

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie Sommersemester 2020 – 8. Vorlesung

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



CMS Bildquelle:

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Zertifikat seit 2010 audit familiengerechte hochschule



Kurze Wiederholung

- Etwa 5000 verschiedene **Nuklide** (= gebundene Kernsysteme) theoretisch möglich, davon bisher knapp 4000 beobachtet. Wenige stabil; Großteil künstlich erzeugt.
- **Strahlungsarten** α , β , γ entstehen durch verschiedene Wechselwirkungsarten
 - Erklärung durch Energie- & Symmetriebetrachtungen (Tröpfchen-/Schalenmodell) Instabile Kerne ermöglichen eine Vielzahl von Anwendungen
- Strahlungseigenschaften: frühe Erkenntnisse über die Natur der zugrundeliegenden Wechselwirkungen und der zerfallenden Kerne, z. B.:
 - Kontinuierliches Betaspektrum \rightarrow Neutrinohypothese (Pauli), neue "schwache" Wechselwirkung (Fermi), Spinstatistik (Bohr, Heisenberg, Pauli, ...)
 - Alphazerfall, Lebensdauer/Energie \rightarrow wellenmechanischer Tunneleffekt (Gamow) Winkel- und Energiemessungen in der Gamma-Spektroskopie \rightarrow Multipolstrahlung, Kernspins (Weisskopf, ...)



Sommersemester 2020



Kurze Wiederholung

- "Inverser β -Zerfall" als wichtige Nachweisreaktion von Neutrinos in großen Detektoren (verzögerte Koinzidenz aus Positronannihilation, Neutroneneinfang)
- Schwache Wechselwirkung birgt auch extrem seltene Zerfälle ($t_{1/2} > 10^{21}$ a); interessante teilchenphysikalische Implikationen (Neutrinos ...)
- Schwere Kerne: Bildung leichter durch die starke Wechselwirkung gebundener Systeme in Kern, besonders Alphateilchen
 - Freisetzung von Bindungsenergie durch Emission des Alphateilchens
 - Zweikörperzerfall: monoenergetische α , typische Energie: einige MeV
- Natürliche Radioaktivität und Zerfallsreihen: lange Halbwertszeit von α -Zerfällen steuert Zerfallsreihen schwerer Elemente \rightarrow radioaktives Gleichgewicht.



Sommersemester 2020

Aufgabe 14

- Welche der folgenden Aussagen über α -Strahlung sind korrekt?
- A. α -Strahlung tritt vornehmlich in schweren Kernen auf.
- B. Aufgrund der Zerfallskinematik wird eine kontinuierliche Verteilung der Energien von Alphateilchen erwartet.
- C. Aufgrund der Zerfallskinematik werden diskrete α -Energien erwartet. Pro Nuklid können auch mehrere α -Linien auftreten.
- D. Die Wahrscheinlichkeit für α -Strahlung ist proportional zur Tunnelwahrscheinlichkeit der Alphateilchen durch den "Coulombwall".
- E. Die Zerfallsprodukte langlebiger α -Strahler wie Uran sind ein wichtiger Bestandteil der natürlichen Radioaktivität.
- Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS [link]



Sommersemester 2020





Kapitel 4

Anwendungen der Kernphysik







Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.









Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Kapitel 4.2

Kernspaltung und Kernfusion



Uberblick Kernspaltung

- Kernspaltung: **spontan** oder durch Neutronenbeschuss induziert
- Forschungsgeschichte:
 - Ab 1933: künstliche Radioaktivität (Joliot-Curie, Joliot, Fermi)
 - 1938: Nachweis von Barium bei **Beschuss von Uran mit Neutronen** (Hahn, Straßmann)
 - 1939: theoretische Deutung als Kernspaltung (Meitner, Frisch)
 - 1942: erste kontrollierte Kettenreaktion (Fermi)



Versuchsaufbau von Hahn und Straßmann



Sommersemester 2020

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

<u>Deutsches Museum München</u>





Spontane Kernspaltung

Energiebilanz für schwere Kerne

- Bindungsenergie pro Nukleon fällt mit A → Spaltung in zwei stärker gebundene Tochterkerne energetisch möglich
- Potenzialbarriere für Spaltung (vgl. Alphazerfall): Tunnelwahrscheinlichkeit extrem gering, nur für wenige Nuklide (U, Th, Transurane) in Konkurrenz zu anderen Zerfallsarten
- Dynamische **Deformation** (Tröpfchenmodell)
 - Änderung von Oberflächen- und Coulombterm
 - Überwindung der Spaltbarriere falls **Energiegewinn durch Deformation**





Sommersemester 2020



Induzierte Kernspaltung

- Überwindung der Spaltbarriere induziert durch **Teilchenbeschuss** (meist Neutronen, aber auch α -Teilchen)
- Spaltbarkeit durch thermische/schnelle Neutronen?
 - Abschätzung Thermalisierungsenergie: *E*_{kin} ≈ *k*_{*B*}·300 K ≈ 0,025 eV
 - → Energiegewinn schon für **thermische** Neutronen
 - (kleiner Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang)



²³⁵U (= ug-Kern) + n \rightarrow ²³⁶U* (= gg-Kern) \rightarrow freiwerdende Paarungsenergie, \rightarrow Abfall des Spaltquerschnittes mit 1/v_n (Zeitdauer, die das n am Kern verweilt) Natürliches Uran: ²³⁸U + n \rightarrow ²³⁹U* \rightarrow Energiegewinn nur für E_{kin} > 0.7 MeV

Sommersemester 2020









Kernreaktoren

- Nukleare Kettenreaktion: mehr Spaltneutronen erzeugt als absorbiert
 - ²³⁵U: im Mittel **2,5 Neutronen** pro Spaltprozess, mittlere kinetische Energie ca. 1 MeV
 - Spaltung durch thermische Neutronen $(E_{kin} \approx 0.025 \text{ eV}) \text{ möglich, hoher Wirkungsquerschnitt}^{-1}$
 - Abbremsen der Spaltneutronen durch möglichst wenige elastische Stöße in Moderator (z. B. H₂O, ¹²C)
- Kontrollierte Kettenreaktion: Steuerung durch Elemente mit großem Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang (z. B. ¹⁰B, ¹¹³Cd)



Sommersemester 2020









Der erste künstliche* Spaltungsreaktor

- 1938: Spaltung eines Kerns setzt mehrere Neutronen frei \rightarrow zielgerichtete Nutzung?
- 1942: **E. Fermi** (U Chicago) erzielt die erste selbsterhaltende Kettenreaktion mit dem "Chicago Pile No. 1"
- Bauart: Uran(oxid)-Blöcke eingebettet in Graphit-Matrix (Moderator); Cadmiumstäbe (Neutronenabsorber) zur Steuerung

Erste natürlich vorkommende selbsterhaltende Kettenreaktion: Oklo-Urlanerzlager (Gabun), vor ca. 2 Milliarden Jahren aktiv über mehrere 100.000 Jahre





Sommersemester 2020





Kernreaktoren



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



1. Reaktortheorie 2. Reaktortechnik 3. Kraftwerkstechnik





Vier-Faktoren-Formel

- **Stabiler** Reaktorbetrieb: konstante Neutronenzahl beeinflusst durch

 - des Wirkungsquerschnitts (~10 eV) eingefangen zu werden
 - **Thermischer Nutzfaktor** Anteil der thermischen n, die dem Einfang in anderen Materialien (Moderator, Regelstäbe, ...) entgehen
 - **Regenerationsfaktor** *n*: zusätzliche n durch Spaltung von ²³⁵U (und Verlust durch andere Reaktionen mit 235U, 238U)



Schnellspaltfaktor *E*: Multiplikationsfaktor durch Spaltung mit schnellen n

Wahrscheinlichkeit p, nicht durch Absorption im Resonanzbereich



Sommersemester 2020





Neutronenbilanz und Reaktivität

Für endlich großes Reaktorvolumen: Wahrscheinlichkeit 1–L_{f/th} für Herausdiffundieren schneller/ thermischer Neutronen

Effektiver Neutronenvermehrungsfaktor

 $k_{\rm eff} = k_{\infty} \cdot L_{\rm f} \cdot L_{\rm th}$



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Kritikalitätsbedingung: k_{eff} >1

Reaktivität:
$$R = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

- Stationäre Energieproduktion durch Regelvorgang
 - t₀: mittlere Dauer eines n-Zyklus
 - g(t): Neutronendichte

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta t} = \frac{k\rho - \rho}{t_0} \implies \rho(t) = \rho_0 e^{(k-1)}$$

$$au = rac{t_0}{k-1} pprox rac{1\,{
m ms}}{1.007-1} pprox 0.14\,{
m s}$$

Sommersemester 2020

$)t/t_{0}$



Neutronenbilanz und Steuerung

- **Grundprinzip** kontrollierter Kettenreaktion beruht auf unterschiedlichen Zeitskalen der prompten und verzögerten Neutronen-Emission (nach β-Zerfällen der Spaltprodukte)
 - Prompte n (< 10⁻¹⁴ s): zu schnell f
 ür regulierendes Eingreifen
 - Verzögerte n (~ms bis ~min): verlangsamen Reaktorzyklus und erlauben Steuerung durch Regelungstechniken (Absorberstäbe oder -flüssigkeit)
- Enger Steuerungsrahmen: verzögerte n machen Anteil < 1% aller Spaltneutronen aus



Beispiel: Spaltung von ²³⁵U durch thermische Neutronen

G	ruppe	T _{1/2} (s)	Anteil an emittierten Neutronen (%)
1		55,90	0,0221
2		22,73	0,1467
3		6,25	0,1313
4		2,30	0,2647
5		0,608	0,0771
6		0,230	0,0281
Sι	umme:	0.67%	aller Neutroner
3 4 5 6 S t	umme:	6,25 2,30 0,608 0,230 0,230	0,1313 0,2647 0,0771 0,0281 aller Neutron

Sommersemester 2020





Moderation und Steuerung

- Kriterien für geeignete Moderatoren
 - Kleiner Wirkungsquerschnitt f
 ür n-Einfang \rightarrow geringe Verluste durch Absorption
 - Gleichzeitig als Kühlmittel geeignet
 - Sicherheit, Kosten, ...
- **Steuerung** von Reaktoren über Stoffe mit großem Wirkungsquerschnitt für n-Einfang $(für E_n = 0.025 eV)$
 - ¹⁰B: $\sigma \approx 4000$ b
 - ¹¹³Cd: $\sigma \approx 20000$ b

Brennstoffhülle oft aus Zirkon (91 Zr: $\sigma \approx 0.9$ b)



Streuung/Absorption thermischer Neutronen

	i	σ _{el} (b)	σ _{abs} (
H ₂ O	18	20	0,3
D ₂ O	25	4	0,000
12 C	114	5	0,005

www.oecd-nea.org



früher bei: interaktiv.schroedel.de

Typen von Kernkraftwerken

- Leichtwasserreaktoren:

 - Druck- oder Siedewasserreaktoren
- **Schwerwasserreaktoren**: D₂O als Moderator (geringerer n-Einfang)
 - Graphitmoderierte Reaktoren
 - Gas- oder Wasserkühlung
 - Spezialform: Kugelhaufenreaktor (Brennmaterial in Graphitkugeln)
- **Brutreaktoren** ("schnelle Brüter"):
 - Zusätzlicher Brennstoff durch Brutreaktion $^{238}U \rightarrow ^{239}Pu$ Spaltung mit schnellen Neutronen, Kühlung: flüssige Metalle (z. B. Na, Pb)



\blacksquare H₂O als Moderator (wegen n-Einfang: in ²³⁵U angereicherter Brennstoff)



Sommersemester 2020







Druckwasserreaktor



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.







Alternative Konzepte

Verteilte Kompaktkraftwerke (vgl. U-Boot, Eisbrecher) ca. 50 - 150 MW statt 1700 MW





Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Online, 21. Mai 2016 Spiegel



- "Reaktoren der Generation IV":
 - Vorteile bei Effizienz und Sicherheit durch alternative Kühlmittel (z. B. flüssiges Na oder Pb)
 - Natürliches Uran als Brennstoff möglich
 - Transmutation langlebiger Spaltprodukte durch schnelle Neutronen
- Siehe auch "Kompakte Natriumgekühlte Kernanlage" (KNK-I/II) in Karlsruhe, Betrieb 1971-1991
 - Viele weitere Konzepte, wie z. B. Kugelhaufenreaktor



Stephan Kühn, wikimedia commons





Aufgabe 15

Was ist die Rolle von Neutronen bei der Kernspaltung?

- A. Die Wahrscheinlichkeit für spontane Kernspaltung wird durch Neutronenbeschuss erhöht.
- B. Ob induzierte Kernspaltung möglich ist, hängt vom (energieabhängigen) Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang im Material ab.
- C. gg-Kerne wie ²³⁸U kann man mit thermischen Neutronen spalten.
- D. Durch eine Kernspaltung werden im Mittel rund 2-3 Neutronen frei.
- E. Zur Steuerung einer Kettenreaktion tragen prompte und verzögerte Neutronen gleichermaßen bei.

Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS: [link]



Sommersemester 2020





Uberblick Kernfusion

Fusion leichter Kerne:

- Energiegewinn durch höhere Bindungsenergie pro Nukleon bei Reaktionsprodukt für Kerne mit A < 56
- Anwendungen: Energiezeugung (Sterne, Fusionsreaktor), primordiale Nukleosynthese (leichte Elemente nach Urknall)

Bedingung für Fusion: Überwinden des oder Tunneln durch Coulombwall zwischen Kernen

$$V_C(r) = \frac{Z_1 Z_2 \alpha \hbar c}{r}$$

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Abschätzung für Deuterium-Tritium-Fusion: $-R_i = 1,2 \text{ fm} \cdot A_i^{1/3}$ \rightarrow für $A_1 = 2, A_2 = 3$: $r_{max} \approx 3,2$ fm - $V_C(r_{\rm max}) \approx 450 \text{ keV}$ $\rightarrow E_{kin} = 225 \text{ keV pro Kern}$ Umrechnung auf Temperatur mit $\rightarrow T = 1,7 \cdot 10^9 \text{ K}$ $E_{\rm kin} = 3/2 \, k_B T$



Kernfusion: technische Nutzung?

a.k.a. "The technology that is always 30 years away"

- Energiegewinn pro Nukleon in der Fusion leichter Kerne bis zu 3-4 mal größer als in der Spaltung schwerer Kerne:
 - ca. 0.81 MeV/Nukleon $d + d \rightarrow {}^{3}He + n + 3.25 \text{ MeV}$
 - d + t \rightarrow ⁴He + n + 17.6 MeV ca. 3.52 MeV/Nukleon
 - Vergleich Spaltung (²³⁵U): ca. 0.85 MeV/Nukleon
 - Vergleich chem. Verbrennung: ca. 4 eV/Sauerstoffmolekül
- Fusions-Brennstoffe sind allgemein in ausreichender Menge vorhanden
- Sicherheits- und Entsorgungsaspekte weniger schwerwiegend als bei Kernspaltungskraftwerken (v.a. keine langlebigen aktiven Produkte)





Sommersemester 2020



Gamow-Peak



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



- Abschätzung der Fusionsrate (z. B. Sterne): Produkt aus
 - Maxwell-Boltzmann-Verteilung der kinetischen Energien: exponentieller Abfall mit Ekin
 - **Tunnelwahrscheinlichkeit**: exponentieller Anstieg mit Ekin (vgl. Gamow-Faktor)
- Resultat: Gamow-Peak \rightarrow enges Energiefenster ΔE_0 für **Fusionsreaktionen**







Fusionsreaktoren

Tokamak-Aufbau (z. B. ITER)



Wichtigste Reaktorkonzepte: Tokamak und Stellarator Temperatur für Fusion: 100–300 Millionen Kelvin → Wasserstoffplasma Meist magnetischer Plasmaeinschluss (alternativ: Trägheitseinschluss)

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Stellarator-Aufbau (Wendelstein 7-X)







Plasma-Einschluss

Magnetischer Einschluss



- Plasmaspeicherung und Verhinderung von Wandkontakten durch starke Magnetfelder
- Speziell Tokamak-"Transformator": Primärwindungen um Magnetjoch, Plasma als Sekundärstromkreislauf

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Trägheitseinschluss ("Inertialfusion")



Injektion von D-T-"Pellets" (5-10 mm; 20 pro Sekunde) Zündung durch Laser- oder Ionenstrahlen:

- 5-10 MJ in 20 ns (Pulsleistung 500 TW)
- Pellet-Implosion \rightarrow Trägheit \rightarrow kurzzeitiger Einschluss











Lawson-Kriterium

- bei magnetischem Einschluss notwendig
 - Neutronen verlassen Plasma → Energiegewinnung: Stöße im Brutmantel
 - Alphateilchen heizen Plasma ("Alphaheizung")
 - Verluste durch Bremsstrahlung und Transport
 - Lawson-Kriterium (Variante)
 - **Tripelprodukt** aus Elektronendichte n_e, Einschlusszeit τ_E , Plasmatemperatur T

$$n_{e} \cdot \tau_{E} \cdot T \stackrel{!}{\geq} rac{3k_{B}T^{2}}{rac{1}{4} \langle \sigma v \rangle E_{lpha} - c_{\gamma} \sqrt{2}}$$

Bisher noch von keinem Reaktor erreicht

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Ziel: Erzeugung von mehr Energie, als für Aufrechterhaltung des Plasmas temperature [keV]



Sommersemester 2020





D-T

D-D





Lawson-Kriterium

- magnetischem Einschluss notwendig
 - Neutronen verlassen Plasma → Energiegewinnung: Stöße im Brutmantel
 - Alphateilchen heizen Plasma ("Alphaheizung")
 - Verluste durch Bremsstrahlung und Transport
 - Lawson-Kriterium (Variante)
 - **Tripelprodukt** aus Elektronendichte n_e, Einschlusszeit τ_{E} , Plasmatemperatur T

$$n_{e} \cdot \tau_{E} \cdot T \stackrel{!}{\geq} \frac{3k_{B}T^{2}}{\frac{1}{4} \langle \sigma \mathbf{v} \rangle E_{\alpha} - c_{\gamma} \sqrt{2}}$$

Bisher noch von keinem Reaktor erreicht

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Ziel: Erzeugung von mehr Energie, als für Aufrechterhaltung des Plasmas bei 100









Fusionsreaktoren: Tokamak-Prinzip

- Erreichbare Fusionsleistung wächst mit den Abmessungen

Joint European Torus (JET) Culham/Oxford, UK

- Größter Tokamak in Betrieb
- 1984 fertiggestellt
- 1997: Erreichte Kurzzeitleistung ca. 67% der Heizleistung (Q = 0.67)
- Plasmastrom 7 MA



токамак: Toroidalnaja kamera w magnitnych katuschkach (ток = Strom)



Sommersemester 2020







ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor

- **ITER**: Tokamak zur DT-Fusion
 - Standort: Cadarache (Südfrankreich)
 - **Ziele:** stabiles Plasma, 10-fache Leistungsverstärkung (Q = 10 bei 500 MW und 50 MW Heizung)
 - Derzeit im Aufbau, erstes Plasma Ende 2025, DT-Betrieb 2035
- Fernziel: Erzeugung von mehr Energie, als für Aufrechterhaltung des Plasmas notwendig (optimiere Tripelprodukt aus Elektronendichte n_e , Einschlusszeit τ_E , Temperatur T)





Sommersemester 2020

Rolle des Blankets

- Schutz der Stahlstruktur und der supraleitenden Magnete vor Hitze und Neutronenbeschuss
- Aufnahme und Abf
 ührung der Neutronen-Energie (Wasserkühlung)
- Brüten von Fusionsbrennstoff $^{6}Li + n \rightarrow ^{4}He + ^{3}H + 4,8 MeV$ ⁷Li + n \rightarrow ⁴He + ³H + n - 2,5 MeV

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

MISE

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



10-sale









Juni 2017: Helium-Tanks (4.5 K)

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.





Aufgabe 16

- Welche der folgenden Aussagen über die technische Nutzung der Kernfusion sind korrekt?
 - A. Fusionsreaktoren der Bauformen Tokamak und Stellarator beruhen auf dem magnetischen Einschluss des Plasmas.
 - B. Der vielversprechendste Prozess für die technische Nutzung der Kernfusion ist die direkte Fusion zweier Protonen.
 - C. Das Blanket dient hauptsächlich zum Heizen des Plasmas.
 - D. Mit einem Fusionsreaktor wird netto Energie erzeugt, wenn Elektronendichte und Temperatur des Plasmas sowie die Einschlusszeit hinreichend groß sind.
 - E. Am vielversprechendsten ist die Deuterium-Tritium-Fusion.

Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS: [link]



Sommersemester 2020





- Energiegewinnung durch Kernspaltung (schwere Elemente) und Kernfusion (leichte Elemente)
- Kernspaltungsreaktor: kontrollierte Kettenreaktion
 - Schnelle Neutronen: Abbremsung durch Moderator (z. B. H₂O)
 - Stabiler Betrieb durch Kontrolle der Neutronenbilanz \rightarrow Vierfaktorformel
 - Wichtigster Bautyp: **Druckwasserreaktor**
- Kernfusionsreaktor: Deuterium-Tritium-Fusion
 - Positive Energiebilanz: Lawson-Kriterium
 - Wichtigster Bautyp: **Tokamak**
 - Internationale Forschungs- und Entwicklungsprojekte: ITER (Cadarache), Wendelstein 7-X (Greifswald)



Sommersemester 2020





Nukleare Astrophysik

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



Kapitel 4.3



Entwicklung des Universums



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.







Entstehung der Elemente

- Zentrale Frage: wie sind die Elemente im Universum entstanden?
 - Primordiale Nukleosynthese (engl.: big bang nucleosynthesis, BBN) → leichte Elemente D, ³H, ⁴He, ⁷Li
 - Kernfusion in Sternen \rightarrow Elemente bis ⁵⁶Fe
 - Weitere kernphysikalische Prozesse (r-Prozess, s-Prozess) in roten Riesen und **Supernovae** → schwere Elemente



Kosmische Elementhäufigkeit H-Verbrennung 10 He 8 He-Verbrennung og (relative Elementhäufigkeit) C,O,Si-Verbrennung (T~10⁹K) 6 Eisengruppe 4 N=50 N=82 N=126 Li-Be-B -2 250 50 100 200 150 Massenzahl A

Sommersemester 2020





Die ersten drei Minuten...

- Weniger als eine Sekunde nach Urknall (T > 1 MeV $\approx 10^{10}$ K): Hadronisierung: Bildung von Nukleonen aus Quark-Gluon-Plasma Verhältnis $n/p \approx 1/7$ (p, n: Anzahl der Protonen/Neutronen) festgelegt durch unterschiedlich schnelles "Ausfrieren" der Protonen/Neutronen aus thermischem Gleichgewicht ($n/p \approx 1/6$) und β -Zerfall der Neutronen
- **Primordiale Nukleosynthese** (ca. 1 s bis 15 min): Konkurrenz von ca. 100 verschiedenen Prozessen: Fusion, …
 - Raten abhängig von Verhältnis η der Dichte der Nukleonen und Photonen

 $\eta \equiv \frac{n_{\rm b} - n_{\rm b}}{n_{\rm c}}$

T ≈ 10¹⁰ K Antang: Ende:

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.





THE

FIRST THREE MINUTES

the ORIGIN of the UNIVERSE

STEVEN WEINBERG Winner of the Nobel Prize for Physics







Primordiale Nukleosynthese

- Wesentlicher Pfeiler der Urknalltheorie
- **Forschungsgeschichte:**
 - 1948: alle Elemente aus Neutroneneinfang und β-Zerfall (Alpher, Gamow)
 - \blacksquare 1950: keine stabilen Kerne mit A = 5 und A = 8 \rightarrow BBN nur für **leichte Kerne** (Fermi, Turkevich)
 - 1957: schwere Elemente nur in Sternen erzeugt (Fowler, Hoyle, ...)
 - 1964–1967: Berechnung der Elementhäufigkeiten aus BBN (Peebles, Hoyle, Fowler, ...)
 - ab 2003: unabhängige Bestätigung der Baryonendichte durch kosmischen **Mikrowellenhintergrund** (WMAP, Planck)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 7

APRIL 1, 1948

Letters to the Editor

P UBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER* Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, Silver Spring, Maryland Н. ВЕТНЕ Cornell University, Ithaca, New York G. GAMOW The George Washington University, Washington, D. C. February 18, 1948

 \mathbf{A}^{S} pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed protons must have led first to the formation of deuterium nuclei, and the subsequent neutron captures resulted in the building up of heavier and heavier nuclei. It must be remembered that, due to the comparatively short time allowed for this process,¹ the building up of heavier nuclei must have proceeded just above the upper fringe of the stable elements (short-lived Fermi elements), and the present frequency distribution of various atomic species was attained only somewhat later as the result of adjustment of their electric charges by β -decay.

Thus the observed slope of the abundance curve must not be related to the temperature of the original neutron gas, but rather to the time period permitted by the expansion process. Also, the individual abundances of various nuclear species must depend not so much on their intrinsic stabilities (mass defects) as on the values of their neutron capture cross sections. The equations governing such a building-up process apparently can be written in the form:

$$\frac{dn_i}{dt} = f(t)(\sigma_{i-1}n_{i-1} - \sigma_i n_i) \quad i = 1, 2, \cdots 238,$$
(1)

where n_i and σ_i are the relative numbers and capture cross sections for the nuclei of atomic weight *i*, and where f(t) is a factor characterizing the decrease of the density with time.

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,² the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances³ it is necessary to assume the integral of $\rho_n dt$ during the building-up period is equal to 5×10^4 g sec./cm³.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \cong 10^6/t^2$. Since the integral of this expression diverges at t = 0, it is necessary to assume that the buildingup process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^6/t^2) dt \cong 5 \times 10^4, \qquad (2$$

which gives us $t_0 \cong 20$ sec. and $\rho_0 \cong 2.5 \times 10^5$ g sec./cm³. This result may have two meanings: (a) for the higher densities existing prior to that time the temperature of the neutron gas was so high that no aggregation was taking place, (b) the density of the universe never exceeded the value 2.5×10^3 g sec./cm³ which can possibly be understood if we









BBN-Reaktionsschema

12 dominante Prozesse, viele weitere Reaktionen:

1	$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e$
2	$p + n ightarrow d + \gamma$
3	d + p $ ightarrow$ ³ He + γ
4	$d + d \rightarrow {}^{3}He + n$
5	$d + d \rightarrow t + p$
6	3 He + d $\rightarrow \ ^{4}$ He + p
7	3 He + n \rightarrow T + p
8	$t + d \rightarrow {}^{4}He + n$
9	t + ${}^{4} ext{He} ightarrow {}^{7} ext{Li}$ + γ
10	7 Li + p $ ightarrow$ 4 He + 4 He
11	$^{3}\mathrm{He}$ + $^{4}\mathrm{He}$ $ ightarrow$ $^{7}\mathrm{Be}$ + γ
12	$^7\text{Be} + n \rightarrow \ ^7\text{Li} + p$

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.





Notation für kernphysikalische Prozesse: $X(a,b)Y \triangleq X + a \longrightarrow Y + b$





Vorhersagen für Massenanteile

Praktisch alle Neutronen in ⁴He gebunden \rightarrow primordialer Massenanteil Y_P:



Modellrechnungen → Massenanteile von ²H, ³H, ³He, ⁷Be, ⁷Li

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Häufigkeit

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.













Sternentwicklung

Sternentwicklung abhängig von Masse des Sterns:



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.



ternentwicklung.png, gemeinfrei

Hertzsprung-Russell-Diagramm







Kernfusion in Sternen: pp-Kette Hauptreihensterne (z. B. Sonne): Energieerzeugung durch Wasserstoff-**Fusion**, Nettoreaktion: $4^{1}H \rightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_{e} + 26,2 \text{ MeV}$



Details der Reaktion:



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 8. Vorlesung

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.





D	Name	Reaktion
Szam,	Wasserstofffusion Deuteriumfusion	$\label{eq:Homoson} \begin{array}{l} {}^{1}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{+} + \nu_{\mathrm{e}} \\ {}^{2}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma \end{array}$
Proto	pp-Reaktion I	$^{3}\text{He} + {}^{3}\text{He} \rightarrow {}^{4}\text{He} + {}^{1}\text{H} + {}^{1}\text{H}$
on proton c	<i>pp</i> -Reaktion II	${}^{3}\text{He} + {}^{4}\text{He} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + \gamma$ ${}^{7}\text{Be} + e^{-} \rightarrow {}^{7}\text{Li} + \nu_{e}$ ${}^{7}\text{Li} + {}^{1}\text{H} \rightarrow {}^{4}\text{He} + {}^{4}\text{He}$
cycle.svg, CC E	<i>pp</i> -Reaktion III	$\label{eq:He} \begin{array}{l} {}^{3}\text{He} + {}^{4}\text{He} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + \gamma \\ {}^{7}\text{Be} + {}^{1}\text{H} \rightarrow {}^{8}\text{B} + \gamma \\ {}^{8}\text{B} \rightarrow {}^{8}\text{Be} + {e}^{+} + \nu_{e} \\ {}^{8}\text{Be} \rightarrow {}^{4}\text{He} + {}^{4}\text{He} \end{array}$
3Y-SA 2.5	<i>pep</i> -Reaktion <i>hep</i> -Reaktion	${}^{1}\text{H} + \text{e}^{-} + {}^{1}\text{H} \rightarrow {}^{2}\text{H} + \nu_{\text{e}}$ ${}^{3}\text{He} + {}^{1}\text{H} \rightarrow {}^{4}\text{He} + \text{e}^{+} + \nu_{\text{e}}$



Kernfusion in Sternen: CNO-Zyklus

- **Massive** Sterne $(M > 1,3 M_{\text{Sonne}}, T > 1,4 \cdot 10^7 \text{ K})$: katalytische Wasserstofffusion
- Dominant: CNO-Zyklus (von Weizsäcker 1938, Bethe 1939) Nettoreaktion: $4^{1}H + 2e^{-} \rightarrow {}^{4}He + 2\nu_{e} + 3\gamma + 26,7 \text{ MeV}$
 - Kohlenstoffkern muss bereits vorhanden sein





Sommersemester 2020







Kernschalenbrennen

- **Rote Riesen**: Temperaturen höher als 2·10⁸ K
 - Neuer Fusionsprozess energetisch erlaubt: **Fusion dreier Heliumkerne** zu ¹²C ("Heliumbrennen") (Salpeter, 1952)
 - ⁴He + ⁴He + 92,78 keV \leftrightarrow ⁸Be + γ
 - ⁸Be + ⁴He \longrightarrow ¹²C + γ + 7,367 MeV
- Weitere Fusionsprozess bei noch höheren Temperaturen bis 3·10⁹ K: Schalenbrennen Schalen: Brennen von $H \rightarrow He \rightarrow C$ $\rightarrow Ne \rightarrow O \rightarrow Si \rightarrow Ni$
 - Stabiler Kern: Eisen/Nickel





Bildquelle unbekannt

Sommersemester 2020





Synthese schwerer Elemente

- Nukleosynthese schwerer Elemente: **Anlagerung** von Neutronen (B²FH = Burbridge, Burbridge, Fowler, Hoyle, 1957)
 - **r-Prozess** (rapid neutron capture):
 - Neutroneneinfang
 - Schneller Neutroneneinfang bei hohen Temperaturen und extremen Neutronenflüssen (10^{22} cm⁻² s⁻¹)
 - Verschmelzung von Neutronensternen oder **Supernovae** mit Kernkollaps(?)
 - **s-Prozess** (slow neutron capture):
 - Neutroneneinfang
 - **Sterne** im asymptotischen Riesenast des Hertzsprung-Russell-Diagramms





Sommersemester 2020





Aufgabe 17

- Woher kommen die Elemente im Universum?
 - Elemente in späteren Phasen.
 - B. Der Anteil von primordialem Helium im Universum ist abhängig vom Verhältnis von Protonen und Neutronen einige Sekunden nach dem Urknall.
 - C. Alle Elemente werden aus Neutroneneinfang und Betazerfall erzeugt.
 - D. Elemente oberhalb der Eisengruppe werden durch Protoneneinfang erzeugt.
 - E. Als Quelle der auf der Erde ankommenden Sonnenneutrinos spielt der CNO-Zyklus eine untergeordnete Rolle gegenüber der pp-Kette.
- Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS: [link]



A. Die leichten Elemente werden kurz nach dem Urknall erzeugt, die schweren

Sommersemester 2020



- mit Querverbindungen untereinander z. B. Herstellung von Radionukliden für medizinische Anwendungen in Kernreaktoren und Beschleunigern

Beispiele früher technischer Anwendungen:

- Entwicklung der Kernspinresonanzmethode (NMR) ab ca. 1938
- Erster Kernreaktor mit kontrollierter Kettenreaktion 4 Jahre nach Entdeckung der Kernspaltung
- Nutzung von Radiopharmazeutika mit künstlichen Radionukliden ("tracer") ab ca. 1950



Breite Anwendung der Kernphysik in Technik und Grundlagenforschung: Kriminalistik, Kunstgeschichte, Paläontologie & Archäologie, medizinische Diagnostik und Therapie, Messverfahren, Umweltphysik und -technik, Kernenergie, Astro(teilchen)physik



Sommersemester 2020



Science



- Kerntechnische Anwendungen: Energiegewinnung möglich durch Spaltung schwerer Kerne oder Fusion leichter Kerne
- **Kernspaltungsreaktoren:** Leicht- und Schwerwasserreaktoren im Einsatz, mit unterschiedlichen Brennstoff- und Moderator-Materialien
 - Weltweit etwa 400 betriebsbereite Reaktoren in Kraftwerken (Stand 2019)
 - Hauptsächlich Druckwasserreaktoren; viele weitere Bauformen erforscht (z. B. Kugelhaufenreaktor, Brüter, zuletzt: Kompaktkraftwerke)
 - Kernfusionsreaktoren: zwei wesentliche Bauformen (Tokamak, Stellarator)
 - Liefern bislang keine Nettoproduktion nutzbarer Energie
 - Aktuelle Forschungskraftwerke mit Ziel der selbsterhaltenden Fusion (Tokamak: ITER, Beginn ~2025; Stellarator: Wendelstein 7-X, ab 2015)





- **Primordiale Nukleosynthese**: leichte Elemente D, ³H, ⁴He, ⁷Li • Keine stabilen Kerne mit A = 5 und $A = 8 \rightarrow$ keine schwereren Elemente Vorhersage für Massenanteile leichter Elemente, z. B. Heliumanteil $Y_P \approx 0,25$ → Grundpfeiler der Urknalltheorie

Kernfusion in Sternen:

- Massive Sterne: katalytisches Wasserstoffbrennen (CNO-Zyklus) Höhere Temperaturen: Schalenbrennen (3α -Prozess, ..., Si-Brennen)
- Hauptreihensterne: Wasserstoffbrennen (pp-Reaktion)



Schwere neutronenreiche Kerne: Anlagerung von Neutronen durch **r-Prozess** (Neutronensterne, Supernovae) und **s-Prozess** (schwere Sterne)

Sommersemester 2020





