Karlsruher Institut für Technologie

Diese Veranstaltung wir aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

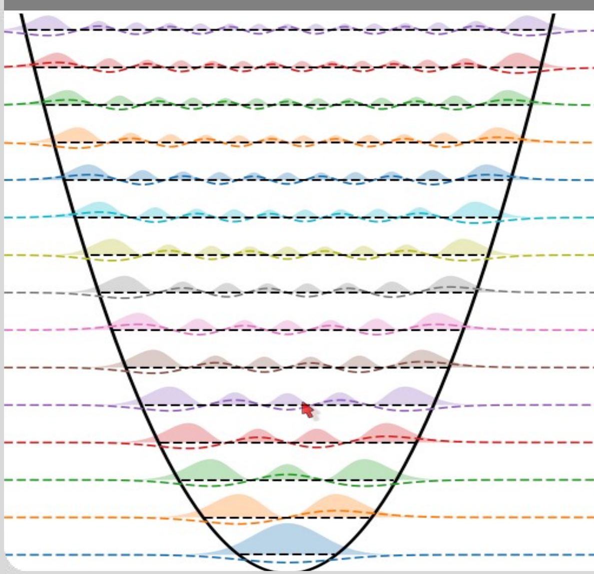
Vorlesung 21 Moderne Physik (L)

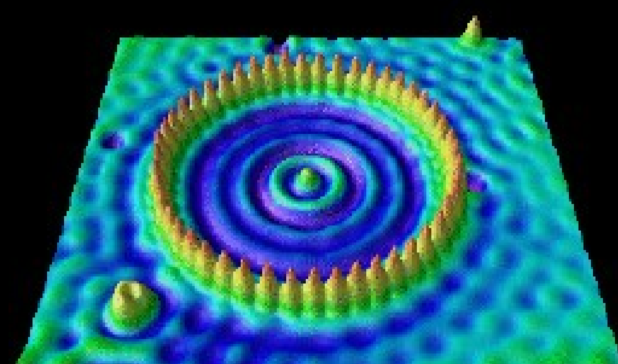
Experimentelle Methoden der Kernphysik

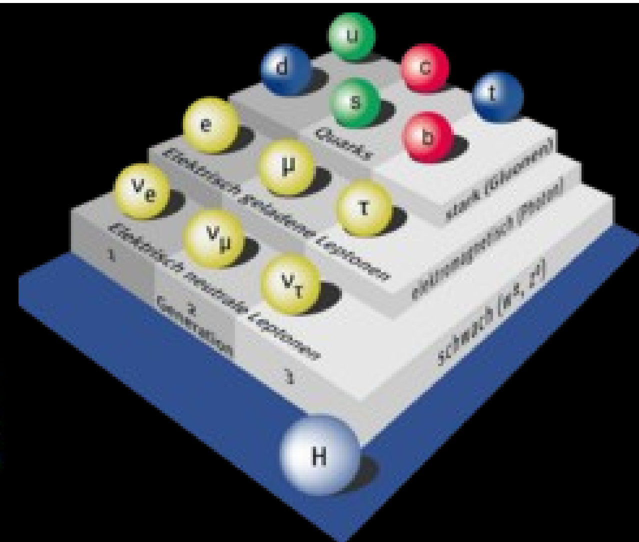
Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20







Vorlesungsevaluation

Vom 29. Juni bis 3. Juli können Sie an einer Online- Umfrage zur Vorlesung und zu den Übungen teilnehmen.

Dazu diese Links verwenden

Vorlesungsevaluation

Evaluation der Übungen für LA

oder

Evaluation der Übungen für Geo/Met

(die gleichen Links finden Sie auf der Ilias-Seite der Vorlesung)

Das Übungs-Team und ich bitten um rege Teilnahme !

Zusammenfassung Vorlesung 20

- Atomkern hat 10^{-15} des Volumens, aber fast die gesamte Masse des Atoms ($\frac{\sum m_e}{M_{Kern}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$)
- Kern besteht aus Z Protonen und N Neutronen
  - Proton: Ladung $+e$, Spin $\frac{1}{2}$
  - Neutron: Ladung 0, Spin $\frac{1}{2}$
- Bezeichnung: $\boxed{{}^{A}_{Z}X}$
  - $A = Z + N$
  - $A \propto R^3$ (Masse $\propto$ Radius^3 $\propto$ Volumen) $\Rightarrow$ Kernmaterie hat konstante Dichte
- Nicht alle Kerne sind stabil, Zerfall folgt „exponentiellem Zerfallsgesetz“ $\boxed{N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}$
  - N_0: Zahl der Kerne bei $t = 0$
  - τ: Lebensdauer
  - Halbwertszeit: $\boxed{N(t_{\frac{1}{2}}) = \frac{1}{2} N_0 \Rightarrow t_{\frac{1}{2}} = \tau \cdot \ln 2}$
  - Zerfallsrate: $\boxed{r(t) = \frac{-dN}{dt} = N_0 \cdot \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}}$

Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

1) Einführung
2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
3) Spezielle Relativitätstheorie
4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
5) Die Schrödingergleichung
6) Anwendungen der Schrödingergleichung
7) Das Wasserstoff-Atom
8) Atome mit mehreren Elektronen
9) Wechselwirkung von Licht und Materie
10) Grundlagen der Festkörperphysik
11) Kernphysik
12) Teilchenphysik
13) Astrophysik und Kosmologie

Anwendung: Radiokarbondatierung

Neutronen aus des kosmischen Höhenstrahlung wandeln mit konstanter Rate Stickstoff in Kohlenstoff um: $^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + p$

Durch **massenspektroskopische Bestimmung des ^{14}C-Anteils** oder **Messung der Zerfallsrate** kann das Alter von organischen Proben bestimmt werden.

Anwendung: Radiokarbondatierung

Neutronen aus des kosmischen Höhenstrahlung wandeln mit konstanter Rate Stickstoff in Kohlenstoff um: $^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + p$

– das Verhältnis der Anteile der Isotope ^{14}C und ^{12}C beträgt etwa $1.2 \cdot 10^{-12}$

– ^{14}C ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von $t_C = 5715 \pm 30$ Jahren:

$$^{14}C \rightarrow {}^{14}N + e^{-} + \bar{\nu}$$

Durch **massenspektroskopische Bestimmung des ^{14}C-Anteils** oder **Messung der Zerfallsrate** kann das Alter von organischen Proben bestimmt werden.

Anwendung: Radiokarbondatierung

Neutronen aus des kosmischen Höhenstrahlung wandeln mit konstanter Rate Stickstoff in Kohlenstoff um: $^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + p$

– das Verhältnis der Anteile der Isotope ^{14}C und ^{12}C beträgt etwa $1.2 \cdot 10^{-12}$

– ^{14}C ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von $t_C = 5715 \pm 30$ Jahren:

$$^{14}C \rightarrow {}^{14}N + e^- + \bar{\nu}$$

Über den Stoffwechsel nehmen Lebewesen Kohlenstoff auf und bauen ihn in organisches Material ein. Das Verhältnis der Anteile von ^{14}C und ^{12}C entspricht recht genau dem Verhältnis in Luft.

Durch **massenspektroskopische Bestimmung des ^{14}C-Anteils** oder **Messung der Zerfallsrate** kann das Alter von organischen Proben bestimmt werden.

Anwendung: Radiokarbondatierung

Neutronen aus des kosmischen Höhenstrahlung wandeln mit konstanter Rate Stickstoff in Kohlenstoff um: $^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + p$

– das Verhältnis der Anteile der Isotope ^{14}C und ^{12}C beträgt etwa $1.2 \cdot 10^{-12}$

– ^{14}C ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von $t_C = 5715 \pm 30$ Jahren:

$$^{14}C \rightarrow {}^{14}N + e^- + \bar{\nu}$$

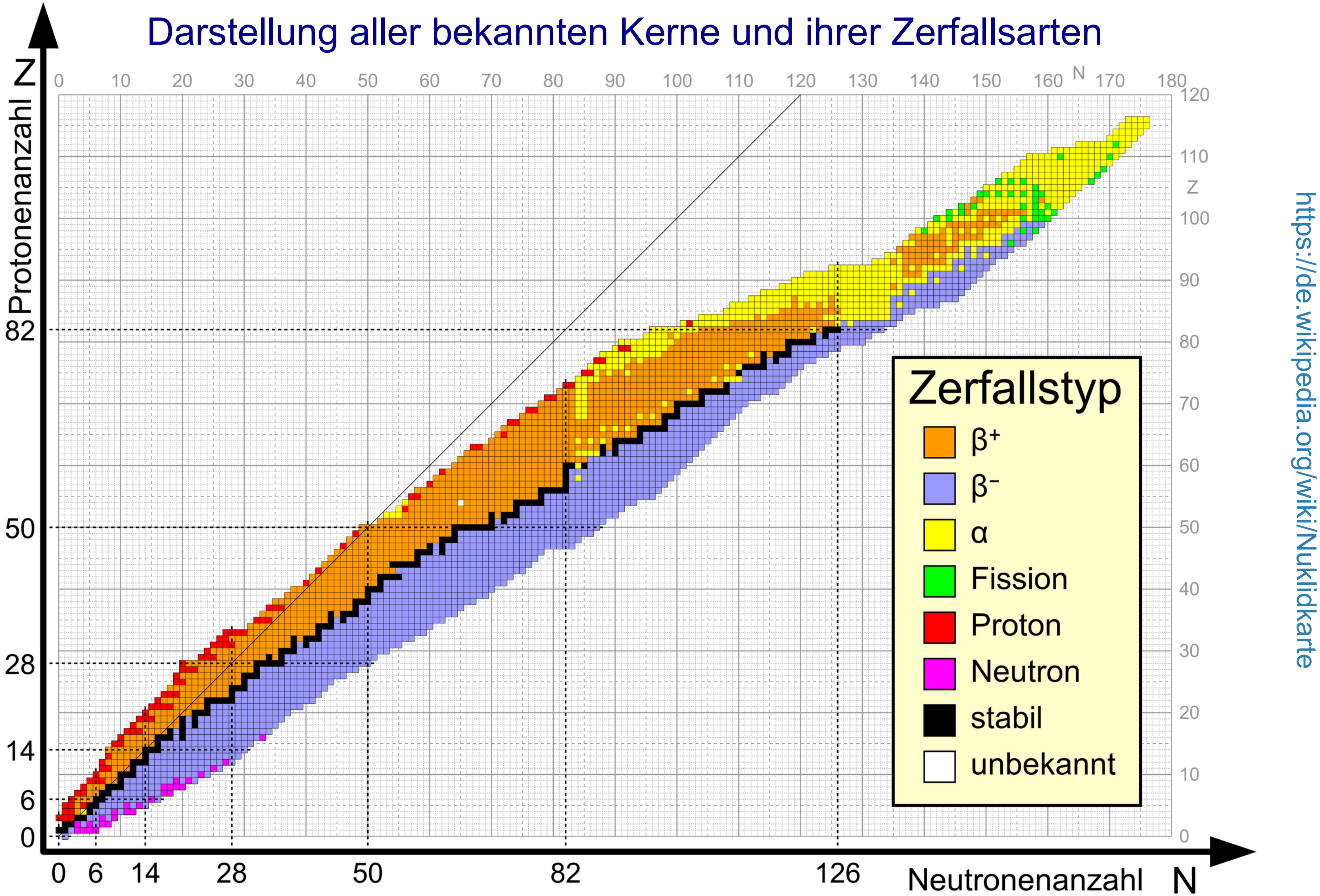
Über den Stoffwechsel nehmen Lebewesen Kohlenstoff auf und bauen ihn in organisches Material ein. Das Verhältnis der Anteile von ^{14}C und ^{12}C entspricht recht genau dem Verhältnis in Luft.

Wenn der Stoffwechsel endet, findet kein Austausch mehr statt; ^{14}C zerfällt und das Verhältnis ändert sich mit der Zeit:

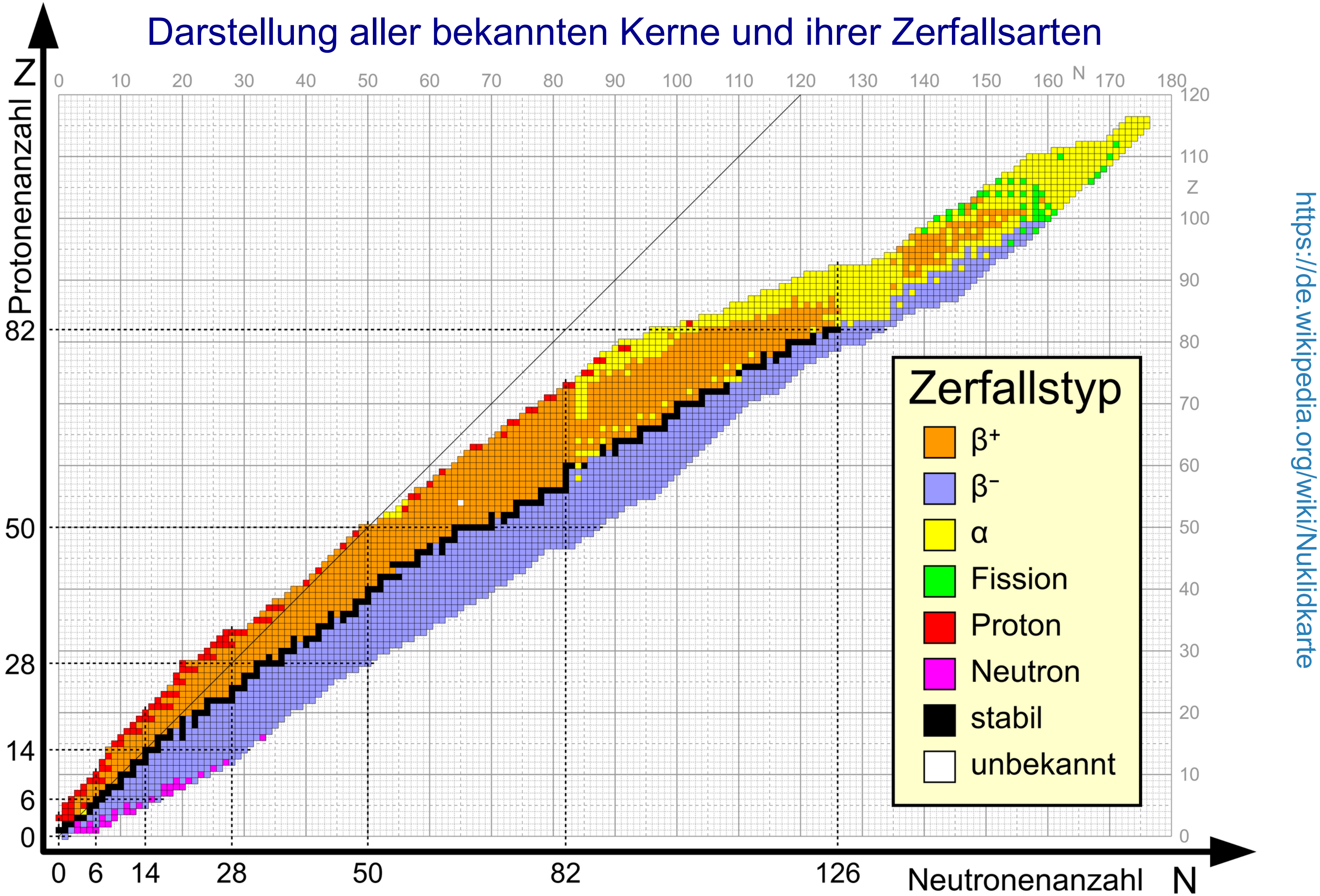
$$\frac{N(^{14}C)}{N(^{12}C)}(t) = \left(\frac{N(^{14}C)}{N(^{12}C)}\right)_{\mathrm{Luft}} \cdot \exp -t/\tau_C \quad \mathrm{mit}\ \tau_C = t_C/\ln 2$$

Durch **massenspektroskopische Bestimmung des ^{14}C-Anteils** oder **Messung der Zerfallsrate** kann das Alter von organischen Proben bestimmt werden.

Die Nuklidkarte



Die Nuklidkarte



- Mit wachsender Massenzahl Z+N werden Konfigurationen mit Neutron-Überschuss günstiger
- Zerfälle führen zum „Tal der Stabilität“ (die schwarze Linie)

Ausschnitte aus der Karlsruher Nuklidkarte

Die Nuklidkarte (berühmt: die **Karlsruher Nuklidkarte** aus der Zeit, als es noch das „Kernforschungszentrum Karlsruhe“ gab)
enthält noch viel mehr Information zu jedem Kern:

Be 9,01218 σ 0,0092	chemisches Symbol Masse in AME gemittelt über alle radioaktiven Isotope Einfangquerschnitt σ für Neutronen in barn = 10^{-28} m^2
H 2 0,015 σ 0,00053	rot: stabile Isotope Massenzahl A Isotopenhäufigkeit in % Einfangquerschnitt σ_n in barn
H 3 12,346 a β 0,02	weiß: instabile Isotope Massenzahl A mittlere Lebensdauer Energie der emittierten β, γ in MeV, n = Neutronenemitter p = Protonenemitter

↑ Z		N →	1	2	3	4	5	6	7	8
8				O 15,9994 σ 0,000270			O 13 8,9 ms β^+1,9 (p 1,44 6,44; 0,93 ...)	O 14 70,59 s β^+1,8; 4,1 γ 2313	O 15 2,03 m β^+ 1,7 n σ γ	O 16 99,756 σ 0,000178
7				N 14,0067 σ_{abs} 1,85			N 12 11,0 ms β^+16,4 γ 4439 (σ ~ 1,6; 2,8)	N 13 9,96 m β^+ 1,2 n σ γ	N 14 99,64 σ 0,075 $\sigma_{n,p}$ 1,81	N 15 0,36 σ 0,000024
6				C 12,011 σ_{abs} 0,0034	C 9 126,5 ms β 3,5 (p 8,24; 10,92)	C 10 19,3 s β^+ 1,9 γ 718, 1022	C 11 20,3 m β 1,0 n σ γ	C 12 98,89 σ 0,0034	C 13 1,11 σ 0,0009	C 14 5736 a β 0,2 n σ γ
5				B 10,81 σ_{abs} 759	B 8 762 ms β 14,1 (2σ~1,6..8,3)	B 9 p	B 10 20 σ 0,5 $\sigma_{n,p}$ 3836	B 11 80 σ 0,0005	B 12 20,3 ms β 13,4 γ 4439 (σ 0,2 ...)	B 13 17,33 ms β13,4 γ 3684 (σ 3,6; 2,4)
4	Be 9,01218 σ 0,0092				Be 7 53,4 d γ 478 $\sigma_{n,p}$ 48000	Be 8 2σ 0,05	Be 9 100 σ 0,0092	Be 10 1,6 ·10^6 a β 0,6 n σ γ	Be 11 13,8 s β11,5 γ 2125 6791 (σ)	Be 12 11,4 ms β 11,7 (σ)
3	Li 6,941 σ 70,7			Li 5 p	Li 6 7,5 σ 0,028 $\sigma_{n,p}$ 940	Li 7 92,5 σ 0,037	Li 8 844 ms β 12,5 (2n ~ 1,6)	Li 9 176 ms β 11,0; 13,5 (n 0,7 ...)		Li 11 9,7 ms β ~ 18 (n)
2	He 4,00260 σ_{abs} < 0,05		He 3 0,00013 σ 0,00006 $\sigma_{n,p}$ 5327	He 4 99,99987 σ 0	He 5 n	He 6 802 ms β 3,5	He 7 n	He 8 122 ms βγ ~ 10 γ 981 (n)		
1	H 1,0079 σ 0,332	H 1 99,985 σ 0,332	H 2 0,015 σ 0,00053	H 3 12,346 a β 0,02						

insg. >4000 Nuklide enthalten

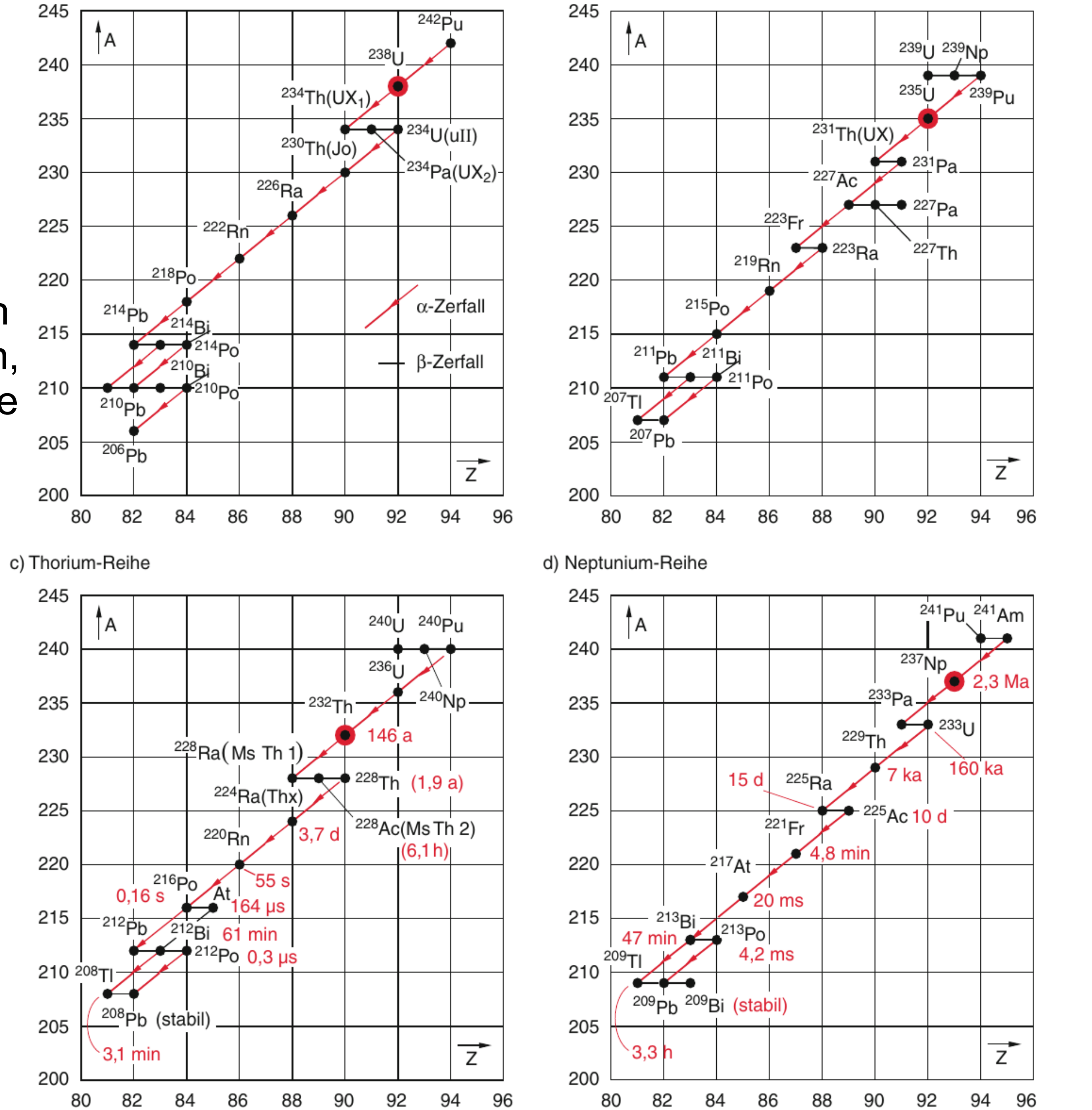
Nachdruck aus Karlsruher Nuklidkarte, Demtröder, Physik 4

Zerfallsreihen

Schwere Kerne zerfallen sukzessive in leichtere Kerne;

es entstehen sog. **Zerfallsreihen**, die ihren Ausgang bei langlebigen, Isotopen in der Erdkruste haben. Die Reihen sind nach den häufigsten Isotopen benannt:

^{238}U (a)
^{235}U (b)
^{232}Th (c)
^{237}Np (d)



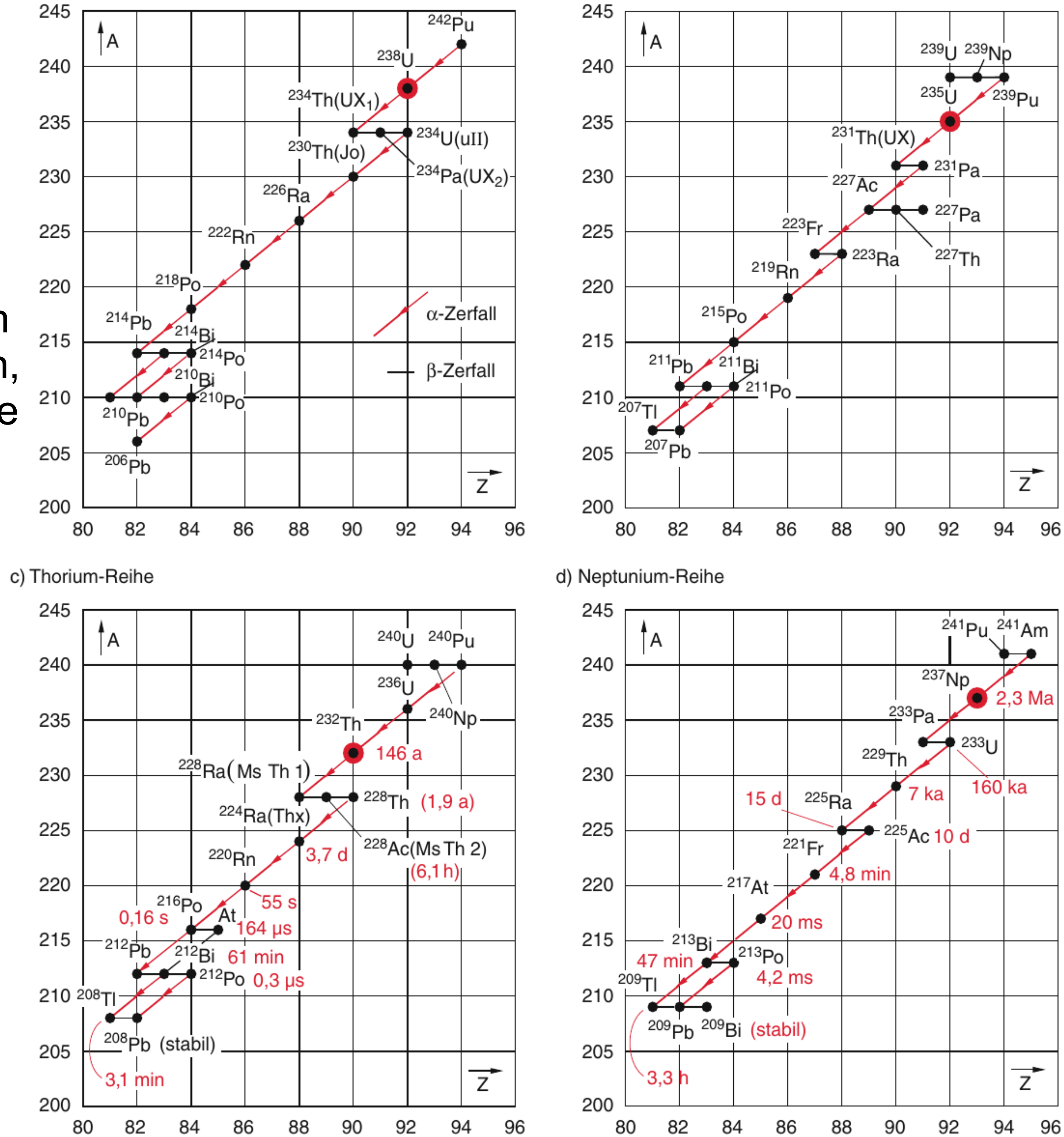
Zerfallsreihen

Schwere Kerne zerfallen sukzessive in leichtere Kerne;

es entstehen sog. **Zerfallsreihen**, die ihren Ausgang bei langlebigen, Isotopen in der Erdkruste haben. Die Reihen sind nach den häufigsten Isotopen benannt:

^{238}**U** (a)
^{235}**U** (b)
^{232}**Th** (c)
^{237}**Np** (d)

→ Verwendung zur **Altersbestimmung** von Gesteinen



Zerfallsreihen: aktuelles Forschungsergebnis

Die in den Zerfallsreihen auftretenden Neutrinos aus β-Zerfällen mit E_ν >1.8 MeV können in modernen (großen) Detektoren nachgewiesen werden:

Reaktion $\nu + p \rightarrow n + e^+$, dann Reaktionen mit Detektormaterial

– $e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma$

– $n + p \rightarrow {}^2\mathrm{H} + \gamma$

$\longrightarrow$ klare Signatur mit kurz nacheinander eintreffenden γ-Signalen

Zerfallsreihen: aktuelles Forschungsergebnis

Die in den Zerfallsreihen auftretenden Neutrinos aus β-Zerfällen mit E_ν >1.8 MeV können in modernen (großen) Detektoren nachgewiesen werden:

Reaktion $\nu + p \rightarrow n + e^+$, dann Reaktionen mit Detektormaterial

– $e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma$

– $n + p \rightarrow {}^2\mathrm{H} + \gamma$

⟶ klare Signatur mit kurz nacheinander eintreffenden γ-Signalen

Im Januar 2020 berichtete das **Borexino-Experiment** nach fast 10 Jahren Datennahme über die Beobachtung von **53 „Geoneutrinos“ aus der ^{238}U- und ^{232}Th - Reihe**

Zerfallsreihen: aktuelles Forschungsergebnis

Die in den Zerfallsreihen auftretenden Neutrinos aus β-Zerfällen mit E_ν >1.8 MeV können in modernen (großen) Detektoren nachgewiesen werden:

Reaktion $\nu + p \rightarrow n + e^+$, dann Reaktionen mit Detektormaterial

– $e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma$

– $n + p \rightarrow {}^2\mathrm{H} + \gamma$

$\longrightarrow$ klare Signatur mit kurz nacheinander eintreffenden γ-Signalen

Im Januar 2020 berichtete das **Borexino-Experiment** nach fast 10 Jahren Datennahme über die Beobachtung von **53 „Geoneutrinos“ aus der ^{238}U- und ^{232}Th - Reihe**

Die Neutrino-Reaktionen im Detektor sind extrem selten

$\rightarrow$ **es muss eine große Menge Material beitragen**

Die in den Zerfallsreihen auftretenden Neutrinos aus β-Zerfällen mit E_ν >1.8 MeV können in modernen (großen) Detektoren nachgewiesen werden:

Reaktion $\nu + p \rightarrow n + e^+$, dann Reaktionen mit Detektormaterial

– $e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma$

– $n + p \rightarrow {}^2\mathrm{H} + \gamma$

$\longrightarrow$ klare Signatur mit kurz nacheinander eintreffenden γ-Signalen

Im Januar 2020 berichtete das **Borexino-Experiment** nach fast 10 Jahren Datennahme über die Beobachtung von **53 „Geoneutrinos" aus der ^{238}U- und ^{232}Th - Reihe**

Die Neutrino-Reaktionen im Detektor sind extrem selten

$\rightarrow$ **es muss eine große Menge Material beitragen**

Abschätzung der durch

Radioaktivität in der Erde erzeugten Leistung: $38^{+14}_{-13}\,\mathrm{TW}$

Zerfallsreihen: aktuelles Forschungsergebnis

Die in den Zerfallsreihen auftretenden Neutrinos aus β-Zerfällen mit E_ν >1.8 MeV können in modernen (großen) Detektoren nachgewiesen werden:

Reaktion $\nu + p \rightarrow n + e^+$, dann Reaktionen mit Detektormaterial

– $e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma$

– $n + p \rightarrow {}^2\mathrm{H} + \gamma$

$\longrightarrow$ klare Signatur mit kurz nacheinander eintreffenden γ-Signalen

Im Januar 2020 berichtete das **Borexino-Experiment** nach fast 10 Jahren Datennahme über die Beobachtung von **53 „Geoneutrinos“ aus der ^{238}U- und ^{232}Th - Reihe**

Die Neutrino-Reaktionen im Detektor sind extrem selten

$\rightarrow$ **es muss eine große Menge Material beitragen**

Abschätzung der durch **Radioaktivität in der Erde erzeugten Leistung:** $38^{+14}_{-13}\,\mathrm{TW}$

Radioaktive Prozesse stellen damit einen erheblichen Beitrag zur Energie, die Plattentektonik, Vulkanismus, Erdbeben und das Erdmagnetfeld antreibt !

Beispiel: Alter der Erde

- Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung von Gesteinen

$$^{238}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=4.5\cdot 10^9 a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$$

Beispiel: Alter der Erde

- Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung von Gesteinen

$$^{238}\mathrm{U} \quad \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=4.5\cdot 10^9\, a} \quad \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$$

Alter aus $\dfrac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}$ massenspektroskopische Bestimmung

Beispiel: Alter der Erde

- Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung von Gesteinen

$$^{238}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=4.5\cdot 10^9 a} \ldots \, ^{206}\mathrm{Pb}$$

Alter aus $\dfrac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}$ massenspektroskopische Bestimmung

Voraussetzung: beim Aufschmelzen des Gesteins wurden U und Pb getrennt („Nullsetzen der nuklearen Uhr“)

$$\rightarrow \quad N_{\mathrm{U}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 \exp -\frac{t}{\tau} \qquad N_{\mathrm{Pb}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 - N_{\mathrm{U}}(t)$$

Beispiel: Alter der Erde

- Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung von Gesteinen

$$^{238}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=4.5\cdot 10^9\, a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$$

Alter aus $\dfrac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}$ massenspektroskopische Bestimmung

Voraussetzung: beim Aufschmelzen des Gesteins wurden U und Pb getrennt („Nullsetzen der nuklearen Uhr“)

$$\rightarrow\ N_{\mathrm{U}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 \exp - \frac{t}{\tau} \qquad N_{\mathrm{Pb}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 - N_{\mathrm{U}}(t)$$

$$\Rightarrow t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(1 + \frac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}\right) \quad \text{mit } \tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

Beispiel: Alter der Erde

- Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung von Gesteinen

$$^{238}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=4.5\cdot 10^9 a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$$

Alter aus $\frac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}$ massenspektroskopische Bestimmung

Voraussetzung: beim Aufschmelzen des Gesteins wurden U und Pb getrennt („Nullsetzen der nuklearen Uhr")

$$\rightarrow\ N_{\mathrm{U}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 \exp -\frac{t}{\tau} \qquad N_{\mathrm{Pb}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 - N_{\mathrm{U}}(t)$$

$$\Rightarrow t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(1 + \frac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}\right) \quad \text{mit } \tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

- **alternativ:** $^{235}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=7.1\cdot 10^8 a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$ liefert Überprüfung

Beispiel: Alter der Erde

- Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung von Gesteinen

$$^{238}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=4.5\cdot 10^9\,a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$$

Alter aus $\dfrac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}$ massenspektroskopische Bestimmung

Voraussetzung: beim Aufschmelzen des Gesteins wurden U und Pb getrennt („Nullsetzen der nuklearen Uhr“)

$$\rightarrow\ N_{\mathrm{U}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 \exp -\frac{t}{\tau} \qquad N_{\mathrm{Pb}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 - N_{\mathrm{U}}(t)$$

$$\Rightarrow t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(1 + \frac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}\right) \quad \text{mit } \tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

- **alternativ:** $^{235}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=7.1\cdot 10^8\,a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$ liefert Überprüfung

- **Kalium-Argon-Methode:** $^{40}\mathrm{K} \underbrace{\xrightarrow{11\%}}_{t_{1/2}=1.28\cdot 10^9\,a} \ldots\ ^{40}\mathrm{Ar}$

Beispiel: Alter der Erde

- Uran-Blei-Methode zur Altersbestimmung von Gesteinen

$$^{238}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=4.5\cdot 10^9 a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$$

Alter aus $\frac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}$ massenspektroskopische Bestimmung

Voraussetzung: beim Aufschmelzen des Gesteins wurden U und Pb getrennt („Nullsetzen der nuklearen Uhr")

$$\rightarrow\ N_{\mathrm{U}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 \exp -\frac{t}{\tau} \qquad N_{\mathrm{Pb}}(t) = N_{\mathrm{U}}^0 - N_{\mathrm{U}}(t)$$

$$\Rightarrow t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(1 + \frac{N_{\mathrm{Pb}}(t)}{N_{\mathrm{U}}(t)}\right) \quad \mathrm{mit}\ \tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

- **alternativ:** $^{235}\mathrm{U} \underbrace{\rightarrow}_{t_{1/2}=7.1\cdot 10^8 a} \ldots\ ^{206}\mathrm{Pb}$ liefert Überprüfung

- **Kalium-Argon-Methode:** $^{40}\mathrm{K} \underbrace{\xrightarrow{11\%}}_{t_{1/2}=1.28\cdot 10^9 a} \ldots\ ^{40}\mathrm{Ar}$

$\longrightarrow$ **Alter der Erde 4.7 Milliarden Jahre !**

11.6 Messmethoden 2

Zum weiteren Verständnis der „Kernmaterie“
brauchen wir noch mehr Information:

Was ist die Struktur der Kernmaterie ?

1. Größe, d.h. Volumen von Kernen
2. die genauen Massen von Kernen

Wie stark sind Nukleonen im Kern gebunden ?

3. Bindungsenergien verschiedener Kerne

Zum weiteren Verständnis der „Kernmaterie“ brauchen wir noch mehr Information:

Was ist die Struktur der Kernmaterie ?

1. Größe, d.h. Volumen von Kernen
2. die genauen Massen von Kernen

Wie stark sind Nukleonen im Kern gebunden ?

3. Bindungsenergien verschiedener Kerne

Weil die Bindungsenergien sehr groß (einige %) im Vergleich zur Kernmasse sind, reicht hier die Antwort auf die 2. Frage:

$$E_b({}^A_Z X) = \underbrace{\left(N \cdot m_n + Z \cdot m_p - m_{{}^A_Z X}\right)}_{\textbf{Massendefekt}} \cdot c^2$$

Zum weiteren Verständnis der „Kernmaterie“
brauchen wir noch mehr Information:

Was ist die Struktur der Kernmaterie ?

1. Größe, d.h. Volumen von Kernen
2. die genauen Massen von Kernen

Wie stark sind Nukleonen im Kern gebunden ?

3. Bindungsenergien verschiedener Kerne

Weil die Bindungsenergien sehr groß (einige %) im Vergleich zur Kernmasse sind, reicht hier die Antwort auf die 2. Frage:

$$E_b({}^A_Z X) = \underbrace{\left(N \cdot m_n + Z \cdot m_p - m_{{}^A_Z X}\right)}_{\textbf{Massendefekt}} \cdot c^2$$

Zwei wichtige Messverfahren zur

Messung von Kernmassen und Massendefekt: **Massenspektrometer**

Messung der Kerngröße: **Streuexperiment**

Prinzip: analog e/m – Bestimmung eines Elektronenstrahls

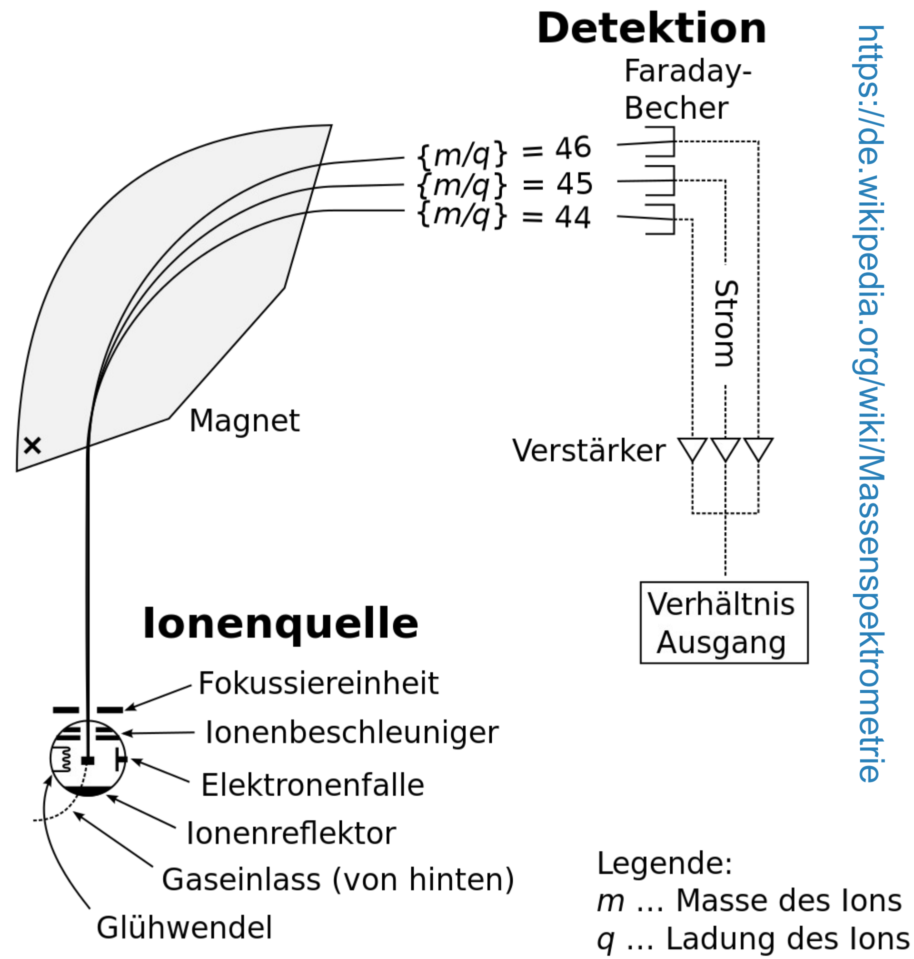
Ionisieren einer Probe

Beschleunigung in elektrischem Feld

Ablenkung in Magnetfeld

→ Ablenkwinkel (bzw. Auftreffort)

hängt vom **Verhältnis *Ze/m*** ab.



https://de.wikipedia.org/wiki/Massenspektrometrie

Messverfahren 2: Massenspektrometer

Prinzip: analog e/m – Bestimmung eines Elektronenstrahls

Ionisieren einer Probe

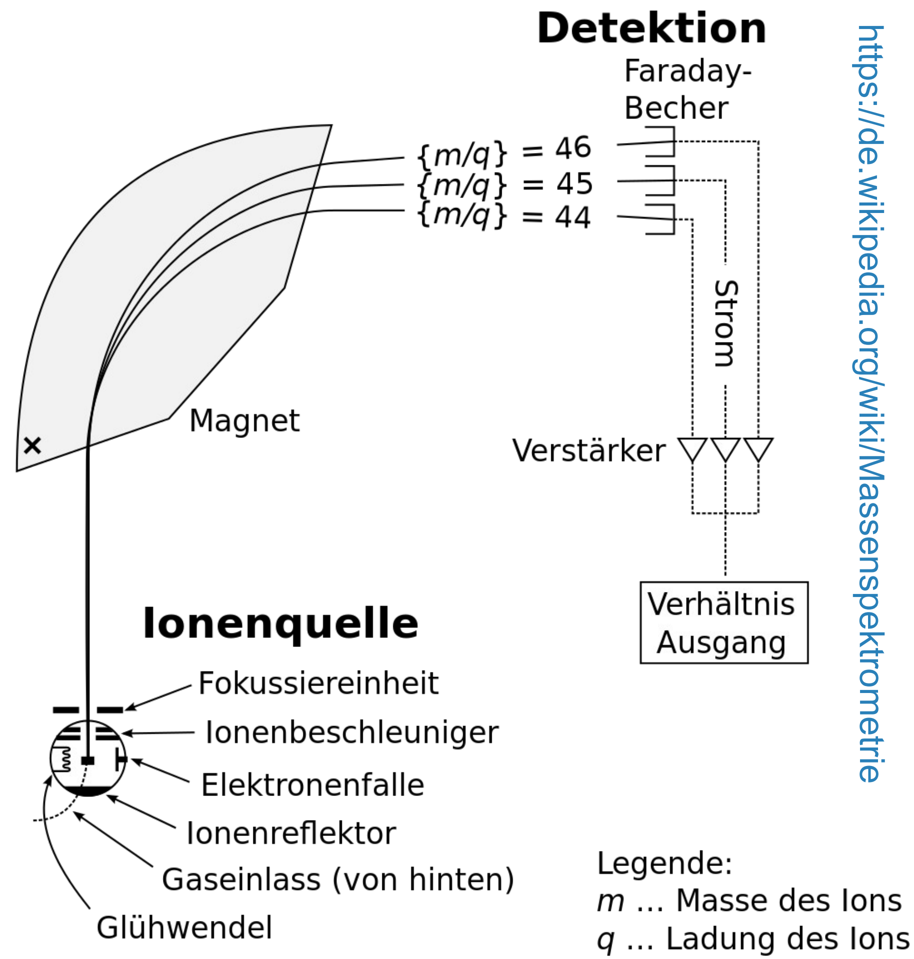
Beschleunigung in elektrischem Feld

Ablenkung in Magnetfeld

→ Ablenkwinkel (bzw. Auftreffort)

hängt vom **Verhältnis *Ze/m*** ab.

es gibt auch andere Verfahren:
- Flugzeitmessung,
- elektrische Quadrupol-Wechselfelder,
- Ionenfalle …



https://de.wikipedia.org/wiki/Massenspektrometrie

Messverfahren 2: Massenspektrometer

Prinzip: analog e/m – Bestimmung eines Elektronenstrahls

Ionisieren einer Probe

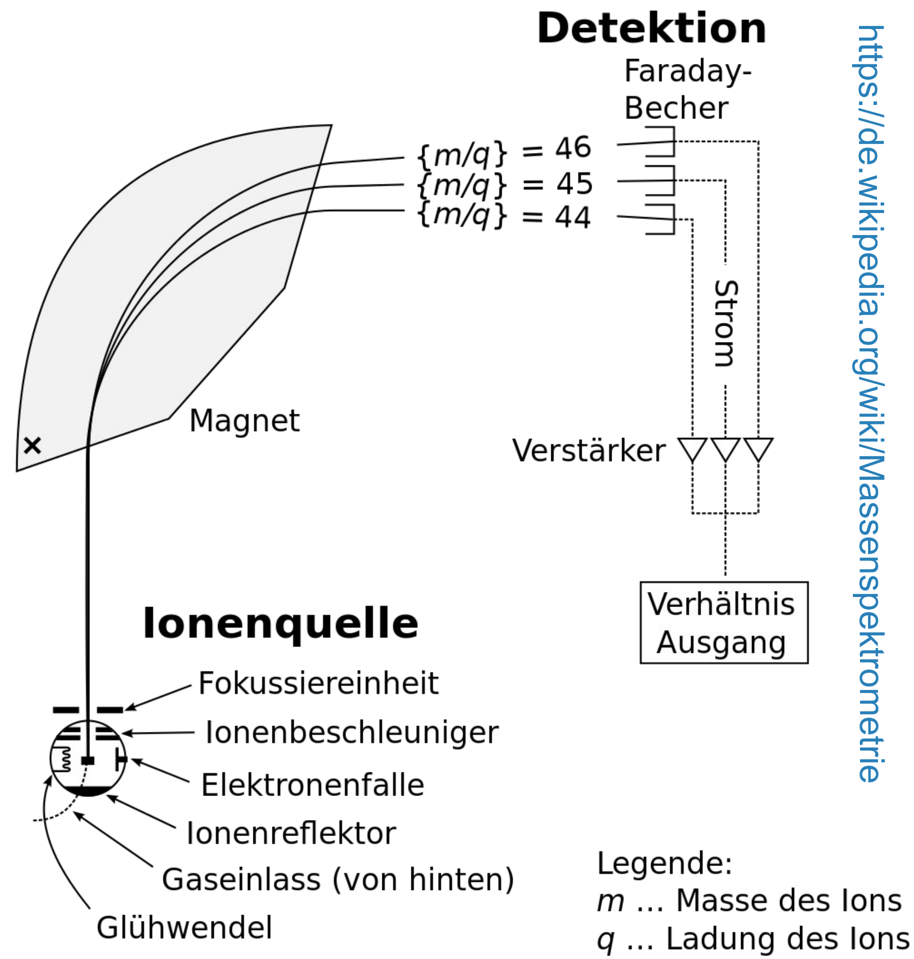
Beschleunigung in elektrischem Feld

Ablenkung in Magnetfeld

→ Ablenkwinkel (bzw. Auftreffort)

hängt vom **Verhältnis *Ze/m*** ab.

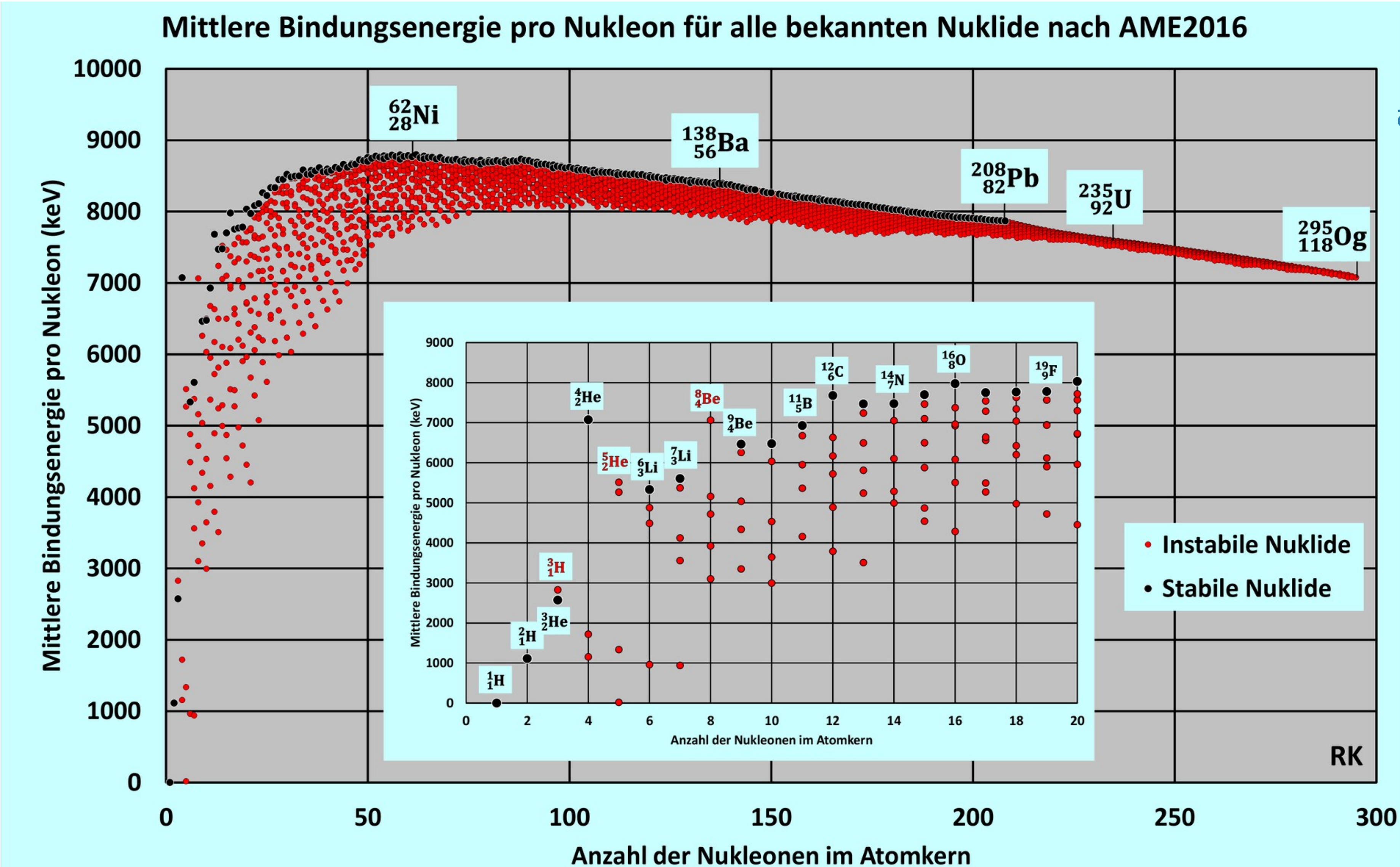
es gibt auch andere Verfahren:
- Flugzeitmessung,
- elektrische Quadrupol-Wechselfelder,
- Ionenfalle …



https://de.wikipedia.org/wiki/Massenspektrometrie

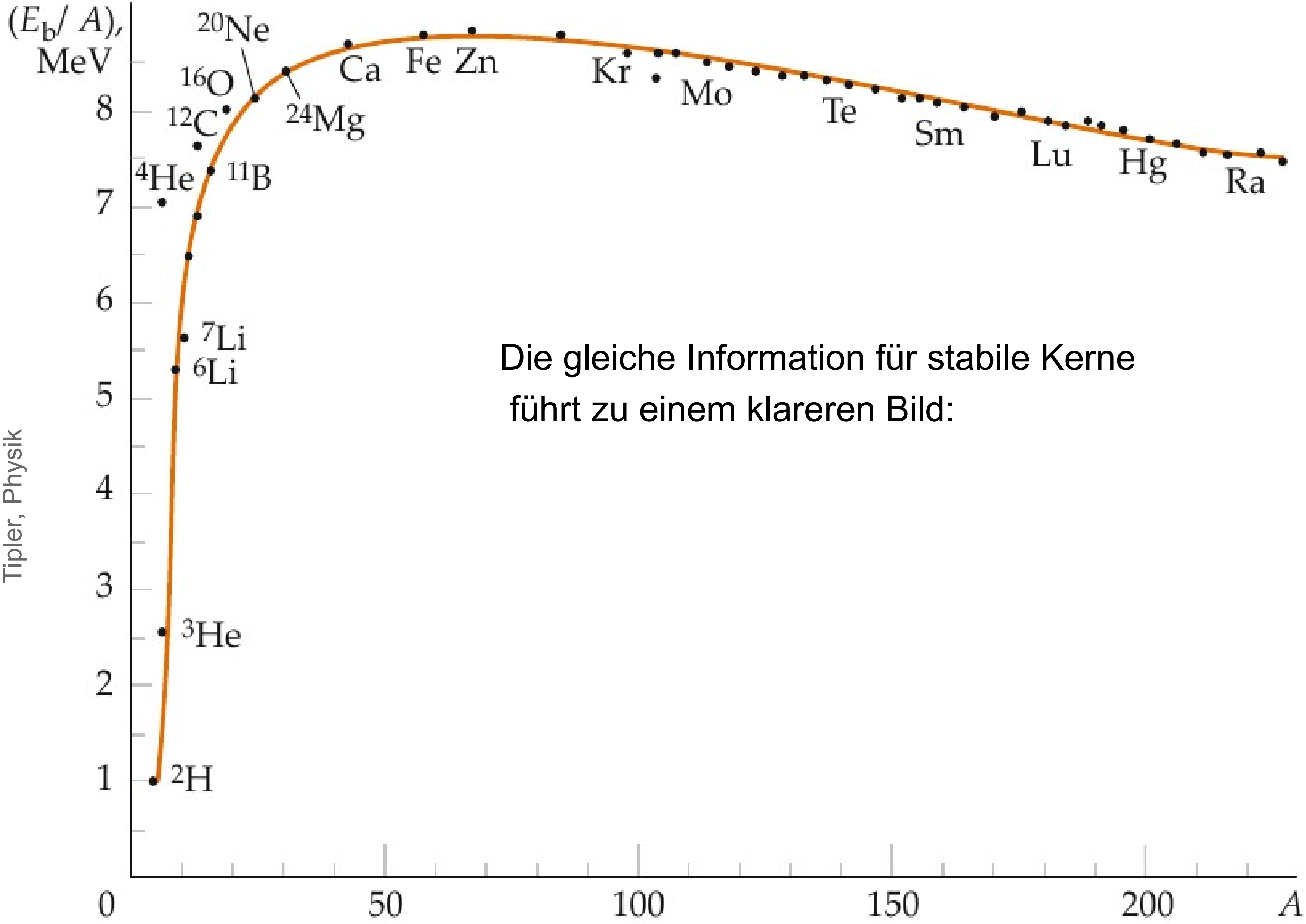
Heute routinemäßig eingesetzt zur **Bestimmung der Isotopenzusammensetzung von Proben**

Bindungsenergie von Kernen (aus Massendefekt)



https://de.wikipedia.org/wiki/Bindungsenergie

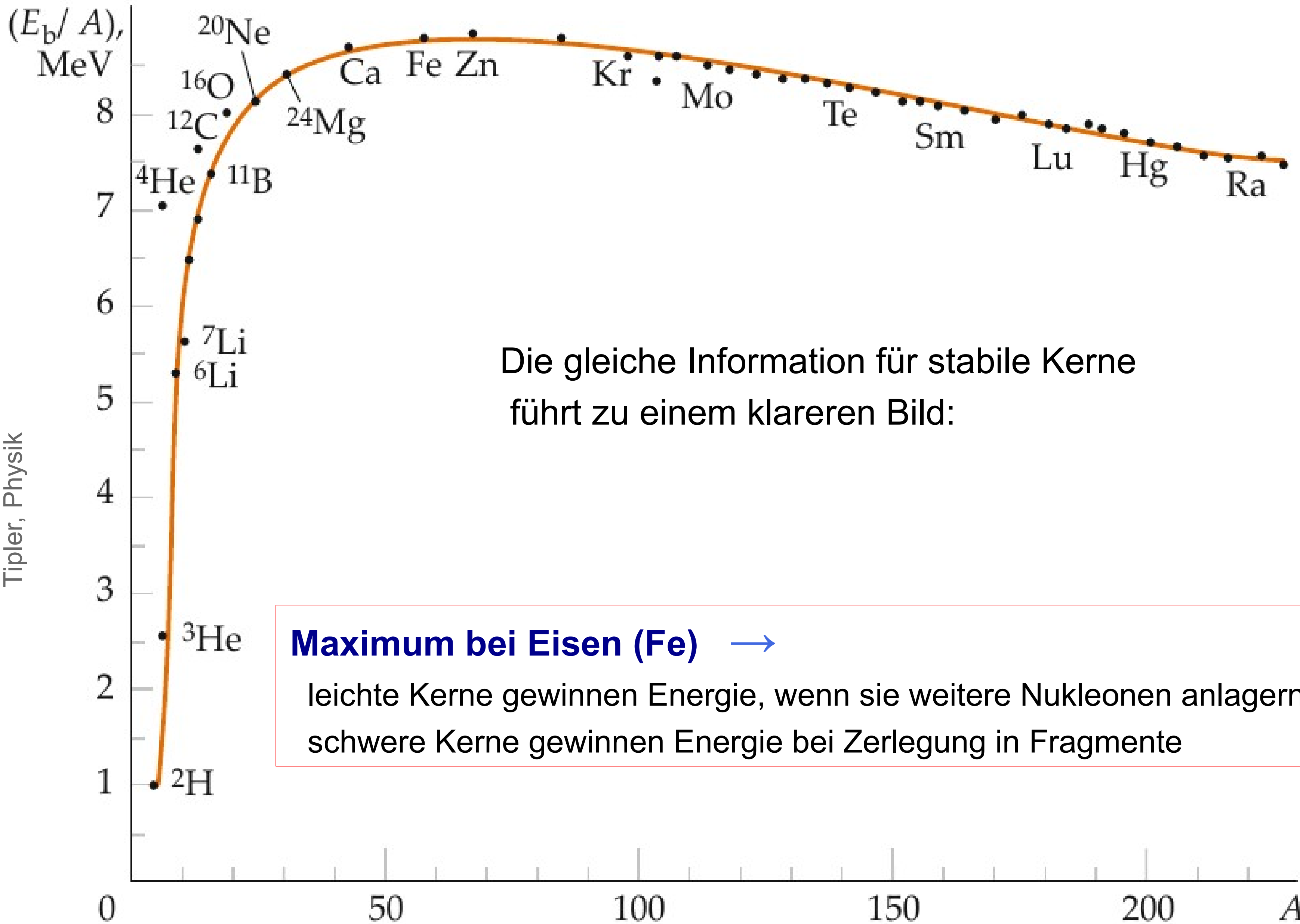
Bindungsenergien (2)



Tipler, Physik

Die gleiche Information für stabile Kerne führt zu einem klareren Bild:

Bindungsenergien (2)



Tipler, Physik

Die gleiche Information für stabile Kerne führt zu einem klareren Bild:

Maximum bei Eisen (Fe) →

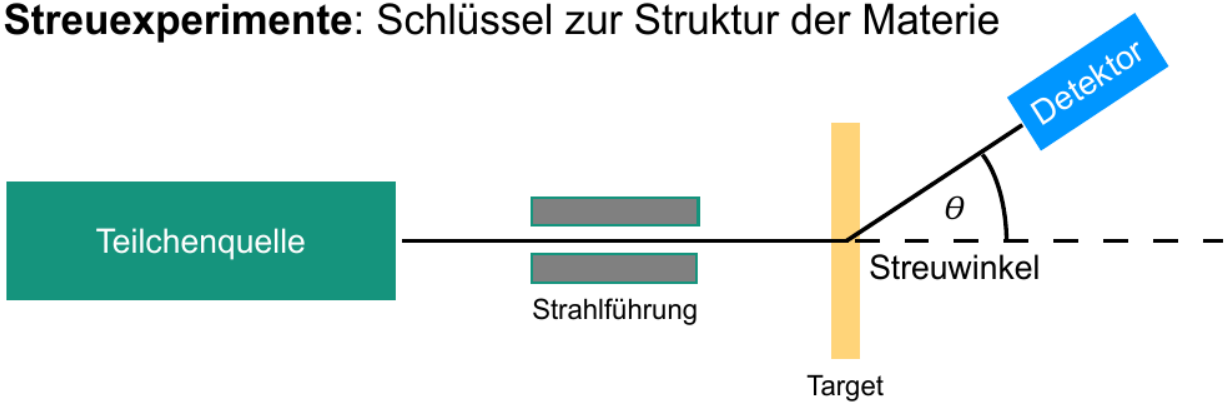
leichte Kerne gewinnen Energie, wenn sie weitere Nukleonen anlagern
schwere Kerne gewinnen Energie bei Zerlegung in Fragmente

Pause

und Zeit für Fragen ?

Messverfahren 2: Streuexperiment

Streuexperimente: Schlüssel zur Struktur der Materie



Prinzip:

Teilchenstrahl

mit Wellenlänge im Bereich der aufzulösenden Struktur

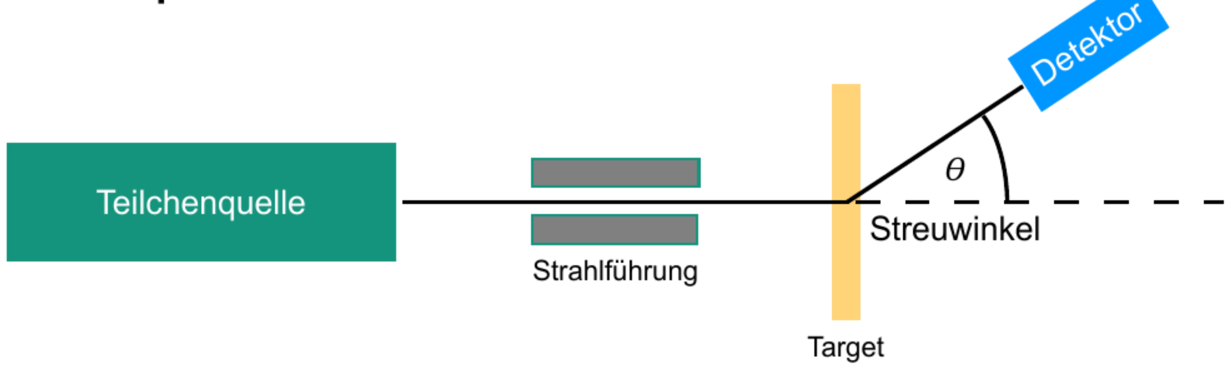
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar c}{pc} = \frac{2\pi\,197\,\mathrm{MeV\,f}}{pc} \simeq \frac{1\,\mathrm{GeV\,f}}{pc}$$

triff auf eine Anzahl **Target-Teilchen**

und **wird** daran **gestreut**.

Messverfahren 2: Streuexperiment

Streuexperimente: Schlüssel zur Struktur der Materie



Prinzip:

Teilchenstrahl

mit Wellenlänge im Bereich der aufzulösenden Struktur

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar c}{pc} = \frac{2\pi\,197\,\mathrm{MeV\,f}}{pc} \simeq \frac{1\,\mathrm{GeV\,f}}{pc}$$

triff auf eine Anzahl **Target-Teilchen**

und **wird** daran **gestreut**.

Die in verschiedene Richtungen gestreuten Teilchen werden gezählt

$\longrightarrow$ **differentieller Wirkungsquerschnitt**

Erzeugung von Teilchenstrahung

Lorentzkraft: $$\vec{F}_\mathrm{L} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- **Beschleunigung** geladener Teilchen durch elektrische Felder
- **Ablenkung** geladener Teilchen durch Magnetfelder

Erzeugung von Teilchenstrahung

Lorentzkraft: $$\vec{F}_\mathrm{L} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- **Beschleunigung** geladener Teilchen durch elektrische Felder
- **Ablenkung** geladener Teilchen durch Magnetfelder

Energiegewinn nur durch elektrische Felder :

$$\Delta E = \int_{s_0}^{s_0+d} \vec{F}_\mathrm{L} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = q \int_{s_0}^{s_0+d} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = qU$$

Beschleunigungsspannung von 1 V entspricht einem Energeigewinn von 1 eV

Erzeugung von Teilchenstrahung

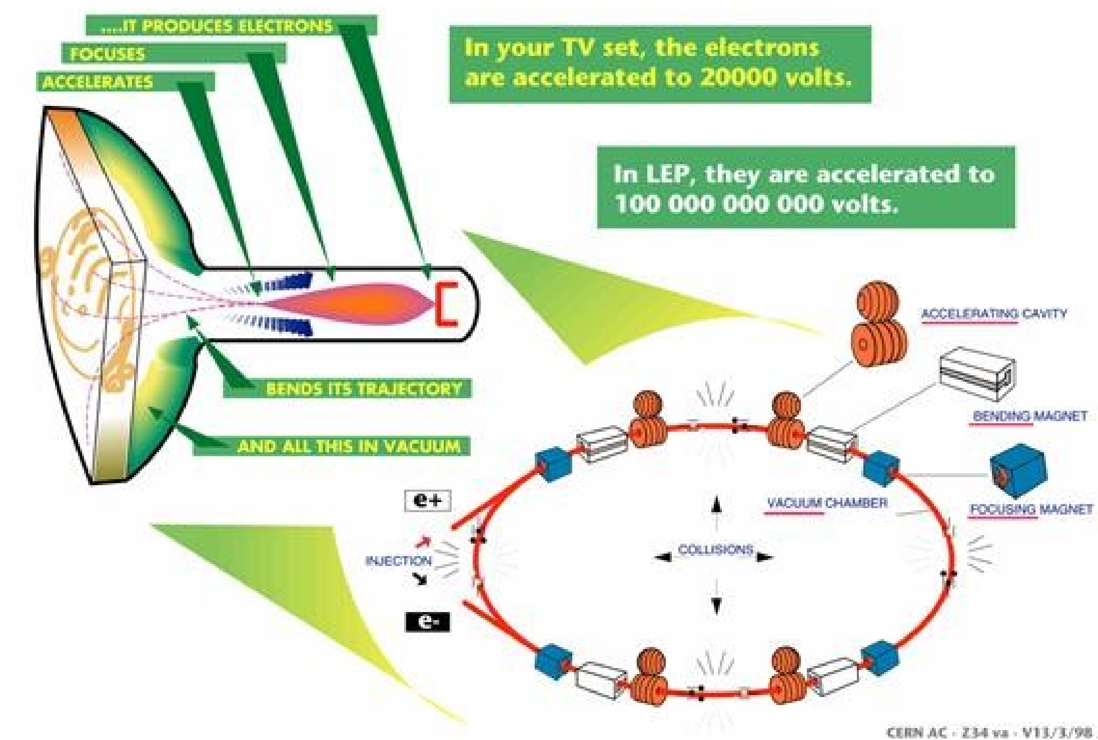
Lorentzkraft: $$\vec{F}_\mathrm{L} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- **Beschleunigung** geladener Teilchen durch elektrische Felder
- **Ablenkung** geladener Teilchen durch Magnetfelder

Energiegewinn nur durch elektrische Felder :

$$\Delta E = \int_{s_0}^{s_0+d} \vec{F}_\mathrm{L} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = q \int_{s_0}^{s_0+d} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = qU$$

Beschleunigungsspannung von 1 V entspricht einem Energeigewinn von 1 eV

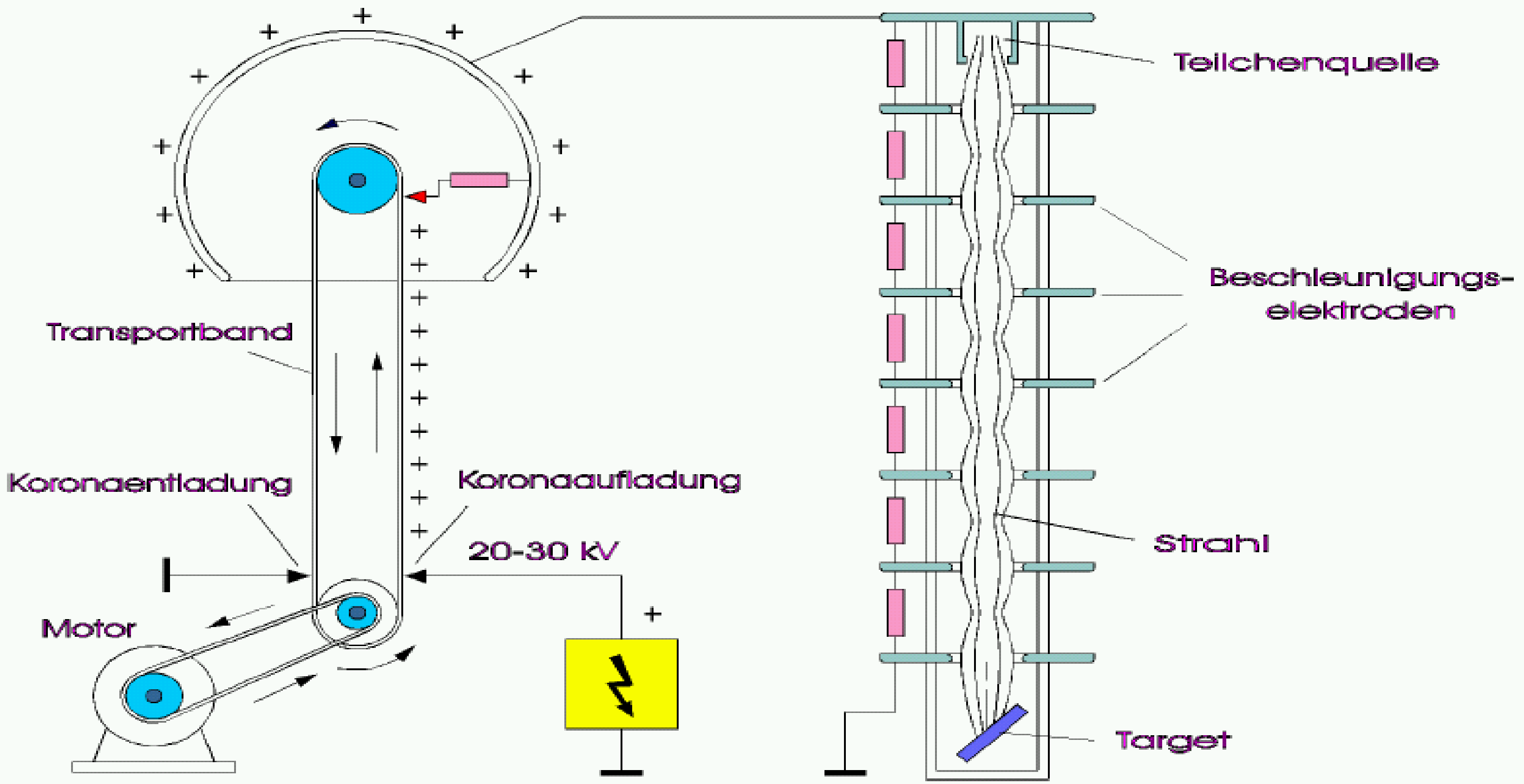


Ein Beschleuniger nutzt elektrische und magnetische Felder, um stabile, geladene Teilchen zu beschleunigen, zu speichern und zu fokussieren.

http://cds.cern.ch/record/39726

Der Van de Graaff-Beschleuniger

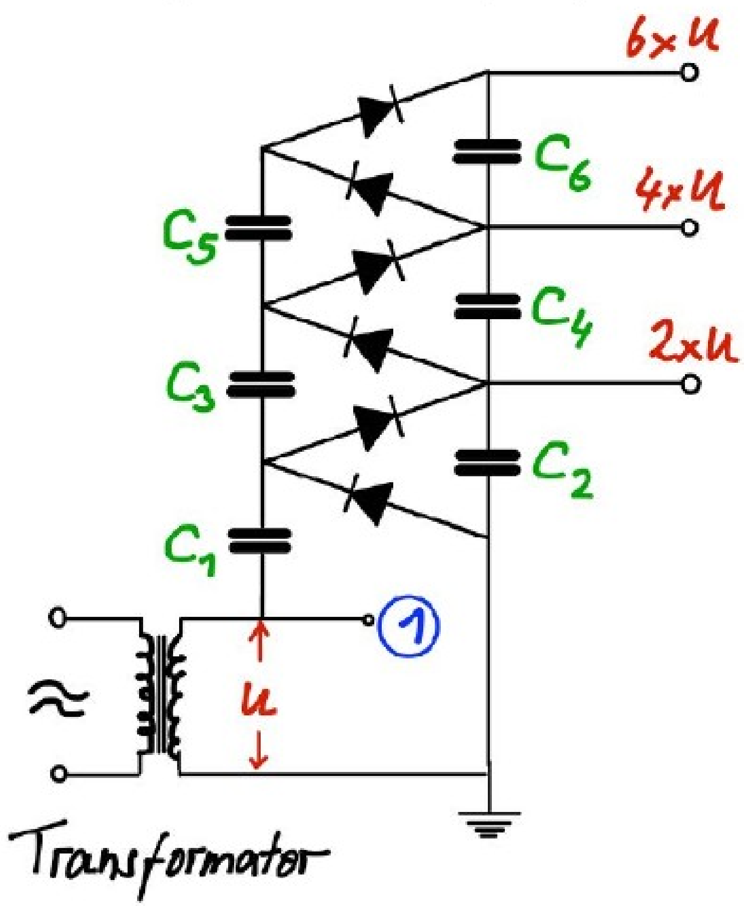
1930 begann Van de Graaff mit der Entwicklung eines Hochspannungsgenerators.



Erzeugung von Teilchenstrahlung

Historisch: elektrostatische Beschleuniger

In den 1930ger Jahren: bis zu 4 MeV, Pulse von 100 mA und ~1µs Dauer



source: lecture on Accelerator Physics by Anke-Susanne Müller

Grenzen elektrostatischer Beschleuniger

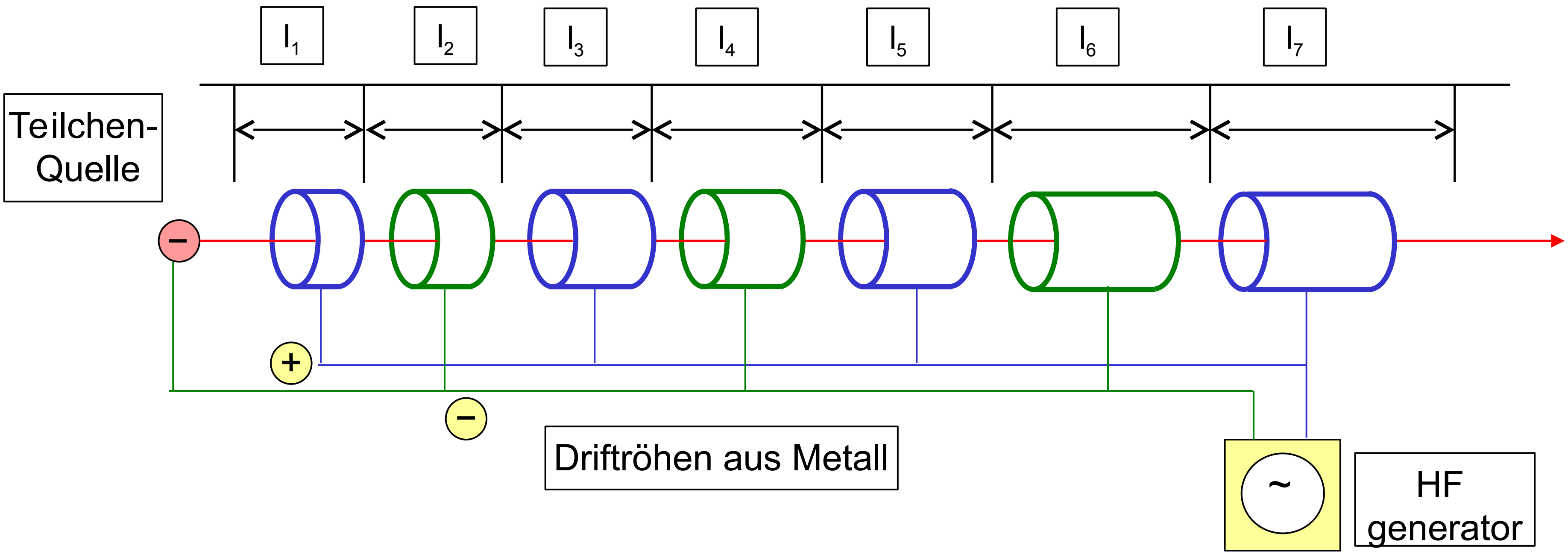
Die Grenze von Hochspannungsanlagen liegt bei einigen Millionen Volt.
Die Anlagen werden für höhere Energie immer aufwendendiger,
und bei höherer Spannung kommt es zu Funkenüberschlägen.

Vorschlag von **Ising 1924 :**
schnell wechselnde **Hochfrequenzspannung** statt Gleichspannung
zur Beschleunigung benutzen.

Wideröe 1928 testet erfolgreich den ersten Linearbeschleuniger,
der auf diesem Prinzip beruht.

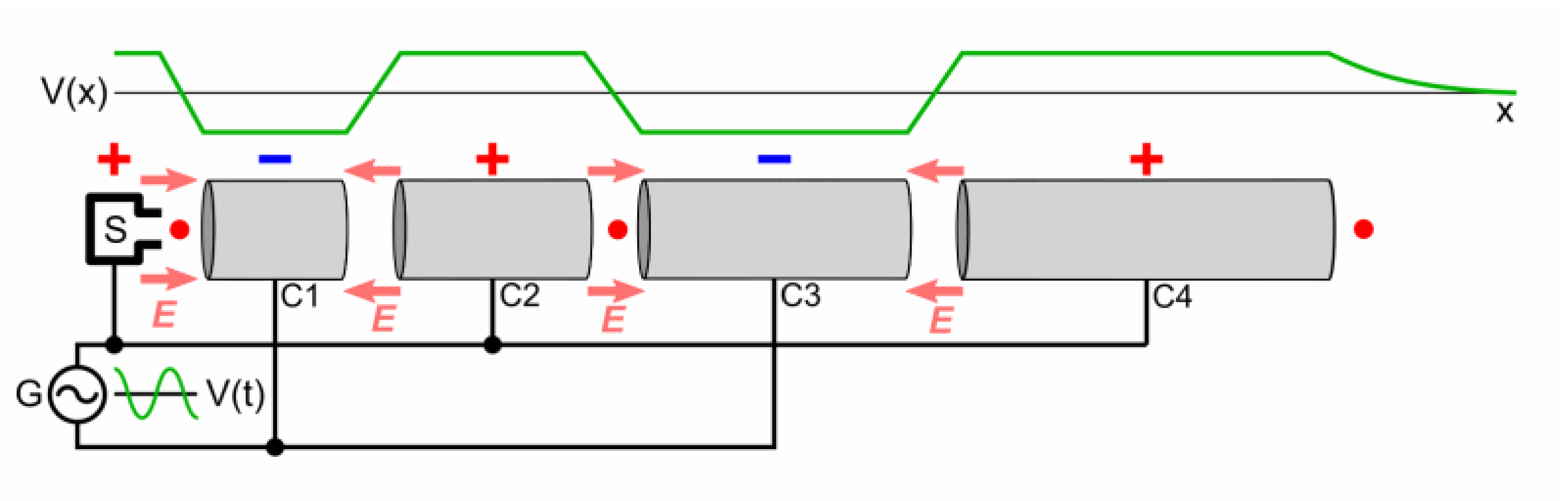
Linearbeschleuniger

… die erste Stufe jedes modernen Beschleunigers



- Teilchen von der Quelle werden im Potential der ersten Driftröhre beschleunigt
- Spannung wir umgekehrt, wenn die Teilchen in der ersten Röhre sind
- nach Verlassen der Driftröhre verlassen werden Teilchen in Richtung der nächsten beschleunigt
- die Länge der Röhren wird entsprechend der steigenden Geschwindigkeit größer

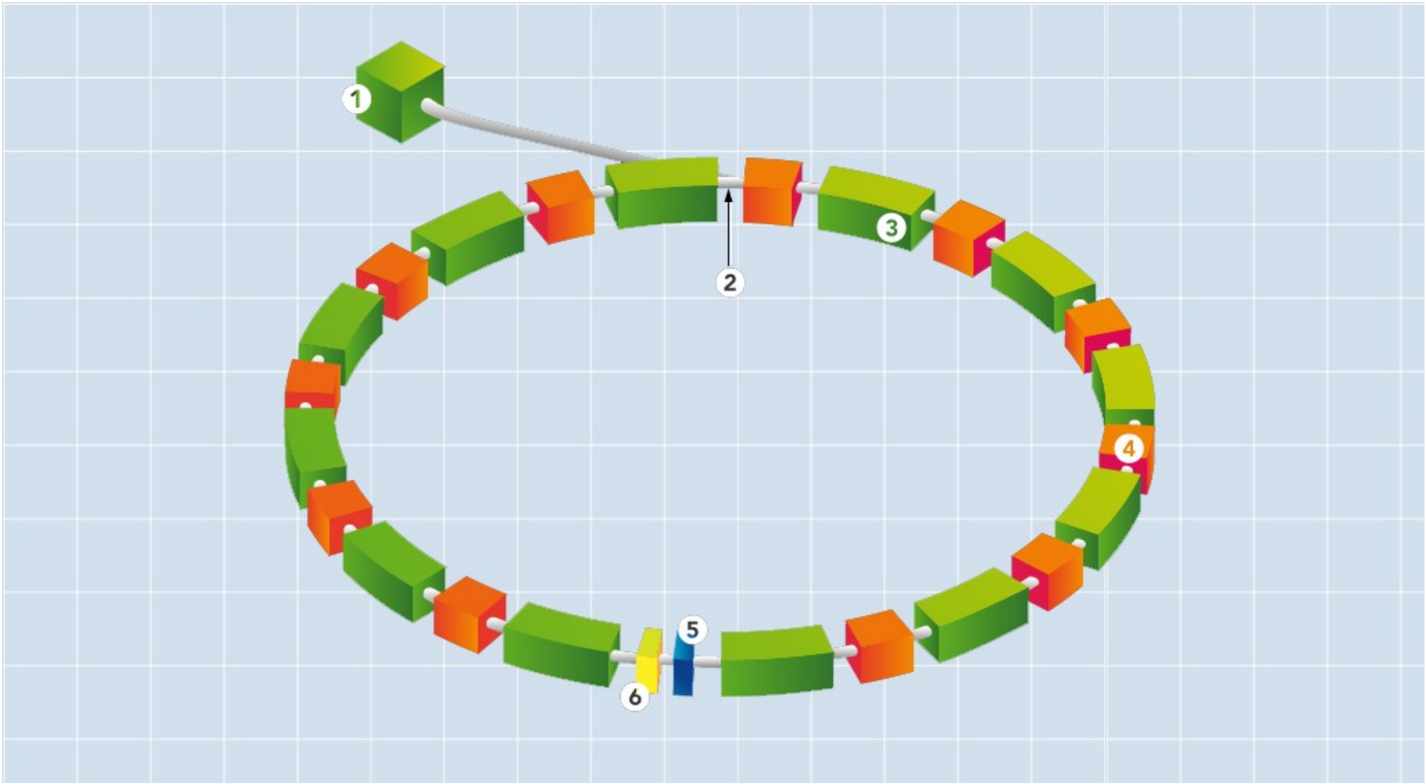
Linearbeschleuniger



https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator

Kreisbeschleuniger

In einem Ring können die Beschleunigungsstrecken bei jedem Umlauf genutzt werden:



https://www.bnl.gov/accelerators/accelerators.php

1. Teilchenquelle
2. evakuiertes Strahlrohr
3. Magnete
4. elektrische (Wechsel-)Felder
5. Target(s)
6. Detektoren

Kreisbeschleuniger (2)

Lorentzkraft auf Teilchen

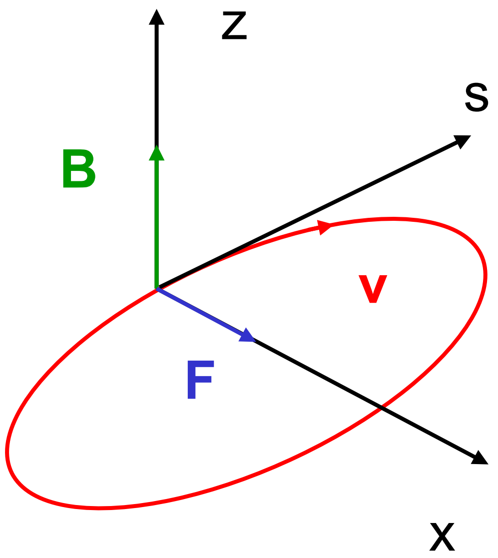
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Für Bewegung senkrecht zum B-Feld:

$\longrightarrow$ **Kreisbewegung des Teilchens**

mit Lorentztkraft als Zentripetalkraft

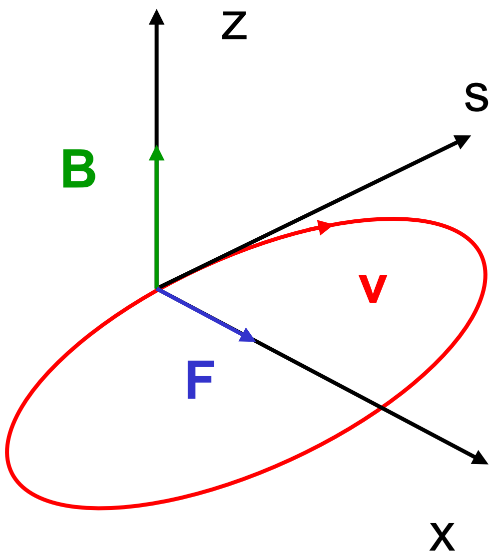
$$qvB = mv^2/R \to qpB = p^2/R$$



Kreisbeschleuniger (2)

Lorentzkraft auf Teilchen

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$



Für Bewegung senkrecht zum B-Feld:

$\longrightarrow$ **Kreisbewegung des Teilchens**

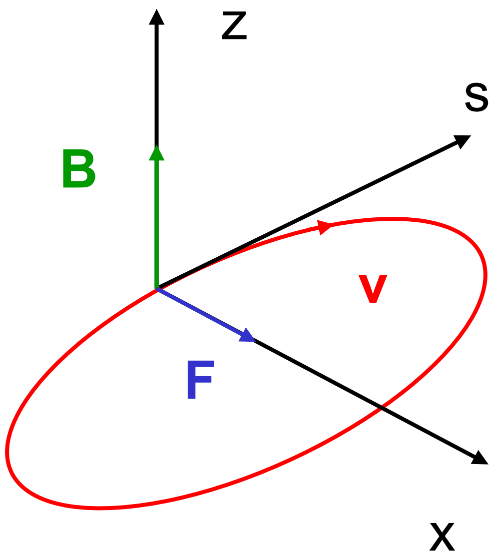
mit Lorentzkraft als Zentripetalkraft

$$qvB = mv^2/R \rightarrow qpB = p^2/R \rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

Kreisbeschleuniger (2)

Lorentzkraft auf Teilchen

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$



Für Bewegung senkrecht zum B-Feld:

→ **Kreisbewegung des Teilchens**

mit Lorentzkraft als Zentripetalkraft

$$qvB = mv^2/R \rightarrow qpB = p^2/R \rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

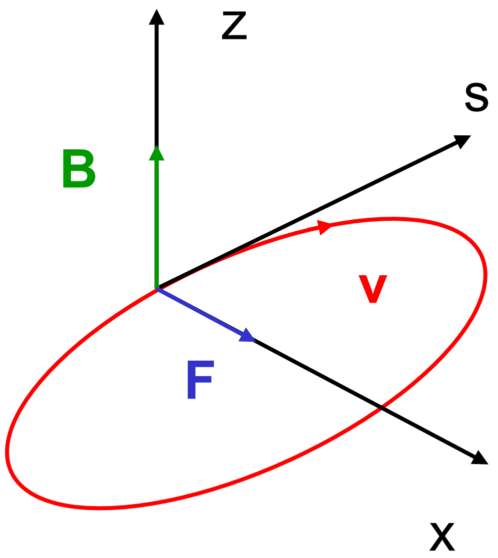
Die vom B-Feld abhängige **Umlauffrequenz** nennt man **Zyklotronfrequenz**:

$$\omega_Z = 2\pi f = 2\pi \frac{v}{2\pi R} = \frac{p}{m}\frac{|q|B}{p} = \frac{|q|B}{m}$$

Kreisbeschleuniger (2)

Lorentzkraft auf Teilchen

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$



Für Bewegung senkrecht zum B-Feld:

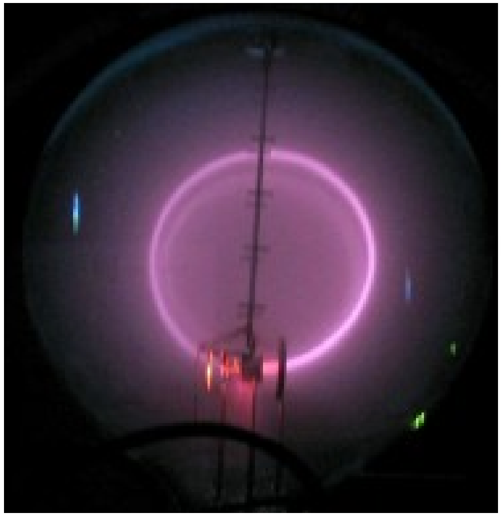
$\longrightarrow$ **Kreisbewegung des Teilchens**

mit Lorentztkraft als Zentripetalkraft

$$qvB = mv^2/R \rightarrow qpB = p^2/R \rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

Die vom B-Feld abhängige **Umlauffrequenz** nennt man **Zyklotronfrequenz**:

$$\omega_Z = 2\pi f = 2\pi \frac{v}{2\pi R} = \frac{p}{m}\frac{|q|B}{p} = \frac{|q|B}{m}$$

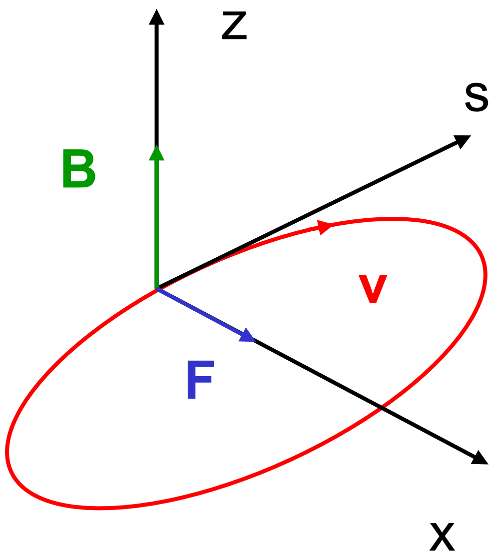


s. Praktikum: e/m-Röhre

Kreisbeschleuniger (2)

Lorentzkraft auf Teilchen

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$



Für Bewegung senkrecht zum B-Feld:

$\longrightarrow$ **Kreisbewegung des Teilchens**

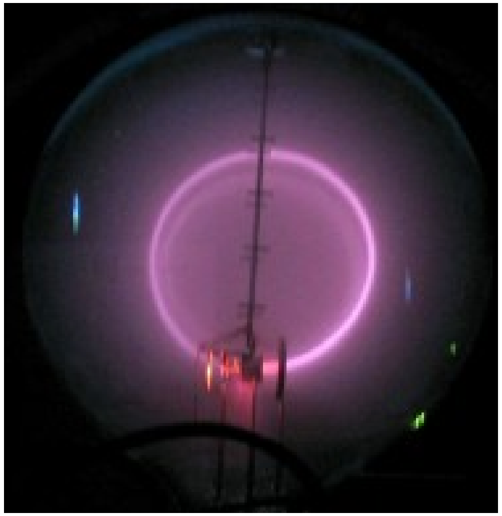
mit Lorenztkraft als Zentripetalkraft

$$qvB = mv^2/R \rightarrow qpB = p^2/R \rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

Die vom B-Feld abhängige **Umlauffrequenz** nennt man **Zyklotronfrequenz**:

$$\omega_Z = 2\pi f = 2\pi \frac{v}{2\pi R} = \frac{p}{m}\frac{|q|B}{p} = \frac{|q|B}{m}$$

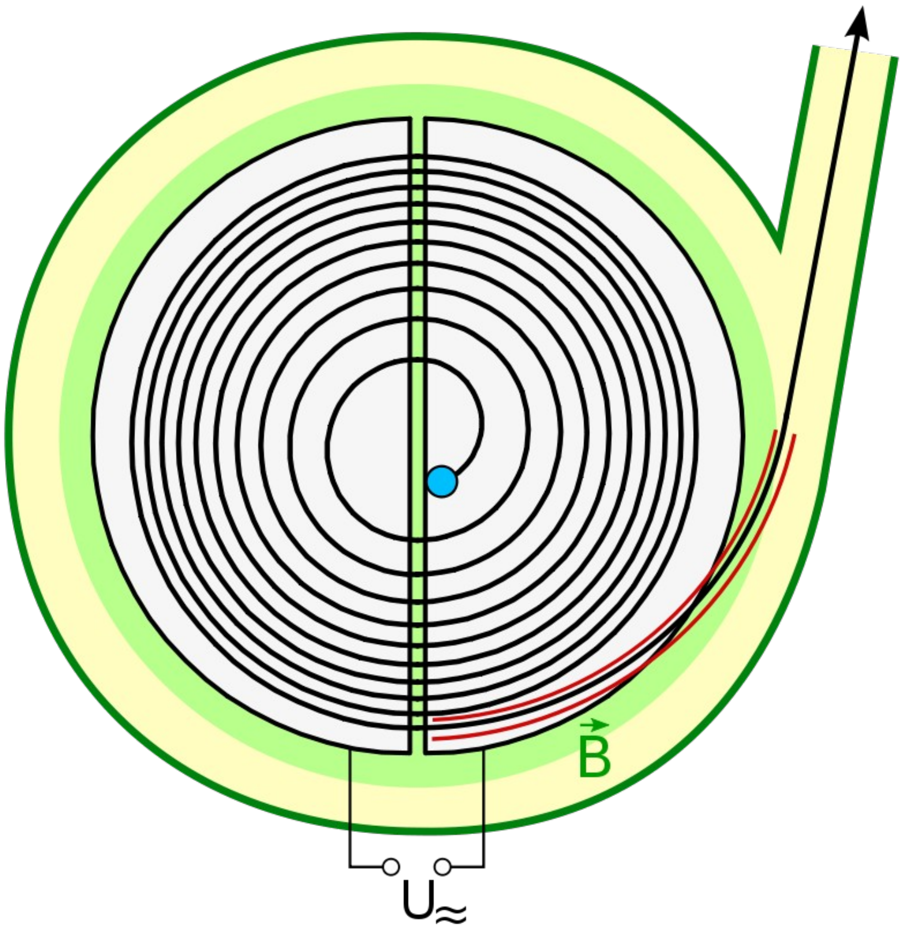
Bei zunehmender Energie und Geschwindigkeit laufen die Teilchen mit größerem Radius im Magnetfeld um



s. Praktikum: e/m-Röhre

Kreisbeschleuniger: Zyklotron

https://de.wikipedia.org/wiki/Zyklotron



http://www.zyklotron-ag.de/ (Karlsruhe)

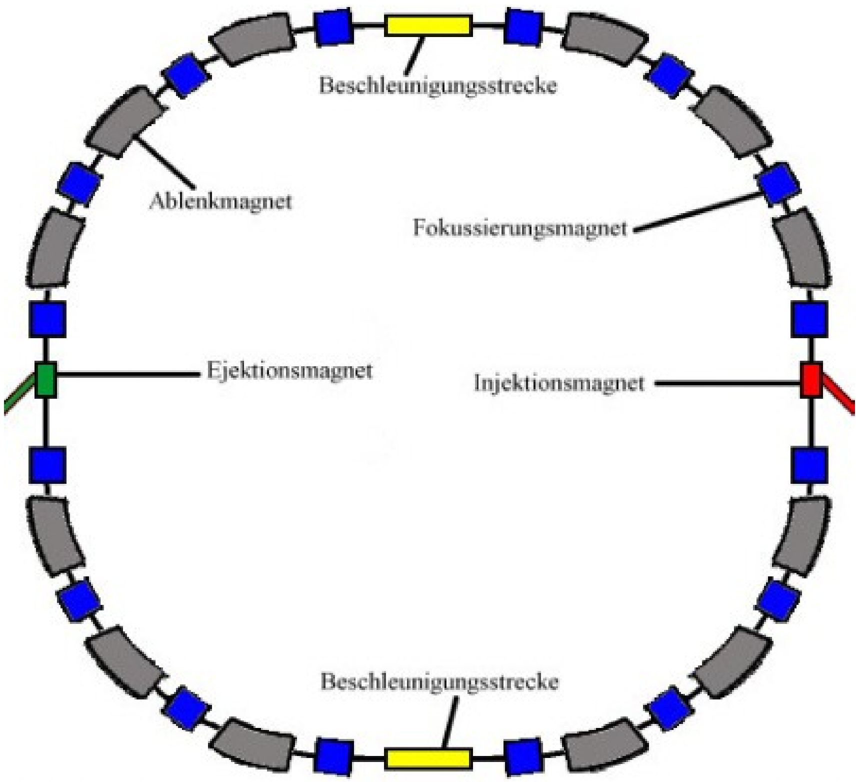
Zyklotron ist ein einfacher, robuster Beschleunigertyp

für Energien größer als einige 10MeV für Protonen
wird der notwendige Radius zu groß

Kreisbeschleuniger: Synchrotron

In modernen Kreisbeschleunigern wird das **Magnetfeld** proportional („**synchron**“) **zum Teilchenimpuls erhöht**.

Außerdem nutzt man **Magnetoptik** (Quadrupole und Sextupole) zur Fokussierung des Teilchenstrahls.



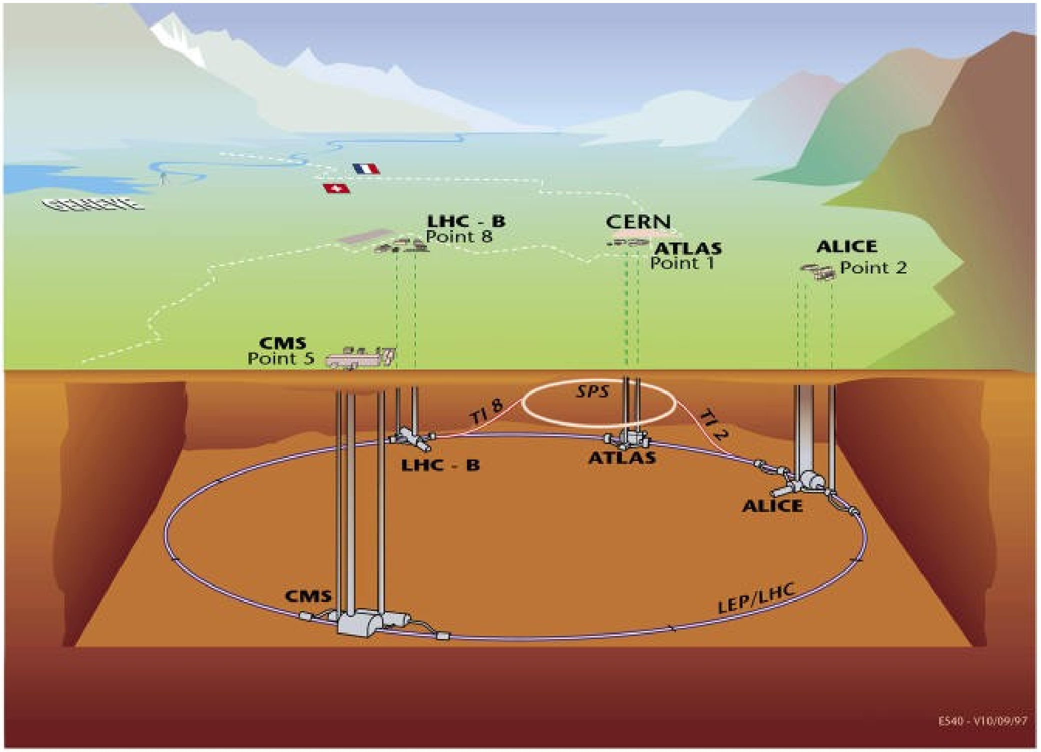
Komponenten eines Synchrotrons:

- Ablenkmagnete
- Magnete zur Fokussierung
- Injektionsmagnete (gepulst)
- Extraktionsmagnete (gepulst)
- Beschleunigungsstrecke
- Vakuumsystem
- Diagnostik
- Kontrollsystem
- Netzgeräte

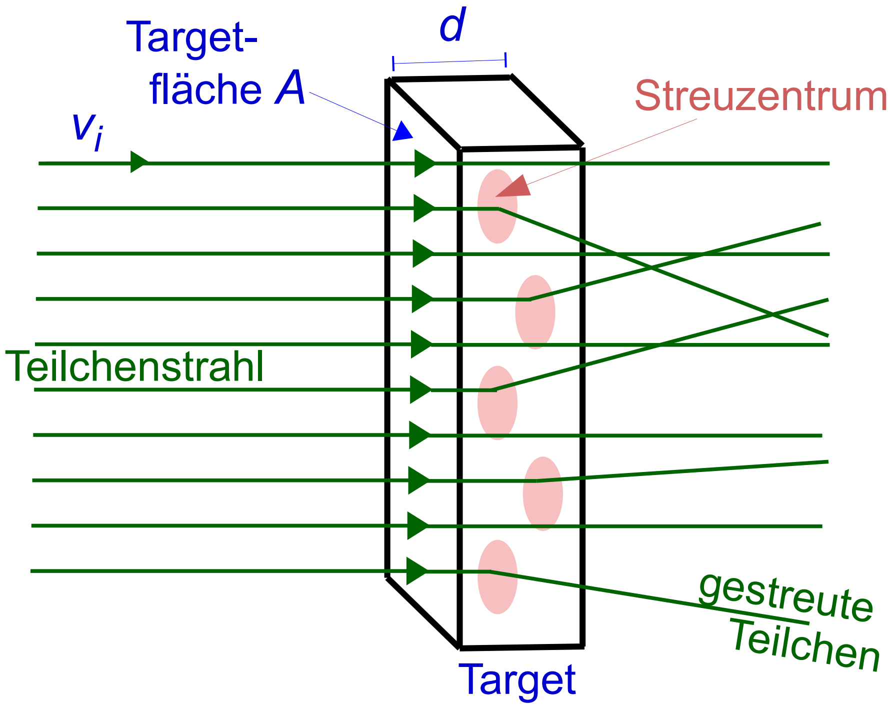
Beispiele

Stanford Linear Accelerator

Large Hadron Collider, CERN in Genf



Streuexperiment: Wirkungsquerschnitt



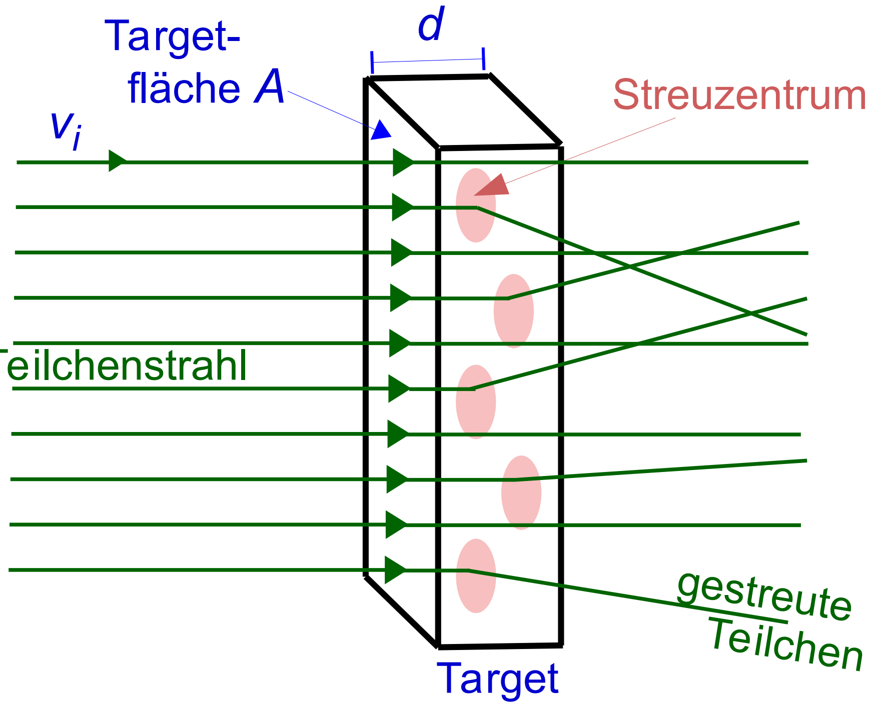
Parameter des einfallenden Teilchenstrahls

- Querschnittsfläche: A (typischerweise in cm²)
- Geschwindigkeit: v_i (in cm/s)
- Anzahldichte: n_s (in cm^{-3})
- Flussdichte: $J = n_s \cdot v_i$ (in $cm^{-2}\,s^{-1}$)
- Fluss: $\Phi = J \cdot A = n_s \cdot v_i \cdot A$ (in s^{-1})

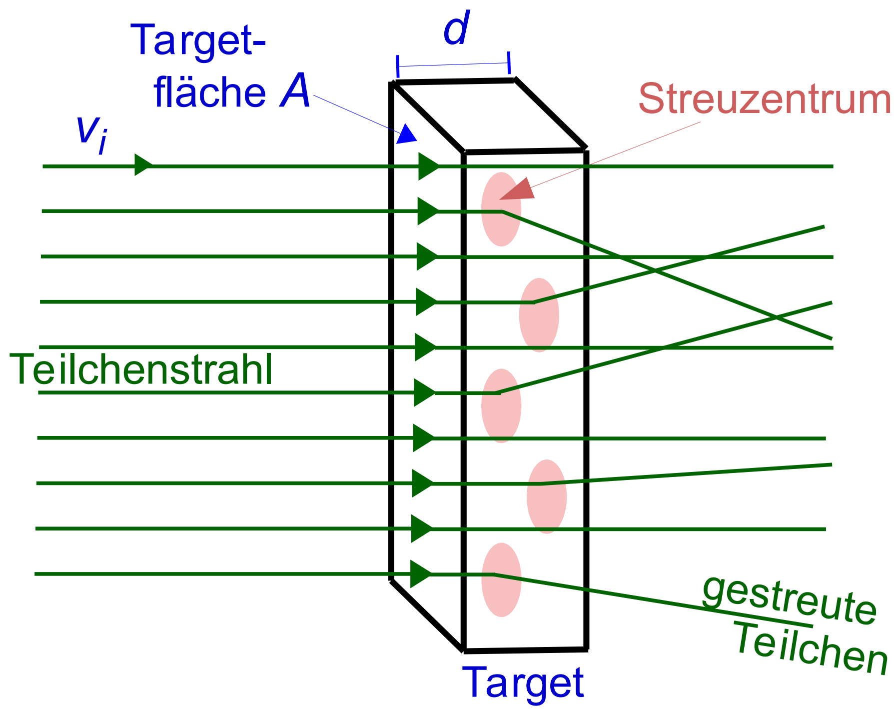
Prinzip: als ebene Welle beschriebener einfallender Teilchenstrahl triff auf eine Anzahl Target-Teilchen und wird daran gestreut. Die in verschiedene Richtungen gestreuten Teilchen werden gezählt

⟶ **differentieller Wirkungsquerschnitt**

Messverfahren 2: Streuexperiment (2)



Messverfahren 2: Streuexperiment (2)

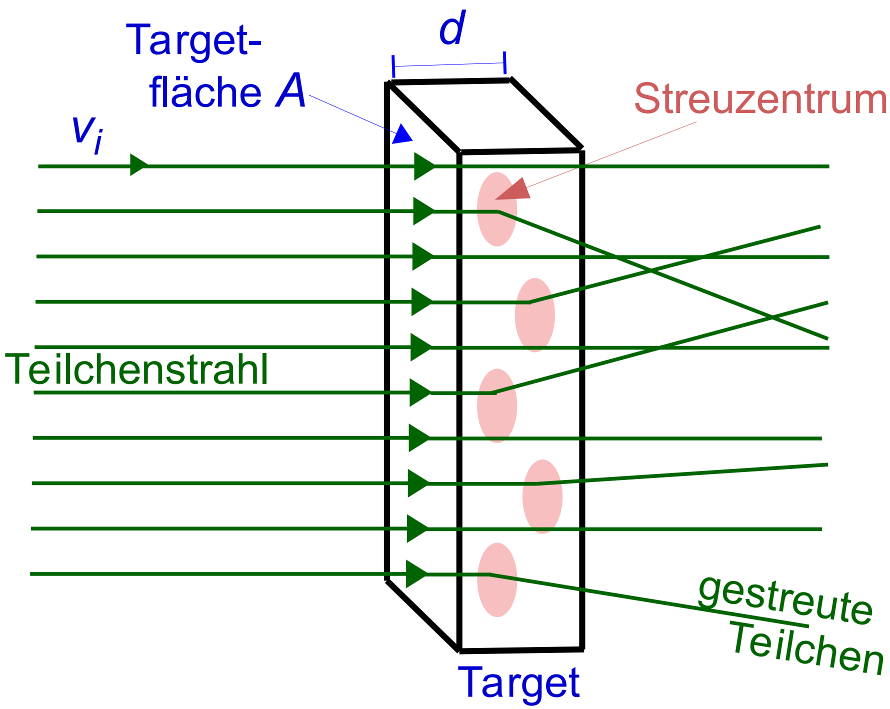


Parameter des Targets

- Dicke: d (in cm)
- Dichte: ρ (in g/cm³)
- Atommasse: M_t (in atomarer Masseneinheit u)
- Anzahldichte der Targetkerne: $n_t = \rho \cdot N_A / M_t$

  (mit Avogadro-Konstante: $N_A = 6.022 \cdot 1023$)
- **Anzahl Targetkerne im Strahl**: $N_t = n_t \cdot A \cdot d$

Messverfahren 2: Streuexperiment (2)



Parameter des Targets

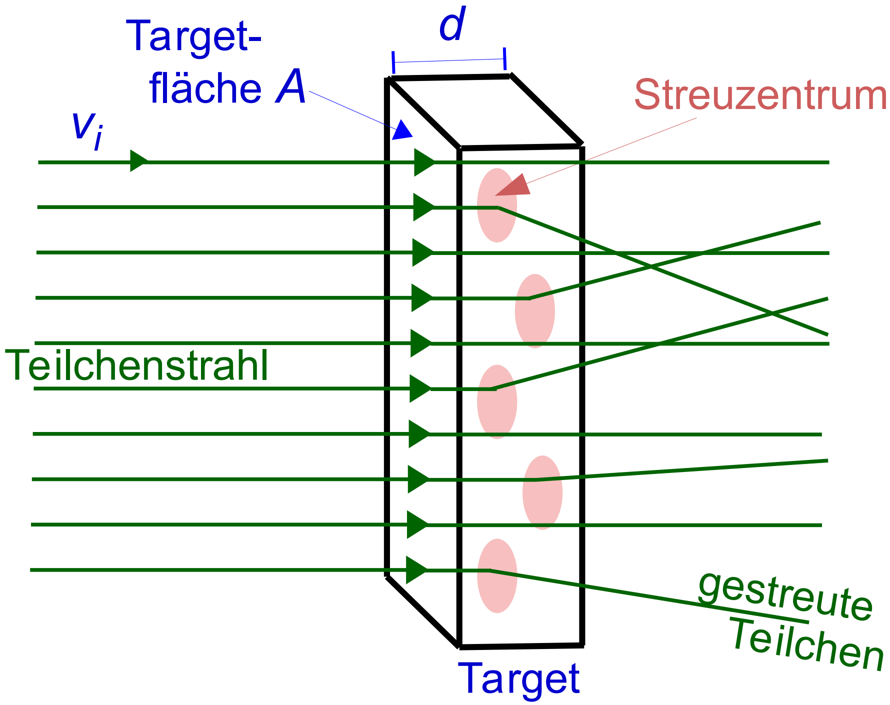
- Dicke: d (in cm)
- Dichte: ρ (in g/cm³)
- Atommasse: M_t (in atomarer Masseneinheit u)
- Anzahldichte der Targetkerne: $n_t = \rho \cdot N_A / M_t$

  (mit Avogadro-Konstante: N_A =6.022·1023)
- **Anzahl Targetkerne im Strahl**: $N_t = n_t \cdot A \cdot d$

Wirkungsquerschnitt: Wahrscheinlichkeit für Streuprozess

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{Zahl der pro Targetkern nach } d\Omega \text{ gestreuten Teilchen}}{\text{Zahl der einfallenden Teilchen pro Fläche}}$$

Messverfahren 2: Streuexperiment (2)



Parameter des Targets

- Dicke: d (in cm)
- Dichte: ρ (in g/cm³)
- Atommasse: M_t (in atomarer Masseneinheit u)
- Anzahldichte der Targetkerne: $n_t = \rho \cdot N_A / M_t$

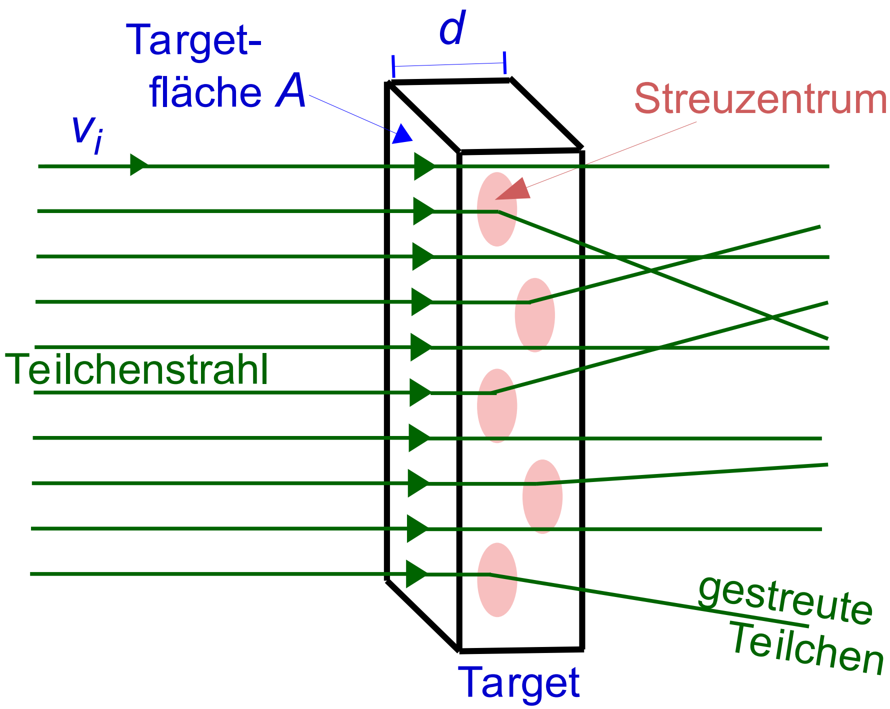
  (mit Avogadro-Konstante: N_A =6.022·1023)
- **Anzahl Targetkerne im Strahl**: $N_t = n_t \cdot A \cdot d$

Wirkungsquerschnitt: Wahrscheinlichkeit für Streuprozess

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{Zahl der pro Targetkern nach } d\Omega \text{ gestreuten Teilchen}}{\text{Zahl der einfallenden Teilchen pro Fläche}}$$

Erinnerung: Einheit des Wirkungsquerschnitts: $[\sigma]$= 1 barn = 10^{-28} m²

Messverfahren 2: Streuexperiment (2)



Parameter des Targets

- Dicke: d (in cm)
- Dichte: ρ (in g/cm³)
- Atommasse: M_t (in atomarer Masseneinheit u)
- Anzahldichte der Targetkerne: $n_t = \rho \cdot N_A / M_t$

  (mit Avogadro-Konstante: N_A =6.022·1023)
- **Anzahl Targetkerne im Strahl**: $N_t = n_t \cdot A \cdot d$

Wirkungsquerschnitt: Wahrscheinlichkeit für Streuprozess

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{Zahl der pro Targetkern nach } d\Omega \text{ gestreuten Teilchen}}{\text{Zahl der einfallenden Teilchen pro Fläche}}$$

Erinnerung: Einheit des Wirkungsquerschnitts: $[\sigma]$= 1 barn = 10^{-28} m²

In der Quantenphysik beschreibt der **Wirkungsquerschnitt** eine **effektive Fläche**. Er ist ein **Maß für die Streuwahrscheinlichkeit**.

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} + {}^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets:	d = 2.0 μm,
Fläche des Targets:	A = 2.5cm²
Dichte:	$\rho_{Fe} = 7.8 \cdot 10^3$ kg/m³
Molmasse von Eisen:	M_{Fe} = 56 g/mol
Protonrate:	$r_p = 2 \cdot 10^{13}$/s

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} + {}^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets:	d = 2.0 µm,
Fläche des Targets:	A = 2.5cm²
Dichte:	$\rho_{Fe} = 7.8 \cdot 10^3$ kg/m³
Molmasse von Eisen:	M_{Fe} = 56 g/mol
Protonrate:	$r_p = 2 \cdot 10^{13}$/s

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} + {}^{56}\mathrm{Fe} \to {}^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets:	d = 2.0 µm,
Fläche des Targets:	A = 2.5cm²
Dichte:	ρ_{Fe} = 7.8 ·10³ kg/m³
Molmasse von Eisen:	M_{Fe} = 56 g/mol
Protonrate:	r_p= 2 ·10^{13}/s

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

$$r_{\mathrm{n}} = \sigma \cdot r_{\mathrm{p}}/A \cdot A \cdot d \cdot N_{\mathrm{Fe}} \text{ und } N_{\mathrm{Fe}} = \rho_{\mathrm{Fe}}/M_{\mathrm{Fe}} \cdot N_A$$

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} + {}^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets:	d = 2.0 μm,
Fläche des Targets:	A = 2.5cm²
Dichte:	$\rho_{Fe} = 7.8 \cdot 10^3$ kg/m³
Molmasse von Eisen:	M_{Fe} = 56 g/mol
Protonrate:	$r_p = 2 \cdot 10^{13}$/s

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

$$r_\mathrm{n} = \sigma \cdot r_\mathrm{p}/A \cdot A \cdot d \cdot N_\mathrm{Fe} \text{ und } N_\mathrm{Fe} = \rho_\mathrm{Fe}/M_\mathrm{Fe} \cdot N_A$$

$$= 0.65 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m}^2 \cdot 2 \cdot 10^{13}/\mathrm{s} \cdot 2.0 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m} \cdot 8.4 \cdot 10^{28}/\,\mathrm{m}^3$$

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} + {}^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets:	d = 2.0 µm,
Fläche des Targets:	A = 2.5cm²
Dichte:	$\rho_{Fe} = 7.8 \cdot 10^3$ kg/m³
Molmasse von Eisen:	M_{Fe} = 56 g/mol
Protonrate:	$r_p = 2 \cdot 10^{13}$/s

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

$$r_\mathrm{n} = \sigma \cdot r_\mathrm{p}/A \cdot A \cdot d \cdot N_\mathrm{Fe} \text{ und } N_\mathrm{Fe} = \rho_\mathrm{Fe}/M_\mathrm{Fe} \cdot N_A$$

$$= 0.65 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m}^2 \cdot 2 \cdot 10^{13}/\mathrm{s} \cdot 2.0 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m} \cdot 8.4 \cdot 10^{28}/\,\mathrm{m}^3 \;= 2.2 \cdot 10^8/\mathrm{s}$$

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} + {}^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets: $d = 2.0\ \mu\mathrm{m}$,

Fläche des Targets: $A = 2.5\,\mathrm{cm}^2$

Dichte: $\rho_{Fe} = 7.8 \cdot 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$

Molmasse von Eisen: $M_{Fe} = 56\ \mathrm{g/mol}$

Protonrate: $r_p = 2 \cdot 10^{13}/\mathrm{s}$

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

$$r_\mathrm{n} = \sigma \cdot r_\mathrm{p}/A \cdot A \cdot d \cdot N_\mathrm{Fe} \text{ und } N_\mathrm{Fe} = \rho_\mathrm{Fe}/M_\mathrm{Fe} \cdot N_A$$

$$= 0.65 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m}^2 \cdot 2 \cdot 10^{13}/\mathrm{s} \cdot 2.0 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m} \cdot 8.4 \cdot 10^{28}/\,\mathrm{m}^3 \;\; = 2.2 \cdot 10^8/\mathrm{s}$$

Weitere Beispiele:

Proton-Proton am LHC bei 3.5 TeV: $\sigma_\mathrm{pp} = 50\,\mathrm{mb}$

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} +^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow ^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets: *d* = 2.0 μm,

Fläche des Targets: *A* = 2.5cm²

Dichte: ρ_{Fe} = 7.8 ·10³ kg/m³

Molmasse von Eisen: M_{Fe} = 56 g/mol

Protonrate: r_p= 2 ·10^{13}/s

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

$$r_\mathrm{n} = \sigma \cdot r_\mathrm{p}/A \cdot A \cdot d \cdot N_\mathrm{Fe} \text{ und } N_\mathrm{Fe} = \rho_\mathrm{Fe}/M_\mathrm{Fe} \cdot N_A$$

$$= 0.65 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m}^2 \cdot 2 \cdot 10^{13}/\mathrm{s} \cdot 2.0 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m} \cdot 8.4 \cdot 10^{28}/\,\mathrm{m}^3 = 2.2 \cdot 10^8/\mathrm{s}$$

Weitere Beispiele:

Proton-Proton am LHC bei 3.5 TeV: $\sigma_\mathrm{pp} = 50\,\mathrm{mb}$

Elektron-Positron bei 45GeV: $\sigma_{\mathrm{e^+e^-} \rightarrow \mu^+\mu^-} = 1.4\,\mathrm{nb}$

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} + {}^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets: d = 2.0 µm,

Fläche des Targets: A = 2.5cm²

Dichte: ρ_{Fe} = 7.8 ·10³ kg/m³

Molmasse von Eisen: M_{Fe} = 56 g/mol

Protonrate: r_p= 2 ·10^{13}/s

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

$$r_\mathrm{n} = \sigma \cdot r_\mathrm{p}/A \cdot A \cdot d \cdot N_\mathrm{Fe} \text{ und } N_\mathrm{Fe} = \rho_\mathrm{Fe}/M_\mathrm{Fe} \cdot N_A$$

$$= 0.65 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m}^2 \cdot 2 \cdot 10^{13}/\mathrm{s} \cdot 2.0 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m} \cdot 8.4 \cdot 10^{28}/\,\mathrm{m}^3 \ = 2.2 \cdot 10^8/\mathrm{s}$$

Weitere Beispiele:

Proton-Proton am LHC bei 3.5 TeV: $\sigma_\mathrm{pp} = 50\,\mathrm{mb}$

Elektron-Positron bei 45GeV: $\sigma_{\mathrm{e^+e^-}\rightarrow\mu^+\mu^-} = 1.4\,\mathrm{nb}$

LHC bei 7 TeV, Higgs-Erzeugung: $\sigma_\mathrm{ppH+x} = 10\,\mathrm{pb}$

Beispiele Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $\mathrm{p} +^{56}\mathrm{Fe} \rightarrow^{56}\mathrm{Co} + \mathrm{n}$ beträgt 0.65 b

Dicke des Eisentargets:	d = 2.0 µm,
Fläche des Targets:	A = 2.5cm²
Dichte:	$\rho_{Fe} = 7.8 \cdot 10^3$ kg/m³
Molmasse von Eisen:	M_{Fe} = 56 g/mol
Protonrate:	$r_p = 2 \cdot 10^{13}$/s

Wie viele Neutronen entstehen pro Sekunde ?

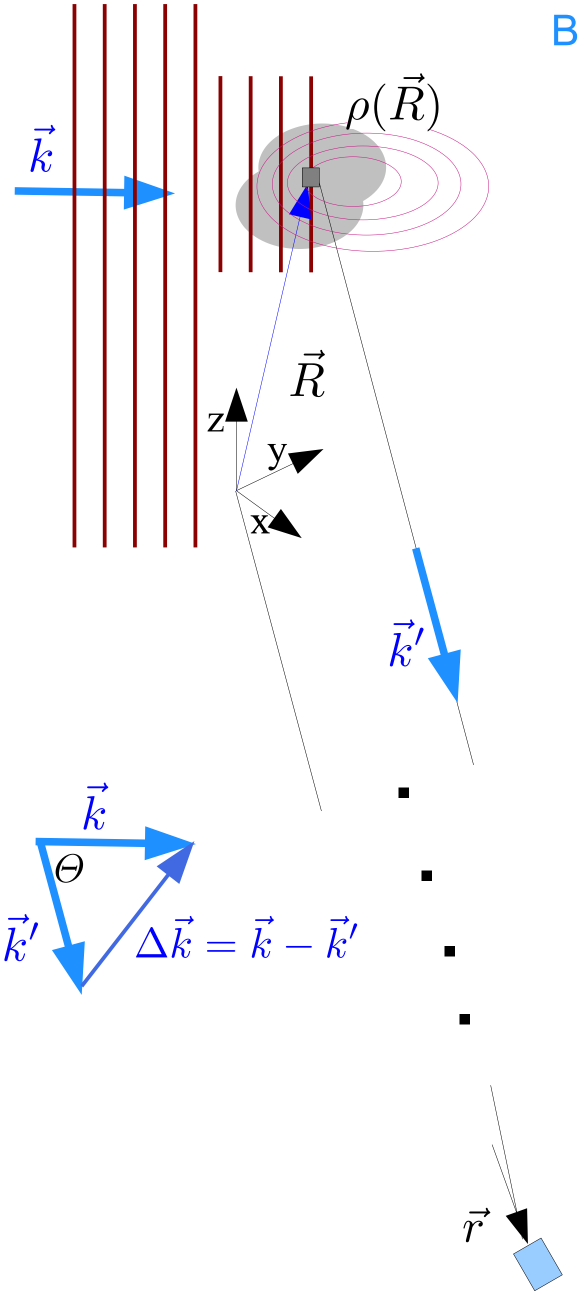
$$r_\mathrm{n} = \sigma \cdot r_\mathrm{p}/A \cdot A \cdot d \cdot N_\mathrm{Fe} \text{ und } N_\mathrm{Fe} = \rho_\mathrm{Fe}/M_\mathrm{Fe} \cdot N_A$$

$$= 0.65 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m}^2 \cdot 2 \cdot 10^{13}/\mathrm{s} \cdot 2.0 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m} \cdot 8.4 \cdot 10^{28}/\,\mathrm{m}^3 = 2.2 \cdot 10^8/\mathrm{s}$$

Weitere Beispiele:

Proton-Proton am LHC bei 3.5 TeV:	$\sigma_\mathrm{pp} = 50\,\mathrm{mb}$
Elektron-Positron bei 45GeV:	$\sigma_{\mathrm{e}^+\mathrm{e}^- \to \mu^+\mu^-} = 1.4\,\mathrm{nb}$
LHC bei 7 TeV, Higgs-Erzeugung:	$\sigma_\mathrm{ppH+x} = 10\,\mathrm{pb}$
Neutrinos von der Sonne:	$\sigma_{\nu,Kern} = 10^{-21}\,\mathrm{b}$

Messverfahren 2: Streuexperiment (3)



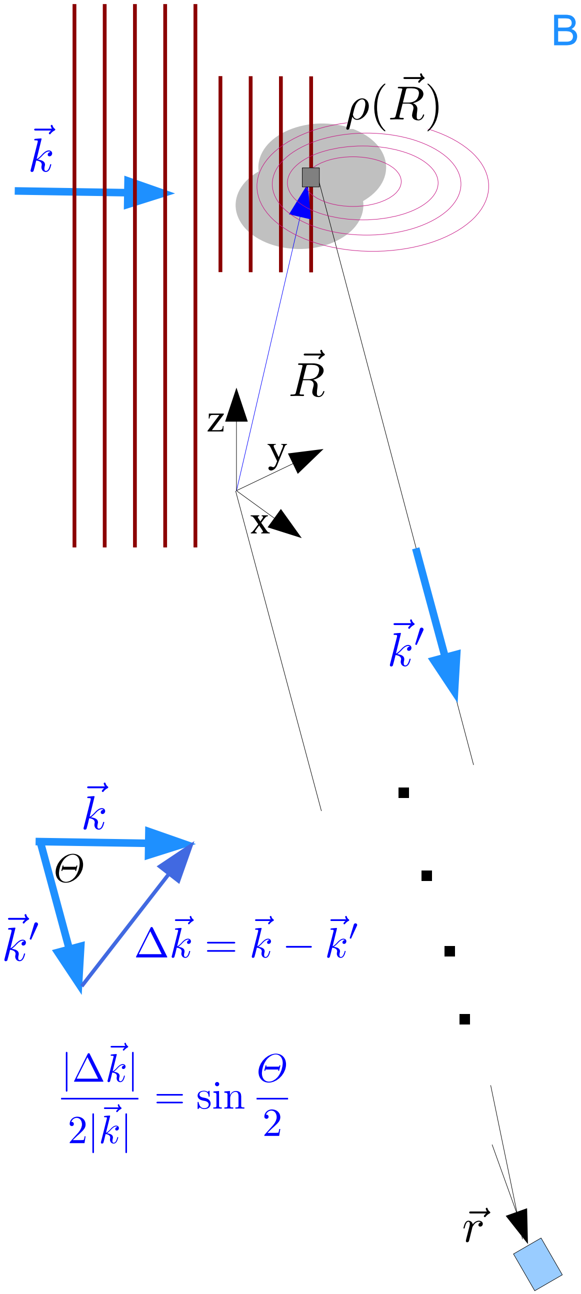
Betrachtung ganz analog zur Streuung am Gitter (s. Vorl. 16)

Ebene Welle mit Wellenvektor $\vec{k}$ wird von Streuzentren an Orten $\vec{R}$ elastisch gestreut und am (unendlich) weit entfernten Punkt $\vec{r}$ in Richtung $\vec{k}'/|\vec{k}|$ beobachtet.

Eingestrahlte ebene Welle: $A(\vec{R}) = A \cdot \exp(i\vec{k} \cdot \vec{R})$

Rutherford-Streuung an jedem Volumenelement, d.h. Überlagerung aller Streuprozesse.

Messverfahren 2: Streuexperiment (3)



Betrachtung ganz analog zur Streuung am Gitter (s. Vorl. 16)

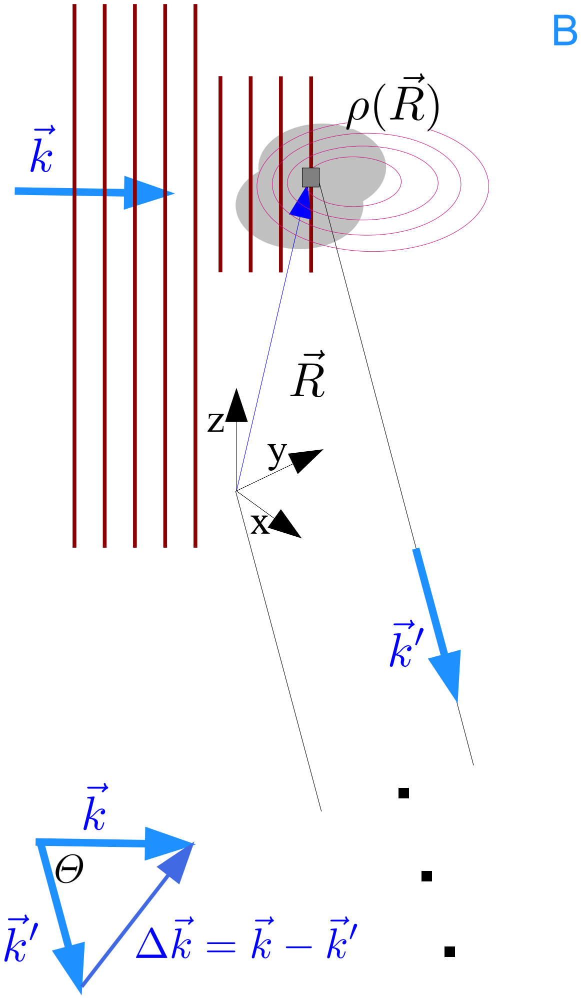
Ebene Welle mit Wellenvektor $\vec{k}$ wird von Streuzentren an Orten $\vec{R}$ elastisch gestreut und am (unendlich) weit entfernten Punkt $\vec{r}$ in Richtung $\vec{k}'/|\vec{k}|$ beobachtet.

Eingestrahlte ebene Welle: $A(\vec{R}) = A \cdot \exp(i\vec{k} \cdot \vec{R})$

Rutherford-Streuung an jedem Volumenelement, d.h. Überlagerung aller Streuprozesse.

$$\frac{|\Delta\vec{k}|}{2|\vec{k}|} = \sin\frac{\Theta}{2}$$

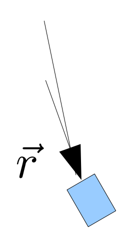
Messverfahren 2: Streuexperiment (3)



$$\frac{|\Delta\vec{k}|}{2|\vec{k}|} = \sin\frac{\Theta}{2}$$

Impulsübertrag

$$\Delta\vec{p} = \hbar\Delta\vec{k}$$



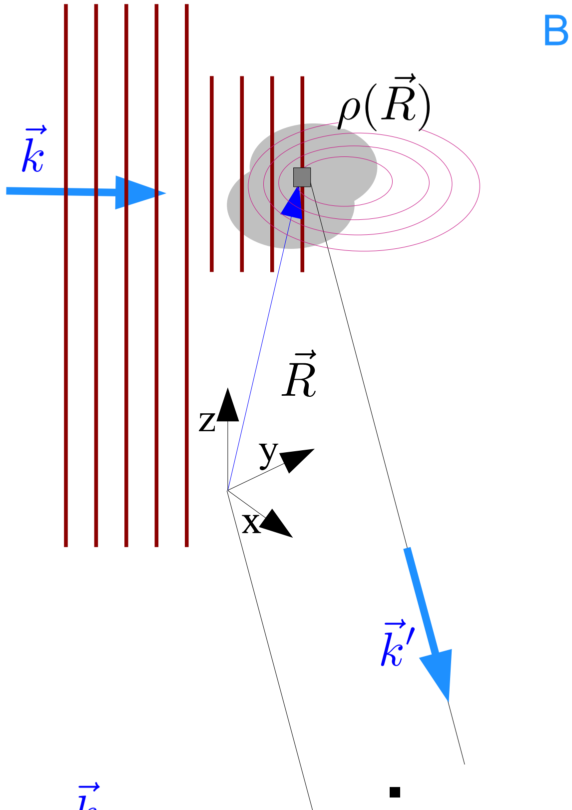
Betrachtung ganz analog zur Streuung am Gitter (s. Vorl. 16)

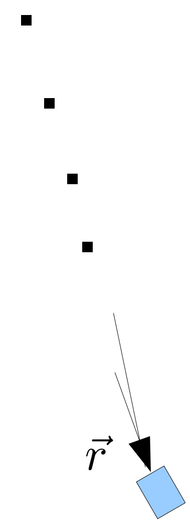
Ebene Welle mit Wellenvektor $\vec{k}$ wird von Streuzentren an Orten $\vec{R}$ elastisch gestreut und am (unendlich) weit entfernten Punkt $\vec{r}$ in Richtung $\vec{k}'/|\vec{k}|$ beobachtet.

Eingestrahlte ebene Welle: $A(\vec{R}) = A \cdot \exp(i\vec{k} \cdot \vec{R})$

Rutherford-Streuung an jedem Volumenelement, d.h. Überlagerung aller Streuprozesse.

Messverfahren 2: Streuexperiment (3)





Betrachtung ganz analog zur Streuung am Gitter (s. Vorl. 16)

Ebene Welle mit Wellenvektor $\vec{k}$ wird von Streuzentren an Orten $\vec{R}$ elastisch gestreut und am (unendlich) weit entfernten Punkt $\vec{r}$ in Richtung $\vec{k}'/|\vec{k}|$ beobachtet.

Eingestrahlte ebene Welle: $A(\vec{R}) = A \cdot \exp(i\vec{k}\cdot\vec{R})$

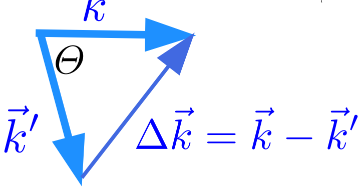
Rutherford-Streuung an jedem Volumenelement, d.h. Überlagerung aller Streuprozesse.

Wie seinerzeit beim Gitter erhalten wir mit $|\vec{r}| \parallel |\vec{k}'| \text{ und } |\vec{k}'| = |\vec{k}|$ für den **Wirkungsquerschnitt**

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \left(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}\right)_{\text{Ruhterford}} \cdot \left(\underbrace{\int \mathrm{d}R^3 \rho(\vec{R}) \exp(i\Delta\vec{k}\cdot\vec{R})}\right)^2}$$

Fouriertransformation der Ladungsverteilung

„Formfaktor“



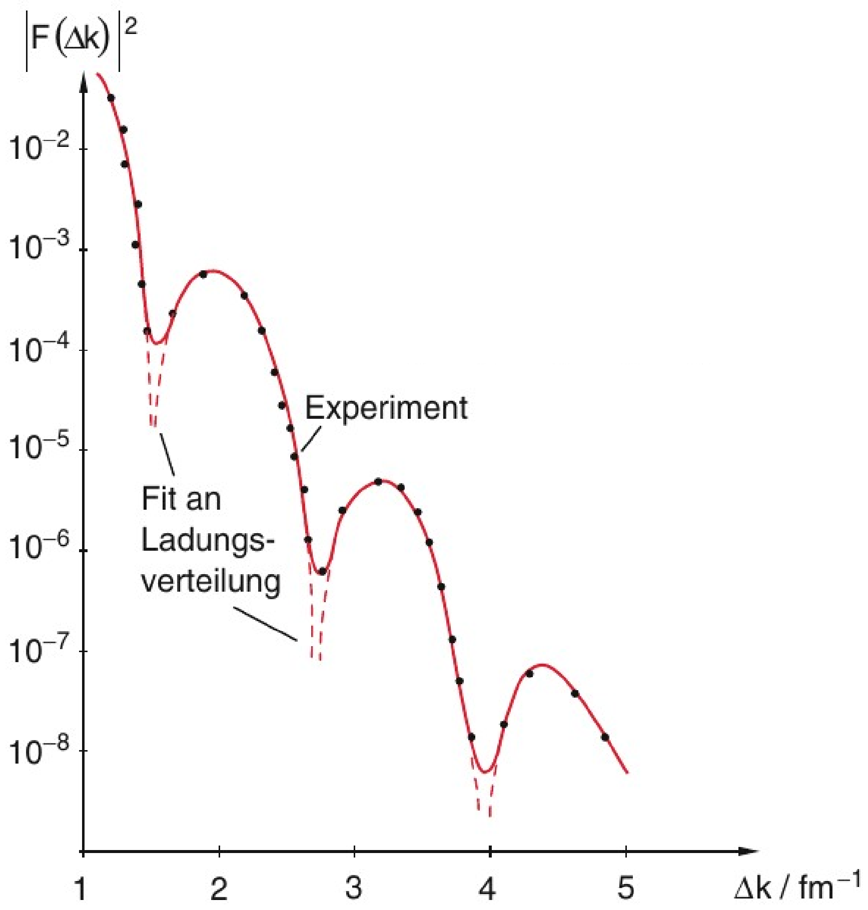
$$\frac{|\Delta\vec{k}|}{2|\vec{k}|} = \sin\frac{\Theta}{2}$$

Impulsübertrag

$$\Delta\vec{p} = \hbar\Delta\vec{k}$$

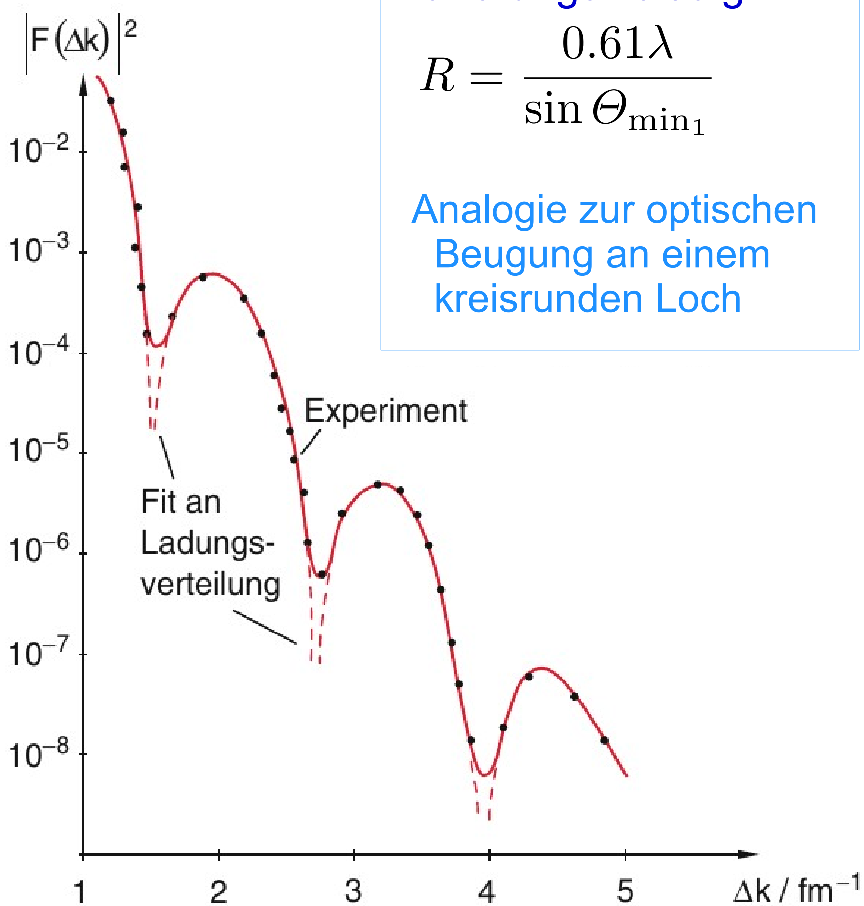
Wirkungsqeuerschnitt Elektron-Kernstreuung

Demtröder, Physik 4 (Springer 2016)



Formfaktor $|F(\Delta p)|^2$ aus Streuung von e^- mit 750 MeV Energie an ^{16}O-Kernen

Wirkungsqeuerschnitt Elektron-Kernstreuung



Demtröder, Physik 4 (Springer 2016)

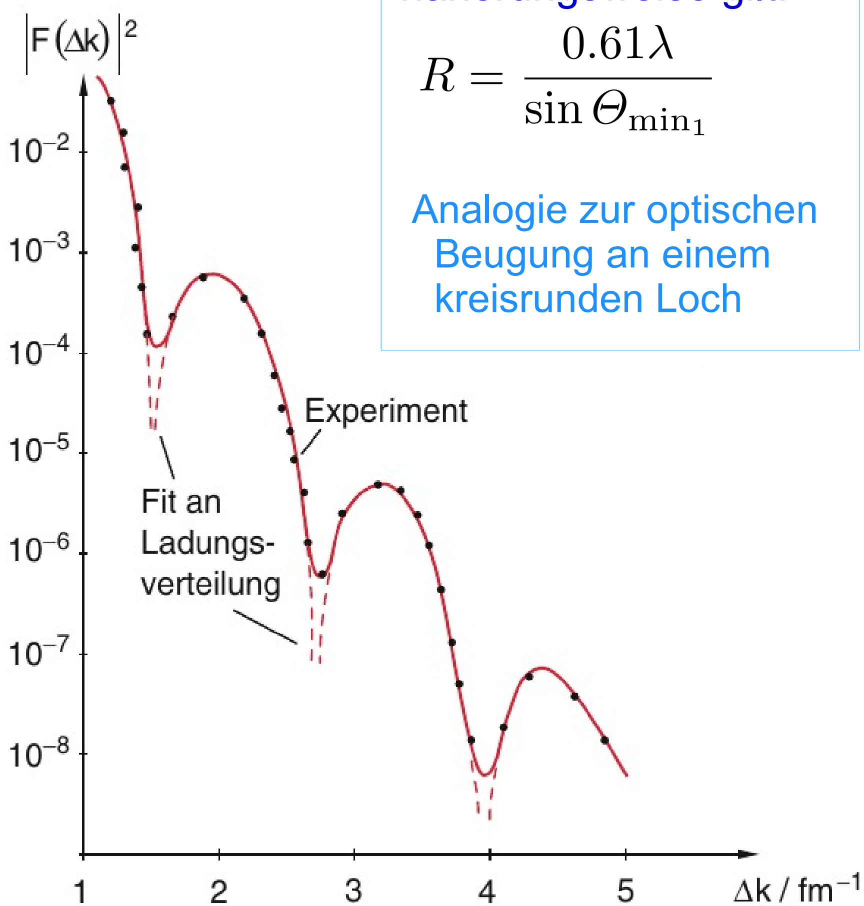
näherungsweise gilt:

$$R = \frac{0.61\lambda}{\sin\Theta_{\mathrm{min}_1}}$$

Analogie zur optischen Beugung an einem kreisrunden Loch

Formfaktor $|F(\Delta p)|^2$ aus Streuung von e^- mit 750 MeV Energie an ^{16}O-Kernen

Wirkungsqeuerschnitt Elektron-Kernstreuung



Demtröder, Physik 4 (Springer 2016)

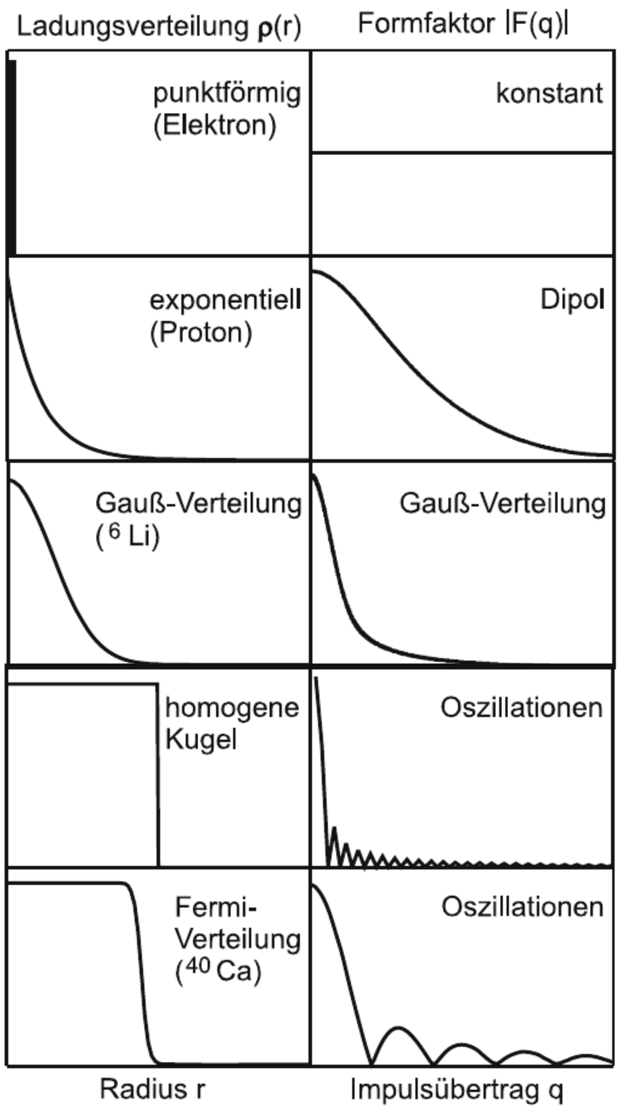
näherungsweise gilt:

$$R = \frac{0.61\lambda}{\sin \Theta_{\min_1}}$$

Analogie zur optischen Beugung an einem kreisrunden Loch

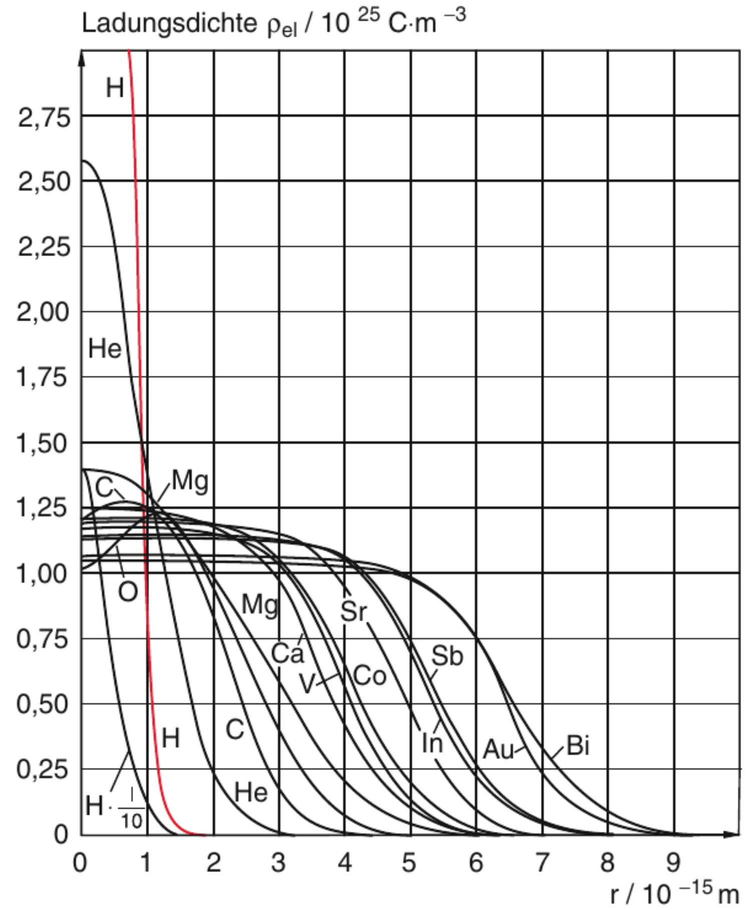
Formfaktor $|F(\Delta p)|^2$ aus Streuung von e^- mit 750 MeV Energie an ^{16}O-Kernen

Einige Verteilungen und deren Fourier-Transformierte



Bethge, Walter, Wiedemann, Kernphysik, Springer 2008

Demtröder, Physik 4 (Springer 2016)



Mit Elektronenstreuung bestimmte radiale Ladungsdichteverteilungen einiger Kerne

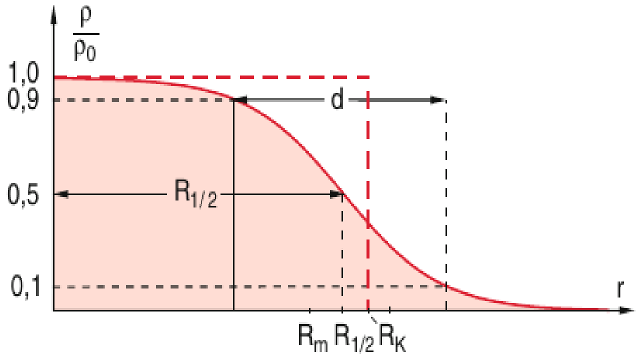
(nach R. Hofstadter: Ann. Rev. Nucl. Sci. 7, 231 (1957))

Kernradien

Ergebnisse der Streuexperimente mit Elektronen:

Ladungsverteilung im Kern hat einen „diffusen“ Rand

→ Breite der Ladungsverteilung als „Kernradius“



R_m: mittlerer Radius $R_m = \sqrt{\langle r^2 \rangle}$

$R_{1/2}$: Radius bei halber Höhe

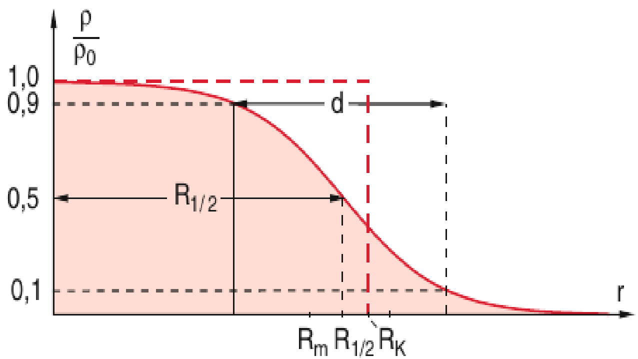
R_K: Radius einer Kugel mit konstanter Massendichte $R_K = \sqrt{5/3} \cdot R_m$

Kernradien

Ergebnisse der Streuexperimente mit Elektronen:

Ladungsverteilung im Kern hat einen „diffusen“ Rand

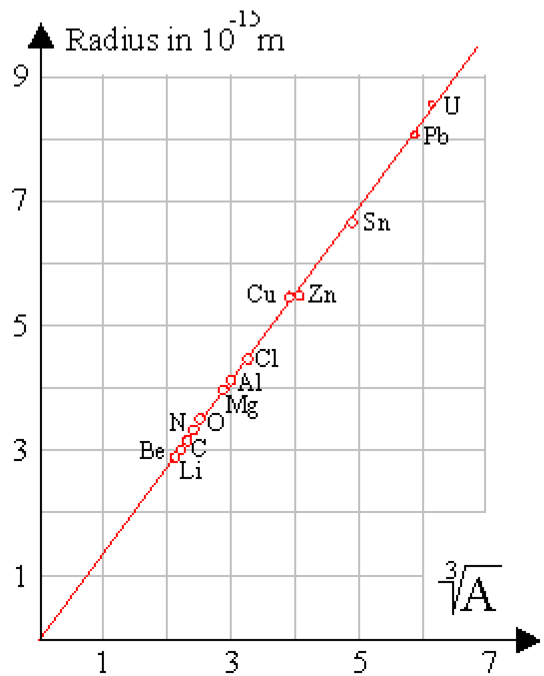
→ Breite der Ladungsverteilung als „Kernradius“



R_m: mittlerer Radius $R_m = \sqrt{\langle r^2 \rangle}$

$R_{½}$: Radius bei halber Höhe

R_K: Radius einer Kugel mit konstanter Massendichte $R_K = \sqrt{5/3} \cdot R_m$

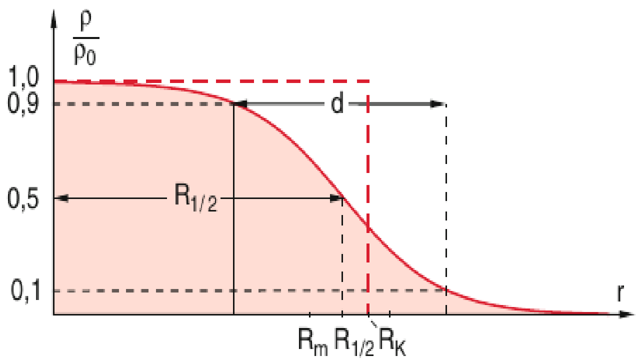


Kernradien

Ergebnisse der Streuexperimente mit Elektronen:

Ladungsverteilung im Kern hat einen „diffusen“ Rand

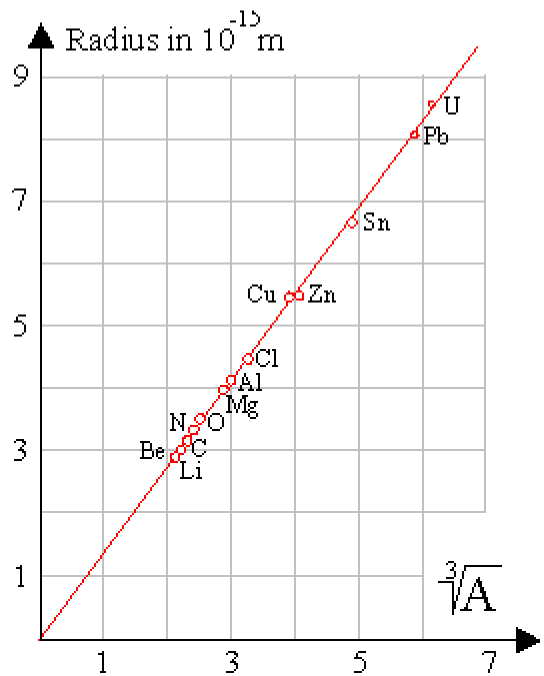
→ Breite der Ladungsverteilung als „Kernradius“



R_m: mittlerer Radius $R_m = \sqrt{\langle r^2 \rangle}$

$R_{½}$: Radius bei halber Höhe

R_K: Radius einer Kugel mit konstanter Massendichte $R_K = \sqrt{5/3} \cdot R_m$



Radien sind proportional zur 3. Wurzel A

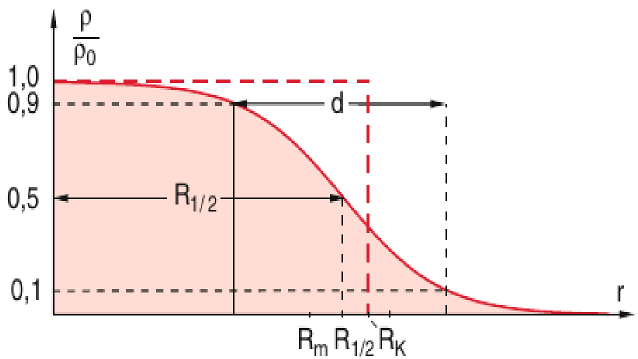
→ **Kernvolumen proportional zu A !**

Kernradien

Ergebnisse der Streuexperimente mit Elektronen:

Ladungsverteilung im Kern hat einen „diffusen“ Rand

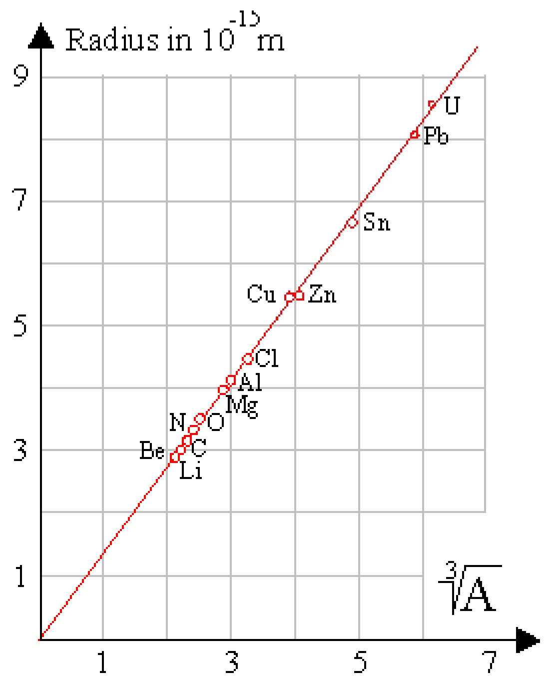
→ Breite der Ladungsverteilung als „Kernradius“



R_m: mittlerer Radius $R_m = \sqrt{\langle r^2 \rangle}$

$R_{½}$: Radius bei halber Höhe

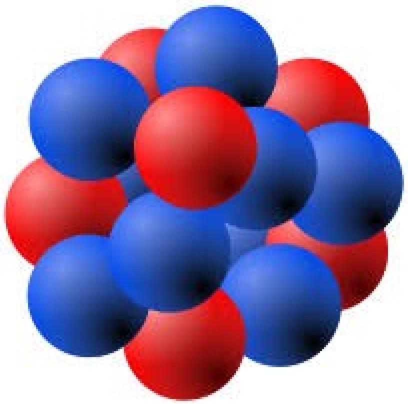
R_K: Radius einer Kugel mit konstanter Massendichte $R_K = \sqrt{5/3} \cdot R_m$



Radien sind proportional zur 3. Wurzel A

→ **Kernvolumen proportional zu A !**

Protonen und Neutronen sind im Kern dicht gepackt, Kern ist kugelförmig →



Proton und Neutron

Proton und Neutron haben

- eine Ausdehnung, sind also keine punktförmigen Teilchen
- ein gyromagnetische Verhältnis > 2 (wie bei punktförmigen Teilchen)

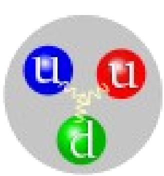
Proton

el. Ladung	+1e
Masse	1.00727646681±0.00000000009 938.272046±0.000021 MeV
Spin	½ $\hbar$
Radius	0.84087± 0.00039 fm 0.8775 ± 0.0051 fm
gyromagn. Verh. g	g = 5.585 694 6893 (16)

Neutron

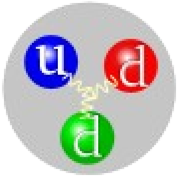
el. Ladung	0
Masse	1.0086649160±0.0000000004 u 939.565379±0.000021 MeV
Spin	½ $\hbar$
Radius	0.862±0.009 fm
gyromagn. Verh. g	-3.826 085 45 (90)

$$m_n - m_p = 1.2933322 \pm 0.0000004 \text{ MeV}$$



Proton und Neutron sind zusammengesetzt

- sie bestehen aus sog. „Quarks“



Wirkungsquerschnitt

experimentell:
$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{\text{Streurate pro Raumwinkel d}\Omega}{j \cdot N_T}$$

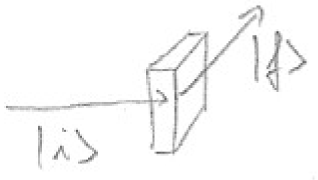
Wirkungsquerschnitt

experimentell: $$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{\text{Streurate pro Raumwinkel d}\Omega}{j \cdot N_T}$$

allgemeine quantenmechanische Berechnung als

Übergangswahrscheinlichkeit vom

Anfangszustand |**i**> in den Endzustand |**f**>



$$W_{i \to f} = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |M_{fi}|^2 \cdot \rho(E)$$ “Fermis goldene Regel“

M_{fi} : Übergangsmatrixelement

$\rho(E)$: Dichte der möglichen Endzustände („Phasenraum“)

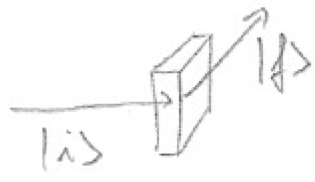
Wirkungsquerschnitt

experimentell: $$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{Streurate pro Raumwinkel } d\Omega}{j \cdot N_T}$$

allgemeine quantenmechanische Berechnung als

Übergangswahrscheinlichkeit vom

Anfangszustand |**i**> in den Endzustand |**f**>



$$W_{i \to f} = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |M_{fi}|^2 \cdot \rho(E)$$ “Fermis goldene Regel“

M_{fi} : Übergangsmatrixelement

$\rho(E)$: Dichte der möglichen Endzustände („Phasenraum“)

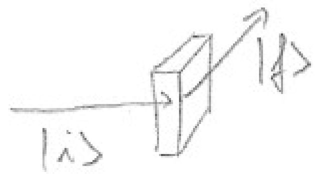
$$M_{fi} = \left\langle f \left| \hat{\mathbf{O}} \right| i \right\rangle = \int \mathrm{dx}^3 \Psi_\mathrm{f}^* \hat{\mathbf{O}} \Psi_\mathrm{i}$$

für Wechselwirkung vermittelt durch Operator $\hat{\mathbf{O}}$

Wirkungsquerschnitt

experimentell: $$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{\text{Streurate pro Raumwinkel d}\Omega}{j \cdot N_T}$$

allgemeine quantenmechanische Berechnung als
Übergangswahrscheinlichkeit vom
Anfangszustand |**i**> in den Endzustand |**f**>



$$W_{i \to f} = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |M_{fi}|^2 \cdot \rho(E)$$ "Fermis goldene Regel"

M_{fi} : Übergangsmatrixelement
$\rho(E)$: Dichte der möglichen Endzustände („Phasenraum")

$$M_{fi} = \left\langle f \middle| \hat{\mathbf{O}} \middle| i \right\rangle = \int \mathrm{dx}^3 \Psi_\mathrm{f}^* \hat{\mathbf{O}} \Psi_\mathrm{i}$$

für Wechselwirkung vermittelt durch Operator $\hat{\mathbf{O}}$

Die **physikalisch interessante Information**
über den Wechselwirkungsprozess steckt im **Matrixelement** !

Ende Vorlesung

und Zeit für Fragen ?