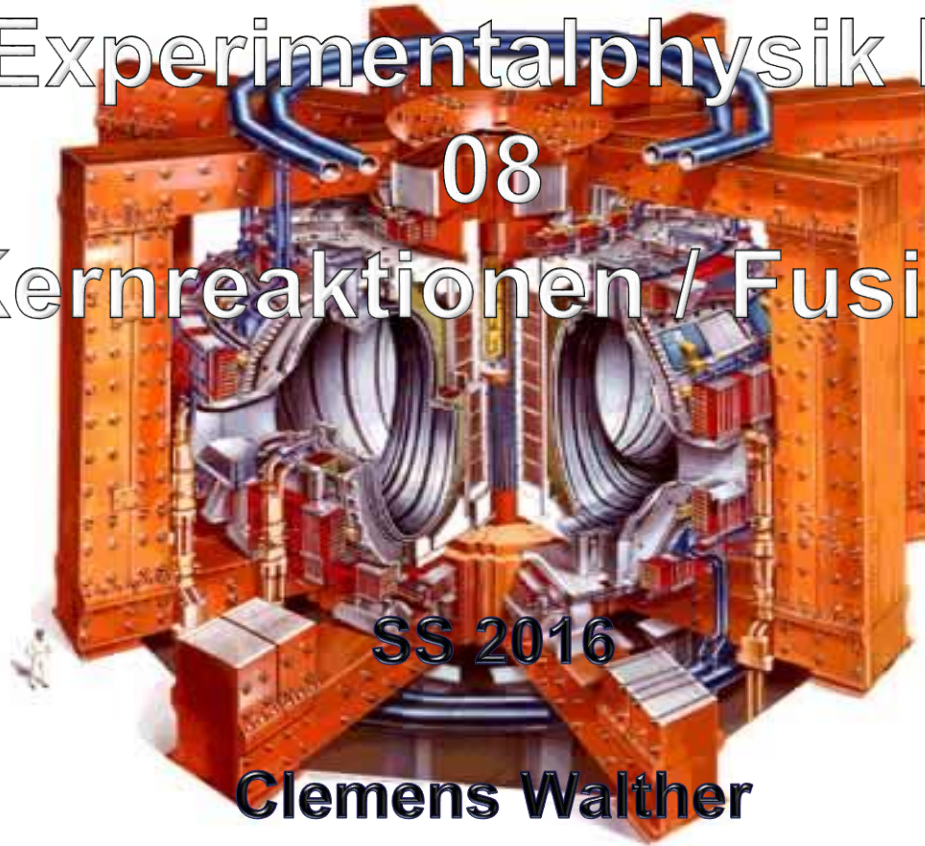


# Experimentalphysik IV

## 08

### Kernreaktionen / Fusion



SS 2016

**Clemens Walther**

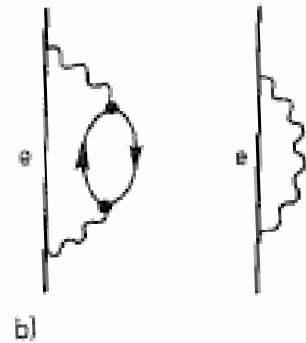
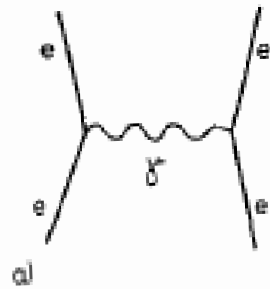
Einige Worte zur „starken Kernkraft“

Nach Meyer Kuckuck Kap. 5.6

Bestandteile der Hadronen (Mesonen und Baryonen) sind elementare Fermionen, genannt Quarks, die durch **Austausch masseloser** Vektorbosonen, genannt **Gluonen**, wechselwirken

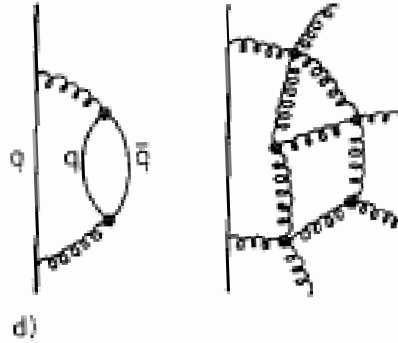
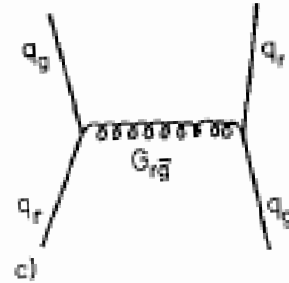
Im Gegensatz zur elektromagnetischen Wechselwirkung, bei der die Feldquanten (die  $\gamma$ -Quanten) elektrisch neutral sind, tragen die Gluonen der starken Wechselwirkung aber Farbladungen.

**Haben Quarks eine reale Existenz als Teilchen?** Das ist möglicherweise eine mehr erkenntniskritische als physikalische Frage.



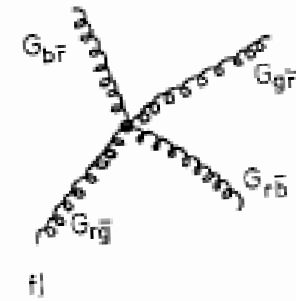
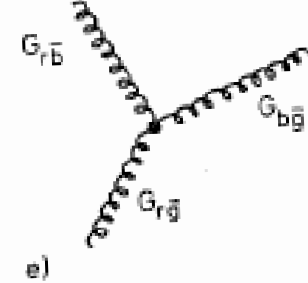
QED

Die virtuellen  $\gamma$ -Quanten  
tragen keine elektrische  
Ladung



QCD

Die Gluonen tragen Farbladung

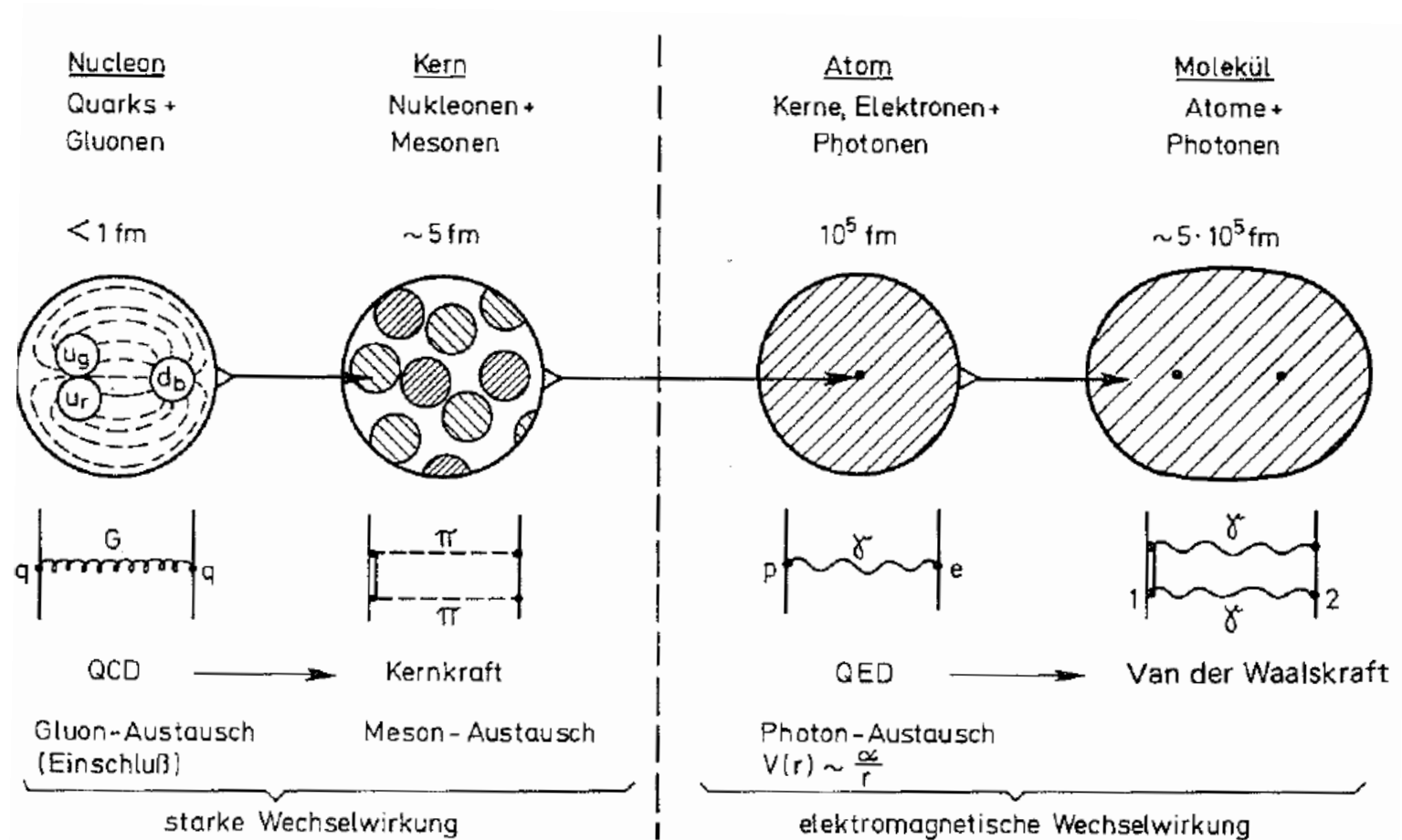


Die **eigentlichen starken Kräfte**, die durch Gluon-Austausch verursacht werden, **treten daher im Kern gar nicht auf.**

Was wir als Kernkräfte beobachten, sind nur die **Restwechselwirkungen, die sich als Mesonen-Austausch beschreiben lassen.**

Den Hauptanteil an der Bindungsenergie des Kerns liefert der **Mehr-Pion-Austausch**. Er wirkt über eine **Polarisation der Nukleonen im Pionfeld** ähnlich wie der Mehr-Photon-Austausch über eine elektrische Polarisation die Van der Waalskräfte der molekularen Bindung bewirkt.

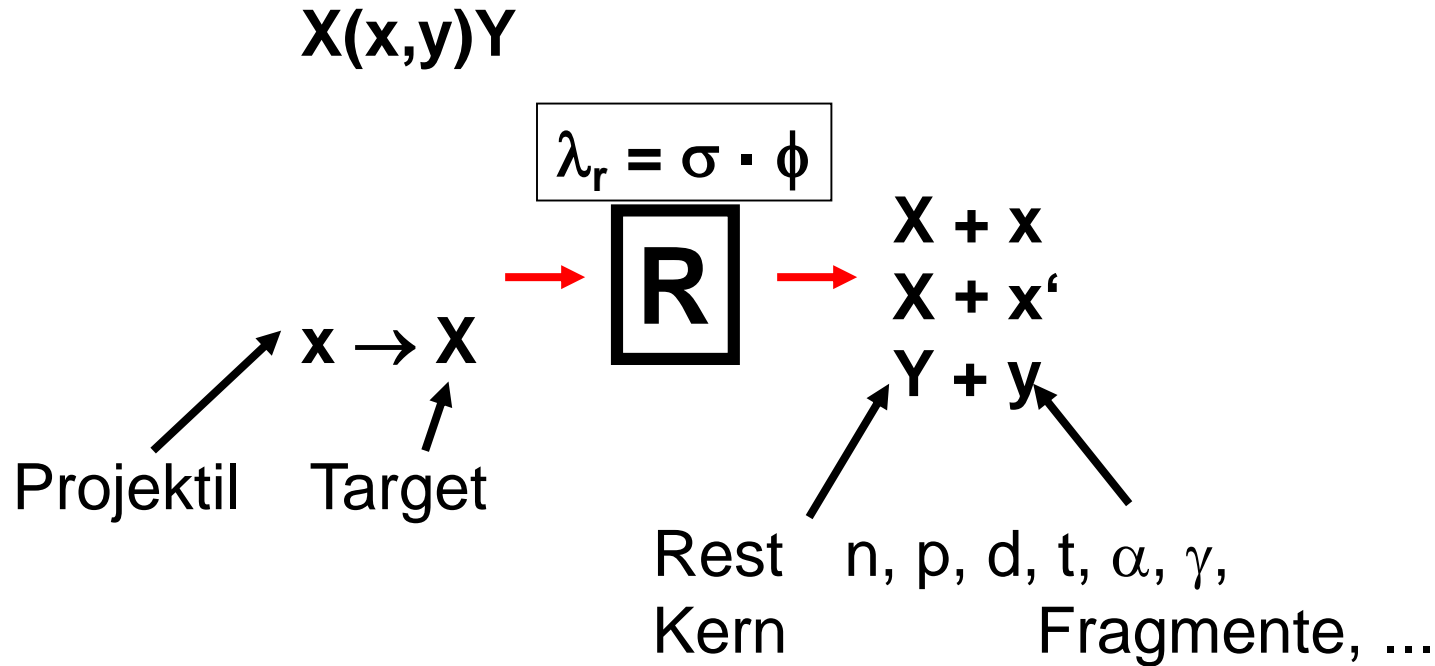
Für das Verständnis der Kerneigenschaften ist jedoch die Quantenchromodynamik nicht erforderlich.





Energieübertrag  
Inverse Kinematik  
Compoundkern und Detailed Balance  
Vor-Gleichgewichtsreaktionen  
Spallation



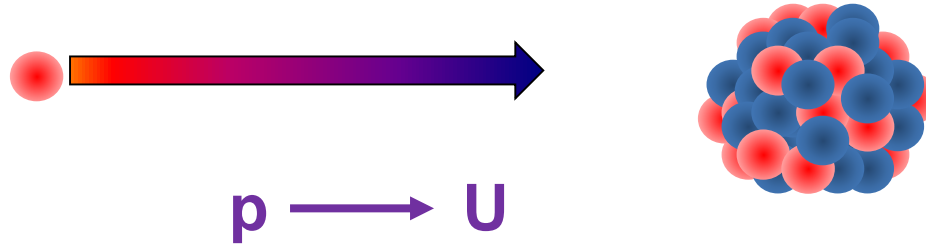


$$X(x,y)Y \longleftrightarrow (\alpha, \beta)$$

Eingangskanal  $\alpha$  und Ausgangskanal  $\beta$

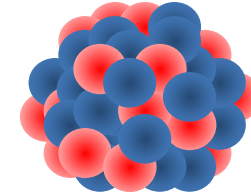
$$E_x = 0$$

normale Kinematik: Target ruht



$$E_x = 0$$

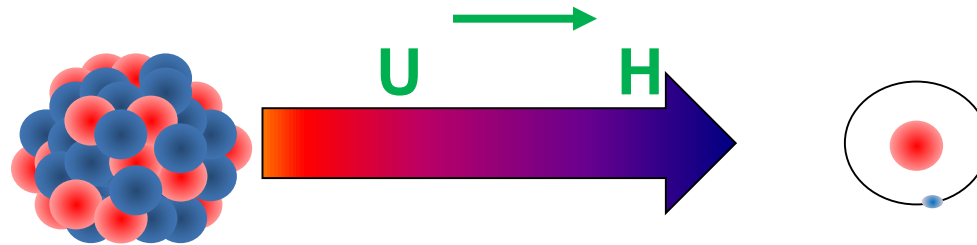
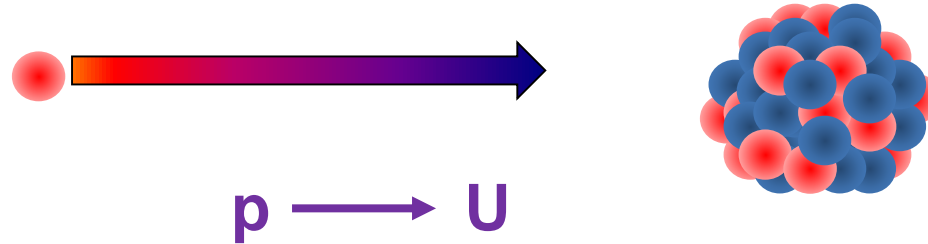
normale Kinematik: Target ruht



$p \longrightarrow U$

$$E_x = 0$$

normale Kinematik: Target ruht



$$E_x = 0$$

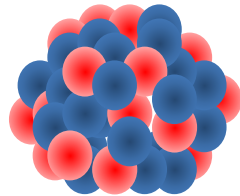
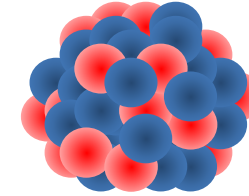
inverse Kinematik: Target als Projektil

$$E_x = 0$$

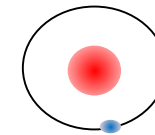
normale Kinematik: Target ruht



$$p \longrightarrow U$$



$$U \longrightarrow H$$



$$E_x = 0$$

inverse Kinematik: Target als Projektil

Q-Wert:  $Q = \overbrace{m_Y \cdot c^2 + m_y \cdot c^2}^{\text{Ausgang}} - \overbrace{(m_X \cdot c^2 + m_x \cdot c^2)}^{\text{Eingang}}$

$Q > 0$ : exotherm

$Q < 0$ : endotherm,  $E_{\text{thr}} = -Q$  Schwellenenergie im CMS

$$E_{\text{thr,lab}} = E_{\text{thr}} \cdot \frac{m_X + m_x}{m_X}$$



AO

Reaktion:  $(\alpha, \beta) \Leftrightarrow X(x, y)Y$

Eingangskanal:  $\alpha = X(x,$

Ausgangskanal:  $y)Y = \beta$

Kinetische Energie (CMS):  $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$

**$^{14}\text{N}$     2.863 MeV**

**$^4\text{He}$     2.425 MeV**

---

**5.288 MeV**

**$^{17}\text{O}$     -0.81 MeV**

**p    7.289 MeV**

---

**6.479 MeV**

$$Q = (5.288 - 6.479) \text{ MeV} = -1.191 \text{ MeV}$$

**(1 amu = 931.494 MeV)**

**1.191 MeV nicht ausreichend für eine Reaktion, weil ...**





$$m_P v_P = (m_P + m_T) v_R$$

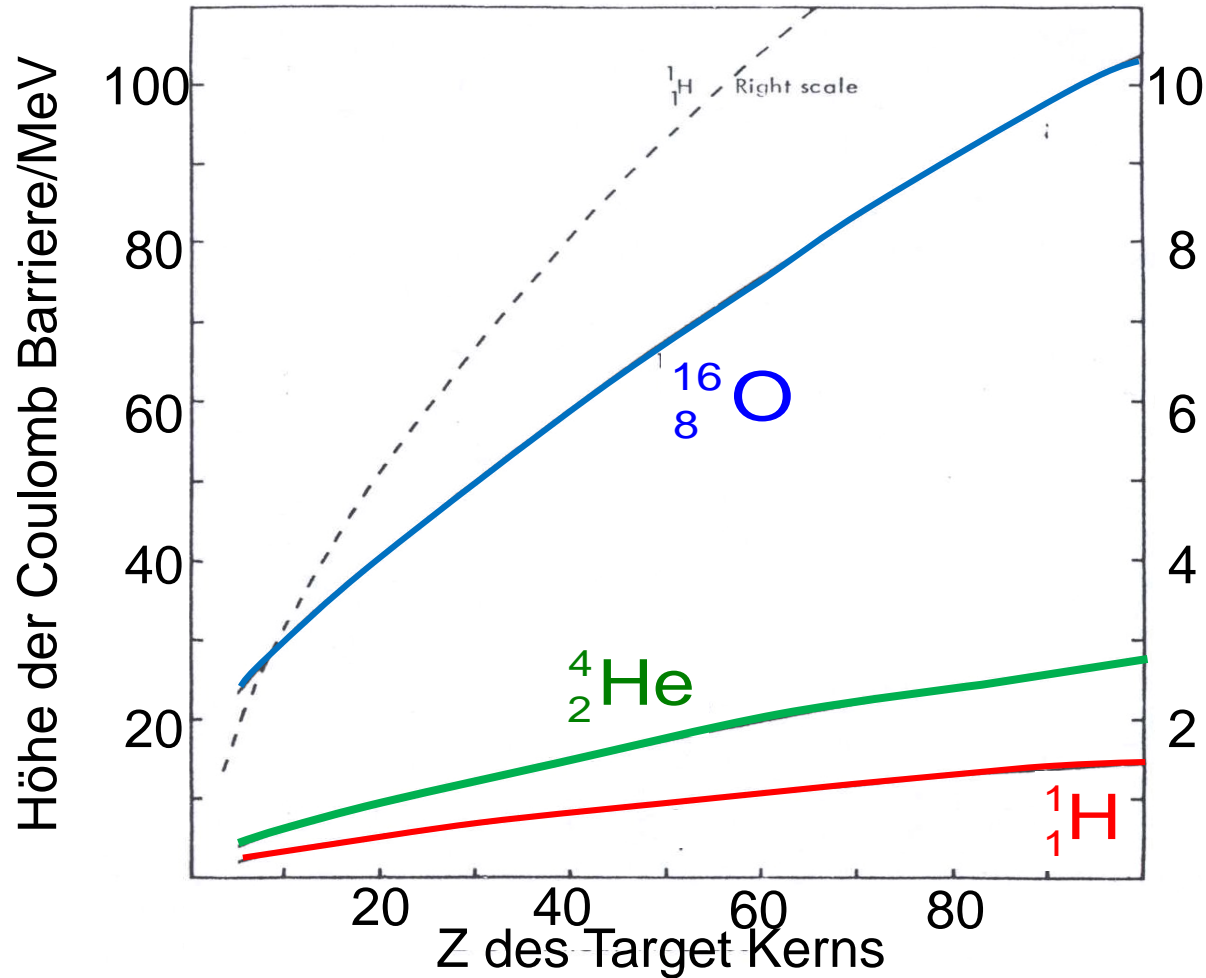
$$m_P E_P = (m_P + m_T) E_R$$

$$E_R = \frac{m_P}{m_P + m_T} E_P$$

$E_R$  = Translationsenergie des Ausgangssystems

$$E_P^{Min} = Q + E_R$$

$$\begin{aligned}
 E_{\text{Coulomb,CMS}} &\propto \frac{Z_X \cdot Z_x}{A_X^{1/3} + A_x^{1/3}} \\
 &= 1,109 \text{ MeV} \cdot \frac{Z_X \cdot Z_x}{A_X^{1/3} + A_x^{1/3}} \\
 E_{\text{Coulomb,lab}} &= E_{\text{Coulomb,CMS}} \cdot \frac{m_X + m_x}{m_X}
 \end{aligned}$$



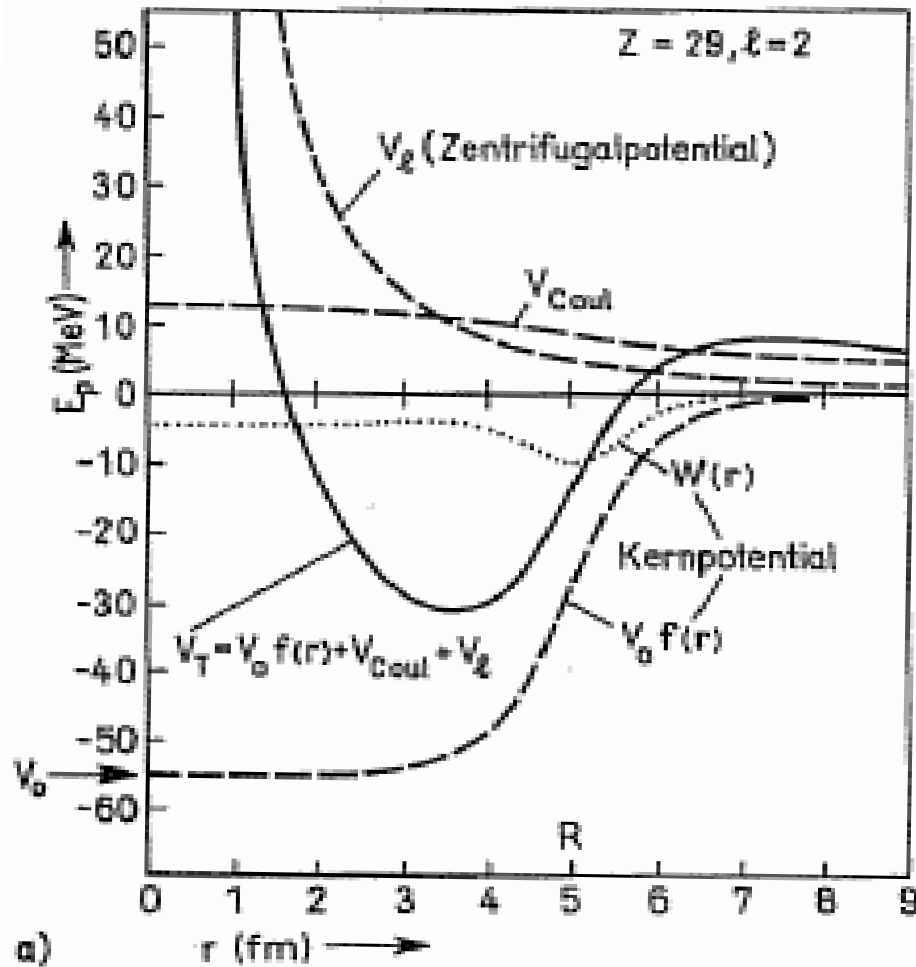
$$\begin{aligned}\sigma_{s,l} &= (\pi \tilde{\lambda}^2) \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) \\ &= (\pi \tilde{\lambda}^2) (l_{\max} + 1)^2 \quad l_{\max} = R / \tilde{\lambda}\end{aligned}$$

$$\sigma = \pi (R + \tilde{\lambda})^2$$

Zentrifugalbarriere  
für  $l > 0$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left[ E - V(r) - \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2} \right] u = 0$$

$$E_z > \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\tilde{m}R^2} \quad \tilde{m} =: \text{reduzierte Masse}$$



- Zahl der Nukleonen
- Ladung
- Energie
- Impuls
- Drehimpuls
- Parität
- Isospin (ungefähr)

$$\pi_X \cdot \pi_x \cdot (-1)^{I_\alpha} = \pi_Y \cdot \pi_y \cdot (-1)^{I_\beta} \quad \text{CMS}$$

Zwei Hauptklassen konkurrierender Kernreaktionen bei niedrigen Energien



## Direkte Reaktionen

---

- Zeit  $\sim 10^{-20}$  s
- Teilchenemission:
  - anisotrop
  - vorwärts gerichtet
  - diskrete Energien
- Eindeutige Kombination von Zerfallskanälen

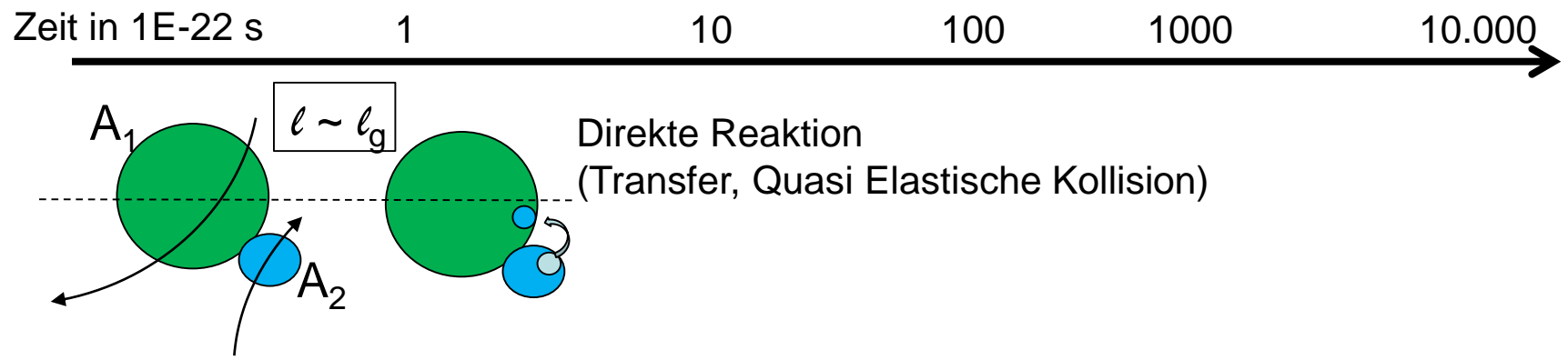
## Compoundkern-Reaktionen

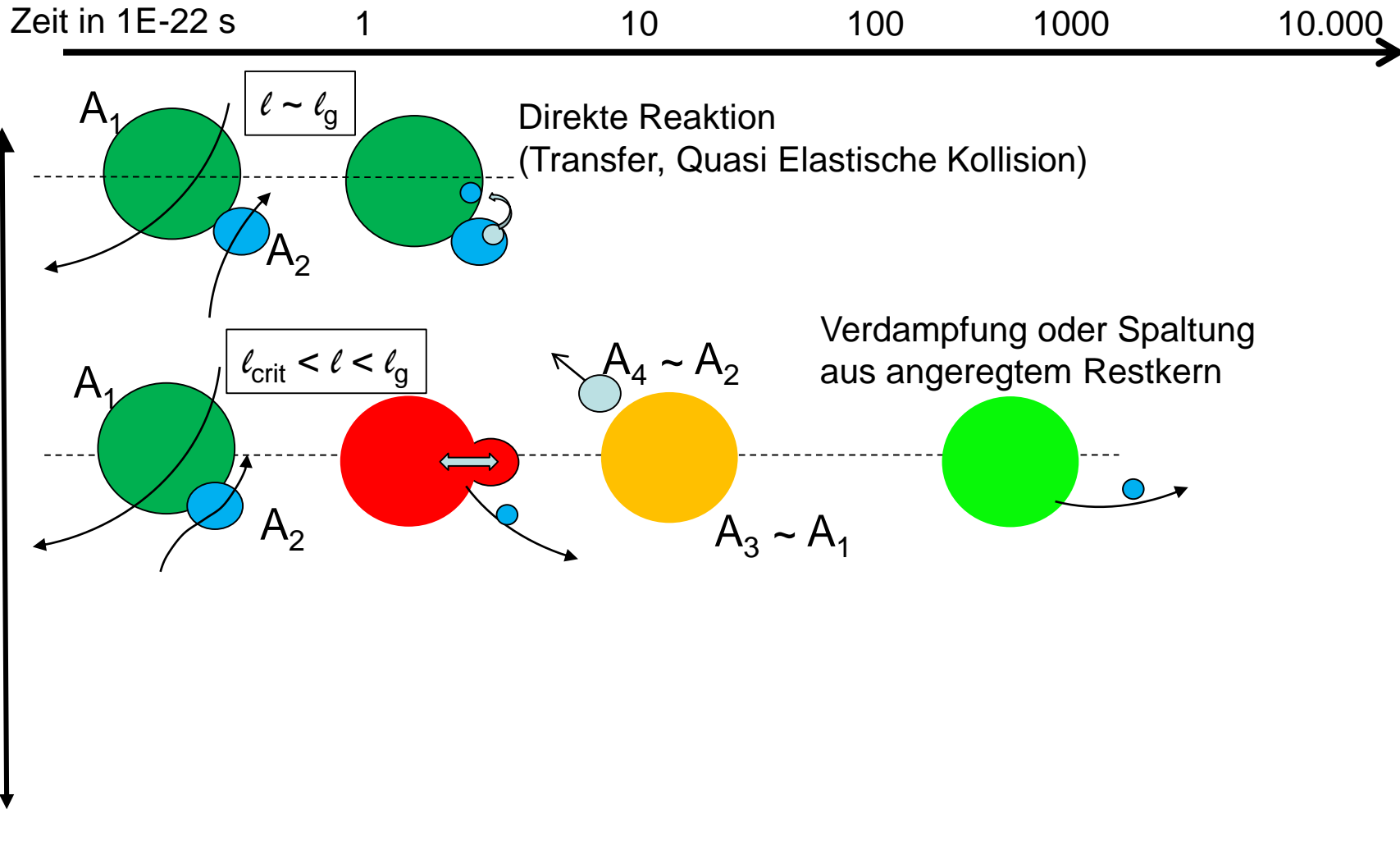
---

- $E < 50$  MeV
- Zeit  $\sim 10^{-14} - 10^{-16}$  s
- Teilchenemission:
  - isotrop
  - Verdampfungsspektrum
- Unabhängige Teilprozesse
- Statistische Verteilung der Anregungsenergien
- Kollektive Reaktionen

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| ➤ Direkte Reaktionen           | alle Energien                             |
| ➤ Compoundkernreaktionen       | $E < 50 \text{ MeV}$                      |
| ➤ Vorgleichgewichtsreaktionen  | $20 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV}$    |
| ➤ Spallationsrreaktionen       | $E > 200 \text{ MeV}$                     |
| ➤ Fragmentationsreaktionen     | $E > 500 \text{ MeV}$                     |
|                                |   |
| ➤ Reaktionen niedriger Energie | $E < 50 \text{ MeV}$                      |
| ➤ Mittelenergiereaktionen      | $200 \text{ MeV} < E < \text{einige GeV}$ |
| ➤ Hochenergiereaktionen        | $E > \text{einige GeV}$                   |





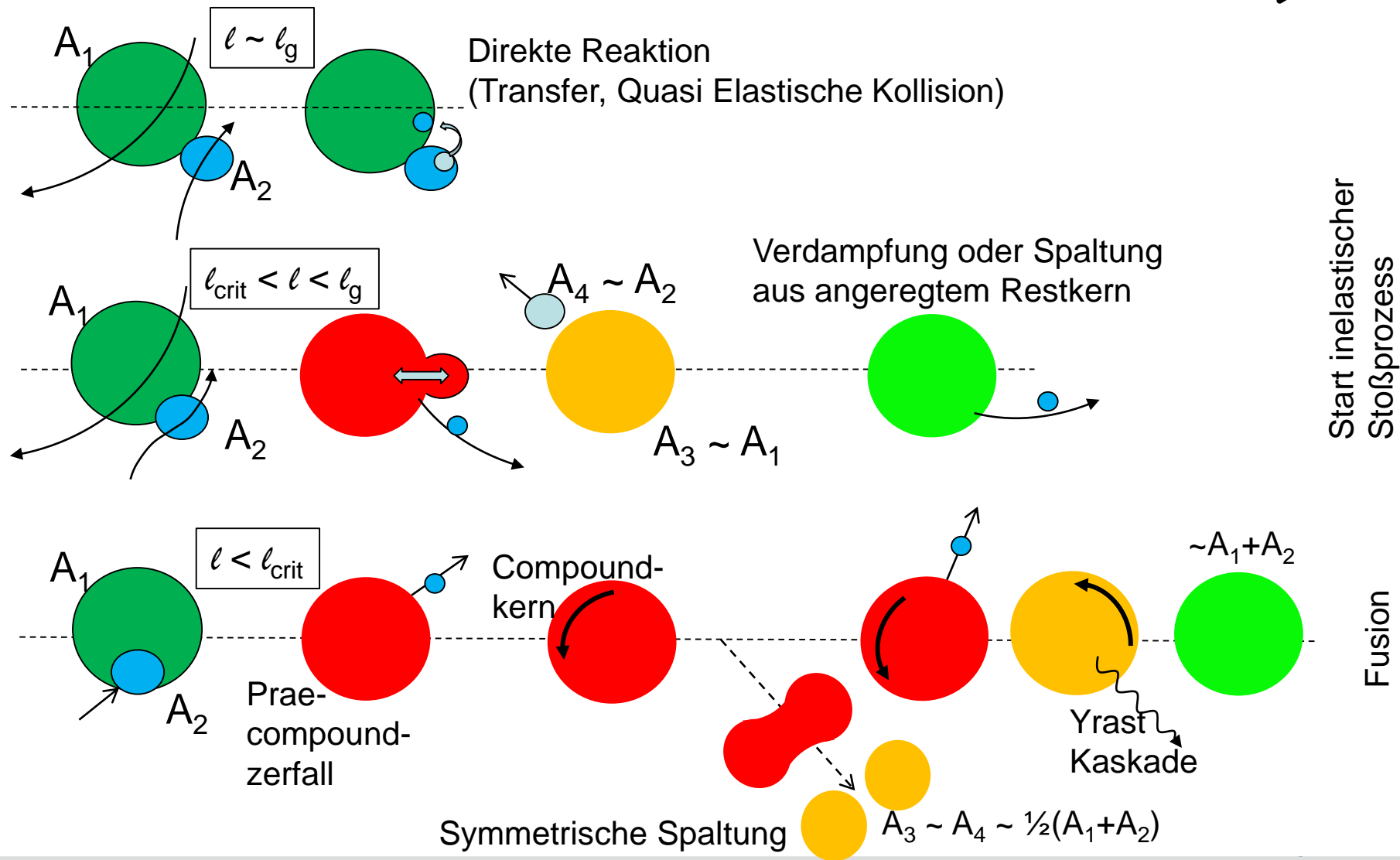


Zeit in 1E-22 s      1      10      100      1000      10.000

Stoßparameter  $b = \hbar l$

groß

klein



Bohr's Hypothese:  
Kernreaktionen laufen über

**Compoundkern ab.**

Bildung und Zerfall des Compoundkerns  
sind **unabhängige Prozesse.**

$$\sigma_{\alpha,\beta} = \sigma_{\alpha,CN}(E) \cdot \frac{\Gamma_{\beta}}{\Gamma_{\text{total}}}$$

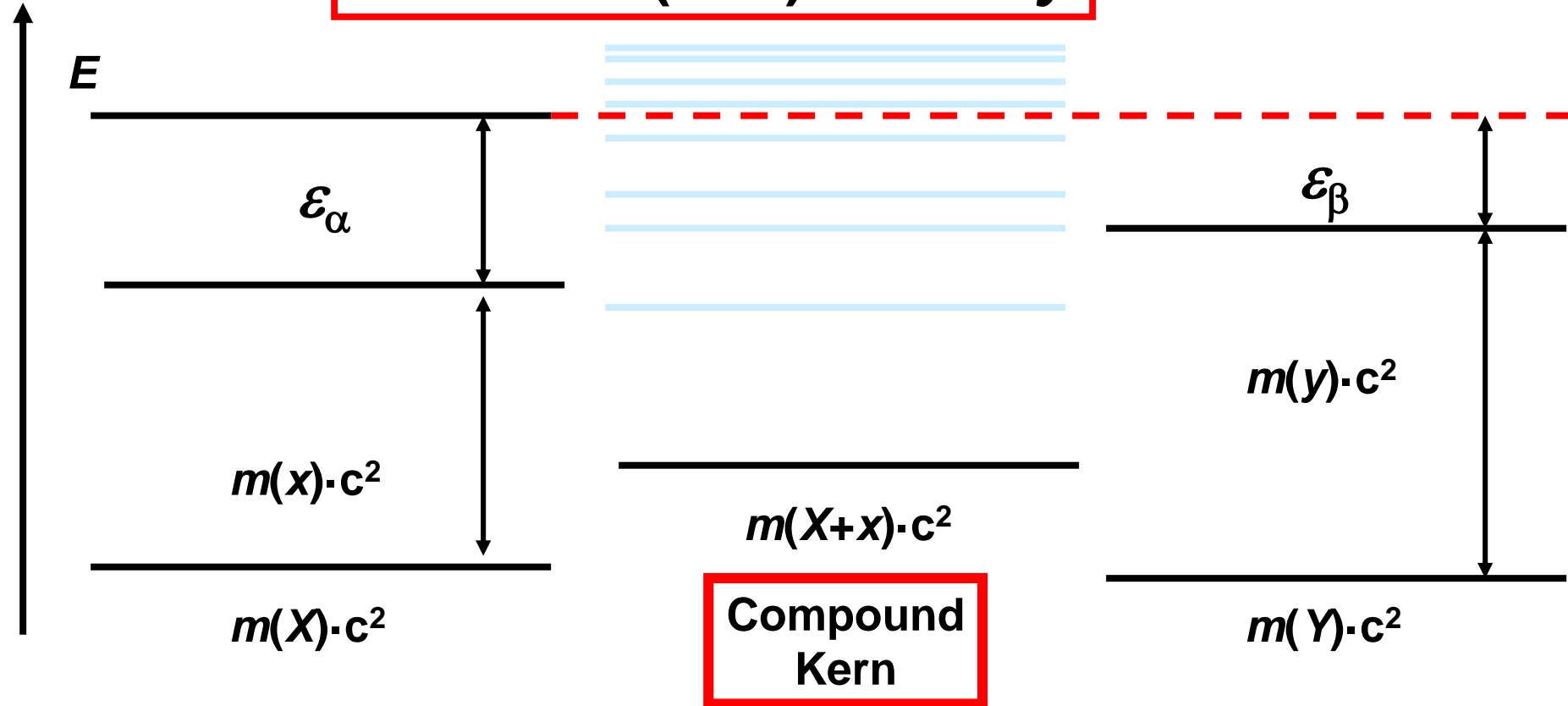
Der **Zerfall** eines hoch angeregten Compoundkerns ist  
**unabhängig von seiner Bildung.**

⇒ Faktorisierung des Wirkungsquerschnitts

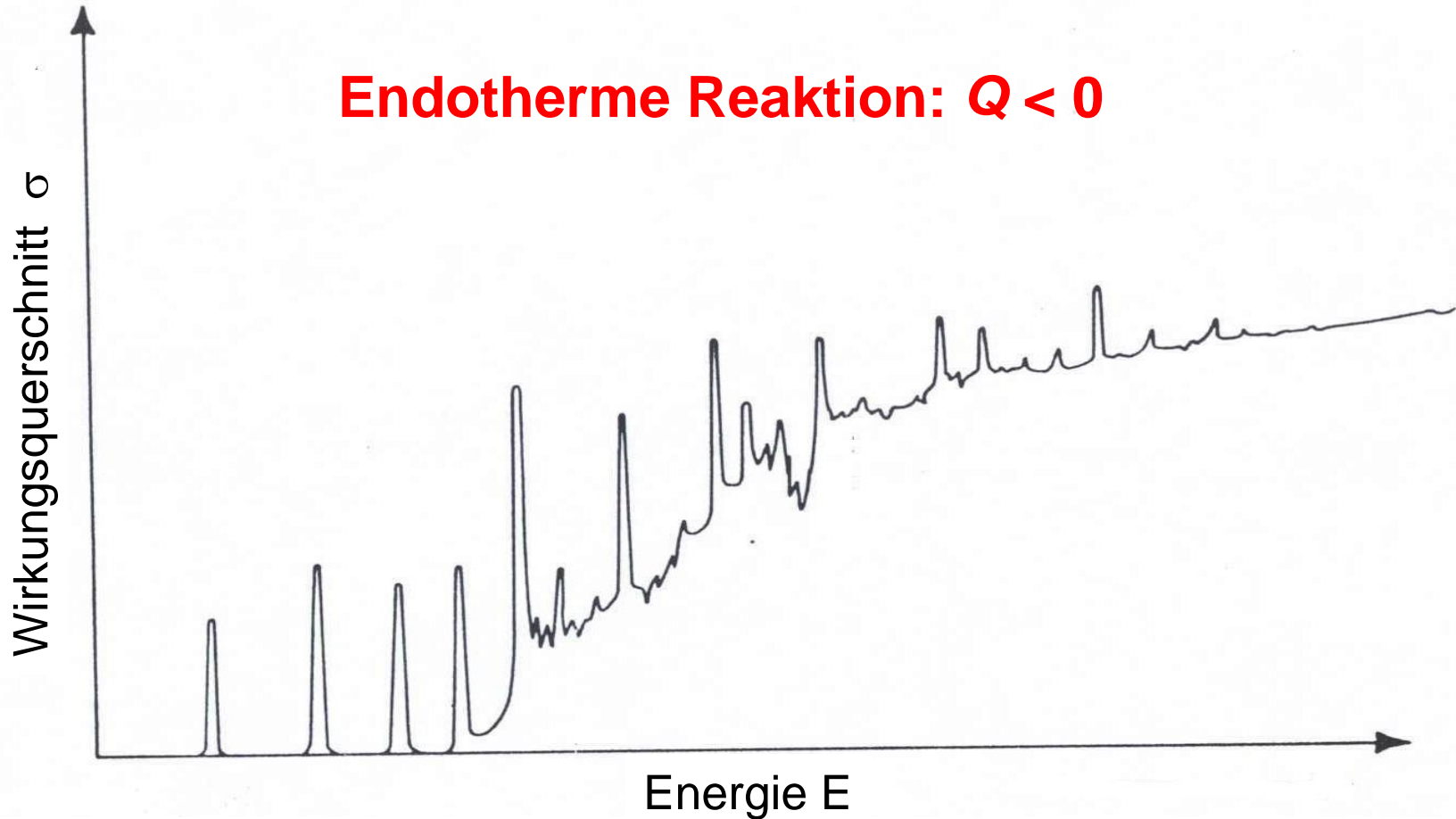
$$\sigma_{\alpha,\beta} \propto \sigma_{\alpha;cn} \cdot G_{\beta} \quad G_{\beta} = \Gamma_{\beta} / \sum_{\beta'} \Gamma_{\beta'}$$

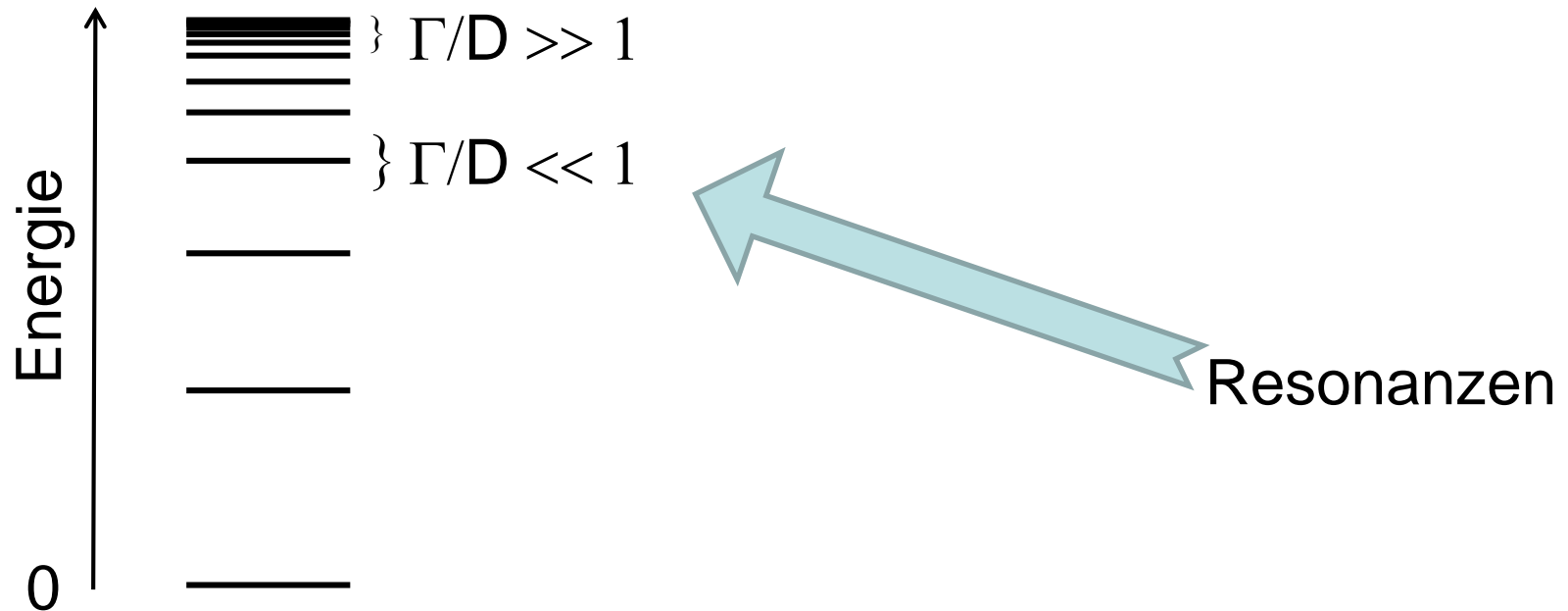
Zerfallsbreite

$\Gamma$  Ist Maß der Zerfalls-  
wahrscheinlichkeit

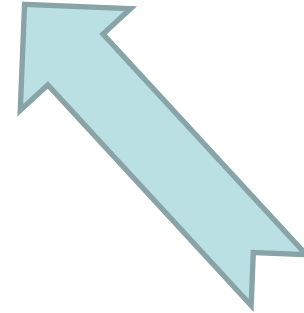


**Endotherme Reaktion:  $Q < 0$**

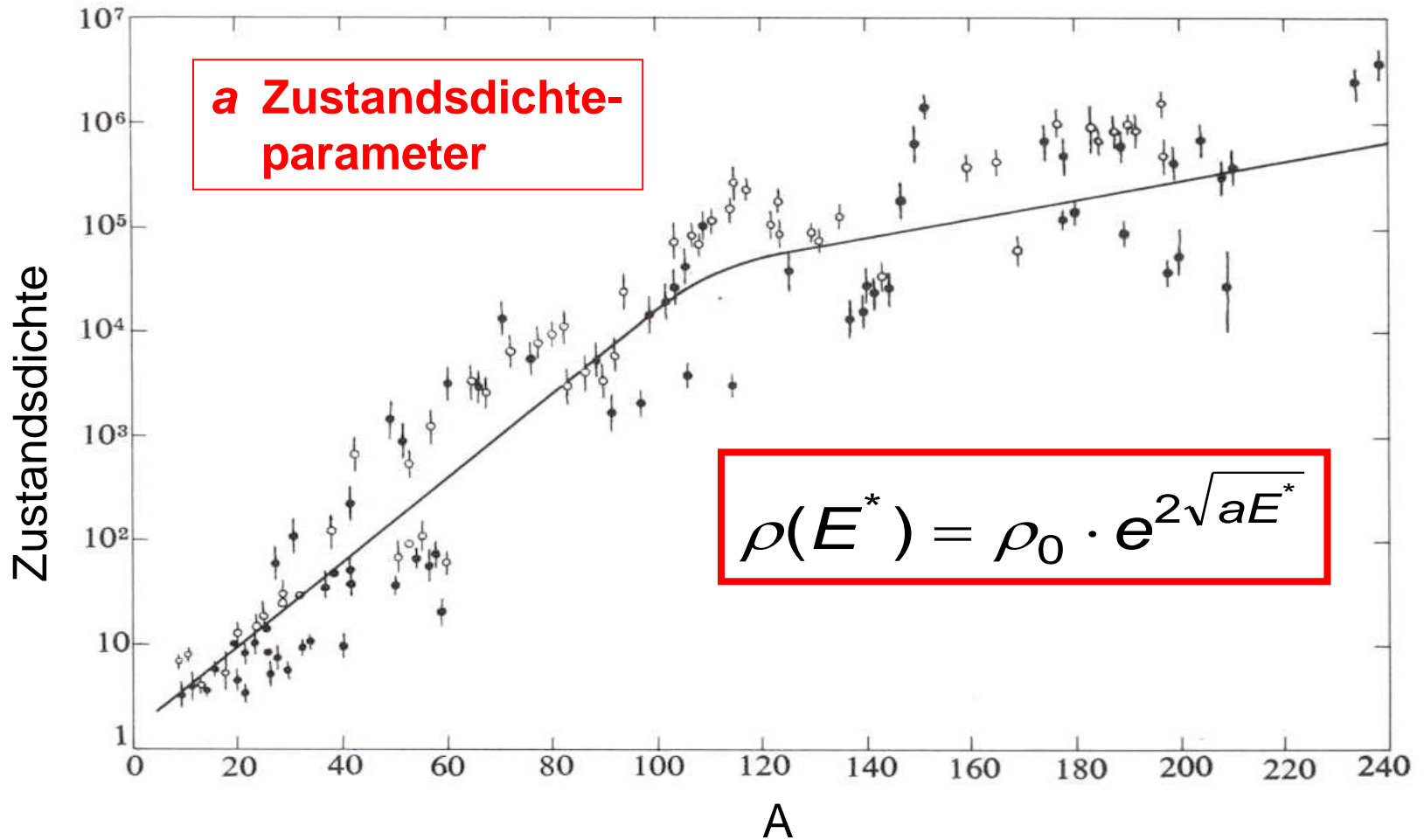


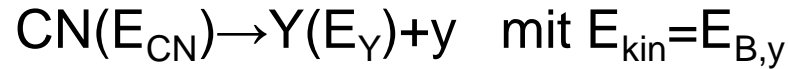


$$\sigma_{\alpha,\beta} \propto \sigma_{CN} \cdot P_{\beta}$$









## Prinzip der „Detailed Balance“

$$I(E_{yY}) dE_{yY} = \frac{\tilde{m}_{y,B}}{\pi^2 h^3} \sigma_{yY} E_{yY} \frac{D_Y(E_Y)}{D_{\text{CN}}(E_{\text{CN}})}$$

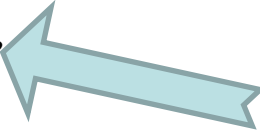
E: Energie

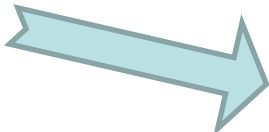
D: Zustandsdichte

$\sigma_{yY}$ : Wirkungsquerschnitt für Rückreaktion

( $\text{Y} + y \rightarrow \text{CN}$  mit  $E_{yY}$ )

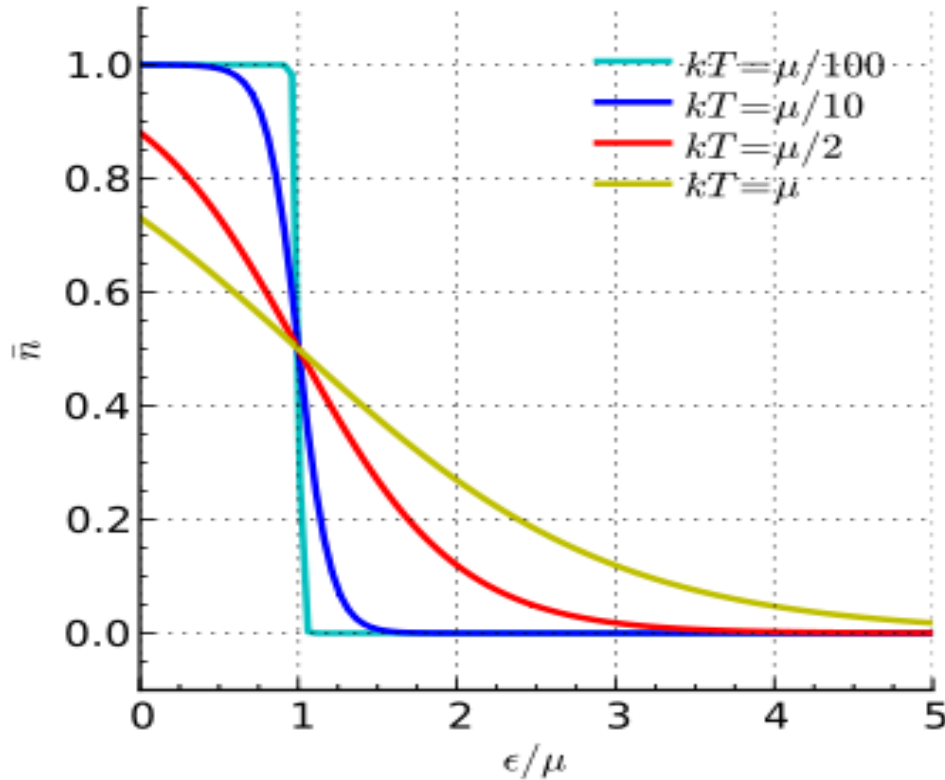
$$\tilde{m} = \frac{m_x m_X}{m_x + m_X} : \text{reduzierte Masse, wegen } \frac{1}{\tilde{m}} = \frac{1}{m_x} + \frac{1}{m_X}$$

$$\sigma_{\alpha,\beta} \propto \sigma_{CN} \cdot P_{\beta}$$




$$P_{\beta} = \int_0^{E_{CN} - \varepsilon_Y} I(E_{yY}) dE_{yY}$$

$\varepsilon_Y$  = Bindungsenergie von y im CN



Temperatur  
Abhängigkeit

$$\langle n_E \rangle = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1}$$

$$= \begin{cases} 1 & E < \mu \\ 0 & E > \mu \end{cases} \text{ for } T = 0$$

$$S = \log \frac{D_Y(E_Y)}{D_{CN}(E_{CN})}$$



$D \propto (2I + 1)$  hängt von A ab  
ein Level hat mehrere Zustände!

$U \propto T$  klassisch

$U \propto T^2$  für Kerne

$$\langle n_E \rangle = \frac{1}{e^{(E-\mu)/kT} + 1} = \begin{cases} 1 & E < \mu \\ 0 & E > \mu \end{cases} \text{ für } T = 0$$

$$\frac{dn}{dE} \propto E \cdot e^{-E/kT}$$

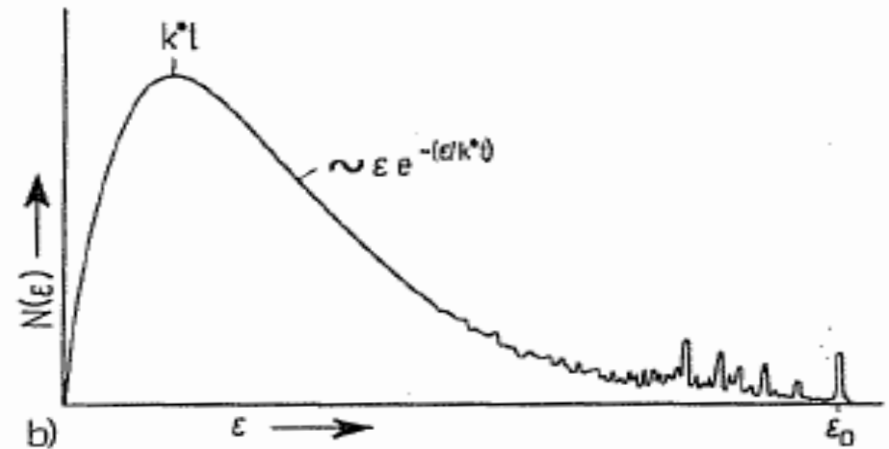
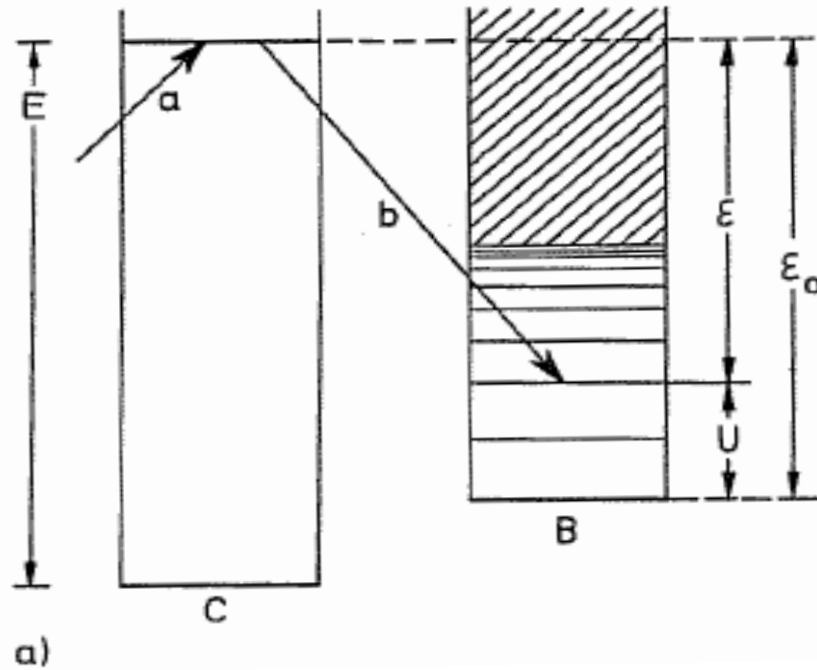
Im **statistischen Modell** des  
Compoundkerns wird die  
Teilchenemission als Abdampfung  
beschrieben  
**⇒ Maxwell-Boltzmann Spectrum**

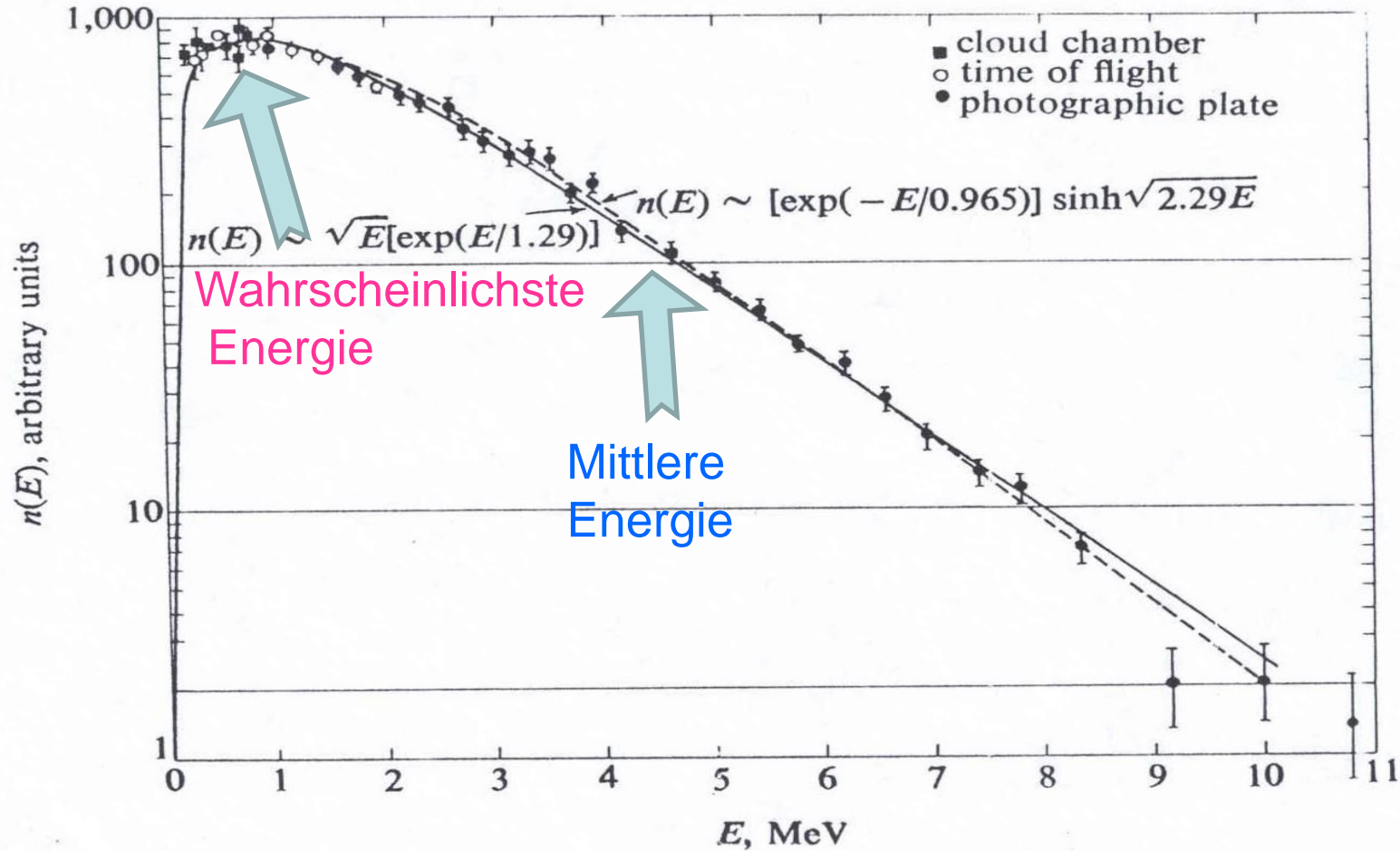
$$S = k \cdot \log \frac{\rho(E)}{\rho(0)}$$

$$S(T) = \int_0^T \frac{dE}{T}$$

Die Entropie eines Kernes als **Fermi gas**  
und die Temperatur eines Kerns

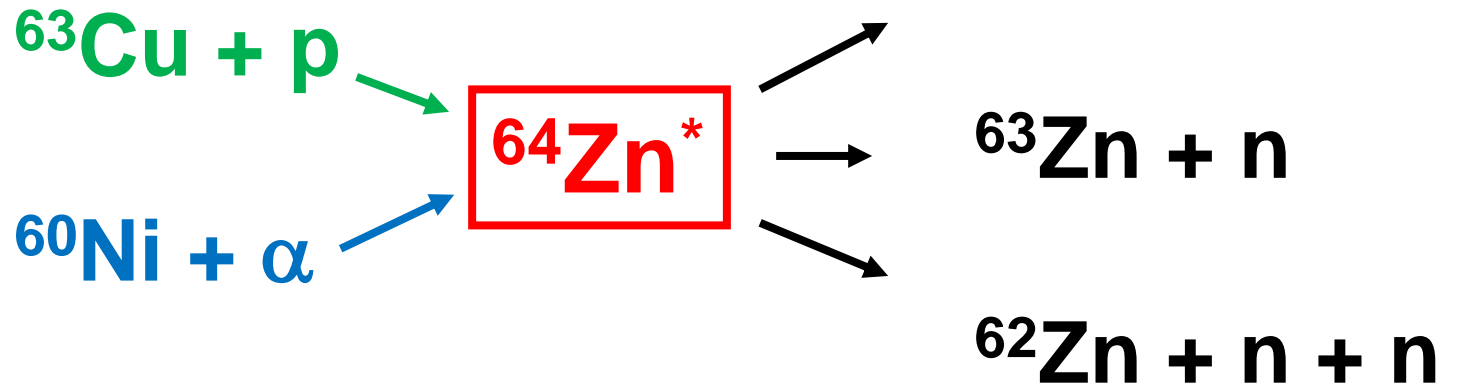
Die Temperatur eines  
Compoundkerns ist 1 – 2 MeV.



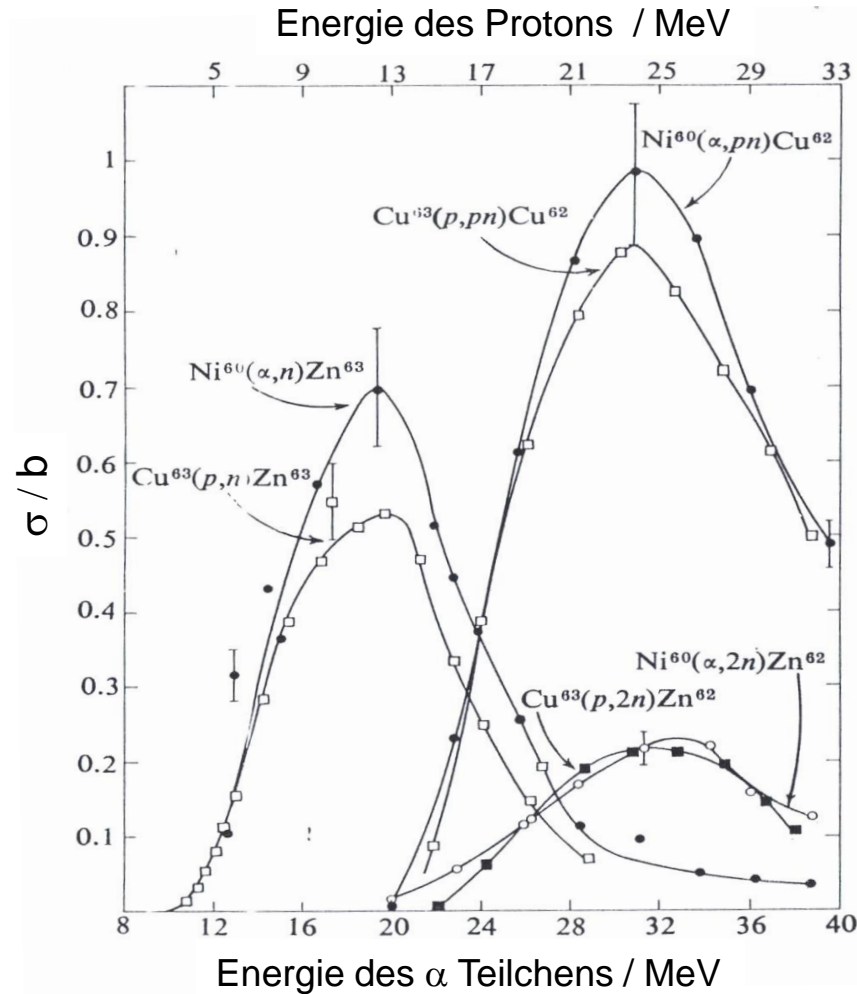




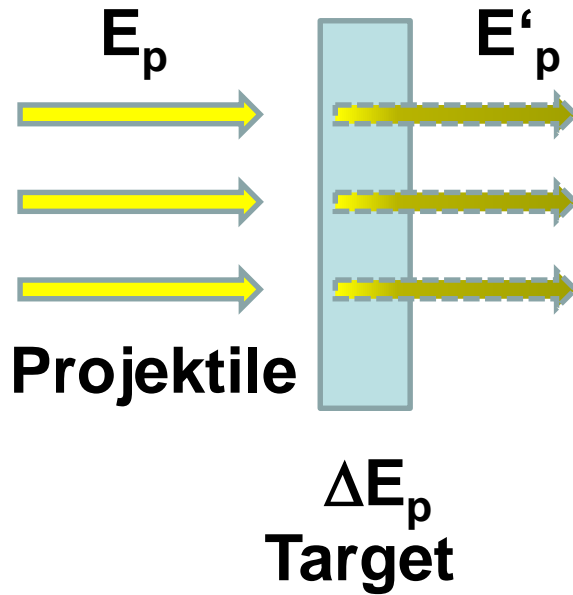
$$\sigma_{\alpha,\beta} = \sigma_{\text{CN},\alpha}(E) \cdot \frac{\Gamma_{\beta}}{\Gamma_{\text{t}}}$$



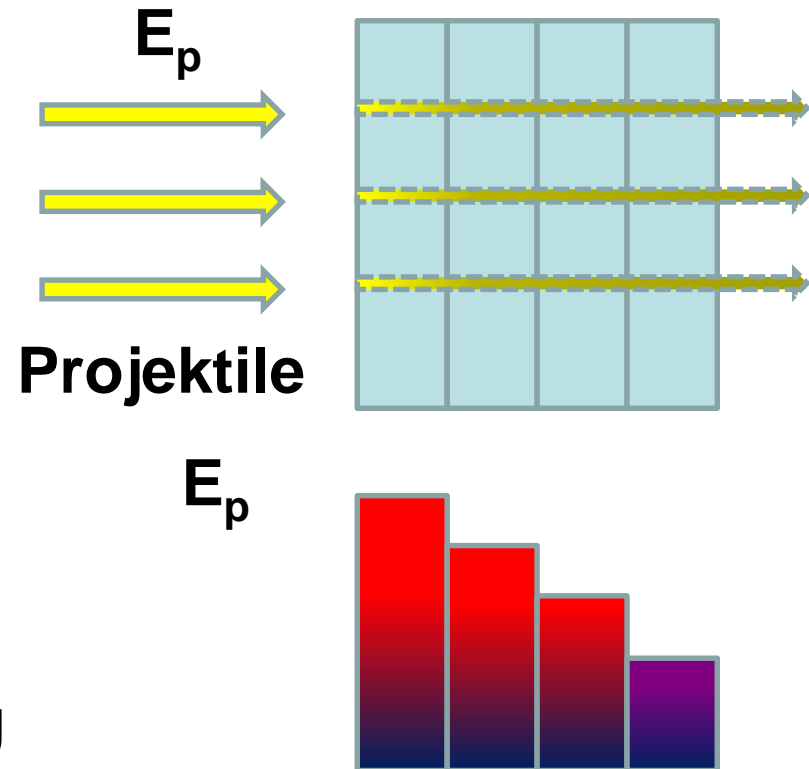
$$\begin{aligned}
 &\sigma(^4\text{He}, \text{pn}) : \sigma(^4\text{He}, \text{nn}) : \sigma(^4\text{He}, \text{n}) \\
 &= \sigma(\text{p}, \text{pn}) : \sigma(\text{p}, \text{nn}) : \sigma(\text{p}, \text{n}) \\
 &= \Gamma_{\text{pn}} : \Gamma_{\text{nn}} : \Gamma_{\text{n}}
 \end{aligned}$$



- Radiochemie
- Physikalische Methoden
- Kombination aus beidem



+ Chemische Trennung

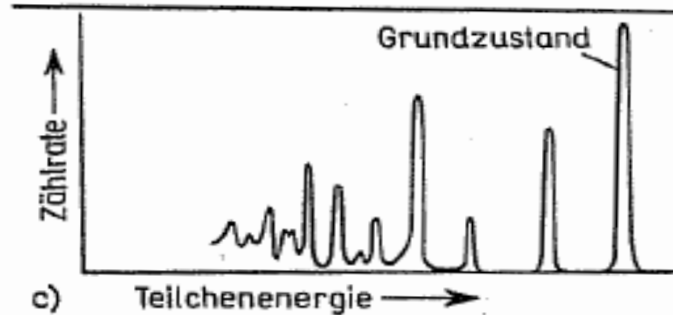
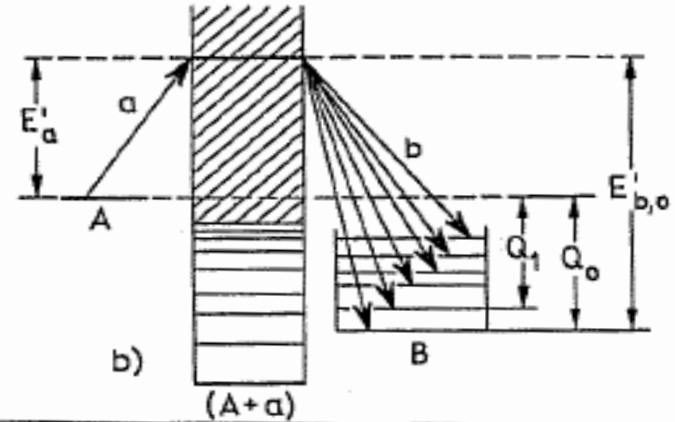
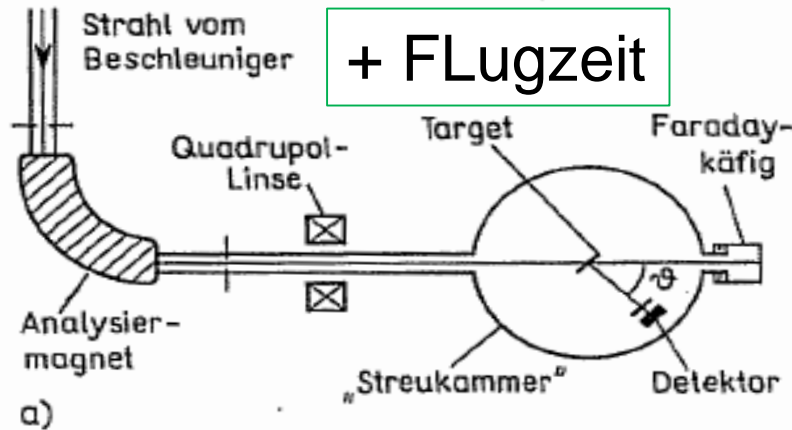


|       | $T_{1/2}$ | Zerfall   | $E_\gamma/\text{keV}$ | Kanal |
|-------|-----------|-----------|-----------------------|-------|
| Zn-64 | stab      |           |                       | 0n    |
| Zn-63 | 38 min    | $\beta^+$ | 670; 962              | 1n    |
| Zn-62 | 9.1 h     | $\beta^+$ | 41,5 97               | 2n    |
| Cu-62 | stab      |           |                       | p0n   |
| Cu-62 | 10 min    | $\beta^+$ | 511<br>(Vernichtung)  | p1n   |
| Cu-61 | 3.3 h     | $\beta^+$ | 283; 656              | p2n   |
| Cu-60 | 234 min   | $\beta^+$ | 1332; 1792            | p3n   |

$$\sigma_i = \frac{A_i}{INd(1 - e^{-\lambda_i t})}$$

☺ Eindeutig Z, A, Hohe Empfindlichkeit

☹ Keine stabilen Produkte, -> von Theorie



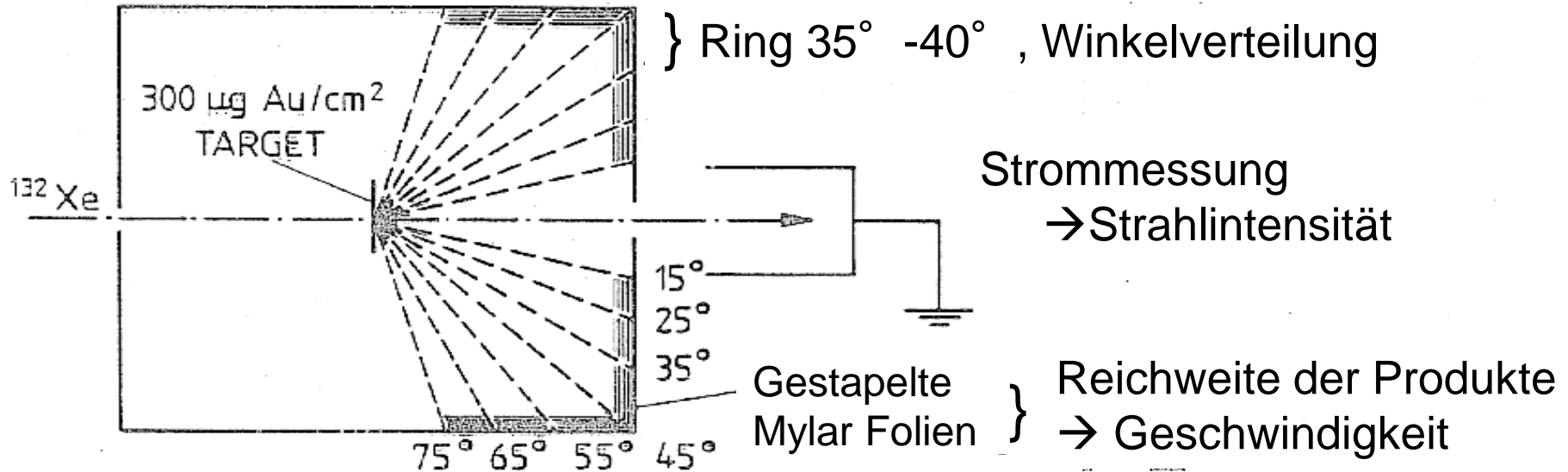
**Fig. 105**  
Typisches Kernreaktionsexperiment  
a) Anordnung  
b) Energieverhältnisse  
c) Energiespektrum der Reaktionsprodukte  
Ein experimentell beobachtetes Energiespektrum ist in Fig. 118 wiedergegeben

😊 Z, A, E, T können gemessen werden

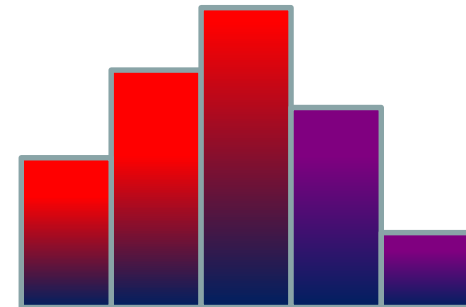
😊 Angeregte Zustände

☹ Auflösung bzgl. A, Z gering

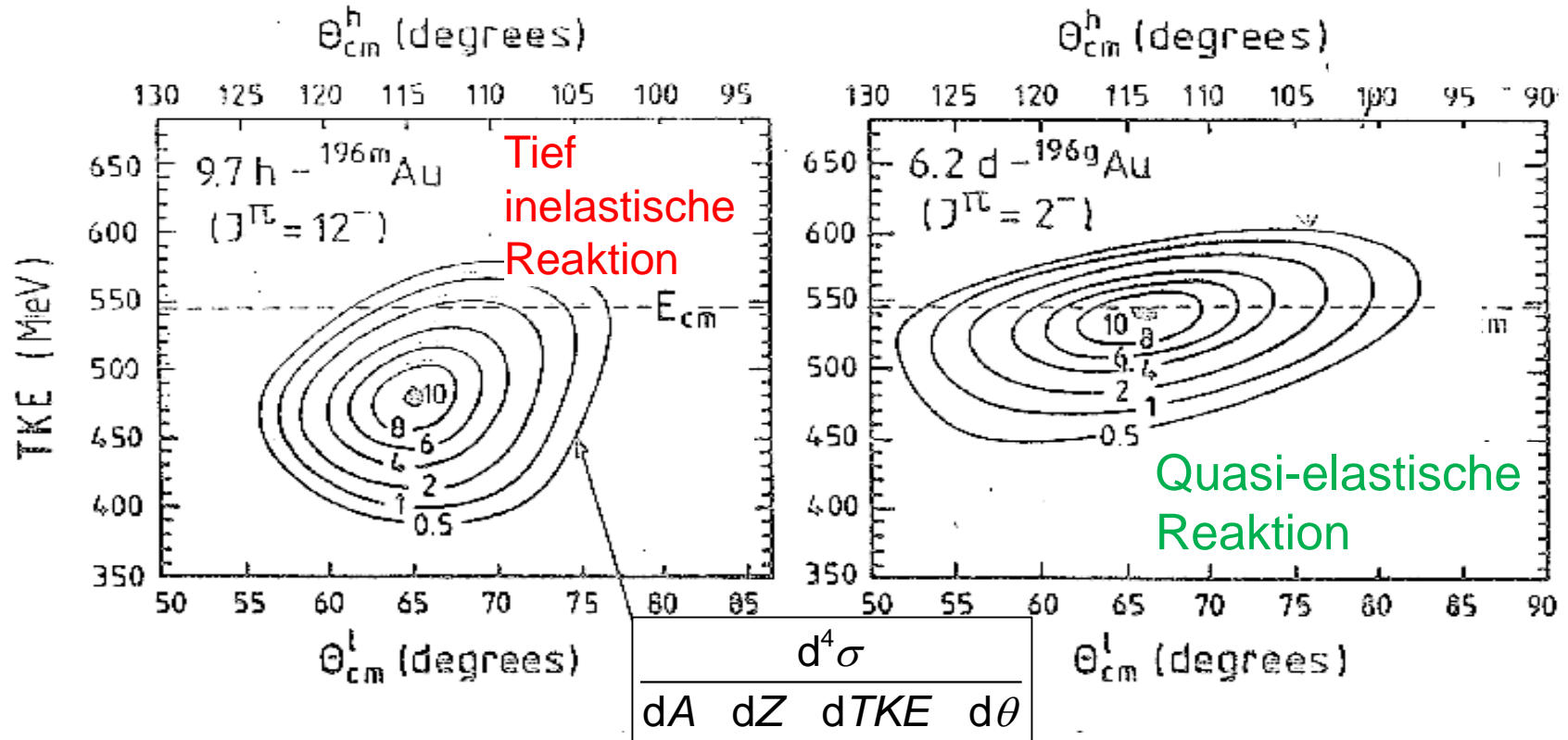
☹ Typisch  $\Delta Z/Z = 1/60$   
 $\Delta A/A = 1/50$  -> keine eindeutige Identifikation

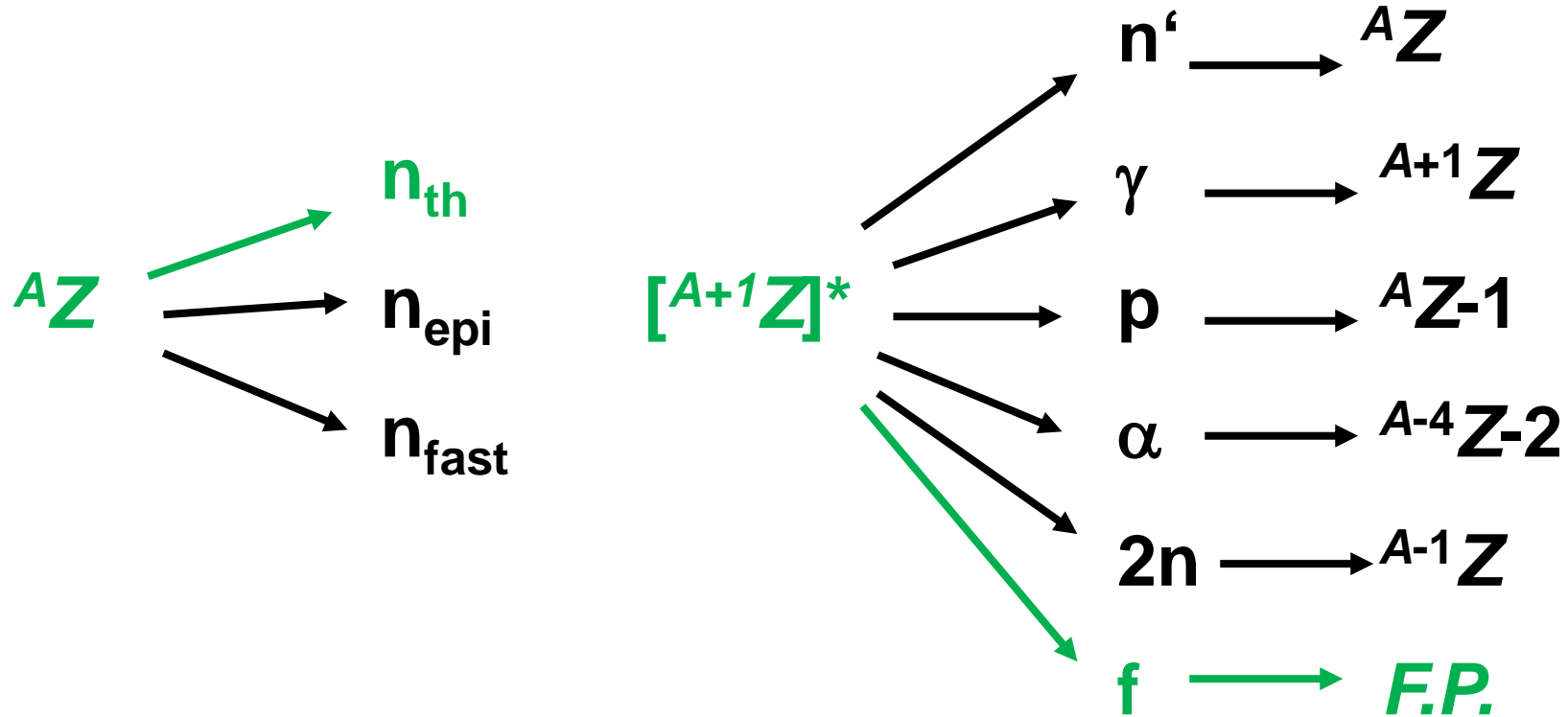


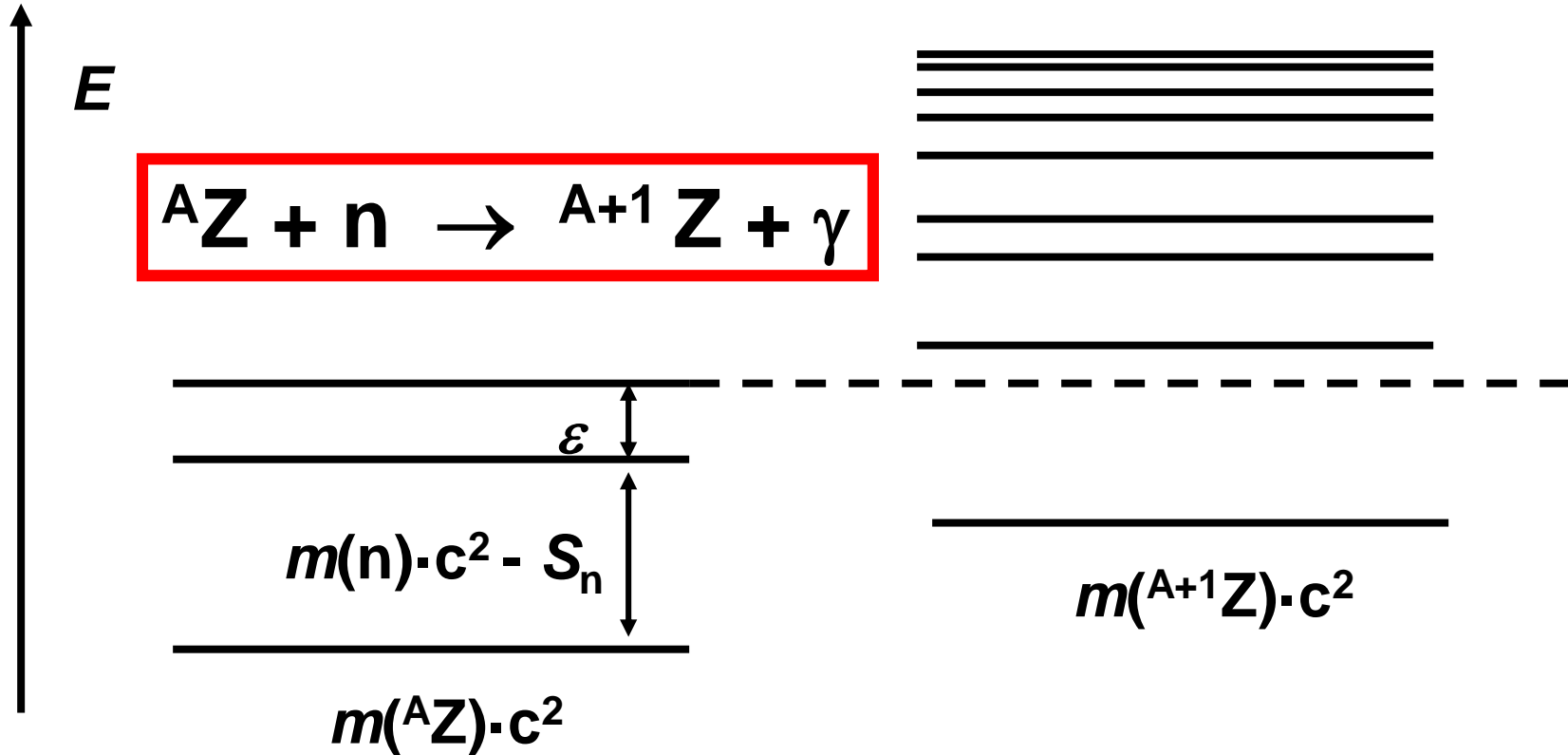
**Intensität**











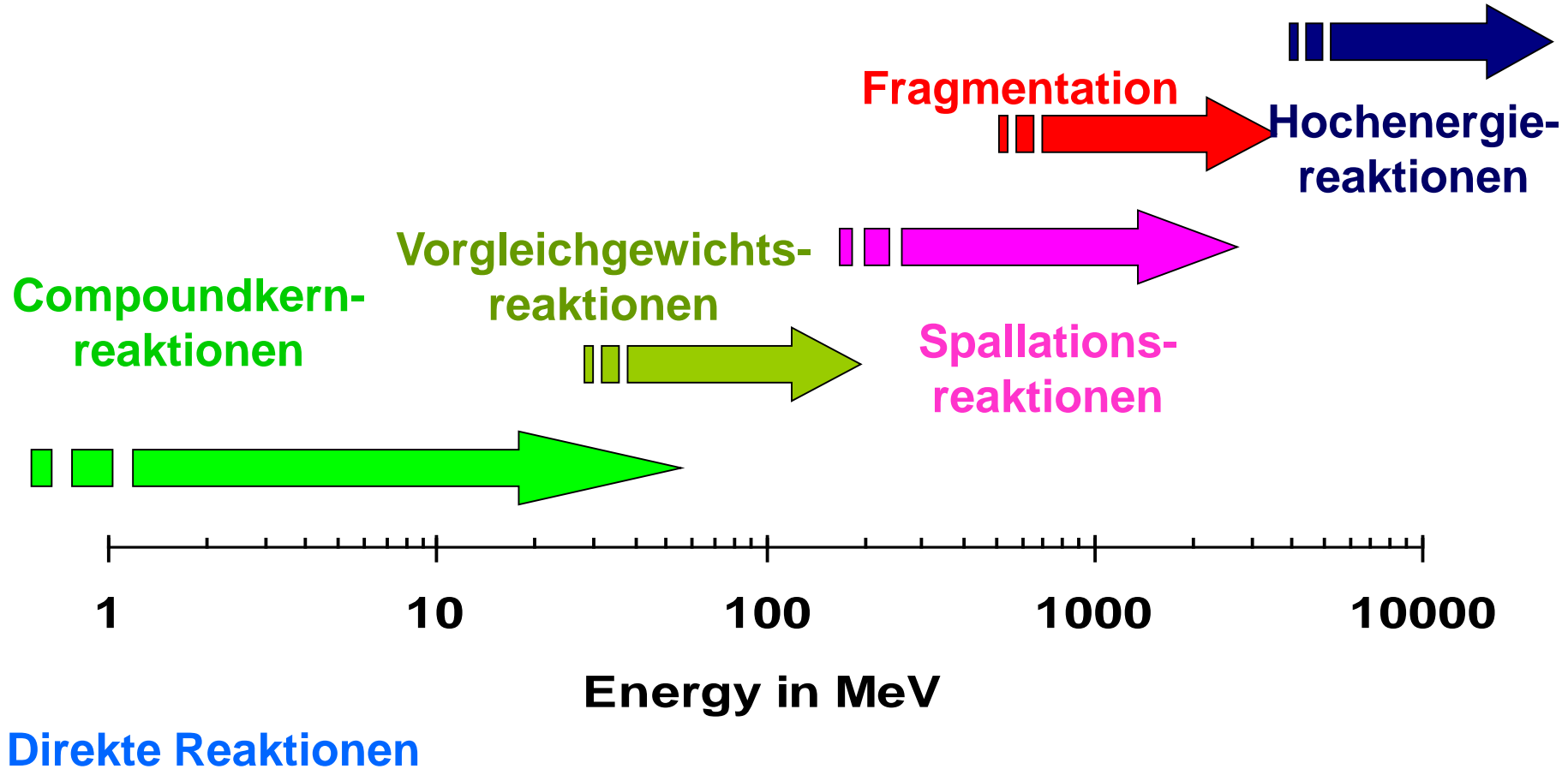
$S_n$  Separationsenergie eines Neutrones in  $A+1 Z$

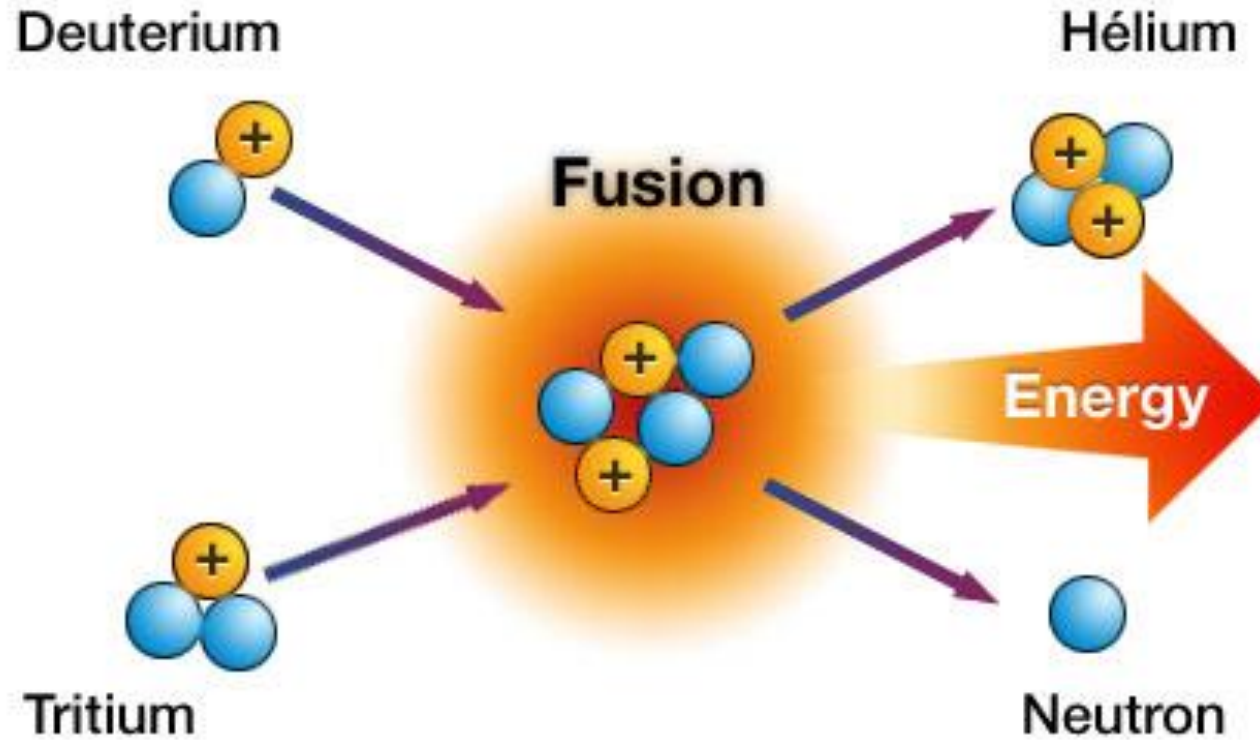
$\varepsilon$  kinetische Energie im CMS

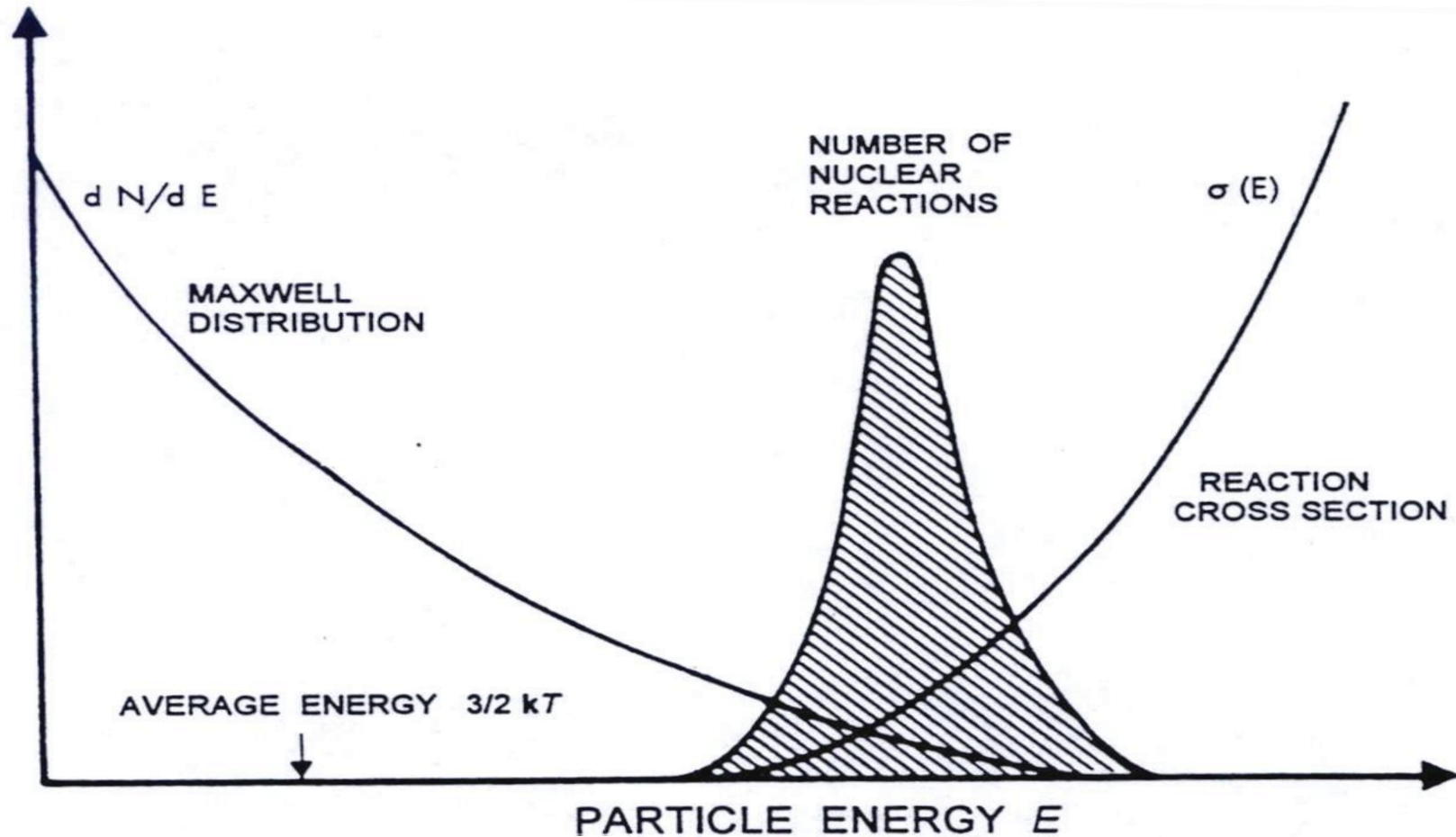
- (n,γ)-Reaktionen exotherm
- einige (n,p)- und (n,α)-Reactions exotherm
- Die meisten (n,Partikel)-Reactionen endotherm

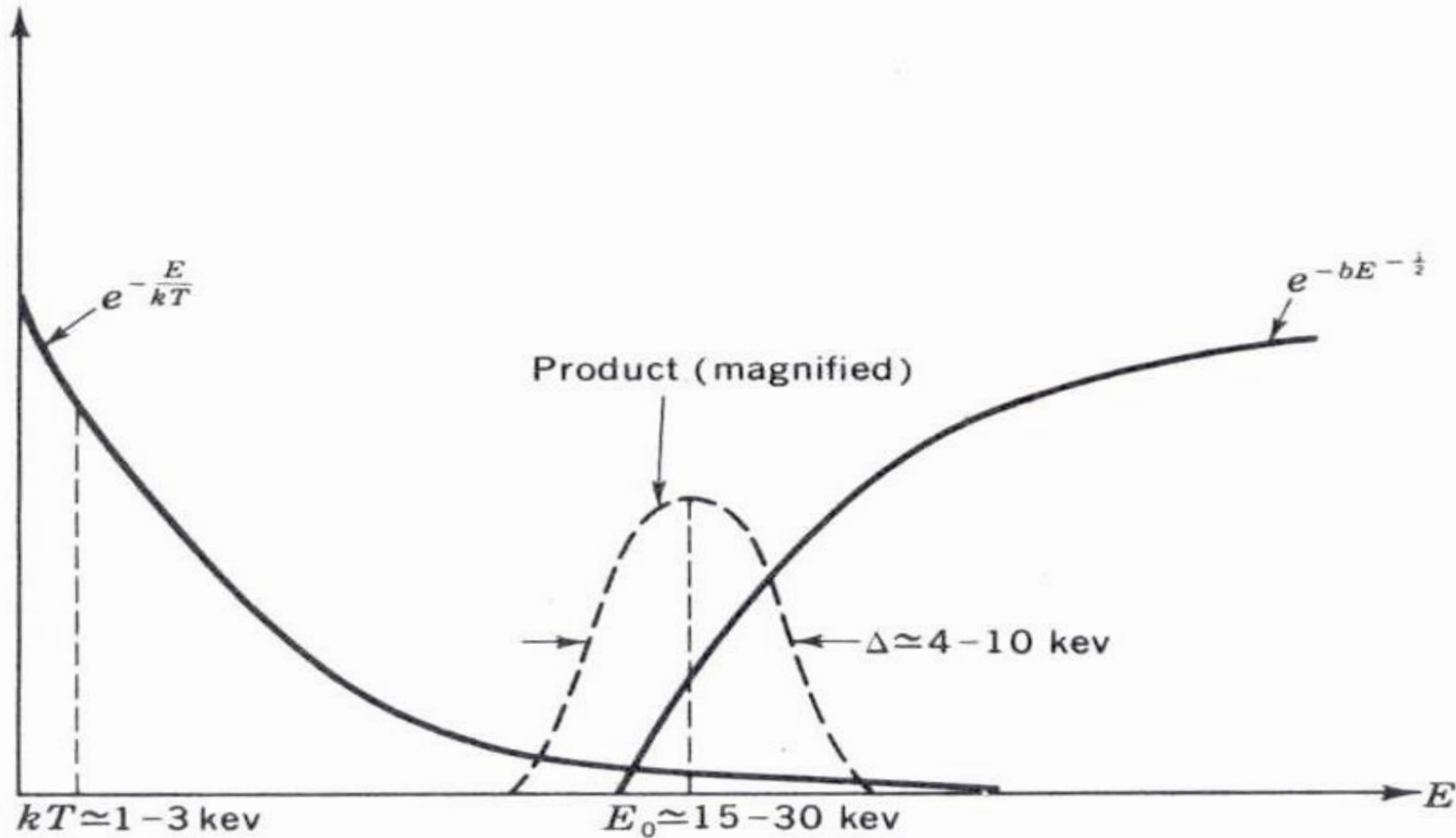
Alle Reaktionen < 10 MeV sind Compoundkern Reaktionen

$$\sigma(E) = \sigma_{CN}(E) \cdot \frac{\Gamma_{\gamma}}{\Gamma}$$





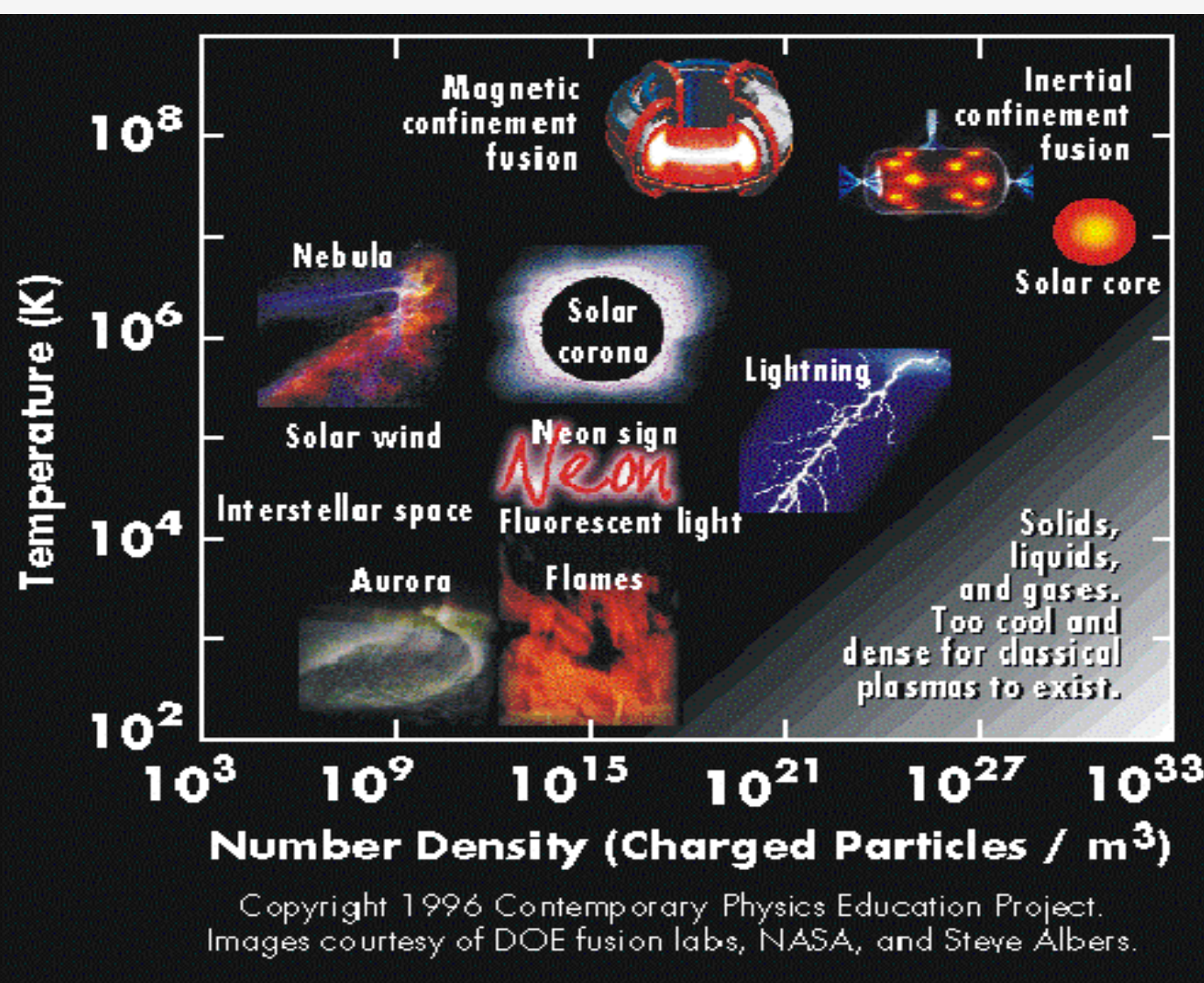


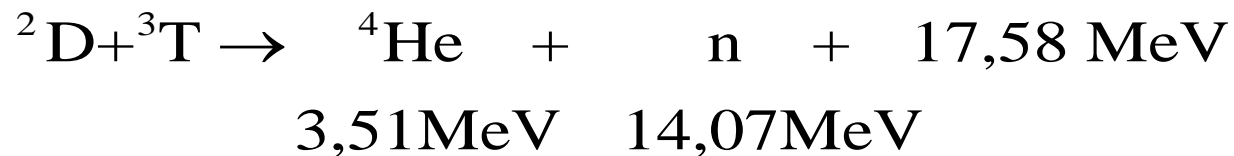
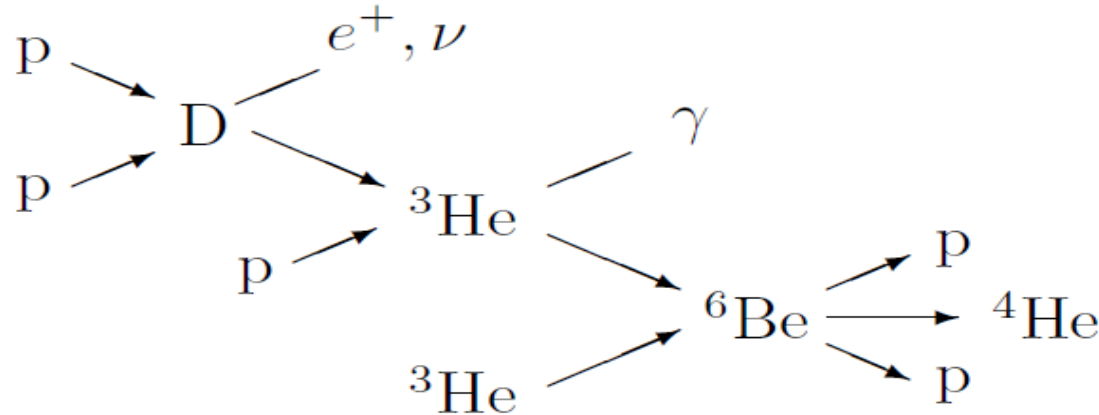


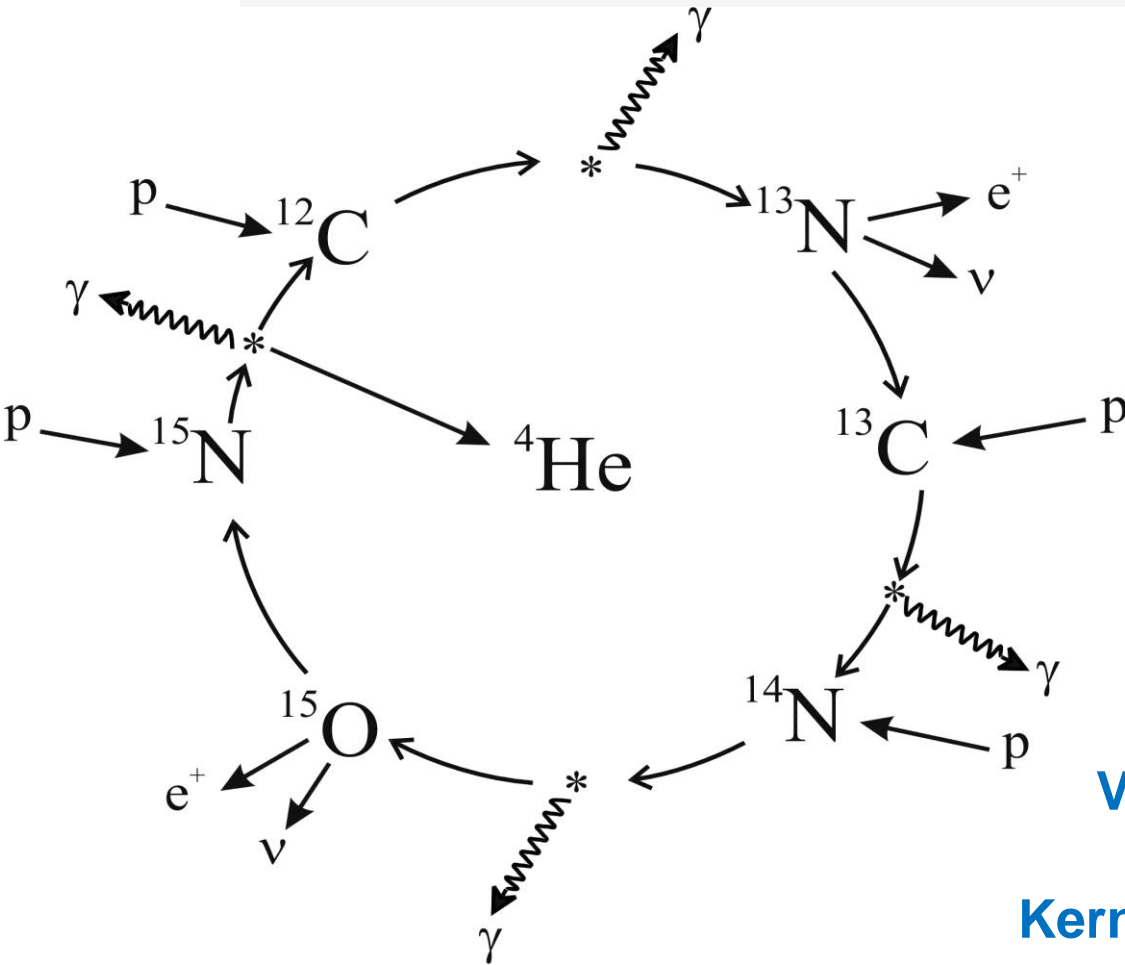


## Fusion

# Plasmen



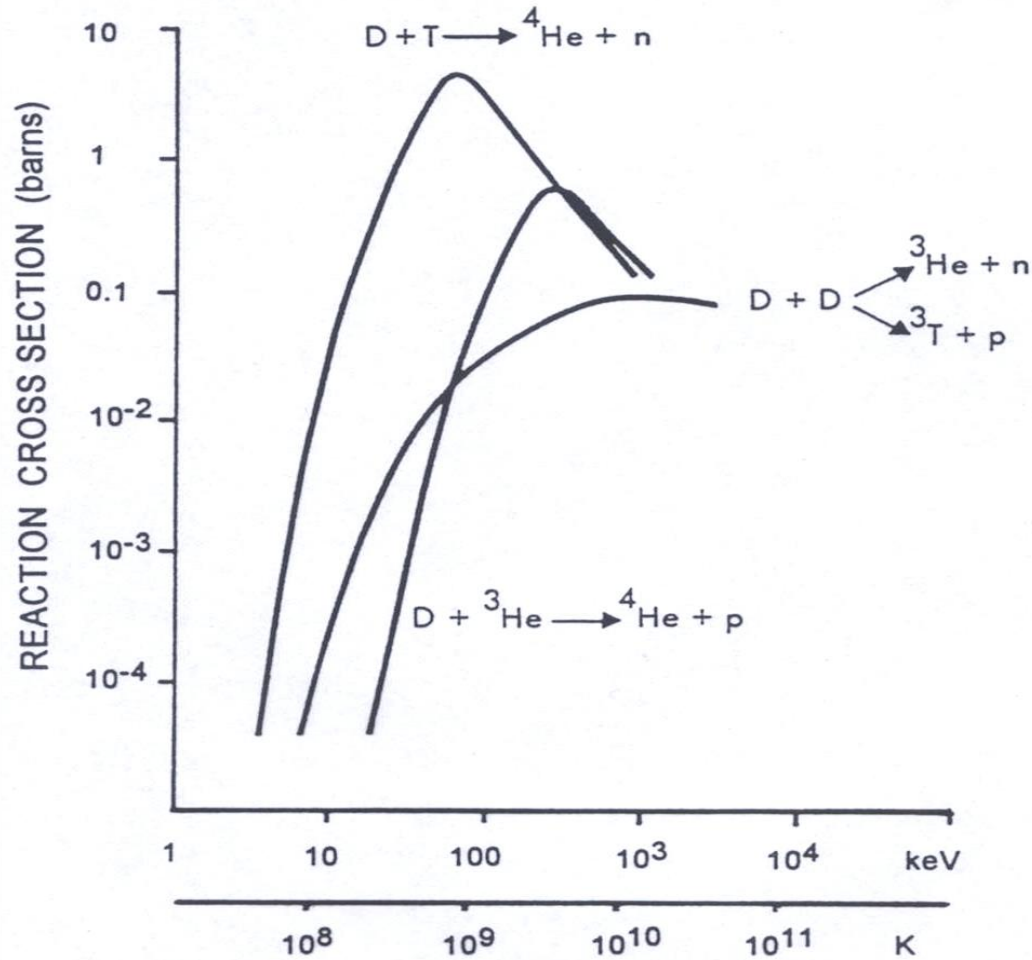




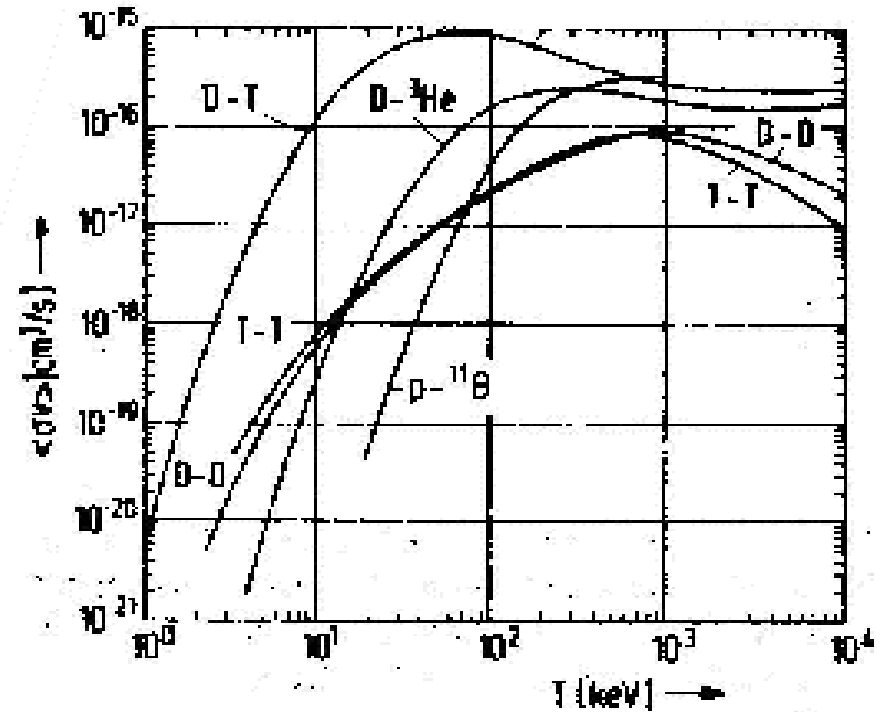
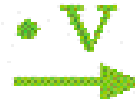
$^{12}\text{C}$  ist  
„Katalysator“  
für Fusion

**Vorlesung SS 2016 Di 14:00**

**Kernphysikalische Anwendungen  
in der Umweltphysik**



### Reaktionsparameter $\langle \sigma, \nu \rangle(T)$



Fusionsrate:

$$\langle R_{1,2} \rangle \propto \langle \sigma v \rangle T^{-2}$$

Fusions-

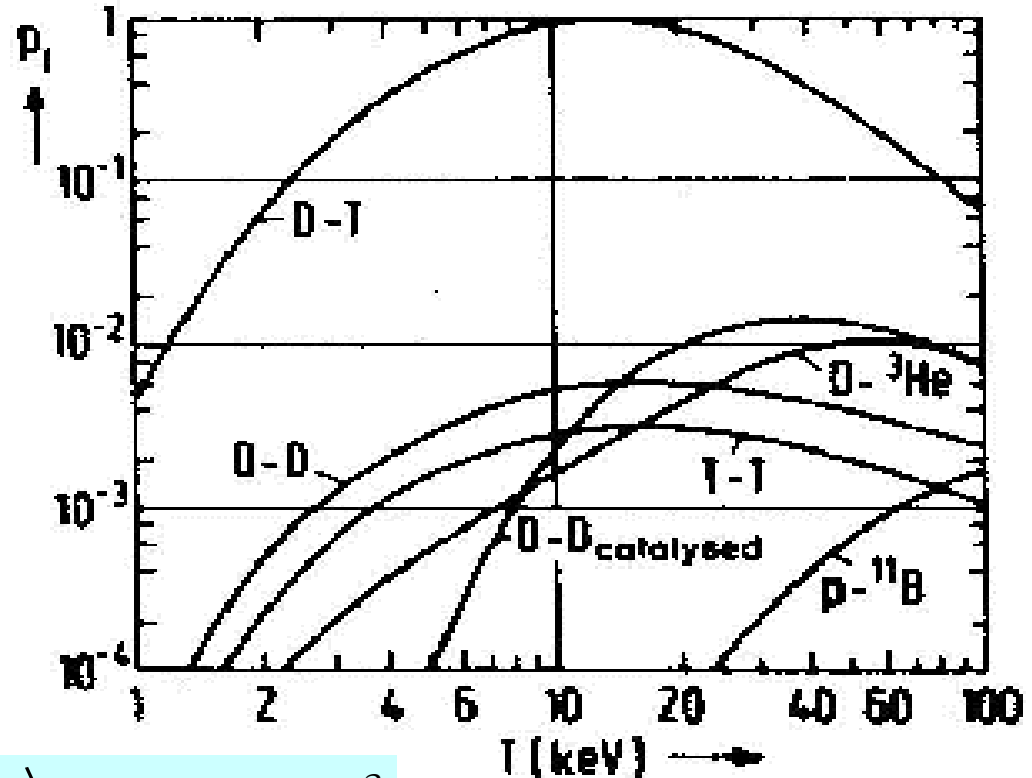
leistungsdichte:

$$\langle p_f \rangle = \langle R_{1,2} \rangle E_{fus}$$

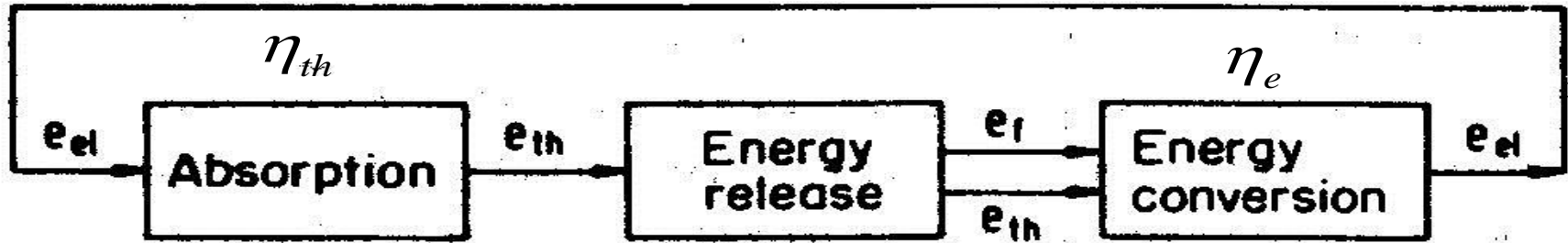
$$E_{fus} = 17,6 \text{ MeV}$$

$$n_1 = n_2 = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \rightarrow \langle p_f \rangle = 1,8 \text{ W/cm}^3$$

$$(\text{Sonne: } 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^3)$$



## Energiebilanz



$$(E_{fus} + E_{th})\eta_e = E_{el} = E_{th} / \eta_{th}$$

$$(p_f \tau_b + E_{th}) = E_{th} / \eta_{th} \eta_e \quad p_f = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle E_{fus}$$

$$E_{th} = \frac{3}{2} (n_i n_e) k_B T$$

$$n \tau_b = \frac{1}{\eta_e \eta_{th}} \frac{(6 + 3(z_1 + z_2)) k T}{E_{fus} \langle \sigma v \rangle}$$



$\tau$ : Plasma  
-Zusammenhalt

$$E_{fus} = 17,6 \text{ MeV}$$

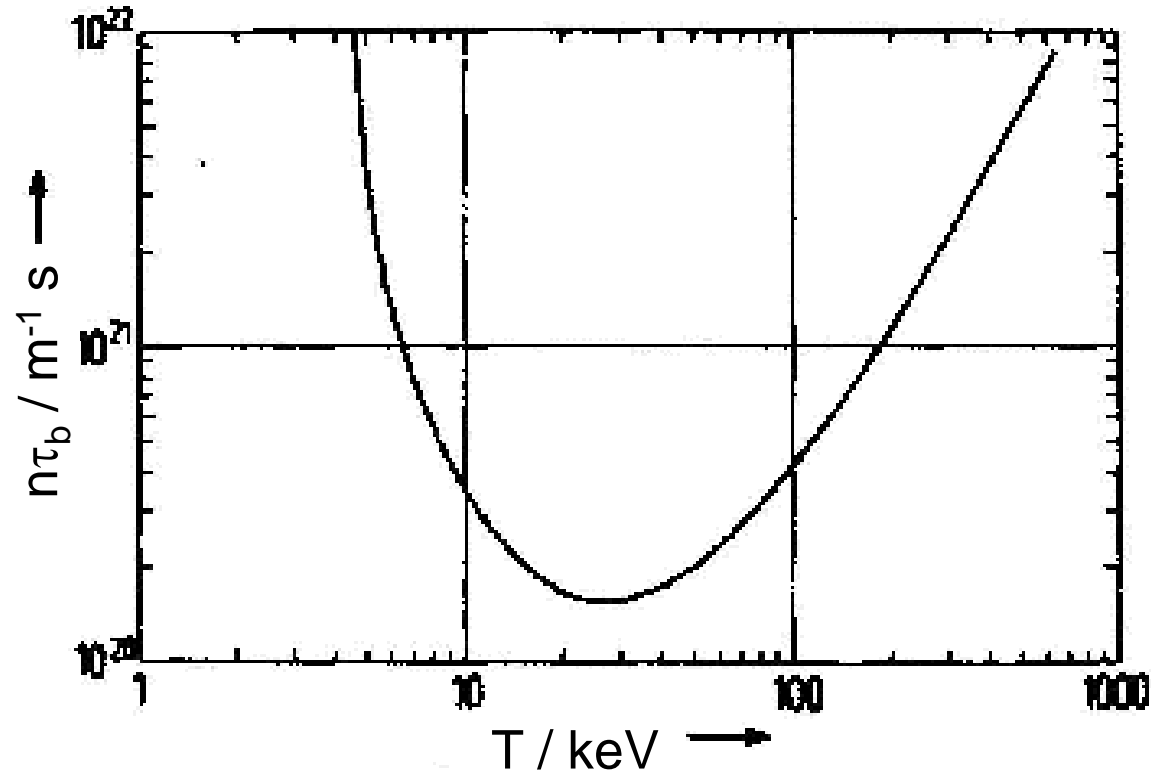
$$\eta_e = 0,3$$

$$\eta_{th} = 0,7$$

$$\langle \sigma v \rangle = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{s}$$

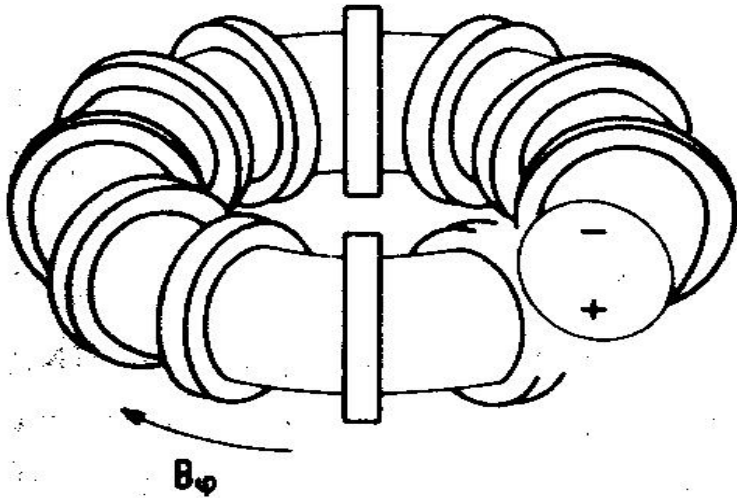
(at  $T=15 \text{ keV}$ )

$$n \tau_b \geq 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{s}$$



Magnetischer Einschluss ( $n = 10^{14} \text{ cm}^{-3} \rightarrow \tau \sim 1 \text{ s}$ )  
 Plasmavolumen ( $\text{m}^3$ )

Trägheitsfusion Einschluss ( $\tau \sim 10^{-11} \text{ s} \rightarrow n = 10^{25} \text{ cm}^{-3}$ )  
 Plasmavolumen ( $\text{m}^3$ )



Magnetfeld nicht homogen  
sondern Abfall zum Rand:

$$B_{\Phi}(R) \cdot R = \text{const.}$$

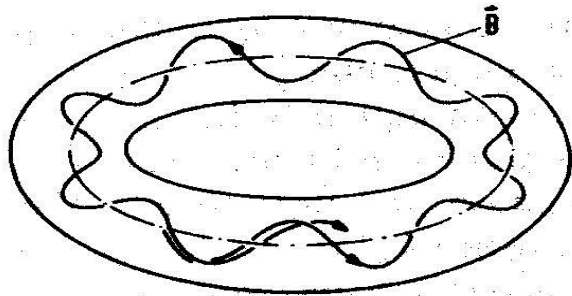


Teilchen außen  
langsamer als innen

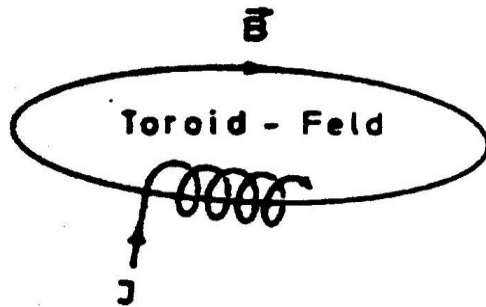


Drift nach unten oder oben,  
aus Magnetfeld

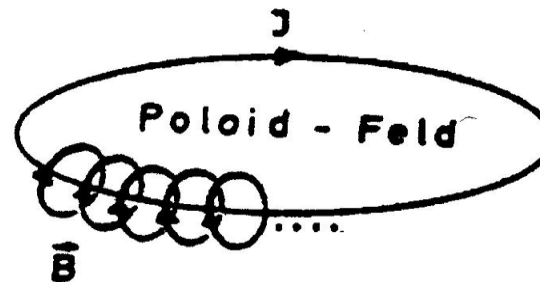




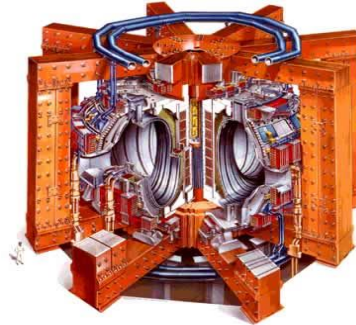
=



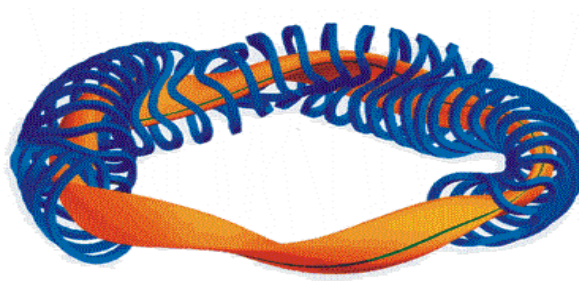
+

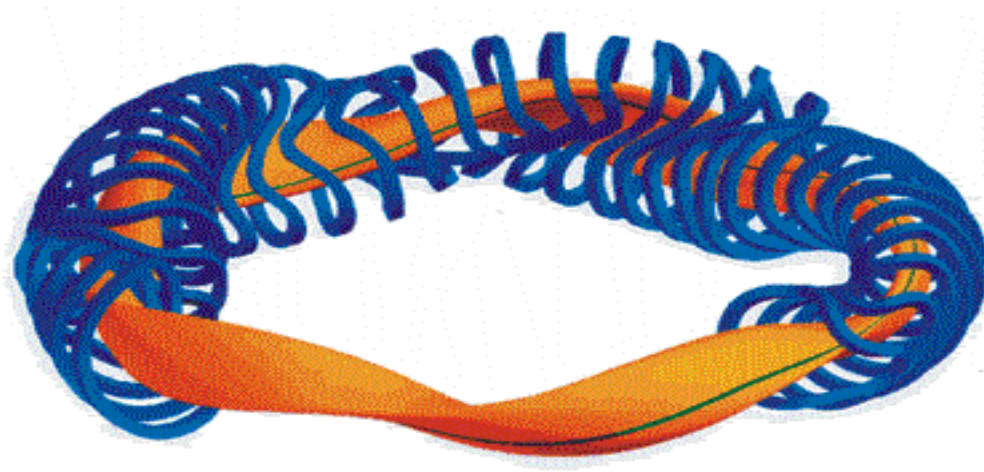


Tokamak:  
(dynamisch)

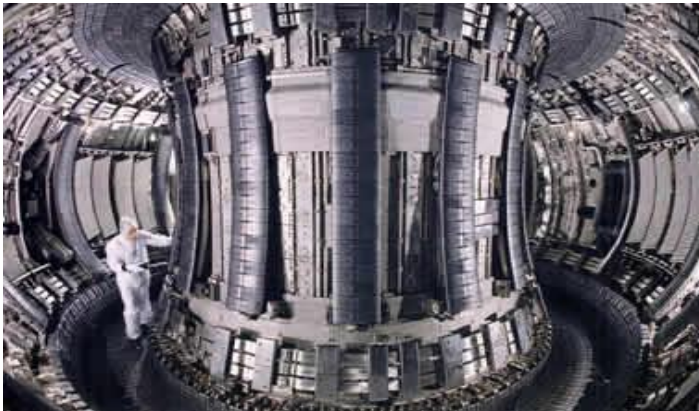
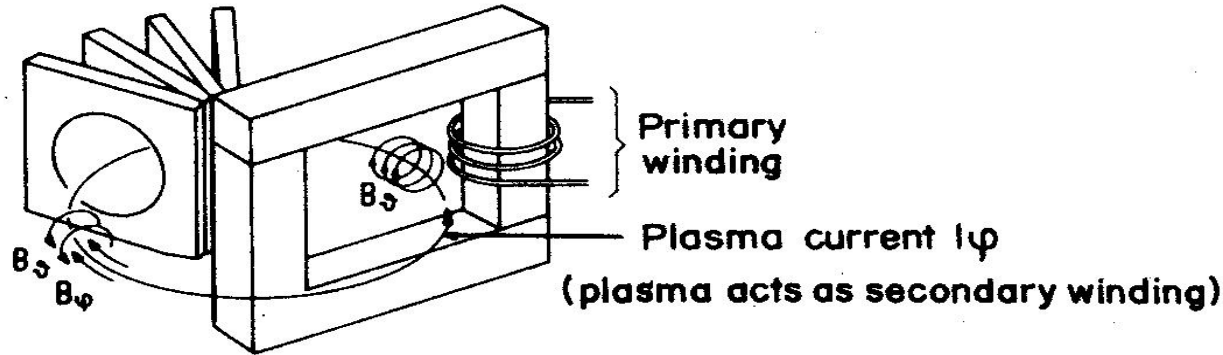


Stellarator  
(statisch)





## Tokamak



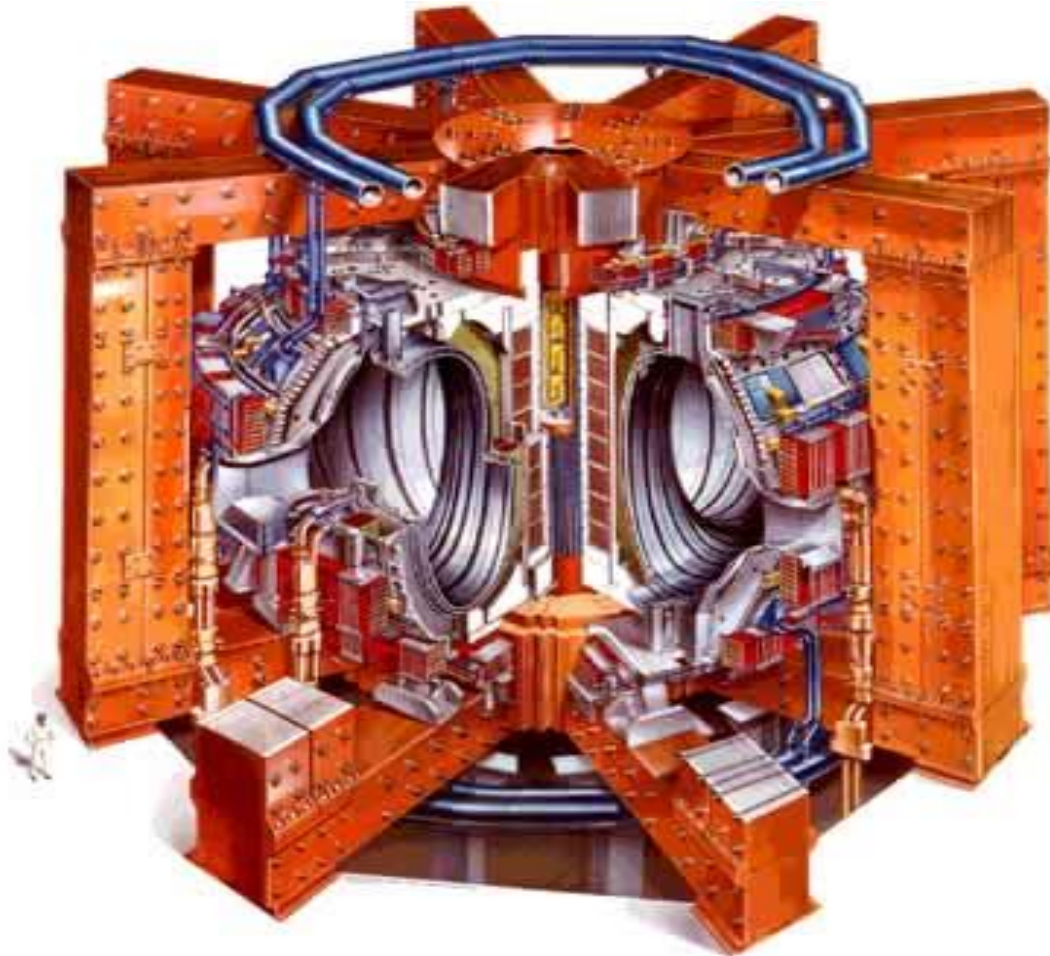
Strom im Plasma durch  
zeitlich veränderliches Magnetfeld



Gepulst !

# Einschluss





|   | JET                | ITER        |
|---|--------------------|-------------|
| Torus radius, central point (m)                                   | 3.0                | 6.0         |
| Vacuum chamber: width (m)   | 1.2                | 2.05        |
| height (m)  | 3.0                | 6.0         |
| Total reactor height (m)  | 11.3               | 27.6        |
| Total reactor radius (m)  | 17.5               | 31.0        |
| Plasma current (MA)   | 4-7                | 22          |
| Toroidal field (T)  | 3.5                | 4.9         |
| Power in (MW)   | 36                 |             |
| Operation:  |                    |             |
| ion temperature $T$ (keV)   | 25                 | 10-20       |
| " (K)   | $2 \times 10^8$    | $\sim 10^8$ |
| ion density, $n$ ( $\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ )              | 4                  | 25          |
| pulse length/confinement time $\tau$ (s)                          | 1.2 (25)           | 400         |
| fusion product $nT\tau$ ( $\times 10^{20} \text{ keV s m}^{-3}$ ) | 8-9                | 50          |
| DT reactions/s  | $6 \times 10^{17}$ | $10^{21}$   |
| T-consumption (kg/d) <sup>†</sup>                                 |                    | 0.43        |
| DD reactions/s  | $1 \times 10^{17}$ |             |
| Power out (thermal MW)  | 2 <sup>‡</sup>     | 1000        |

<sup>†</sup> At continuous operation. <sup>‡</sup> For about 2 s in DD reaction.

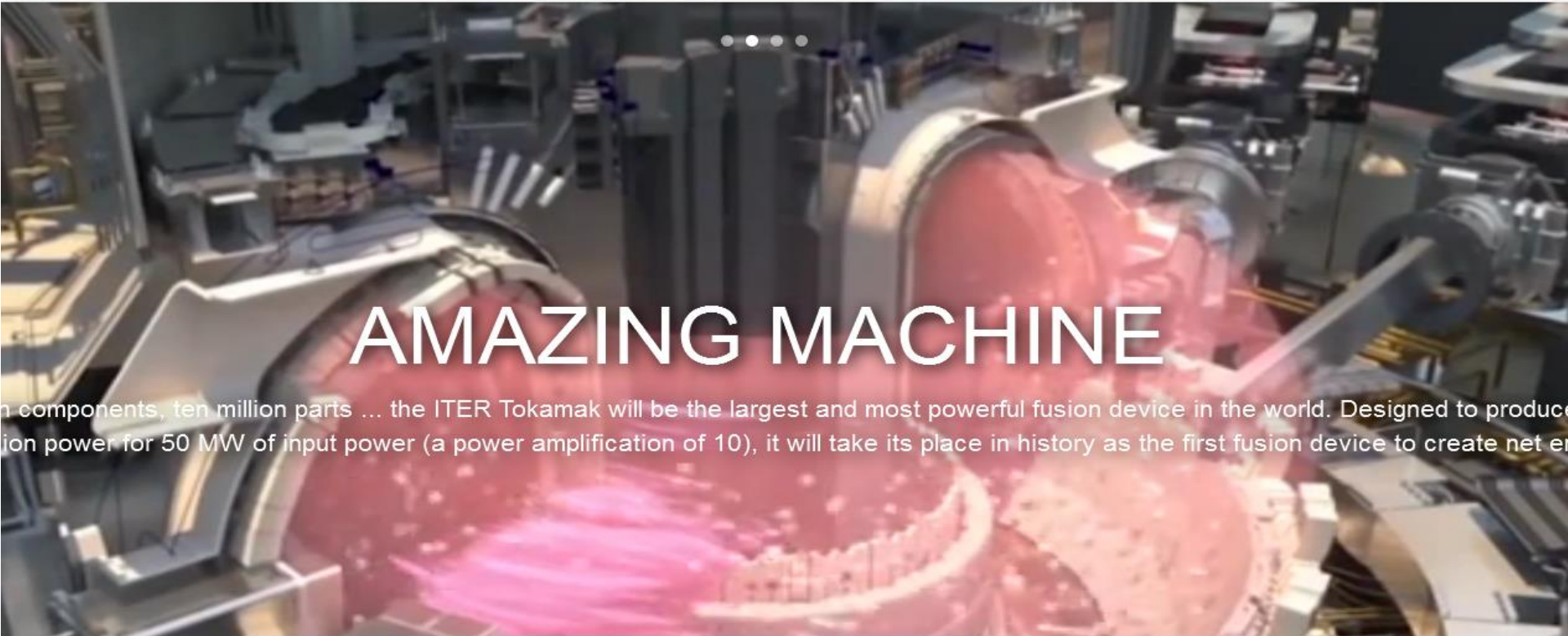

[JOBS](#)
[FAQS](#)
[VISITS](#)
[CONTACT US](#)
[SUBSCRIBE](#)
[INTRANET](#)
[Français](#)

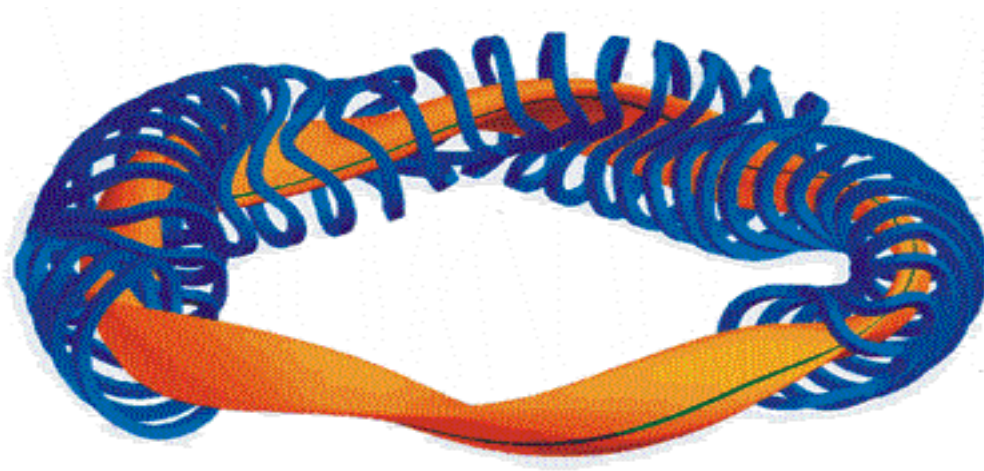
[ABOUT](#)
[MACHINE](#)
[SCIENCE](#)
[BUILDING ITER](#)
[NEWS & MEDIA](#)

<https://www.iter.org/factsfigures>

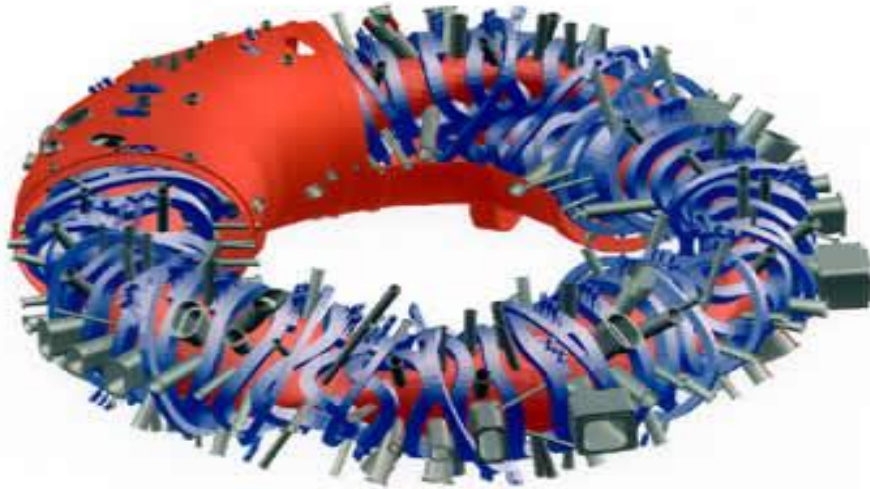
# AMAZING MACHINE

h components, ten million parts ... the ITER Tokamak will be the largest and most powerful fusion device in the world. Designed to produce  
ion power for 50 MW of input power (a power amplification of 10), it will take its place in history as the first fusion device to create net energy

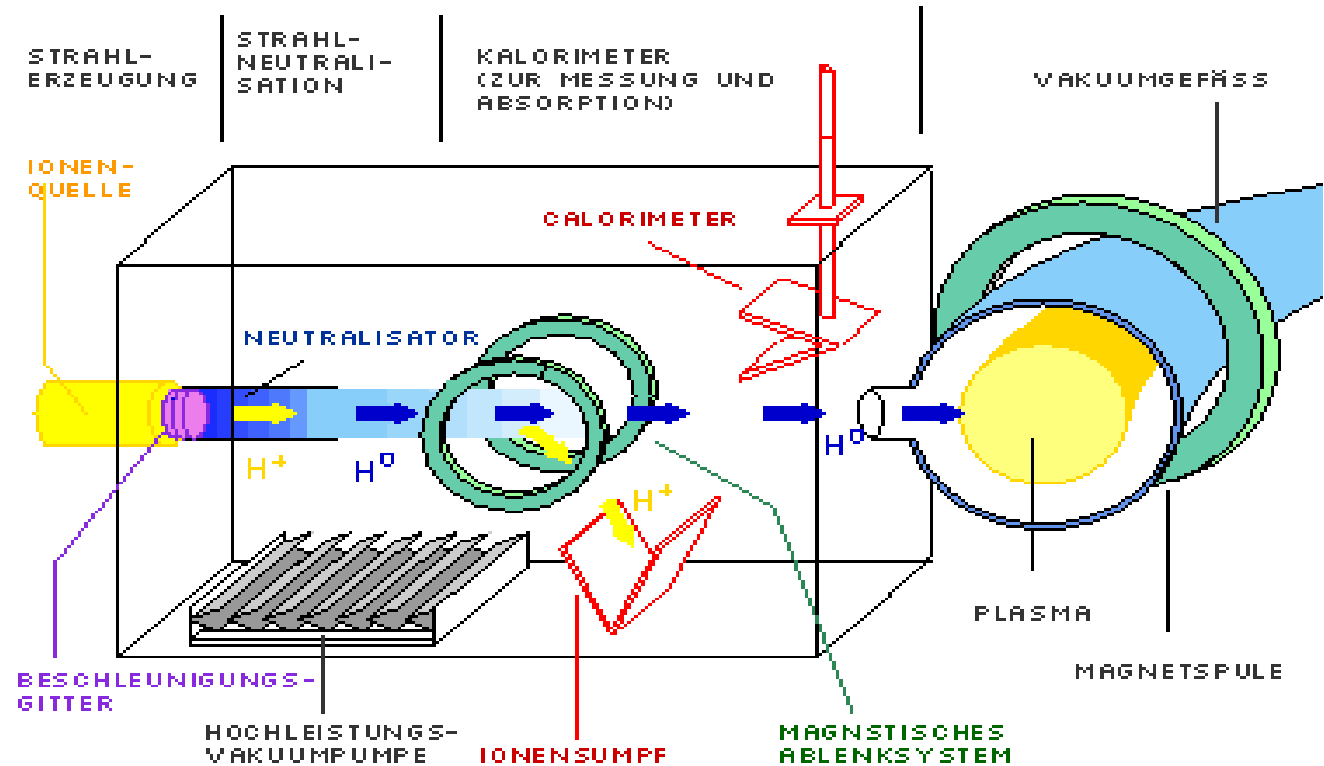








Ohmsche  
Heizung bis  
15 Mio K  
Dann Mikrowelle  
Oder Neutralstrahl





Max-Planck-Institut  
für Plasmaphysik

FORSCHUNG | ENERGIEQUELLE FUSION | INSTITUT | AKTUELLES | KARRIERE | JUGEND UND SCHULE | KONTAKT

▶ Startseite ▶ Forschung ▶ Projekte ▶ Wendelstein 7-X

**Projekte**

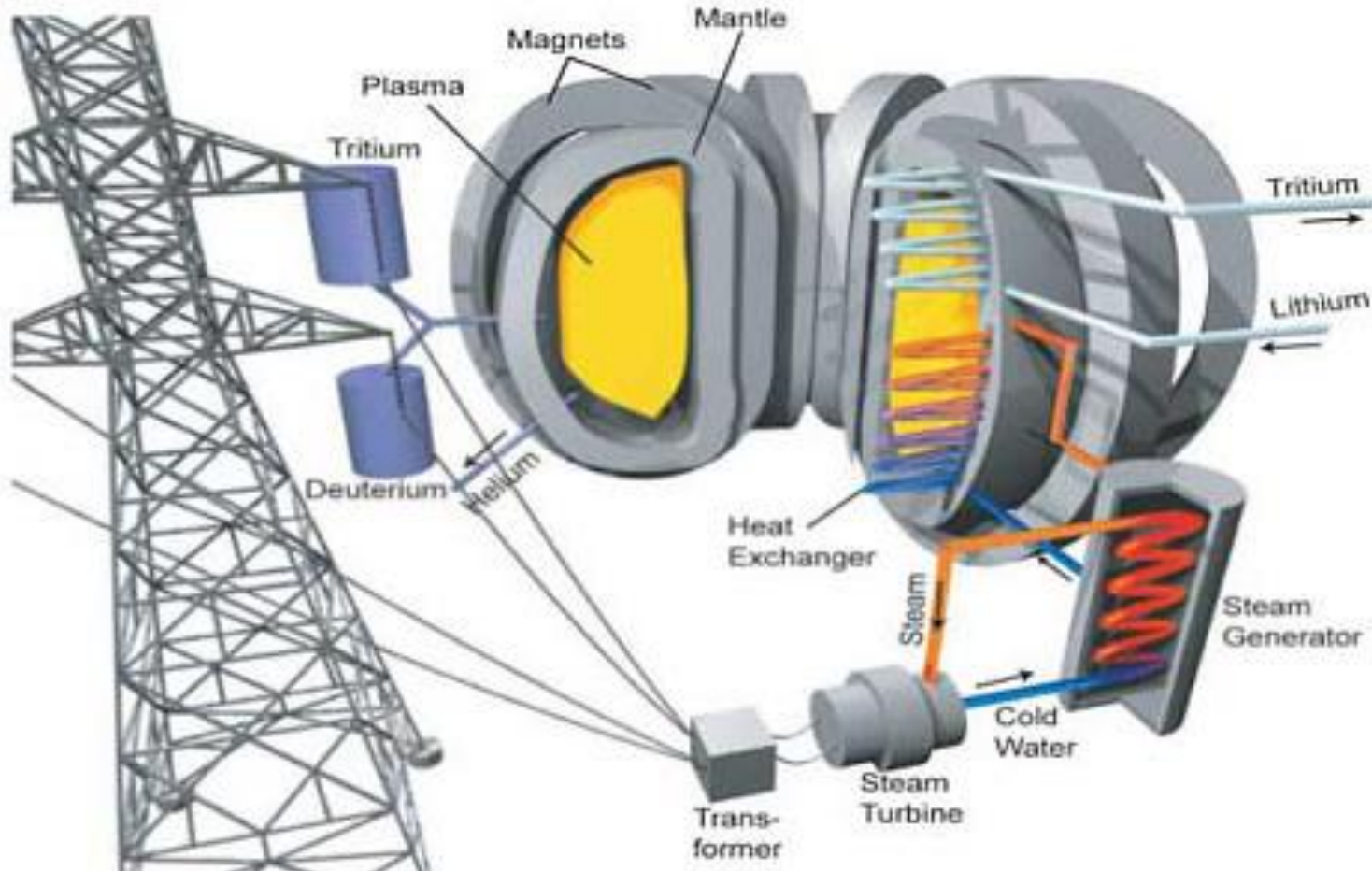
- ASDEX Upgrade
- **Wendelstein 7-X**
- Einführung
- Aktuelle Forschung
- Meilensteine
- Sicherheitsfragen
- Organisation



**Wendelstein 7-X**

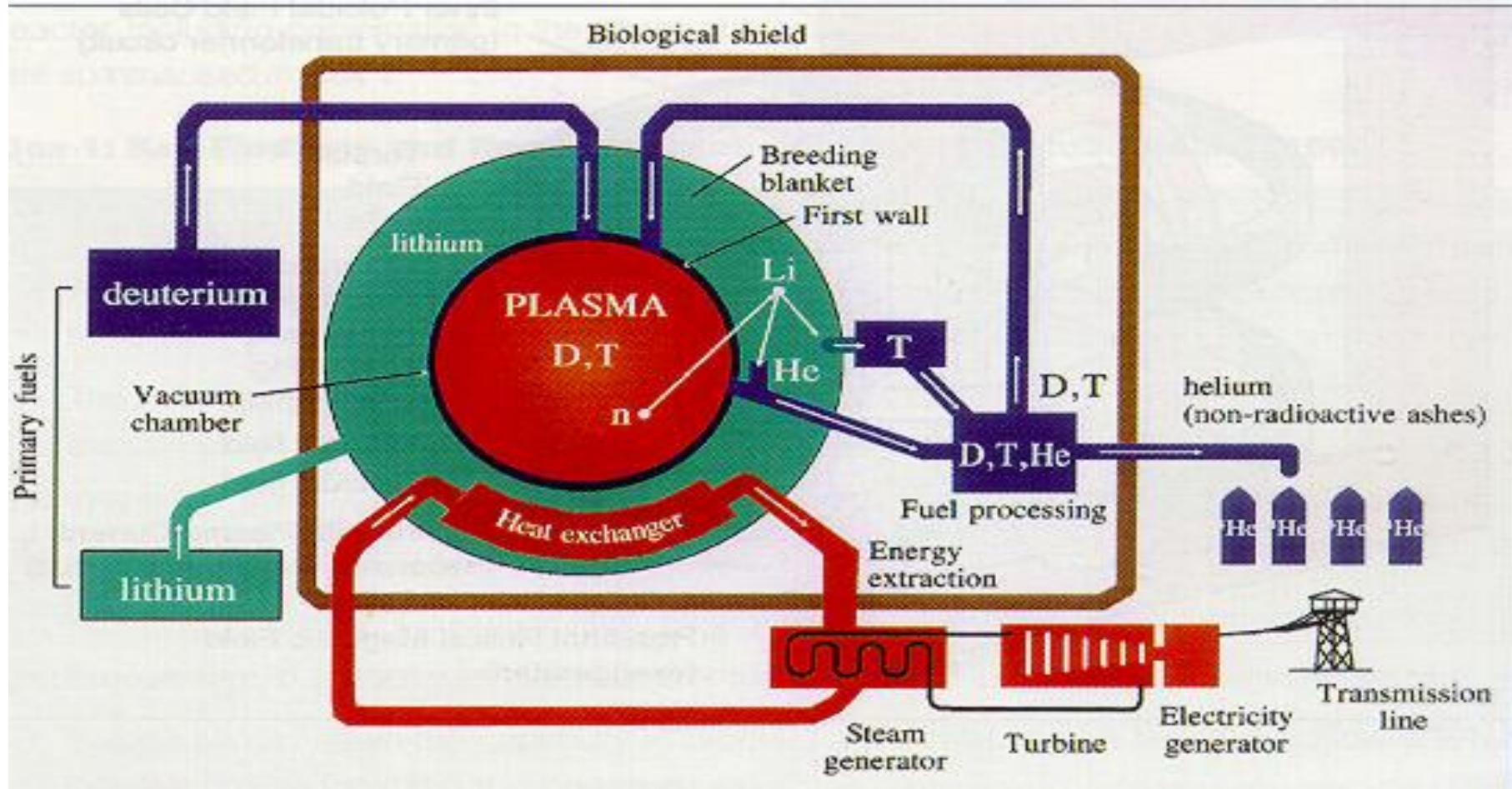
Die Experimentieranlage Wendelstein 7-X im IPP-Teilinstitut Greifswald soll die Kraftwerkstauglichkeit von Fusionsanlagen des Typs "Stellarator" demonstrieren.

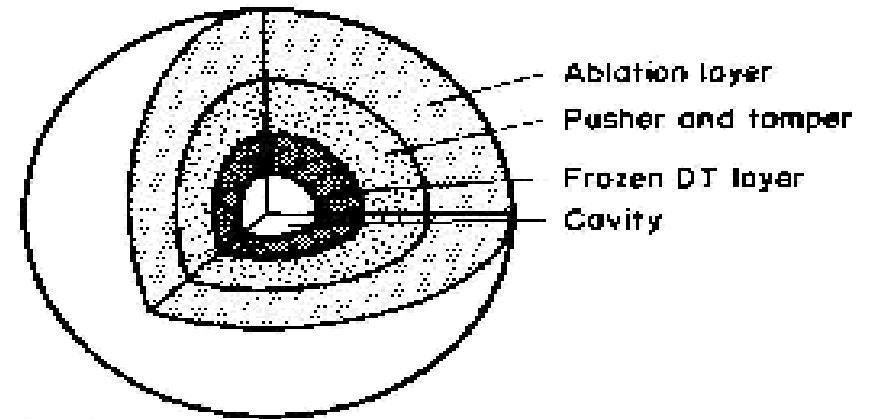
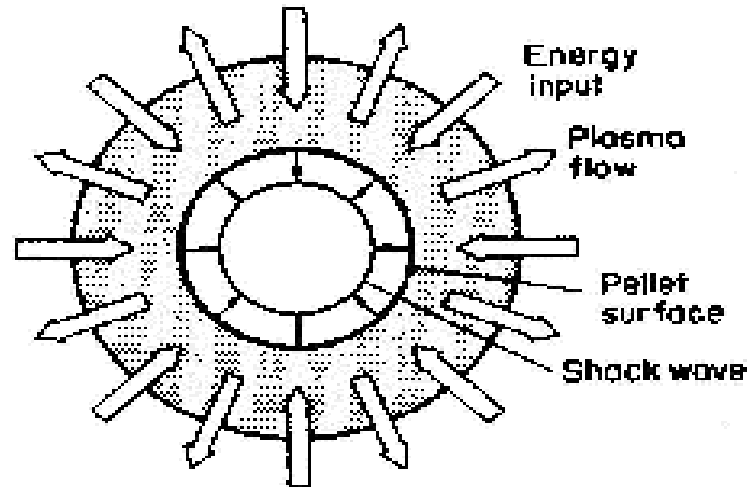
<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/w7x/index>



<http://fusionforenergy.europa.eu/understandingfusion/demo.aspx>







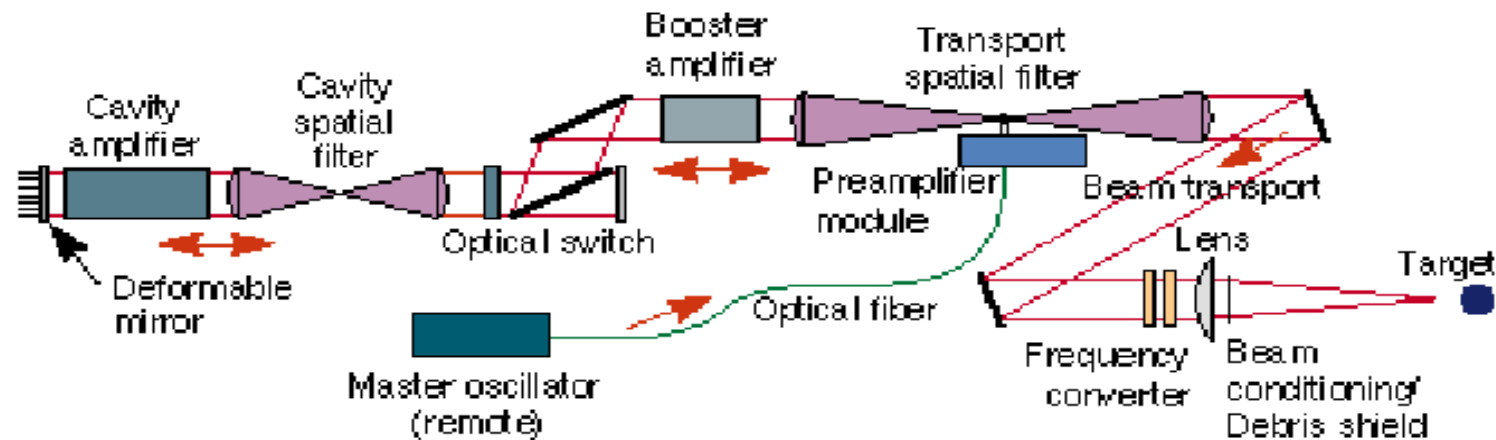


Figure 1. The layout of NIF's major components through which a pulse of laser light travels from injection to final focus on the target.



Large rapid-growth KDP crystals for NIF. Approximately 35% of the NIF KDP crystal plates can be yielded from these boules.



A laser glass LRU being moved by a transport vehicle in the OAB



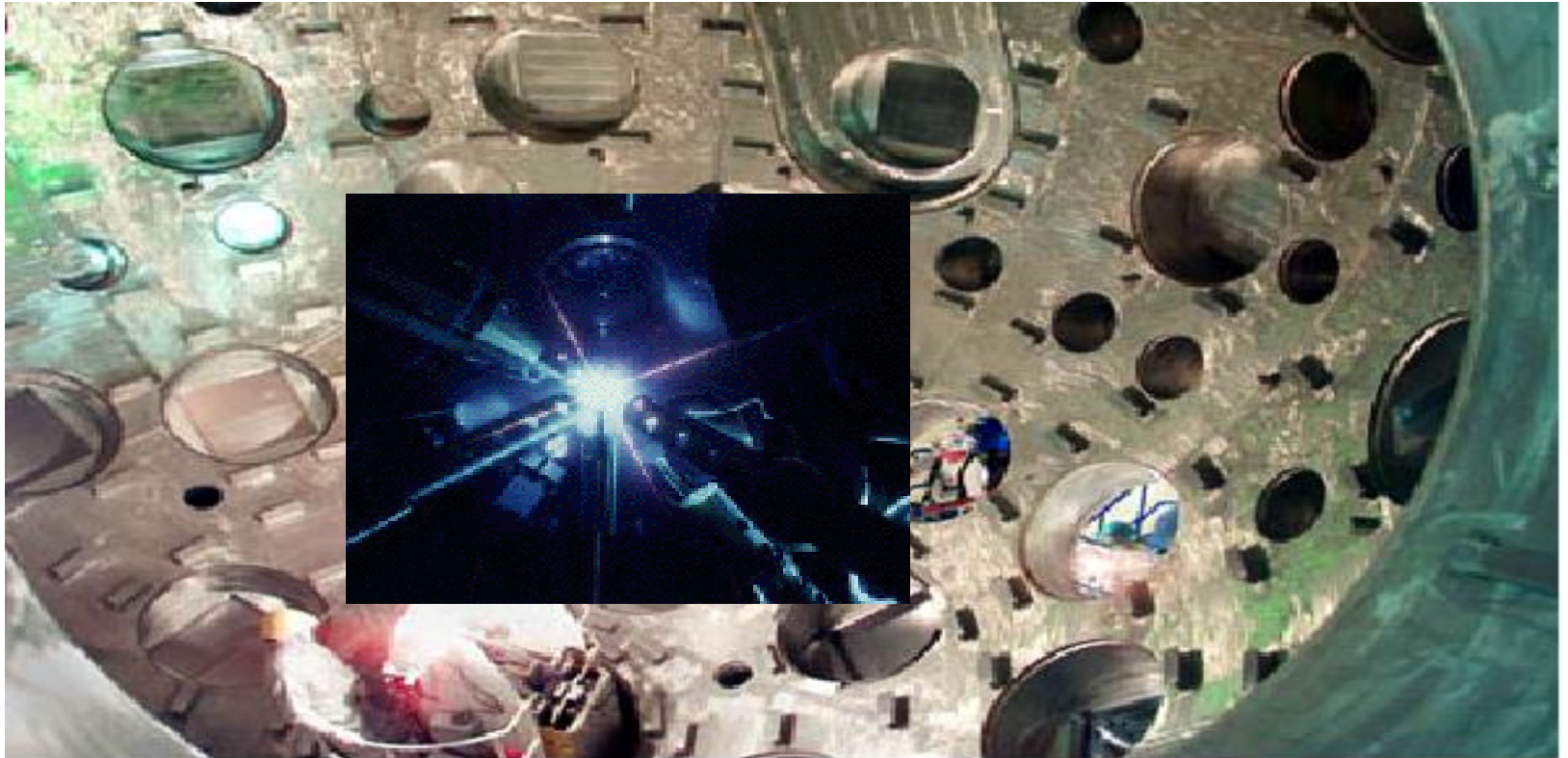


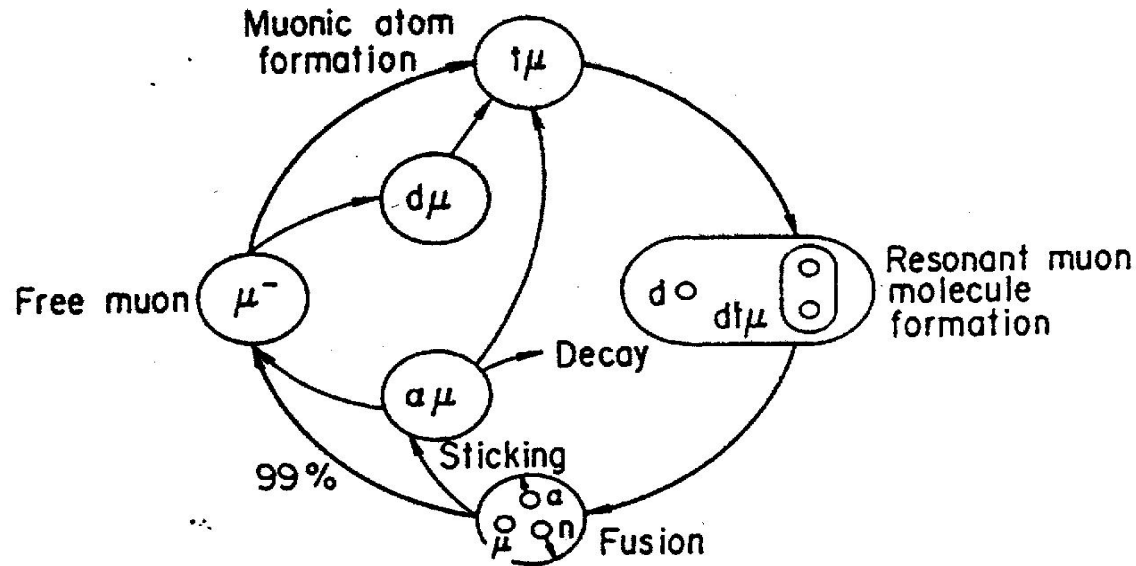
Interior of Laser Bay 2 looking from the transport spatial filters towards the main amplifier cavity



Interior of Laser Bay 2 looking at Cluster 3 main amplifier cooling system and down the length of the laser bay towards the transport spatial filter

LLNL





$D_2$ :  $R = 74 \text{ pm}$

$\mu DT$ :  $R = 500 \text{ fm}$