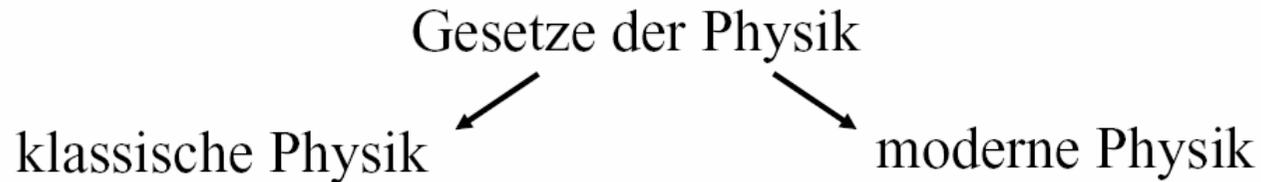


## Struktur der Materie / Einführung in die Quantenmechanik



Bisher: ausschließlich „klassische Physik“

Entdeckung der Wellennatur der Materie  
Fundamentalkonstante  $h$  (Planck 1900)      Beginn der „modernen Physik“

Gesetze und mathematischer Formalismus: Quantenmechanik

**Zielstellung:**  
**Herausarbeitung einiger grundlegender Ideen**  
**Kontext in der “Struktur der Materie”**

## “Clouds over Nineteenth-Century Physics ...”

### Das Physikbild am Ende des 19. Jahrhunderts:

“...künftige Arbeit besteht nur noch darin, an bereits bekannten Ergebnissen weitere Dezimalstellen anzufügen....”

Natur kann beschrieben werden durch:

(klassische) Mechanik → Newtonsche Gl.

(klassische) Elektrodynamik → Maxwell Gl.

### Aber: 2 Probleme !

Lord Kelvin (geb. 1834)

Berühmte Vorlesung im Jahr 1900:

**„Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light”**

“Gebäude der Physik erscheint vollkommen harmonisch und im wesentlichen vollendet, **nur am Horizont sehe ich 2 dunkle Wolken:**

\* das neg. Ergebnis des Versuchs von

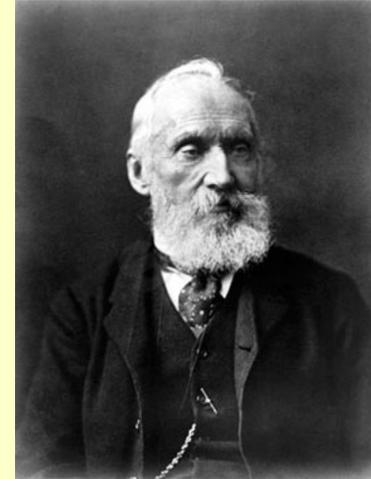
Michelson-Morley

→ Relativitätstheorie

\* Ultraviolett katastrophe des Rayleigh-Jeanschen

Strahlungsgesetzes

→ Quantenmechanik



## Beispiel: Elektrodynamik

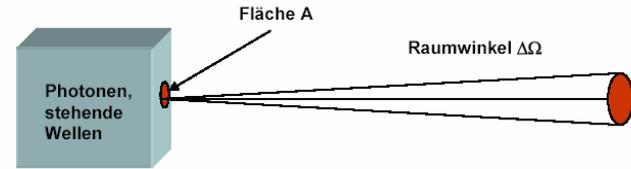
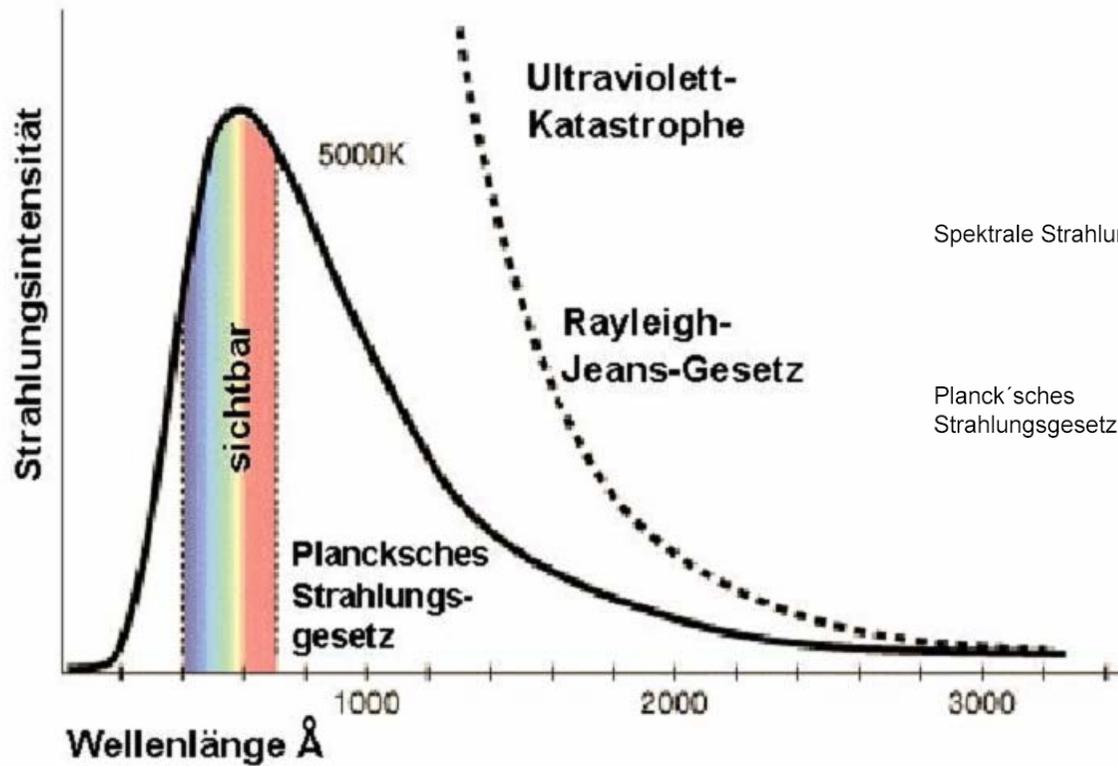
1870: Theorie des Lichtes (und damit der Optik) als mathematische Folgerung aus den Maxwell'schen Gleichungen hergeleitet

→ Dadurch Komplikationen bei der Deutung des „Äthers“

→ Lösung durch spezielle Relativitätstheorie (Einstein 1905)

Rückblickend: Maxwell'sche Gleichungen können als relativistische Folgerung aus dem Coulombschen Gesetz verstanden werden

# Beispiel: Rayleigh - Jeans „Ultraviolettkatastrophe“



Spektrale Strahlungsdichte

$$L(\nu, T) d\nu = \frac{\text{abgestrahlte Energie in Intervall } d\nu}{\text{Zeit, Fläche, Raumwinkel}}$$

Planck'sches Strahlungsgesetz

$$L(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left[\frac{h\nu}{k_B T}\right] - 1} d\nu$$

Die nach der klassischen Physik berechnete Intensitätsverteilung zeigte einen starken Anstieg bei kurzen Wellenlängen, den man als die Ultraviolett-Katastrophe bezeichnet hat, da der Anstieg ins Unendliche auf der ultravioletten Seite des Spektrums hervorgesagt wird.

# Struktur der Materie / Historischer Überblick

## Geschichtlicher Überblick

### *Meilensteine der Atom- und Quantenphysik*

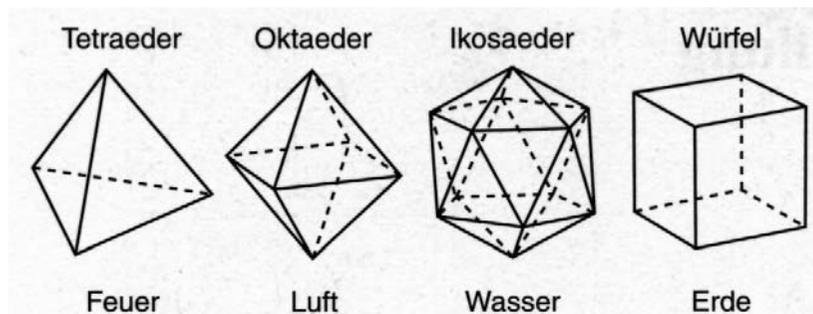
(E - Experiment; T - Theorie; P - Phänomenologie)

-400 T	Atommodell von Demokrit
1808 E,P	Dalton: Gesetz der konstanten Proportionen in der Chemie
1811 E,T	Gasgesetze, kinetische Gastheorie von Avogadro und anderen
1868 P	Mendelejew: Periodensystem
1885 P	Balmer-Formel für Wasserstoff-Spektrallinien
1896 E	Becquerel: Radioaktivität
1897 E	Thomson: Elektron identifiziert durch $q/m$
1900 T	Plancksches Strahlungsgesetz
1905 T	Erklärung des Photoeffektes durch Einstein
1911 E	Millikan: Ladungsquantelung
1911 E	Rutherford-Streuung: Atomkern
1913 T	Bohrsches Atommodell
1922 E	Stern und Gerlach: Elektronspin
1926 T	Schrödinger-Gleichung
1927 T	Heisenbergsche Unschärferelation.
1928 T	Dirac-Gleichung (relativistisch): Anti-Elektron
1932 E	Positron-Nachweis in Nebelkammer durch Anderson
1948 T	Quantenelektrodynamik (Elektronen $\leftrightarrow$ Photonen)

## Atommodell des Demokrit (460 – 370 v. Chr.)



- Alle Naturkörper bestehen aus ‚unendlich kleinen‘, raumfüllenden gänzlich unteilbaren Partikeln: den **Atomen**
- Außerhalb der Atome ist nur leerer Raum
- Verschiedene Atome unterscheiden sich in Größe und Gestalt
- Die charakteristischen Eigenschaften der makroskopischen Körper entstehen durch verschiedenen Anordnung gleicher oder verschiedener Atome



- Weiterentwicklung im Rahmen der Elementhypothese des Empedokles (490 – 430 BC), nach der alle Dinge aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde bestehen sollten

# Schritte zum experimentell belegten Atommodell

## Materie ist aus „Molekülen“ aufgebaut

- Daltons Gesetz der konstanten Proportionen
- Kinetische Gastheorie

## Zahl der Moleküle pro Mol – Avogadro-Konstante

- Gasgesetze
- Elektrolyse
- Milikan Versuch
- Röntgenbeugung + Molvolumen Bestimmung

## „Größe“ der Moleküle (Atome)

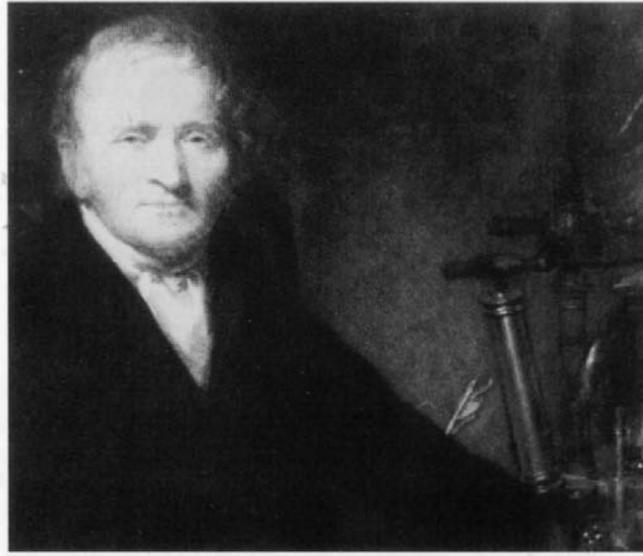
$$\left(P + \frac{a}{V_m}\right)(V_m - b) = RT$$

- Van-der-Waals Gleichung
- Transportkoeffizienten und freie Weglängen (Diffusion, Wärmeleitung, Viskosität, ...)
- Röntgenbeugung (Strukturfunktionen)

## Struktur

- Identifikation der Komponenten (schwere positive Teilchen, leichte negative)
- Streuexperimente !!!
- Spektroskopie + Modelle
- ...

## (1) Daltons Gesetz der konstanten Proportionen (1808)



### Quantitative chemischen Analysen und Synthesen:

Das Massenverhältnis der Stoffe, aus denen sich eine chemische Verbindung ergibt, ist für jede Verbindung konstant und eindeutig bestimmt.

### Folgerungen:

- Alle chemischen Elemente bestehen aus chemisch unteilbaren Atomen
- Alle Atome eines Elementes sind gleich.
- Bei einer chemischen Verbindung treten ganzzahlige Mengenverhältnisse auf.
- In der Regel werden die Mengenverhältnisse durch *kleine* Zahlen beschrieben (Prout, 1815).

# Periodensystem der Elemente

Mendeljew, Meyer 1868 - 1871

Periode	= Hauptgruppen																= Edelgase	Schale	
	I	II	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	Ia	Ib	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	1,008 1 H Wasserstoff															4,003 2 He Helium	K		
2	6,941 3 Li Lithium	9,012 4 Be Beryllium										10,811 5 B Bor	12,011 6 C Kohlenstoff	14,007 7 N Stickstoff	15,999 8 O Sauerstoff	18,998 9 F Fluor	20,180 10 Ne Neon	L	
3	22,990 11 Na Natrium	24,305 12 Mg Magnesium										26,982 13 Al Aluminium	28,086 14 Si Silicium	30,974 15 P Phosphor	32,066 16 S Schwefel	35,453 17 Cl Chlor	39,948 18 Ar Argon	M	
4	39,098 19 K Kalium	40,078 20 Ca Calcium	44,956 21 Sc Scandium	47,88 22 Ti Titan	50,942 23 V Vanadin	51,996 24 Cr Chrom	54,938 25 Mn Mangan	55,847 26 Fe Eisen	58,933 27 Co Kobalt	58,69 28 Ni Nickel	63,546 29 Cu Kupfer	65,39 30 Zn Zink	69,723 31 Ga Gallium	72,61 32 Ge Germanium	74,922 33 As Arsen	78,96 34 Se Selen	79,904 35 Br Brom	83,8 36 Kr Krypton	N
5	85,468 37 Rb Rubidium	87,62 38 Sr Strontium	88,906 39 Y Yttrium	91,224 40 Zr Zirkon	92,906 41 Nb Niob	95,94 42 Mo Molybdän	98,906 43 Tc Technetium	101,07 44 Ru Ruthenium	102,906 45 Rh Rhodium	106,42 46 Pd Palladium	107,868 47 Ag Silber	112,411 48 Cd Cadmium	114,82 49 In Indium	118,71 50 Sn Zinn	121,75 51 Sb Antimon	127,6 52 Te Tellur	126,904 53 I Iod	131,29 54 Xe Xenon	O
6	132,905 55 Cs Cäsium	137,327 56 Ba Barium	138,906 57 La Lanthan	176,49 72 Hf Hafnium	180,948 73 Ta Tantal	183,85 74 W Wolfram	186,207 75 Re Rhenium	190,2 76 Os Osmium	192,22 77 Ir Iridium	195,08 78 Pt Platin	196,967 79 Au Gold	200,59 80 Hg Quecksilber	204,383 81 Tl Thallium	207,2 82 Pb Blei	208,98 83 Bi Bismut	208,982 84 Po Polonium	209,967 85 At Astat	222,018 86 Rn Radon	P
7	223,02 87 Fr Francium	226,025 88 Ra Radium	227,028 89 Ac Actinium	261,109 104 Rf Rutherfordium	262,114 105 Ha Hahnium	263,118 106 Sg Seaborgium	262,123 107 Ns Nihonium	ca. 265 108 Hs Hassium	ca. 266 109 Mt Moscovium	? 110 ?	? 111 ?								Q

Lanthanide														
6	140,12 58 Ce Cer	140,91 59 Pr Praseodym	144,24 60 Nd Neodym	146 61 Pm Promethium	150,35 62 Sm Samarium	151,96 63 Eu Europium	157,25 64 Gd Gadolinium	158,92 65 Tb Terbium	162,50 66 Dy Dysprosium	164,93 67 Ho Holmium	167,26 68 Er Erbium	168,93 69 Tm Thulium	173,04 70 Yb Ytterbium	174,97 71 Lu Lutetium

Actinide														
7	232,04 90 Th Thorium	231 91 Pa Protactinium	238,03 92 U Uran	237 93 Np Neptunium	244 94 Pu Plutonium	243 95 Am Americium	247 96 Cm Curium	247 97 Bk Berkelium	251 98 Cf Californium	254 99 Es Einsteinium	257 100 Fm Fermium	258 101 Md Mendelevium	259 102 No Nobelium	260 103 Lr Lawrencium

Aggregatzustand unter Normalbedingungen:

- Fe fest
- Hg flüssig
- He gasförmig

\* = radioaktives Element

## (1) Weitere Untermauerung der Atomhypothese

### Gay-Lussac , 1808:

- Das Gesetz der konstanten Proportionen gilt auch für die Volumina ( $T, p = \text{const.}$ ) von Gasen bei chemischen Reaktionen.

### Avogadro Hypothese, 1811:

- Gleiche Volumina ( $T, p = \text{const.}$ ) unterschiedlicher Gase enthalten gleich viele Moleküle.

### Clausius, Boltzmann (Atomistik der Wärme ... ), ~ 1870:

- Thermodynamische Gasgesetze als Folge von atomaren Bewegungen und Stößen.

### Faraday (Atomistik der Elektrizität ... ), 1833:

- Die elektrolytisch abgeschiedene Menge eines Elementes ist der transportierten Ladungsmenge proportional.
- Die Masse der abgeschiedenen Elemente ist zur relativen Atommasse (a la Dalton, Avogadro) proportional.

## (2) Zahl der Moleküle pro Mol / Molmasse

**1 Mol := Menge eines Stoffes für die gilt:**

**Masse [g] entspricht dem relativem Atomgewicht [u]**

Also: 1 Mol einer Substanz enthält jeweils die gleiche Zahl  $N_A$  an Molekülen

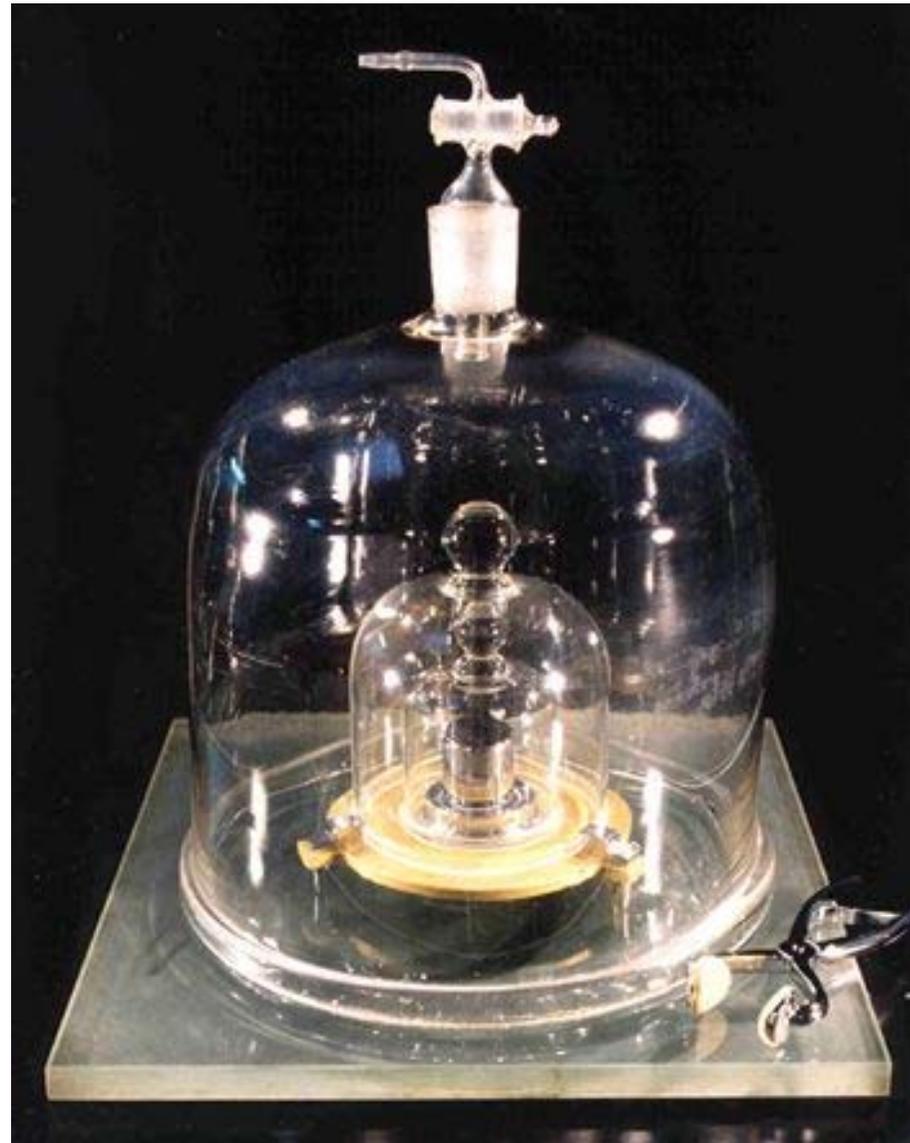
Avogadro-Konstante, Loschmidt-Zahl

$$N_A := \frac{\text{Masse von 1 Mol einer Substanz}}{\text{Masse eines einzigen Moleküls dieser Substanz}}$$

Interessant:  $N_A$  ist eine experimentell zu bestimmende Größe, wenn eine unabhängige Definition der Masse ( heute: via Ur-Kilogram) existiert.

Aber: Prinzipiell kann man dies auch umkehren, und erhält dann eine auf atomare Konstanten zurückgeführte Definition der Masse !!!

## Das Ur-Kilogramm in Paris



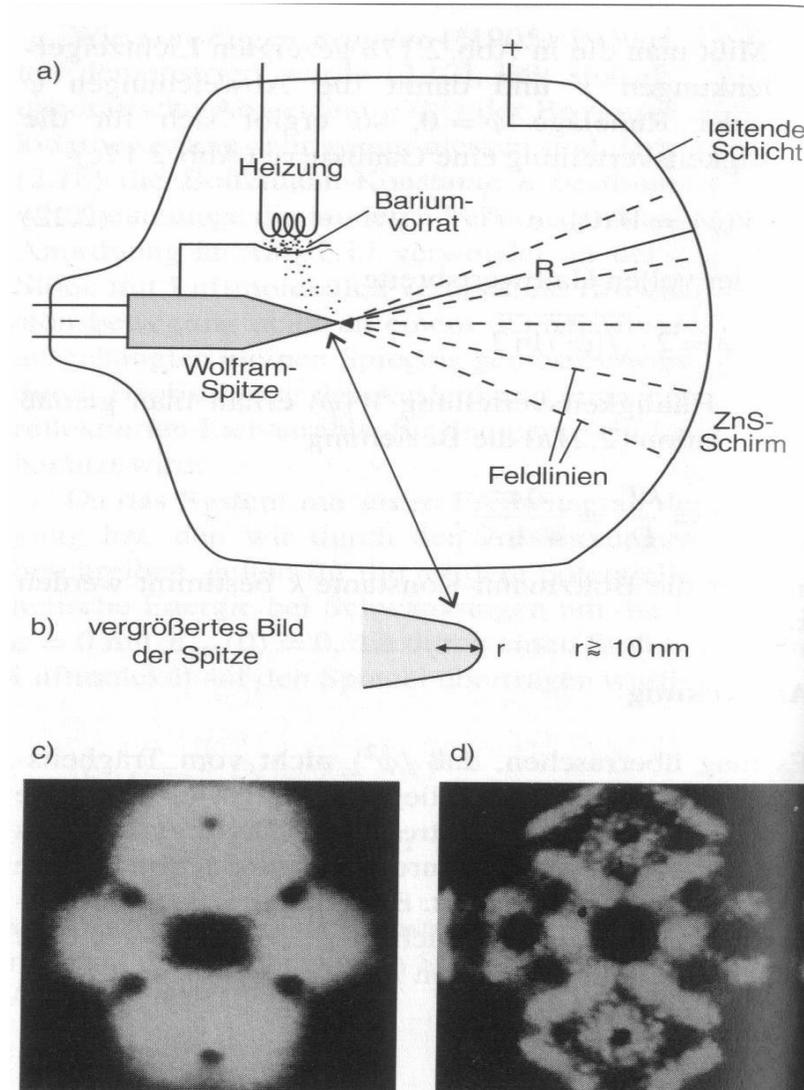
## Neudefinition des Kilograms



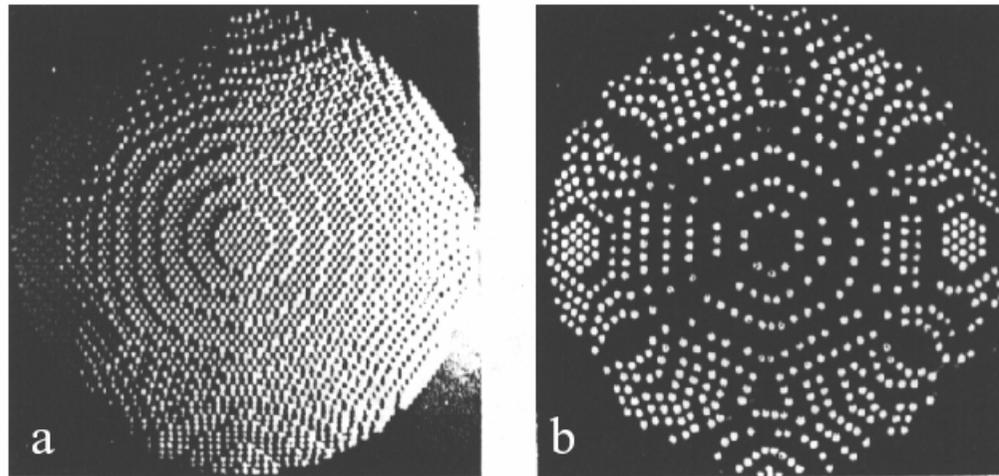
# Atome sehen?

## Feldelektronenmikroskop FEM

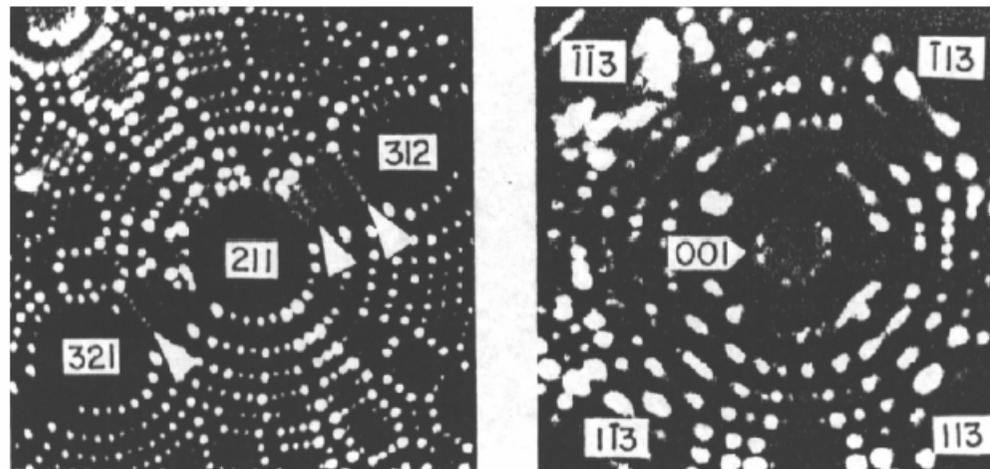
(Erwin Müller 1937)



## Feldionenmikroskop FIM



*Abb.81: Modell einer einkristallinen 'Halbkugel' (a) und Markierung der 'vorstehenden' Atome (b)*

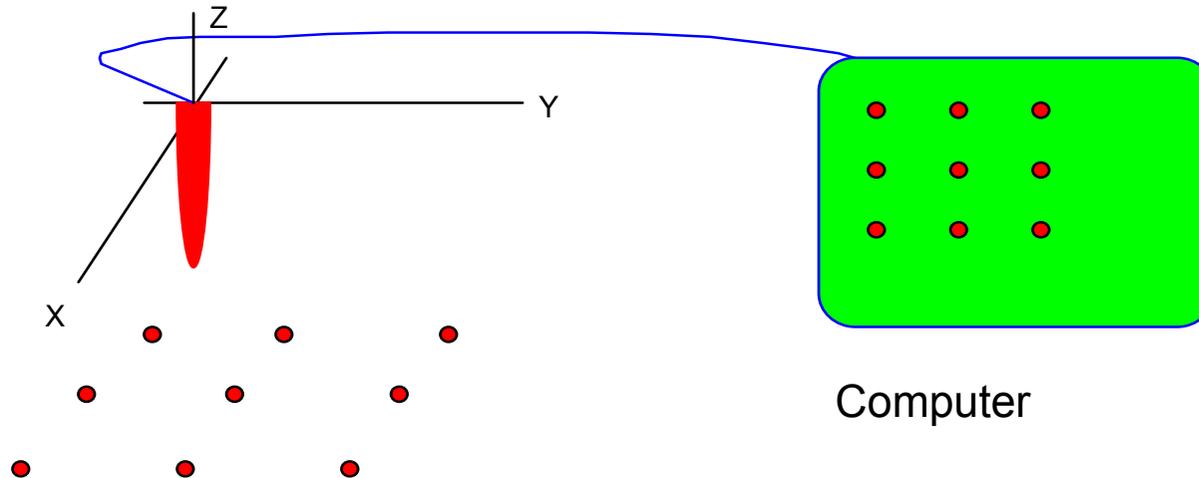


*Abb.83: links: Auflösung der 2,74 Å-Ketten entlang der [111]-Zone einer Wolfram-Spitze mit 840 Å Radius (24,1 kV, 0,3 Pa Helium, 12 K)  
rechts: Voll aufgelöste (001)-Ebene von Platin, 2,77 Å Abstand, Spitzenradius 164 Å (5,6 kV, 0,3 Pa, 21 K)*

„Ecken und Kanten“ abgebildet  
d.h. auch einzelne Atome auf glatter Terasse

## Rastermikroskope

- Idee:**
- a) man benutze eine feine Sonde die ein Signal an der zu untersuchenden Oberfläche erzeugt und / oder mißt
  - b) die Sonde werde zur Bilderzeugung über die Oberfläche in kleinen X/Y Inkrementen bewegt (RASTER)

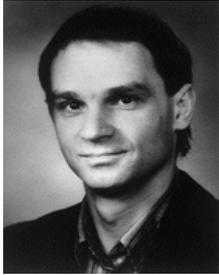


Sondengröße und kleinstes Rasterinkrement bestimmen die maximale Ortsauflösung.

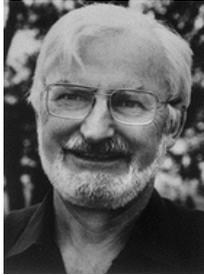
**Sonden:** Elektronenstrahl => **REM** feine Spitze (Leiter) => **STM**

Cantilever => **AFM**

Licht => **SNOM**



Gerd Binnig

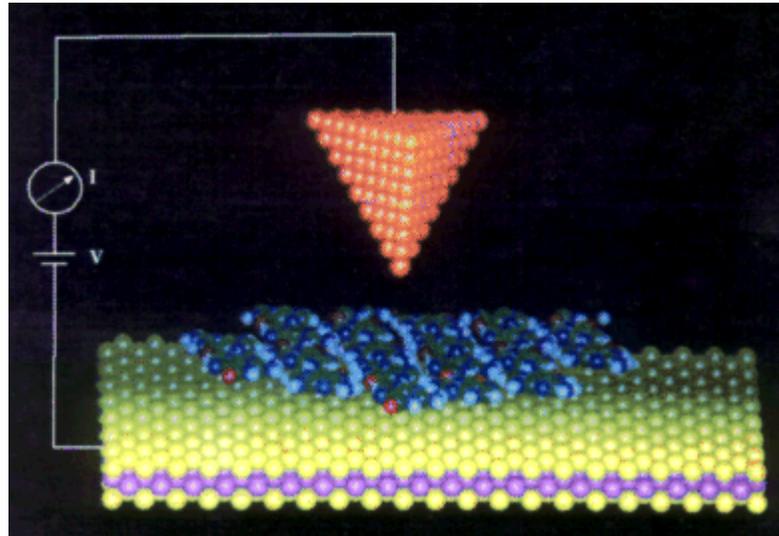


Heinrich  
Rohrer

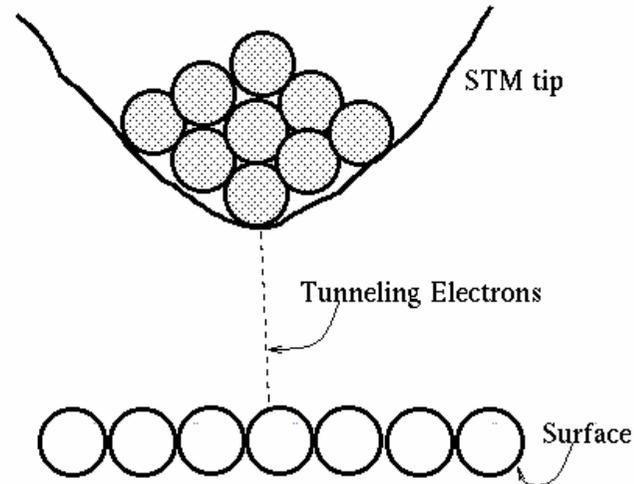
## Rastertunnel- Mikroskop STM

Rastertunnel-  
mikroskopie

Auflösung: Å



## The Scanning Tunneling Microscope

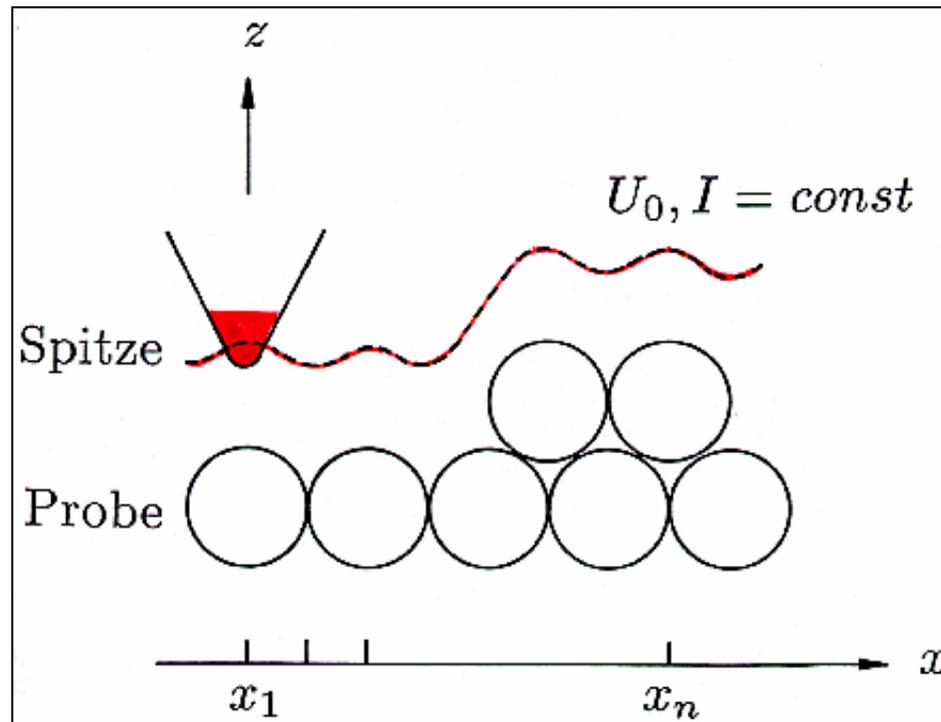


The Scanning Tunneling Microscope (STM) was developed by Gerd Binnig and Heinrich Rohrer at IBM. When a metal tip is brought near a conducting surface, electrons can tunnel from the tip to the surface or vice-versa. Because the tunneling probability is exponentially dependent on the distance the contours of the surface can be mapped out by keeping the current constant and measuring the height of the tip. In this way, atomic resolution can be obtained. For their work, Binnig and Rohrer shared the 1986 Nobel Prize.

► **Gerd Binnig & Heinrich Rohrer, IBM Zurich**

**The Nobel Prize in Physics 1986 "for their design of the scanning tunneling microscope"**

## Topographieabbildung mit dem STM

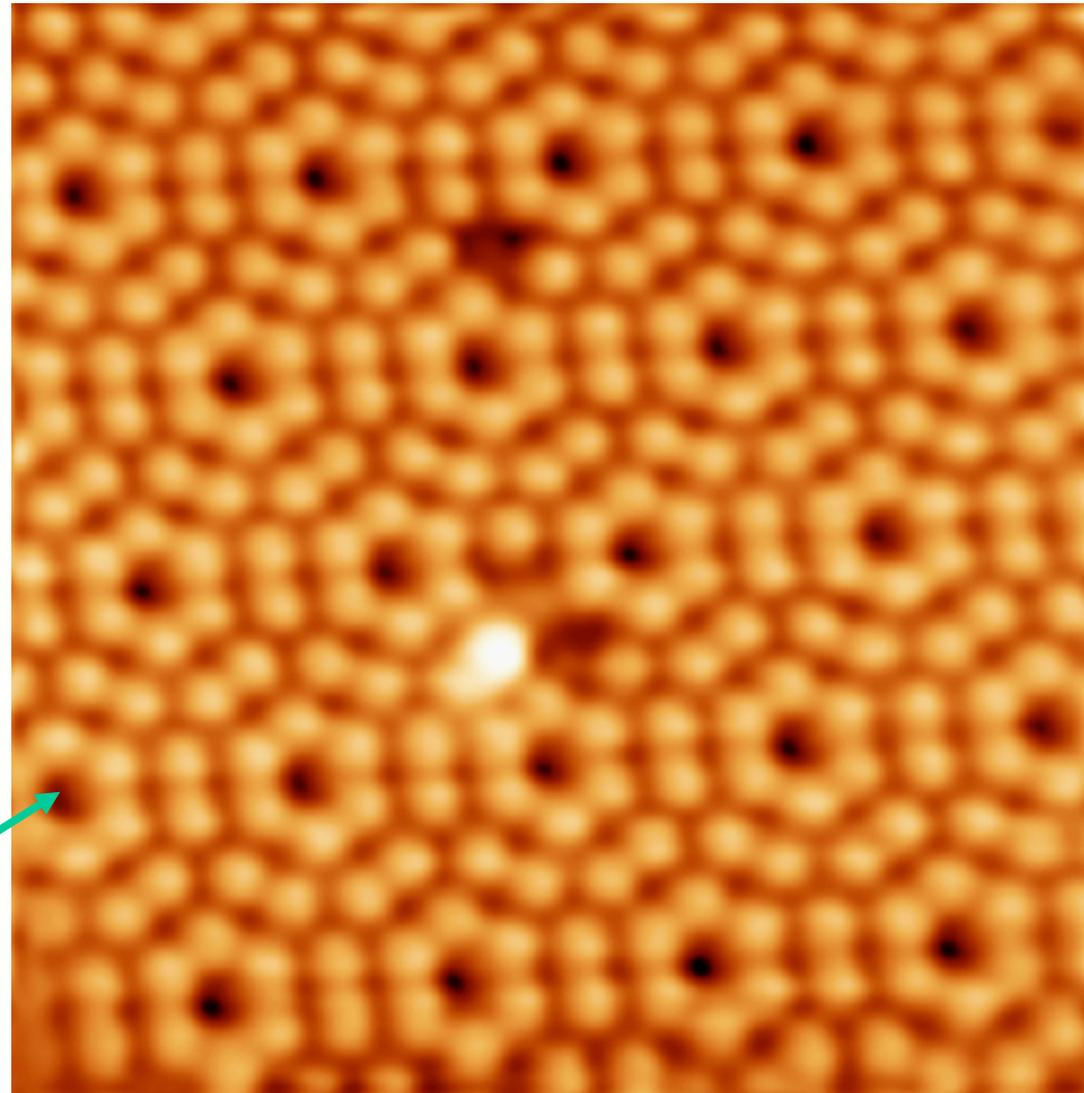


## Image of Si (111) by STM

„filled states“

12.5nm x 12.5 nm

- Si (111)- 7×7  
(DAS structure)  
Dimer -  
Adatom -  
Stacking-fault -



corner hole

Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of iron silicide epitaxially grown on Si(111),  
W.Raunau, H.Niehus, T.Schilling, G.Comsa Surf.Sci. 286 (1993) 203

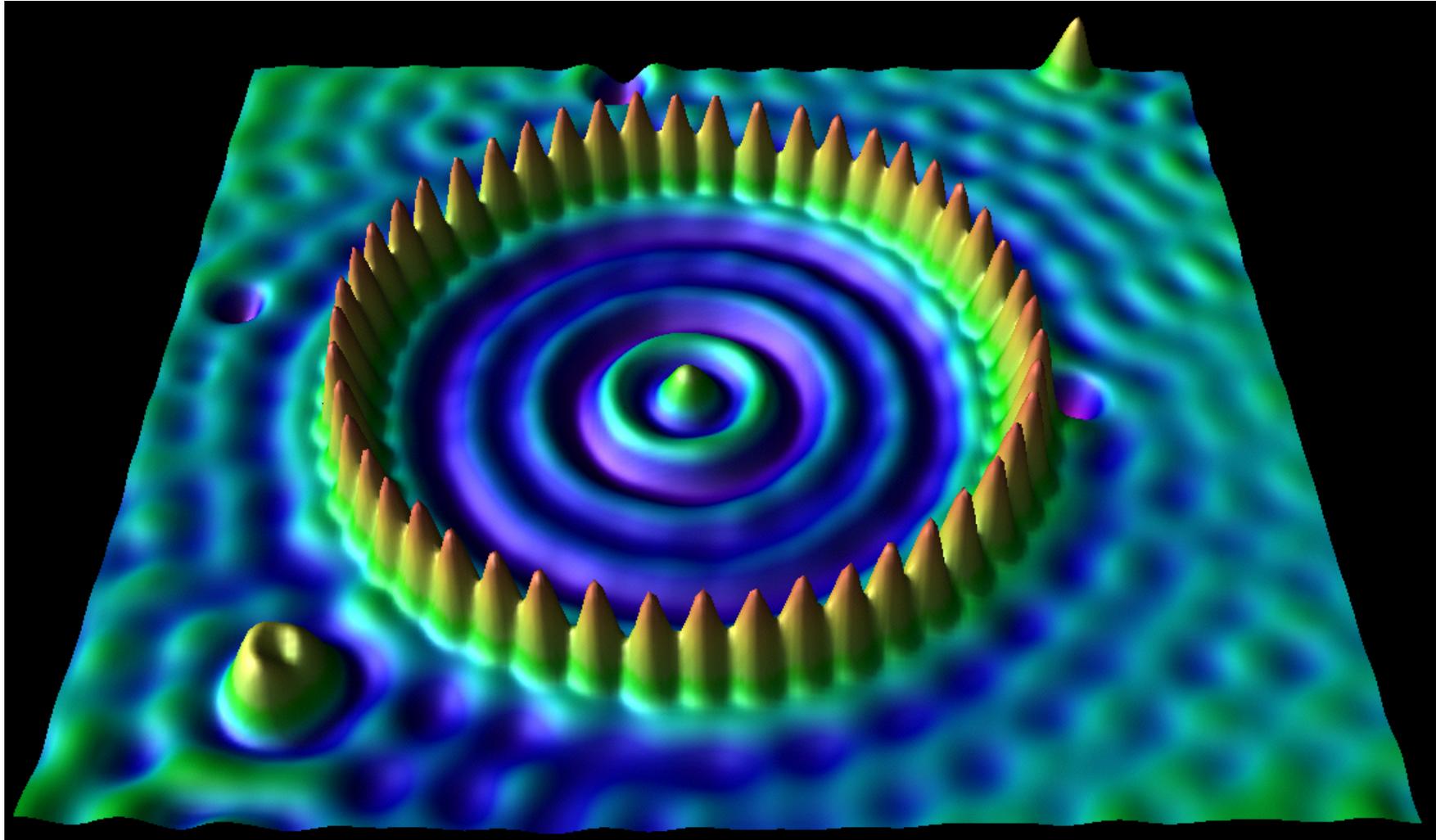
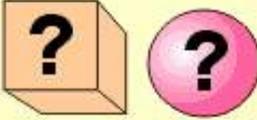
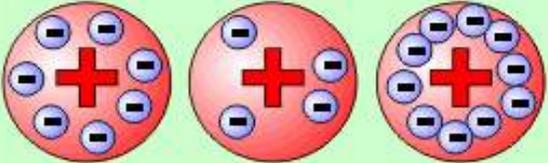


Image: Don Eigler IBM, Almaden, Calif.

**48 Fe atoms adsorbed on Cu(111) surface forming a "quantum corral" at 4K.** The image shows the contour of the local density of electron states. The corral is about 14.3 nm in diameter.

## Atommodelle (vor 1900)

Forscher / Zeit	Beschreibung des Atommodells	neuer Begriff
<b>Leukipp</b> ca 450 v.Chr. <b>Demokrit</b> ca 380 v.Chr. Griechenland	 <p>Älteste überlieferte Atomvorstellung. Jeder Stoff muß letztlich aus unvorstellbar kleinsten Teilchen bestehen. Diese Teilchen können sich vereinen und trennen, bleiben dabei aber unverändert.</p>	<b>Atom</b> als unteilbares Teilchen (Atomos = unteilbar)
<b>Dalton</b> ca 1800 England  * 1766 + 1844	 <p>Dalton erweitertes Atommodell der Antike um seine chemischen Experimente erklärbar zu machen. Er erfand eine Symbolschreibweise für die verschiedenen Elemente. Für ihn besaßen Atome Haftstellen, an denen sie sich zu Molekülen verbinden können.</p>	<b>Molekül</b> als Verbindung mehrerer Atome untereinander. <b>Ordnungsschema</b>
<b>Thomson</b> ca 1900 England  * 1856 + 1940	<p><b>"Rosinenkuchen-Modell"</b></p>  <p>elektrisch neutral    Elektronen-Mangel    Elektronen-Überschuß</p> <p>Erstmals wird dem Atom die Eigenschaft der Elektrizität zugeschrieben. Die Elektrizitätsleitung in Gasen konnte mit dem bisherigen Atommodell nicht erklärt werden.</p> <p>Die Elektronen (negativ) sind im "Atomteig" wie Rosinen eines Kuchens eingebettet.</p>	<b>Unterscheidung von Atom, +Ion, -Ion</b>

# Rutherford Streuexperimente

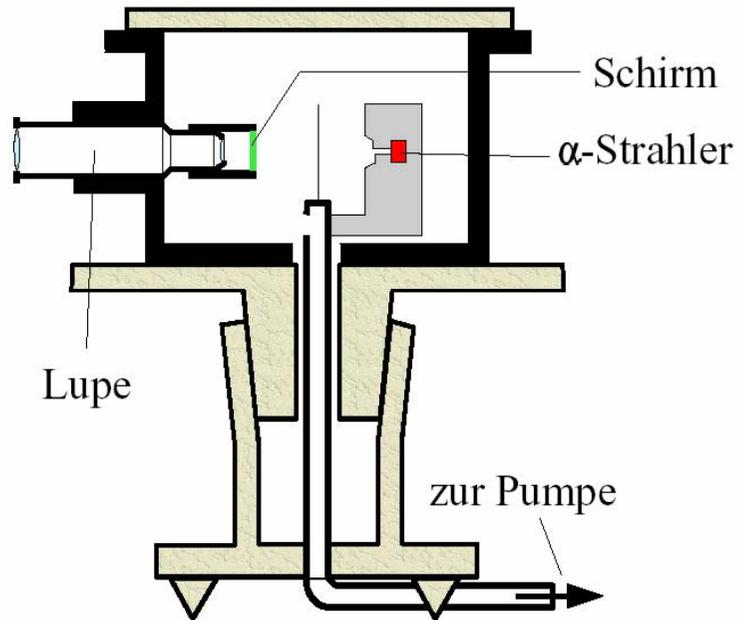
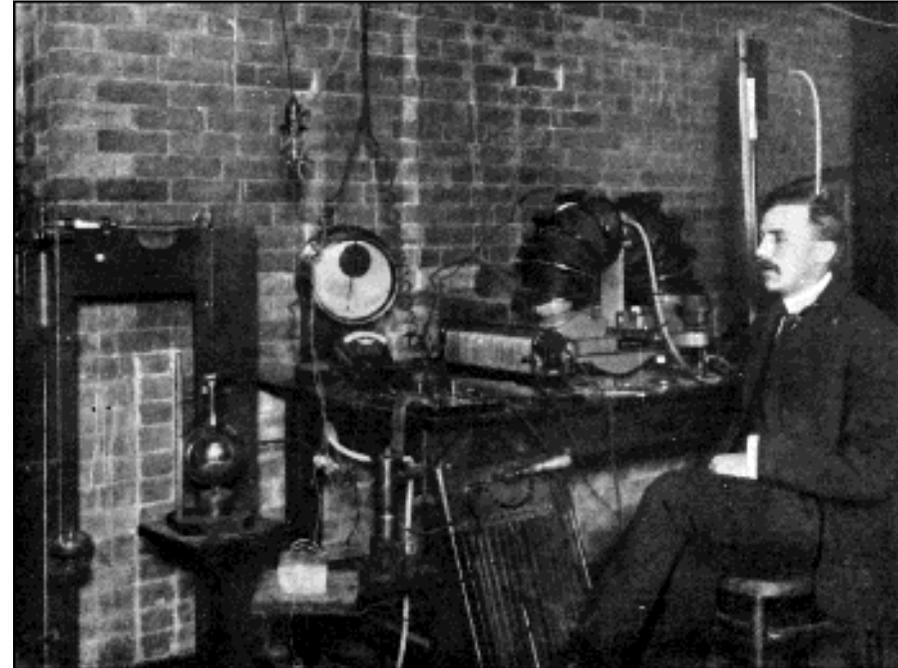


Abb.89: Schema des Experiments zur Streuung von  $\alpha$ -Teilchen gemäß Geiger und Marsden



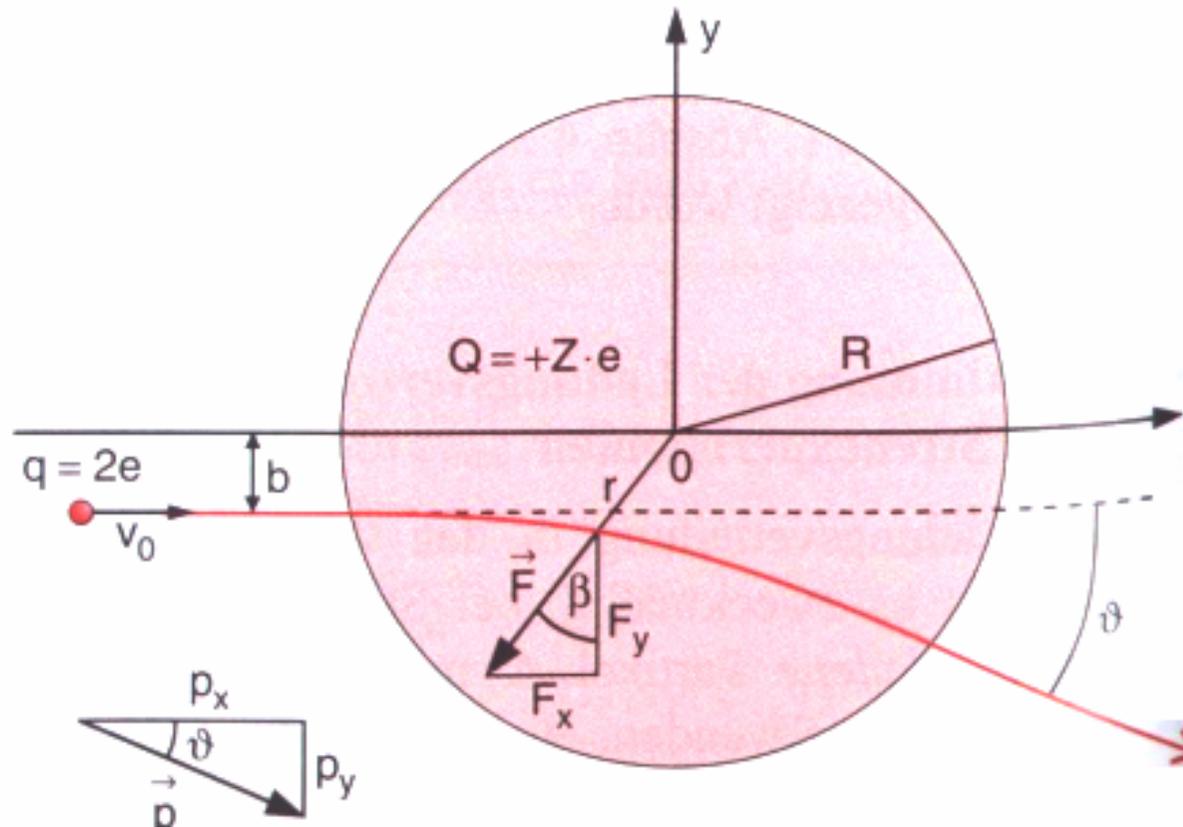
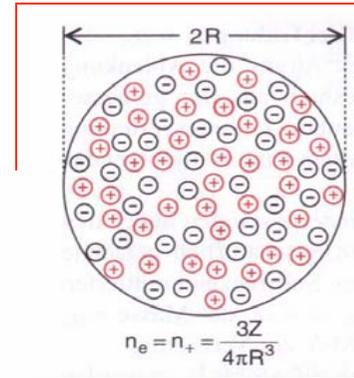
Ernest Rutherford with Gold Foil Experiment

- Radon  $^{222}\text{Rn}$  emittiert  $\alpha$  Teilchen (He),  $E_{\alpha} = 5.49 \text{ MeV}$ ,  $\tau = 3.8 \text{ Tage}$
- Die  $\alpha$  Teilchen werden im Blendenkanal kollimiert und an der Goldfolie F gestreut.
- Die auf den Leuchtschirm auftreffenden Teilchen erzeugen Lichtblitze und werden im Mikroskop beobachtet und gezählt als Funktion vom Drehwinkel
- Detailliertere Vorhersage muss Vielfachstreuung berücksichtigen

# Thomson - Atommodell

„Rosinenkuchen“ Modell, d.h. Ladungen über die Gesamtgröße des Atoms verschmiert

Streuung im homogenen E-Feld!



$$\cos \beta \approx b/r$$

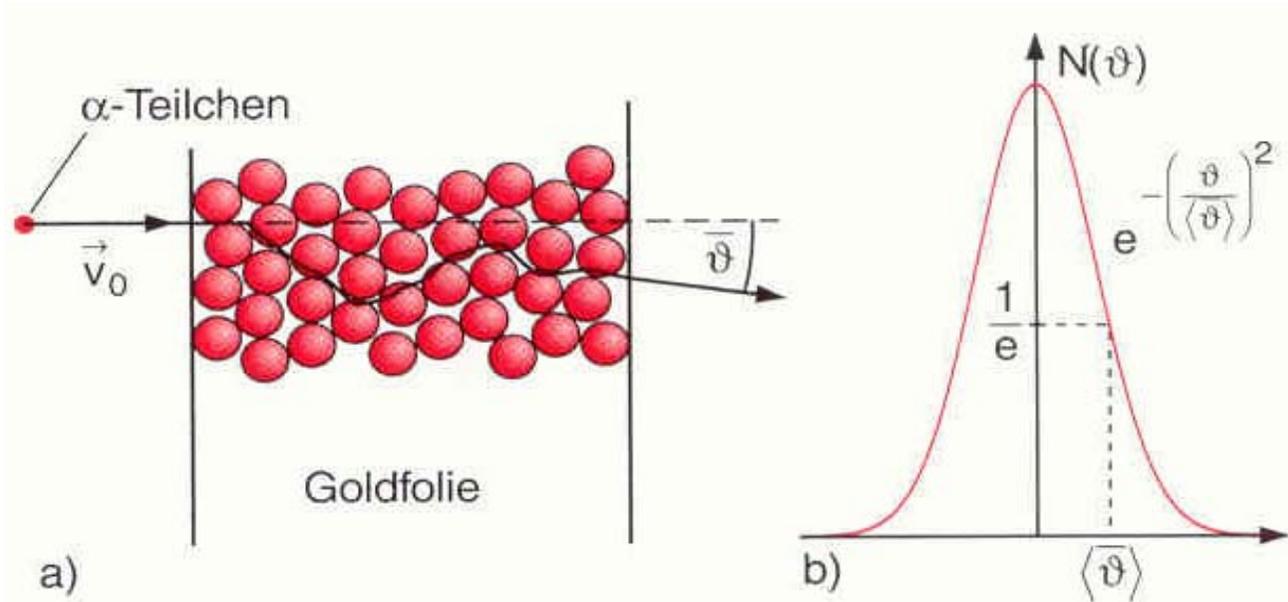
Flugstrecke d:

$$(d/2)^2 + b^2 = R^2$$

für kleine  $\vartheta$

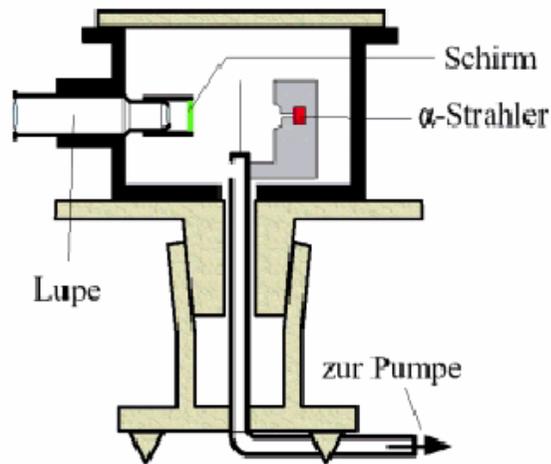
## Rutherford-Streuung für das Thomson - Atommodell

- Detailliertere Vorhersage muss Vielfachstreuung berücksichtigen
  - random walk: nach jedem Streuprozess wird entschieden, in welche Richtung unter dem mittleren Ablenkwinkel gestreut wird.

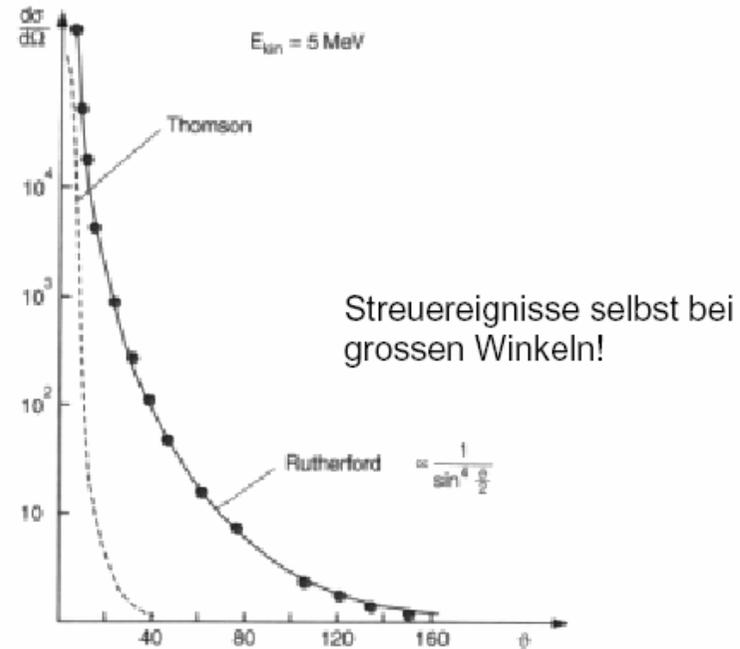


- Nach vielen ( $n$ ) Streuprozessen mit einer Ablenkung von durchschnittlich  $\Delta y$  eine Gaußförmige Verteilung der Wahrscheinlichkeit einer Gesamtablenkung  $y$ :
  - $P(y) = C \exp(-y^2 / n \Delta y)$
- Analog für die Zahl  $N$  der um  $\vartheta$  abgelenkten Teilchen:  $N(\vartheta) = N_0 \exp(-\vartheta^2 / \langle \vartheta^2 \rangle)$
- Wegen  $\langle \vartheta \rangle \approx 2 \cdot 10^{-4}$  rad wird für  $n = 10^5$  Stöße die HWB ( $\Delta \vartheta$ )  $\approx 3 \cdot 10^{-2}$  rad =  $1.8^\circ$ 
  - sehr klein!

# Rutherford Streuung



Experiment nach Geiger und Marsden

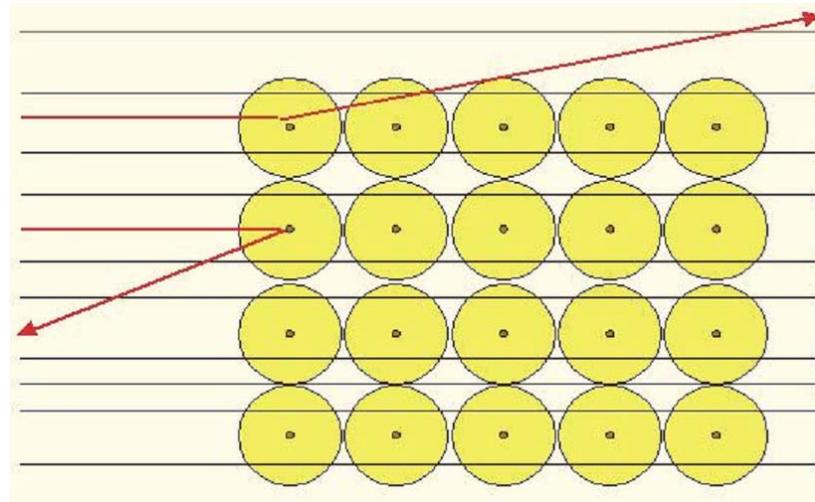


Rutherford über die experimentellen Ergebnisse der Weitwinkelstreuung

*"Es war bestimmt das unglaublichste Ergebnis, das mir je in meinem Leben widerfuhr. 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."*

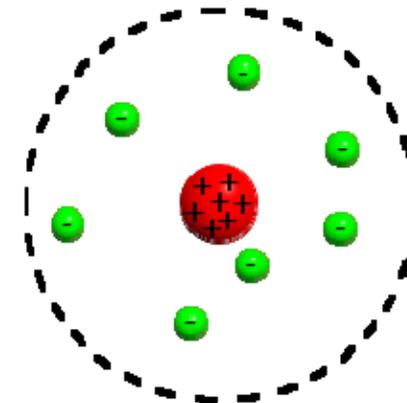
# Rutherford Streuung

- „Planetenmodell“: Kleiner, schwerer Atomkern wird in großem Abstand von leichten Elektronen umkreist. Ablenkung quasi nur am Atomkern!

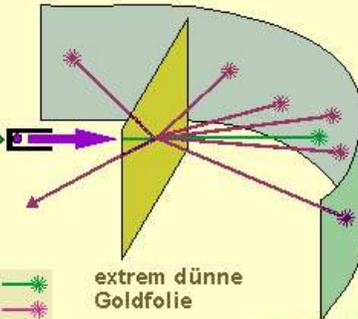
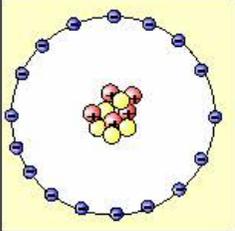


- Genauer: Atome haben einen schweren positiv geladenen Kern mit einem Radius von etwa  $10^{-15}$  m = 1 Femtometer [fm]. Negativ geladene Elektronen umkreisen diesen Kern.

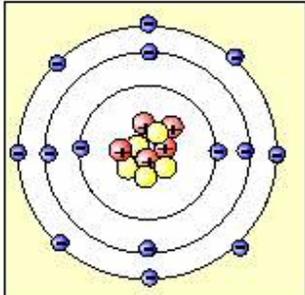
	Elektron	Proton
Masse	$9,1 \times 10^{-31}$ kg	$1,67 \times 10^{-27}$ kg
Radius (klassischer)	$3 \times 10^{-15}$ m	$1,6 \times 10^{-18}$ m
Ladung	$-1,6 \times 10^{-19}$ C	$1,6 \times 10^{-19}$ C
Magn. Moment	$-9,3 \times 10^{-24}$ J/T	$1,4 \times 10^{-26}$ J/T

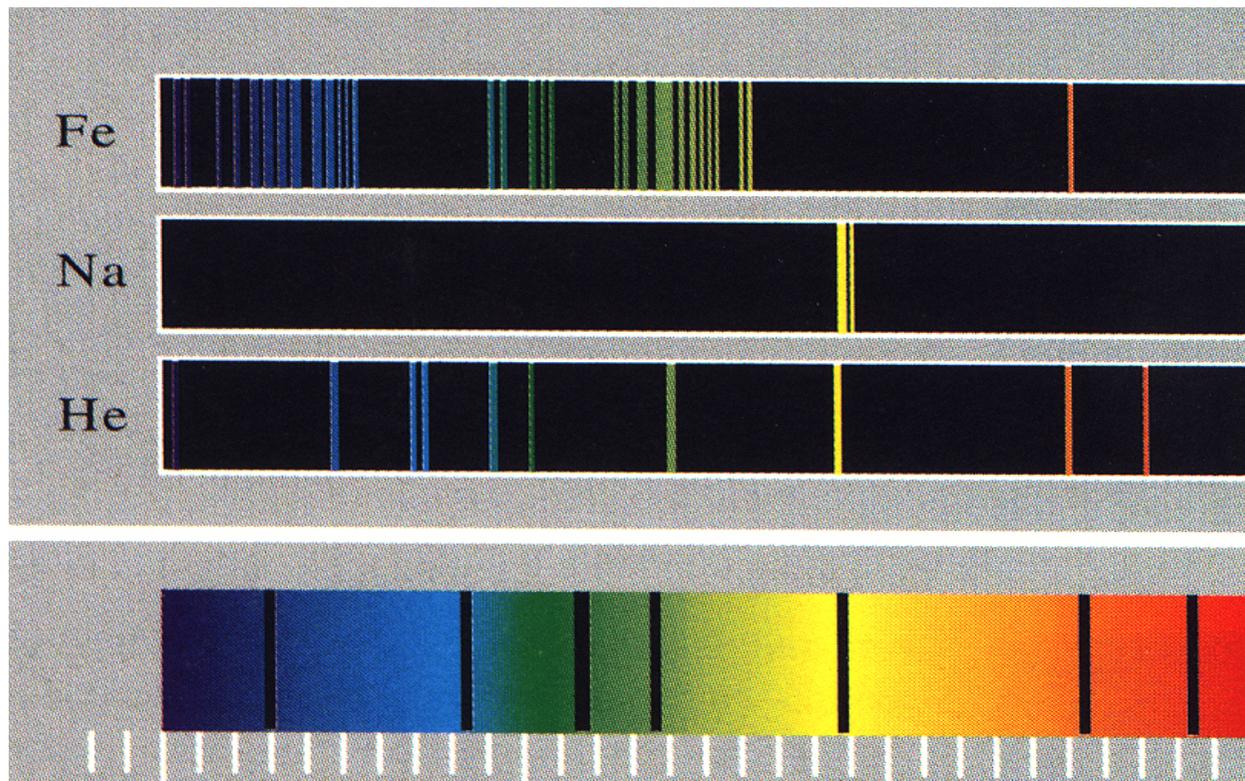


# Rutherford Experiment widerlegt z.B. das Tomson'sche „Rosinenkuchen“ Atommodell

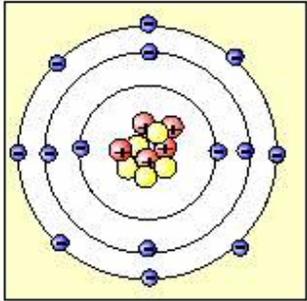
<p><b>Thomson</b> ca 1900 England * 1856 + 1940</p>	<p><b>"Rosinenkuchen-Modell"</b></p>  <p>Erstmals wird dem Atom die Eigenschaft der Elektrizität zugeschrieben. Die Elektrizitätsleitung in Gasen konnte mit dem bisherigen Atommodell nicht erklärt werden.</p> <p>elektrisch neutral    Elektronen-Mangel    Elektronen-Überschuß</p> <p>Die Elektronen (negativ) sind im "Atomteig" wie Rosinen eines Kuchens eingebettet.</p>	<p><b>Unterscheidung von Atom, +Ion, -Ion</b></p>
<p>Forscher / Zeit</p>	<p>Beschreibung des Atommodells</p>	<p>neuer Begriff</p>
<p><b>Rutherford</b> ca 1900 England Ernest Rutherford * 1871 + 1937 gilt als Begründer der modernen Kernphysik</p>	<p><b>Der Streuversuch:</b></p> <p>radiaktive Strahlung:</p> <p><math>\alpha</math>-Strahlung (Heliumkerne) <math>4\text{He}^{++}</math></p> <p><math>\beta</math>-Strahlung (Elektronen) <math>e^{-}</math></p>  <p>nicht abgelenkt —* abgelenkt —*</p> <p>extrem dünne Goldfolie</p> <p>Filmschicht</p> <p>Das Rutherford'sche Atommodell enthält folgende Aussagen:</p>  <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Größenverhältnisse: <i>Der Atomkern ist wesentlich kleiner als das Gesamtatom.</i></li> <li>2. Leere: <i>Zwischen Atomkern und Atomhülle ist materielle Leere.</i></li> <li>3. Masse: <i>Fast die gesamte Masse des Atoms ist im Atomkern vereinigt.</i></li> <li>4. Ladung: <i>Der Atomkern ist mehrfach positiv elektrisch geladen, die Elektronen jeweils 1fach negativ.</i></li> </ol>	<p><b>Atomkern mit Protonen und Neutronen*</b></p> <p><b>Atomhülle</b> mit um den Kern kreisenden Elektronen.</p> <p>* Der Nachweis des Neutrons erfolgte erst 1932 durch Chadwick.</p>

# Bohrsches Atommodell / Linienspektren

<p><b>Bohr</b> ca 1915 Dänemark Nils Bohr * 1885 + 1962</p>	<p>Die Bohrsche Erweiterung enthält folgende Aussagen:</p>  <ol style="list-style-type: none"><li>1. Schalen: <u>Elektronen umkreisen den Atomkern in ganz bestimmten Abständen.</u></li><li>2. Energie: <u>Elektronen haben auf äußeren Schalen mehr Energie als auf den weiter innen liegenden Schalen..</u></li></ol>
---	--

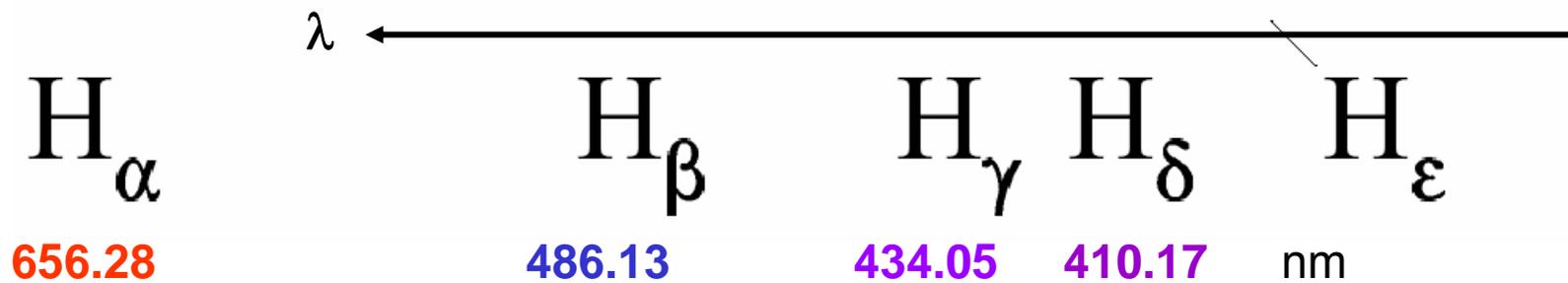
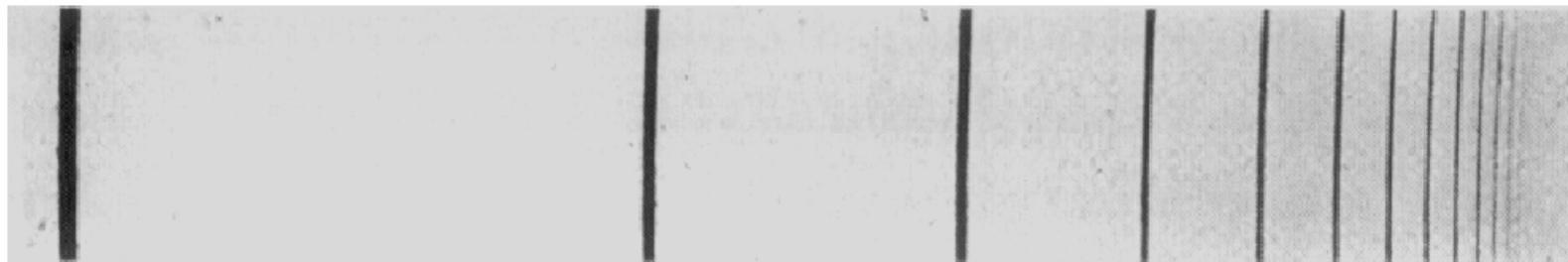


# Bohrsches Atommodell / Linienspektren

<p><b>Bohr</b> ca 1915 Dänemark Nils Bohr * 1885 + 1962</p>	<p>Die Bohrsche Erweiterung enthält folgende Aussagen:</p> 	<p>1. Schalen: <u>Elektronen umkreisen den Atomkern in ganz bestimmten Abständen.</u></p> <p>2. Energie: <u>Elektronen haben auf äußeren Schalen mehr Energie als auf den weiter innen liegenden Schalen..</u></p>
---	---	--

Emissionslinienspektren von Wasserstoffatomen im sichtbaren Bereich

„Balmer Serie“ (1885):  $1 / \lambda = K (1/4 - 1/n^2)$



## Motivation für Einführung der Quantenmechanik

- **Spektrum der Schwarzkörperstrahlung**
- **Photoeffekt**
- **Compton-Effekt**

### → **Teilcheneigenschaften der elektromagnetischen Strahlung**

- **Diskrete Energiezustände in Atomen (und Molekülen ...)**
  - **Linienpektren**
  - **Franck-Hertz Versuch**
- **Beugungseffekte für Elektronen**

### → **Welleneigenschaften von Teilchen**

## Grundaussagen der Quantenmechanik

### Quantitative Aussage

Alle Teilchen besitzen Welleneigenschaften, die ihr Verhalten, insbesondere bei kleinen Abmessungen entscheidend beeinflussen

Verständnis des Verhaltens und der Eigenschaften von Atomen, Molekülen, Elementarteilchen, der Gesetzmäßigkeiten der Kernphysik, Astrophysik,...  
nur möglich unter Berücksichtigung der Wellennatur der Materie.

**UND**

**es gilt darüber hinaus**

**Jedes Teilchen besitzt Welleneigenschaften und  
jede Welle Teilcheneigenschaften**