

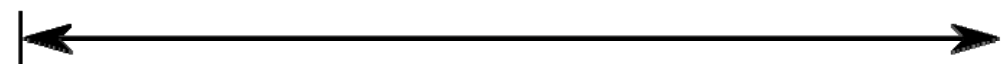
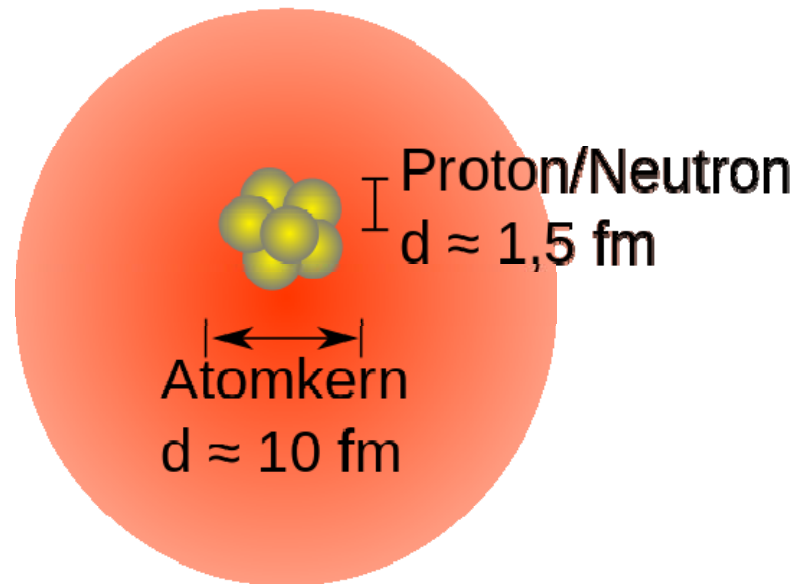
Chicago Pile No 1 (Erster Kernreaktor)

Kerne 2

Tröpfchenmodell
Kernreaktionen
Schalenmodell

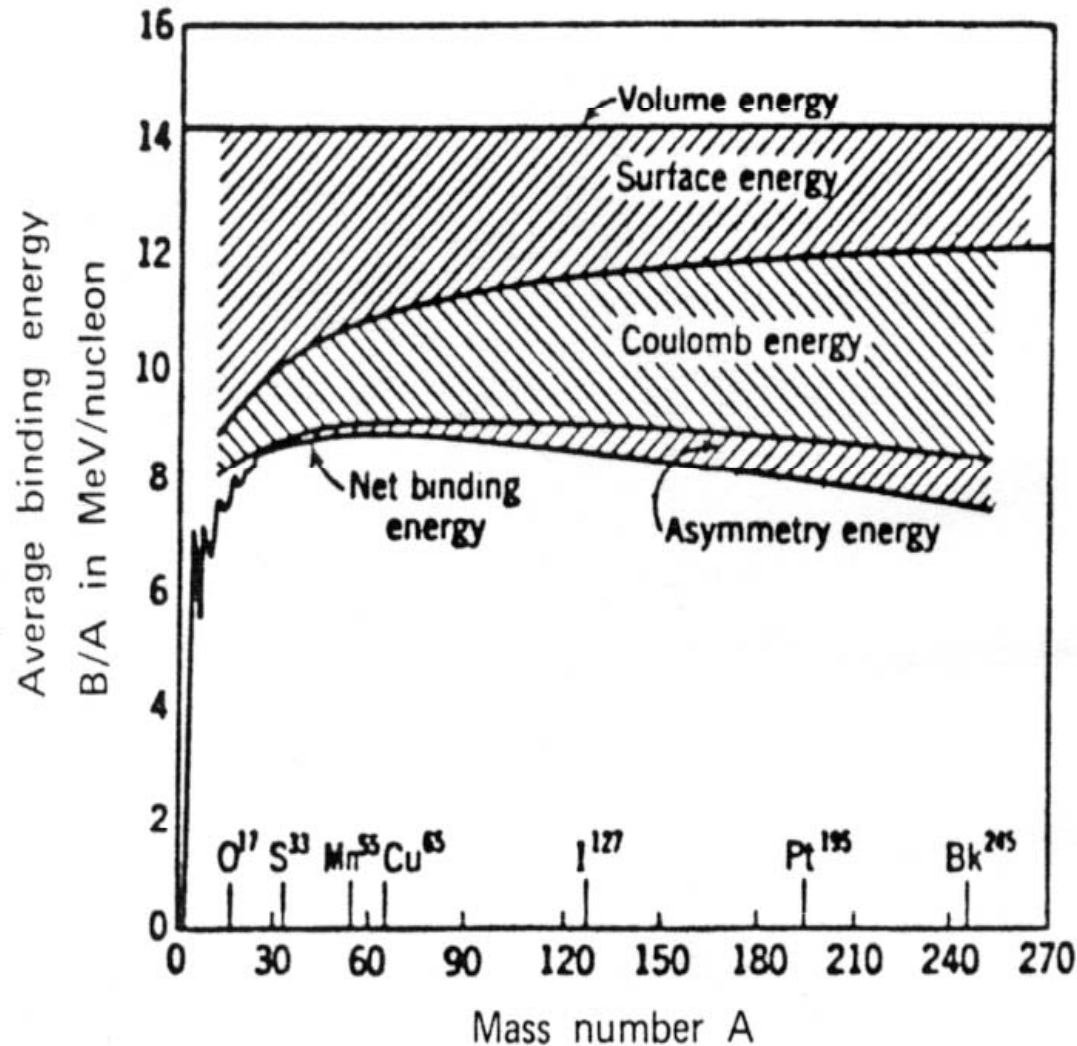
Thema Kerne
Tröpfchenmodell

Elektronenhülle



Atom mit Atomhülle
 $d \approx 100\,000 \text{ fm} = 1 \text{ \AA}$

Tröpfchenmodell



Diagnose

- Bindungsenergie im Atomkern hat unterschiedliche Beiträge
- Modell eines Flüssigkeitstropfens in erster Näherung gute Beschreibung für Kern
- Protonen und Neutronen werden physikalisch auf gleicher Stufe behandelt
- Bindungsenergie verteilt sich gleichmäßig über alle Nukleonen
- Modell erklärt Spaltung schwerer Kerne und Verschmelzung leichter Kerne



liquid drop model

Volumenenergie

Symptome

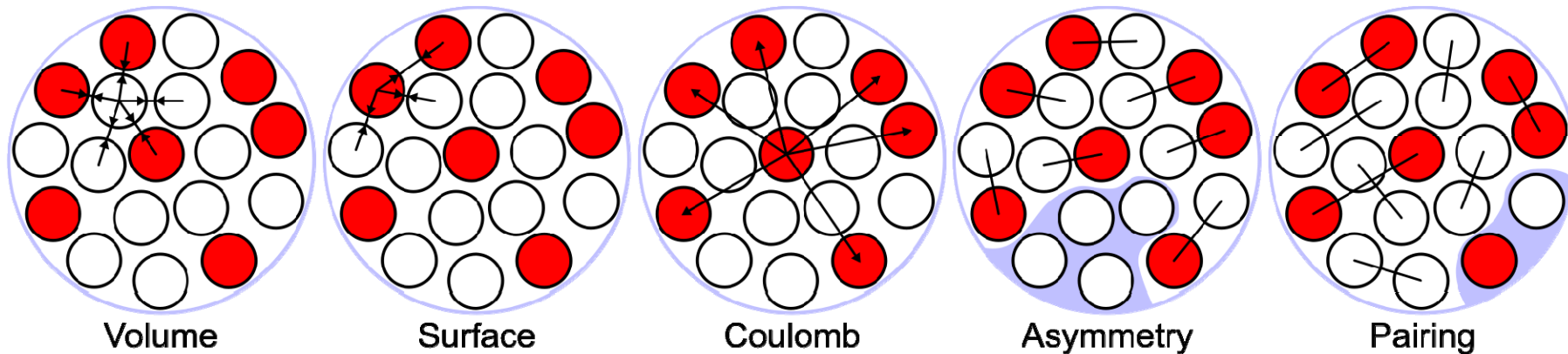
- im Kern ist die Dichte der Materie konstant
- Volumen ist deshalb proportional der Anzahl der Kernbausteine

Volumen- vs- Anzahl

$$R_{nucleus} = \text{const} \cdot A_{nucleus}^{1/3}$$

Volumenenergie

$$E_V = a_V A_{nucleus}$$



Experimentell bestimmter Volumenparameter

$$a_V = 15.6 \text{ MeV}$$

Diagnose

- Nukleonen spüren aufgrund kurzer WW-Reichweite NUR Anwesenheit nächster Nachbarn
- positiver Betrag zur Bindungsenergie ist in etwa identisch ist für jeden Kernbaustein



liquid drop model

Oberflächenenergie

Oberfläche

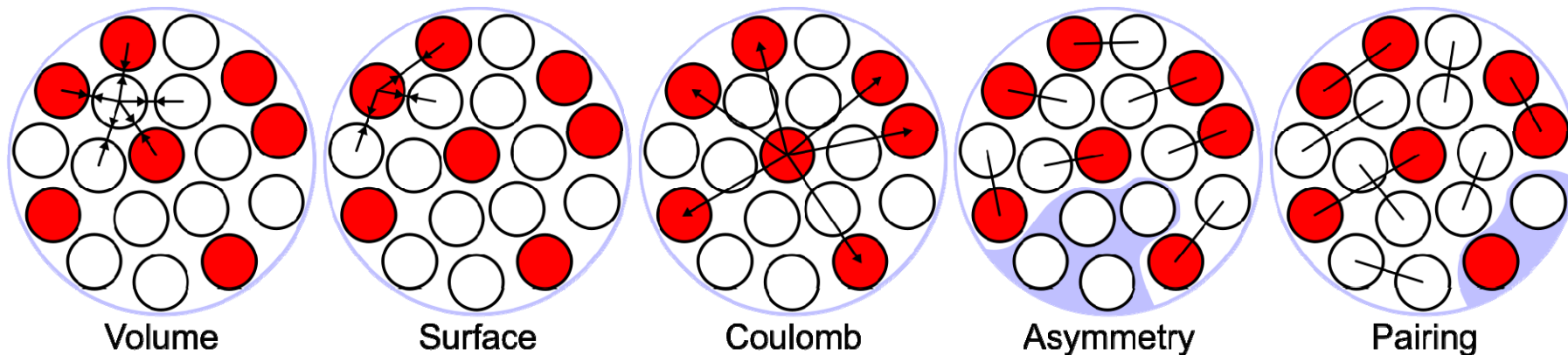
$$E_{OF} = -a_s A_{nucleus}^{2/3}$$

Volumen-vs-Anzahl

$$R_{nucleus} = \text{const} \cdot A_{nucleus}^{1/3}$$

Oberfläche- vs- Volumen

$$A_0 = 4\pi R_{nucleus}^2 = 4\pi (A_{nucleus})^{2/3}$$



Experimentell bestimmter Oberflächenparameter

$$a_{OF} = 17.3 \text{ MeV}$$

Diagnose

- Nukleonen nahe der Oberfläche wechselwirken mit geringerer Anzahl von Nachbarn
- reduzierte Bindungsenergie im Vergleich zu Nukleonen im Innern des Kerns
- Effekt ist proportional zur Anzahl Kernbausteine auf Oberfläche



liquid drop model

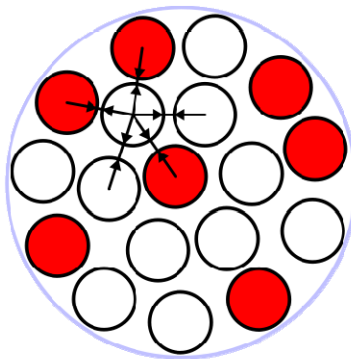
Coulombenergie

Elektrostatische Energie einer Kugel

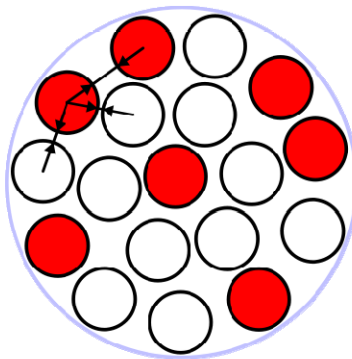
$$\frac{3}{5} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Z_{nucleus} e)^2}{R_{nucleus}}$$

Volumen - vs - Anzahl

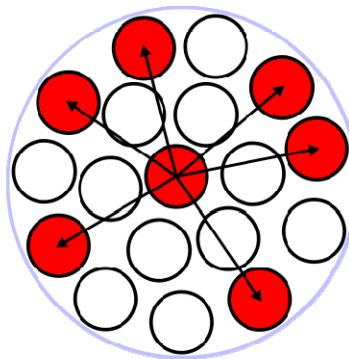
$$R_{nucleus} = \text{const} \cdot A_{nucleus}^{1/3}$$



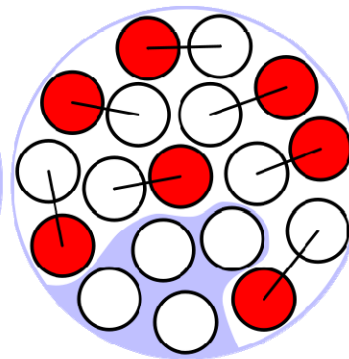
Volume



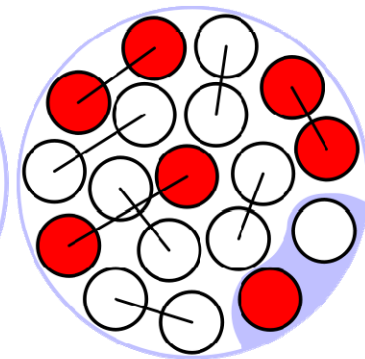
Surface



Coulomb



Asymmetry



Pairing

Coulombenergie

$$E_c = -a_c \frac{Z_{nucleus}^2}{A_{nucleus}^{1/3}}$$

Experimentell bestimmter Coulombparameter

$$a_c = 23.3 \text{ MeV}$$

Diagnose

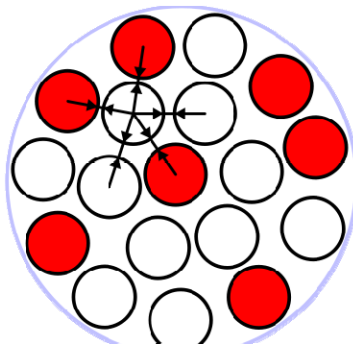
- Kern hat Ladung Z konzentriert auf Volumen einer Kugel mit Radius R
- abstoßende Energie ist proportional zum Quadrat der Kernladungszahl



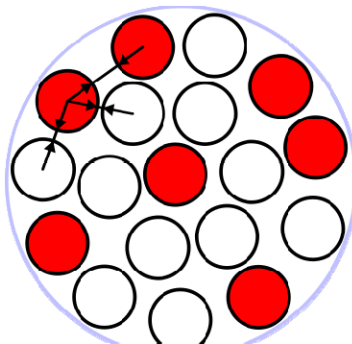
liquid drop model

Asymmetrieenergie

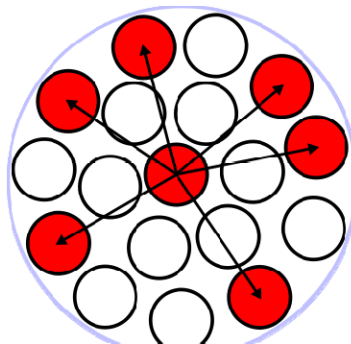
$$N_{nucleus} - Z_{nucleus} = (A_{nucleus} - Z_{nucleus}) - Z_{nucleus} = A_{nucleus} - 2Z_{nucleus}$$



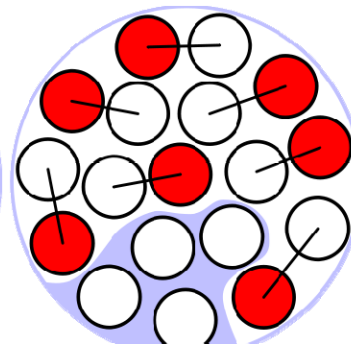
Volume



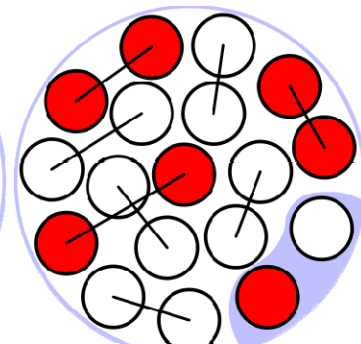
Surface



Coulomb



Asymmetry



Pairing

Asymmetrieenergie

$$E_{asym} = -a_{asym} \frac{(A_{nucleus} - 2Z_{nucleus})^2}{A_{nucleus}}$$

Vorzeichen sollte keine Rolle spielen, daher wird das Quadrat gebildet und durch A dividiert

Experimentell bestimmter Asymmetrieparameter

$$a_{asym} = 0.70 \text{ MeV}$$

Diagnose

- Ungleichgewicht zwischen Anzahl Protonen (Z) und Neutronen (A-Z) wirkt destabilisierend
- bei Abweichung von N=Z reduziert sich Bindungsenergie (unabhängig vom Vorzeichen)
- leichte stabile Kern haben gleiche Anzahl Protonen und Neutronen oder A=2Z

liquid drop model

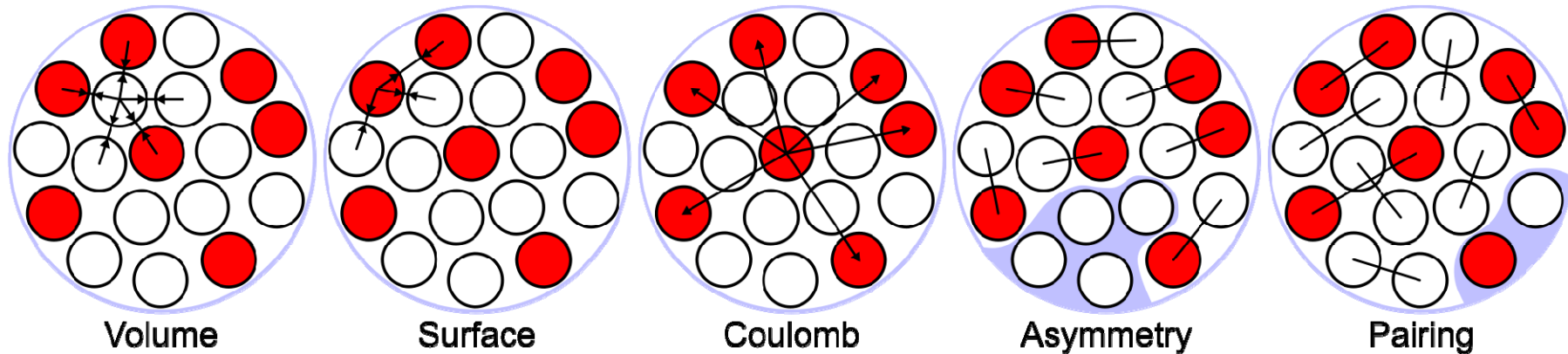
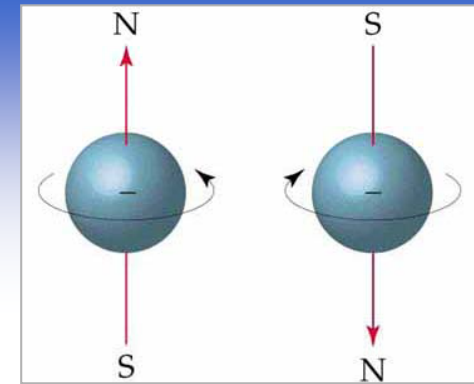
Paarungsenergie

Experimentell bestimmter Paarungsparameter

$$a_{pair} = 11.2 \text{ MeV}$$

$$E_{pair} = \pm \delta_{Pauli} (A_{nucleus}, Z_{nucleus})$$

Paarungsenergie



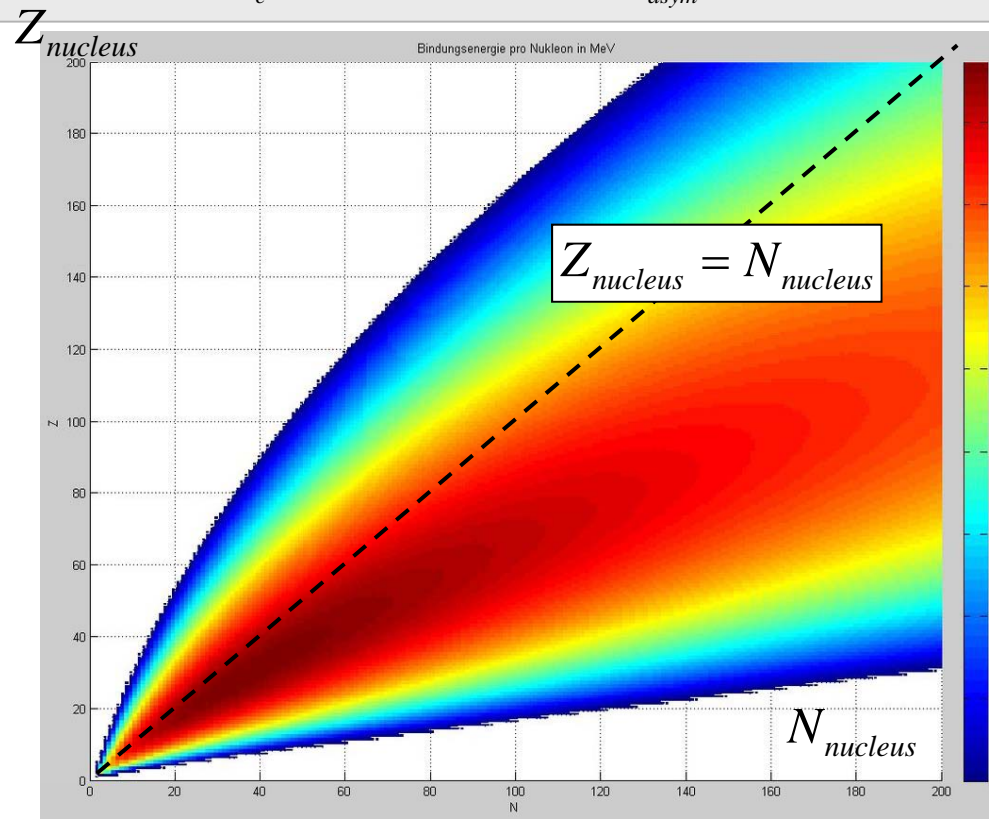
$$\delta_{pair} = \begin{cases} \text{besonders stark gebunden} \\ + \delta_0 = \frac{a_p}{\sqrt{A_{nucleus}}} & Z_{nucleus}, N_{nucleus} \text{ gerade } (A_{nucleus} \text{ gerade (g), sogenannte gg - Kerne)} \\ 0 & A_{nucleus} \text{ ungerade (u), sogenannte ug - und gu - Kerne} \\ - \delta_0 & Z_{nucleus}, N_{nucleus} \text{ ungerade } (A_{nucleus} \text{ gerade, sogenannte uu - Kerne)} \\ \text{besonders schwach gebunden} \end{cases}$$

Diagnose

- Protonen und Neutronen sind Fermionen (Spin 1/2 Teilchen)
- Paarungsenergie berücksichtigt die Spinkopplung der Nukleonen (Pauli-Prinzip)
- Erklärung für diesen Term liefert erst das Schalenmodell

Gamov 1929 und Weizsacker 1935 liquid drop model

$$E_B = \underbrace{a_V A_{nucleus}}_{\substack{\text{Volumen} \\ a_V = 15.56 \text{ MeV}}} - \underbrace{a_s A_{nucleus}^{2/3}}_{\substack{\text{Oberfläche} \\ a_s = 17.23 \text{ MeV}}} - \underbrace{a_c \frac{Z_{nucleus}^2}{A_{nucleus}^{1/3}}}_{\substack{\text{Coulomb} \\ a_c = 23.3 \text{ MeV}}} - \underbrace{a_{asym} \frac{(A_{nucleus} - Z_{protons})^2}{A_{nucleus}}}_{\substack{\text{Asymmetrie} \\ a_{asym} = 0.70 \text{ MeV}}} \pm \delta_{Pauli} \quad a_{Pauli} = 11.2 \text{ MeV}$$

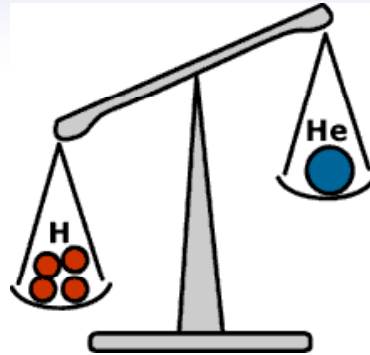


Diagnose

Interessant ist es, sich im weiteren die Bindungsenergie PRO Nukleon anzuschauen

Andere Betrachtungsweise

Massendefekt pro Nukleon



$$1 \text{ amu} = \frac{\text{Umrechnung } 931.5 \text{ MeV}}{c^2}$$

Kohlenstoff

Massendefekt

$$\Delta m_{\text{}^6_6\text{C}} = z_{\text{}^6_6\text{C}} m_p + n_{\text{}^6_6\text{C}} m_n - m_{\text{}^6_6\text{C}}$$

$$\Delta m_{\text{}^6_6\text{C}} = 6(1.007825 \text{ amu}) + 6(1.008665 \text{ amu}) - 12 \text{ amu} = 0.09894 \text{ amu}$$

$$E_B^{\text{}^6_6\text{C}} = \Delta m_{\text{}^6_6\text{C}} c^2 = 0.09894 \text{ amu} \cdot 931.5 \frac{\text{MeV}}{\text{amu} \cdot c^2} = 92.16 \text{ MeV}$$

$$\frac{E_B^{\text{}^6_6\text{C}}}{A_{\text{Kern}}} = \frac{92.16 \text{ MeV}}{12} = 7.68 \text{ MeV}$$

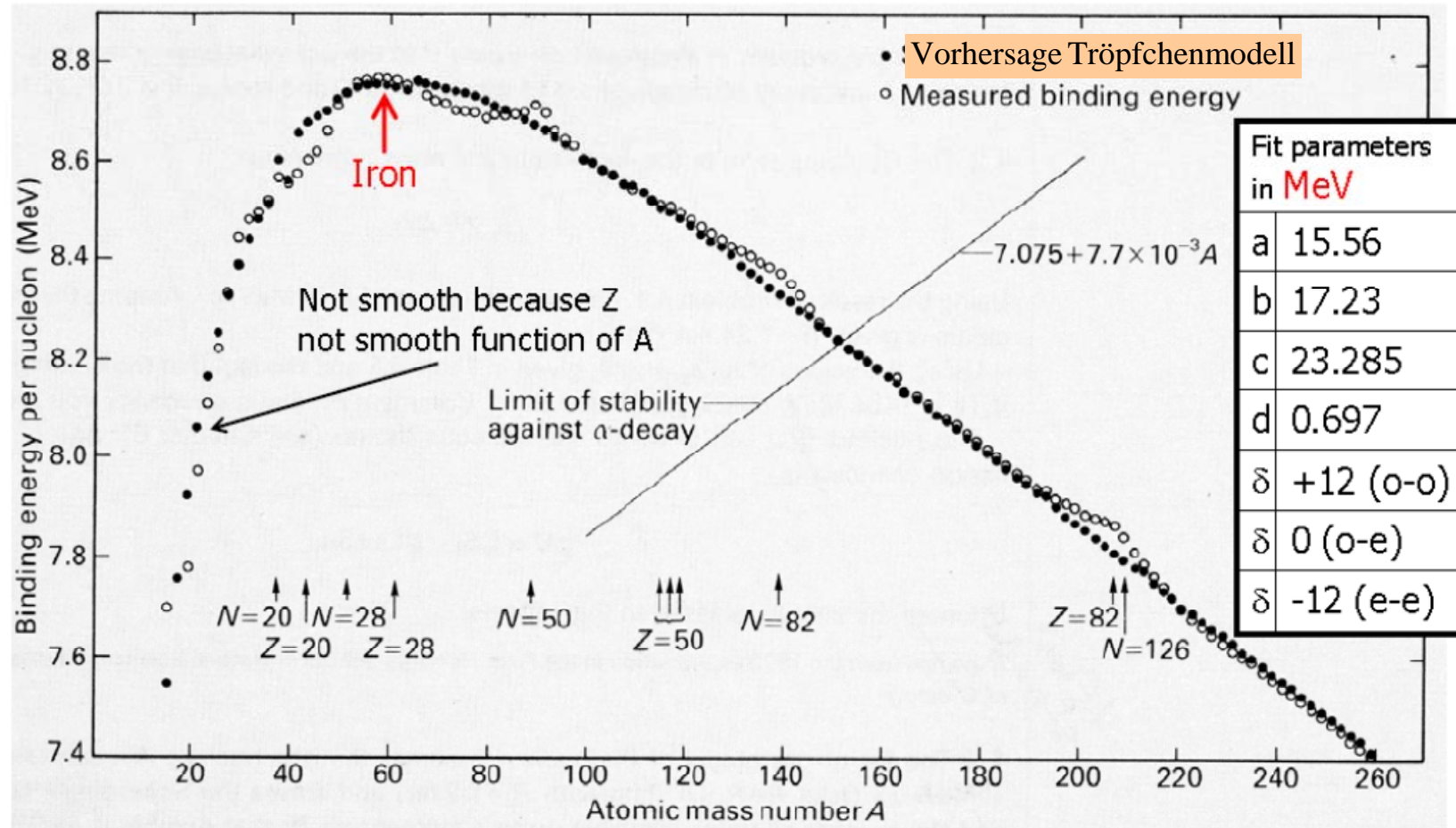
Bindungsenergie pro Nukleon

Diagnose

Bindungsenergie PRO Kernbaustein um Größenordnungen höher als Bindungsenergie des GESAMTEN Elektronensystem (~keV)

Kernbindungsenergie nach Tröpfchenmodell

Binding Energy vs. A for beta-stable odd-A nuclei

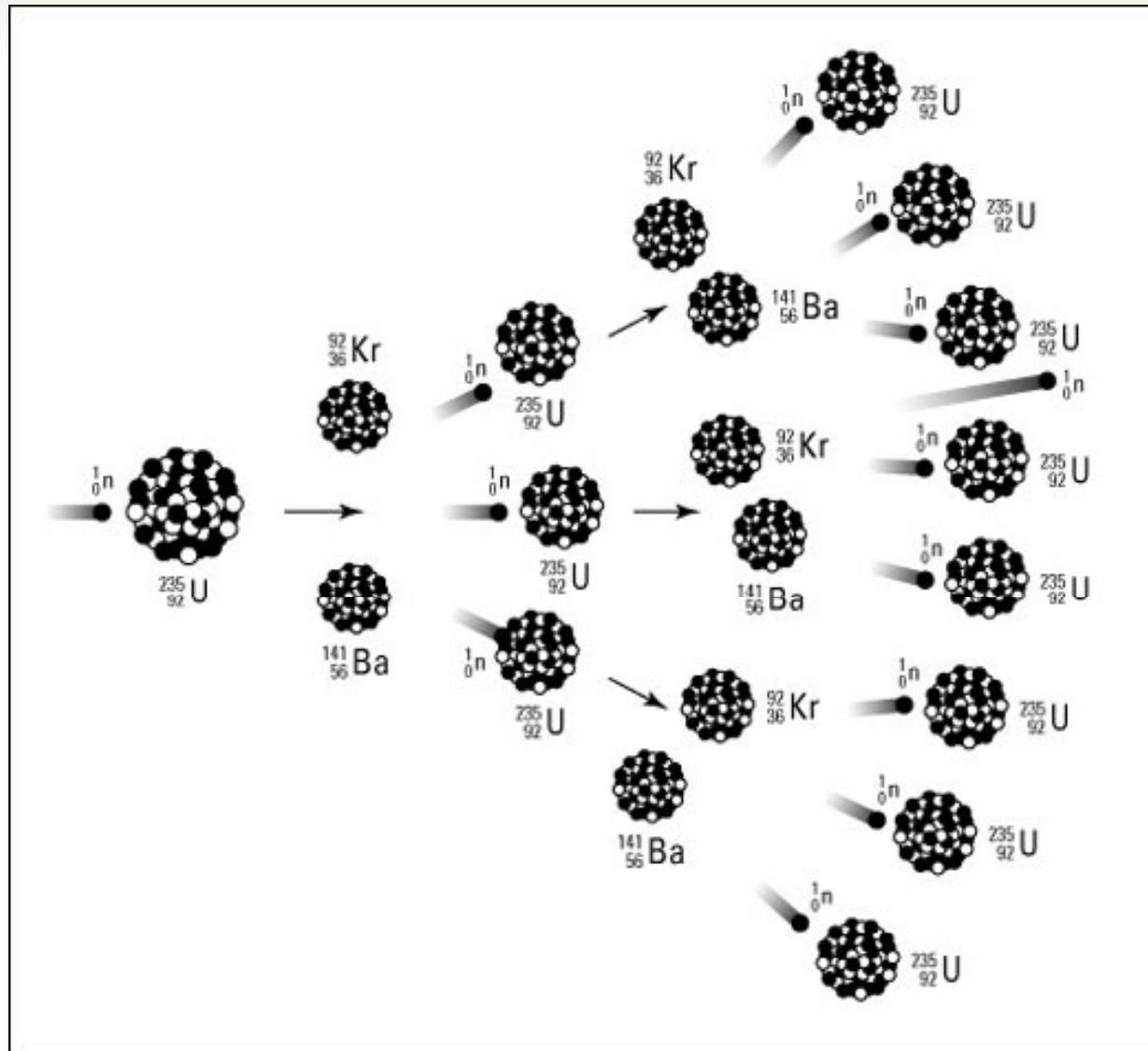


Diagnose

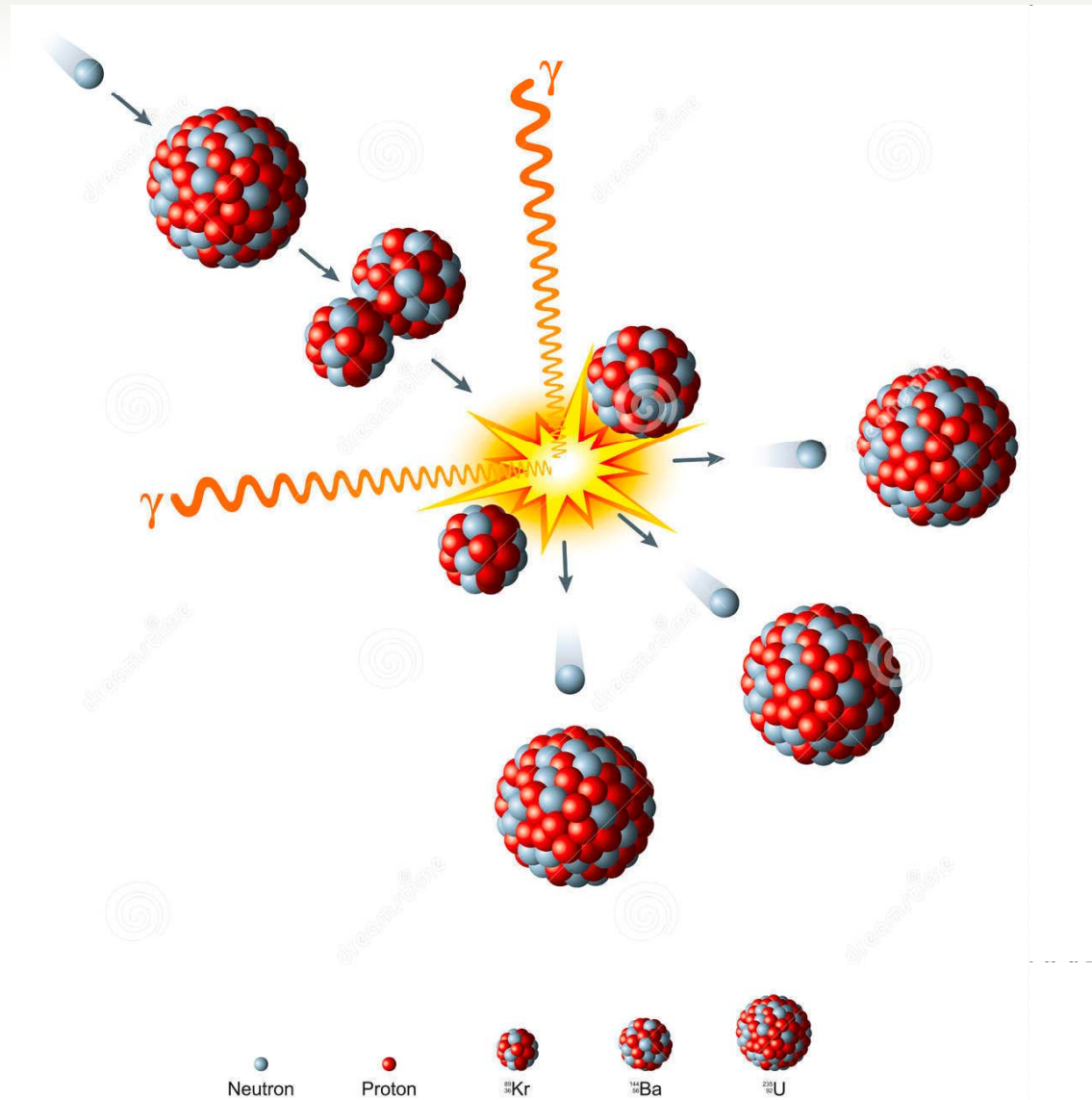
- Tröpfchenmodell sagt Bindungsverhältnisse im Kern gut voraus
- feinere Details können allerdings nicht wiedergegeben werden

Thema Kerne

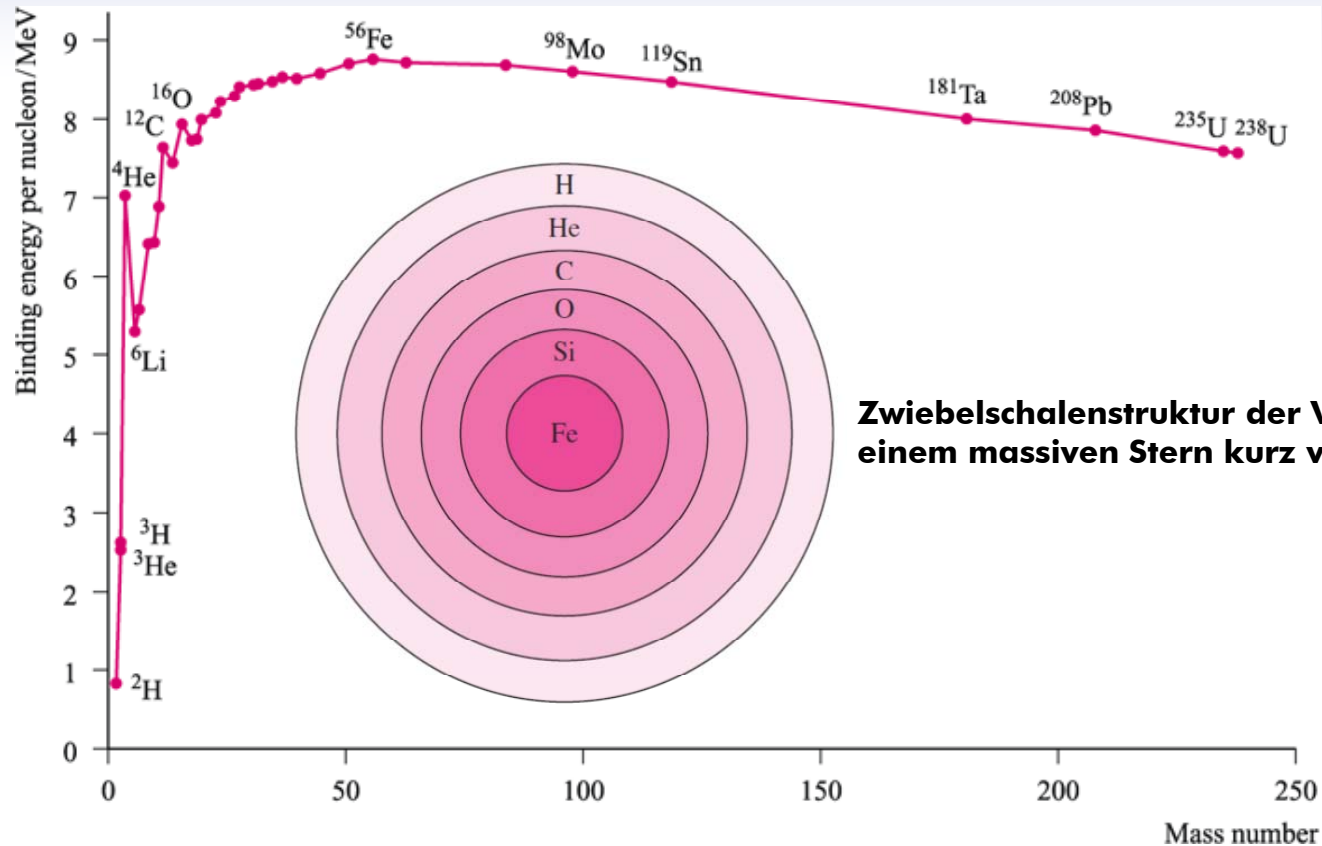
Kerneaktionen



Thema Kerne Kernreaktionen



Kernbindungsenergie Elementabhängigkeit

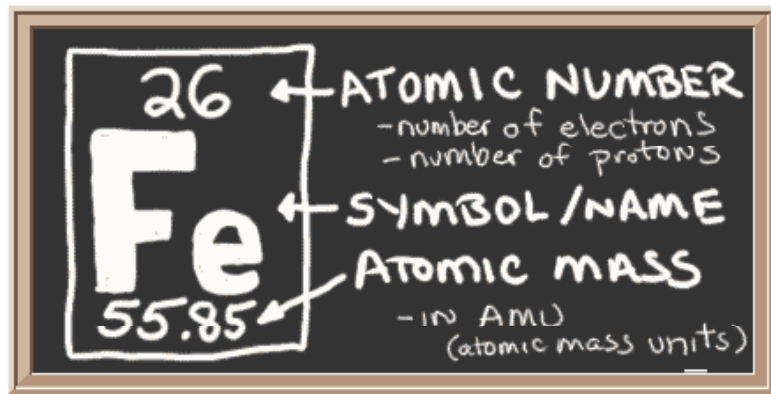


Zwiebelschalenstruktur der Verteilung der Elemente in einem massiven Stern kurz vom Übergang zur Supernova

Diagnose

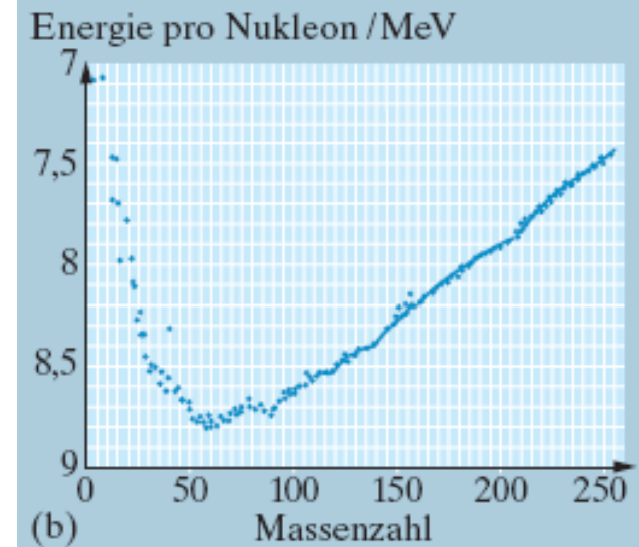
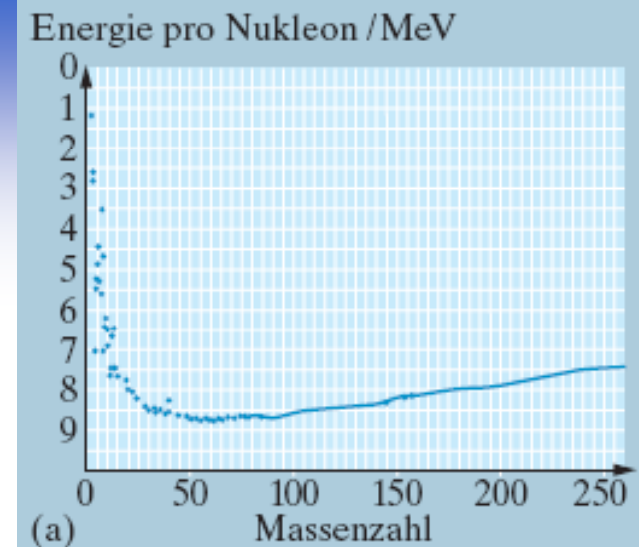
- Bindungsenergie resultiert aus starker Wechselwirkung mit nächsten Nachbarn
- größere Kerne spüren stärkere Coulombabstoßung
- Bindungsenergie im Kern sinkt deshalb mit der Ordnungszahl bei größeren Kernen
- Bindungsenergie von 10 MeV pro Nukleon ist etwa 1% der Ruhemasse
- Kern kann deshalb als System aus einzelnen Nukleonen betrachtet werden

fusion or fission Energiegewinn



maximale Bindungsenergie pro Nukleon erreicht bei Element ^{56}Fe

$$\frac{\text{Bindungsenergie}}{\text{Nukleon}} = 8.77 \text{ MeV}$$



Diagnose

- **MAXIMALE** Bindungsenergie pro Nukleon erreicht bei Element Eisen ($A=56$) erreicht
- Gruppe aus 60 Nukleonen würde niedrigsten Bindungszustand einnehmen
- Energiegewinn durch **FUSION** leichter Kerne zu schweren Atomkernen
- Energiegewinn durch **SPALTUNG** schwerer Kerne in mittelschwere Atomkerne

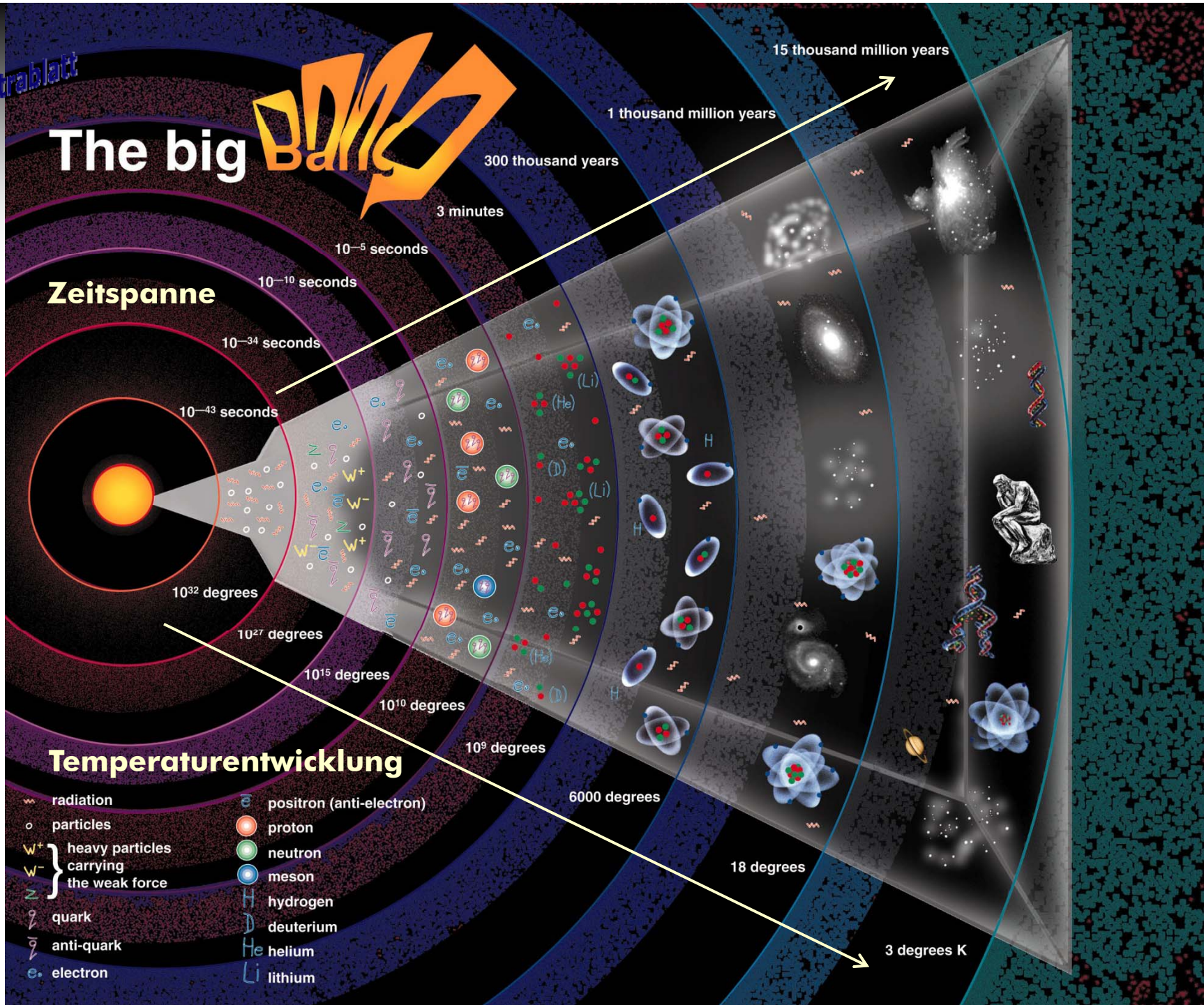
Atomium (Brüssel) hat Kristallstruktur des Eisens



Diagnose

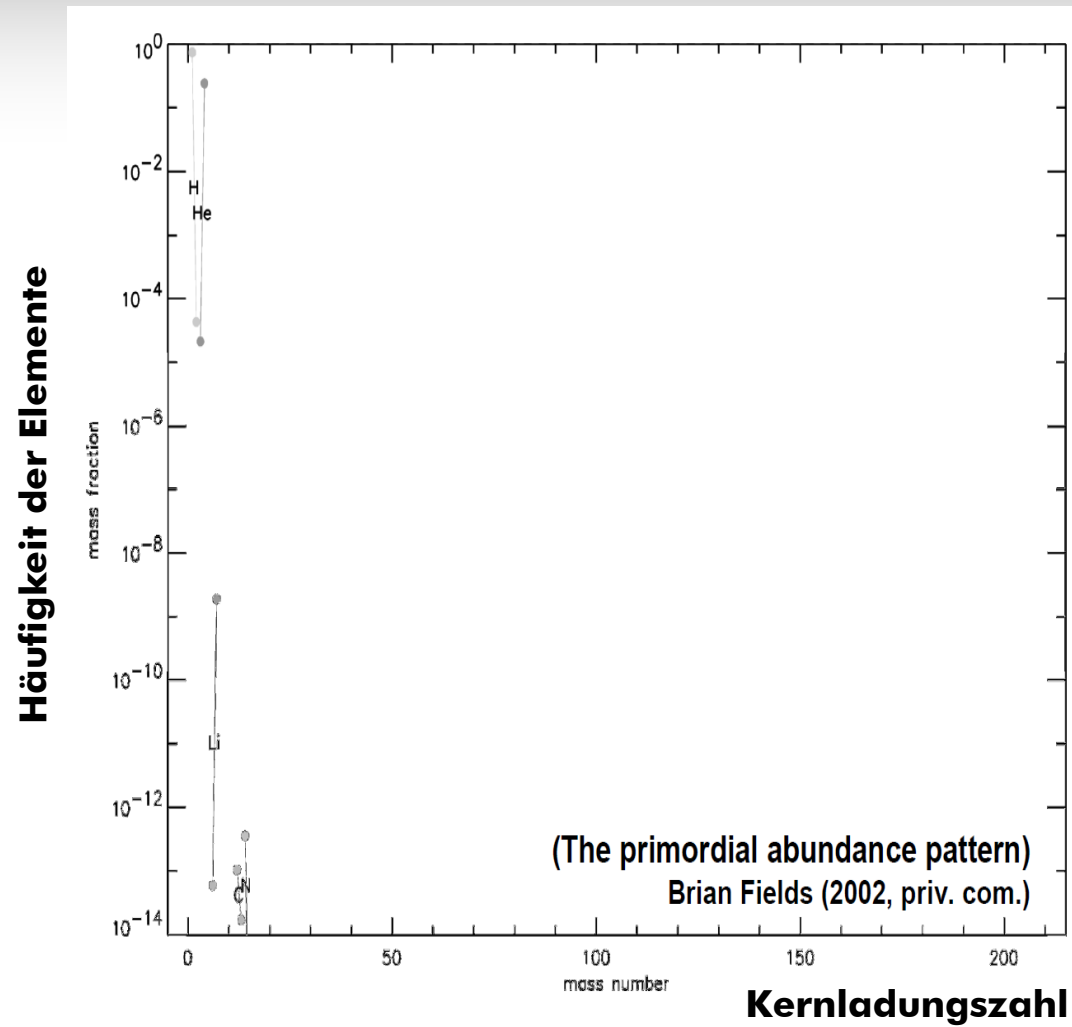
Maximale Bindungsenergie pro Nukleon wird beim Element Eisen ($A=56$) erreicht

The big Bang



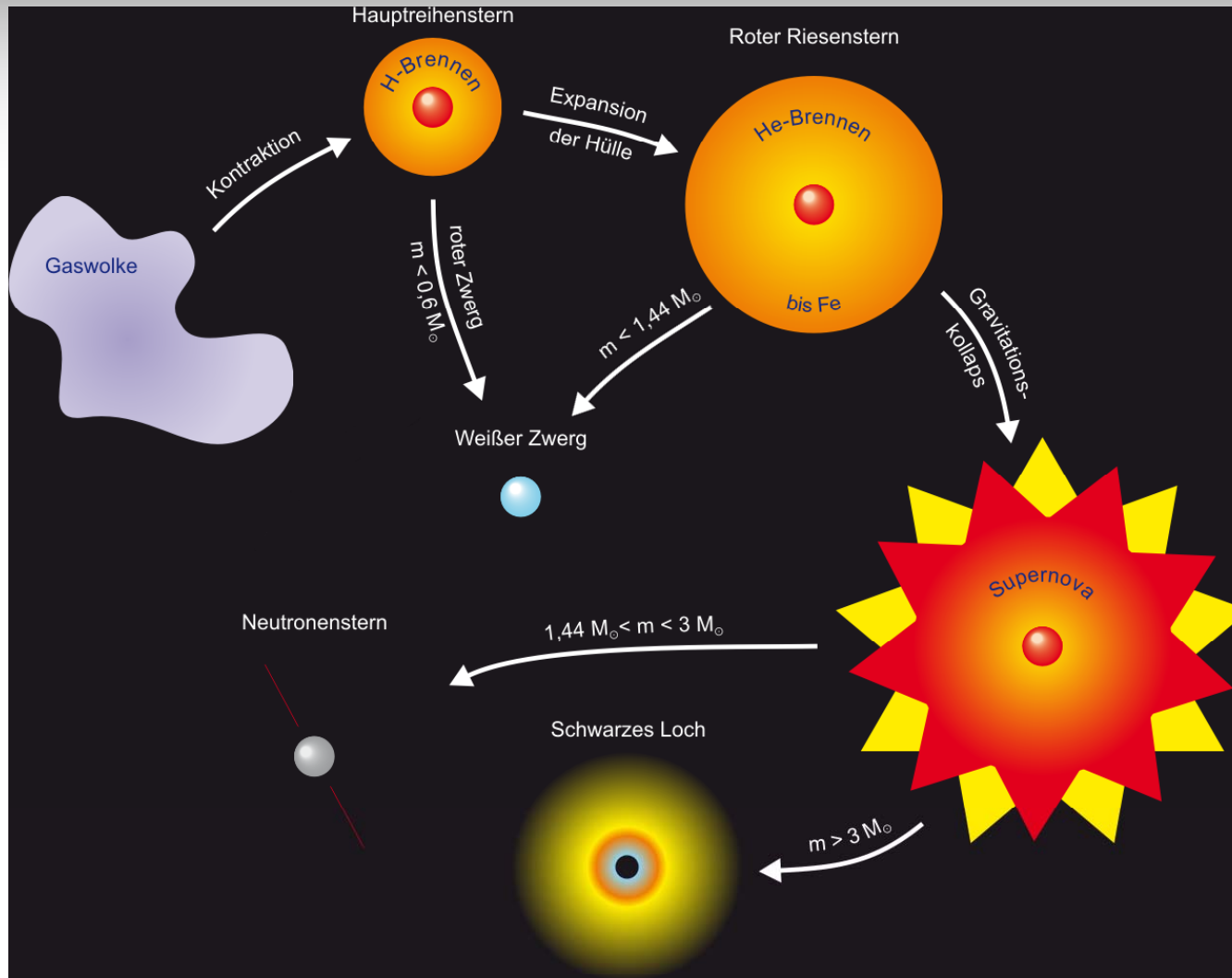
Historie des Universums

Sterne damals



Diagnose
Direkt nach Urknall gab es im Wesentlichen nur leichte Elemente

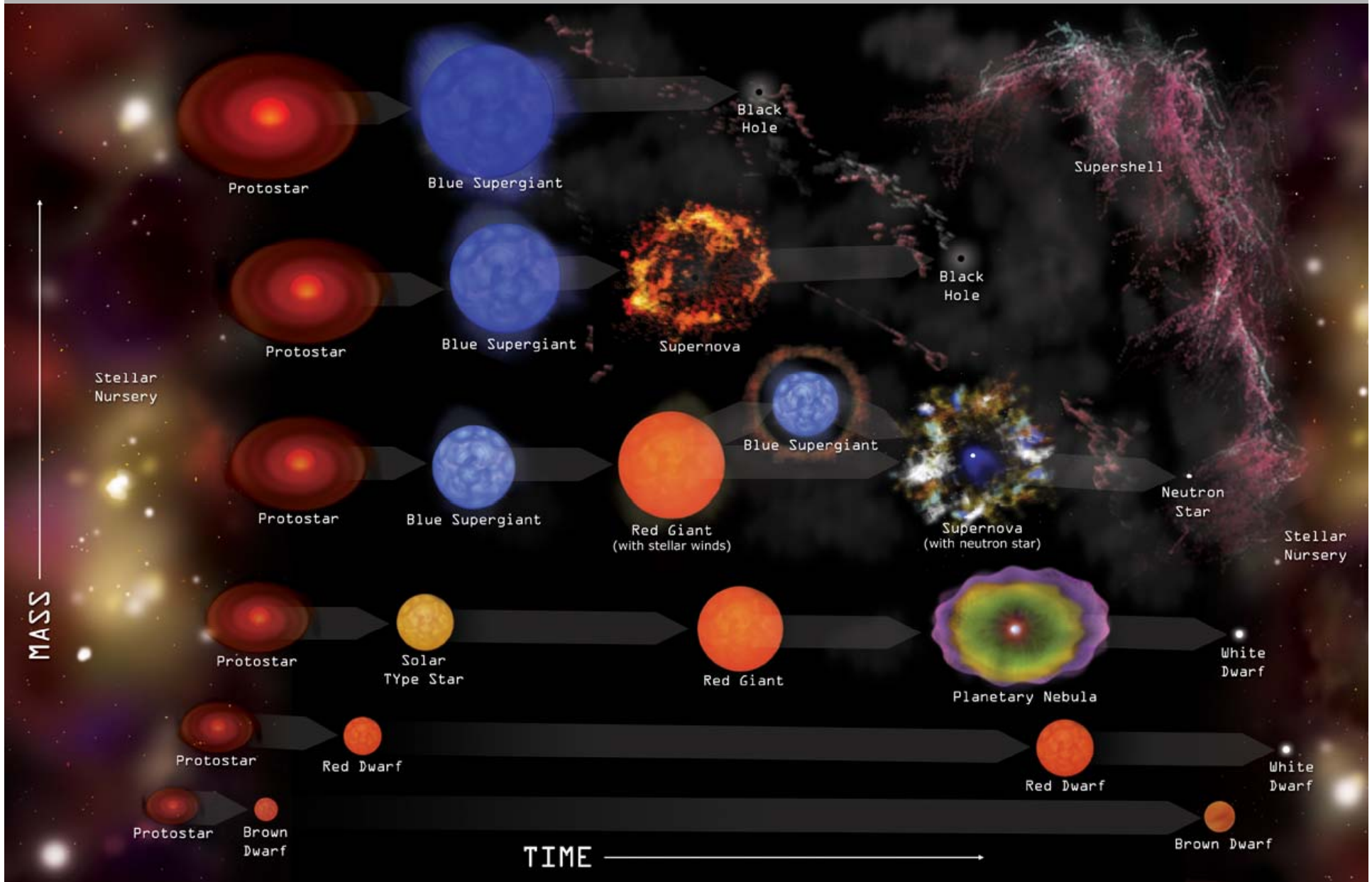
Sternentwicklung



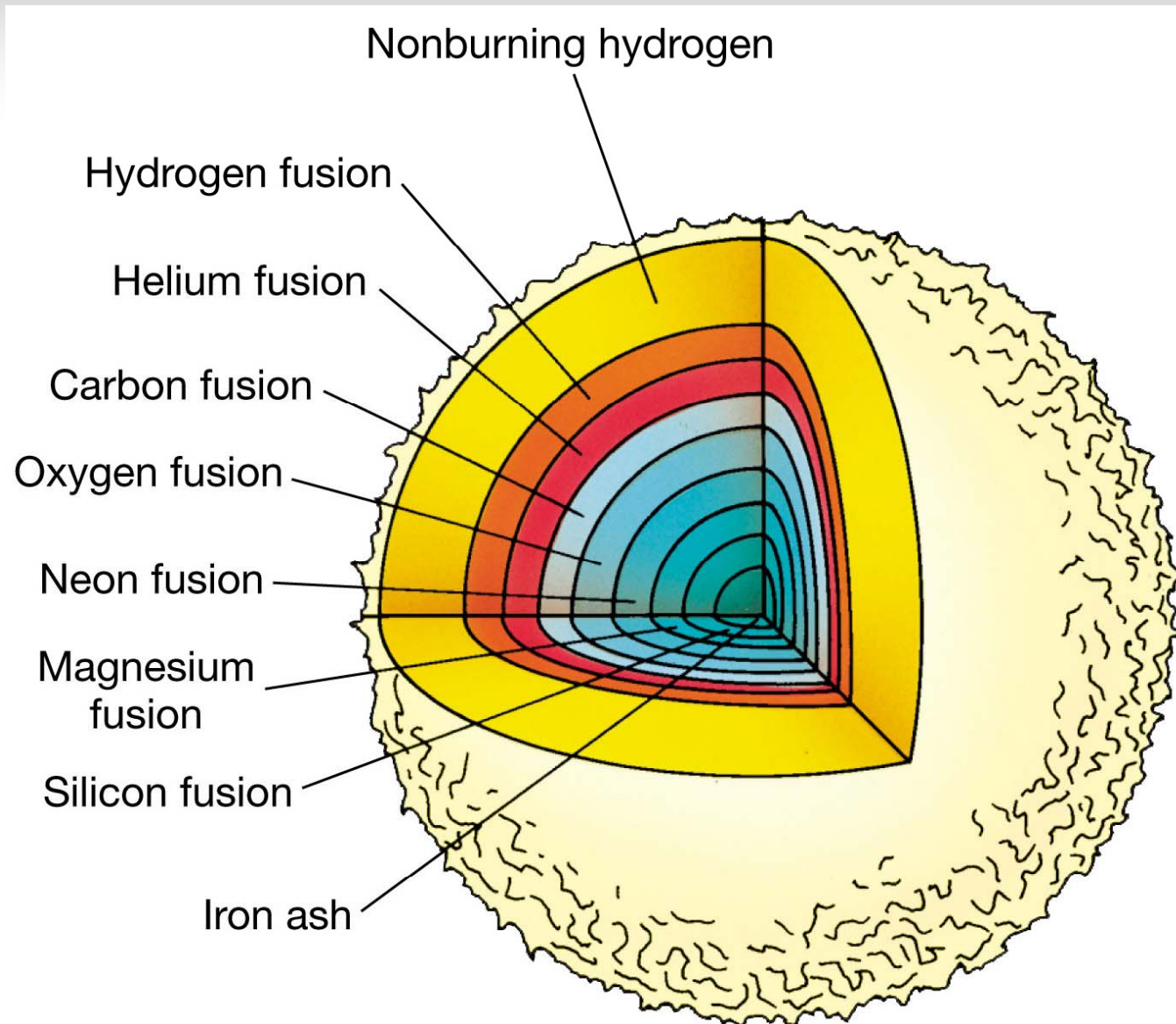
Diagnose

Sterne durchlaufen im Laufe ihrer Entwicklung charakteristische Entwicklungsstadien

Sternentwicklung

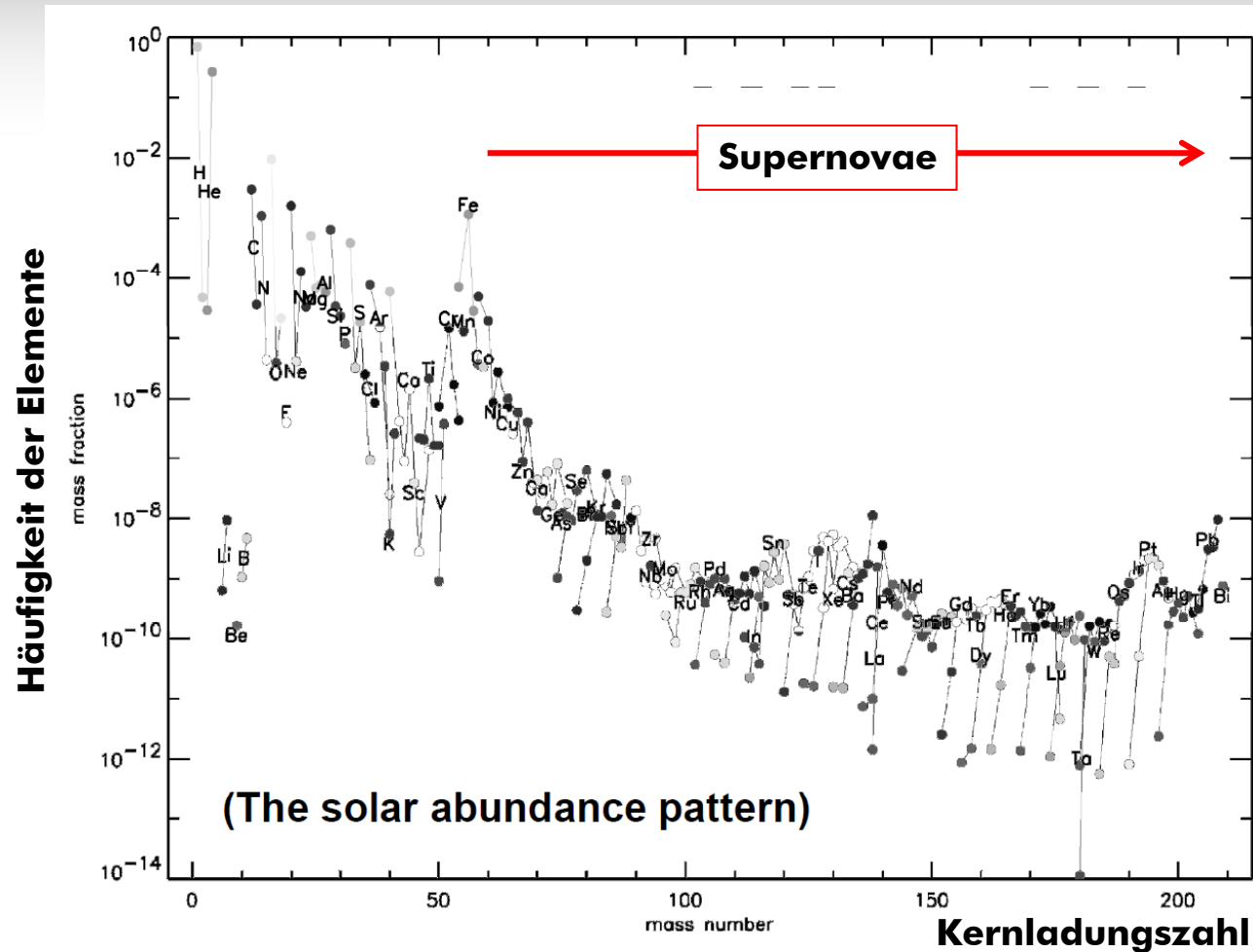


Spärentwicklung eines Sternes Zwiebelschalenbrennen



Historie des Universums

Sterne heute



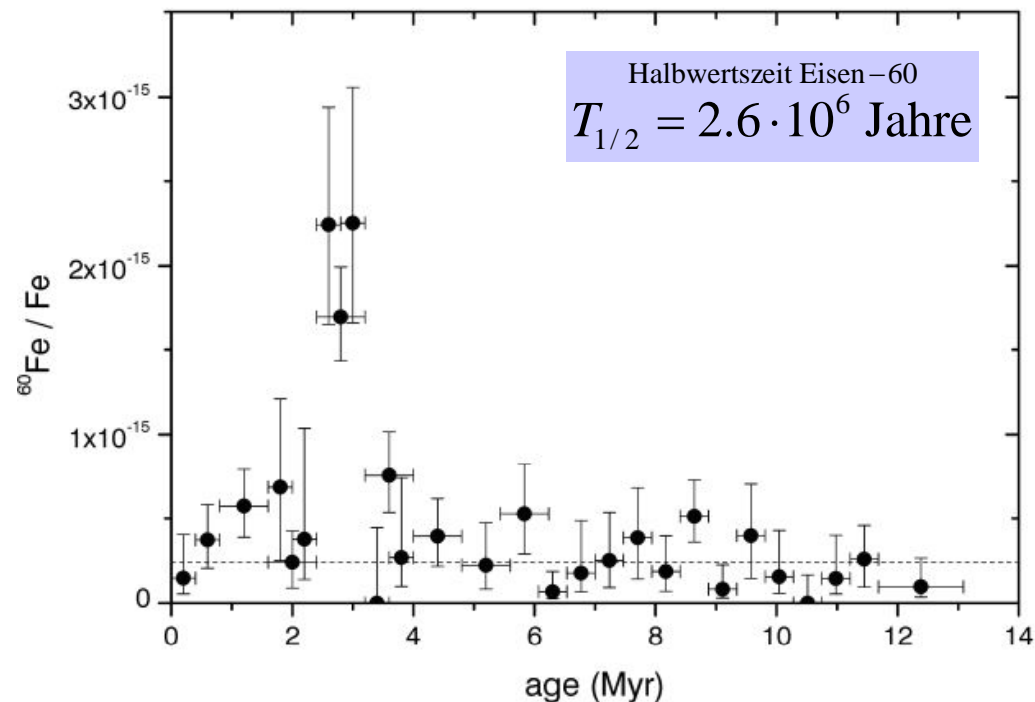
Diagnose

- mittelschwere Elemente entstanden durch Sternentstehung (bis ^{56}Fe)
- Fusion zu noch schwereren Elementen setzt keine Energie mehr frei
- alle schweren Elemente sind erst durch Supernova-Explosionen entstanden

Supernova in der Nachbarschaft

Symptome

- auf dem Pazifikboden wurde in 2 Milliarden alten Gesteinschichten Eisen-60 gefunden
- Eisen-60 ist radioaktiv und hat Halbwertszeit von 2.6 Millionen Jahren
- da Erde deutlich älter sollte Anteil Fe-60 auf der Erde äußerst gering sein



Diagnose

- Analyse deutet auf Ausbruch einer Supernovaexplosion 10 Millionen Jahren in einer Entfernung von nur 100 Parsec hin
- Entfernung zu Alpha Centauri ist 1.3 Parsec

Recent near-Earth supernovae probed by global deposition of interstellar radioactive ^{60}Fe
Wallner et al. Nature 532,69 (2016)

Tröpfchenmodell 1939 Kernspaltung

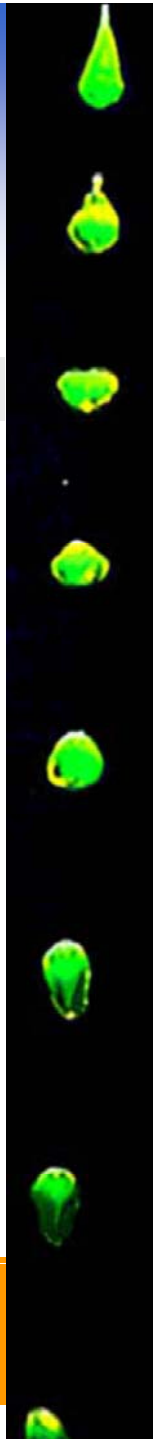
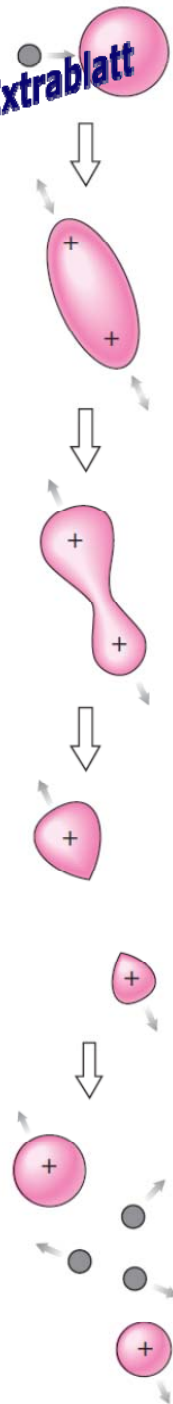
Flüssigkeitstropfen vollführen im freien Fall Form-Oszillationen

Diagnose

Bohr und Wheeler vermuten, dass Urkerne ähnliche Oszillationen aufweisen, wenn Kern durch beispielsweise Neutronen bombardiert wird

Extrablatt

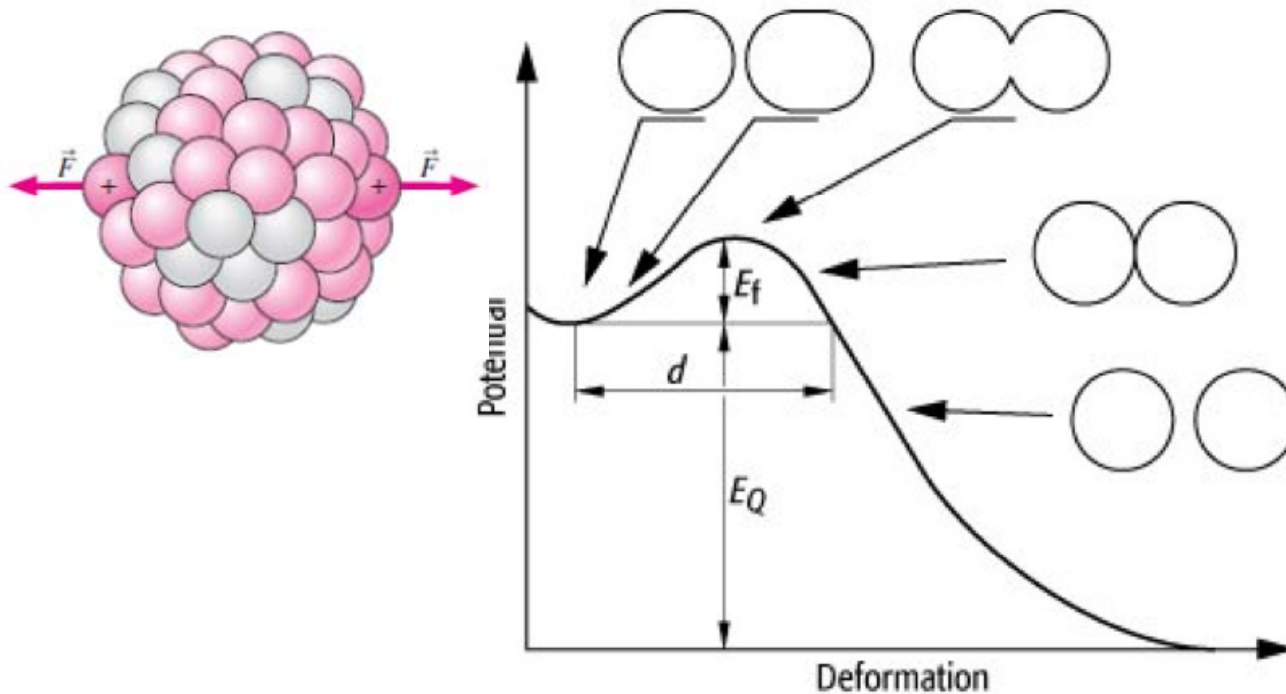
Time



Tröpfchenmodell Kernspaltung

Symptome

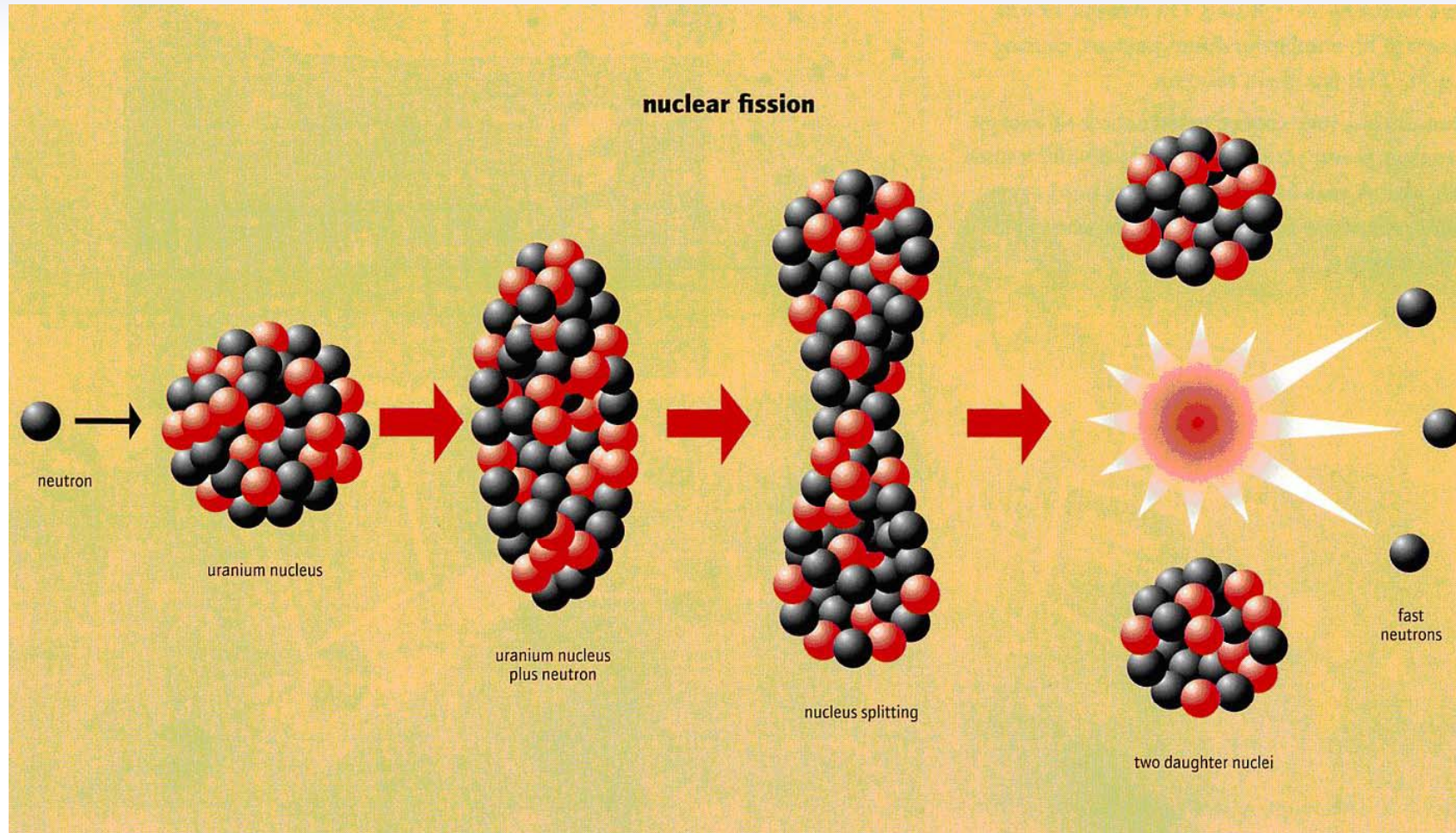
Weit entfernte Protonen spüren Abstoßung durch Coulomb, aber keine starke Wechselwirkung



Diagnose

- Tröpfchenmodell kann Spaltung radioaktiver Kerne erklären
- Anregung des Kerns löst sogenannte Atmungsmode aus
- Kern VERFORMT sich und schnürt sich in der Mitte ein
- Coulombkraft entfernter Kerne überwiegt gegenüber kurzreichweitiger starker Wechselwirkung
- Energieüberschuss reicht aus, um Reaktionsbarriere zu überwinden
- Kern zerfällt in etwa GLEICHGROSSE Fragmente

Tröpfchenmodell Fission

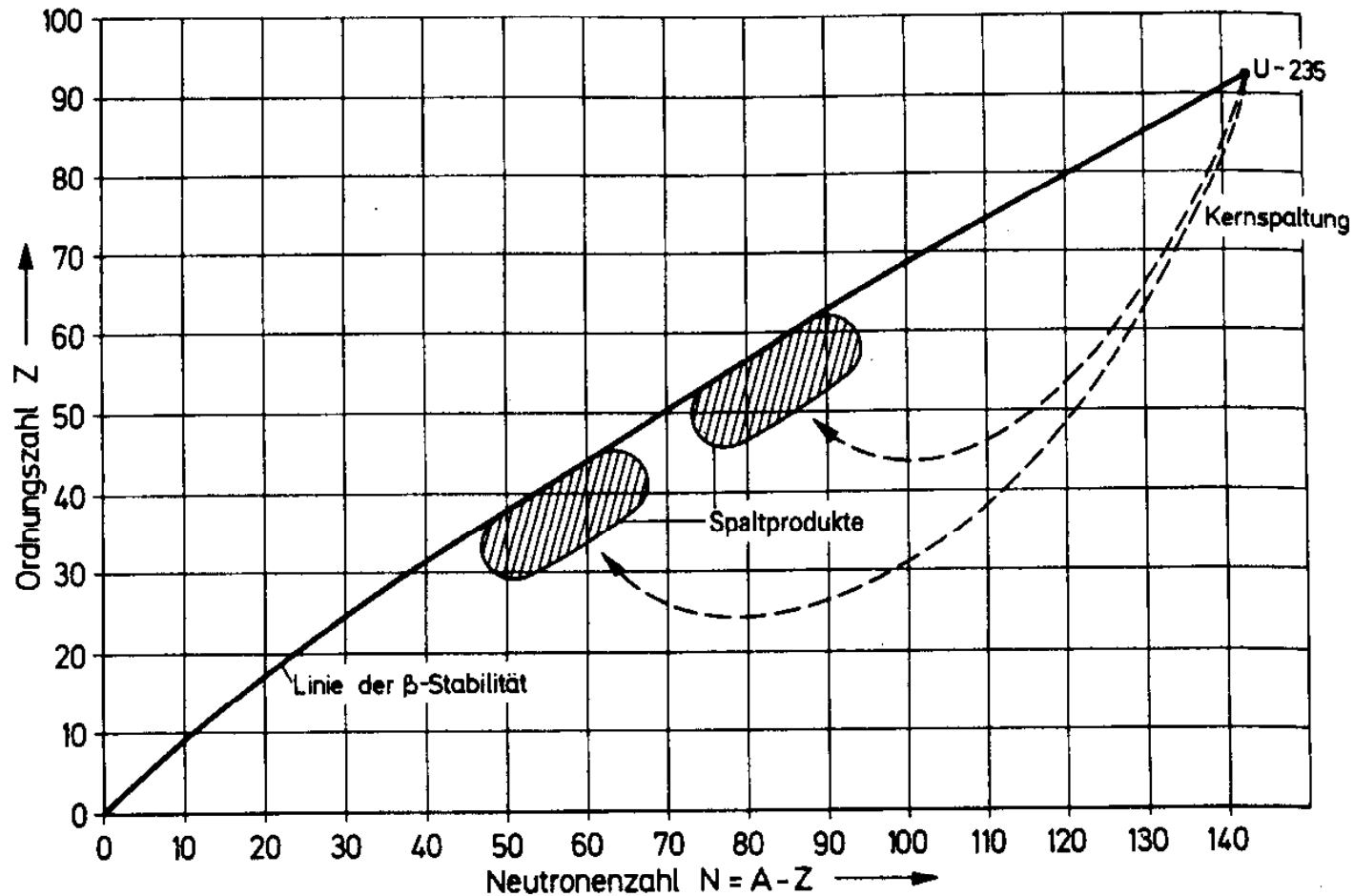


Diagnose

- Stoß und Absorption von Neutron bringt Kern in angeregten Zustand
- innere Energie des Kerns reicht aus, um Spaltung herbeizuführen

Liquid drop model Kernfragmente

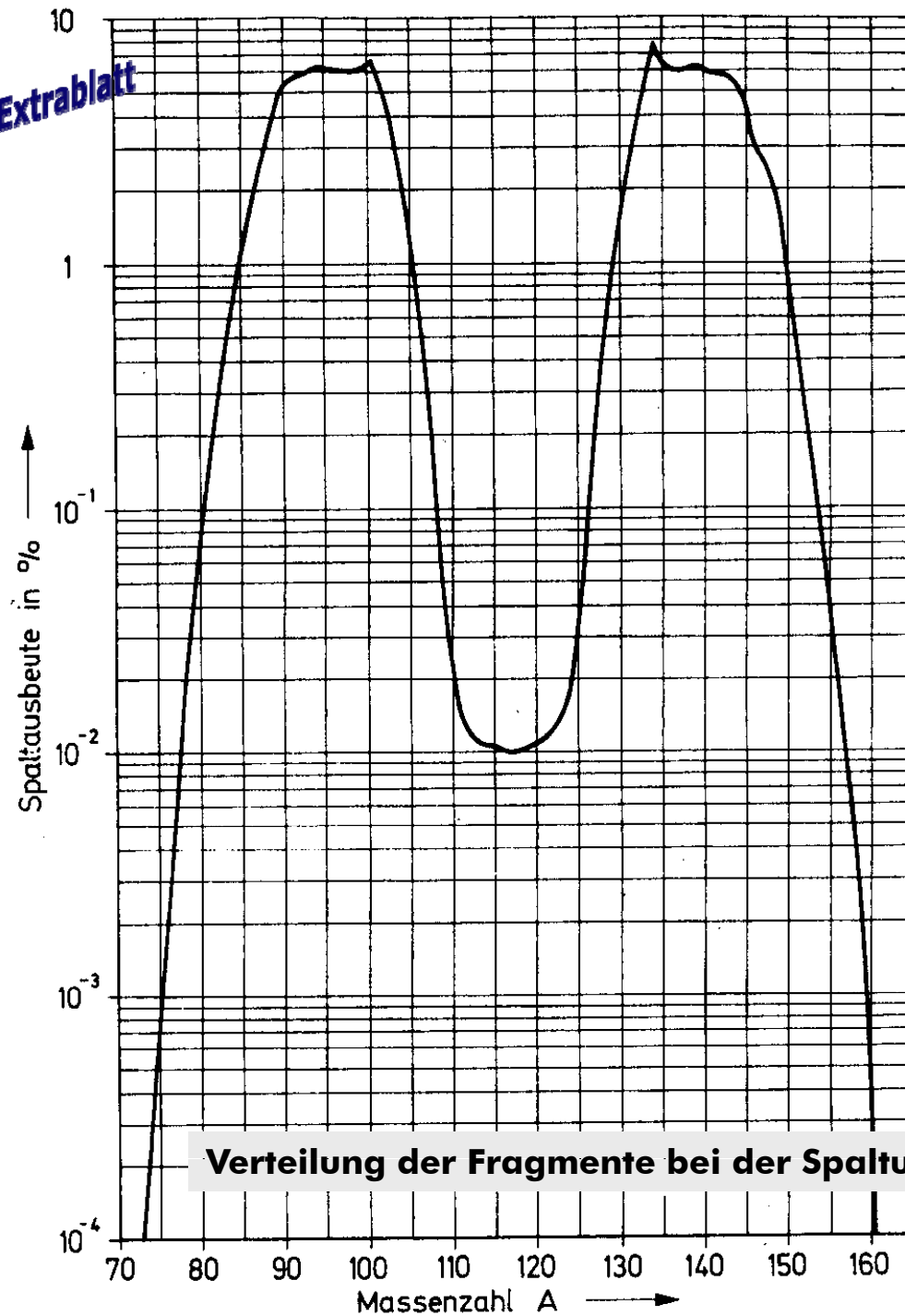
Nach Tröpfchenmodell erwartete Fragmente bei der Spaltung von ^{235}U



Diagnose

Spaltprodukte ergeben sich in einem engen Bereich von Ladungs- und Neutronenzahl

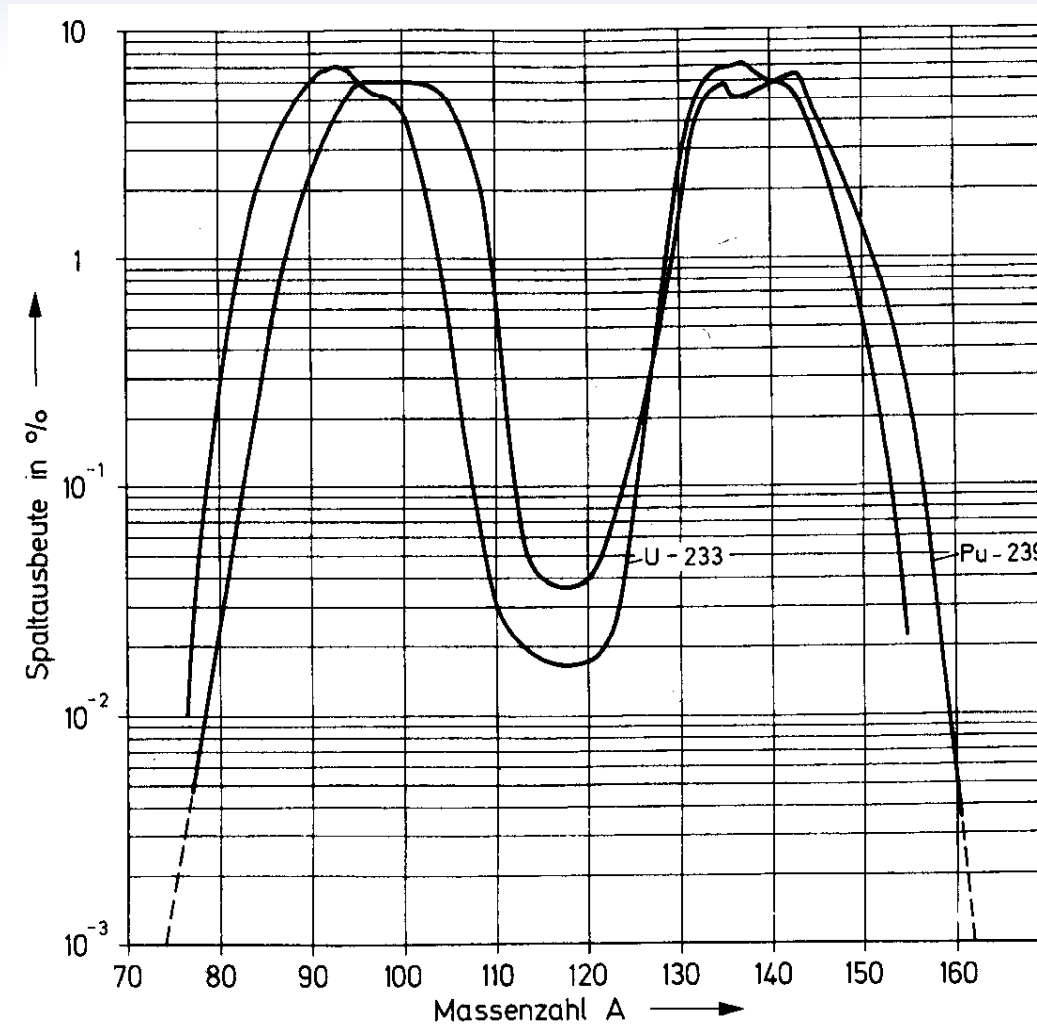
Extrablatt



Verteilung der Fragmente bei der Spaltung von ^{235}U durch Neutronen

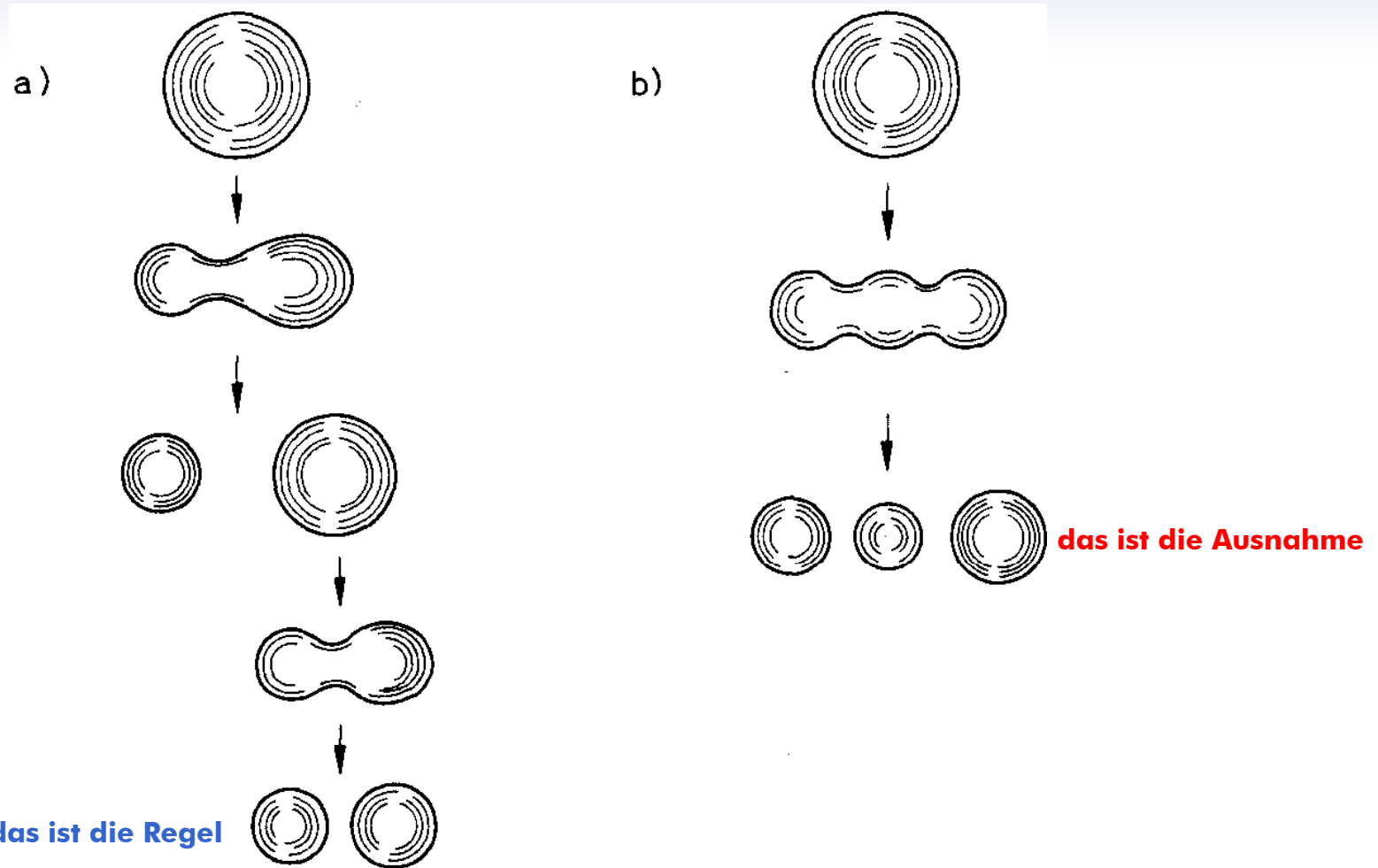
Liquid drop model Kernfragmente

Liquid drop model Fission



Diagnose
Vergleich der Fragmentmassen für unterschiedliche Ursprungsisotope

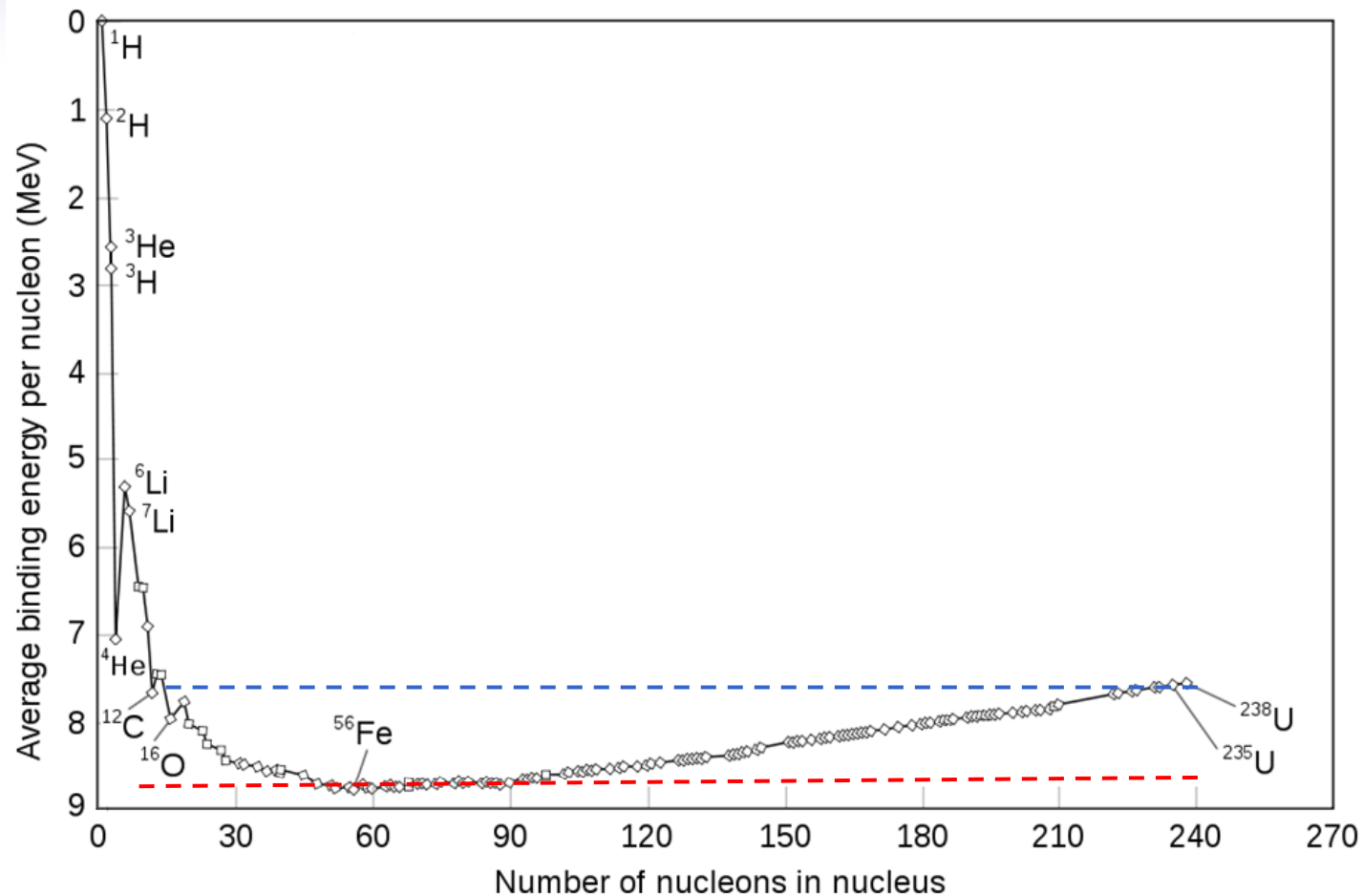
Liquid drop model Fission



Diagnose

- Spaltung in drei Fragmentkerne ist ein äußerst seltener Zerfallskanal
- Beispiele sind z.B. ^{233}U und ^{239}Pu

Bindungsenergie schwer vs mittelschwer



Diagnose

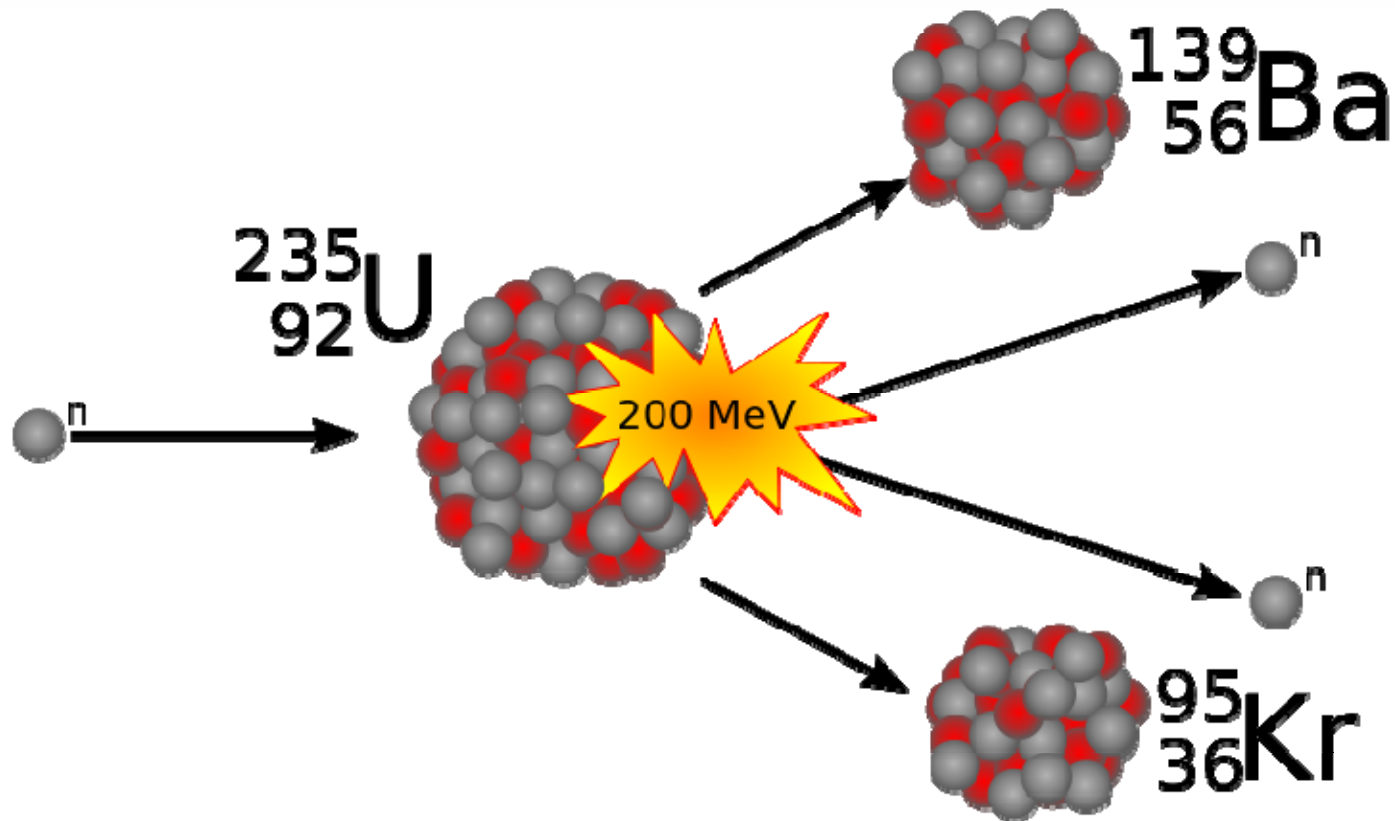
- mittelschwere Kerne haben Bindungsenergien von 8.5 bis 9.0 MeV pro Nukleon
- schwere Atomkerne haben Bindungsenergie von 7.5 bis 8.0 MeV pro Nukleon
- Änderung in der Bindungsenergie als Funktion von Z beträgt etwa 1 MeV

fission

Energielieferant

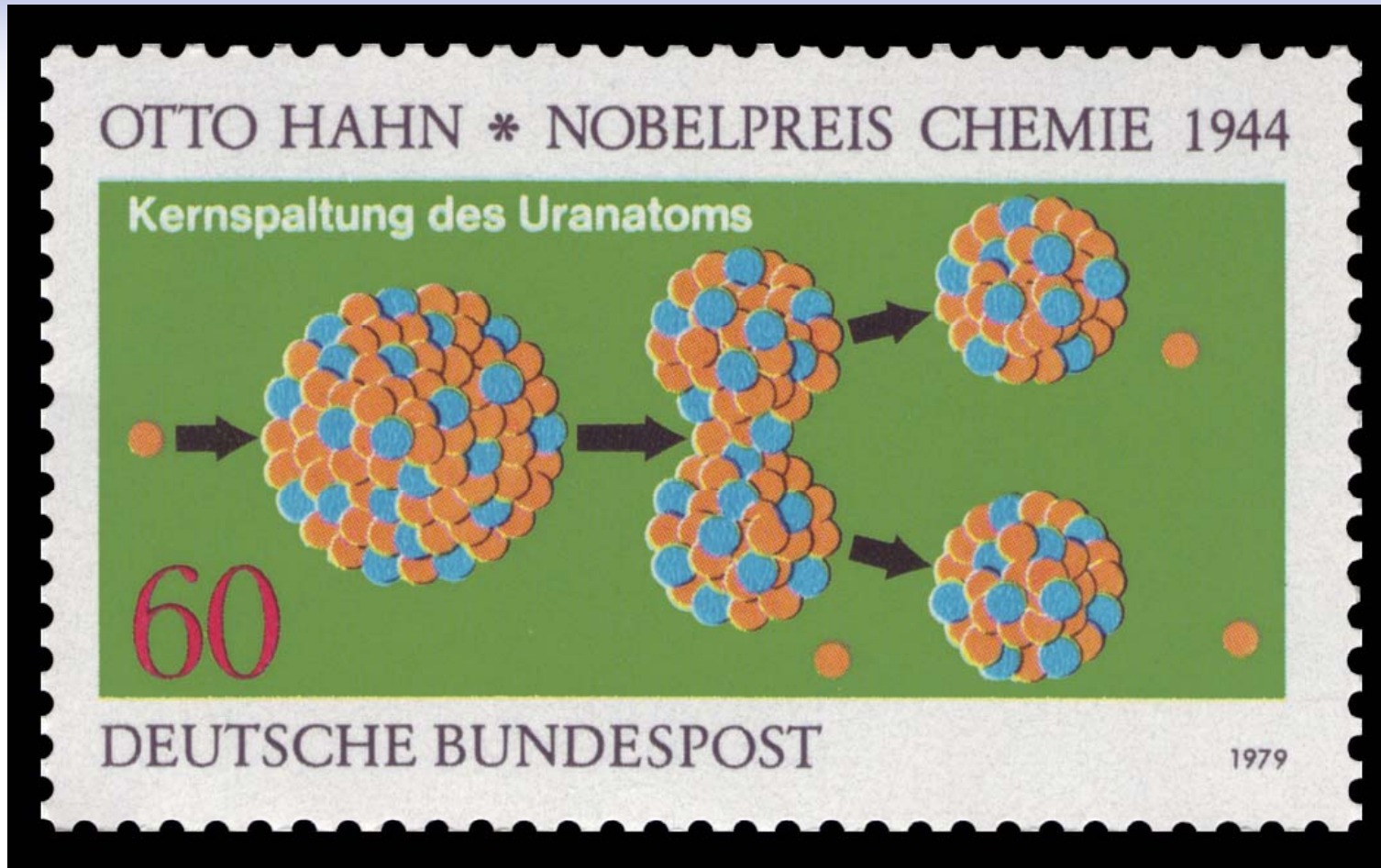
Symptome

Bei Spaltung schwerer Kerne wird Energie von 1 MeV pro Nukleon freigesetzt



Diagnose

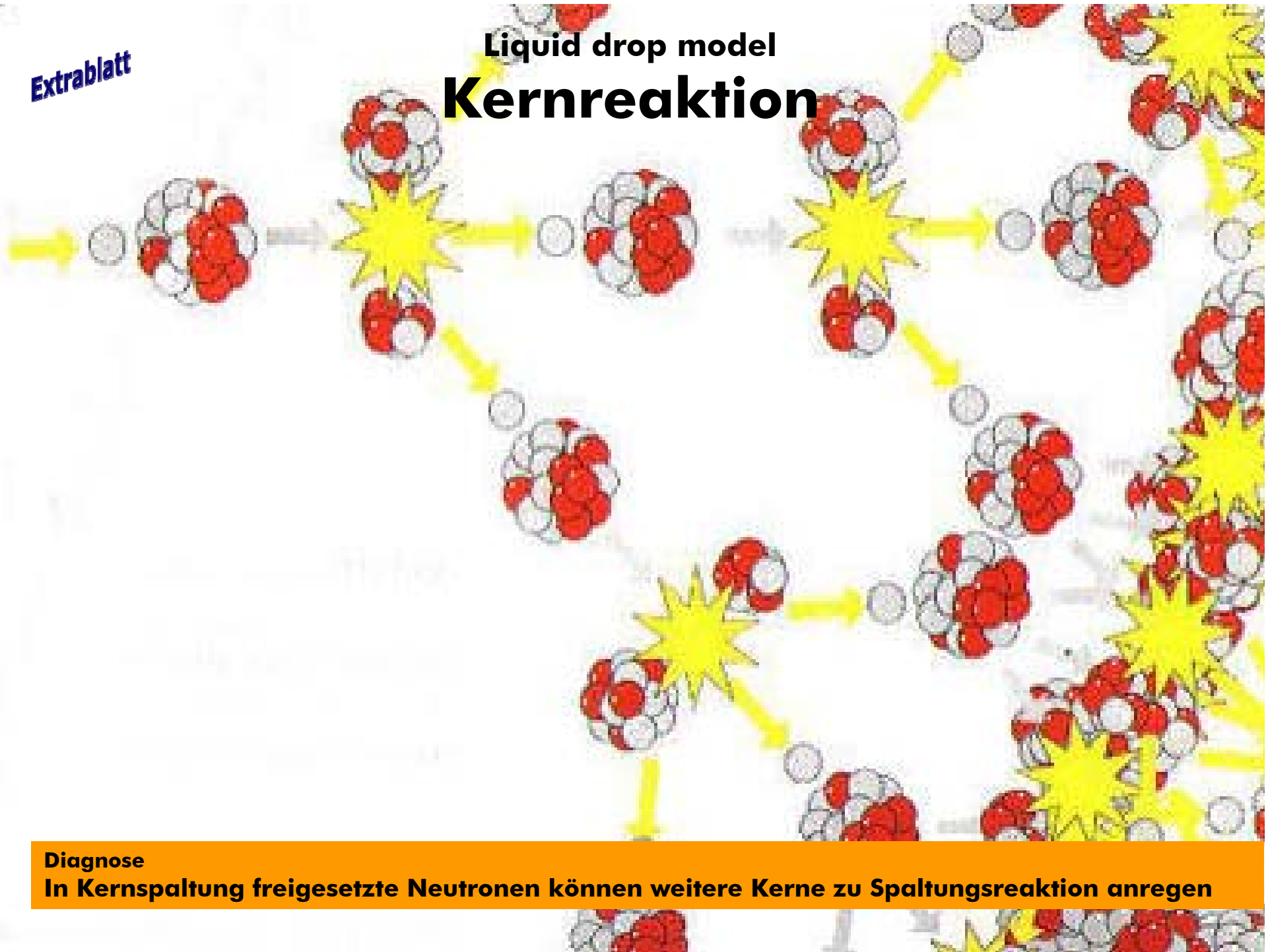
- für Uran ergibt sich Energie von 200 MeV (1 kg U-235 ~ 2.4e7 kWh oder 2500t Steinkohle)
- bei der Kernspaltung werden AUSSDERDEM Neutronen freigesetzt
- Ursache ist, dass Spaltprodukte in der Regel im Verhältnis WENIGER Neutronen aufweisen
- Neutronen aus der Kernspaltung können WEITERE Kernreaktionen auslösen



**The Nobel Prize in Chemistry 1944 was awarded to Otto Hahn
for his discovery of the fission of heavy nuclei**

Extrablatt

Liquid drop model
Kernreaktion



Diagnose

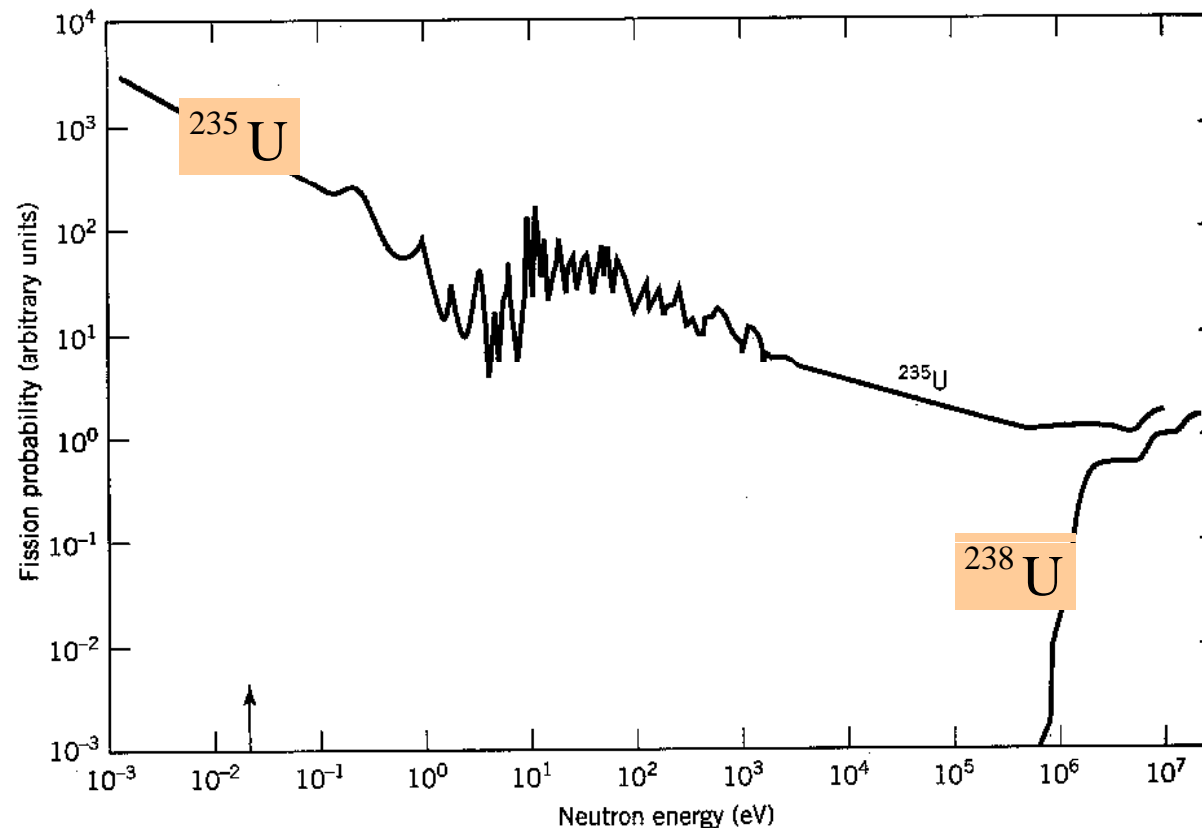
In Kernspaltung freigesetzte Neutronen können weitere Kerne zu Spaltungsreaktion anregen

Kernspaltung HowTo

Aktivierungsgleichung

Symptome

Stoß mit Neutronen kann Spaltung von schweren Atomkernen auslösen



Diagnose

- bei niedrigen Stoßenergie ist Wahrscheinlichkeit für Kernspaltung in der Wechselwirkung mit langsamen (thermischen) Neutronen für ^{235}U deutlich höher als bei ^{238}U
- erst ab Stoßenergien im MeV Bereich wird Reaktion vergleichbar

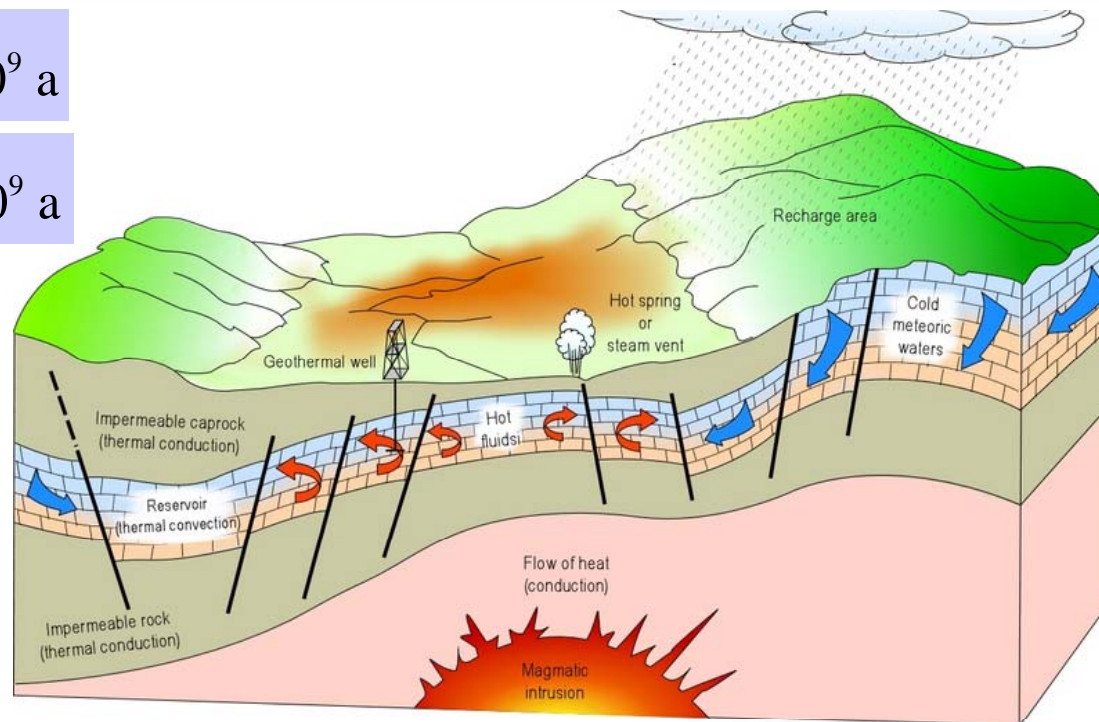
Erdgeschichte Geothermie

Symptome

- natürliche Vorkommen an Uran zeigen, dass Element vor 6 Milliarden Jahren erzeugt wurde
- Hypothese ist, dass ^{235}U und ^{238}U zu diesem Zeitpunkt in ähnlichen Mengen vorlagen

Uran-235
 $T_{1/2} = 0.7038 \cdot 10^9 \text{ a}$

Uran-238
 $T_{1/2} = 4.4680 \cdot 10^9 \text{ a}$



Diagnose

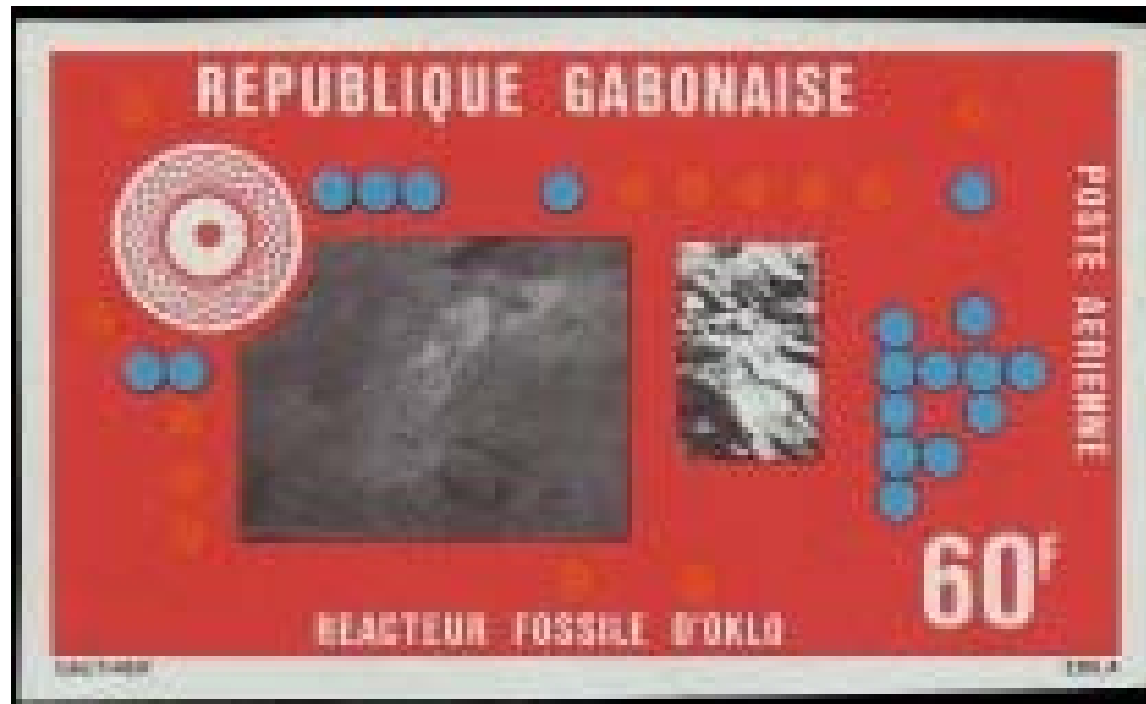
- Isotopenverhältnis beträgt heute ^{235}U 39.8% und ^{238}U 0.29% der damaligen Menge
- daraus ergibt sich ein Anteil von 0.72% an ^{235}U in Uranvorkommen
- ^{239}Pu -Halbwertszeit von 24000 Jahren für so kurz, dass es keine natürlichen Vorkommen gibt
- ^{232}Th hat extrem lange Halbwertszeit und ist verantwortlich für geothermale Aktivität

Uranium-thorium series radionuclides in brines and reservoir rocks from two deep geothermal boreholes in the Salton Ses geothermal field, Southeastern California
Zukin et al. Geochim. Cosmochim. Acta 51,2719 (1987)

Oklo Ur-Reaktor

Symptome

- Isotopengehalt ^{235}U Proben aus Oklo niedriger als erwartet im Vergleich zu Gehalt an ^{238}U
- ^{235}U Anteil in Uran aus Bergbau heute etwa 0.5%
- für Kettenreaktion muss ^{235}U Anteil in Uranprobe 3% betragen
- da kürzere Halbwertszeit als ^{238}U , gab es früher höheren Anteil an ^{235}U in Uranvorkommen
- Verhältnis ^{235}U zu ^{238}U vor zwei Milliarden Jahren hatte kritischen Anteil von 3%



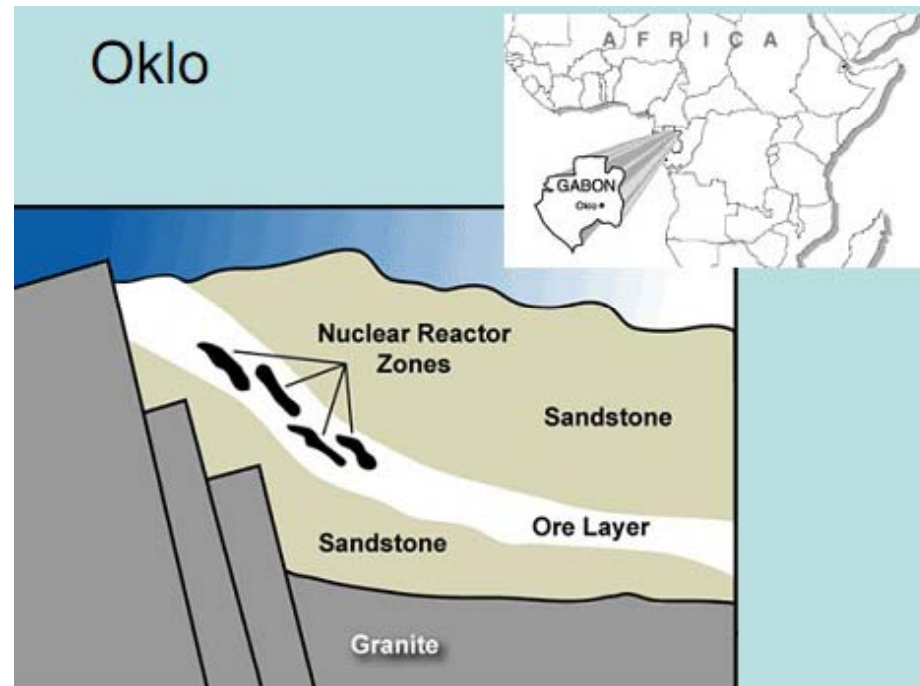
Diagnose

- notwendige Randbedingung für Kettenreaktion sind langsame Neutronen
- Wasservorkommen in Urangestein wirkt als Neutronenbremse

Oklo Ur-Reaktor

Symptome

- selbsterhaltene Kettenreaktion über 150 000 Jahre
- Verbrauch von 5 Tonnen ^{235}U
- pulsartiger Betrieb über 30min mit 2.5h Pause



Diagnose

- Ursache ist starke Erhitzung bei Betrieb
- Wasser verdampft und fehlt dann als Moderator zur Abbremsung der schnellen Neutronen
- Neutronen müssen für Kettenreaktion langsam sein
- Nachweis über Zerfallsprodukt ^{136}Xe
- technologisch: radioaktives ^{136}Xe verstärkt in umgebendem Al-Phosphat eingeschlossen
- Leistung des natürlichen Reaktors etwa 100 kW

Extrablatt

1957

Ford Nucleon



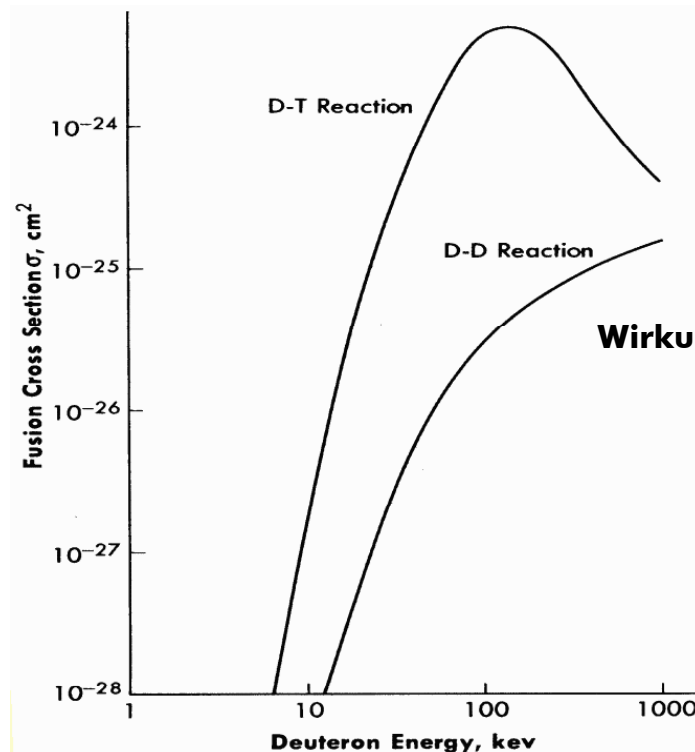
It was during this honeymoon with nuclear energy that the Ford Motor Company unveiled the most ambitious project in their history: a concept vehicle which had a sleek futuristic look, emitted no harmful vapors, and offered incredible fuel mileage far beyond that of the most efficient cars ever built. This automobile-of-the-future was called the *Ford Nucleon*, named for its highly unique design feature... a pint-size atomic fission reactor in the trunk.

Fusion

Kernverschmelzung

Symptome

- bei der Formung von Atomkernen bis ^{57}Fe wird Energie freigesetzt
- Kernbausteine müssen aber zunächst abstoßende Coulombbarriere überwinden
- Kernfusion setzt mehr Energie frei, als für Reaktion eingesetzt



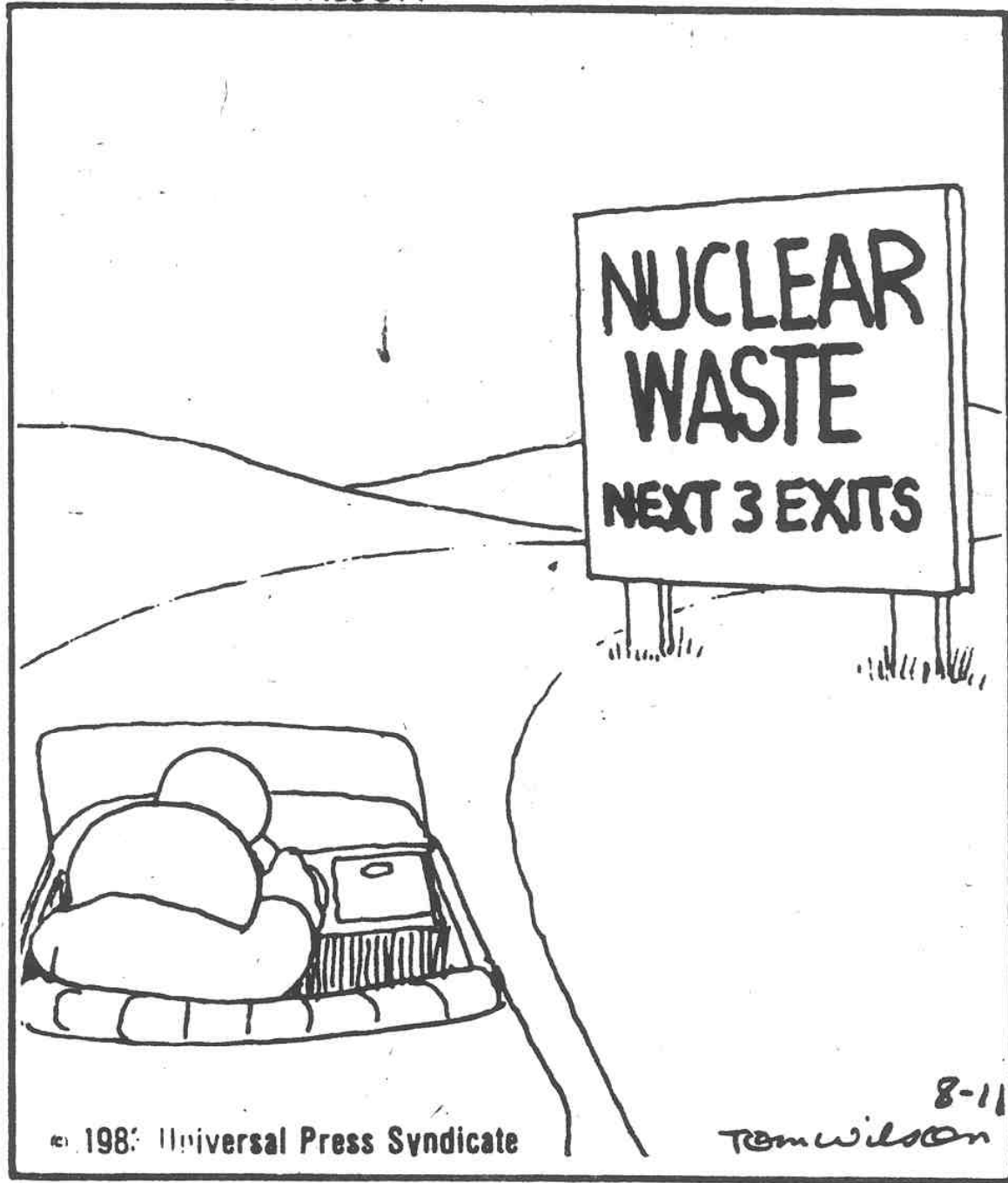
Wirkungsquerschnitt für Kernfusion als Funktion der kinetischen Energie der Wasserstoffisotope (Deuterium, Tritium)

Diagnose

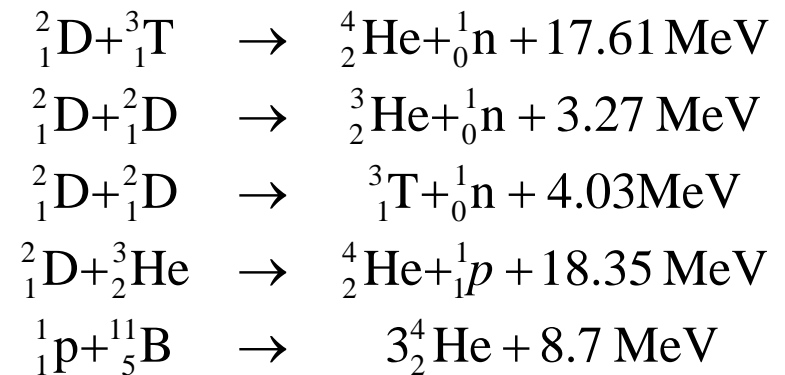
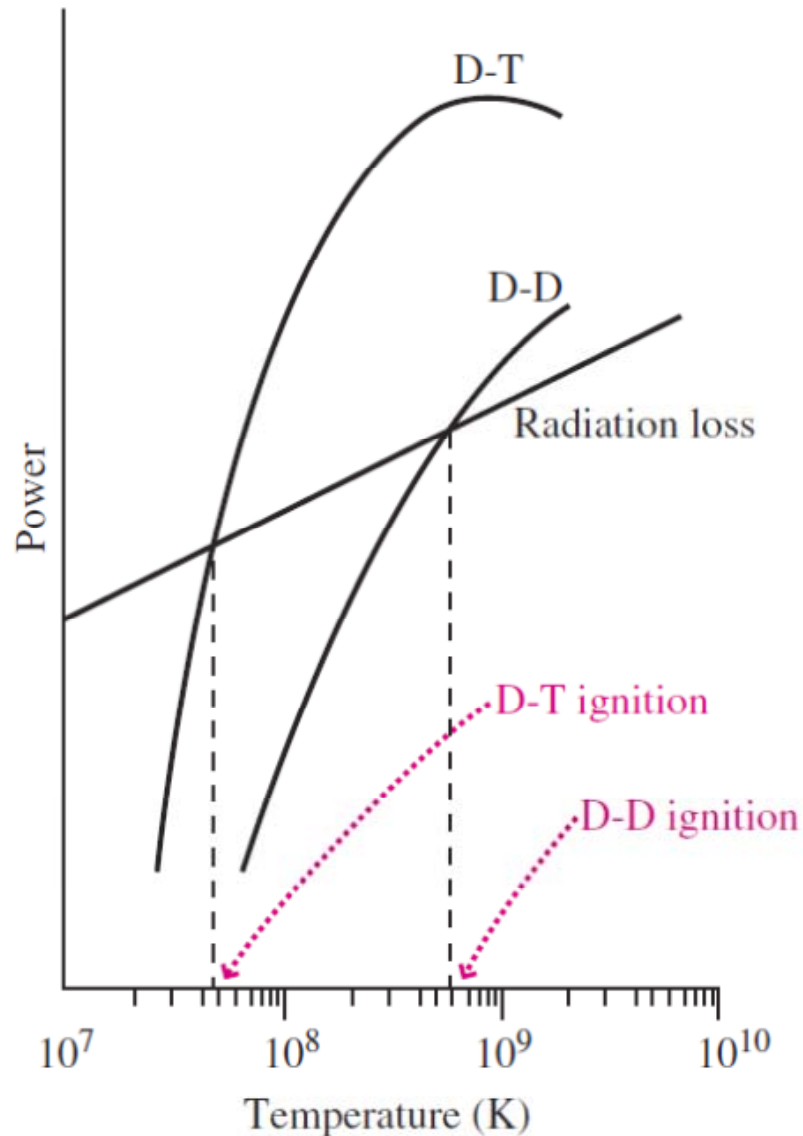
- Temperaturen im Zentrum der Sonne notwendig ($\sim 10^8\text{K}$), um Kernfusion auszulösen
- für 1 kg Helium gebildet aus Wasserstoff wird 25 MeV an Energie freigesetzt
- in Sonne werden pro Sekunde 6.7×10^{11} kg Wasserstoff zu Helium umgewandelt
- Energiemenge von 10^{20} kWh wird in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben

fusion Zündung

Fusionsreaktion	Zündtemperatur		freigesetzte Energie [keV]
	[10^6 K]	[keV]	
${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T}$ ${}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	45	4	17.6
${}^2_1\text{D} + {}^3_2\text{He}$ ${}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{p}$	350	30	18,3
${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D}$ ${}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	400	35	4
${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D}$ ${}^3_1\text{T} + {}^1_1\text{p}$	400	35	4



Zündung kritische Temperatur



Diagnose

- Fusion in Reaktor erfordert höhere Temperaturen als in der Sonne
- denn starke Beschleunigung der Kerne in Reaktor führt zu Strahlungsverlusten
- Fusion ist aber interessanter Energielieferant
- im Gegensatz zu Kernspaltung sind Fusionsprodukte leichte Kerne mit geringer Halbwertszeit

Fusionsreaktionen

sind die Energiequelle der Sonne und der Sterne. Bei einer Fusionsreaktion verschmelzen leichte Atome zu schwereren. Der Fusionsprozess wandelt Masse (m) gemäß der Einsteins Formel $E = mc^2$ in kinetische Energie (E) um. Eine Alpha-Strahlung (Heliumkern), die sich "Proton-Proton-Kette" nennt, erzeugt die größte Teil der Energie unserer Sonne und wird die noch für einige Milliarden Jahre hin. Die p-p-Kette geht aus von Protonen, dem Kern des einfachsten Wasserstoffisotops, und endet bei Alpha-Teilchen, dem Kern des Heliumatoms.

Fusion

Physik einer fundamentalen Energiequelle

ENERGIEQUELLEN UND UMWANDLUNG

EIN ÜBERBLICK ÜBER ENERGIEUMWANDLUNGSPROZESSE

Energie kann viele verschiedene Formen annehmen und eine Vielzahl von Mechanismen kann eine Form in eine andere umwandeln. Während der Gesamtbetrag der Energie immer gleich bleibt, scheitern die meisten Umwandlungsprozesse den beträchtlich größeren Betrag später ein.



Physikalische Parameter energiefreisetzender Reaktionen

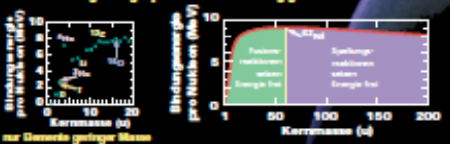
Reaktionstyp:	chemisch	Kernspaltung	Kernfusion
Beispielreaktion	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$^{235}_{92}U + n \rightarrow ^{142}_{54}Ba + ^{91}_{38}Kr + 2n$	$D ({}^2H) + T ({}^3H) \rightarrow {}^4He + n$
verwandelter Brennstoff	Kohle, Öl und Luft	UO_2 (2% ^{235}U) + 97% ^{238}U	Deuterium und Lithium
Typ. Temperatur (K)	1000	1000	100 000 000
pro kg Brennstoff freigesetzte E (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

WIE DIE FUSION FUNKTIONIERT

DIE KERNPHYSIK DER FUSION

Die Verschmelzung von Elementen geringer Masse setzt genau wie die Spaltung von Elementen hoher Masse Energie frei.

Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit der Kernmasse



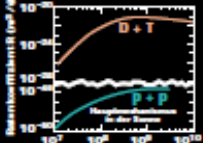
Nukleare Reaktionsenergie: $\Delta E = k (m_1 - m_2) c^2$

Abgeleitet aus der Einsteins Formel $E = mc^2$. ΔE = pro Reaktion freigesetzte Energie; m_1 = Summe der Einzelmassen vor der Reaktion; m_2 = Summe der Massen der Reaktionsprodukte. In SI-Einheiten beträgt der Umrechnungsfaktor $k=1$; er beträgt 931,466 MeV/c², wenn k in MeV und m in atomaren Masseneinheiten (u) gemessen wird.

Einige Kernmassen

Bezeichnung	Teilchen	Massen (u)
n	Neutron	1,008665
p	Proton	1,007276
D	Deuteron	2,013553
T	Triton	3,015500
3He	Helium-3	3,014932
4He	Helium-4	4,001506

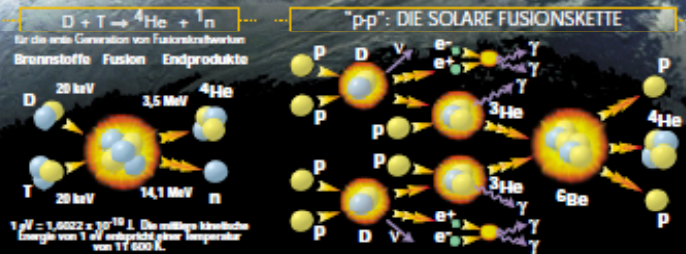
Reaktionskoeffizienten von Fusionsreaktionen



Reaktionsrate der Fusion = $R = n_1 n_2$

n_1, n_2 = Dichten der Reaktionspartner (Ionen/m³); R = Reaktionskoeffizient (m³/s). Multipliziert mit ΔE erhält man die Leistungsdichte des Fusionsprozesses.

ZWEI WICHTIGE FUSIONSPROZESSE



SCHAFFUNG FUSIONSRELEVANTER BEDINGUNGEN

PLASMAHEIZUNG UND -EINSCHLUSS

Beschreibung:	Schwerkraft	Magnetfelder	Massenträgheit
Prinzip: Für die Fusion werden Hochtemperaturplasmen benötigt, die hinreichend lange bei hoher Dichte eingeschlossen werden müssen, um Energie freizusetzen.	Plasma eines entstehenden Sterns	Tokamak	Laserfusion
Typische Dimensionen:	Größe: 10^{10} m	Größe: 10 m	Größe: 10^{-7} m
Lebensdauer:	Lebensdauer: $10^{10} - 10^{11}$ s	Lebensdauer: $10^{-2} - 10^2$ s	Lebensdauer: $10^{-9} - 10^{-7}$ s
Beizmechanismen:	• Kompression • Energie der Fusionsprodukte	• elektromagnetische Wellen • ohmsche Heizung • Neutronenstrahl-Heizung • Neutronen-Alpha-Heizung • Kompression	• Kompression • Laser- oder Ionenstrahlheizung • durch in Folge entstehende Reaktionsprodukte
Energieerzeugung:	• Energie der Fusionsprodukte	• Energie der Fusionsprodukte	• Energie der Fusionsprodukte

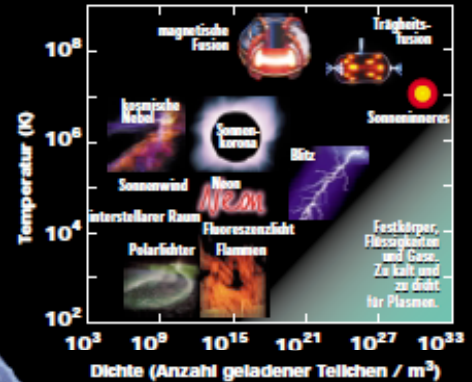
Um Fusion

auf der Erde Wirklichkeit werden zu lassen, müssen Atome auf extrem hohe Temperaturen aufgeregt werden, typisch auf mehr als 10 Millionen K. In diesem Zustand sind Atome ionisiert, sie bilden ein Plasma. Für die Erzeugung nutzbarer Energie ist es notwendig, das Plasma lange genug zusammenzuhalten, d.h. es einzuschließen, damit genügend viele Verschmelzungsreaktionen stattfinden können. Wenn es gelingt, Fusionsreaktionen zu lassen, haben wir eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung. Die Erzeugung Deuterium und Lithium sind im Überflus auf der Erde vorhanden. Wissenschaftler forschen seit auf dem Weg zu diesem Ziel bereits erreicht werden.

PLASMA – DER VIERTE AGGREGATZUSTAND

EIGENSCHAFTEN TYPISCHER PLASMEN

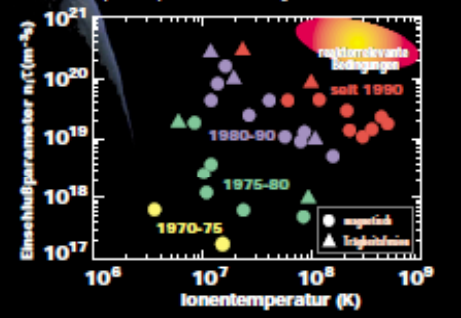
Plasmen bestehen aus frei beweglichen geladenen Teilchen, d.h. Elektronen und Ionen. Sie entstehen bei extrem hohen Temperaturen, wenn Elektronen von den Ionen neutralen Atomen abgetrennt werden. Sie sind in der Natur und im Labor weit verbreitet. So bestehen Sterne z.B. vorwiegend aus Plasma. Man trennt sie von Plasmen als dem vierten Aggregatzustand, weil die atomaren physikalischen Eigenschaften abweichen, die sie von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen deutlich unterscheiden. Die Temperaturen und Dichten von Plasmen unterscheiden sich über einen enorm weiten Parameterbereich.



FUSION MÖGLICH MACHEN

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE DER FUSIONSFORSCHUNG

Schon die Vorarbeiten als auch die experimentellen Fusion-Experimente zielen auf die Verwirklichung von Plasmen ab. Die Forschungsanstrengungen haben zu höheren Plasmatemperaturen T_e , Dichten n_e und Einschlusszeiten τ geführt. Zukünftige Fusionsreaktoren werden eine Leistung von typisch 1 GW liefern. Das Plasma werden eine Temperatur von etwa $T_e = 120$ Millionen K haben, während der Einschlussparameter $n_e \tau$ etwa $2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ betragen wird.

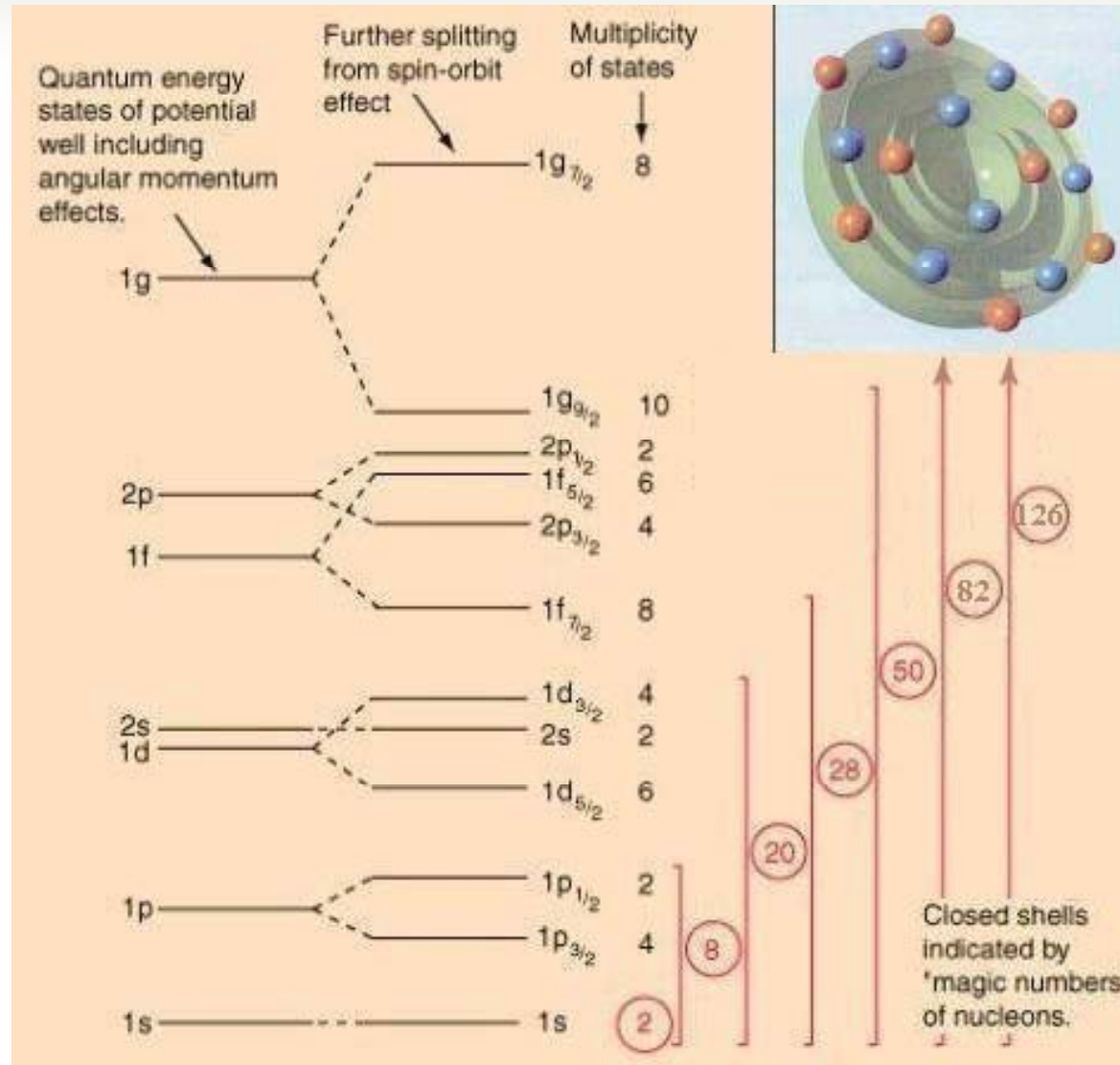


Copyright © 1998 Contemporary Physics Education Project (CPEP), Translation by Tomoko Sugawara, JAEA / IEC

CPEP ist eine gemeinnützige Organisation von Lehrern, Dozenten und Professoren mit vielfältiger Beteiligung von Studenten, Eltern und jenseitigen Förderern sowie die Unterstützung durch Forschungsinstitute sowie für diesen Projekt unterstützt und werden es auch zukünftig sein. Dieses Projekt wurde von CPEP mit Hilfe der folgenden Organisationen unterstützt: die NSF (National Science Foundation), Division of Plasma Physics of the APS, General Atomics, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Princeton Plasma Physics Laboratory, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, the U.S. Department of Energy and National Energy Research Council, NASA, the National Solar Observatory, Sandia National Laboratories and other generous organizations.

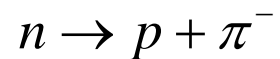
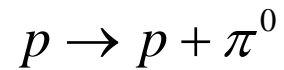
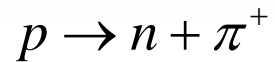
Thema Kerne

Schalenmodell

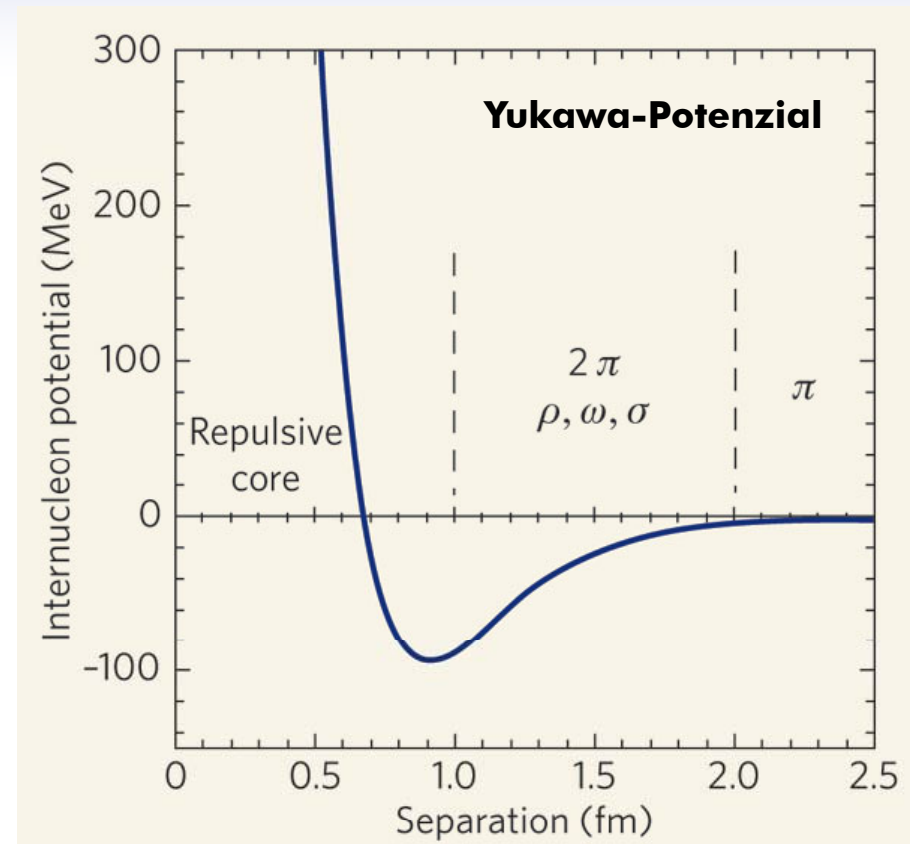
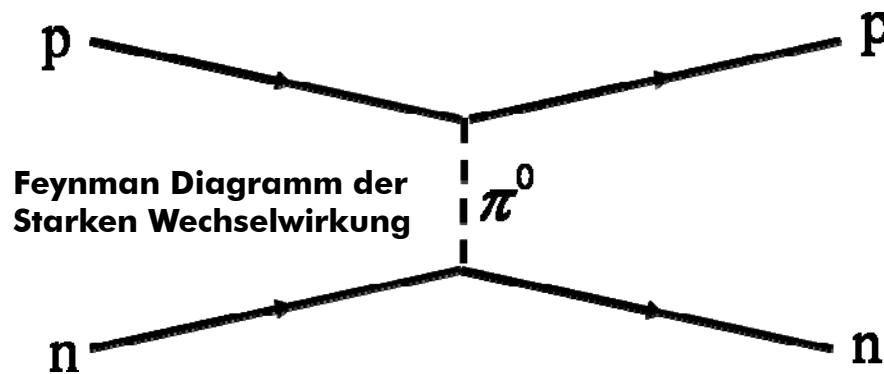


Yukawa 1935 Mesonen

Austauschreaktionen im Kern



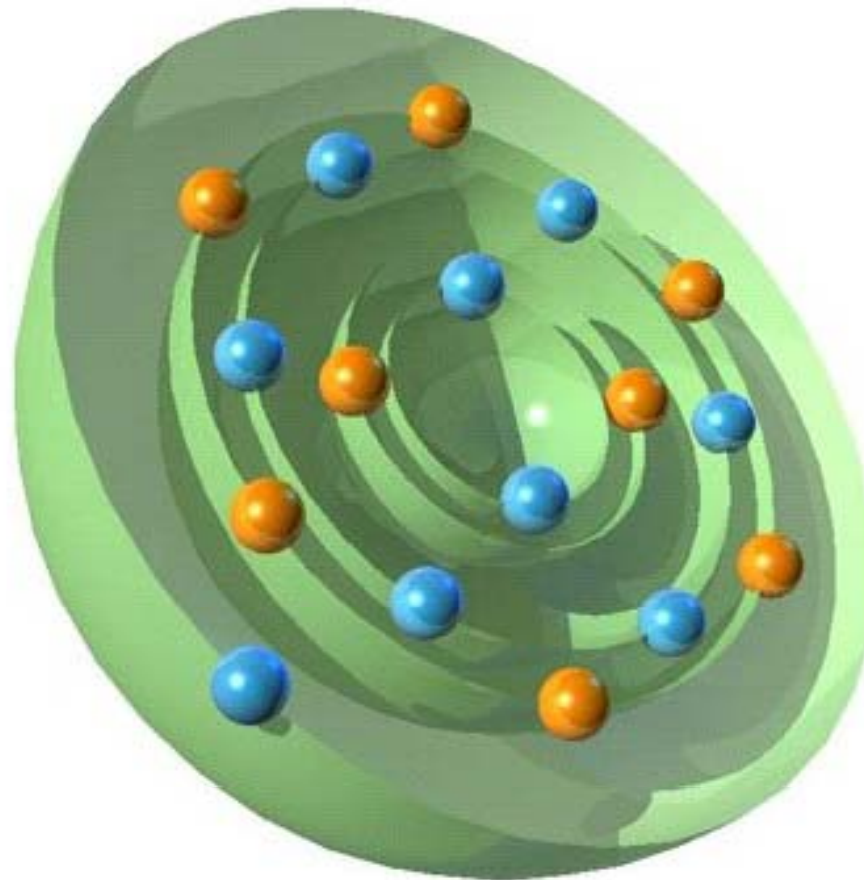
$n \rightarrow n + \pi^0$
sind Ursache für Kernbindung



Diagnose

- Nukleonenbindung wird durch Austauschteilchen Meson (π^0, π^+, π^-) vermittelt
- Protonen und Neutronen wechseln dauernd Mesonen (Austauschteilchen) aus
- Masse des Mesons beträgt 273 x Masse Elektron
- auf Neutronen wirken nur Kernbindungskräfte
- Bindungsenergie zwischen Protonen geringer, da zusätzlich die Colombkraft wirkt

Atome vs Kerne

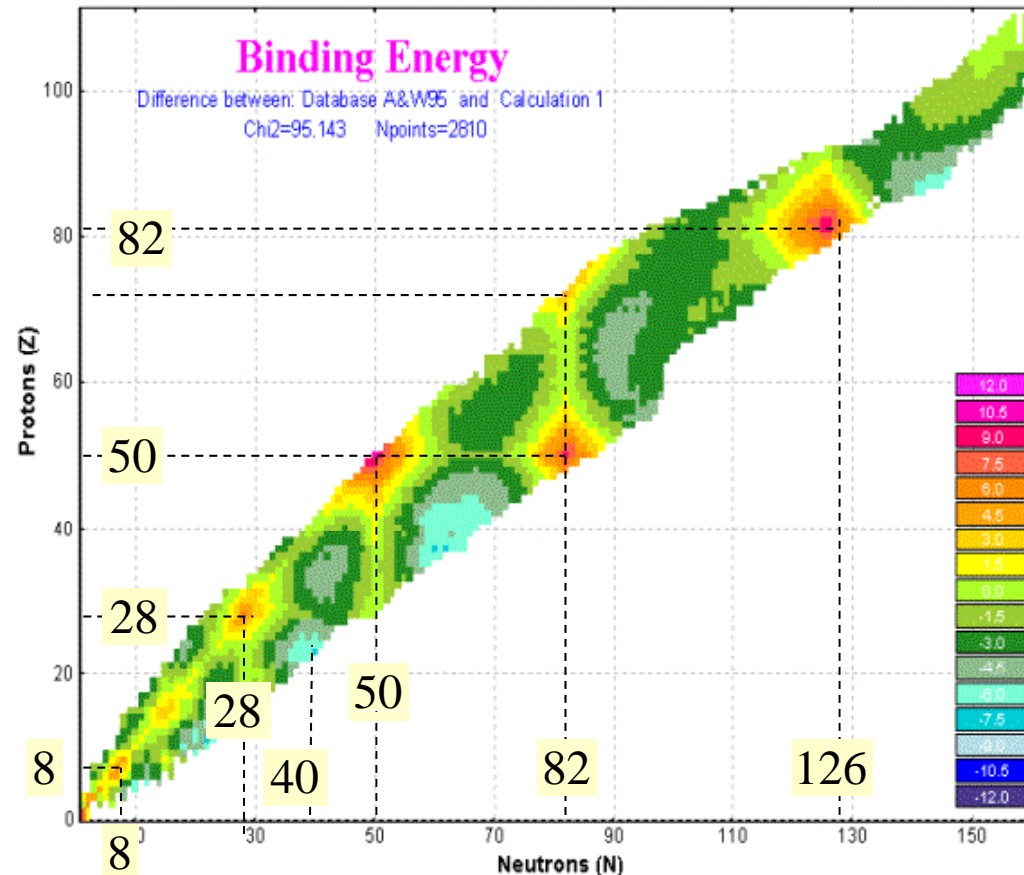


***In analogy with atomic structure one may postulate that in the nucleus the nucleons move fairly independent in individual orbits in an average potential
Maria Mayer-Goeppert***

Bindungsenergie

Symptome

Der Vergleich mit den tatsächlichen Bindungsverhältnissen hebt Feinheiten hervor, die durch das Tröpfchenmodell nicht erklärt werden können



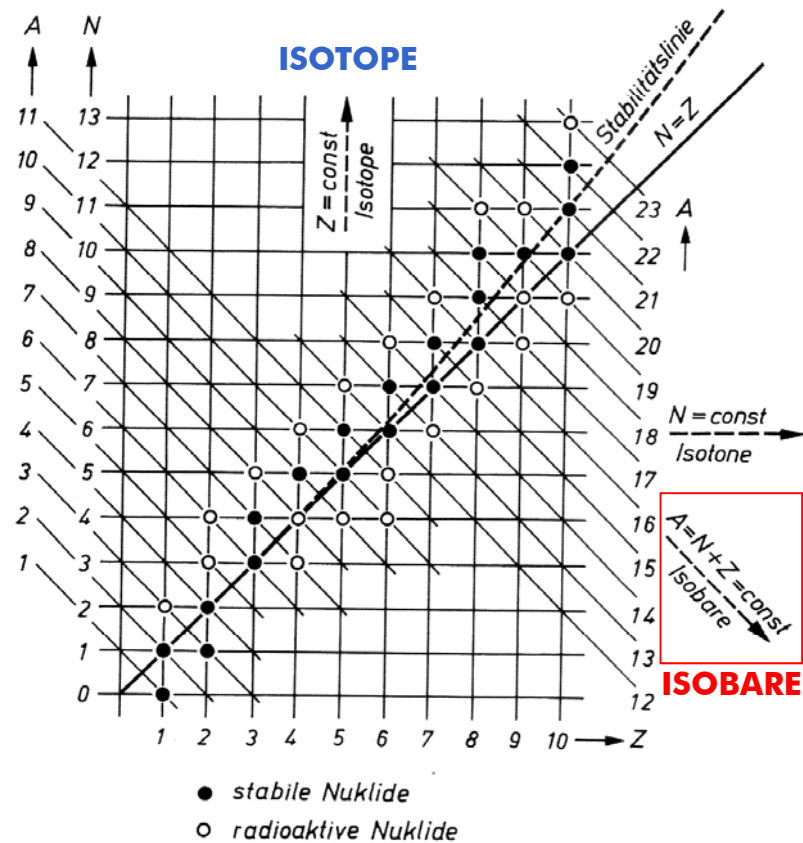
Diagnose

- Kern zeigt für bestimmte Proton-Neutron Kombinationen ausgeprägt starke Bindungskräfte
- Tröpfchenmodell kann magische Zahlen bei $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ nicht erklären

Tal der Stabilität

Symptome

- für Stabilität der Kerne ist starke Proton-Neutron Bindung verantwortlich
- dieser Umstand macht sich insbesondere bei leichten Kernen bemerkbar
- Überzahl von Protonen oder Neutronen energetisch ungünstig



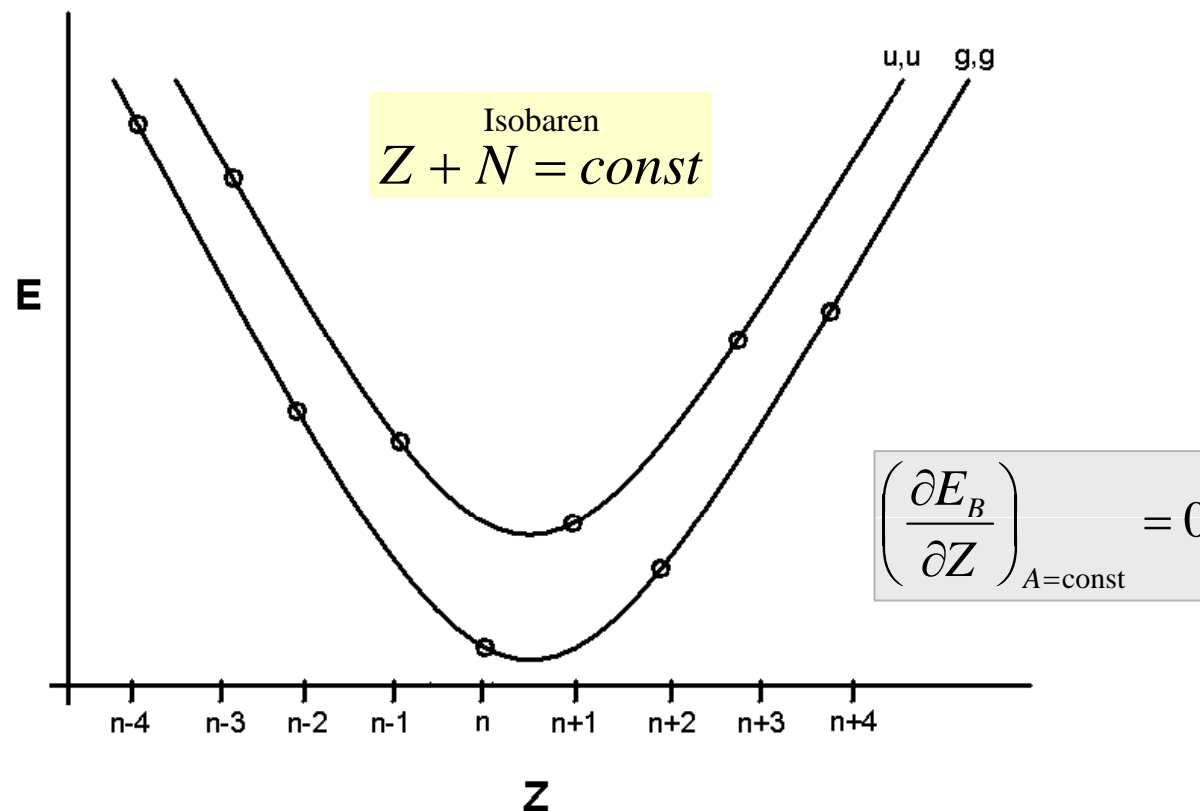
Diagnose

Isobarenschnitte ($N=Z$) im Proton-Neutron Diagramm zeigen stabile Isotope für $N=Z$

liquid drop model limits

Symptome

- Bindungsenergie für ISOBARE (Anzahl Protonen+Anzahl Neutronen konstant)
- Ergebnis der Isobarenanalyse ist eine Parabel



Diagnose

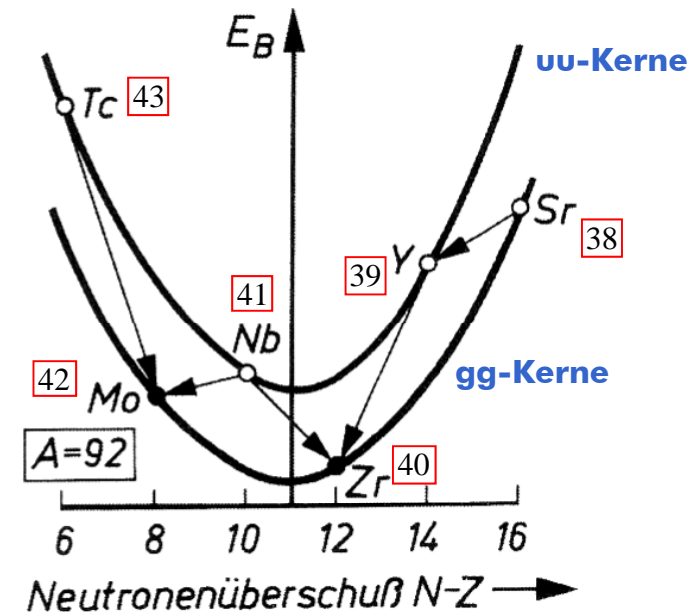
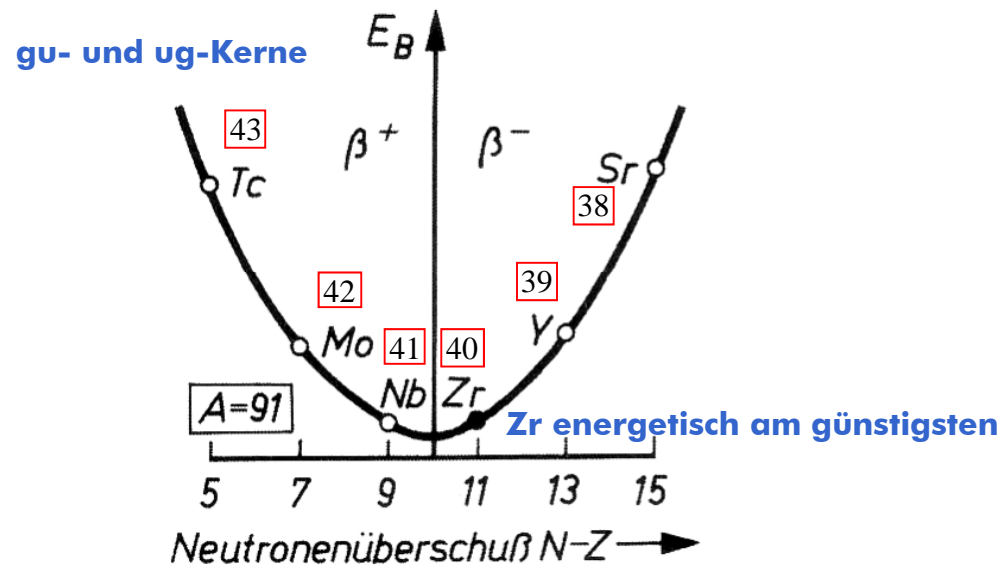
- wird der Paarungsterm berücksichtigt, ergibt sich eine Doppelparabel
- gerade-gerade (gg) Kerne stabiler als gerade-ungerade (gu) Kerne und (uu) Kerne
- Ursache ist die sogenannte Paarungsenergie

Mattauchsche Isobarenregel

Kern-Energiefläche

Symptome

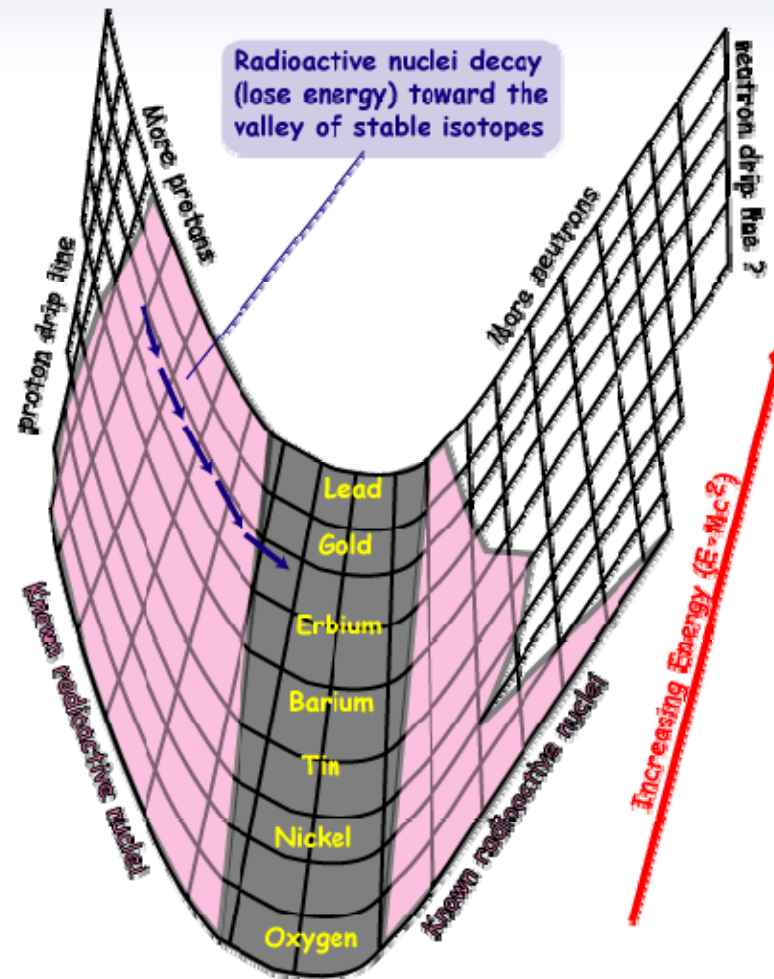
- Kern mit gradzahliger Ordnungszahl hat
entweder gerade Anzahl Protonen (g) und gerade Anzahl Neutronen (gg-Kerne)
oder hat ungerade Anzahl von Protonen (u) und ungerade Anzahl von Neutronen (uu)
- Kern mit ungradzahliger Ordnungszahl hat
gerade Anzahl von Protonen und ungerade Anzahl von Neutronen (gu-Kerne)
oder ungerade Anzahl von Protonen und gerade Anzahl von Neutronen (ug-Kerne)
- Kernbindung ist erhöht für Proton-Neutron Paare



Diagnose

- Stabilität der uu-Kerne ist geringer als die der gg-Kerne
- Kerne wandeln sich in β -Zerfall um, um Zustand höherer Bindungsenergie zu erreichen
- genannt Tal der β -Stabilität

Mayer-Goeppert und Jensen 1949 Kern-Energiefläche



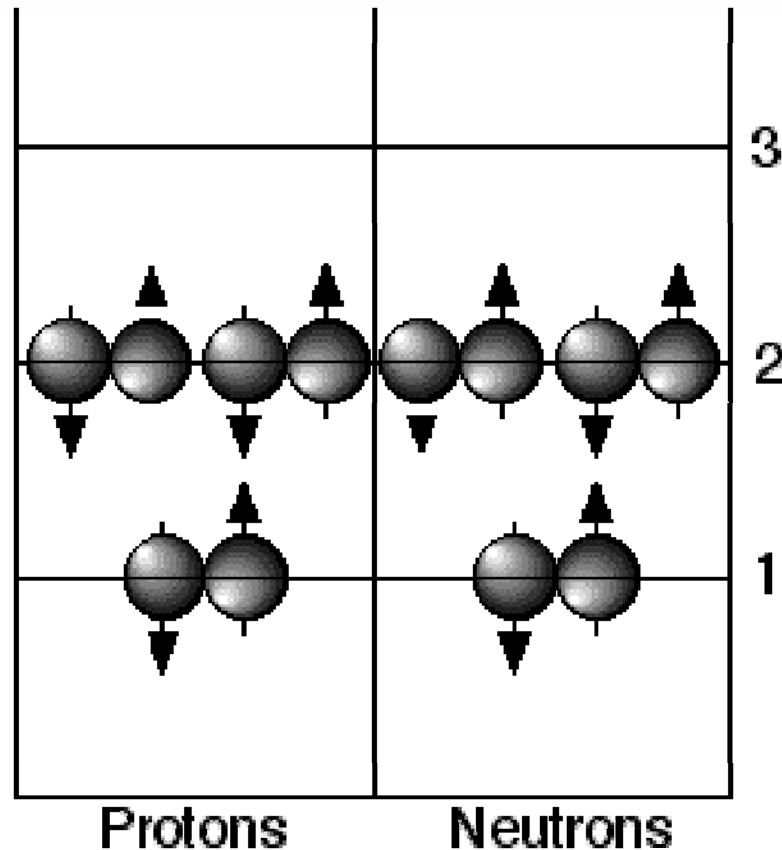
Diagnose

Für jede Kombination aus Neutronen und Protonen mit gleicher Ordnungszahl, gibt es energetisch günstige Konfigurationen

Mayer-Goeppert und Jensen 1949 shell model

Symptome

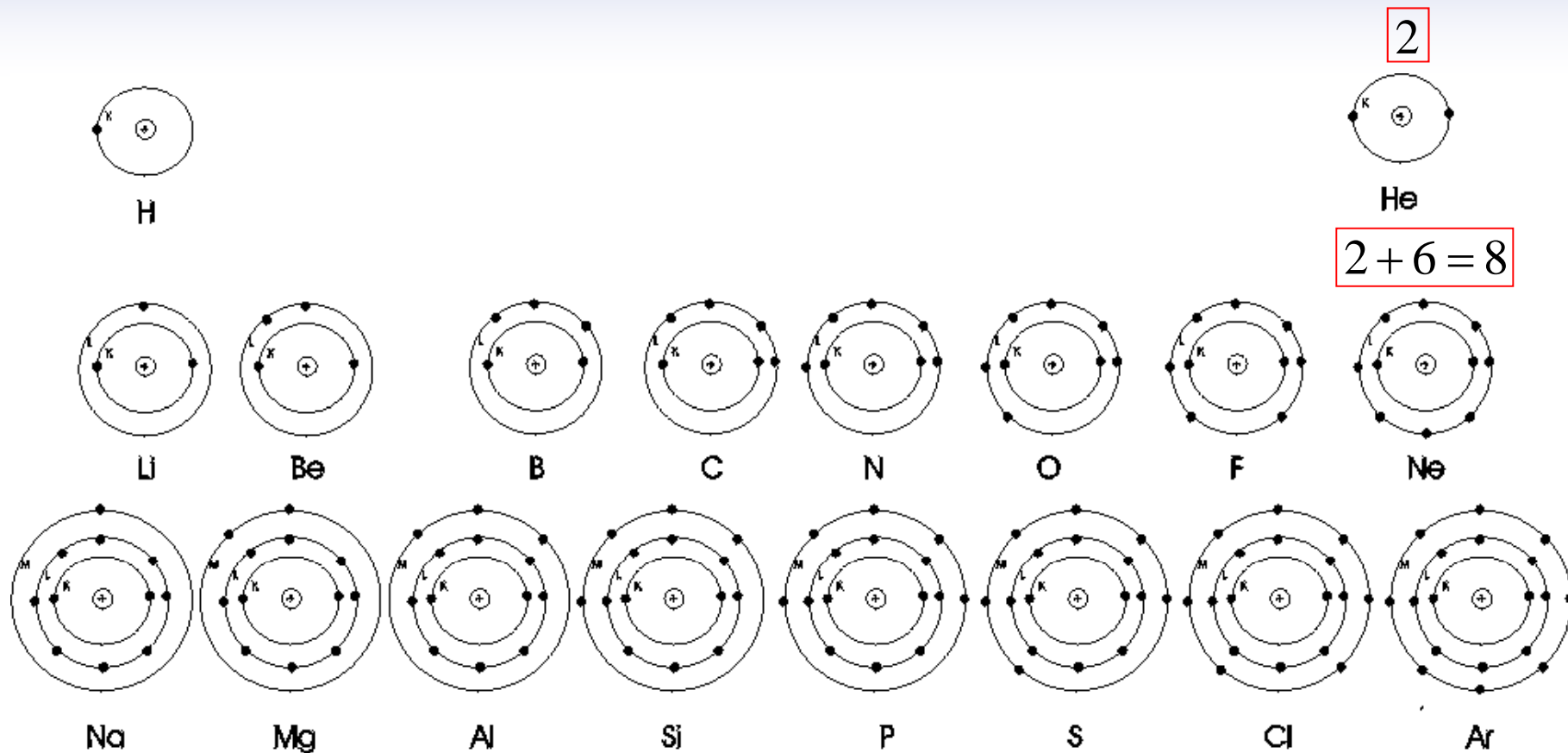
Protonen und Neutronen sind Fermionen und unterliegen dem Pauli-Prinzip



Diagnose

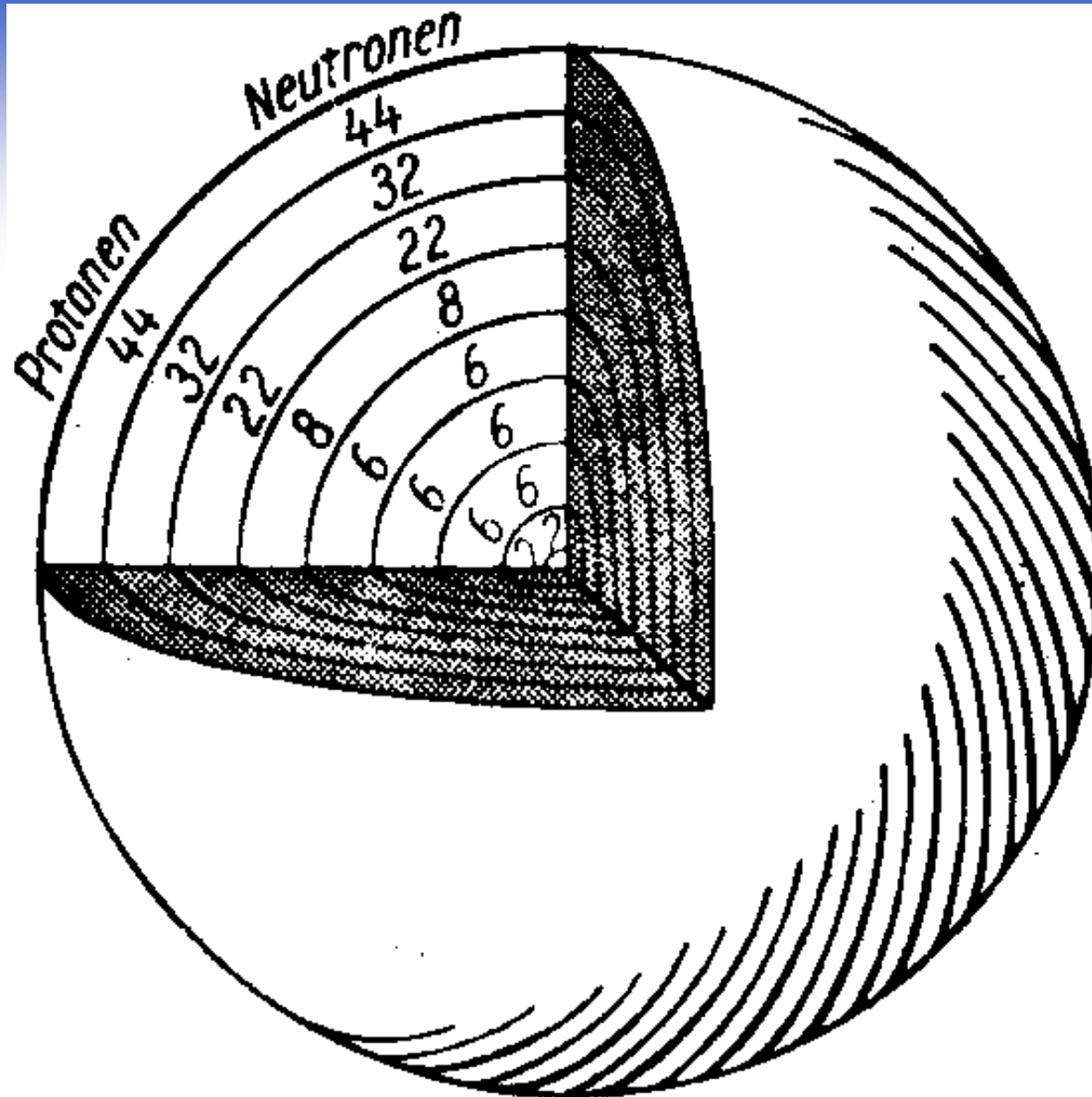
- Kern kann betrachtet werden als unabhängiges System von Protonen und Neutronen
- Kern setzt sich zusammen aus Fermisystem Protonen und Fermisystem Neutronen
- Besetzung der Energiezustände von Protonen und Neutronen erfolgt nach dem Pauliprinzip

Pauli lässt grüßen Schalenstruktur im Atom



Diagnose

- Aufbauprinzip von Pauli führt zu ähnlichen Schalenabschlüssen in Kern und Atom
- in der Kernphysik gibt es kein Analogon zur Hauptquantenzahl der Atomphysik
- das niedrigste Energieniveau JEDER Drehimpulsquantenzahl wird deshalb mit EINS notiert
- Energieniveau wie 1d ist deshalb im Kern möglich



Vollständiger Schalenaufbau des Kernes

Extrablatt 2011



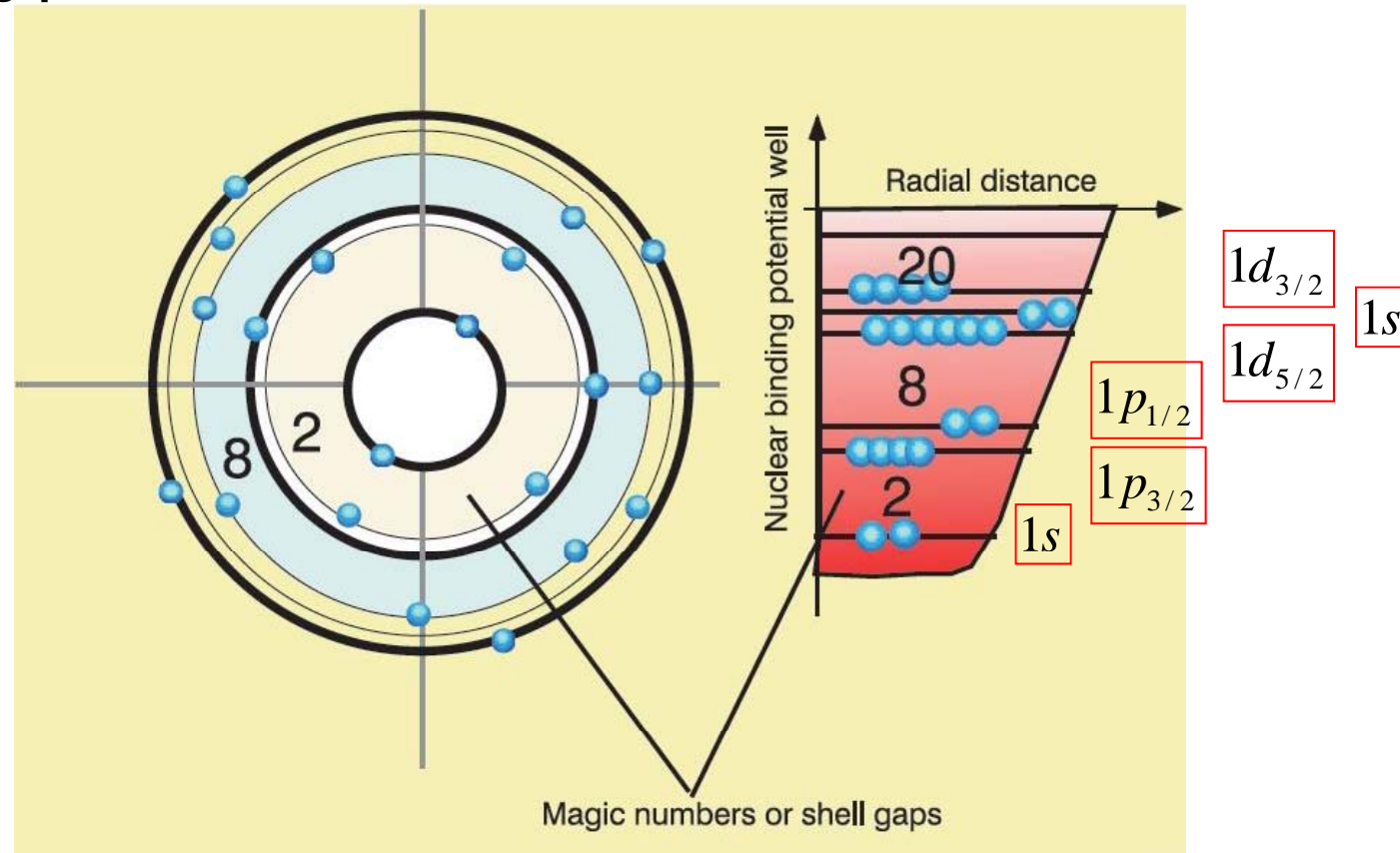
**The Nobel Prize in Physics 1963 was divided,
... the other half jointly to Maria Goeppert Mayer and J. Hans D. Jensen
for their discoveries concerning nuclear shell structure**

Pauli lässt grüßen

Nuclear shell model

Symptome

- Nukleonen bewegen sich im effektiven Potenzial verursacht durch die anderen Kernbausteine
- Kern ist dicht gepackt und es sollte deshalb vermehrt zu Stößen untereinander kommen

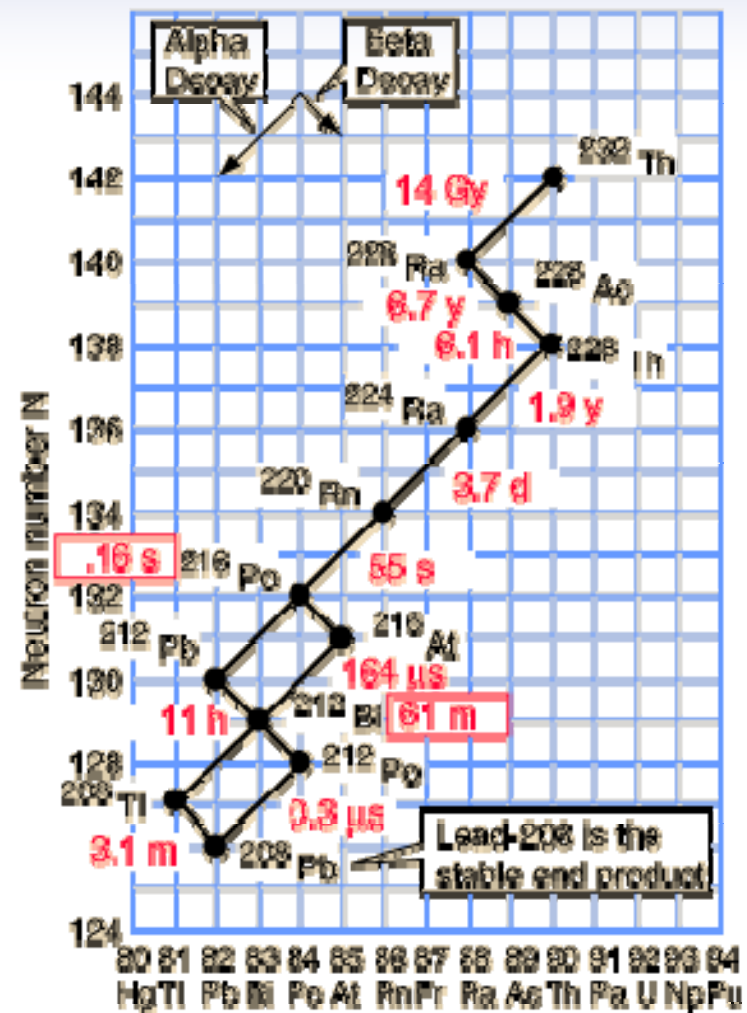
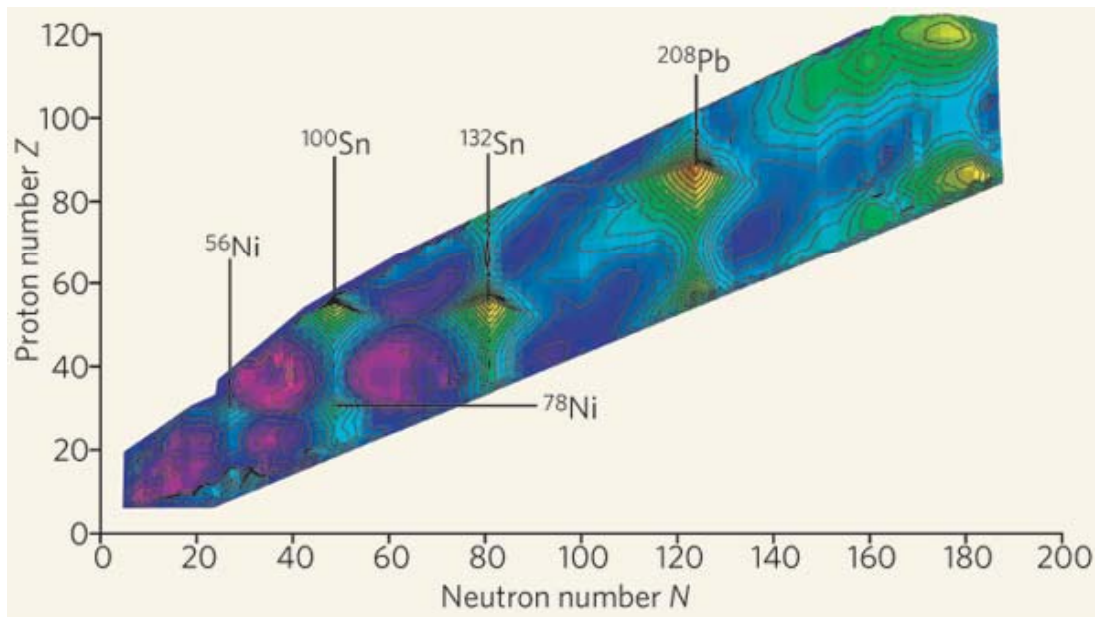


Diagnose

- Stoß-Wechselwirkung ist aufgrund des Pauliprinzips stark vermindert
- Nukleonen können als Fermionen nicht denselben Zustand besetzen
- wenn im Stoß kein freies Energieniveau besetzt werden, findet Wechselwirkung nicht statt

Nuclear shell model

Experimentelle Hinweise

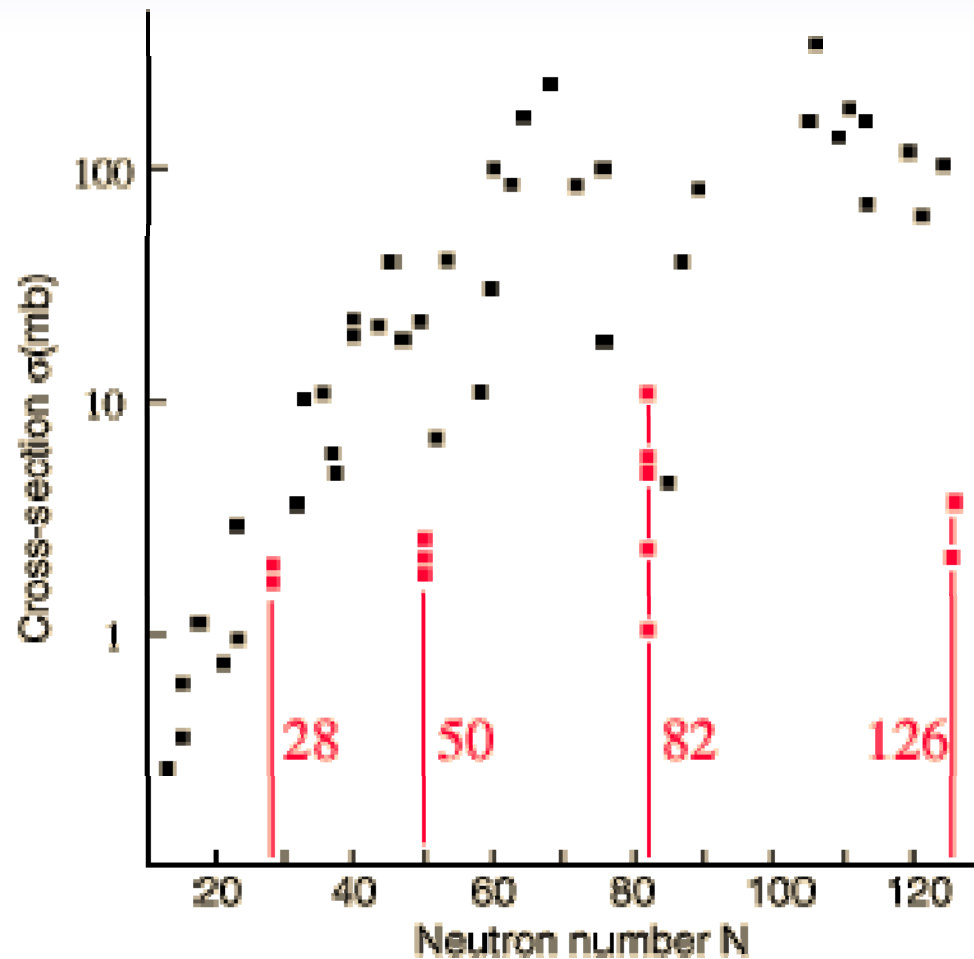


Diagnose

Elemente am Ende der Zerfallsreihen sind magische Anzahl von Neutronen oder Protonen

Nuclear shell model

Experimentelle Hinweise

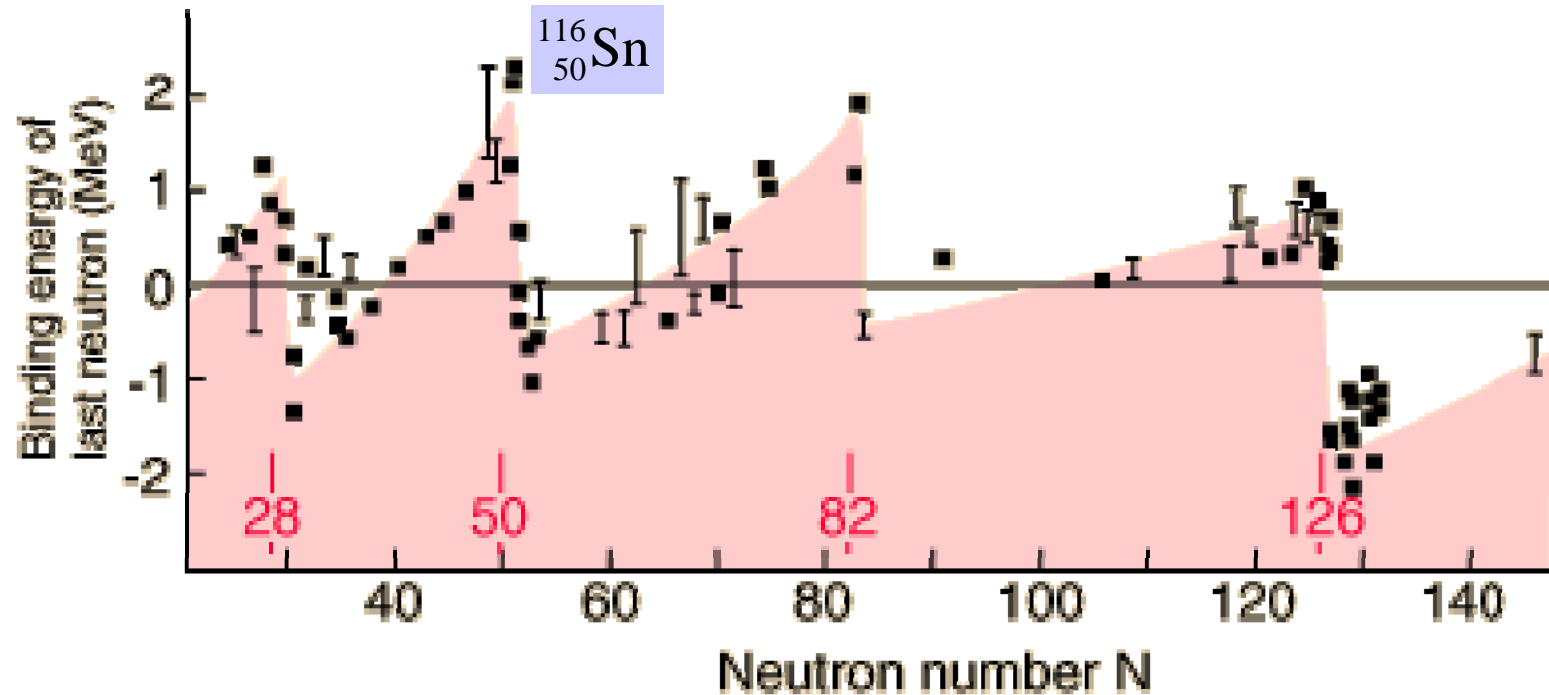


Nuclei with magic numbers of neutrons have neutron absorption cross-sections up to two orders of magnitude less than other nuclei with similar masses

Diagnose

Neutronen-Absorptionsquerschnitt für magische Kerne ist gering

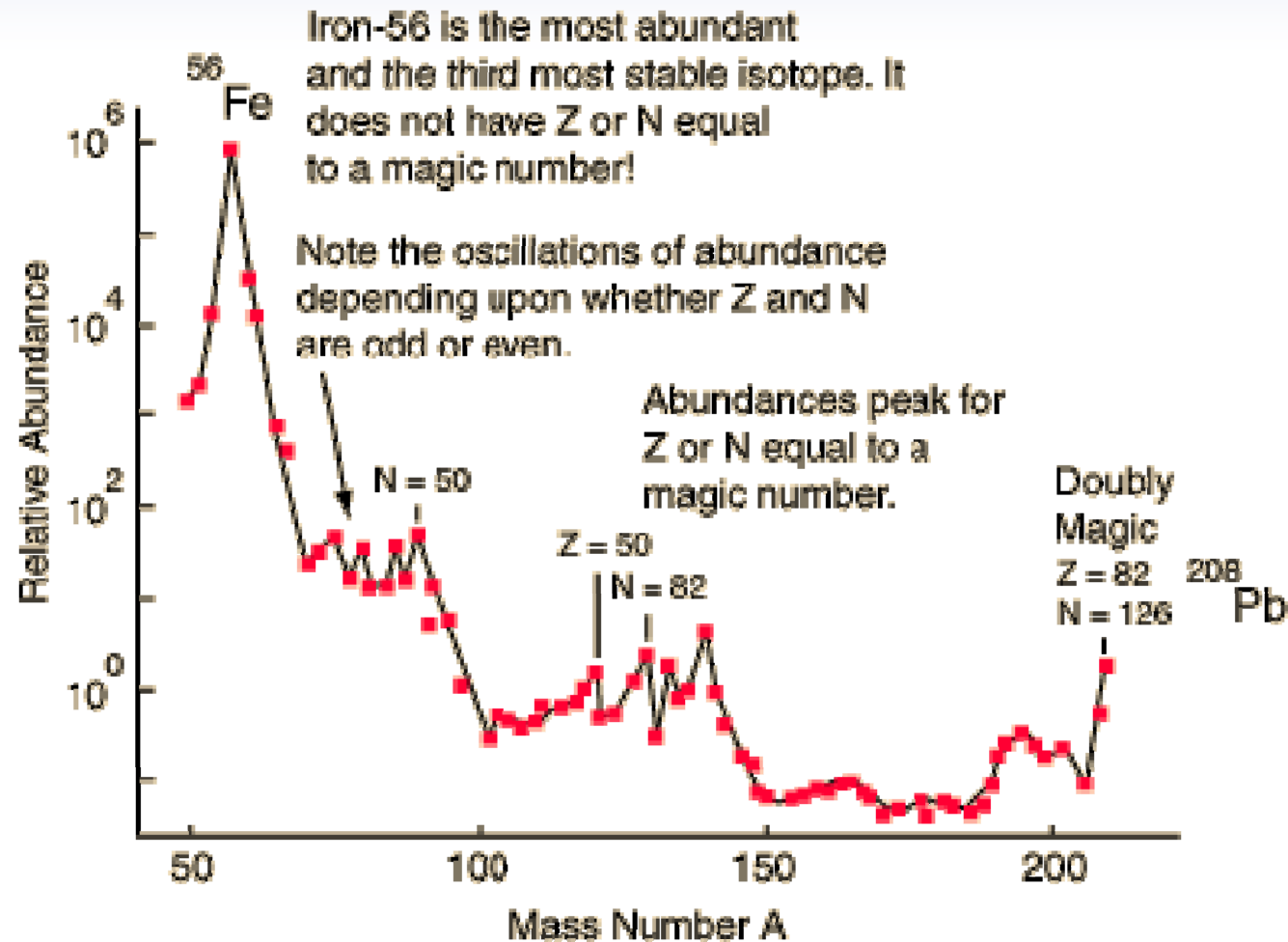
Experimentelle Hinweise Magische Kerne



Diagnose

- Bindungsenergie des äußersten Neutrons ist maximal für magische Neutronenanzahl
- Bindungsenergie eines zusätzlichen Neutrons ist stark reduziert
- Beispiel ist Zinn mit 50 Protonen
- Kerne mit 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 Protonen bzw Neutronen werden magische Kerne genannt

Nuclear shell model Experimentelle Hinweise

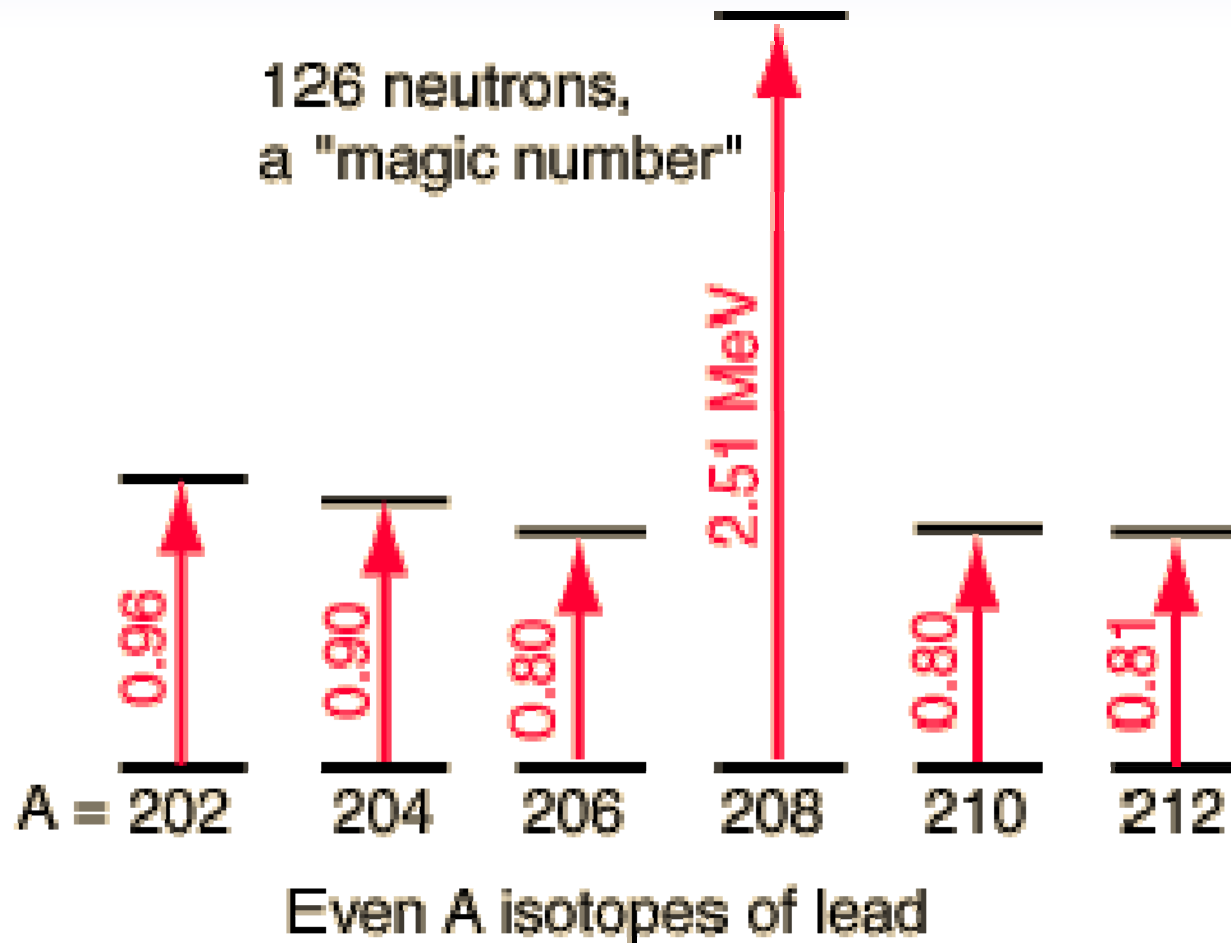


Diagnose

Erhöhter Anteil von Elementen in denen Z oder N magisch ist

Nuclear shell model

Experimentelle Hinweise

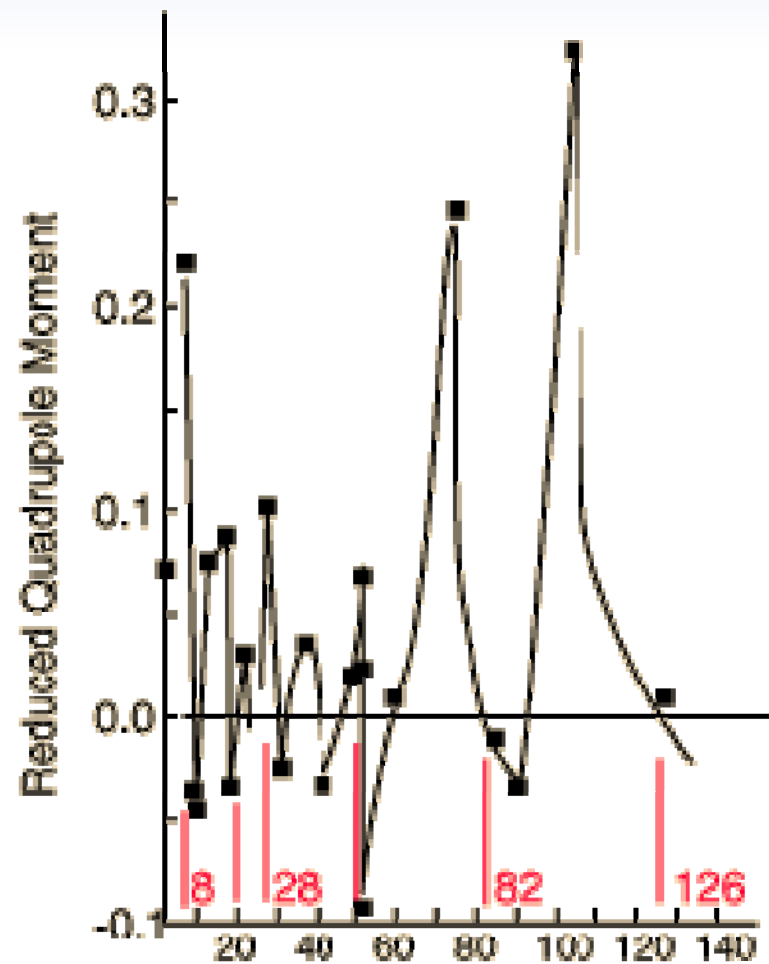


Diagnose

Anregungsenergie aus Grund- in ersten angeregten Zustand ist hoch für magischen Kern

Nuclear shell model

Experimentelle Hinweise



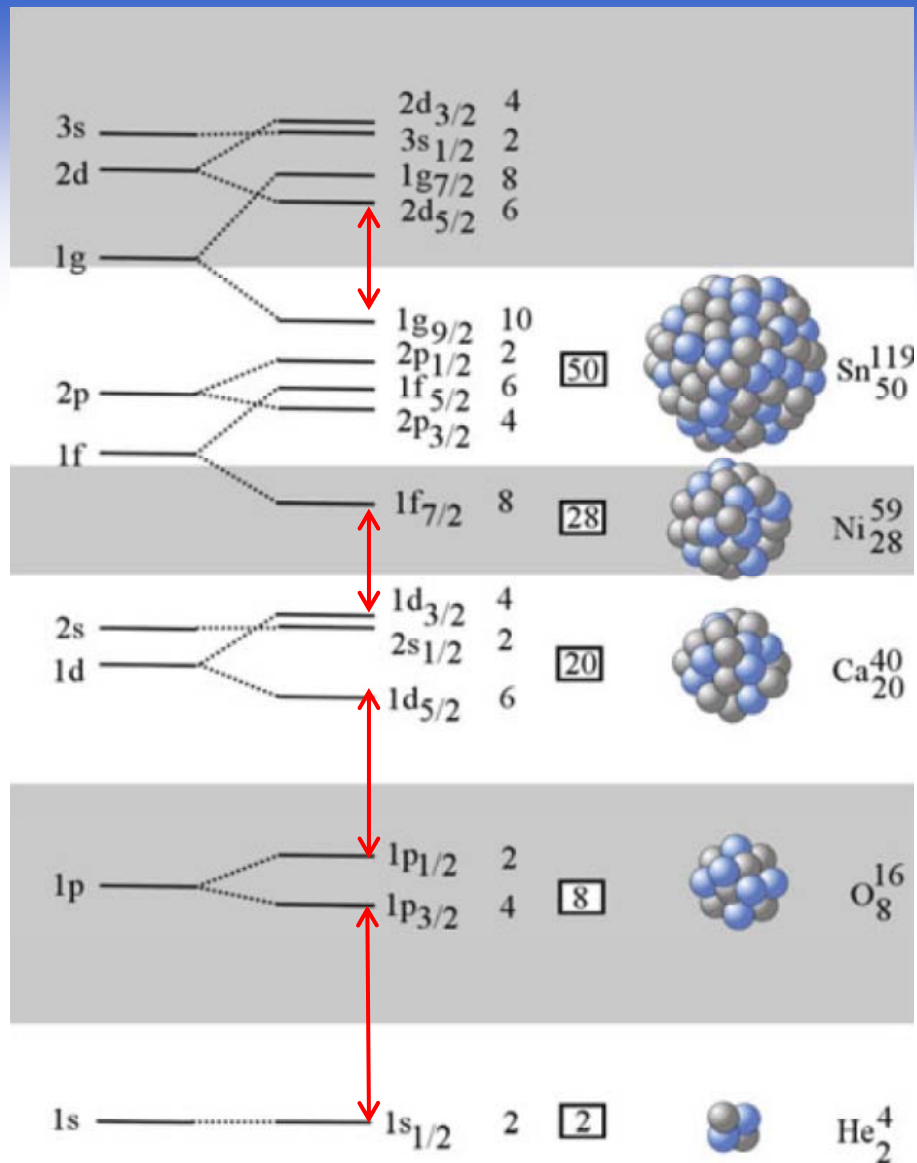
Quadrupole measurements for odd-A nuclei. The horizontal axis is either neutron number or proton number, whichever is odd.

For a shell model, those nuclei with closed shells should be spherically symmetric and have no quadrupole moment.

Diagnose

Elektrisches Quadrupolmoment (Abweichung von sphärischer Form) ist Null für magischen Kern

von einfach bis doppelt Magische Kerne



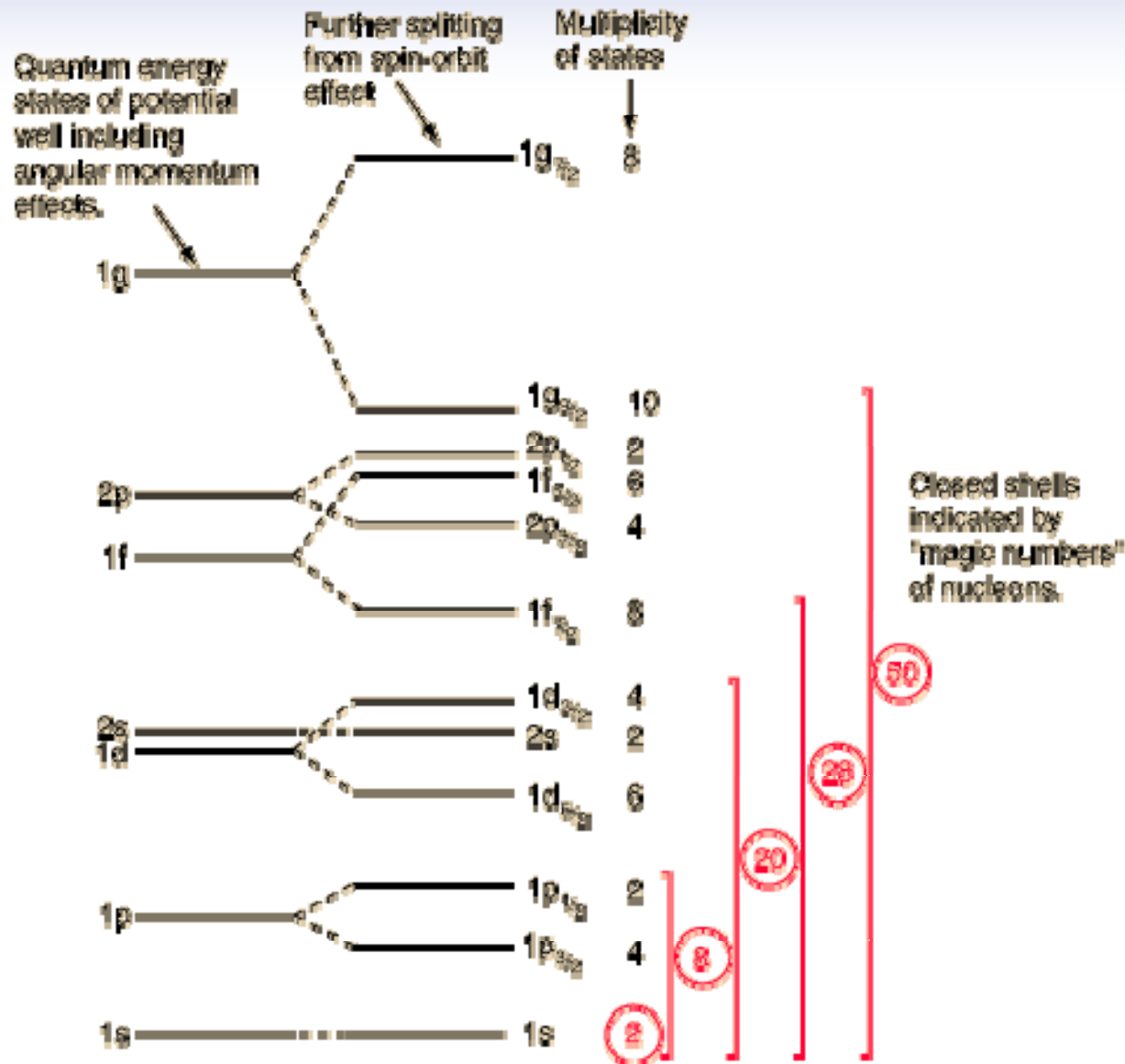
Magische Kerne
 ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$

doppelt magische Kerne
 ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$

Diagnose

Größere Energielücken (rot) trennen Energieniveaus von bestimmten Kernen von denen mit N+1 Nukleonen und machen diese Kerne energetisch besonders stabil

Nuclear shell model Pauli-Prinzip



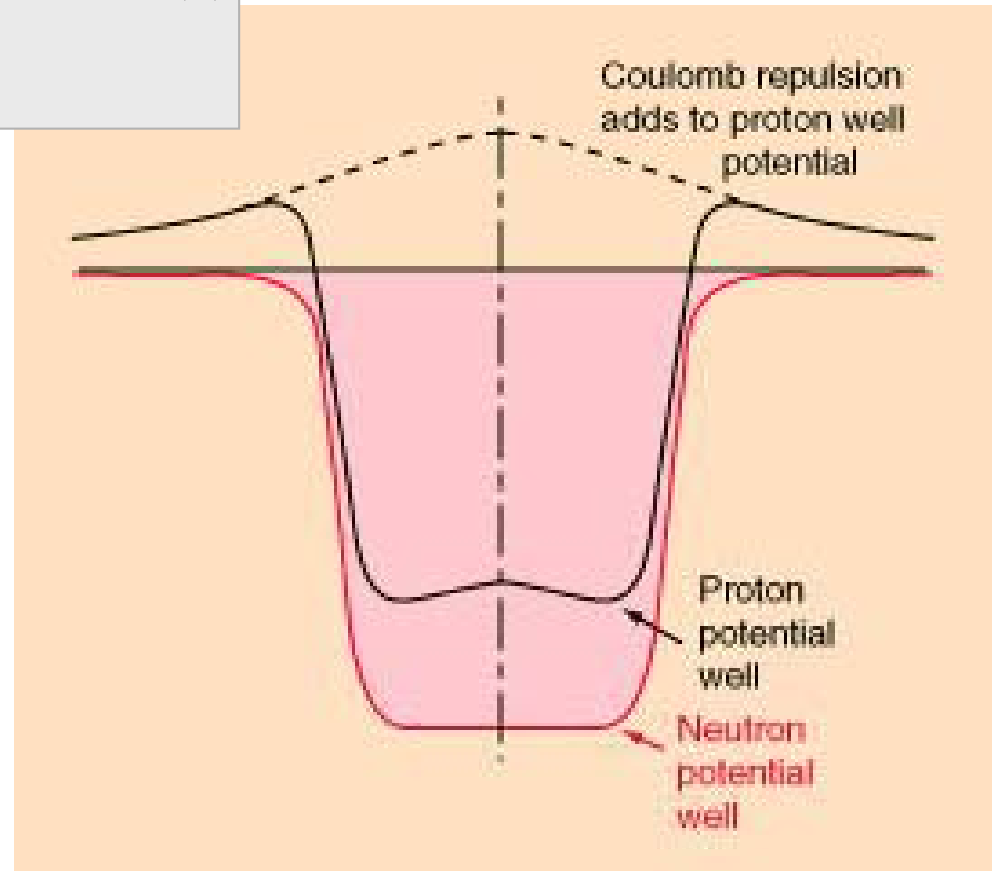
höchste Bindungsenergie entscheidet Kernumwandlung

$$V(r) = - \frac{\text{Kernpotenzial } V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_{\text{nucleus}}}{a}\right)} \pm V_{\text{sym}} + V_{\text{Coulomb}}(r)$$

$$V_0 = 57 \text{ MeV}$$

$$R_{\text{nucleus}} = 1.25 A_{\text{nucleus}}^{1/3} [\text{fm}]$$

$$a = 0.65 \text{ fm}$$



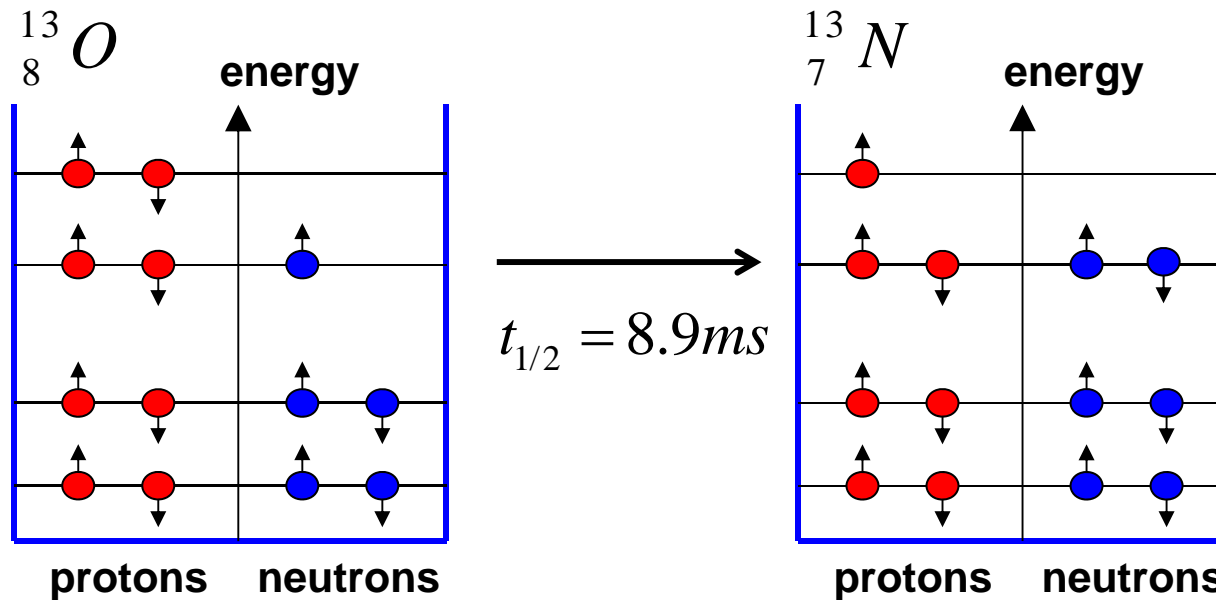
Diagnose

Effektive Potenzial Neutronen ist tiefer, da abstoßende Coulombkräfte die Bindung schwächen

Kernzerfälle Leichte Kerne

Symptome

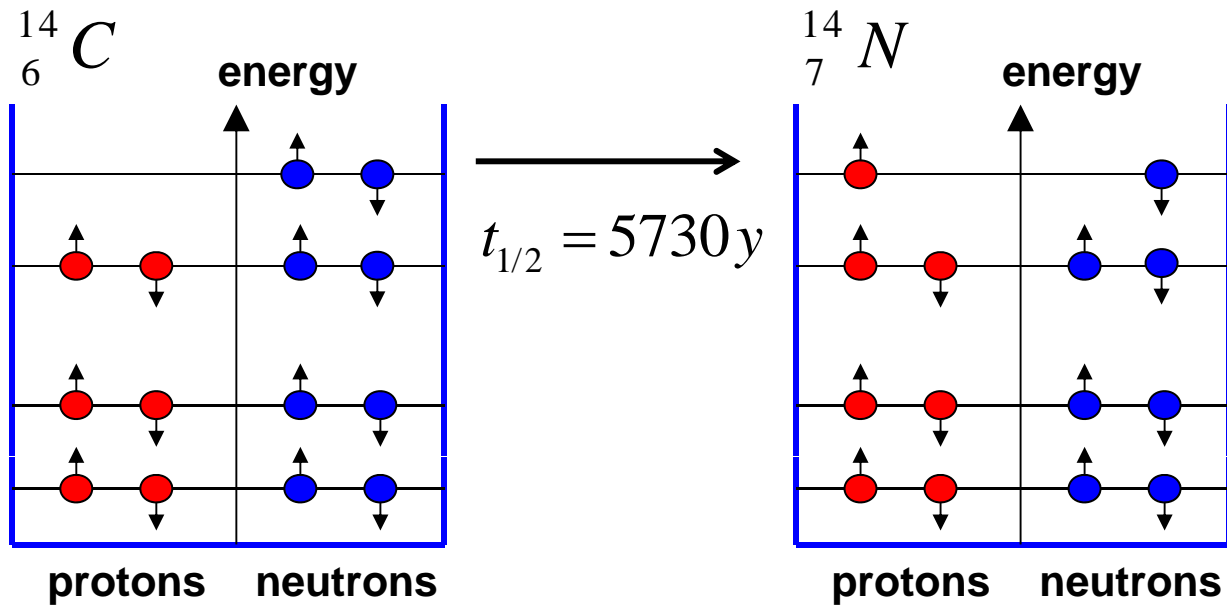
- in leichten Kernen ist Coulomb-Beitrag zur Kernbindungsenergie gering
- Anzahl Protonen und Neutronen in etwa gleich



Diagnose

- Kern kann Gesamtenergie absenken, wenn er Proton in Neutron umwandelt
- physikalische Ursache für Umwandlung ist die Schwache Wechselwirkung

Kernzerfälle Leichte Kerne



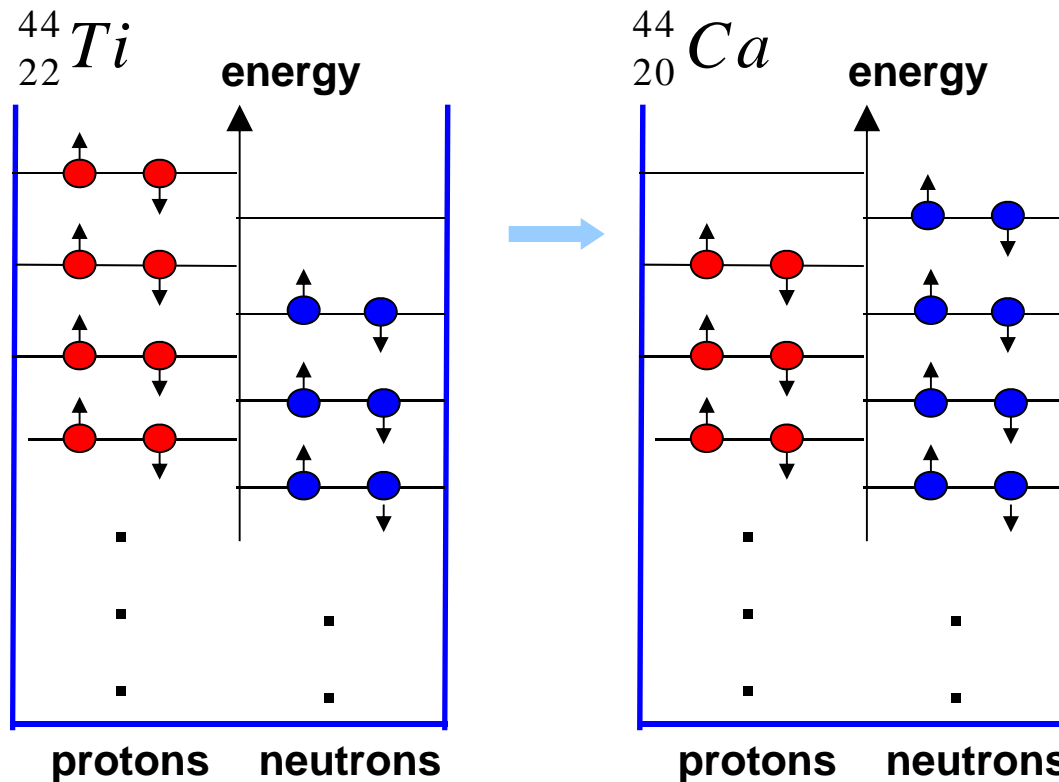
Diagnose

Kern kann Gesamtenergie absenken, wenn er Neutron in Proton umwandelt

Kernzerfälle Schwere Kerne

Symptome

- in schweren Kerne kann Coulomb-Abstoßung nicht mehr vernachlässigt werden
- stabiles Element Titan wandelt sich in Element Kalzium um



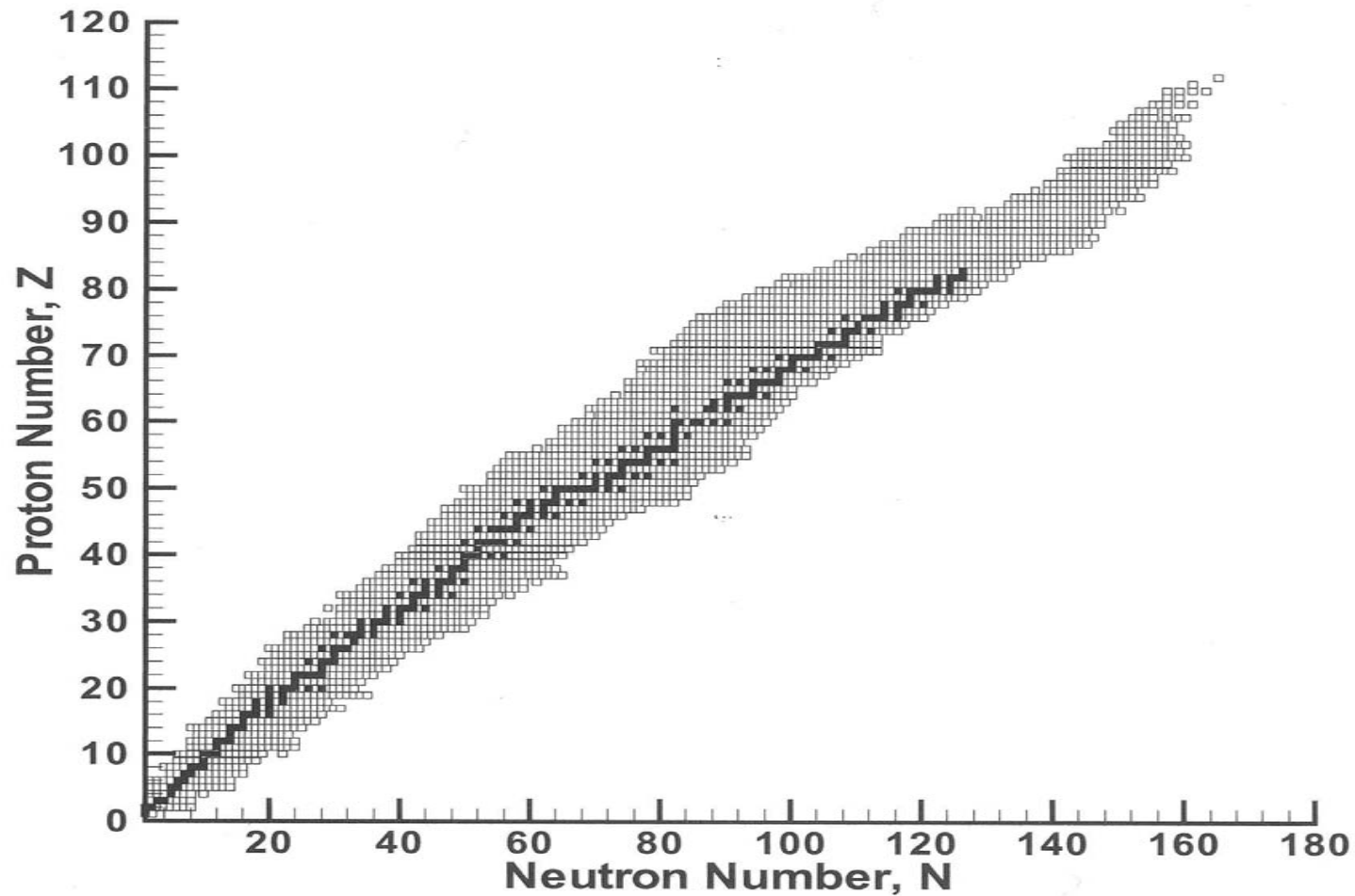
Diagnose

- Energiezustände Protonen im Vergleich zu Neutronen zu geringeren Bindungsenergien verschoben
- Proton-Neutron Ungleichgewicht verstärkt sich mit Ordnungszahl
- schwere Kerne haben Überschuss an Neutronen

nachgewiesen Isotopenlandschaft

Symptome

Nicht alle Kombinationen von Protonen und Neutronen sind möglich



Diagnose

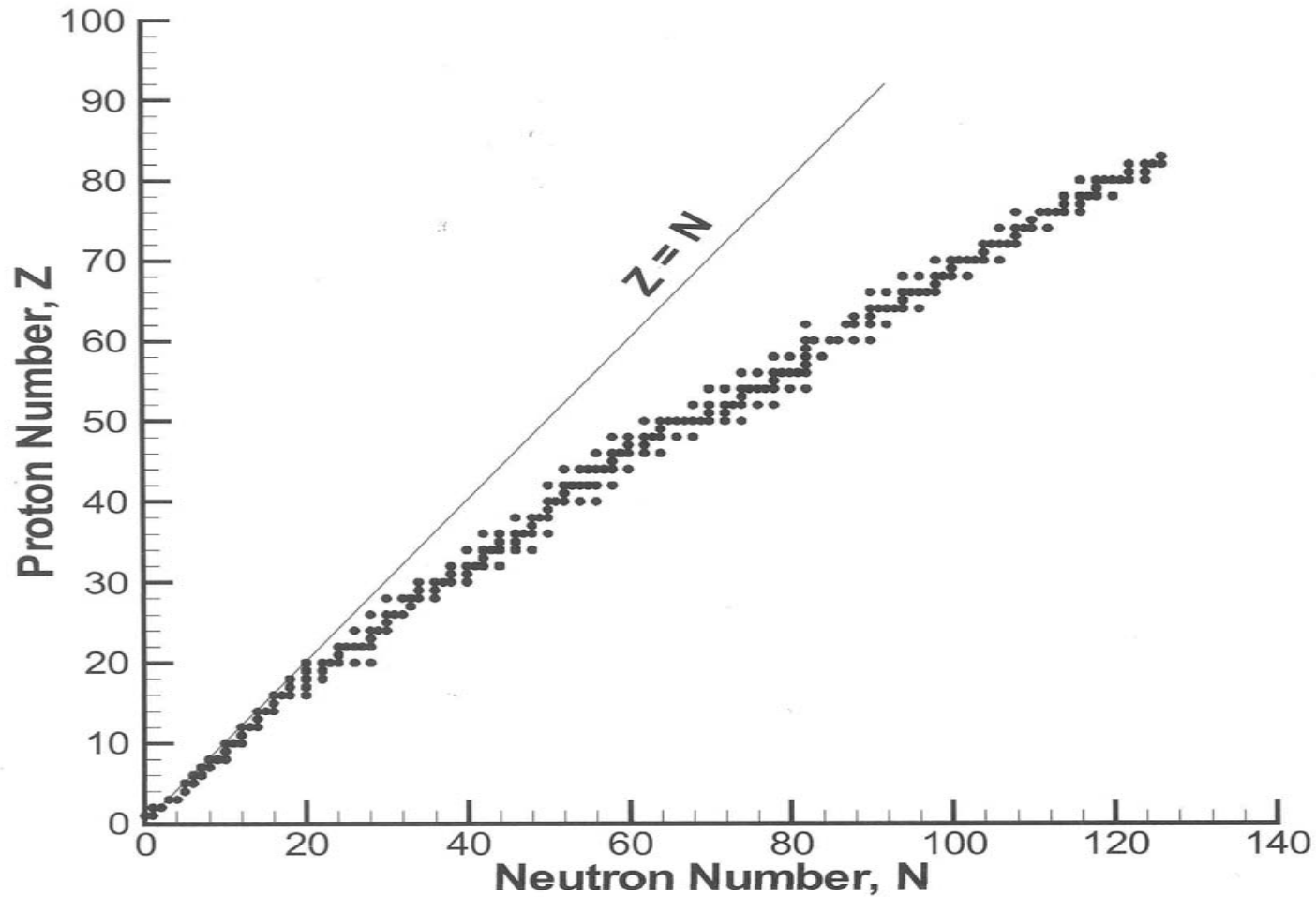
Landkarte der Isotope zeichnet sich durch ähnliche Anzahl von Protonen und Neutronen aus

Stabilisierung durch Neutronen

Stabile Isotope

Symptome

Bei den stabilen Isotopen überwiegt Anzahl der Neutronen



Diagnose

Nur ein Bruchteil der Isotope ist chemisch stabil und unterliegt nicht radioaktiven Zerfall

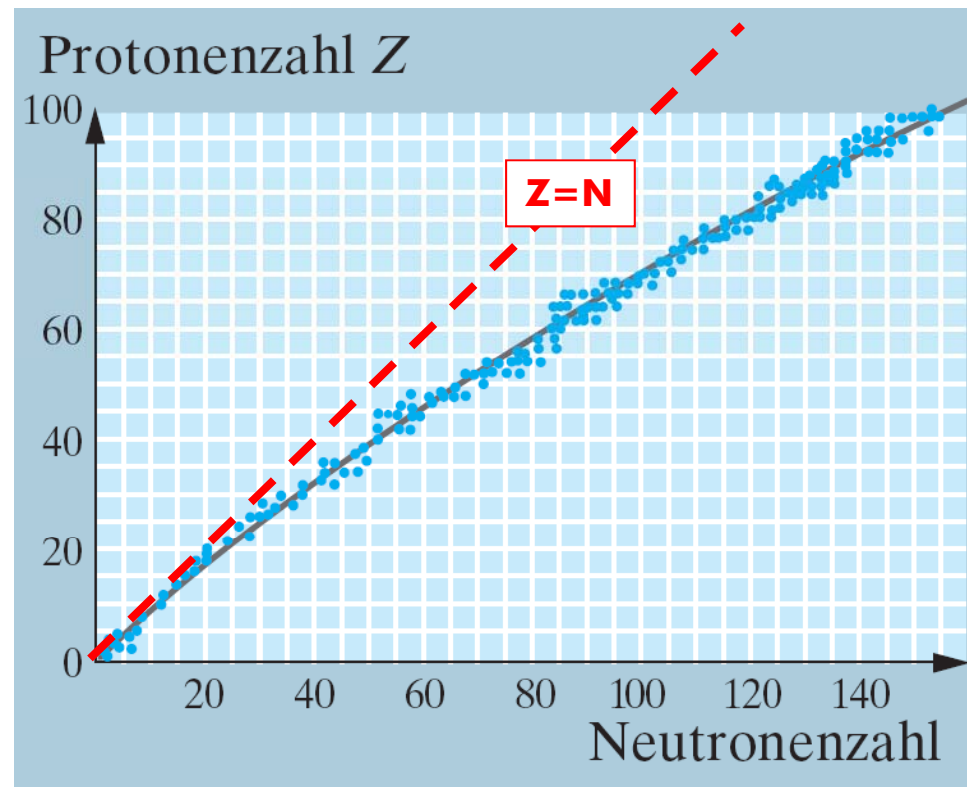


Periodensystem

Stabilität von Kernen

Symptome

- Chemie der Elemente des Periodensystems charakterisiert durch Anzahl Protonen
- neben Protonen enthält Kern bestimmte Anzahl Neutronen



Diagnose

- leichte Kerne liegen auf der Geraden $Z=N$
- Ursache ist das Aufbauprinzip von Pauli
- bei schweren Kernen überwiegt Anzahl der Neutronen
- Ursache ist abstoßende Coulombkraft zwischen den Protonen

Nuklidkarte

... nicht jede Kombination von Protonen und Neutronen ist stabil

Ununoctium

Noble gas

Symbol: **Uuo** Neutrons: **176**

Atomic number: **118** Energy levels: **7**

Atomic weight (amu): **294**

Atomic radius (pm): **?**





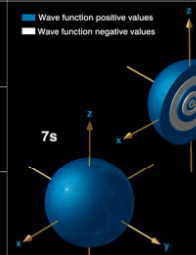
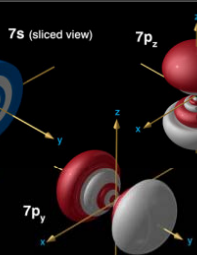
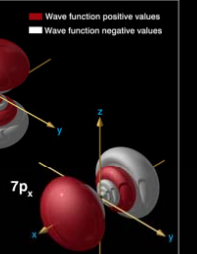








Proton/electrons: **118**

Shell structure:

1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s	7p	
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Atomic orbitals

[Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s² 7p⁶

Orbital types				Ununoctium valence orbitals			
							
							
							

No elements are known in which g orbitals are occupied in their ground states, only in excited states.

Diagnose

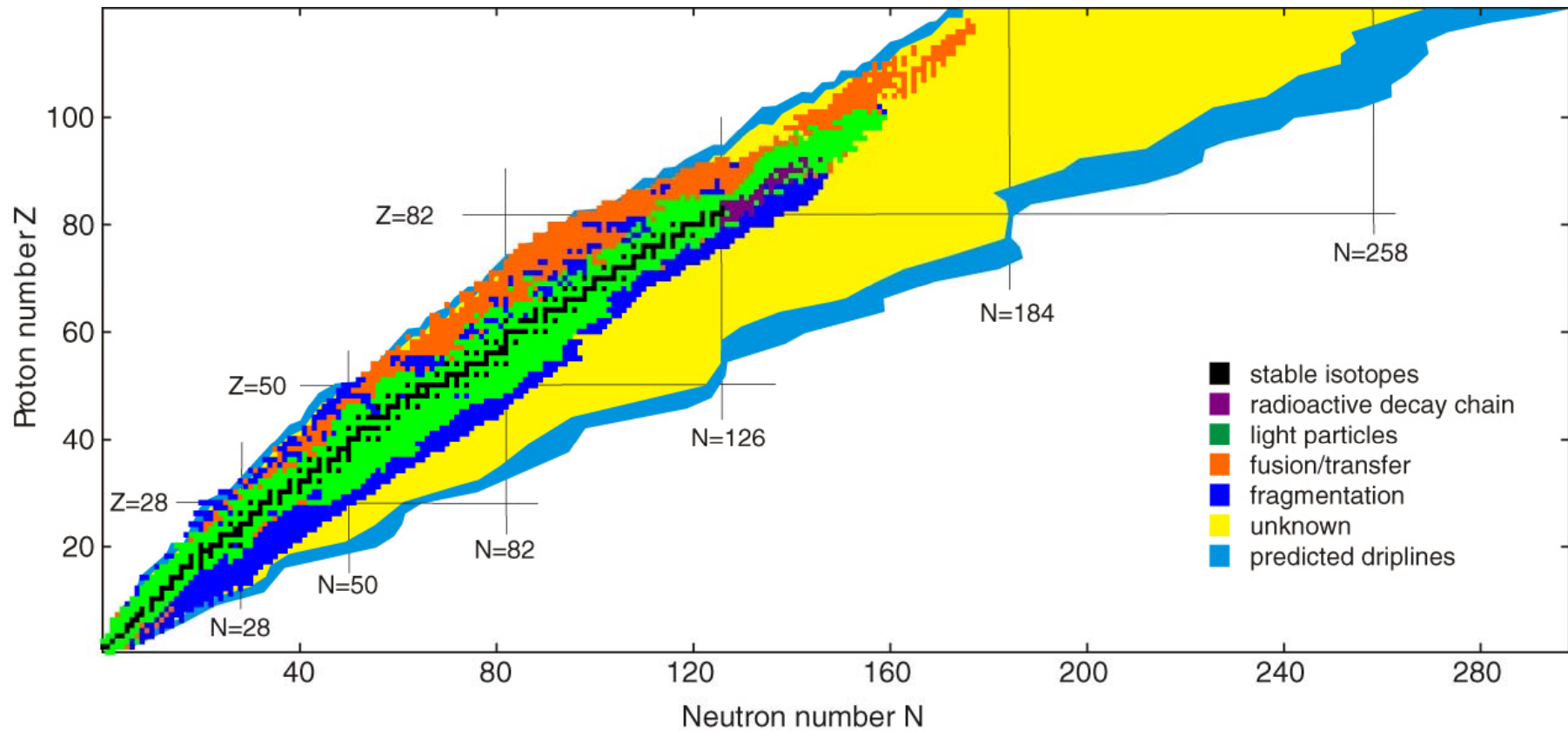
- schwerstes bislang erzeugtes Element ist Ununoctium (Eka-Radon)
- Ordnungszahl ist 118 (294 amu)
- Ununoctium wurde erstmals 2006 nachgewiesen

Chemiker ergänzen Periodensystem um vier Elemente

Die wohl berühmteste Tabelle der Wissenschaft bekommt Zuwachs: Das Periodensystem der Elemente wird um die Elemente 113, 115, 117, 118 ergänzt - damit ist die siebte Zeile komplett

Gallium 69.732	Germanium 72.61	Arsenic 74.922	Selenium 78.09	Bromine 79.904	Krypton 84.80
49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.29
81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018
113 Uut Ununtrium unknown	114 Fl Flerovium [289]	115 Uup Ununpentium unknown	116 Lv Livermorium [298]	117 Uus Ununseptium unknown	118 Uuo Ununoctium unknown

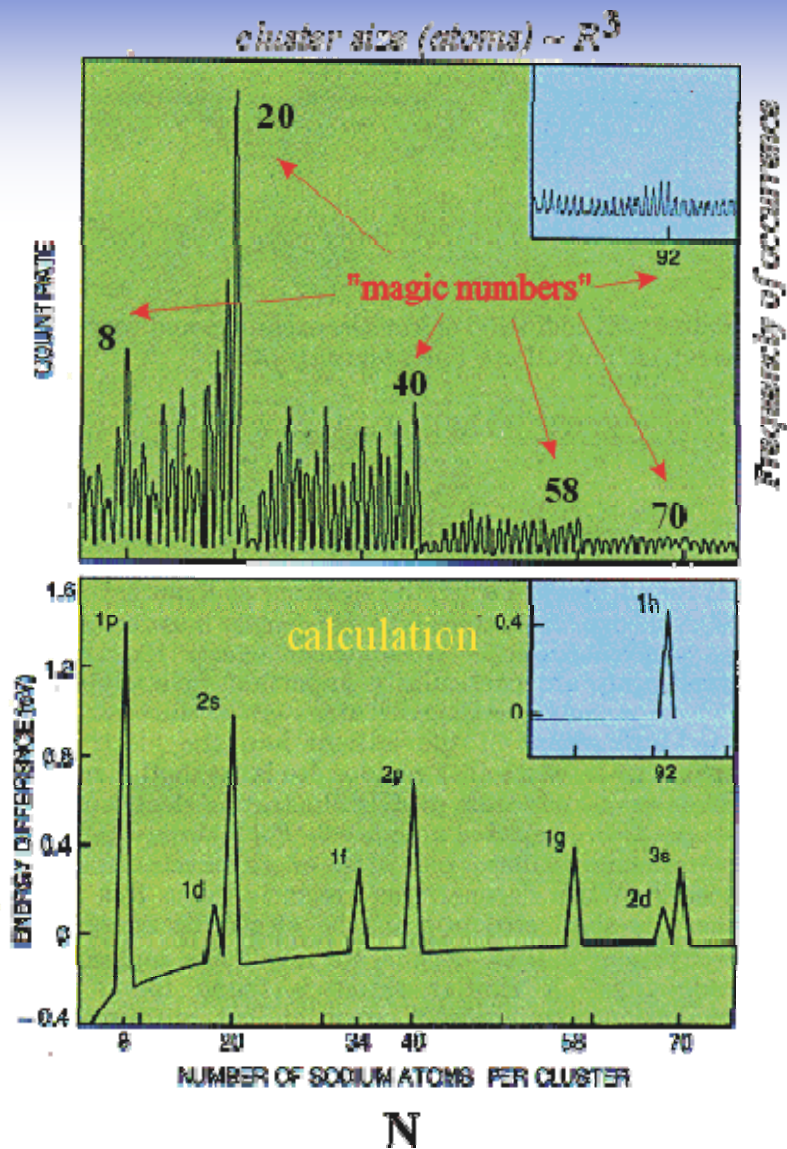
Nuklidkarte Inseln der Stabilität



Diagnose

Das Schalenmodell sagt stabile Proton-Neutron Kombinationen voraus

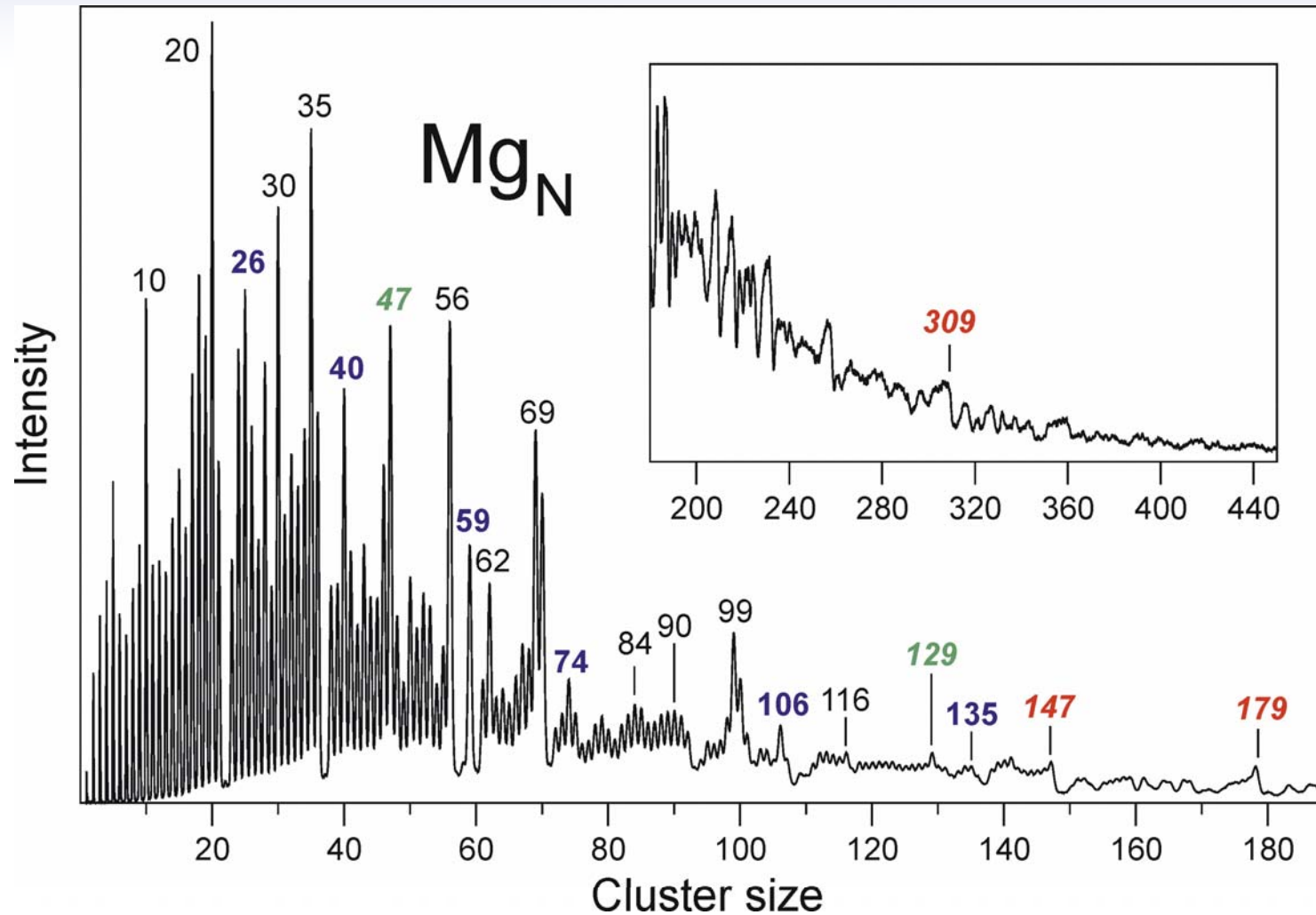
Clusterphysik



Diagnose

Metallcluster können ebenfalls durch das Schalenmodell beschrieben werden

in eigener Sache
Clusterphysik



Diagnose
Atomare Cluster sind Modellsysteme für große Kerne