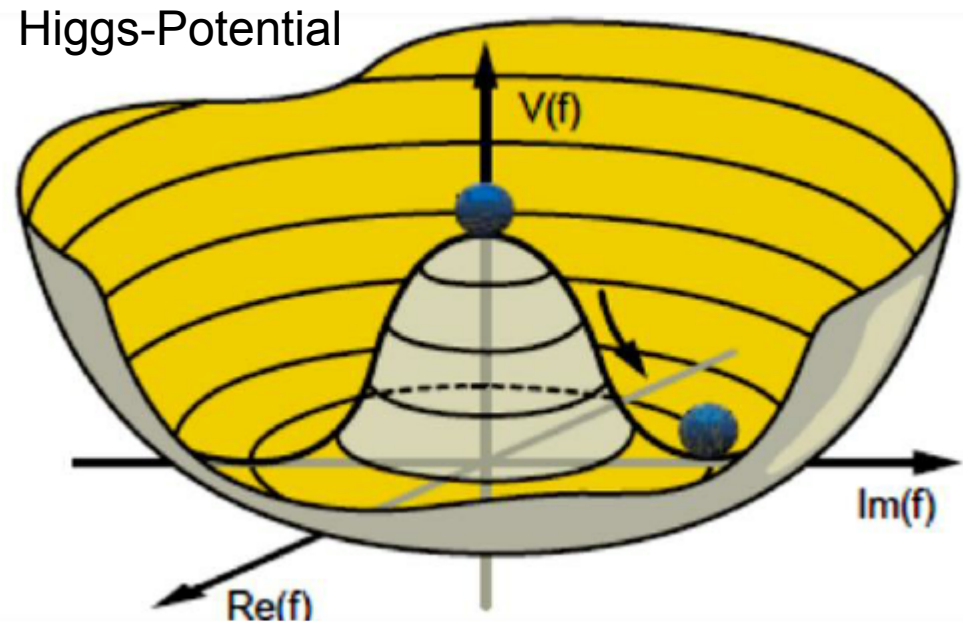
- z.B. durch Protonzerfall \rightarrow bisher nicht nachgewiesen
- Vorhersage GUT: $\tau_p \approx 4.5 \cdot 10^{29} \text{ a} \leftrightarrow$ Beobachtung: $\tau_p \gtrsim 6 \cdot 10^{31} \text{ a} @ 95\% \text{ CL}$

Elektroschwacher Phasenübergang

$$t \approx 10^{-11} \text{ s}$$

Oberhalb $k_B T \approx 100 \text{ GeV}$:

Schwache und elektromagnetische Wechselwirkung gleich (\rightarrow siehe weiterer Verlauf der VL)



Unterhalb $k_B T \approx 100 \text{ GeV}$:

Spontane Symmetriebrechung führt zu Masse von W/Z-Boson

Ausbildung von Hadronen

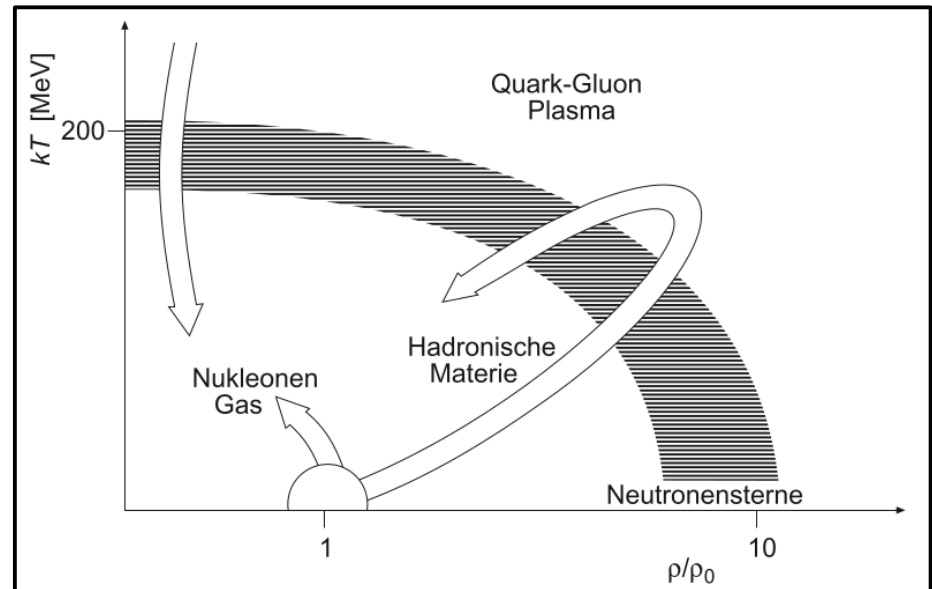
$$t \approx 10^{-6} \text{ s}$$

Oberhalb $k_B T \approx 100 \text{ MeV}$:

Freie Quarks und Gluonen (Quark-Gluon-Plasma)

- Ausbildung von p und n im Gleichgewicht (so lange bis $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ aufgrund von $m_n > m_p$ "ausfriert")
- Danach abnehmendes Verhältnis $p : n$

Unterhalb $k_B T \approx 100 \text{ MeV}$:
Ausbildung von Hadronen



Entkopplung Neutrinos

$$t \approx 10^{-0} \text{ s}$$

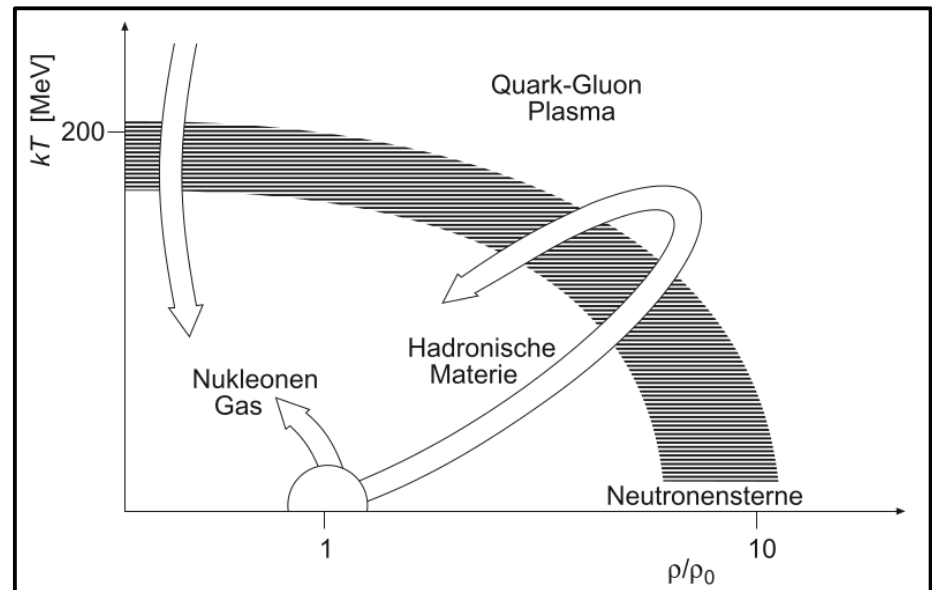
Oberhalb $k_B T \approx 1 \text{ MeV}$:

Neutrinos halten Gleichgewicht zwischen Protonen und Neutronen aufrecht

- Verhältnis $p : n = 6 : 1$ durch unterschiedliches "ausfrieren aufgrund verschiedener Masse")
- Durch anschließenden β -Zerfall: $p : n = 7 : 1$

Unterhalb $k_B T \approx 1 \text{ MeV}$:

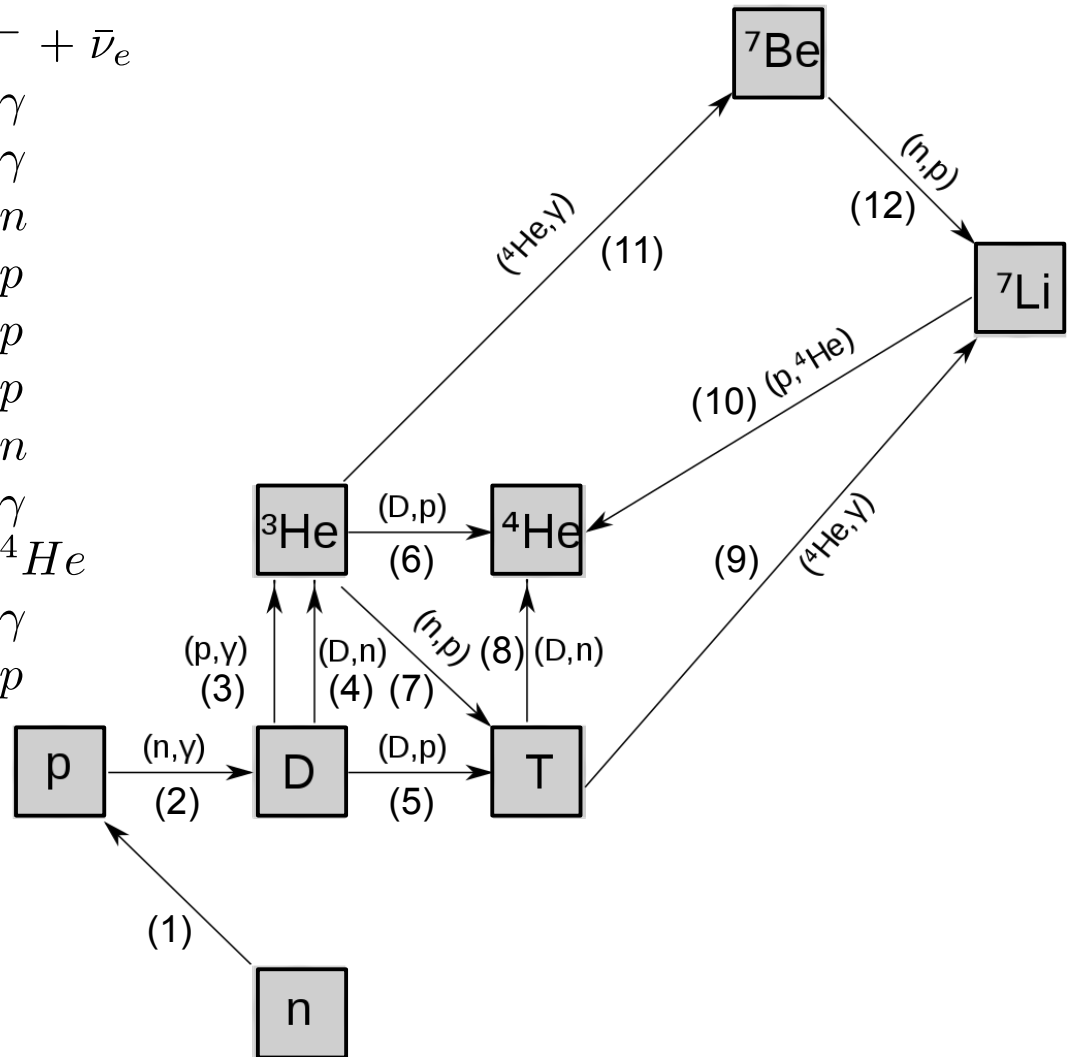
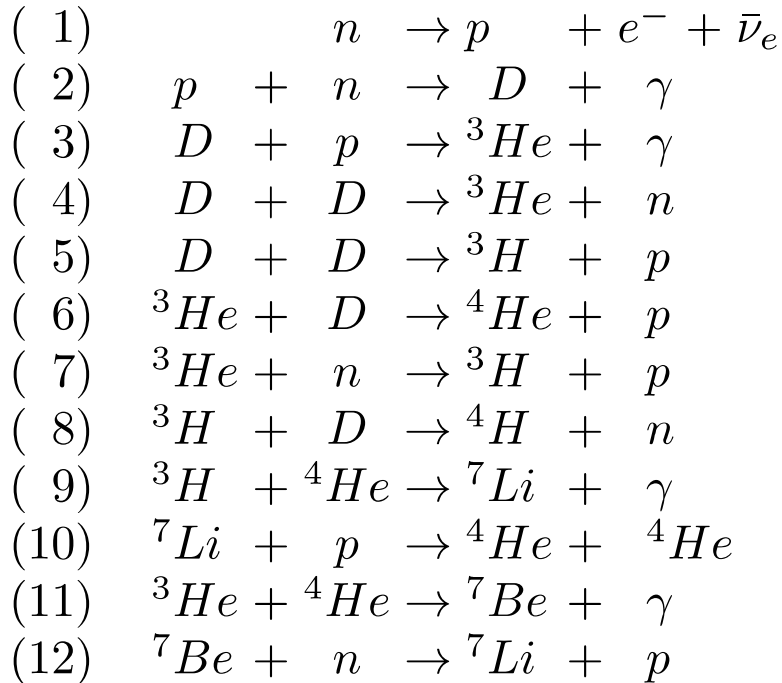
Neutrinos entkoppeln \rightarrow
quasi frei (snapshot Universum nach einer Sekunde)



Primordiale Elementsynthese (BBN)

$$t \approx 10^+ 2 \text{ s}$$

- 12 dominante Prozesse, viele weitere möglich



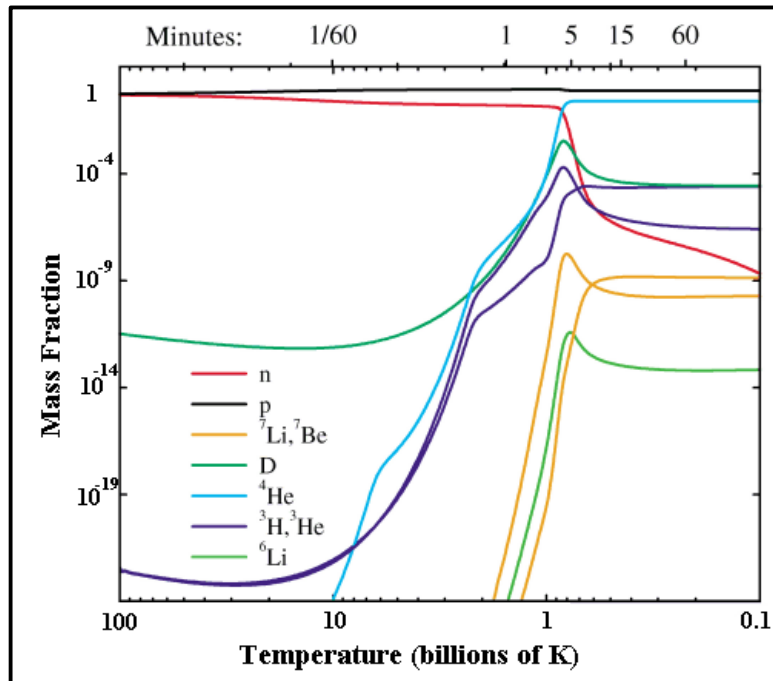
Primordiale Elementsynthese (BBN)

$$t \approx 10^+ 2 \text{ s}$$

- Praktisch alle Neutronen in $\frac{4}{2}He$ gebunden
- Primordialer **Massenanteil Helium** zu Baryonischer Materie insgesamt:

$$\frac{\rho_{He}}{\rho_B} = \frac{4 \cdot (n/2)}{n + p} = \frac{2n/p}{1 + n/p} \approx 0.25$$

- Modellrechnungen:



${}^4\text{He} : 0.25$

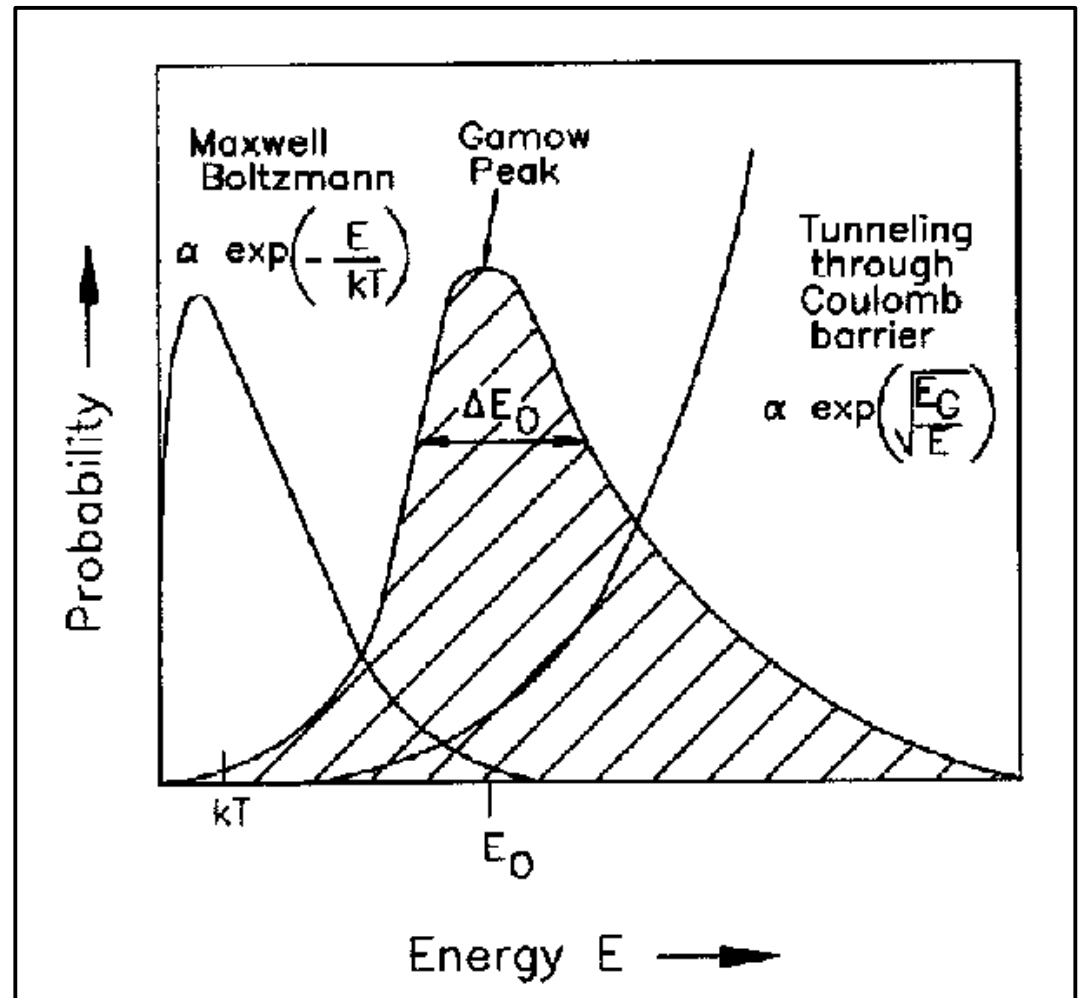
$d, {}^3\text{He} : \mathcal{O}(10^{-5})$

${}^7\text{Be}, {}^7\text{Li} : \mathcal{O}(10^{-10})$

**Exakte Vorhersagen
der Kernphysik!**

Elementsynthese in Sternen

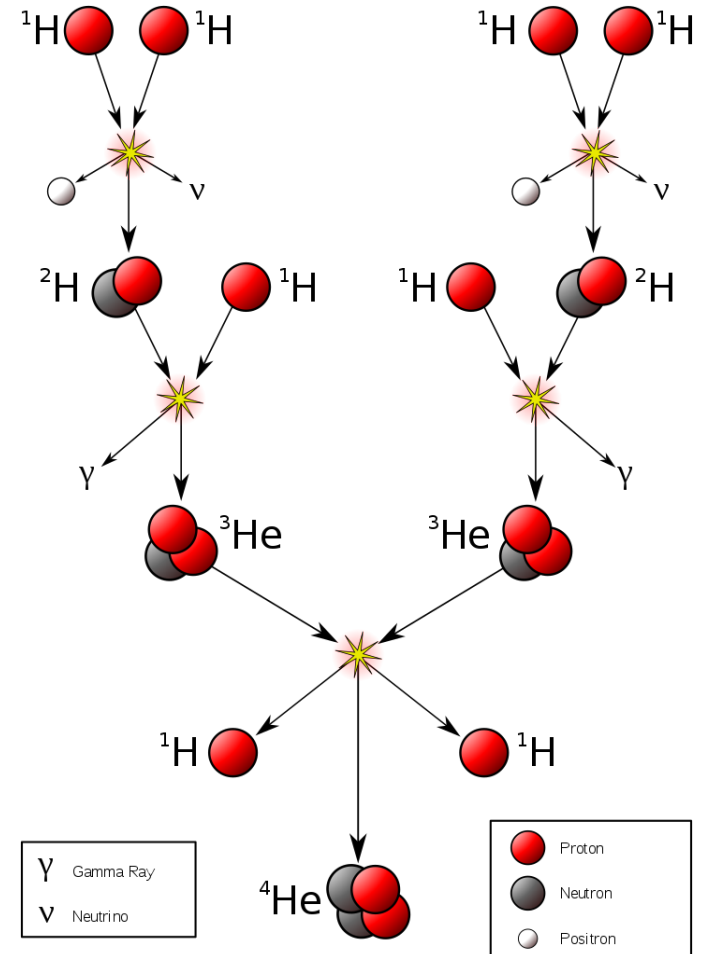
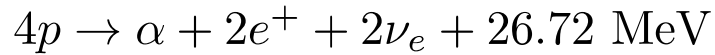
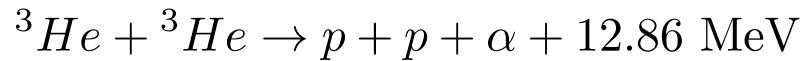
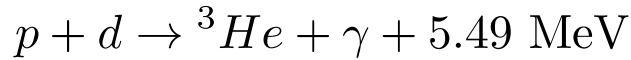
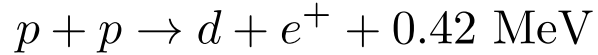
- Siehe [VL-13 Folie 9](#):
- Fusion höherer Elemente (mit höherer Ordnungszahl) erfordert **höhere Temperatur**, um Tunneln zu ermöglichen



Elementsynthese in Sternen (pp-Zyklus)

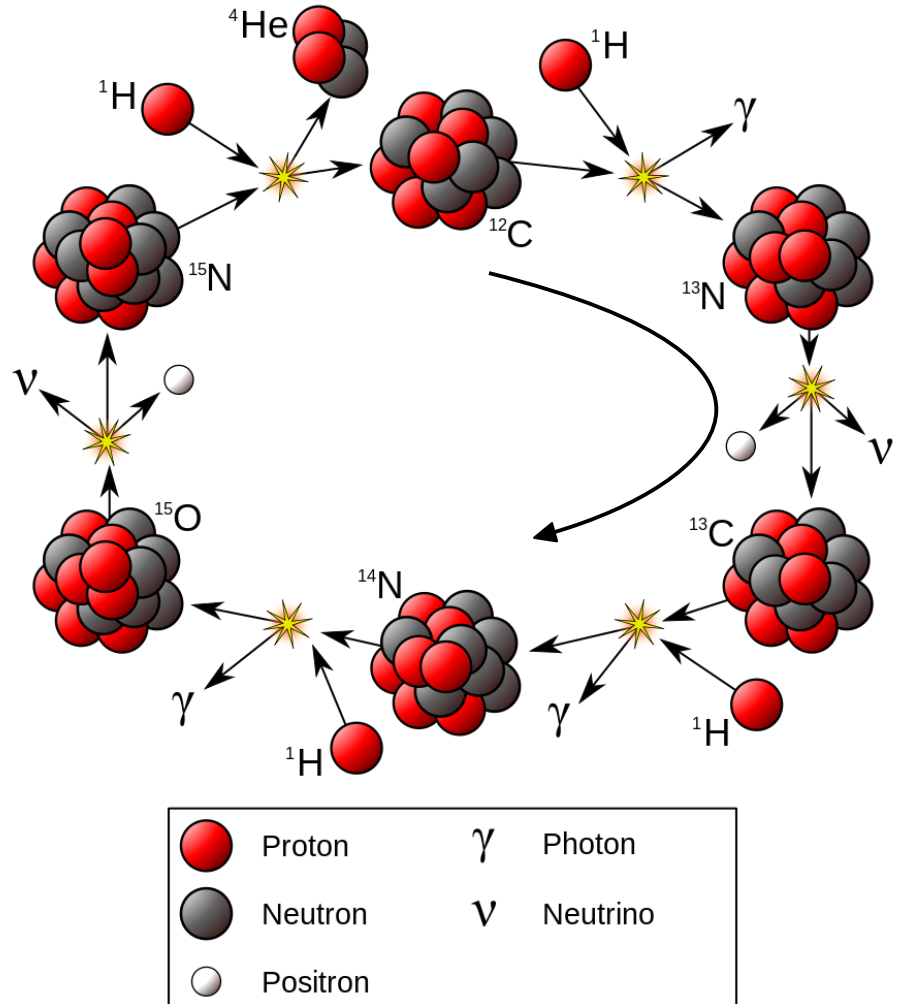
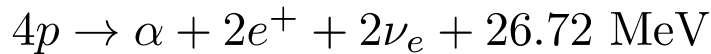
- Bei Hauptreihensternen: **Wasserstofffusion:**

$$T > 10^7 \text{K}$$



Elementsynthese in Sternen (CNO-Zyklus)

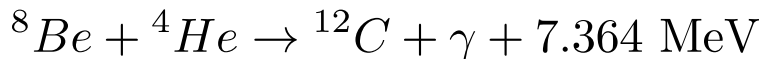
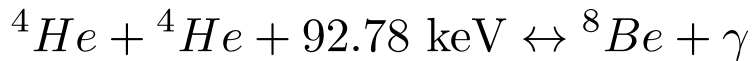
- In größeren Sternen: Wasserstofffusion **Kohlenstoff katalysiert**:
- Schnellerer Ablauf der Fusionsreaktion
- Erfordert:
 - A priori Anwesenheit von Kohlenstoff
 - höhere Temperaturen
- Netto gleiche Reaktion, gleicher Energiegewinn, wie zuvor:



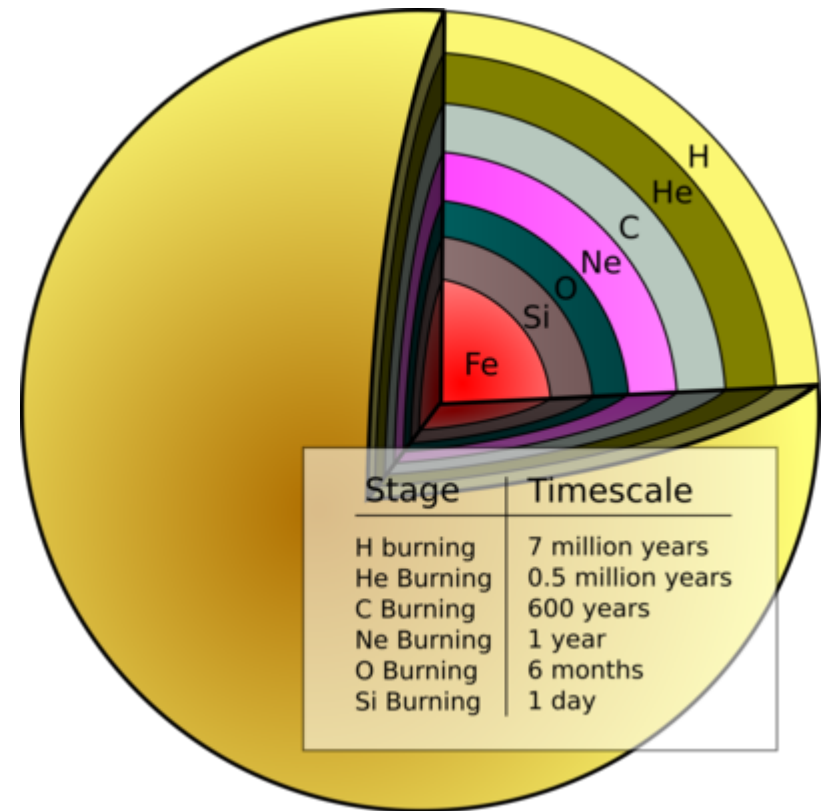
Sternenende

- Kernreaktion endet (schleichend), wenn aller Wasserstoff verbraucht
- Stern fällt in sich zusammen und glüht aus (→ **weißer Zwerg**, Sonne bei Hälfte dieses Lebenszyklus)
- Wenn Stern groß genug reicht Temperatur beim Einsturz aus, um **Fusion von Helium** und schwererer Elemente einzuleiten → schnelles Ausbrennen, z.B.

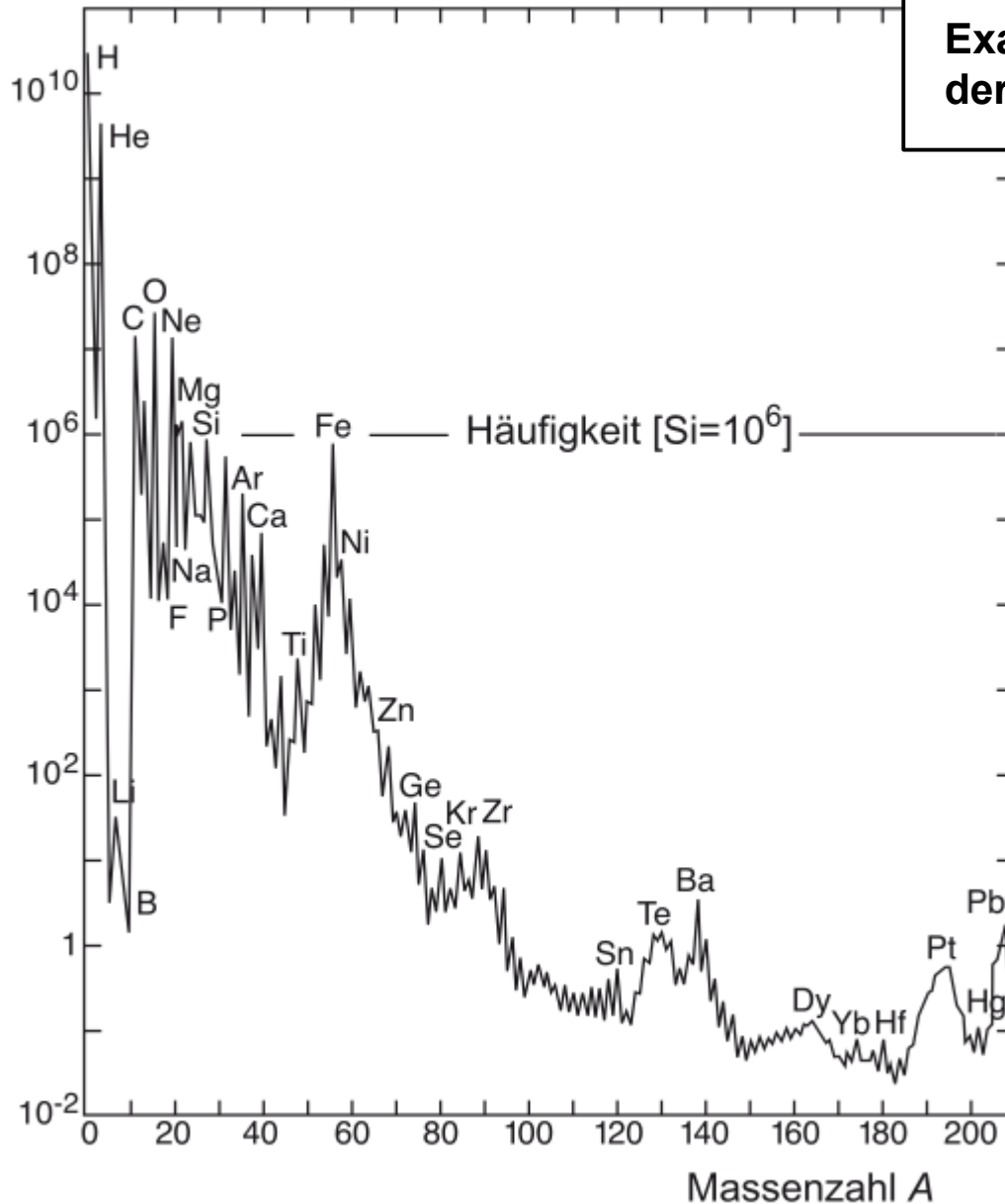
Bei $T > 2 \cdot 10^8$ K



erlaubt Fusion bis Eisen. Noch schwerere Elemente dann durch Neutronanlagerung



Elementvorkommen im Universum



Exakte Vorhersagen
der Kernphysik!

- Primordiale Elementsynthese ebenso wie Genesis schwerer Elemente in Sternen exakt vorhergesagt.
- Genaue Beschreibung der Elementvorkommen im Universum wird so zum **Zeugen für Urknall-Theorie** und der Thermodynamik im Inneren der Sterne



KW-21/22

4 Kernmodelle

4.1 Eigenschaften stabler Kerne

4.2 Fermigas und Tröpfchenmodell

4.3 Schalenmodell

4.4 Struktur der Kernkräfte

KW-22

5 Instabile Kerne

5.1 Radioaktives Zerfallsgesetz

5.2 Alpha-, Beta-, Gammastrahlen

5.3 Kernspaltung und Kernfusion

KW-23

6 Anwendungen der Kernphysik

6.1 Energieerzeugung

6.2 Kernphysik in der Medizin

6.3 Nukleare Thermodynamik

6.4 Nukleare Astrophysik

KW-24

7 Symmetrien und Erhaltungssätze

7.1 Symmetrien und Quantenzahlen

7.2 Diskrete und kontinuierliche Symmetrien

7.3 Schlüsselexperimente zu C-, P-, CP-Verletzung

KW-25/26

8 QCD: Quarks, Gluonen und Hadronen

8.1 Quarkmodell und Hadronen

8.2 Quarkonium

8.3 Farbwechselwirkung in der QCD

8.4 Struktur der Nukleonen und Partonmodell

