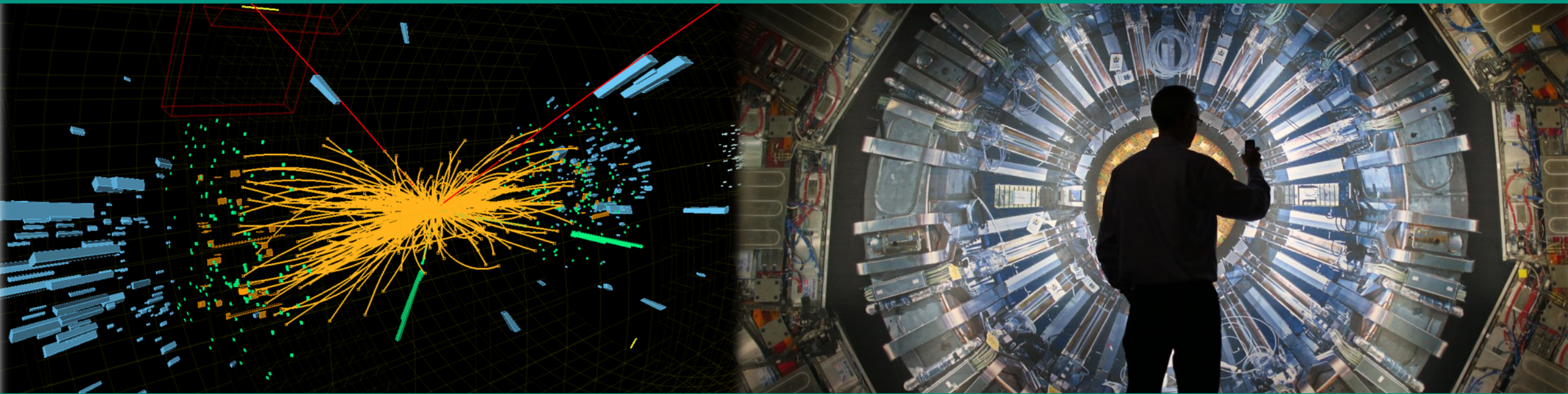


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 9

16.5.2022

Guido Drexlin & Markus Klute



Recap: Instabile Kerne

■ Exponentielle Zerfälle

- Zerfallskonstante λ in s^{-1} : Wahrscheinlichkeit pro s, $\Leftrightarrow \tau$ bzw. $t_{1/2}$
- Zerfallsarten: α -, β -, γ - Zerfall, n-/p-Emission, Spaltung

■ α -Zerfälle & primordiale Zerfallsketten

- Tunnelprozess mit Gamow-Faktor $T \sim e^{-G}$
- monoenergetisches α -Teilchen, Geiger-Nuttal-Regel
- 4 primordiale α -Ketten: ^{232}Th , ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}U (säkulares Gleichgewicht)

■ β -Zerfälle & Neutrinos (Pauli's Hypothese)

- Feynman-Diagramme für β^+ , β^- und EC Prozesse: Austausch von $W^\pm$ -Boson

Konzept Fragen

- Wie kann man die Häufigkeitsverteilung instabiler Kerne beschreiben?
- Wie sind die Halbwertsbreite und die Lebensdauer instabiler Kerne verknüpft?
- In welchen Einheiten misst man die Aktivität eine Probe?

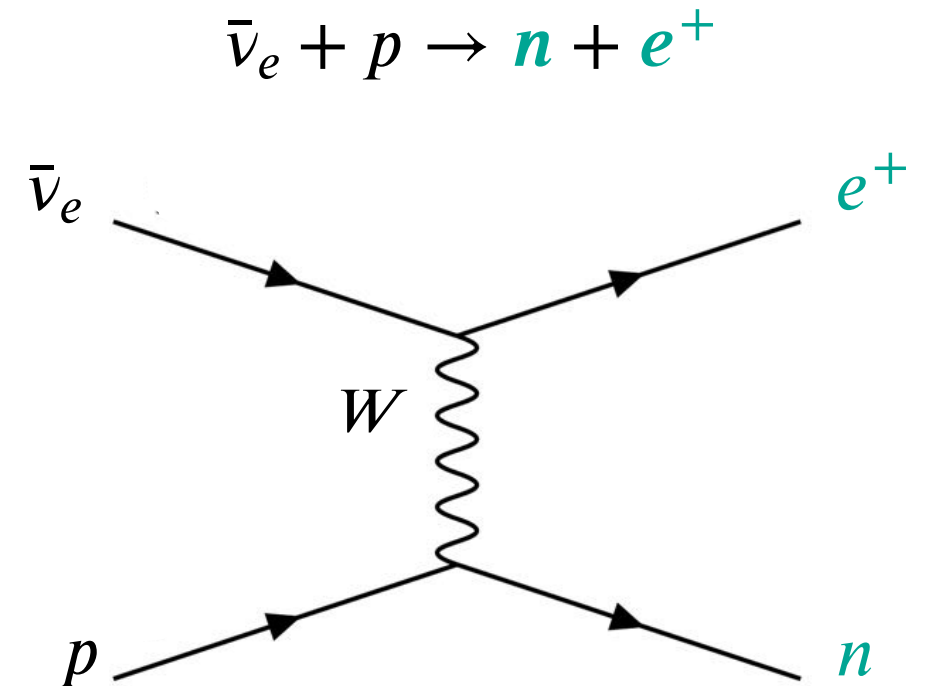
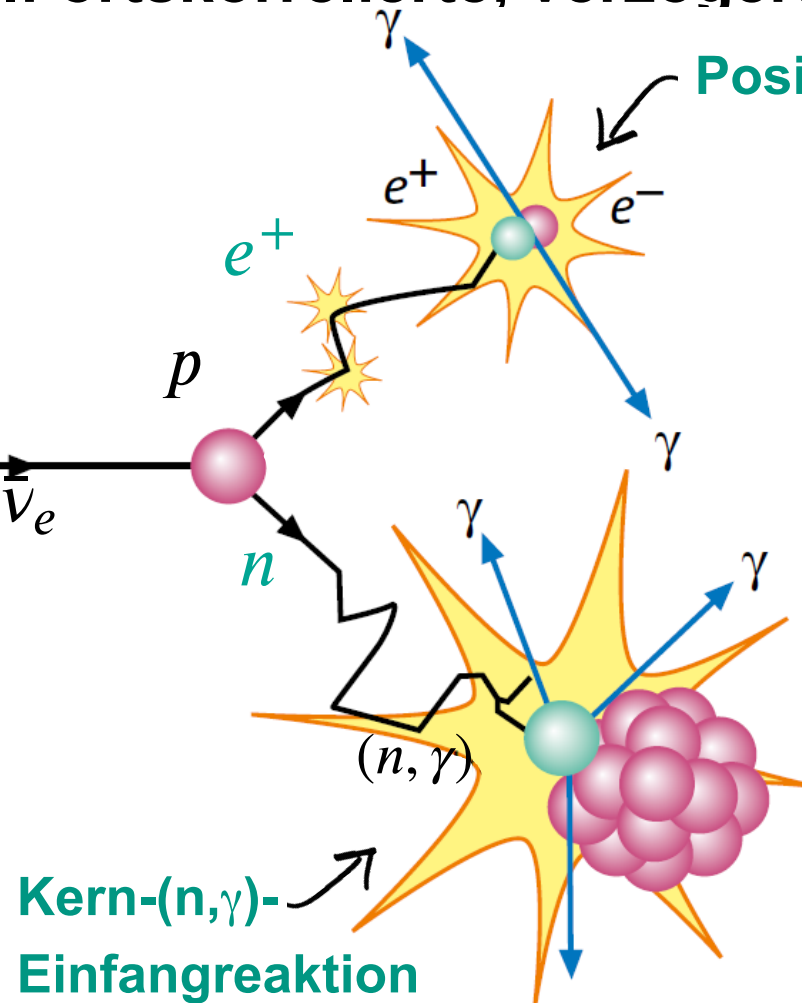
Signatur von Antineutrinos

- Inverser β -Zerfall: ortskorrelierte, verzögerte Koinzidenz-Signatur

$E_{\bar{\nu}}$ ~ wenige MeV



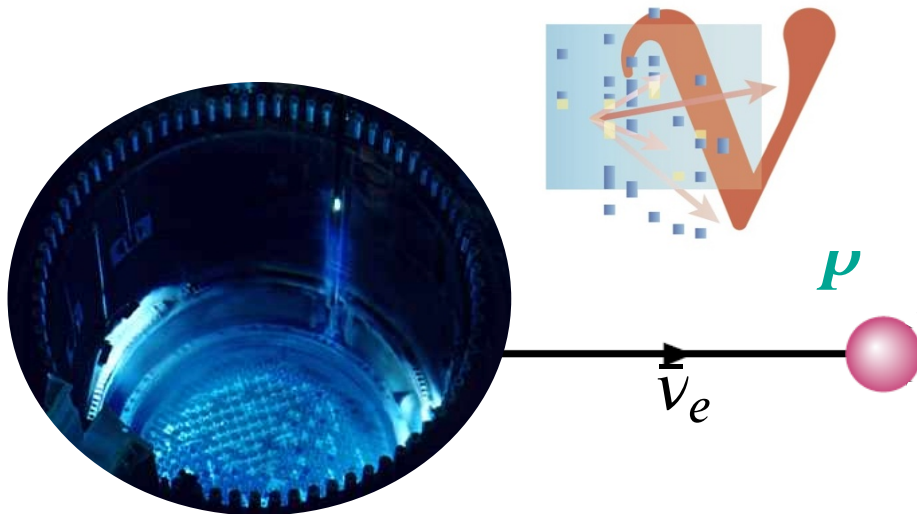
β -Zerfälle
Reaktor



im Feynman-Diagramm sehr einfach.

Signatur von Antineutrinos, nachgefragt

- warum muss das Antineutrino-Target **freie Protonen** enthalten?



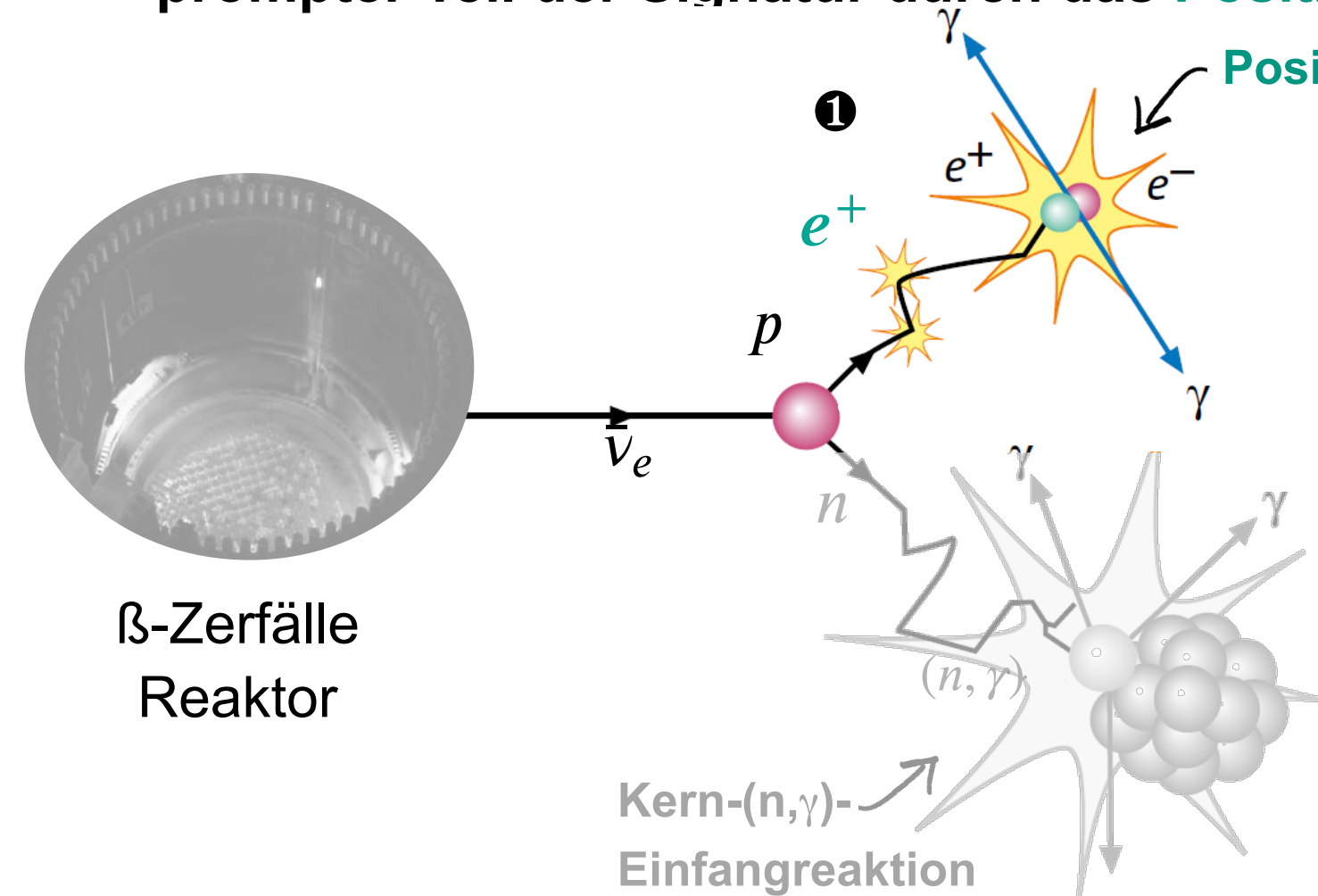
β -Zerfälle
Reaktor



- A) ...da Protonen im Kern **gepaart** sind
(Paarungsterm im Tröpfchenmodell)... !
- B) ...da Protonen im Kern eine **große Bindungsenergie** besitzen... !
- C) ...da Protonen im Kern nur der **starken Wechselwirkung** unterliegen... !

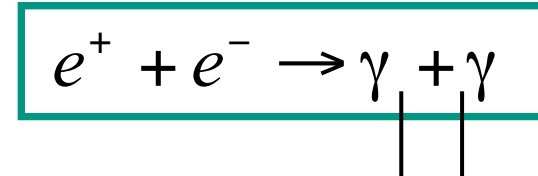
Signatur von Antineutrinos: Nachweis Positron

- prompter Teil der Signatur durch das **Positron**



- ① **Positron** gibt Energie über Stöße ab & annihiliert durch Bildung von **Positronium**

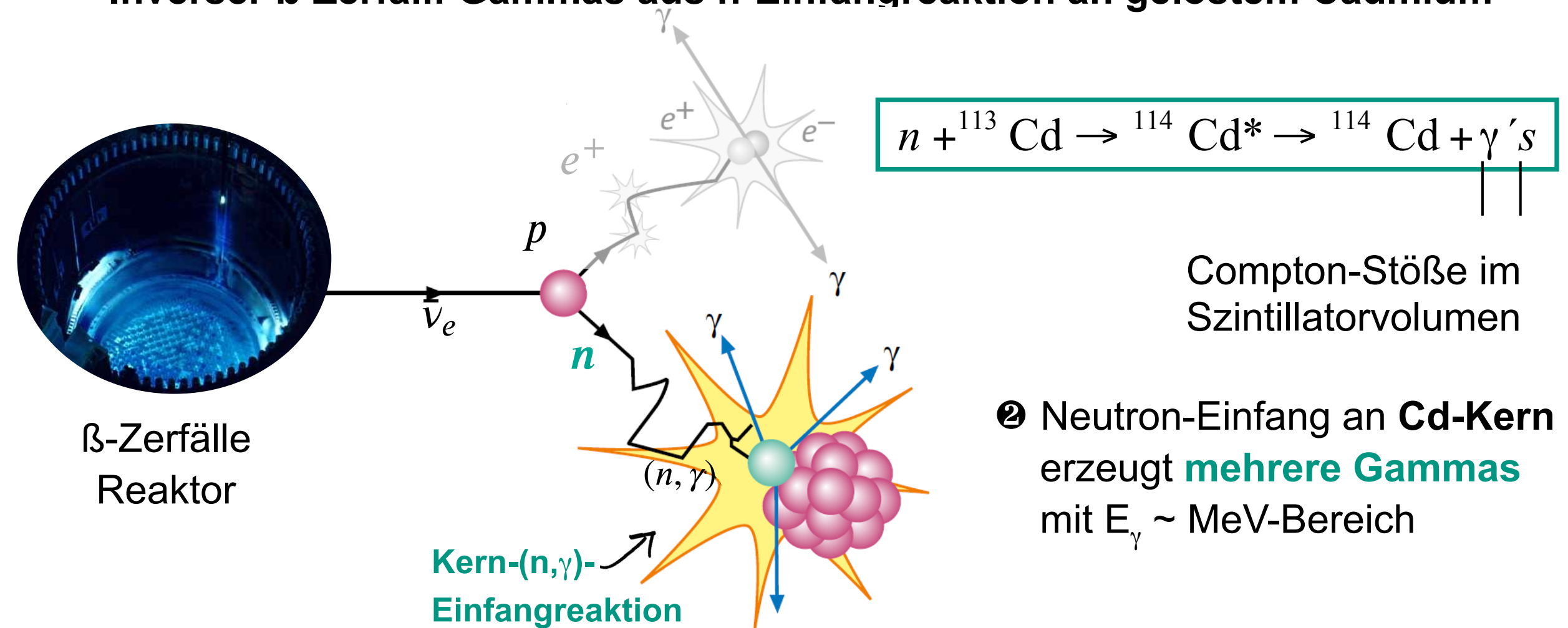
$$E_\gamma = 511 \text{ keV}$$



Compton-Stöße im
Szintillatorvolumen

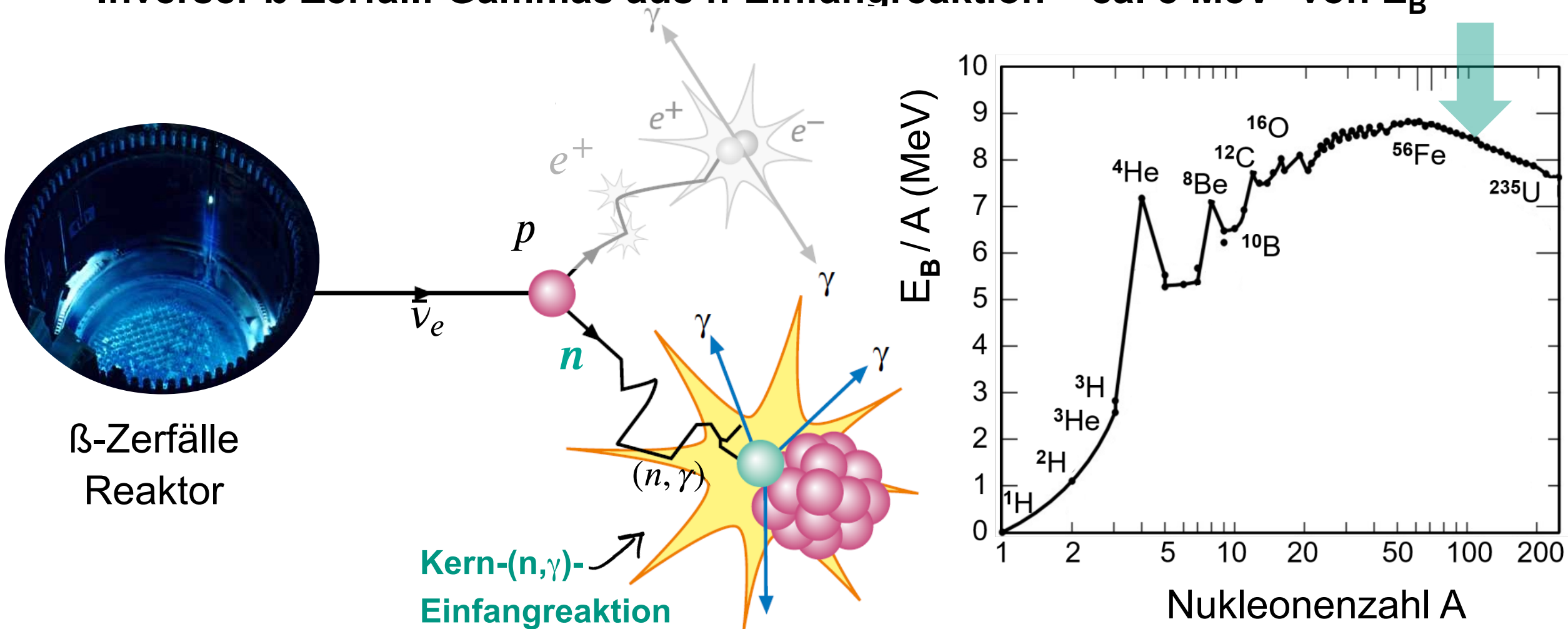
Signatur von Antineutrinos: Nachweis Neutron

- Inverser β -Zerfall: Gammas aus n-Einfangreaktion an gelöstem Cadmium



Signatur von Antineutrinos: Nachweis Neutron

- Inverser β -Zerfall: Gammas aus n-Einfangreaktion – ca. 8 MeV* von E_B

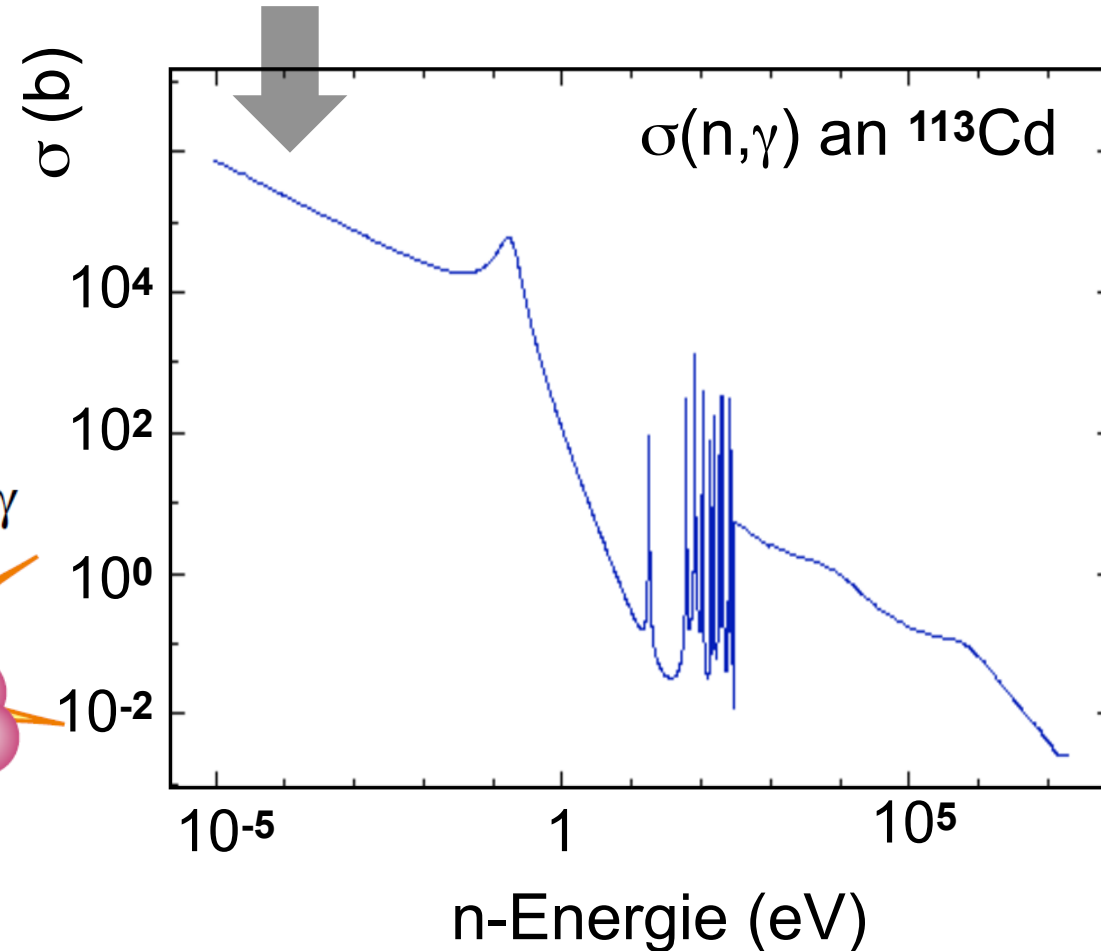
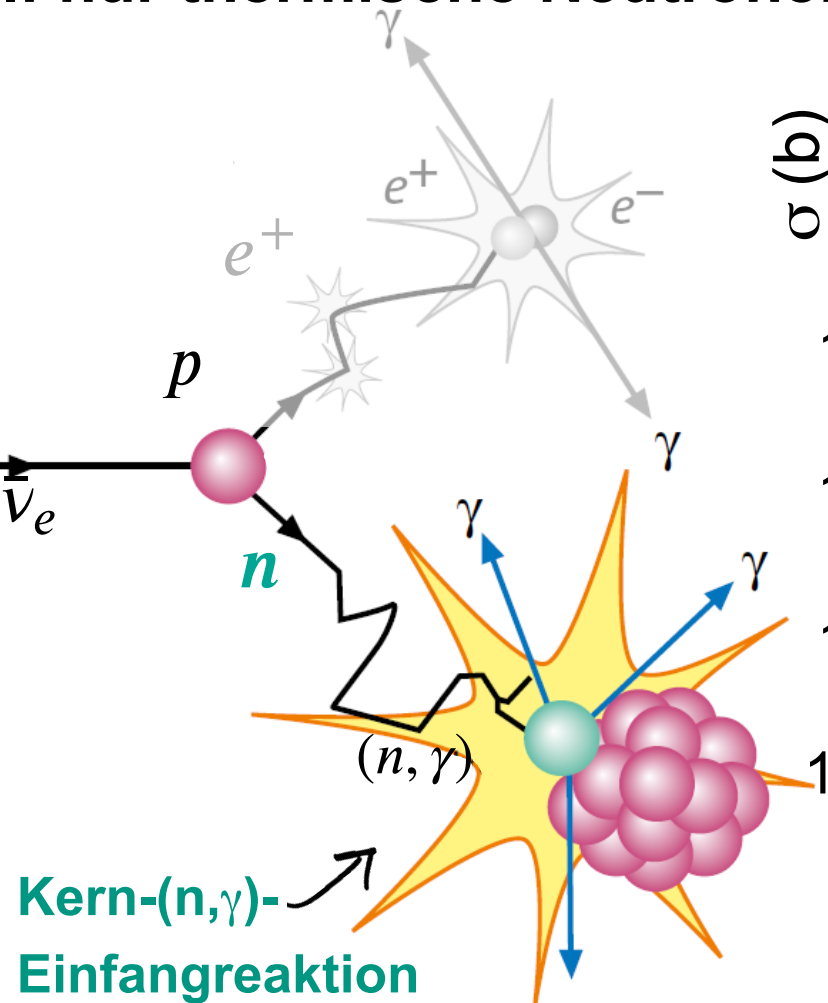


Signatur von Antineutrinos: Nachweis Neutron

- Inverser β -Zerfall: nur thermische Neutronen (**sub-eV**) werden eingefangen!



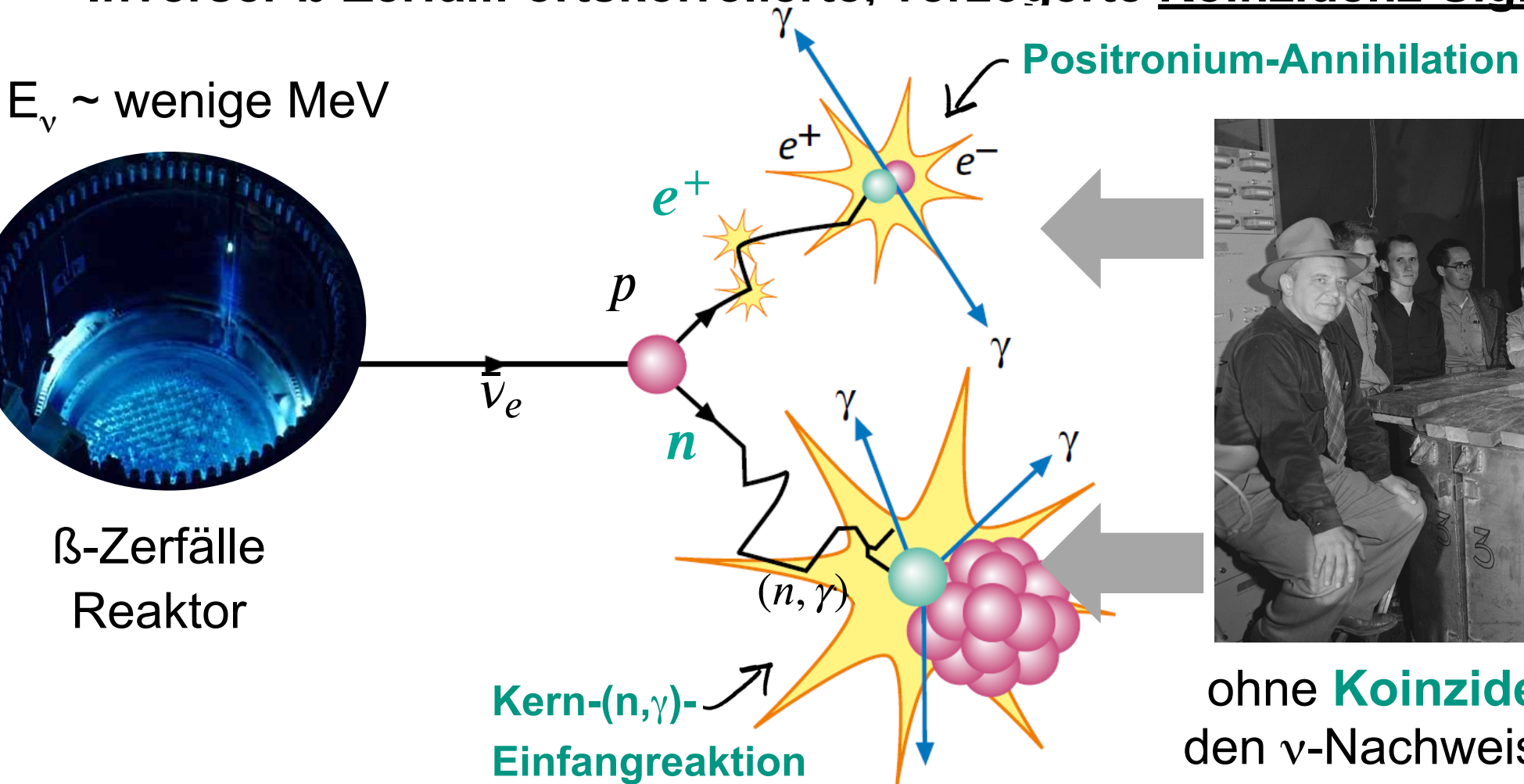
β -Zerfälle
Reaktor



Signatur von Antineutrinos

- Inverser β -Zerfall: ortskorrelierte, verzögerte Koinzidenz-Signatur

$E_{\bar{\nu}}$ ~ wenige MeV



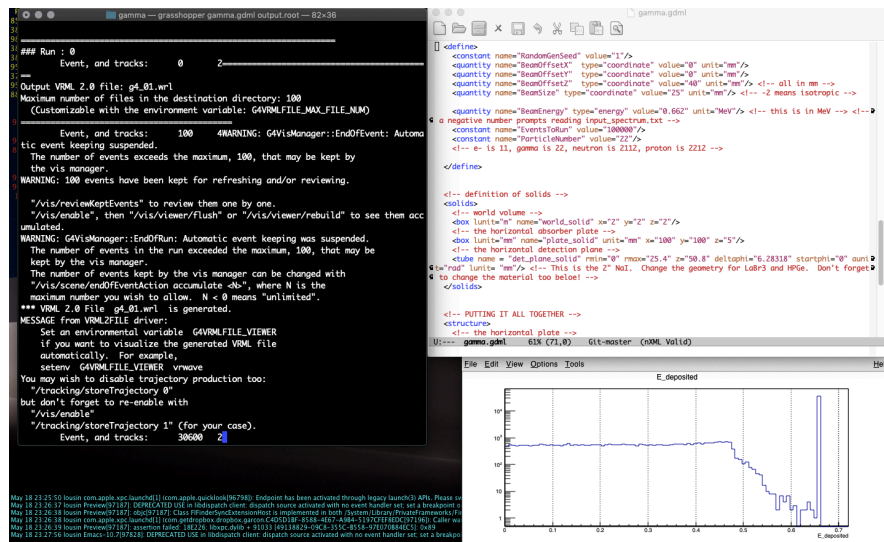
ohne **Koinzidenz** hätten wir den $\bar{\nu}$ -Nachweis nie geschafft!

Signatur von Teilchen: moderne MC-Methoden

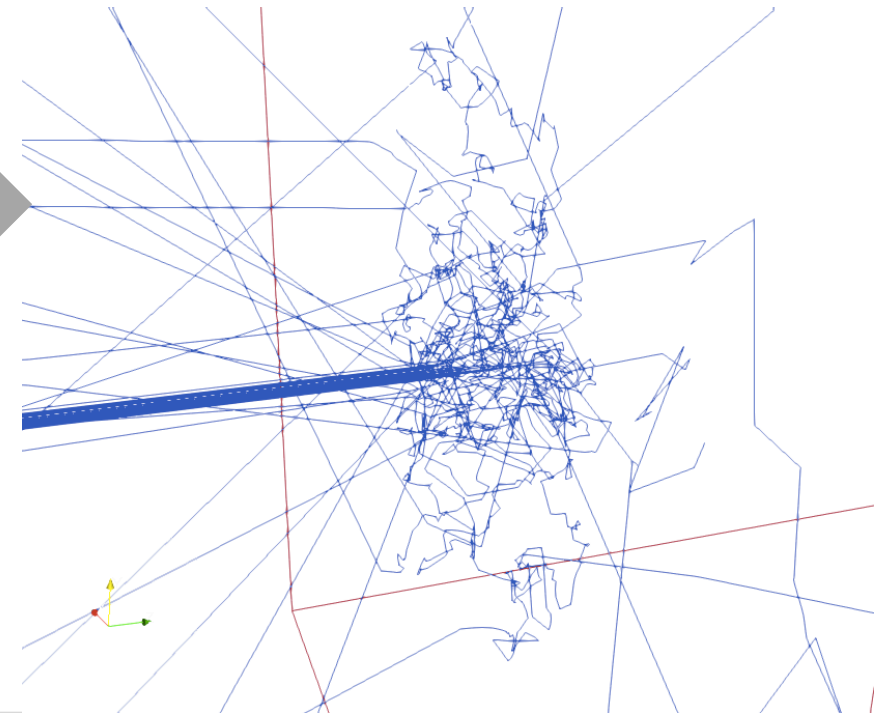
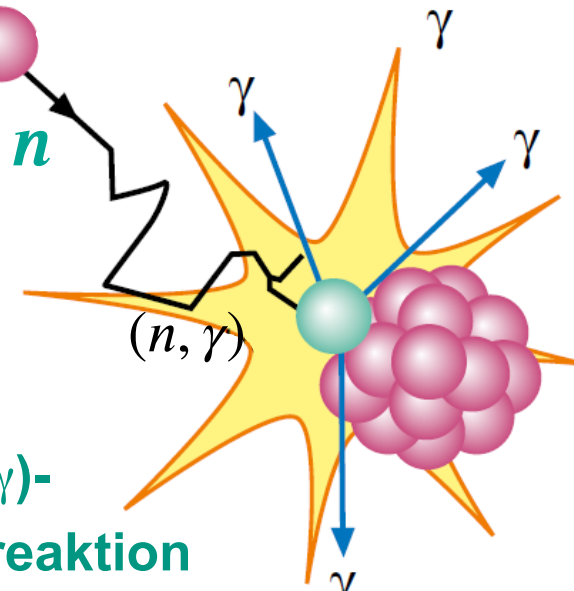
- **GEANT4** – ein unentbehrliches Tool zur Simulation, z.B. für **Neutronen**

GEometry AND Tracking – C++ Code

1 MeV Neutronen auf H₂O Target:
Thermalisierung modelliert



The image shows a terminal window on the left with GEANT4 command line output, including event counts and warnings. On the right is the GEANT4 GUI showing a 3D visualization of a neutron (n) interacting with a nucleus, producing gamma rays (γ). Below the 3D view is a 2D plot of deposited energy (E_deposited) versus position.



**Kern-(n,γ)-
Einfangreaktion**

Signatur von Teilchen: moderne MC-Methoden

- **GEANT4** – ein unentbehrliches Tool zur Simulation in der Teilchenphysik

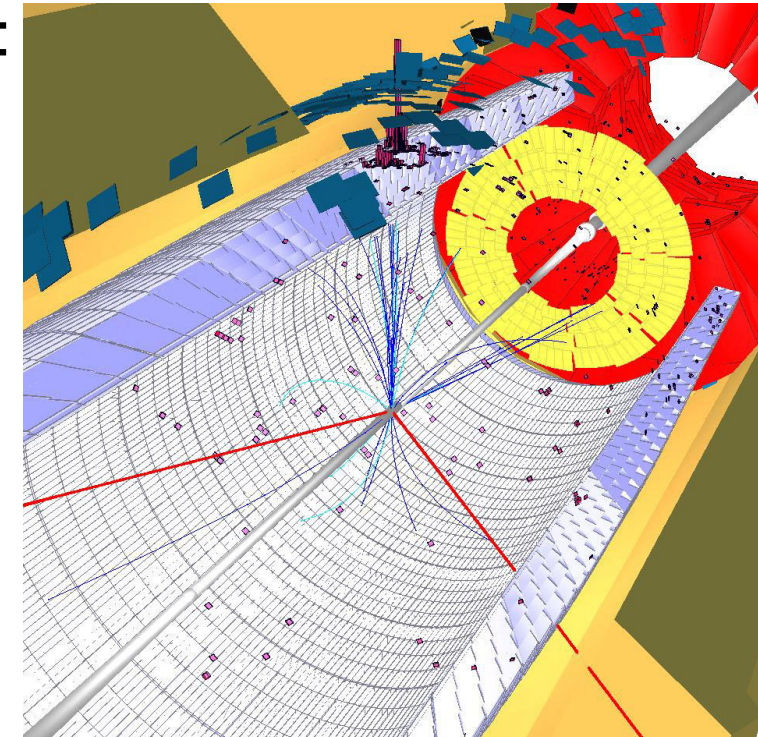
GEometry **ANd** **T**racking – C++ Code



vielfältigste Anwendungen in der

- Hochenergiephysik: GeV...TeV
- Astroteilchenphysik
- Kernphysik
- Medizintechnik
- Strahlungseffekte in Mikroelektronik

Visualisierungs-
Tools:



Signatur von Teilchen: moderne MC-Methoden

- **GEANT4** – ein unentbehrliches Tool zur Simulation in der Teilchenphysik

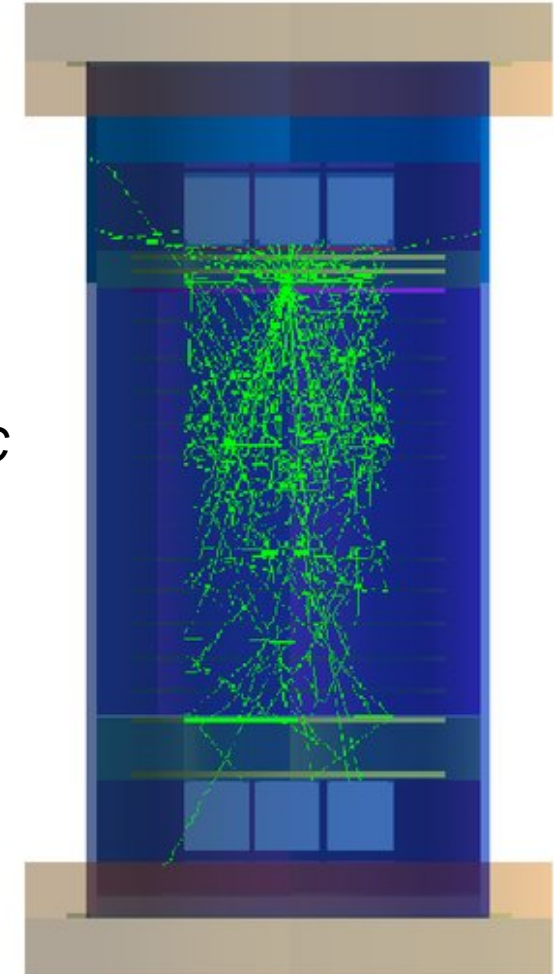
GEometry **AN**d **T**racking – C++ Code



vielfältigste Anwendungen in der

- Hochenergiephysik
- **Astroteilchenphysik... bis keV**
- Kernphysik
- Medizintechnik
- Strahlungseffekte in Mikroelektronik

*“Geant4 simulation of a
dual phase Time
Projection Chamber TPC
to detect neutrinos”*



Signatur von Antineutrinos: Flüssig-Szintillatoren

■ Inverser β -Zerfall: Entwicklung der **Detektorgröße** & Energieauflösung

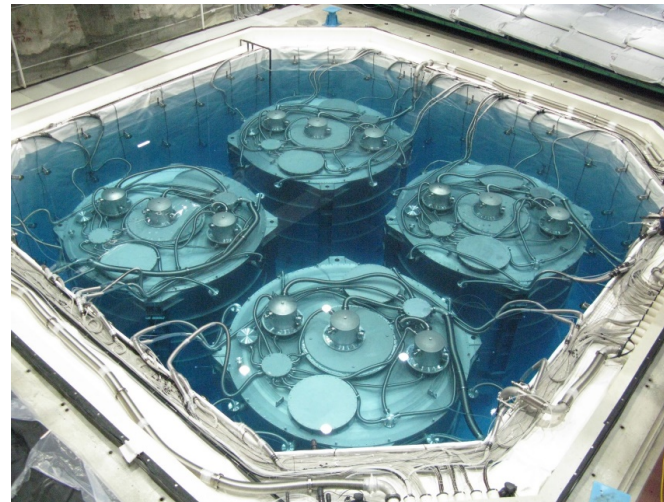
Herr Auge (USA) @ 10 m

- Target: **300 l** (90 PMTs)
- Messphase: 1954-55
- Ziel: erster ν -Nachweis



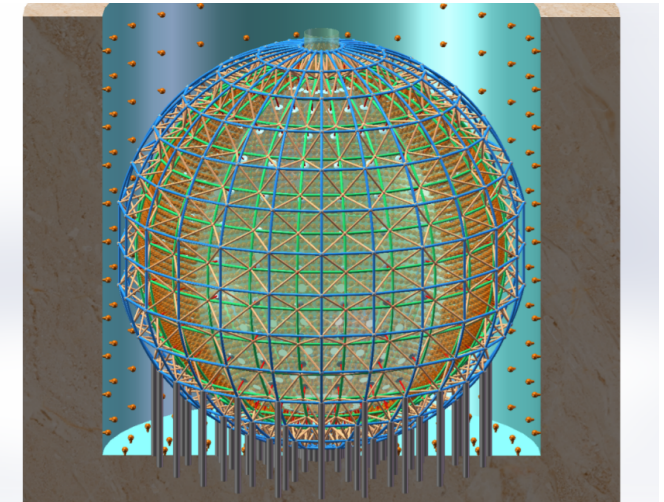
Daya Bay (CN) @ d = 2 km

- Target: **320 t** (1500 PMTs)
- Messphase: 2011-2020
- Ziel: ν -Oszillationen



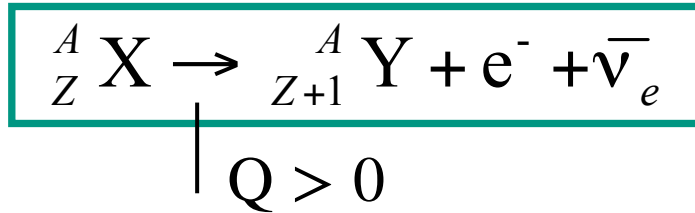
JUNO* (CN) @ d = 53 km

- Target: **20 kt** (17000 PMTs)
- Messphase: > 2023...
- Ziel: ν -Eigenschaften

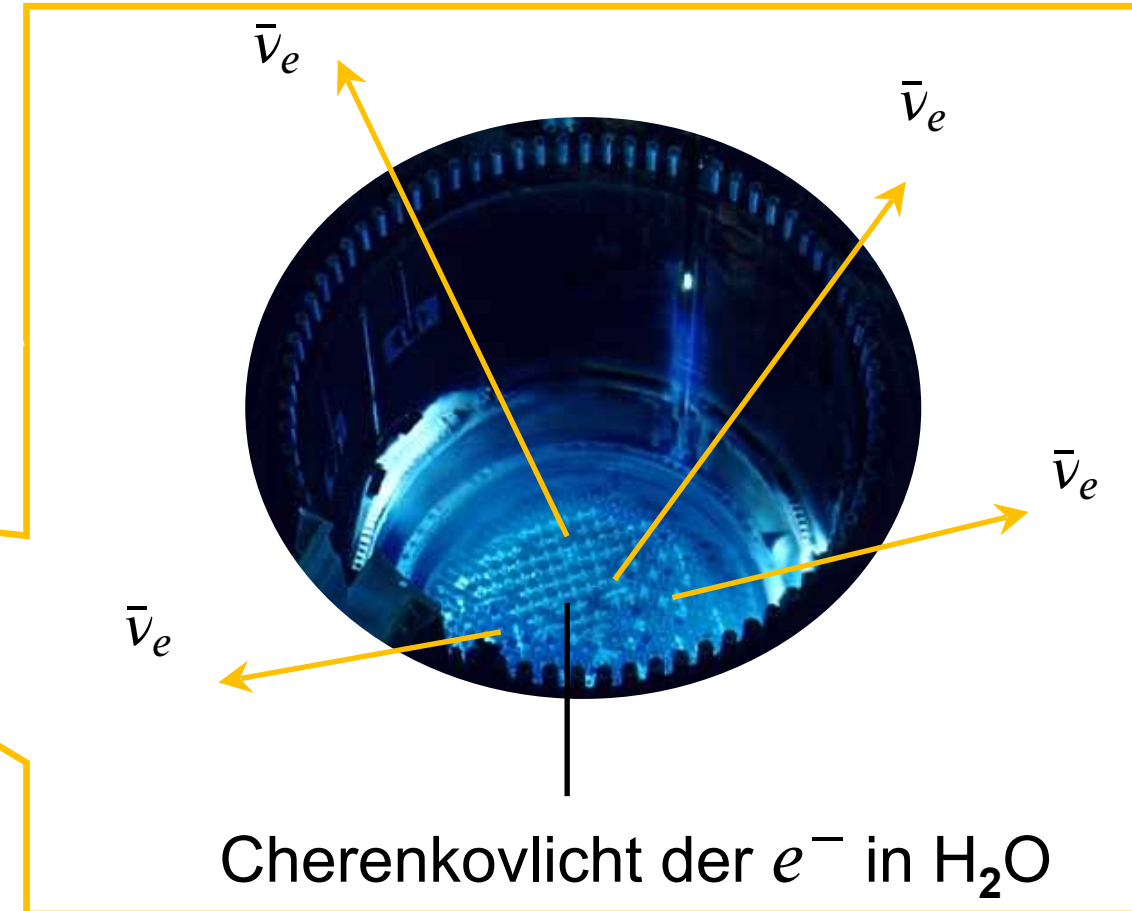
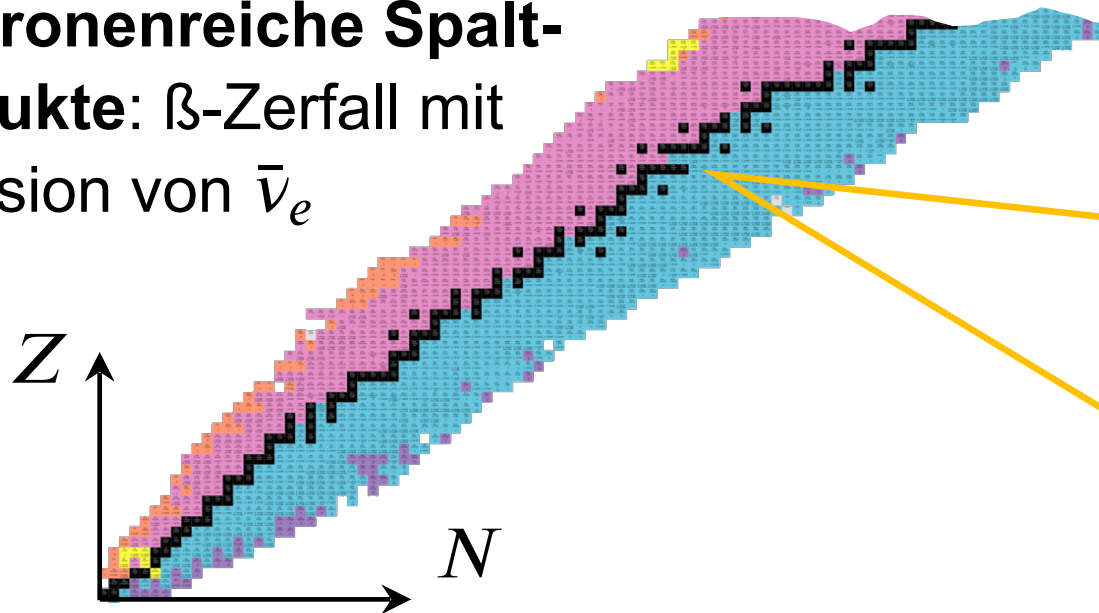


Beta-Zerfall: Neutronen-reiche Kerne

■ Beta-Zerfall unter Emission eines Elektrons & Antineutrinos

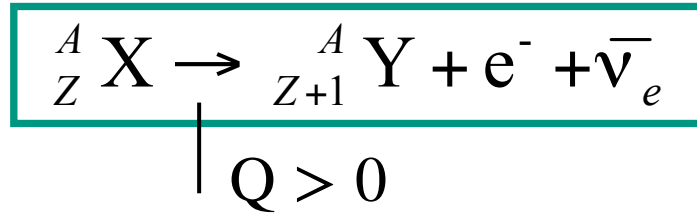


- Neutronenreiche Spalt-
produkte: β -Zerfall mit
Emission von $\bar{\nu}_e$

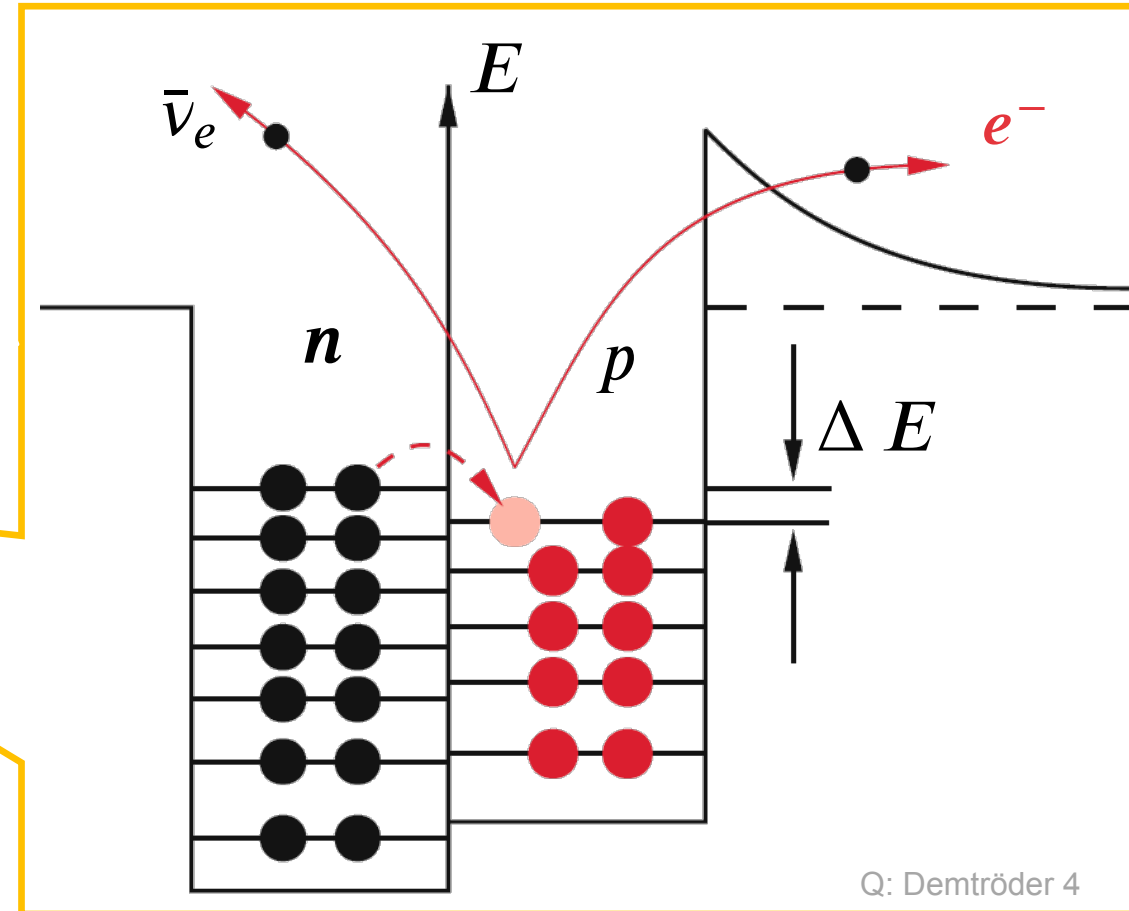
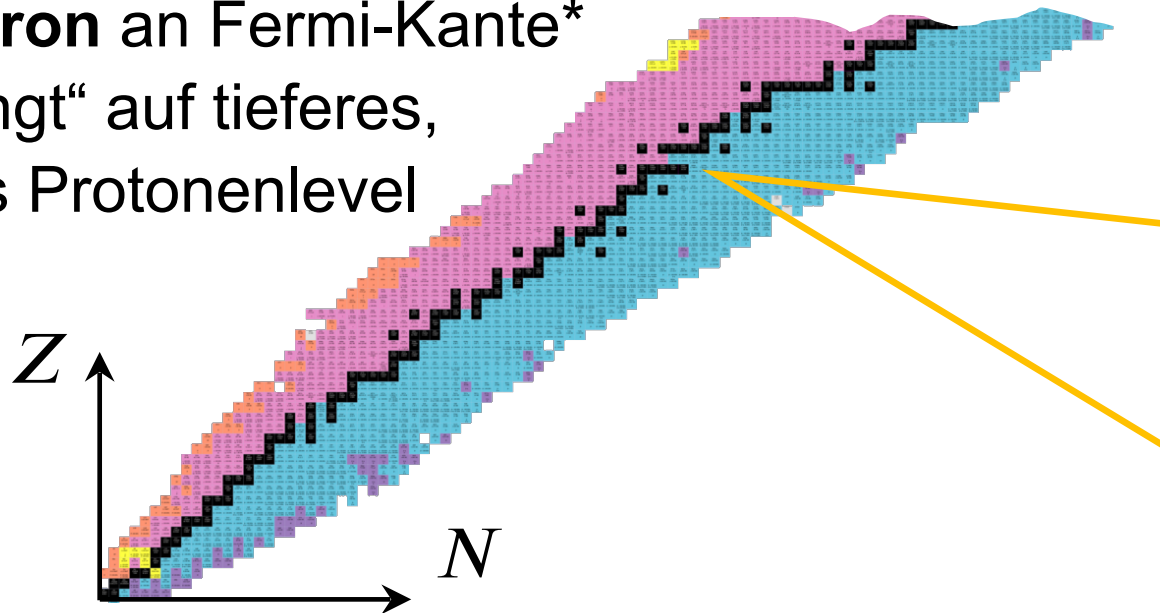


Beta-Zerfall: Neutronen-reiche Kerne

■ Beta-Zerfall unter Emission eines Elektrons & Antineutrinos



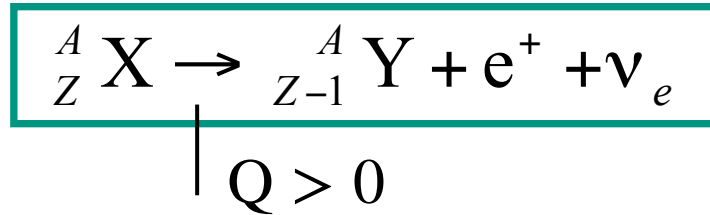
- **Neutron** an Fermi-Kante*
„springt“ auf tieferes,
freies Protonenlevel



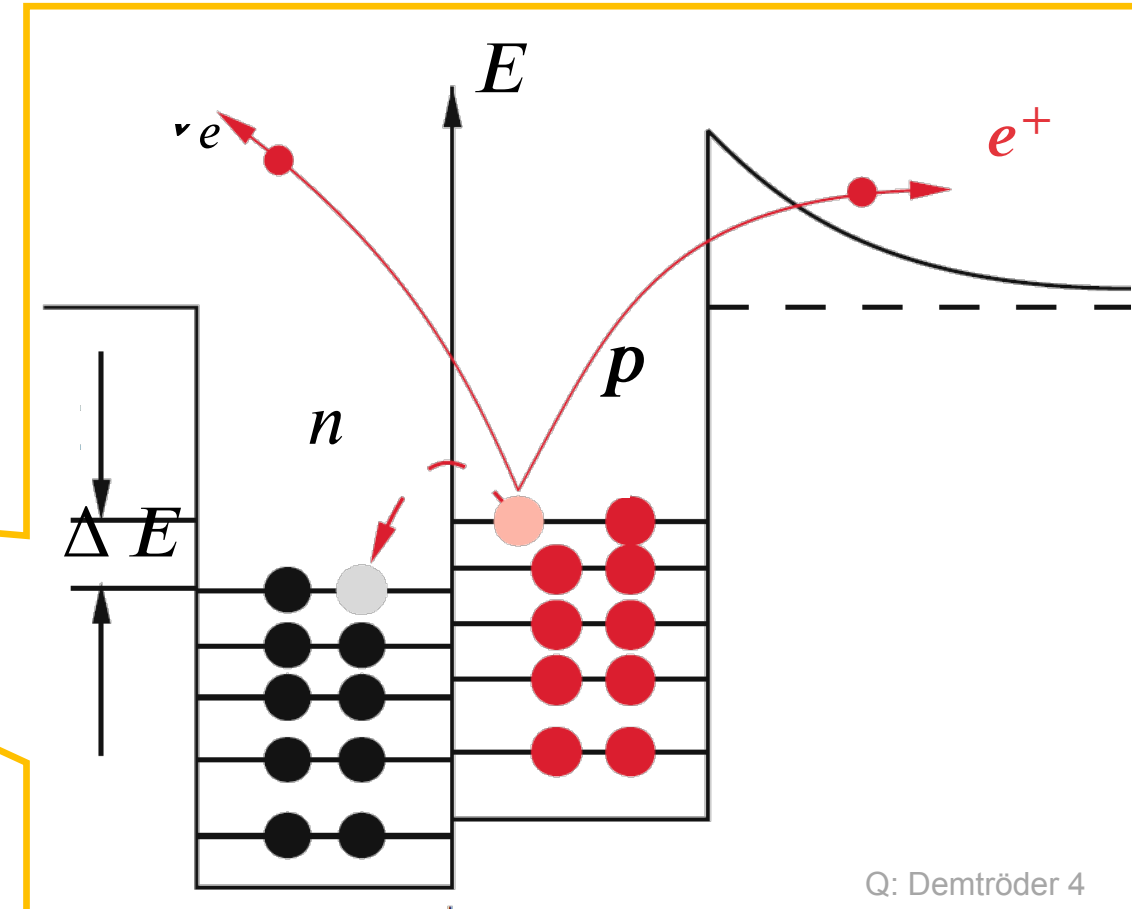
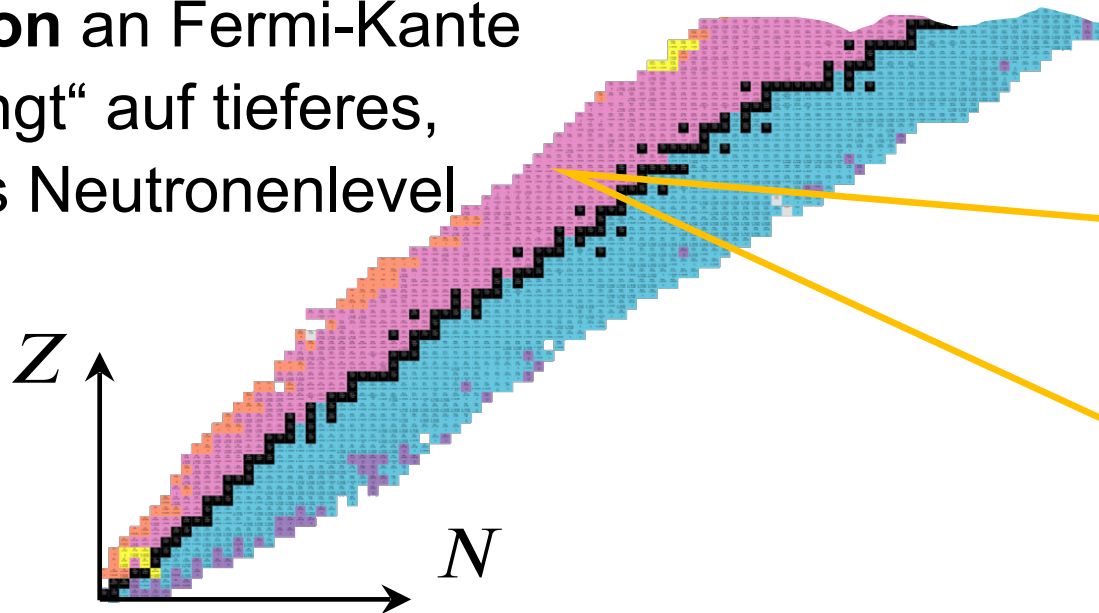
Q: Demtröder 4

Beta-Zerfall: Protonen-reiche Kerne

■ Beta-Zerfall unter Emission eines Positrons & Neutrinos



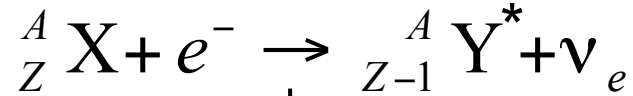
- **Proton** an Fermi-Kante
„springt“ auf tieferes,
freies Neutronenlevel



Q: Demtröder 4

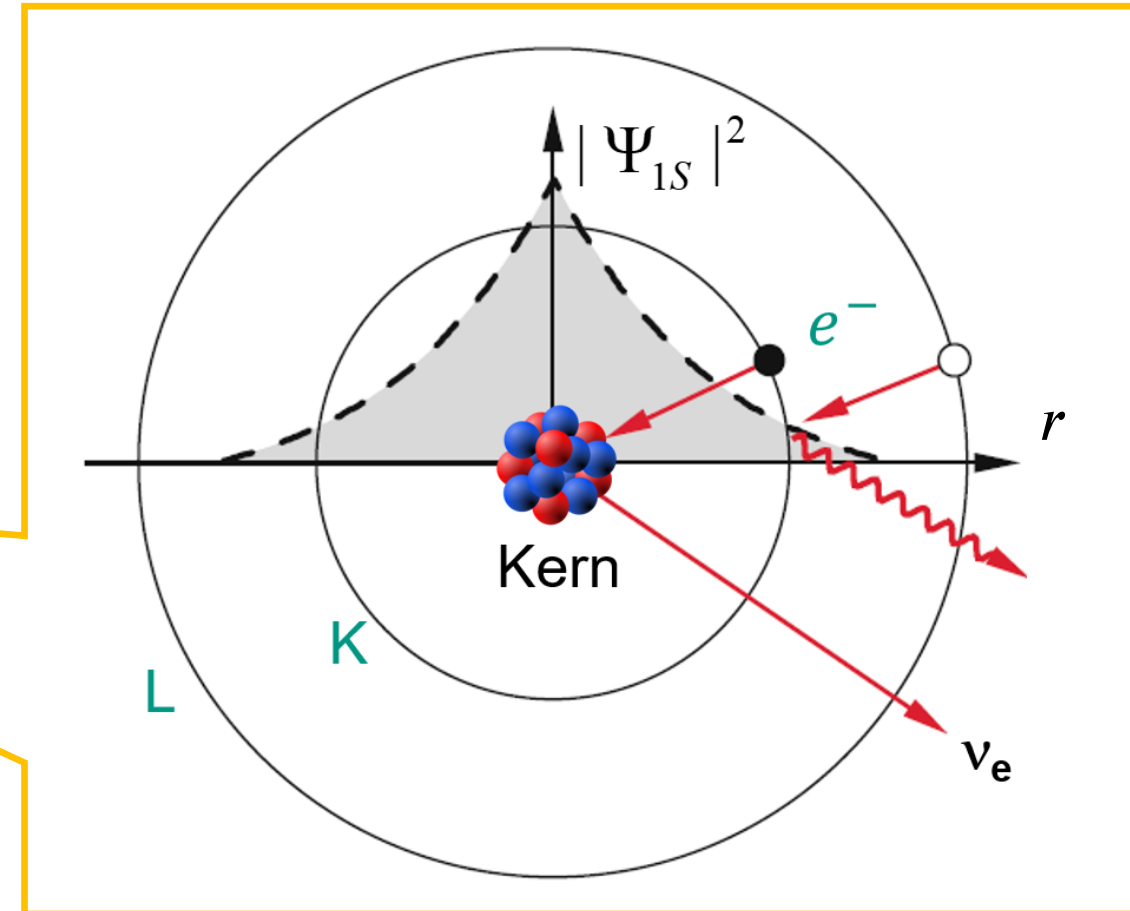
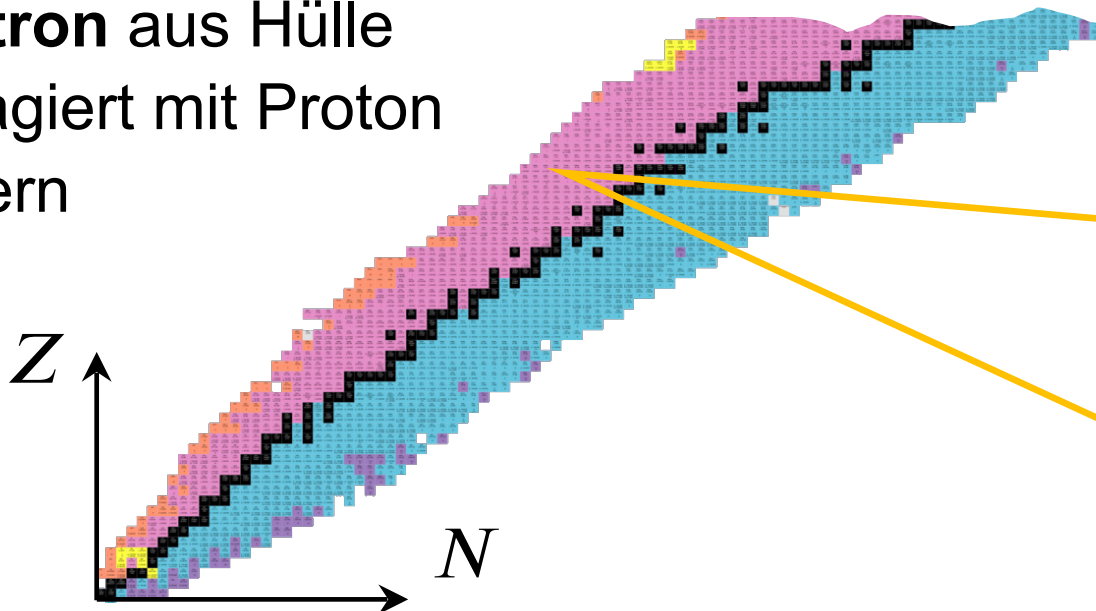
Elektronen-Einfangreaktion* am Kern

- Beta-Zerfall unter Absorption eines Elektrons & Emission eines Neutrinos



$$Q > 0$$

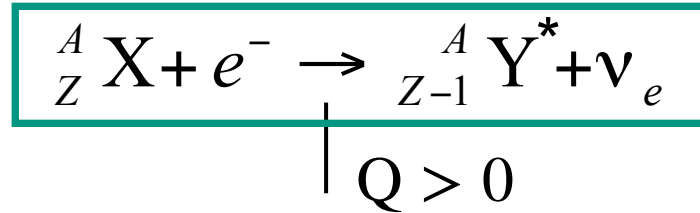
- **Elektron** aus Hülle
interagiert mit Proton
im Kern



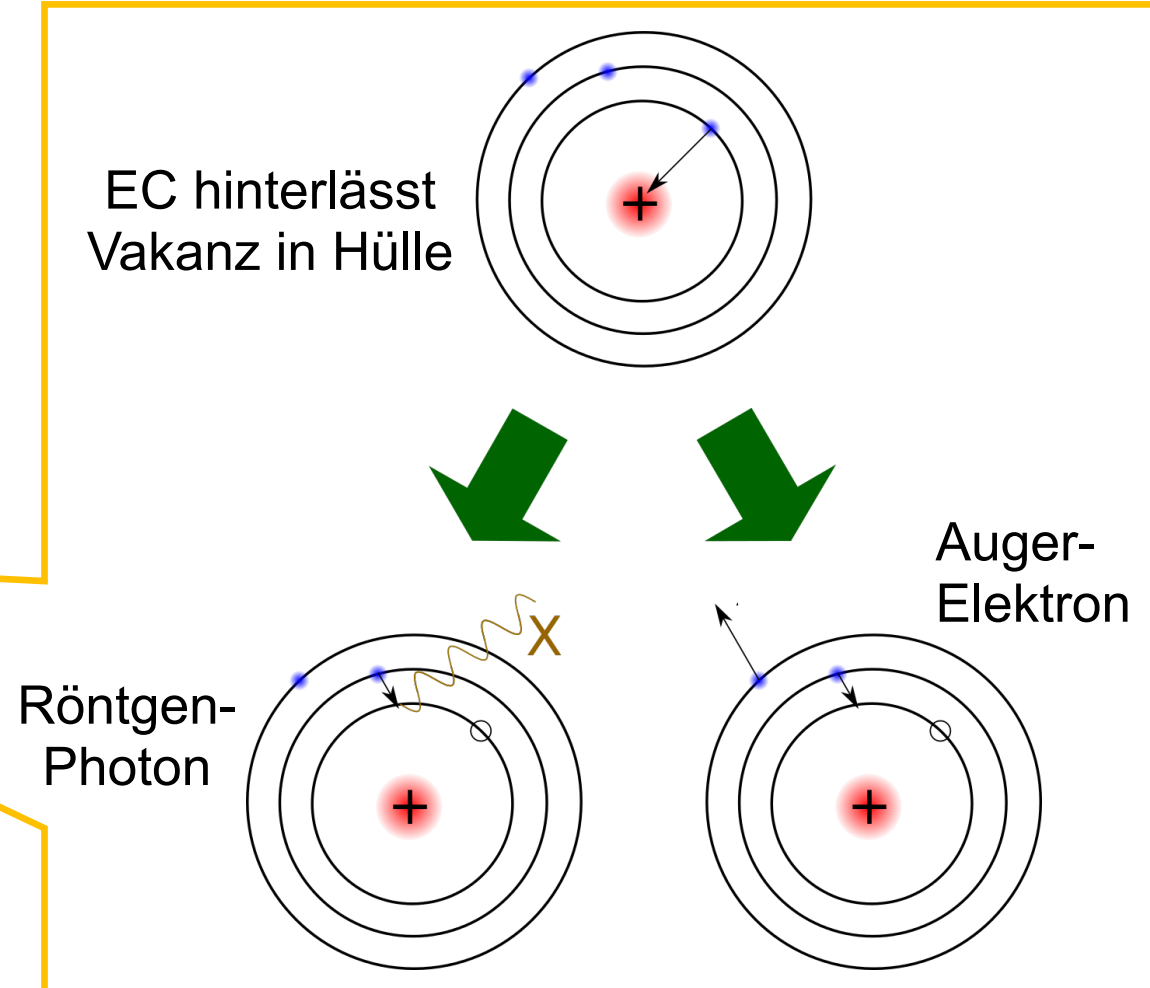
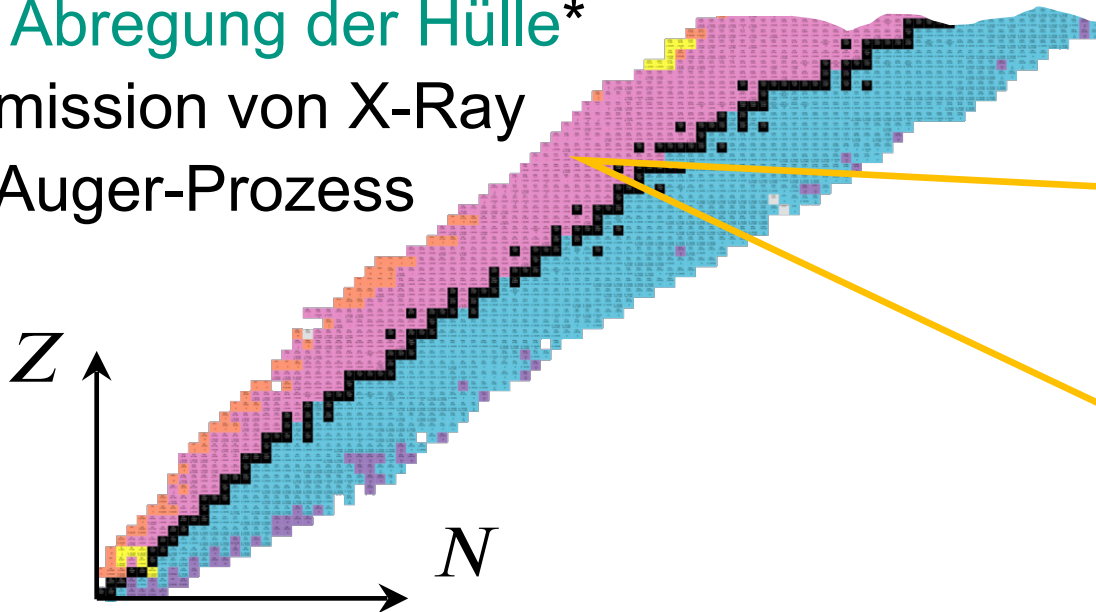
*EC (Electron Capture)

Elektronen-Einfangreaktion am Kern

■ Beta-Zerfall unter Absorption eines Elektrons & Emission eines Neutrinos



- dann **Abregung der Hülle***
via Emission von X-Ray
oder Auger-Prozess

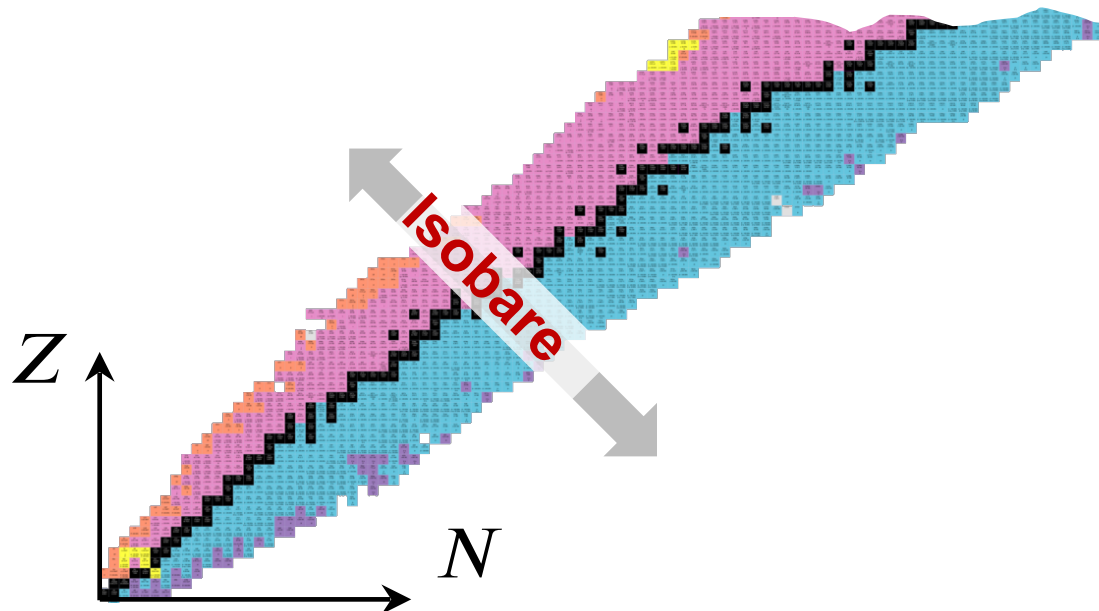


Isobaren-Zerfallsketten: Massenbetrachtung

- Isobare mit **A = const.** $\Rightarrow$ Kernmassen aus Tröpfchenmodell

$$B(Z, A) = a_V \cdot A - a_S \cdot A^{2/3} - a_C \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3} - a_A \cdot \frac{(N-Z)^2}{A} \pm \delta(Z, A)$$

Z: Kernladungszahl, **A**: Massenzahl
N: Anzahl Neutronen



Asymmetrie-
-Term

quadratisch
in $(N-Z)$

Massenparabeln

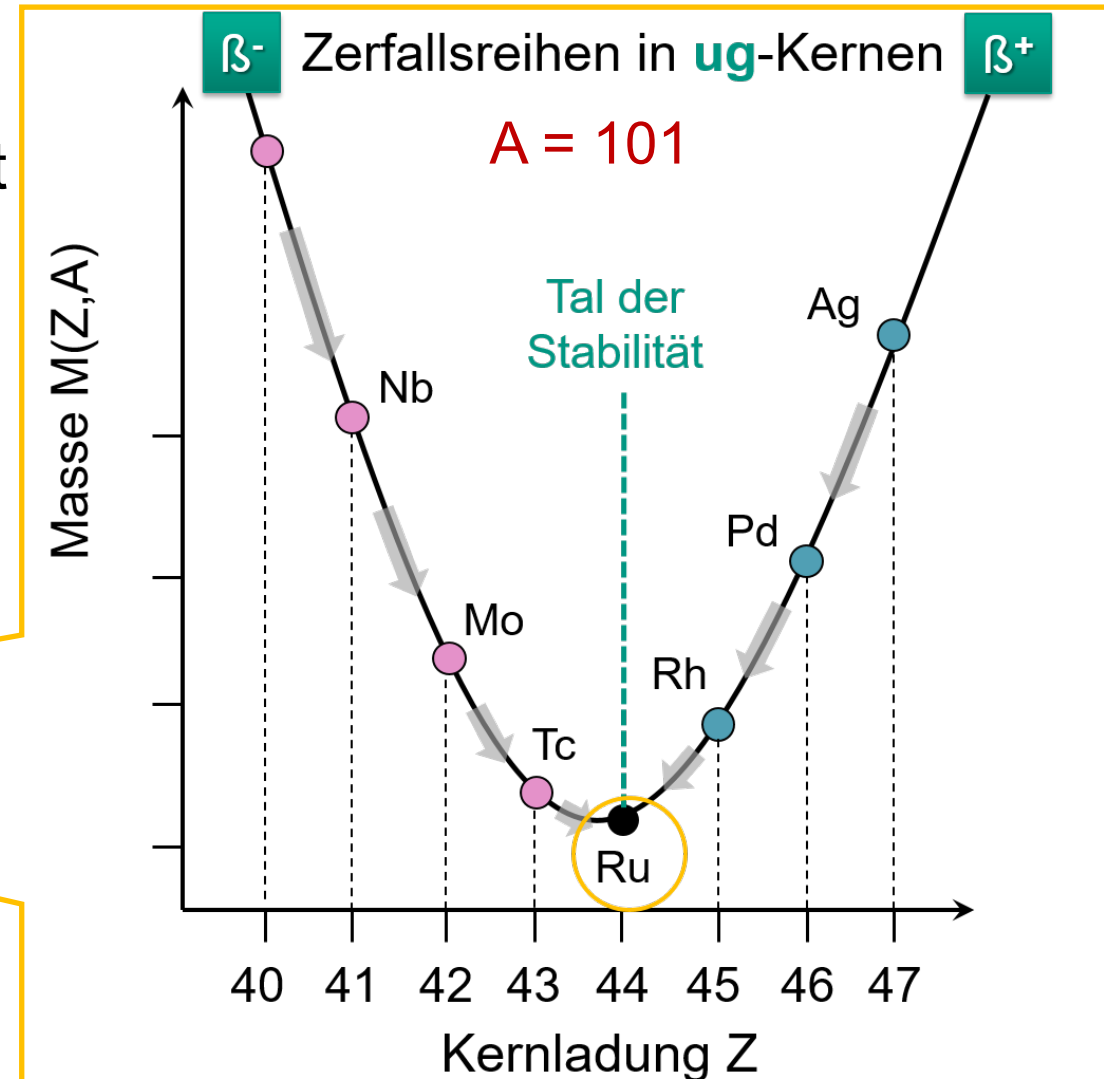
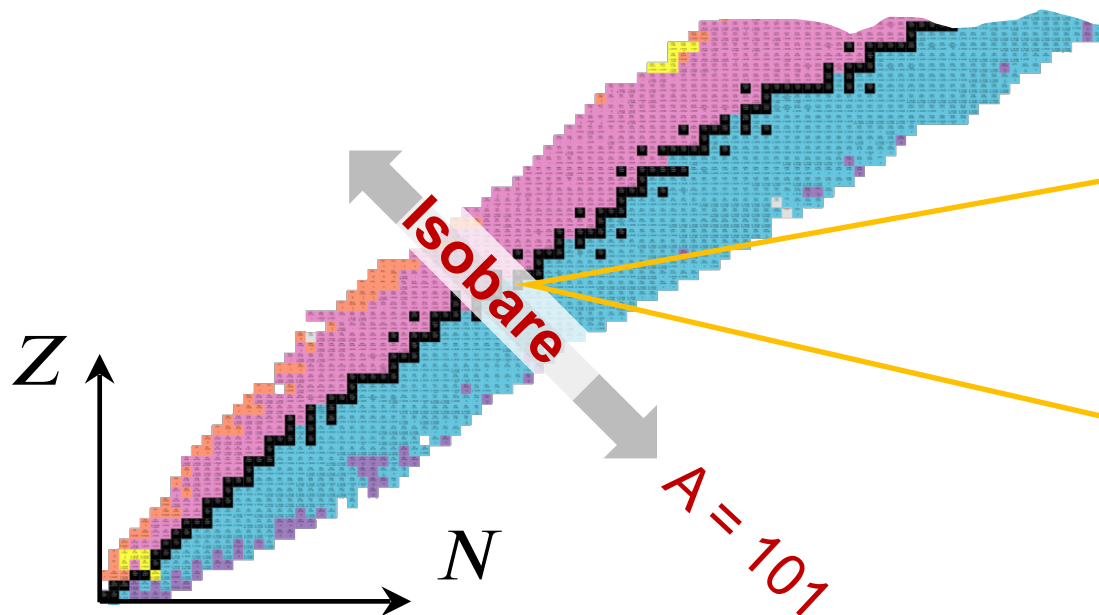
δ : Paarungs-
-Term

$\delta \sim 1 \text{ MeV}$
für $A = 100$

gg : $+\delta$
ug : $\delta = 0$
uu : $-\delta$

Isobaren-Zerfallskette von ug-Kernen

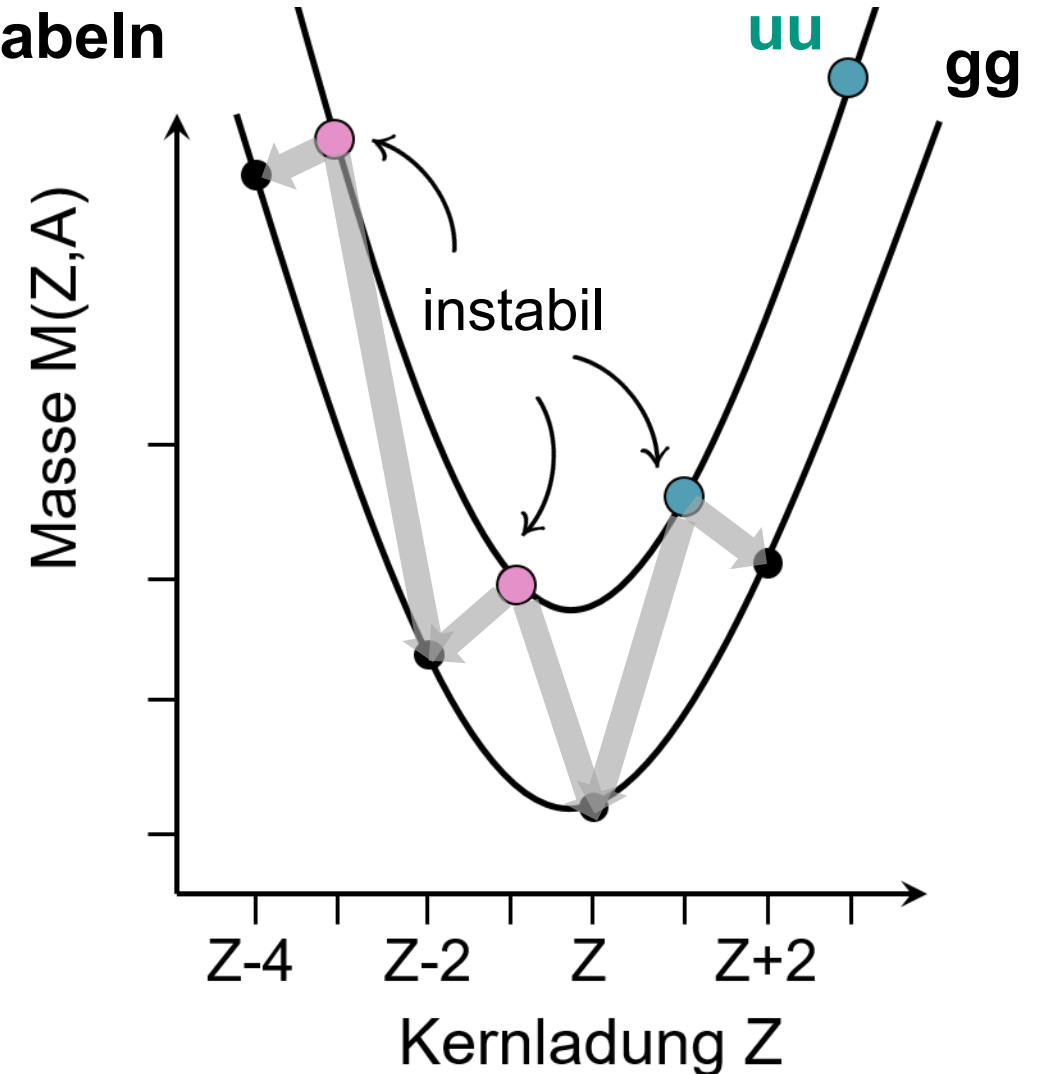
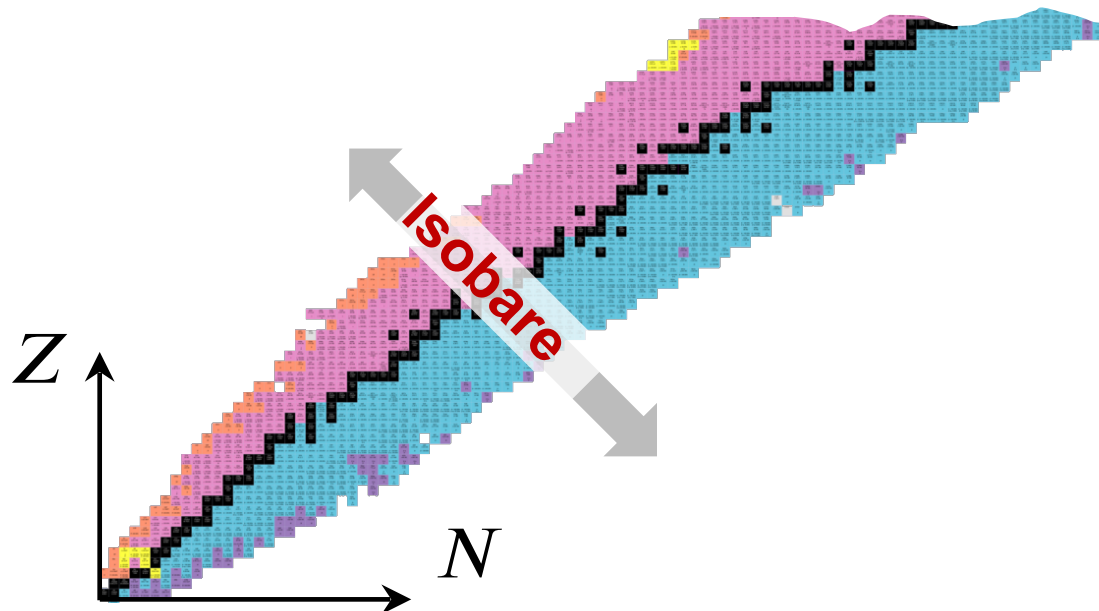
- Isobare mit **$A = \text{const.}$**
- **ug-Kerne**: 1 ungepaartes Nukleon verbleibt
- mehrstufige **β -Zerfallsketten** zum energetisch günstigsten (stabilen) Kern



Isobaren-Zerfallskette von gg/uu-Kernen

- Isobare mit **A = const.** $\Rightarrow$ 2 Massenparabeln

- uu-Kerne: jeweils 1 ungepaartes p, n
 β -Zerfälle energetisch möglich

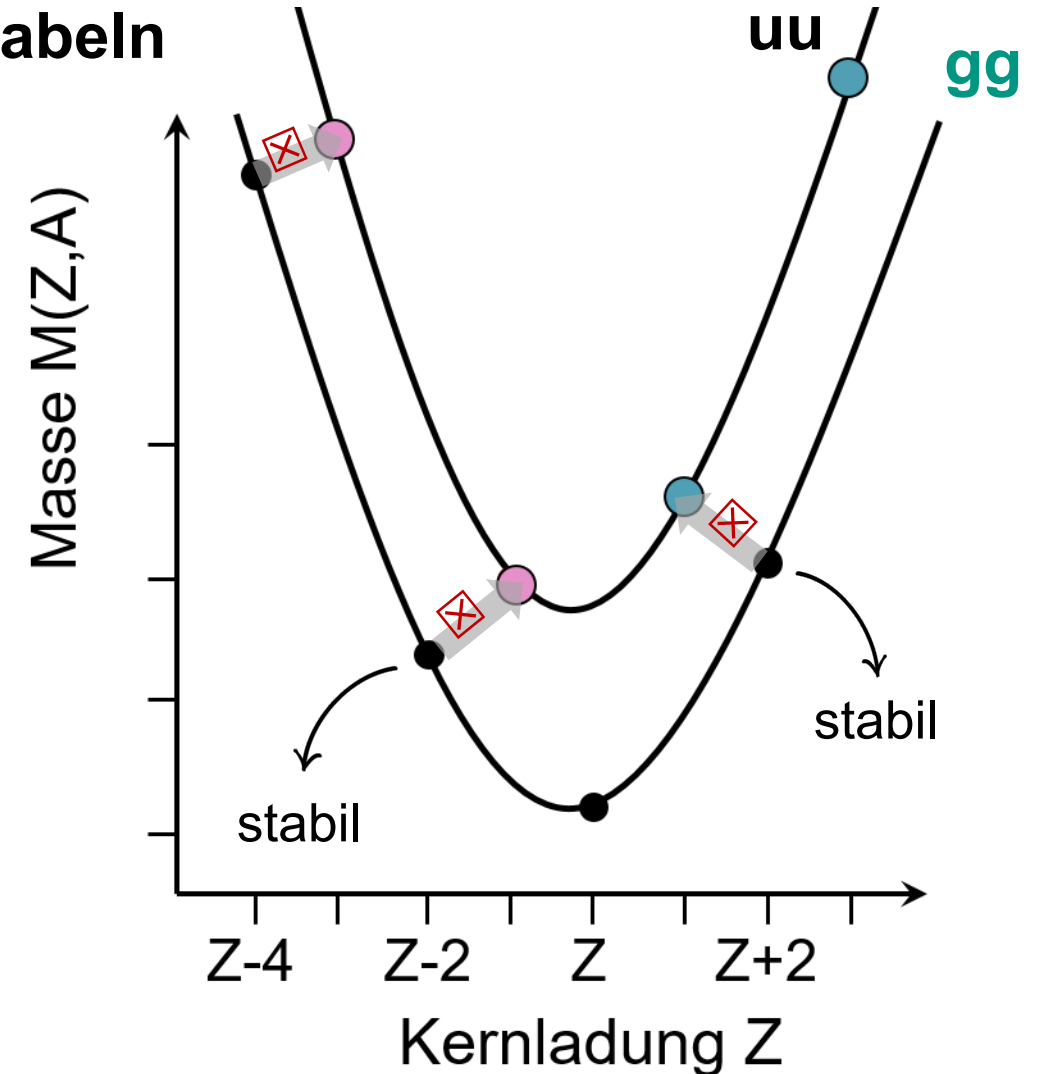
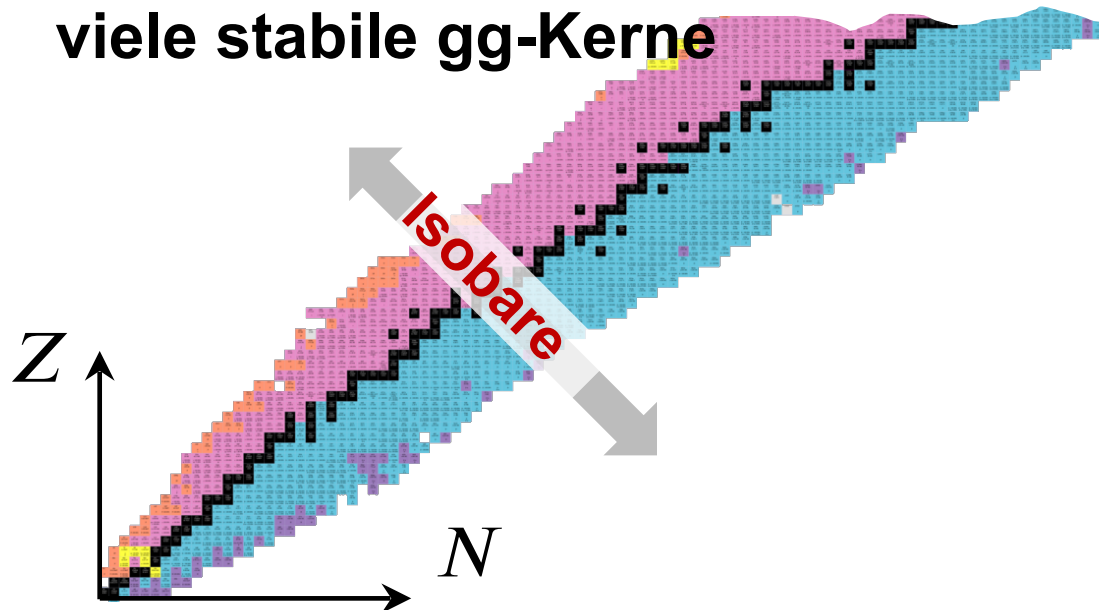


Isobaren-Zerfallskette von gg/uu-Kernen

- Isobare mit **$A = \text{const.}$** $\Rightarrow$ 2 Massenparabeln

- **gg**-Kerne: nur gepaarte Nukleonen, kein (einfacher) β -Zerfall zum Nachbarisotop $Z \pm 1$ möglich (liegt energetisch höher!)

$\Rightarrow$ **viele stabile gg-Kerne**



Isobaren-Zerfallskette: $\beta\beta$ -Zerfall von gg-Kernen

- **gg-Kerne: 2 Nukleonen zerfallen gleichzeitig!**

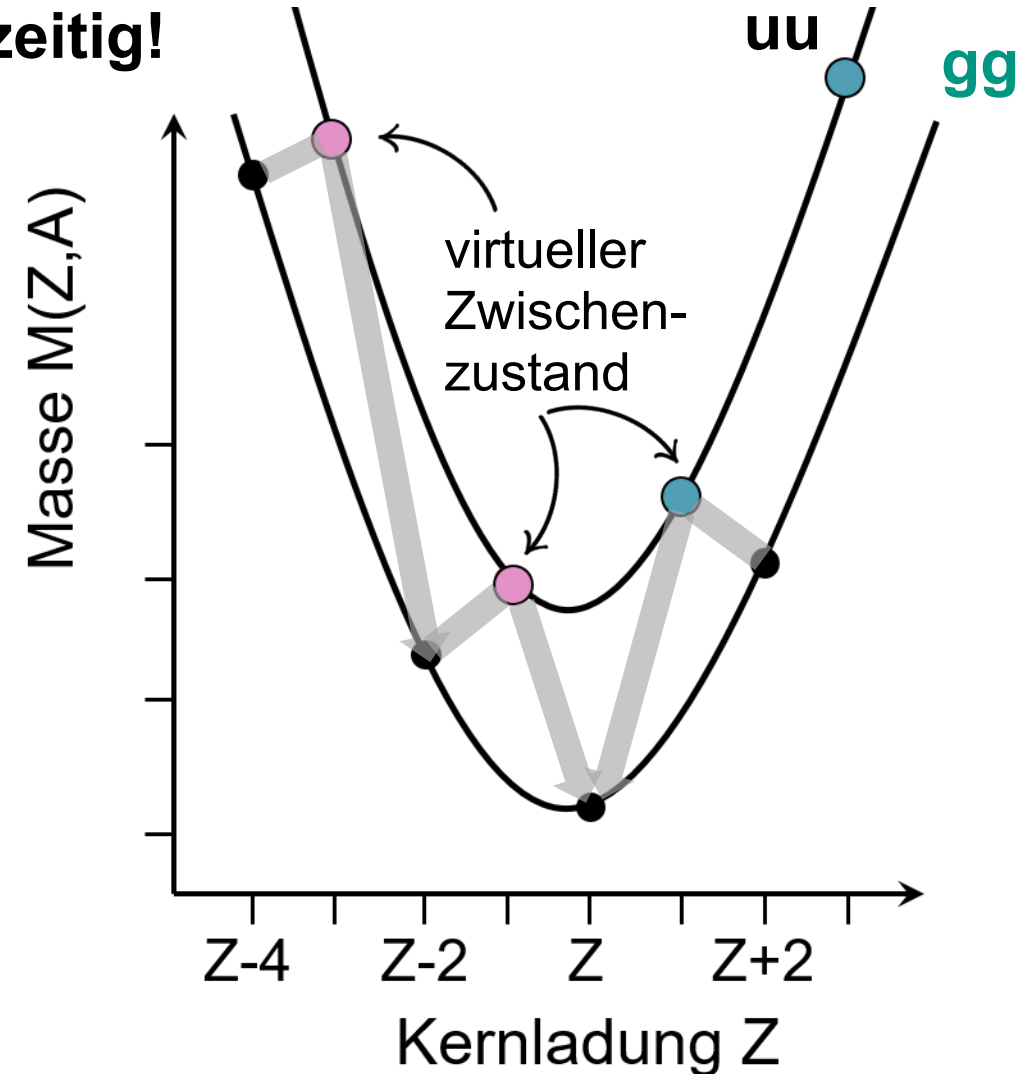
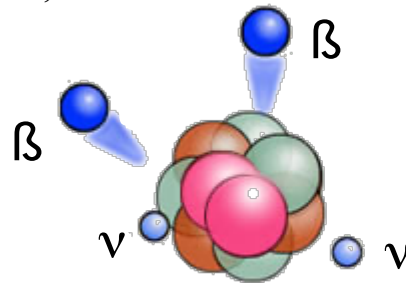
- Maria Goeppert-Mayer (1935):

Vorschlag einer neuen, extrem seltenen Zerfallsart:

Doppelbetazerfall ($2\nu\beta\beta$)

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A)$$

$$+ e_1^- + e_2^- + \bar{\nu}_{e,1} + \bar{\nu}_{e,2}$$



Isobaren-Zerfallskette: $\beta\beta$ -Zerfall von gg-Kernen

- gg-Kerne: 2 Nukleonen zerfallen gleichzeitig, ohne ν -Emission!

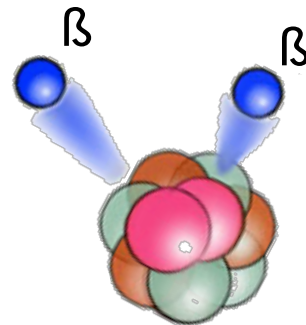
- George Racah, Ettore Majorana (1937):

Vorschlag einer neuen, hypothetischen
Zerfallsart jenseits des SM*:

Doppelbetazerfall ($0\nu\beta\beta$)

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A)$$

$$+ e_1^- + e_2^-$$



Mastervorlesung
Astroteilchenphysik



LEGEND

Large Enriched
Germanium Experiment
for Neutrinoless $\beta\beta$ Decay



Ge-76

Einfacher Kern- β -Zerfall: Energiespektrum

- Enrico Fermi's Theorie beschreibt das β -Spektrum auch heute noch!

- theoretische Voraussage der **Übergangsrate eines β -Zerfalls** auf der Basis der Störungstheorie der Quantenmechanik

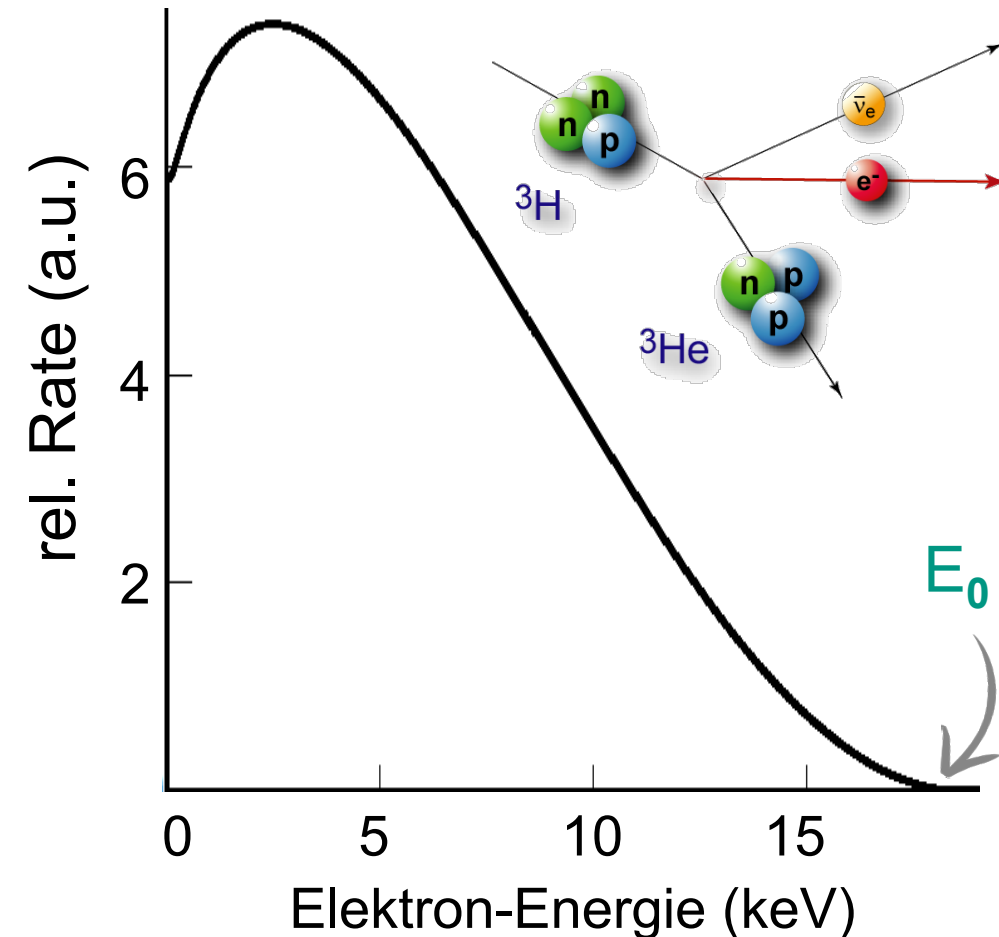


Enrico Fermi

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

Übergang:

Zustand ❶ $\rightarrow$ Zustand ❷



Fermi's Goldene Regel

■ Bestimmung der Übergangsrate Γ & des Energie-Spektrums

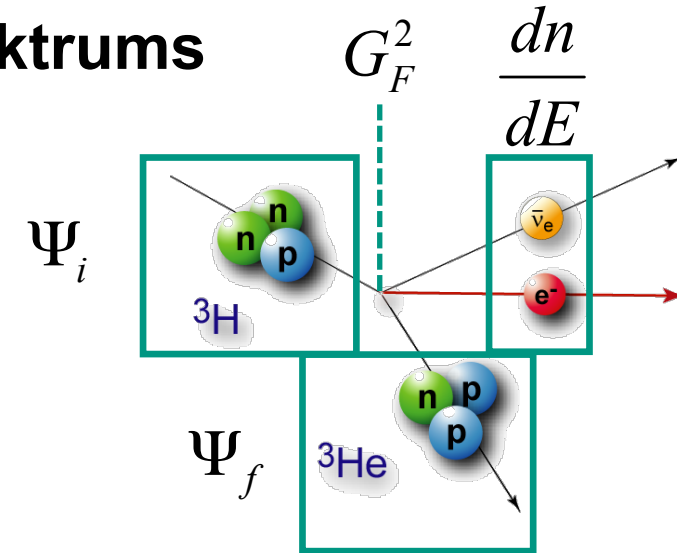
- schwache Wechselwirkung bewirkt als **Störoperator** den Übergang vom Anfangszustand Ψ_i in den Endzustand Ψ_f

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

Stärke der
Wechselwirkung

Matrixelement
des Übergangs

Endzustandsdichte –
bestimmt die Energieverteilung



Fermi's Goldene Regel

- **Kopplungskonstante G_F (Fermi-Konstante)**

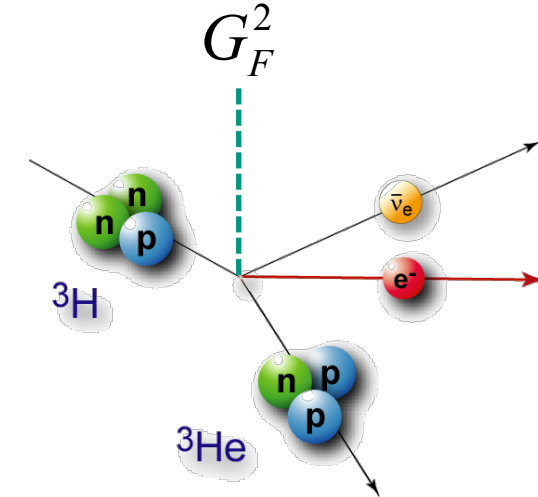
- Stärke der Kopplung bei niedrigen Energien = G_F =
Punktwechselwirkung von 4-Fermionen

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = 1,16637 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} = 8,96 \times 10^{-5} \text{ MeV fm}^{-3}$$

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

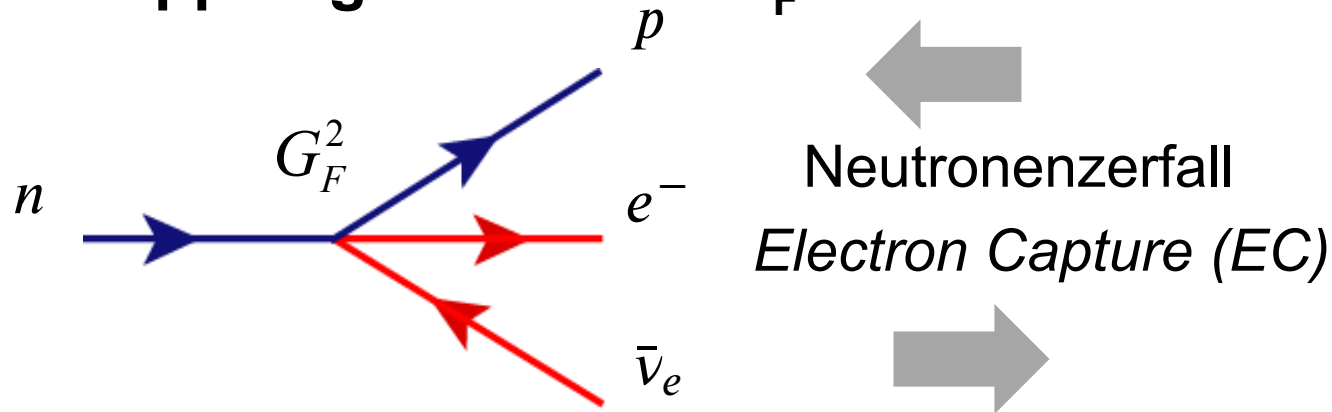
Stärke der
Wechselwirkung

- G_F bestimmt aus schwachen Zerfällen,
z.B. β -Zerfällen von O-14 und von Myonen



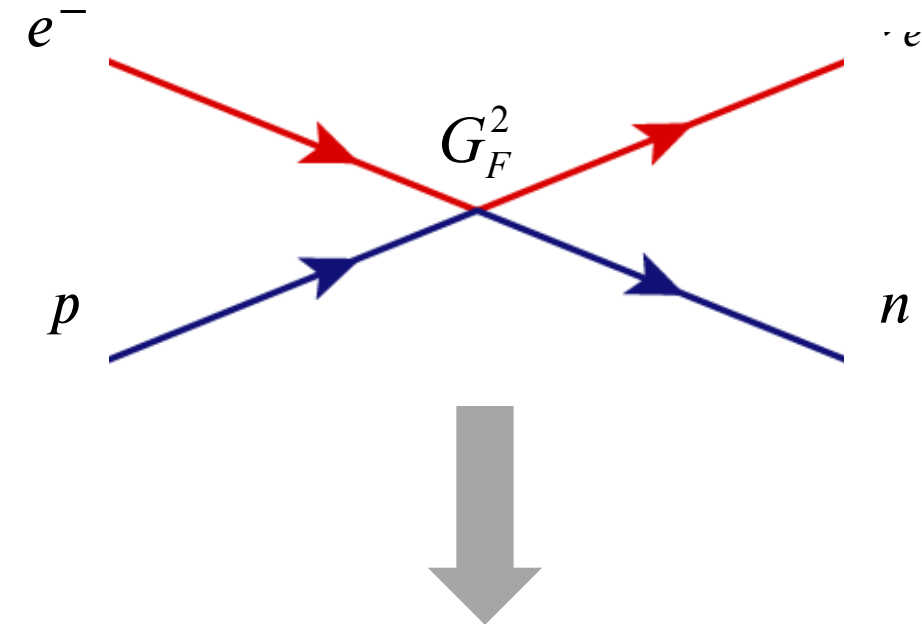
Fermi's Goldene Regel

- Kopplungskonstante G_F : Punktwechselwirkung von 4 Fermionen



$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

Stärke der
Wechselwirkung



- Wechselwirkung noch **ohne W-Bosonen**,
daher **dimensionsbehaftete Größe**,
Rate divergiert bei sehr hohen Energien!

Fermi's Goldene Regel

- **Kernmatrixelement: Überlapp der Wellenfunktionen des Anfangs- & des Endzustands**

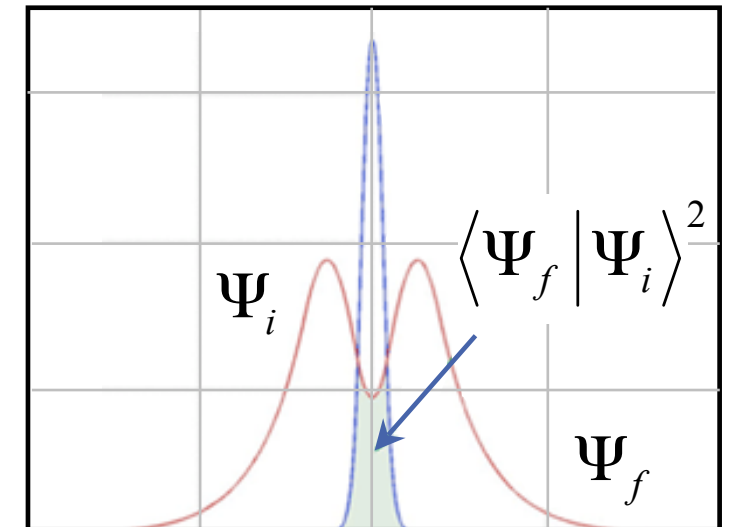
- bei **erlaubten Zerfällen** ist das **Kernmatrixelement M energie-unabhängig** (es wird kein Bahndrehimpuls L weggetragen)

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$



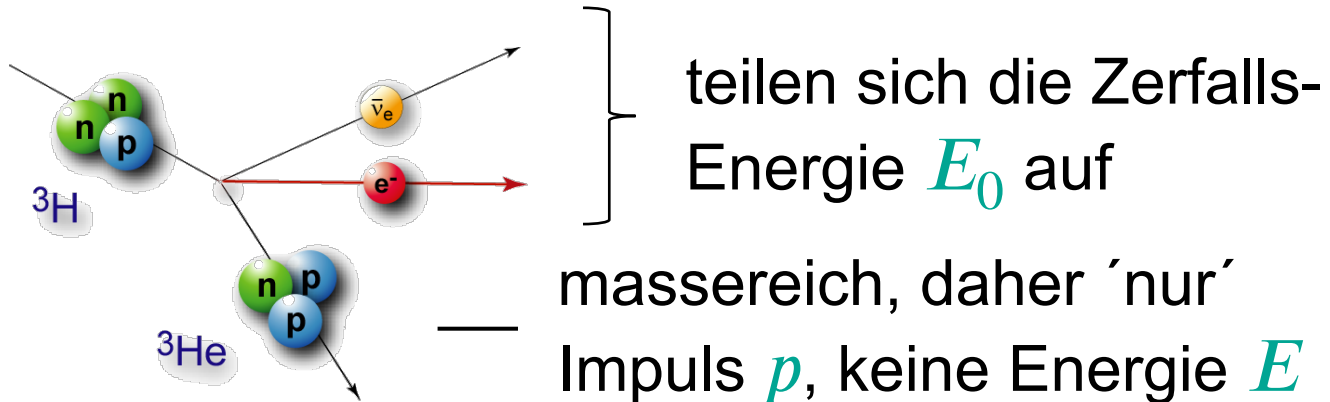
- **f**: Wellenfunktion des „final state“
Kern + auslaufendes Leptonenpaar
- **i**: Wellenfunktion des „initial state“

Überlapp der Kern-
wellenfunktionen



Fermi's Goldene Regel

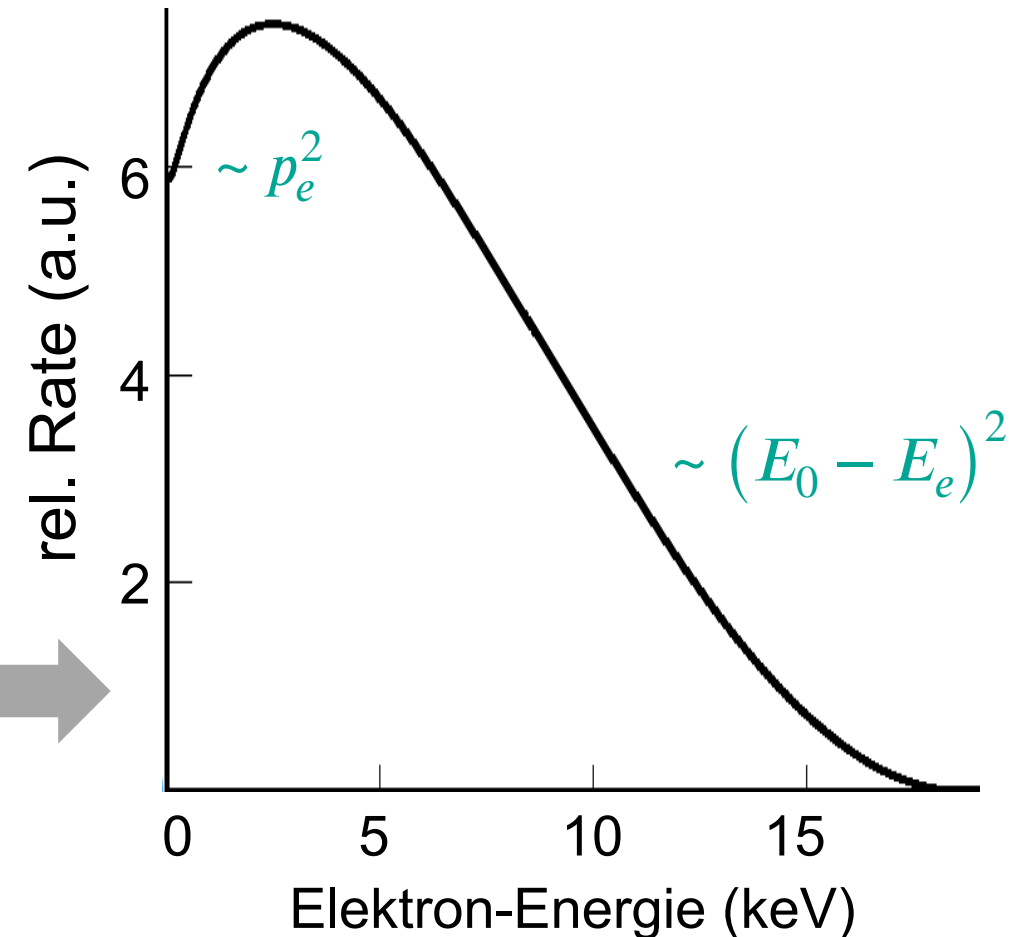
- Endzustandsdichte: bestimmt des Energiespektrum der Elektronen



$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

- zur Berechnung des Spektrums:
nur kinematische Größen relevant...
 E_0 , p_e , p_ν , ...

Resultat



Fermi's Goldene Regel

- **Phasenraum eines Fermions: Impulsintervall** $[p, p + dp]$

- **Phasenraum**: 6 dim. Orts-Impuls-Raum: $dx \cdot dy \cdot dz \cdot dp_x \cdot dp_y \cdot dp_z$
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Ort (Einheitsvolumen)}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Impuls}}$

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

Endzustandsdichte –
bestimmt die Energieverteilung

- da Volumen $V \equiv 1$ wird die Zahl dn der Fermion-Zustände gesucht im **Impulsintervall** $[p, p + dp]$ (über das gesamte β -Spektrum)

Fermi's Goldene Regel

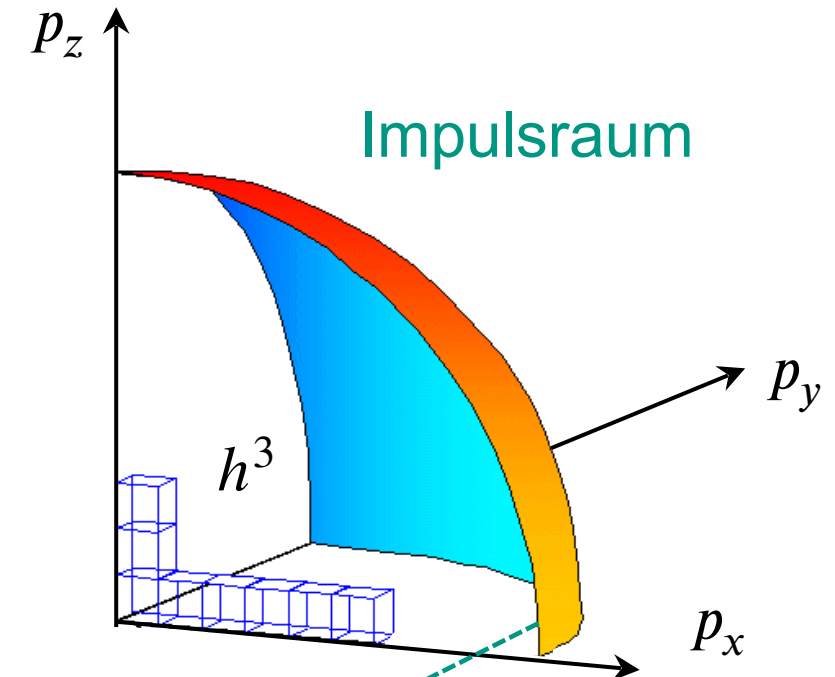
■ Endzustandsdichte: Phasenraum des Leptonenpaars

dn = Zahl der Teilchen-Zustände im **Phasenraum**
innerhalb des **Impulsintervalls** $[p, p + dp]$



$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

⇒ diese Fermionen sind lokalisiert im
Impulsraum-Volumen einer dünnen
Kugelschale mit Oberfläche $4\pi \cdot p^2$ und Dicke dp



Fermi's Goldene Regel

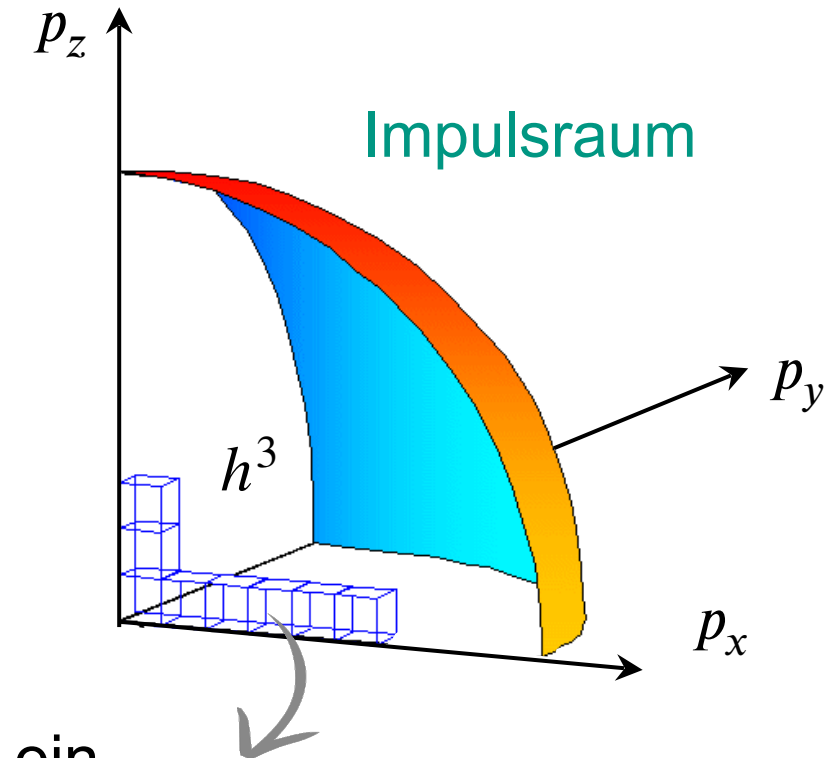
■ Endzustandsdichte: Phasenraum des Leptonenpaars

dn = Zahl der Teilchen-Zustände im **Phasenraum** innerhalb des **Impulsintervalls** $[p, p + dp]$

- # Phasenraumzustände: $\sim V \cdot 4\pi \cdot p^2 \cdot dp / h^3$

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot G_F^2 \cdot \left| \langle f | M_{fi} | i \rangle \right|^2 \cdot \frac{dn}{dE}$$

- in statistischer Mechanik tritt für den **Impulsraum** ein minimales Phasenraum-Volumen auf: $V_{min} = (2\pi \cdot \hbar)^3 = h^3$



Fermi's Goldene Regel

■ Endzustandsdichte: Phasenraum des **Leptonenpaars**

- **ein Fermion**: gesamter Impulsraum

$$dn = \frac{4\pi \cdot p^2 \cdot dp}{(2\pi \hbar)^3} \cdot V = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} \cdot V \cdot p^2 dp$$

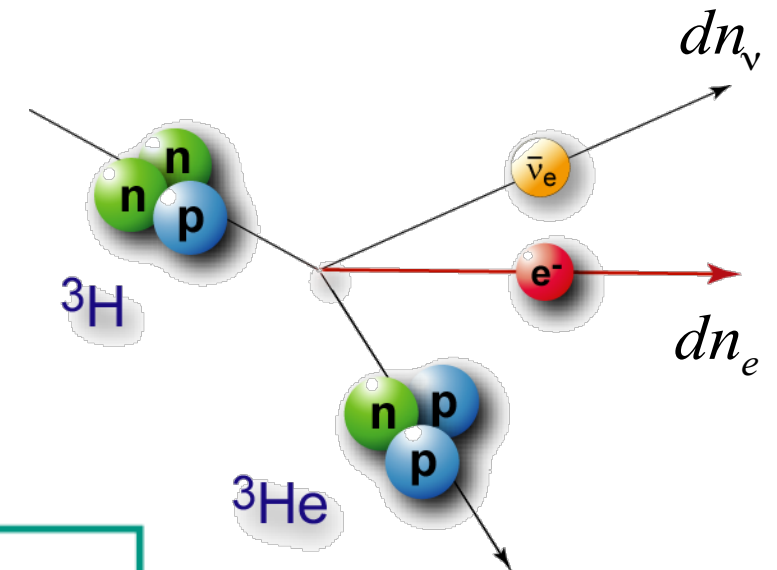
- im Endzustand: e^- und $\bar{\nu}_e$ - **2 Fermionen** teilen sich den verfügbaren **Phasenraum** auf:

$$dn_e = \frac{1}{2\pi^2 \cdot \hbar^3} \cdot V \cdot p_e^2 \cdot dp_e$$

e^-

$$dn_\nu = \frac{1}{2\pi^2 \cdot \hbar^3} \cdot V \cdot p_\nu^2 \cdot dp_\nu$$

$\bar{\nu}_e$



Fermi's Goldene Regel

- Endzustandsdichte: Phasenraum des **Leptonenpaars**

- β -Zerfälle sind **3-Teilchenprozesse**:

die Impulse von Elektron & Neutrino
sind nicht korreliert

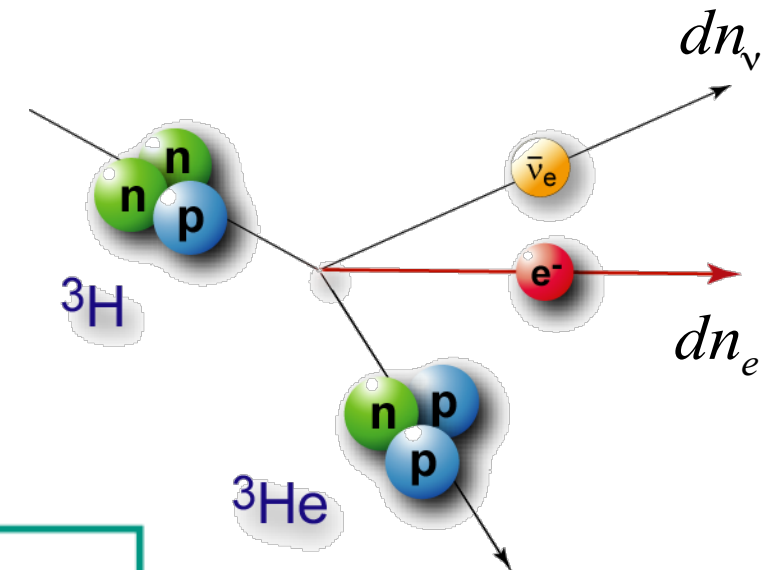
⇒ Ursache: der Impuls des Rückstoßkerns
kompensiert den Gesamtimpuls $\Sigma \mathbf{P}_i = 0$

$$dn_e = \frac{1}{2\pi^2 \cdot \hbar^3} \cdot V \cdot p_e^2 \cdot dp_e$$

e^-

$$dn_\nu = \frac{1}{2\pi^2 \cdot \hbar^3} \cdot V \cdot p_\nu^2 \cdot dp_\nu$$

$\bar{\nu}_e$



$$\Sigma \mathbf{P}_i = 0$$

(bei ^3H -Zerfall in Ruhe)

Fermi's Goldene Regel

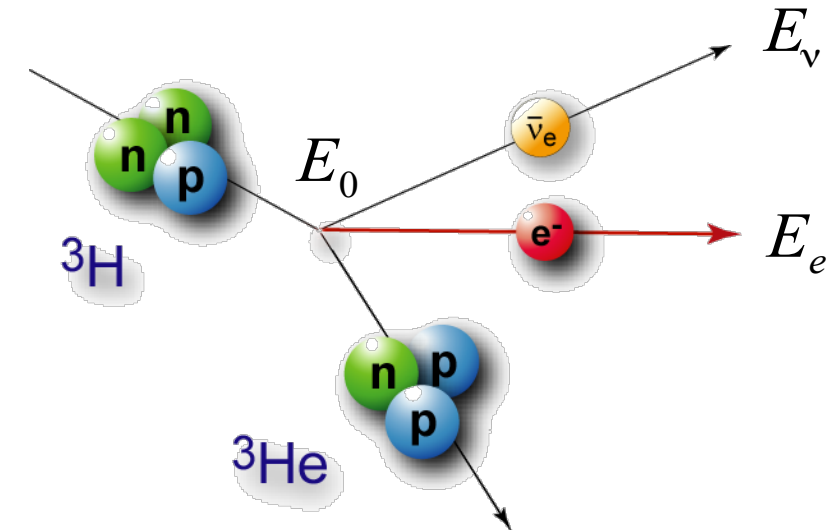
■ Endzustandsdichte: Phasenraum des **Leptonenpaars**

$$\frac{dn}{dE_{e,\nu}} = \frac{dn_e \cdot dn_\nu}{dE} = \frac{V^2}{4\pi^4 \hbar^6} \cdot p_e^2 \cdot dp_e \cdot p_\nu^2 \cdot dp_\nu$$

- für das quasi-masselose, ultra-relativistische **Neutrino** gilt die Energie-Impuls-Relation:

$$p_\nu = \frac{E_\nu}{c} = \frac{E_0 - E_e}{c} \quad dp_\nu = \frac{1}{c} \cdot dp_e$$

$$\frac{dn}{dE_e} = \frac{V^2}{4\pi^4 \cdot \hbar^6 c^3} \cdot p_e^2 \cdot (E_0 - E_e)^2 \cdot dp_e$$



$$E_0 = E_\nu + E_e$$

Fermi's Goldene Regel

■ Endzustandsdichte: Energiespektrum der Elektronen

- festgelegt durch Aufteilung Phasenraum

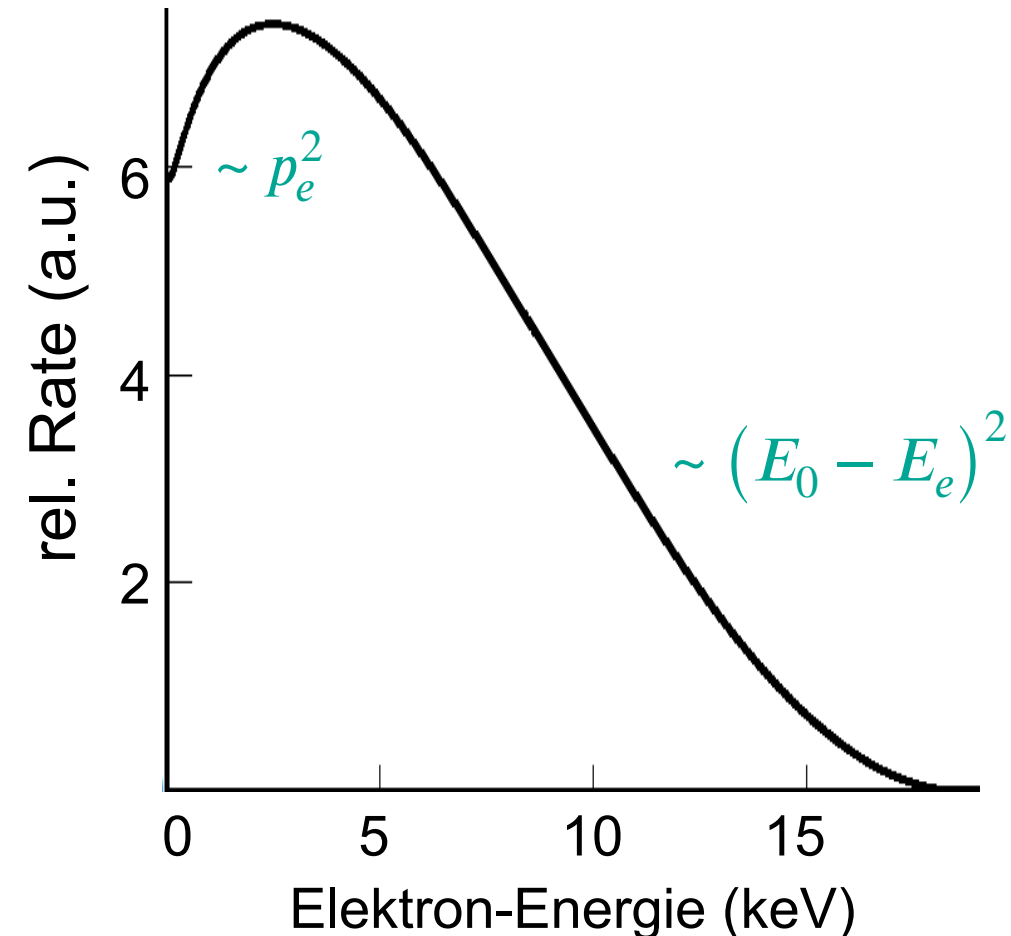
grosses E_e :

$$\Rightarrow dn/dE \sim (E_0 - E_e)^2$$

kleines E_e :

$$\Rightarrow dn/dE \sim p_e^2$$

$$\frac{dn}{dE} = \frac{V^2}{4\pi^4 \cdot \hbar^6 c^3} \cdot p_e^2 \cdot (E_0 - E_e)^2 \cdot dp_e$$



Fermi's Goldene Regel

- am kinematischen Endpunkt bei E_0 : Sensitivität auf ν -Masse!

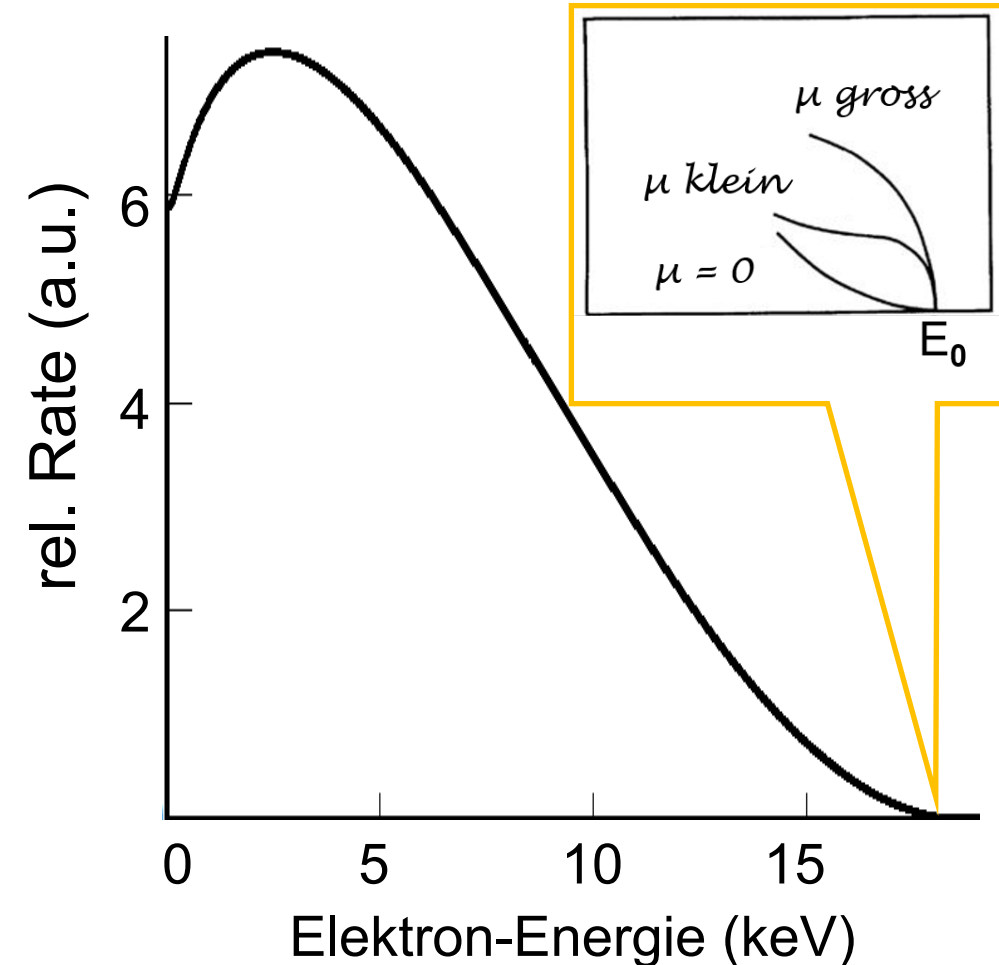
- massebehaftetes ν modifiziert Spektrum*
der e^- **nahe am Endpunkt E_0**
- KATRIN Experiment: bisher unerreichte
Präzision bei der Messung des Spektrums



E. Fermi



W. Pauli



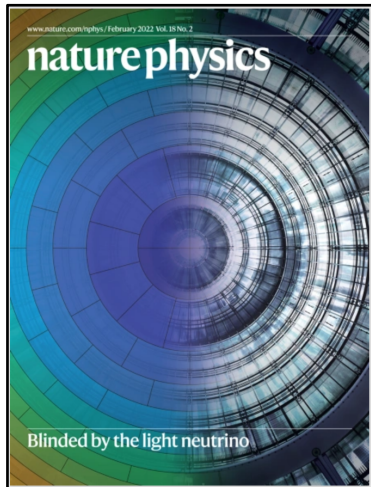
... und dann gibt es Katzen



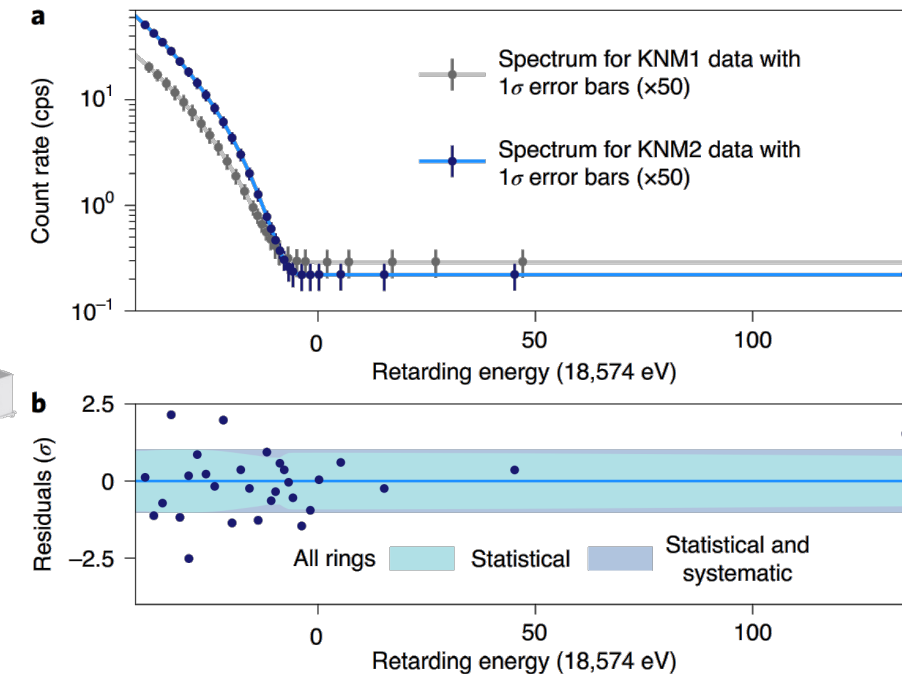
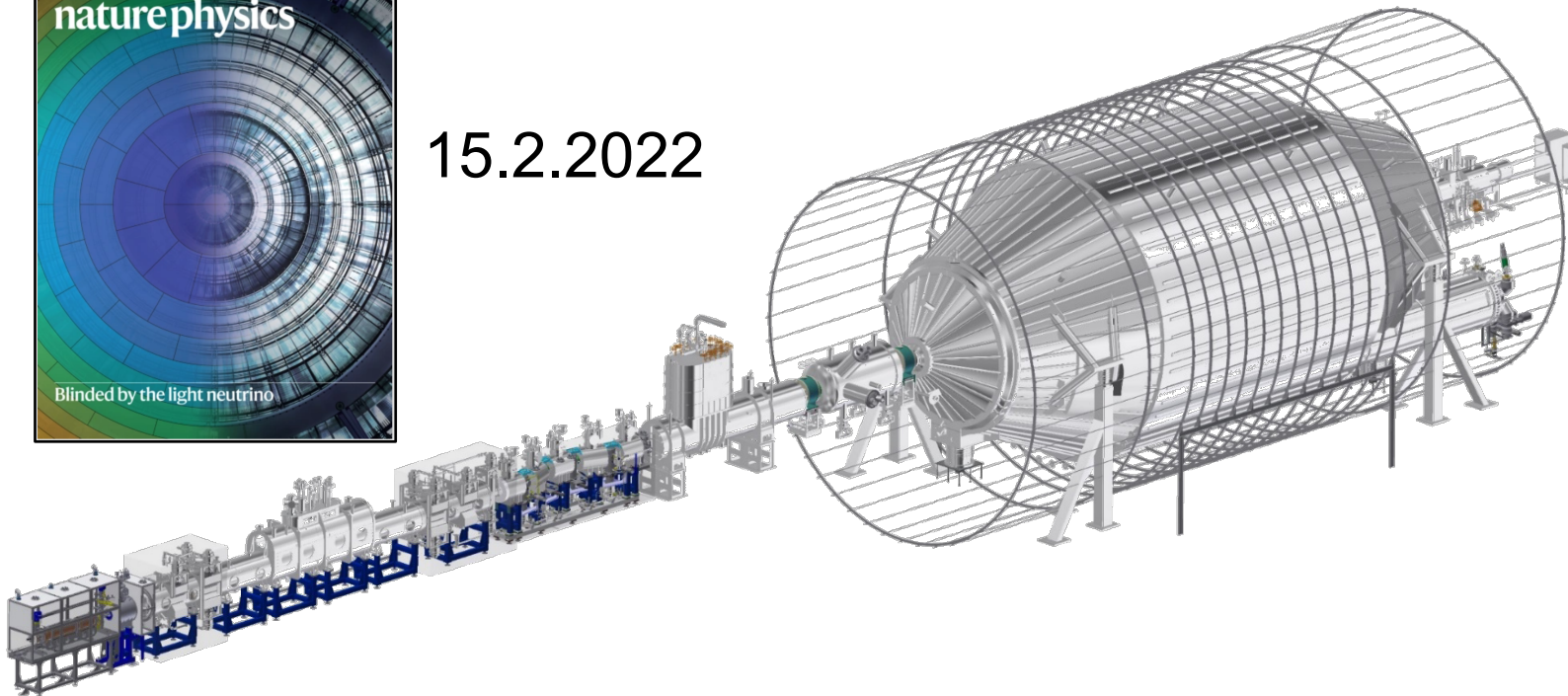
KATRIN Experiment

- am kinematischen Endpunkt bei E_0 : Sensitivität auf ν -Masse!

- ein 70 m langer experimenteller Aufbau
- aktuelle Obergrenze*: $m(\nu) < 0,8 \text{ eV}$ (90% CL)



15.2.2022



Quiz: Grundlagen des β -Zerfalls, nachgefragt

- Welche der folgenden Aussagen zum β -Zerfall sind korrekt?
 - A. Die **Lebensdauer τ** von β -Zerfällen ist generell sehr lang, da das Neutrino so leicht ist & kaum **Masse $m(\nu)$** hat
 - B. Es gibt Nuklide, die über einen **β -Zerfall** und über **Elektronen-Einfang (EC)** zerfallen können
 - C. Alle **gg-Kerne sind stabil**, da ihre Massenparabel unter der von uu-Kernen liegt
 - D. Aus dem Energiespektrum der e- aus β -Zerfällen lernt man sehr wenig über die Eigenschaften der **schwache Wechselwirkung**, aber viel über den verfügbaren **Phasenraum**

Gammazerfall

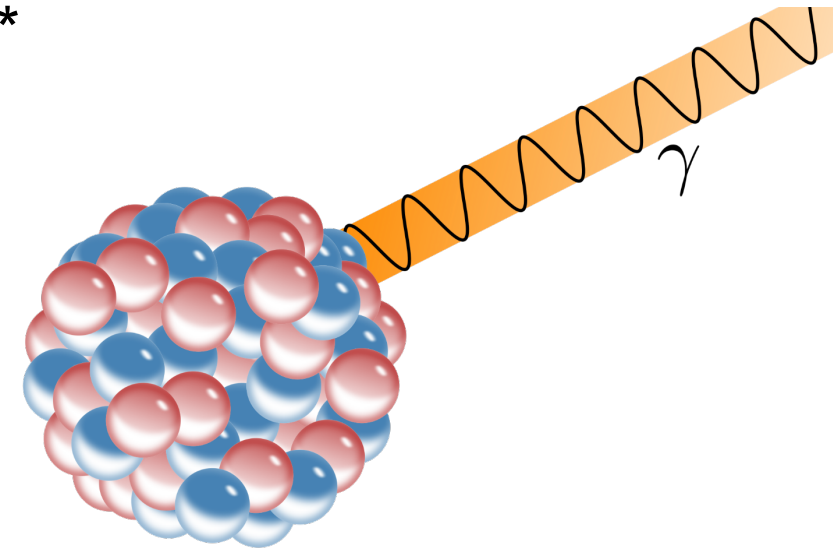
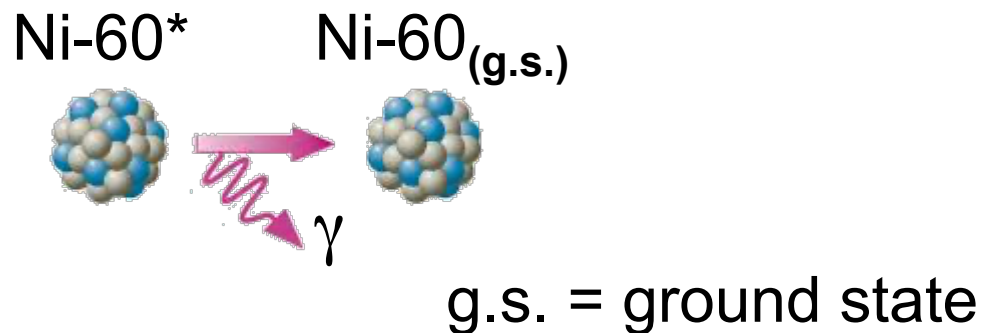
- **Angeregte Kernniveaus A^* können Gammastrahlung emittieren**

- Energiebereich: **0,1 – 10 MeV** (typisch: einige MeV)

⇒ **diskretes Gammaspektrum**

- typische Halbwertszeiten eines Zustands A^* : **$10^{-15} \text{ s} \dots 10^{-9} \text{ s}$**

- Beispiel: γ -Abregung eines angeregten Niveaus $^{60}\text{Ni}^*$

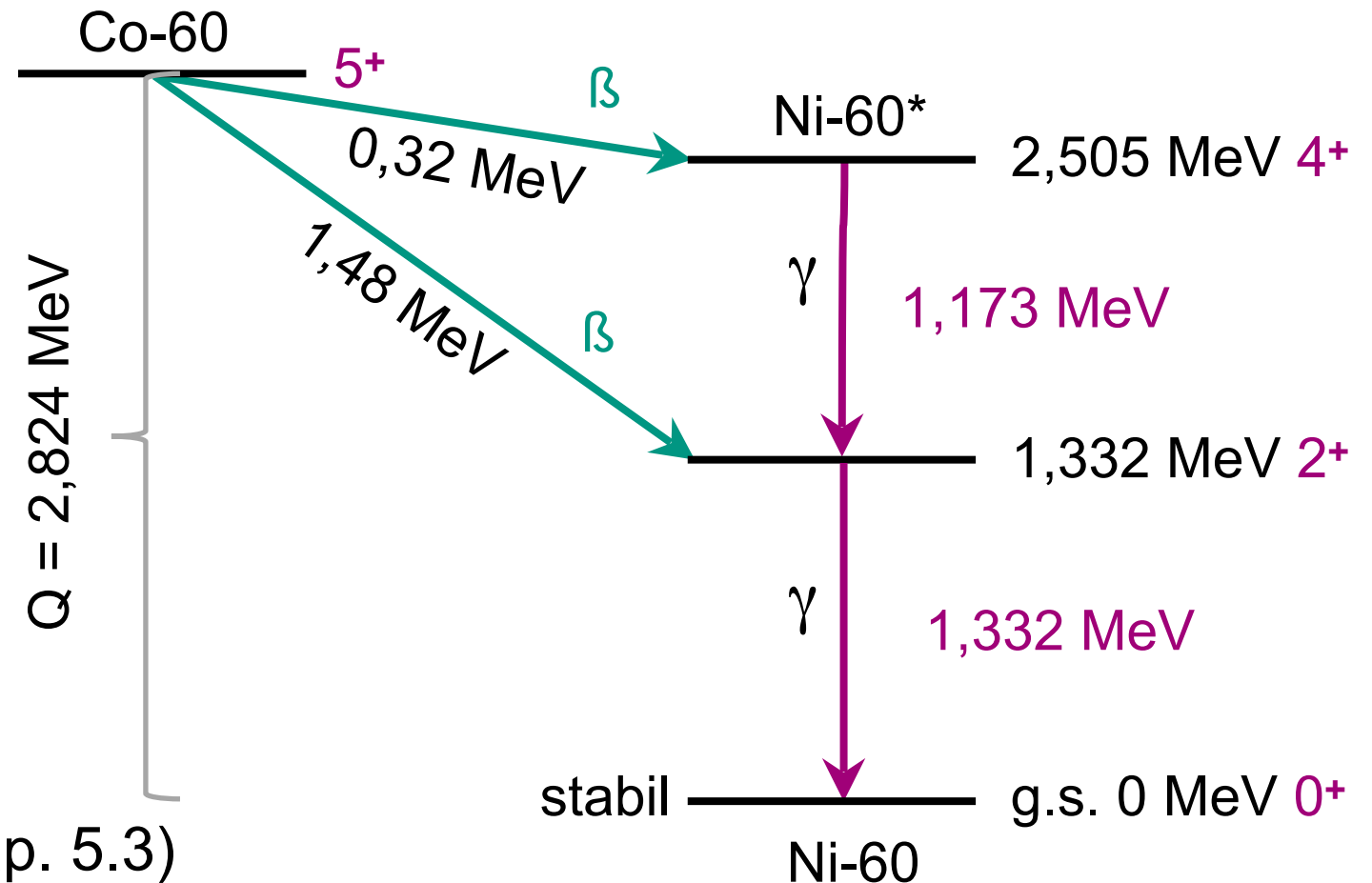


Gammazerfall: Beispiel Co-60 Präparat

- Angeregte Kernniveaus $^{60}\text{Ni}^*$: bevölkert über β -Zerfall



- Co-60 Präparat mit $t_{1/2} = 5,27$ Jahre
- Co-60 Präparat spielt wichtige Rolle im **Wu-Experiment** (s. Kap. 5.3)

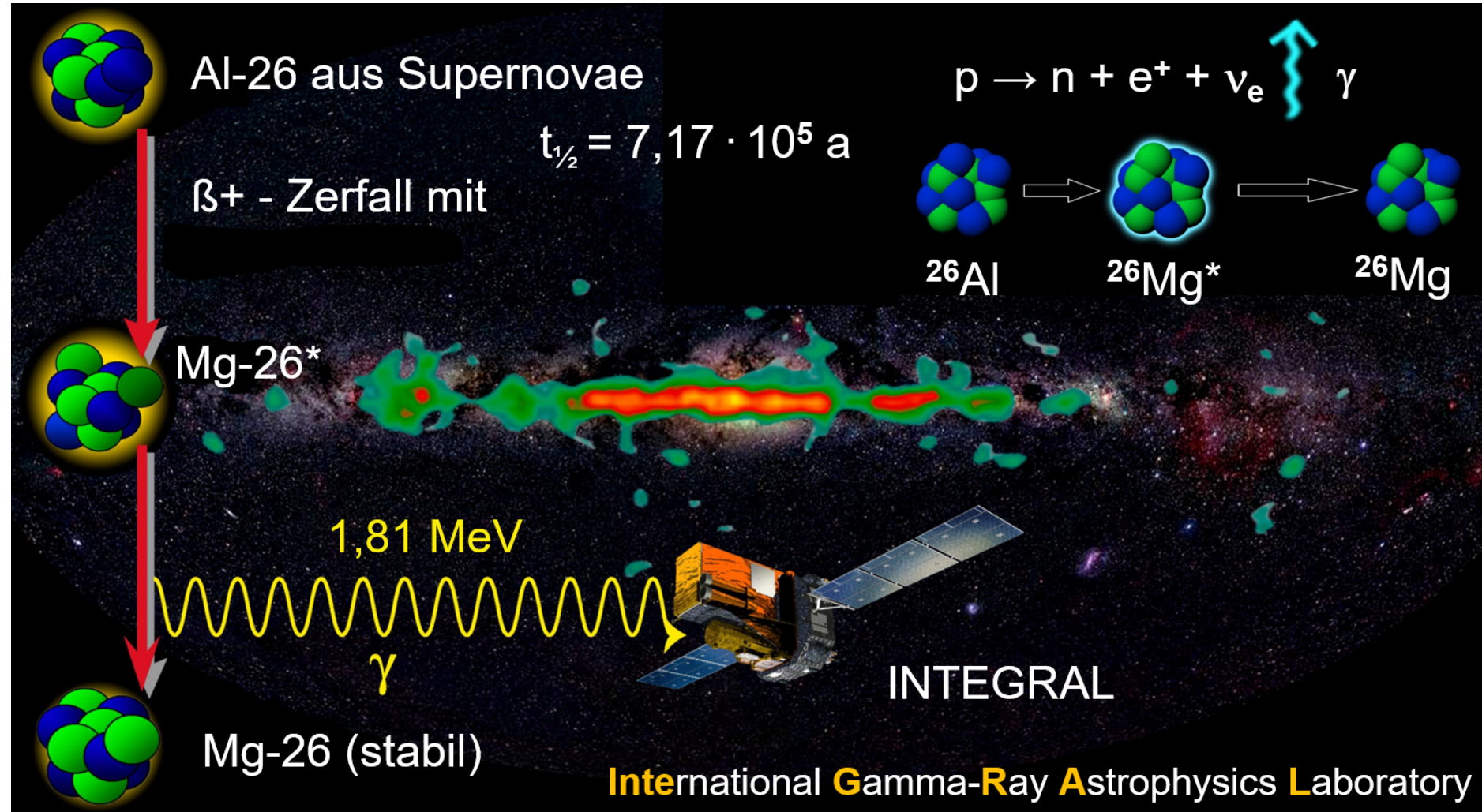


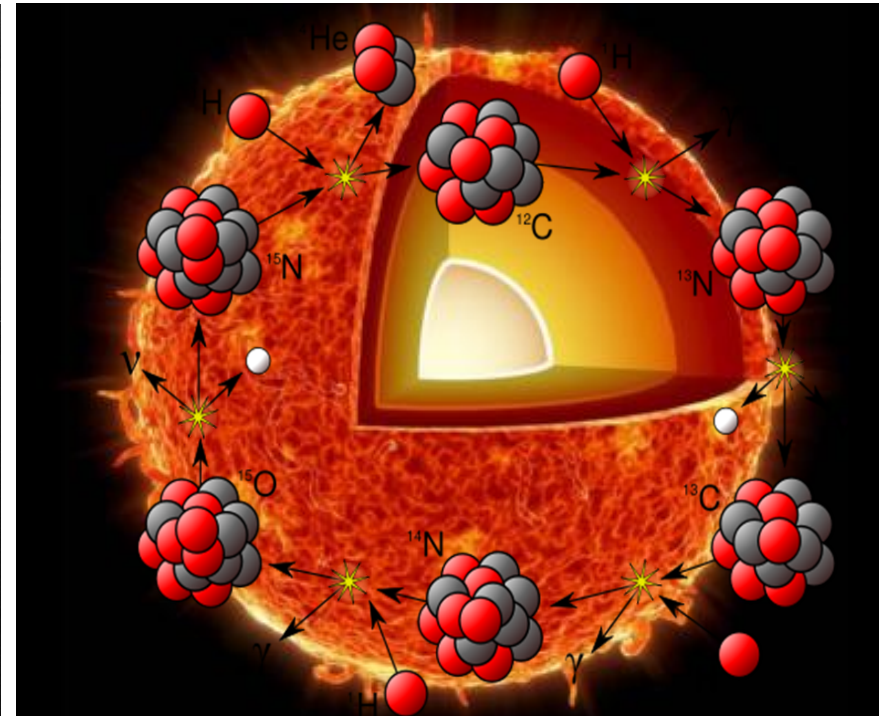
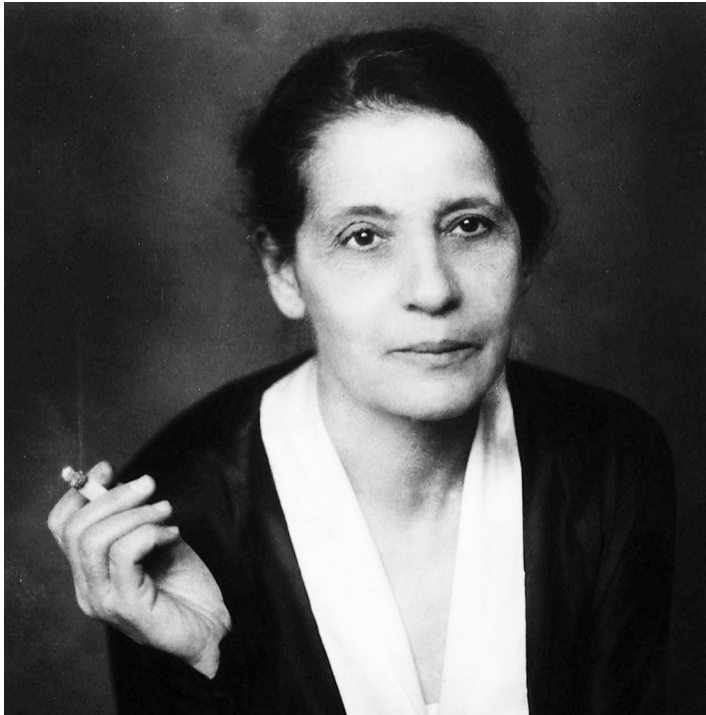
Gammazerfall: Beispiel Al-26 in Galaxis

■ Supernovae!

- Gammas aus $^{26}\text{Mg}^*$ -Zerfällen zeigen:

alle 50 Jahre
explodiert eine
Supernova in
unserer Galaxis!

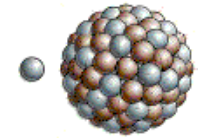
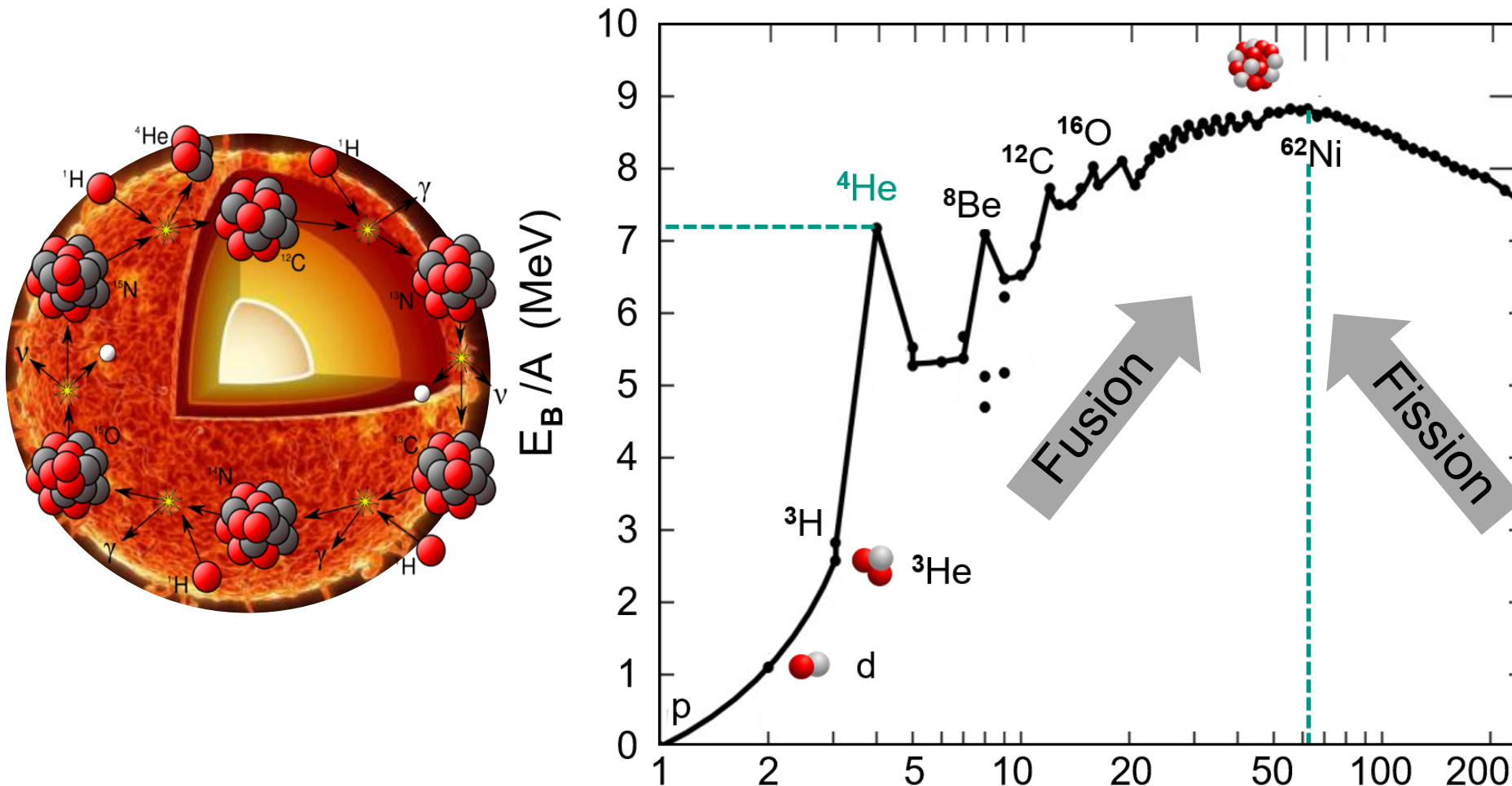




KAPITEL 4.2 – KERNSPALTUNG & KERNFUSION

Kernspaltung & Kernfusion

■ Energiegewinnung aus der Bindungsenergie von Nukleonen



Nukleonenzahl A

Bindungsenergie pro Nukleon, nachgefragt

■ Nukleonen im Kernpotenzial, welche Aussage ist richtig

A) Die Masse eines Nukleons M_N ist eine **Naturkonstante**, sie ändert sich **nicht** im Kernvolumen

B) Die Masse eines **Neutronensterns** ist $M = M_n \cdot N_n$,
mit M_n = Masse des freien n, N_n = # der n

C) ein niederenergetisches Proton ($E < 1 \text{ MeV}$) kann nicht in einen Kern integriert werden

D) ein Kern gibt seine Anregungsenergie nach Einfang eines Neutrons immer als Gammastrahlung ab

Kernspaltung

■ Historische Übersicht: die Phase der Entdeckungen

- 1938: O. Hahn & F. Straßmann entdecken die Kernspaltung
- 1939: L. Meitner & R.O. Frisch geben die erste korrekte Interpretation
- 1942: E. Fermi erzeugt in Chicago erste kontrollierte Kettenreaktion



Otto Hahn (1879-1968)
Nobelpreis für Chemie

Lise Meitner (1878-1968)



Otto Hahn's Labortisch*

Kernspaltung

■ Historische Übersicht: die Phase der Entdeckungen

- 1938: O. Hahn & F. Straßmann entdecken die Kernspaltung
- 1939: L. Meitner & R.O. Frisch geben die erste korrekte Interpretation
- 1942: E. Fermi erzeugt in Chicago erste kontrollierte Kettenreaktion



Enrico Fermi & sein Team

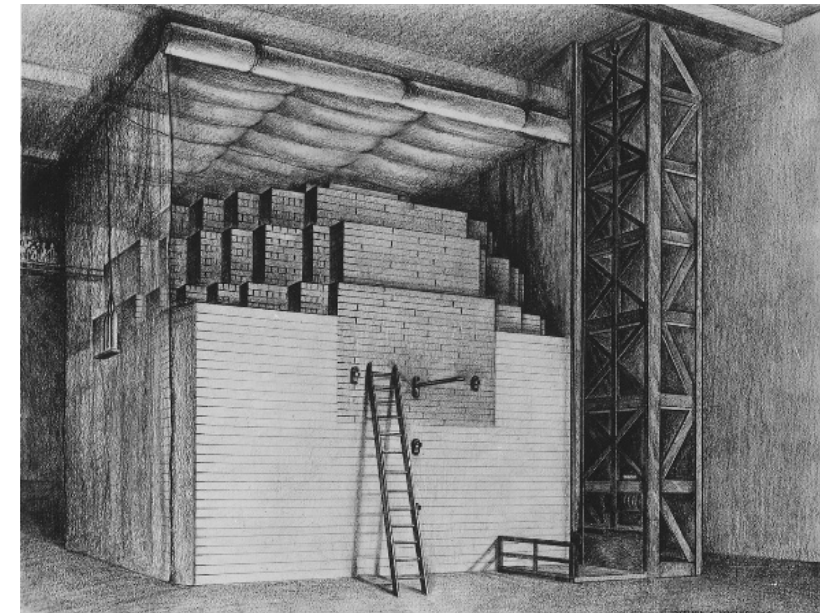
Chicago Pile-1: der erste
Kernreaktor mit $P = 200 \text{ W}$

Aufbau:

5 t Uran-Metall & 40 t Uran-Oxid

Radium-Beryllium-n-Quelle

45 000 Graphit-Blöcke (n-Moderator)



Kernspaltung

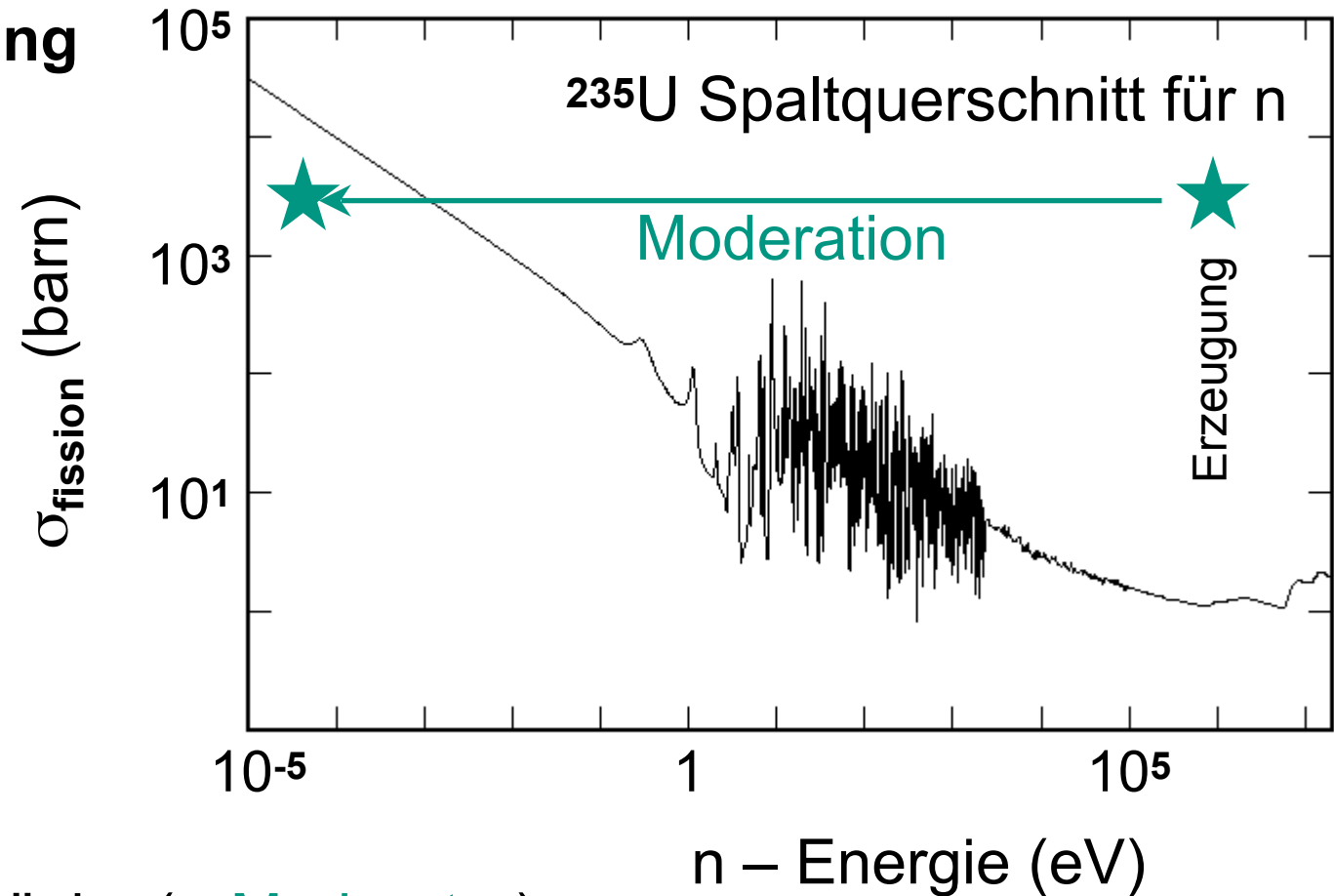
■ Historische Übersicht: n-Einfang am Uran-Isotop ^{235}U

- nur **niederenergetische (thermische) Neutronen** zur Spaltung von ^{235}U



45 000 Graphit-Blöcke (**n-Moderator**)

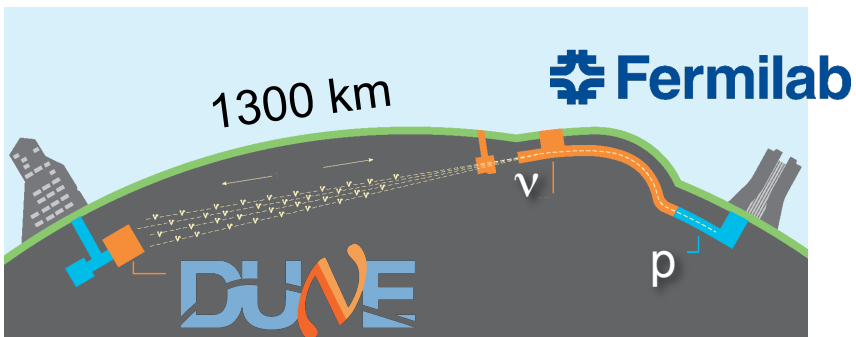
Enrico Fermi & sein Team



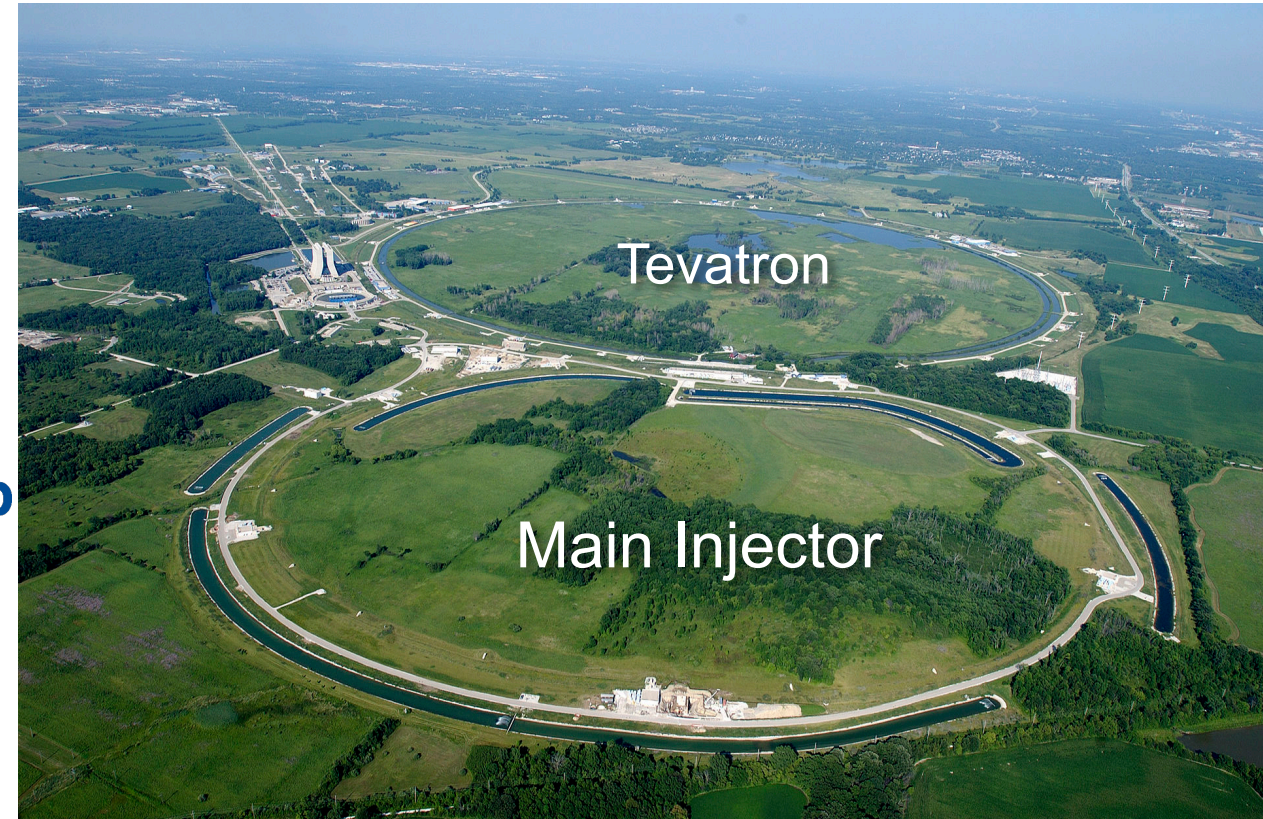
Teilchenphysik: FNAL in Batavia bei Chicago

■ Fermi National Accelerator Laboratory – das **Fermilab**

- wichtiges US-Beschleunigerlabor (**Tevatron** 1983-2011: $p\bar{p}$ -Energie von **1 TeV**)
- wichtige Resultate:
 - Entdeckung **top-Quark** (1995)
 - ⋮
 - heute fokussiert auf ν 's:



Enrico Fermi & sein Labor



Kernspaltung – induziert durch Neutronen

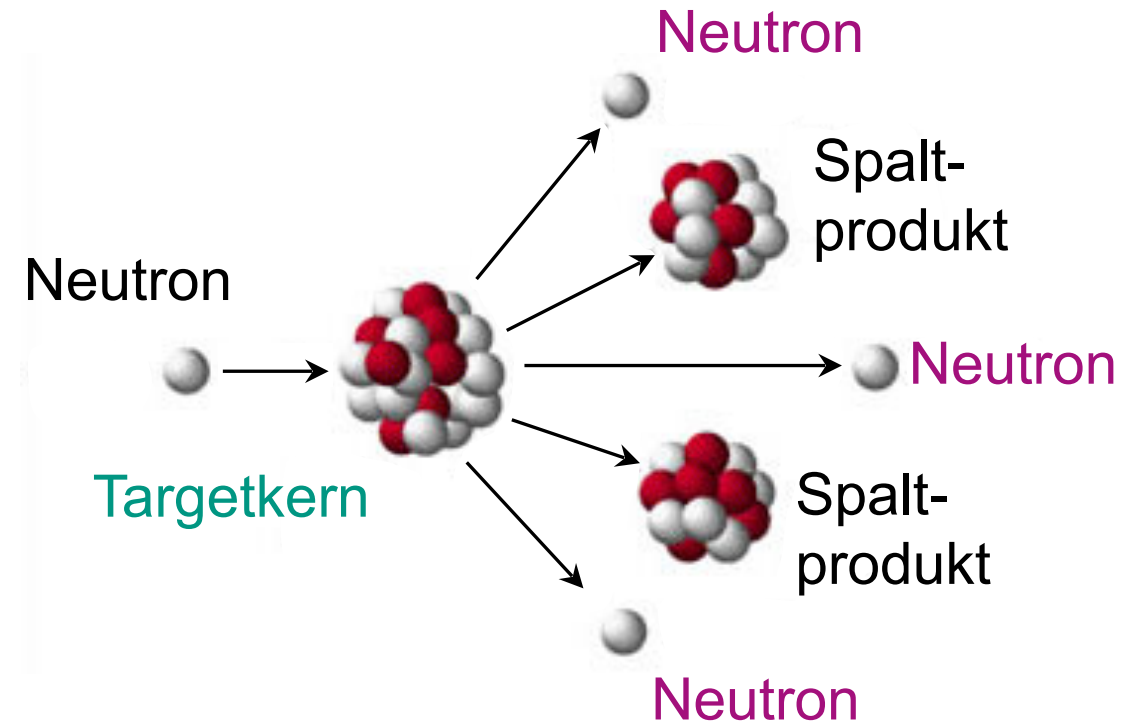
- entsteht durch 'dynamische Instabilität' bei Kernanregung (hohes Z)

- bei einem Spaltprozess wird eine Energiemenge von $\Delta E \sim 200 \text{ MeV}$ freigesetzt

- vgl. $\Delta E \sim 1 \text{ MeV}$ für B/A pro Nukleon
⇒ Uran (^{235}U) mit $A \sim 235$

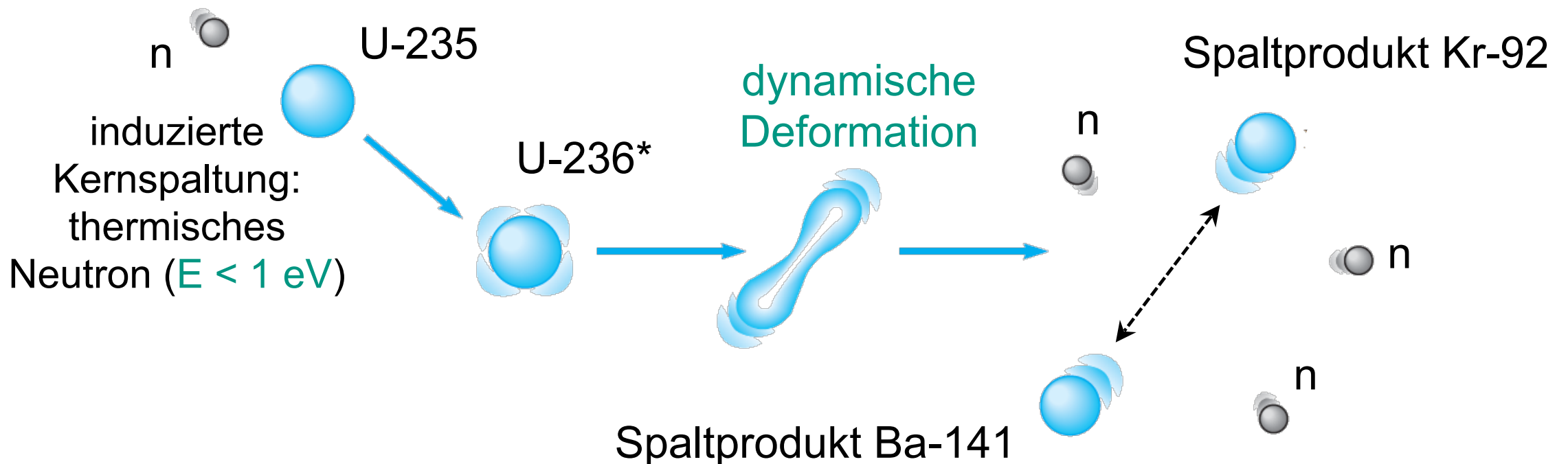
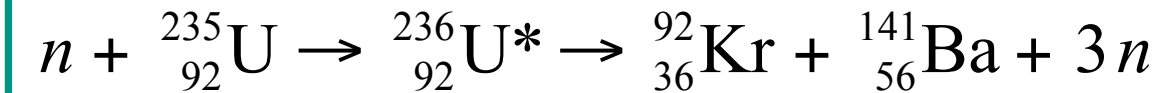
- **Kettenreaktion** erzeugt durch sekundäre Neutronen

- kontrollierte Spaltprozesse durch **Neutronenabsorber**



Spaltprozess – Deformation vor der Fission

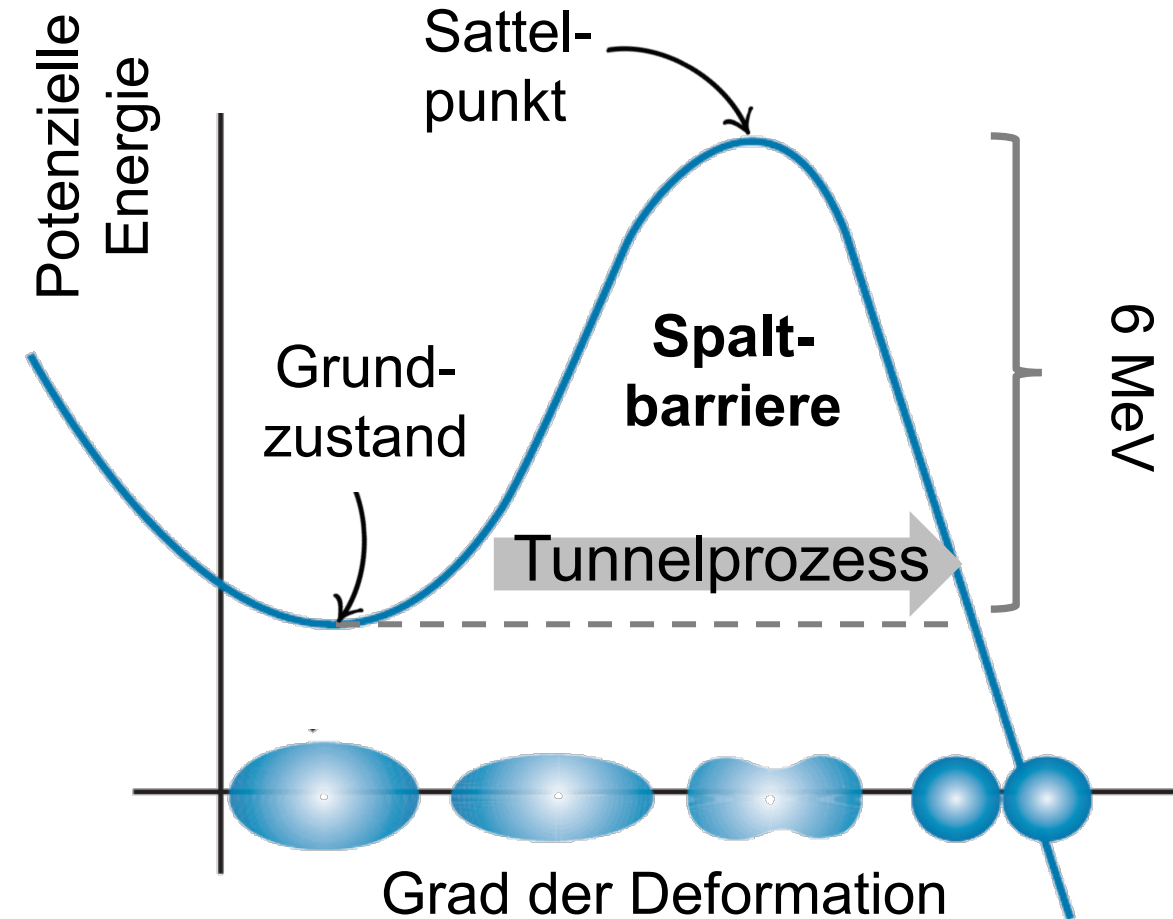
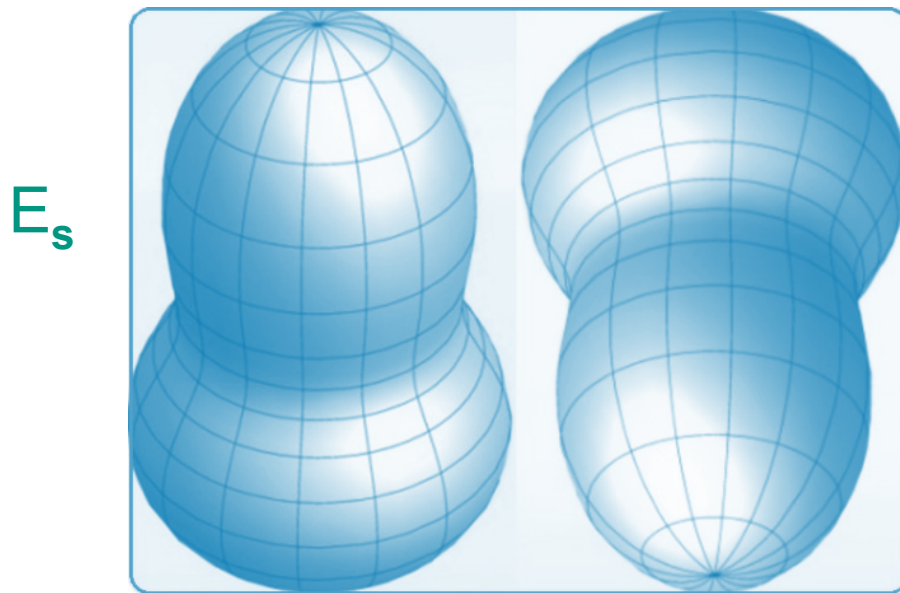
- entsteht durch **dynamische Instabilität**: Kerndeformation



Spaltprozess – spontane Spaltung

■ Stabilität eines schweren Kerns gegen spontane Spaltung

- dynamische **Deformation**
des Ausgangs-Kerns
(U-235, Pu-239)



Spaltprozess – spontane Spaltung

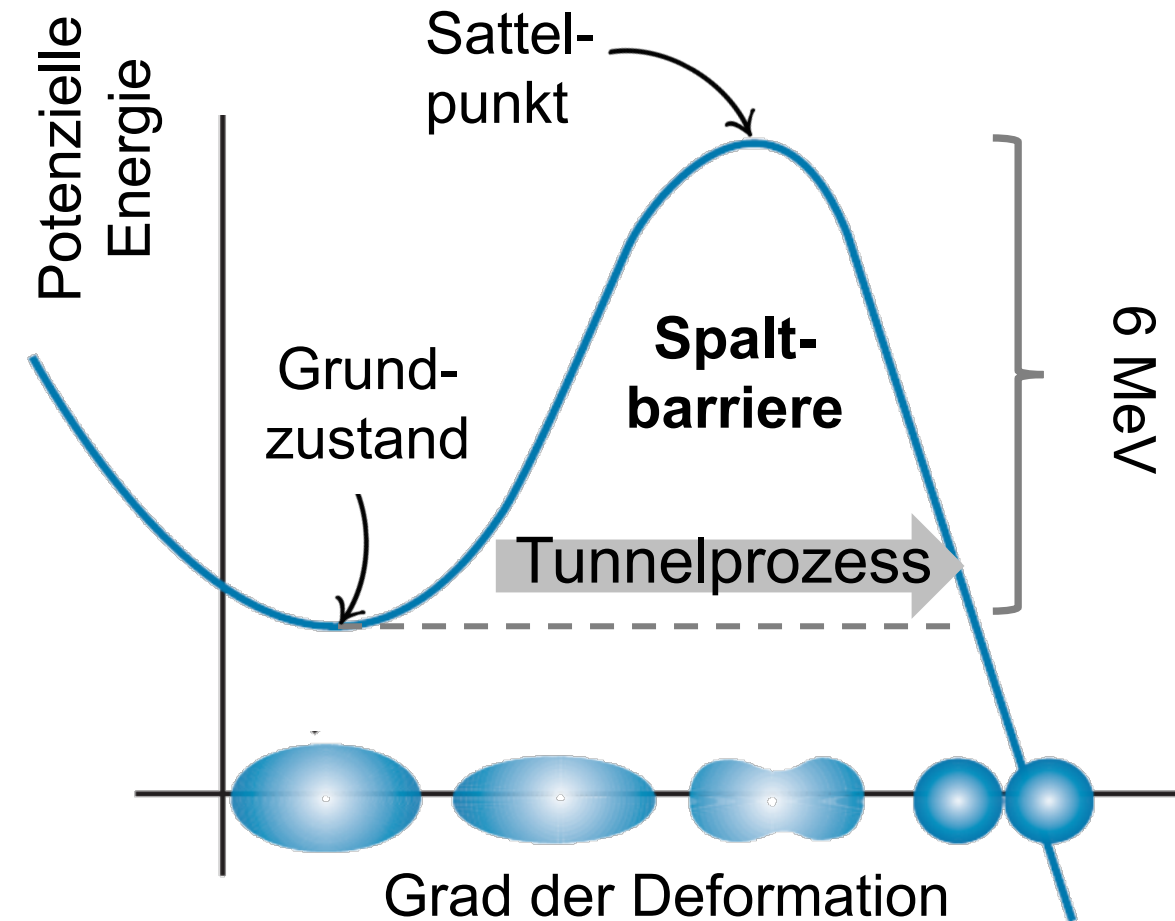
■ Stabilität eines schweren Kerns gegen spontane Spaltung

- dynamische **Deformation des Ausgangs-Kerns (U-235, Pu-239)**

- **Deformation** ändert im Tröpfchenmodell:



- Oberflächenenergie E_S
- Coulomb-Energie E_C



Spaltprozess – spontane Spaltung

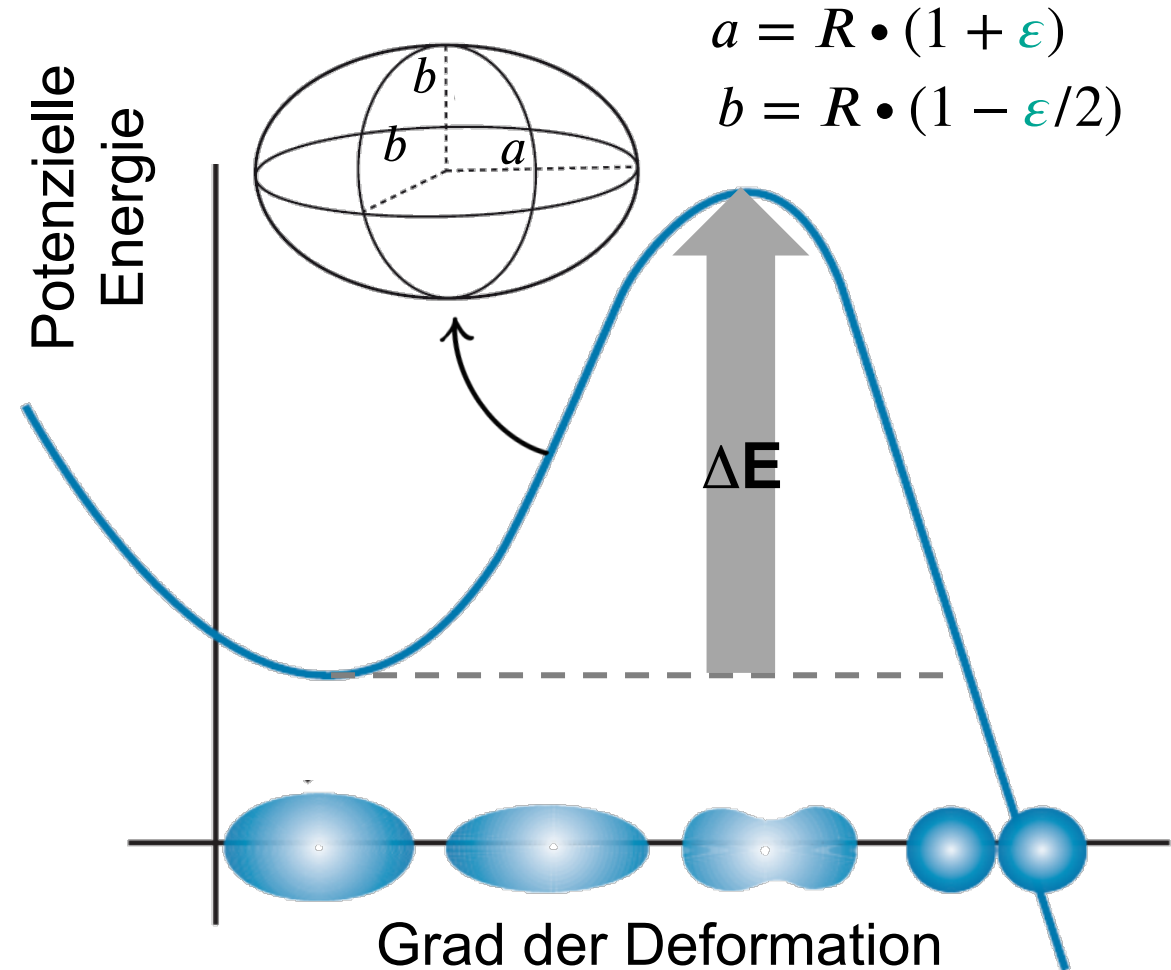
- Energiebilanz ΔE bei einer Deformation eines Kerns mit Massenzahl A :

- **Zunahme** der
Oberflächen-Energie E_S

$$\Delta E = \frac{\epsilon^2}{5} (2a_s \cdot A^{2/3} - a_c \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3})$$

- **Abnahme** der
Coulomb-Energie

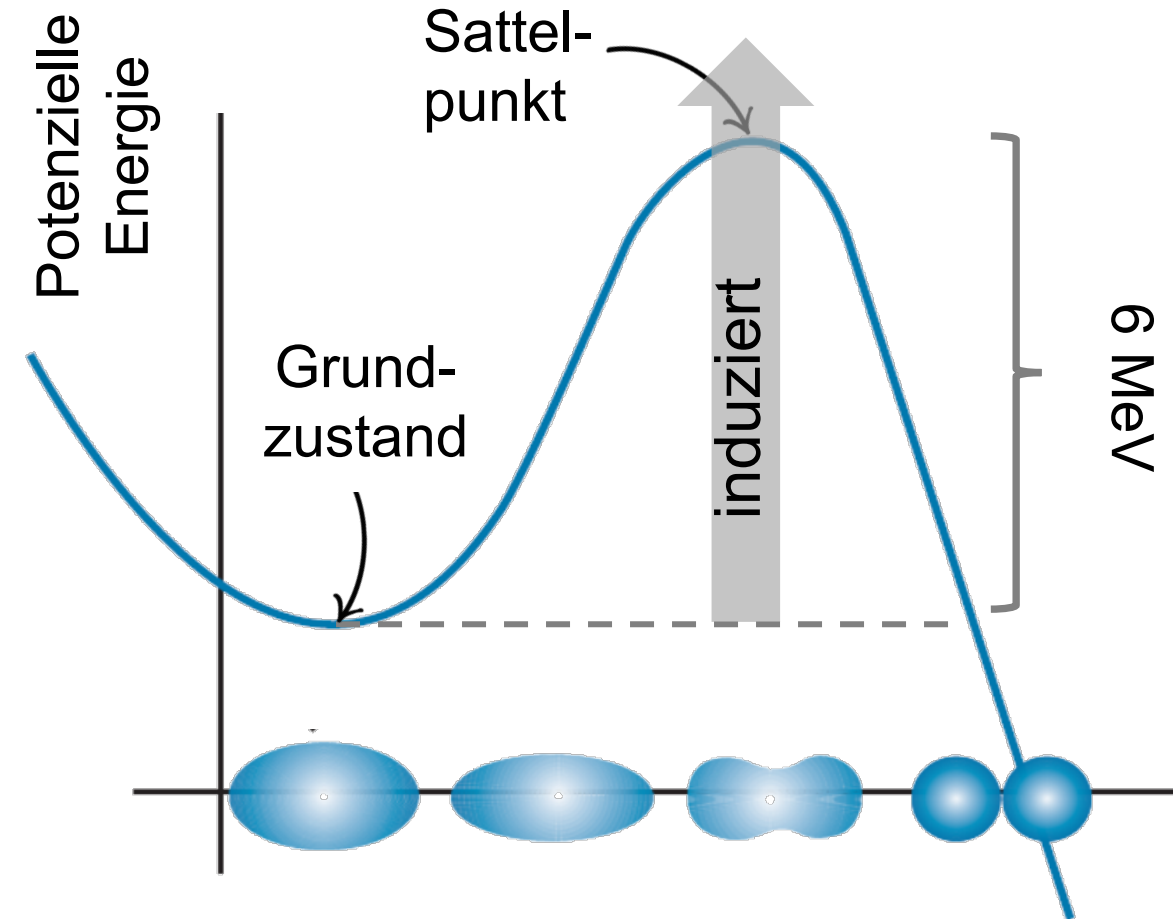
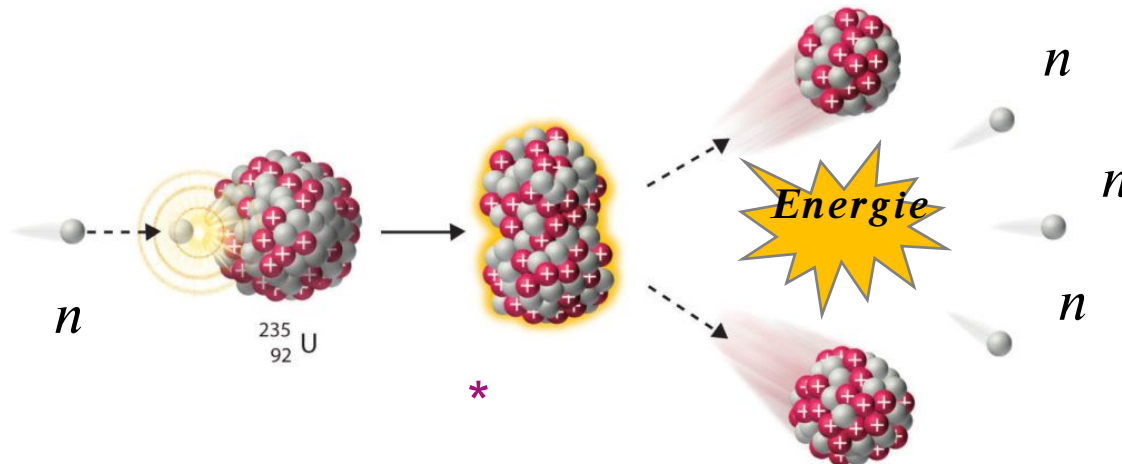
- Spaltbarriere ΔE verschwindet
bei $Z^2/A > 48$ ($Z > 114$)



Spaltprozess – induzierte Spaltung

■ induzierte Spaltung von ^{235}U durch Absorption eines Neutrons

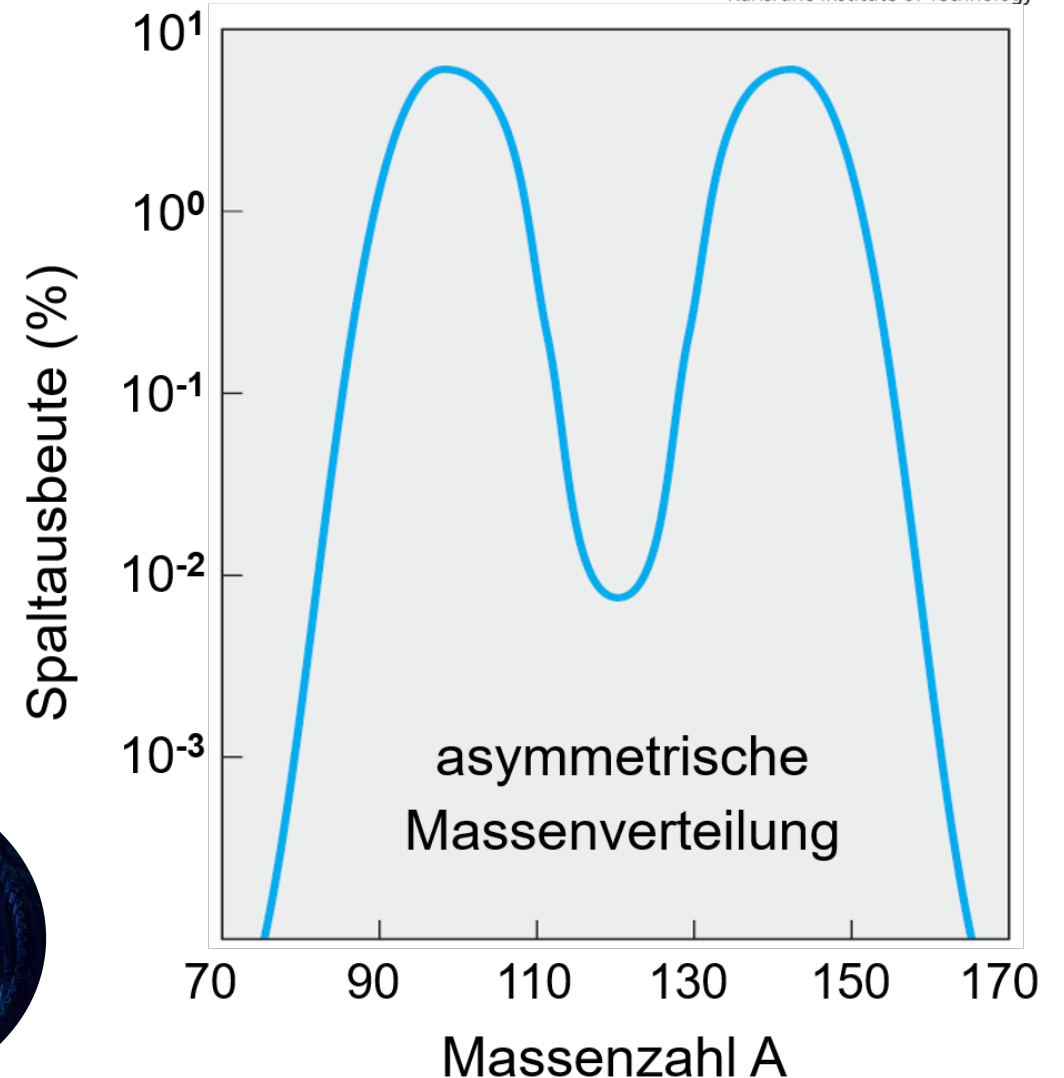
- bei **Absorption eines Neutrons** wird eine Bindungsenergie von $\Delta E \sim 7,5 \text{ MeV}$ freigesetzt (Anregung)
- **ug-Kerne** (^{235}U) mit ungerader n-Anzahl schwächer gebunden als **gg-Kerne**



Spaltprozess – induzierte Spaltung

■ induzierte Spaltung: Spaltfragmente

- nach **Absorption eines Neutrons** kann der angeregte gg-Kern in 2 Tochterkerne spalten
- **asymmetrische Massenverteilung** der Spaltfragmente von ^{235}U
- typisches Massenverhältnis der beiden Spaltfragmente $\sim 2 : 3$
- Spaltfragmente sind oft β -instabil



Spaltprozess – Aufteilung der Spaltenergie

- **Energiebilanz:** $\Delta E \sim 200 \text{ MeV}$ pro Spaltung von U-235

- Kinetische Energie Spaltfragmente: $\sim 160 \text{ MeV}$
- restliche Energie in Neutronen (5MeV), Gammas, Elektronen, Neutrinos* (ca. $6 \bar{\nu}_e$ mit je $1,5 \text{ MeV}$)
- emittierte Neutronen (Energien bis zu einige MeV):
Einfang durch andere ^{235}U Kerne: $\Rightarrow$ **Kettenreaktion**
- **Effizienz $\eta = 1$:** kontrollierte Reaktion, nur bei ^{235}U
 $\eta = (\# \text{ Spaltneutronen}) / (\# \text{ absorbierte Neutronen})$

