

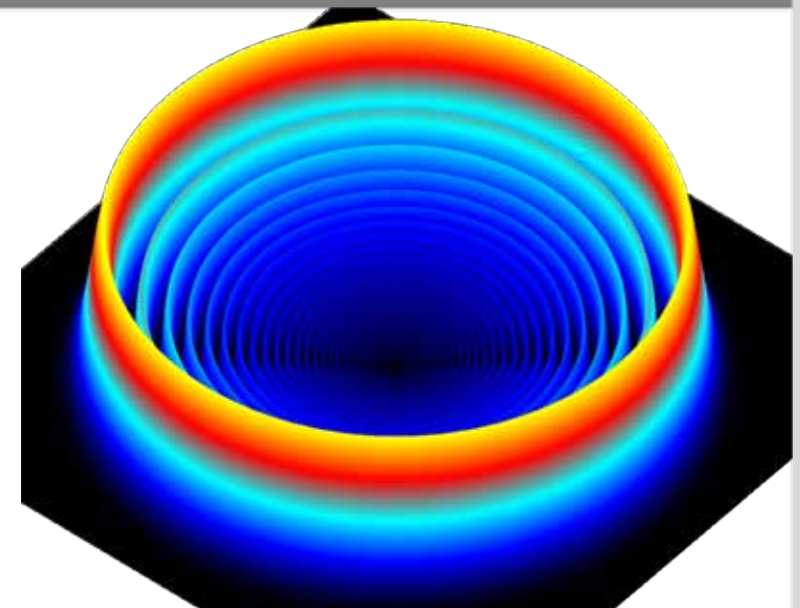
Atome, Moleküle & Kerne

Sommersemester 2024
Vorlesung # 3, 23.04.24

Thomas Müller, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

2. Experimentelle Grundlagen – Atome

- 2.2 Eigenschaften von Atomen
- 2.3 Atomstruktur & Streuexperimente



Energie- & Zeitskalen

■ Typische **Energie-** und **Zeit-** Skalen von atomaren Prozessen

- **Rotation von Molekülen**

Energieskala: 10^{-6} eV (**μ eV**)

Zeitskala: 10^{-12} s (**ps**)



- **Vibration von Molekülen**

Energieskala: 10^{-3} eV (**meV**)

Zeitskala: 10^{-15} s (**fs**)

- **Bindungsenergie** leichtes Atom

Energieskala: **einige eV**

Anregung: Licht (optisch)

UV

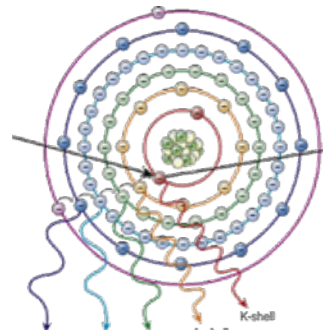


IR

- **Bindungsenergie** schweres Atom

Energieskala: **einige keV**

Anregung: Röntgenphoton



- **Bindungsenergie** Kerne

Energieskala: **einige MeV**

Anregung: Gammaquanten

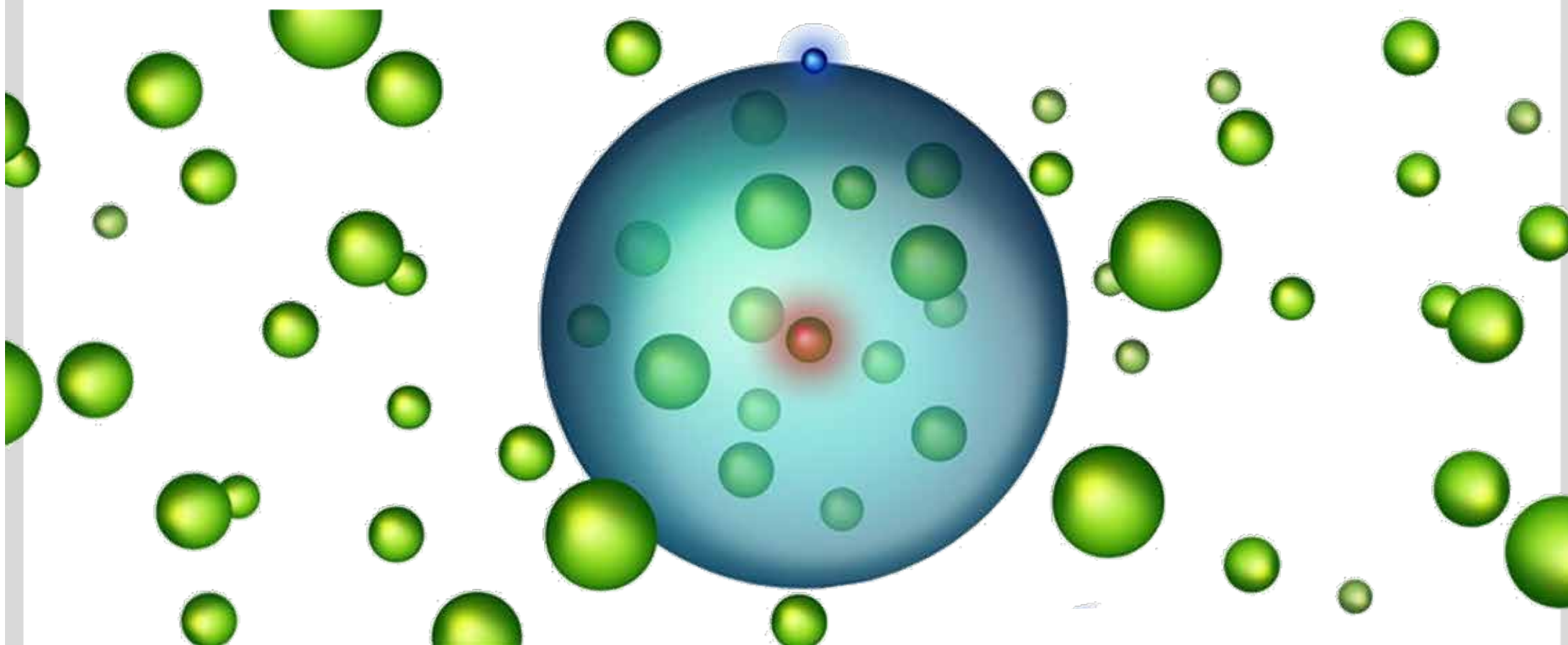


- **Anregungsenergien** Baryonen

Energieskala: **GeV**

Anregung: Teilchenstreuung

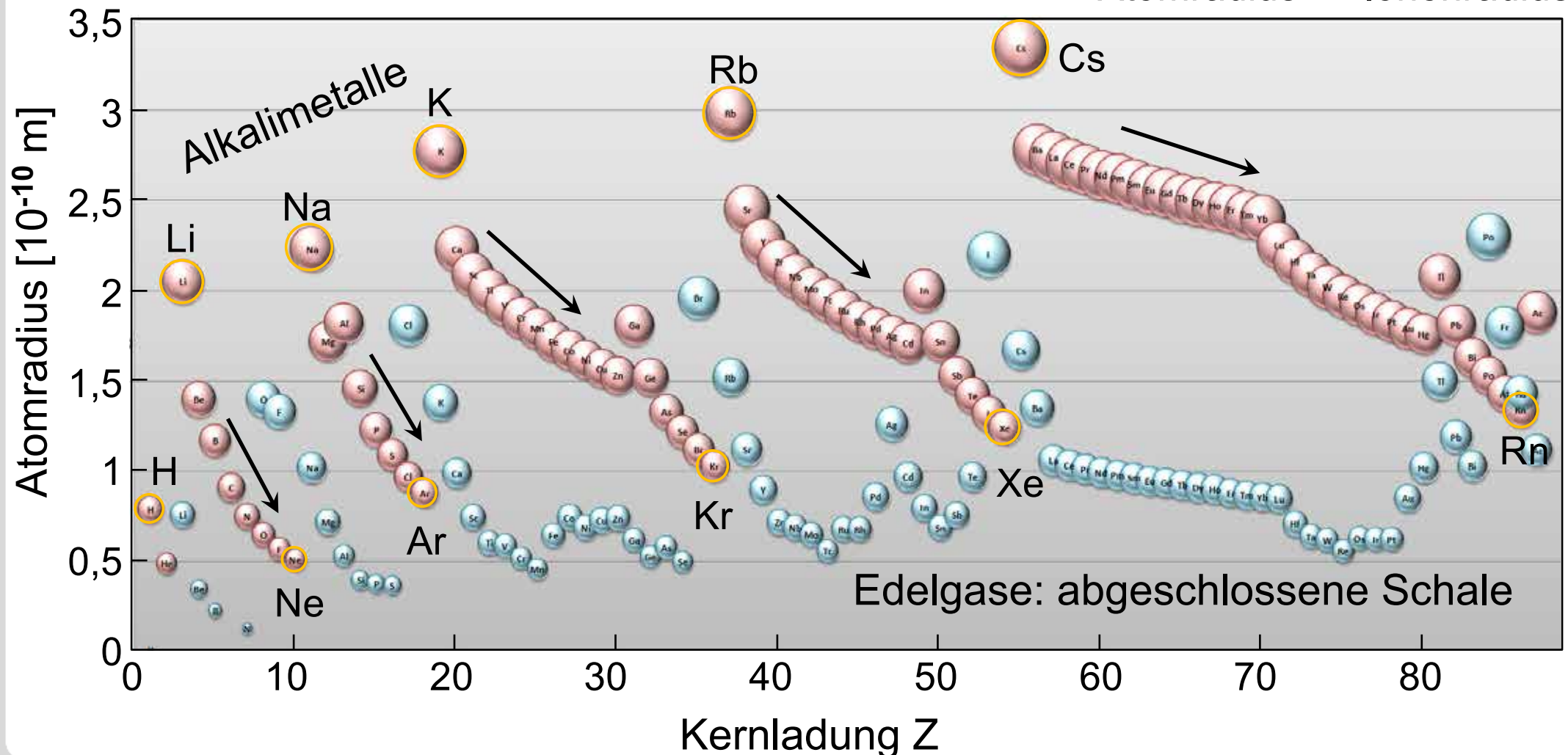




2.2 EIGENSCHAFTEN VON ATOMEN

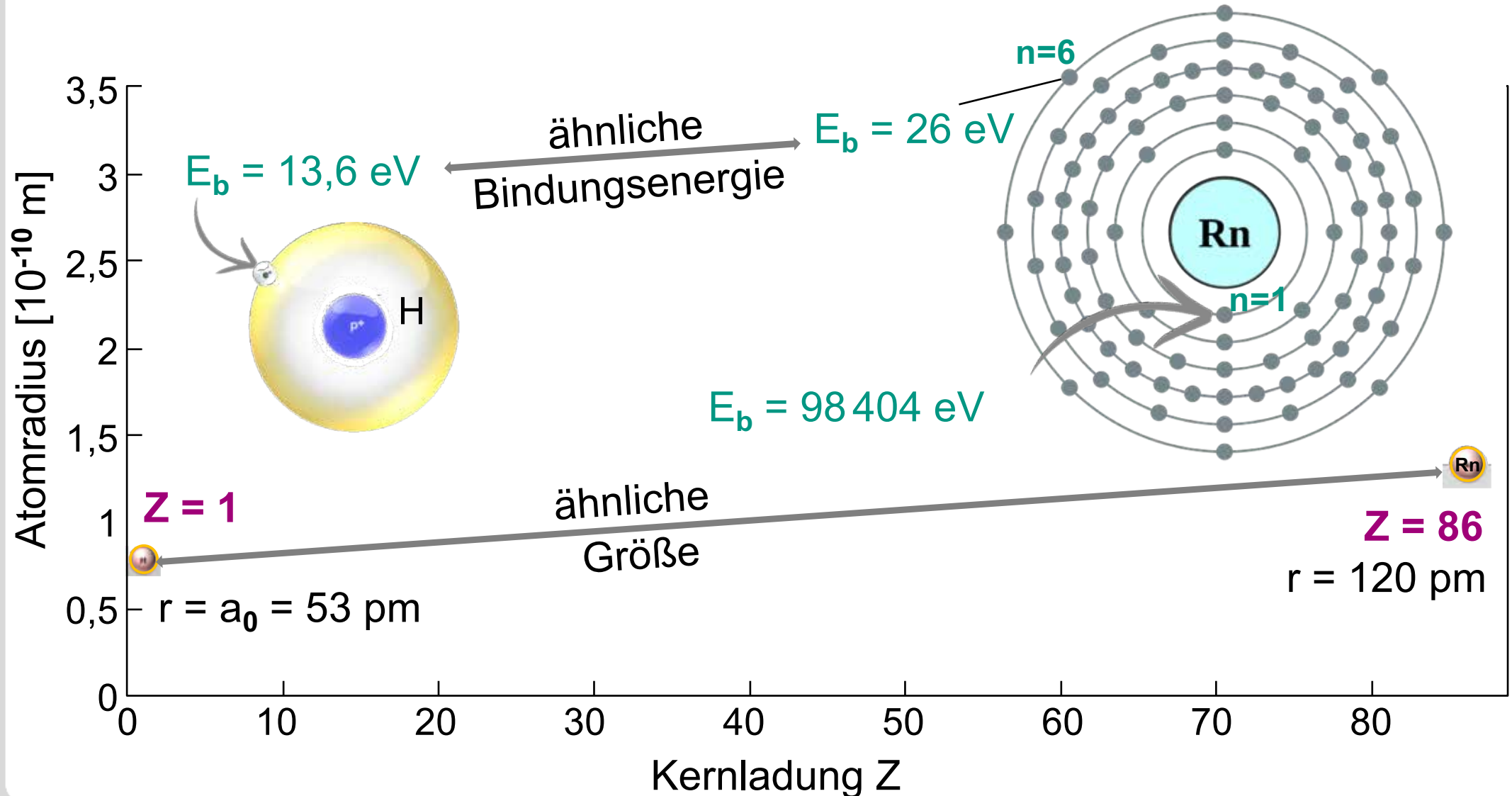
Atome – Größenskalen

- **Atomradien** korrelieren mit ihrer Stellung im Periodensystem der Elemente
(He: 122 pm, Li: 155 pm, O: 55 pm, Fe: 126 pm) ● Atomradius ● Ionenradius



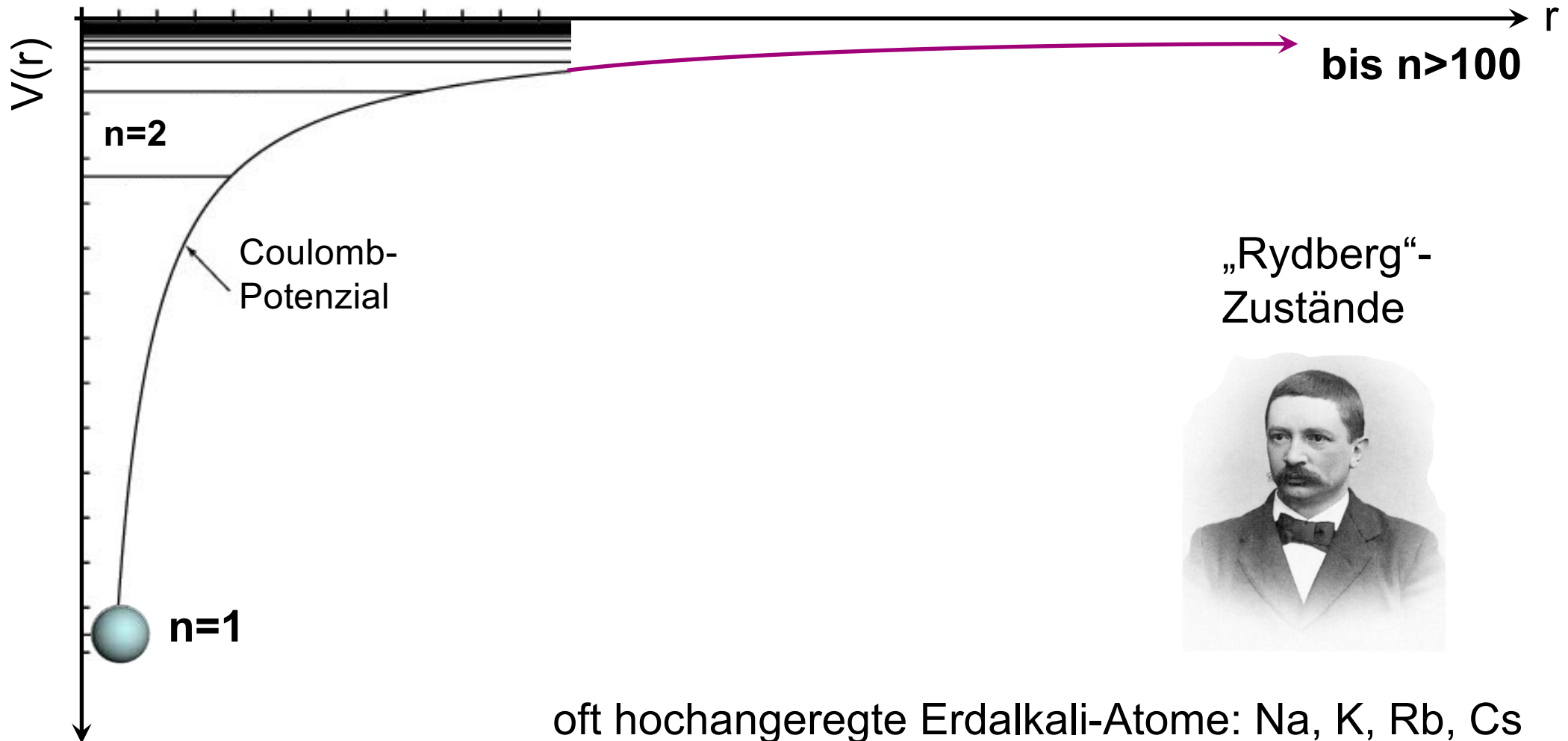
Größenskalen & Coulombpotential

- Coulombpotential $\sim Z$, aber Abschirmung durch Hüllenelektronen



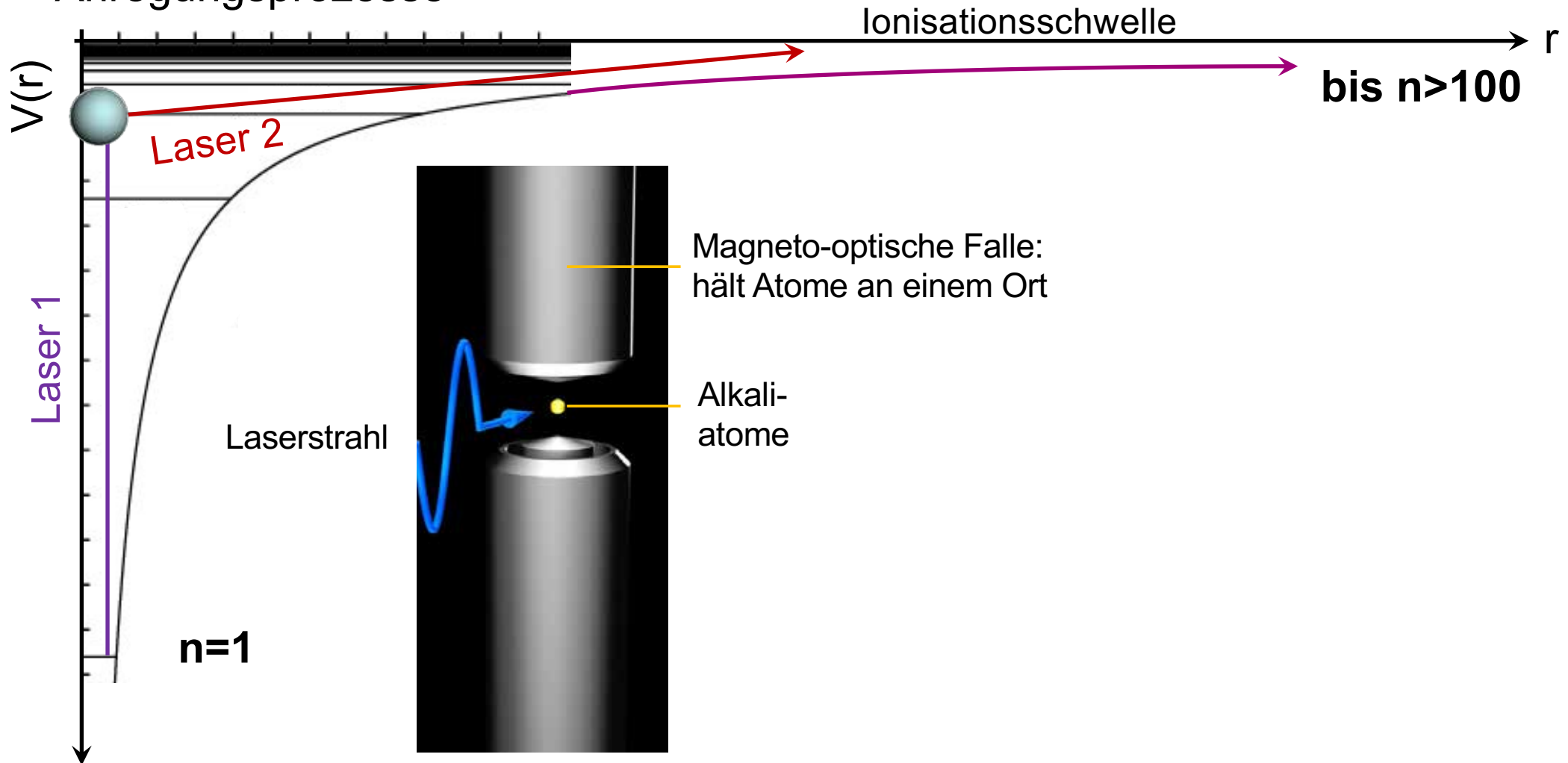
Wie erzeuge ich ein riesiges Atom?

- Rezept für sehr große Atome: kleines Z , hohe Quantenzahl n ,
Rydberg-Zustände sehr nahe an der Ionisationskante (nur wenige meV!!)



Wie erzeuge ich ein riesiges Atom?

- Erzeugung hochangeregter Rydberg-Zustände über verschiedene Laser-Anregungsprozesse



Atome – „Guinness Buch der Rekorde“

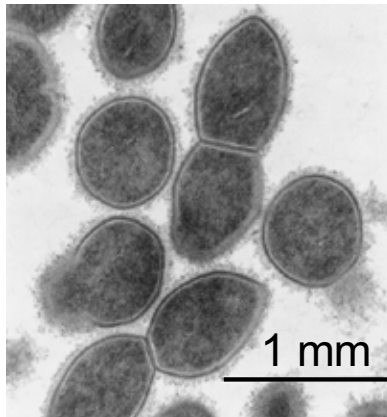
■ Rydberg-Atome: die „Giganten“ unter den Atomen



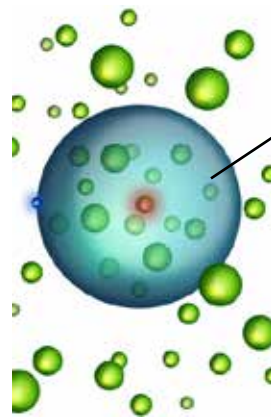
- Riesen-H-Atome mit Radien bis ~ 1 mm!
- Elektron in hochangeregtem Zustand n ($n = 20-600$)

$$r_n = n^2 \cdot a_0 = n^2 \cdot 52,9 \text{ pm}$$

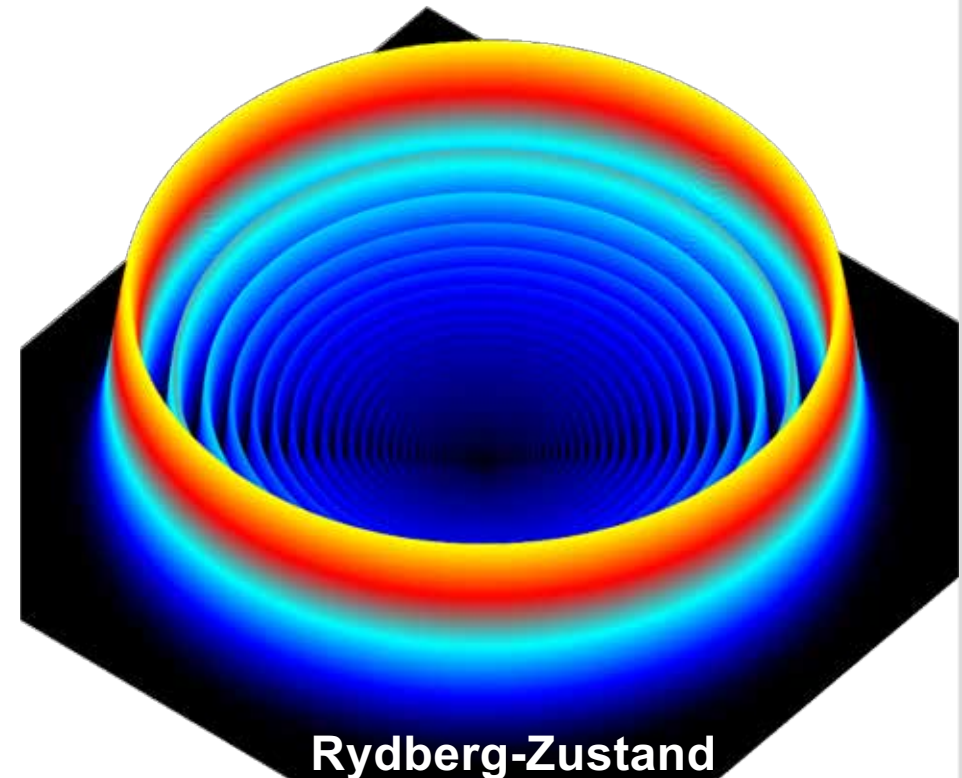
H-Atom mit Elektron im Zustand $n = 35$



bacterium



Rydbergatom
 $n = 600$



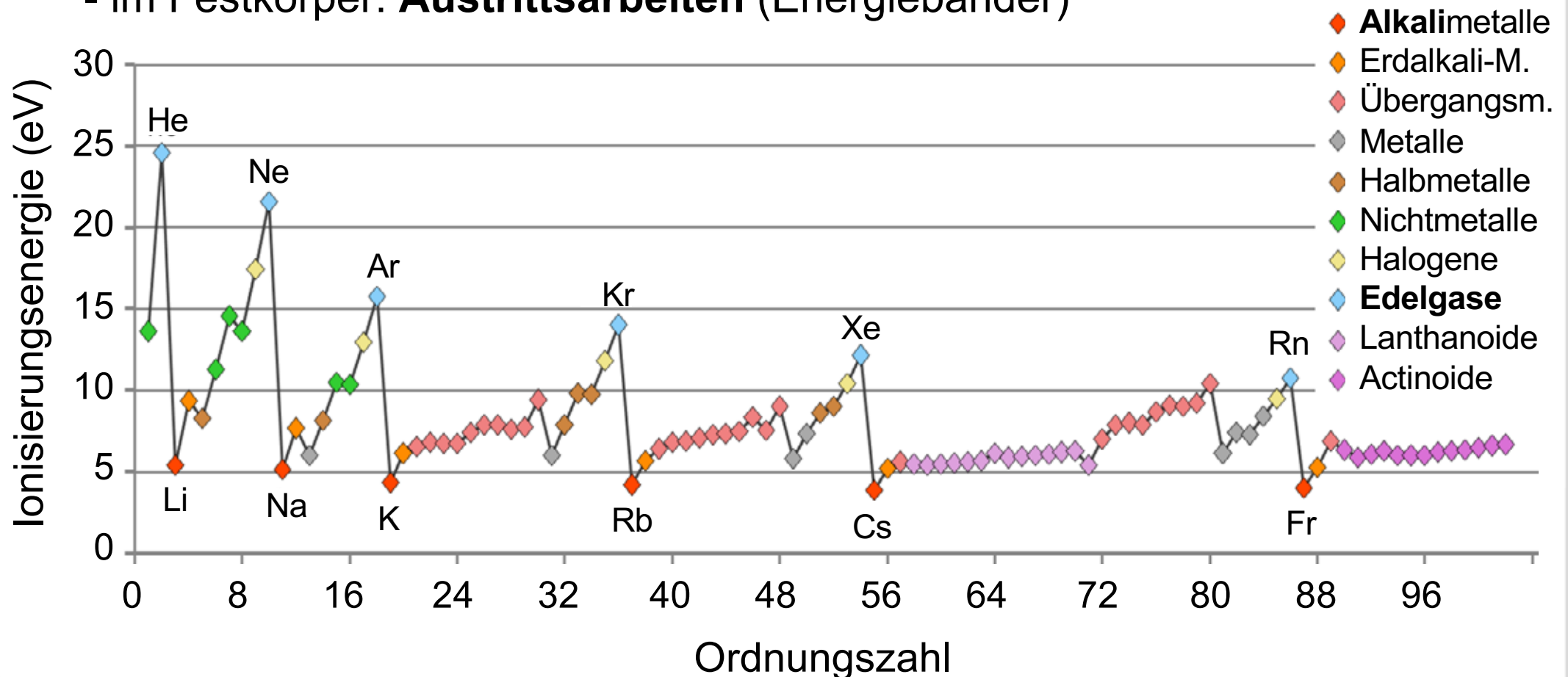
Rydberg-Zustand

- extrem **langlebige** hoch-angeregte Rydberg-Zustände n ($\tau \sim 1$ s)

Atome – Ionisationsenergien

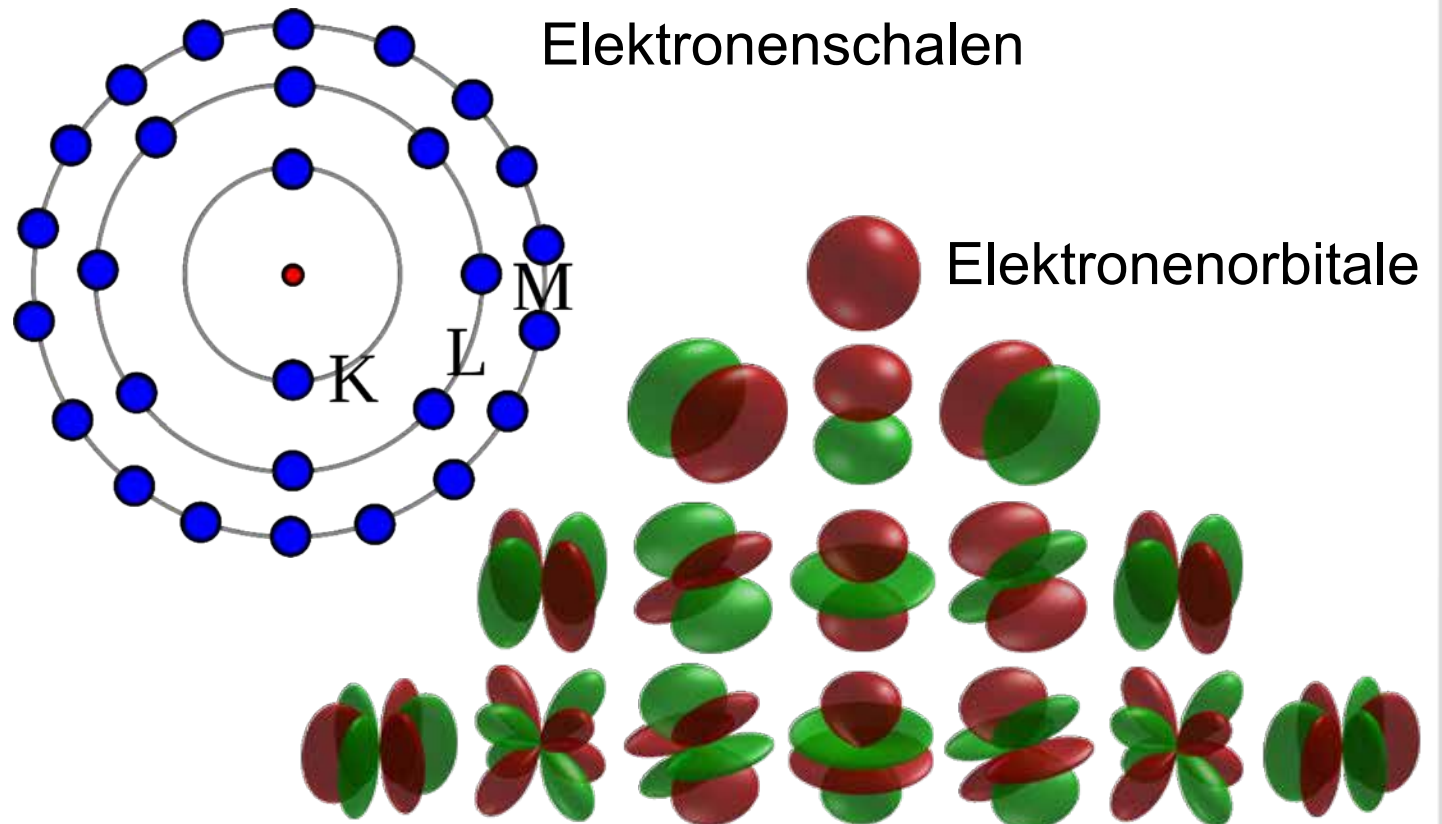
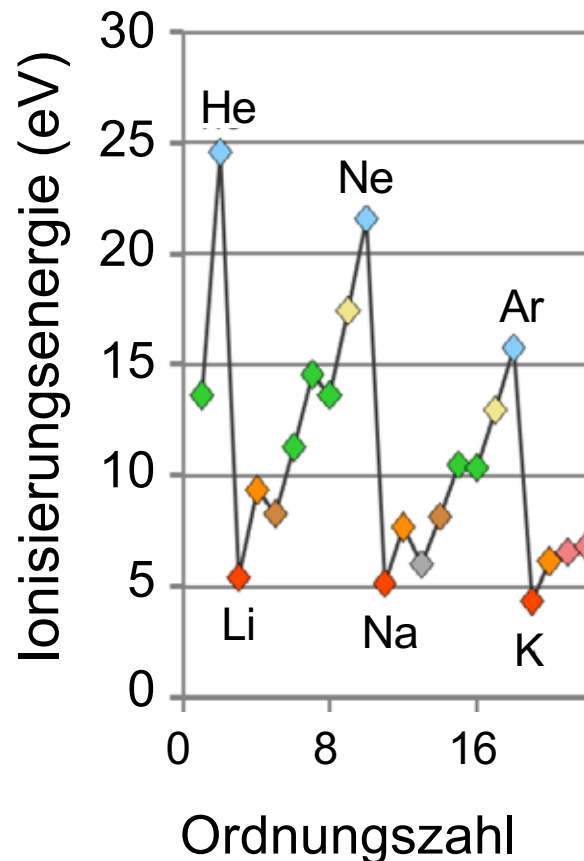
■ Ionisierungsenergien von freien Atomen

- hohe Werte für Edelgase: He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn: 10 eV...25 eV
- wichtig z.B. für **Ionisationsdetektoren** (Vieldrahtkammer, Driftkammer)
- im Festkörper: **Austrittsarbeiten** (Energiebänder)



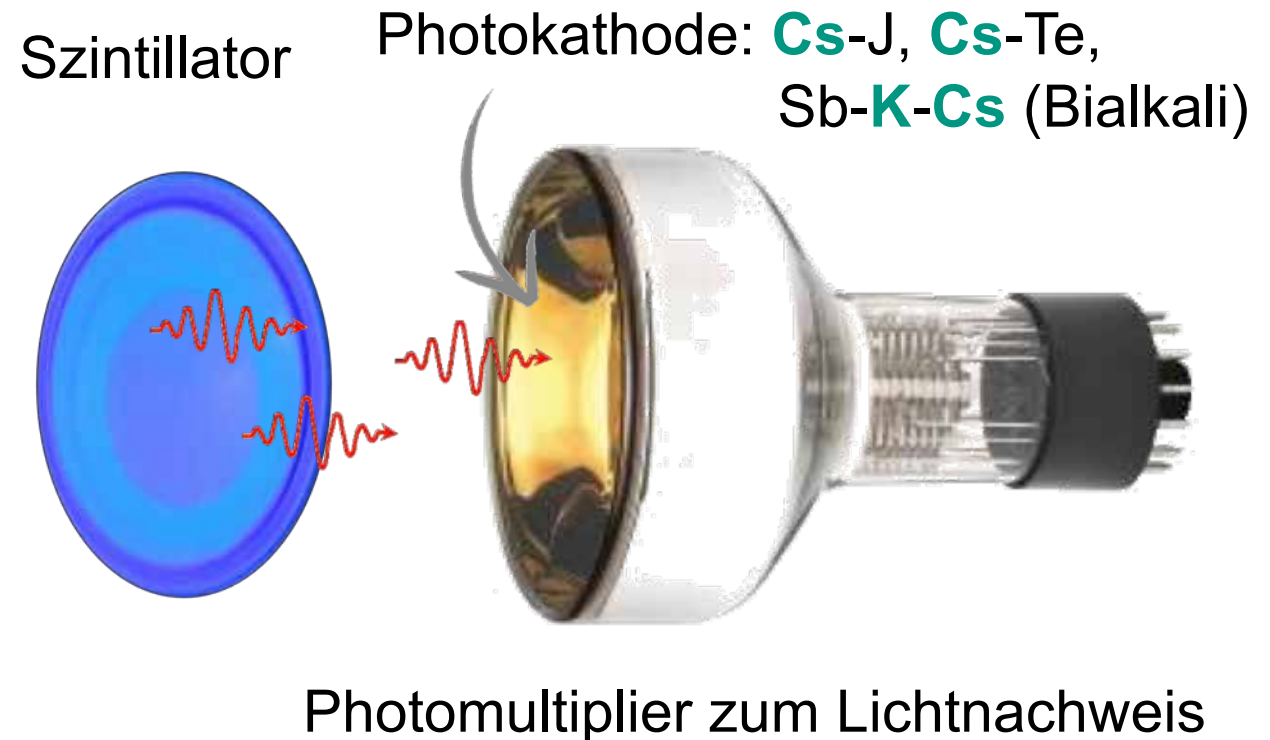
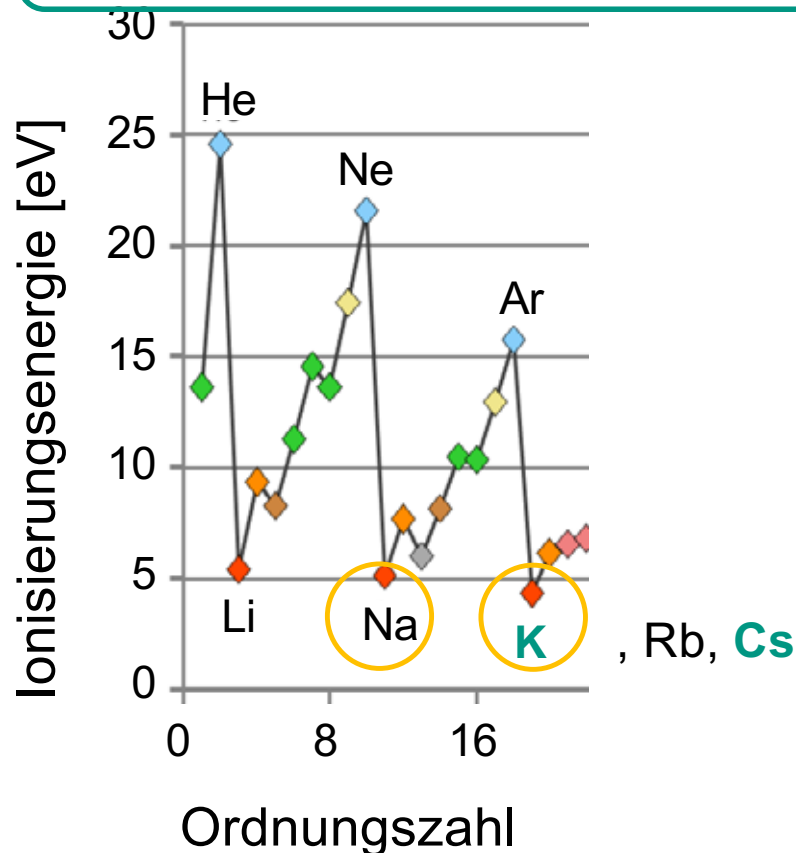
■ Ionisierungsenergien von freien Atomen

- erklärbar durch Elektronenschalen-Modell $\Rightarrow$ modern: Orbitale
- Effekte: höhere Kernladungszahl $Z \Rightarrow$ tieferes Coulombpotenzial
Teil-Abschirmung von Z durch tiefere Elektronenschalen



■ Ionisierungsenergien von freien Atomen

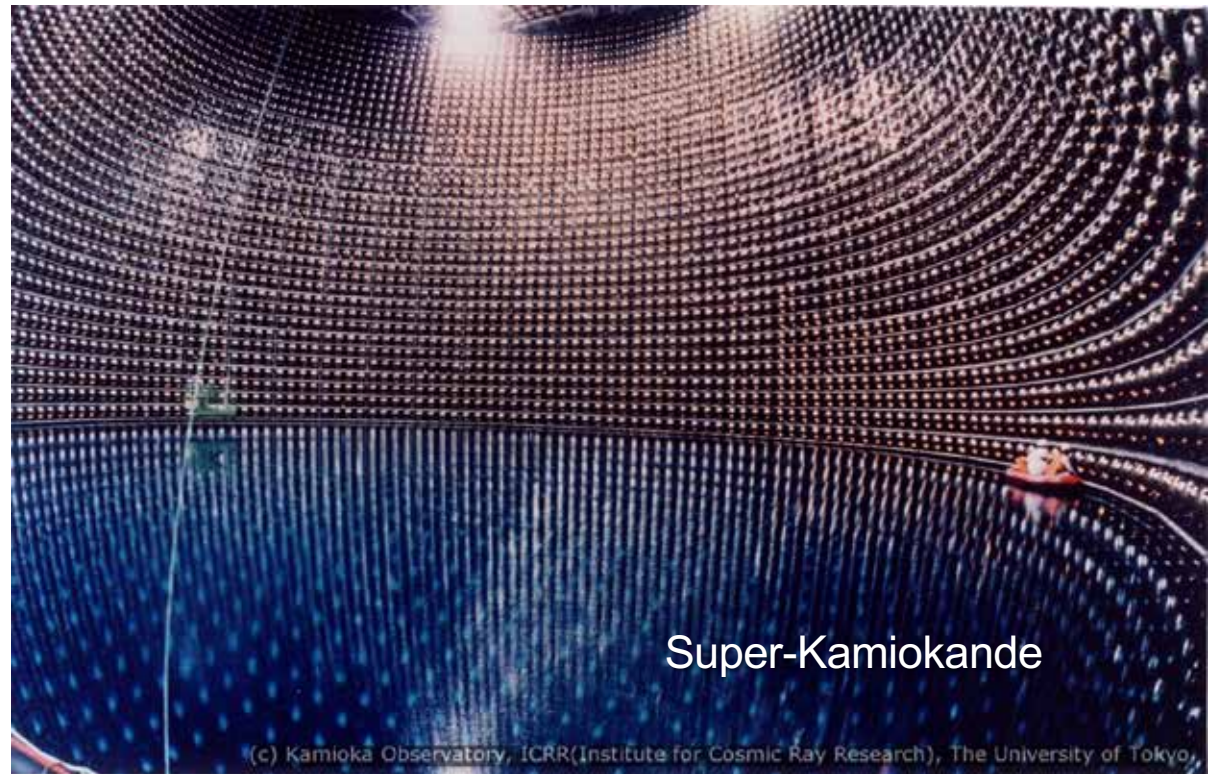
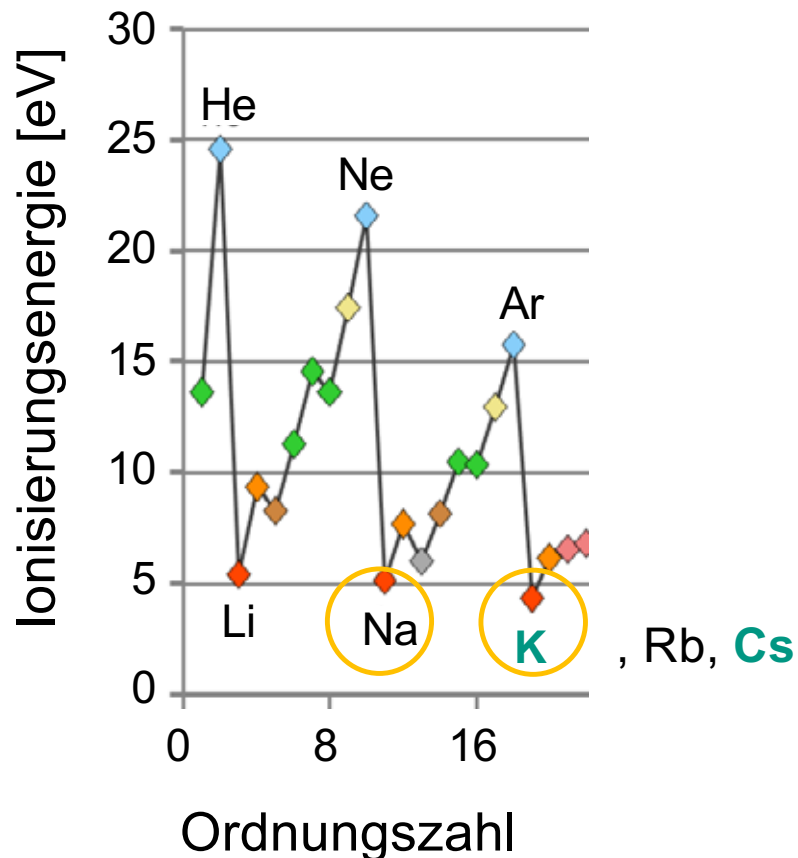
- wichtig für Auslegung von Teilchendetektoren (Gase, Flüssigkeiten)
- wenn nur wenig Energie zur Erzeugung eines freien Elektrons bereitsteht, nimmt man Erdalkali-Metalle (z.B. bei der Detektion von Licht!!!)



Atomare Ionisationsenergien

■ Ionisierungsenergien von freien Atomen

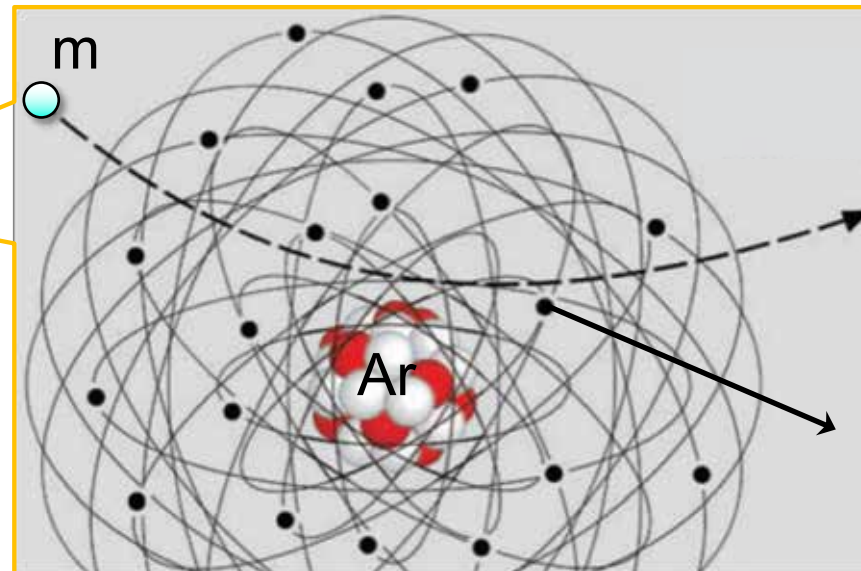
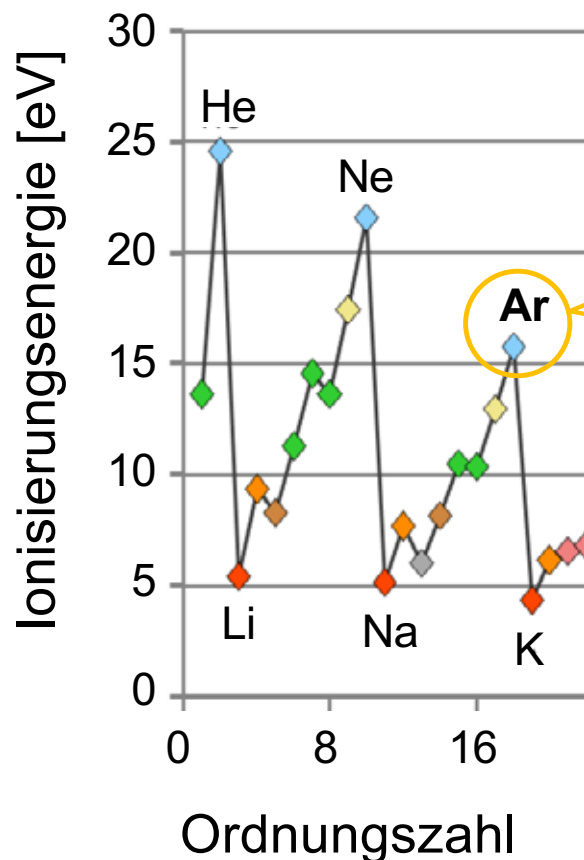
- wichtig für Auslegung von Teilchendetektoren (Gase, Flüssigkeiten)
- wenn nur wenig Energie zur Erzeugung eines freien Elektrons bereitsteht, nimmt man Erdalkali-Metalle (z.B. bei der Detektion von Licht!!!)



viele Photomultiplier zum Lichtnachweis

■ Ionisierungsenergien von freien Atomen

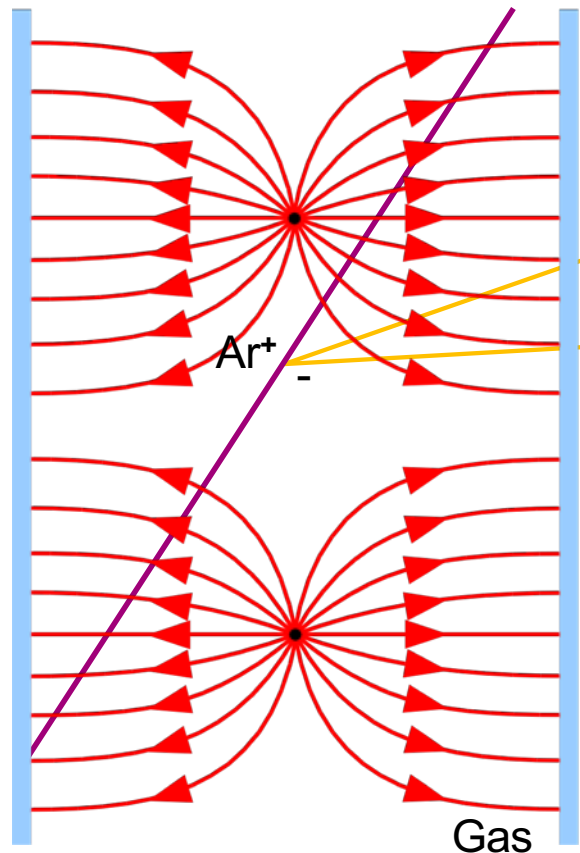
- wichtig für Auslegung von Teilchendetektoren (Gase, Flüssigkeiten)
- Vieldrahtkammern oder Driftdetektoren: **Ionisation durch Teilchen**
oft Betrieb mit Argon: $\Delta E_{\min} = 15,76 \text{ eV}$ pro Elektron/Ion-Paar



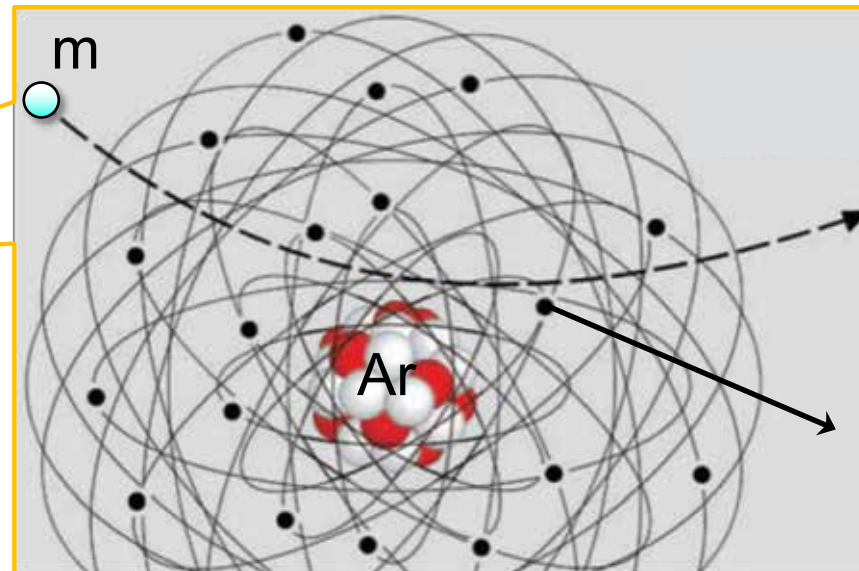
Atomare Ionisationsenergien

■ Ionisierungsenergien und Teilchendetektoren

- **Vieldrahtkammern** sind gefüllt mit einem inerten Zählgas (Edelgas Argon, & weitere Gasanteile)
- Zähldrähte zum Aufsammeln der erzeugten Ladungen (e^-)



Vieldrahtproportionalkammer, gefüllt mit Argon

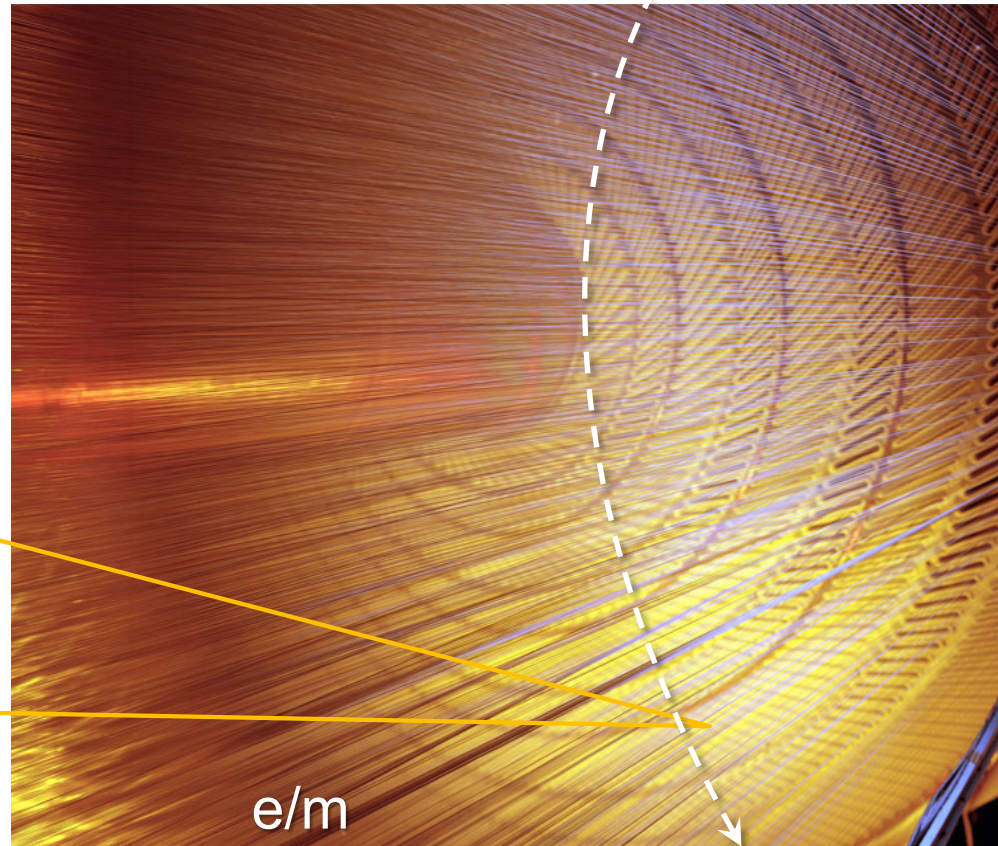
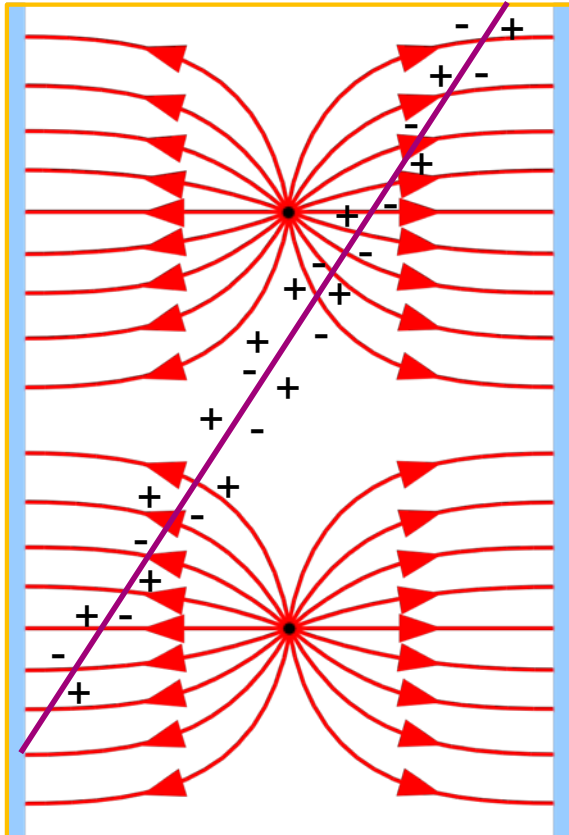


nachzuweisendes
geladenes
Teilchen

Elektron aus
Ionisation eines
Ar-Atoms

■ Ionisation von Atomen zur Spurrekonstruktion

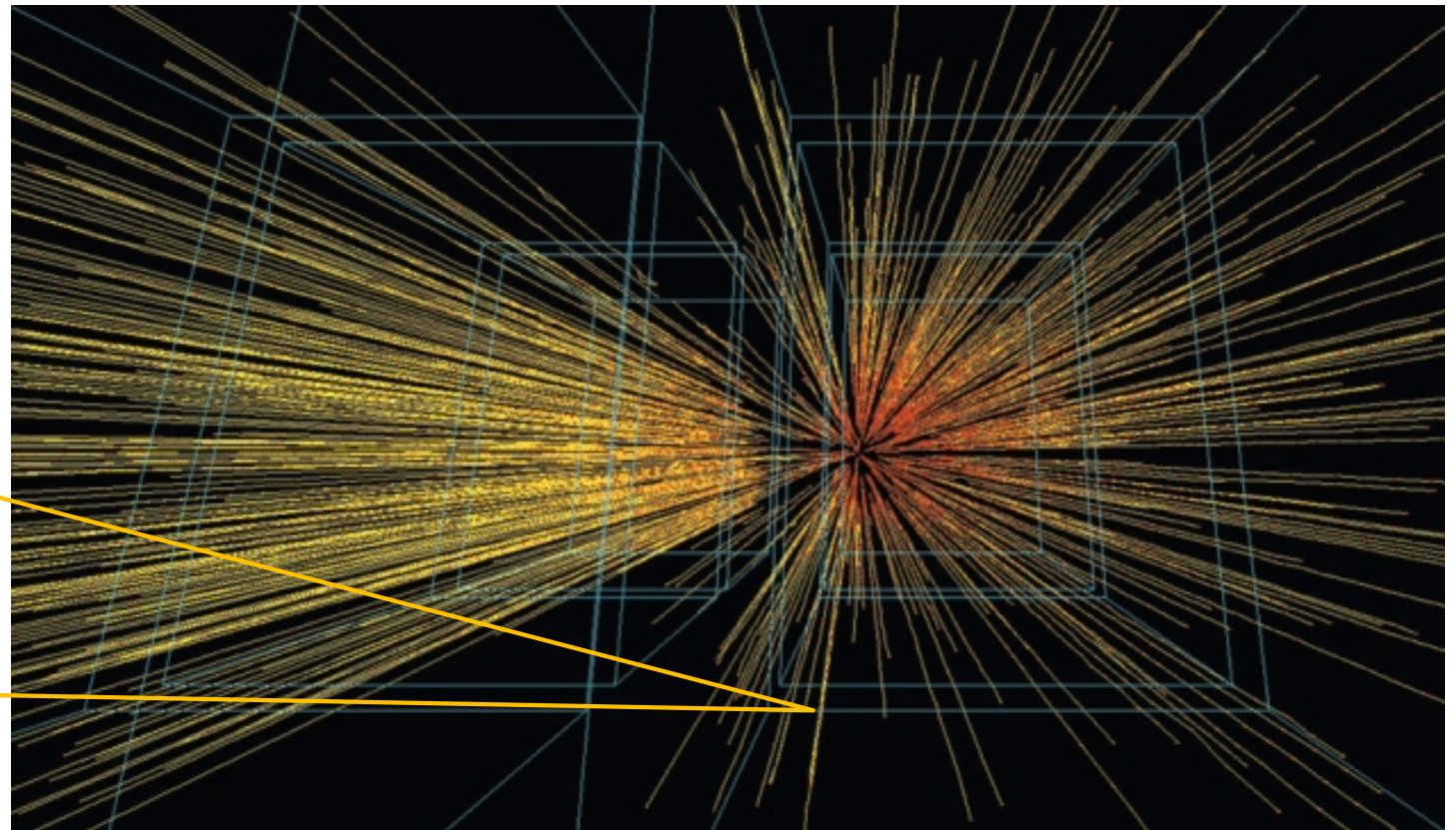
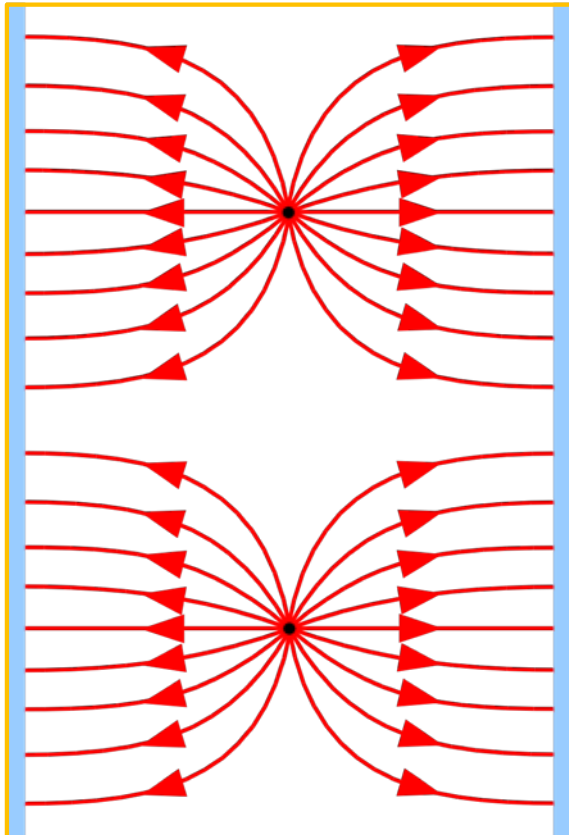
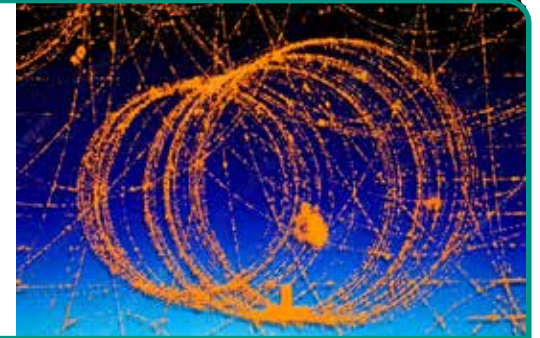
- Moderne Vieldrahtkammern unverzichtbar für Spur- (Orts-) Rekonstruktion von geladenen Teilchen aus Kollisionen
- Edelgase als Standardfüllung der Kammern



Im Master:
Spezial-
Vorlesung
Detektoren

■ Ionisation von Atomen zur Spurrekonstruktion

- Teilchenidentifikation über **spezifische Ladung e/m**
z.B. Protonen vs. Positronen
- Nachweis der Teilchenspur in externem Magnetfeld



Experiment: „Millikan – Versuch“

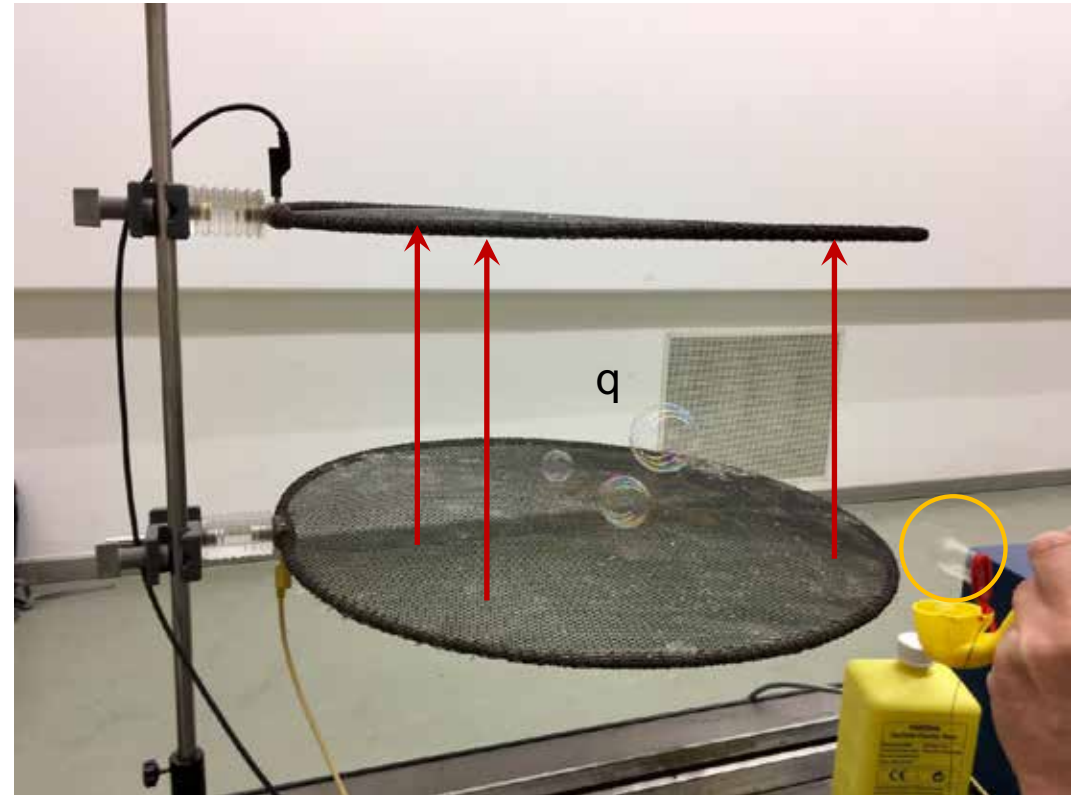
■ Seifenblasen in einem homogenen elektrischen Feld (s. Ex-Phys 2)

- Kräftebetrachtung einer „schwebenden“ Seifenblase



Q:Wikipedia

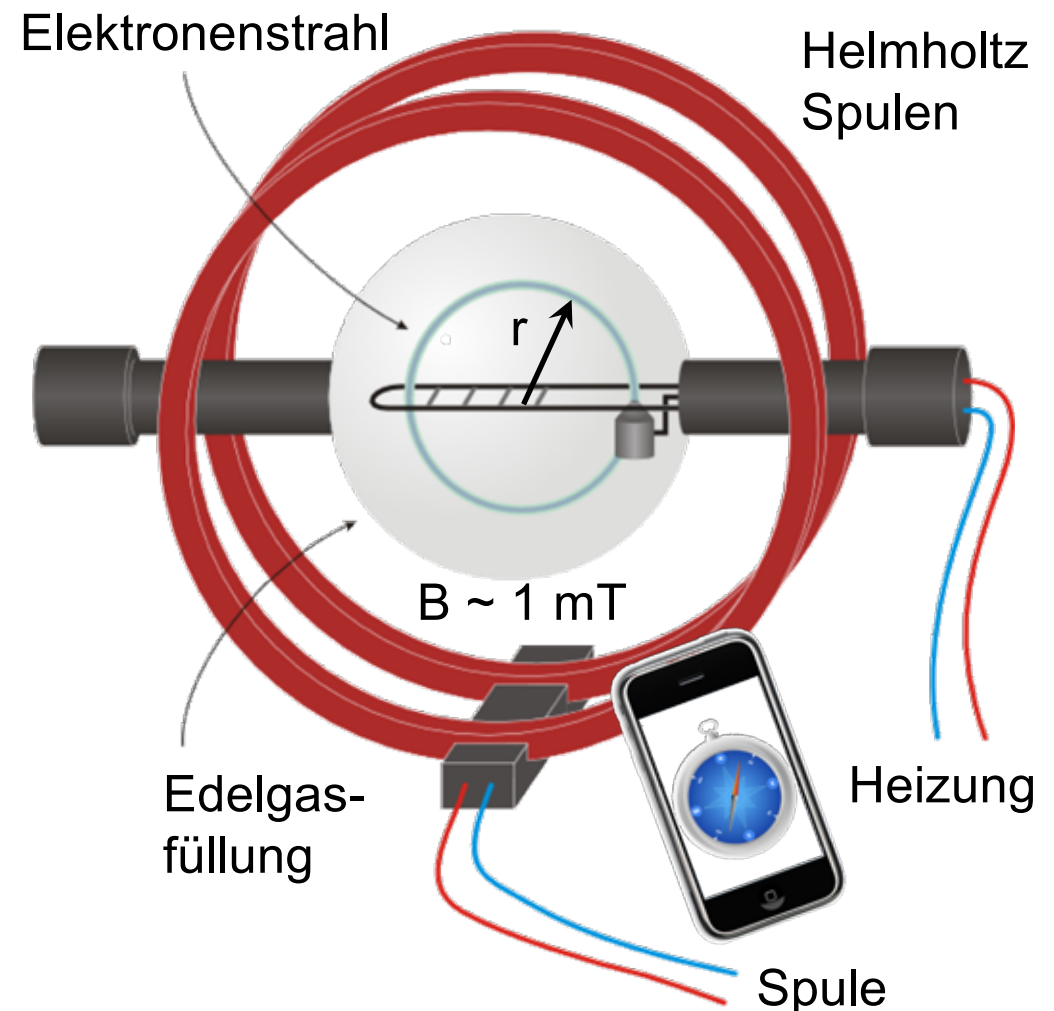
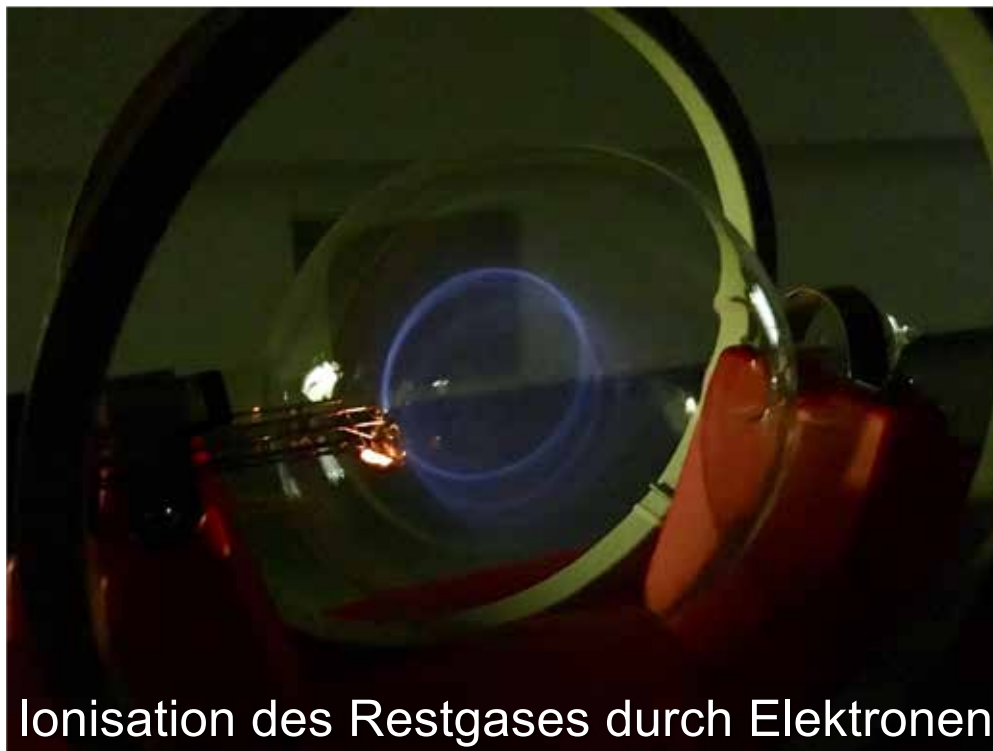
Doktorand Harvey Fletcher
hatte die wichtige Idee, für das
Millikan-Experiment Öltropfen zu verwenden



Experiment: Fadenstrahlrohr

■ Bestimmung des Verhältnisses e/m und damit me

- Messung mit **Elektronen** in einem Fadenstrahlrohr: nach Beschleunigung Kreisbahn in homogenem B-Feld,
- Lorentzkraft = Zentripetalkraft



Elektronen – spez. Ladung e/m

■ Bestimmung des Verhältnisses e/m

- Zentripetalkraft
= Lorentzkraft

$$\frac{mv^2}{r} = B \cdot e \cdot v$$

- Geschwindigkeit
aus Kin. Energie

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U$$

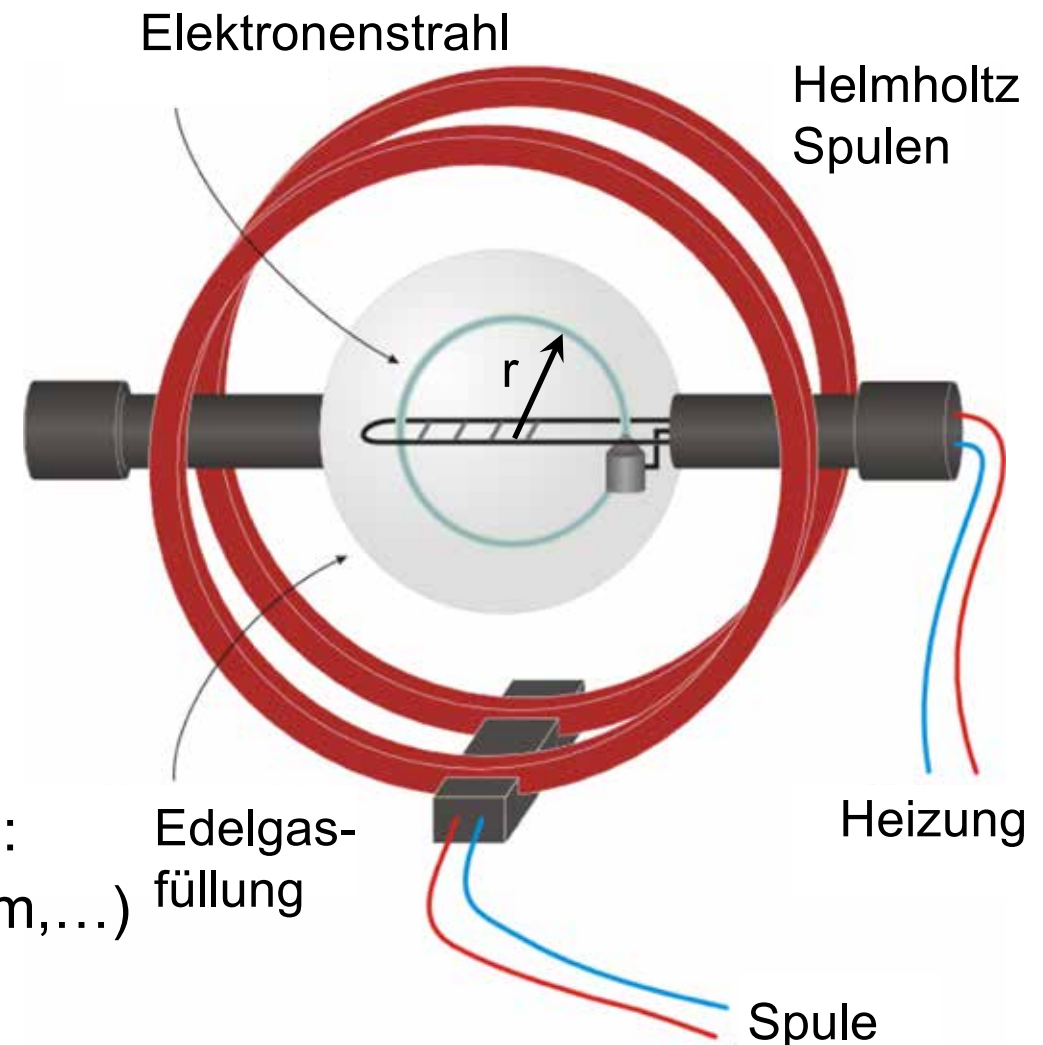
- >Verhältnis e/m_e :

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot r^2}$$

- >Spezifische Ladung des Elektrons:

$$e/m_e = -1,758\,820\,024(11) \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$$

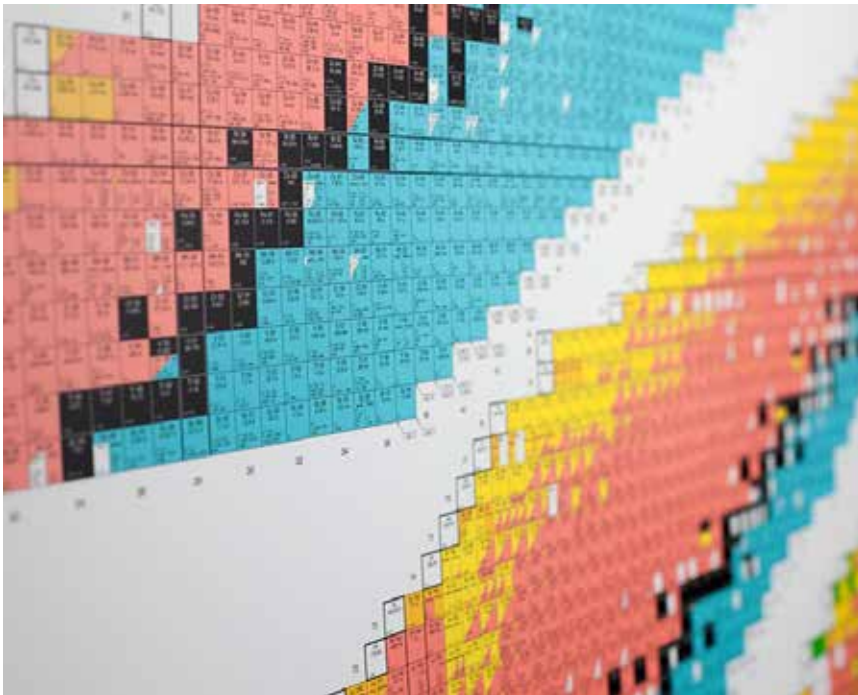
- **Massenverhältnis Proton-Elektron:**
 $\mu = m_p/m_e = 1846$ (wichtig für H-Atom,...)



Isotope – bestimmt aus spez. Ladung e/m

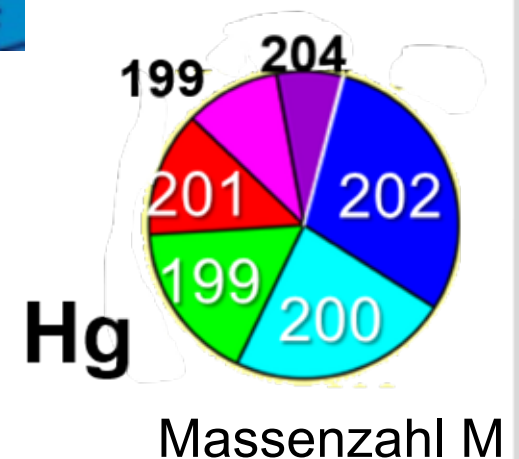
■ Elemente besitzen oft verschiedene Isotope

- **Isotop**: gleiche Kernladung Z (Protonenzahl), unterschiedliche Neutronenanzahl, d.h. unterschiedliche Gesamtmasse M
- Isotope mit sehr kleiner / sehr großer Neutronenanzahl N oft instabil
- Bestimmung natürlicher **Isotopen-Verhältnisse** oft sehr wichtig



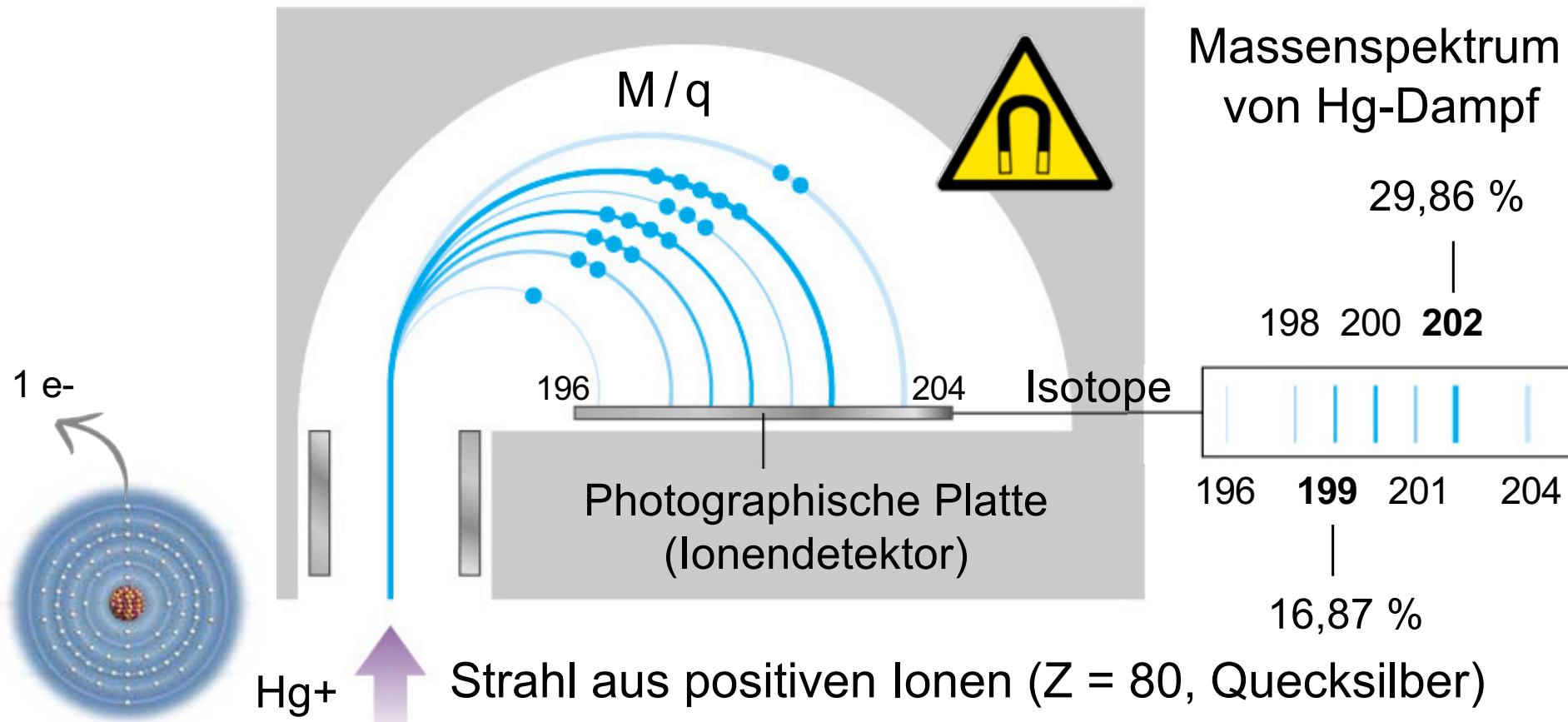
Karlsruher Nuklidkarte

■ Beispiel: Quecksilber



■ Bestimmung von Massenspektren M/Q für Ionen

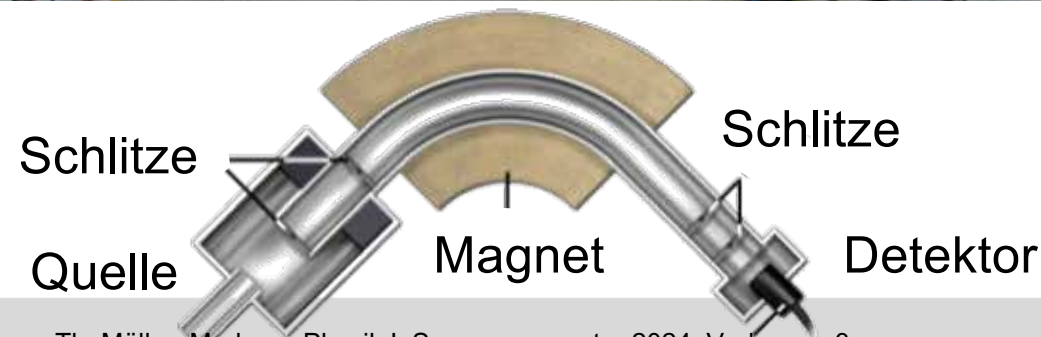
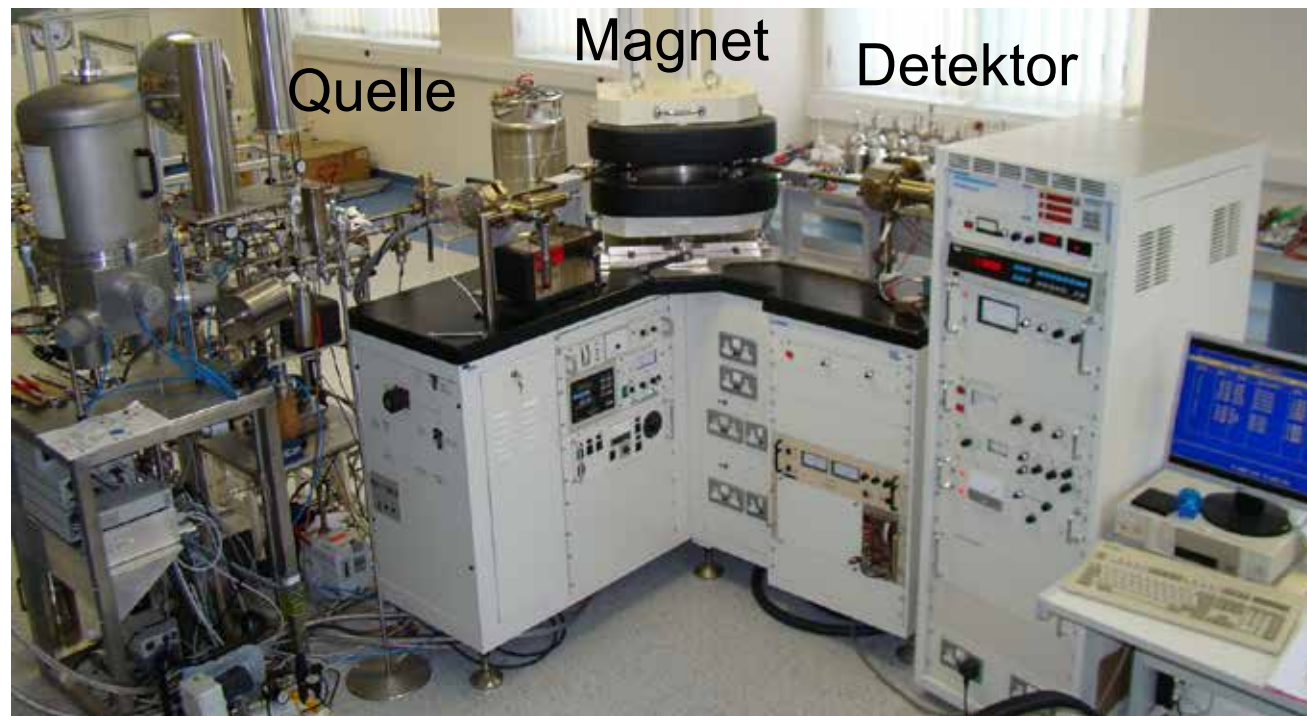
- Erzeugung von Ionen in Ionenquelle, dann Ionen-Transport zum Analysator
- Selektion einzelner Isotope über spez. Ladung M/Z in homogenem B-Feld

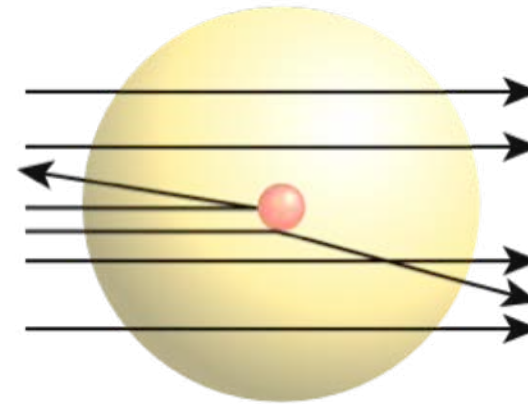


Massenspektrometrie von Ionen

■ Moderne Massenspektrometer für Ionen

- heutige Massen-Spektrometer erreichen Auflösung von $1/1000$

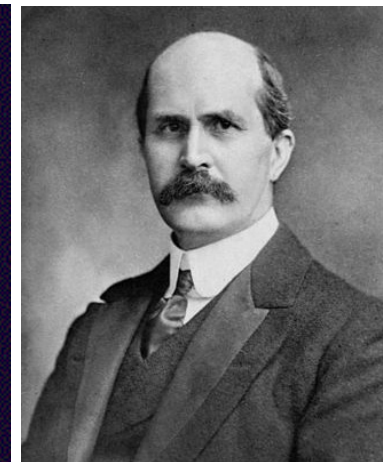
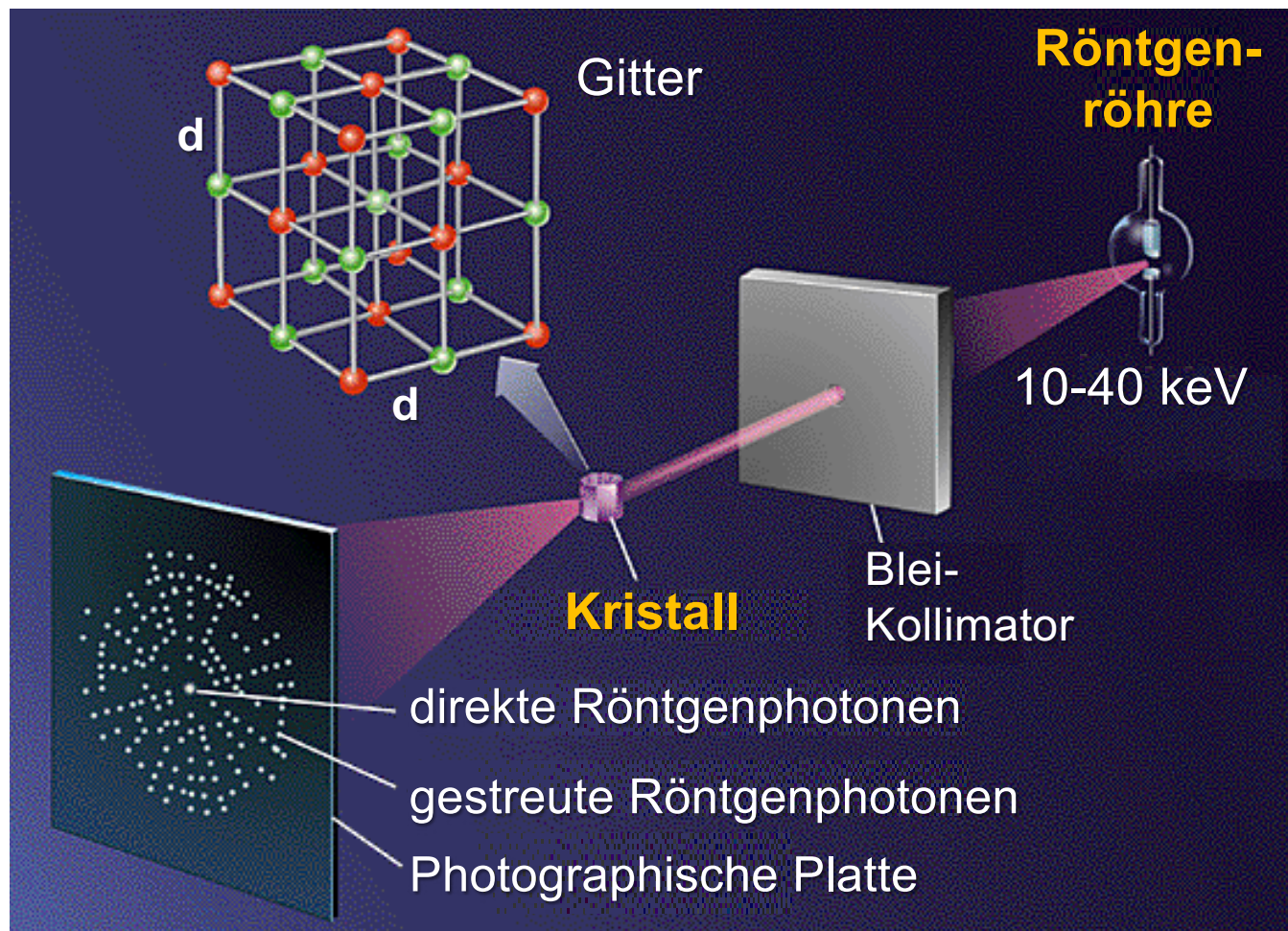




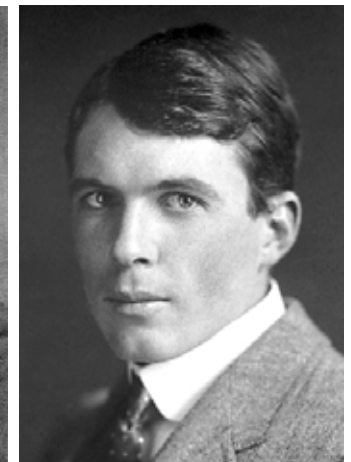
2.3 ATOMSTRUKTUR / STREU-EXPERIMENTE

Methode 1: Röntgenstreuung

- **Streuung von Röntgenphotonen** (keV-Energie) an Kristallen:
 - Ziel: Bestimmung des **Abstands d** zwischen Kristallebenen



William
Henry



William
Lawrence

Bragg
(Vater & Sohn)



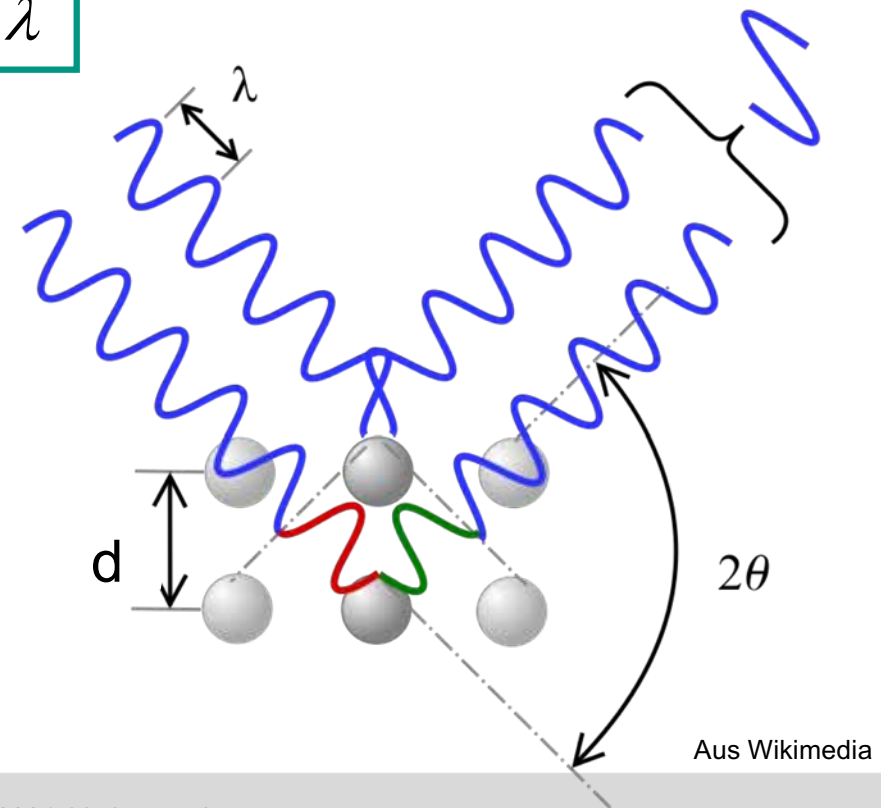
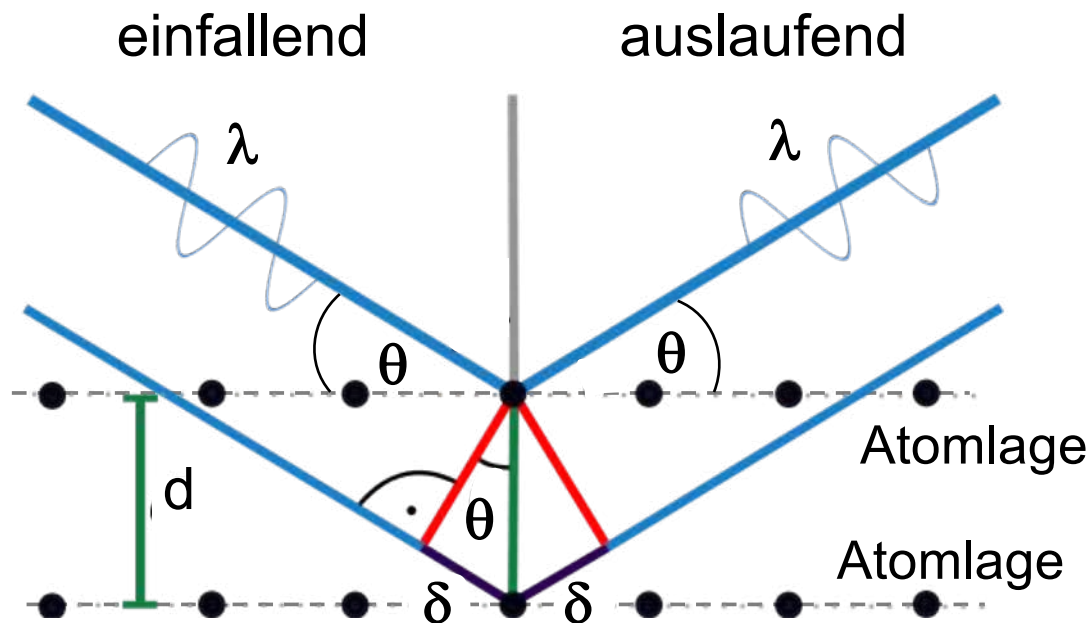
Nobelpreis 1915

Röntgenstreuung: Bragg-Bedingung

■ Streuung von Röntgenphotonen an Kristallen:

- einfallender Strahl: Wellenlänge λ unter Winkel θ relativ zur Kristallebene
- auftretender Gangunterschied $2\delta = 2d \cdot \sin \theta$ [da $\sin \theta = \delta / d$]
- Bragg-Reflexionsbedingung für **konstruktive** Interferenz

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$

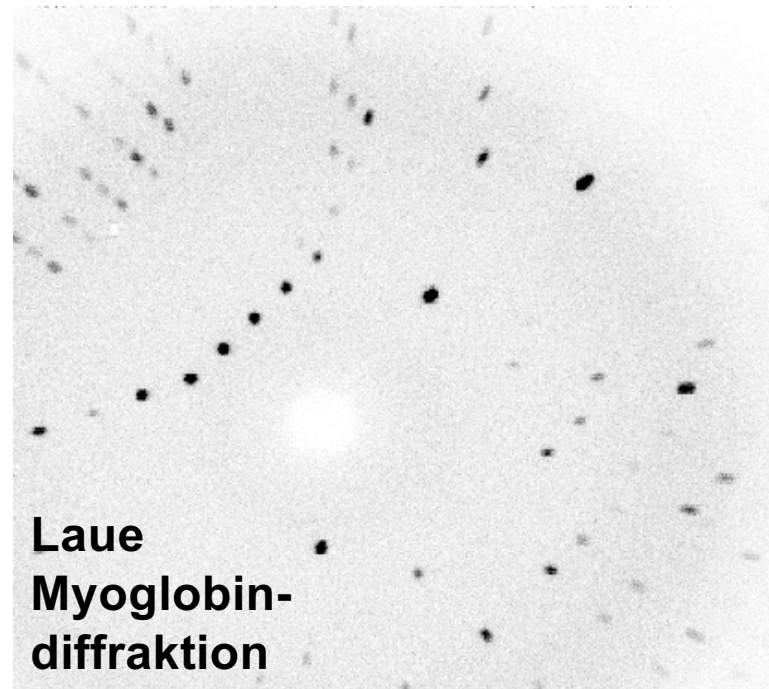
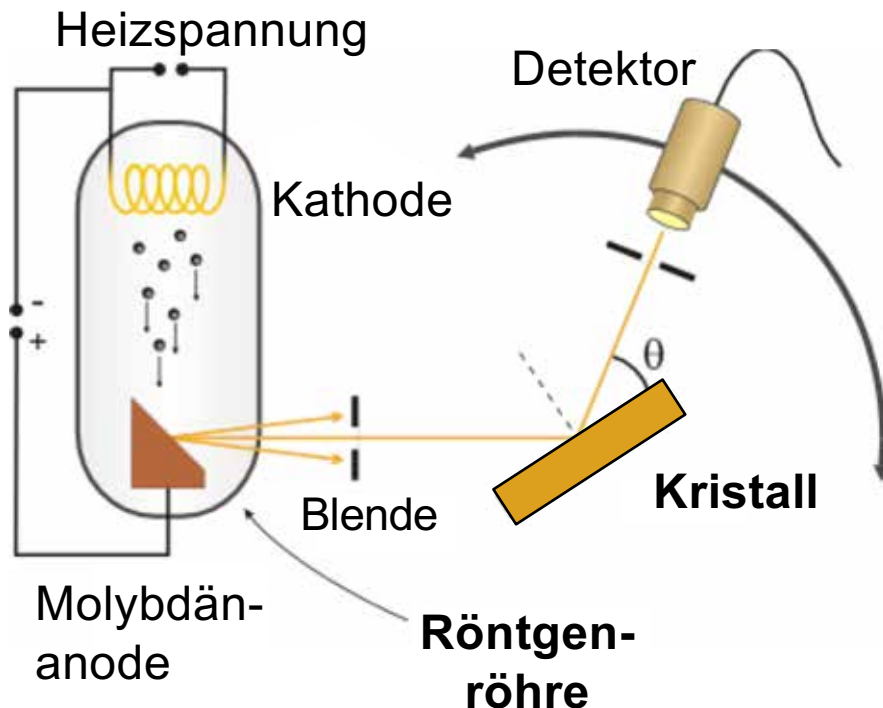


Aus Wikimedia

Laue-Verfahren

■ **Streuung von Röntgenphotonen** (keV-Energien) an einem **Einkristall**:

- Erzeugung **kontinuierlicher** (weißer) **Röntgenstrahlung** durch Bremsstrahlung von beschleunigten Elektronen an Anode
- mehrere Gitterschichten erfüllen Bragg-Bedingung, da λ = variabel
- erlaubt z.B. Untersuchung dynamischer Prozesse in Proteinkristallen



Max von Laue
(1879-1960)
Nobelpreis 1914

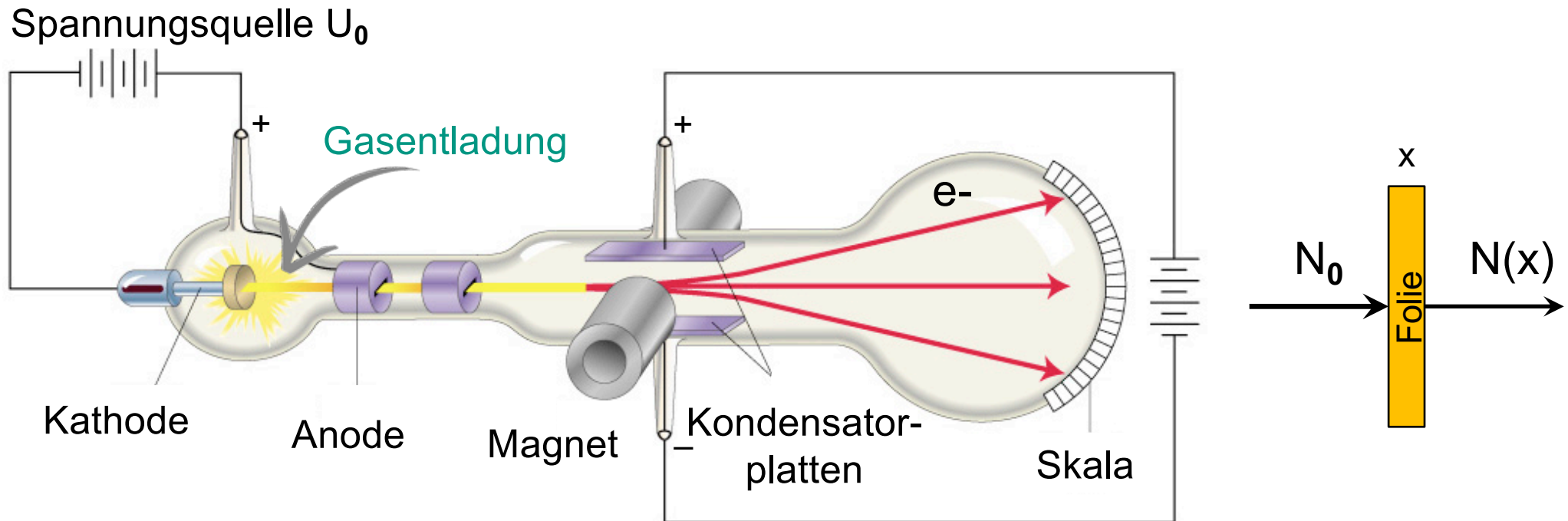


Methode 2: Kathodenstrahlen

■ Streuung von Elektronen an Materie

- Erzeugung von Kathodenstrahlen (Elektronenstrahl) über Gasentladung
- Lenard: erste Untersuchungen zur Reichweite von Elektronen in Gasen
- Aufstellung des Streugesetzes an dünnem Absorber (Folie)

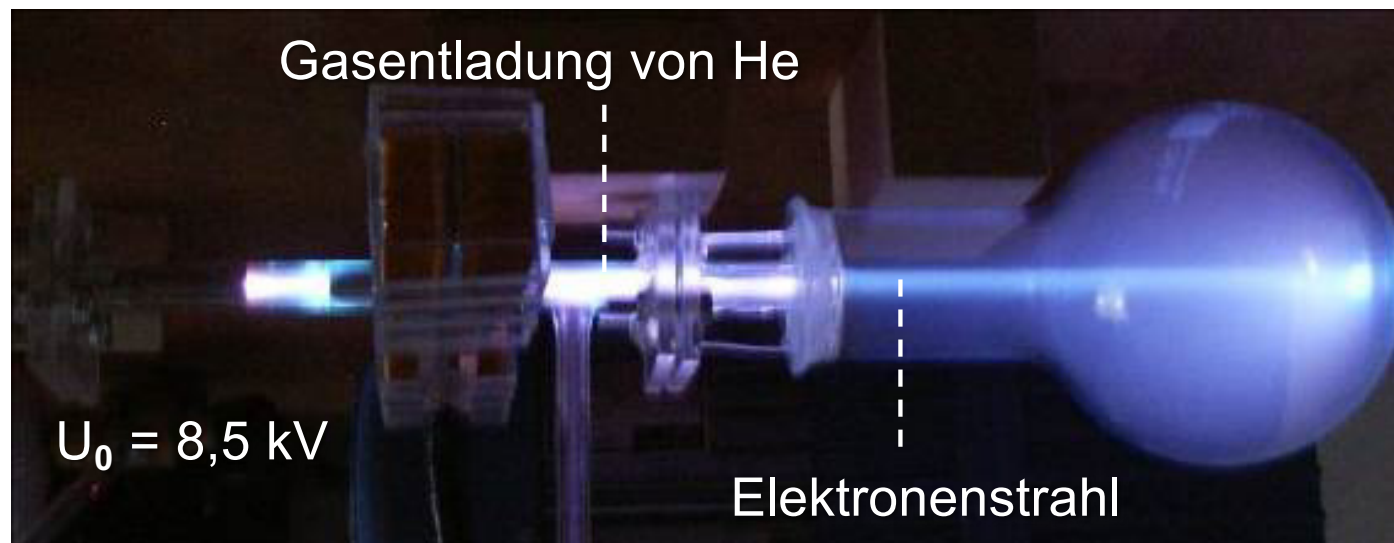
$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad \alpha: \text{Absorptionskoeffizient}$$



■ Streuung von Elektronen an Materie

- Erzeugung von Kathodenstrahlen (Elektronenstrahl) über Gasentladung
- Lenard: erste Untersuchungen zur Reichweite von Elektronen in Gasen
- Aufstellung des Streugesetzes an dünnem Absorber (Folie)

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad \alpha: \text{Absorptionskoeffizient}$$



He mit $p = 40 \text{ Pa} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ bar} = 40 \text{ mbar}$

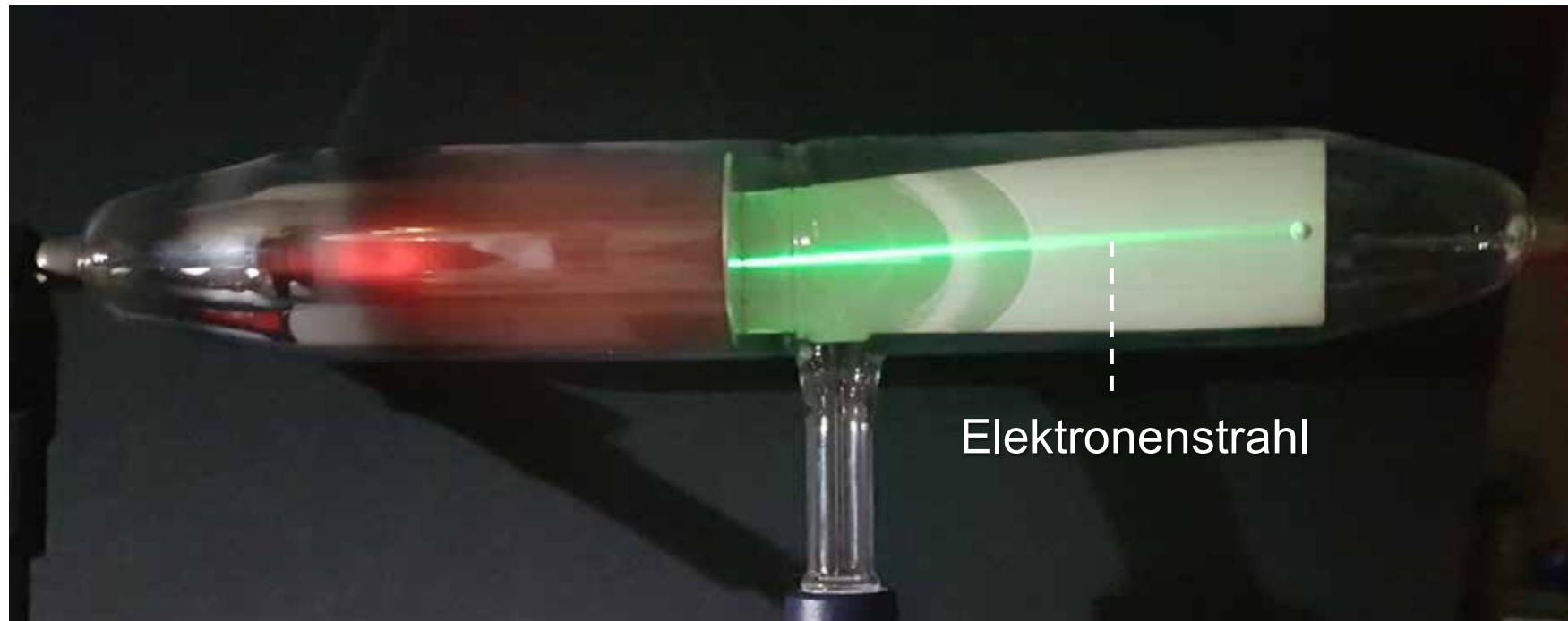
Elektronenstrahl
trifft auf Glasoberfläche



■ Streuung von Elektronen an Materie

- Erzeugung von Kathodenstrahlen (Elektronenstrahl) über Gasentladung
- Lenard: erste Untersuchungen zur Reichweite von Elektronen in Gasen
- Aufstellung des Streugesetzes an dünnem Absorber (Folie)

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad \alpha: \text{Absorptionskoeffizient}$$

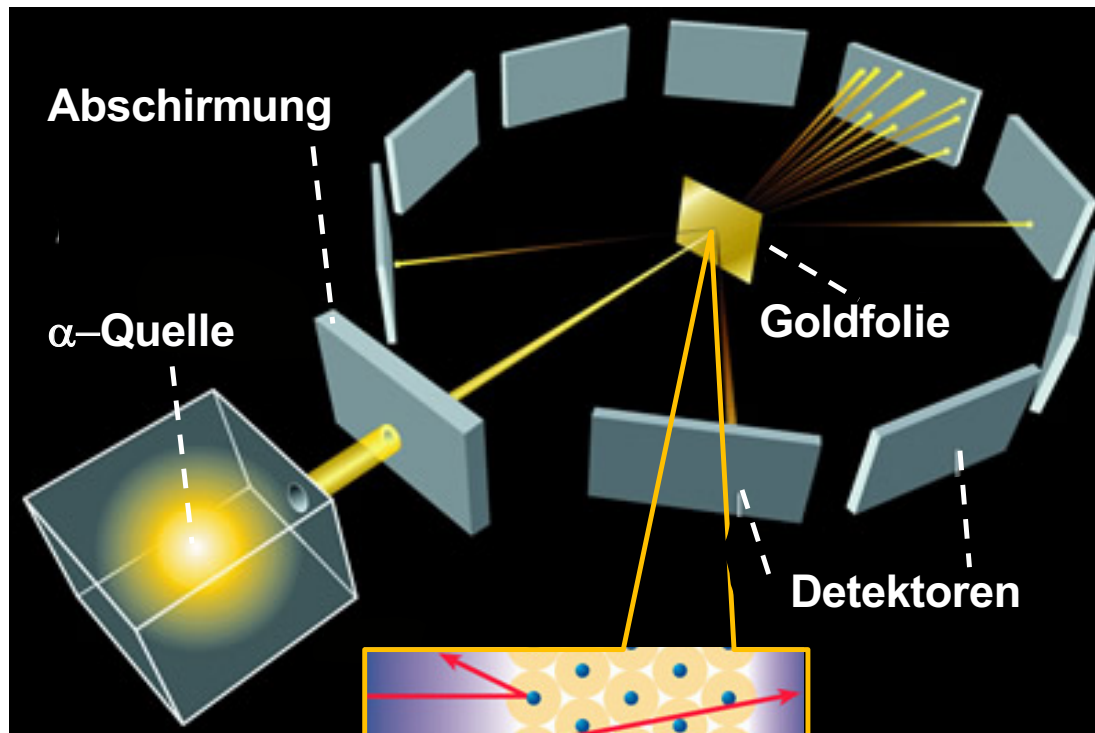
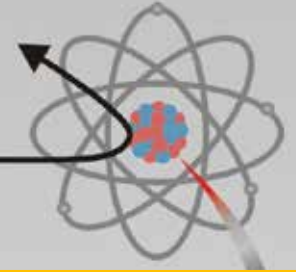


Methode 3: Teilchenstreuung

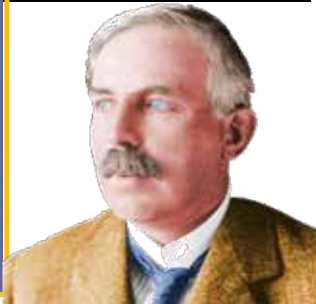
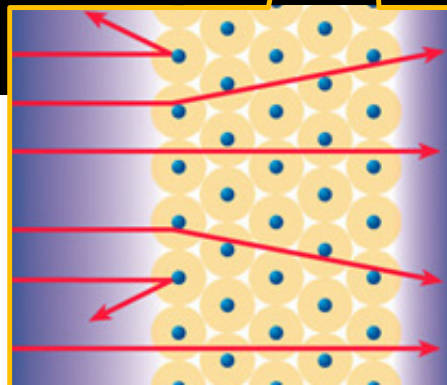
- Atome & Kerne: Beginn von Untersuchungen
 - ⇒ immer kleinere Materie-Bausteine

1908: Rutherford
Atomkern

α -Teilchen



α -Energie:
5 MeV



■ Atome & Kerne: Beginn von Untersuchungen

⇒ immer kleinere Materie-Bausteine

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 102, NUMBER 3

MAY 1, 1956

Elastic Scattering of 188-Mev Electrons from the Proton and the Alpha Particle*†‡§||¶

R. W. McALLISTER AND R. HOFSTADTER

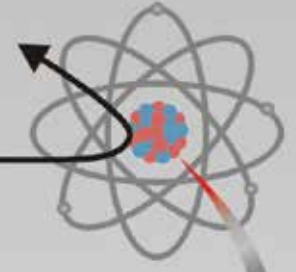
Department of Physics and High-Energy Physics Laboratory, Stanford University, Stanford, California

(Received January 25, 1956)

The elastic scattering of 188-Mev electrons from gaseous targets of hydrogen and helium has been studied. Elastic profiles have been obtained at laboratory angles between 35° and 138° . The areas under such curves, within energy limits of ± 1.5 Mev of the peak, have been measured and the results plotted against angle. In the case of hydrogen, a comparison has been made with the theoretical predictions of the Mott formula for elastic scattering and also with a modified Mott formula (due to Rosenbluth) taking into account both the anomalous magnetic moment of the proton and a finite size effect. The comparison shows that a finite size of the proton will account for the results and the present experiment fixes this size. The root-mean-square radii of charge and magnetic moment are each $(0.74 \pm 0.24) \times 10^{-13}$ cm. In obtaining these results it is assumed that the usual laws of electromagnetic interaction and the Coulomb law are valid at distances less than 10^{-13} cm and that the charge and moment radii are equal. In helium, large effects of the finite size of α -particle are observed and the rms radius of the alpha particle is found to be $(1.6 \pm 0.1) \times 10^{-13}$ cm.

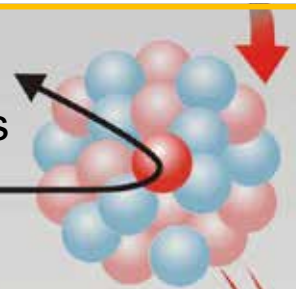
1908: Rutherford
Atomkern

α -Teilchen



1956: Hofstadter:
Größe des Protons

Elektronen



Ladungsradius $r = 0,8 \cdot 10^{-15}$ m

Robert Hofstadter
(1915-1990)

Nobelpreis
1961



Robert Hofstadter

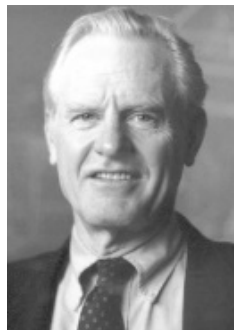
- Atome & Kerne: Beginn von Untersuchungen
⇒ immer kleinere Materie-Bausteine

SLAC



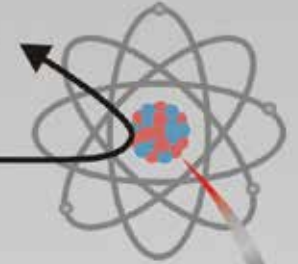
Henry W. Kendall
Jerome Friedman
Richard Taylor

Nobelpreis
1990



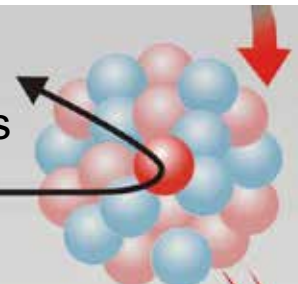
1908: Rutherford
Atomkern

α -Teilchen



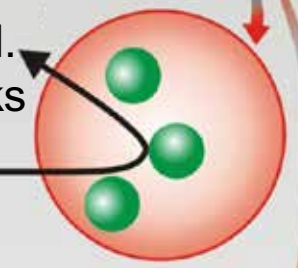
1956: Hofstadter,
Größe des Protons

Elektronen

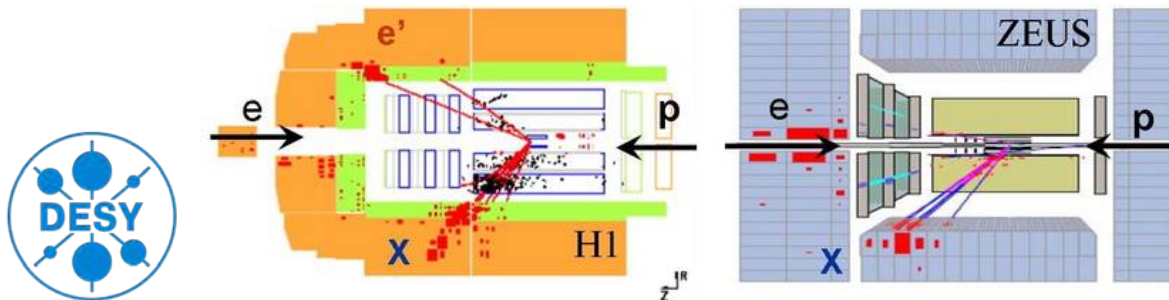


1962: Kendall et al.
Entdeckung Quarks

Elektronen

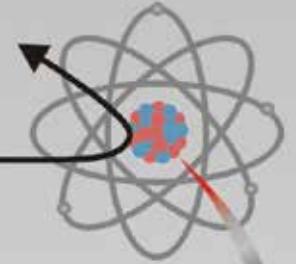


■ Atome & Kerne: Beginn von Untersuchungen ⇒ immer kleinere Materie-Bausteine



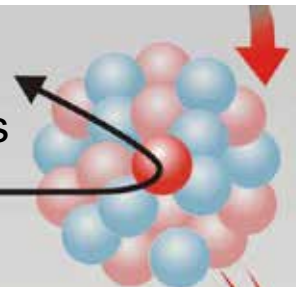
1908: Rutherford
Atomkern

α -Teilchen



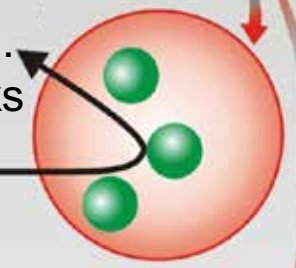
1956: Hofstadter:
Größe des Protons

Elektronen

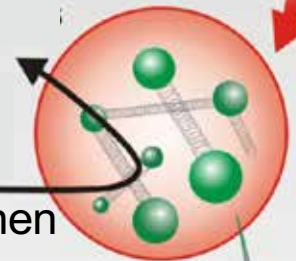


1962: Kendall et al.
Entdeckung Quarks

Elektronen



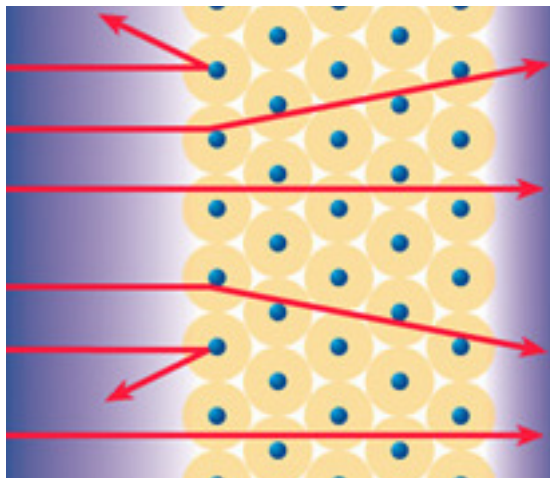
1992: HERA
(DESY)
Aufbau Proton
Elektronen, Myonen



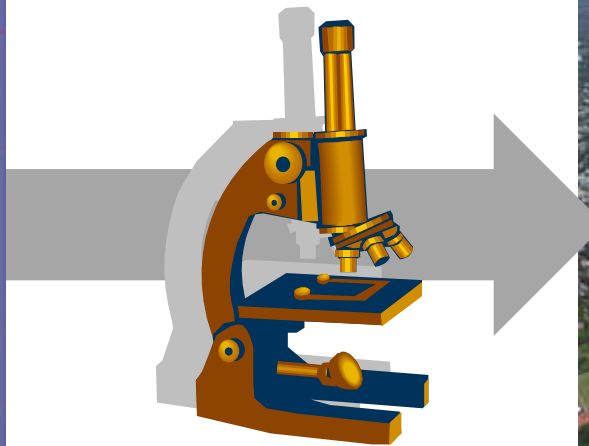
■ Atome & Kerne: Beginn von Untersuchungen

⇒ immer kleinere Materie-Bausteine

α -Energie:
5 MeV



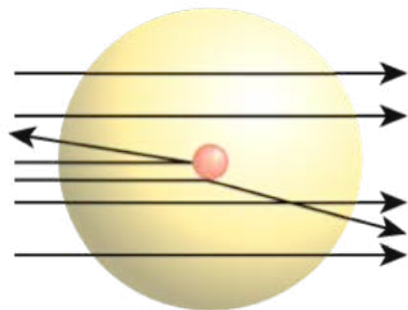
Faktor ~ 10000



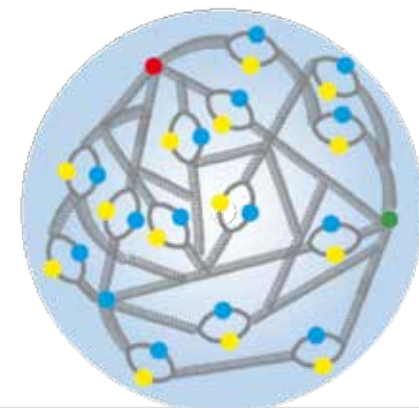
p-Energie: **800 GeV**
e-Energie: 30 GeV



in Teilchenenergie



Atom
damals



Proton
heute

