

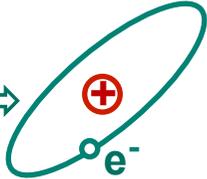
Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III
Vorlesung 2

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Globale Eigenschaften der Kerne

2.1 Atome

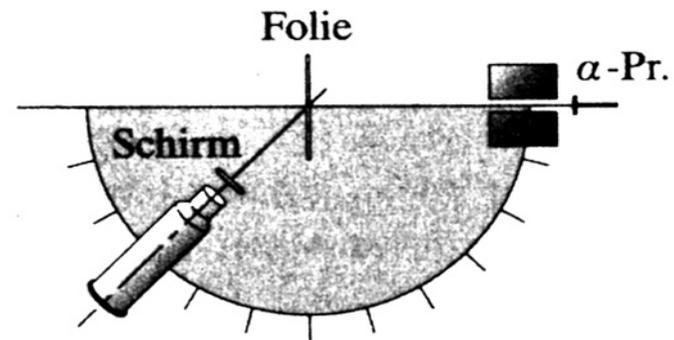
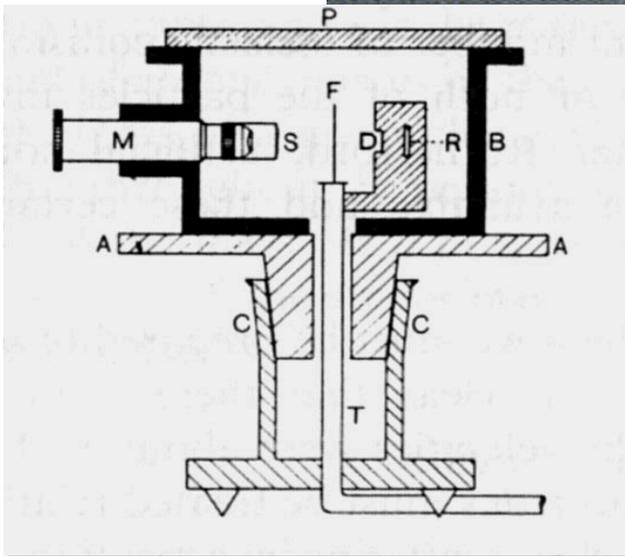
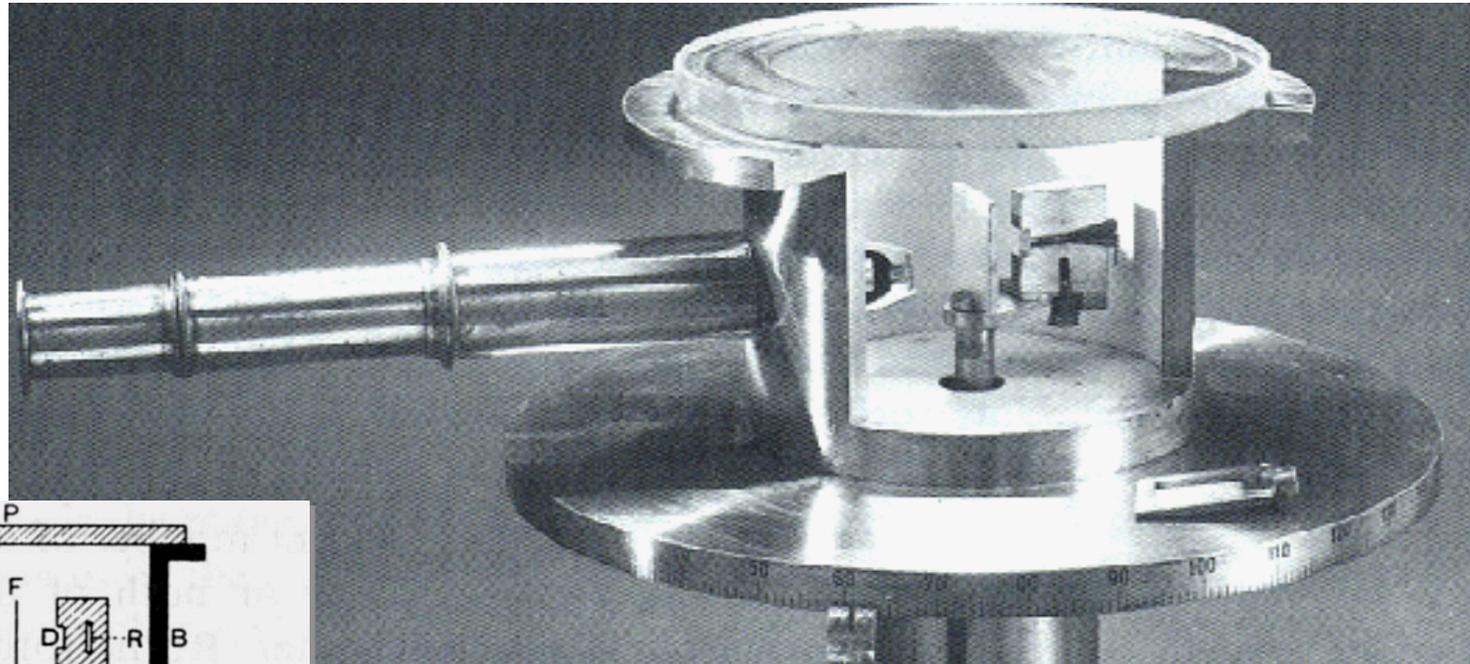
- Thomson 1897: freie e^- in Entladungsröhren
 v , q/m durch Lorentzkraft gemessen
 nicht von Apparat abhängig \Rightarrow UNIVERSELL
- Millikan 1910: $|e|$ durch Tröpfchenversuch
- Thomson – Atom: diffuse Ladungsverteilung
 gestochen durch Rutherford, Geiger, Marsden \Rightarrow 
- Rutherford 1919: α = Helium-Kern
 $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$

 positiv geladenes Teilchen mit großer Reichweite
 vgl. $\frac{dE}{dx}|_{\alpha}$ $\frac{dE}{dx}|_p$
- Chadwick 1932: Neutron
 Rückstoßmessungen an H, He, N!
 Stoßgesetze: $m_n \approx m_p$

Ionenquellen und Massenspektrographen:

\Rightarrow **Kernmassen, Bindungsenergie**

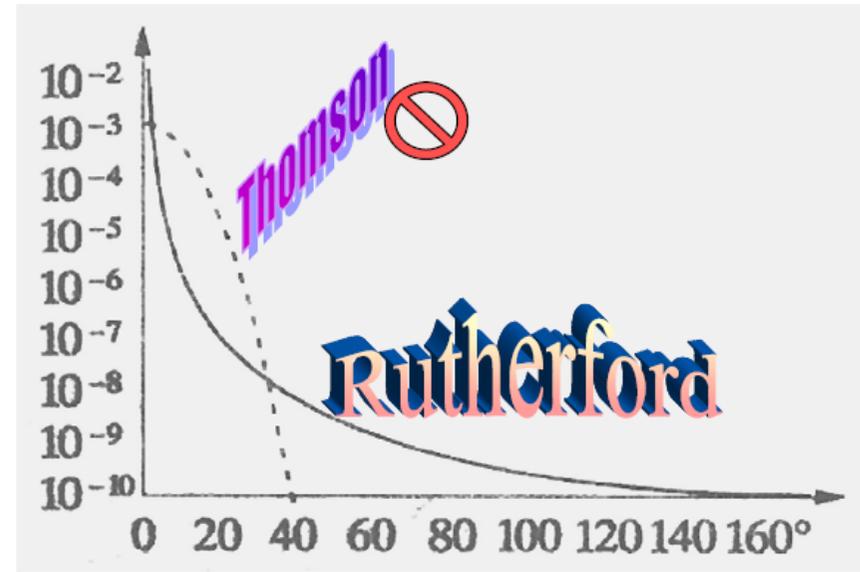
Das Rutherford Experiment: Entdeckung der Atomkerne



Bestätigung durch Messungen von Geiger und Marsden

Variation of scattering with ϕ

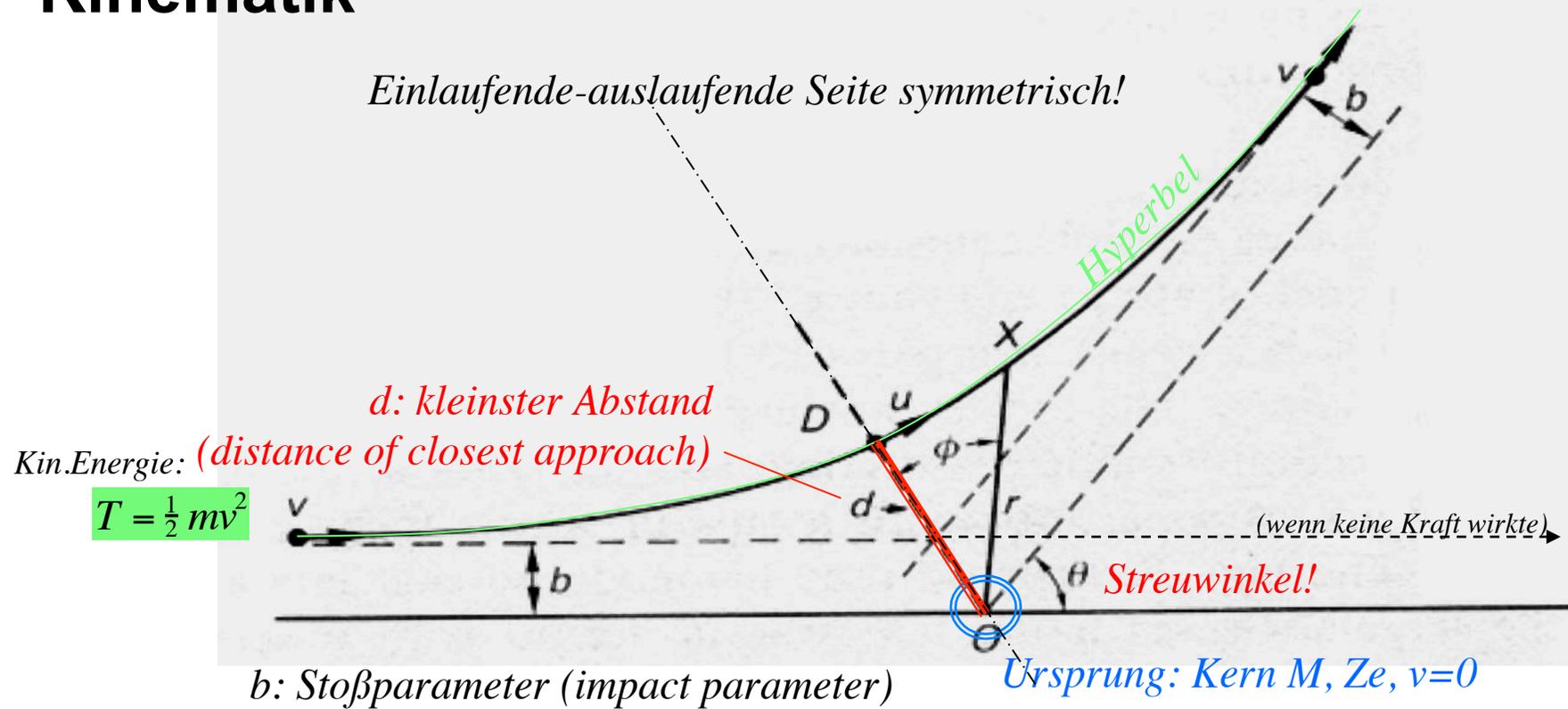
I Angle of deflection, ϕ	II $\operatorname{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi$	III SILVER IV	
		Number of scintillations, N	$\frac{N}{\operatorname{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi}$
150°	1.15	22.2	19.3
135	1.38	27.4	19.8
120	1.79	33.0	18.4
105	2.53	47.3	18.7
75	7.25	136	18.8
60	16.0	320	20.0
45	46.6	989	21.2
37.5	93.7	1760	18.8
30	223	5260	23.6
22.5	690	20300	29.4
15	3445	105400	30.6
30	223	5.3	0.024
22.5	690	16.6	0.024
15	3445	93.0	0.027
10	17330	508	0.029
7.5	54650	1710	0.031
5	276300	—	—



Rutherford-klassisch

Kinematik

Einlaufende-auslaufende Seite symmetrisch!



d: kleinster Abstand

Kin.Energie: (distance of closest approach)

$$T = \frac{1}{2} mv^2$$

b: Stoßparameter (impact parameter)

Ursprung: Kern M, Ze, v=0

Wenn $b=0$: Zurücklaufen des Projektils nach Annäherung auf d_0

Energieerhaltung:

$$E_{pot} = T \text{ und } \frac{1}{2} mv^2 d_0 = Zze^2 / 4\pi\epsilon_0$$

$$E_{pot} = \frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot d_0}$$

==> Gesucht: d_0 als $f(\theta)$

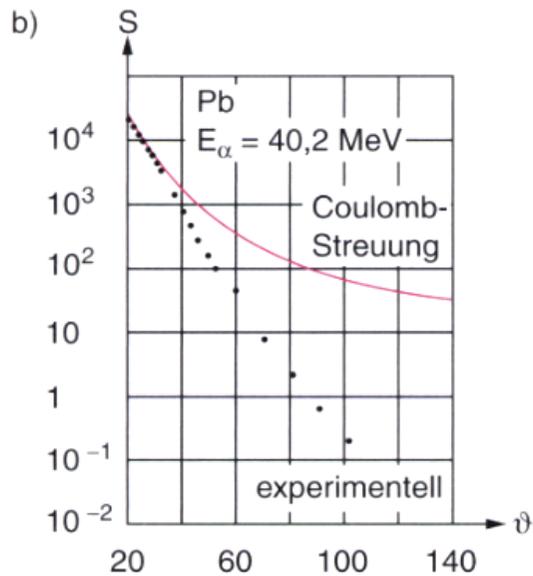
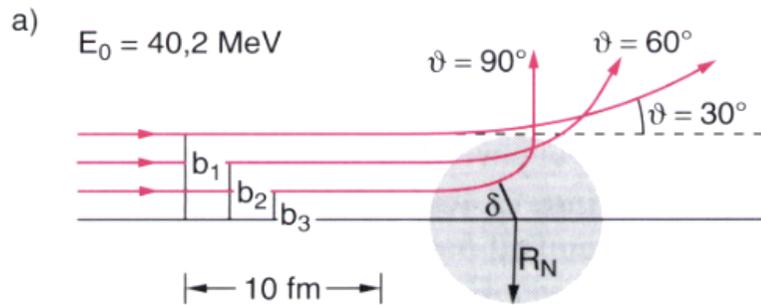


Abb. 2.4a,b. Streuung von α -Teilchen mit fester Anfangsenergie $E = 40,2 \text{ MeV}$. (a) Anschauliche Darstellung Abhängigkeit $b(\vartheta) \rightarrow \vartheta(\delta)$. (b) Vergleich experimenteller Streuraten S bei der Streuung von α -Teilchen an Bleikern mit der berechneten Coulomb-Streuung [2.4]

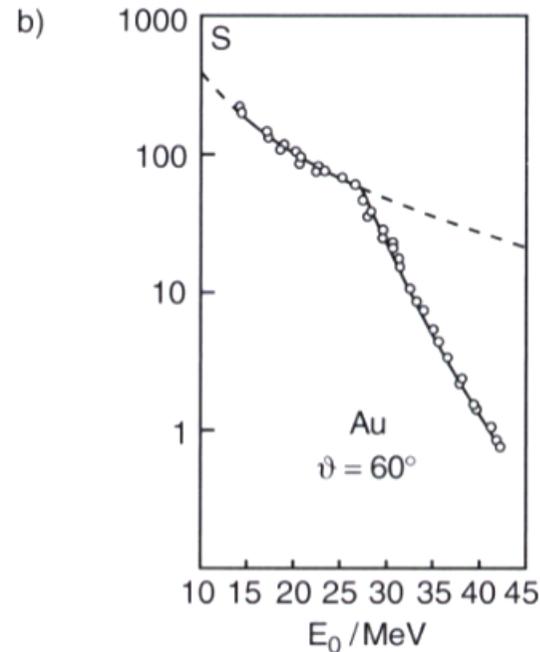
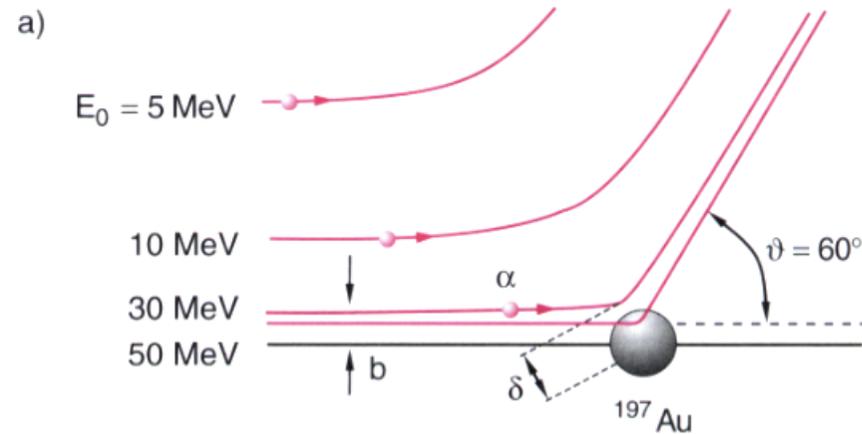


Abb. 2.5a,b. Streuung von α -Teilchen an Goldkernen bei festem Streuwinkel ϑ . (a) Bahn der α -Teilchen bei verschiedenen Einschussenergien; (b) gemessene Streuraten [2.5]

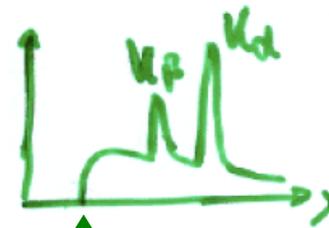
2.2 Nuklide

- Kernladungen: $Q = Z \cdot e$
- charakteristische Röntgenstrahlung:

$$E_{K\alpha} \propto (Z - 1)^2$$

Moseley – Gesetz

K_α : L \rightarrow K -Schale
 K_β : M \rightarrow K -Schale



$\lambda_m = hc / eU$ (Grenzwellenlänge)

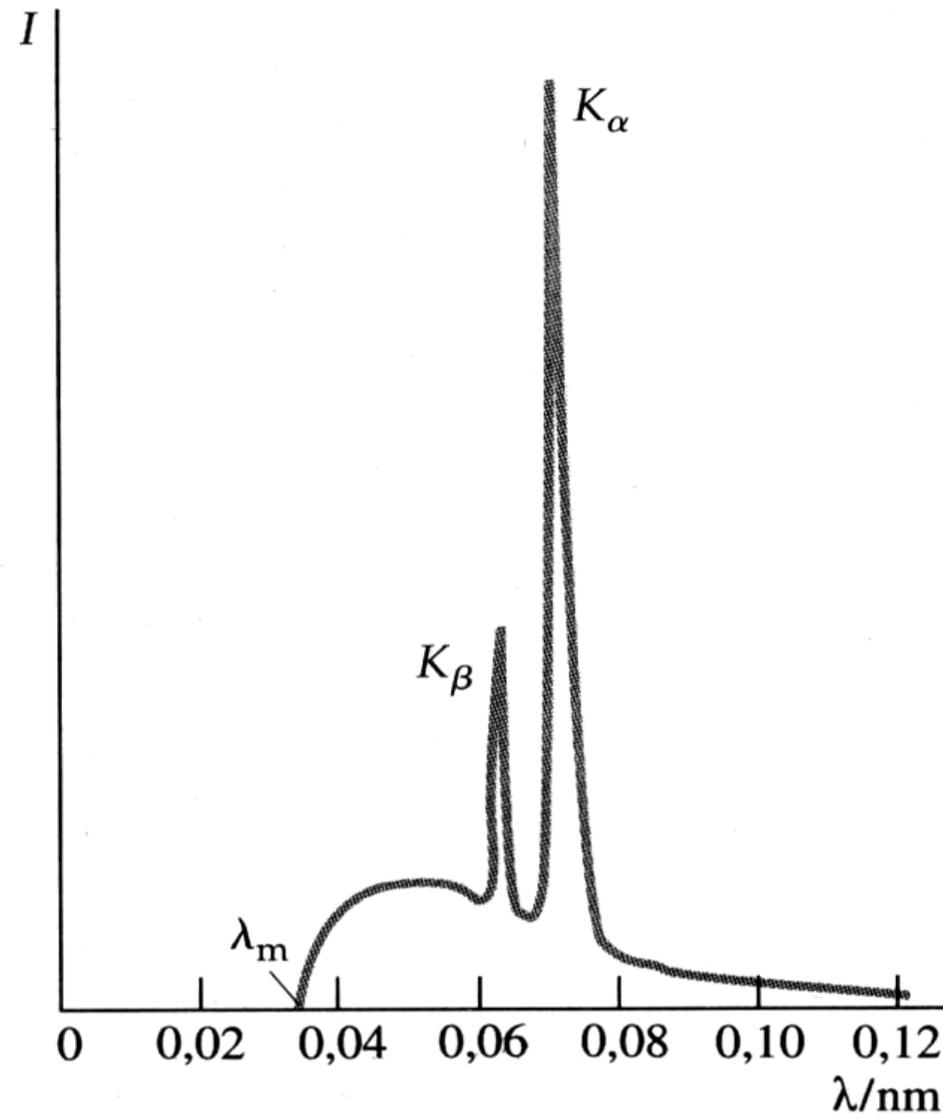
- Ladung des Protons: $\frac{|e_p + e_e|}{e} < 10^{-18}$

aus Ablenkung neutraler Moleküle
(+ kosmologischen Überlegungen,
Strukturbildung etc.)

- Massenzahl: $A = N + Z$
- \uparrow \uparrow
 Neutronen Protonen

} Nuklide

gleiches A : Isobare
 gleiches Z : Isotope
 gleiches N : Isotone



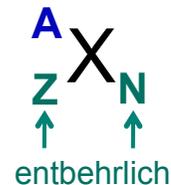
Bindungsenergie B

- Bindungszustand und Stabilität
- Massendefekt $\approx O(1\%)$
- präzise Messungen durch Atommassen

$$\begin{array}{c}
 \text{"Erwartung"} \qquad \qquad \qquad \text{"Messung"} \\
 \hline
 B(Z, A) = \left[\left(Z \cdot M(^1H) + (A - Z) \cdot M_n \right) - M(A, Z) \right] \cdot c^2 \\
 \downarrow \\
 = M_p + m_e + 13.6 \text{ eV}
 \end{array}$$

$M_p = 938.272 \text{ MeV}$
 $M_n = 939.566 \text{ MeV}$
 $m_e = 0,511 \text{ MeV}$

- Nuklidbezeichnungen:



Massenspektrometrie (Aston 1919)

- Ablenkung in **elektrischen** und **magnetischen** Feldern (Lorentzkraft)

$$r_E = \frac{M}{Q} \cdot \frac{v^2}{E}$$

(\Rightarrow kinetische Energie)

$$r_M = \frac{M}{Q} \cdot \frac{v}{B}$$

(\Rightarrow Impuls)

- Doppelfokus – Massenspektrometer, Aston – Massenspektrometer

- $\frac{M}{Q} = \frac{B^2 r^2}{2U} \quad r = \frac{\sqrt{2U}}{B} \sqrt{\frac{M}{Q}}$

- Auflösung: $\frac{\Delta r}{r} = 1 - \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \approx 10^{-2}$

- $U: 3000 \text{ V} \quad , \quad B = 0.12 \text{ T} \quad , \quad r \approx 500 \text{ mm}$

- Eichung durch ^{12}C : atomare Masseneinheit 1 u

$$1 \text{ u} = 1/12 M(^{12}\text{C}) = 931.494 \text{ MeV} \quad (< m_p)$$

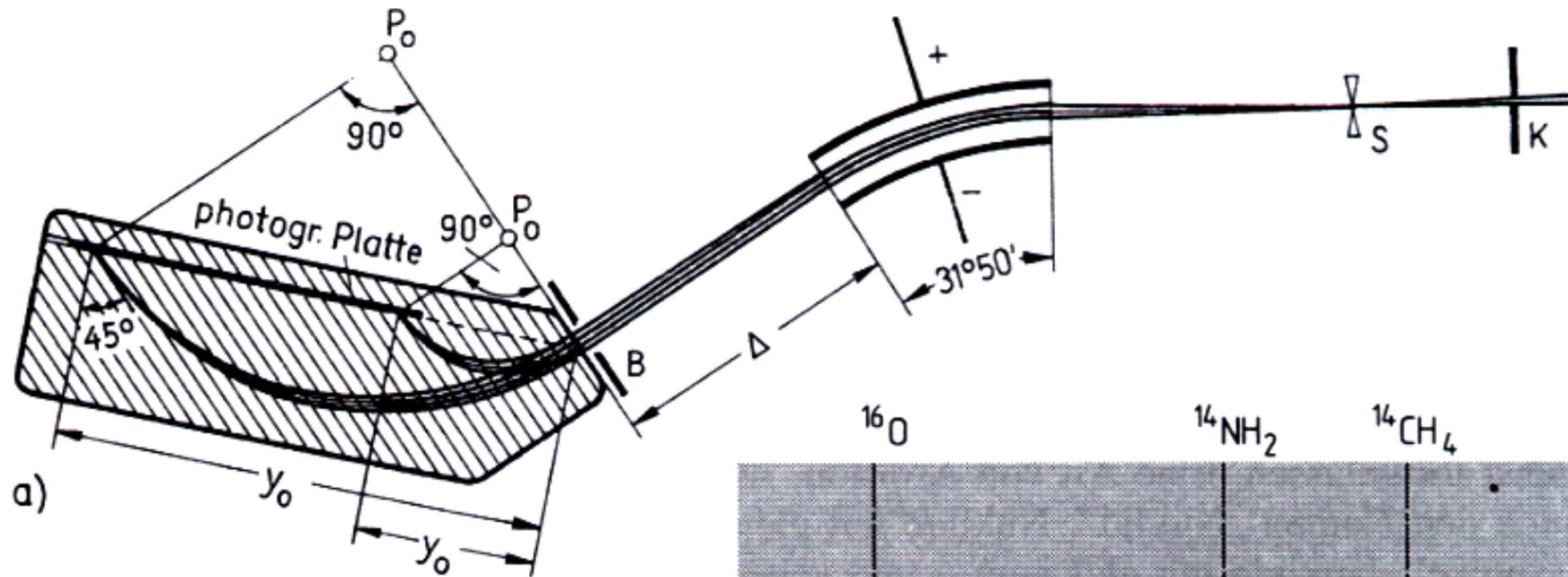
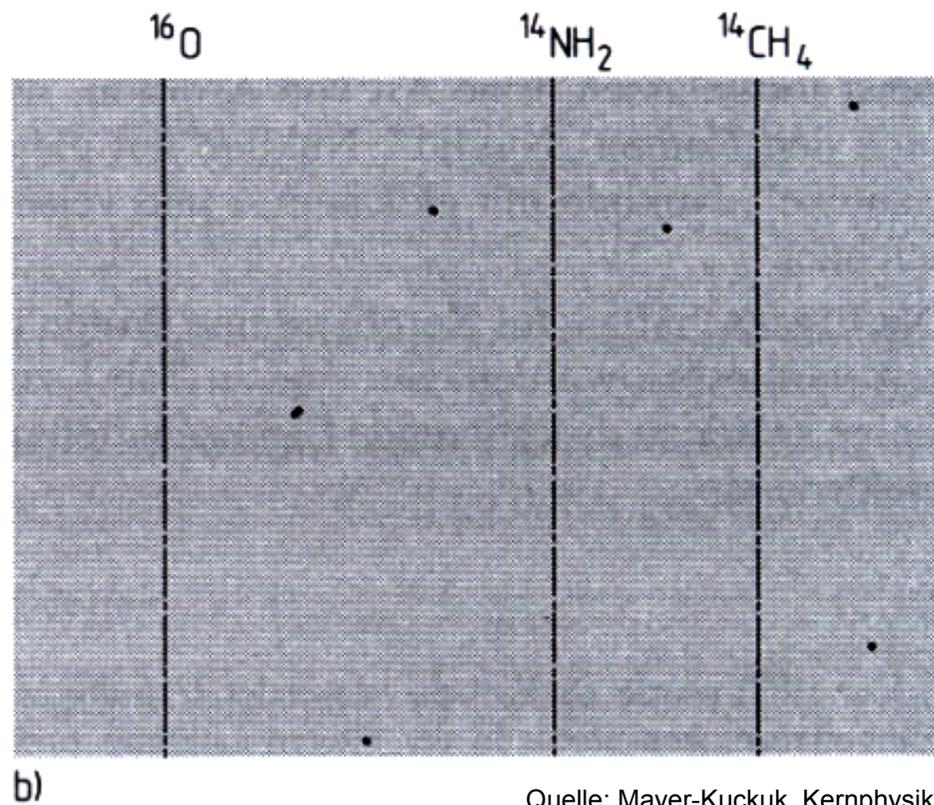
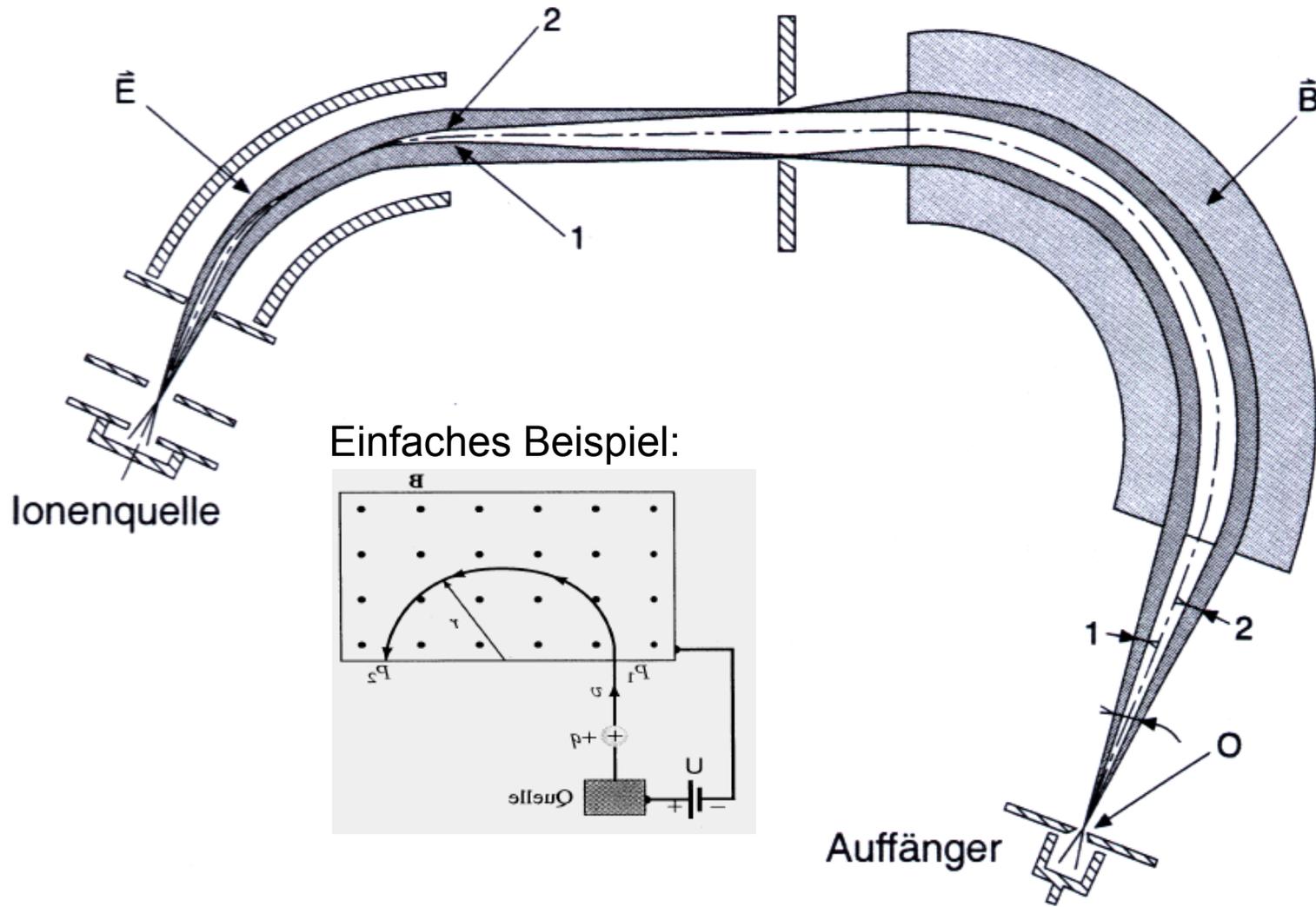


Fig. 9
 a) Feldanordnung des Mattauchschen Massenspektrographen
 b) drei mit diesem Instrument aufgenommene Linien zur Massenzahl 16 [Bie 55]



Quelle: Mayer-Kuckuk, Kernphysik

Massenspektrometer



[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

Massenbestimmung

- durch Energiebilanz in Kernreaktionen



↑
thermische Energie $\approx 1/40$ eV

$$E_\gamma + \frac{E_\gamma^2}{2M({}^2H)} \approx B({}^2H) = 2.2 \text{ MeV}$$

Rückstoß

- sonst: 3 bekannte Massen + alle kinetischen Energien messen !

Elementhäufigkeiten

- Sonnensystem:
 - Erde
 - Mond
 - Meteoriten
- } Proben
-
- außerhalb: kosmische Strahlung
 - Primärstrahlung
 - Ballon- und Satellitenexperimente

Elementhäufigkeiten

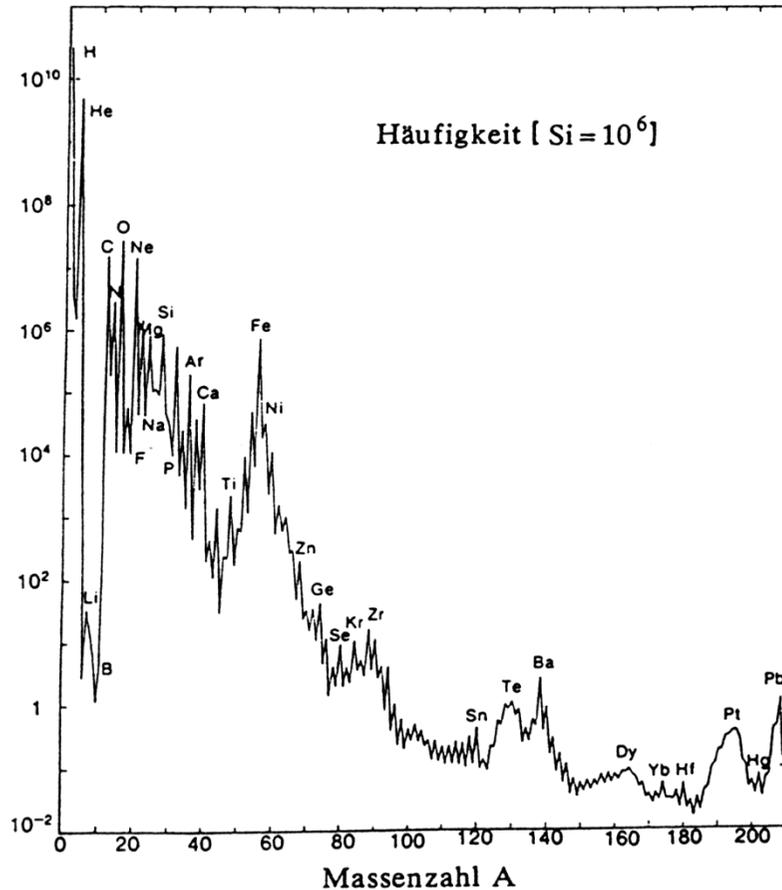
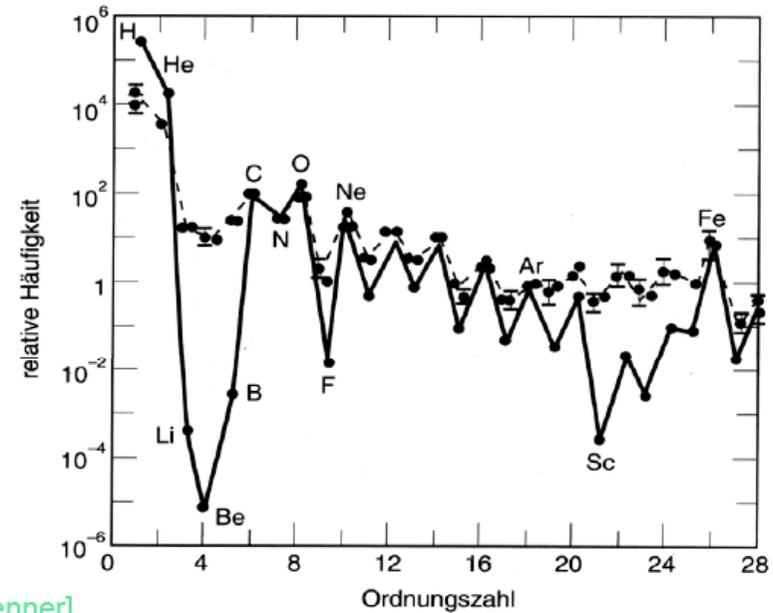


Abb. 2.2. Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem als Funktion der Massenzahl A . Die Häufigkeit des Siliziums wurde auf 10^6 normiert. [Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]



[Goenner]

Abb. 1.26. Elementverteilung im Sonnensystem (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie entspricht der Elementverteilung in der kosmischen Strahlung am Rand der Erdatmosphäre [Rol87]. Die Normierung ist auf $C = 100$ bezogen.

Elementsynthese

- Quarks und Elektronen →

H	}	Urknall- Nukleosynthese
D		
He		
Li		
Be		
⋮	}	stellare Nukleosynthese
Fe		
SiFe	}	Supernova- Explosionen
⋮		
⋮		
- aus Urknall


- H₂O und C : aus Sternenbrennen

- Pb ... : aus Supernovae

2.3 Bindungsenergie

- $E_B \approx 7\text{-}8 \text{ MeV / Nukleon}$
- Bethe-Weizsäcker (1935): semiempirische Massenformel

$$M(A, Z) = N \cdot M_n + Z \cdot M_p + Z \cdot m_e$$

Bindung der
Nukleonen

$$\left\{ \begin{array}{l} - a_v \cdot A \\ + a_s \cdot A^{2/3} \end{array} \right.$$

Volumen-

Oberflächen-

Reduktion
der
Bindung

$$\left\{ \begin{array}{l} + a_c \cdot Z^2 / A^{1/3} \\ + a_a \cdot (N - Z)^2 / 4A \\ + a_p \cdot \delta / A^{1/2} \end{array} \right.$$

Coulomb-

Asymmetrie-

Paarungs-

energie

Ruhemassen der Teilchen

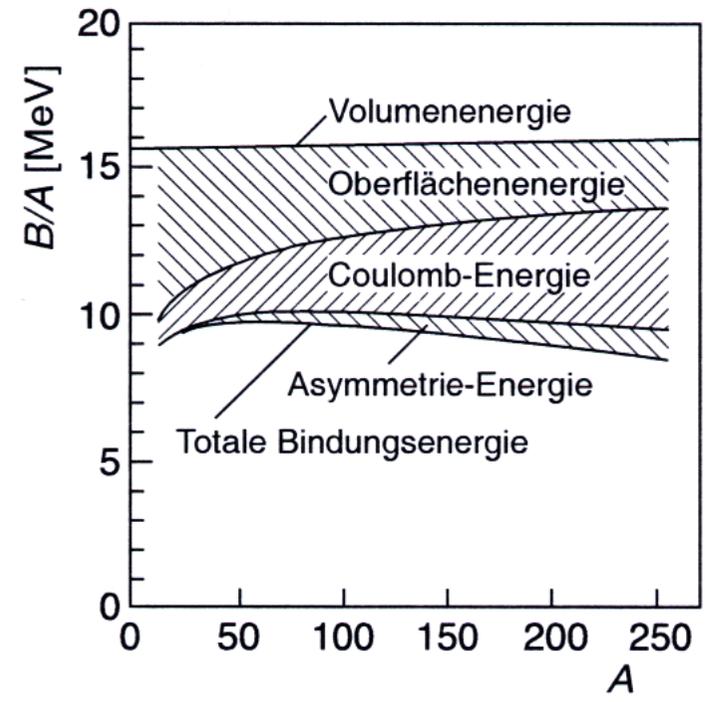
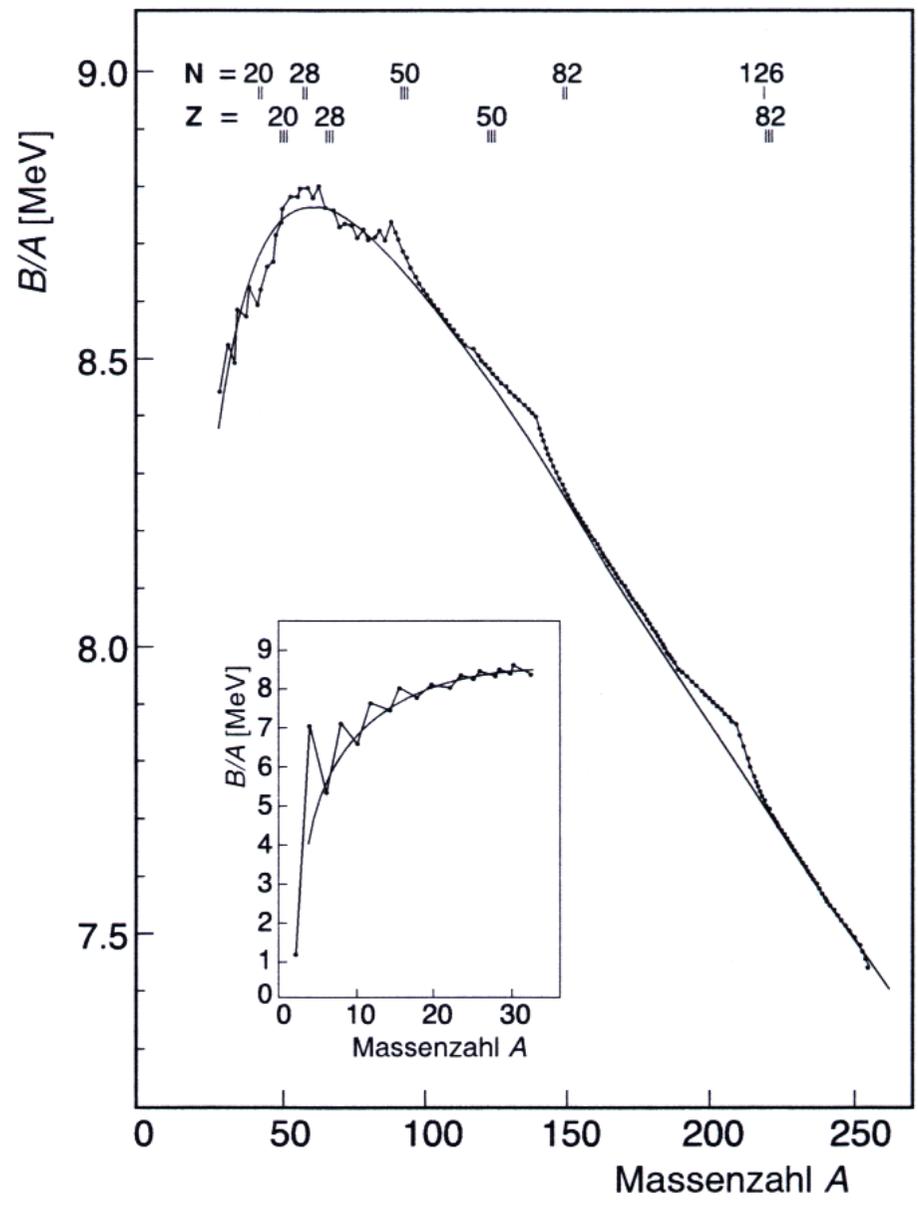
$$a_v = 16 \text{ MeV}$$

$$a_s = 17 \text{ MeV}$$

$$a_c = 0,7 \text{ MeV}$$

$$a_a = 93 \text{ MeV}$$

$$\delta = \begin{matrix} \pm 11 \\ 0 \end{matrix} \text{ MeV}$$



[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

Tröpfchenmodell

- konstante Dichte: $M \propto A \propto R^3$
- kurze Reichweite der Bindungskraft
- Sättigung, nur nächste Nachbarn
- Deformierbarkeit
- Oberflächenspannung $\propto R^2 \propto A^{2/3}$



aber: mittlere freie Weglänge von Nukleonen im Kern ist groß

⇒ **Quantenflüssigkeit, "Fermigas"**

Coulombenergie: Coulombabstoßung der Protonen (alle untereinander)

$$E_C = \frac{3}{5} \frac{Z(Z-1)\alpha\hbar c}{R} \rightarrow \propto \frac{Z^2}{R} = \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

Paarungsenergie: Spin-Doublets $\uparrow\downarrow$ besonders stabil

$$\delta = \begin{cases} +11\text{MeV} & \text{für } gg - \text{Kerne} \\ 0 & \text{für } ug-, gu - \text{Kerne} \\ -11\text{MeV} & \text{für } uu - \text{Kerne} \end{cases}$$

g = gerade Anzahl
u = ungerade Anzahl

$\uparrow\uparrow$
N Z

Isobare A=14: Multipletts und Isospin

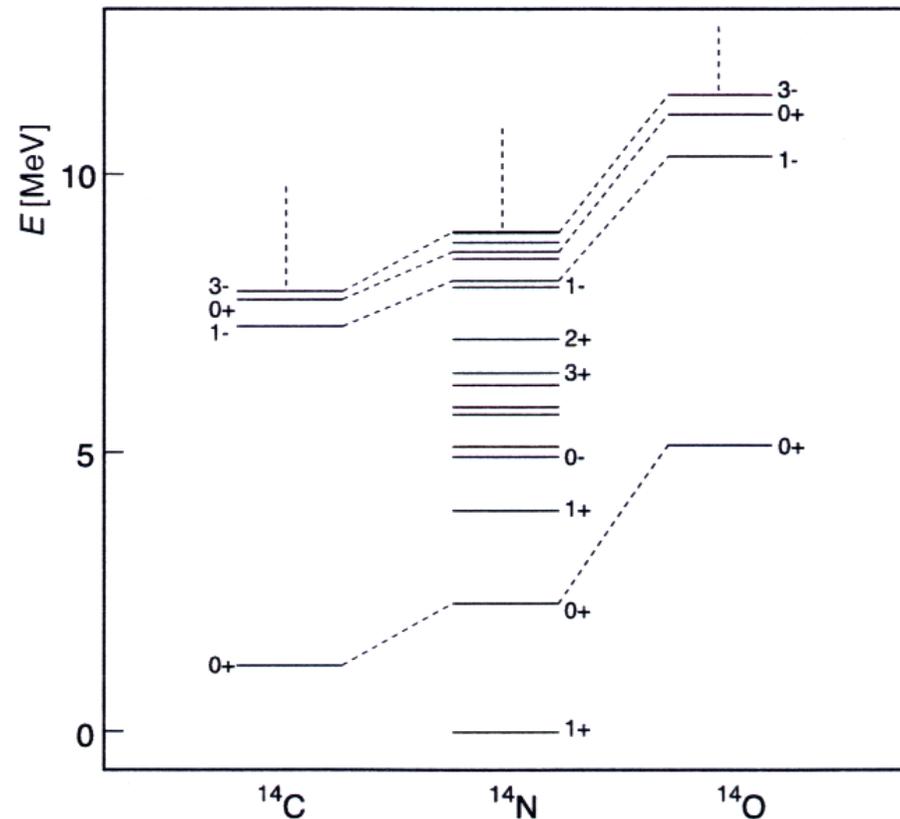


Abbildung 2.6. Niederenergetische Energieniveaus der drei stabilsten Isobaren mit $A = 14$. Drehimpuls J und Parität P der wichtigsten Zustände sind angegeben. Analogzustände in den drei Kernen sind durch gestrichelte Linien miteinander verbunden. Als Nullpunkt der Energieskala wurde der Grundzustand von ${}^{14}_7\text{N}_7$ gewählt.

[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]