Astroteilchenphysik und Kosmologie

Prof. Dr. B. Kämpfer und Dr. D. Bemmerer

- **Kernphysikalische Grundbegriffe zur Elemententstehung (heute)**
- Urknall und kosmologische Inflation
- Entstehung chemischer Elemente im Urknall und durch kosmische Strahlung
- Teilchenphysik in Sternen
- Boten aus dem All: Neutrinos von Supernovae und aus der Sonne
- Kosmische Teilchenbeschleuniger – schneller als der CERN-LHC
- Dunkel-Energie und Dunkel-Materie als wichtig(st)e Materieformen im Universum
- Kosmische Teilchen und das Standardmodell
- Weltmodelle und Alternativen

2. Vorlesung, TU Dresden 19.04.2010

Literatur zur Vorlesung “Astroteilchenphysik und Kosmologie”

Iliadis: Christian Iliadis, Nuclear Physics of Stars, Wiley-VCH Weinheim, 2007 (heute)

Clayton: Donald D. Clayton, Handbook of Isotopes in the Cosmos: Hydrogen to Gallium, Cambridge University Press, 2007

Glendenning: N.K. Glendenning, After the Beginning, Imp. Coll. Press & World Scientific, 2004

Perkins: D. Perkins, Particle Astrophysics, Oxford University Press, 2003

Dodelson: S. Dodelson, Modern Cosmology, Academic Press Amsterdam, 2003

Börner: G. Börner, The Early Universe, Springer Verlag Berlin, 2003

KLP: B. Kämpfer, B. Lukacs, Gy. Paal, Cosmic Phase Transitions, Teubner Verlag, 1994

CL: P. Coles, F. Lucchin, Cosmology, John Wiley & Sons, 1995

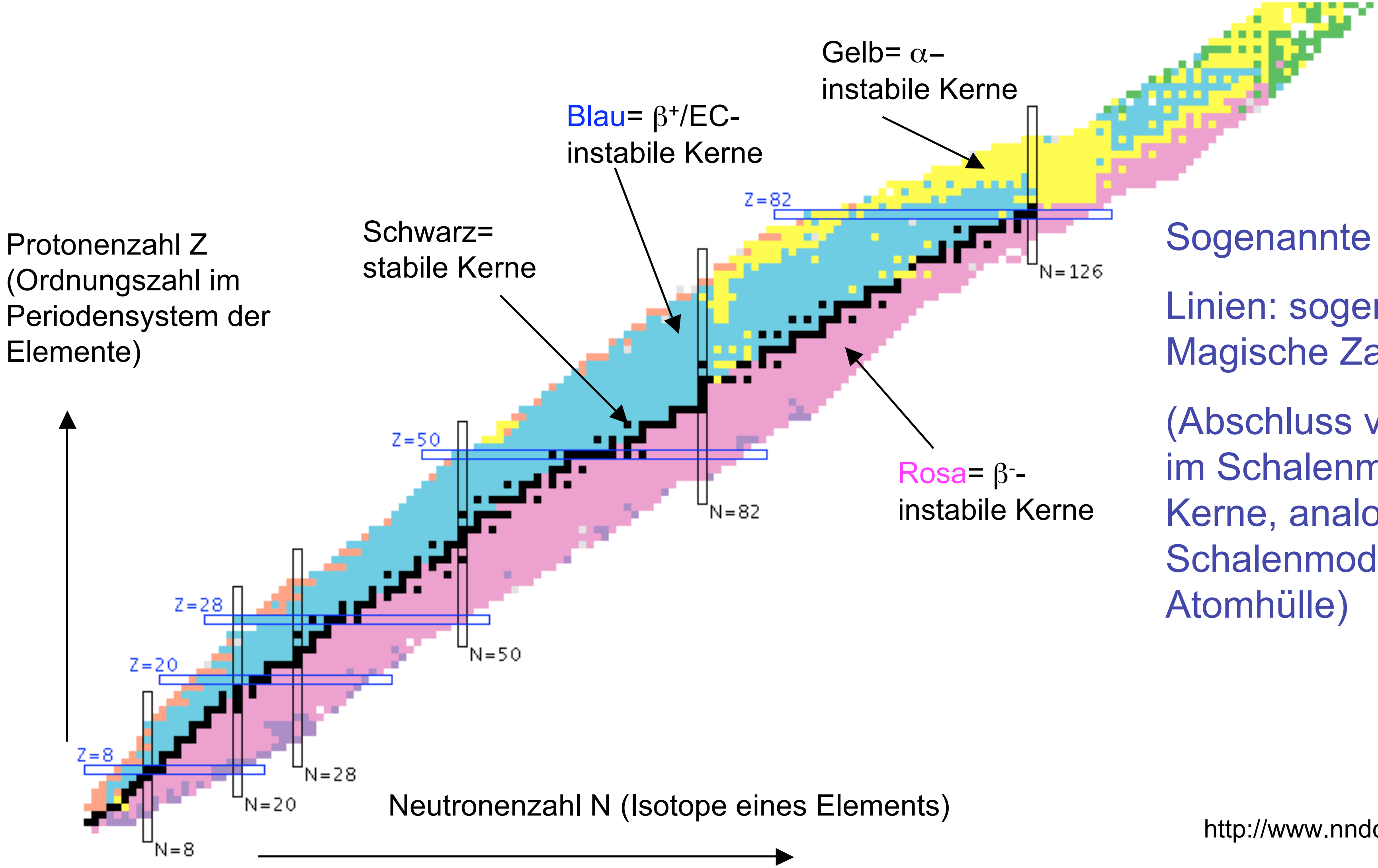
MTW: C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, Gravitation, Freeman & Co, San Francisco, 1973

Berger: C. Berger, Teilchenphysik, Springer Verlag Berlin, 1992

Vier fundamentale Wechselwirkungen

Starke Kernwechselwirkung vermittelt durch Pionen, *Gluonen* Reichweite≤Kernradius	Schwache Kernwechselwirkung vermittelt durch $W^{\pm}$ - Boson, Z^{0} - Boson Reichweite≤Kernradius
Elektromagnetische Wechselwirkung vermittelt durch Photonen Reichweite ∞	Gravitation vermittelt durch *Gravitonen* Reichweite ∞

Konsequenz aus der starken Kernwechselwirkung: Es gibt Atomkerne!



Sogenannte “Nuklidkarte”

Linien: sogenannte Magische Zahlen

(Abschluss von Schalen im Schalenmodell der Kerne, analog zum Schalenmodell der Atomhülle)

http://www.nndc.bnl.gov/

Ausschnitt aus der Nuklidkarte

- Durch die starke Kernkraft werden die Atomkerne zusammengehalten
- Dieses "Zusammenhalten" lässt sich durch die sogenannte Bindungsenergie quantifizieren:
  $m_{C\text{-}12}$ = 11178 MeV/c^2 < 11270 MeV/c^2 = 6*(m_p+m_n)
  sind 92 MeV/c^2 fehlende Masse bei ^{12}C;
  mit $E = mc^2$ sind das 92 MeV Bindungsenergie für ^{12}C
- Kerne können instabil sein, wenn durch den Zerfall Bindungsenergie gewonnen wird

Protonenzahl Z (Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente)

Blau= β^+/EC-instabile Kerne

13O 8.58 MS εp≈ 100.00% ε: 100.00%	14O 70.606 S ε: 100.00%	15O 122.24 S ε: 100.00%	16O STABLE 99.762%	17O STABLE 0.038%	18O STABLE 0.200%
12N 11.000 MS ε: 100.00%	13N 9.965 M ε: 100.00%	14N STABLE 99.634%	15N STABLE 0.366%	16N 7.13 S β-: 100.00% β-α: 1.2E-3%	17N 4.173 S β-: 100.00% β-n: 95.1%
11C 20.334 M ε: 100.00%	12C STABLE 98.89%	13C STABLE 1.11%	14C 5700 Y β-: 100.00%	15C 2.449 S β-: 100.00%	16C 0.747 S β-: 100.00% β-n: 99.00%

Neutronenzahl N (Isotope eines Elements)

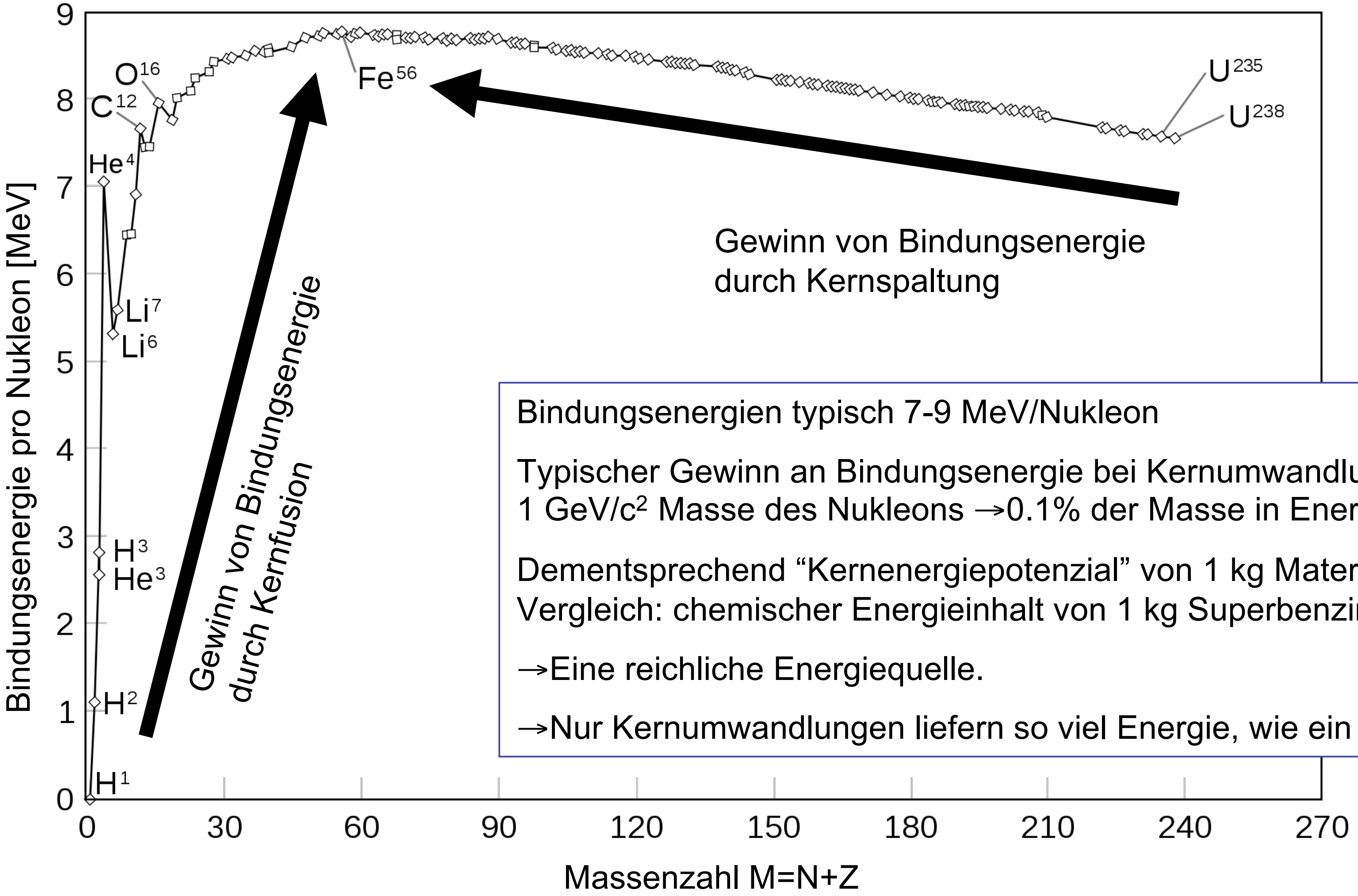
Beispiel ^{12}N, β^+-instabil:

Masse ^{12}N = 11195 MeV/c^2
Masse ^{12}C = 11178 MeV/c^2

Durch den Zerfall ^{12}N→^{12}C werden also 17 MeV Energie frei.

Rosa= β^--instabile Kerne

Globaler Verlauf der Bindungsenergie (je mehr Bindungsenergie, desto leichter der Kern)



Bindungsenergien typisch 7-9 MeV/Nukleon

Typischer Gewinn an Bindungsenergie bei Kernumwandlungen 1 MeV/Nukleon bei 1 GeV/c^2 Masse des Nukleons →0.1% der Masse in Energie umgewandelt

Dementsprechend “Kernenergiepotenzial” von 1 kg Materie = 10^{14} Joule
Vergleich: chemischer Energieinhalt von 1 kg Superbenzin = 10^{8} Joule

→Eine reichliche Energiequelle.

→Nur Kernumwandlungen liefern so viel Energie, wie ein Stern braucht.

Bindungsenergie und Entstehung der chemischen Elemente

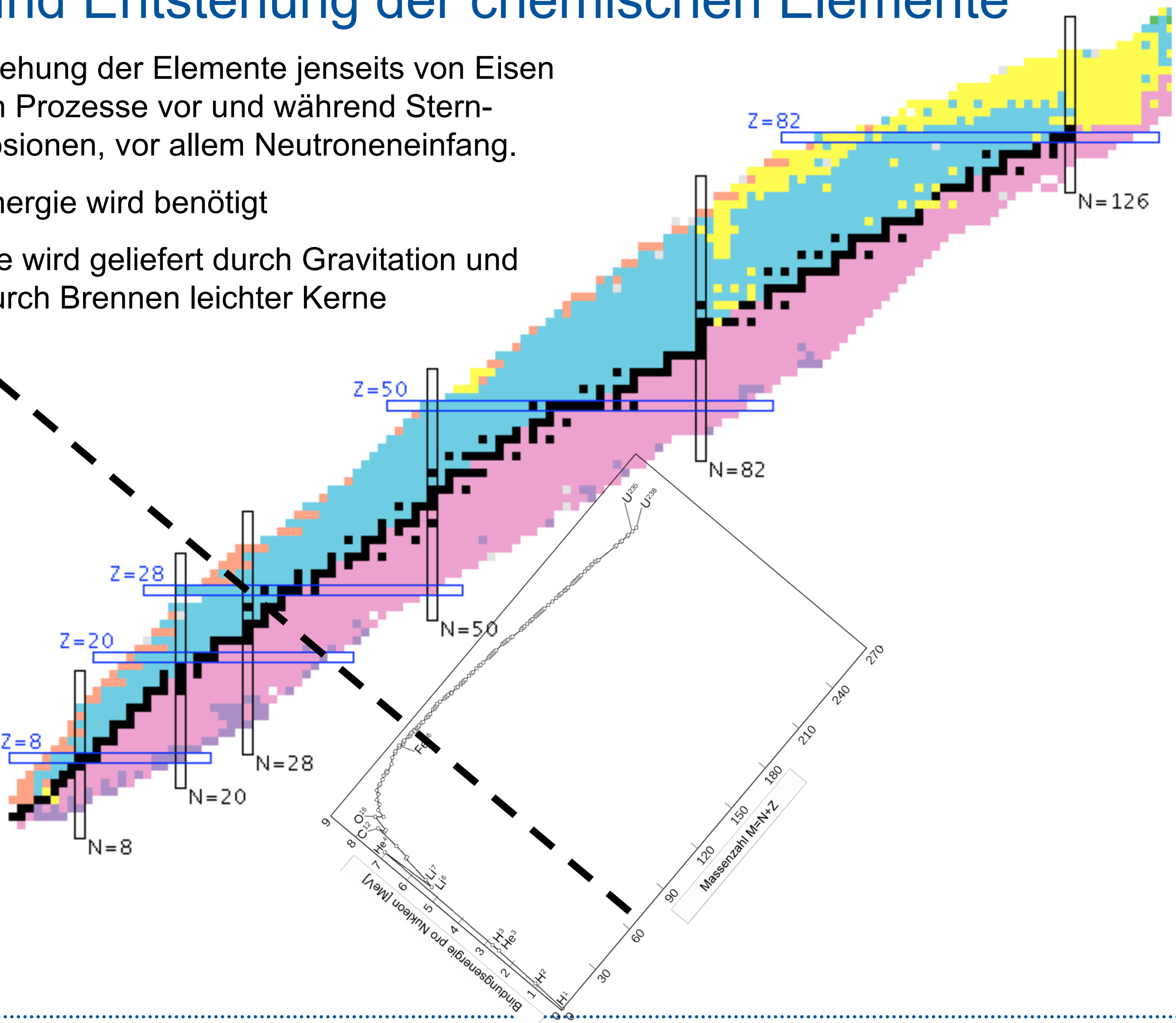
Entstehung der Elemente jenseits von Eisen durch Prozesse vor und während Stern-explosionen, vor allem Neutroneneinfang.

→ Energie wird benötigt

→ Sie wird geliefert durch Gravitation und durch Brennen leichter Kerne

Entstehung der Elemente bis zum Eisen durch Fusion (“Brennen”) von leichten Kernen zu schwereren Kernen, im Urknall oder in Sternen.

→ Energieproduktion



Zur Notation von Zweikörper-Kernreaktionen

Projektil		Target		Ejektil		Restkern	
a	+	A	→	b	+	B	Kurz: A(a,b)B
Anfangszustand, „initial“, i				Endzustand, „final“, f			

a, A, b, B: Kurzform für beteiligte Kerne, z.B. ^{208}**Pb**
Abkürzung für leichte Teilchen **p, d, t, α**

Es gelten Energie- und Impulserhaltung, unter Berücksichtigung der Kernmassen m(a), m(A), m(b), m(B):

$$m(a) + m(A) = m(b) + m(B) + Q$$

Q = sogenannter Q-Wert der Reaktion; $Q > 0$ bedeutet Energiegewinn bei der Reaktion
$Q < 0$ bedeutet Energieverlust bei der Reaktion

Rechne statt der Massen zur Vereinfachung mit dem Massenüberschuss (*mass excess*) Δ:

Δ(Kern) = m(Kern) - A * a.m.u. (*atomic mass unit*, definiert als 1/12 der ^{12}C-Masse), z.B.

$\Delta(^{12}N) = 11195\ MeV/c^2 - 12 * 931.494\ MeV/c^2 = 17\ MeV/c^2$

Kernreaktionen: Definition des Wirkungsquerschnitts

Reaktion A(a,b)B	a= Projektil	A = Target

- Geometrische Vorstellung: Immer, wenn ein Projektil die am Target “angeheftete” Fläche σ trifft, findet die Reaktion A(a,b)B statt

$$\frac{\text{Reaktionen}}{\text{Zeit}} = \sigma \cdot \text{Targetatome} \frac{\text{Projektile}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$$

- Praktisch messbar: Targetatome pro Fläche = Dicke * Dichte / Atommasse
  Projektile pro Zeit = Ionenstrom

$$\sigma = \frac{\dfrac{\text{Reaktionen}}{\text{Zeit}}}{\dfrac{\text{Targetatome}}{\text{Fläche}} \cdot \dfrac{\text{Projektile}}{\text{Zeit}}}$$

Besonderheiten:

- Differentieller Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$

- Partieller Wirkungsquerschnitt $\sigma_{tot}=\sigma_{elast}+\sigma_{inelast}$

Lebensdauer und Halbwertszeit

- Differentialgleichung des radioaktiven Zerfalls, und ihre Lösung:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}$$

- Lebensdauer τ, Zerfallskonstante λ und Halbwertszeit $t_{1/2}$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

- Bei verschiedenen Zerfallsmöglichkeiten ein- und desselben Kerns addieren sich die $\lambda_{1,2}$:

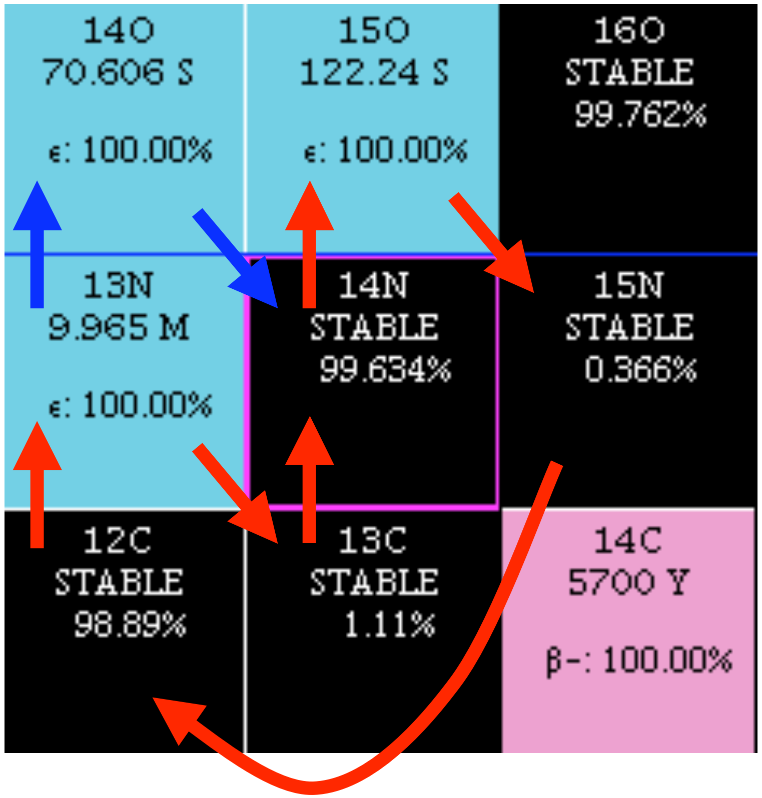
$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \ldots$

- Es kann auch konkurrierend zu einem radioaktiven Zerfall die Zerstörung desselben Kerns durch eine Kernreaktion auftreten:

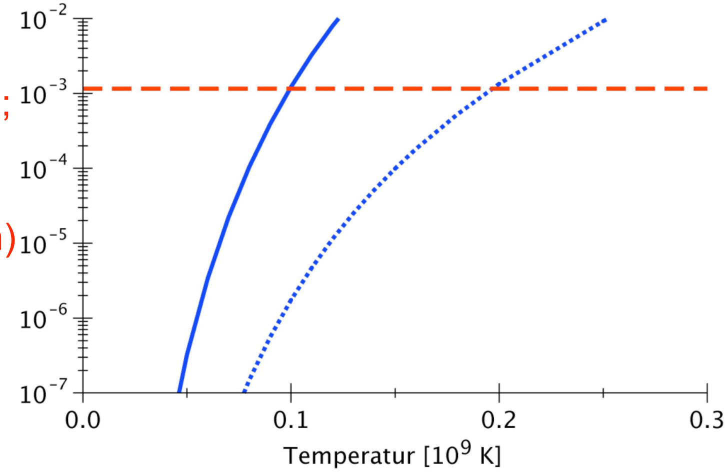
$$\lambda_{\text{Reaktion}} = \sigma \frac{\text{Projektile}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$$

Gerechnet wird analog (Beispiel Hot-CNO-Zyklus)

Beispiel für Konkurrenz zwischen Kernzerfall und Kernreaktion: CNO-Zyklus



Rot: β-Zerfall von ^{13}N (normaler CNO-Zyklus; ^{13}N zerfällt in aller Regel, bevor es ein Proton einfangen kann)



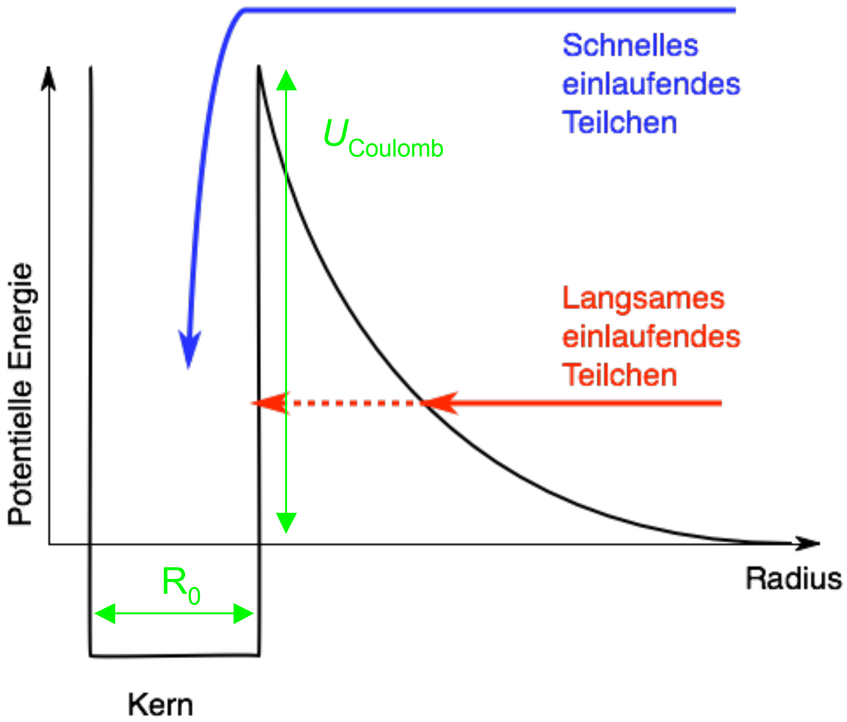
Blau: Rate für den Protoneneinfang an ^{13}N für zwei verschiedene Dichten des Sterns, in Abhängigkeit von der Temperatur (heißer CNO-Zyklus, spielt nur eine Rolle bei hohen Temperaturen, daher der Name)

Rot = normaler ("kalter") Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)

Blau = Heißer CNO-Zyklus

- Bei astrophysikalischen Temperaturen sind Kernreaktionsraten stark temperaturabhängig,
- Analog zur Rate von chemischen Reaktionen: Höhere Temperatur, höhere Rate

Der Grund für die Temperaturabhängigkeit der Kern-Reaktionsrate (1)



- Im Kerninnern wirkt die starke Kernkraft, aber ihre Reichweite ist kurz, 10^{-15} m (hier angenähert durch Kastenpotential).

- Außerhalb des Kerns wirkt die elektrostatische Abstoßung zwischen einem positiv geladenen Teilchen ($^1H^+$, $^4He^{2+}$ usw.) und der Kernladung (Coulomb-Kraft):

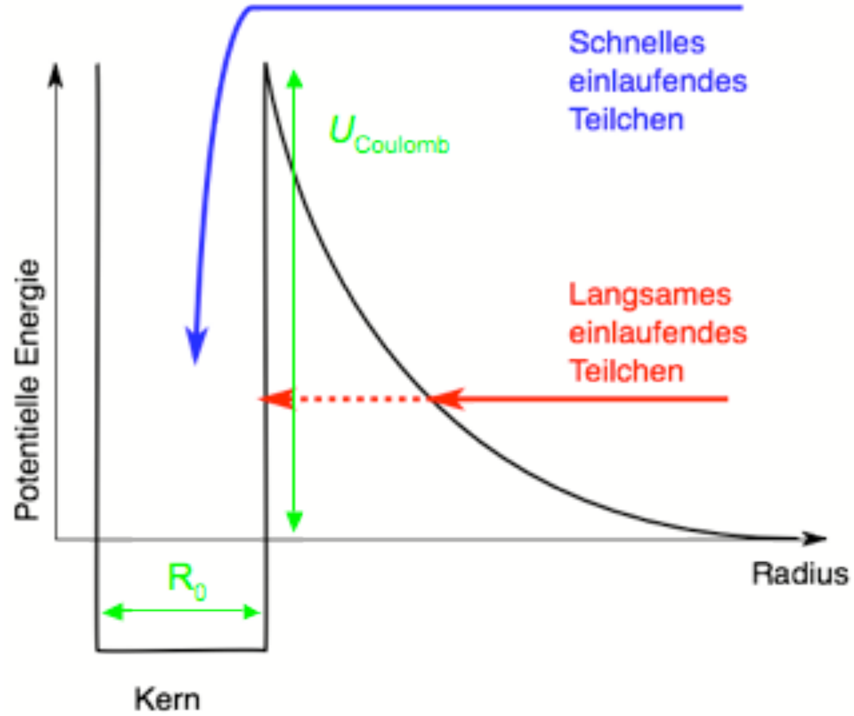
$$U(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} = 1.44\,\mathrm{MeV}\,\frac{Z_1 Z_2}{r/\mathrm{fm}}$$

- Setze nun $r = R_0$ (Radius des Kastenpotentials), dann erhält man für $U_{coulomb}=U(R_0)$ die Höhe der sogenannten Coulombschwelle, typisch einige MeV.

- Um klassisch in den Kern einzudringen, muss das einlaufende Teilchen eine Energie $E > U_{Coulomb}$ haben. Die Einfangrate der einlaufenden Teilchen ist dann näherungsweise energieabhängig wie $1/v$ oder $E^{-0.5}$ (siehe Grundvorlesung Kern- und Teilchenphysik).

- Für langsamere Teilchen, $E < U_{Coulomb}$, bleibt nur das Eindringen mittels des quantenmechanischen Tunneleffekts.

Der Grund für die Temperaturabhängigkeit der Kern-Reaktionsrate (2)



- Typische Werte für $U_{Coulomb}$ sind einige MeV.
- Typische Werte für Temperaturen in astrophysikalischen Plasmen sind:
  - 10^7 K → k_BT = 0.0086 MeV (Sonne)
  - 10^8 K → k_BT = 0.0086 MeV (schwere Sterne,Nukleosynthesephase des Urknalls)
  - 10^9 K → k_BT = 0.086 MeV (Sternexplosionen)
- Praktisch alle astrophysikalisch relevanten Prozesse spielen sich also weit unter der Coulombschwelle ab!
- Für die Tunnelwahrscheinlichkeit gilt (Quantenmechanik)

$$P(E) \propto \exp\left[-Z_1 Z_2 \alpha \left(\frac{\mu}{E}\right)^{0.5}\right]$$

d.h. eine sehr steile Energieabhängigkeit

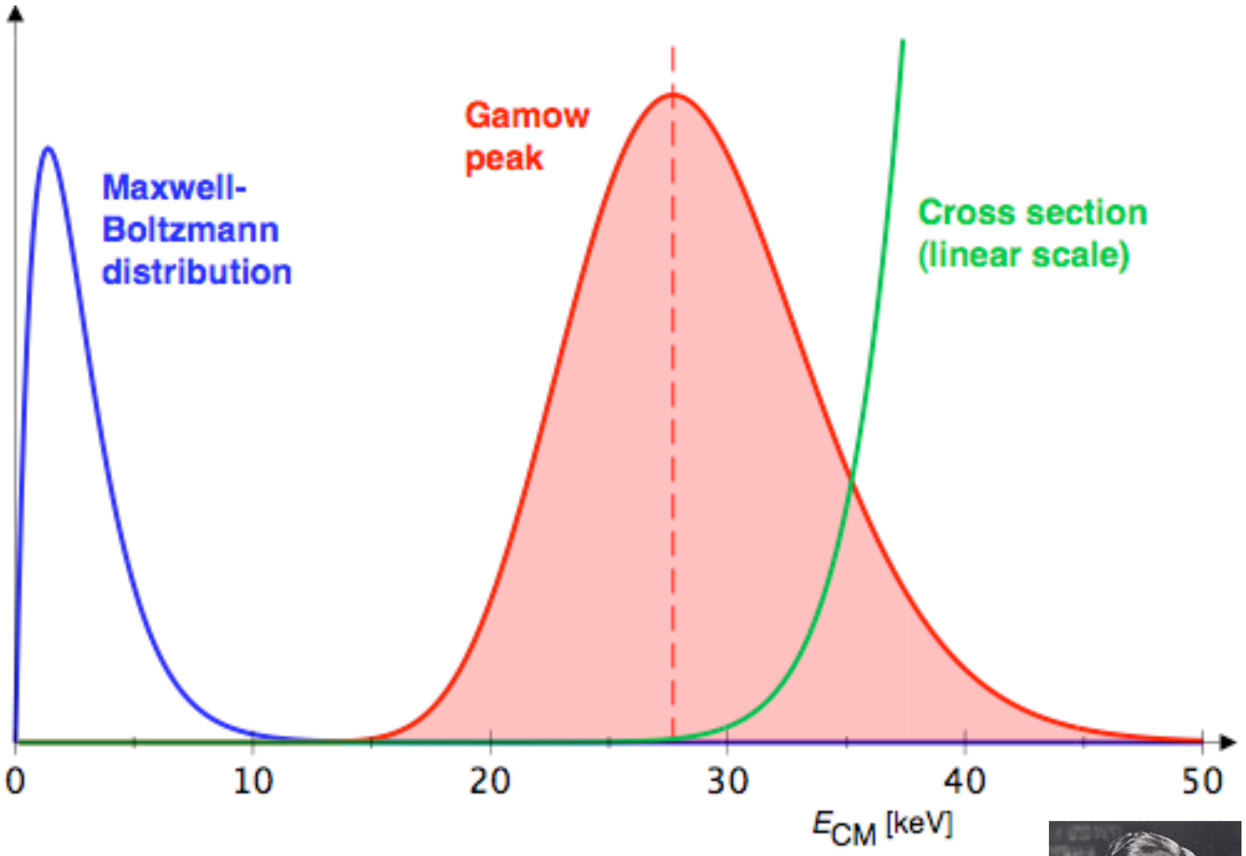
Der Grund für die Temperaturabhängigkeit der Kern-Reaktionsrate (3)

- Das Maximum der thermischen Verteilung (Maxwell-Boltzmann-Verteilung) liegt bei einigen keV, deutlich unter der Coulombschwelle (MeV)

- Die Anzahl der stattfindenden Reaktionen wird bestimmt durch die Faltung zweier stark energieabhängiger Funktionen:

1. Maxwell-Boltzmann-Verteilung
2. Wirkungsquerschnitt (bestimmt durch die Wahrscheinlichkeit für das Durchtunnel der Coulombbarriere)

- Die Fläche unter dem Integral gibt die Rate an tatsächlich stattfindenden Reaktionen an.



Entdecker dieses Zusammenhangs:
George Gamow (1904-1968)

Übungsaufgaben

1. Wie ist der Q-Wert der Reaktionen $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$, $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$, $^{7}Li(p,n)^{7}Be$, $^{3}H(d,n)^{4}He$? Verwende für die Rechnung die Werte für den Massenüberschuss (mass excess) aus der aktuellen Massenevaluation
   (Suche nach AME2003 ... oder alternativ direkt)
   http://www.nndc.bnl.gov/amdc/masstables/Ame2003/mass.mas03

2. Betrachte den radioaktiven Zerfall 1 → 2 → 3, wobei 1 der radioaktive Mutterkern ist, 2 der ebenfalls radioaktive Tochterkern und 3 der stabile Endkern. Zu Anfang sei $N_1(t=0) = N_1^0$ und $N_2(t=0) = N_3(t=0) = 0$.
   - Leite die Differentialgleichung für die Änderung der Häufigkeit $dN_2(t) / dt$ her und gib die Funktion für $N_2(t)$ an.
   - Gib den Verlauf von $N_3(t)$ an.
   - Betrachte den Verlauf von N_1, N_2 und N_3 für kleine Werte von t. Nähere die Exponentialfunktion in 1. Ordnung linear und diskutiere die Ergebnisse.

- Auf der Webseite http://www.fzd.de/pls/rois/Cms?pOid=30632&pNid=2041
  (www.fzd.de → Institute → Strahlenphysik → Vorlesungen und Praktika)

- Übung Donnerstag (gerade Wochen), 3. DS, SE2/122, nächste Übung: 22.04.2010

Zusammenfassung

- Durch Umwandeln eines Kerns in einen anderen (durch radioaktiven Zerfall oder Kernreaktionen) werden große Mengen an Energien freigesetzt, typisch 0.1% der Masse,
  Umrechnung mit $E = mc^2$

- Nur Kernumwandlungen liefern ausreichend Energie für die sehr aufwändigen Prozesse in Sternen.

- Die Rate von Kernreaktionen mit geladenen Teilchen ist stark von der Temperatur des astrophysikalischen Plasmas abhängig.