

Experimentalphysik III, Modul BP-09

Teilmodul: Einführung in die Atomphysik

Prof. Dr. Alfred Müller

WS 2010/11

Stand vom 14.10.2010

Termine:

Vorlesung

Mo. 8:15 – 10:00 Uhr H I (mit Experimenten)

Mi. 10:00 – 11:45 Uhr H SZ

Übungen

Gruppe Müller Mi. 8:15 – 9:45 Uhr, H SZ

Gruppe Schippers Mi. 8:15 – 9:45 Uhr, SZ 023

Experimentalphysik III, Modul BP-09

Zu diesem Modul gehören:

- I. Vierstündige Vorlesung
- II. Zweistündige Übungen

- III. Blockpraktikum (12 Versuche, nach der Vorlesungszeit)

Zum Bestehen des Moduls gehören folgende Prüfungsleistungen

- I. Klausur zur Vorlesung (Wichtung: 50%),
Voraussetzung: 50% der Hausaufgaben)

- II. Abschlusskolloquium oder Klausur zum Praktikum (Wichtung: 50%)
Voraussetzung: alle Versuchsprotokolle

Experimentalphysik III, Modul BP-09

Vorgesehene Prüfungstermine zum Modul im WS 2009/10

Klausur

(Teilnahmebedingung: 50% der Hausaufgaben)

09.02.2011

9-12 Uhr, H SZ

Ausgleichsprüfung für Teilmodul Vorlesung

(Nachklausur)

01./08. 04. 2011 ?

9-12 Uhr, SZ 023

1. bzw. 2. Wiederholungsprüfung

WS 2011/12

vorläufig geplant 08.02.2012

bzw. 30.03.2012

Blockpraktikum

28.02. – 18.03.2011

Abschlussprüfung für Praktikum

18.03.2011

Ablaufplanung

Vorlesung:

insgesamt 31 Doppelstunden verfügbar
Montag in H I ermöglicht Experimente
Mittwoch in H SZ (Hörsaal Strahlenzentrum)

Laborbesichtigung:

geplant 16. Februar 2011

Übungen:

Einteilung in zwei Gruppen:
Müller, Schippers

insgesamt 26 Stunden verfügbar,
Hausaufgaben, **Präsenzübungen**
Lösung der Hausaufgaben (50% der
erreichbaren Punkte) als Voraussetzung
für die Teilnahme an der Klausur

Tutorien:

Einteilung in drei Gruppen:
Kaija Spruck,
Josephina Werner,
Arno Becker

Termine nach Absprache
Hausaufgaben, Präsenzübungen

Organisation über Stud.IP

Bitte melden Sie sich über STUD.IP als Teilnehmer/Teilnehmerin an:

Name der Veranstaltung in STUD.IP

Vorlesung:

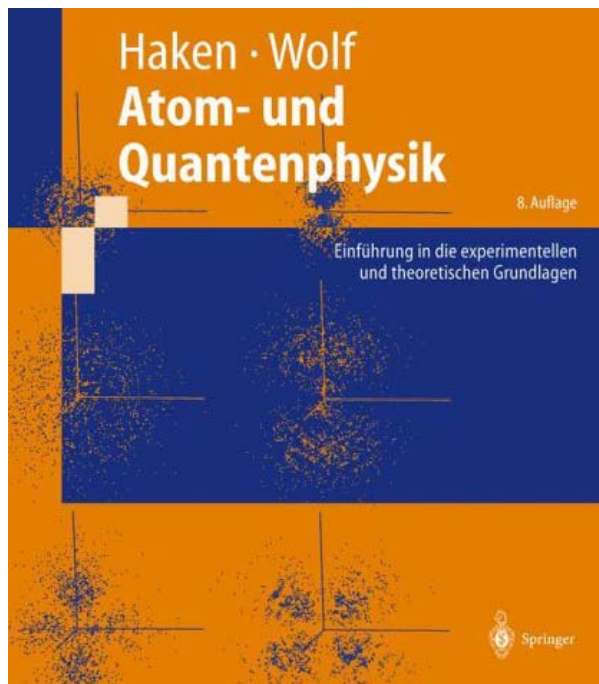
**Experimentalphysik III für Physiker
Atom- und Quantenphysik**

Übungen:

Übungen zur Experimentalphysik III

Literatur

Lehrbuch für die Vorlesung



Atom- und Quantenphysik

Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen

Reihe: Springer-Lehrbuch,

Haken, Hermann, **Wolf**, Hans C.

8., aktualisierte u. erw. Aufl., 2004, XX, 531 S. 307 Abb., 32 Tab.,

177 Aufgaben und vollständigen Lösungen., Geb.

ISBN: 3-540-02621-5

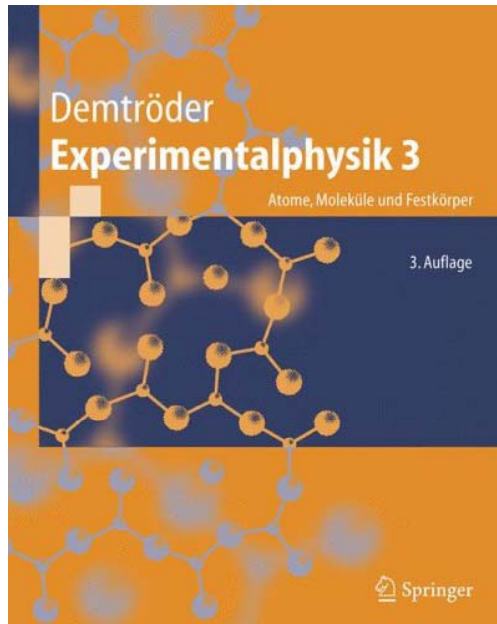
Versandfertig innerhalb von 3 Tagen

Ladenpreis 49,95 €

Versandfertig bei Amazon in 24 Stunden

Literatur

Lehrbuch für die Vorlesung



Einleitung

- Entwicklung der Atomvorstellung
- Entwicklung der Quantenphysik
- Grundlagen der Quantenmechanik
- Das Wasserstoff-Atom
- Atome mit mehreren Elektronen
- Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome
- Laser
- Moleküle
- Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik
 - Die Struktur fester Körper
 - Dynamik der Kristallgitter
 - Elektronen im Festkörper
 - Halbleiter
 - Optische Eigenschaften von Festkörpern
 - Amorphe Festkörper
 - Flüssigkeiten, Flüssigkristalle und Cluster
 - Oberflächen

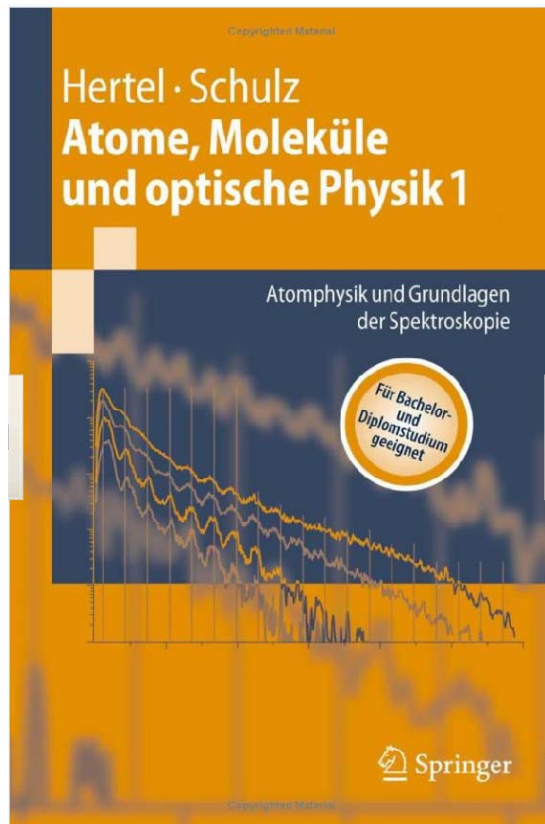
Amazon-Preis: EUR 44,95, Broschiert - 639 Seiten,
4. Auflage 2010, 44,94 €, 650 Seiten

Online-Version:

<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03911-9>

Literatur

Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



Hertel, Ingolf V., Schulz, C.-P.

Atome, Moleküle und optische Physik 1

Atomphysik und Grundlagen der Spektroskopie

Reihe: Springer-Lehrbuch

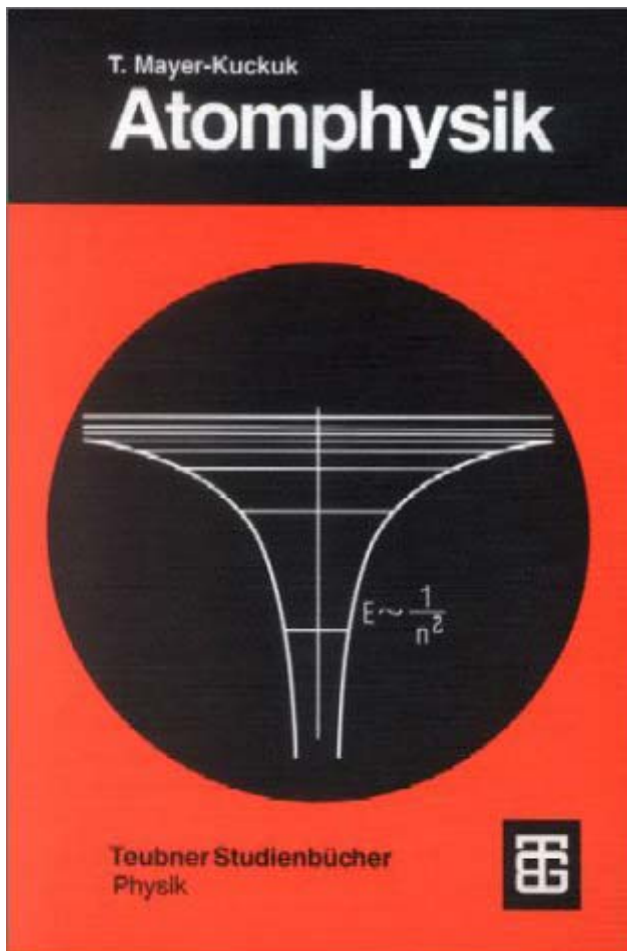
2008, ISBN 978-3-540-30613-9, Softcover

Versandfertig innerhalb von 3 Tagen

49,95 €

Literatur

Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



Mayer-Kuckuk, Theo

Atomphysik

Eine Einführung

Aus der Reihe:

[Teubner Studienbücher Physik](#)

B.G. Teubner Verlag

5., durchgesehene und erweiterte Aufl. 1997.

276 S. Mit 138 Abb. u. 7 Tab.

1 Spektraltafel 13,7 x 20,5 cm Br.

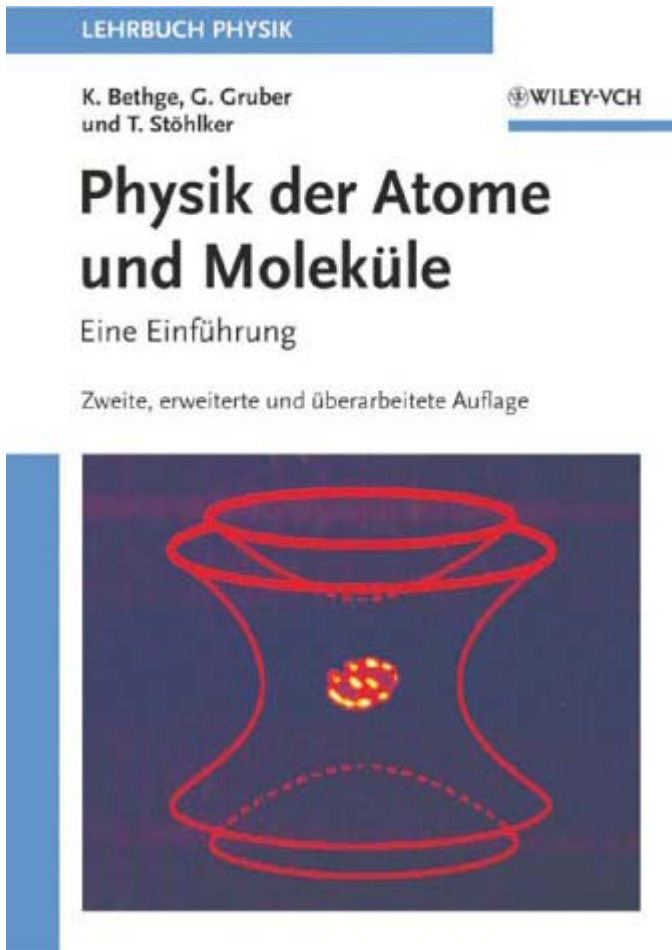
ISBN: 3-519-43042-8

EUR: 28,90

Amazon-Preis: EUR 28,90

Literatur

Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



Bethge, Klaus und
Gruber, Gernot / Stöhlker, Thomas

Physik der Atome und Moleküle

Eine Einführung

Die Neuauflage des Klassikers deckt neben den Grundlagen auch die zahlreichen modernen Anwendungen ab, z.B. Quantenoptik, Atom- und Ionenfallen, Hochpräzisionsspektroskopie, Atome in starken Magnetfeldern, Bose-Einstein-Kondensate etc.

August 2004

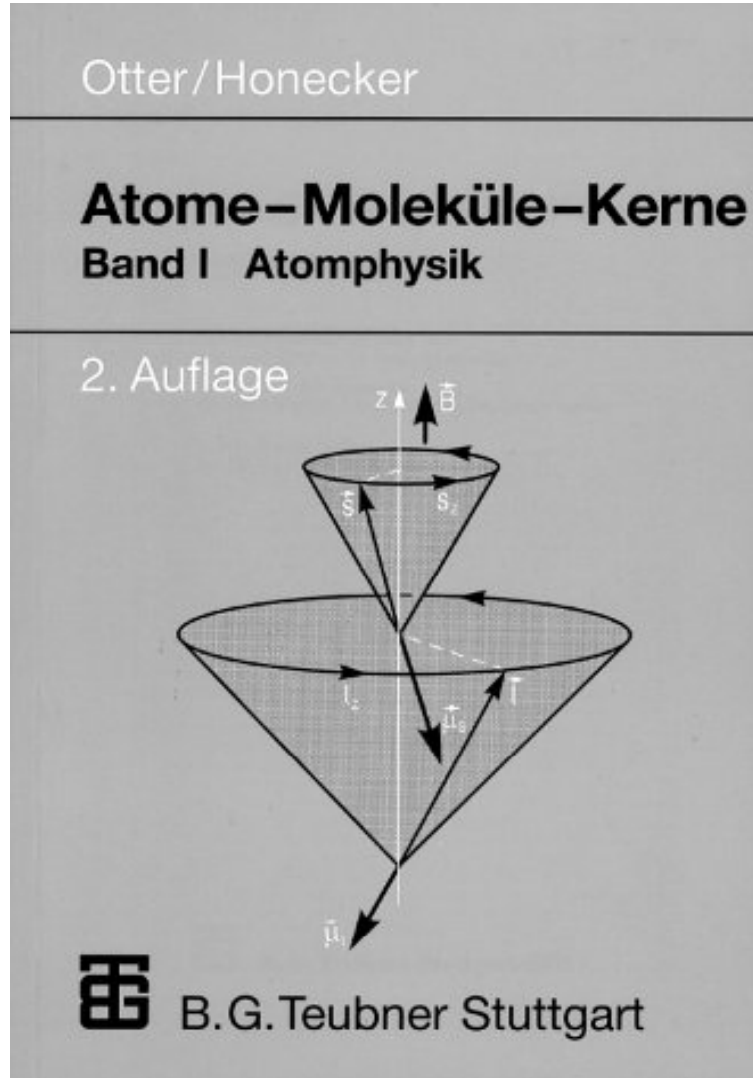
ISBN 3-527-40463-5

59,- Euro / 87,- SFR

Amazon-Preis: EUR 59,00

Literatur

Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



Atome - Moleküle - Kerne

Band III Atome:
Fragen und Antworten
B.G. Teubner Verlag 2001.
156 S. Mit 26 Abb.

17 x 24 cm Br.

ISBN: 3-519-00329-5

EUR: 18,90

Atome - Moleküle - Kerne

Band I : Atomphysik

B.G. Teubner Verlag

2., überarbeitete Aufl. 1998.

471 S. Mit 192 Abb. u. 19 Tab.

16,2 x 22,9 cm Br.

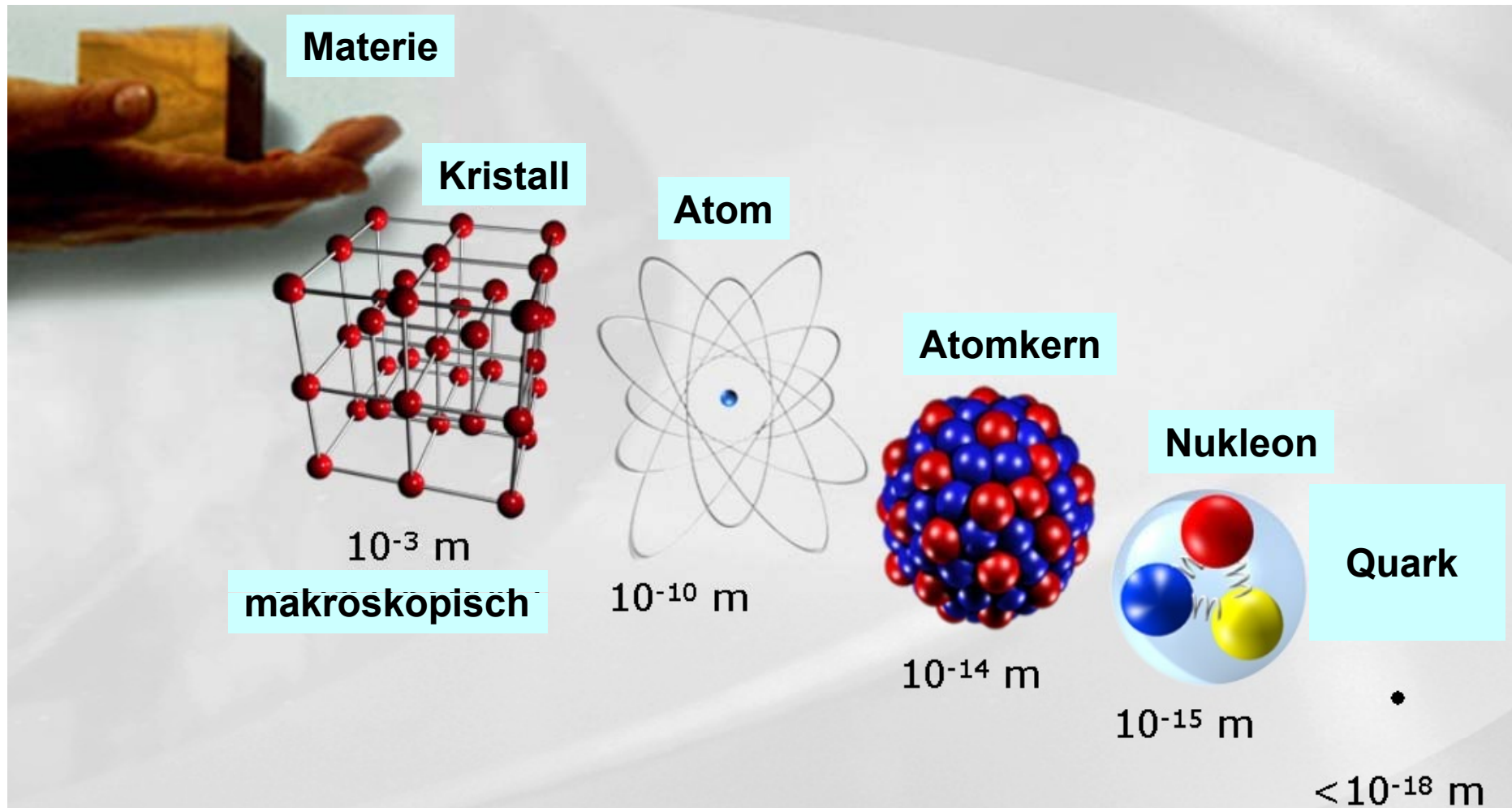
ISBN: 3-519-13219-2

EUR: 34,90

Kap. 1:

Einleitung

Struktur der Materie nach heutigem Wissen

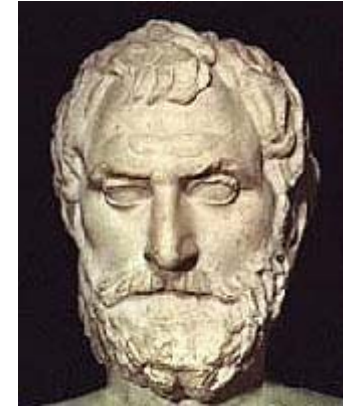


Entwicklung der Vorstellung von Elementen

Wasser als Urelement



Anaxagoras
ca. 500 – 428 v. Chr.



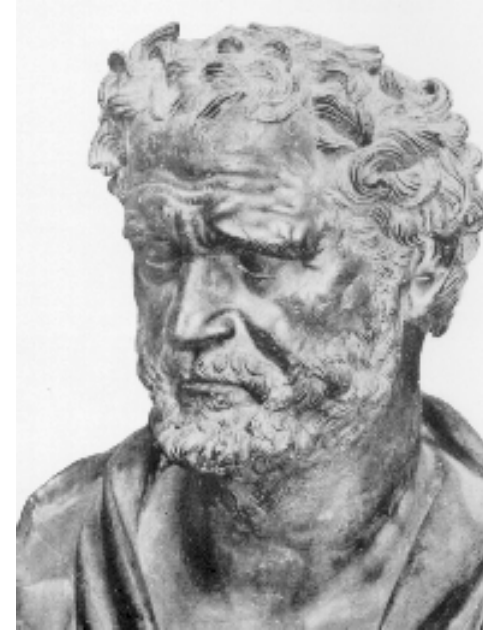
Thales von Milet
ca. 624 – 547 v. Chr.

Werden und Vergehen erklären sich durch
Zusammensetzung bzw. Trennung
zuvor existierender Einzeldinge

Vorstellung kleinster Bausteine



Leukipp (Idealbild)



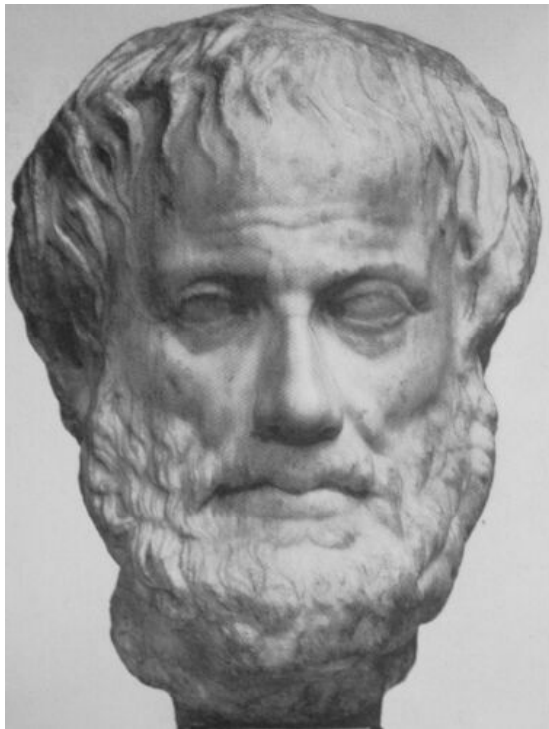
Demokrit

Leukipp (ca 440 v Chr.) und sein Schüler Demokrit (469-370 v.Chr.)

Leukipp: es gibt kleinste Bausteine, dazwischen befindet sich „Leere“

Demokrit: Atomvorstellung ατομοζ = unteilbar, unzerschneidbar

Gegenmeinung: Vorstellung stetiger Erfüllung des Raums mit Materie



Aristoteles
384 – 322 v. Chr.

Nach seiner Meinung
lässt die Natur kein Vakuum zu.
Es gibt demnach keinen leeren Raum

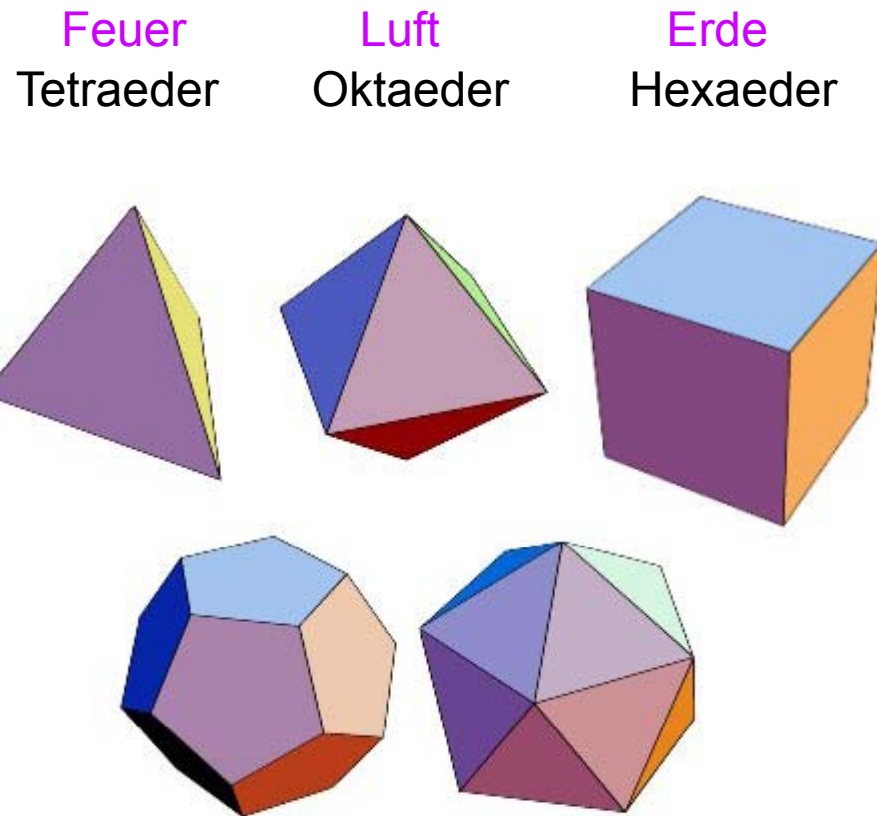
-etwa zwischen Atomen, die damit
eine sinnlose Modellvorstellung bieten

Demokrit „hatte Glück“,
Aristoteles dagegen „hatte Pech“
mit den ohne experimentelle Befunde
entwickelten Vorstellungen von der
Struktur der Materie

Die Platonischen Körper und die 4 klassischen Elemente



Platon
427 - 347 v.Chr



Feuer
Tetraeder

Luft
Oktaeder

Erde
Hexaeder

Dodekaeder

Ikosaeder

Quintessenz, Weltganzes, Äther

Wasser

Die Philosophie des Aristoteles bestimmt die Naturvorstellungen des Mittelalters

Ab dem 17. Jahrhundert
setzte sich zunehmend die
Atomvorstellung durch



Pierre Gassendi
1592 - 1655

Gassendi griff als erster die
Überlegungen von Demokrit
wieder auf.

Er sprach von

„Kräften“ zwischen den Atomen

(Werden und Vergehen: bei Thales u. Anaxagoras)

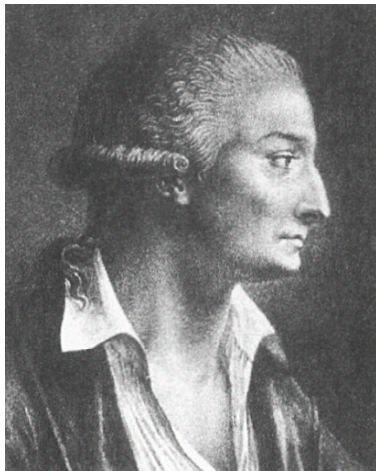
Neue Vorgehensweise: Experimente

Schärfung des Elementbegriffs



Robert Boyle
1627 - 1691

Robert Boyle in „The sceptical Chymist“
Elemente sind bestimmte primitive und **einfache**,
völlig **unvermischte Körper**; sie enthalten keine
anderen Körper, sie sind die **Zutaten**, aus denen
alle perfekt gemischten Körper zusammengesetzt
sind und in welche diese letztlich zerlegt werden



Antoine Lavoisier
1743 - 1794

Experimenteller Nachweis für die Anlagerung von
Sauerstoff bei der Verbrennung

**Ein Element ist ein Stoff, der mit chemischen Methoden
(Wärme, Licht, mechanische oder elektrische Energie)
nicht weiter zerlegt werden kann.**

Experimenteller Befund: Die Gesetze der konstanten bzw. multiplen Proportionen

Die Gewichtsmengen, in denen sich die Elemente untereinander verbinden, sind stets die gleichen oder stehen in einfachen, ganzzahligen Verhältnissen zueinander



Joseph Louis Proust
1754 - 1826

Beispiel:

14 g Stickstoff + 16 g Sauerstoff ergeben 30 g Stickoxid
14 g Stickstoff + 32 g Sauerstoff ergeben 46 g Stickoxidul

Die atomistische Deutung der Gesetze der konstanten bzw. multiplen Proportionen



John Dalton
1766 - 1844

„A New System of Chemical Philosophy“

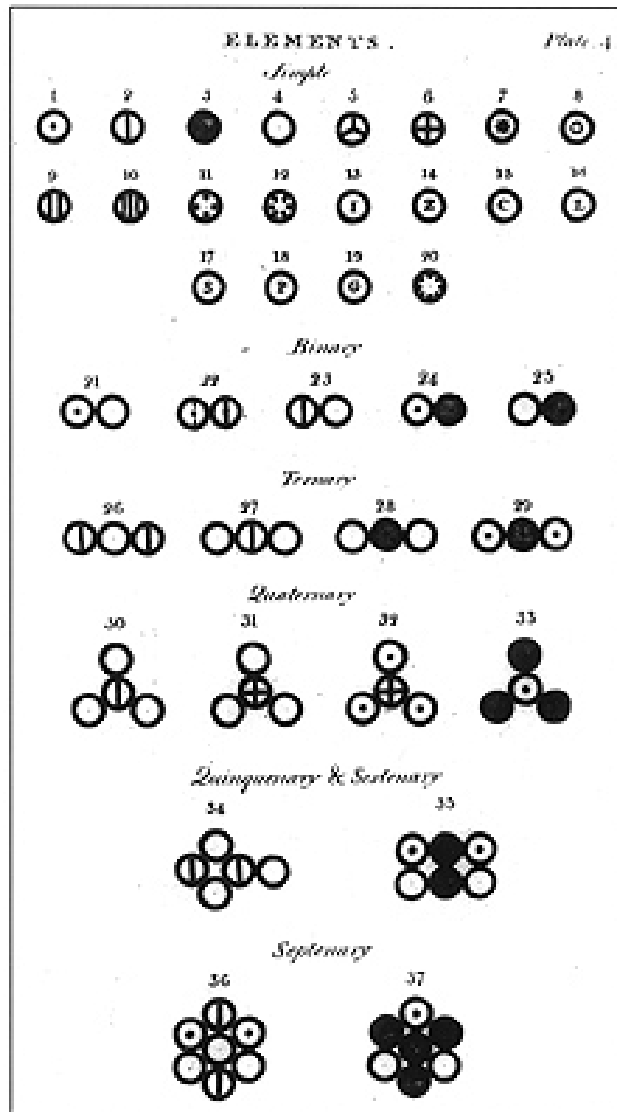
All matter consists of tiny particles.

Atoms are indestructible and unchangeable.

Elements are characterized by the mass of their atoms.

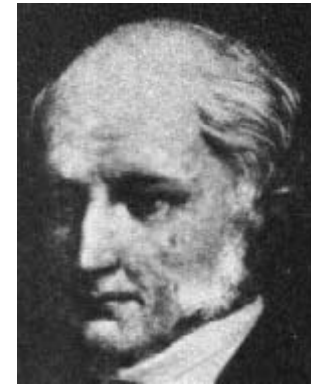
When elements react, their atoms combine in simple, whole-number ratios

Dalton's Elemente und ihre Verbindungen



Folgerung aus der Beobachtung relativer Massen: Wasserstoff als Baustein der Elemente

Atomgewichte erscheinen
als ganzzahlige Vielfache
des Atomgewichts von
Wasserstoff



William Prout
1785-1850

s. Aufbau der Atomkerne aus Nukleonen

Gasvolumina bei Reaktionen



Louis Joseph Gay-Lussac
1778 -1850

**1 Volumeneinheit Sauerstoff O_2
+ 1 Volumeneinheit Stickstoff N_2**

2 Volumeneinheiten NO

Gay-Lussac: auch bekannt durch $V_{\text{gas}} \sim T$

Zahl von Atomen in Gasvolumina



Amadeo Avogadro
1776 -1856

Folgerung aus den Gesetzen der konstanten bzw. multiplen Proportionen von Massen und Gasvolumina bei Reaktionen:

Gleiche Volumina verschiedener Gase enthalten

(bei gleichem Druck und bei gleicher Temperatur)

gleich viele Atome bzw. Moleküle

1 Liter Helium enthält ebenso viele Moleküle wie 1 Liter Kohlendioxid (p, T identisch)

Avogadro-Konstante

$$M_{\text{Stoffmenge}} = N \cdot m_{\text{Stoffatom}}$$

$$V_{\text{Stoffmenge}} = N \cdot V_0$$

Einführung der Stoffmenge **1 Mol**: Stoffmenge mit derjenigen Masse in Gramm, die das relative Atomgewicht vorgibt

Beispiel 1 Mol Helium: 4 g Helium

In 4 g Helium sind N_A Heliumatome,
in 32 g Sauerstoff sind N_A Sauerstoffmoleküle.

Diese Atome bzw. Moleküle nehmen bei gleichen Druck- und Temperaturwerten das gleiche Volumen ein (22.4 l unter Normalbedingungen).

Avogadro-Konstante: Zugang zur Masse (und zur Größe) von Atomen

$$\text{CODATA 2006: } N_A = 6.022\,141\,79(30) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Erstmalig bestimmt von **Johann Josef Loschmidt** (1865)

Verbindung der **Atomistik von Gasen** (mittlere freie Weglänge) mit der zugehörigen makroskopisch messbaren **Diffusionskonstanten**

unter der Annahme, dass **kondensierte Gase** die **dichteste Packung** der Atome/Moleküle einnehmen

erhielt Loschmidt den Wert $d = 1\text{nm}$ für den Durchmesser eines Luftmoleküls, rund einen **Faktor 3 zu groß**



Atomistik der Elektrizität

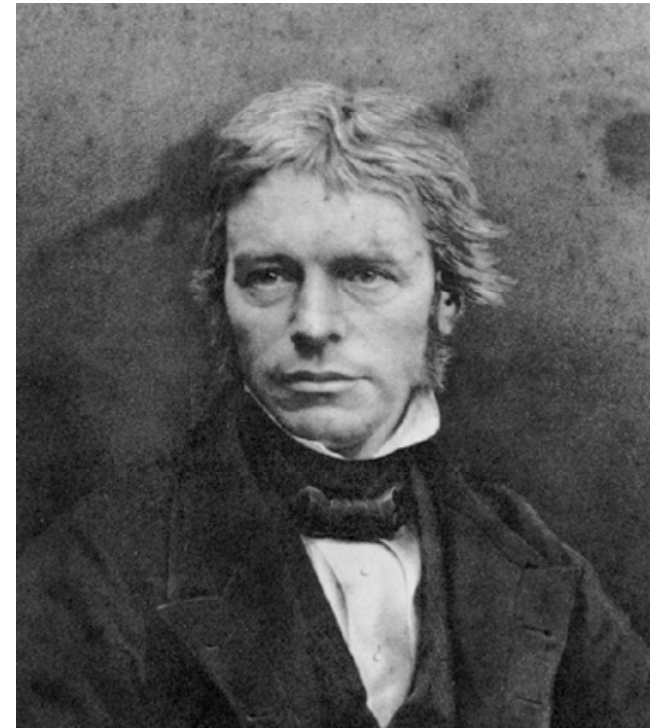
Elektrolyse:

abgeschiedene Menge eines Materials
proportional zur Ladungsmenge

Ladungsmenge zur Abscheidung von
1 Mol einer einwertigen Substanz:

Faradaysche Konstante

$$F = N_A \cdot e$$



Michael Faraday (1791-1867)

Atomistik der Energie

$$E = h \cdot \nu$$

Plancksche Konstante

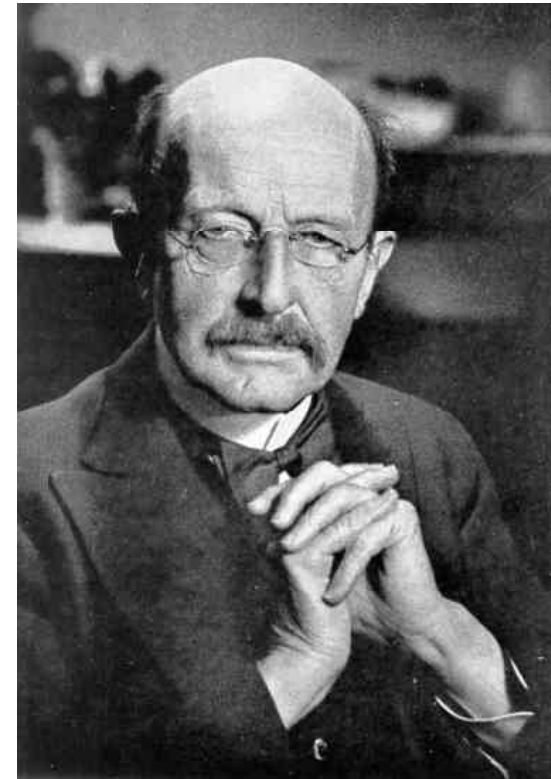
(CODATA 2002):

$$h = 6.626\ 0693(11) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

(CODATA 2006):

$$h = 6.626\ 068\ 96(33) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Beginn der Atom- und Quantentheorie



Max Planck 1858 – 1947
Nobelpreis 1918

Fundamentale Konstanten: physics.nist.gov/cuu/index.html

Adresse <http://physics.nist.gov/cuu/index.html> Wechseln zu Links

Physics Laboratory
Physical Reference Data
NIST
National Institute of Standards and Technology

Home Products and Services **Physical Reference Data** Research Areas Contact Search

The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty
Information at the foundation of modern science and technology from the [Physics Laboratory](#) of [NIST](#)

[Detailed contents](#)

Fundamental Physical Constants
[Values of the constants](#) and related information
[Searchable bibliography](#) on the constants

International System of Units (SI)
[In-depth information on the SI](#), the modern metric system

Uncertainty of Measurement Results
[Guidelines](#) for the expression of uncertainty in measurement

[About this reference.](#) [Feedback.](#)

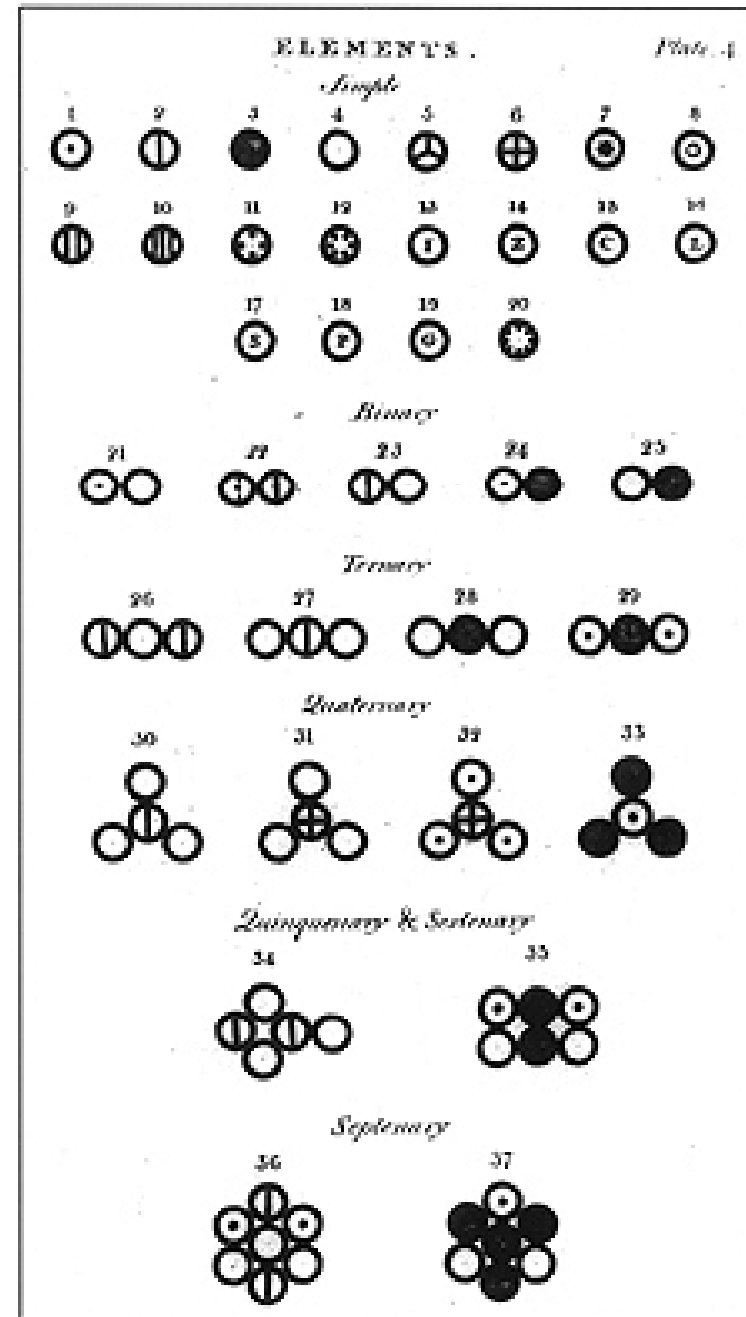
Online: February 1998 - Last update: December 2003
[Privacy Policy / Security Notice](#) - [NIST Disclaimer](#)

Atomhypothese: Status bis ca.1895

Aufbau der Atome unbekannt

ELEMENTS			
	Hydrogen	1	wt. 46
	Azote	5	wt. 68
	Carbon	5	wt. 50
	Oxygen	7	wt. 56
	Phosphorus	9	wt. 56
	Sulphur	13	wt. 90
	Magnesia	20	wt. 190
	Lime	24	wt. 190
	Soda	28	wt. 190
	Potash	42	wt. 167
	Strontian		wt. 46
	Barytes		wt. 68
	Iron		wt. 50
	Zinc		wt. 56
	Copper		wt. 56
	Lead		wt. 90
	Silver		wt. 190
	Gold		wt. 190
	Platina		wt. 190
	Mercury		wt. 167

Daltons
Vorstellungen



Elektron noch nicht identifiziert

Das erste Periodensystem der Elemente (1869)

Handwritten manuscript of the periodic table by Dmitri Mendeleev, showing elements arranged in columns with their atomic weights and names in Cyrillic script.

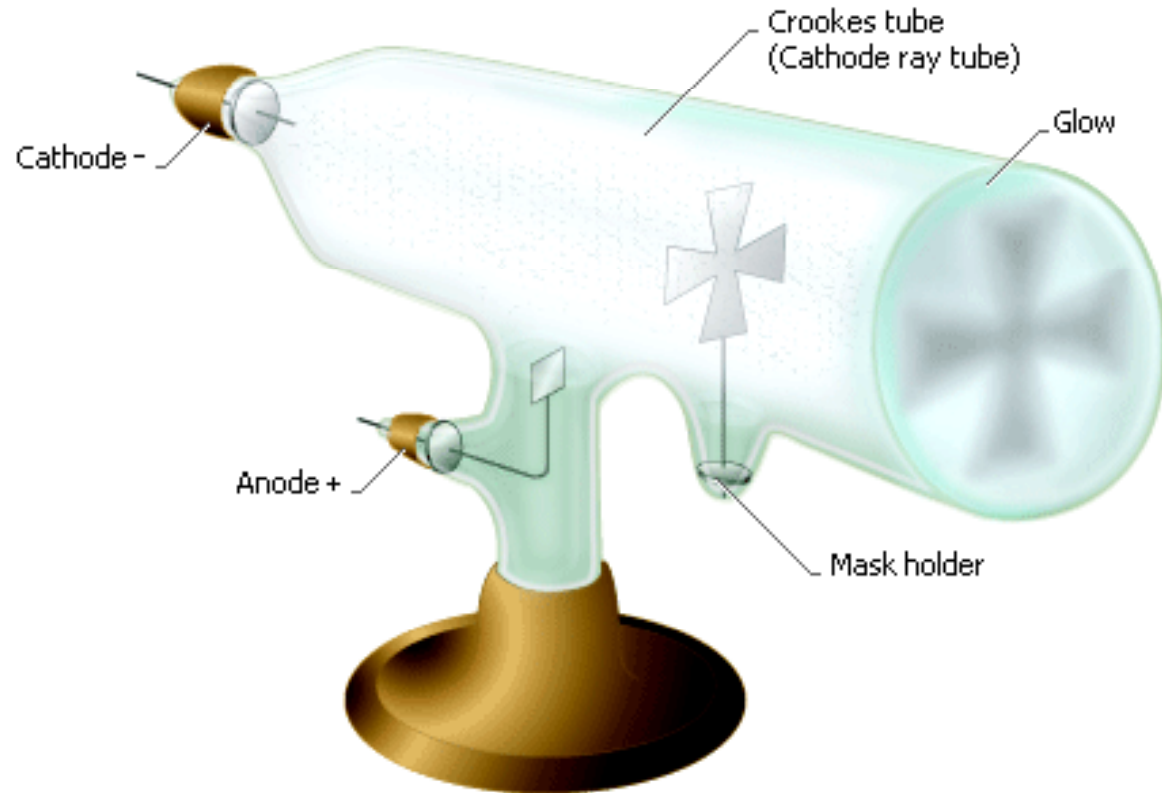
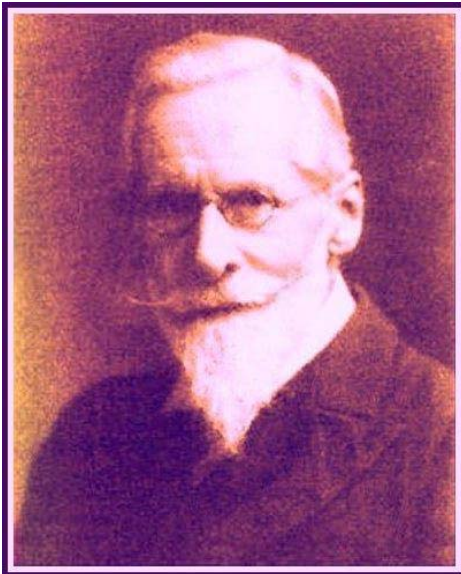


Dmitri Mendelejew
1834-1907

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 189
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
		Ni =	Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
			Zn = 65,2	Cd = 112	
			? = 68	Ur = 116	Au = 197?
			? = 70	Sn = 118	
			As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
			Se = 79,4	Te = 128?	
			Br = 80	I = 127	
			Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
			Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
			? = 92		
			La = 94		
			Di = 95		
			Th = 118?		
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24			
	B = 11	Al = 27,4			
	C = 12	Si = 28			
	N = 14	P = 31			
	O = 16	S = 32			
	F = 19	Cl = 35,5			
	Li = 7	K = 39			
		Ca = 40			
		? = 45			
		?Er = 56			
		?Yt = 60			
		?In = 75,6			

Kathodenstrahlen: Werkzeug auf dem Weg zur Modernen Physik

W. Crookes 1879:



Faszinierte Beobachter dieser Experimente:

W. C. Röntgen

H. Becquerel

J. J. Thomson

Unbekannte neue Strahlen



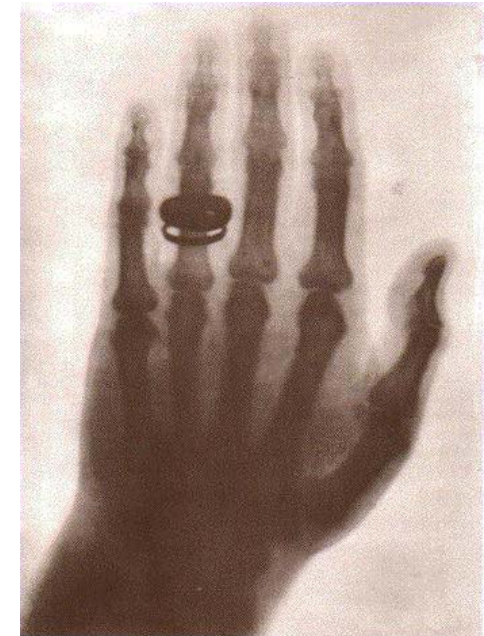
Wilhelm Conrad Röntgen
1845-1923

W. C. Röntgen

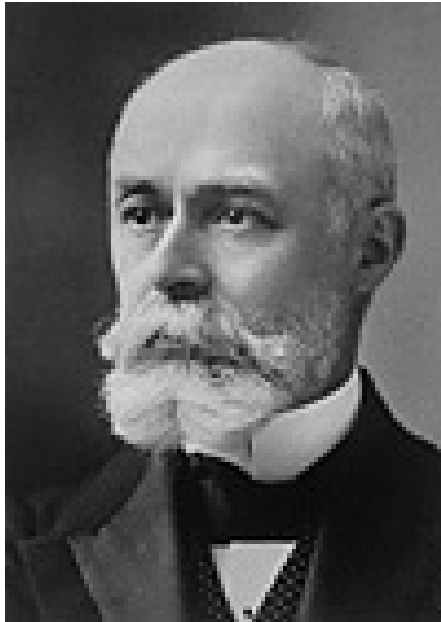
1879 – 1888
08.Nov.1895
10.Dez.1901

Physik-Professor in Gießen
Entdeckung der X-Strahlen
erster Nobelpreis für Physik

Eine optisch dicht eingepackte Entladungsröhre vermochte in einem dunklen Raum ein phosphoreszierendes Material zum Leuchten anzuregen (1895)



Entdeckung der Radioaktivität



Antoine Henri
Becquerel
1852-1908

Nobelpreis
1903
zusammen mit
Pierre und Marie
Curie

Aus Bequerels Nobelpreis-Vortrag

*66 - 1896 - 90. ... Sulfate double d'uranyle et de Potassium ...
Papier noir - Curie de Curie ...
Exposé au Salon le 27. de cette année ...
Vendredi le 5 Mars.*

Verpackte
Photoplatte



Verpackte
Photoplatte
mit
Metallkreuz
abgedeckt

Lumineszierendes Uransalz schwärzte eine optisch dicht verpackte Photoplatte ohne selbst durch Primärstrahlung (Licht, Wärme) angeregt zu werden; das Salz strahlt „von selbst“ (1896)

Radioaktive Strahlung, radioaktive Elemente

Nobelpreis Physik 1903
zusammen mit Henri Becquerel



Pierre Curie
1859-1906



Marie Curie,
geb. Sklodowska
1867-1934

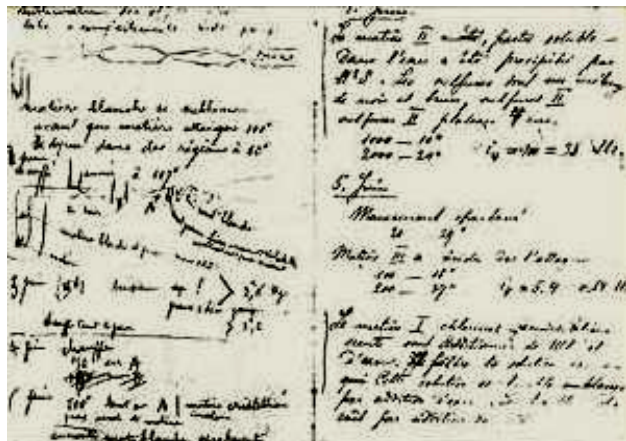
Nobelpreis
Chemie
1911

Entdeckung der
Radioaktivität in Thorium,

Entdeckung der Elemente
Polonium und Radium
(beide 1898),

Isolation von reinem Radium
aus Tonnen von Pechblende,

Untersuchung der
Eigenschaften radioaktiver
Strahlung



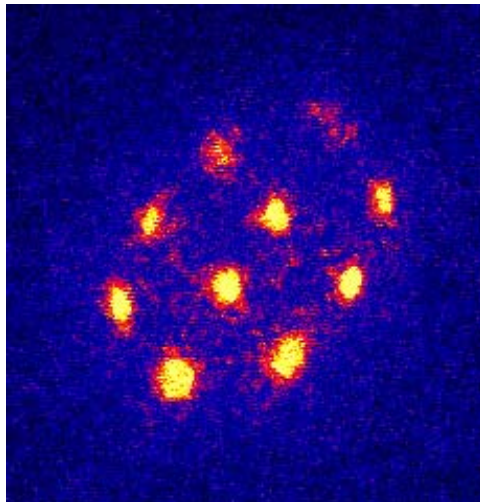
Laborbuch 1898

Hauptthema dieser Vorlesung: Atomphysik



Institut für Atom- und Molekülphysik

24 Nobelpreisträger
aus dem Bereich der
Atom- und Molekül-
physik seit 1986



Kap. 2:

Größe von Atomen,

„Sichtbarmachen“ von Atomen

Atomare Masseneinheit

1 atomare Masseneinheit = $1 m_u = 1/12 m(^{12}\text{C})$

$m(^{12}\text{C})$: Masse des neutralen Kohlenstoffatoms

CODATA* 2006

$$1 m_u = 1.660\,538\,782(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m_u / m_u = 5.0 \cdot 10^{-8}$$

$$1 m_u = 931.494\,028(23) \times 10^6 \text{ eV}/c^2$$

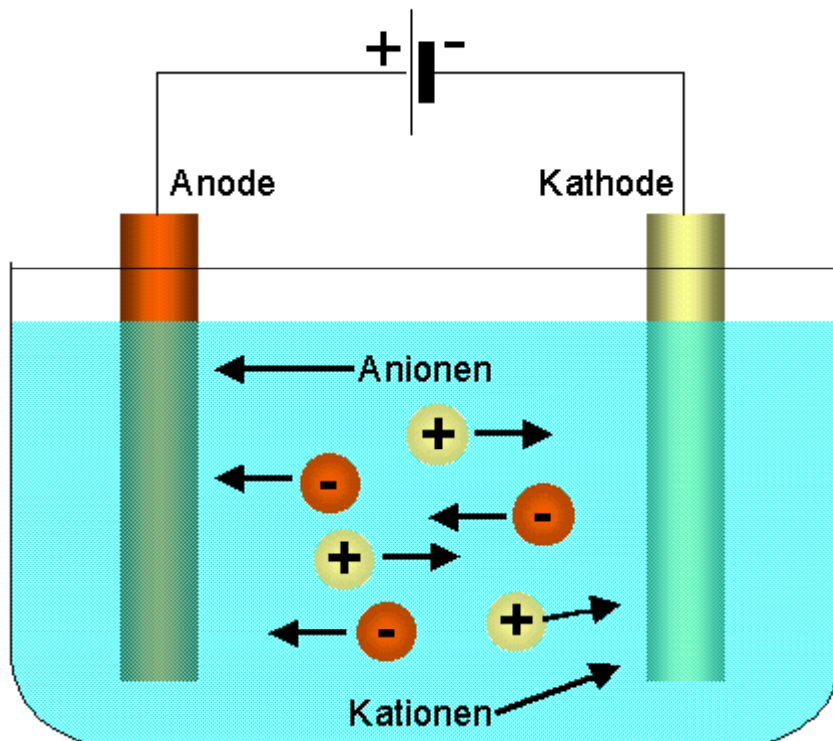
$$\Delta m_u / m_u = 2.5 \cdot 10^{-8}$$

* CODATA: Committee on Data for Science and Technology

Avogadro-Zahl aus der Elektrolyse

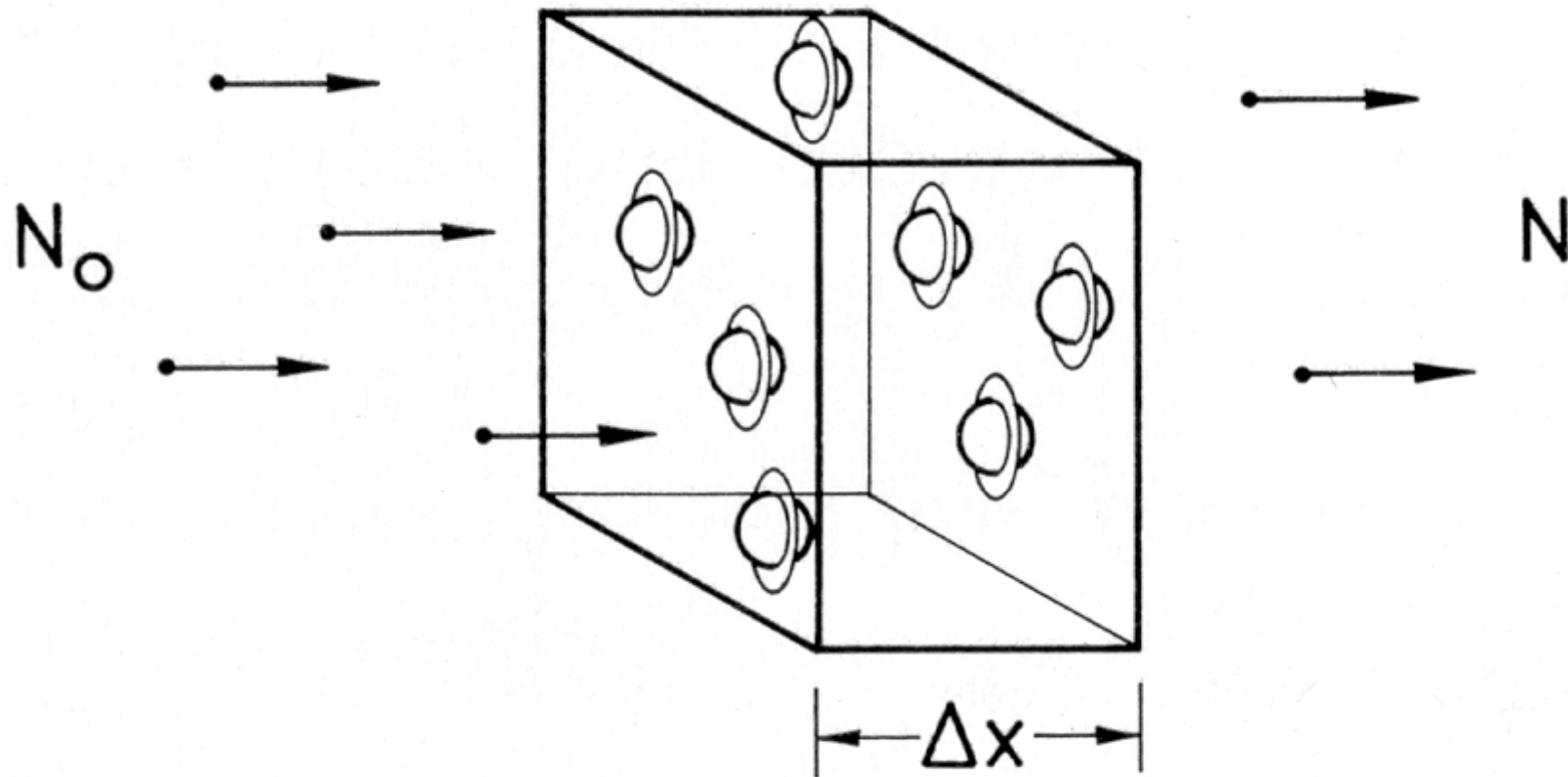
$$N_A = F / e$$

$F = 96\,485.3399(24) \text{ C mol}^{-1}$ durch Messung von Stromstärke und Zeit
Separate Messung der Elementarladung notwendig



Der **Elektrolyt** kann z.B. wässrige **Silbernitratlösung** sein. Daraus werden **Ag⁺ Ionen** zur negativen Elektrode transportiert und dort abgeschieden. Mit **96485 As** kann man $96485 \cdot 1.118 \text{ mg} = 107.87 \text{ g}$ Silber abscheiden, d.h. **1 Mol Silber**.

Streuung von Projektilen an Targets



Der Begriff des Wirkungsquerschnitts

Ein Wirkungsquerschnitt hat als Einheit eine Fläche. Der Wirkungsquerschnitt sagt etwas über die **Reaktionswahrscheinlichkeit** von Teilchen und Quanten in ihren **Wechselwirkungsprozessen** aus.

Ausgangsvorstellung ist ein **Teilchenstrahl**, der eine Materiescheibe (ein **Target**) durchdringt und dabei bestimmte **Ereignisse** (z.B. eine chemische Reaktion oder die Emission von Elektronen einer bestimmten Energie in einen bestimmten Winkelbereich) auslöst.

Da die studierten Ereignisse auf atomarer und sub-atomarer Ebene ablaufen, kann man die um jedes Targetteilchen herum angeordnete Zielscheibe nicht sehen. Die **Größe der Zielscheibe** kann man nur **aus Streuexperimenten** ermitteln. Die Größe dieser Zielscheibe ergibt wichtige Aussagen über die Wechselwirkungsprozesse zwischen den beteiligten Stoßpartnern, sie wird als **Wirkungsquerschnitt** bezeichnet. Der Wirkungsquerschnitt für eine Wechselwirkung zwischen einem Teilchen und einem Atom kann sehr viel kleiner sein als die Projektionsfläche des Atoms.

Man unterscheidet totale, sowie einfach und mehrfach **differentielle Wirkungsquerschnitte**, je nachdem wie detailliert man das Streuereignis definiert.

Bei der sogenannten Rutherfordstreuung beispielsweise wird der einfach differentielle Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$ durch Beobachtung der Streuung in einen bestimmten Raumwinkelbereich $d\Omega(\theta)$ ermittelt.

Beispiel: Neutrino - Wirkungsquerschnitte

In jeder Sekunde werden wir von ca. **100 Billionen** (10^{14}) **Neutrinos** durchdrungen

Neutrinos unterliegen der Schwachen Wechselwirkung → **kaum Reaktionen**

Ein Strahl von Neutrinos wird in Materie abgeschwächt gemäß

$$N_{\nu} = N_{\nu}(0) \exp\left(-\frac{x}{d}\right)$$

Die Materiestrecke, auf der die Strahlintensität auf $1/e$ absinkt, ist

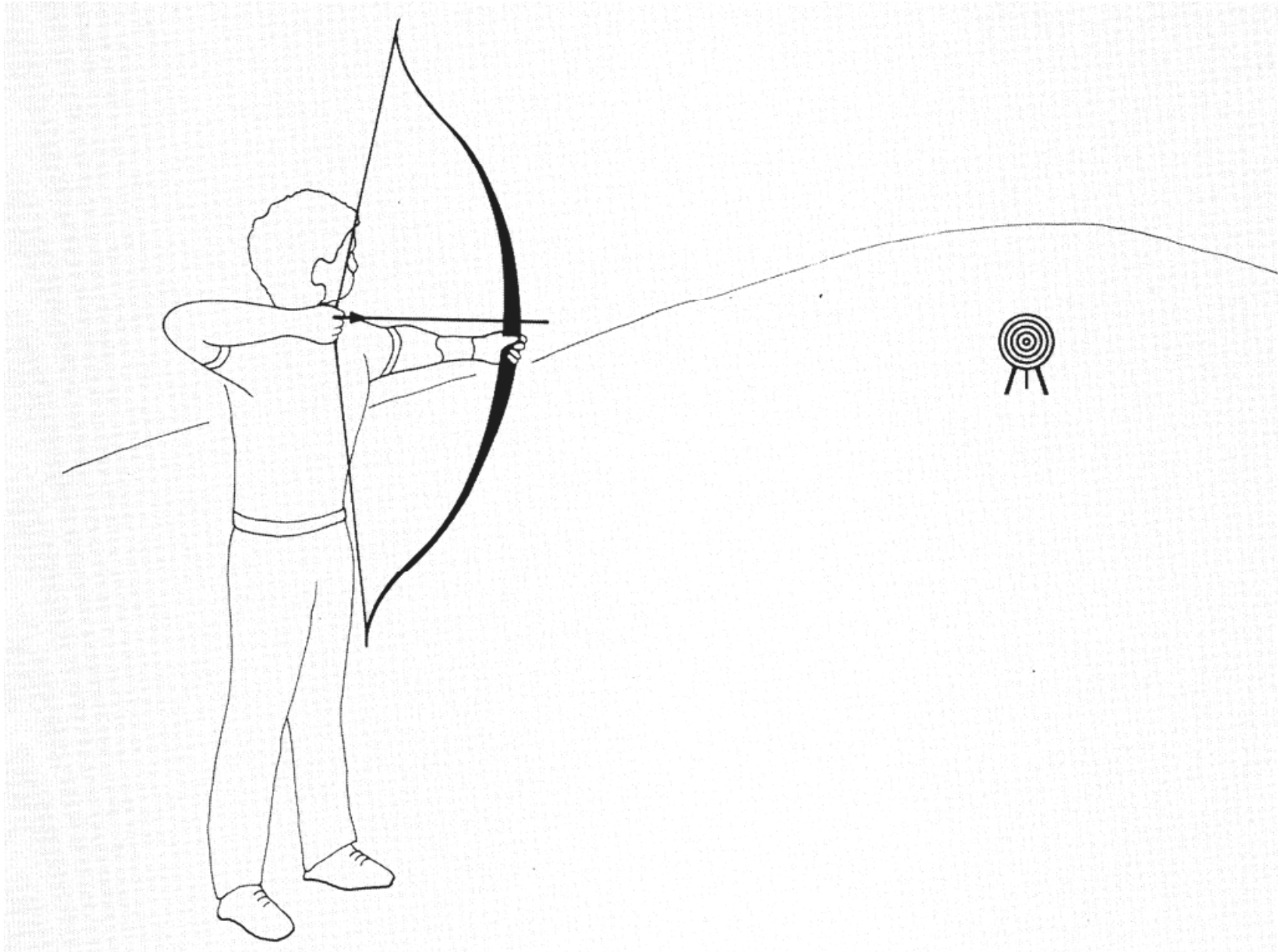
$$d = \frac{1}{n\sigma}$$

Dabei ist **n** die **Volumendichte** der Materieteilchen, **σ** der sogenannte **totale Wirkungsquerschnitt** für Neutrinostreuung.

Dieser Wirkungsquerschnitt ist von der Größenordnung **$\sigma = 10^{-43} \text{ cm}^2$** . Nimmt man die Atomdichte von Blei mit $n = 11.34 \text{ g/cm}^3 \cdot 6 \cdot 10^{23} / 208 \text{ g} = 3.3 \cdot 10^{23} / \text{cm}^3$, so ergibt sich $d = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm} = 10^9$ Lichtsekunden, bzw. **$d = 32$ Lichtjahre**.

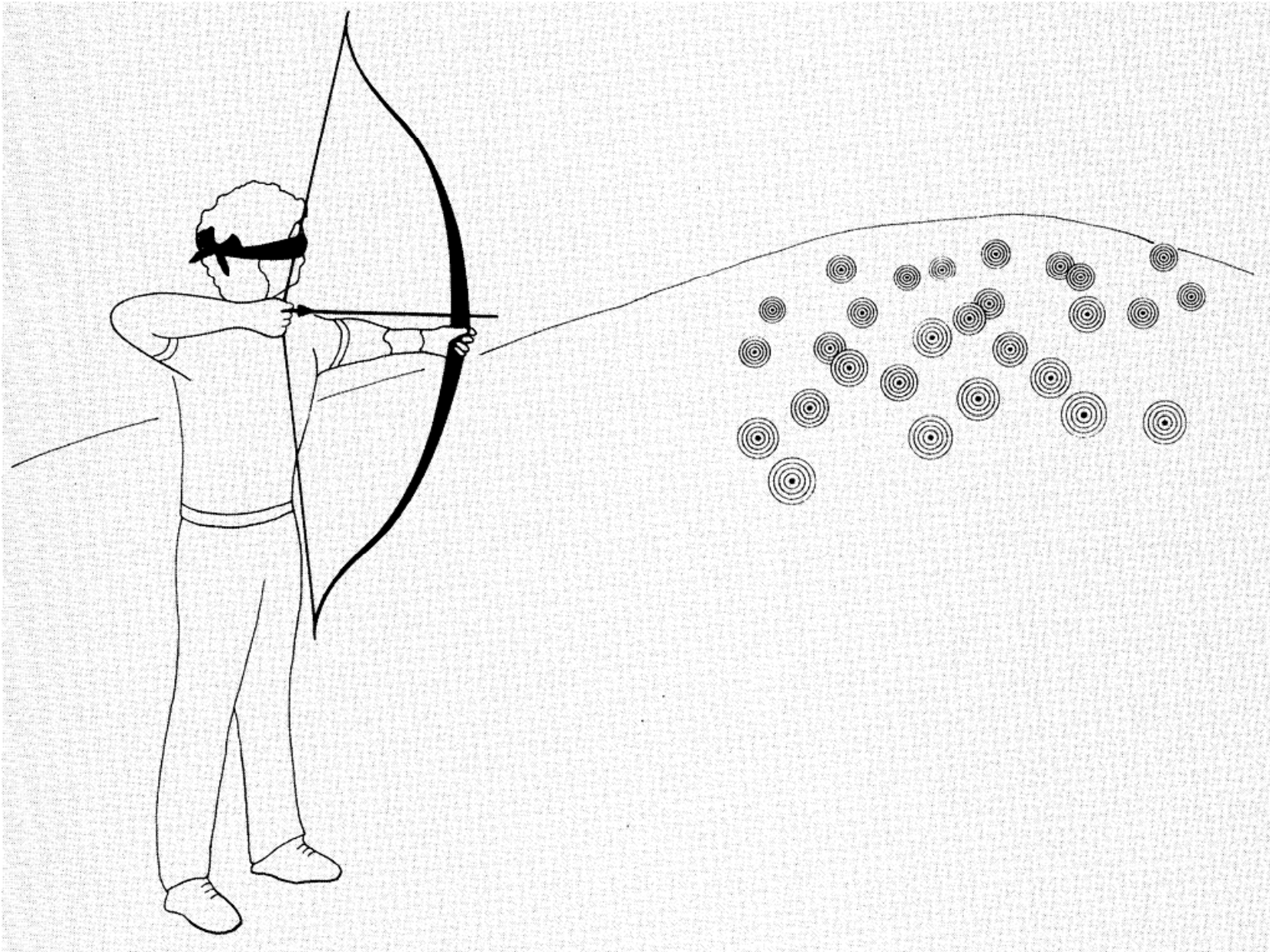
Würde man Bleikerne unmittelbar hintereinanderreihen, d.h. $n \approx 10^{38} / \text{cm}^3$, so wäre $d = 1000 \text{ m}$, die Neutrinos können mehr als 10^{16} Bleikerne einfach durchdringen

Normale Zielscheibe, Bogenschütze zielt auf Mitte



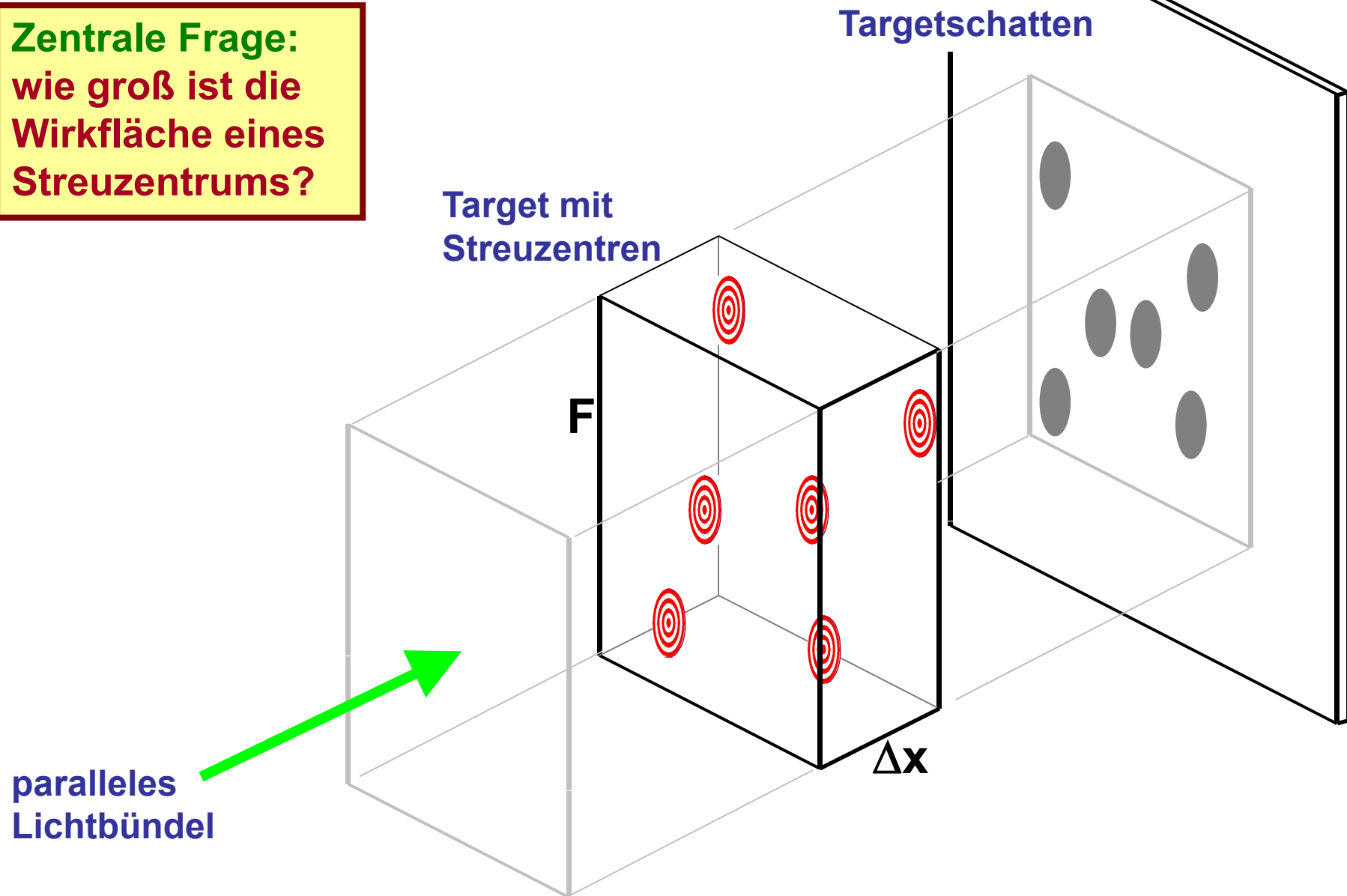
Atomare Zielscheiben, Bogenschütze zielt blind

Es gibt aber viele Zielscheiben



Anschauliche Vorstellung vom Wirkungsquerschnitt

Zentrale Frage:
wie groß ist die
Wirkfläche eines
Streuzentrums?



Anschauliche Vorstellung vom Wirkungsquerschnitt

räumliche Dichte der Streuzentren n
bekannt:

Beleuchtetes Targetvolumen

$$\Delta V = \Delta x \cdot F$$

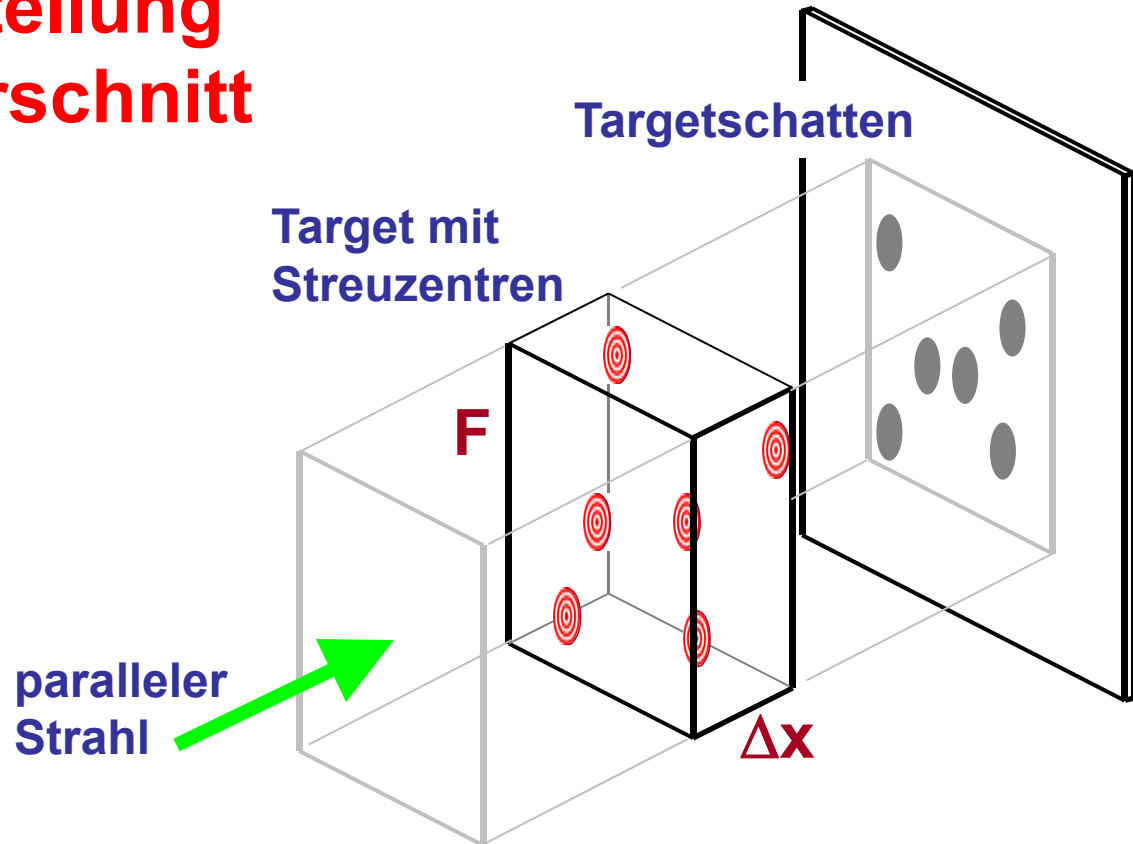
Zahl der beleuchteten Streuzentren

$$\Delta N = \Delta x \cdot F \cdot n$$

Flächendichte der Streuzentren

$$\Delta N/F = \Delta x \cdot n$$

(Flächenbelegung)



Wirkfläche der Streuzentren: σ

Messgröße Absorptionswahrscheinlichkeit =

$$\begin{aligned} \text{Schattenfläche/Gesamtfläche} &= \Delta P = \Delta N \cdot \sigma / F \\ &= \Delta x \cdot n \cdot \sigma \end{aligned}$$

Messung eines totalen Wirkungsquerschnitts

Schattenflächen i.a. viel zu klein für eine direkte Messung; die Zahl der Streuzentren ist dagegen sehr hoch

Beispiel:

Goldtarget mit

$F = 0.1 \text{ cm}^2$, $\Delta x = 50 \mu\text{m}$

$\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$, $M = 197 \text{ g}$:

$$\Delta N = n \cdot F \Delta x$$

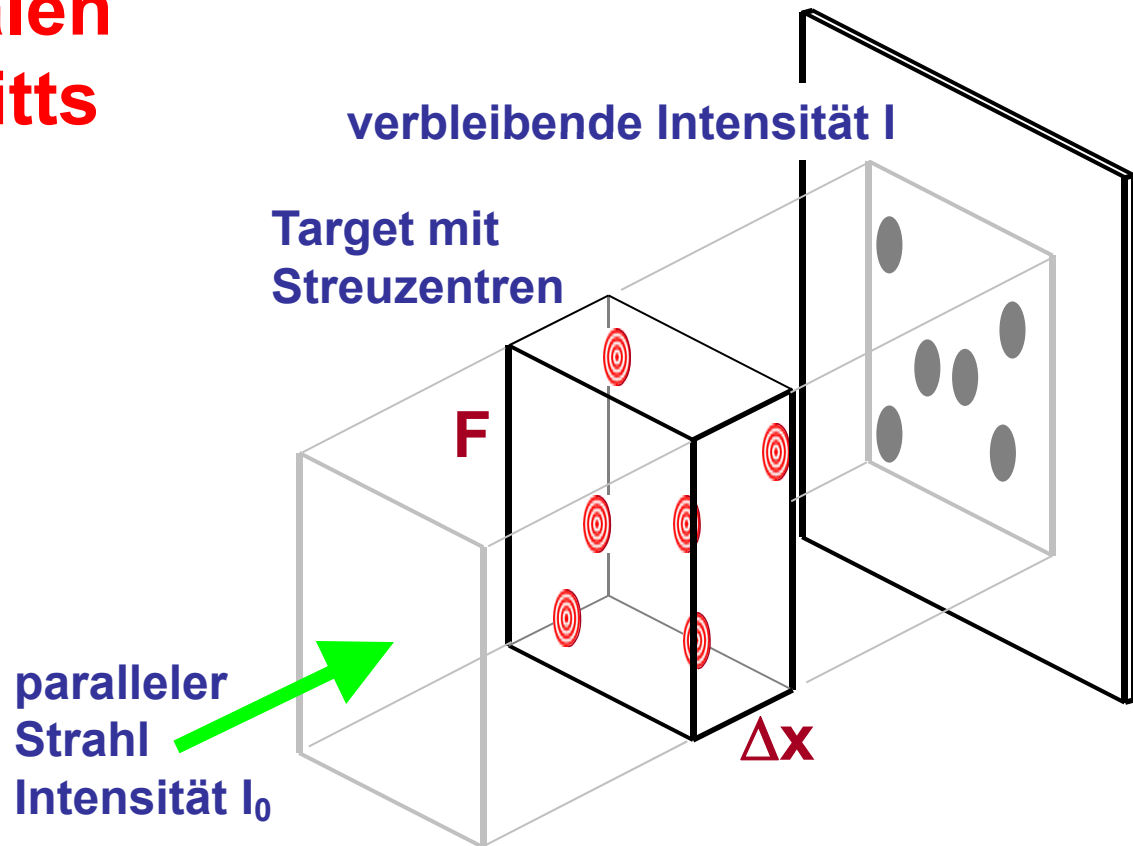
$$= \rho N_A / M \cdot F \Delta x$$

$$= 2.9 \cdot 10^{19} \text{ Au Atome}$$

Messmöglichkeit:

Bestimmung der

Strahlintensität mit (I)
und ohne Target (I_0)



Falls für die Reaktionswahrscheinlichkeit gilt

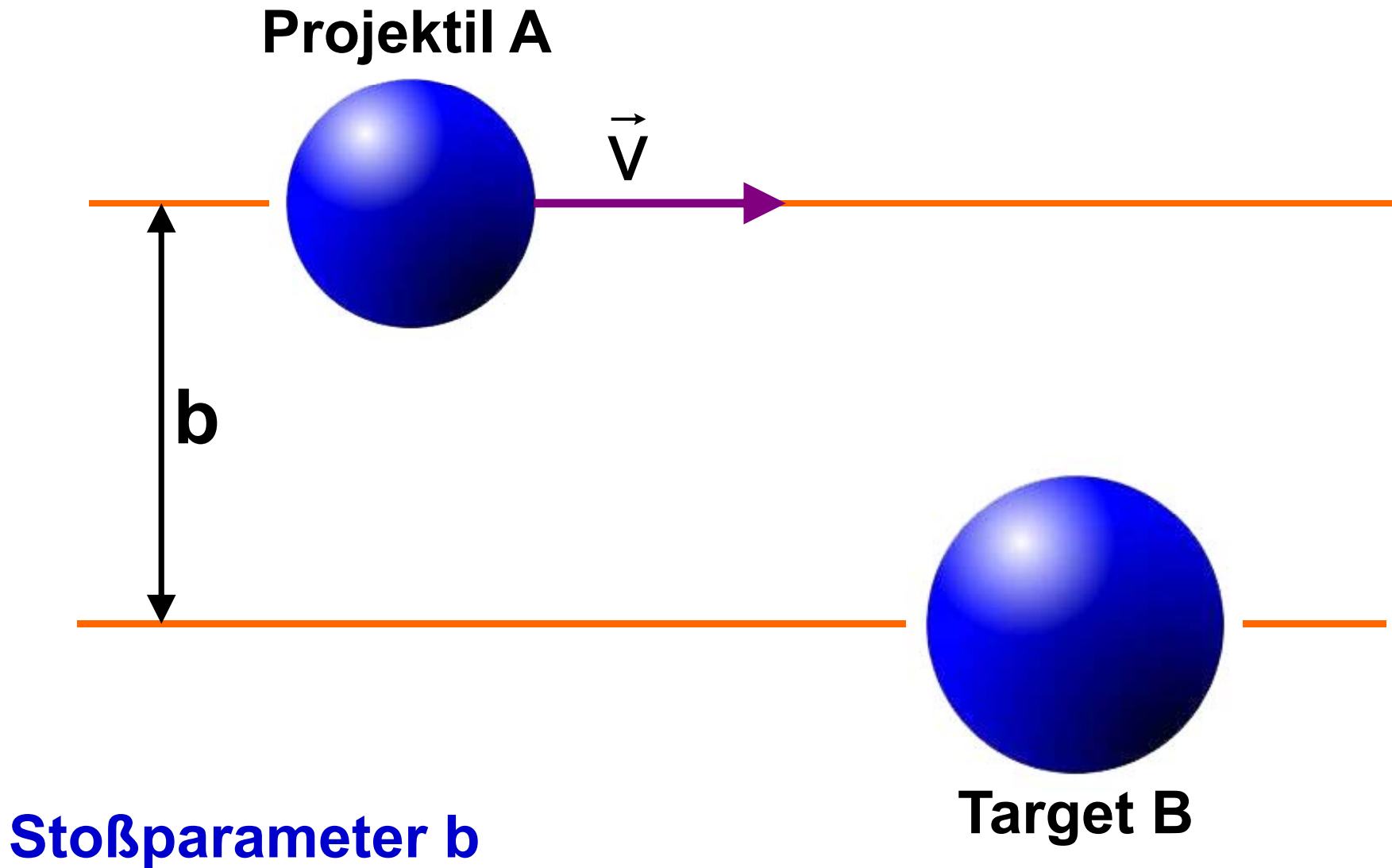
$P = (I_0 - I) / I_0 \ll 1$, dann ist die Reaktionsrate

$$(I_0 - I) = R = I_0 \cdot \Delta N / F \cdot \sigma = I_0 \cdot n \cdot \Delta x \cdot \sigma$$

Damit ergibt sich σ aus makroskopisch

$$\text{messbaren Größen: } \sigma = R / (I_0 \cdot n \cdot \Delta x)$$

Elastische Streuung starrer Kugeln



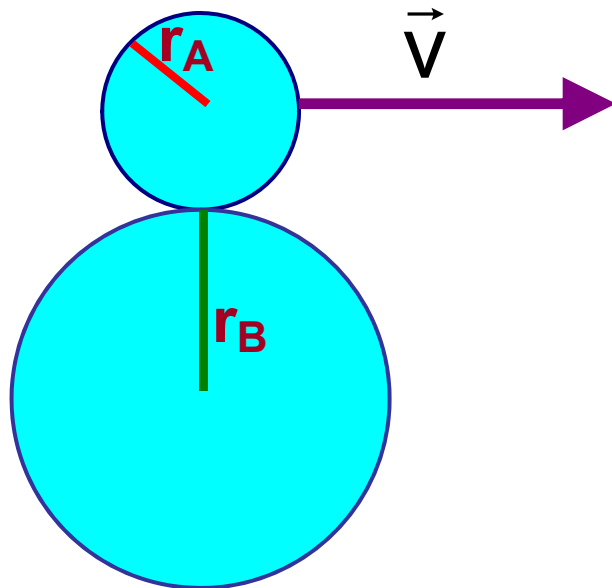
Wirkungsquerschnitt für den Stoß starrer Kugeln

Gesucht:

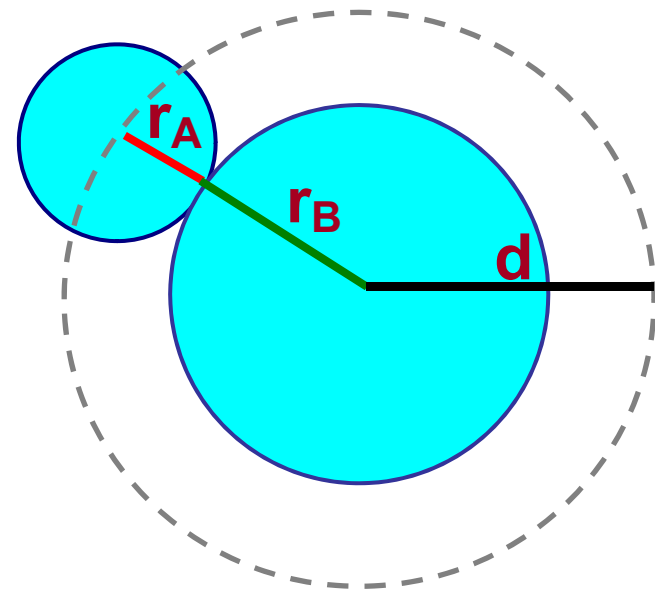
maximaler Stoßparameter $b_{\max} = d$, bei dem eine Streuung stattfindet.

Streuung tritt ein, wenn das Projektil das Target beim Stoß berührt, d.h. für $b < r_A + r_B$, d.h. $b_{\max} = d = r_A + r_B$

Seitenansicht

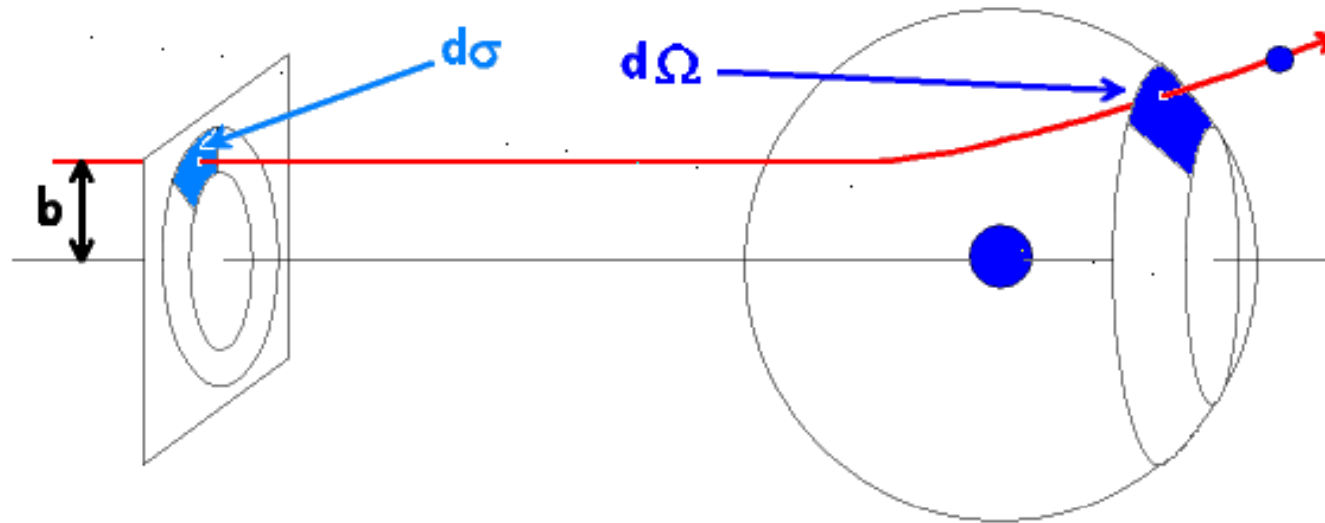


Frontalansicht in Richtung der Projektiltrajektorie



Totaler Wirkungsquerschnitt: $\sigma = \pi \cdot (r_A + r_B)^2$

(Winkel-)Differentieller Wirkungsquerschnitt



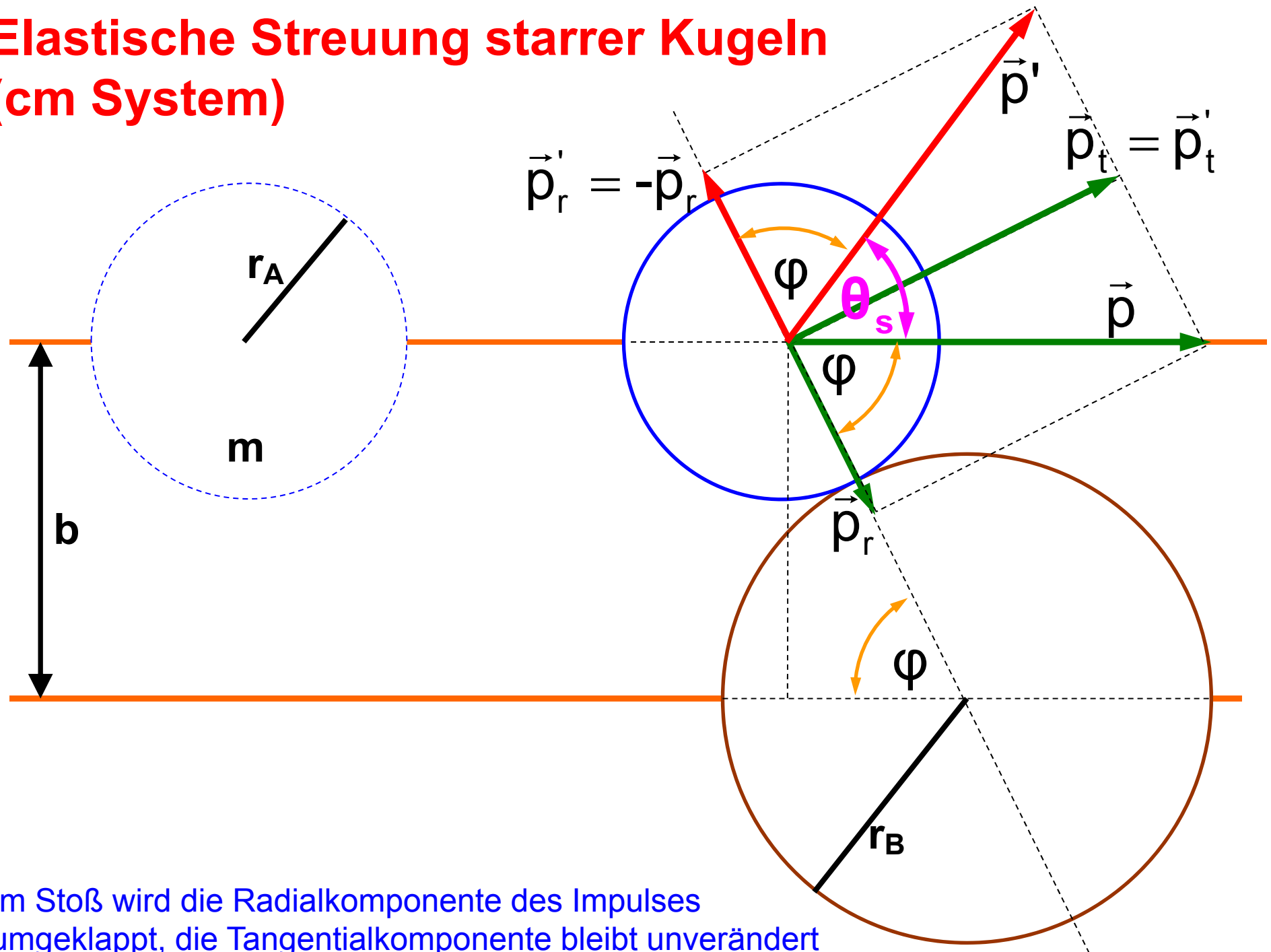
Treten Projektile durch die Wirkungs-Teilfläche $d\sigma$, so werden sie in das Raumwinkelement $d\Omega$ (unter dem Winkel θ) gestreut

$$d\sigma = \Delta\varphi \cdot b db$$

$$d\Omega = \Delta\varphi \cdot \sin\theta d\theta$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{b}{\sin\theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right|$$

Elastische Streuung starrer Kugeln (cm System)



Im Stoß wird die Radialkomponente des Impulses umgeklappt, die Tangentialkomponente bleibt unverändert

Wirkungsquerschnitt für elastische Streuung starrer Kugeln

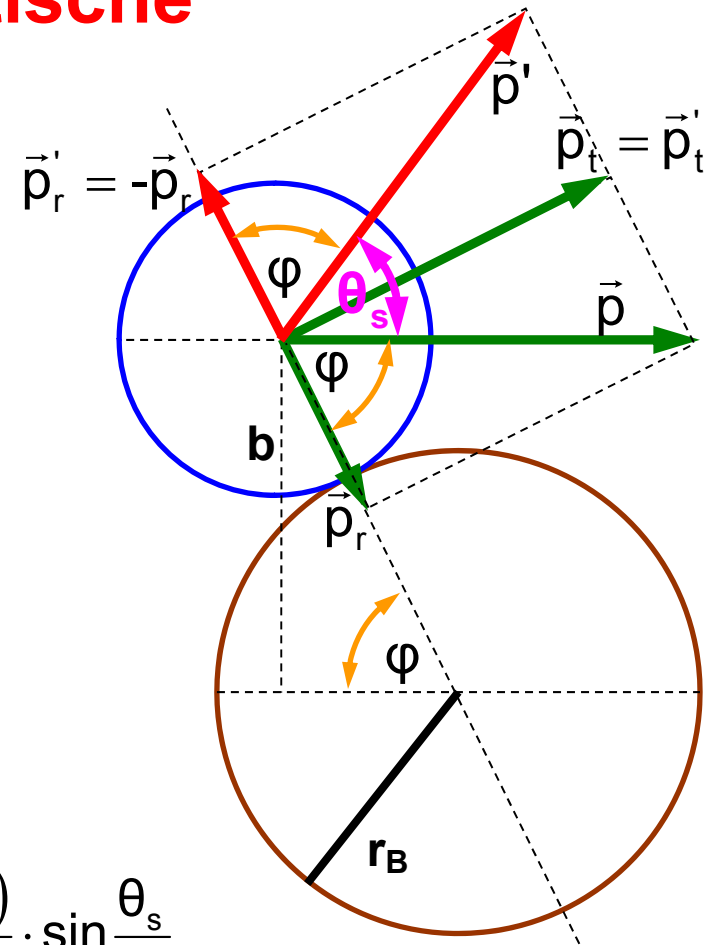
$$\sin\varphi = \frac{b}{r_A + r_B}$$

$$b = (r_A + r_B) \cdot \sin\varphi = (r_A + r_B) \cdot \sin\left(\frac{180^\circ - \theta_s}{2}\right)$$

$$b = (r_A + r_B) \cdot \cos\frac{\theta_s}{2}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_s) = \frac{b}{\sin\theta_s} \left| \frac{db}{d\theta_s} \right| = \frac{(r_A + r_B) \cdot \cos\frac{\theta_s}{2}}{2\sin\frac{\theta_s}{2} \cdot \cos\frac{\theta_s}{2}} \cdot \frac{(r_A + r_B)}{2} \cdot \sin\frac{\theta_s}{2}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_s) = \frac{(r_A + r_B)^2}{4}$$



winkelunabhängiger differentieller Wirkungsquerschnitt

Schwerpunktsystem \leftrightarrow Laborsystem

Targetteilchen sei zunächst in Ruhe; es nimmt im Stoß einen Impuls auf,

Bei elastischer Streuung gilt:

Schwerpunktsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{cm}}}, \theta_{\text{cm}}, v_0$$

vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

Laborsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Lab}}}, \theta_{\text{Lab}}, v_0, v_1, v_2$$

vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_0^2$$

nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_1^2 + \frac{m_2}{2} v_2^2$$

Umrechnungen cm \leftrightarrow Lab (nicht-relativistisch)

$$\frac{d\sigma(\theta_{\text{Lab}})}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\theta_{\text{cm}})}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{d\Omega_{\text{cm}}}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\theta_{\text{cm}}(\theta_{\text{Lab}}))}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{\sin\theta_{\text{cm}} d\theta_{\text{cm}}}{\sin\theta_{\text{Lab}} d\theta_{\text{Lab}}}$$

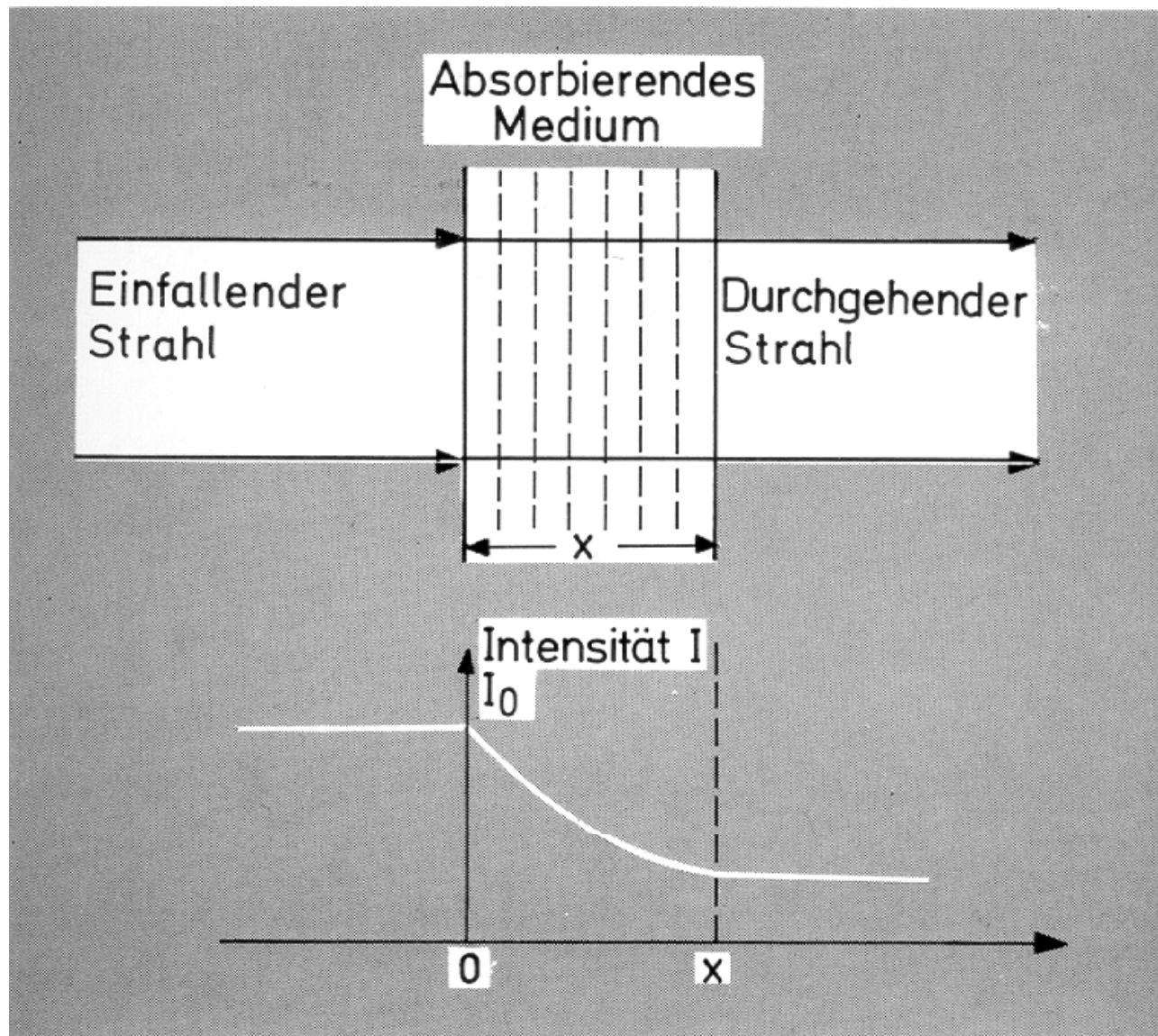
Elastische Streuung:

$$\theta_{\text{Lab}} = \arctan\left(\frac{\sin\theta_{\text{cm}}}{\cos\theta_{\text{cm}} + m_1/m_2}\right)$$

$$\theta_{\text{cm}} = \arcsin\left[\frac{m_1}{m_2} \sin\theta_{\text{Lab}} \cos\theta_{\text{Lab}} \pm \sin\theta_{\text{Lab}} \sqrt{1 - \left(\frac{m_1}{m_2} \sin\theta_{\text{Lab}}\right)^2}\right]$$

$$v_1 = v_0 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \left[\cos\theta_{\text{Lab}} \pm \sqrt{(\cos\theta_{\text{Lab}})^2 + \frac{(m_2^2 - m_1^2)}{m_1^2}} \right]$$

Abnahme der Zahl ungestreuter Projektile

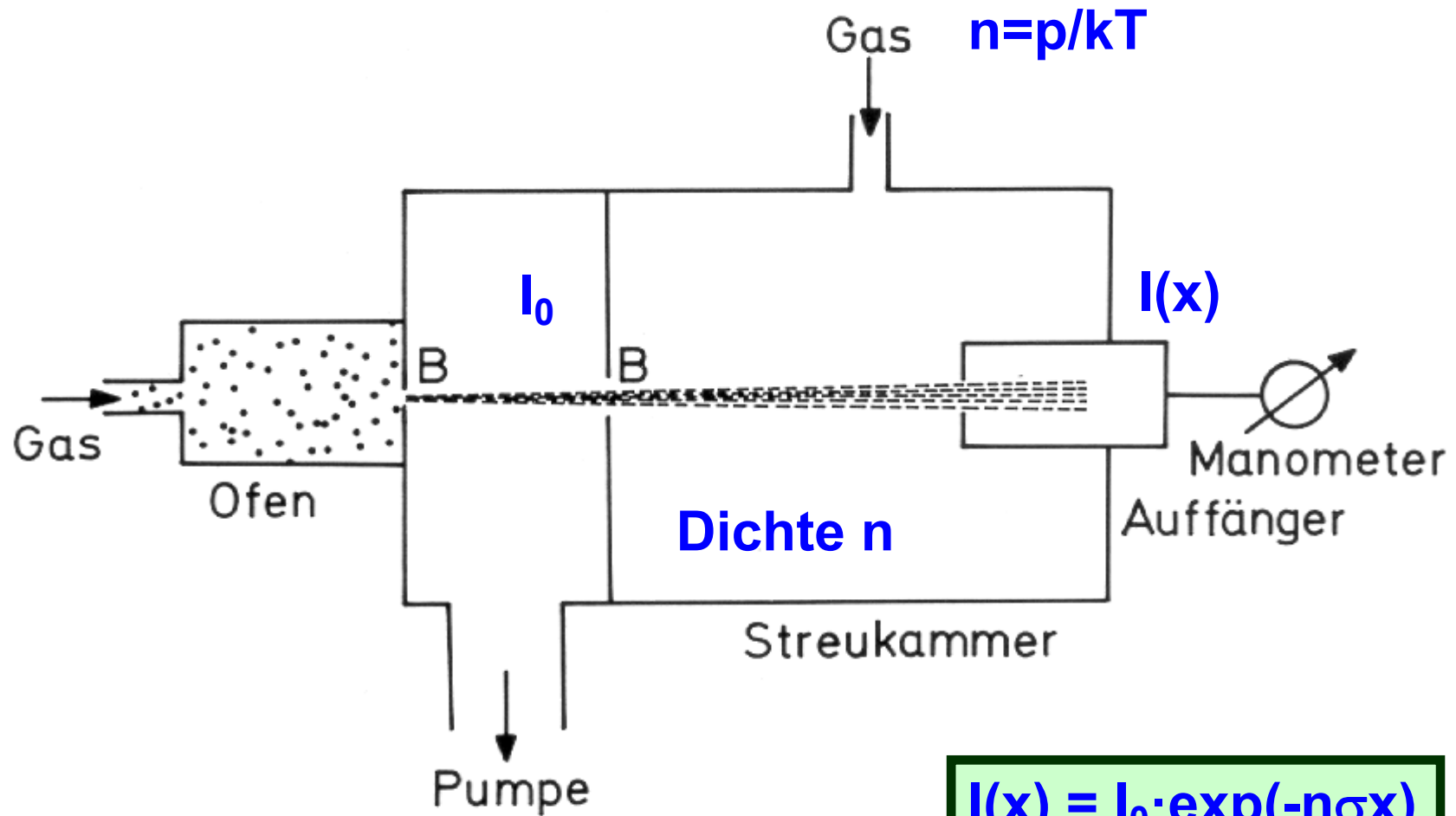


Totaler Wirkungsquerschnitt starrer Kugeln:
$$\sigma = \pi \cdot (r_A + r_B)^2$$

Idee:
Bestimmung von Atomradien durch Streuexperimente

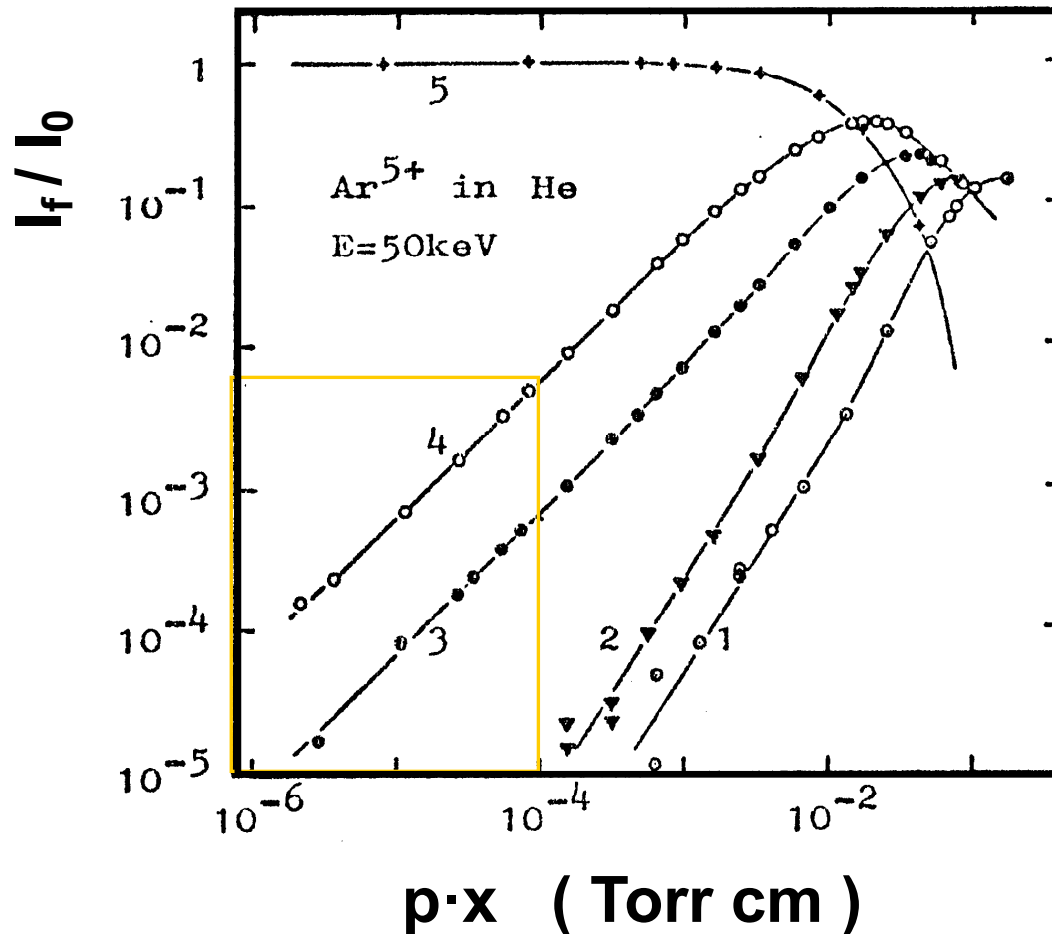
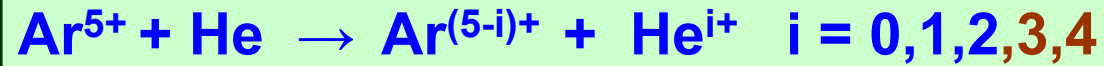
Bestimmung von Atomdurchmessern Streuexperimente mit Atomstrahlen

Pionierarbeiten von Max Born durchgeführt



Einzelstoßbedingung

Beispiel: Ladungstransfer in Ion-Atom Stößen



$$I_4 / I_0 = \sigma_{5,4} \cdot n \cdot x$$
$$= \sigma_{5,4} \cdot (p/kT) x$$

$$\sigma_{5,4} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$$

Atomgröße aus Kenntnis der Avogadro-Zahl

Siehe Präsenzübung: Volumen eines Atoms in flüssigem Helium unter
der Annahme einer dichten Kugelpackung

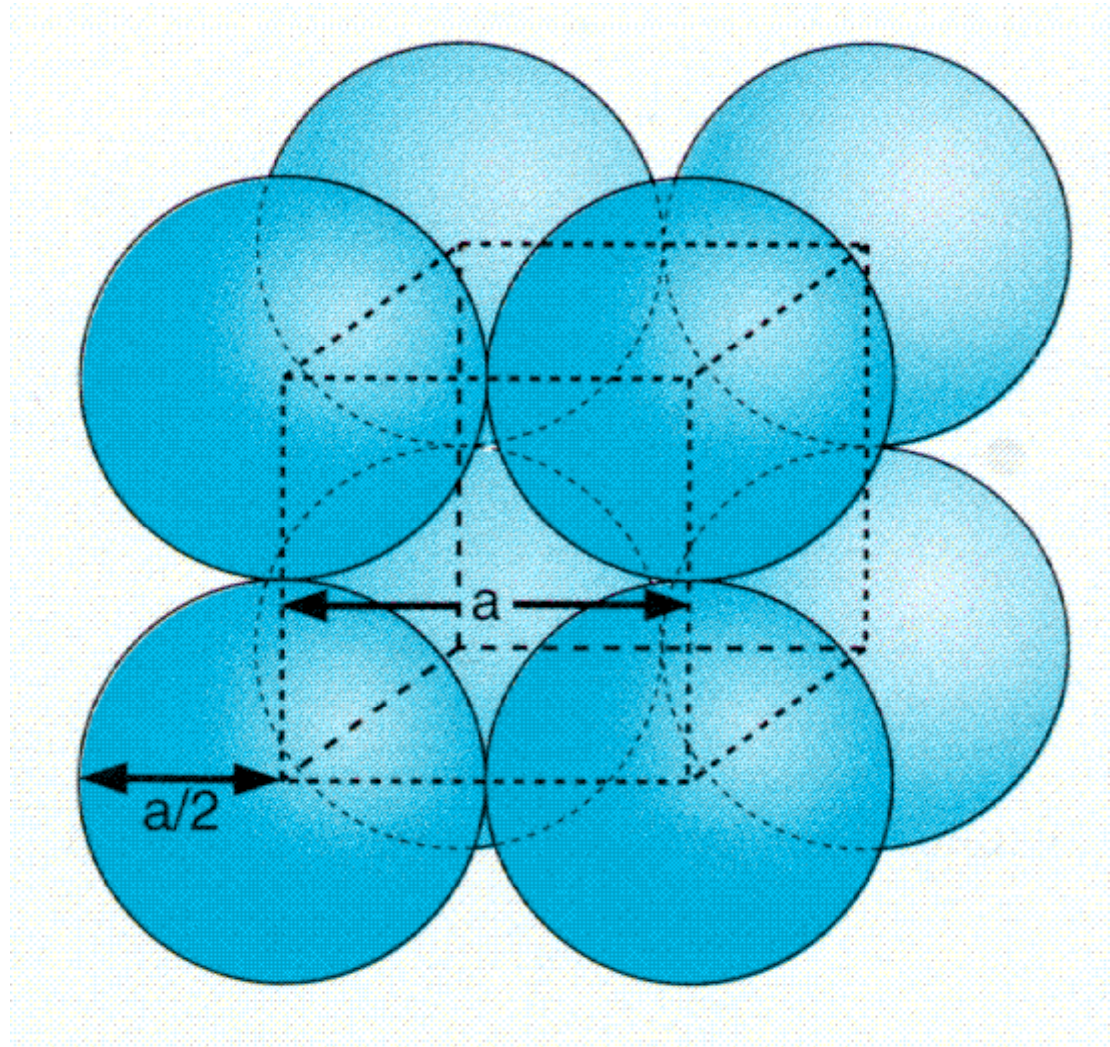
Annahme von Wassermolekülen in einem Einheitswürfel der Kantenlänge a
ergibt als Molekülradius $a \approx 3.1 \text{ \AA}$

Öltröpfchenmethode

Experiment

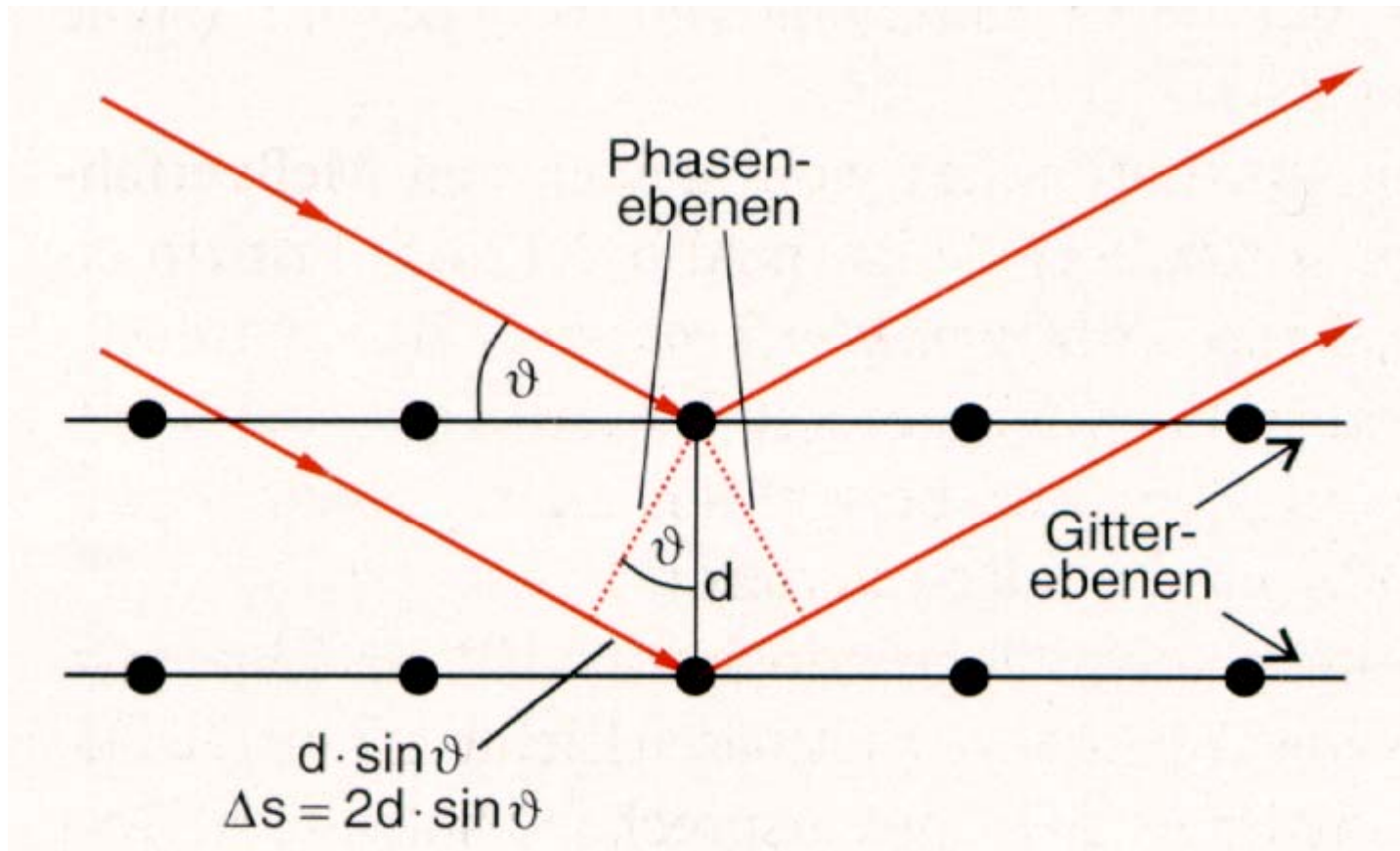
Tropfen mit Volumen V_{Tropfen} breitet sich zu einer monomolekularen
Schicht der Dicke h auf einer Fläche F auf Wasser aus. Der
Moleküldurchmesser ergibt sich zu $h = V_{\text{Tropfen}} / F$

Atomgröße aus der Packungsdichte in Kristallen



Abstand a ist der zweifache Atomradius

Beugung an Kristallen: Bragg Bedingung



Konstruktive Interferenz, wenn $\Delta s = 2d \cdot \sin \vartheta = m \cdot \lambda$

$m = 1, 2, 3$

Röntgenbeugung an Kristallen

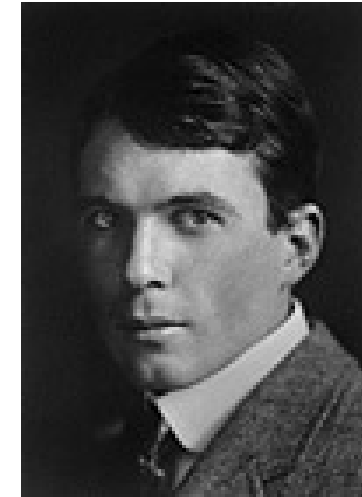


Max von Laue
(1879 – 1960)

Nobelpreis 1914

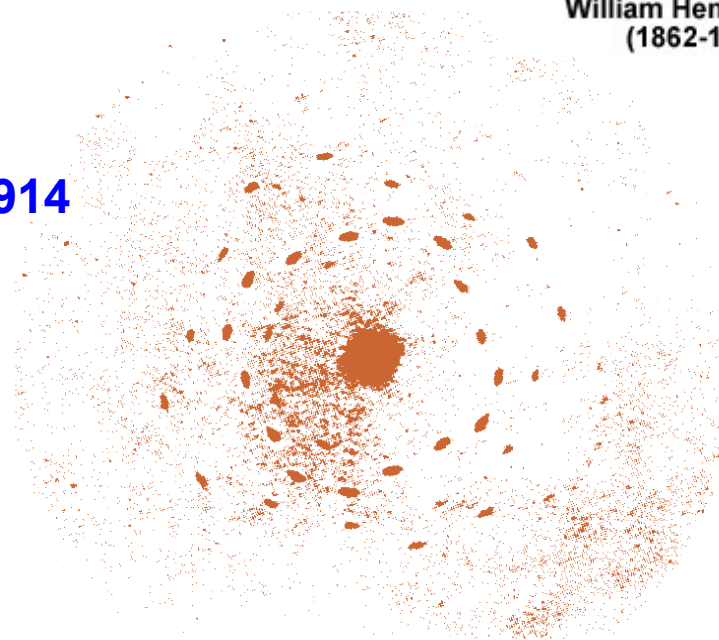


William Henry Bragg
(1862-1942)



William Lawrence Bragg
(1890 – 1971)

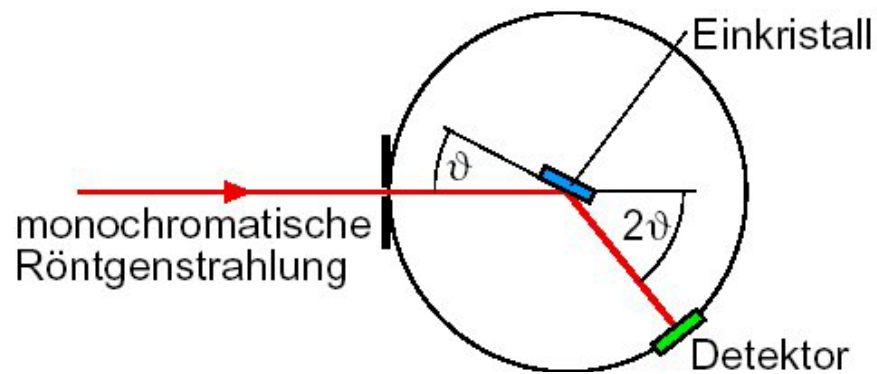
Nobelpreis 1915



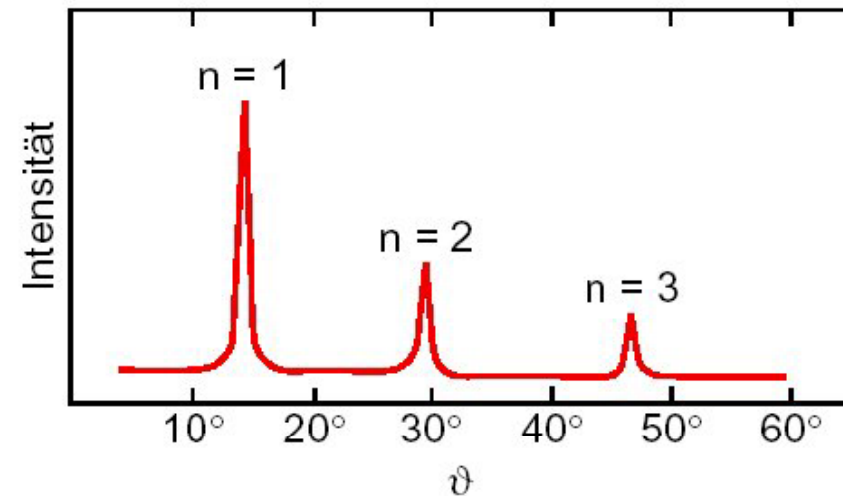
Braggsche Röntgenbeugung (monochromatische Röntgenstrahlung))

Reflexion von einem drehbaren Einkristall
(Detektor wird mit dem Kristall mitgeschwenkt):

Beugungsmaxima bei unterschiedlich indizierten Gitterebenen

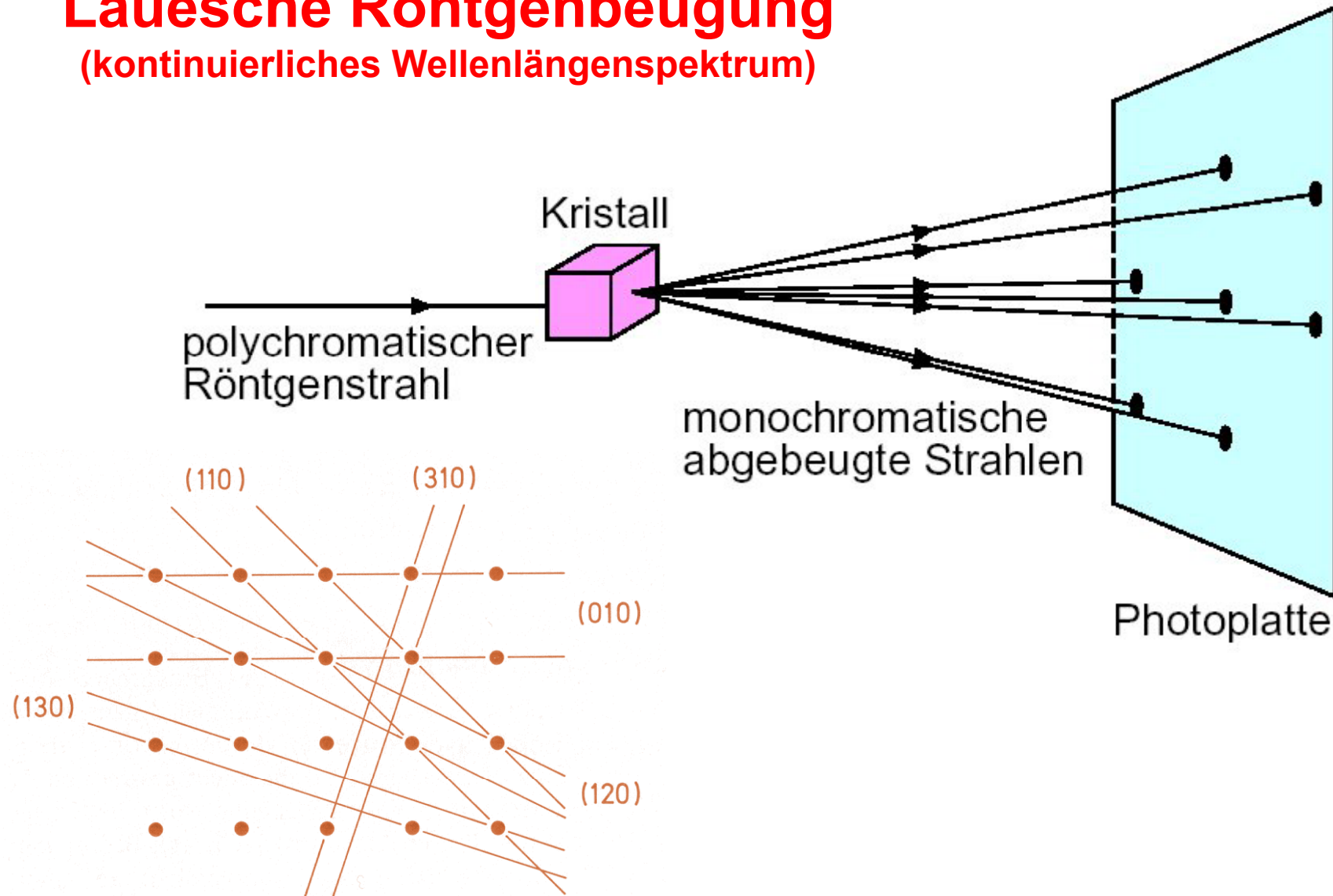


Schema einer Vorrichtung zur Aufnahme eines Röntgenspektrums nach dem Drehkristallverfahren



Röntgenspektrum nach dem Drehkristallverfahren

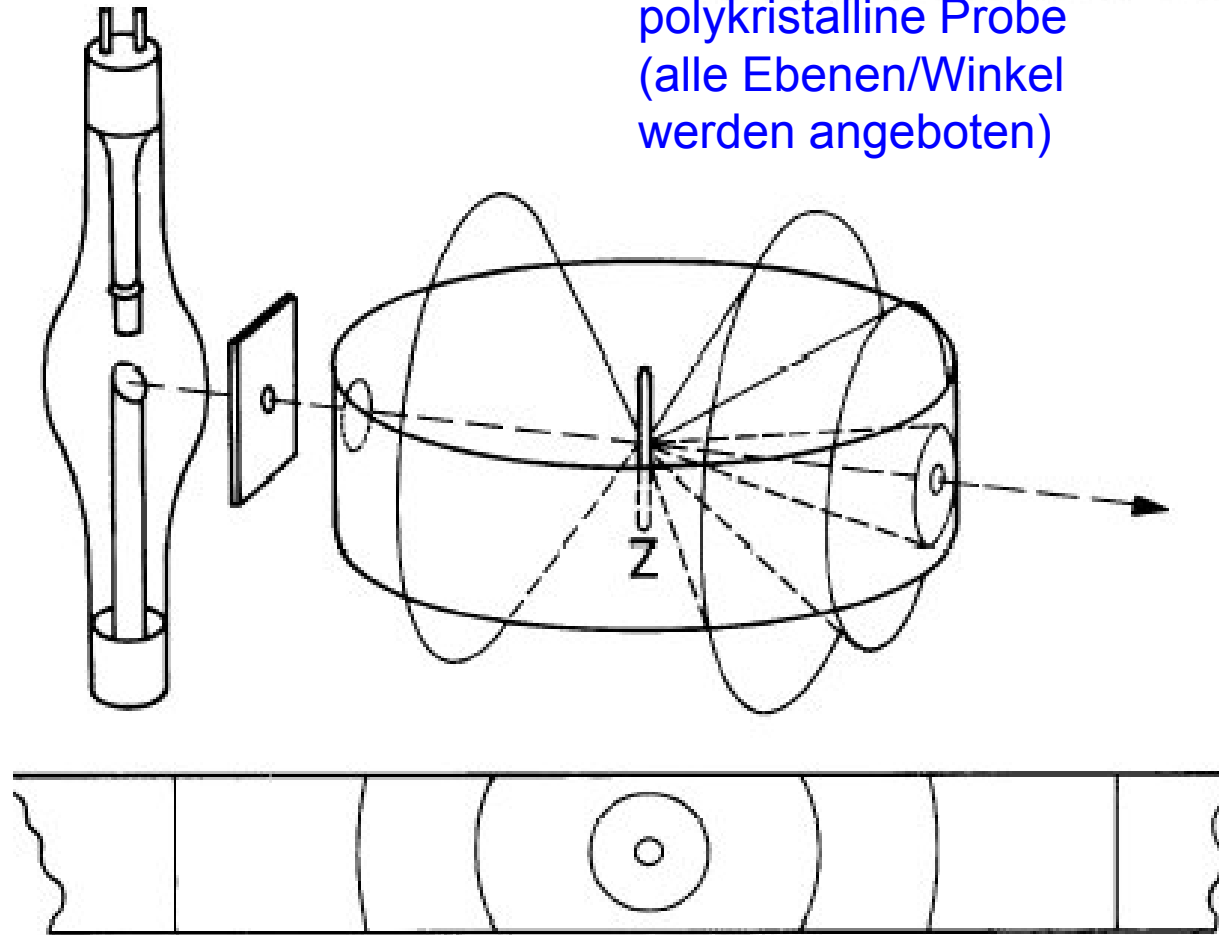
Lauesche Röntgenbeugung (kontinuierliches Wellenlängenspektrum)



Im Kristall treten unterschiedlich indizierte Gitterebenen auf
Konstruktive Interferenz nur bei den passenden Wellenlängen

Debye-Scherrer Verfahren der Röntgenbeugung

Monochromatisches Licht,
polykristalline Probe
(alle Ebenen/Winkel
werden angeboten)



jeweils unter einem bestimmten Streuwinkel (bzw. Abstand von der Strahlachse) bekommt man für eine eindeutig indizierte Gitterebene ein Intensitätsmaximum



Paul Scherrer
1890 - 1969

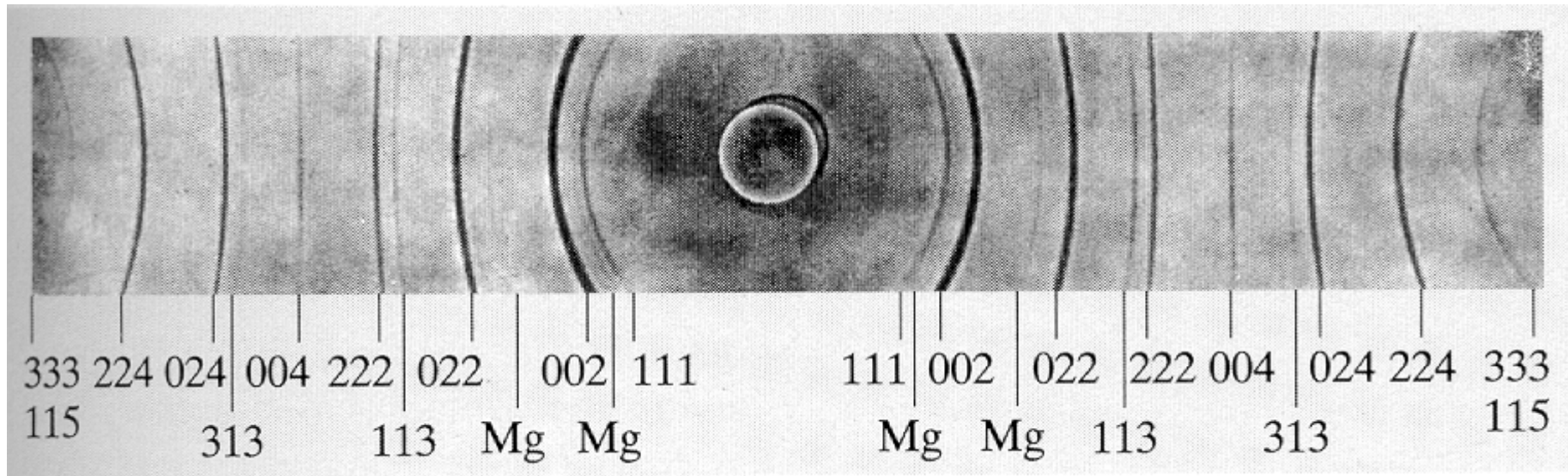


**Petrus (Peter)
Josephus
Wilhelmus Debye**
1884 - 1966

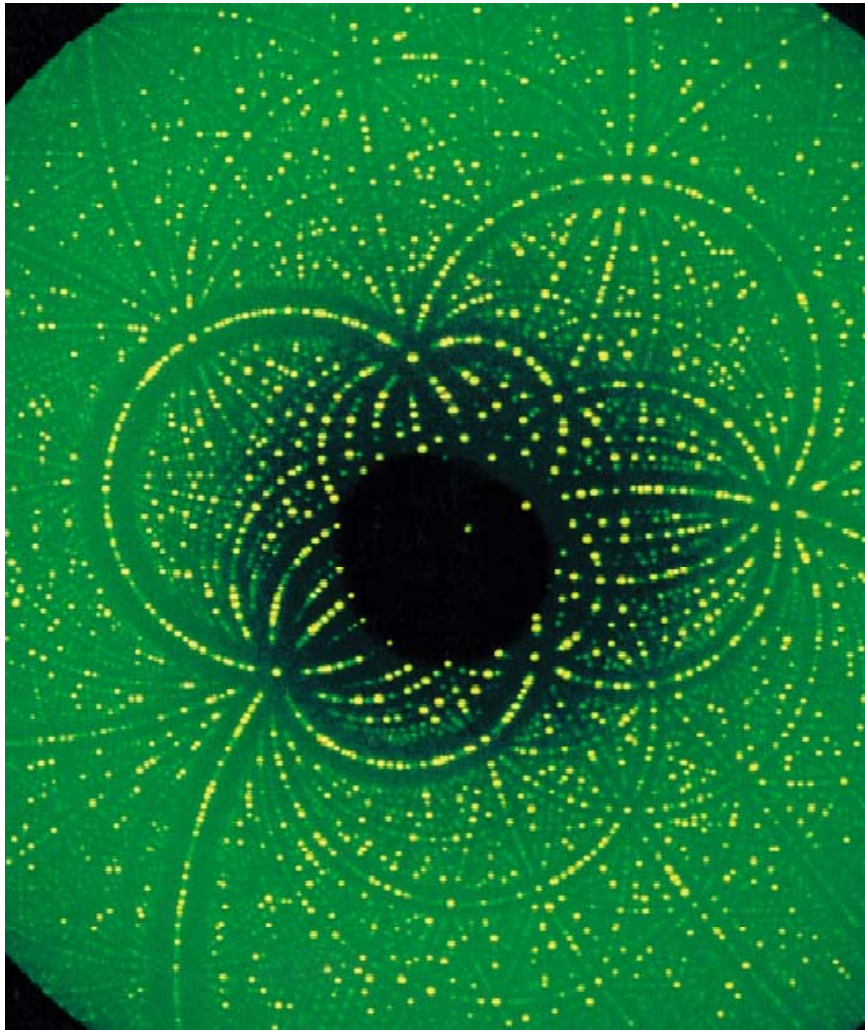
**Nobelpreis
Chemie 1936**

Debye-Scherrer Aufnahme von MgO Pulver

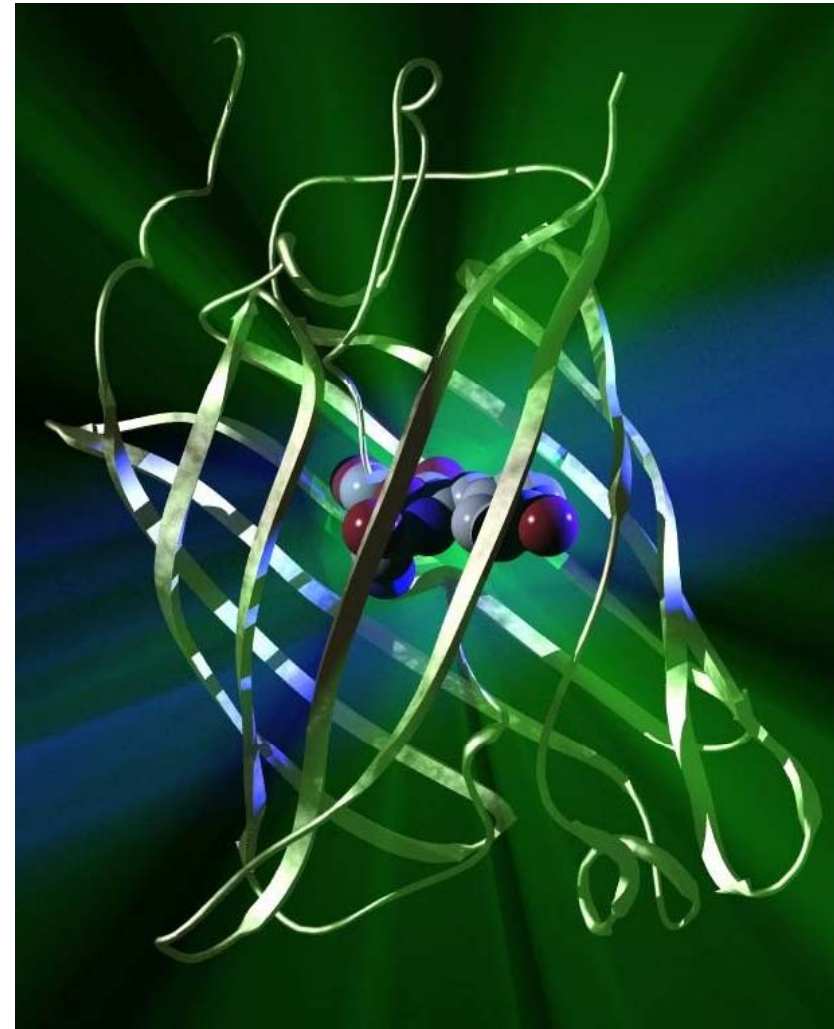
MgO Pulver, „resonante“ Ebenenscharen sind mit Laueschen Indizes bezeichnet



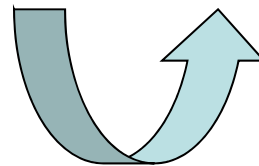
Röntgen-Beugung an kristallisierten Biomolekülen



Die hier dargestellten Bilder gehören nicht unmittelbar zusammen



Aus einem gemessenen Beugungsmuster erhält man durch geeignete Rückrechnung (Transformation)

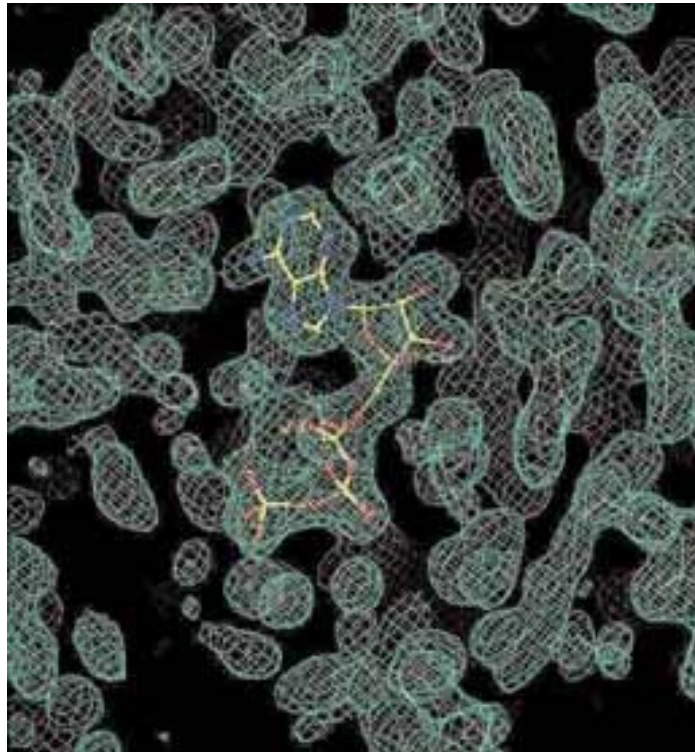


Information über Aufbau und Struktur auch von komplexen Molekülen

Röntgen-Strukturanalyse von Biomolekülen

Standardtechnik:

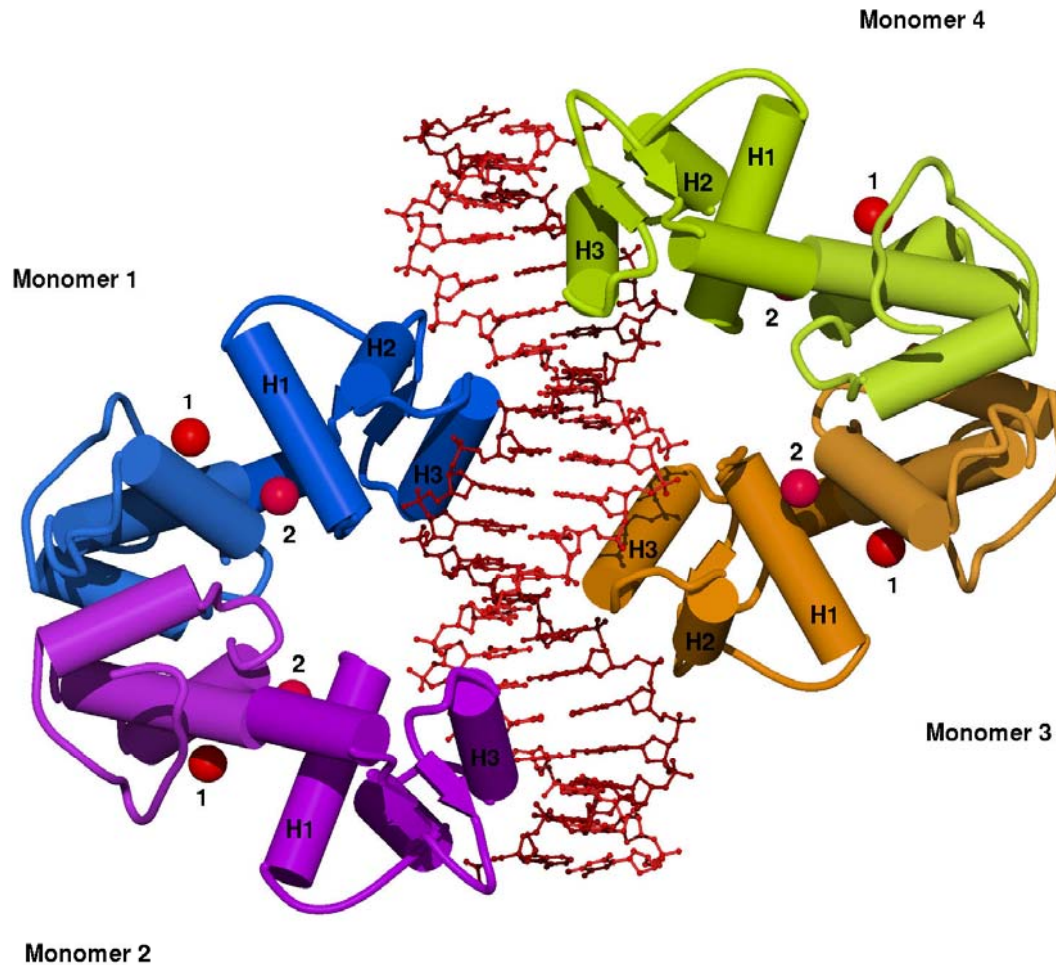
Kristallisierung
Röntgenbeugung
Computeranalyse



Beobachtung von
Elektronendichteverteilungen

Zukunft mit Röntgen Laser

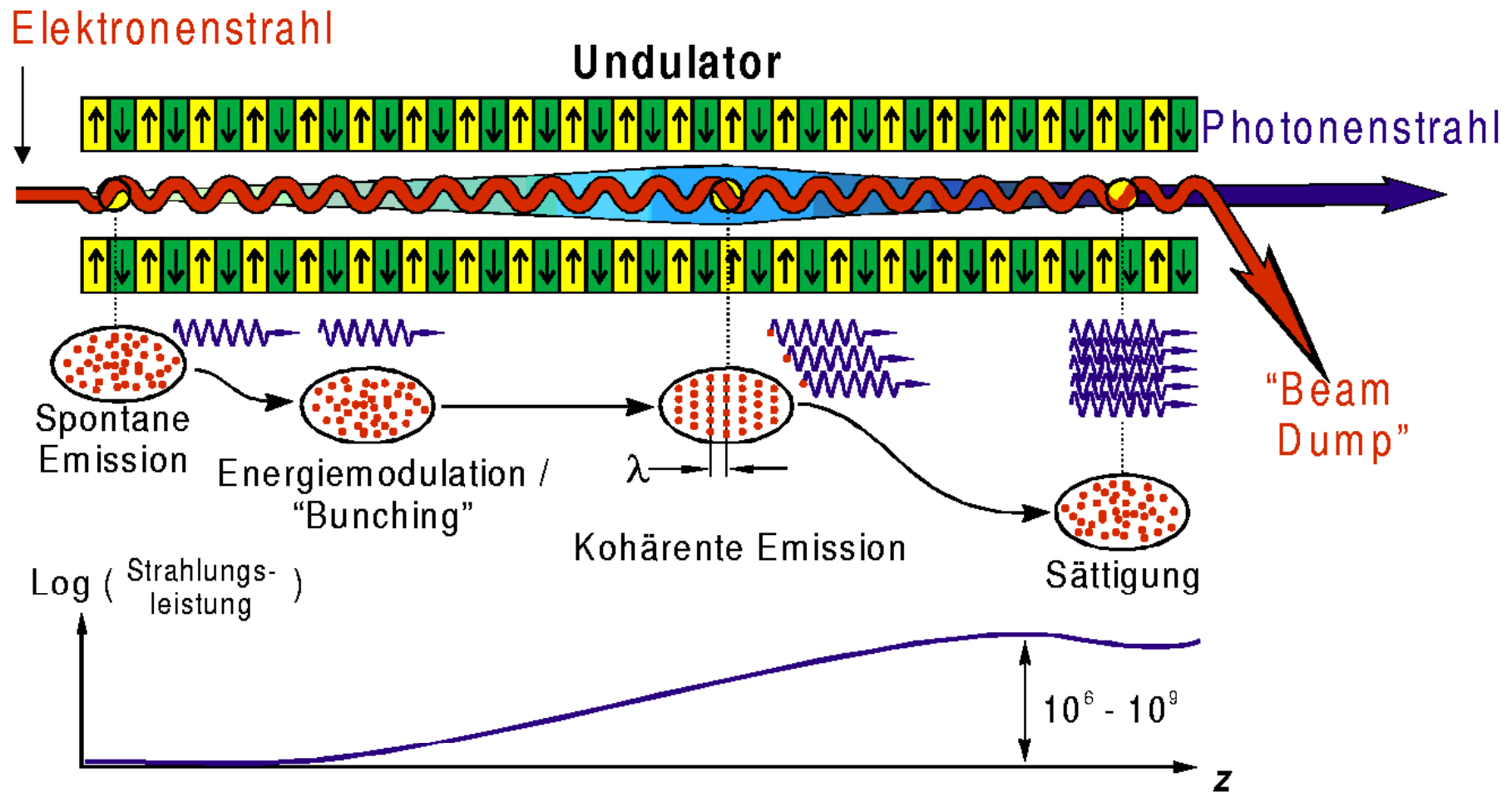
Protein-DNA-Komplex
untersucht mit der Methode
der Proteinkristallographie



Komplexe aus DNA und Proteinen extrem schwierig zu kristallisieren. Um ihre Struktur und Funktion im lebenden Organismus aufzuklären, bietet der Röntgenlaser neue Möglichkeiten, die ohne die herkömmliche Kristallisation auskommen.

Röntgenlaser SASE-FEL:

self-amplification of spontaneous emission - free-electron laser

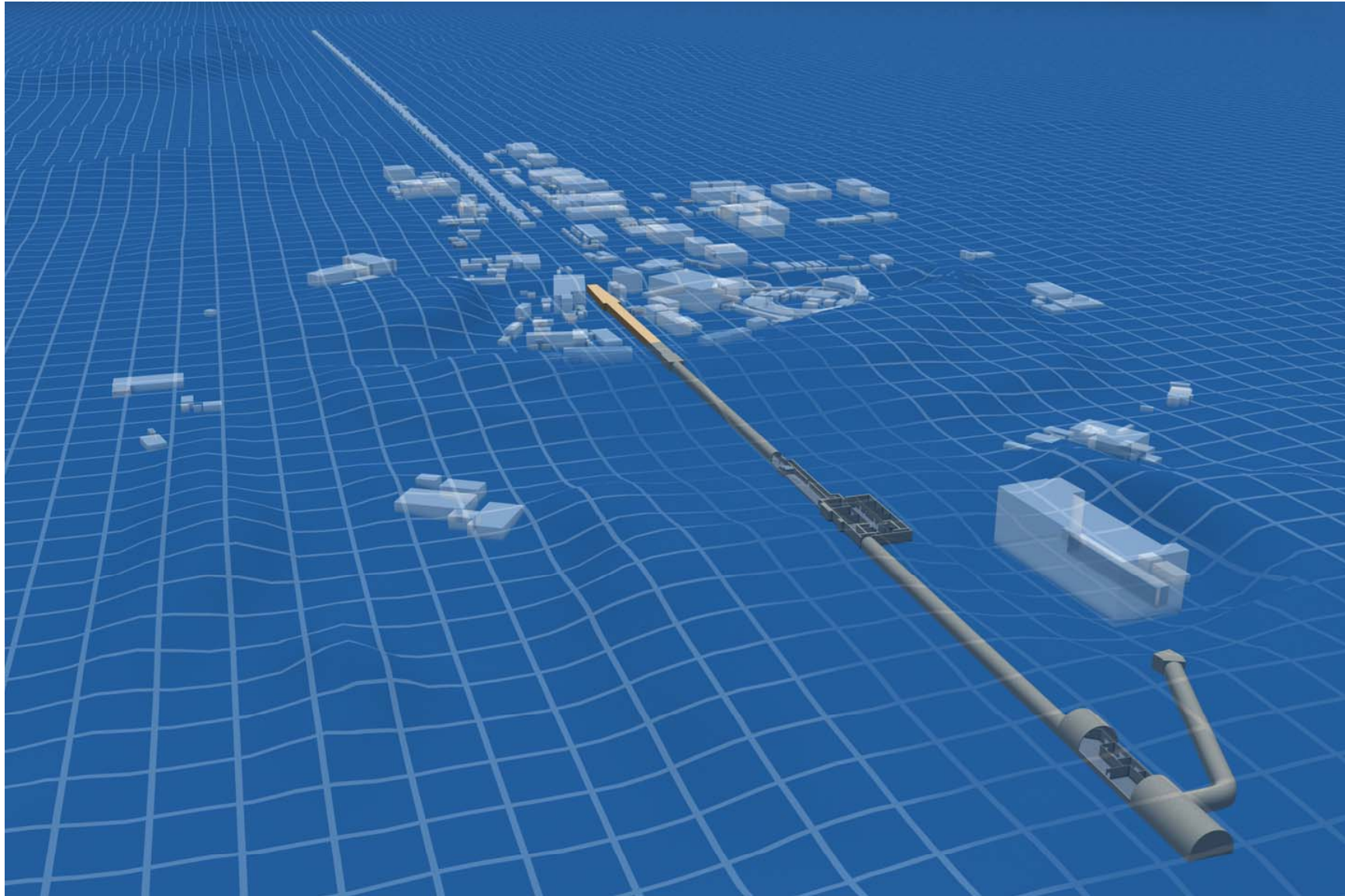


LCLS* Stanford - Undulatorstruktur



* Linac Coherent Light Source

LCLS Stanford

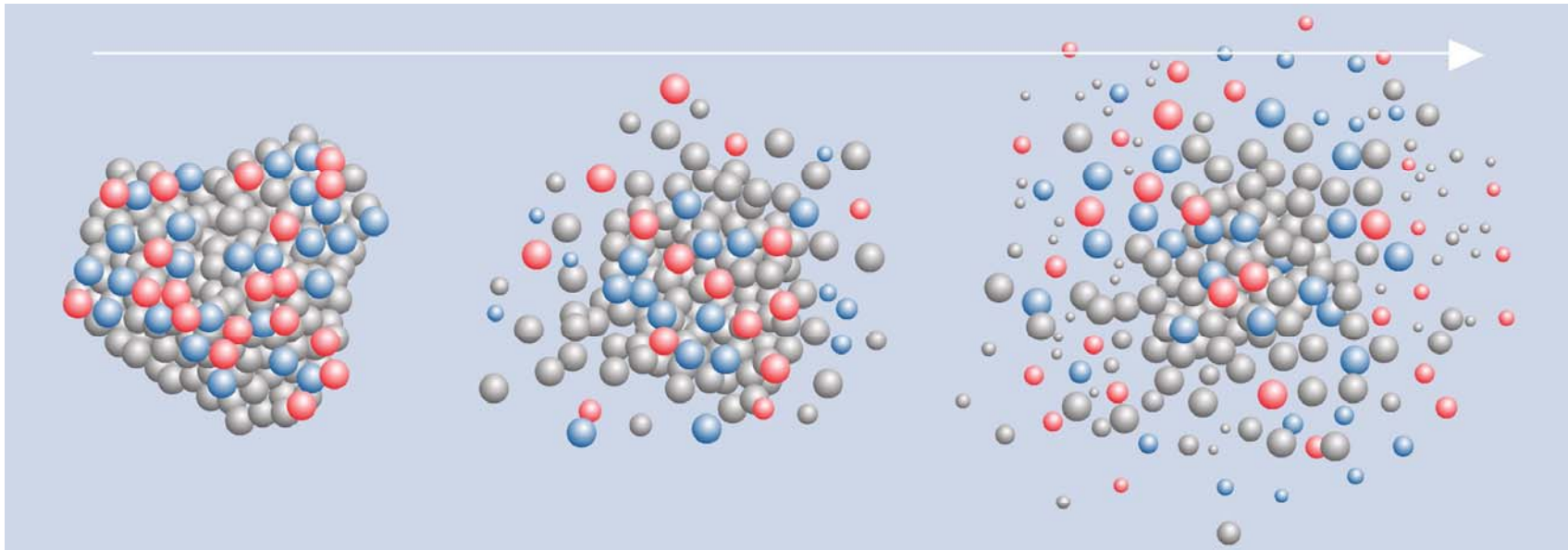


3,2 km Elektronenbeschleuniger + knapp 1 km Röntgenlaser - Aufbauten

Femtosekundenblitz mit Röntgen Laser

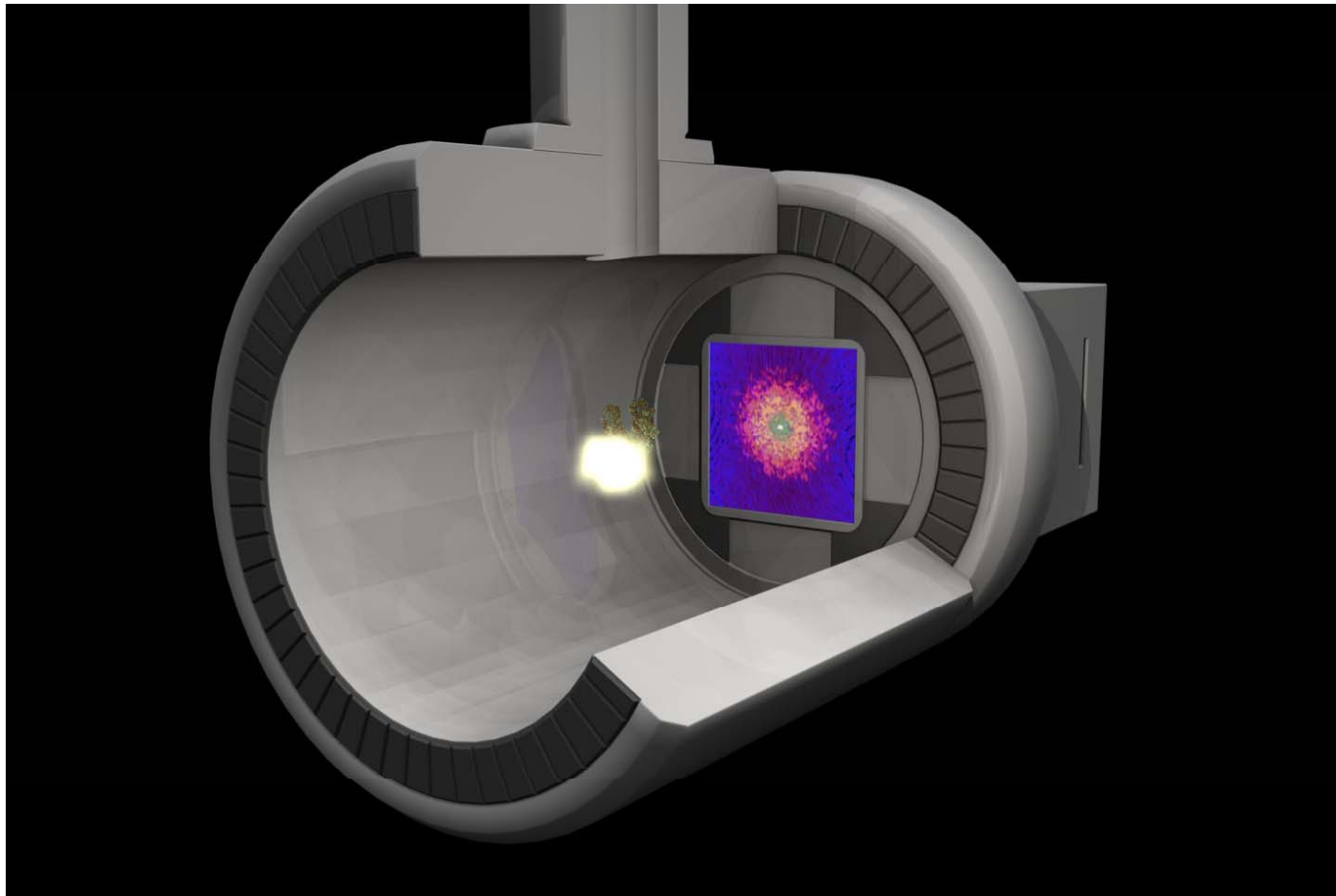
Strukturbiologie

Biomoleküle werden zwar durch intensive Röntgenstrahlung zerstört, sie "explodieren". Dennoch kann ein einzelnes Biomolekül „photographiert“ werden, wenn die Röntgen-Beugungsstruktur aufgenommen werden kann, bevor die Probe zerstört ist.



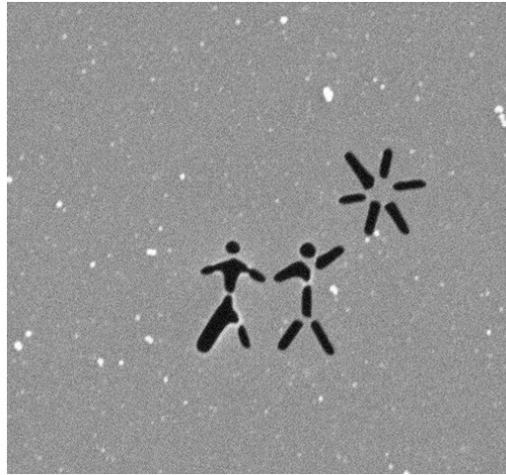
Strukturaufklärung einzelner Moleküle mit einem Röntgen Laser Blitz

Aufnahme der Röntgen-Beugungsstruktur bevor die Probe zerstört ist

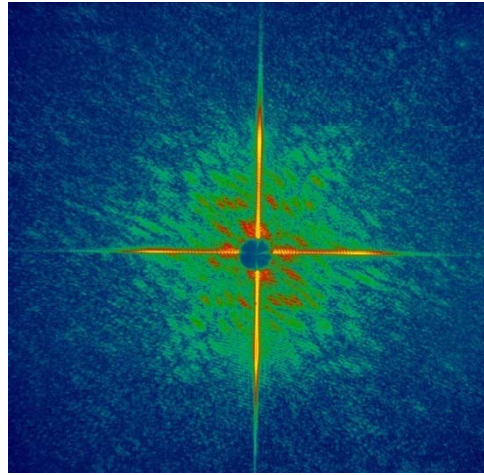


FEL Röntgenlaser in Hamburg

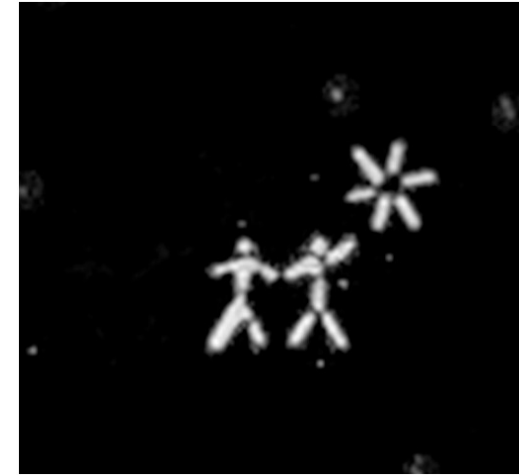
FLASH (Freie-Elektronen Laser Hamburg): Einzelschussaufnahme



Vorlage: 20 nm dick
20 μm x 20 μm Fläche



Beugungsfigur
aus einem fs Laserschuss



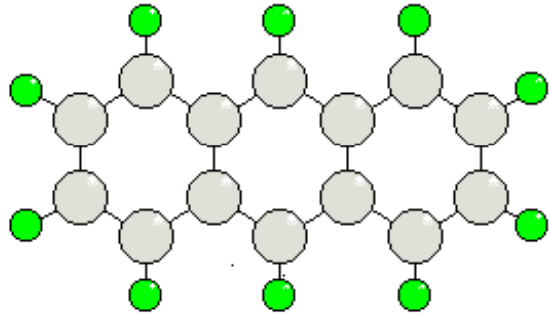
Rekonstruktion der
Vorlage

Derzeit im Bau:

European XFEL; supraleitende Beschleunigereinheiten
3,4 km Länge; 17,5 GeV Elektronenenergie,
0,1 nm minimale Wellenlänge der FEL-Strahlung
 $5 \cdot 10^{33}$ Photonen/ (s \cdot mm² \cdot mrad² \cdot 0.1% Bandbreite)

http://www.xfel.eu/overview/in_comparison/

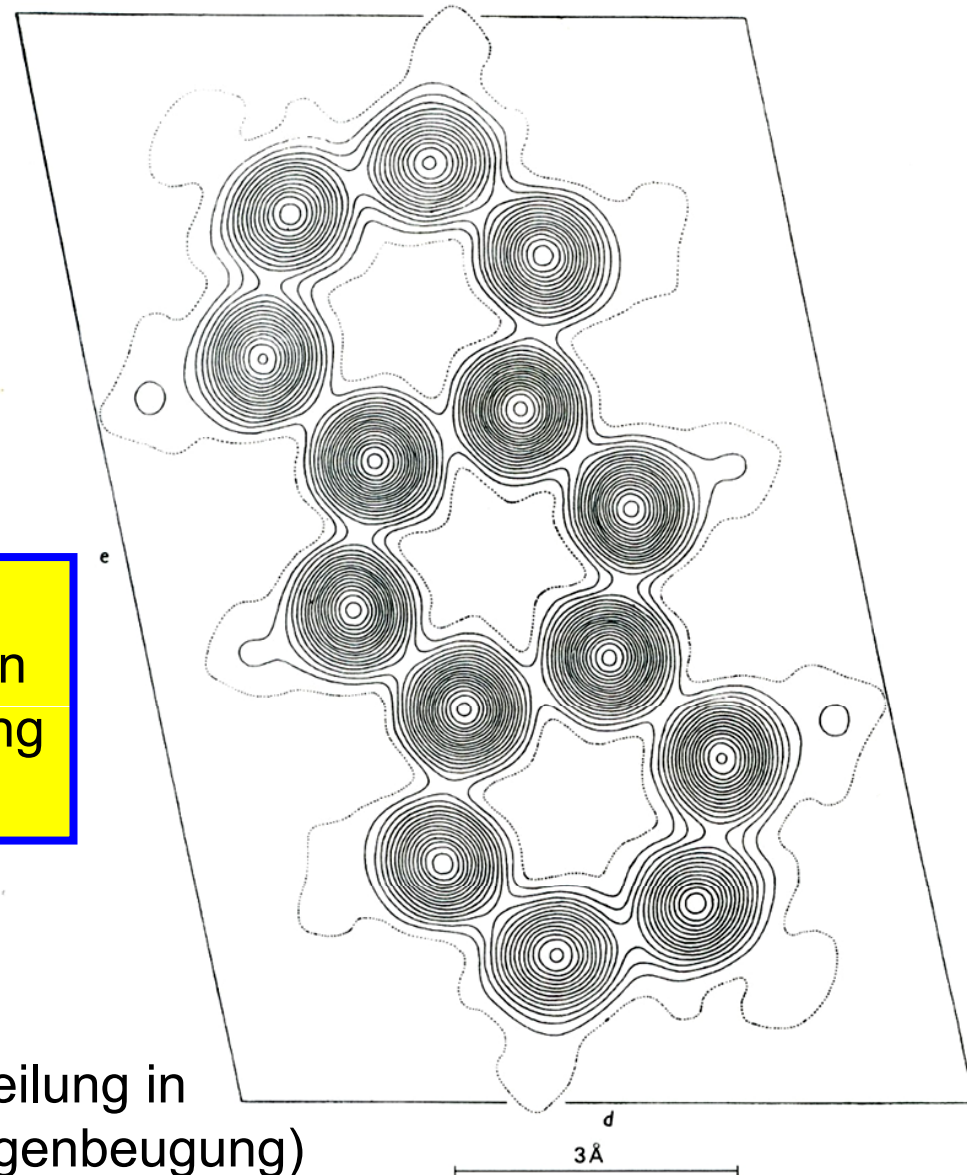
Wie groß sind Atome? Randschärfeproblemematik



Anthracen

Details der Streuung hängen nicht nur von den Kernen sondern von der Elektronendichteverteilung ab!

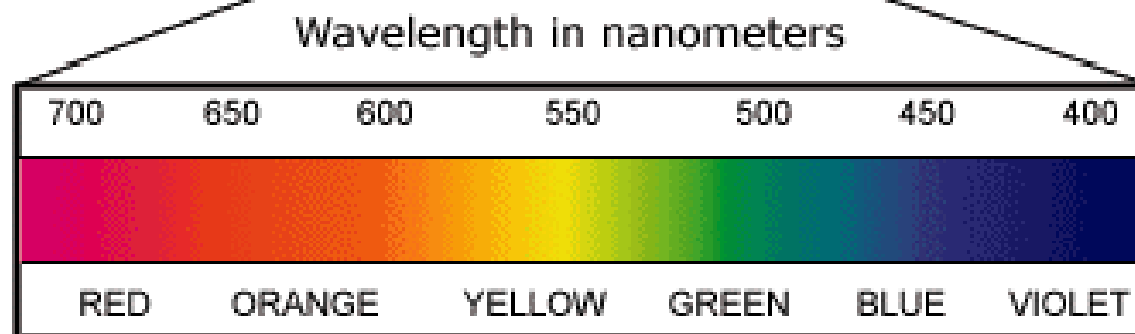
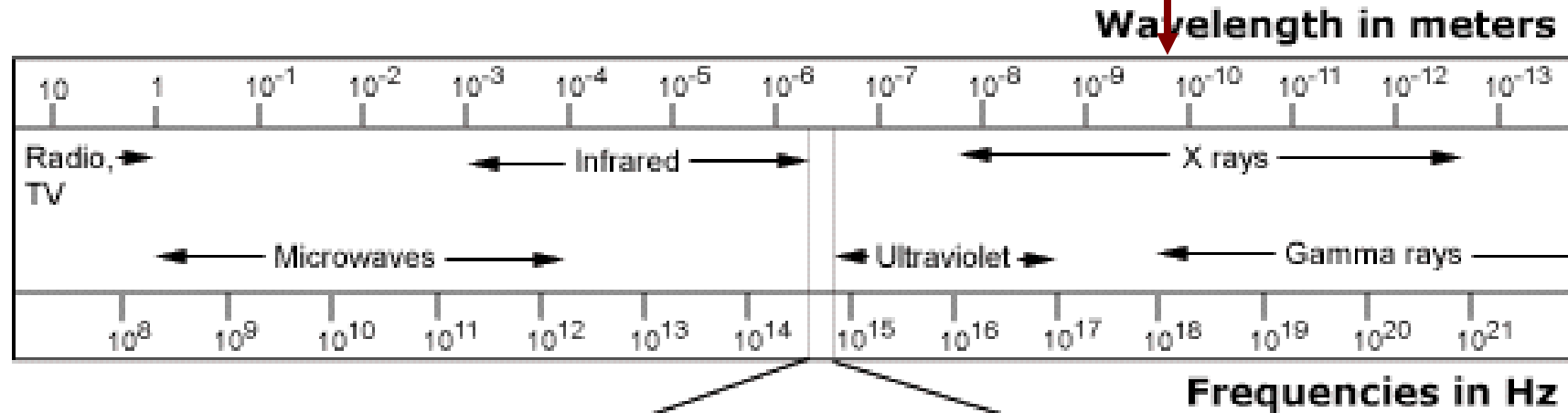
Rückgerechnete Elektronendichteverteilung in Anthracen (aus Röntgenbeugung)



Kann man einzelne Atome sehen?

mit sichtbarem Licht?

Atom



Auflösung und Wellenlänge

Auflösungsvermögen eines **Lichtmikroskops**

$$\delta = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}$$

δ : kleinster Punktabstand

λ : Wellenlänge

n : Brechungsindex des
Einbettungsmediums

α : numerische Apertur

bestenfalls ca. $0.5 \mu\text{m}$ mit sichtbarem Licht

Auflösungssteigerung mit kürzeren Wellenlängen: siehe Röntgen

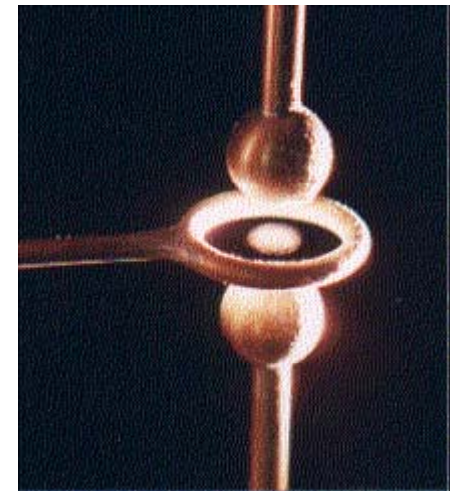
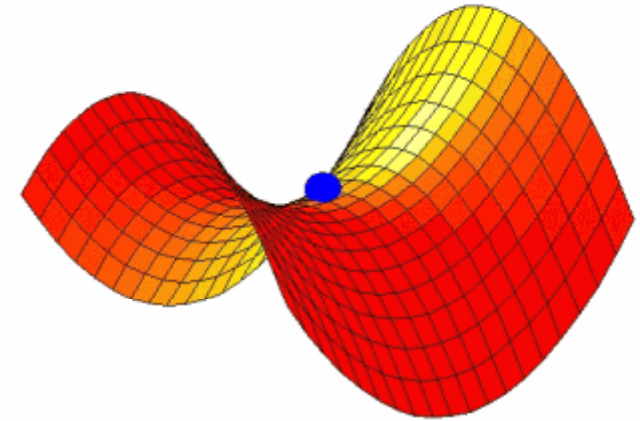
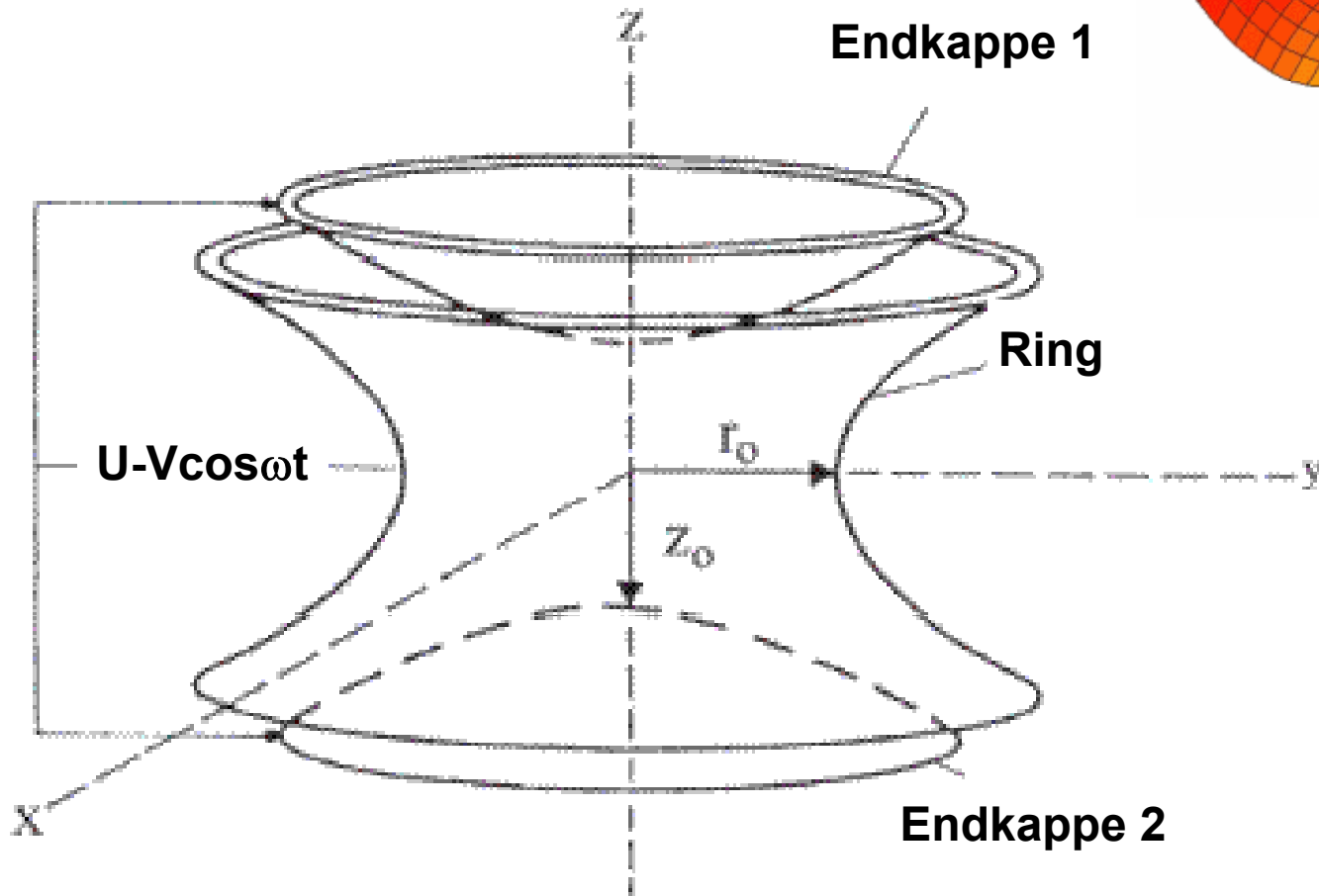
Weitere Steigerung mit
Materiewellen (deBroglie)

**Kürzere Wellenlängen
bei höheren Energien E**

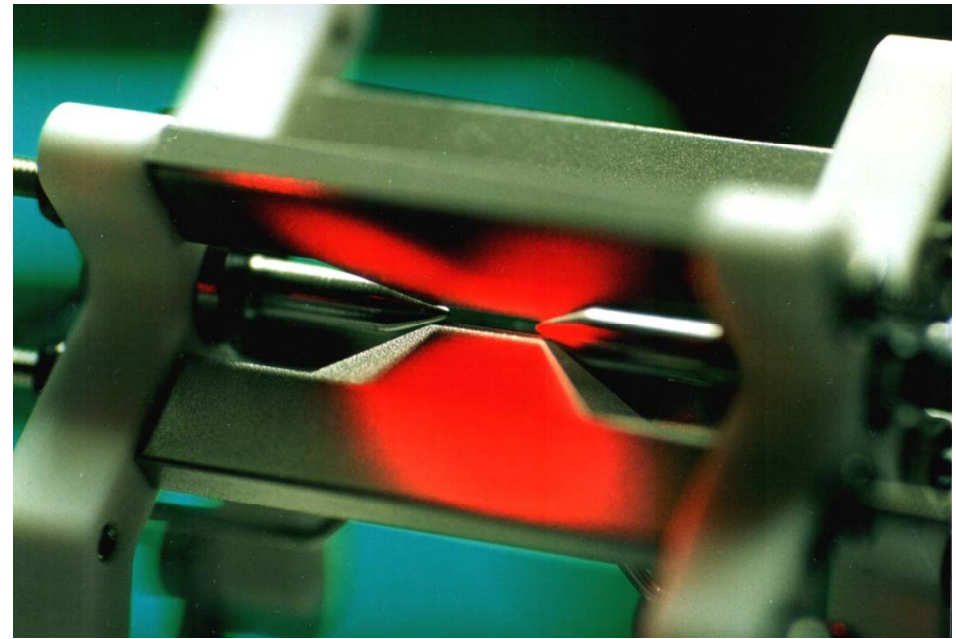
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

Sichtbarmachen einzelner Atome: Atom- und Ionenfallen

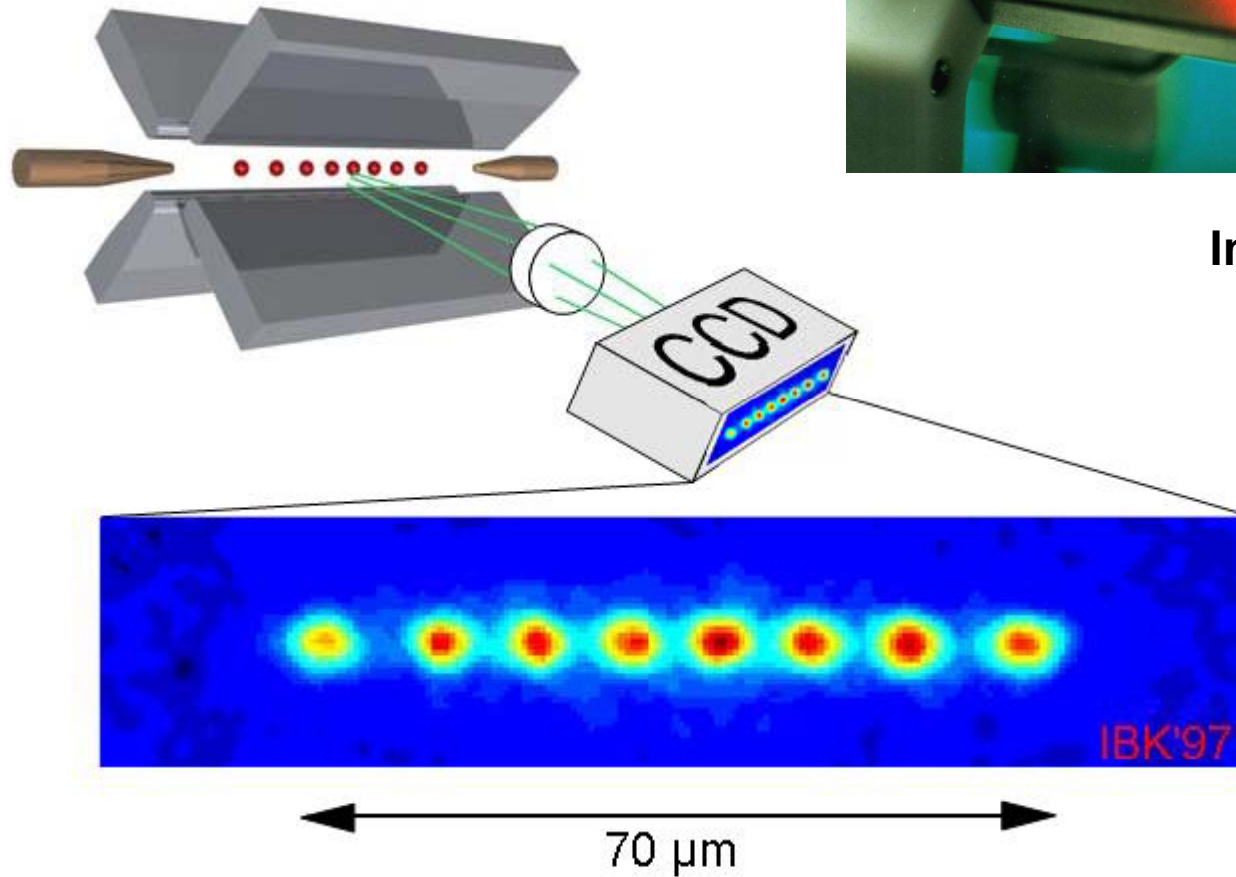
Paul – Fallen (Hochfrequenz-Ionenfallen)



Ionen in Fallen



Innsbrucker Paulfalle



70 μm

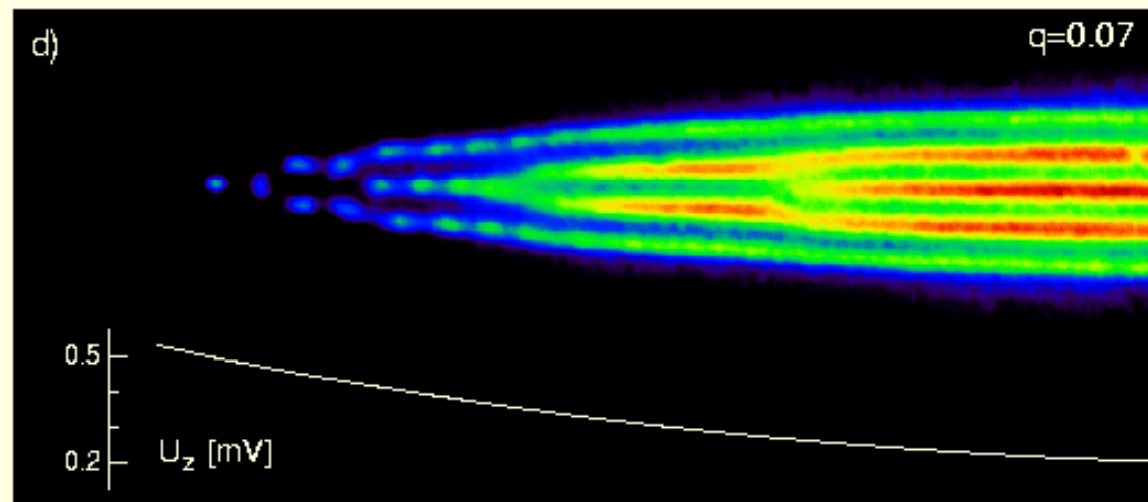
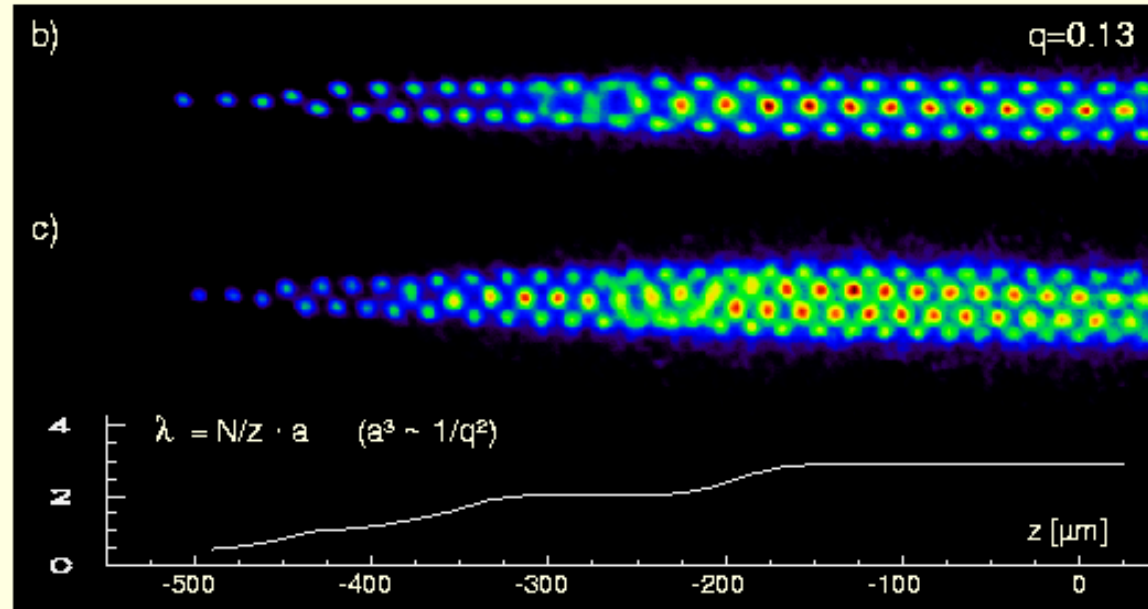
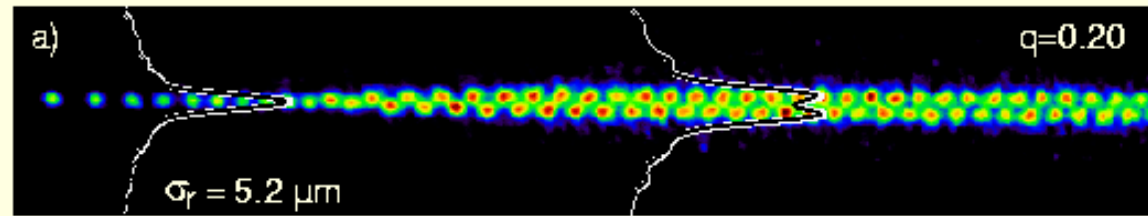
Ionenkristalle

Ionenkühlung

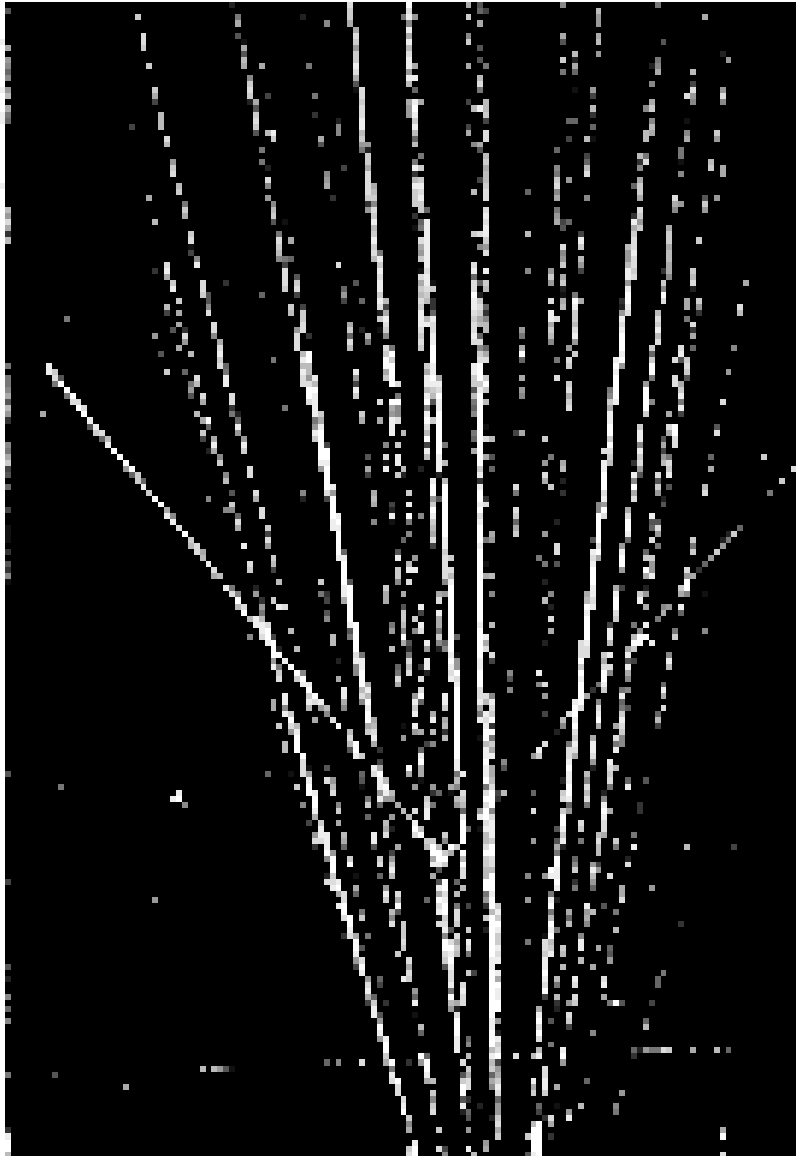
thermische Energie
geringer als
Coulombenergie

Zusammenhalt
durch die
Fallenkräfte

Beleuchtung mit
Laserlicht:
zahlreiche
Absorptions und
Emissionsvorgänge



Nebelkammer: sichtbare Bahnen atomarer Teilchen

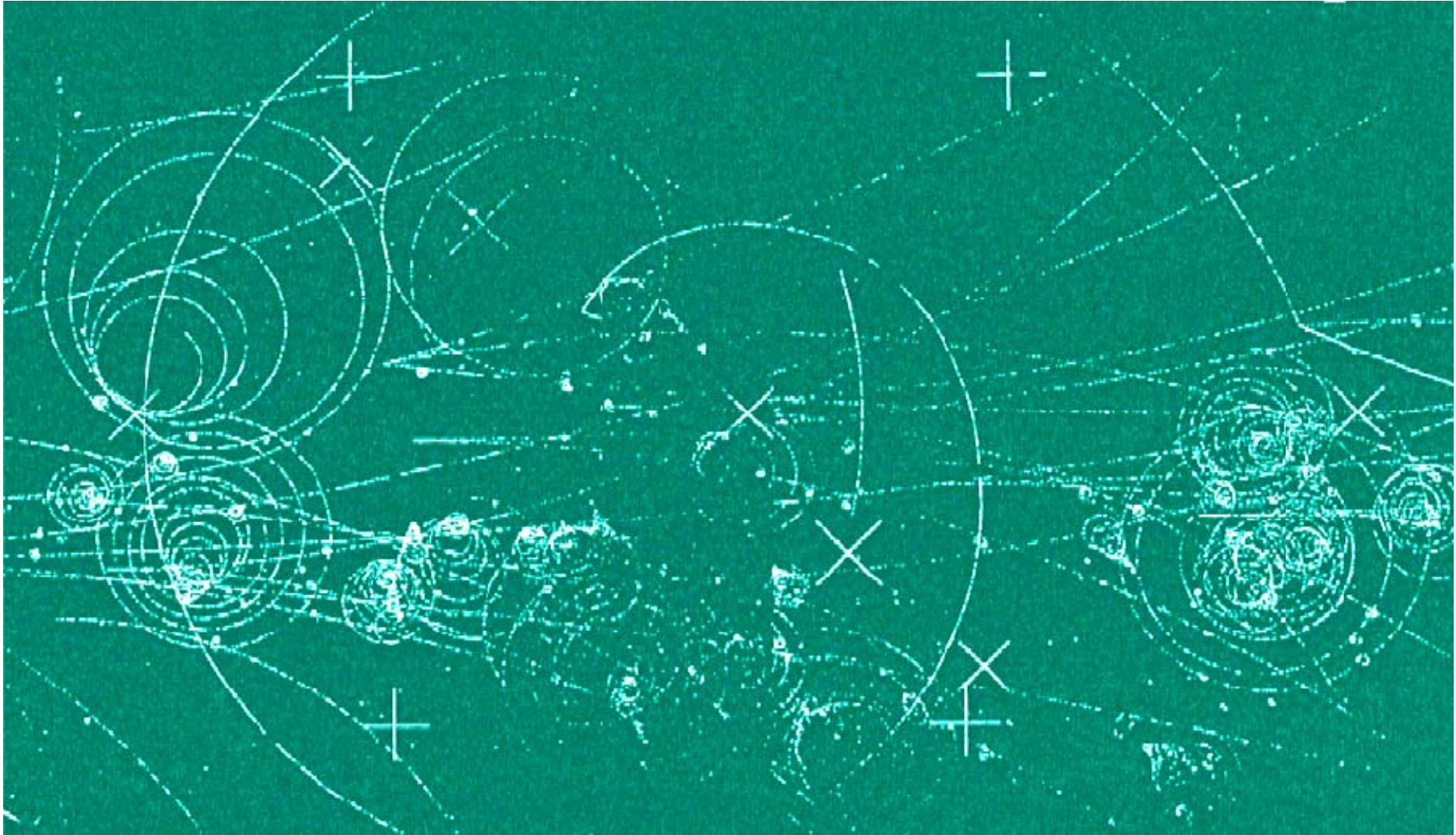


α -Teilchen
(Heliumkerne)

Mit Magnetfeld

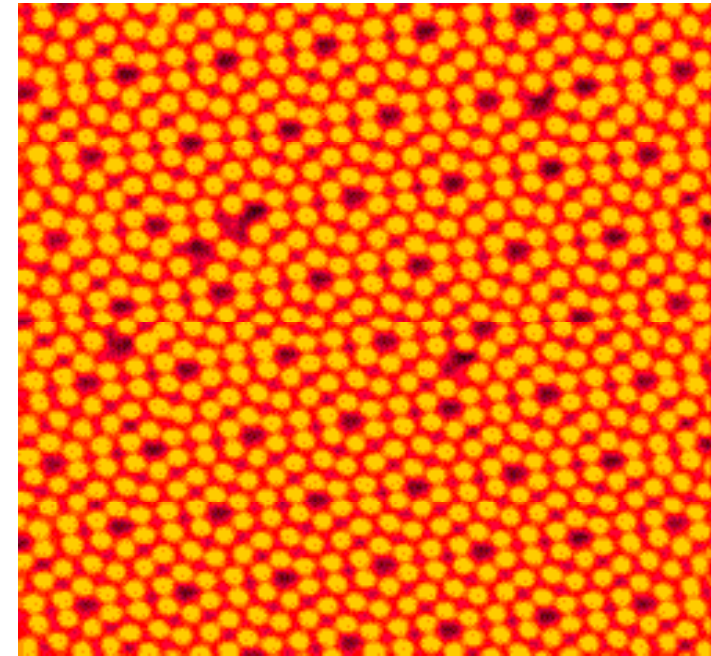
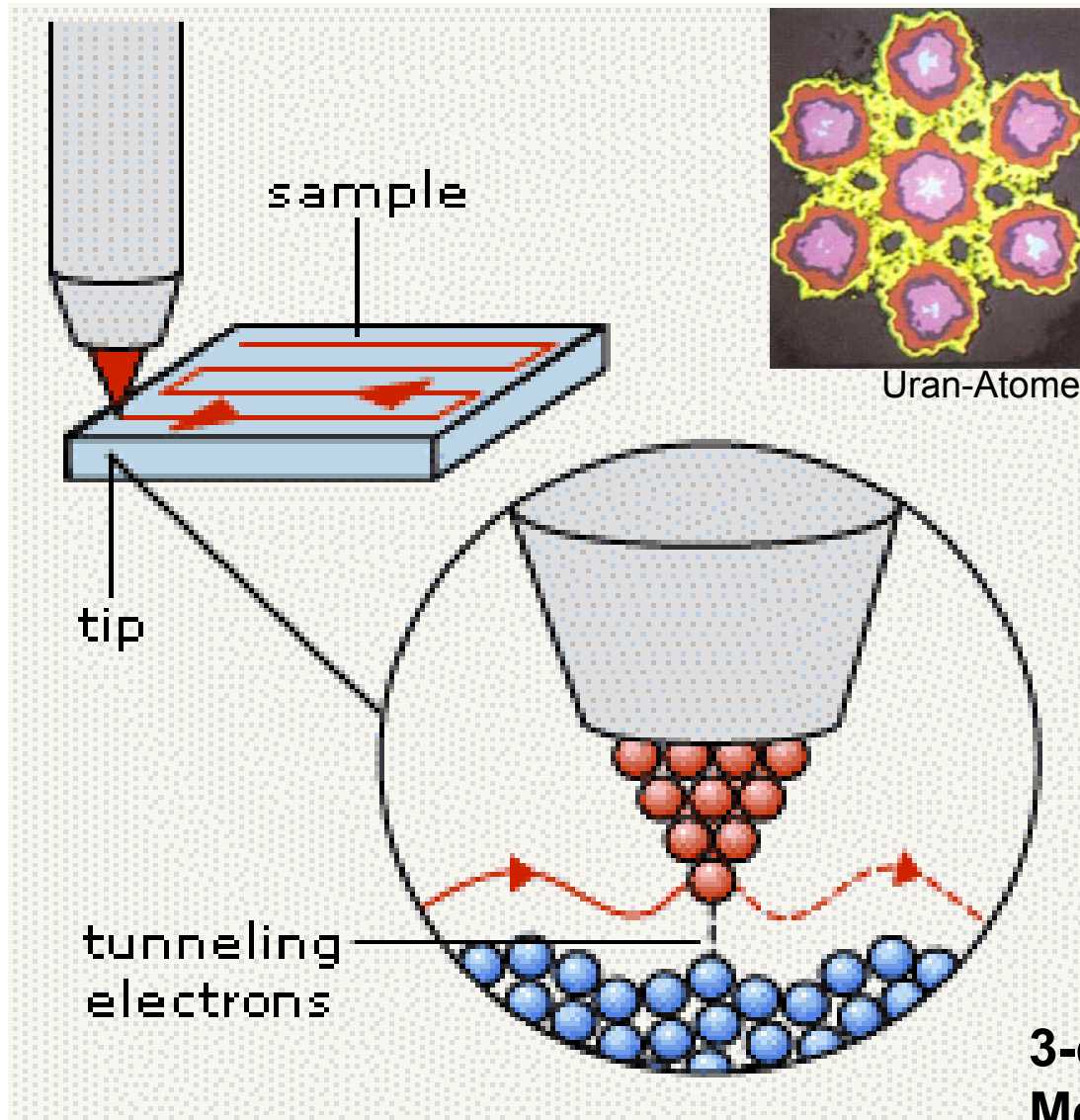


Blasenkammer: sichtbare Bahnen atomarer Teilchen



Aufnahme an DESY

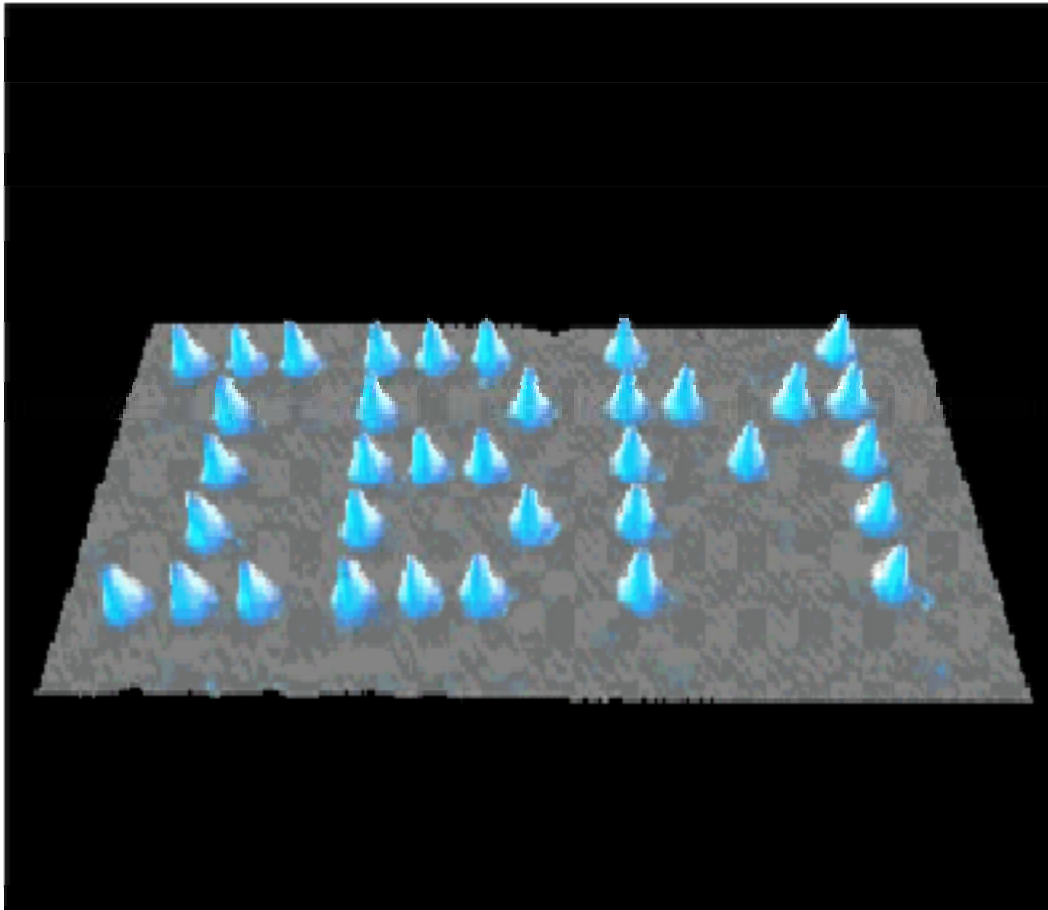
Sichtbarmachung einzelner Atome: Raster-Tunnel Mikroskopie



**Siliziumoberfläche
STM Aufnahme**

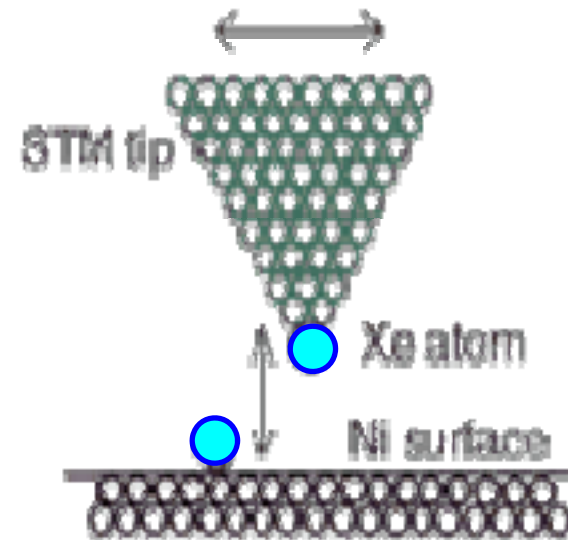
**3-dimensionale Piezo-Kontrolle
Messung des Tunnelstroms**

Manipulation einzelner Atome



Einzelne Xenon Atome, bei -273C (IBM 1989)

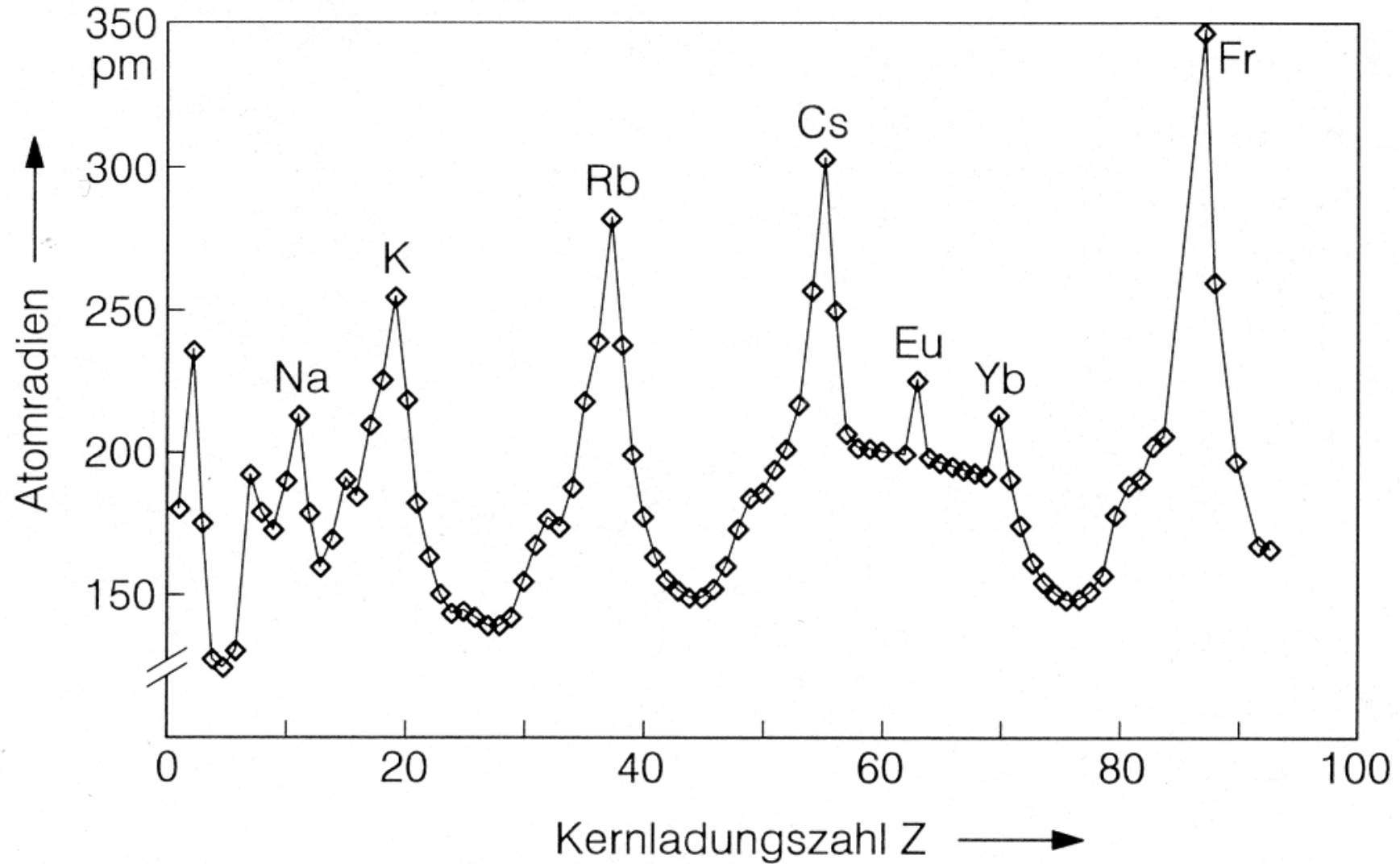
- Xenonatome werden mit der Tunnelspitze verschoben



Atomradien

Aus Atomvolumina in der festen bzw. flüssigen Phase gemäß:

$$V_{\text{Atom}} = \frac{4}{3} \pi r_{\text{Atom}}^3 = \frac{m_{\text{Mol}}}{\rho_m N_A}$$



Kap. 3:

Die Isotopie:

Massenmessung und Isotopentrennung

Masse von Atomen

Massenspektrometer:

Erzeugung geladener Teilchen:

z.B. Elektronenstoßionisation

Messung von q/m durch Verwendung von

elektrischen Feldern

magnetischen Feldern

Flugzeitmethoden

zeitabhängigen Feldern

Lorentzkraft:

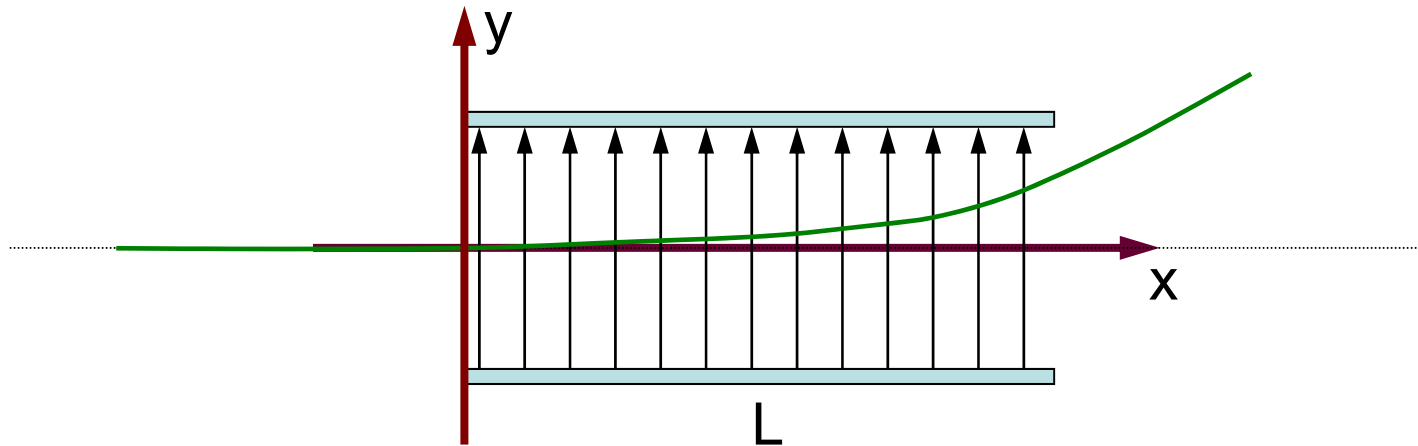
$$\mathbf{F} = q * (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

(geschwindigkeitsabhängig!)

Kraft im elektrischen Feld:

$$\mathbf{F} = q * \mathbf{E}$$

Ablenkung im elektrischen Feld



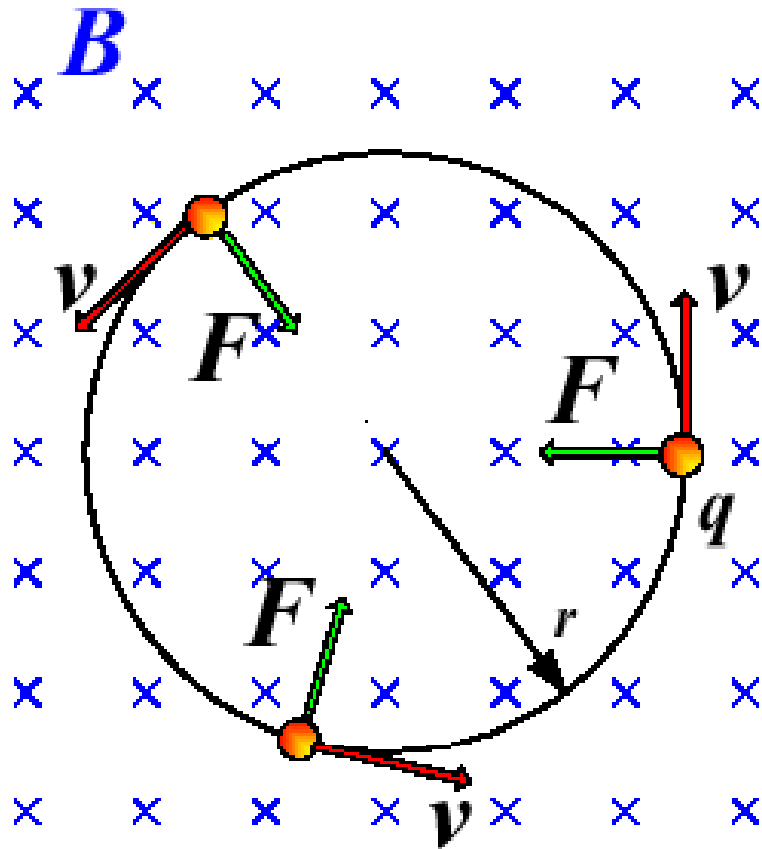
$$m \ddot{y} = eE$$

$$y(t) = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E t^2 ; \quad t = \frac{x}{v}$$

$$y(x=L) = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E \left(\frac{L}{v} \right)^2 = \frac{1}{4} \frac{eEL^2}{E_{\text{kin}}}$$

Energiefilter!

Ablenkung in magnetischen Feldern



Lorentzkraft:

$$F = q \cdot (v \times B)$$

Zentrifugalkraft:

$$F = m \cdot v^2 / r$$

$$\frac{m \cdot v}{q} = B \cdot r$$

Magnetfeld:

Impulsfilter

Elektrisches Feld:

Energiefilter

Massenspektrometer

Problematik in realen Experimentaufbauten:
Winkeldivergenz im Teilchenstrahl
Geschwindigkeitsverteilung

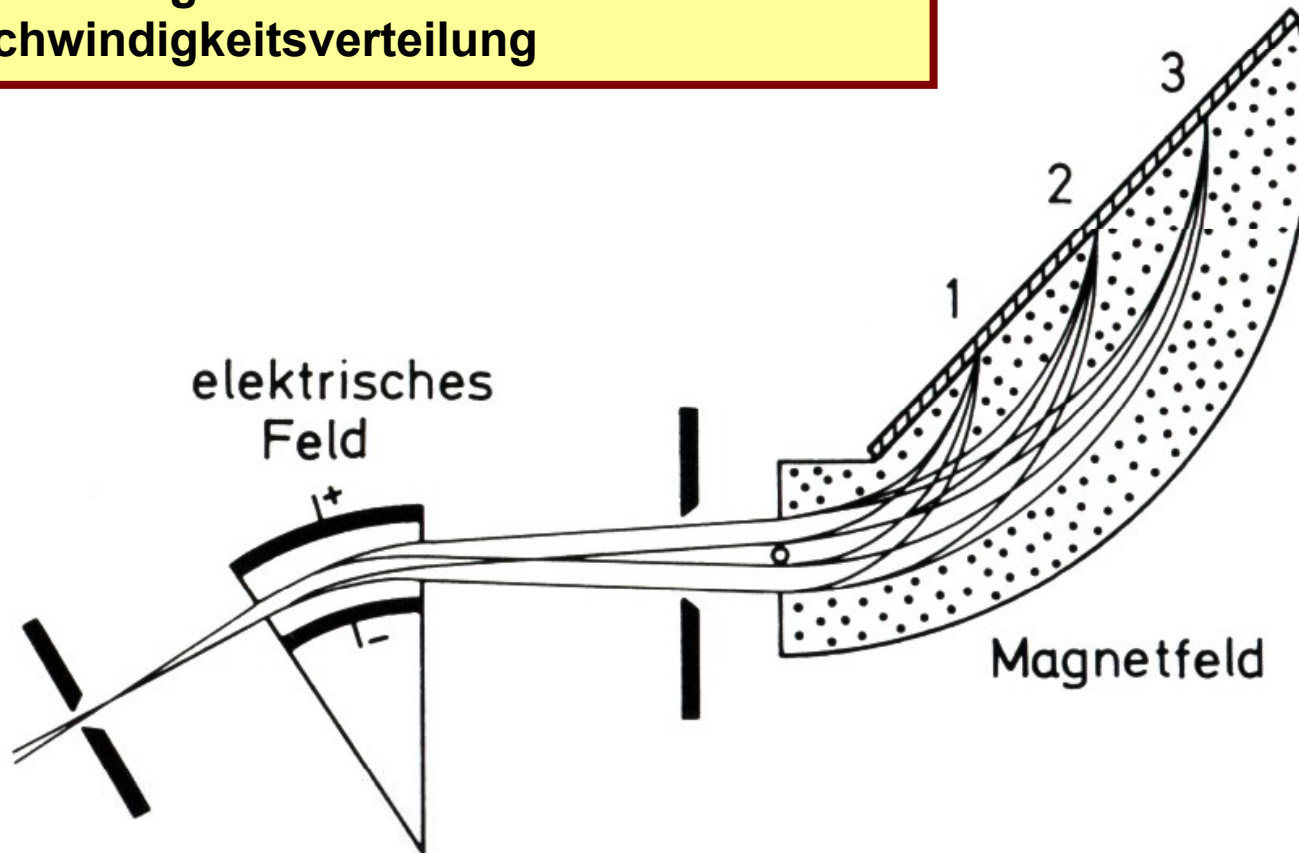
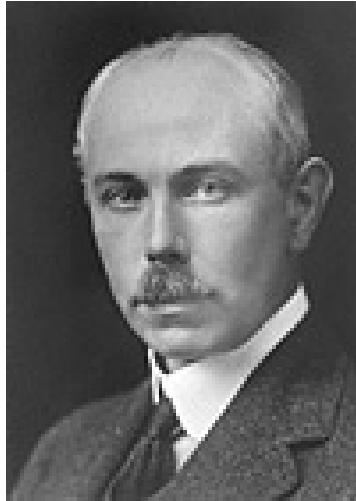


Abb. 3.4. Fokussierender Massenspektrograph nach Aston. Mit 1, 2 und 3 sind die Auftreffpunkte von drei Teilchensorten mit unterschiedlichem Verhältnis e/m gekennzeichnet

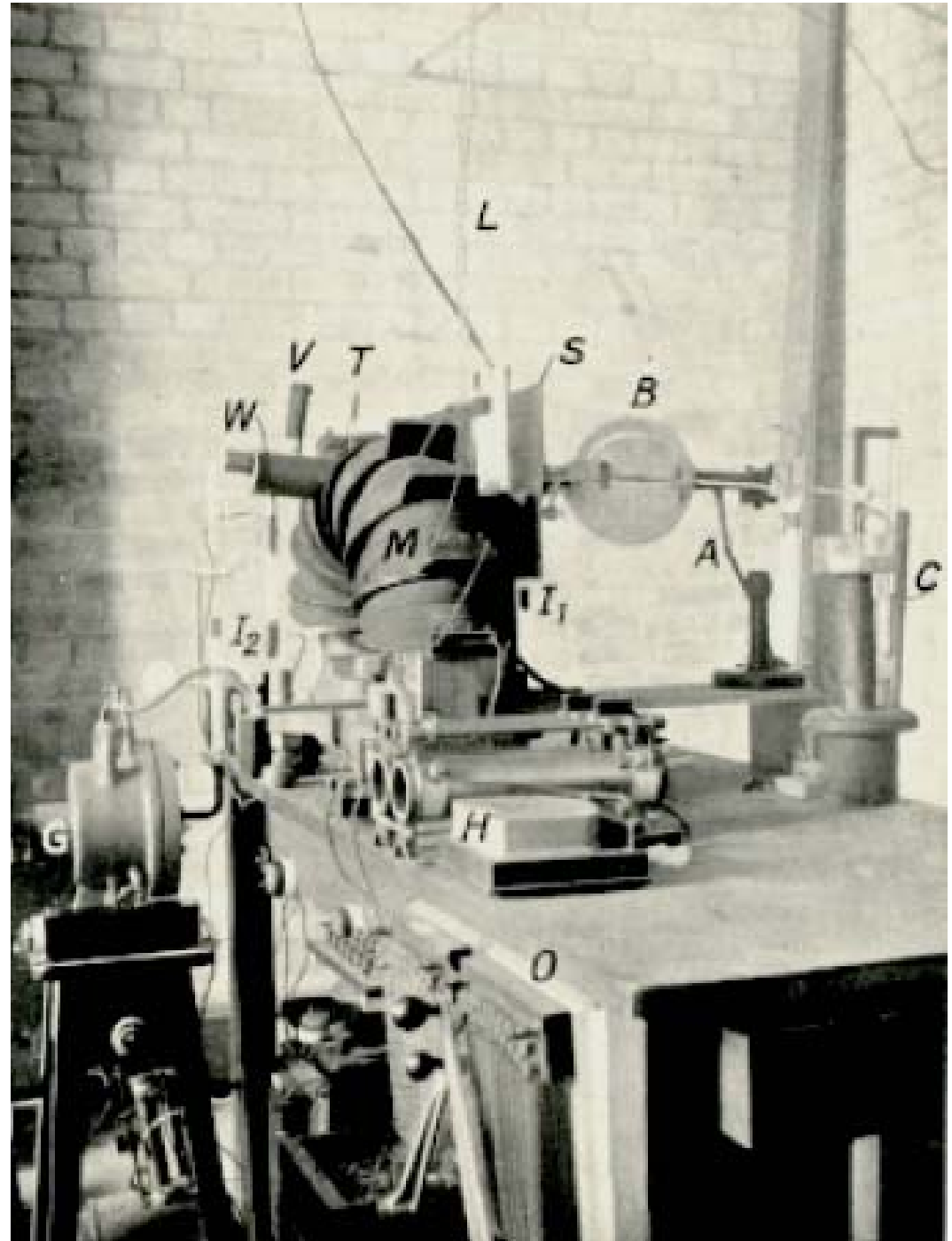
Massenspektrometrie



Sir Francis William Aston:
1877 – 1945
Nobelpreis Chemie 1922

Entdeckung von 212 der 287
natürlich vorkommenden Isotope

Entdeckung von Abweichungen
der Atomgewichte von ganzen
Zahlen



Richtungsfokussierung in magnetischen Feldern

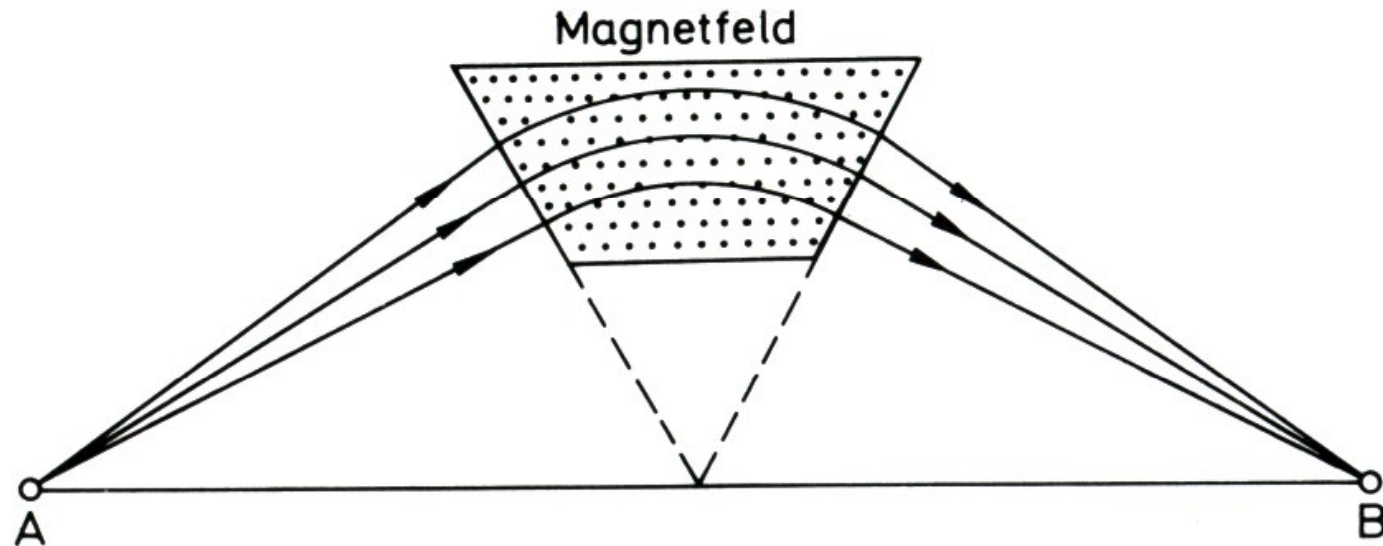
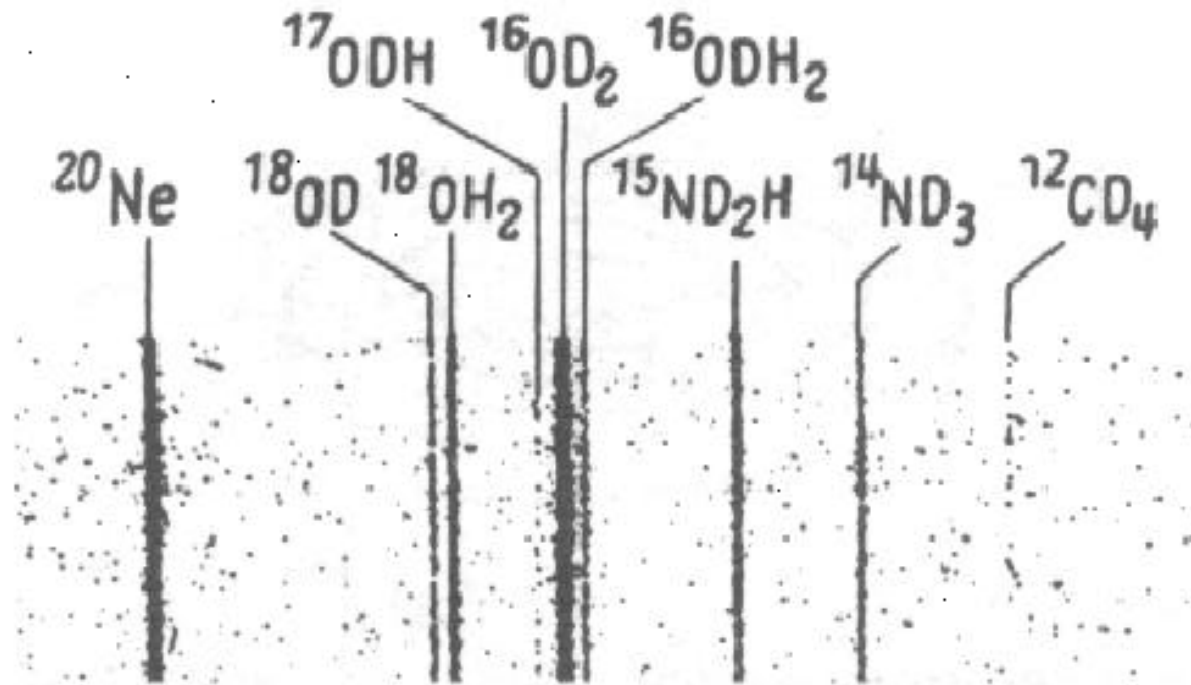


Abb. 3.5. Richtungsfokussierung im magnetischen Sektorfeld, schematisch. Teilchen, die einen langen Weg im Bereich des Magnetfeldes zurücklegen, werden stärker abgelenkt

Magnetsektor wirkt wie eine Linse

Massenspektrometrie

Abbildung auf einer Photoplatte:

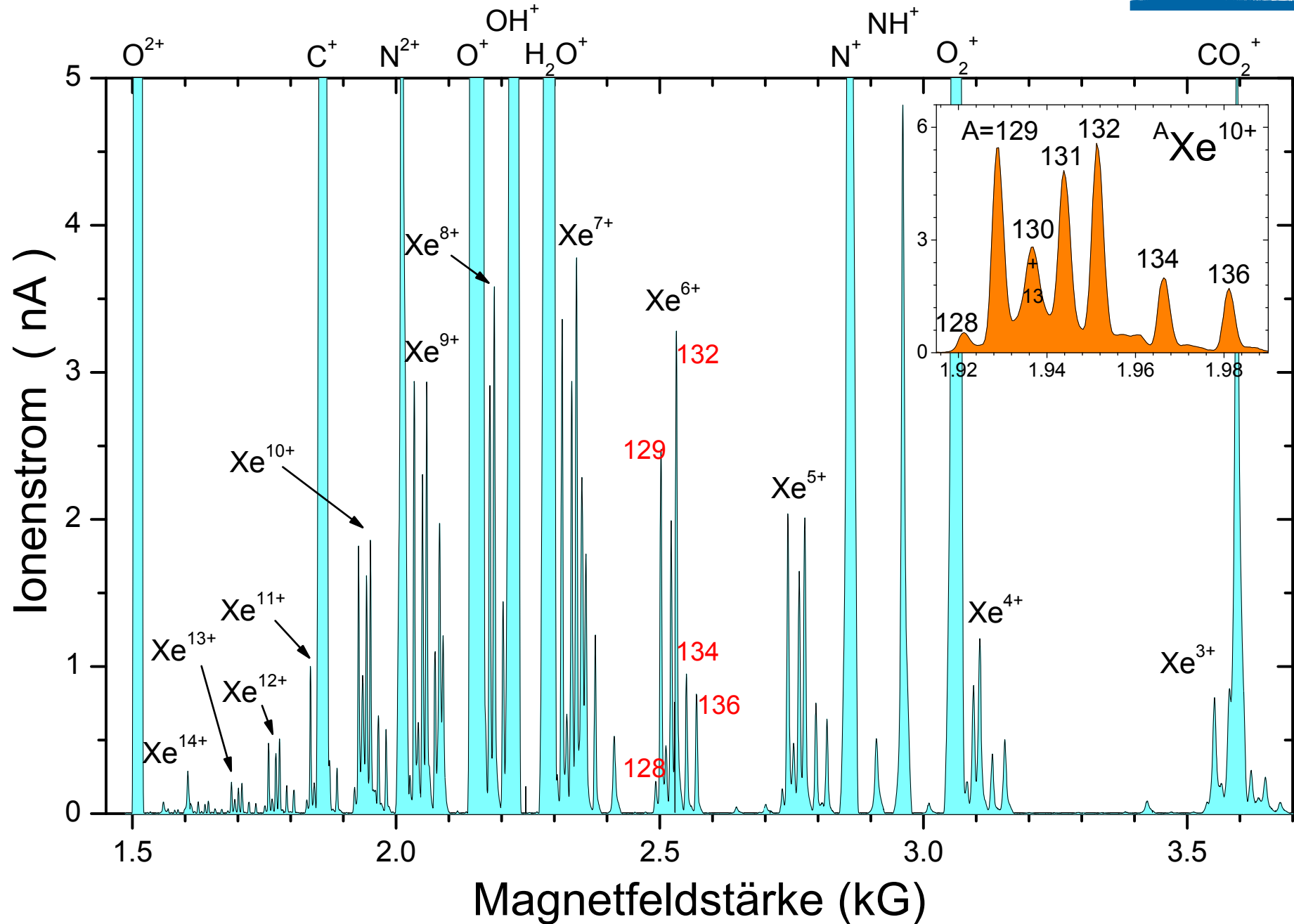


Massenzahl 20!

Isotopie!

19.9876 – 20.0628

Ladung/Masse - Analyse im Magnetfeld



Quadrupolmassenspektrometer

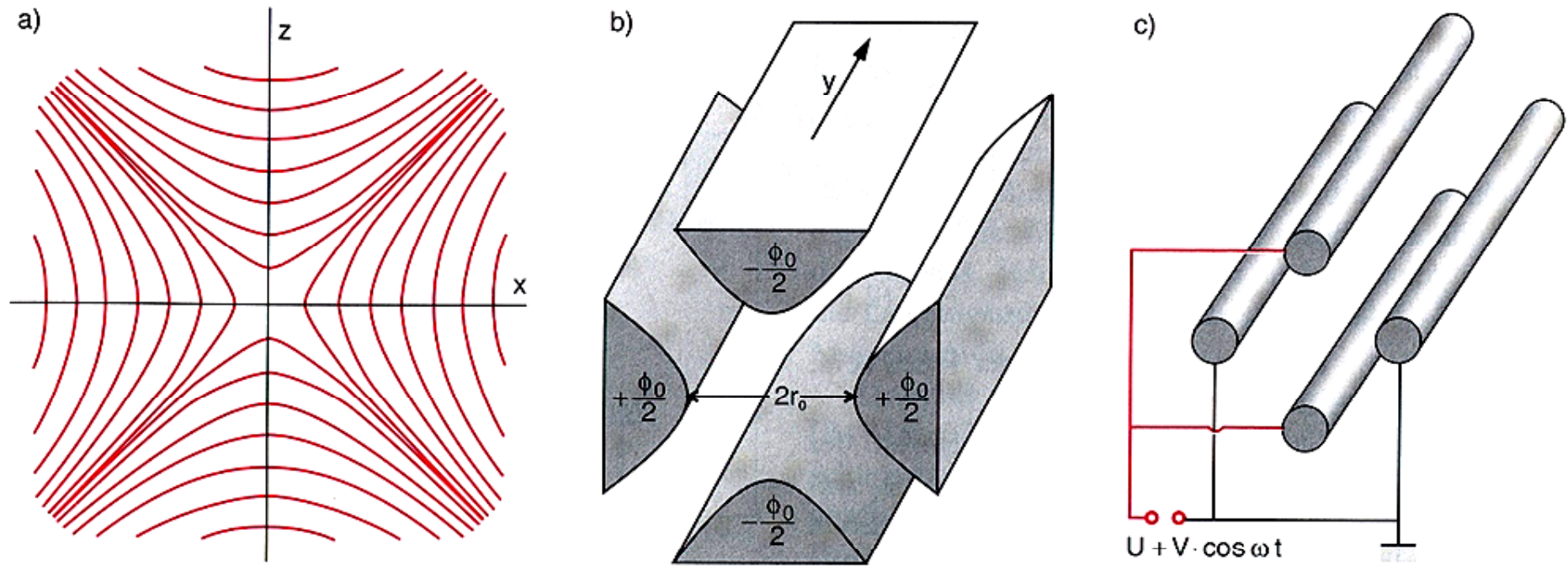
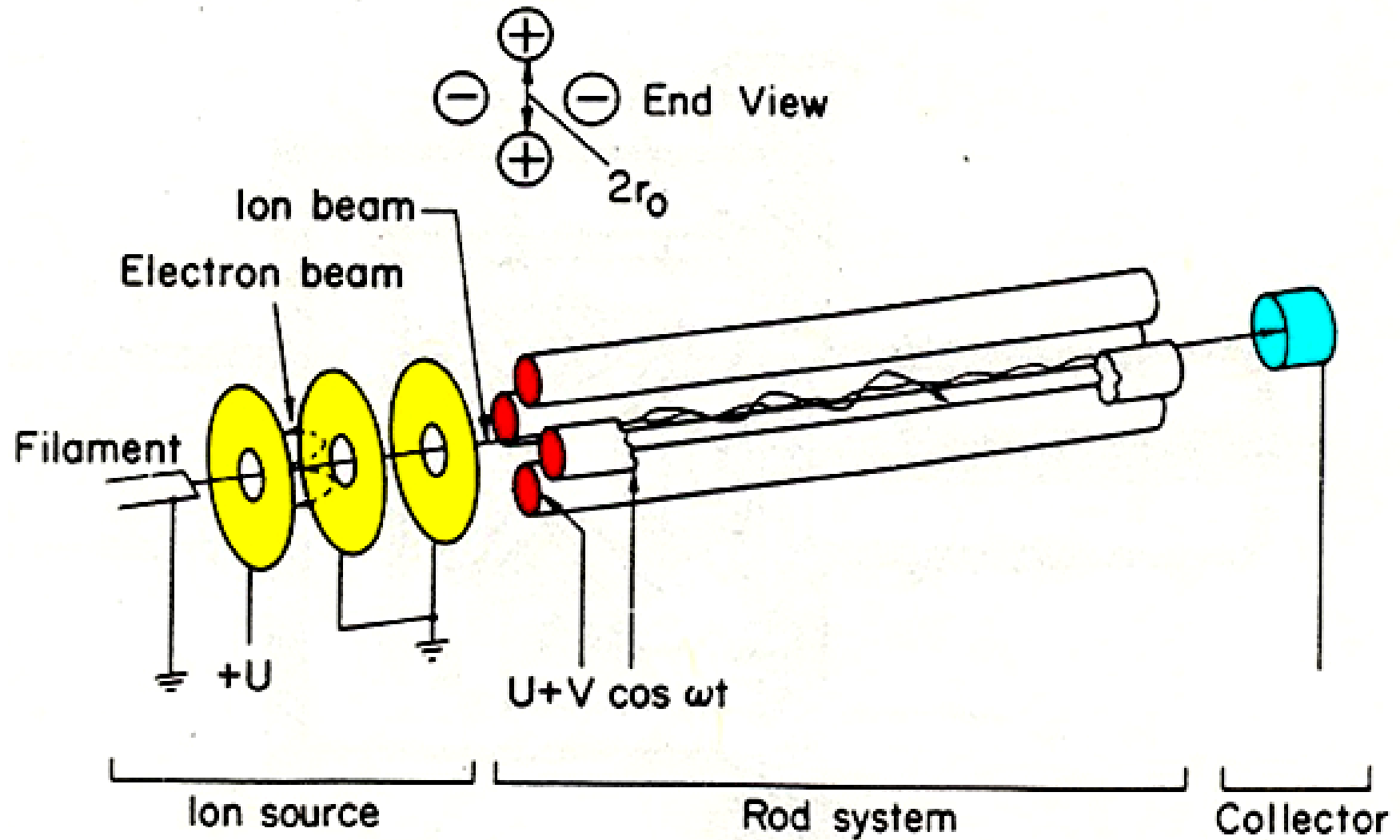


Abb. 2.71a–c. Quadrupolmassenspektrometer. (a) Äquipotentiallinien; (b) hyperbolische Elektroden; (c) in der Praxis verwendete runde Stäbe

Standard-Analyseverfahren in der Vakuumtechnik

Quadrupolmassenfilter



Massenmessung mit Ionenfallen

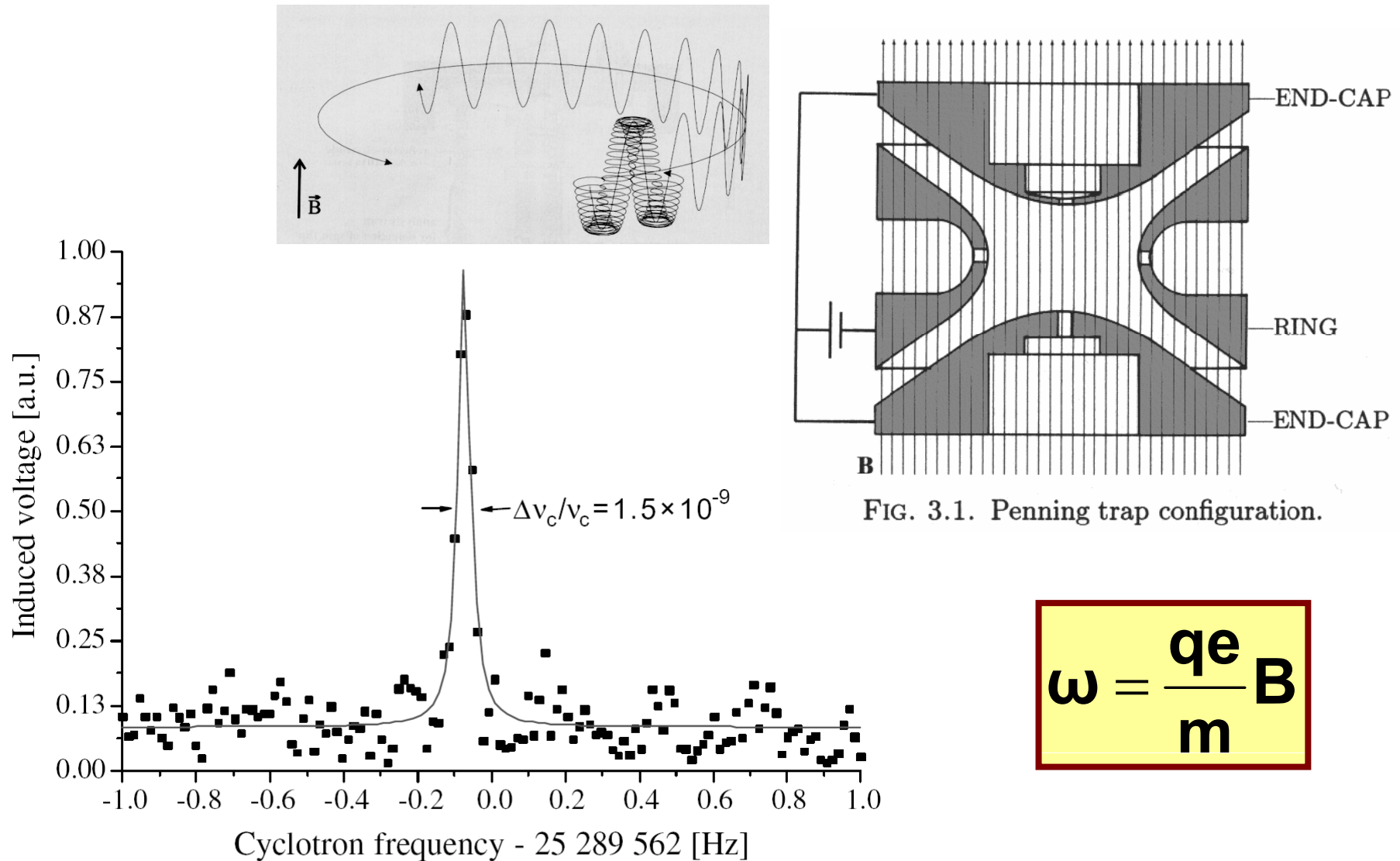
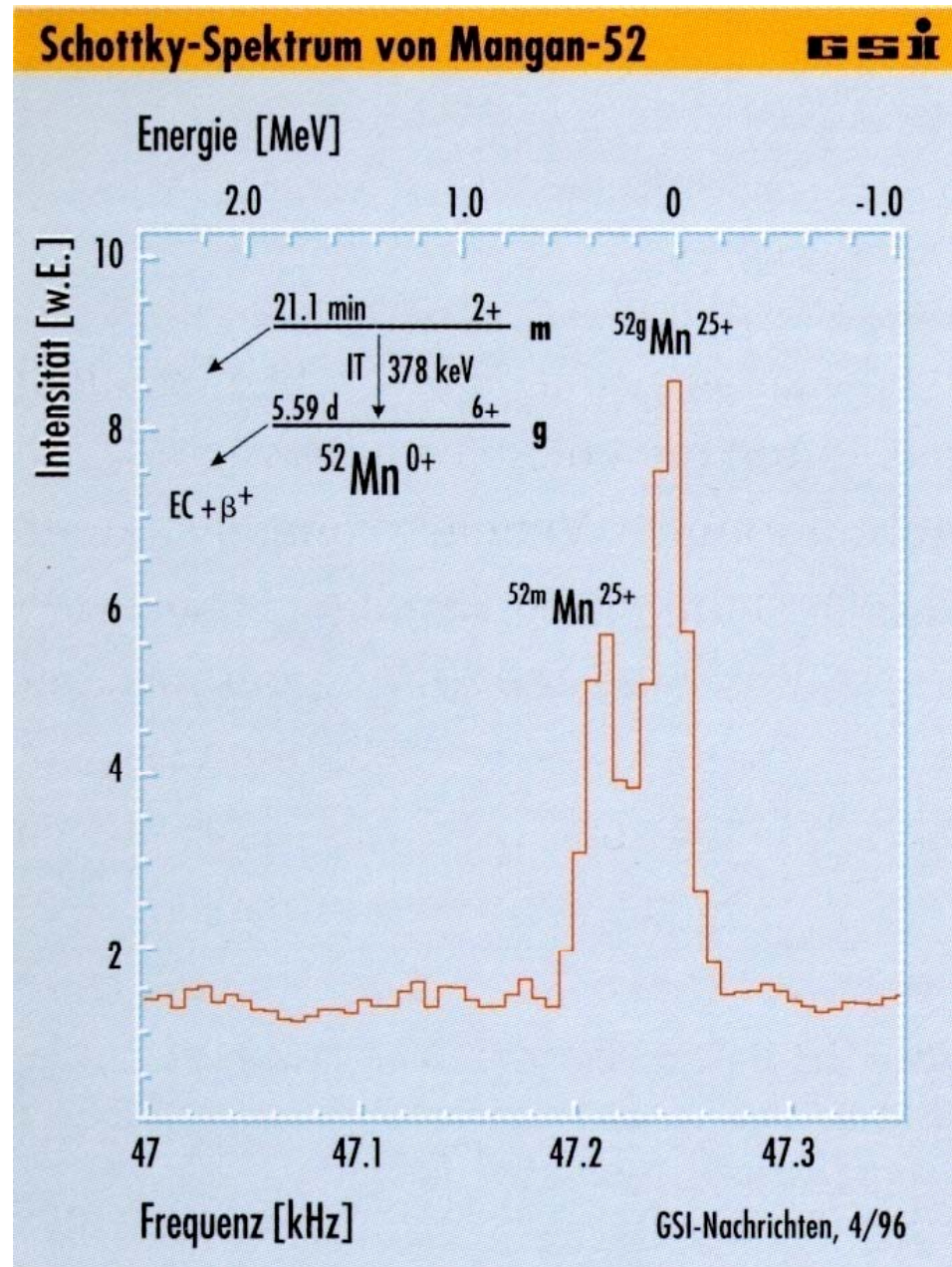
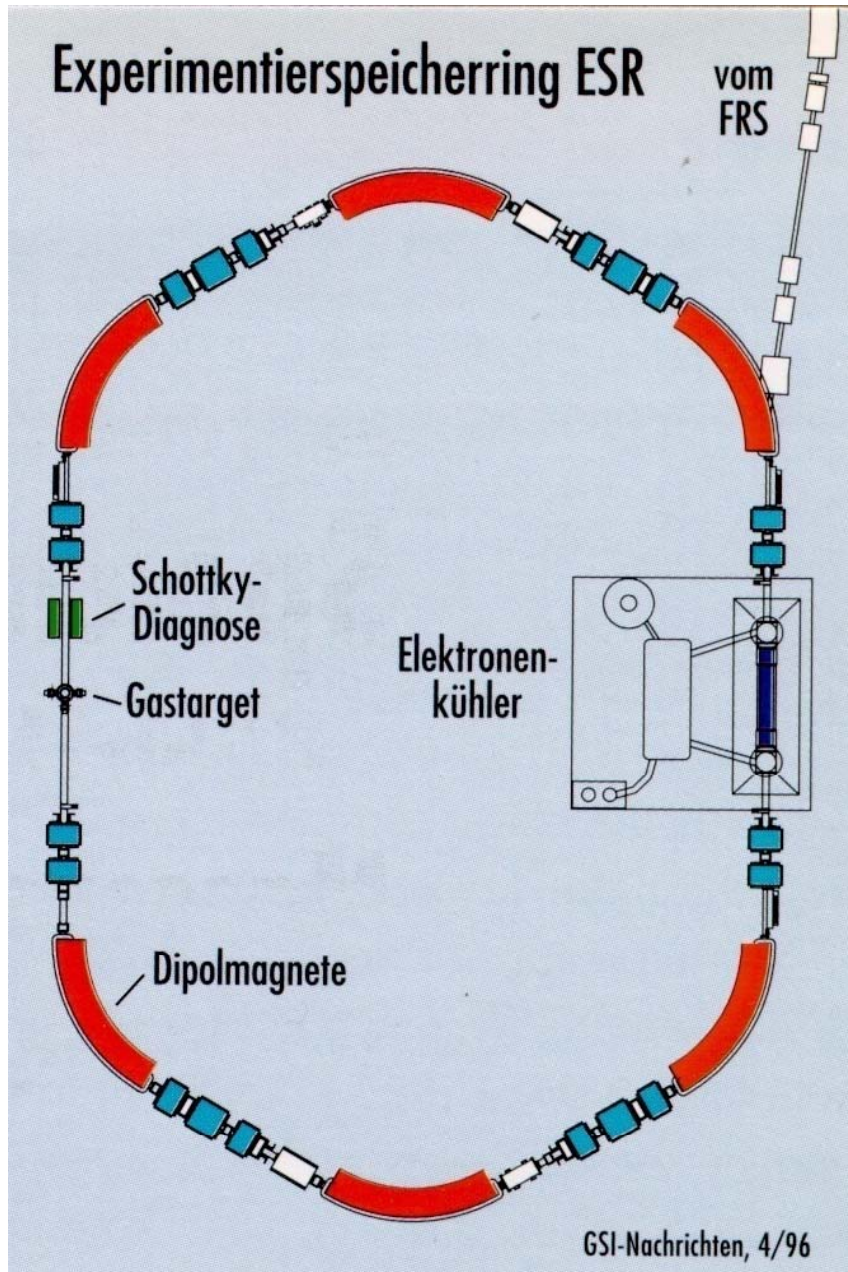


FIG. 3.1. Penning trap configuration.

$$\omega = \frac{qe}{m} B$$

Fig. 4. Fourier transform of the induced voltage from a single O^{7+} ion in a circuit attached to the split ring electrode.

Massenmessung an Speicherringen



Atomare Masseneinheit

1 atomare Masseneinheit = $1 m_u = 1/12 m(^{12}\text{C})$

$m(^{12}\text{C})$: Masse des neutralen Kohlenstoffatoms

CODATA* 2006

$$1 m_u = 1.660\,538\,782(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m_u / m_u = 5.0 \cdot 10^{-8}$$

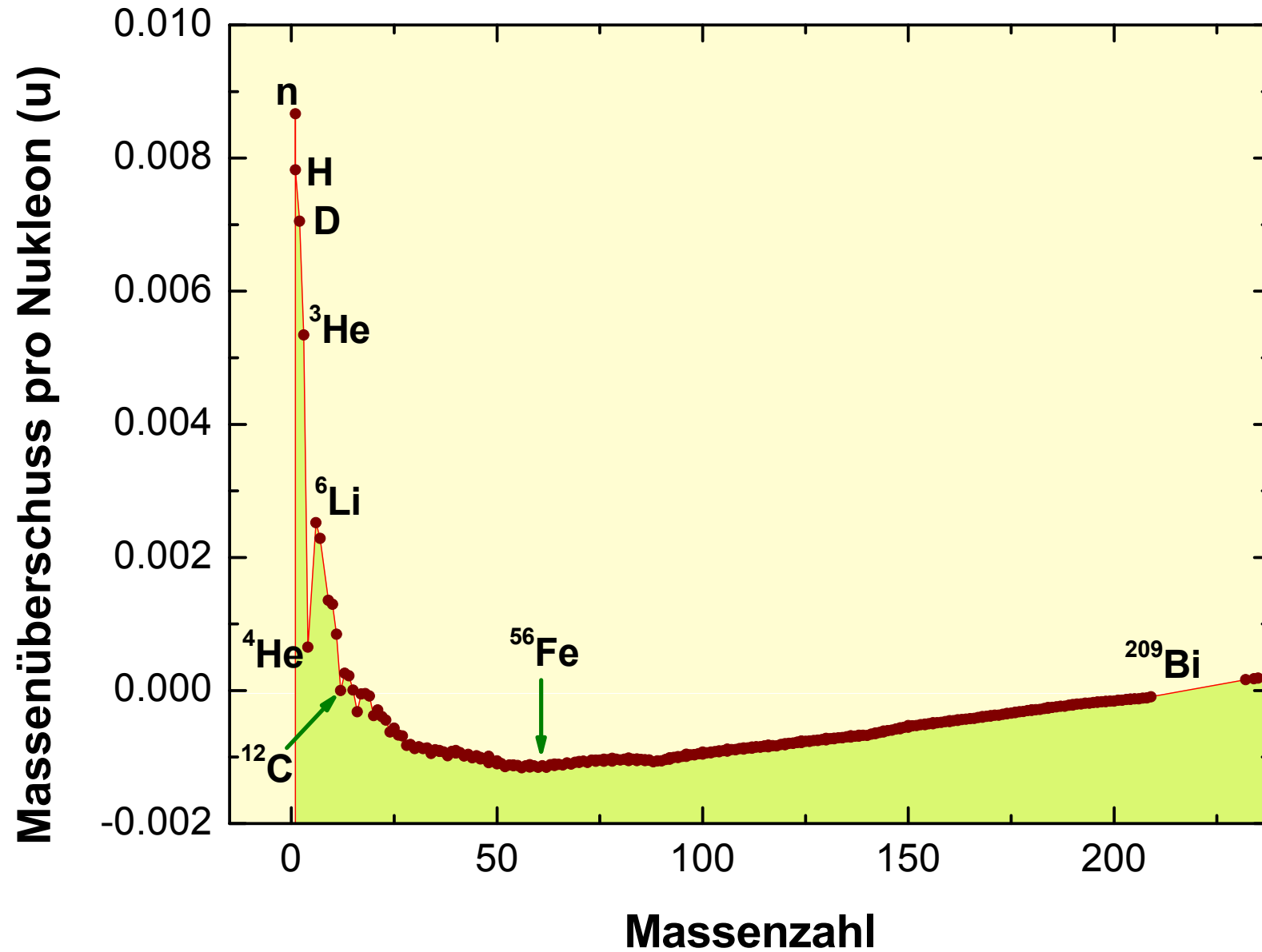
$$1 m_u = 931.494\,028(23) \times 10^6 \text{ eV}/c^2$$

$$\Delta m_u / m_u = 2.5 \cdot 10^{-8}$$

* CODATA: Committee on Data for Science and Technology

Massen der stabilen Atome

Atommasse = $A \cdot (u + \text{Massenüberschuss pro Nukleon})$

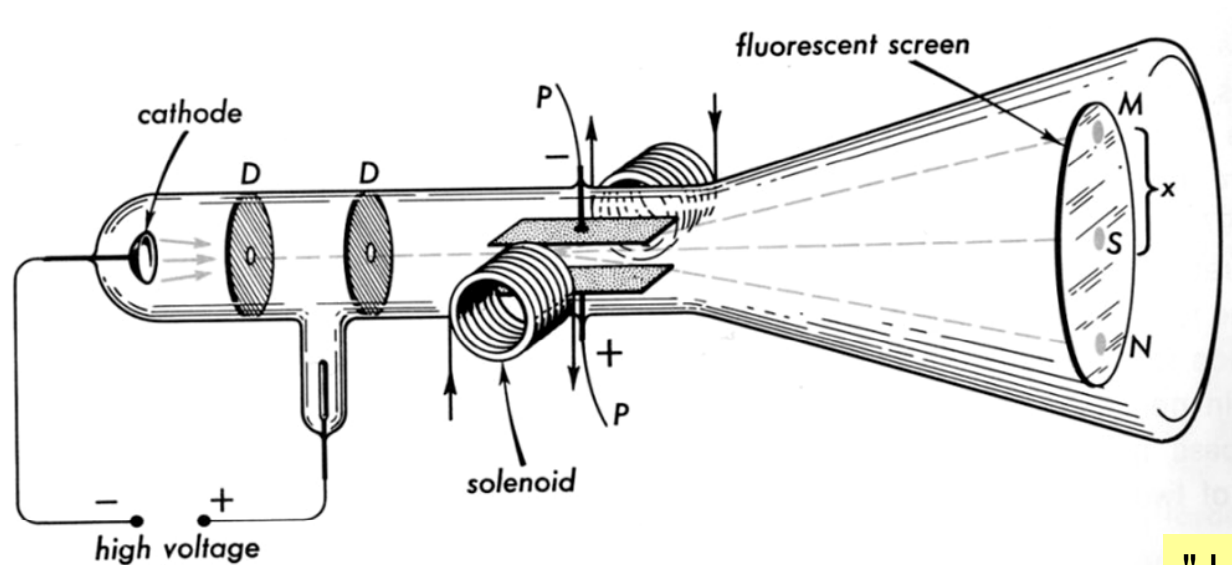


Kap. 4:

Aufbau von Atomen

Entdeckung des Elektrons

1. Kathodenstrahlen werden durch Magnetfelder abgelenkt
2. Ebenso von elektrischen Feldern



3. Bestimmung von e/m

Kathodenstrahlen bestehen aus Korpuskeln, d.h. Teilchen mit definierter Masse und Ladung. Sie sind Bestandteile der Atome. (1897)



Joseph John Thomson
1856-1940
Nobelpreis 1906

"J.J. was very awkward with his fingers, and I found it very necessary not to encourage him to handle the instruments! But he was very helpful in talking over the ways in which he thought things ought to go." -- H. F. Newall, onetime assistant to the young Professor Thomson.

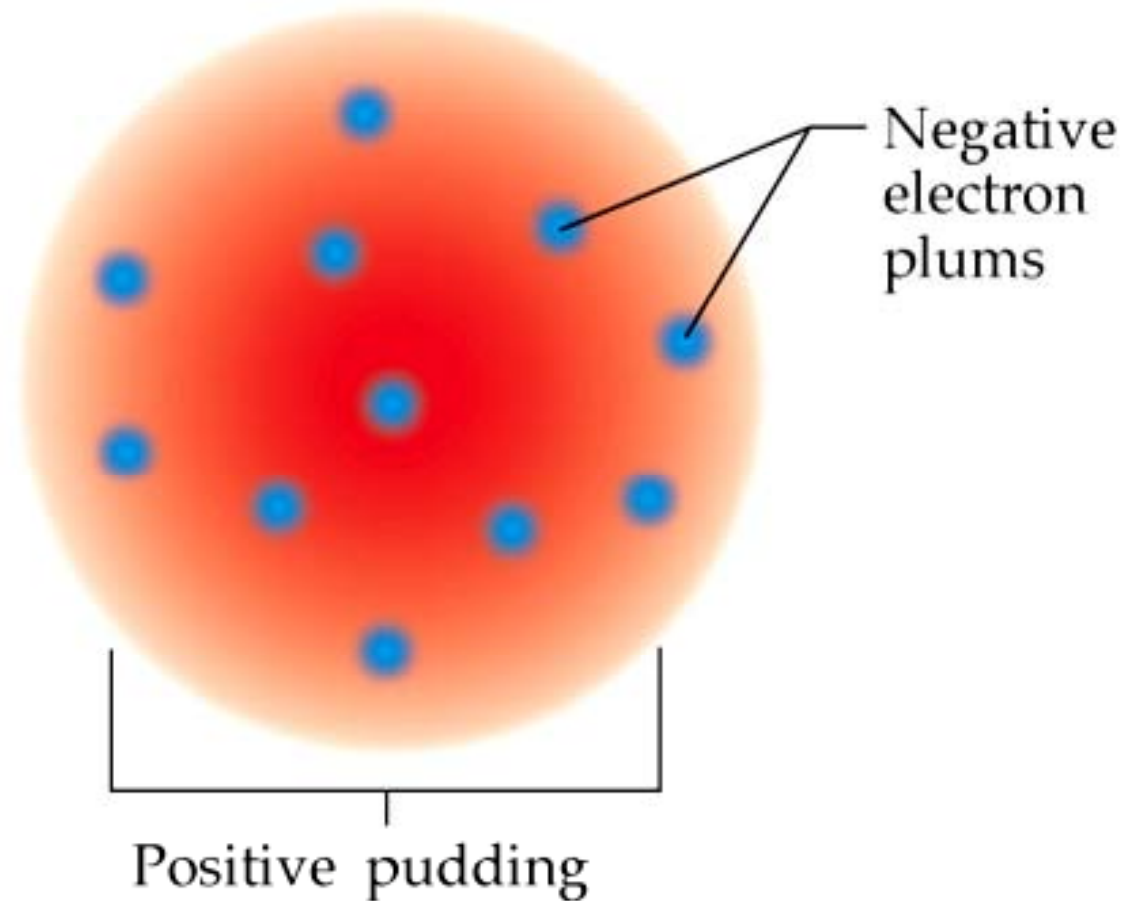
Atomaufbau: Thomsonmodell

J. J. Thomsons Plumpudding Modell

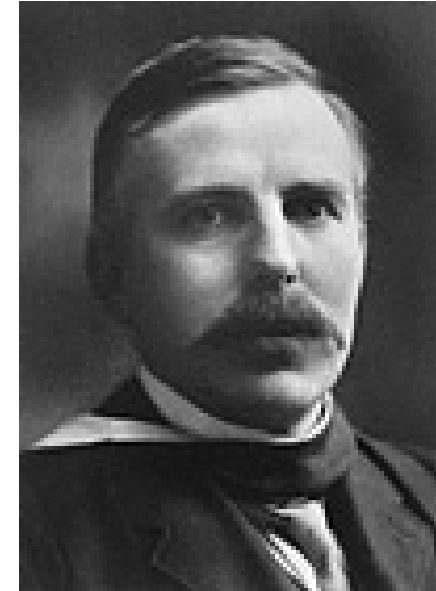
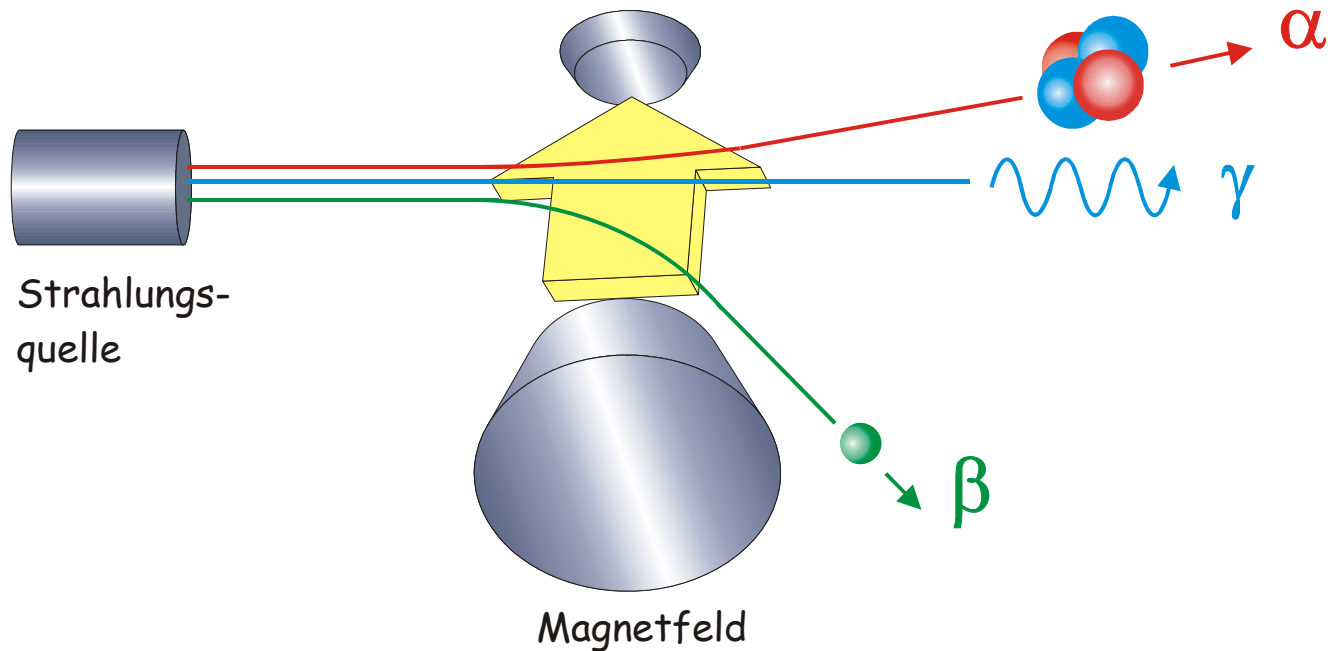
Vorstellung:

**Gleichmäßige
Verteilung der
positiven Ladung
im Atom**

**neutralisiert durch
Elektronen**



Elementumwandlungen, Alphateilchen



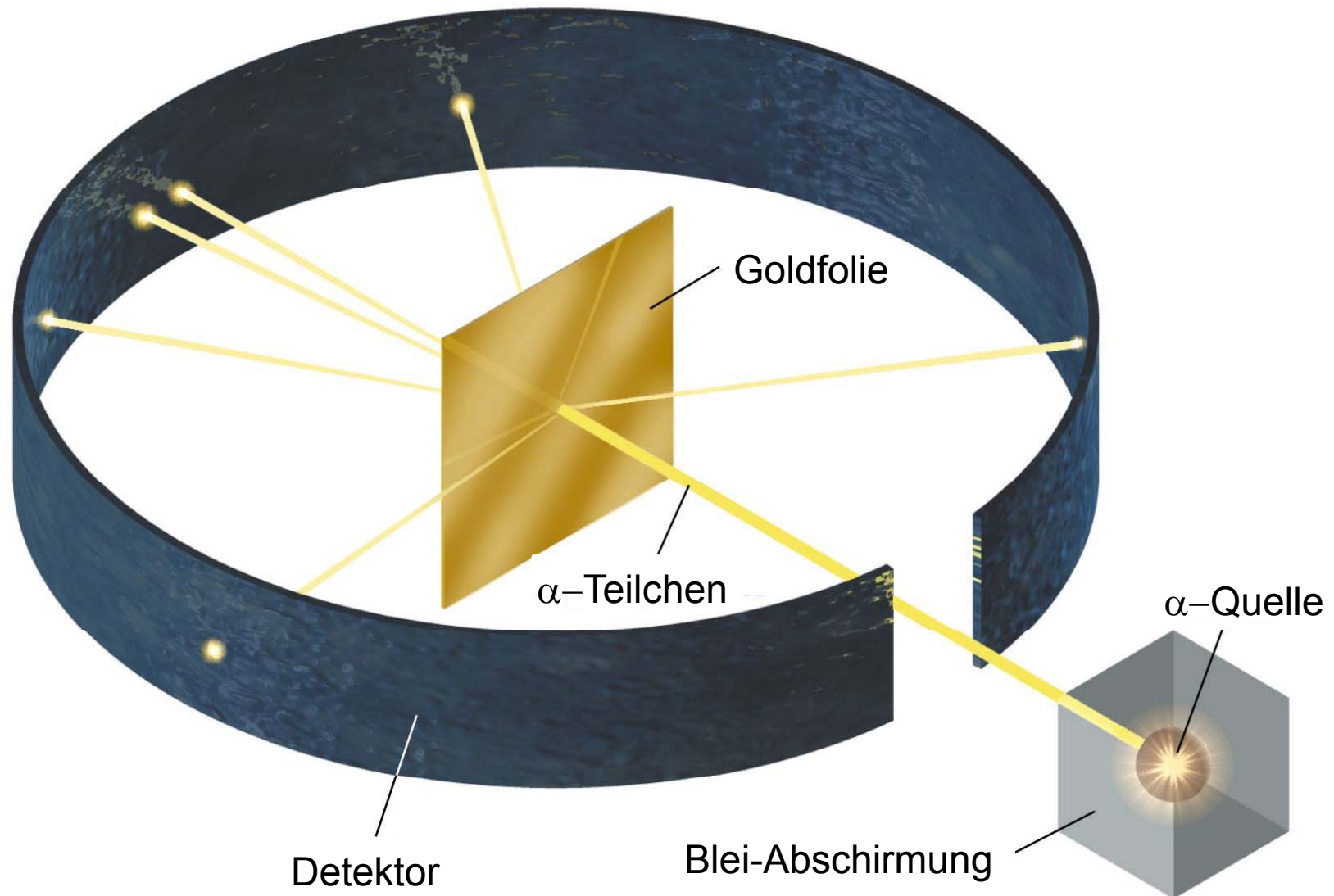
Ernest Rutherford
1871-1931
Nobelpreis
Chemie 1908

Erklärung der radioaktiven Strahlung als Folge spontaner Umwandlungen radioaktiver Elemente (1902)

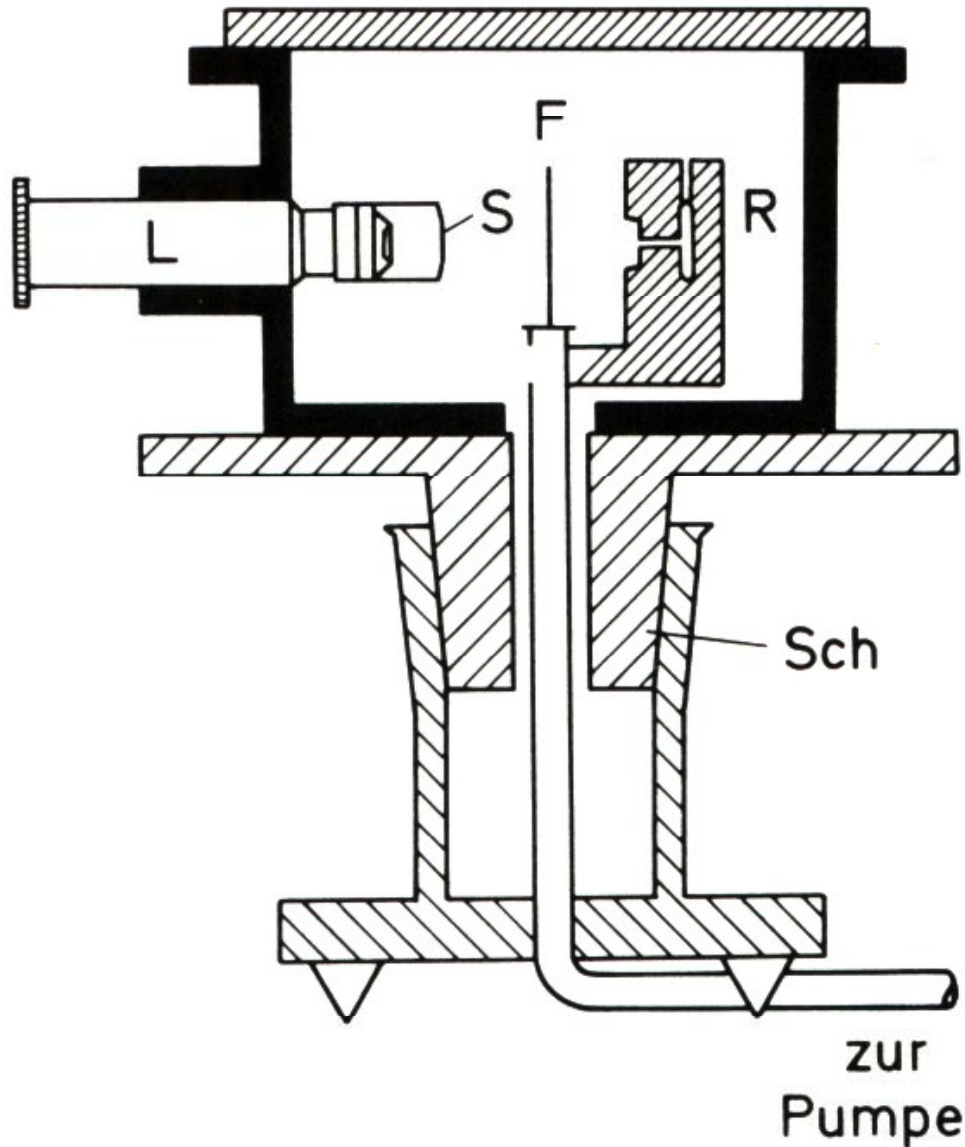
Nachweis, dass α -Teilchen energiereiche positiv geladene Heliumatome sind

Atomaufbau: Test durch Streuexperimente

Rutherford: Messung der Winkelverteilung gestreuer α -Teilchen



Rutherford/Geiger/Marsden Experiment



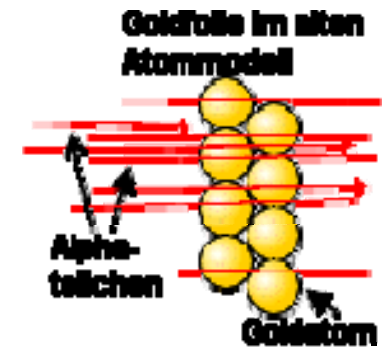
- R: Radon α -Emitter
- F: Goldfolie
- S: Szintillatorschirm
- L: Beobachtungslupe

Blendenkanal:
gerichteter Strahl
von α -Teilchen

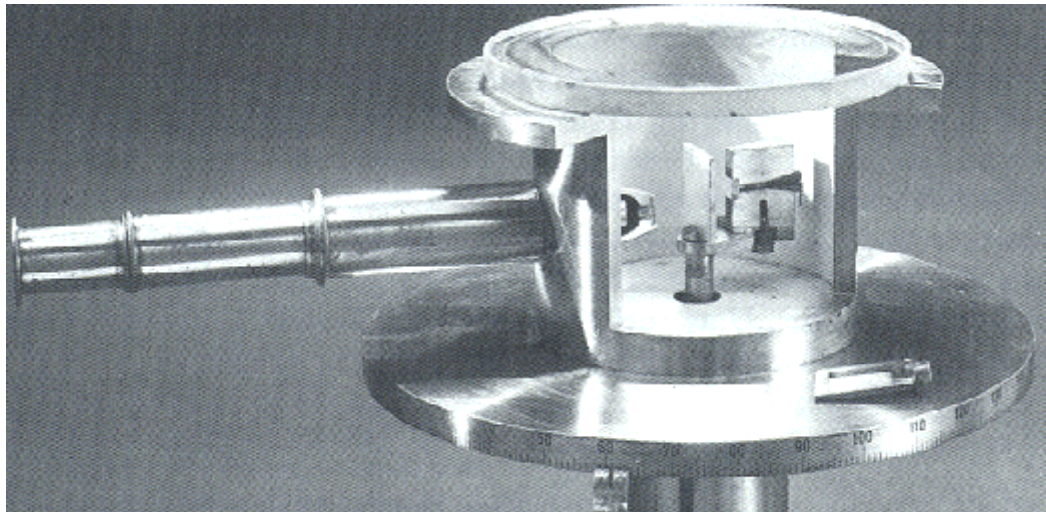
Vakuum:
Streuung an Gold
und nicht an Luft

Verblüffende Ergebnisse

Erwartung: beim Durchlaufen der Goldfolie sollten die α -Teilchen zwar langsamer werden, ihre Richtung aber fast ungestört beibehalten, ähnlich wie Geschosse, die auf einen Plumpudding mit Rosinen geschossen werden



Beobachtung: mit nicht-verschwindender Wahrscheinlichkeit wurde **Großwinkelstreuung** beobachtet



Rutherford später:

...as if one had fired a large naval shell at a piece of tissue paper and it had bounced back...

Es war fast so unglaublich, als wenn einer eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier abgefeuert hätte und diese zurückgekommen wäre und ihn getroffen hätte

Behandlung von Streuproblemen

Behandlung im Schwerpunktsystem:

Rückführung des Zwei-Körperproblems auf die Bewegung eines fiktiven Teilchens mit der reduzierten Masse m

Streuzentrum wird räumlich fixiert angenommen

reduzierte Masse

$$m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

Projektilmasse: m_1

Targetmasse: m_2

Anschließend Umrechnung auf das Laborsystem

Beachtung der Erhaltungssätze:

Energiesatz

$$E_{\text{vor}} = E_{\text{nach}}$$

Impulserhaltung

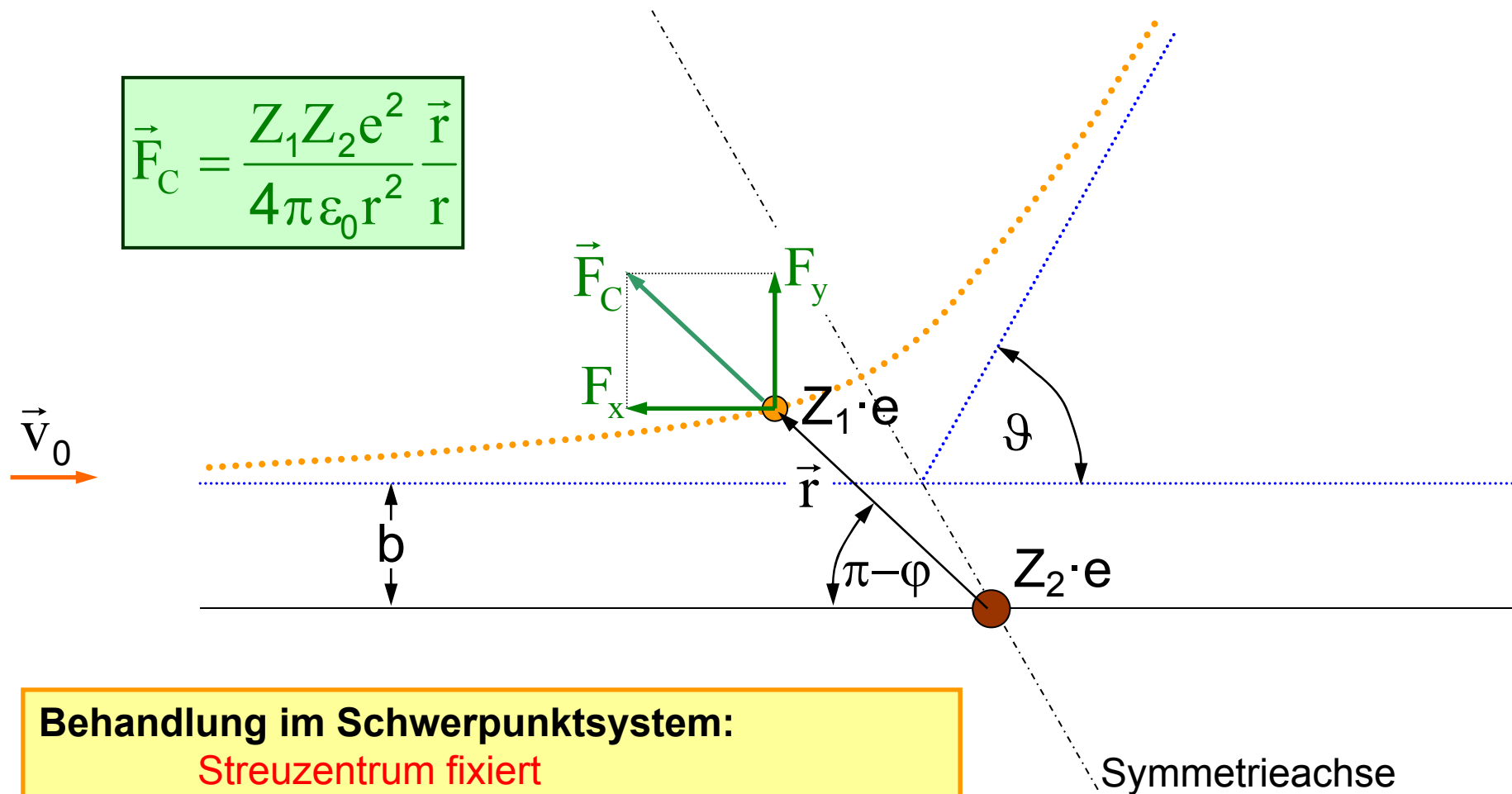
$$\vec{p}_{\text{vor}} = \vec{p}_{\text{nach}}$$

Drehimpulserhaltung

$$\vec{L}_{\text{vor}} = \vec{L}_{\text{nach}}$$

und andere mehr

Coulombstreuung punktförmiger Teilchen



Behandlung im Schwerpunktsystem:

Streuzentrum fixiert

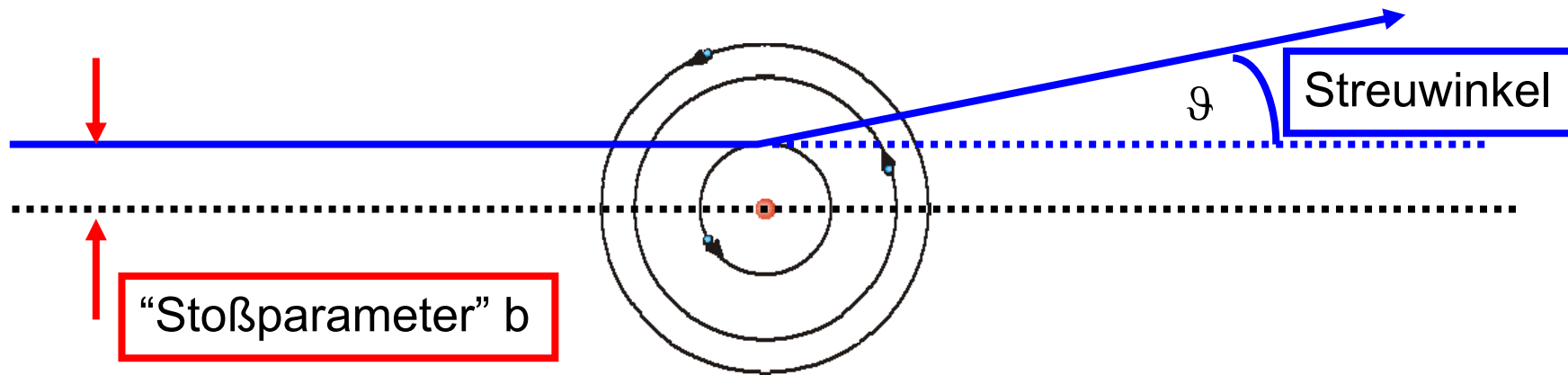
Verwendung der reduzierten Masse

$$m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

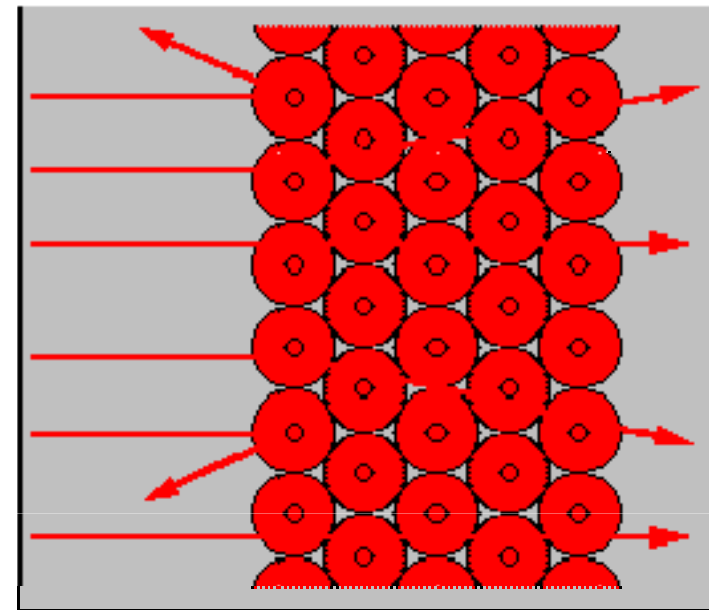
Projektilmasse: m_1

Targetmasse: m_2

Atomaufbau: Test durch Streuexperimente



Anordnung der Goldatome in einer Goldfolie



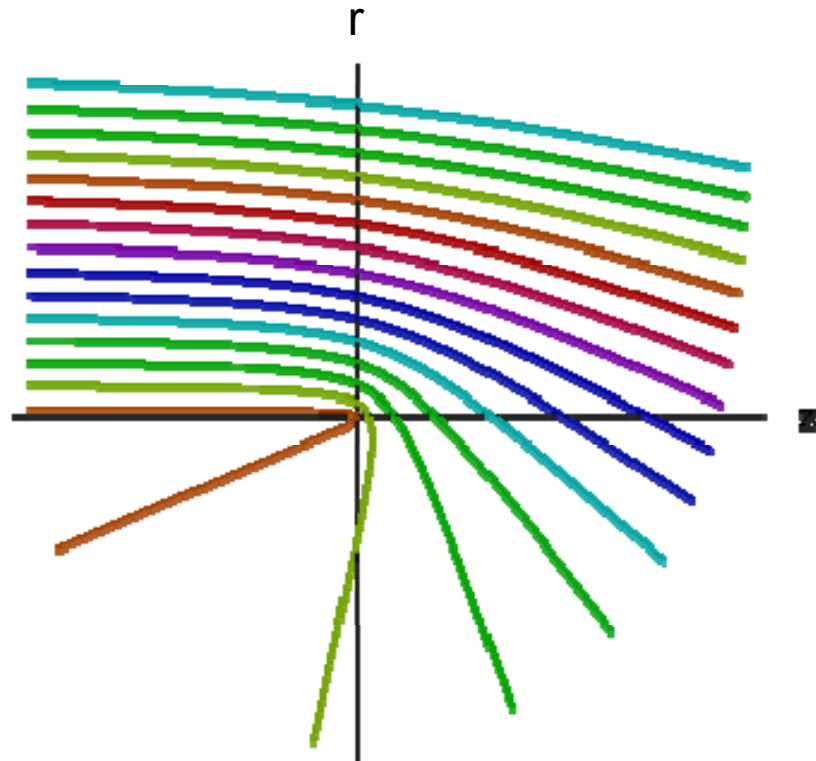
Rutherford's Streuversuch

$$b = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 m v_0^2 \tan(\vartheta/2)}$$

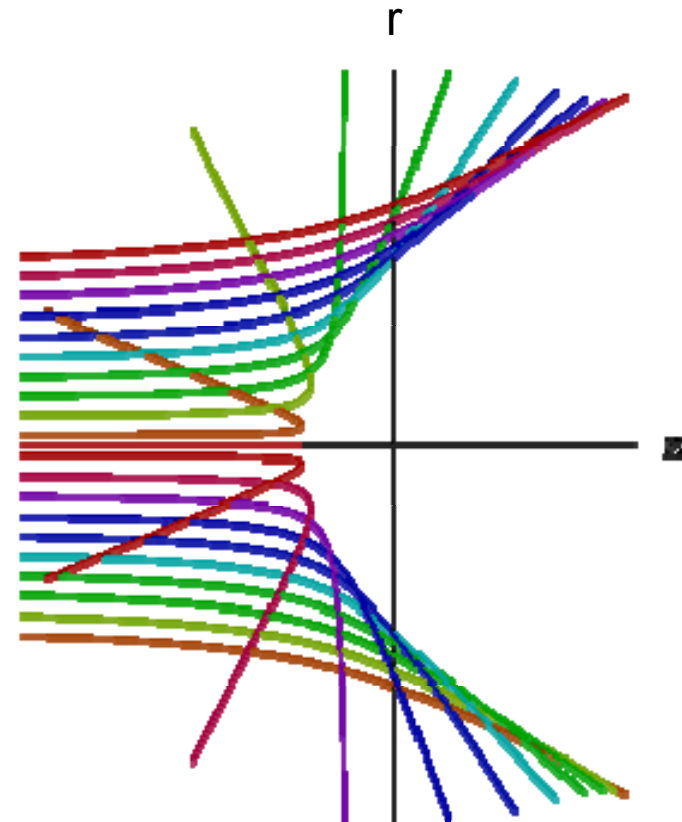
für Coulomb-Wechselwirkung
zwischen Punktteilchen

Trajektorien bei der Coulomb-Streuung

Entgegengesetzte Ladungen
(anziehend)

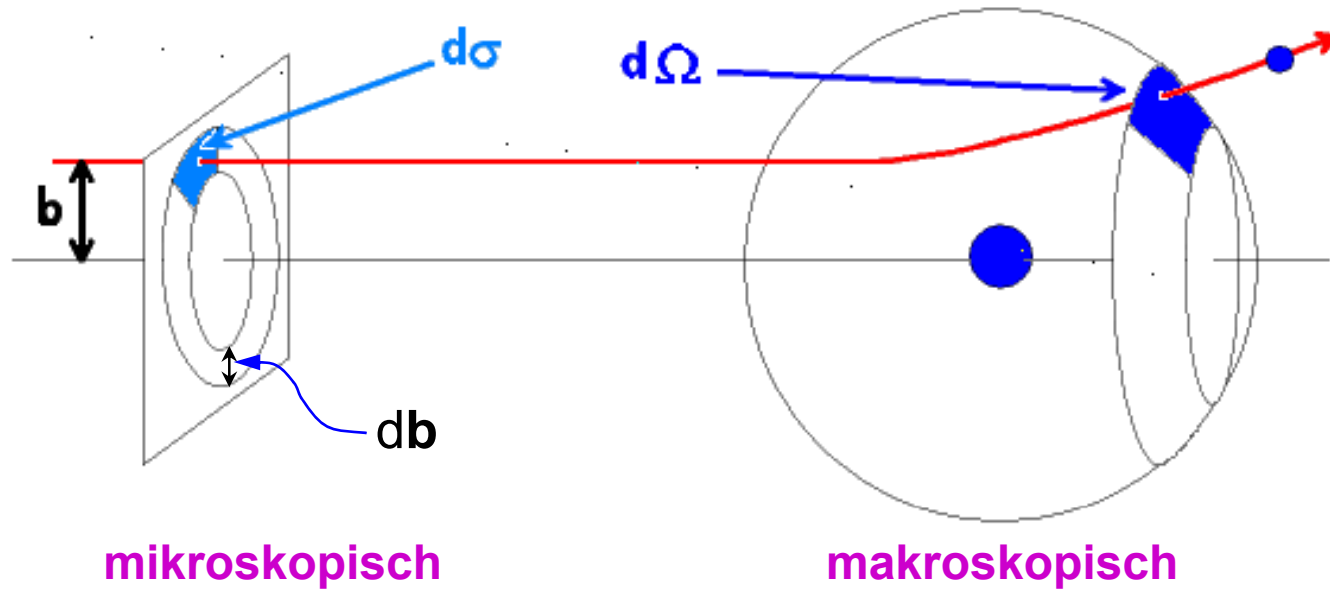


gleichnamige Ladungen
(abstoßend)



Streuzentrum jeweils im Koordinatenursprung

Stoßparameter, Streuwinkel, Wirkungsquerschnitt



Erhaltung des Teilchenflusses bei elastischer Streuung:

$$j_0 \cdot 2\pi b \, db = j_0 \cdot d\sigma = j_0 \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 2\pi \sin \vartheta \cdot d\vartheta$$

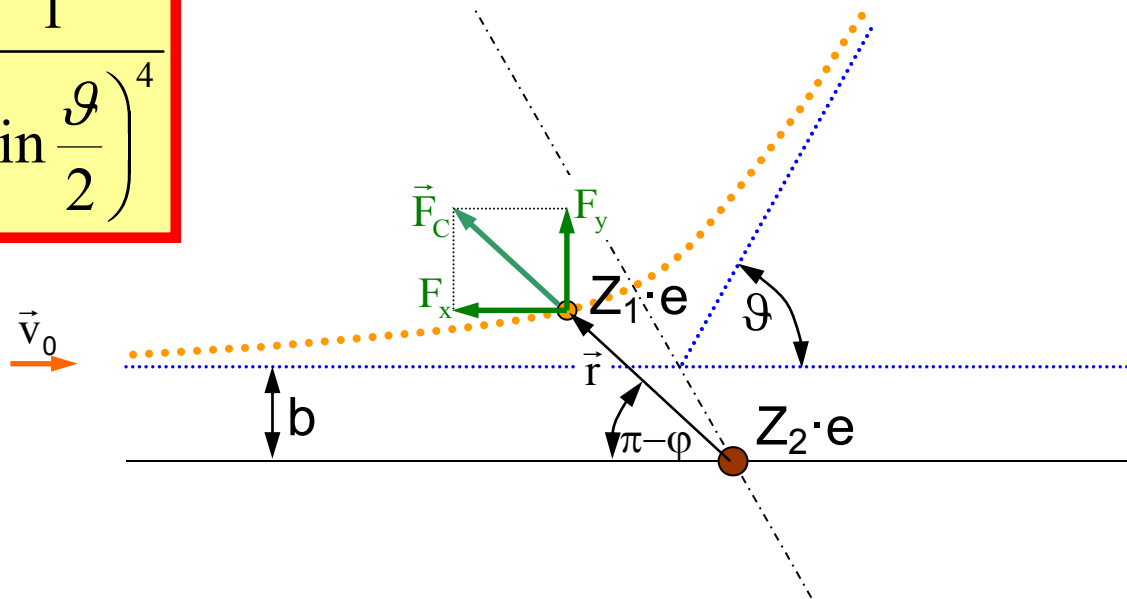
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left| \frac{b}{\sin \vartheta} \frac{db}{d\vartheta} \right|$$

Differentieller Wirkungsquerschnitt (Rutherford)

Coulomb-Streuung punktförmiger geladener Teilchen

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{16} \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_{kin}} \right)^2 \frac{1}{\left(\sin \frac{\vartheta}{2} \right)^4}$$

$$E_{kin} = \frac{mv_0^2}{2}$$



Formel gilt für das Schwerpunktsystem, d. h.

$$E_{kin} = \frac{m}{2} v_0^2, \quad \frac{d\sigma}{d\Omega}, \quad \vartheta \quad \text{sind Größen im Schwerpunktsystem}$$

Schwerpunktsystem \leftrightarrow Laborsystem

Targetteilchen sei zunächst in Ruhe; es nimmt im Stoß einen Impuls auf,

Bei elastischer Streuung gilt:

Schwerpunktsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{cm}}, \quad \mathcal{G}_{cm}, \quad v_0$$

vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

Laborsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Lab}}}, \quad \mathcal{G}_{\text{Lab}}, \quad v_0, \quad v_1, \quad v_2$$

vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_0^2$$

nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_1^2 + \frac{m_2}{2} v_2^2$$

Umrechnungen cm \leftrightarrow Lab (nicht-relativistisch)

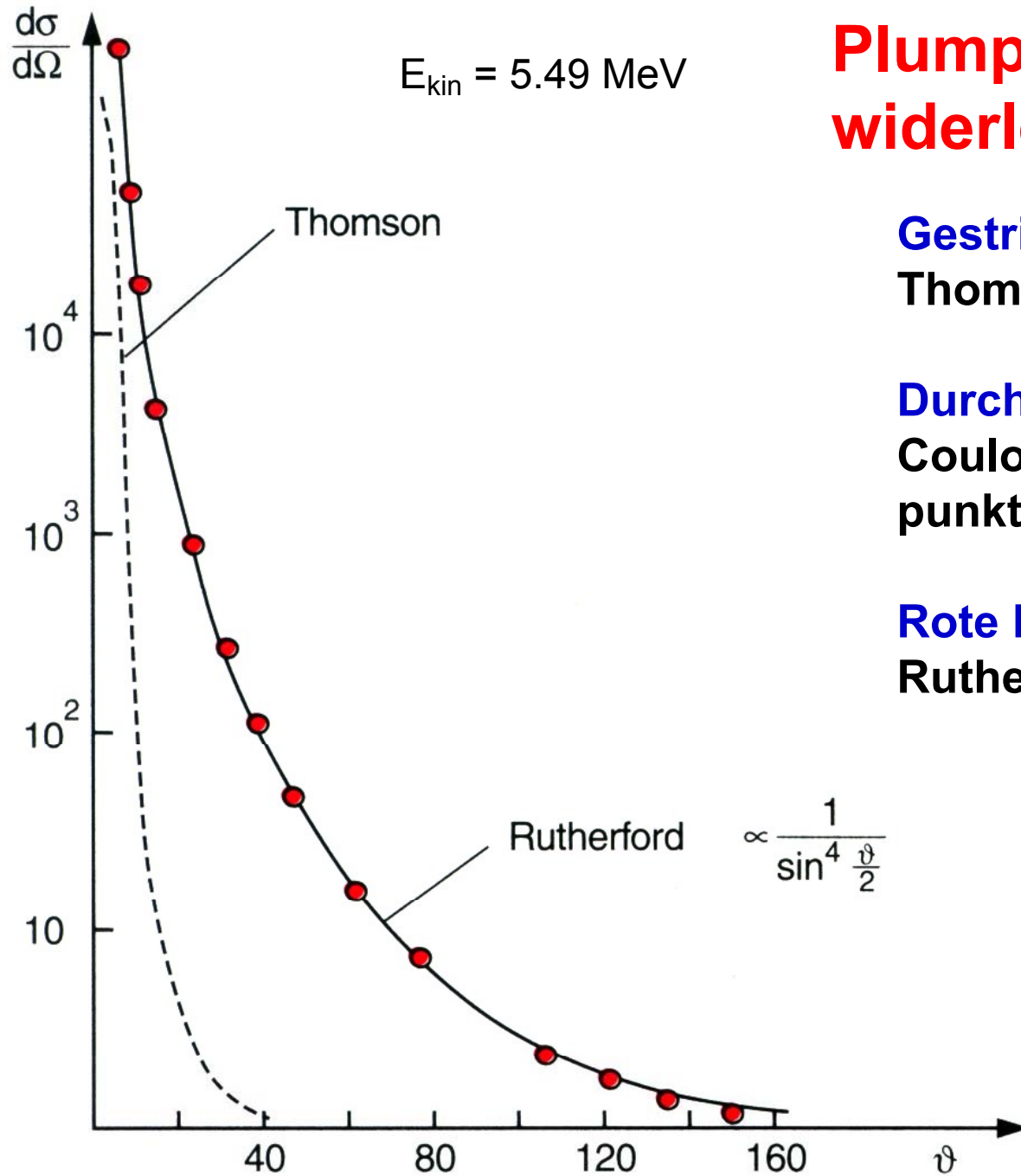
$$\frac{d\sigma(\vartheta_{\text{Lab}})}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\vartheta_{\text{cm}})}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{d\Omega_{\text{cm}}}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\vartheta_{\text{cm}}(\vartheta_{\text{Lab}}))}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{\sin \vartheta_{\text{cm}} d\vartheta_{\text{cm}}}{\sin \vartheta_{\text{Lab}} d\vartheta_{\text{Lab}}}$$

Elastische Streuung:

$$\vartheta_{\text{Lab}} = \arctan\left(\frac{\sin \vartheta_{\text{cm}}}{\cos \vartheta_{\text{cm}} + m_1/m_2}\right)$$

$$\vartheta_{\text{cm}} = \arcsin\left[\frac{m_1}{m_2} \sin \vartheta_{\text{Lab}} \cos \vartheta_{\text{Lab}} \pm \sin \vartheta_{\text{Lab}} \sqrt{1 - \left(\frac{m_1}{m_2} \sin \vartheta_{\text{Lab}}\right)^2}\right]$$

$$v_1 = v_0 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \left[\cos \vartheta_{\text{Lab}} \pm \sqrt{(\cos \vartheta_{\text{Lab}})^2 + \frac{(m_2^2 - m_1^2)}{m_1^2}} \right]$$



Plumpudding-Modell widerlegt

Gestrichelte Linie:
Thomson-Modell

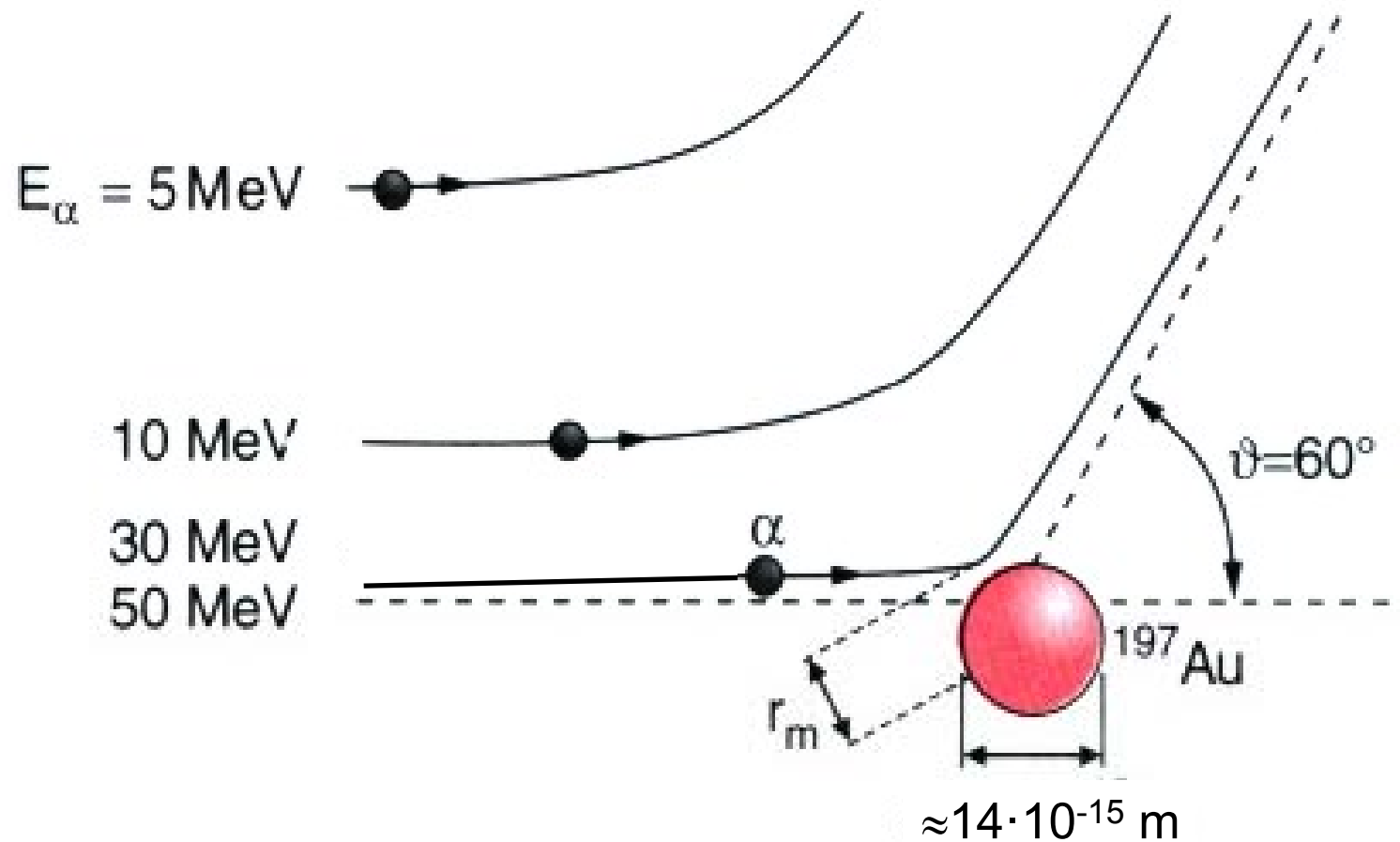
Durchgezogene Linie:
Coulombstreuung
punktförmiger Teilchen

Rote Kreise:
Rutherfordexperiment

Ladung und Masse
des Atoms finden
sich fast vollständig
in einem
näherungsweise
punktförmigen Kern

Größe des Atomkerns

Winkel fest, Variation der Energie



Abweichung von Rutherfordstreuung bei Kernkontakt

Größe des Atomkerns

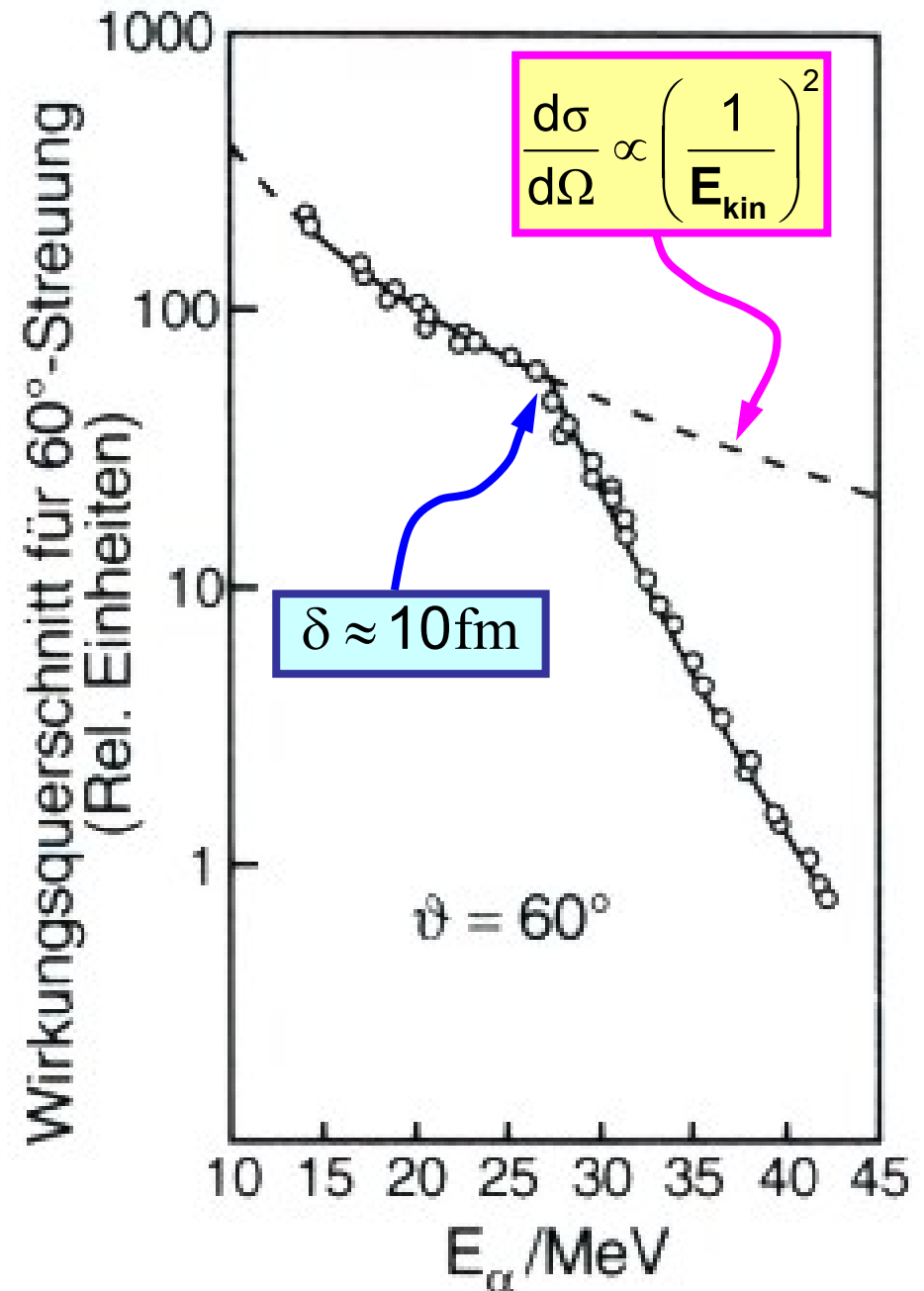
Zu jeder Energie erhält man bei festem Streuwinkel ϑ einen Abstand größter Annäherung

$$\delta = \frac{\delta_0}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\vartheta}{2}} \right)$$
$$\delta_0 = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_{\text{kin}}}$$

Kernradien (aus α -Streuung):

$$R = 1.4 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot A^{1/3}$$

A: Massenzahl



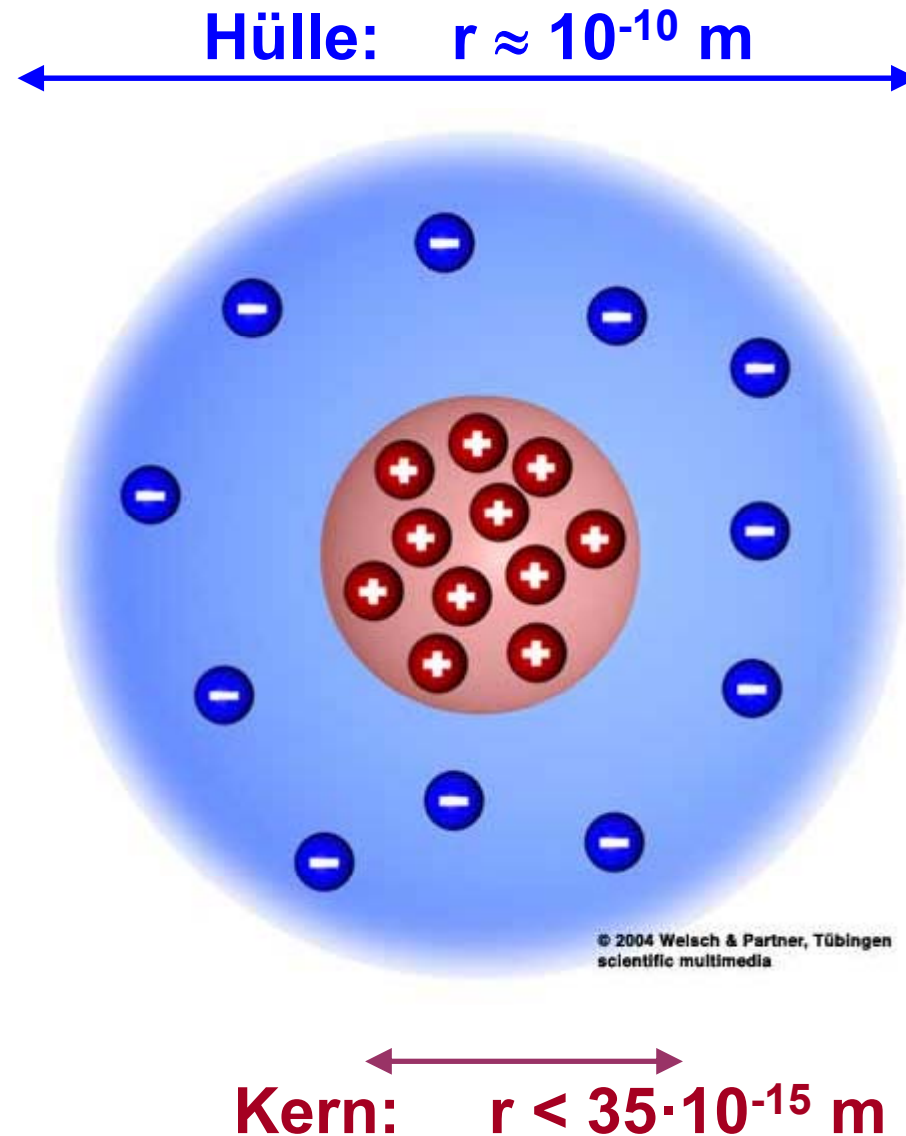
Atommodell nach Rutherford

Bei 150°-Streuung von 5.5 MeV α -Teilchen keine Abweichung von der Berechnung unter Annahme eines punktförmigen Kerns

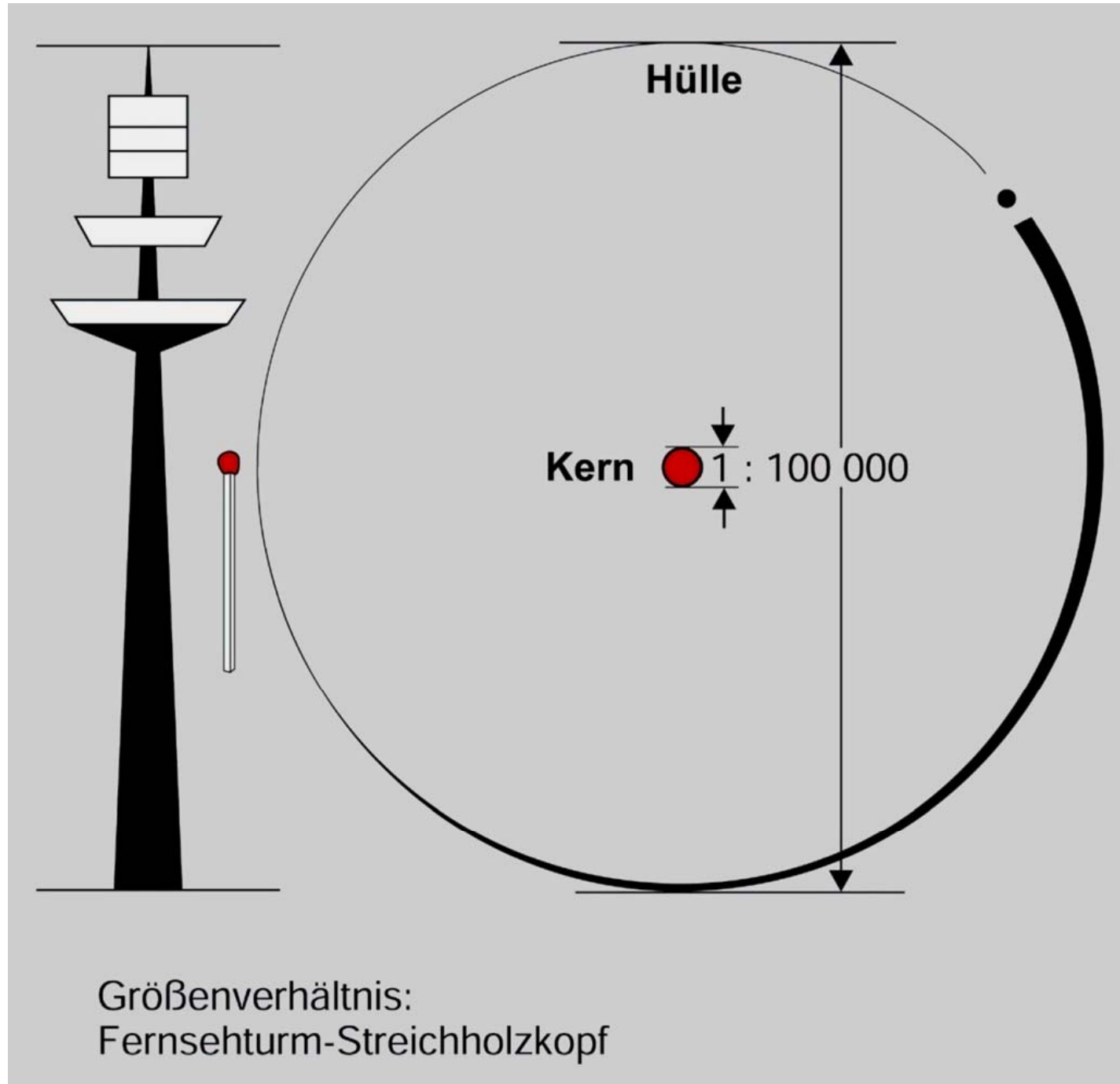


Obergrenze für den Kernradius: ca. 35 fm

Bei Atomradius von ca. 100 000 fm



Größen- vergleich



Mengen- vergleich



1g Eisen enthält ca. 10^{22} Atome



Verteilt im Wasser der Weltmeere
(1 370 Mio km³)



ca. 7 Atome / l