

# Kerne und Teilchen

Spiralgalaxie NGC 4526  
 Entfernung:  $55 \pm 5$  Mio LJ  
 Raumwinkel:  $7.2' \times 2.4'$   
 Rotverschiebung:  $448 \pm 8$  km/s

Supernova 1994D, entdeckt am 7.3.1994

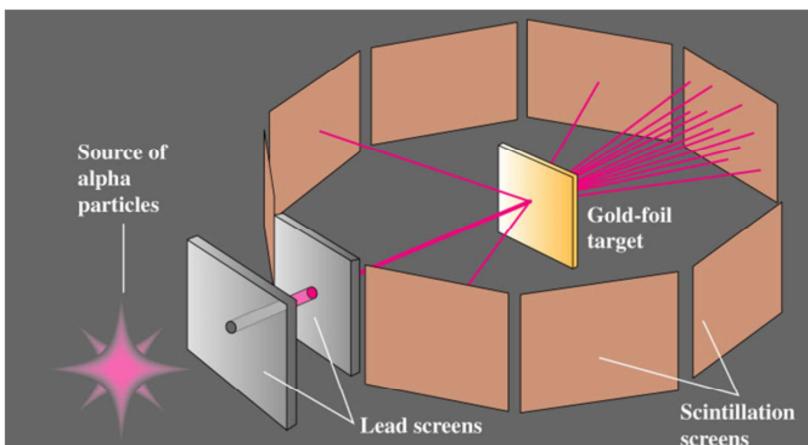
Der Kosmos ist ein gigantisches teilchenphysikalisches Labor. Was man am CERN mit grossem Aufwand tun kann, ist im Universum Alltag. Unser Sonnensystem, die Erde und alles Leben darauf besteht aus Elementen, die in vergangenen Sternzyklen und Supernovaexplosionen überhaupt erst entstanden sind.

## INHALT:

• Grösse des Atomkerns	2
Atomkern	2
Nuklide und Isotope	5
Kerngrösse	6
• Bindungsenergie des Atomkerns	9
Bindungsenergie der Kerne $E = mc^2$	9
Bindungsenergie pro Nukleon $E_B/A$	10
Nuklidkarte	13
• Radioaktiver Zerfall	16
Detektor und Strahlenarten	16
Alpha Zerfall	18
Beta Zerfall	20
Gamma Zerfall	34
Zerfall von Uran 238	37
• Elementarteilchen	23
Übersicht	23
Neutrino	27
Higgs Boson	33
• Radioaktivität	38
Halbwertszeit $T_{1/2}$ , Zerfallszeit $\tau$ , Aktivität	38
C14 Datierung	43
Strahlendosis	48
Radioaktiver Niederschlag - Fallout	54
Strahlentherapie	58

# Atomkern

Rutherford fand experimentell, dass der Kerndurchmesser mehrere 10'000 Mal kleiner ist als der Atomdurchmesser.



Experiment zur Bestimmung des Kerndurchmessers:  
Alpha Teilchen ( $\alpha$ ) werden an einer Goldfolie gestreut. Die  $\alpha$ -Teilchen stammen von radioaktivem Radium. Die Bleischirme mit kleinen Löchern dienen der Bündelung des Strahls. Die

Richtung der gestreuten Alpha Teilchen wird mithilfe der Lichtblitze auf den Szintillations-Schirmen registriert. Aufgrund der Verteilung der Streurichtungen kann man auf die Kerngrösse schliessen.

• Zerfallsstatistik	60
Poisson Verteilung	60
Gauss Verteilung	61
• Kernreaktion	63
Reaktionsenergie	63
Energieabgabe = exotherm , Energieaufnahme = Endotherm	64
• Kernspaltung	65
Kernspaltung - Fission	65
Kettenreaktion	68
Kernkraftwerk	71
Atombombe	79
Kritische Masse	80
• Kernverschmelzung	83
Fusion	83
Aktivierungsenergie	86
ITER	88
Wasserstoffbombe	91

Hinweis für Grafik-Aufgaben mit Taschenrechner:

Wenn der Taschenrechner langsam zeichnet, sollten Sie xres vergrössern (z.B. xres=6). Ist xres nicht in [Window] veränderbar (=hellgrau), dann drücken Sie [F1]), [9:Format] und ändern zu Discontinuity = Off. Bei manchen TR schneller mit: ♦ und | drücken im [Window]-Mode.

## Streu-Experimente

**Thomsons Modell des Atoms:** Eine Kleinwinkelstreuung der *Alpha* Teilchen wäre die Folge.

**Rutherford's Modell des Atoms:** Die Konsequenz ist eine starke Rückstreuung der *Alpha* Teilchen.

**Computer-Simulation der Trajektorien von an Goldkernen gestreuten 5.0 MeV Alpha Teilchen.**

Ein Goldkern mit hypothetischem Radius  $7.0 \times 10^{-16} \text{ m} = 0.7 \text{ fm}$  ergibt nur kleine Streuwinkel.

Ein Goldkern mit Radius  $7.0 \times 10^{-15} \text{ m} = 7.0 \text{ fm}$  (seine wirkliche Größe) erzeugt grosse Streuwinkel.

Viele der Bilder und Aufgaben stammen aus amerikanischen College Lehrbüchern.

**1. Physics for Scientists & Engineers, Douglas C. Giancoli, Prentice Hall** (in der Schweiz bestellen über Pearson Studium). Ein ausgezeichnetes Lehrbuch, das den ganzen Physikstoff in kompakter Form abdeckt. Es finden sich in diesem Buch zahlreiche, vorgerechnete Beispiele, sowie viele Übungsaufgaben. Auch die deutsche Übersetzung ist hervorragend, aber voluminös.

**2. University Physics, Young und Freedman, Pearson, Addison Wesley.** Hervorragend wie 1. Titel, aber viel umfangreicher. Keine Übersetzung.

**3. The Cosmic Perspective, Bennett, Donahue, Schneider und Voit, Pearson, Addison Wesley.** Schönes Buch mit sehr vielen Bildern des Universums und anschaulichen Erklärungen. Deckt das aktuelle Verständnis des Universums ab, von der Planetenbewegung über die Hintergrundstrahlung bis zur Inflationstheorie. Ganz einfaches Niveau.

**4. Modern Physics, Tipler und Llewellyn, Freeman.** Gutes Buch. Zu viele Themen für diesen Kurs.

**5. Taschenbuch der Physik, Horst Kuchling, Fachbuchverlag Leipzig,** Formelsammlung.



Der Neuseeländer Ernest Rutherford (1871 - 1937) forschte in England und Kanada. 1908 erhielt er zusammen mit Frederick Soddy den Nobelpreis für Chemie.

### Glossar:

**Nucleus** (pl. Nuclei) = Kern, **Nucleon** = Kernteilchen = Neutron oder Proton

**1.** Ein *Alpha* Teilchen wird direkt auf einen Goldkern geschossen. Ein *Alpha* Teilchen (= Heliumkern) besteht aus zwei Neutronen und zwei Protonen mit einer Ladung von  $2e = 2 \times (1.60 \times 10^{-19} C)$ . Ein Goldkern hat 79 Protonen. Berechnen Sie die kinetische Energie des *Alpha* Teilchens in MeV, wenn dieses das Zentrum des Goldkerns auf  $5.0 \times 10^{-14} m$  annähert. Der Goldkern hat eine 50 Mal grössere Masse als das *Alpha* Teilchen. Der Goldkern bleibe in Ruhe.  $\circledR 7.3 \times 10^{-13} J = 4.6 \text{ MeV}$ , vergleiche: Ein  $\alpha$  aus  $^{226}Ra$  wird mit 4.78 MeV ausgestossen

$$\text{Coulomb-Kraft: } F_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad \text{Coulomb-Energie: } E_{\text{pot}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r}$$

Elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}/(\text{V}\cdot\text{m})$

### Geschichtliche Anmerkung.

Das etwas andere Einheitensystem der Elektrostatik (*esu*), die *CGS* Einheiten:

$$1\text{Coulomb} = 10^{-1} c \cdot \text{cm}^{3/2} \text{ gr}^{1/2} \text{ s}^{-1} = 10^{-1} 3 \times 10^8 \text{ cm}^{3/2} \text{ gr}^{1/2} \text{ s}^{-1} = 3 \times 10^{5/2} \text{ m}^{5/2} \text{ kg}^{1/2} \text{ s}^{-2} = 1\text{C}$$

$$1\text{Volt} = 10^8 c^{-1} \cdot \text{cm}^{1/2} \text{ gr}^{1/2} \text{ s}^{-1} = 10^8 / (3 \times 10^8) \text{ cm}^{1/2} \text{ gr}^{1/2} \text{ s}^{-1} = (1/3) \times 10^{-5/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ kg}^{1/2} = 1\text{V}$$

Test:  $1\text{V} \cdot 1\text{C} = ?$

Im Einheitensystem oben kommt die Lichtgeschwindigkeit  $c$  vor. Lichtgeschwindigkeit, Maxwellgleichungen und Relativitätstheorie haben sehr viel miteinander zu tun !

# Nuklide und Isotope

Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen. Der Atomkern ist von Elektronen umgeben und das neutrale Atom besitzt je ein Elektron pro Proton. Die Anzahl Protonen (= Atomzahl  $Z$ ) bestimmt das Element. Die Neutronen (Neutronenzahl  $N$ ) dienen als "Kernklebstoff" gegen die grosse Coulomb-Abstossung der Protonen.

**Atomare Masseneinheit "u":**

$$1\text{u} = 1.660\,538\,921(73) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Masse der Elementarteilchen: #)

$$m_p = 1.007\,276\,466\,812(90) \text{ u}$$

$$m_n = 1.008\,664\,916\,00(43) \text{ u}$$

$$m_e = 5.485\,799\,094\,6(22) \times 10^{-4} \text{ u}$$

Element and Isotope	Atomic Number $Z$	Neutron Number $N$	Atomic Mass (u)	Mass Number A
Hydrogen ( ${}^1_1\text{H}$ )	1	0	1.007825	1
Deuterium ( ${}^2_1\text{H}$ )	1	1	2.014102	2
Tritium ( ${}^3_1\text{H}$ )	1	2	3.016049	3
Helium ( ${}^2_2\text{He}$ )	2	1	3.016029	3
Helium ( ${}^4_2\text{He}$ )	2	2	4.002603	4
Lithium ( ${}^6_3\text{Li}$ )	3	3	6.015122	6
Lithium ( ${}^7_3\text{Li}$ )	3	4	7.016004	7
Beryllium ( ${}^4_4\text{Be}$ )	4	5	9.012182	9
Boron ( ${}^{10}_5\text{B}$ )	5	5	10.012937	10
Boron ( ${}^{11}_5\text{B}$ )	5	6	11.009305	11
Carbon ( ${}^{12}_6\text{C}$ )	6	6	12.000000	12
Carbon ( ${}^{13}_6\text{C}$ )	6	7	13.003355	13
Nitrogen ( ${}^{14}_7\text{N}$ )	7	7	14.003074	14
Nitrogen ( ${}^{15}_7\text{N}$ )	7	8	15.000109	15
Oxygen ( ${}^{16}_8\text{O}$ )	8	8	15.994915	16
Oxygen ( ${}^{17}_8\text{O}$ )	8	9	16.999132	17
Oxygen ( ${}^{18}_8\text{O}$ )	8	10	17.999160	18

Source: A. H. Wapstra and G. Audi, *Nuclear Physics A595*, 4 (1995).

2. Was bedeuten die Klammerausdrücke ...(90) links bei der Angabe der atomaren Masseneinheit?

Die einzelnen Atome mit spezifischem  $Z$  und  $N$  heissen **Nuklide**. Nuklide mit identischem  $Z$  aber unterschiedlichem  $N$  werden **Isotope** dieses Elementes genannt.

Die Kraft, welche die Protonen und Neutronen zusammenhält, heisst die **starke Wechselwirkung**. Sie ist erstens unabhängig von der Ladung und wirkt gleichermaßen zwischen Protonen wie auch zwischen Neutronen. Sie ist zweitens nur kurzreichweitig. D.h. sie verliert sehr rasch an Stärke und ist bei Abständen grösser als 1 fm nicht mehr wirksam. Andernfalls würden Kerne ins Unendliche anwachsen, indem sie immer mehr Neutronen und Protonen schlucken. Drittens wechseltwirkt ein Nukleon nur mit seinen nächsten Nachbarn stark, hingegen stösst ein Proton alle andern Protonen im Kern ab. Das ist der Grund für die annähernd konstante Kerndichte aller Elemente. Leider kann man für diese starke Wechselwirkung nicht eine einfache Gleichung schreiben wie das Gravitationsgesetz von Newton oder das Coulombgesetz. Trotzdem existieren Modelle des Kerns, beispielsweise das Tröpfchenmodell oder das Schalenmodell.

#) NIST, CODATA 2006

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

Präzisere Daten der atomaren Massen von Wasserstoff und Helium:

<http://www.nndc.bnl.gov/amdc/masstable/Ame2003/mass.mas03>

${}^1\text{H}$ : 1.00782503207(10) u ( $= m_p + m_e - 0.00000001465 \text{ u}$ )

${}^2\text{H}$ : 2.01410177785(36) u

${}^4\text{He}$ : 4.00260325415(06) u

# Kerngrösse

Mithilfe der Streuexperimente von Rutherford (und anderer) hat man ein Modell des Kernradius  $R$  entwickelt.

$$R = R_0 \cdot A^{1/3}$$

$R_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.2 \text{ fm}$ , experimentelle Konstante  
 $A$ : Gesamtzahl Nukleonen, Massenzahl,  $A = Z + N$

Nucleus	Mass Number (Total Number of Nucleons), $A$	Atomic Number (Number of Protons), $Z$	Neutron Number, $N = A - Z$
${}_1^1\text{H}$	1	1	0
${}_1^2\text{D}$	2	1	1
${}_2^4\text{He}$	4	2	2
${}_3^6\text{Li}$	6	3	3
${}_3^7\text{Li}$	7	3	4
${}_4^9\text{Be}$	9	4	5
${}_5^{10}\text{B}$	10	5	5
${}_5^{11}\text{B}$	11	5	6
${}_6^{12}\text{C}$	12	6	6
${}_6^{13}\text{C}$	13	6	7
${}_7^{14}\text{N}$	14	7	7
${}_8^{16}\text{O}$	16	8	8
${}_{11}^{23}\text{Na}$	23	11	12
${}_{29}^{65}\text{Cu}$	65	29	36
${}_{80}^{200}\text{Hg}$	200	80	120
${}_{92}^{235}\text{U}$	235	92	143
${}_{92}^{238}\text{U}$	238	92	146

3. Begründen Sie die Potenz  $1/3$  in der Gleichung für  $R$ .

4. Interpretieren Sie die Zahlen in der Tabelle. Erklären Sie den Unterschied zwischen  ${}_{92}^{235}\text{U}$  und  ${}_{92}^{238}\text{U}$

5. Was ist ein Deuterium?

6. Die häufigste Variante von Eisen hat die Massenzahl 56. Bestimmen Sie Masse und Dichte des Kerns.

Zu 6.

$R = 4.6 \text{ fm}$ ,  $\text{Vol} = 4.1 \times 10^{-43} \text{ m}^3$ ,  $m = 9.3 \times 10^{-26} \text{ kg}$ ,  $\rho = 2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3 \approx$  Dichte eines Neutronensternes! Ein Neutronenstern ist wie ein gigantischer Kern, ohne positive Ladungen. Die Dichte eines Stückes Eisen zum Vergleich ist nur etwa  $\rho = 7.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

### Das Periodensystem der Elemente

The Periodic Table of Elements is shown with the following key information:

- Ordnungszahl:** Atomic number (1 to 118).
- Symbol:** Element symbol.
- Masse (u):** Atomic mass.
- Vorkommen:** Occurrence (natürlich, nat. radioaktiv, synthetisch).
- Serie:** Series classification (Alkalimetall, Erdalkalimetall, Lanthanoid, Actinoid, Halbmetall, Metalloid, Nichtmetall, Halogen, Übergangsmetall, Edelgas).

**PeriodenSystem.info**

## Das Mol

**Die Einheit mol ist eine Mengenangabe.**

**1 mol entspricht der Avogadrozahl  $N_A = 6.0221 \times 10^{23}$  Teilchen**

**Die gesamte Anzahl Teilchen in einem Körper / Stoff ist  $N$ .**

**Die Anzahl mol des Körpers ist  $n = N / N_A$**

**14 Si**

**molare Masse  $m_{mol}$**   $28.086 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

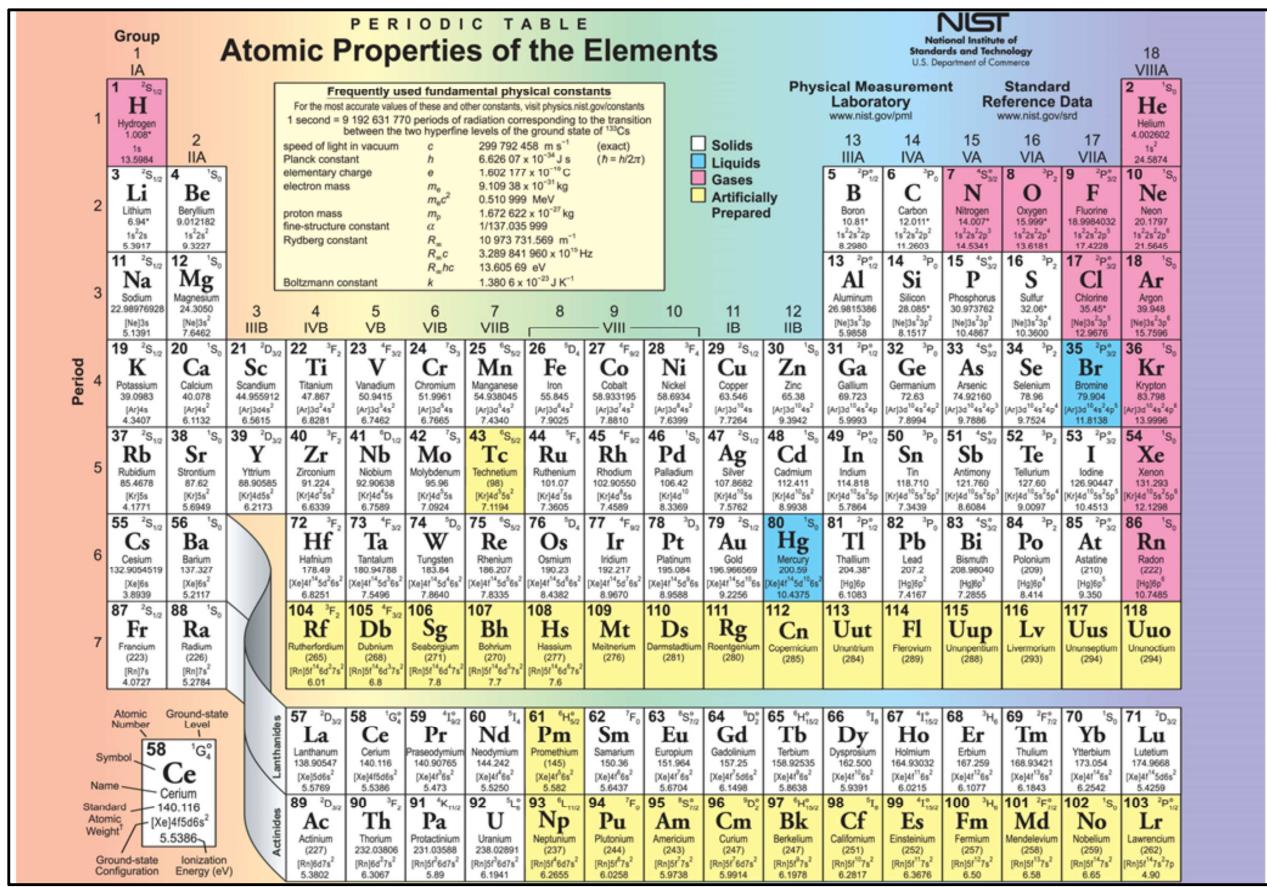
**Die Masse  $m$  eines Körpers / Stoffes von  $n$  mol ist  $m = n \cdot m_{mol}$**

Beispiel:

76% aller Chloratome besitzen 18 Neutronen, 24% haben 20 Neutronen. Berechnen Sie die mittlere Molmasse von Chlor und vergleichen Sie mit der Angabe im Periodensystem.

Lösung:

Im Durchschnitt  $18.48$  Neutronen +  $17$  Protonen =  $35.48 \text{ u} \cdot 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg} = 5.893 \times 10^{-26} \text{ kg}$ ; ...  
 $6.022 \times 10^{23} = 0.03549 \text{ kg pro Mol.}$

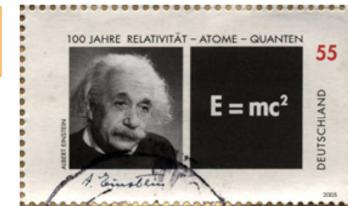


# Bindungsenergie der Kerne

Es muss dem Kern Energie zugeführt werden, um ihn in seine Elementarteilchen ( $p$  und  $n$ ) zu zerlegen.

Bindungsenergie eines Atomkerns : 
$$E_B = \left( Z \cdot M_H + N \cdot m_n - \frac{A}{Z} M \right) \cdot c^2$$

\ / \ /  
Masse des neutralen Atoms  
Masse des Wasserstoffatoms



7. Erklären Sie die Gleichung für  $E_B$  mithilfe  $E = mc^2$ .

8. Zeigen Sie dass:  $1 u \cdot c^2 = 931.494\ 061(21) \text{ MeV}$

Sonderbriefmarke zum Jahr der Physik 2005

9. Das einfachste Atom ist Wasserstoff. Als nächstes kommt das Deuterium. Berechnen Sie mithilfe der Tabelle auf Seite 5 seine Bindungsenergie. Bestimmen Sie daraus seine Bindungsenergie pro Nukleon  $E_B/A$ . Zum Vergleich: Bindungsenergie des  $e^-$  im  $^1H$  ist 13.6 eV

10. Wegen seiner grössten Bindungsenergie pro Nukleon wird  $^{62}_{28}Ni$  als stabiliestes Element bezeichnet. Berechnen Sie seine Bindungsenergie und die Bindungsenergie pro Nukleon. Seine neutrale Atommasse wurde mit 61.928349  $u$  gemessen.

Zu 10.

$Z = 28, M_H = 1.007825 \text{ u}, N = A - Z = 62 - 28 = 34, m_n = 1.008665 \text{ u}, E_B = 545.3 \text{ MeV}$ ,  
 $\rightarrow 8.795 \text{ MeV}$  pro Nukleon.

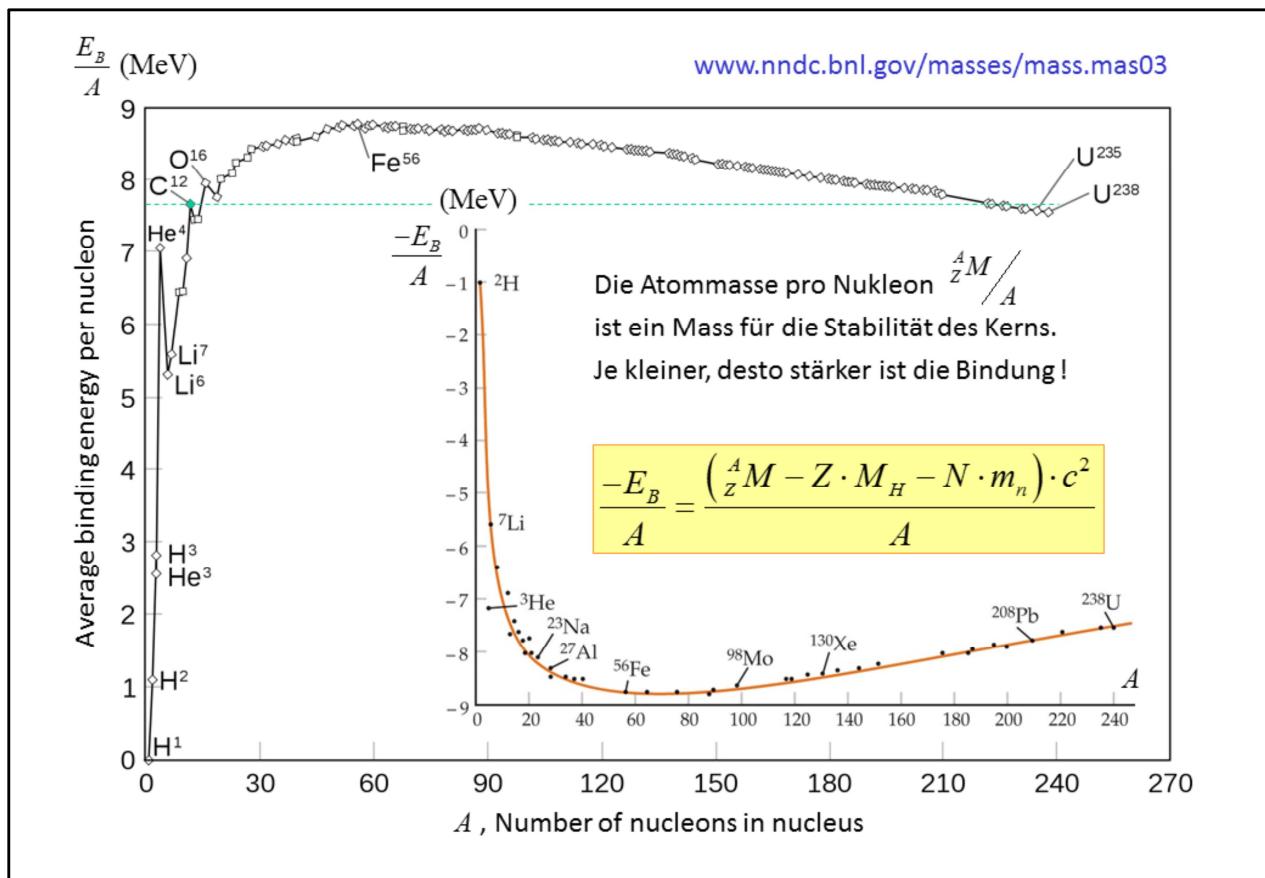
$$E = mc^2$$

Masse ist blass eine weitere Energieform, wie beispielsweise Wärme auch !

Elementarladung:  $1 e = 1.602\ 176\ 487(40) \times 10^{-19} \text{ C}$  Lichtgeschwindigkeit:  $c = 299\ 792\ 458 \text{ m/s}$

Masse - Energie Äquivalent:  $1 \text{ u} \equiv 1.492\ 417\ 83 \times 10^{-10} \text{ J} = 931.494\ 028 \text{ MeV}$

Particle	Symbol	Rest energy $m \cdot c^2, \text{ MeV}$	Mean lifetime $\tau, \text{ s}$
Photon	$\gamma$	0	
Electron (positron)	$e$ or $e^-$ ( $e^+$ )	0.510 998 910(13)	
Muon	$\mu^\pm$	105.658 369(9)	$2.197\ 03(4) \times 10^{-6}$
Pion	$\pi^0$	134.976 6(6)	$8.4(6) \times 10^{-17}$
	$\pi^\pm$	139.570 18(35)	$2.6033(5) \times 10^{-8}$
Proton	$p$	938.272 013(23)	$>2.1 \times 10^{29}$
Neutron	$n$	939.565 346(23)	885.7(8)
Deuteron (Atom)	$^2H$ or $d$	1875.612 793(47)	
Triton (Atom)	$^3H$ or $t$	2808.920 906(70)	
Helium-3 (Atom)	$^3He$	2809.413 300	
Alpha particle	$\alpha$	3727.379 109(93)	



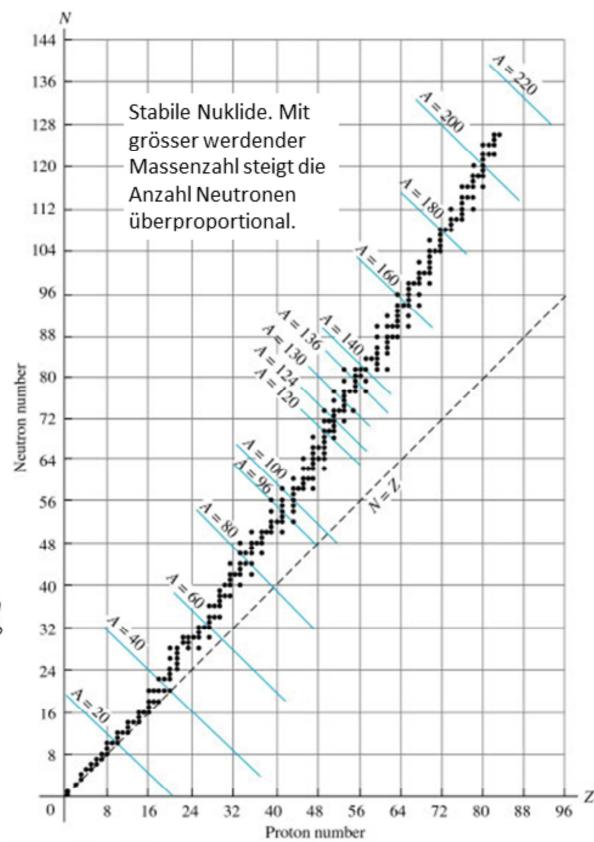
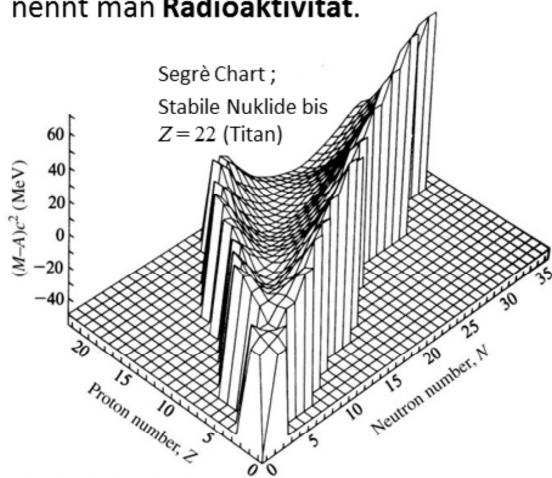
Es existiert kein stabiles Element mit  $A = 5$ . Die Kernbildung aus Protonen und Neutronen (Fusion) stoppte im jungen Universum bei  $4\text{-He}$ . Die Bildung von Helium und Wasserstoff war etwa 1000 s nach dem Urknall abgeschlossen. Das Universum war dann noch  $10^9$  K heiss. Grössere Kerne entstanden erst viel später durch Kernverschmelzung in Sternen. Die "sichtbare" Materie des Universums besteht deshalb zu 99% aus Wasserstoff und Helium.

Neueste Beobachtungen lassen darauf schliessen, dass es im Universum 7 Mal mehr dunkle Materie gibt als die uns bekannte, sichtbare (baryonische). Wir wissen nicht, was dunkle Materie ist. Wir können sie nur indirekt beobachten durch ihre Gravitationswirkung .

Die grün gestrichelte Linie entspricht der Definition der atomaren Masseneinheit:  $1 u \equiv ^{12}\text{C}/12$ . Alle Isotope über der grünen Linie haben ein Massendefizit  $\Delta(\text{MeV})$  im Vergleich zu  $A \cdot u$ , alle Isotope unterhalb haben einen Massenüberschuss im Vergleich zu  $A \cdot u$ :  $\Delta(\text{MeV})$  ist positiv (Siehe S14)

## Kern-Stabilität

Von den 2500 bekannten Nukliden sind weniger als 300 stabil. Die andern zerfallen in neue Kerne und senden dabei Teilchen und elektro-magnetische Strahlung aus. Diesen Zerfallsprozess nennt man **Radioaktivität**.



- 11.** Interpretieren Sie die z-Achse im 3D Segrè-Chart der vorangehenden Figur.
- 12.** Können Sie sich erklären, warum  $N$  schneller wächst als  $Z$  ?
- 13.** Was könnte der Grund sein, dass es keine stabilen Isotope mit  $Z > 83$  (= Wismut) gibt ? #)

Emilio Gino Segrè, 1905 - 1989, gewann zusammen mit Owen Chamberlain 1959 den Nobelpreis in Physik für die Entdeckung des Antiprotons.  
(Badge Foto des Los Alamos National Laboratory)



Marie Skłodowska-Curie,  
1867 - 1934, Erforscherin der  
Radioaktivität und  
Nobelpreisträgerin in Physik  
(1903) und Chemie (1911).

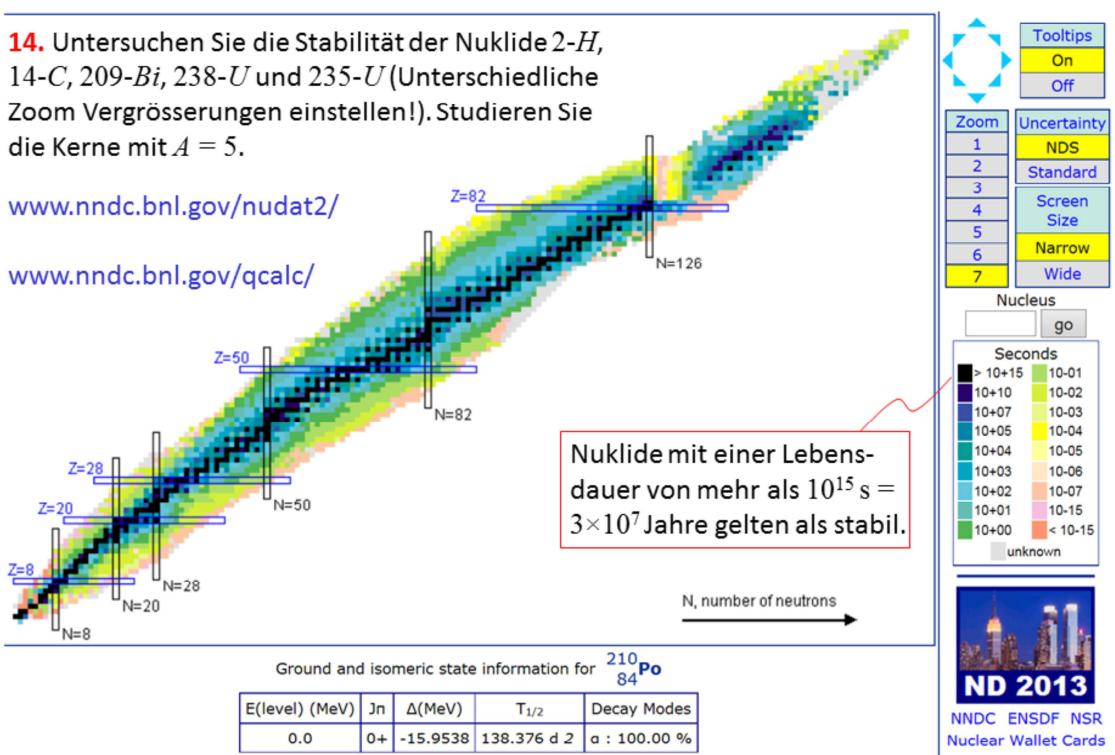


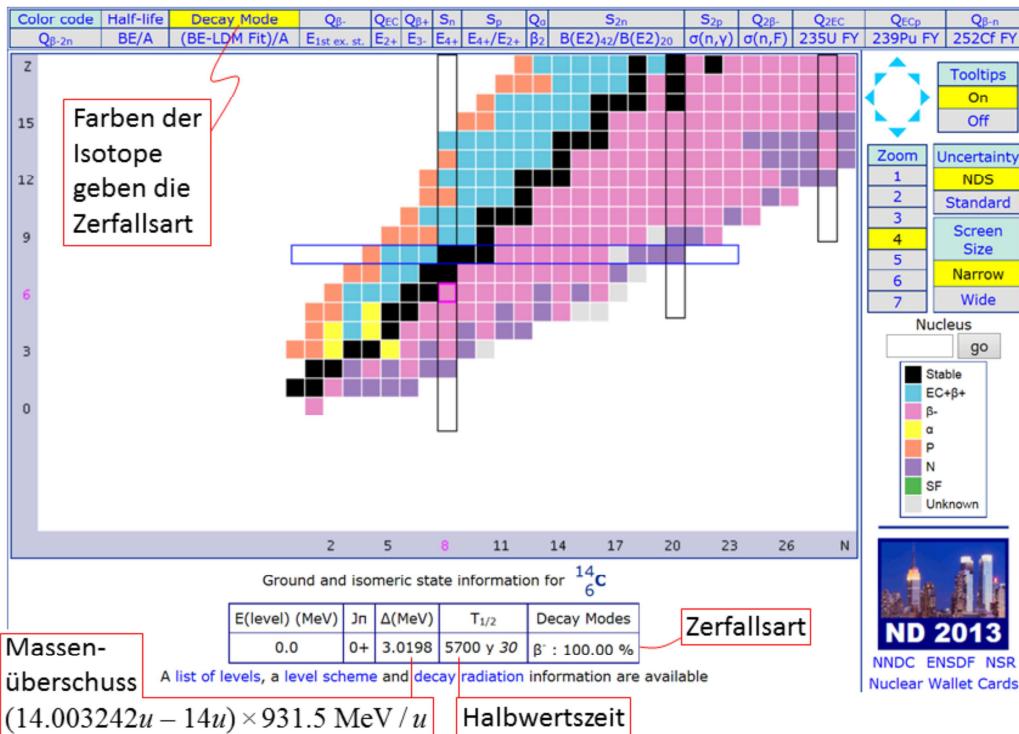
#) Neuere Messungen geben für Wismut eine Halbwertszeit von  $T_{1/2} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{19}$  Jahre!

**14.** Untersuchen Sie die Stabilität der Nuklide  ${}^2H$ ,  ${}^{14}C$ ,  ${}^{209}Bi$ ,  ${}^{238}U$  und  ${}^{235}U$  (Unterschiedliche Zoom Vergrösserungen einstellen!). Studieren Sie die Kerne mit  $A = 5$ .

[www.nndc.bnl.gov/nudat2/](http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/)

[www.nndc.bnl.gov/qcalc/](http://www.nndc.bnl.gov/qcalc/)





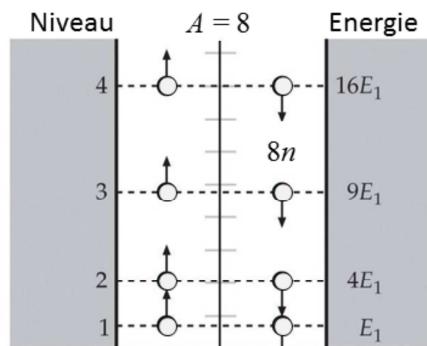
Mithilfe des Massenüberschusses  $\Delta(\text{MeV})$  kann die exakte Atommasse bestimmt werden, beispielsweise für  $^{14}\text{-C}$ :

$$m_{^{14}\text{C}} = 14 \cdot u + \Delta = (14 + 3.0199/931.5) u = 14.003242 u$$

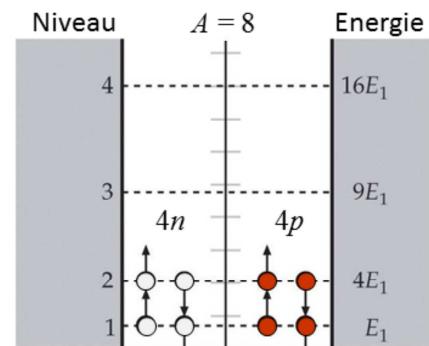
Vergleiche mit Tabellenwert unter [www.nndc.bnl.gov/masses/mass.mas03](http://www.nndc.bnl.gov/masses/mass.mas03) : 14.003 241 988 7 u

## Energieniveaus und Pauliprinzip

Wie beim Bohr'schen Modell befinden sich die Nukleonen im Kern auf diskreten Energieniveaus. Das **Pauli Ausschliessungsprinzip** verhindert, dass alle auf dem tiefsten Niveau sitzen.



Acht Neutronen befinden sich im *Potentialtopf* des Kerns. Ein Energieniveau kann nur von zwei Neutronen mit entgegen gesetztem Spin besetzt werden.

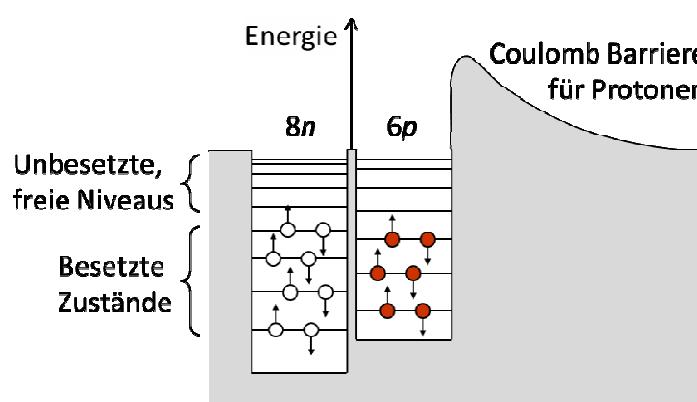


Vier Neutronen und vier Protonen haben gesamthaft die tiefere Energie (= grössere Bindungsenergie), weil Protonen und Neutronen unterscheidbar sind. #)

Wegen der Protonenabstossung  $\sim Z^2$  wären die einzelnen Energieniveaus in der Figur rechts etwas höher als links. Die Konfiguration rechts bleibt aber insgesamt trotzdem vorteilhafter.

#) Statt einen Achterklumpen aus 8 Neutronen zu bilden, ist es energetisch günstiger 4 Neutronen plus 4 Protonen zu einem Kern, plus 4 Elektronen zu einem Beryllium-Atom zu formen. Wir verdanken dem Pauliprinzip also die Stabilität der Materie unter Normalbedingungen und somit unsere Existenz. In einem Neutronenstern ist der Gravitationsdruck allerdings so gross, dass die atomaren Elektronen auf die Protonen gepresst und diese zu Neutronen werden. Ein Neutronenstern ist ein gigantischer Neutronenklumpen.

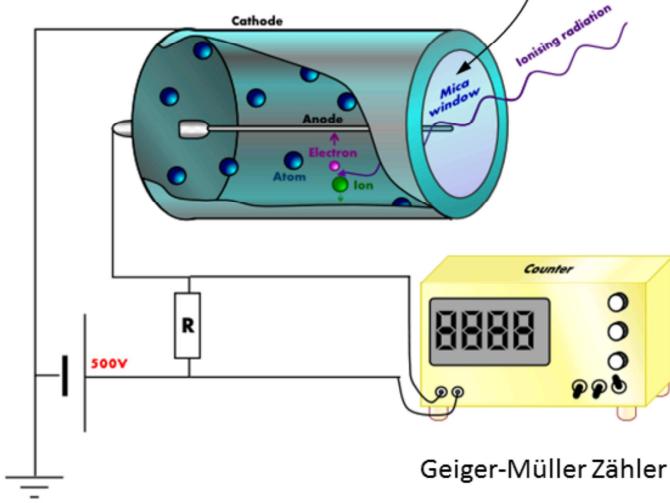
Unten eine Darstellung des Atomkerns als Potentialtopf für die 8 Neutronen und 6 Protonen von  $^{14}C$ . Eine Barriere der gegenseitigen Coulombabstossung existiert nur für die Protonen.



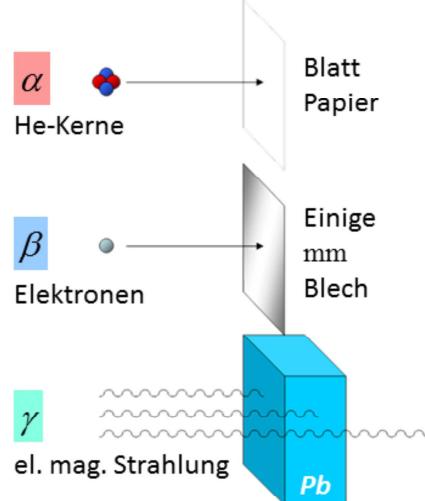
## Strahlen Detektor

Mit Argon (200 hPa) gefülltes Stahlrohr. Radioaktive Strahlung ionisiert Atome des Edelgases.

Sehr dünnes Fenster aus Glimmer oder Mylar.



## Abschirmung



*Alpha* Teilchen vermögen die Hornschicht der Haut nicht zu durchdringen. Die Hornschicht ist die äusserste, tote Schicht der Haut; Alphastrahlung von aussen dringt also nie in den Körper ein.

*Beta* Teilchen dringen wenige mm tief in Körpergewebe ein. Kleidung oder Brillen haben bereits eine gute Schutzwirkung gegen äussere Betastrahlen.

*Gamma*- wie auch Röntgenstrahlung werden von Körperteilen teilweise absorbiert und gestreut. Es ist die durchstrahlte Masse, welche die Strahlung bremst; je weniger dicht die Materie, umso grösser die Reichweite. Siehe **Halbwertsdicke** unten.

Ausgerechnet die Strahlen geringer Reichweite (*Alpha*- und *Beta* strahlen) haben in Körperorganen eine starke Wirkung, weil die Strahlenenergie auf kurze Distanzen absorbiert ist, was zu dichten, aber kurzen «Schadensspuren» führt. Durchdringende *Gamma*- und Röntgenstrahlen hingegen verursachen eine «dünne» Schadensspur.

Zu viel Strahlung kann die Gesundheit beeinträchtigen. Die Wahrscheinlichkeit, an Leukämie oder Tumor zu erkranken, steigt bei hohen Strahlendosen; die Symptome zeigen sich aber meistens erst viele Jahren nach einer Bestrahlung.

$^{210}_{84}\text{Po}$  wurde 1898 von Marie und Pierre Curie entdeckt.  $^{210}_{84}\text{Po}$  zerfällt in  $^{206}_{82}\text{Pb}$  und ein Alpha Teilchen. Seine Halbwertszeit beträgt 138 Tage.

**15. Alpha Teilchen sind nur gefährlich, wenn sie direkt in der Nähe vom oder im Körper entstehen. Warum?**



Alexander Walterowitsch  
Litwinenko (Александр  
Вальтерович Литвиненко),  
1962 - 2006

### Polonium-210 – selten, aber sehr gefährlich

**H. W.** Weil die britischen Gesundheitsbehörden erklärt hatten, im Urin Litwinenkos eine «hohe Dosis» Polonium-210 registriert zu haben, könnten dies die Ursache für dessen Tod gewesen sein. Bisher ist jedoch kein Fall einer absichtlichen Vergiftung mit Polonium bekannt. Für die Experten ist die These, dass ein so «extraordinäres» Gift verwendet worden sein soll, daher mit einigen Fragezeichen zu versehen.

#### Spuren durch Schweiß verteilt?

Das Element Polonium ist ein silbriges, radioaktives Metall, das über eine lange Zerfallskette aus Uran-238 entsteht; es kommt in Form verschiedener Isotope vor, das häufigste ist Polonium-210. In der Natur ist Polonium sehr selten. Pro Tonne Uranerz finden sich nur etwa 100 Mikrogramm. Die Substanz lässt sich indes auch künstlich herstellen, wozu allerdings ein grosses technisches Know-how nötig ist. So lässt sich Polonium mittels Kernreaktoren durch den Neutronenbeschuss von Wismut oder an einem Teilchenbeschleuniger durch die Bestrahlung einer Wismut-Probe mit Protonen erzeugen. Pro Jahr werden weltweit schätzungsweise 100 Gramm Polonium hergestellt. Es wird etwa als Wärmequelle für thermoelektrische Zellen, wie sie in der Raumfahrt zum Einsatz kommen, verwendet sowie gemischt mit Beryllium als Neutronenquelle für Versuche oder auch als Auslöser für Atombomben.

Beim Zerfall zu Blei strahlt Polonium energiereiche Alphateilchen aus. Diese haben über eine Reichweite von weniger als 0,1 Millimeter. Schon die Haut oder ein Papier vermag die Strahlung abzuschirmen, weshalb Polonium relativ leicht zu transportieren ist. In den Körper gebracht – durch Einatmen, eine Wunde oder mit der Nahrung –, ist es ein starkes radioaktives Gift. Über das Blut verteilt es sich in weichem Körpergewebe. Die Alpha-

strahlen zerstören Gewebe und Organe. Polonium wird vom menschlichen Körper innerst 30 bis 50 Tage zur Hälfte ausgeschieden – zu 90 Prozent über Faeces und zu 10 Prozent über den Urin.

Auch über den Schweiß dürfte laut Herwig Paretzke, dem Direktor des Instituts für Strahlenschutz des deutschen GSF-Forschungszentrums, bei einer starken Vergiftung eine geringe Menge Polonium freigesetzt werden. Dies könnte die Polonium-Spuren an einigen Orten, an denen sich Litwinenko aufgehalten hatte, erklären.

Ob ein Kranke innerlich durch Polonium verseucht worden ist, lässt sich nur über eine spezielle spektrometrische Analyse von Körperauscheidungen feststellen. Zwar strahlt Polonium auch Gammastrahlen aus; dieser Anteil ist allerdings so gering, dass er von aussen nicht gemessen werden kann. Bei der Obduktion der Leiche Litwinenkos, die am Donnerstag beginnen soll, kann nun auch Gewebe direkt untersucht werden. Schon heute ist für Paretzke aber sehr wahrscheinlich, dass sich die bei Litwinenko beobachteten Symptome – Übelkeit nach einem Tag, Haarausfall, Organversagen, Tod nach rund drei Wochen – nur durch Strahlung, und zwar eine sehr hohe Dosis, erklären lassen. Dafür würden schon etwa 0,1 Mikrogramm einen Polonium ausreichen. Weil Polonium-210 eine kurze Halbwertszeit von rund 138 Tagen hat, kann das eingesetzte Material aber nicht vor allzu langer Zeit hergestellt worden sein. Zwischen Herstellung und Anwendung dürfte maximal ein Jahr gelegen haben, so Paretzke. Wer immer den Stoff beschafft habe, müsse also Zugang zu «frischem» Polonium gehabt haben. Woher dieses stammen könnte, ist zurzeit unklar.

#### Spekulation über zusätzliche Faktoren

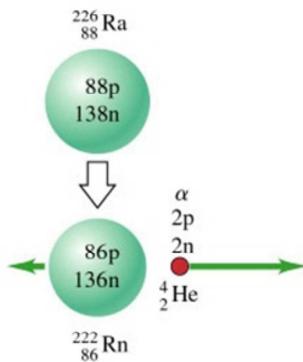
Paretzke vermutet zudem, dass noch ein weiterer Stoff an der Strahlenkrankheit beteiligt gewesen sein könnte, etwa das radioaktive Blei-210. Dieses kann wegen seiner langen Halbwertszeit gut aufbewahrt werden und ist leichter zu beschaffen; es zerfällt zu Polonium-210. Die gefundenen Polonium-Spuren könnten also auch auf eine Vergiftung mit Blei hinweisen. Paretzke schliesst auch eine zusätzliche externe Belastung mit Gammastrahlen nicht aus. Auch diese Hypothesen lassen sich bei der Obduktion nun prüfen.

#### NZZ ONLINE

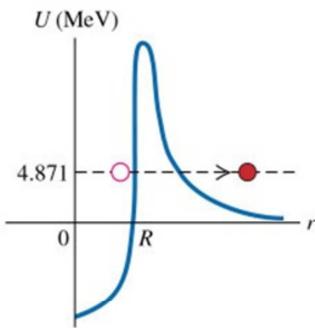
Dossier •Der Islam und Europa•  
Muslimischer Alltag und islamistische  
Tendenzen im europäischen Umfeld.  
[www.nzz.ch/islam\\_europa](http://www.nzz.ch/islam_europa)

## Alpha Zerfall

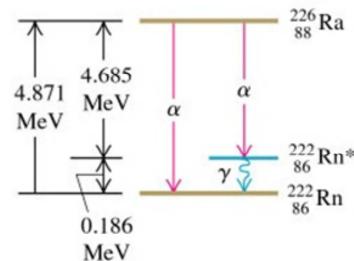
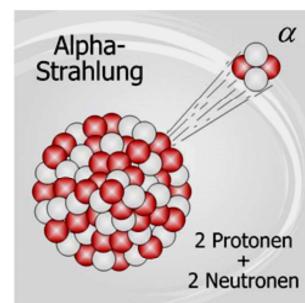
Nahezu 90% der bekannten Nuklide sind radioaktiv und zerfallen nach einer gewissen Zeit in neue Nuklide. Beim Zerfall emittieren sie *Alpha* ( $\alpha$ ) oder *Beta* ( $\beta$ ) Teilchen oder *Gamma* ( $\gamma$ ) Strahlung. Das *Alpha* Teilchen ist ein  ${}^4_2\text{He}$  Kern (mit Spin 0).



${}^{226}_{88}\text{Ra}$  zerfällt in  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  unter Emission eines Alpha Teilchens.



Zerfallsmodell: Das *Alpha* Teilchen befindet sich im Potentialtopf des Kerns. Spontan tunnelt das Teilchen durch die Barriere.



Energie Schema: Direkter Zerfall in den Grundzustand, oder indirekter mit nachträglicher Emission eines Photons ( $\gamma$ )

**16.** Erklären Sie mit eigenen Worten die vorangehende Figur, insbesondere das Tunneln, das Energie Schema und das Symbol  $^{222}_{86}\text{Rn}^*$  (den Stern !).

**17.** Die beiden neutralen Atome  $^{226}_{88}\text{Ra}$  und  $^{222}_{86}\text{Rn}$  haben Ruhemassen von 226.025 403 u und 222.017 571 u. Die kinetische Energie des Alpha Teilchens wird in Experimenten mit 4.87 MeV gemessen. Zeigen Sie, dass die Energiebilanz stimmt und bestimmen sie die Geschwindigkeit des austretenden Alpha Teilchens. Wie viele Prozent der Lichtgeschwindigkeit macht die Alpha Geschwindigkeit aus? ® 4.871 MeV #)

**18.** Bestimmen Sie mithilfe der Masse - Energie Äquivalenz die Bindungsenergie des Elektrons in einem Wasserstoffatom.

$$\textcircled{R} \Delta m = 1.46515 \times 10^{-8} \text{ u} \quad || \quad 13.65 \text{ eV}$$

**19.** Weshalb hat  $^{12}\text{C}$  eine Masse von genau 12 u ? (Siehe S10 und S14)

**20.** Uran kann leicht oxidieren. Deshalb findet man auf der Erde Uran nicht in reiner Form, sondern als Uranerz  $\text{UO}_2$ . Die Oxidation  $\text{U} + \text{O}_2 \rightarrow \text{UO}_2$  setzt 4500 J/g<sub>Uran</sub> frei. Bestimmen Sie die Oxidationsenergie pro Uran Atom. Welche Masse wird dabei freigesetzt ?

$$\textcircled{R} 11.1 \text{ eV} ; \quad 5 \times 10^{-11} \text{ g pro g Uran}$$

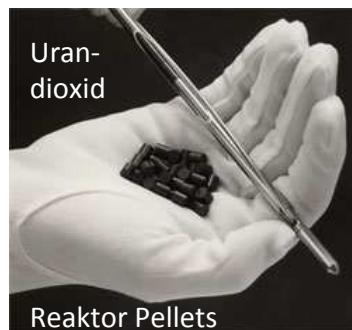
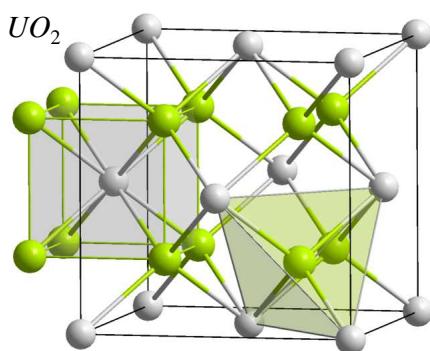
Teilchen / Element	Atomare Masse (u)
$e^- (-1.60218 \times 10^{-19} \text{ C})$	$5.485\,799\,095(2) \times 10^{-4}$
$p^+ (+1.60218 \times 10^{-19} \text{ C})$	1.007 276 466 812(90)
n	1.008 664 916 00(43)
alpha $\alpha$	4.001 506 179 125(62)
$^1\text{H}$	1.007 825 032 07(10)
$^2\text{D}$	2.013 553 212 712(77)
$^4\text{He}$	4.002 603 254 15(6)
$^{12}\text{C}$	12.000 000 0
$^{238}\text{U}$	238.050 788 2(20)

[www.nndc.bnl.gov/masses/mass.mas03](http://www.nndc.bnl.gov/masses/mass.mas03)

#) Die frei werdende Energie beim Zerfall muss auf das Radon und das Alpha Teilchen aufgeteilt werden. Es müssen aber auch die beiden "überzähligen" Elektronen berücksichtigt werden, mindestens deren Ruheenergie von  $E_{2e} = 2 \times (5.486 \times 10^{-4} \text{ u}) \times 931.5 \text{ MeV/u} = 1.022 \text{ MeV}$  !

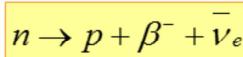
Also: Entweder rechnet man mit dem Zerfall:  $\text{Ra} \rightarrow \text{Rn} + \alpha + 2e^-$  oder, wegen der vergleichsweise geringen Bindungsenergie der Elektronen an den Heliumkern mit:  $\text{Ra} \rightarrow \text{Rn} + \text{He}$

Bei einem solchen Zerfall gilt immer auch die Impulserhaltung (Keine äusseren Kräfte!). Daraus ergibt sich eine sehr ungleiche Energieverteilung. Das viel leichtere Alpha Teilchen bekommt fast die gesamte freiwerdende Zerfallsenergie, welche es in Form kinetischer Energie davon trägt.



## Beta Zerfall

Erstaunlicherweise kann ein Kern auch Elektronen aussenden. Diese *Beta minus* Teilchen ( $\beta^-$ ) stammen von der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton unter Aussendung eines Antineutrinos.



Dieser Prozess ist ein Beispiel der **schwachen Wechselwirkung!**

Das Antineutrino ist das **Antiteilchen** des Neutrinos  $\nu$  (griechisches "nū"). Beide Neutrino-varianten haben keine Ladung und sehr, sehr kleine Masse ( $? m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV}$ ). Sie sind deshalb äusserst schwer zu beobachten. Ihr direkter Nachweis gelang Cowan und Reines erst 1953.

**21.** Der Neutronenzerfall oben kann im Kern, aber auch ausserhalb des Kerns auftreten. Wie steht es mit der Energie-, Impuls-, und Ladungsbilanz vor und nach dem Zerfall? Wie sehen die entsprechenden Bilanzen für folgende Reaktionen aus:  $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu_e$ ,  $p + \beta^- \rightarrow n + \nu_e$

**22.** Das Nuklid  $^{60}_{27}\text{Co}$  ist unstabil und wird für medizinische Zwecke verwendet. Zeigen Sie, dass ein Beta minus Zerfall möglich ist. Dazu sind folgende Massen zu betrachten:

$^{60}_{27}\text{Co}$ : 59.933 822 u	$\circledR \Delta E = 4.53 \times 10^{-13} \text{ J} = 2.83 \text{ MeV}$ . Dieser Energieüberschuss wird in Form kinetischer Energie auf das $\beta^-$ und $\bar{\nu}_e$ aufgeteilt.
$^{60}_{28}\text{Ni}$ : 59.930 791 u	

Zu 21.

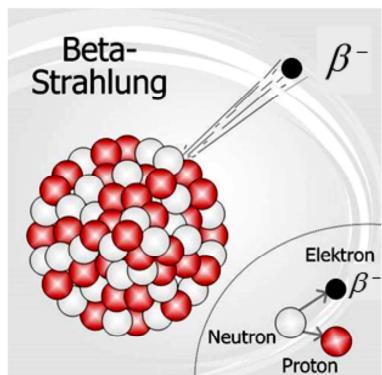
Zu zeigen: Ladungserhaltung, Energieerhaltung, Impulserhaltung, ... . Der Protonenzerfall ausserhalb des Kerns ist energetisch nicht möglich.

**23.** Kommt die Umwandlung von  $^{57}\text{Co}$  (56.936 296 u) zu  $^{57}\text{Fe}$  (56.935 399 u) durch  $\beta^+$  Emission in Frage? Dazu müssen zwei Elektronenmassen  $^{57}\text{Co}$  verlassen.

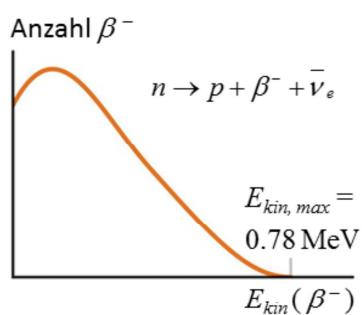
### Antimaterie im Alltag:

Das Positron  $\beta^+$  ist das Antiteilchen des Elektrons  $\beta^-$ . Antimaterie unterscheidet sich von Materie nur durch gegenteiliges Vorzeichen der Teilchen-Ladung. Positronen entstehen nicht nur während eines radioaktiven Zerfalls oder am CERN in Genf. Blitze erzeugen ebenfalls Positronen. Positronen aus einem Gewitter über Sambia wurden erstmals am 14. Dezember 2009 mithilfe des NASA-Satelliten "Fermi" über Ägypten nachgewiesen (NZZ vom 19.1.2011). Die Positron Erzeugung funktioniert etwa folgendermassen: Die Luft in einem Blitz wird ionisiert. Die freien Elektronen werden in den grossen elektrischen Feldern des Blitzes beschleunigt. Die schnellen Elektronen stoßen mit Luftmolekülen zusammen und erzeugen so Gammastrahlung. Einzelne Gammaquanten haben genügend Energie für die Paarbildung  $\beta^+$  und  $\beta^-$  (Vergleiche mit der gegenteiligen Reaktion, der Paarvernichtung, unten, Aufgabe 64).

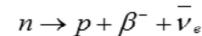
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html)



Wolfgang Pauli, 1900 - 1958, veröffentlichte 1918 eine Arbeit zur allgemeinen Relativitätstheorie. Erst danach begann er das Physikstudium und promovierte bereits 1921 mit "summa cum laude". 1930 postulierte er das Neutrino. 1945 erhielt er den Nobelpreis für die Formulierung, respektive Entdeckung des nach ihm benannten Ausschliessungsprinzips.

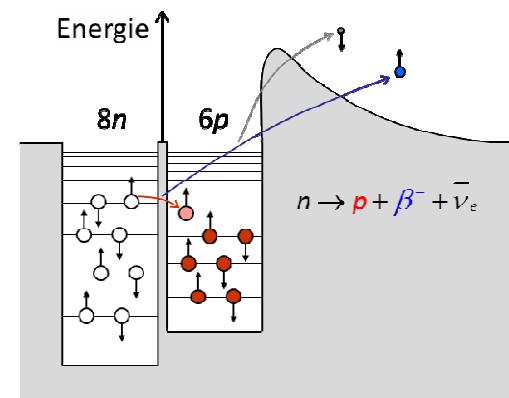


Die Messung links zeigt die Häufigkeit der Elektronen ( $\beta^-$ ) mit einer bestimmten kinetischen Energie nach dem Zerfall eines Neutrons ( $n$ ). Würde das Neutron nur in ein Elektron und ein Proton zerfallen gemäss  $n \rightarrow p + \beta^-$ , wäre die kinetische Energie des Elektrons immer  $E_{kin,max} = 0.78$  MeV. ( $p$  nimmt praktisch keine kinetische Energie auf! Warum?) Aufgrund dieser experimentellen Tatsache schloss Pauli auf ein "unsichtbares" Teilchen und die wahre Reaktion

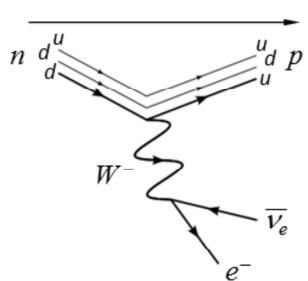


Max Born 1921 über seinen Assistenten Pauli: "Er ist ausserordentlich klug und kann sehr viel, einen so guten Assistenten werde ich nie mehr kriegen." Max Born war selber ein brillanter Kopf. Er erhielt den Nobelpreis 1954, neun Jahre nach seinem ehemaligen Assistenten Pauli.

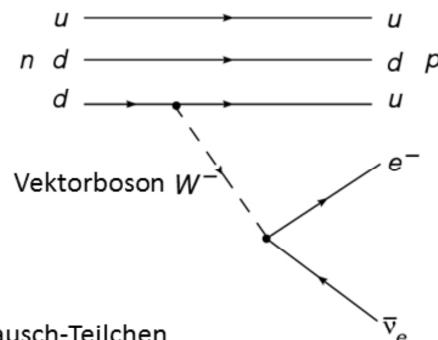
Die kinetische Energie des Elektrons beim Zerfall  $n \rightarrow p + \beta^-$  wäre  $E_{kin} = 0.783$  MeV. Warum? Das ist auch die maximale kinetische Energie des Elektrons, die man bei Zerfall beobachtet (Zerfall ausserhalb eines Kerns). Daraus kann man weiter schliessen, dass das Neutrino keine Ruhemasse hat. Inzwischen gibt es experimentelle Hinweise, dass die Neutrino-Ruhemasse extrem klein ist, aber nicht null. Es gibt drei Arten von Neutrinos: das Elektron-Neutrino, das Müon-Neutrino und das Tau-Neutrino (plus deren Antineutrinos).



## Beta Zerfall - schwache Wechselwirkung



Ein Neutron besteht aus einem Up- und zwei Down-Quarks, das Proton aus zwei Up- und einem Down-Quark.



4 fundamentale Kräfte und Austausch-Teilchen

Wechselwirkung	Austausch-Teilchen				relative Stärke	Reichweite
		Masse	Ladung	Spin		
starke	Gluon	0	0	1	1	1 fm
elektromagnetische	Photon	0	0	1	$1/137$	$1/r^2 \quad \infty$
schwache	$W^\pm$ und $Z$	$80.4, 91.2 \text{ GeV}/c^2$	$\pm e, 0$		$10^{-9}$	0.001 fm
Gravitation	Graviton (?)	0	0	2	$10^{-38}$	$1/r^2 \quad \infty$

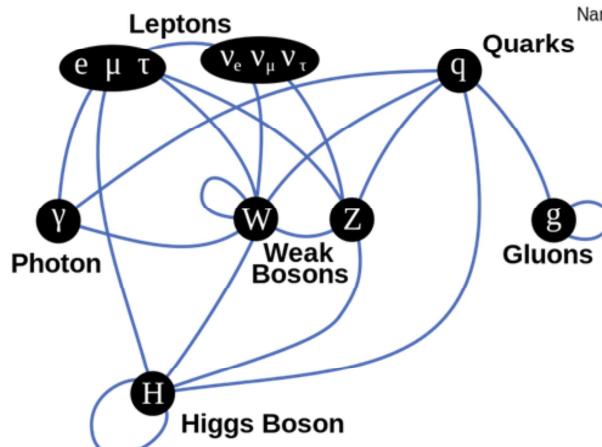
24. Aus der Tabelle oben entnehmen wir ein Stärkeverhältnis der elektrischen zur Gravitationskraft von  $10^{36} : 1$ . Vergleichen Sie dieses mit dem Verhältnis der Coulombkraft zur Gravitationskraft eines Elektrons in einem Wasserstoffatom (einfaches Bohrmodell).

$|q_e| = q_p = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ,  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  ®  $2.3 \times 10^{39}$

Das Verhältnis der elektrischen zur Gravitationskraft zwischen zwei Protonen ist genau  $10^{36}$ . Protonen können alle vier Kräfte erfahren.

# Grundbausteine der Materie und Kräfte

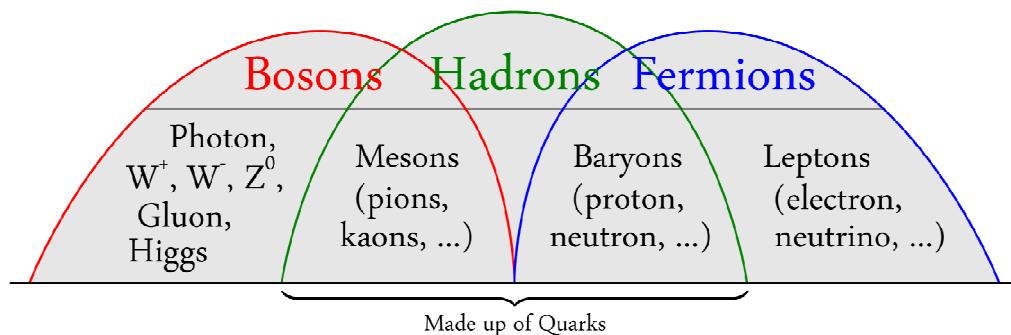
Zoologie der Elementarteilchen. Diese Teilchen sind inzwischen alle experimentell nachgewiesen. Als letztes wurde das schwerste, das Top-Quark 1995 am Fermilab entdeckt.



Drei Generationen der Materie (Fermionen)			
I	II	III	
Masse → 2,4 MeV Ladung → $\frac{2}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Name → u up	1,27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 Y Photon
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon
<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ $V_e$ Elektron-Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $V_\mu$ Myon-Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $V_\tau$ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z <sup>0</sup> Z Boson
0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ $\mu$ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ $\tau$ Tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 W <sup>+</sup> W Boson
Leptonen			
Eichbosonen			

Beachte: Ein Proton (938 MeV) setzt sich aus den drei Quarks uud zusammen (siehe unten), deren Einzelmassen sich zu 9.6 MeV addieren. Die Bindungsenergie = Massendefizit Gleichung ist hier nicht mehr erkennbar. In der starken Wechselwirkung muss die Energie im Gluonen-Feld berücksichtigt werden. Die *Quanten-Chromodynamik* trägt dem Rechnung und ist die moderne Theorie der starken Wechselwirkung.

QUARKS	LEPTONS	GAUGE BOSONS
mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $\frac{2}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ u up	$V_e$ electron neutrino	$\gamma$ photon
mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $\frac{2}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ c charm	$V_\mu$ muon neutrino	$Z$ Z boson
mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $\frac{2}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ t top	$V_\tau$ tau neutrino	$W$ W boson
mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-\frac{1}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ d down	e electron	g gluon
mass → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-\frac{1}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ s strange	$\mu$ muon	
mass → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-\frac{1}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ b bottom	$\tau$ tau	
mass → $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $\frac{1}{2}$ e electron	$\nu_e$ electron neutrino	
mass → $\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $\frac{1}{2}$ $\mu$ muon	$\nu_\mu$ muon neutrino	
mass → $\approx 1,777 \text{ GeV}/c^2$ charge → -1 spin → $\frac{1}{2}$ $\tau$ tau	$\nu_\tau$ tau neutrino	
mass → $\approx 91.2 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 1 Z <sup>0</sup> Z boson		
mass → $\approx 80.4 \text{ GeV}/c^2$ charge → $\pm 1$ spin → 1 W <sup>+</sup> W boson		
		Higgs boson



# Standard Model of

# FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

## FERMIIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

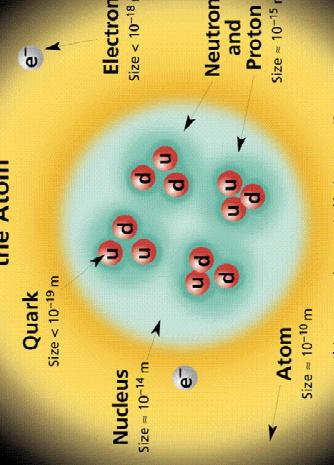
Leptons spin = 1/2				
	Quarks spin = 1/2			
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron	<1×10 <sup>-8</sup>	0	u up	0.003 2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006 -1/3
$\nu_\mu$ muon	<0.0002	0	c charm	1.3 2/3
$\mu$ muon	0.106	-1	s strange	0.1 -1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0	t top	175 2/3
$\tau$ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3 -1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is  $\hbar = h/2\pi = 1.05 \times 10^{-34}$  J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV) the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$ ), where 1 GeV =  $1.60 \times 10^{-10}$  joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c<sup>2</sup> =  $1.67 \times 10^{-27}$  kg.

## Structure within the Atom



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and gluons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property	Interaction		Gravitational		Weak (Electroweak)		Electromagnetic		Fundamental		Strong Residual	
	Acts on:	Mass - Energy	Flavor	Electrically charged	Color Charge	Quarks, Gluons	Gluons	Not applicable to Quarks	Hadrons	See Note	Strong Interaction Note	
Particles experiencing:	All	Gravitation (not yet observed)							Mesons			
Particles mediating:			W+ W- Z <sup>0</sup>	$\gamma$								
Strength relative to electron:	10 <sup>-18</sup> m	10 <sup>-41</sup>	0.8	1	25	60	Not applicable to hadrons					
for two u quarks at:	3×10 <sup>-17</sup> m	10 <sup>-41</sup>	10 <sup>-4</sup>	1								
for two protons in nucleus:	10 <sup>-36</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>	1								

## Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.

There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
P	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{P}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	uds	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	sss	-1	1.672	3/2

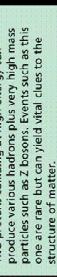
Matter and Antimatter  
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particles and antiparticles have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$ , but not  $\eta_s = ss$ ) are their own antiparticles.

## Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$   
 $e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$   
 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$   
 $e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$

An neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual photon (mediating). An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce  $g\gamma$  and  $\bar{g}\gamma$  via a virtual  $Z^0$  boson or a virtual photon.



Two protons colliding at high energy can produce various hadrons like very high mass particles such as  $Z$  bosons. Events such as these are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

Visit the award-winning web feature [The Particle Adventure at <http://ParticleAdventure.org>](http://ParticleAdventure.org)

This chart has been made possible by the generous support of:  
BURLI INDUSTRIES, INC.  
©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a nonprofit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP MS 30-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720. For information on charts, test materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

# Feynman Diagramme

Flavours	Ladung in $e^+$	Generationen		
		I.	II.	III.
6 Quarks	+2/3	up (u)	charm (c)	top (t)
	-1/3	down (d)	strange (s)	bottom (b)
6 Leptonen	0	Elektron Neutrino ( $\nu_e$ )	Müon Neutrino ( $\nu_\mu$ )	Tau Neutrino ( $\nu_\tau$ )
	-1	Elektron ( $e^-$ )	Müon ( $\mu^-$ )	Tau ( $\tau^-$ )



Feynman's  
Los Alamos  
Badge Foto

Richard Phillips Feynman, 1918 - 1988, war eine der schillerndsten Persönlichkeiten der Physik des 20.JH. Wie andere herausragende Köpfe seiner Zeit wurde er ins Manhattenprojekt nach Los Alamos abkommandiert. Feynman erhielt 1965, zusammen mit Tomonaga und Schwinger den Nobelpreis für Physik.

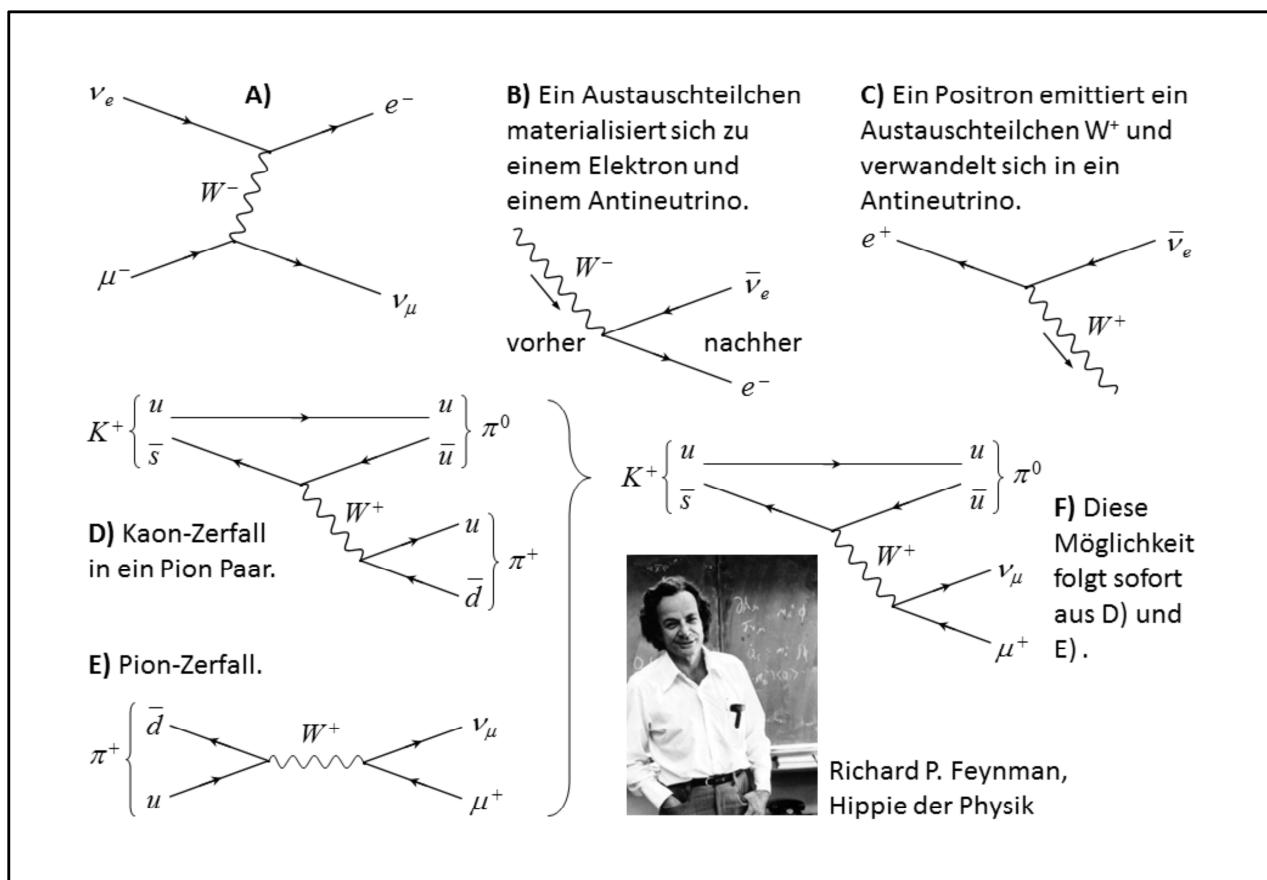
Ein paar Teilchen		Struktur	Ladung	Masse (MeV)
einige Baryonen (3 Quarks)	Proton (p)	uud		938.272
	Neutron (n)	udd		939.565
	Lambda ( $\Lambda$ )	uds		1116
einige Mesonen (2 Quarks)	pi-Null ( $\pi^0$ )	u $\bar{u}$ oder d $\bar{d}$		134.976
	pi-Plus ( $\pi^+$ )	u $\bar{d}$		139.570
	K-Minus ( $K^-$ )	s $\bar{u}$		494

Die 6 Quarks und 6 Leptonen werden statt Elementarteilchen oft "flavours" genannt.

Richard Feynman erfand um 1950 die nach ihm benannten Diagramme. Feynman entwickelte damals eine mathematische Theorie zur Wechselwirkung von Photonen mit anderen Teilchen. Seine Theorie wird heute Quantenelektrodynamik genannt. Die Diagramme benutzte er zur Veranschaulichung einzelner mathematischer Aspekte der Wechselwirkung.

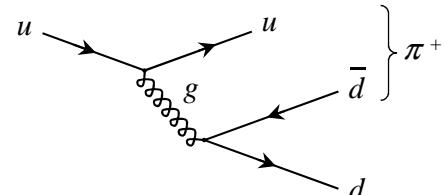
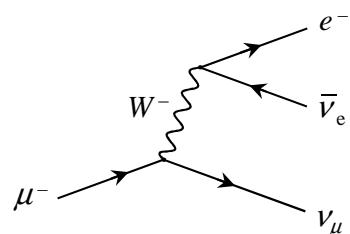
Die Diagramme werden nach folgenden Regeln konstruiert:

1. Feynman Diagramme bestehen aus Vertices (Knoten). Zu jedem Vertex führt ein Teilchenpfeil hin, ein anderer weg. Das Hin und Weg stellt einen Übergang innerhalb einer Leptonengeneration dar, oder einen Übergang innerhalb einer oder benachbarten Quarkgeneration. Die Pfeile werden in die Linie hinein gezeichnet.
2. Teilchen werden als gerade Linien gezeichnet. Die Austauschteilchen wie Photonen, W und Z Bosonen werden als gewellte Linien dargestellt. Diese gleiche Darstellung deutet darauf hin, dass die Theorien der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung vereinheitlicht wurden. Manchmal wird das W und Z trotzdem noch als gestrichelte, gerade Linie dargestellt. Das Gluon wird als Spirale gezeichnet.
3. Die Zeit läuft von links nach rechts (In einigen Büchern von unten nach oben). Pfeile in Zeitrichtung stellen Teilchen dar, Pfeile gegen die Zeitrichtung, also von rechts nach links, stellen Antiteilchen dar, die aber in der Zeit auch vorwärts laufen.
4. Die Teilchen werden am Anfang der Linien, sowohl links (vorher) wie auch rechts (nachher) gekennzeichnet.
5. Austauschteilchen verknüpfen Vertices. Die Zeitrichtung der Austauschteilchen ist durch die Orientierung der Linie gegeben. Sie werden neben der Linie beschriftet.



Mithilfe von A) kann man sofort

**G)** konstruieren:



**H)** Pion-Erzeugung in einer Proton-Proton Kollision. Ein Gluon löst sich von einem Quark und materialisiert in ein Quark-Antiquark Paar.

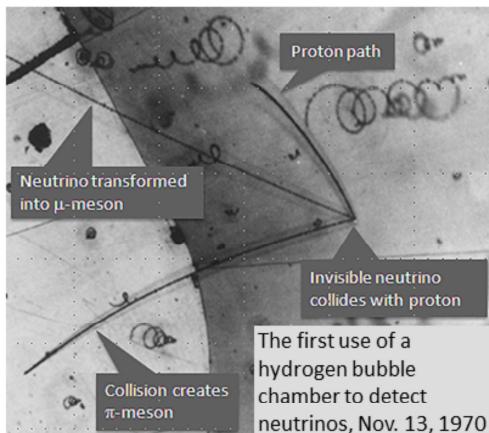


Feynman forschte und lehrte am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena zur gleichen Zeit wie sein Kollege und spätere Nobelpreisträger Murray Gell-Mann. Gell-Mann war kein geschickter Selbstdarsteller und blieb immer im Schatten von Feynman.

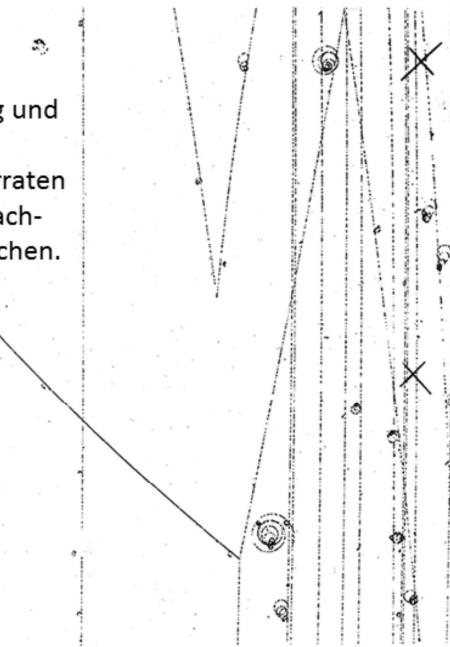
Hard as he tried, Murray Gell-Mann could never make himself into a legend like his rakish colleague and collaborator, Richard Feynman -- even if he was probably the greater physicist

by George Johnson, <http://www.theatlantic.com/past/docs/issues/2000/07/johnson2.htm>

# Neutrino Beobachtung



Krümmung und Länge der Spuren verraten die verursachenden Teilchen.



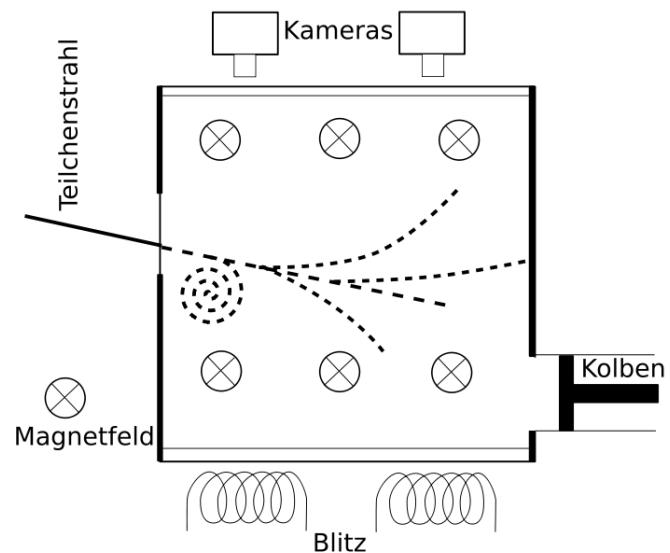
Das Neutrino ist äusserst schwierig zu entdecken. Oben der erste Neutrino-Nachweis, wie er in einer Blasenkammer gelang: Ein Neutrino trifft auf ein Proton in einem Wasserstoffatom. Das Neutrino selbst hinterlässt kein Spur in der Kammer, aber die aus dem Zusammenstoß entstehenden Teilchen.

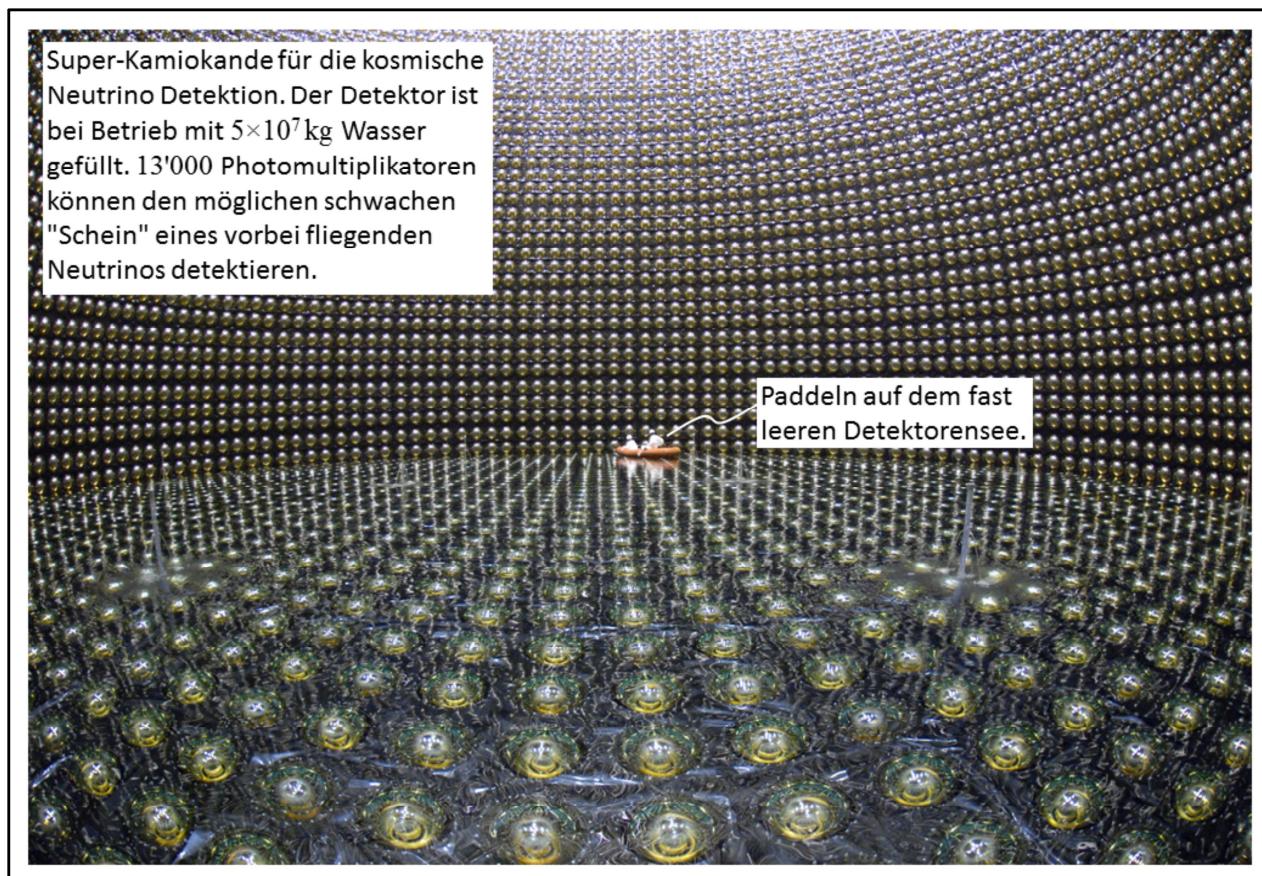
Die Blasenkammer ist mit einem flüssigen Neon-Wasserstoff 2:1-Gemisch gefüllt. Kurz bevor der Teilchenstrahl vom Beschleuniger eintrifft, wird der Druck in der Kammer von 5 auf 2 atm erniedrigt. Die Flüssigkeit ist nun überhitzt und wartet nur darauf zu verdampfen. Die vorbei ziehenden Teilchen ionisieren einzelne Atome in der Kammer. Die Ionen dienen als Siedekerne, die übersättigte Flüssigkeit bildet lokal Dampfblasen. Die vorbei fliegenden Teilchen legen eine 1 mm breite Dampfspur, welche man fotografieren kann. Der ganze Vorgang dauert etwa eine Zehntelsekunde, aber die Wiederholrate beträgt Sekunden oder Minuten. Diese Technik wurde von Donald Arthur Glaser entwickelt, wofür er 1960 den Nobelpreis für Physik erhielt.

[http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble\\_chambers/BCwebsite/index.htm](http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm)



D.A. Glaser





Nobelpreis Physik, 2015

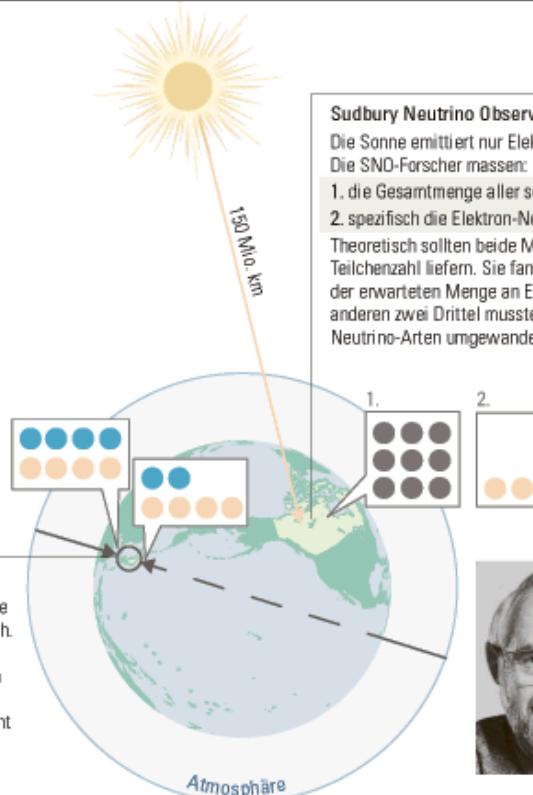
#### Identitätswechsel in der Teilchenwelt

##### Die drei «Flavors» der Neutrinos



**Takaaki Kajita**  
geb. 1959  
in Higashimatsuyama  
Japan  
  
University of Tokyo  
Kashiwa, Japan

**Super-Kamiokande, Japan**  
Neutrinos entstehen unter anderem in der Atmosphäre und bewegen sich ungehindert durch die Erde hindurch. Während sich die Menge der Elektron-Neutrinos bei der Reise durch den Planeten nicht veränderte, schien von den Myon-Neutrinos dabei die Hälfte verloren zu gehen. Ein Hinweis, dass sich einige Myon- in die nicht nachweisbaren Tau-Neutrinos umgewandelt.



##### Sudbury Neutrino Observatory (SNO), Kanada

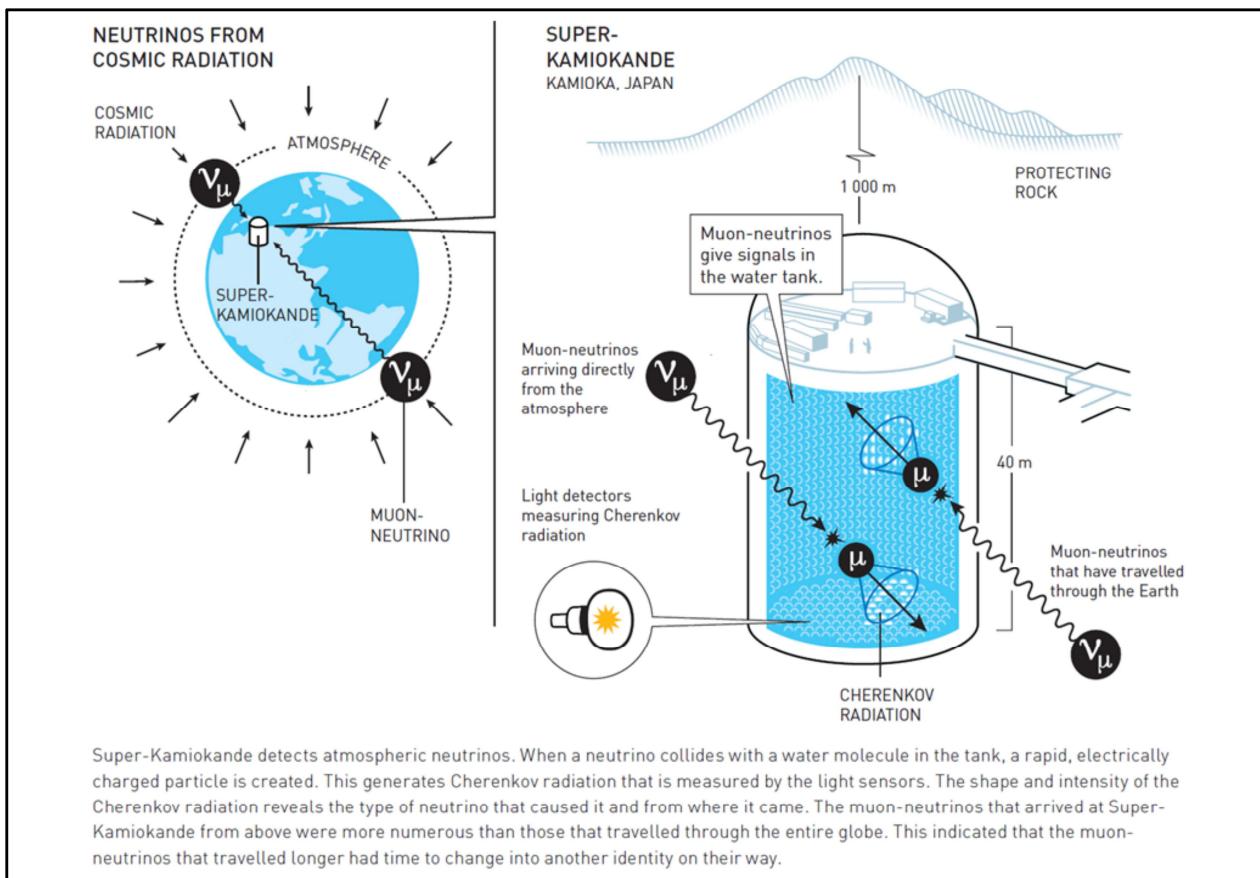
Die Sonne emittiert nur Elektron-Neutrinos.  
Die SNO-Forscher messen:

1. die Gesamtmenge aller solaren Neutrinos
2. spezifisch die Elektron-Neutrinos

Theoretisch sollten beide Messungen die gleiche Teilchenzahl liefern. Sie fanden aber nur ein Drittel der erwarteten Menge an Elektron-Neutrinos. Die anderen zwei Drittel mussten sich also in andere Neutrino-Arten umgewandelt haben.

**Arthur B. McDonald**  
geb. 1943  
in Sydney  
Kanada  
  
Queen's University,  
Kingston, Kanada

OBSERVATORIEN	KONSTRUKTION
<b>SUPER-KAMIOKANDE</b> Ort: nördlich von Nagoya (Japan) Detektorvolumen: 50 000 Kubikmeter Betriebsbeginn: 1996 Winkelauflösung: 26 Grad Energiebereich: $10^8 - 10^{12}$ eV	Fotodetektoren säumen einen riesigen Wassertank in einer Zinkmine. Physiker möchten durch 20-fache Erweiterung den Hyper-Kamiokande schaffen.
<b>PIERRE-AUGER-OBSERVATORIUM</b> Ort: südlich von Mendoza (Argentinien) Detektorvolumen: 30 000 km <sup>3</sup> (Teleskopgröße), 20 000 m <sup>3</sup> (Boden detektoren) Betriebsbeginn: 2004 Winkelauflösung: 0,5 – 2 Grad Energiebereich: $10^{17} - 10^{21}$ eV	Auger ist vor allem ein Detektor für kosmische Strahlen, entdeckt aber mit einem Feld von 1600 kleinen Wassertanks auch energiereiche Neutrinos. Außerdem halten Ultraviolett-Teleskope nach Teilchenkollisionen in der Atmosphäre Ausschau.
<b>ANTARCTIC IMPULSE TRANSIENT ARRAY (ANITA)</b> Ort: McMurdo-Station (Antarktis) Detektorvolumen: 1 Million km <sup>3</sup> Flugzeiten: 2006 – 2007, 2008 – 2009 Winkelauflösung: 1 – 2 Grad Energiebereich: $10^{17} - 10^{21}$ eV	Ein Ballon schwebt einen Monat lang über der Antarktis, um nach Radiowellen zu suchen, die von energiereichen, mit der Eisddecke kollidierenden Neutrinos stammen.
<b>ASTRONOMY WITH A NEUTRINO TELESCOPE AND ABYSS ENVIRONMENTAL RESEARCH (ANTARES)</b> Ort: Mittelmeer bei Marseille (Frankreich) Detektorvolumen: 0,05 km <sup>3</sup> Betriebsbeginn: 2008 Winkelauflösung: 0,3 Grad Energiebereich: $10^{13} - 10^{16}$ eV	Zwölf am Meeresboden verankerte Fotodetektorstränge suchen nach Kollisionen im Wasser. ANTARES ist eines von drei Pilotprojekten für das KM3NeT, ein für 2011 bis 2015 geplantes kubikkilometergroßes Neutrino teleskop.
<b>ICECUBE</b> Ort: Südpol Detektorvolumen: 1 km <sup>3</sup> geschätzte Fertigstellung: 2011 Winkelauflösung: 1 – 2 Grad Energiebereich: $10^{11} - 10^{21}$ eV	86 lichtempfindliche Detektorstränge und einige Radioantennen werden durch Bohrlöcher ins Eis versenkt und frieren dort fest. IceCube ist die vergrößerte Version des früheren AMANDA-Experiments (Antarctic Muon and Neutrino Detector Array).
<b>EXTREME UNIVERSE SPACE OBSERVATORY (EUSO)</b> Ort: Internationale Raumstation Detektorvolumen: 1 Million km <sup>3</sup> Luft (entspricht 1000 km <sup>3</sup> Eis) geschätzte Fertigstellung: 2015 Winkelauflösung: 1 – 2 Grad Energiebereich: $10^{19} - 10^{21}$ eV	Ein Ultraviolett-Teleskop des Japanese Experiment Module (JEM) wird die Erdatmosphäre nach Spuren geladener Teilchen durchsuchen.



## DIE METAMORPHOSE DER NEUTRINOS

**Im Gegensatz zu anderen Teilchensorten** mutieren Neutrinos, während sie durch den Raum jagen. Die Astronomen müssen diesen Effekt rechnerisch umkehren, um zu rekonstruieren, wie die Teilchen ursprünglich aussahen und wodurch sie entstanden.

### MEHRDEUTIGE IDENTITÄT

Ein Neutrino hat die einzigartige Fähigkeit, zu mutieren, weil es zwei Identitäten besitzt. Es kann drei unterschiedliche Flavors und unabhängig davon dreierlei Massen haben.

Der **FLAVOR** bestimmt, wie das Teilchen mit Materie wechselwirkt.



Die **MASSE** bestimmt, wie das Teilchen sich durch den Raum bewegt.



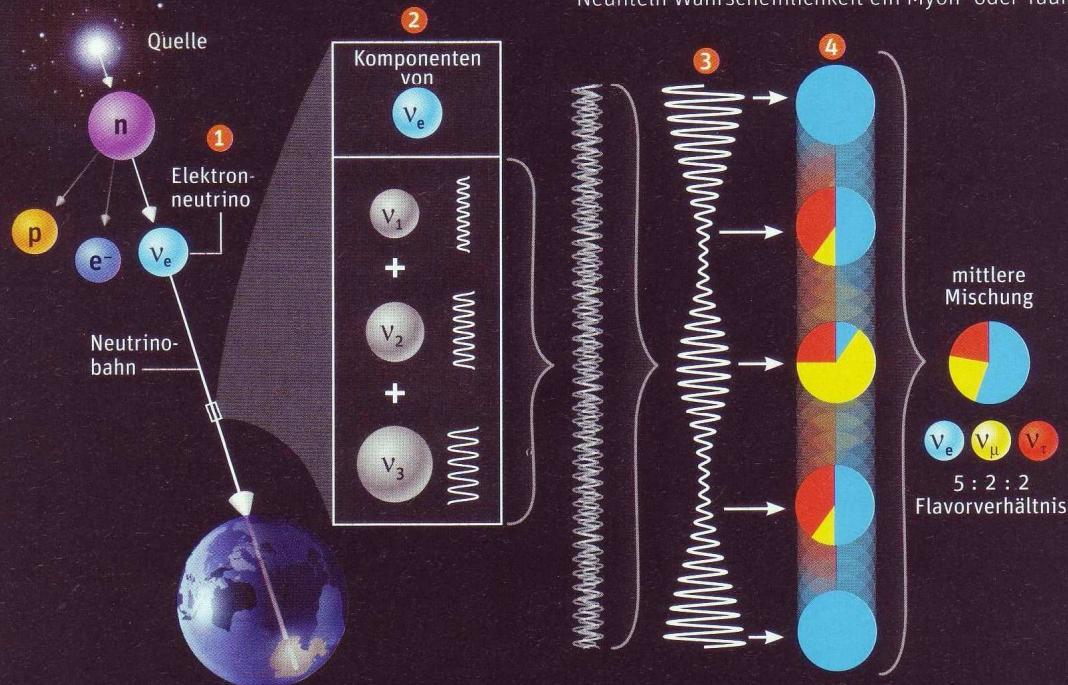
Hingegen hat ein gewöhnliches Objekt eindeutige Eigenschaften. Ein Ball ist entweder ein 600 Gramm schwerer Basketball, ein gut 400 Gramm schwerer Fußball oder ein 60 Gramm schwerer Tennisball. Wenn Bälle sich wie Neutrinos verhielten, müssten Gewicht und Balltyp nicht übereinstimmen, und der Ball könnte im Flug den Typ wechseln.



### FLAVOR-OSZILLATIONEN

Wenn ein Neutrino erzeugt oder nachgewiesen wird, hat es einen bestimmten Flavor. Beispielsweise erzeugt der Betazerfall des Neutrons ein Elektroneneutrino **1**. Dieses Neutrino hat keine bestimmte Masse, sondern ist ein Gemisch aus allen drei Möglichkeiten, dargestellt durch eine Summe aus drei Wellen unter-

schiedlicher Wellenlänge **2**. Während das Neutrino sich fortbewegt, geraten die Wellen aus dem Takt; sie addieren sich nicht mehr zu dem ursprünglichen Flavor, sondern zu einem Gemisch aus allen drei Flavors **3**. Das Gemisch variiert, während das Neutrino unterwegs ist **4**. Hier beträgt die Mischung im Mittel 5:2:2 – das heißt, im Detektor erscheint mit einer Wahrscheinlichkeit von fünf Neunteln ein Elektroneneutrino und mit je zwei Neunteln Wahrscheinlichkeit ein Myon- oder Tauneutrino.

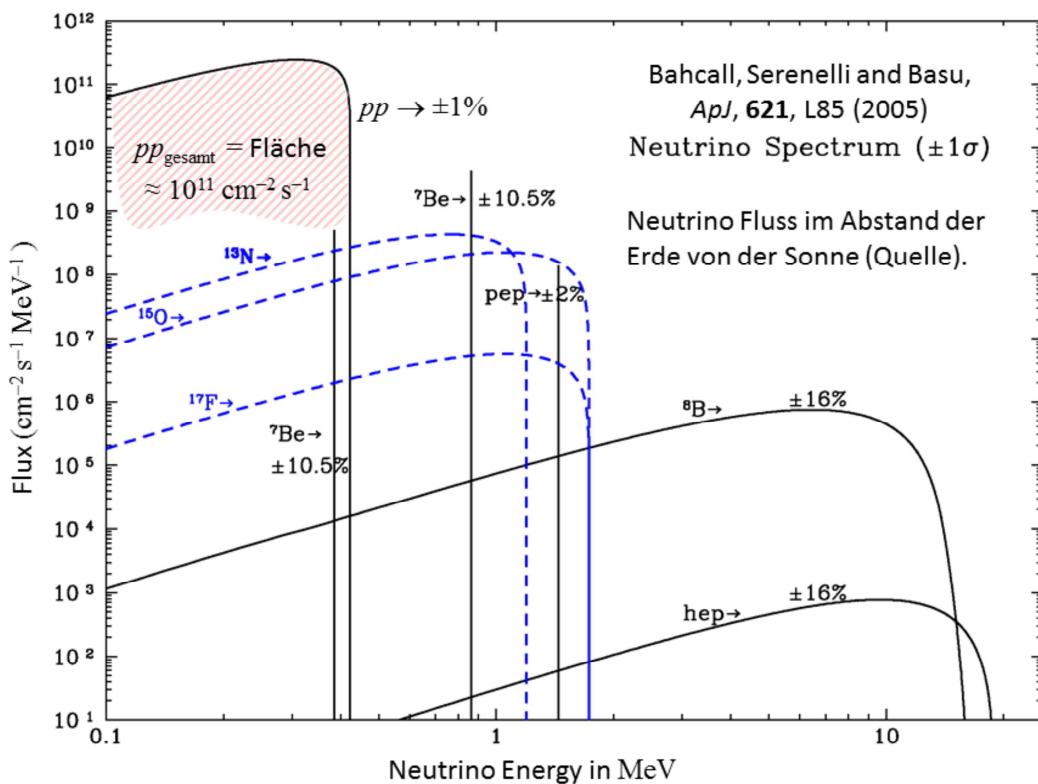


ILLUSTRATIONEN: CHRISTIANSEN, QUELLE UND ERDE (LINKS AUSSEN); GEORGE REISECK

### FLAVORMISCHUNGEN

Astrophysikalische Prozesse erzeugen unterschiedliche Flavormischungen, die sich durch Zurückrechnen der Metamorphose herleiten lassen. Im Detektor tauchen Myon- und Tauneutrinos auf Grund ihrer Symmetrieeigenschaften stets zu gleichen Teilen auf.

QUELLE	MISCHUNG AN DER QUELLE	MISCHUNG AUF DER ERDE
Neutronzerfall	1v <sub>e</sub> : 0v <sub>μ</sub> : 2v <sub>τ</sub>	5v <sub>e</sub> : 2v <sub>μ</sub> : 2v <sub>τ</sub>
Pionzerfall (vollständig)	1:2:0	1:1:1
Pionzerfall (unvollständig)	0:1:0	4:7:7
Zerfall Dunkler Materie (Beispiel)	1:1:2	7:8:8
Raumzeit-Schaum	beliebig	1:1:1
Neutrinozerfall (v <sub>1</sub> am leichtesten)	beliebig	4:1:1
Neutrinozerfall (v <sub>3</sub> am leichtesten)	beliebig	0:1:1



Einige Reaktionen im Innern der Sonne.

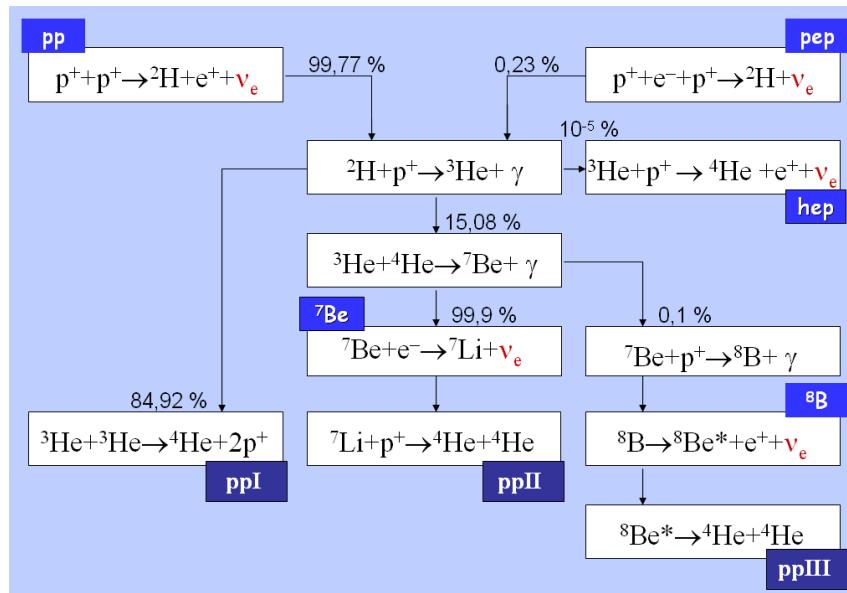
$pp : p + p \rightarrow D + \text{Positron} + \text{Neutrino} + 0.26 \text{ MeV}$

${}^7Be : {}^7Be + \text{Elektron} \rightarrow {}^7Li + \text{Neutrino} + 0.80 \text{ MeV}$

${}^8B : {}^8B \rightarrow {}^8Be + \text{Positron} + \text{Neutrino} + 7.2 \text{ MeV}$

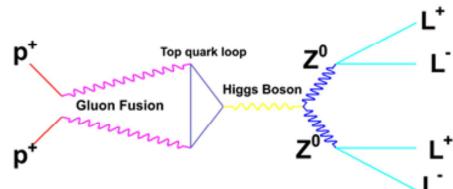
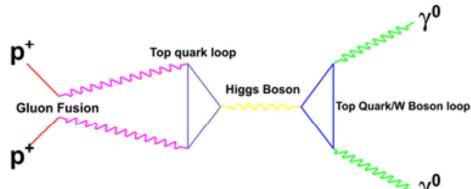
Die dabei entstehenden Neutrinos gelangen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit zur Erde und durchdringen diese fast ohne Wechselwirkung.

Berechnete  $pp$ -Neutrino Produktion gemäss Standard Modell der Sonnen Fusionsreaktion

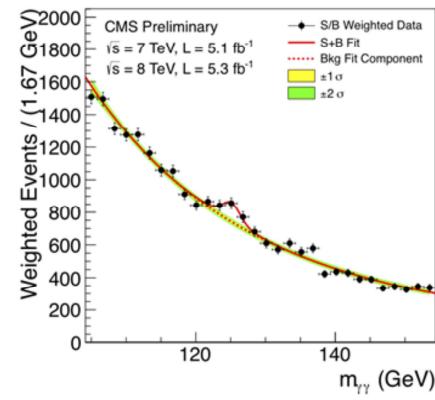
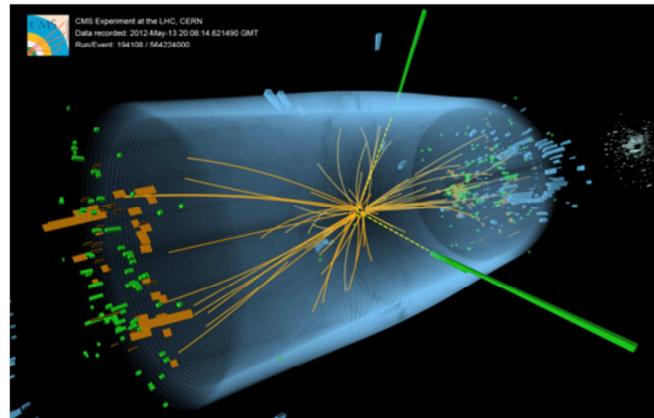


# Das Higgs Boson am LHC

Produktion des Higgs aus der  $pp$  Kollision und anschliessender Zerfall des Higgs, 2 Varianten:



<http://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev>



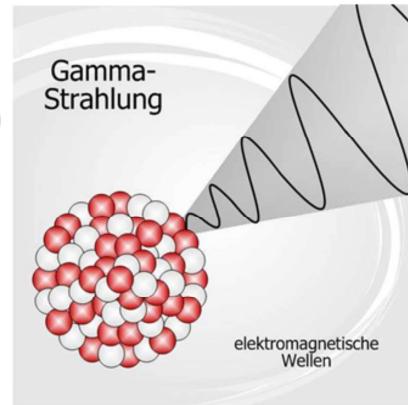
## Gamma Zerfall

Kerne können sich wie die Elektronen im Atom in einem angeregten Zustand befinden. Meist sind sie aber im Grundzustand und werden nur bei heftigem Beschuss oder bei radioaktivem Zerfall in einen angeregten Zustand gehoben. Dieser zerfällt nach kurzer Zeit unter Aussenden eines hochenergetischen Photons ( $\gamma$ ).

**25.** Studieren Sie nochmals den  $^{226}\text{Ra}$  Zerfall auf der Folie "Alpha Zerfall". Welche Energie hat das Photon in der zweiten Zerfallsvariante, welche Frequenz? ( $E_{\text{Photon}} = h \cdot f$ , Plancksche Konstante  $h = 6.6261 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

Achtung: Beim  $\alpha$  und  $\beta$  Zerfall ändert der Wert von  $Z$  und es entsteht ein neues Element. Beim  $\gamma$  Zerfall entsteht kein neues Element. Der Kern fällt nur in einen energetisch tieferen Zustand.

Es gibt viele radioaktive Elemente in der Natur. Jeder Mensch, auch Sie selbst sind leicht radioaktiv, da Sie eine kleine Menge  $^{14}\text{C}$  und  $^{40}\text{K}$  und andere Isotope in sich tragen.



# Elektromagnetisches Spektrum

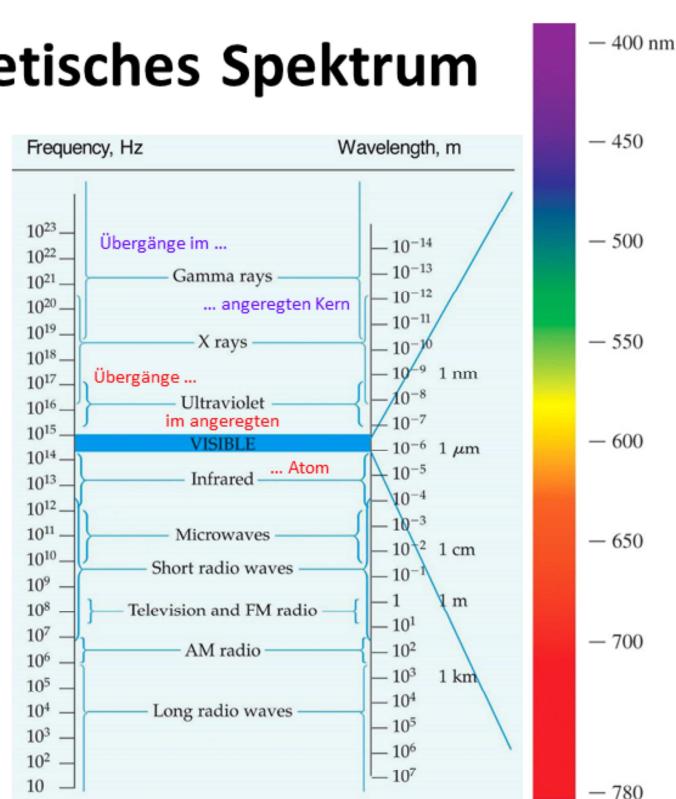
Gamma Strahlung ist nur ein Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums. Sichtbares Licht, Radiowellen, sowie UV-Strahlen sind ebenfalls Teil dieses Spektrums. In der Figur rechts wird zwischen Gamma Strahlung und Röntgenstrahlung unterschieden. Gamma - Photonen sind "härter" als Röntgen - Photonen. Für jede elektromagnetische Welle (Strahlung) gelten folgende Gleichungen:

$$c = f \cdot \lambda \quad c_{Vakuum} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$p_\gamma = \frac{h}{\lambda} \quad h_{Planck} = 6.626\,069 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$E_\gamma = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} = p_\gamma \cdot c$$

$f$ = Frequenz ,  $\lambda$ = Wellenlänge ,  
 $p_\gamma$ = Impuls ,  $E_\gamma$ = Energie des Photons



Jedes Photon, ob von einer Radioantenne, von einem Mikrowellenofen, von einer WLAN Antenne oder von der Sonne überträgt eine bestimmte Energie und einen bestimmten Impuls, entsprechend seiner Frequenz  $f$  ! Auch ohne Masse hat das Photon einen Impuls !

**26. A)** Wie viele Photonen treffen pro Sekunde auf eine Fläche von  $1.0 \text{ m}^2$  bei  $60 \text{ W}$  senkrechter Bestrahlung mit orangem Licht, mit FM - Radiowellen und mit  $1.0 \text{ MeV}$  Gamma Strahlen ?

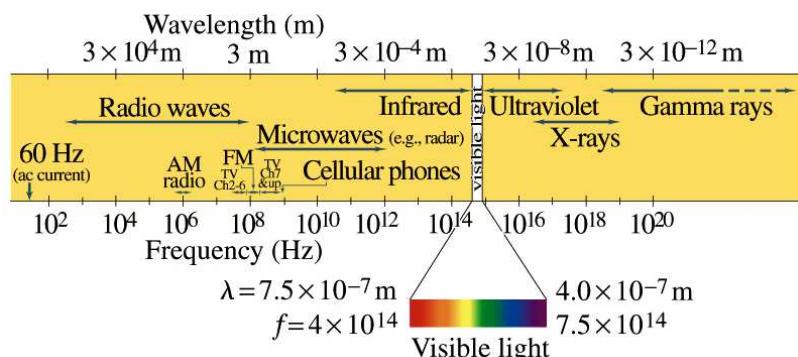
®  $1.8 \times 10^{20}$  orange Photonen ( $600 \text{ nm}$ ,  $500 \text{ THz}$ ,  $E_\gamma = 3.31 \times 10^{-19} \text{ J}$ )

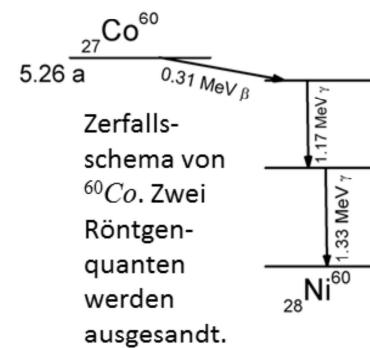
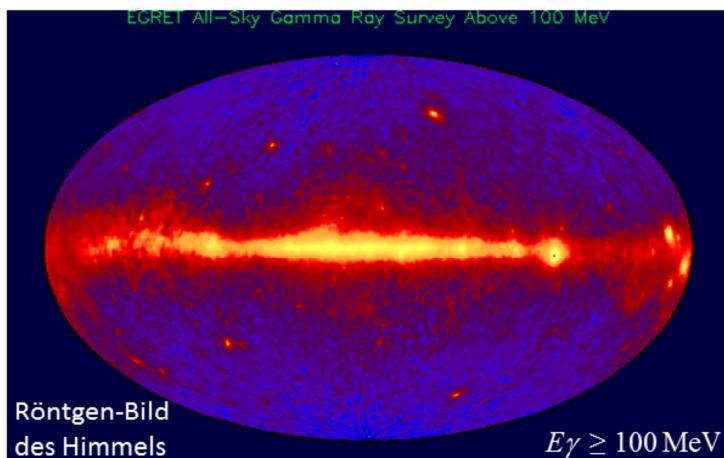
$9.1 \times 10^{26}$  FM Photonen ( $100 \text{ MHz}$ ,  $E_\gamma = 6.63 \times 10^{-26} \text{ J}$ )

$3.7 \times 10^{14}$  Gamma Photonen ( $E_\gamma = 1.0 \text{ MeV} = 1.60 \times 10^{-13} \text{ J}$ )

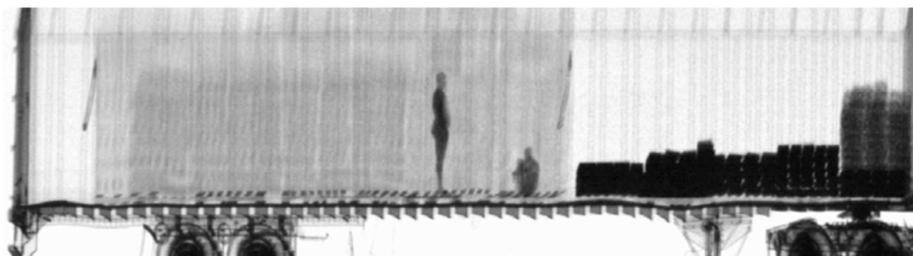
**B)** Welche Photonenenergie und Frequenz würde ein "Photonenzählen" erlauben? Wir fordern dazu eine Zählrate von 1 Photon pro Sekunde und pro  $\text{mm}^2$ . Der Teilchencharakter des Lichts wäre dann leicht beobachtbar, beispielsweise als Blitze auf einem Schirm.

®  $10^6$  Photonen pro Sekunde pro  $\text{m}^2 = 60 \text{ J/s} \rightarrow E_\gamma = 6.0 \times 10^{-5} \text{ J}$ ,  $f = 9 \times 10^{28} \text{ Hz}$  (extrem harte Photonen ! )





Röntgen-aufnahme eines Lastwagens, Quelle:  $^{60}\text{Co}$  oder  $^{137}\text{Cs}$



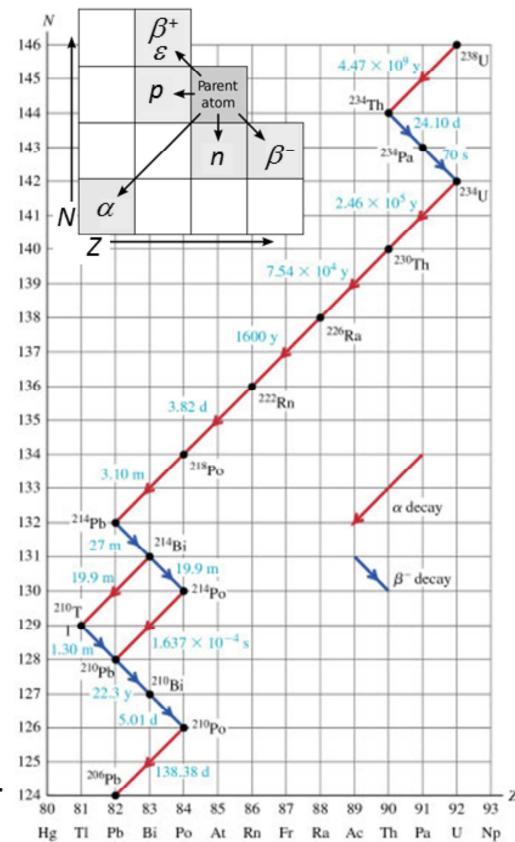
## Zerfalls Serie von $^{238}U$

Kerne können in instabile Tochterkerne zerfallen, welche selber weiter zerfallen. Eine Zerfallsserie endet erst, wenn ein stabiler Endzustand erreicht ist. Das Beispiel rechts zeigt den Zerfall von  $^{238}U$  zum stabilen Element  $^{206}Pb$ .

Erdbeben sind teilweise eine Konsequenz des radioaktiven Zerfalls von  $^{238}U$  im Erdinnern. Die beim Zerfall frei gewordene Energie hilft das Erdinnere im geschmolzenen Zustand zu halten. Die Erdkruste besteht aus so genannten tektonischen Platten. Diese "rutschen" auf der Schmelze, reiben und drücken aneinander. Gelegentlich entlädt sich der Druck und Stress in Form von Erdbeben.

**27.** Studieren Sie die Halbwertszeiten in der Figur. Was bedeuten die Angaben  $y$ ,  $d$ ,  $m$ ,  $s$ ?

**28.** Schreiben Sie den Zerfall von Thorium  $^{234}Th$  aus.



## Halbwertszeit und Aktivität

Der radioaktive Zerfall ist echt zufällig und statistischer Natur. Es ist unmöglich vorauszusagen, wann ein radioaktiver Kern zerfällt. #)

Sei  $N(t)$  eine grosse Anzahl radioaktiver Kerne zur Zeit  $t$ . Im Zeitintervall  $dt$  zerfällt davon die Menge  $dN(t)$ . Die Zerfallsrate  $dN(t)/dt$  heisst **Aktivität** der Probe. Die Aktivität der Probe ist natürlich direkt proportional zur Anzahl radioaktiver Kerne in der Probe:  $-dN/dt = \beta N \rightarrow$

Radioaktives Zerfallsgesetz:  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\beta t}$  = Anzahl verbleibender Kerne

$\beta$  = Zerfallskonstante

$$\text{Halbwertszeit: } T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\beta} = \ln(2) \cdot \tau \quad \text{Zerfallszeit: } \tau = \frac{1}{\beta}$$

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \beta \cdot N = \frac{N}{\tau}$$

Die Aktivität hat die Einheit Zerfälle/Sekunde oder **Becquerel**:  
 $1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall/Sekunde}$ . Eine alte Einheit ist das Curie (Ci):  
 $1 \text{ Ci} = 3.70 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3.70 \times 10^{10} \text{ Zerfälle/Sekunde}$

#) Die echte Zufälligkeit der modernen Physik wollte Einstein nicht akzeptieren. In einem Brief an Max Born, datiert auf den 4. Dezember 1926 schrieb er: *Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der Alte nicht würfelt* ("Gott würfelt nicht").

Zu den häufigsten langlebigen radioaktiven Elementen in der Natur gehören Uran ( $235-U$ ,  $238-U$ ), Thorium ( $232-Th$ ), Kalium ( $40-K$ ) und Rubidium ( $87-Rb$ ).

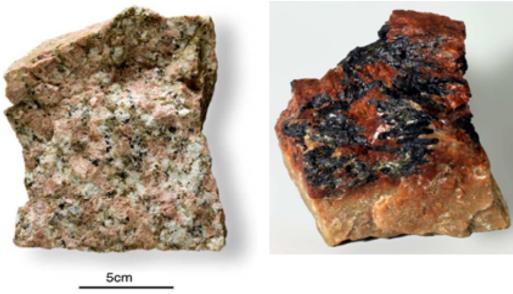
Analog zur Halbwertszeit existieren für Röntgen- und Gammastrahlung **Halbwertsdicken**  $D_{1/2}$ . Innerhalb einer Halbwertsdicke eines gewissen Materials reduziert sich die Intensität der durchdringenden Strahlung auf die Hälfte. Beispiele:

Absorber	100 keV schwache Gamma-Energie	200 keV mittlere Gamma-Energie	500 keV starke Gamma-Energie
Wasser: $D_{1/2} =$	40 mm	50 mm	70 mm
Aluminium, Glas: $D_{1/2} =$	16 mm	21 mm	30 mm
Blei: $D_{1/2} =$	0.1 mm	0.7 mm	4 mm

# Aktivität verschiedener Stoffe

Typische Radioaktivitätsgehalte (Mittelwerte)		
	Natürliche radioaktive Stoffe:	
natürlich	1 m <sup>3</sup> Luft bei uns im Freien	10 Bq
	1 m <sup>3</sup> Luft bei uns in Wohnräumen	60 Bq
	1 m <sup>3</sup> Stollenluft (Radonkurort Gastein)	43'000 Bq
	1 kg Granit vom Grimselpass	3'500 Bq
	1 kg Steinkohle (Sachsen)	10'000 Bq
	1 kg Kalidünger	18'000 Bq
	1 kg Schweizer Heu	1'000 Bq
	1 kg Menschlicher Körper	130 Bq
	1 l Milch	50 Bq
	1 l Meerwasser	10 Bq
	1 l Wasser in Bergseen	1 Bq
künstlich	Künstlich radioaktive Stoffe:	
	1 kg Verbrauchter Brennstoff aus Kernreaktor	5'000'000'000'000'000 Bq
	1 Leuchtanzeige einer modernen Armbanduhr (Tritium)	300'000'000 Bq
	1 Alter Brandmelder	50'000 Bq
	1 Strahlenquelle zur Prüfung von Schweißnähten	20'000'000'000'000 Bq

Ein Becquerel (Bq) bedeutet also, dass ein Atom pro Sekunde zerfällt. Das Becquerel ist eine sehr kleine Einheit. Im menschlichen Körper zerfallen viele tausend Atome pro Sekunde, rund 130 Bq pro kg Körpergewicht. Gewöhnliche **Granite** (unten links) enthalten mehr Radioaktivität als andere Gesteine, etwa 10 Millionen Bq pro Kubikmeter.<sup>§)</sup> Gestein mit schwarzen Uranmineralien (unten rechts) ist noch radioaktiver.<sup>#)</sup>



Viel Aktivität oder eine grosse Anzahl Becquerel ist nicht immer auch gefährlich. Umgekehrt können relativ kleine Mengen gesundheitlichen Schaden anrichten. Die Wirkung auf Lebewesen hängt stark von der Expositionsart (äußere Bestrahlung, Körperaufnahme über Nahrung oder Inhalation), der Strahlenenergie, der Strahlenart, der radioaktiven Atomart, von biologischen Faktoren und der Empfindlichkeit der betroffenen Organe ab. Siehe unten!

<sup>§)</sup> Die Aktivität von Granit erscheint auf den ersten Blick enorm hoch, aber die Strahlung in einem Granittunnel ist nur rund 4-mal grösser als die mittlere Strahlung im Schweizer Mittelland.

<sup>#)</sup> Hochgradiges Uranerz heisst Pechblende

<sup>%)</sup> Bis 1950 wurde hauptsächlich Radium ( $^{226}Ra$ ,  $T_{1/2} = 1600 \text{ y}$ ,  $\alpha$ : 100% ) und Promethium ( $^{147}Pm$ ,  $T_{1/2} = 2.62 \text{ y}$ ,  $\beta^-$ : 100% ) in den Leuchtfarben benutzt. Heute verwendet man für selbstleuchtende Zifferblätter und Zeiger in winzige Glasmehrchen eingeschlossenes, radioaktives Tritium ( $^3H$ ,  $T_{1/2} = 12.32 \text{ y}$ ,  $\beta^-$ : 100% ).

Alte Brandmelder



## Pechblende - ein hochgradiges Uranerz



Die pechschwarze Mineralisation im Schwarzwaldgranit ist fast reines Uranoxid



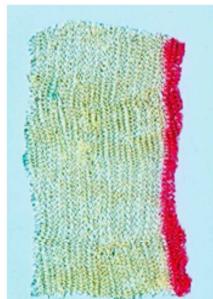
Praktisch reines, hochgradiges Uranerz aus Oklo (Gabun). #)

Bevor das Element Uran entdeckt wurde, hat man beim Kupfer-, Silber- und Bleibergbau im 17. bis ins 19. Jahrhundert die dabei häufig vorkommenden schwarzen Mineralisationen als «Verunreinigung» betrachtet – man hat also beim Abbau des pechschwarzen Gesteins auch «Pech» gehabt, weil man dafür keine Verwendung fand. Bei uranreichem Gestein gab es in den Gruben meist auch viel Radon – ein radioaktives Edelgas und Zerfallsprodukt von Uran – das neben dem Gesteinsstaub ebenfalls die Lungen der Bergleute schädigte. Man wusste schon früh von diesem geruchlosen Grubengift, aber man konnte es nicht identifizieren.

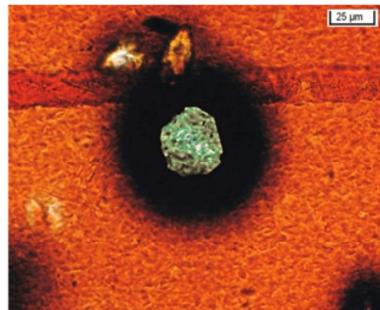
#) Vor zwei Milliarden Jahren enthielt dieses Uranerz noch genügend spaltbares  $^{235}U$ , etwa 3%. Eine selbsterhaltende Kernreaktion lief ab, welche durch das eingeschlossene Wasser moderiert wurde. Dadurch wurden einige Tonnen hochaktiver Abfall (Spaltprodukte) und Plutonium erzeugt, die im Gestein eingeschlossen blieben. Die Natur betrieb in Oklo ein Kraftwerk und hat ein geologisches Lager für hochaktive Abfälle geschaffen. Die radioaktiven Stoffe haben sich dort seit zwei Milliarden Jahren kaum bewegt. Oklo erlaubt im Prinzip einen Blick in ein Lager für radioaktive Abfälle nach zwei Milliarden Jahren.

Für eine natürliche Kettenreaktion müssen sehr viele Bedingungen erfüllt sein, die jünger als vor zwei Milliarden Jahren nur noch selten und heute gar nicht mehr möglich sind. Und zwar weil die spaltbare Atomart  $^{235}U$  nicht mehr in genügenden Mengen im natürlichen Uran vorkommt.  $^{235}\text{Uran}$  hat eine Halbwertszeit von etwa 700 Millionen Jahren, zerfällt also in 2 Milliarden Jahren – das sind fast 3 Halbwertszeiten – auf ungefähr 1/8.

## Radioaktive Quellen im Alltag



Ein «Radiogramm» eines alten Glühstrumpfes einer Campinglampe. Diese enthielten vor dem Jahr 2000 noch radioaktives Thorium. Ein aufgeschnittener Glühstrumpf wurde für etwa 3 Wochen auf Fotopapier gelegt, das dann entwickelt wurde. Auf ähnliche Weise wurde die Radioaktivität 1896 entdeckt.



Aufnahme im Lichtmikroskop, Ausschnitt 0.2 mm: Ein uranhaltiger Zirkonkristall ist in Glimmer (orange) eingebettet. Die Alphastrahlen zerstören das Kristallgitter auf einer Distanz von etwa  $30 \mu\text{m}$  um das Mineralkorn das Kristallgitter des Glimmers, was im polarisierteren Licht als schwarzer Hof erscheint.



Ein alter Wecker mit radioaktivem Radium in der fluoreszierenden Leuchtfarbe. Die Energie der im Farbstoff abgebremsten Alphateilchen bringen Zifferblatt und Zeiger zum Leuchten.

**29.** Leiten Sie die Beziehung für die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  her. Ist eine radioaktive Probe nach Ablauf der Halbwertszeit sicher ?

**30.** Berechnen Sie die Aktivität einer Probe nach drei Halbwertszeiten, ausgedrückt in % der Anfangsaktivität.

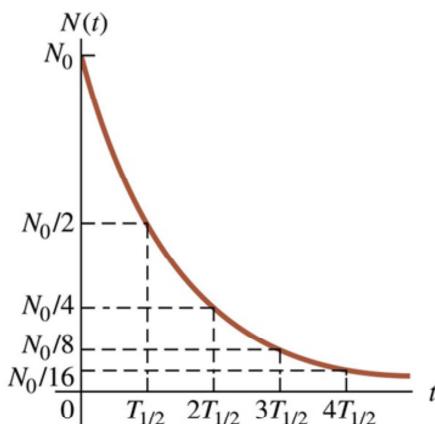
**31.** Das radioaktive Isotop  $^{57}Co$  zerfällt durch Elektroneneinfang mit einer Halbwertszeit von 272 Tagen. Bestimmen Sie die Zerfallszeit.

**32.** Eine  $^{57}Co$  Probe ( $T_{1/2} = 272$  d) habe eine Aktivität von  $2.00 \mu\text{Ci}$ . Wie viele radioaktive Kerne befinden sich in der Probe ? Welche Aktivität zeigt die Quelle nach einem Jahr? ®  $2.51 \times 10^{12}$  Kerne,  $0.789 \mu\text{Ci}$

**33.** Studieren Sie die Punkte 1 bis 7 des Diagramms auf der folgenden Seite und erklären Sie die  $^{14}C$ -Datierungsmethode.

**34.** Wie viele  $^{14}C$ -Zerfälle pro Minute misst man in 1 g Kohlenstoff aus frischem Fleisch ?  
® 15 Zerfälle pro Minute.

**35.** Sie erhalten per Post einen Knochensplitter aus einer archäologischen Grabung zugesandt mit der Bitte, sein Alter zu bestimmen. Sie entnehmen dem Knochen eine Probe, welche 200 g Kohlenstoff enthält. Die Messung der Probe ergibt eine Aktivität von 250 Zerfälle/min. Wie alt ist der Knochen? ® 20500 Jahre



# $^{14}\text{C}$ - Datierung

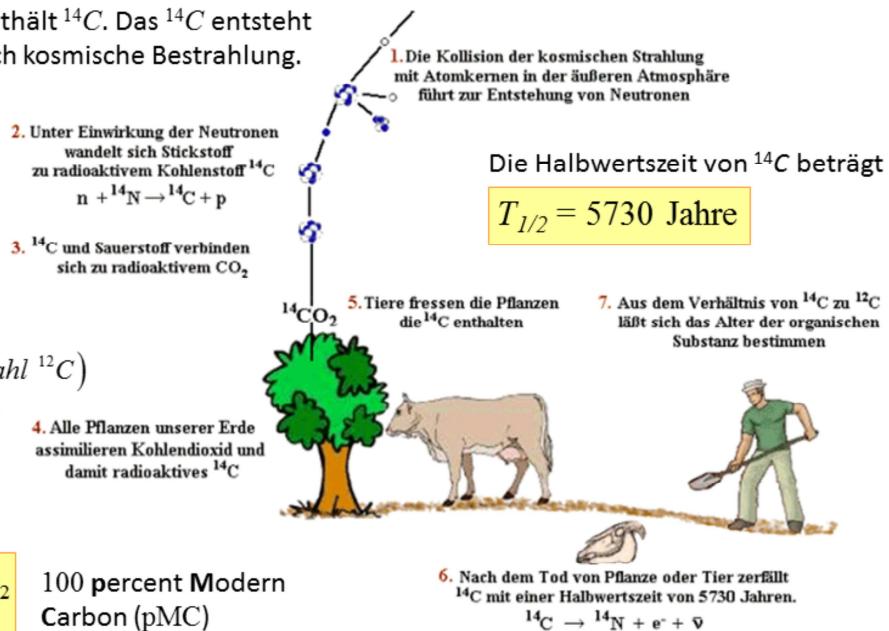
Alles Lebendige enthält  $^{14}\text{C}$ . Das  $^{14}\text{C}$  entsteht kontinuierlich durch kosmische Bestrahlung.

Das natürliche  
Verhältnis  
 $(\text{Anzahl } ^{14}\text{C}) / (\text{Anzahl } ^{12}\text{C})$

in der Atmosphäre  
sowie in lebenden  
Organismen  
beträgt: #)

$$\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} = 1.3 \times 10^{-12}$$

100 percent Modern  
Carbon (pMC)



#) Es handelt sich hier um ein Mengenverhältnis (= Anzahl Atome), nicht um ein Massenverhältnis !

Die Gleichung unter 2. lautet ausführlicher:  $1n + (7p + 7n = ^{14}\text{N}) \rightarrow (6p + 8n = ^{14}\text{C}) + 1p$   
 6. wird zu:  $(6p + 7n) + 1n \rightarrow (6p + 7n) + 1e^- + 1\nu_e$  (Beta - Zerfall eines Neutrons)

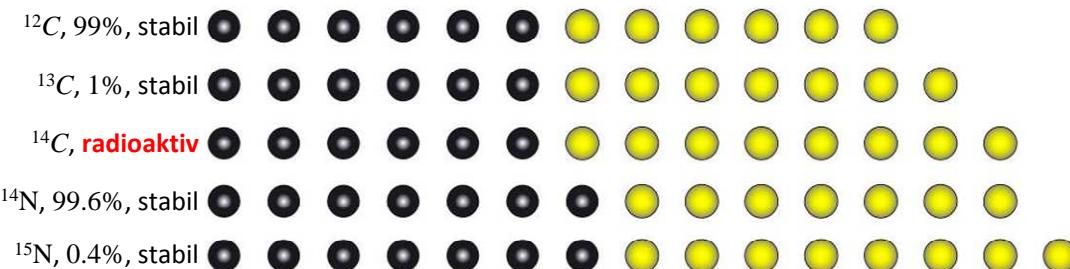
Mit dem Tod des Organismus endet die Neuaufnahme von  $^{14}\text{C}$ . Nun beginnt die Kohlenstoffuhr zu ticken. Der Chemiker Willard Frank Libby (1908 – 1980) entwickelte 1949 die Radiokarbon-Datierungsmethode. Er erhielt 1960 den Nobelpreis in Chemie "for his method to use carbon-14 for age determination in archaeology, geology, geophysics, and other branches of science".

Die Radiokarbonmethode beschränkt sich auf Proben, die nicht älter als 50'000 Jahre sind. Für geologische Altersbestimmungen benutzt man radioaktive Isotope wie Uran-235 ( $T_{1/2} = 704 \text{ Mio y}$ ), oder Thorium-232 ( $T_{1/2} = 14 \text{ Mia y}$ ).

Eine Schwierigkeit der Radiokarbon-Methode ist der leicht ändernde  $^{14}\text{C}$ -Gehalt in der Atmosphäre über lange Zeiträume.



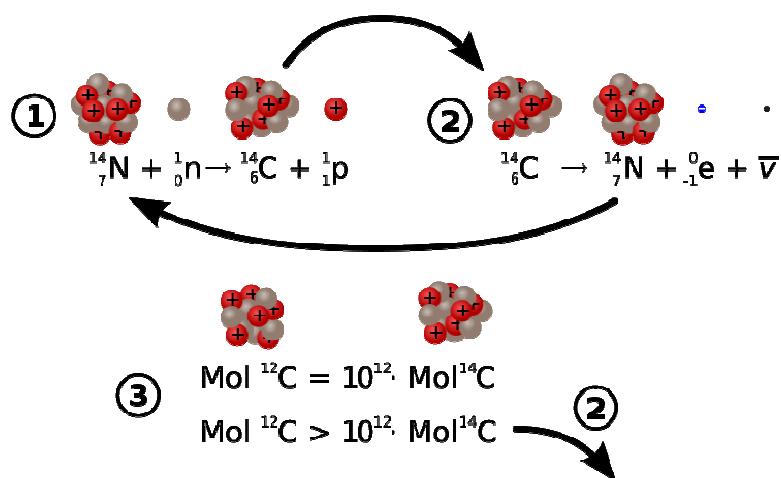
Das Inventar von Kohlenstoff und Stickstoff, zum Abzählen



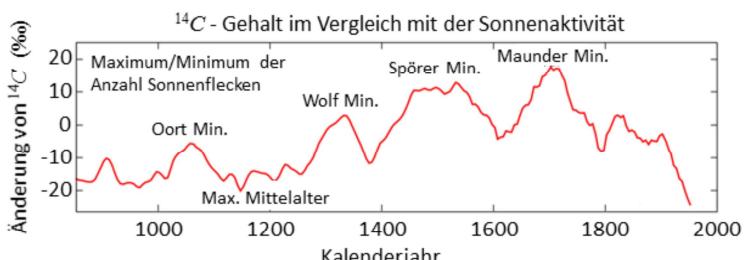
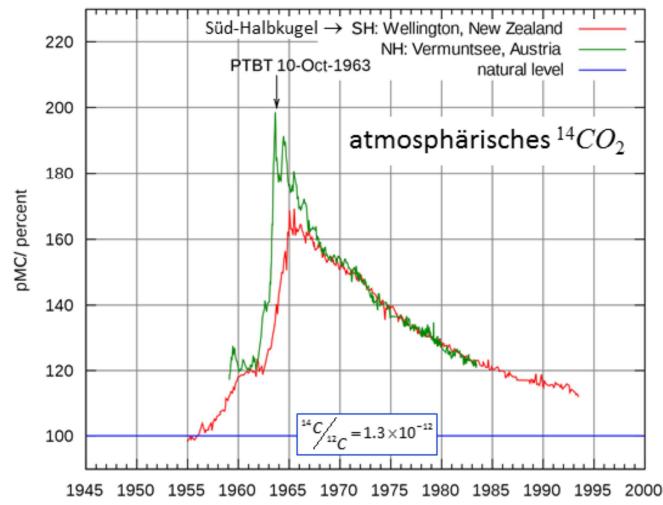
**36.** Radioaktive Strahlung wurde lange in der Krebstherapie eingesetzt. Ein  $1.00 \mu\text{g} {}^{60}\text{Co}$  Präparat, ein *Gamma* Strahler mit einer Halbwertszeit von 5.27 Jahren, wird für die Zerstörung eines Tumors vorbereitet. Bestimmen Sie die anfängliche Aktivität in Ci. Welche Aktivität hat die Probe nach 1.75 Jahren ? ® 1.13 mCi, 0.9 mCi

**37.** Das Alter eines Korbes wird auf 18'000 Jahre bestimmt. Welche Masse Kohlenstoff muss vom Korb mindestens extrahiert werden, um eine Zählrate von 5 pro Sekunde oder mehr zu messen ? ® Mindestens 180 g Kohlenstoff, bestehend zum überwiegenden Teil aus  ${}^{12}\text{C}$

**38.** Welche Probe enthält mehr radioaktive Kerne:  
eine  $5.00 \mu\text{Ci}$  Probe aus  ${}^{240}\text{Pu}$  ( $T_{1/2} = 6560 \text{ y}$ ) oder  
eine  $4.45 \mu\text{Ci}$  Probe aus  ${}^{243}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 7370 \text{ y}$ ) ?



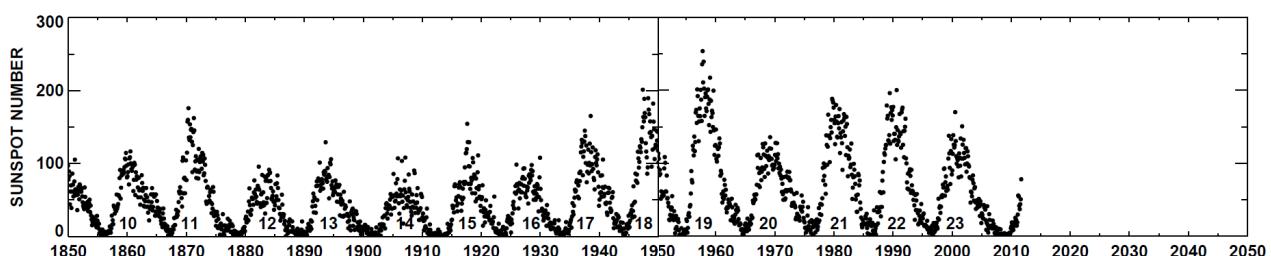
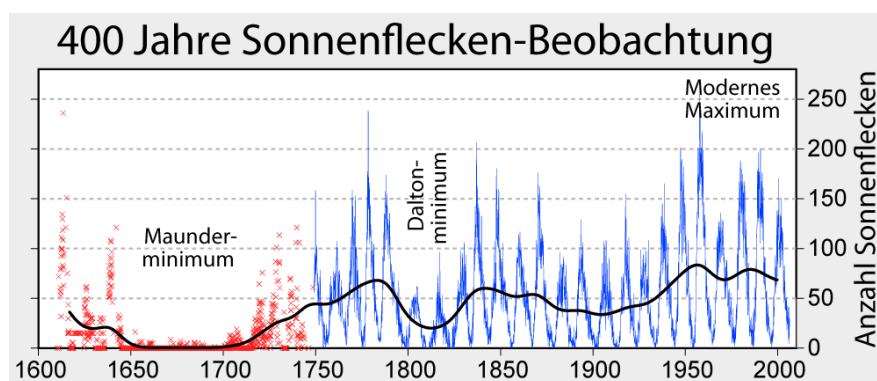
Schwankender  $^{14}\text{C}$ -Gehalt in der Atmosphäre über die vergangenen Jahrzehnte und Jahrhunderte. Gründe dafür sind die ändernde Strahlung der Sonne (Sonnenfleckenaktivität), die Industrialisierung (Suess-Effekt), sowie Kernwaffenversuche. #) Mithilfe anderer Datiermethoden, beispielsweise der Dendrochronologie (Jahrringe zählen bei gefällten Bäumen) kann der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Vergangenheit kalibriert werden.



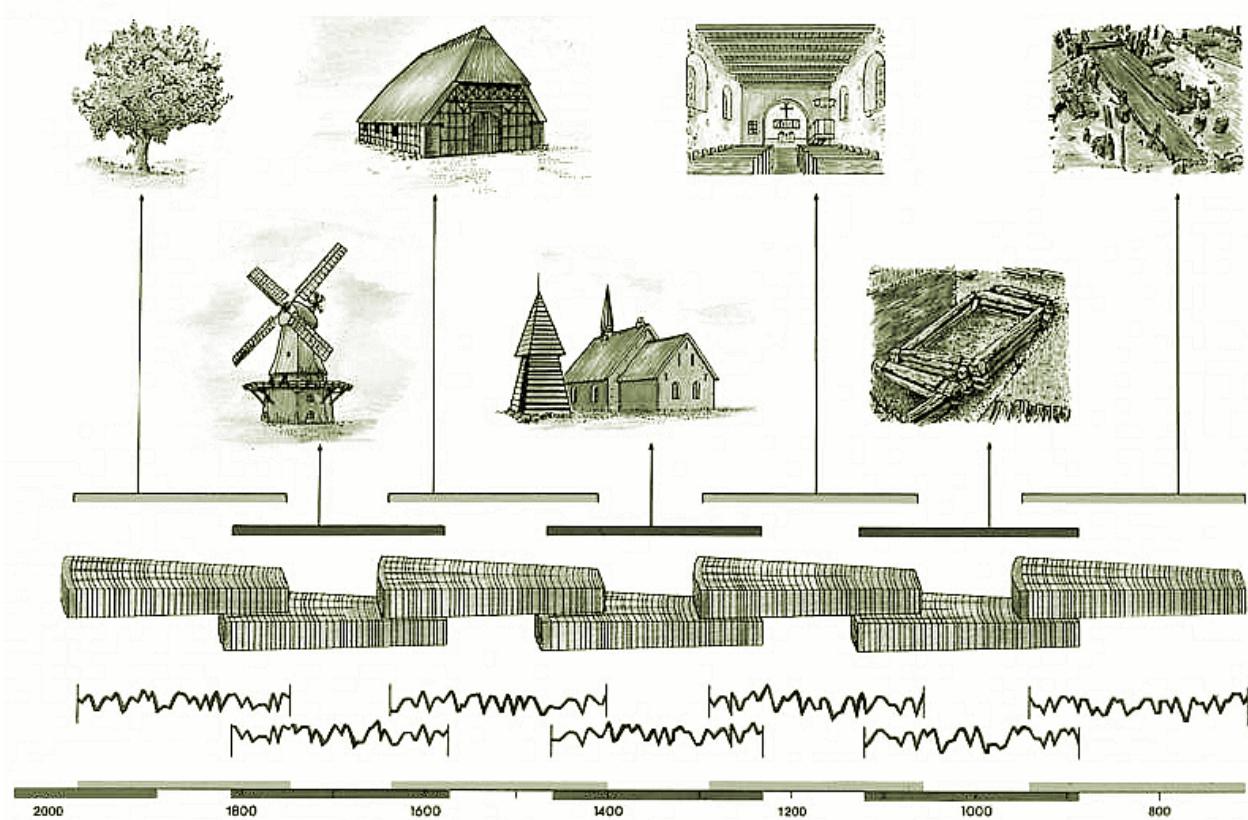
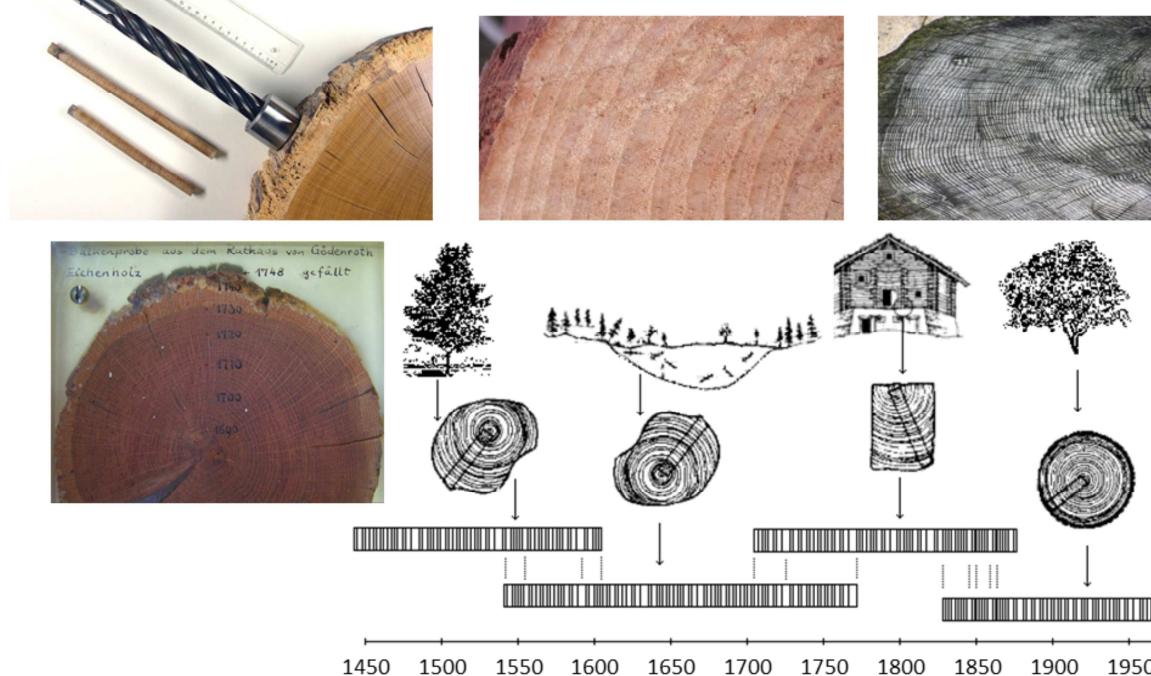
40. Erklären Sie die Abnahme des  $^{14}\text{C}$ -Gehalts zwischen 1800 und 1950 im Zusammenhang mit der Industrialisierung (Kohle und Öl verbrennen).

#) Seit 1945 wurden über 2400 Atomwaffentests durchgeführt. Die Versuche hinterließen an vielen Orten radioaktive Kontaminationen.

Weniger Sonnenaktivität (= kleine Anzahl Sonnenflecken) geht offenbar einher mit weniger Sonnenstrahlung und tieferen Jahrestemperaturen. So entspricht das "Maunder Minimum" der "kleinen Eiszeit" während der Periode von 1650 bis 1700. Gleichzeitig bedeutet weniger Sonnenaktivität einen höheren  $^{14}\text{C}$ -Gehalt. Der physikalische Zusammenhang ist unbekannt.

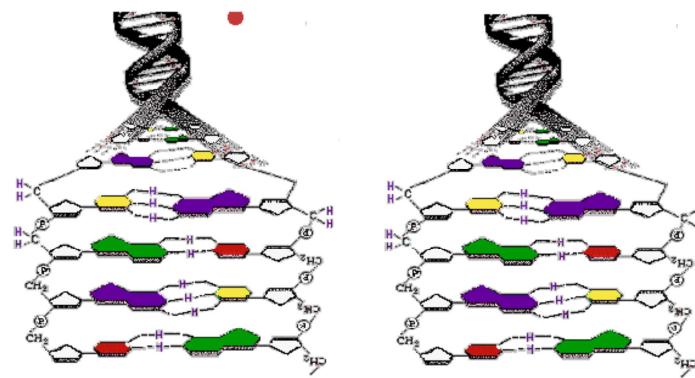


## Dendro-Chronologie



# Ionisierende Strahlung & Biologie

Radioaktive Strahlung hat ionisierende Wirkung (Radikalbildung) mit anschließendem Zersetzungssprozess des Gewebes. Bei der Krebsbekämpfung ist diese Zersetzung erwünscht, für gesundes Gewebe ist sie aber meist schädlich. Weiter kann ionisierende Strahlung den Gencode zerstören (Mutationen).



Verbreitet und gefährlich ist die Anhäufung von  $^{222}Rn$  in Wohnhäusern. Radon ist ein geruch- und farbloses Gas mit einer Halbwertszeit von 3.82 Tagen. Es entsteht durch  $\alpha$ -Zerfall aus Radium  $^{226}Ra$  ( $T_{1/2} = 1600$  Jahre), welches in Baumaterial zu finden ist.  $^{222}Rn$  entsteht also immer wieder neu. Es hilft nichts, das Haus für einige Tage zu verlassen, bis das  $^{222}Rn$  vollständig zerfallen wäre. Nach Schätzung verkürzt eine hohe  $^{222}Rn$  Belastung im Wohnbereich die Lebenserwartung um etwa 40 Tage, das jahrelange Rauchen einer Packung Zigaretten pro Tag jedoch um 6 Jahre.

# Strahlendosis und Gefährlichkeit

Die absorbierte Energie pro kg lebendes Gewebe nennt man **Energiedosis**  $D$ . Der biologische Effekt wird beschrieben durch die **Äquivalentdosis**  $H$ . Diese berechnet sich aus der Energiedosis  $D$  und dem **Bewertungsfaktor**  $q$ :

$$[D] = 1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$$

$$[H] = 1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$H = D \cdot q \quad [q] = \text{Sv / Gy}$$

- 41.** 1.2 kg eines gebrochenen Beins werden geröntgt mit einer Äquivalentdosis von 0.40 mSv. Berechnen Sie die Energiedosis in mrad und mGy. Die Energie der Röntgenphotonen betrage 50.0 keV. Wie viele Photonen werden absorbiert? ® 40 mrad, 0.40 mGy,  $4.0 \times 10^{-4} \text{ J/kg}$ ,  $3.0 \times 10^{15} \text{ eV}$ ,  $6.0 \times 10^{10}$  Photonen
- 42.** Eine 50 kg Person verschluckt irrtümlich 0.35 Ci Tritium ( $T_{1/2} = 12.3 \text{ y}$ ). Der Beta Zerfall liefert 5.0 keV Elektronen. Nehmen Sie an, die Elektronen werden vom ganzen Körper gleichmässig absorbiert. Berechnen Sie die Energiedosis und die Äquivalentdosis, welche die Person in einer Woche akkumuliert. ® 0.125 Gy

Strahlung	$q$ in (Sv / Gy) oder (rem / rad)
$\gamma$	1
$\beta$	1 - 1.5
langsame $n$ (0.025 MeV)	3
$n$ (0.02 - 0.1 MeV)	5 - 8
schnelle $n$ und $p$	10
$\alpha$	20
schwere Kerne	20

**Ionendosis** / in Röntgen. Die Einheit Röntgen ist ein Mass für die Anzahl durch Strahlung ionisierter Luftmoleküle.  $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ . 1 Röntgen entspricht somit etwa  $1.6 \times 10^{15}$  ionisierter Moleküle pro kg durchstrahlte Luft. Um trockene Luft zu ionisieren, muss das ionisierende Teilchen (= Geschoss) eine Energie von etwa 34 eV übertragen. →  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} \equiv 1.84 \times 10^{17}$  Luftmoleküle pro kg  $\equiv 0.0294 \text{ C/kg} = 114 \text{ R}$ .

Energiedosis in Gray, biologische Dosis in Sievert, Ionendosis in Röntgen !

Noch ausführlicher:

Für die in Materie absorbierte Strahlenenergie wird die Einheit Gray benutzt (1 Gray = 1 Joule/kg). Gray bedeutet also absorbierte Energie pro Masse.

Ein Sievert bedeutet eine von der Strahlenart abhängige und mit biologischen Faktoren gewichtete, äquivalente Energie, die vom Gewebe absorbiert wird (1 Sv = 1 Joule-äquivalent/kg).

Bei einer bestimmten deponierten Energie stammt der Unterschied zwischen Sievert und Gray einerseits von der unterschiedlichen Wirkung der *Gamma*-, *Beta*- und *Alpha*strahlen auf lebende Zellen und anderseits von den «Gewichtungsfaktoren», welche die Wirkung in verschiedenen Organen berücksichtigen.

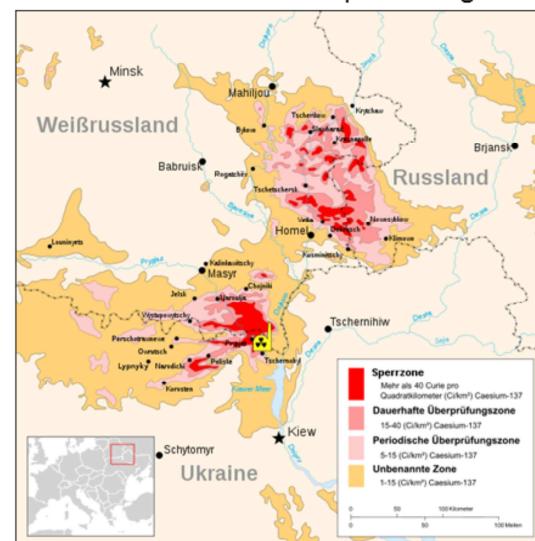
Werden radioaktive Stoffe durch Einatmen oder Essen vom Körper aufgenommen, ist die Wirkung der Strahlung um ein Vielfaches grösser, als wenn dieselbe Menge von aussen auf den Körper einwirkt.

Einen wesentlichen Teil der Erfahrungswerte zur Dosiswirkung erhielt man durch die Untersuchung von fast 90'000 japanischen Bombenopfern, welche den Atombombenabwurf über Hiroshima und Nagasaki überlebt haben. Die jeweilige Strahlendosis wurde innerhalb von räumlichen Abgrenzungen für jede Person rekonstruiert und die Spätfolgen werden bis heute registriert.

# Ursprung ionisierender Strahlung

	mSv / a
kosmische Strahlung, auf Meereshöhe	0,3
terrestrische Strahlung	0,4
inkorporierte natürliche radioaktive Stoffe (z.B. $^{14}\text{C}$ )	0,3
Inhalation von Radon	1,1
$\Sigma$ der natürlichen Strahlung	<b>2,1</b>
radioaktive Stoffe, ionisierende Strahlen in Medizin, Forschung, Technik, Haushalt	2,0
berufliche Exposition	< 0,01
Fallout von Kernwaffenversuchen	< 0,01
Kerntechnische Anlagen	< 0,01
Unfall Tschernobyl (26.4.1986)	< 0,015
$\Sigma$ der zivilisatorischen Strahlung	<b>2,0</b>

Die Tschernobyl Katastrophe vom 26.4.1986 in der Ukraine hat nach Schätzungen total  $10^8 \text{ Ci}$  Aktivität in die Atmosphäre freigesetzt.



a = annus (Latein) = Jahr

Vor 1970 gab es mehrere schwere Havarien von Kernanlagen (Windscale, England; in sowjetischen Anlagen zur Herstellung von Kernwaffen; im unterirdischen Versuchsreaktor Lucens, Schweiz). Die Bevölkerung war – ausser bei den Unfällen hinter dem Eisernen Vorhang – wenig oder nicht betroffen.

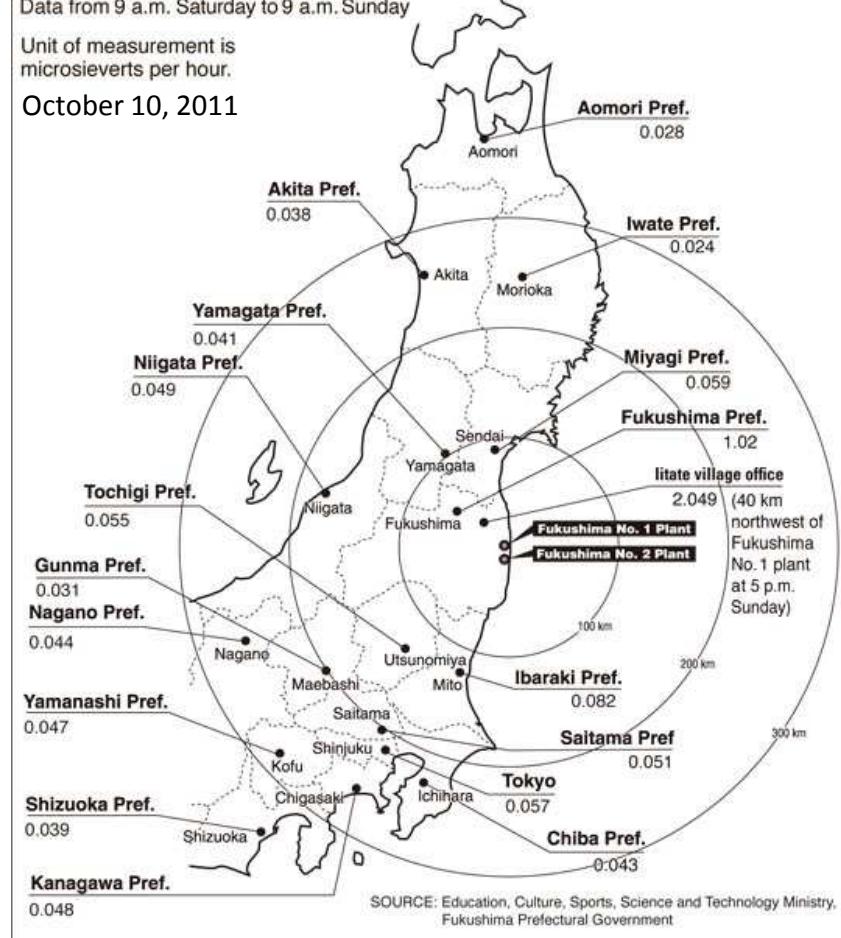
Dann, im Frühjahr 2011 fiel die Wasserkühlung des Atomkraftwerks in Fukushima wegen einer Tsunamiwelle aus. Unter <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/f1/index-e.html> kann man täglich die Umgebungsaktivität konsultieren.

## Maximum radiation levels in eastern Japan

Data from 9 a.m. Saturday to 9 a.m. Sunday

Unit of measurement is microsieverts per hour.

October 10, 2011



# Natürliche Strahlenbelastung

Dosis als Funktion der Höhe über Meer

Ort	Einwohner Millionen	Höhe m	effektive Dosis mSv/a
La Paz	1,6	3900	2,0
Lhasa	0,5	3600	1,7
Quito	1,9	2840	1,1
Mexiko Stadt	21,5	2240	0,82
Nairobi	2,8	1660	0,58
Denver	0,6	1610	0,57
Teheran	11,9	1180	0,44

**43.** Schätzen Sie die Strahlenbelastung eines Piloten, der 50 Tage im Jahr im Flugzeug verbringt. ® etwa 3 mSv zusätzlich

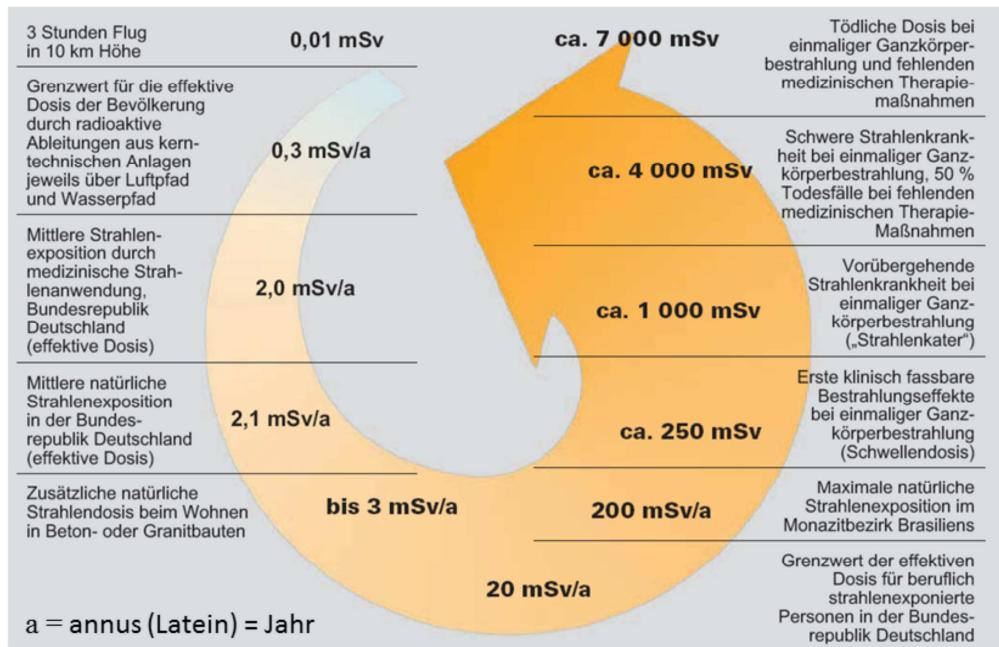
**44.** Warum nimmt die Strahlenbelastung mit der Höhe zu? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für einen langen Aufenthalt im Space Shuttle? (300 km Höhe, 100 - 200 mSv pro Jahr im Shuttle, 400 - 500 mSv pro Jahr ausserhalb, jeweils bei "ruhiger" Sonne)

Strahlendosis bei Flugreisen

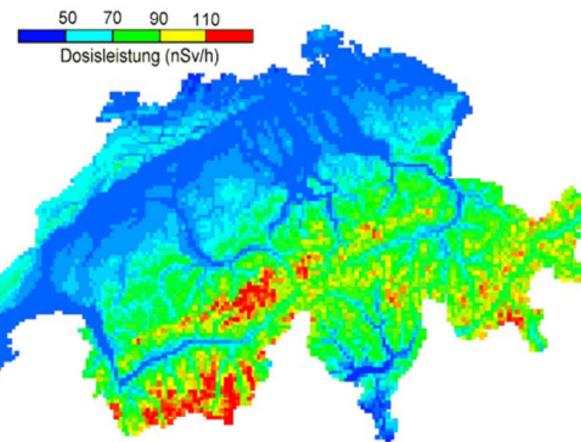
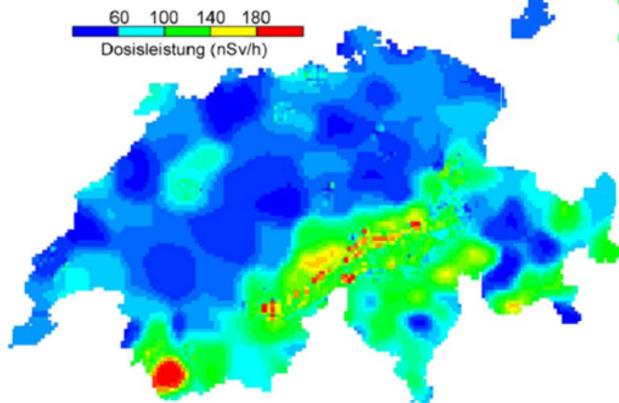
Abflug	Ankunft	Dosisbereich ( $\mu$ Sv)
Frankfurt	Gran Canaria	10 - 18
Frankfurt	Johannesburg	18 - 30
Frankfurt	New York	32 - 75
Frankfurt	Rio de Janeiro	17 - 28
Frankfurt	Rom	3 - 6
Frankfurt	San Francisco	45 - 110
Frankfurt	Singapur	28 - 50

Die Dosisschwankungen gehen auf Sonnenzyklus und Flughöhe zurück.

## Weitere Darstellung der Strahlendosis



Kosmische und terrestrische  
Strahlenbelastung in der Schweiz.



<http://xkcd.com/radiation/>

# Strahlenschäden

Einmalige Dosis (Gy)	Symptome
0 - 0.2	Stochastische Schäden. Mögliche Spätfolgen wie Krebs oder Erbgut Veränderung
0.2 - 0.5	Reduktion der roten Blutkörperchen
0.5 - 1	Kopfschmerzen, erhöhtes Infektionsrisiko
1 - 2	Übelkeit, Erbrechen. 10% Todesfälle nach 30 Tagen (Letale Dosis: LD 10/30)
2 - 3	Schwere Strahlenkrankheit, LD 35/30
6 - 10	Akute Strahlenkrankheit, LD 100/14
über 50	Tod nach wenigen Stunden



Hand mit Hautverbrennung durch radioaktive Strahlung, <sup>#)</sup> drei Wochen nach dem Unfall. Das Opfer spürte während der Bestrahlung nichts. <sup>§)</sup>

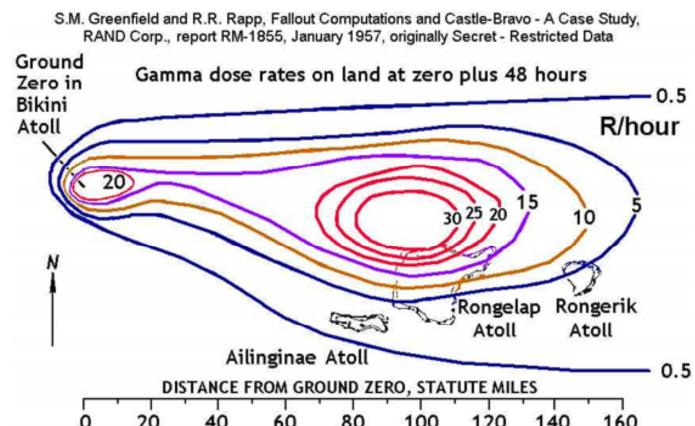
50 Gy sind ein paar Stundendosen am Karatschai See im südlichen Ural. Er gilt als der am stärksten verschmutzte Ort der Welt, eine Folge der unsorgfältigen Handhabung radioaktiver Abfälle zu Sowjetzeiten. Die Strahlenbelastung durch ein korrekt betriebenes Kernkraftwerk ist nicht vernachlässigbar, jedoch etwa 100 Mal kleiner als die "natürliche" Radioaktivität im Rauch eines Kohlekraftwerkes. (Siehe "Kernspaltung" weiter unten)

<sup>#)</sup> Die Hautverbrennung entstand durch Betastrahlen unmittelbar über einer versehentlich geöffneten medizinischen Strahlenquelle. Die Strahlung hatte – ausgenommen auf die nahen Hände – nur wenig weitere Auswirkungen auf die Person, da die Entfernung des Körpers, die Kleidung und die Schutzbrille genügend Schutz boten. Die deponierte Energie der Betastrahlen in den obersten mm Gewebe der Hand entsprach etwa 50 Gray. Dieselbe deponierte Energie aus irgendeiner Strahlung in mehreren und empfindlicheren Körperorganen könnte tödliche Folgen haben.

<sup>§)</sup> Wenn Sie an der Sonne liegen spüren Sie auch nicht den bevorstehenden Sonnenbrand. Der Schmerz kommt erst am Abend. Bei sehr hohen Strahlenbelastungen fühlt man aber schon etwas, das Nervensystem versagt und den Betroffenen wird schnell sehr übel. Dann bewegen wir uns aber bereits im Bereich der tödlichen Dosis.

## Radioaktiver Niederschlag - Fallout

Bei Land- oder Wasserexplosionen wird viel Material "aufgewirbelt" und vermischt sich mit radioaktiven Rückständen der Bombe.



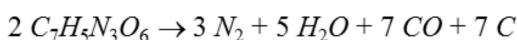
Fallout Simulation der Castle Bravo Explosion vom 1.3.1954 auf dem Bikini Atoll. Der Hotspot auf dem Rongelap Atoll wurde durch Abwinde erzeugt.

**45.** Interpretieren Sie die Figur oben und machen Sie sich Gedanken zur Fotografie links.



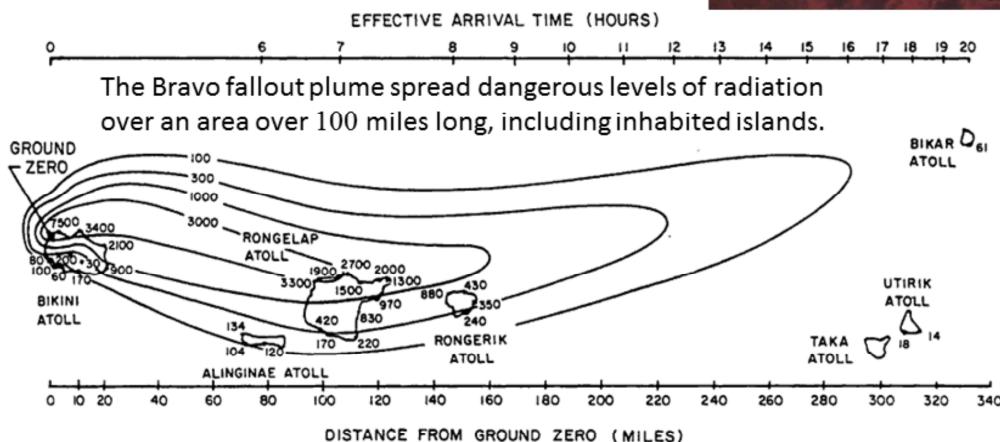
Die bei einer Nuklearexploration frei werdende Energie wird mit dem Energieäquivalent des chemischen Sprengstoffs TNT verglichen.

TNT Explosionsgleichung:



$$1 \text{ kT} (\text{Kilotonne TNT}) = 4.184 \times 10^{12} \text{ J}$$

Der 15 Megatonnen Castle Bravo Pilz über Bikini.





Links & unten: Zwei Aufnahmen der 21 kT Unterwasser-Nuklearexploration auf dem Bikini Atoll 1946, genannt Event Baker oder Baker Explosion.



Explosionsort der grössten je gezündeten Bombe ("Zar oder Tsar Bombe") am 30. Oktober 1961 um 11:32 Uhr Moskauer Zeit. Es handelte sich um eine Wasserstoffbombe mit einer Zerstörungskraft von 50 Megatonnen TNT Äquivalent (= 50'000 kT), fast 4000 Mal stärker als die Hiroshima Bombe.

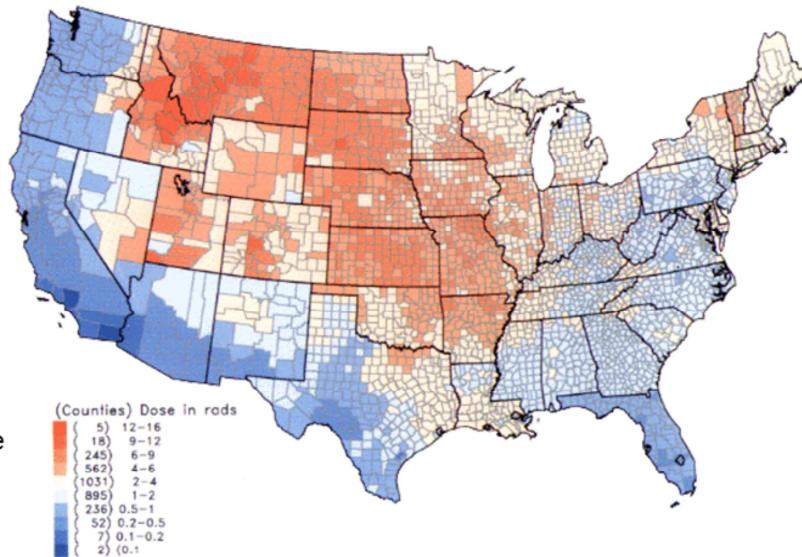


Die Zar Bombe wurde in der Luft gezündet, vor dem Auftreffen am Boden. Dadurch entstand weniger Fallout, als wenn Bomben am Boden oder unter Wasser gezündet werden (Kein aufgewirbeltes, kontaminiertes Material).

# Messen der Fallout-Belastung

Akkumulierte Jod-131 Dosis in der Schilddrüse in rad pro Einwohner als Folge atmosphärischer Nukleartests in Nevada zwischen 1951 und 1962.

Die Schilddrüse (engl. Thyroid) speichert Jod für die Hormonbildung. Bei Jodmangel vergrössert sich die Schilddrüse und es entwickelt sich ein Kropf am Hals. In früheren Zeiten gab es diese Erkrankung oft. Heute wird in der Schweiz den Esswaren, beispielsweise dem Speisesalz Jod bei gemischt.

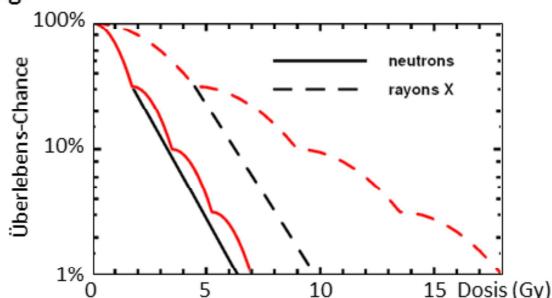


Vorbereitung für einen Untergrundtest in Nevada um 1980. Krater vergangener Explosionen sind erkennbar. Die Messungen während der Explosion sollen das Verständnis verbessern für Weiterentwicklungen. Außerdem dienen die Daten der Validierung von Computersimulationen.

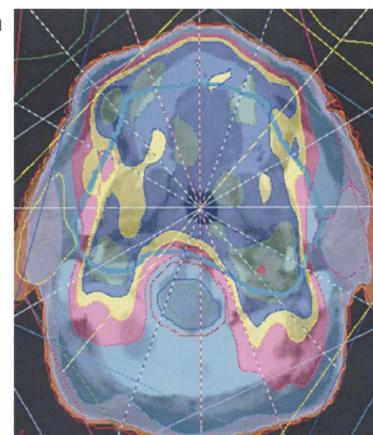


# Nützliche Bestrahlung

Überleben einer Säugetier-Zellkulturs  
Funktion der Strahlendosis. "Schwarz":  
einmalige Dosis; "Rot": etappenweise  
Bestrahlung.



Isodosenplan  
eines Kopfes



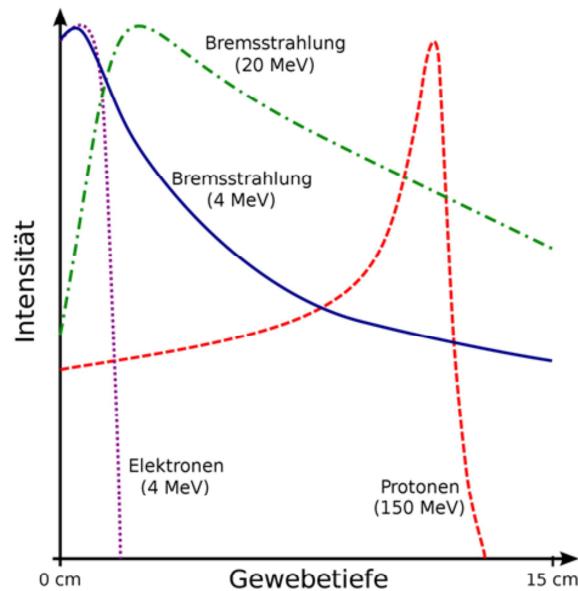
In der Medizin wird die zerstörende Wirkung ionisierender Strahlung zur Bekämpfung von Tumoren eingesetzt. Der Schaden des umliegenden Gewebes ist bei dieser Behandlung zwar erheblich, in Anbetracht des sicheren Todes ohne Behandlung aber vertretbar.

Radioaktive Isotope, wie beispielsweise  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 8.02 \text{ d}$ ) werden als **Tracer** Elemente in den Körper eingegeben.  $^{131}\text{I}$  wirkt als "Selbststrahler". Die schnelle oder weniger schnelle Anhäufung von  $^{131}\text{I}$  in der Schilddrüse ist ein Mass für deren Funktionsfähigkeit.

Radioaktive Strahlung wird auch zum Sterilisieren von Operationsinstrumenten oder Konservieren von Lebensmitteln eingesetzt.



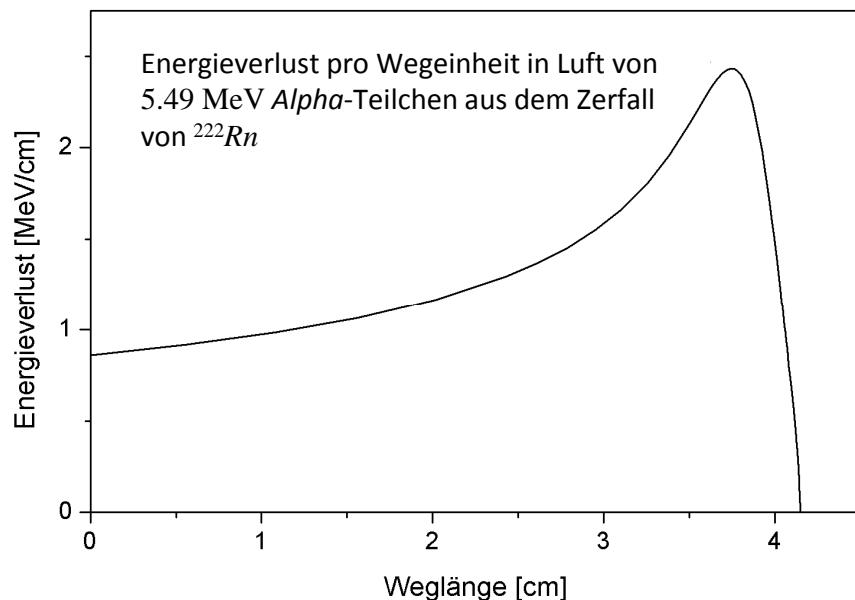
Bei den Implantationsverfahren werden kleine, gekapselte Strahlungsquellen (engl. seeds) mit kurzer Halbwertszeit in den Körper verbracht und verbleiben dort dauerhaft, während ihre Aktivität abklingt. Eine typische Anwendung sind Seed-Implantationen der Prostata mit Jod-125 (59 Tage Halbwertszeit).  $^{125}\text{I}$  gibt sehr schwachenergetische Gamma Strahlen ab, die den Körper des Patienten nicht verlassen. Es ist daher kein spezieller Operationssaal und keine Quarantäne erforderlich.



Elektronen mit 4 MeV dringen nur 1 cm tief ein. Photonen mit 20 MeV schädigen ab 3 cm und tiefer. Sehr energiereiche Protonen schädigen selektiv in 12 cm Tiefe.

#) Elektrisch geladene, massive Teilchen (Protonen, Kohlenstoffionen) haben eine scharf begrenzte Reichweite, so dass Gewebe hinter dem zu bestrahlenden Tumor geschont werden kann. Schwere Ionen geben ihre Energie an die Materie zunächst nur geringfügig und erst nach fast vollständiger Abbremsung konzentriert ab (sogenannter Bragg-Peak); dies erlaubt es, durch geeignete Wahl der Ionenenergie auch vor dem Tumor gelegenes Gewebe zu schonen.

Energieriche Teilchen ionisieren Atome auf ihrem Weg durch Materie. Massereiche Teilchen wie Protonen oder Alpha verlieren am meisten Energie kurz vor dem vollständigen Abbremsen. Dieses Maximum an Energieverlust nennt man Bragg-Peak.



## Wenig Zerfälle - Poisson Statistik

Der radioaktive Zerfall eines Kerns ist **echt zufällig**. Diese Zufälligkeit, respektive die Schwankung der Zerfallshäufigkeit um den Mittelwert wird mittels der **Poissonverteilung** exakt wiedergegeben. Ein Alltagsbeispiel soll dies erläutern: Ein Eimer steht draussen im Regen. Wir zählen lange Zeit die Anzahl Tropfen, die in den Eimer fallen. So können wir einen präzisen Mittelwert von 16.32 Tropfen pro 10.0 s errechnen. Die Wahrscheinlichkeit, in den nächsten 10.0 s 14 Tropfen zu zählen ist:

$$\text{Diskrete Poisson Verteilung} \longrightarrow p(14) = \frac{16.32^{14}}{14!} \cdot e^{-16.32} = 0.089 = 8.9\%$$

**46.** Ist die Wahrscheinlichkeit, 7 Tropfen in 5.00 s zu zählen ebenfalls 8.9 %?

**47.** Berechnen Sie die Wahrscheinlichkeit, in 10.0 s 16 Tropfen zu zählen.

**Kontinuierliche Poisson Verteilung**  $\longrightarrow$   
 $p(x)$  ist die **Wahrscheinlichkeitsdichte** für  
 den Wert  $x$  bei einem Mittelwert von  $m$ . #)

$$p(x) = \frac{m^x \cdot e^{-m}}{x!} = \frac{m^x \cdot e^{-m}}{\int_0^\infty (t^x \cdot e^{-t}) dt}$$

#) Vergleichen Sie mit der Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung eines idealen Gases. Auch dort nennt man  $f(v)$  Wahrscheinlichkeitsdichte. Die eigentlich Wahrscheinlichkeit für eine Geschwindigkeit zwischen  $v$  und  $v+dv$  berechnet sich dann als "Dichte  $\times$  Länge" =  $f(v) \cdot dv$ , respektive als Integral  $\int f(v) \cdot dv$  über einen Geschwindigkeitsbereich mit unterer und oberer Grenze.

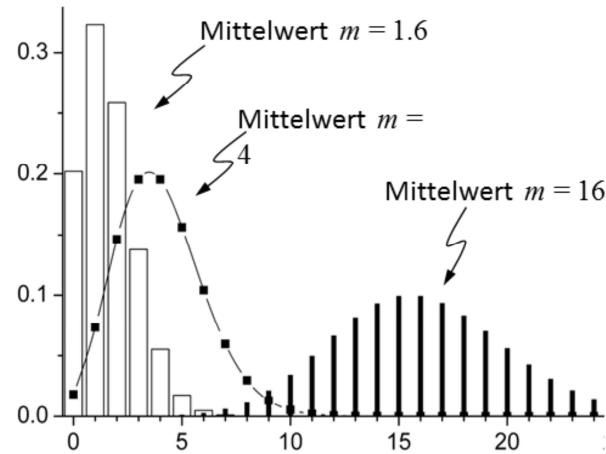
## Viele Zerfälle - Gauss Statistik

Die Figur rechts zeigt drei diskrete Poisson Verteilungen für verschiedene Messzeiten, aber äquivalente Mittelwerte, nämlich 1.6 pro Sekunde, 4 in 2.5 s, respektive 16 in 10.0 s. Die Verteilungen sind asymmetrisch.

Für lange Messzeiten, d.h. grosse Mittelwerte geht die Poisson Verteilung in die **Gaussverteilung** über:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot m}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2m}}$$

$\sigma = \sqrt{m}$  : Die Standard Abweichung wächst mit Wurzel des Mittelwertes !



Wegen  $\sigma = m^{1/2}$  für grosse Dosen, respektive grosse Mittelwerte wird die relative Verteilbreite immer kleiner. Der Quotient Breite / Mittelwert  $\Delta m / m = \sigma / m = m^{-1/2}$  nimmt mit zunehmendem Mittelwert ab.

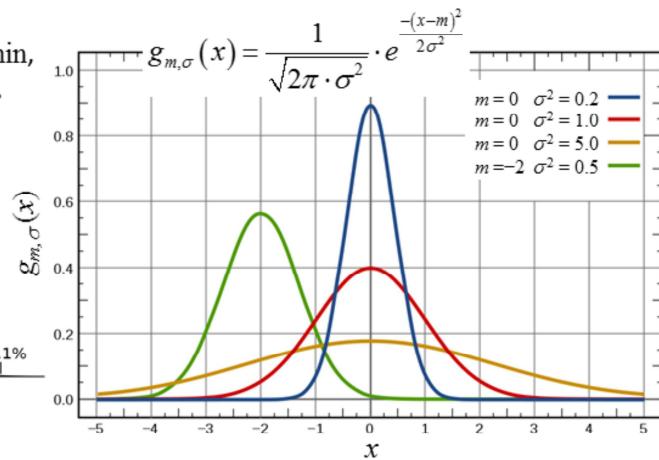
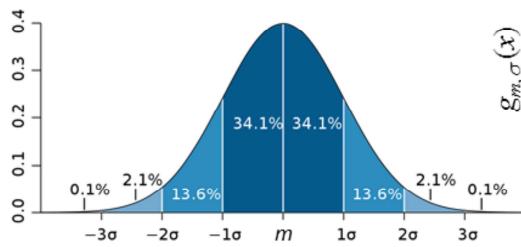
Alter deutscher Zehn-Mark Schein



**48.** Lassen Sie mit dem Taschenrechner die Poisson-Kurve  $p(x)$  für  $m = 1.6$  zeichnen.  
 (Hinweis: Stellen Sie die Auflösung in "Window" auf  $xres = 10$ ). Bestimmen Sie den Wert des Integrals unter der Kurve und interpretieren Sie diesen Wert.

**49.** Radioaktive Strahlung wird in der Krebstherapie eingesetzt. Ein  $1.00 \mu\text{g}^{60}\text{Co}$  Präparat, ein Beta Strahler mit einer Halbwertszeit von  $1925 \text{ d}$ , wird für die Zerstörung eines Tumors vorbereitet. Bestimmen Sie die anfängliche Aktivität in Ci. Ein Patient benötigt eine Dosis von  $12.6 \times 10^9$  Elektronen. Wie lange dauert die Bestrahlung? Wie gross ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Patient durch statistischen Zufall über 1 % zu viel Elektronen abkriegt?

®  $dN/dt = 4.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1} = 1.13 \text{ mCi}$ , 5 min, Fehlwahrscheinlichkeit praktisch null.



Hinweis für Grafik-Aufgaben mit Taschenrechner:

Wenn der Taschenrechner langsam zeichnet, sollten Sie  $xres$  vergrössern (z.B.  $xres=6$ ). Ist  $xres$  nicht in [Window] veränderbar (=hellgrau), dann drücken Sie [F1], [9:Format] und ändern zu Discontinuity = Off. Bei manchen TR schneller mit: ♦ und | drücken im [Window]-Mode.

# Nukleare Reaktionen

Bisher wurde der spontane, zufällige Zerfall radioaktiver Kerne in *Alpha* und *Beta* Teilchen untersucht. (Manchmal folgte dem Zerfall noch eine *Gamma* Emission.) Nun untersuchen wir durch Teilchenbeschuss angeregte nukleare Reaktionen. Rutherford bombardierte Stickstoff  $^{14}N$  mit *Alpha* Teilchen und erzeugte so Sauerstoff  $^{17}O$  und Wasserstoff  $H$ .

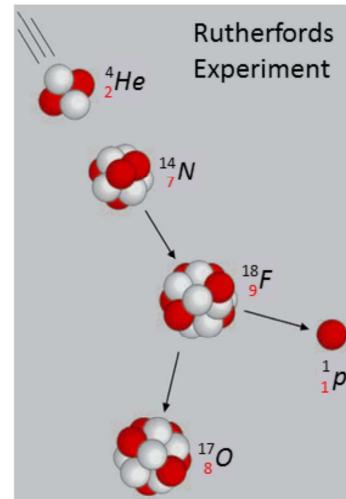
Kernreaktionen gehorchen verschiedenen Erhaltungssätzen: Erhaltung der Ladung, des Impulses, des Drehimpulses und der Energie (inklusive Ruhemasse). Außerdem bleibt bei einer Kernreaktion die Nukleonenzahl  $A$  erhalten.

**50.** Was hat das  $F$  und das  $p$  in der Reaktion der Abbildung verloren? Prüfen Sie die Erhaltung der Nukleonenzahl.

Zwei Kerne  $A$  und  $B$  verwandeln sich in einem Prozess zu Kernen  $C$  und  $D$ . Die Reaktionsenergie  $Q$  berechnet sich als:

$$\text{Reaktionsenergie } Q = (M_A + M_B - M_C - M_D) \cdot c^2$$

**51.** Begründen Sie die Gleichung für  $Q$ .



Bildhafte Vorstellung:

Masse ist wie "gefrorene" Energie. Man kann Teile davon wieder auftauen.

Auch in der Chemie könnte man die Bindungsenergie als Massenunterschied vorher - nachher wahrnehmen (Siehe Aufgabe 20). Ebenso würde man eine Massenzunahme einer gespannten Feder im Vergleich zu einer entspannten Feder feststellen; oder einer warmen Tasse Kaffee im Vergleich zu einer kalten. Diese Massenunterschiede sind aber so unglaublich klein, dass wir keine Möglichkeit haben, sie tatsächlich zu messen.

# exotherm ↗ - endotherm ↘

Ist  $Q$  positiv, wird die gesamte Masse kleiner und die kinetische Restenergie grösser. Eine solche Reaktion heisst in Anlehnung an die Chemie **exotherm**. Ein negatives  $Q$  ist die Folge einer **endothermen** Reaktion. Die Masse wird grösser und die kinetische Energie kleiner.

**52.** Ist die Reaktion rechts möglich? Berechnen Sie  $Q$ .

$$\textcircled{R} \quad Q = +0.018623 \text{ u} \times 931.5 \text{ MeV/u} = +17.35 \text{ MeV} \quad {}^1\text{H} + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$$

**53.** Ist die Reaktion rechts möglich? Berechnen Sie  $Q$ .

$$\textcircled{R} \quad Q = -0.001280 \text{ u} \times 931.5 \text{ MeV/u} = -1.192 \text{ MeV} \quad {}^4\text{He} + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + {}^1\text{H}$$

Eine endotherme Reaktion ist nur möglich, wenn die gewonnene Masse bereits zu Beginn in Form kinetischer Energie vorhanden ist. In der Reaktion 53. müssen sich der Helium- und der Stickstoffkern aufeinander zu bewegen. Die gemeinsame kinetische Energie muss im Schwerpunktsystem ( $cm$ ) mindestens 1.192 MeV betragen. Ist aber  $N$  in Ruhe und bewegt sich nur der  $He$ -Kern, muss die kinetische Energie grösser sein, und zwar gemäss der Gleichung:

$$E_{kin, He} = \frac{M_N + M_{He}}{M_N} \cdot Q_{cm} \quad \text{Warum ist das so?}$$

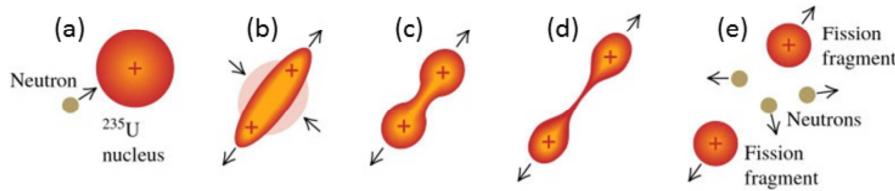
**54.** Berechnen Sie die minimale kinetische Energie für die Reaktion 53. , wenn das Alpha Teilchen ( $He$ ) auf den ruhenden Stickstoffkern ( $N$ ) geschossen wird.  $\textcircled{R} \quad E_{kin, He} = 1.532 \text{ MeV}$

Auch für die exotherme Reaktion 52. braucht das Proton ( $H$ ) eine minimale kinetische Energie. Es muss sich nämlich gegen das abstoßende Coulombpotential des Lithiumkerns durchsetzen. Berechnen Sie diese Minimalenergie. Die Kerne nähern sich an, bis sie sich "berühren" (siehe Berechnung der Kernradien), dann schnappt die Kernkraft zu und das Proton wird vom Lithiumkern verschluckt.  $\textcircled{R} \quad E_{kin, H} = 1.2 \text{ MeV}$

# Kernspaltung - Nuclear Fission

Eine wichtige Klasse von Kernreaktionen ist der **Neutroneneinfang**. Durch Neutronenbeschuss eines (stabilen) Kerns bei gelegentlichem **Beta** Zerfall kann seine Massenzahl (Anzahl Nukleonen) um bis zu 25 erhöht werden. So wurden auch die nicht natürlich vorkommenden, radioaktiven Transurane wie das *Curium* oder *Californium* erzeugt.

Der Neutronenbeschuss von  $^{238}U$  (99.3 %) oder  $^{235}U$  (0.7 %) führt zu deren Spaltung in kleinere **Fragmente** (Spaltprodukte). Für die Spaltung von  $^{238}U$  müssen die Neutronen schnell sein, langsam dagegen für die Spaltung von  $^{235}U$ . Genau genommen zerfällt nicht  $^{235}U$ , sondern das hoch angeregte  $^{236}U^*$ , und zwar gemäß zwei typischen Varianten:



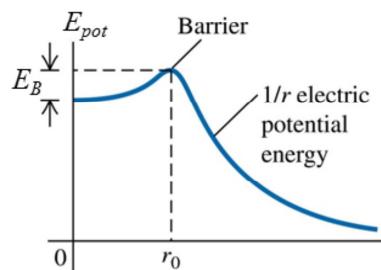
Tröpfchenmodell der Spaltung: Der hoch angeregte Kern  $^{236}U^*$  oszilliert heftig (b), so dass die Coulomb-Abstossung überhand nehmen kann, bis zur Durchschnürung (d) und Spaltung (e).

Das Element Uran wurde 1789 vom Apotheker Martin Heinrich Klaproth (1743 - 1817) entdeckt. Ein gutes Jahrhundert lang waren lediglich die gelben, orangen und braunen Oxide des Urans zum Färben von Glas und Keramik von bescheidenem Nutzen.

Uran kommt in der Erdkruste 1000 Mal häufiger vor als Gold. Die Urankonzentration beträgt etwa 4 g pro Tonne Erdkruste. Uran reichert sich auch in Phosphatlagerstätten und in Kohle, insbesondere Braunkohle an. Das ist der Grund, warum Kohlekraftwerke weit mehr Radioaktivität abgeben als Kernkraftwerke! Mit den Phosphatdünger gelangt radioaktives Uran auf die Äcker.

Eine Zeit lang hat man Stiftzähne mit Uranoxid auf den natürlichen, schwach gelblichen Ton eingefärbt. Das hat den Trägern der Zähne offenbar nicht geschadet. Uran ist ein schwacher Alphastrahler (kleine Aktivität).

(Quelle: "Die Chemischen Elemente" von Lucien F. Trueb, S. Hirzel Verlag)



Die Sequenz (a) bis (e) des Tröpfchenmodells kann quantitativ etwa wie in der Grafik links dargestellt werden. Es handelt sich um die potentielle Energie  $E_{pot}$  als Funktion des Abstandes  $r$  der beiden Fragmente.  $E_B$  könnte man als Bindungsenergie der beiden Fragmente bezeichnen. Wird durch den Beschuss eines Neutrons mehr Energie als  $E_B$  zugeführt, zerfällt der Kern sofort. Ist die zugeführte Energie nicht ganz so gross wie  $E_B$ , wird zumindest die Tunnelwahrscheinlichkeit stark erhöht.

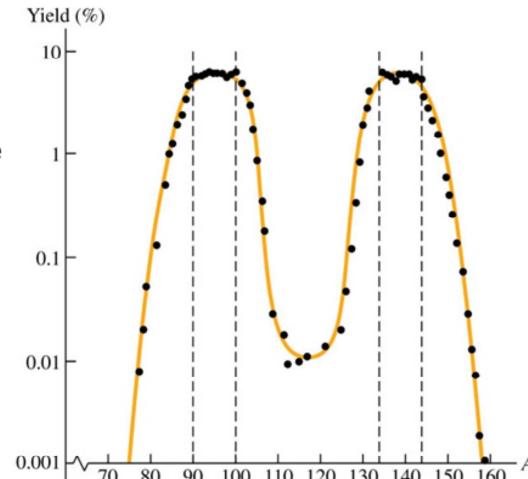
**55.** Berechnen Sie den Gewinn an kinetischer Energie der Spaltprodukte für die Reaktionen auf der vorangehenden Folie. ® 173 MeV

Die atomaren Massen und die Reaktionsenergie können auf folgender Seite gefunden werden:

[www.nndc.bnl.gov/qcalc/](http://www.nndc.bnl.gov/qcalc/) Geben Sie dort beispielsweise  $140Xe$  als "Target" ein. #)

Viele ähnliche Fissionsreaktionen von Uran werden beobachtet. Das Diagramm zeigt die Häufigkeit der Spaltprodukte von  $^{236}U^*$  als Funktion der Massenzahl  $A$ .

**56.** Wie interpretieren Sie die Verteilung?



#) Prüfen Sie ihr Resultat auf der Seite [www.nndc.bnl.gov/qcalc/](http://www.nndc.bnl.gov/qcalc/) durch folgende Eingabe:

<input type="text" value="Target(s) 235U"/> 56fe, Fe56, 26056, cr50-fe56 use dash for range only	<input type="radio"/> Uncertainties <input checked="" type="radio"/> Standard style <input type="radio"/> Nuclear Data Sheets style
<input type="text" value="Projectile n"/> 4He, He-4, 2-he-4, a, alpha, 2004	<input type="text" value="E&lt;sub&gt;lab&lt;/sub&gt; (MeV)"/>
<input type="text" value="Ejectile 44Ba+89Kr+3n"/> <small>g, n, n+p, 2n+a, 2a+12c (reaction)            b-, ec, 2b-, b-n, ecp, 18O (decay)</small>	<small>← Eingabe: 144Ba+89Kr+3n</small>

### Reaction Q-values for $^{235}\text{U} + \text{n}$

Reaction Products	Q-value (keV)	Threshold (keV)
$\gamma + ^{144}\text{Ba} + ^{89}\text{Kr} + 3\text{n}$	173273.4 53.5	0.0 0.0

respektive:

<input type="text" value="Target(s) 235U"/> 56, 26056, cr50-fe56 use dash for range only	<input type="radio"/> Uncertainties <input checked="" type="radio"/> Standard style <input type="radio"/> Nuclear Data Sheets style
<input type="text" value="Projectile n"/> <small>-he-4, a, alpha, 2004</small>	<input type="text" value="E&lt;sub&gt;lab&lt;/sub&gt; (MeV)"/>
<input type="text" value="Ejectile 40Xe+94Sr+2n"/> <small>a, 2a+12c (reaction)            -n, ecp, 18O (decay)</small>	<small>← Eingabe: 140Xe+94Sr+2n</small>

### Reaction Q-values for $^{235}\text{U} + \text{n}$

Reaction Products	Q-value (keV)	Th
$\gamma + ^{140}\text{Xe} + ^{94}\text{Sr} + 2\text{n}$	184680.6 61.0	

Das stabile Neutron-Proton Verhältnis ist  $N/Z = 1$  für leichte Kerne ( $\approx He$ ), etwa 1.3 für  $A = 100$  ( $\approx Ru$ ), 1.4 für  $A = 150$  ( $\approx Sm$ ) und etwa 1.6 für die schwersten Kerne ( $\approx U$ ). Die Spaltprodukte haben folglich zu viele Neutronen und sind deshalb instabil. Sie machen eine Reihe von *Beta* Zerfällen durch, beispielsweise:



**57.** Bestimmen Sie die Fortsetzung der *Beta* Zerfälle.

Das letzte Element in der *Beta* Zerfallsfolge ist stabil. Die Serie produziert noch einmal etwa 15 MeV kinetische Energie zusätzlich.

Nochmals der wichtige Unterschied:

**Radioaktivität:** Spontaner Zerfall instabiler Isotope wie  ${}^{14}C$ . Der Zerfall erfolgt echt zufällig. Die Hälfte der radioaktiven Kerne ist nach der charakteristischen Halbwertszeit  $T_{1/2}$  zerfallen.

**Kernreaktion:** Erzwungene Umwandlung der Kerne, beispielsweise durch Beschuss mit Neutronen. Die neu entstehenden Kerne können allerdings radioaktiv sein und spontan weiter zerfallen.

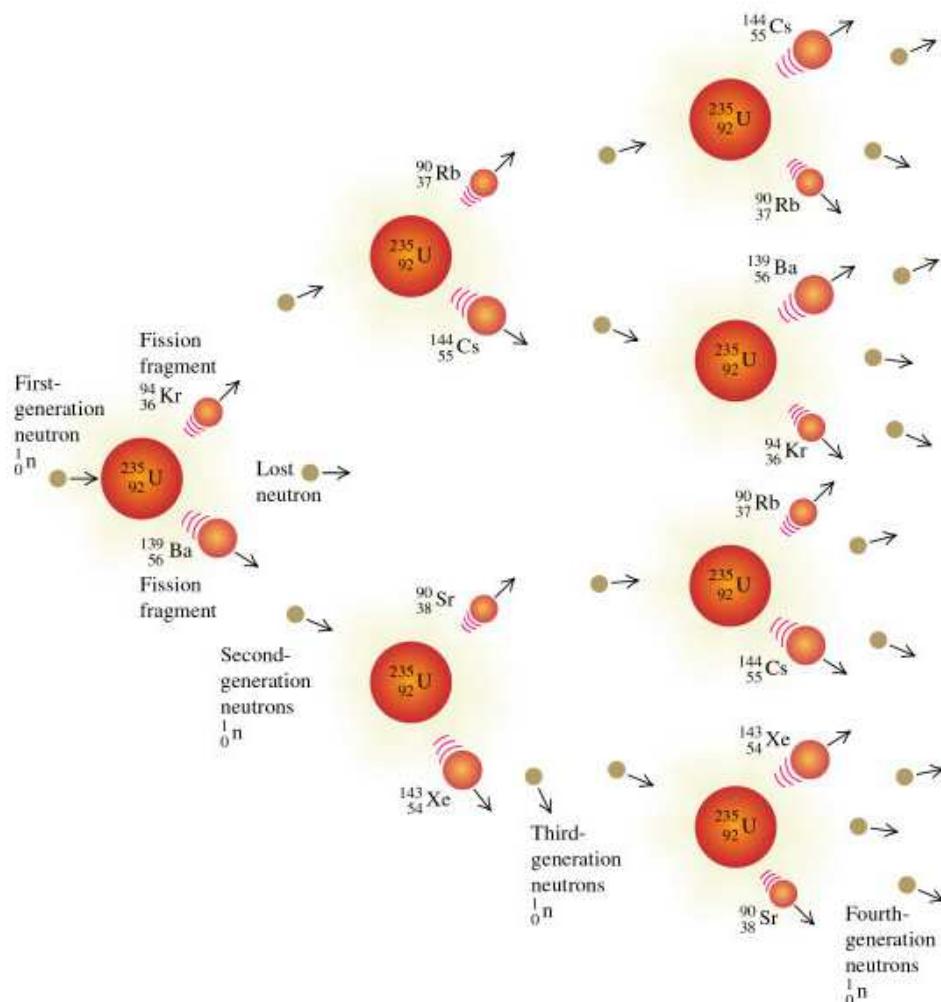
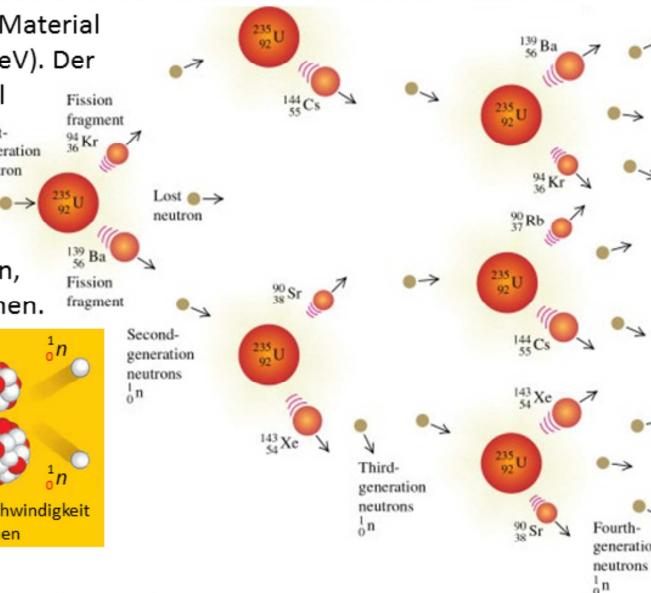
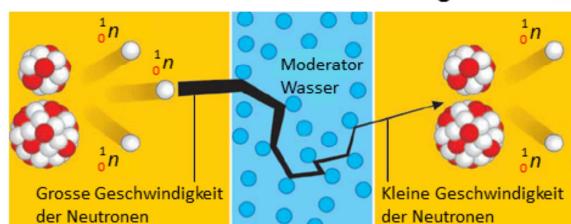
Der Neutronenbeschuss kann also die Uranspaltung bewirken. Bei der Spaltung werden zwei bis drei Neutronen frei gesetzt. Diese können ihrerseits eine Kernspaltung anregen. Diese **Kettenreaktion** kann bei geeigneter Kontrolle langsam ablaufen (Kernkraftwerk), oder in Form einer Explosion (Bombe). Die bei einer nuklearen Kettenreaktion gewonnene Energie ist gewaltig, mehrere Millionen mal grösser als bei einer chemischen Reaktion, beispielsweise einer Verbrennung. Beispiel:

Die Oxidationsenergie von  $U + O_2 \rightarrow UO_2$  ist 11.1 eV pro Uranatom (siehe Aufgabe 20)

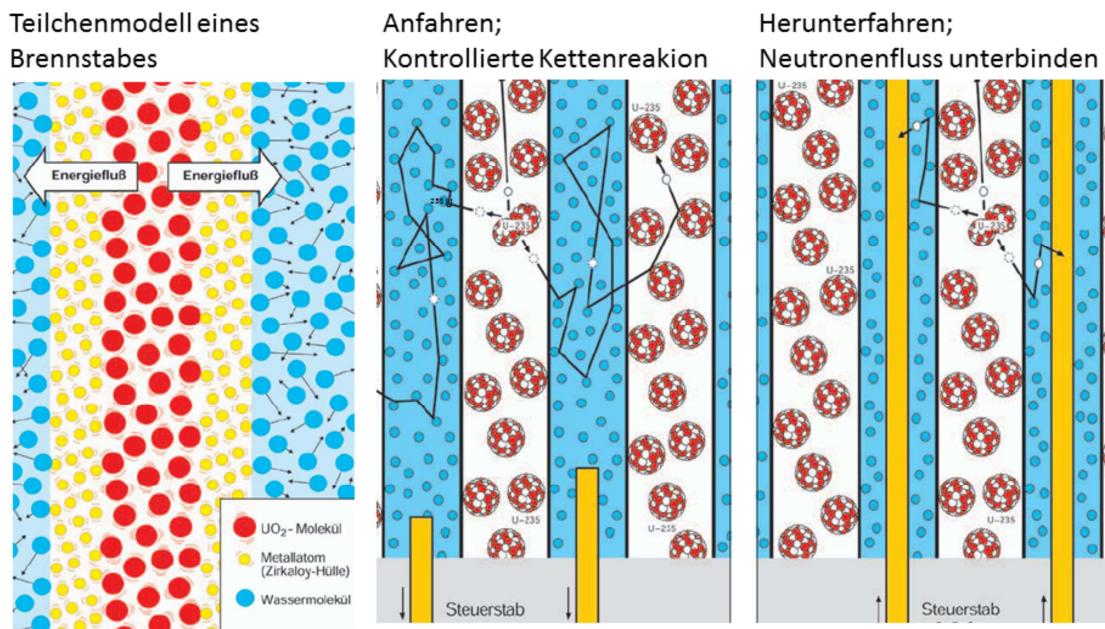
Die Reaktionsenergie von  ${}^{235}U + n \rightarrow {}^{144}Ba + {}^{89}Kr + 3n$  ist etwa 200 MeV pro Uranatom

# Nukleare Kettenreaktion

Pro Spaltung von  $^{235}\text{U}$  werden im Mittel 2.5 schnelle Neutronen frei gesetzt. 1 Neutron würde genügen, um die Kettenreaktion aufrecht zu erhalten. Der Überschuss an Neutronen und deren Geschwindigkeit erlaubt die Kontrolle der Reaktion. Die schnellen Neutronen (etwa 1 MeV) werden im umgebenden Material gebremst (am besten auf weniger als 1 eV). Der **Moderator** ist meist Wasser (manchmal Graphit). Die Anzahl der Neutronen wird mit **Kontrollstäben** auf etwa 1 pro Spaltung gehalten. Die Kontrollstäbe bestehen aus Bor oder Kadmium. Diese absorbieren Neutronen, ohne selber eine Kernreaktion einzugehen.



# Reaktionskontrolle via Neutronenfluss



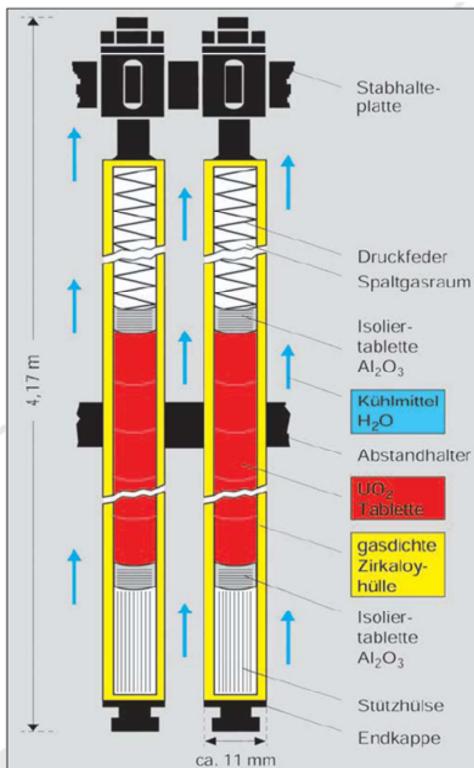


Abb. 7.6: Längsschnitt durch einen Brennstab  
(Prinzipdarstellung)

### 7.3.1 Brennstab

Für die Kernspaltung in Leichtwasserreaktoren wird heute fast ausschließlich Uran-235 verwendet. Es ist in dem in der Natur vorkommenden Uran mit einem Anteil von etwa 0,7 % enthalten. Dieser Anteil wird in dem sog. Kernbrennstoff auf 2 bis 4 % angereichert.

In Abb. 7.6 ist der Aufbau zylinderförmiger Brennstäbe im Längsschnitt wiedergegeben. Die Stäbe haben z. B. bei einem der heute üblichen Siedewasserreaktoren eine Länge von 4,17 m und einen äußeren Durchmesser von ca. 11 mm. Die Umhüllung besteht aus Zirkaloy (Zirkonium-Legierung) mit einer Wandstärke von 0,65 mm. Das Material der Brennstäbe soll den Kernbrennstoff vom Kühlmittel des Primärkreislaufes trennen und außerdem verhindern, dass die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte in das Kühlmittel gelangen. Weitere Anforderungen sind mechanische Festigkeit, Korrosions- und Hitzebeständigkeit sowie eine geringe Neigung zur Neutronenabsorption.

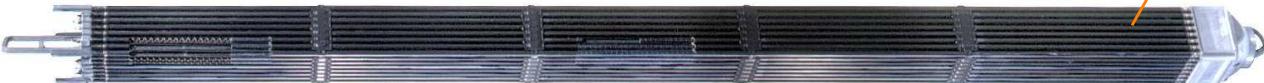
Die aus Urandioxid ( $\text{UO}_2$ ) gepressten, gesinterten (durch Erhitzen zusammengebackenen) und geschliffenen Pellets werden in das mit Endkappen verschlossene Rohr eingebracht. Eine Druckfeder drückt von oben auf die Pellets und hält sie in einer Säule fest zusammen. Dadurch wird gleichzeitig oberhalb des Kernbrennstoffes ein Raum für die bei der Kernspaltung entstehenden Edelgase und die leicht flüchtigen Spaltprodukte geschaffen. Der Spaltgasraum verhindert somit ein unzulässiges Anwachsen des Gasdruckes im Brennstoff bei der sehr starken Erwärmung.

Eine größere Anzahl von Brennstäben wird zu einem quadratischen Brennelement mit Hilfe von Abstandhaltern zusammengefasst. Beim Kernkraftwerk Krümmel sind 72 Brennstäbe in einem Element angeordnet (Abb. 7.7). Insgesamt befinden sich bei diesem Kernreaktor 840 Brennelemente mit einer Gesamtmenge von 150 t Urandioxid im Reaktorkern. Das als Kühlmittel und Moderator dienende Wasser strömt von unten an den durch die Kernspaltung erhitzen Brennstäben vorbei und führt somit die Wärme ab.

Uranoxid-Pellets

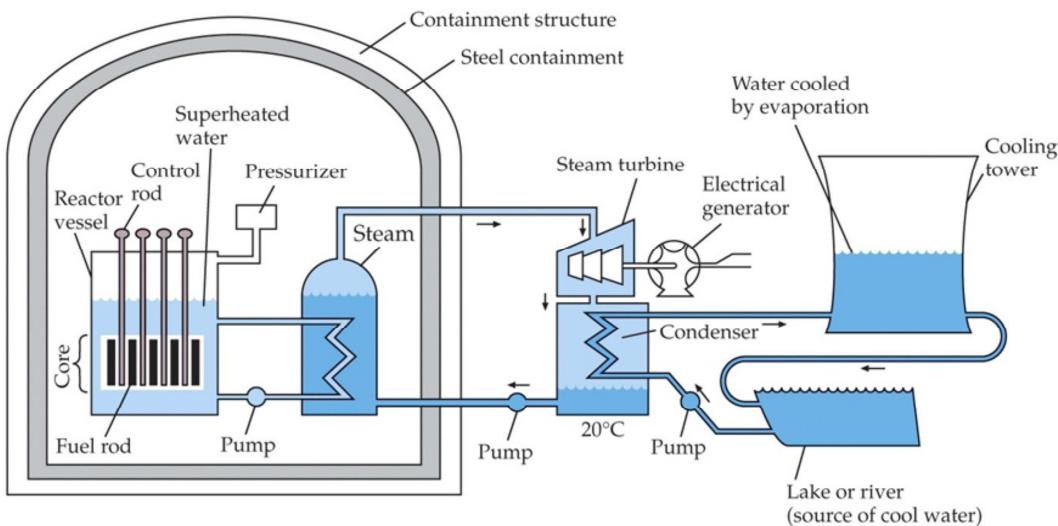


Hüllrohre (Brennstäbe)  
eines Brennelements



Brennelement

# Kernkraftwerk



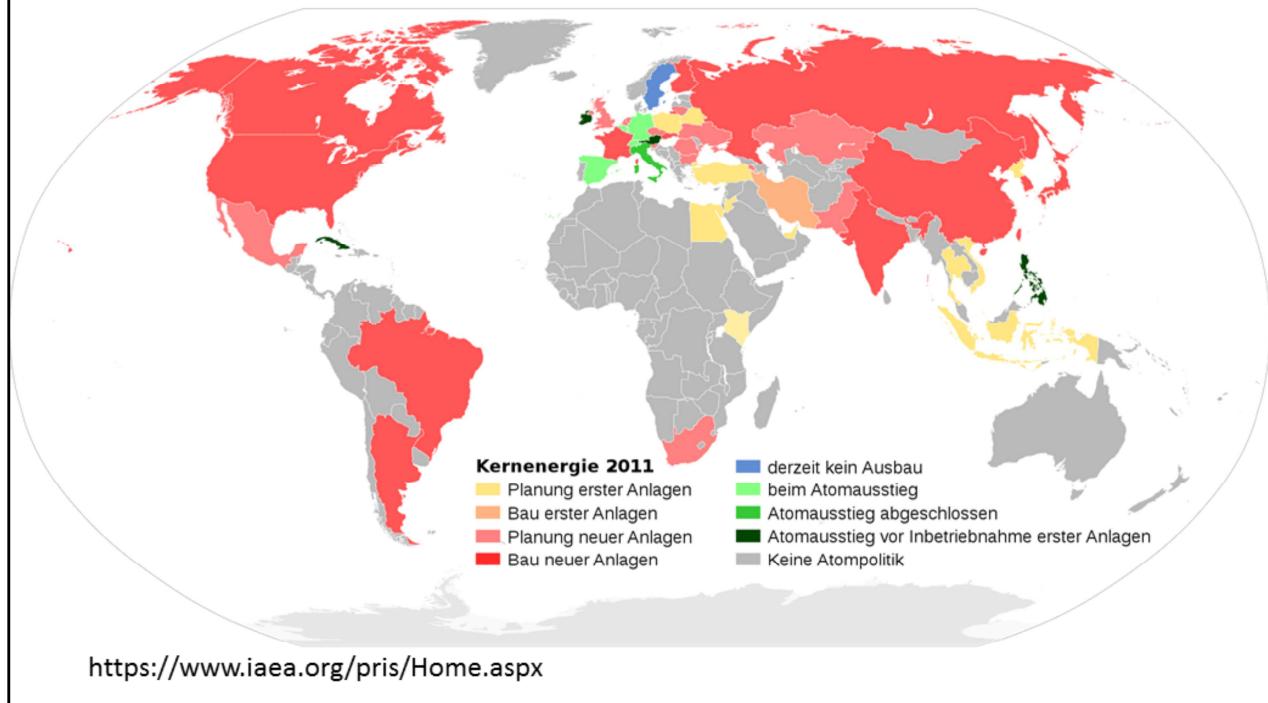
**58.** Studieren Sie das Schema, insbesondere die drei entkoppelten Wasserkreisläufe.

**59.** Welche Masse Uran muss jeden Tag gespalten werden, um ein 1000 MW Kernkraftwerk zu betreiben? ® 1 kg ; Ein 1000 MW Kohlekraftwerk braucht etwa 3'300 t Kohle pro Tag.

Kernkraftwerke liefern rund 40% des Schweizer Strombedarfs. Sie verursachen den grössten Teil der radioaktiven Abfälle. Jährlich werden aus den 5 Reaktoren etwa 60–75 Tonnen verbrauchter Brennelemente entladen. Das ist hochaktiver Abfall.

Während des Betriebs und nach der Stilllegung – also beim Abbruch der Kernkraftwerke – entstehen auch schwach- und mittelaktive Abfälle. Diese entstehen aber auch in Medizin, Industrie und Forschung.

## Kernkraftwerke der Welt

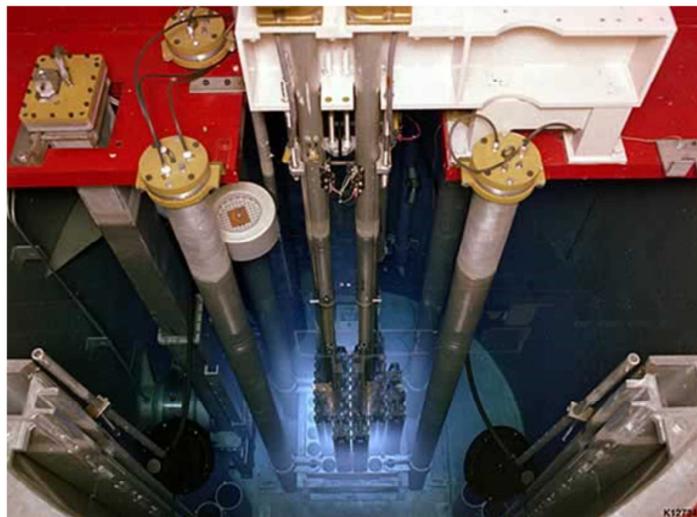


## Tscherenkov Strahlung

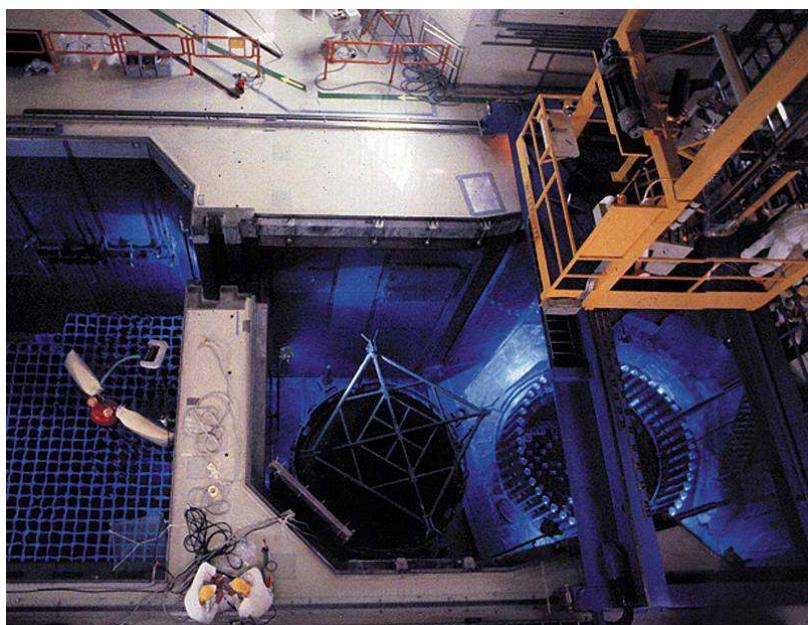
Die blaue Tscherenkovstrahlung im Reaktorwasser von "Triga" entsteht beim Durchgang geladener Teilchen durch ein Dielektrikum. Die Teilchengeschwindigkeit muss dabei grösser sein als die Lichtgeschwindigkeit. Die Tscherenkovstrahlung ist ein Interferenzphänomen und kann ähnlich wie die Schockwelle beim Überschallflug eines Jets erklärt werden.

**60.** Um welche schnellen Teilchen handelt es sich wohl?

**61.** Wie kann eine Teilchengeschwindigkeit grösser als die Lichtgeschwindigkeit werden?



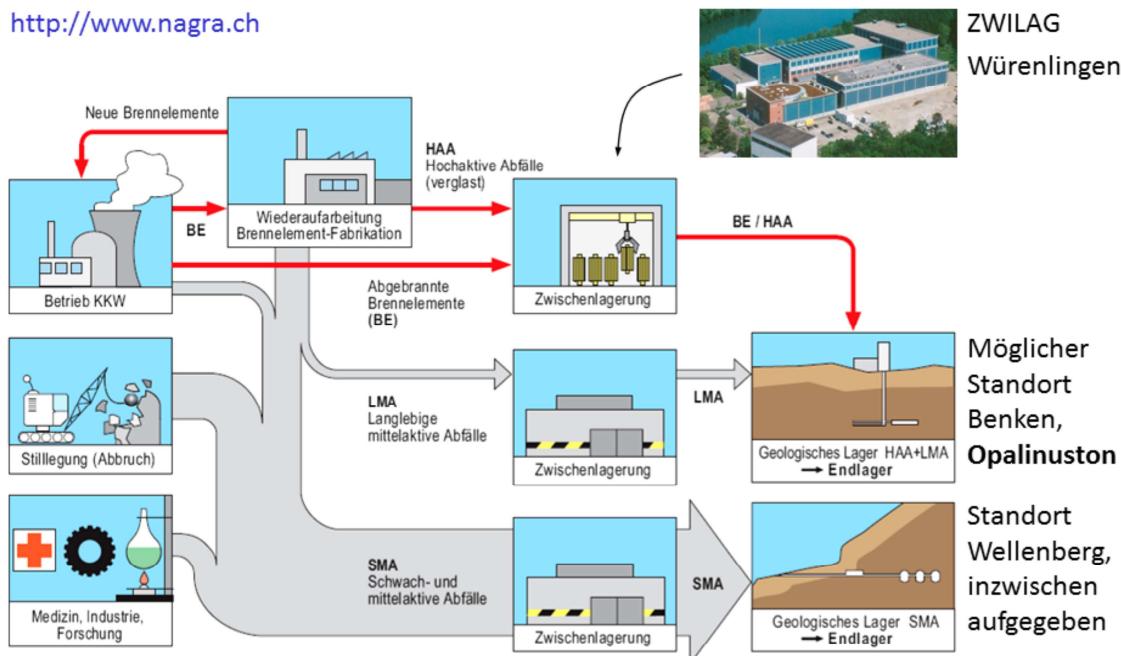
Brennstabwechsel im Kernkraftwerk Gösgen.



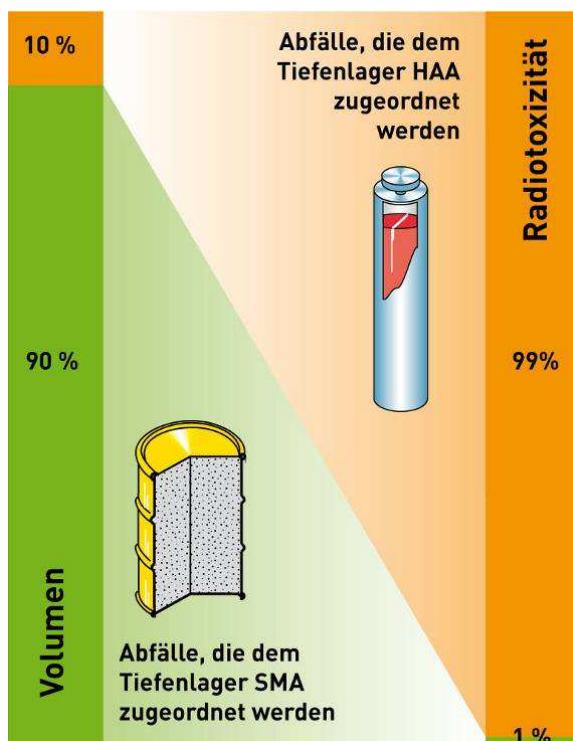
Nach circa 4 bis 6 Jahren Einsatz im Reaktor ist das angereichert Uran «erschöpft». Die «abgebrannten» Brennelemente werden ersetzt und sind nun hochaktiver Abfall.

# Konzept der nuklearen Entsorgung CH

<http://www.nagra.ch>



Die Dicke der Pfeile oben symbolisiert die Volumenverhältnisse der entsprechenden Abfallflüsse.



## Abfallmengen heute (Stand Ende 2007)

Bei den Kernkraftwerken	3 455 m <sup>3</sup>
In den Lagerhallen der Zwilag AG	920 m <sup>3</sup>
Im Bundeszwischenlager (Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung)	1 385 m <sup>3</sup>

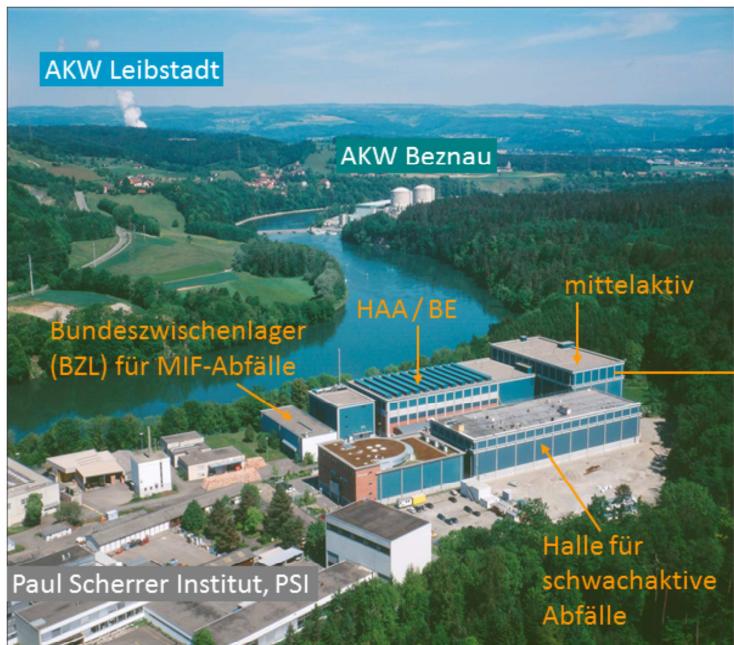
## Prognose

(Verpackt, Betriebsdauer der Kernkraftwerke 50 Jahre)

BE und verglaste HAA	ca. 7 300 m <sup>3</sup>
SMA aus Betrieb und Abbruch der 5 KKW	ca. 60 000 m <sup>3</sup>
SMA aus Medizin, Industrie und Forschung	ca. 33 000 m <sup>3</sup>
Gesamtmenge	ca. 100 000 m <sup>3</sup>

BE = Verbrauchte Brennelemente  
HAA = Hochaktive Abfälle  
SMA = Schwach- und mittelaktive Abfälle

## ZWILAG Würenlingen



Zentrales Zwischenlager der Schweiz, ZWILAG, für alle Kategorien radioaktiver Abfälle, in der Gemeinde Würenlingen (AG), neben dem Paul Scherrer Institut (PSI).

Mittelaktivhalle des ZWILAG



## Radioaktive Abfälle



Schwach- und mittelaktive Abfallfässer werden für dieendlagerung in Betoncontainer einzementiert.

Radioaktive Abfälle entstehen zum grossen Teil in Kernkraftwerken, stammen aber auch aus Medizin, Industrie und Forschung. Ihre Aktivität klingt teilweise nur langsam ab. Sie müssen sorgfältig und für sehr lange Zeiten eingeschlossen werden. Das Risiko aus den Abfällen wird stark vermindert, indem diese in eine stabile, unlösliche Form überführt und kontrolliert zwischengelagert werden. Für die langfristig sichere Entsorgung werden geologische Tiefenlager geplant.



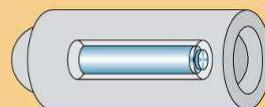
Verbrauchter Reaktorbrennstoff ist hochaktiver Abfall und wird in Castoren zwischengelagert.

### Sicherheitsbarrieren HAA



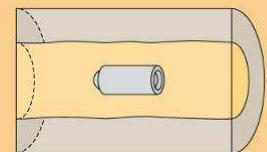
#### Abfallmatrix (Glas)

- Fixierung der Radionuklide in der Glasmatrix
- Kleine Glaskorrosionsrate



#### Endlagerbehälter

- Einschluss der Abfälle für mehrere tausend Jahre
- Danach: Begrenzung Wasserzutritt, Radionuklid-Rückhaltung (Sorption an Korrosionsprodukten)



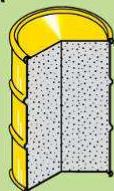
#### Verfüllung (Bentonit)

- Geeigneter Übergang zwischen Endlagerbehältern und Wirtsgestein
- Günstige Radionuklid-Rückhalteigenschaften
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der Endlagerbehälter

### Sicherheitsbarrieren SMA

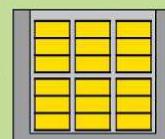
#### Abfallmatrix (diverse Materialien)

- Fixierung der Radionuklide in der Abfallmatrix
- Kleine Degradationsrate der Abfallmatrix



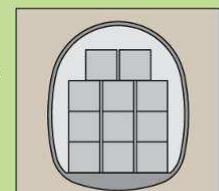
#### Endlagerbehälter

- Einschluss der Abfälle für eine beschränkte Zeit
- Danach: Begrenzung Wasserzutritt, Radionuklid-Rückhaltung (Sorption an Behältermaterialien und Korrosionsprodukten)



#### Verfüllung (Zementmörtel)

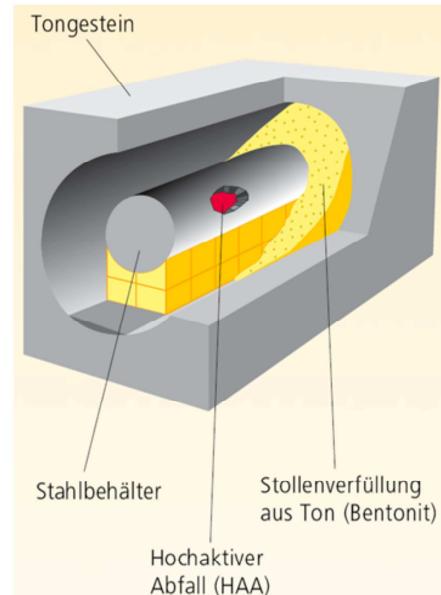
- Geeigneter Übergang zwischen Endlagerbehältern und Wirtsgestein
- Günstige Radionuklid-Rückhalteigenschaften
- Günstige Bedingungen für Langzeitstabilität der Endlagerbehälter



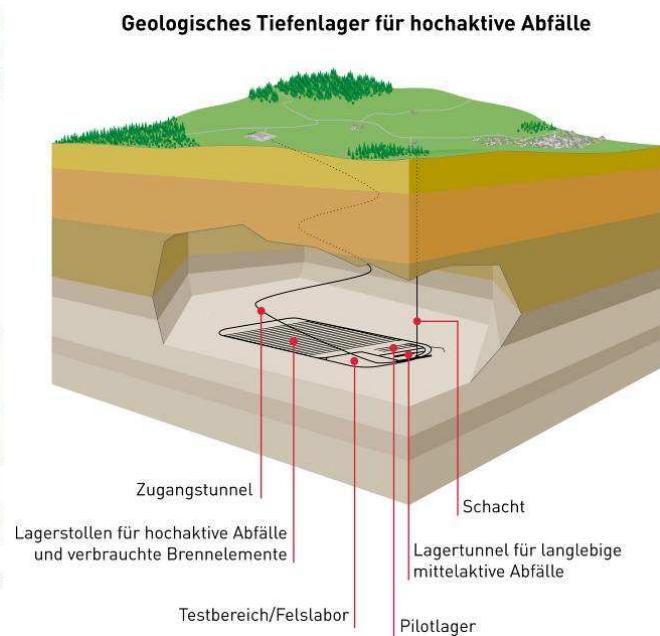
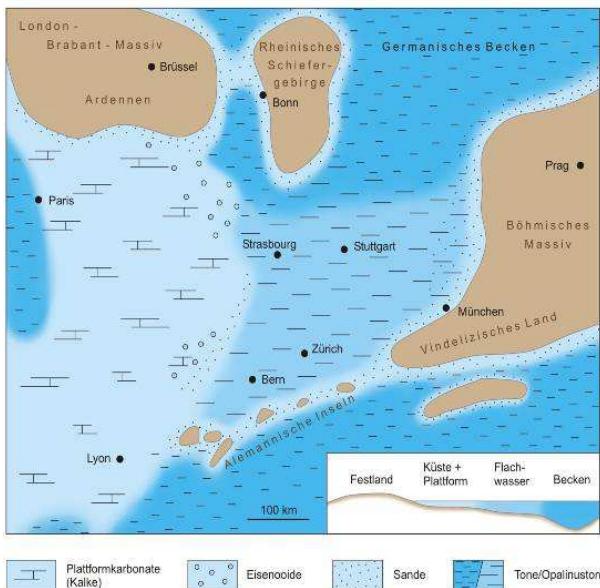
## Tiefenlager in Opalinuston



Das tonige Sedimentgestein Opalinus bekam seinen Namen von häufigen Fossilienfunden des Ammoniten "Leioceras opalinum". Ein rund 179 Millionen Jahre altes Exemplar wurde in einer Tiefe von 652 m mitten im Bohrkern der Bohrung bei Benken gefunden.



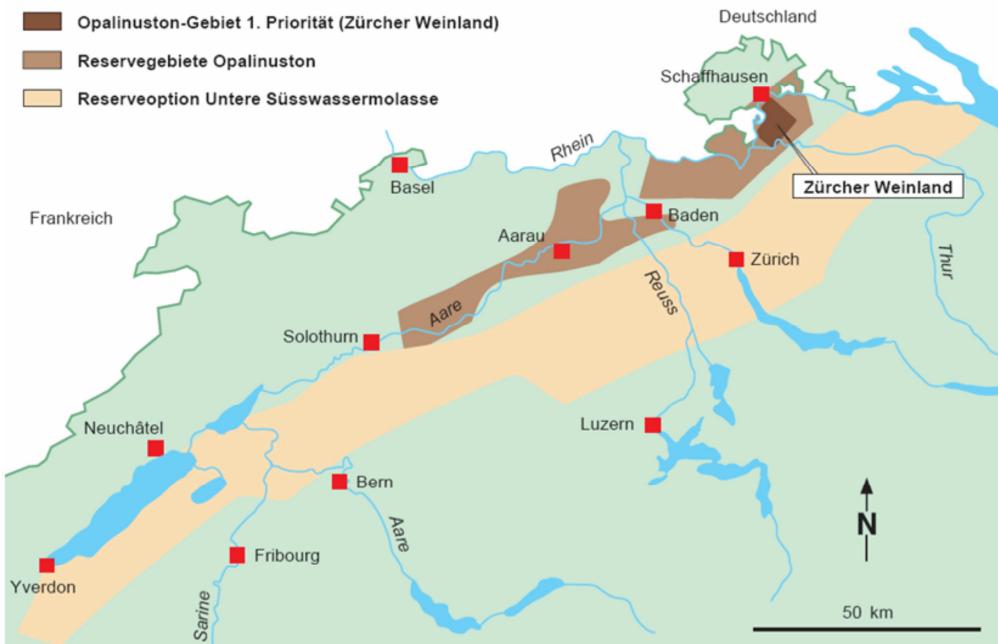
### 62. Warum gerade Opalinuston?



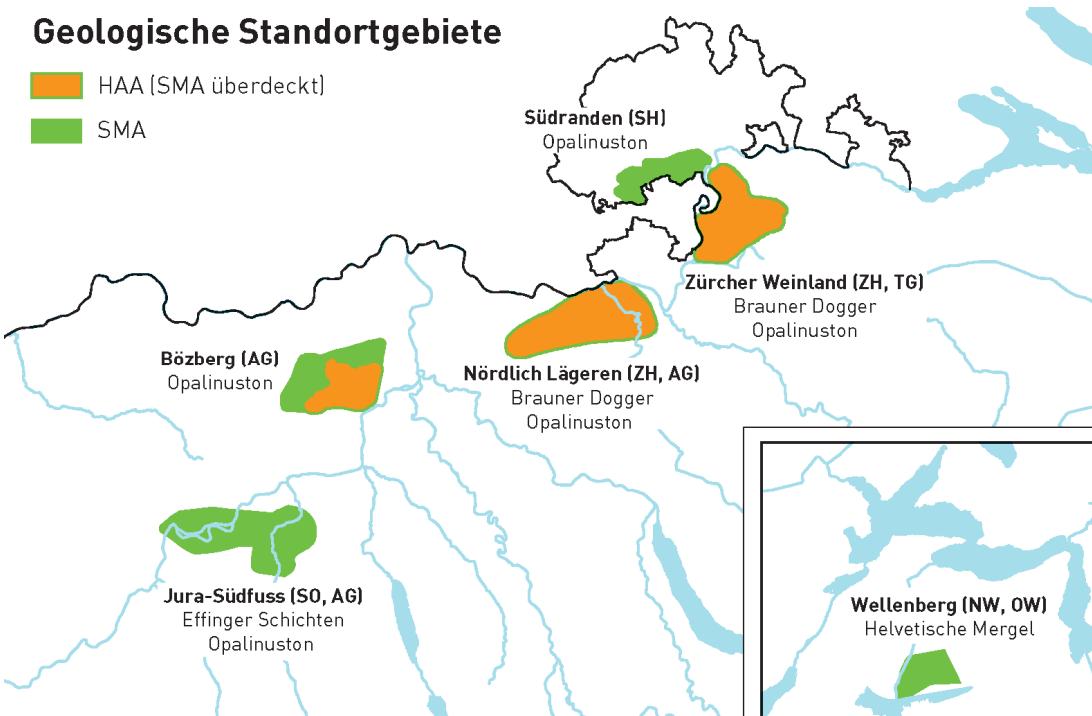
Der Opalinuston ist ein Tongestein aus der Jurazeit (Lias). Vor rund 180 Millionen Jahren entstand er in einem Meer, welches weite Gebiete des heutigen europäischen Festlandes bedeckte.

Der Opalinuston hat eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit und ist wegen seiner Quellfähigkeit «selbstabdichtend». Wasser bewegt sich im Opalinuston nicht oder nur sehr langsam. Weiter zeigt das Gestein günstige geochemische Eigenschaften für die Rückhaltung radioaktiver Stoffe und die Langzeitstabilität der technischen Barrieren.

# Opalinus Geologie der Schweiz



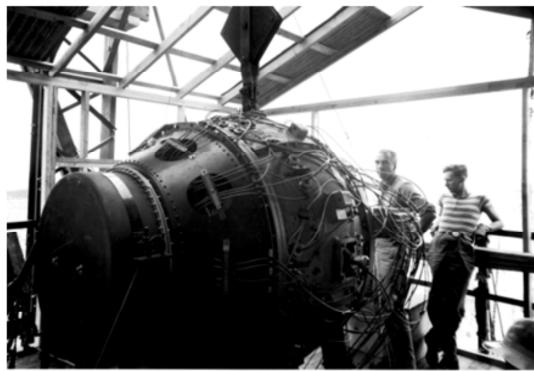
Von der Nagra im Oktober 2008 vorgeschlagene Standorte für die Tiefenlager.



Die Vorschläge wurden aus einer Fülle von Datenmaterial (Bohrungen, Seismik, Tunnelbauten, geologische Untersuchungen usw.) erarbeitet.

# Atombombe

Die Entwicklung der Atombombe wurde ab 1942 in Los Alamos, New Mexico unter dem Decknamen "Manhattan Projekt" vorangetrieben. Brillante Wissenschaftler (Fermi, Feynman, Bethe, ...) haben unter der Leitung des Physikers Julius Robert Oppenheimer und des Generals Leslie Richard Groves die erste Atombombe gebaut und am 16. Juli 1945 in der Nähe von Alamogordo (Trinity test site) gezündet.



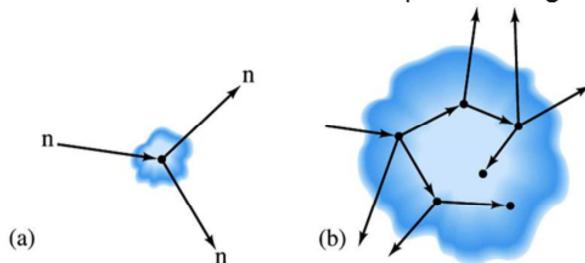
Die erste Bombe "the gadget" bereit zum Test.

Oppenheimer und Groves auf dem Testgelände, ein paar Wochen nach der Explosion von "Gadget".



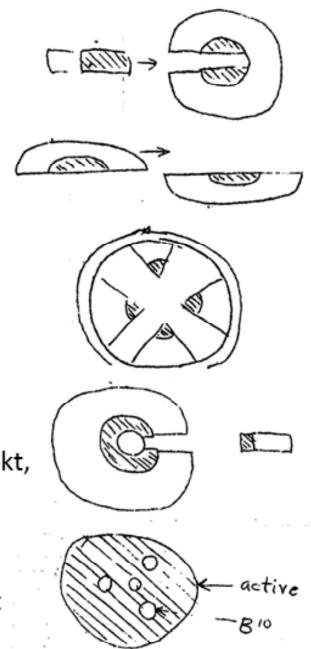
## Kritische Masse

Im Unterschied zum Kernreaktor läuft die Kettenreaktion in der Bombe in Sekundenbruchteilen ab. Das soll aber zu einem genau bestimmten Zeitpunkt geschehen. Wieder nutzt man die Neutronen als Kontrolleure der Reaktion. Ist ein "Uranklumpen" klein, entweichen die meisten Neutronen, ohne dass sie eine Spaltung bewirken können (a). Wird die kritische Masse Uran überschritten, lösen viele Neutronen wieder eine Spaltung aus und die Kettenreaktion kommt explosionsartig in Gang (b).



Für Kernwaffen verwendet man nahezu reines  $^{235}U$ , im Gegensatz zu Brennstäben für ein AKW (Anreicherung auf etwa 3 %).

Skizzen aus dem Manhattan Projekt, wie die kritische Masse im entscheidenden Moment erreicht werden könnte.



## Tod des legendären «Piloten von Hiroshima»

*Paul Tibbets ist im Alter von 92 Jahren gestorben*

Paul Tibbets war eine der letzten noch lebenden Persönlichkeiten des Zweiten Weltkrieges. Jetzt ist der ehemalige General gestorben. Er hatte das Flugzeug kommandiert, das Hiroshima mit einer Atombombe vernichtete.

### rdg. Washington, 1. November

Es war eine exotisch-warme Nacht über der Inselgruppe der Marianen im westlichen Pazifik, als sich die Männer für ihre Mission bereitmachten. Zusammen mit dem 30-jährigen Colonel Paul Tibbets bestiegen neun weitere Angehörige der amerikanischen Luftwaffe die am Rollfeld auf der Insel Tinian bereitstehende B-29. Die Ladung des viermotorigen Bombers hatten Spezialisten bereits vorher in ihrem Rumpf verstaubt. Es war «Little Boy», die erste militärisch einzusetzende Atombombe. Um 2 Uhr 30 in diesen frühen Morgenstunden des 6. August 1945 ließ Tibbets die Motoren der B-29 an und hob wenige Minuten später von der Startbahn auf Tinian ab. Des Colonels Flug in die Unsterblichkeit hatte begonnen, der Tod einer Stadt und der Eintritt in ein neues Zeitalter standen kurz bevor.



Tibbets am 6. August 1945 in der Enola Gay. NATIONAL ARCHIVES / REUTERS

NZZ, 2.11.2007

Hiroshima Bombe "Little Boy": 12.5 kT TNT  
Nagasaki Bombe "Fat Man": 22 kT TNT

### Schlüsselerlebnis mit zwölf

Paul Tibbets wurde am 23 Februar 1915 in Quincy im Bundesstaat Illinois geboren. Der Name seiner Mutter wurde durch ihn weltberühmt: Tibbets benannte die B-29, die er gen Hiroshima steuerte, nach ihr: Enola Gay. Der junge Tibbets hatte als Zwölfjähriger sein Schlüsselerlebnis. Einer der damals auf Jahrmärkten zur Unterhaltung des Publikums aeronautische Kunststückchen aufführenden Piloten suchte für seine Show über Südkalifornien einen Begleiter, der als Höhepunkt der Aufführung Schokoladenriegel in das staunende Publikum werfen sollte. Paul meldete sich – zum Verdruß seiner Eltern – für diesen Job, der ihm mehr als nur ein paar Cent einbrachte. Er weckte seine Leidenschaft für das Fliegen.

Auf Wunsch seiner Eltern begann der junge Tibbets das Studium der Humanmedizin. Er absolvierte ein Praktikum an einer Klinik für Geschlechtskrankheiten und nahm in seiner Freizeit Flugunterricht. Schließlich machte er seine Neigung zum Beruf: Er brach das Studium ab und trat in das Army Air Corps ein, den Vorläufer der späteren U.S. Air Force. Am 7. Dezember 1941 befand er sich auf einem Flug über dem Bundesstaat Georgia, als er im Radio die Nachricht vom japanischen Angriff auf Pearl Harbor hörte. Der Kriegseintritt der USA an jenem Sonntag legte den Grundstein zu Tibbets weiterer Karriere.

Als Pilot eines B-17-Bombers nahm Tibbets am 17. August 1942 am ersten bei Tageslicht geflogenen Angriff der in England stationierten Eighth Air Force auf den von Nazi-Deutschland besetzten europäischen Kontinent teil. Er war ein exzellenter Pilot – und ein Flieger, der Eindruck auf Vorgesetzte machte, wie auf General Dwight D. Eisenhower, den er in seiner Maschine mitfliegen ließ. Im September 1944 wurde Tibbets zu einer unter höchster Geheimhaltung gebildeten Einheit in Colorado Springs abkommandiert, der 509th Composite Group. Was genau ihre Aufgabe war, erfuhren die Männer erst kurz vor ihrem Einsatz und auch dann nur in Andeutungen.

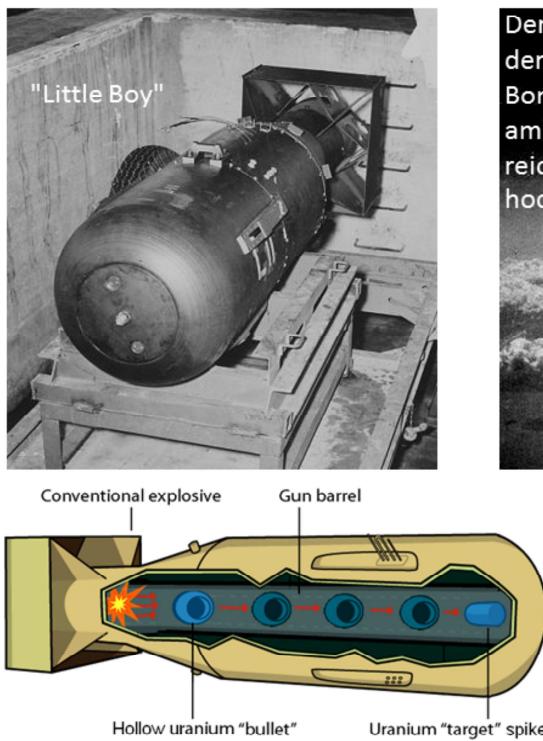
Die «Enola Gay» flog an jenem 6. August 1945 planmäßig in Richtung Hiroshima. Die Wolkendecke über der Stadt war so dünn, dass die Zielmarkierung, eine charakteristische Brückenstruktur

um der Detonation zu entkommen. 43 Sekunden nach dem Abwurf verspürte Tibbets ein Kribbeln in seinen Zähnen – die radioaktive Strahlung interagierte mit deren Füllungen. In Hiroshima kamen an diesem Tag wahrscheinlich 90.000 Personen ums Leben. Unzählige erlagen in den folgenden Monaten und Jahren den Spätfolgen. Die Vermutung der «Enola Gay»-Besatzung, dass die Japaner umgehend «das Handtuch werfen» würden, erfüllte sich nicht. Drei Tage später zerstörte eine zweite Atombombe die Stadt Nagasaki.

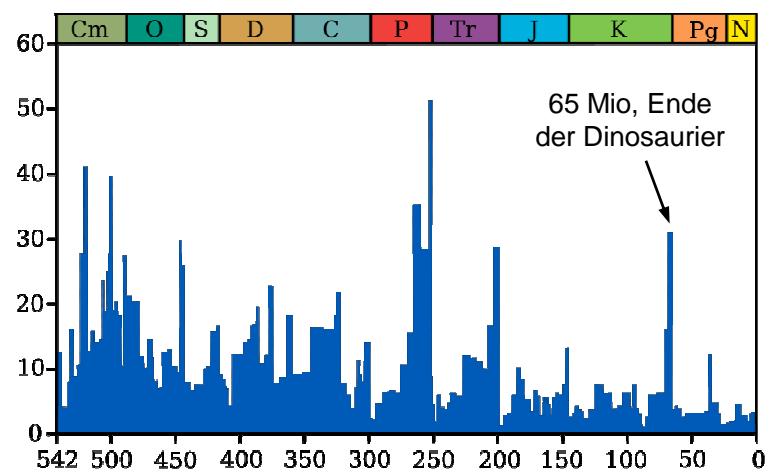
### Kein Gewissensbissen

Tibbets blieb auch nach Kriegsende in der Air Force, die er 1946 im Rang eines Brigadegenerals verließ. Danach wurde er zunächst Mitglied der Geschäftsführung des privaten Flugunternehmens Executive Jet Aviation. Später leitete er das überwiegend von gut ausgebildeten Geschäftsfreisen in Anspruch genommene Unternehmen. 1987 ging er endgültig in den Ruhestand, blieb jedoch hinter den Kulissen höchst aktiv, wenn es um die historische Bewertung des Angriffs auf Hiroshima ging. Als die Washingtoner Smithsonian Institution 1995 einen Teil der «Enola Gay» ausstellte (das Flugzeug steht heute voll restauriert im Udvar-Hazy Air and Space Museum nahe des Washingtoner Dulles Airport) und dabei eine stark opferzentrierte Präsentation wählte, sorgte Tibbets im Verbund mit anderen Veteranen für das vorzeitige Ende der als «unpatriotic» empfundenen Exposition. Bedauert hat er seinen Anteil an der Geschichte des Zweiten Weltkrieges nicht. Auf die Frage nach Gewissensbissen pflegte er stets mit «Hell, no» zu antworten. Nach seiner Interpretation wurde mit den Atombombenabwürfen das Leben von Hunderttausenden von GI gerettet, die sonst bei einer Invasion Japans ums Leben gekommen wären.

Tibbets, der am Donnerstag im Alter von 92 Jahren in Columbus verstarb, hat immer wieder betont, dass er weder ein Denkmal noch einen Grabstein wünsche. Seine Asche solle von einem Flugzeug aus über dem Meer verstreut werden. Diese Aufgabe übernimmt möglicherweise sein Enkel gleichen Namens. Lieutenant-Colonel Paul Tibbets IV fliegt einen B-2-Tarnkappenbomber und hat den Spitznamen «Nuke» – Atombombe.



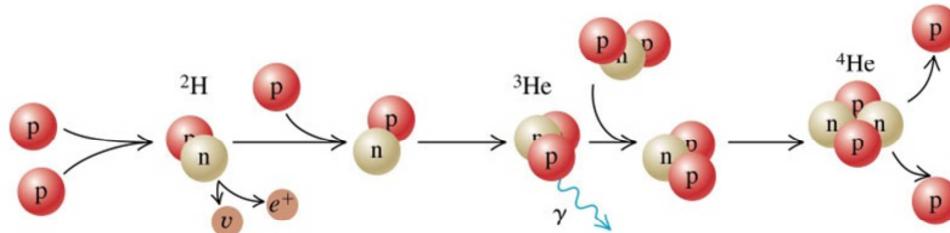
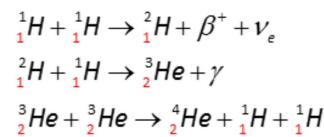
Ein Asteroid von 10 km Durchmesser hat vor 65 Mio Jahren im Golf von Mexiko die Erdoberfläche mit einer Geschwindigkeit von 32'000 km/h getroffen. Die Energie eines solchen Aufpralls entspricht etwa  $10^7$  Megatonnen TNT ( $8 \times 10^8$  Hiroshima Bomben). Es wird vermutet, dass dieser Einschlag mit seinen Folgeerscheinungen das Massenaussterben dieser Epoche eingeleitet hat. Die Figur unten zeigt die Aussterbe-Rate von Meerestieren in Prozent pro Zeitintervall über die vergangenen 542 Mio Jahren Erdgeschichte.



## Kernfusion - Nuclear Fusion

Zwei oder mehr kleine, leichte Kerne können verschmelzen und dabei eine grosse Menge Energie freisetzen aus dem gleichen Grund wie bei der Spaltung: Die Bindungsenergie pro Nukleon nach der Reaktion ist grösser als vorher.

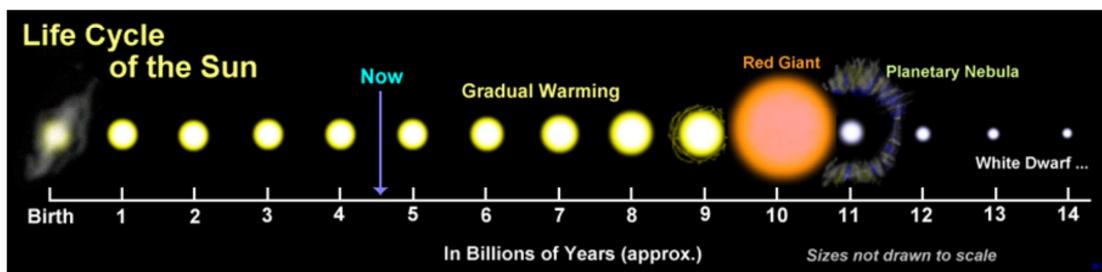
**63.** Prüfen Sie mithilfe der Massenbilanz, dass folgende Reaktionen exotherm sind. Alle drei zusammen bezeichnet man als **Proton-Proton-Reaktion**. Identifizieren Sie die Teilchen.



Die Nettobilanz der Proton-Proton-Reaktion ist also: Aus vier Protonen wird ein *Alpha* Teilchen, zwei Positronen, zwei Elektronen-neutrinos und zwei *Gamma* Teilchen. Der Massengewinn ist  $0.026503 \text{ u} = 24.69 \text{ MeV}$ . Dieser Prozess findet im Innern der Sonne statt. Die gesamte Strahlungsenergie der Sonne hat ihre Ursache in dieser Heliumerzeugung.

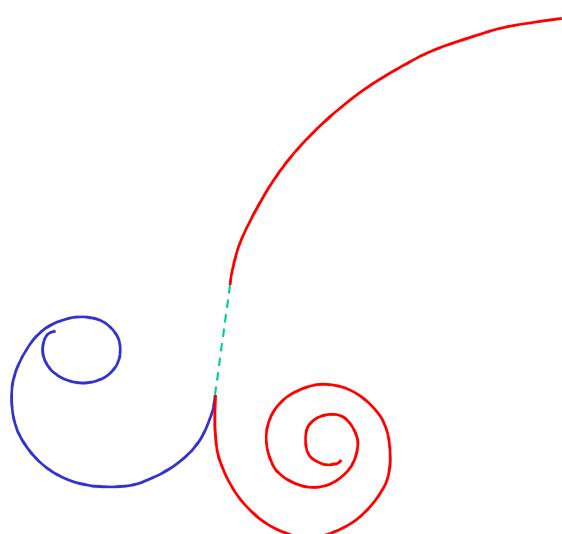
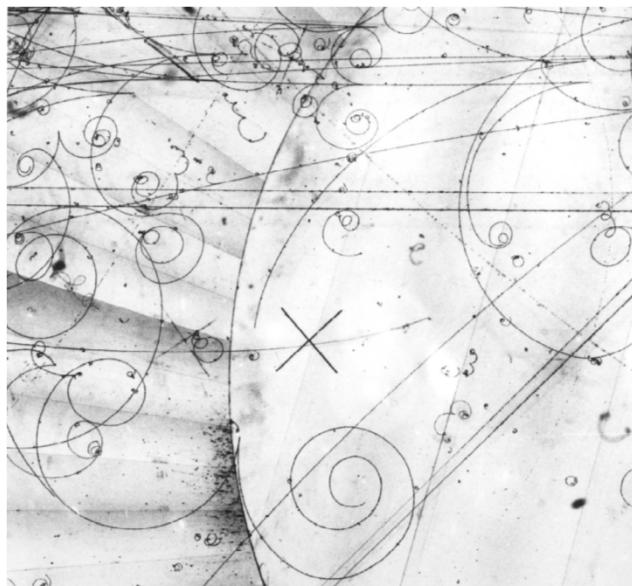
**64.** Die beiden Positronen  $\beta^-$ , die während der Reaktion erzeugt werden, finden in der neutralen Sonne zwei Elektronen und löschen sich aus (**annihilieren**). Die Annihilation eines Teilchens mit seinem Antiteilchen ist die vollständige Verwandlung ("Auftauen") von Masse in Energie. Vergleiche mit "Antimaterie im Alltag" in den Notizen auf Seite 20. Berechnen Sie den zusätzlichen Energiegewinn, wenn sich zwei Positronen und zwei Elektronen auslöschen. ® 2.044 MeV in Form von Strahlungsenergie

Jedes Gramm Sonnenmasse im Innern enthält etwa  $4.5 \times 10^{23}$  Protonen. Diese erzeugen durch Fusion etwa 130'000 kWh Energie. Würde die Sonne so weiterleuchten wie bisher, hätte sie ihren Protonenvorrat nach  $75 \times 10^9$  Jahren aufgebraucht. Für die Nukleosynthese (Kernfusion) ist eine hohe Aktivierungsenergie nötig. Das Wasserstoffbrennen zu Helium funktioniert nur dank extrem hohen Temperaturen im Innern der Sonne. Deshalb kann die Sonne nicht all ihre Protonen verbrennen und lebt nur noch etwa 4.5 Mia Jahre lang.



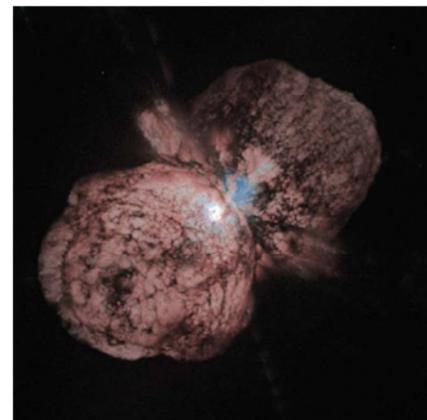
Das Bild unten wurde mithilfe einer Blasenkammer am FermiLab aufgenommen. Die Spuren entstehen, wenn sich geladene Teilchen einen Weg durch ein instabiles Gemisch aus Neon und Wasserstoff bahnen. Die Linien spiralen rechts oder links herum, weil sich die Teilchen in einem senkrechten Magnetfeld bewegen (Lorentzkraft). Sie verlieren an Energie, die Teilchen-Geschwindigkeit wird rasch kleiner.

Die interessante Spur (rot) beginnt oben rechts und stellt ein Positron dar. Seine Existenz kommt zu einem plötzlichen Ende, wenn es im Flug mit einem (ruhenden Atom-) Elektron annihiliert und ein Gamma-Photonen-Paar erzeugt (hinterlassen keine Spuren). Eines der Photonen (virtuell dargestellt als grün unterbrochene Linie) "materialisiert" etwas später wieder zu einem Positron (rot) und einem Elektron (blau).





Orionnebel: Hier entstehen aus Wasserstoffgaswolken junge, heiße Sterne; der Prozess der Fusion von Wasserstoff zu Helium setzt ein.



Gegen Ende ihrer Leuchtphase erzeugen schwere Sterne auch schwerere Atomkerne und stoßen das Material in Form von Wolken aus, hier: Nebel um den extrem massareichen Stern Eta Carinae, entstanden durch Eruptionen vor 100 bis 150 Jahren.

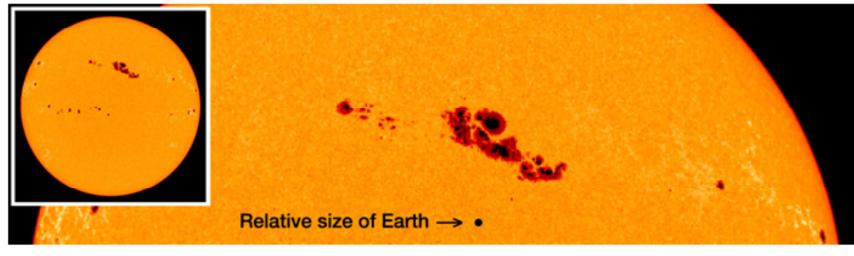
## Aktivierungsenergie

Zwei Kerne müssen sich für die Fusion so weit annähern, dass die starke Kernkraft wirksam wird, typischerweise auf etwa  $2 \times 10^{-15}$  m. Die potentielle Energie der Coulombabstossung zweier Protonen beträgt für diesen Abstand etwa  $1.2 \times 10^{-13}$  J oder 0.7 MeV. Jedes Proton benötigt also eine kinetische Energie von  $0.6 \times 10^{-13}$  J im Schwerpunktsystem. Die durchschnittliche kinetische Energie von Teilchen bei der Temperatur  $T$  beträgt  $\frac{3}{2} k_B T$ .

**65.** Berechnen Sie die Temperatur, bei der die Protonen im Durchschnitt eine kinetische Energie von  $0.6 \times 10^{-13}$  J haben. ®  $3 \times 10^9$  K

Auch bei tieferer Temperatur ist eine Annäherung von Protonen möglich, da die Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung immer auch überdurchschnittlich hohe Energien zulässt. Im Zentrum der Sonne herrscht eine Temperatur von nur  $1.5 \times 10^7$  K. Die Annäherung von Kernen ist in der Sonne wenig wahrscheinlich. Der

**thermo-nukleare**  
Prozess läuft  
langsam ab und  
dauert mehrere  
Milliarden Jahre.



Sonnenflecken sind kälter als die Umgebung und erscheinen dunkler.

Die Sonnenflecken sind ein Mass für die Intensität der Sonnenstrahlung. In den Jahren 1650 bis 1700 wurden kaum Sonnenflecken beobachtet und es herrschte eine kleine Eiszeit ("Maunder Minimum", siehe Seite 43).

## Kernfusion auf der Erde

Das Kopieren des thermonuklearen Prozesses, d.h. kontrollierte, andauernde Reaktion ist wegen der Notwendigkeit hoher Temperaturen sehr schwierig. Bei den entsprechenden Temperaturen sind die leichten Atome vollständig ionisiert und man nennt diesen Zustand der Materie **Plasma**. Mit geeigneten magnetischen Feldern gelingt der Einschluss eines solchen Plasmas (ITER, <http://www.iter.org/> ). Eine andere Möglichkeit ist der Beschuss von Pellets des Fusionsmaterials mit Hochleistungslasern (Inertial Confinement Fusion).



Die 10 Strahllinien des Nova Laser Systems in LLNL

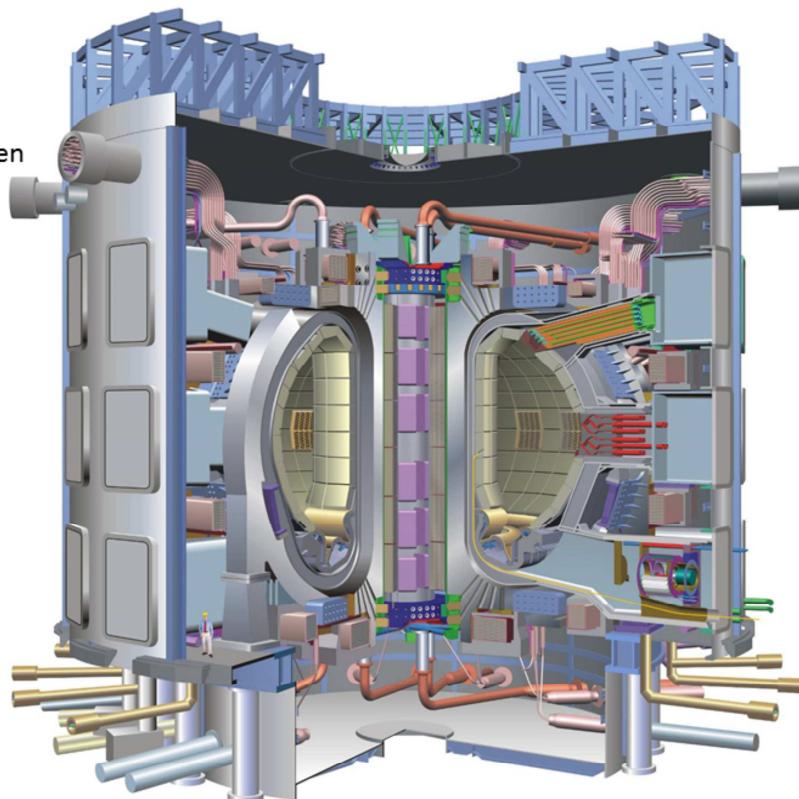


Diese Mikrokapsel kann mit Deuteriumgas gefüllt werden

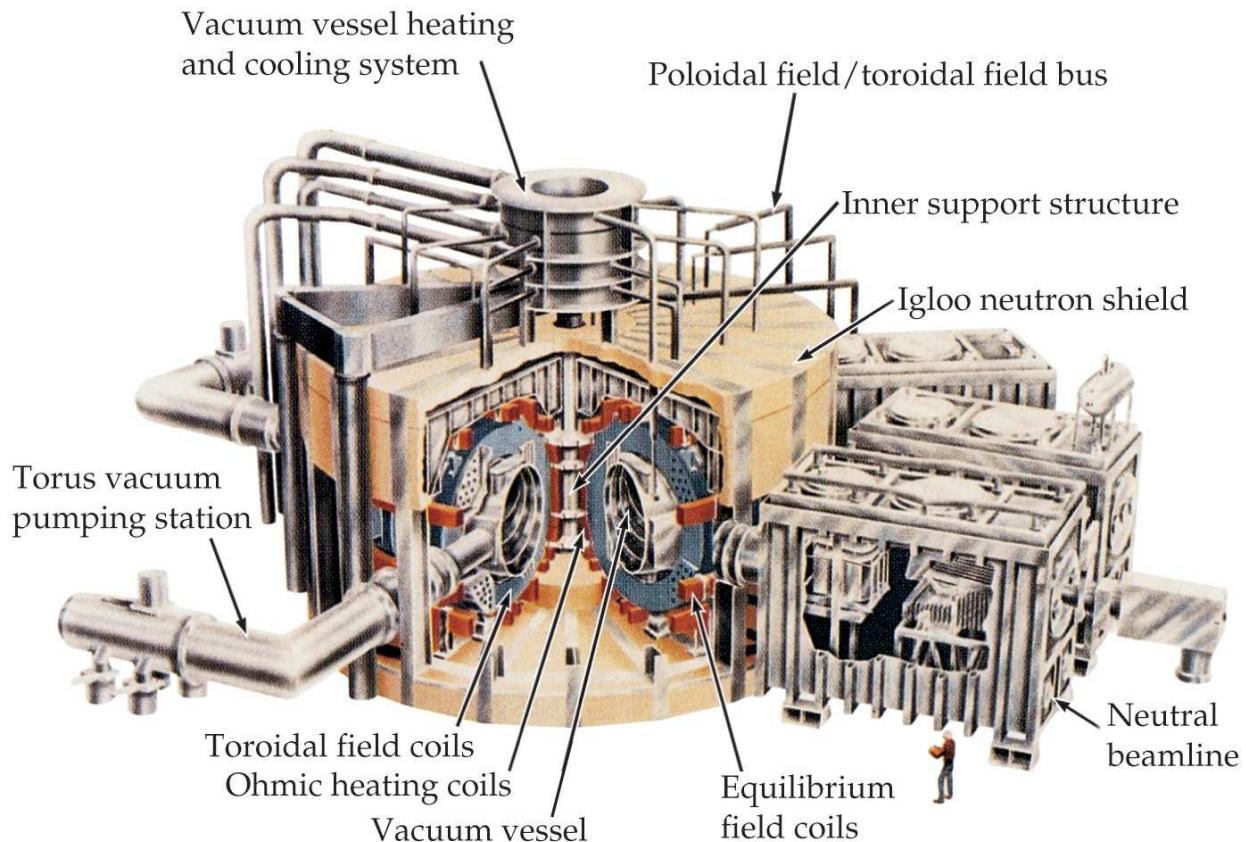
LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory

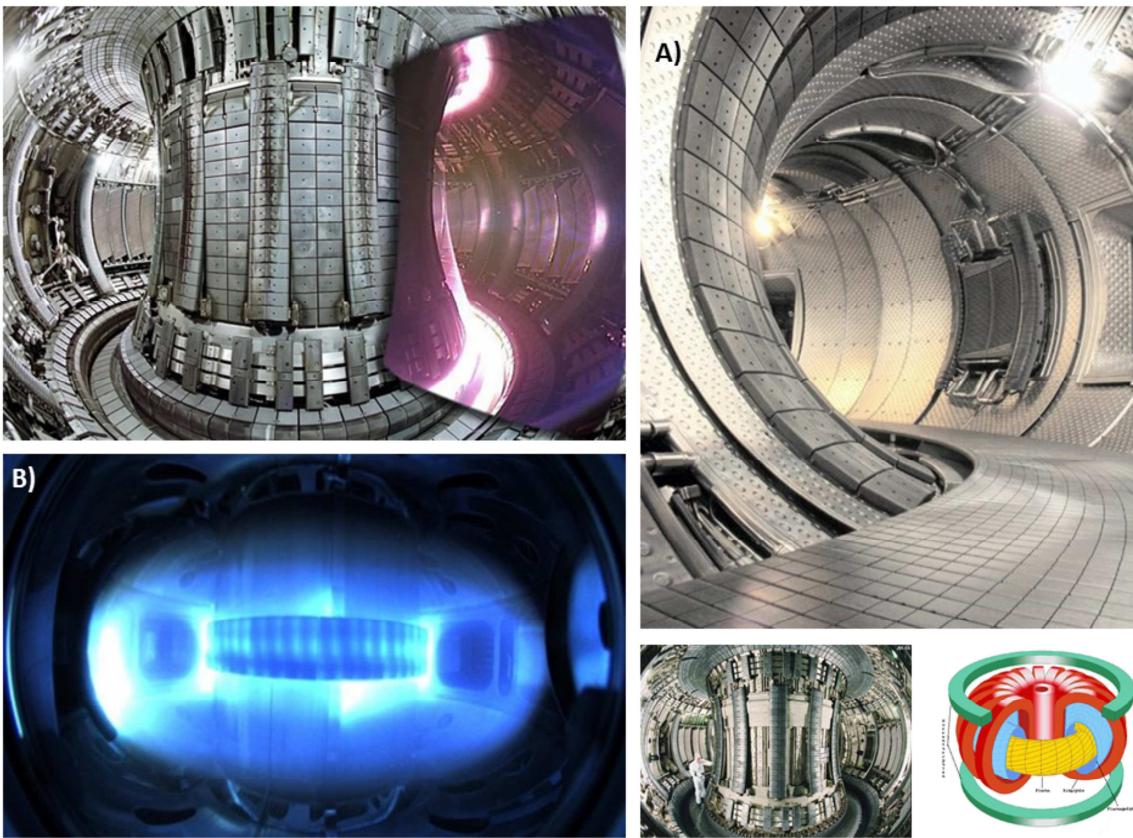
ITER (International Thermonuclear / Tokamak Experimental Reactor) soll den Weg zur wirtschaftlichen Nutzung der kontrollierten Kernfusion aufzeigen.

Gesamtradius	10,7 m
Gesamthöhe	30 m
Plasmaradius	6.2 m
Masse des Plasmas	0.5 g
Magnetfeld	5.3 T
Maximaler Plasmastrom	15 MA
Fusionsleistung	500 MW
Mittlere Temperatur	$10^8$ K
Brenndauer jedes Pulses	> 400 s



<http://www.iter.org/mach>





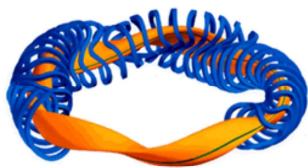
**A)** In a tokamak, blanket modules coat the inside of the chamber and directly face the hot plasma. In ITER, certain modules will be used to test Tritium breeding concepts. Photo: Tore Supra Tokamak, CEA Cadarache.

**B)** Magnetically confined plasma in the Korean superconducting tokamak, KSTAR. The extreme temperature plasma radiates in a spectrum that our eyes can not see. What is visible in this image are the colder regions on the outer edge of the plasma. Photo: KSTAR.

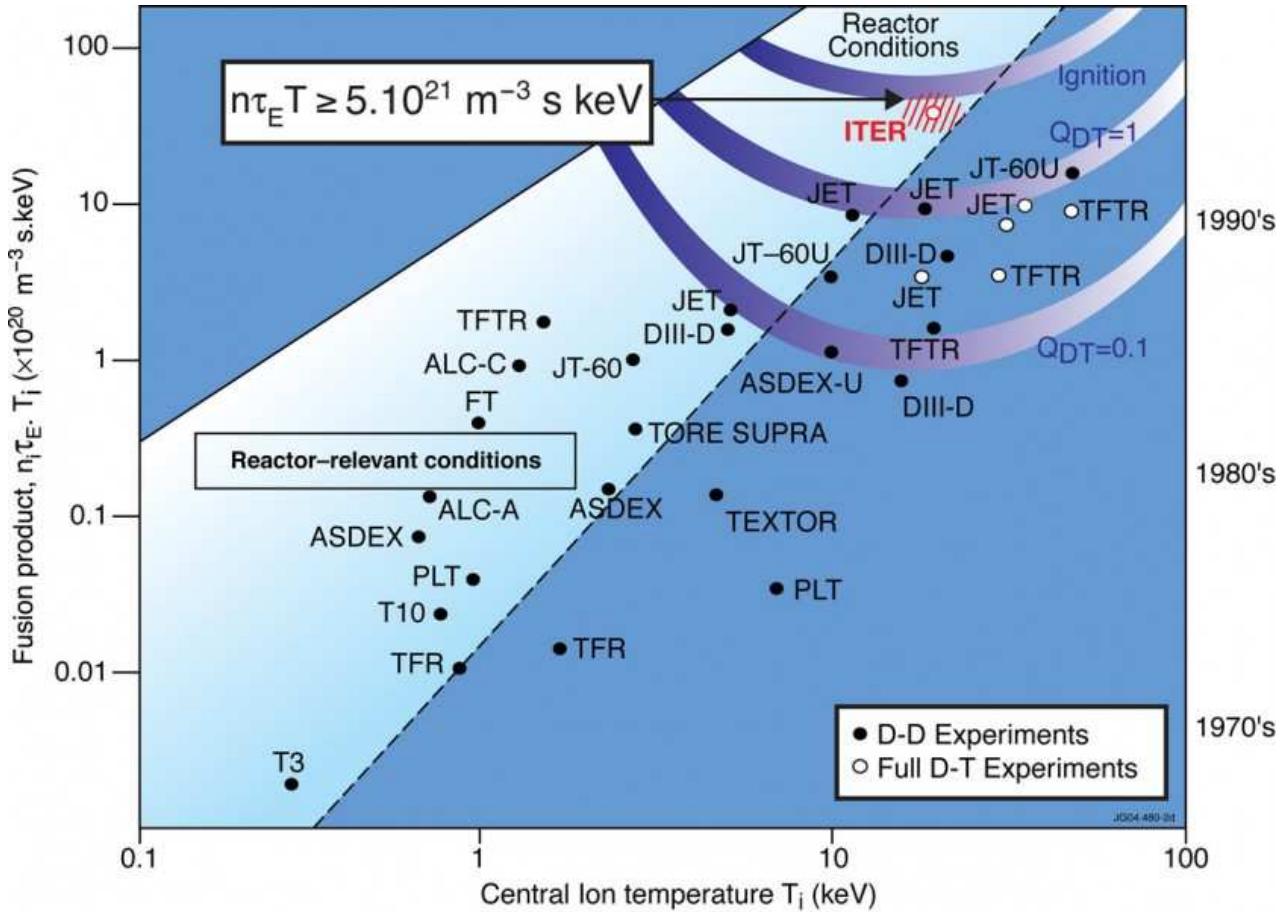
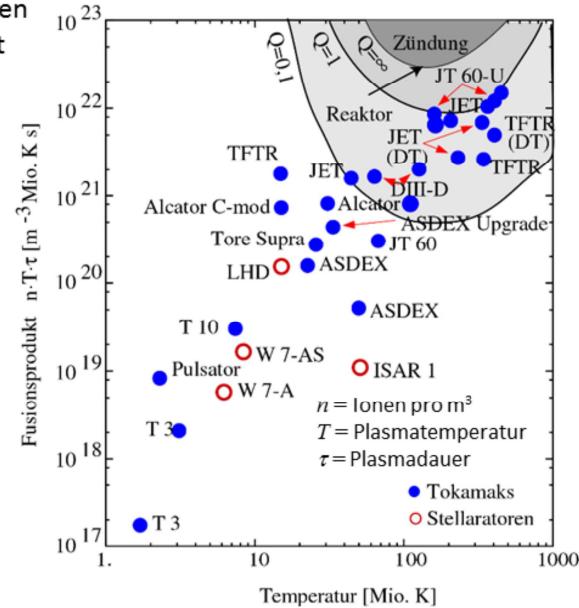
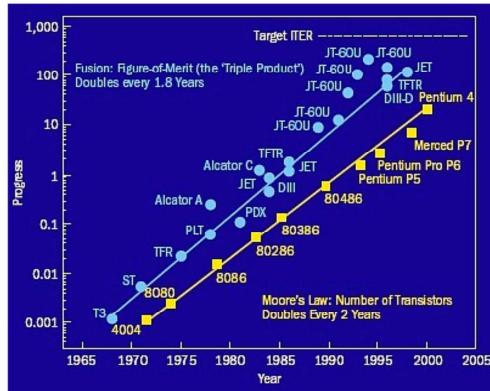
#### Kosmisches Plasma: das Polarlicht



## Tokamak versus Stellarator



Ein Stellarator mit verdrilltem Magnetfeld, wie beispielsweise Wendelstein-7, kann das Plasma ebenfalls einschliessen. Beide Einschlussvarianten sind im Wettstreit um eine dauerhafte, kontrollierte Fusion. Der Vergleich mit Moore's Law ist etwas optimistisch!

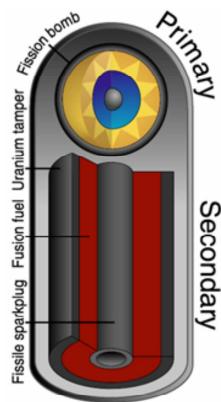


## Wasserstoffbombe

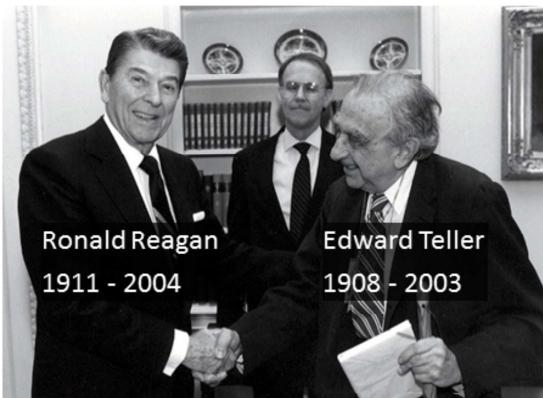


Edward Teller  
LANL Badge Foto

Der ungarstämmige Teller studierte in Deutschland. Als Jude floh er 1935, emigrierte in die USA und war einer der Pioniere im Manhatten Projekt unter Robert Oppenheimer. Bereits damals drängte er auf die Entwicklung einer Wasserstoffbombe, was dann auch zum Konflikt mit Oppenheimer und einem grossen Teil der wissenschaftlichen Gemeinschaft führte. Ab 1980 wurde er vehementer Befürworter von Präsident Reagan's "Strategic Defense Initiative".



Teller-Ulam Design der Wasserstoffbombe von 1951: Die Primär-explosion liefert Druck und Temperatur für die sekundäre Fusion



LANL: Los Alamos National Laboratory