

Eine Reise in die Welt der kleinsten Teilchen

Auftaktveranstaltung zum Projektkurs
„Struktur der Materie – Eine Einführung in die
Elementarteilchenphysik“

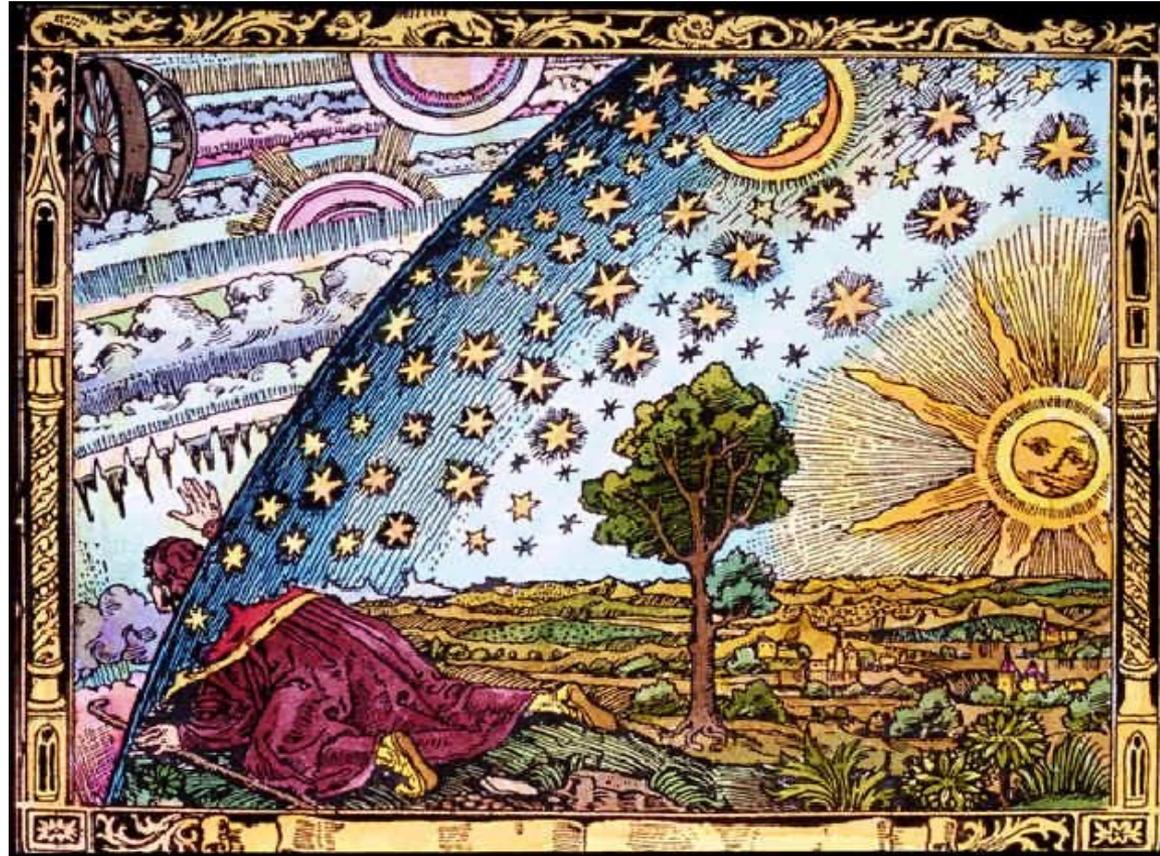
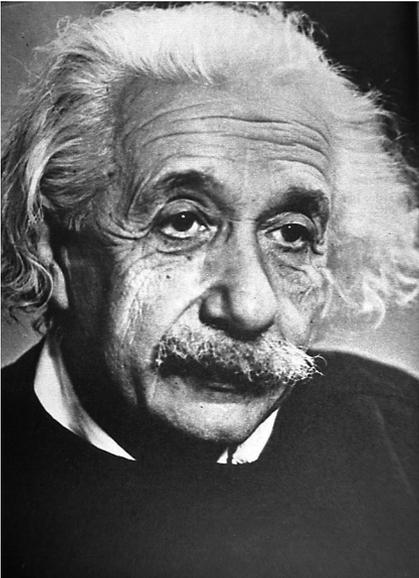
Heute:

1. Einführung
2. Streuexperimente
3. Das Standardmodell

21. August 2023

**Prof. Dr. Wolfgang Wagner
Bergische Universität Wuppertal**

Neugier des Menschen:
Antrieb der Wissenschaft



„Ich habe keine besondere Begabung, sondern bin nur leidenschaftlich neugierig.“

Albert Einstein (1879 – 1955)

"Die Natur liebt sich zu verbergen" Heraklit, 500 v. Chr.

ZWEI FUNDAMENTALE FRAGEN :

WIE IST DAS UNIVERSUM ENTSTANDEN ?

WORAUS BESTEHT DIE MATERIE MIT IHREN KRÄFTEN ?

BEIDE FRAGEN SIND MITEINANDER VERKNÜPFT :

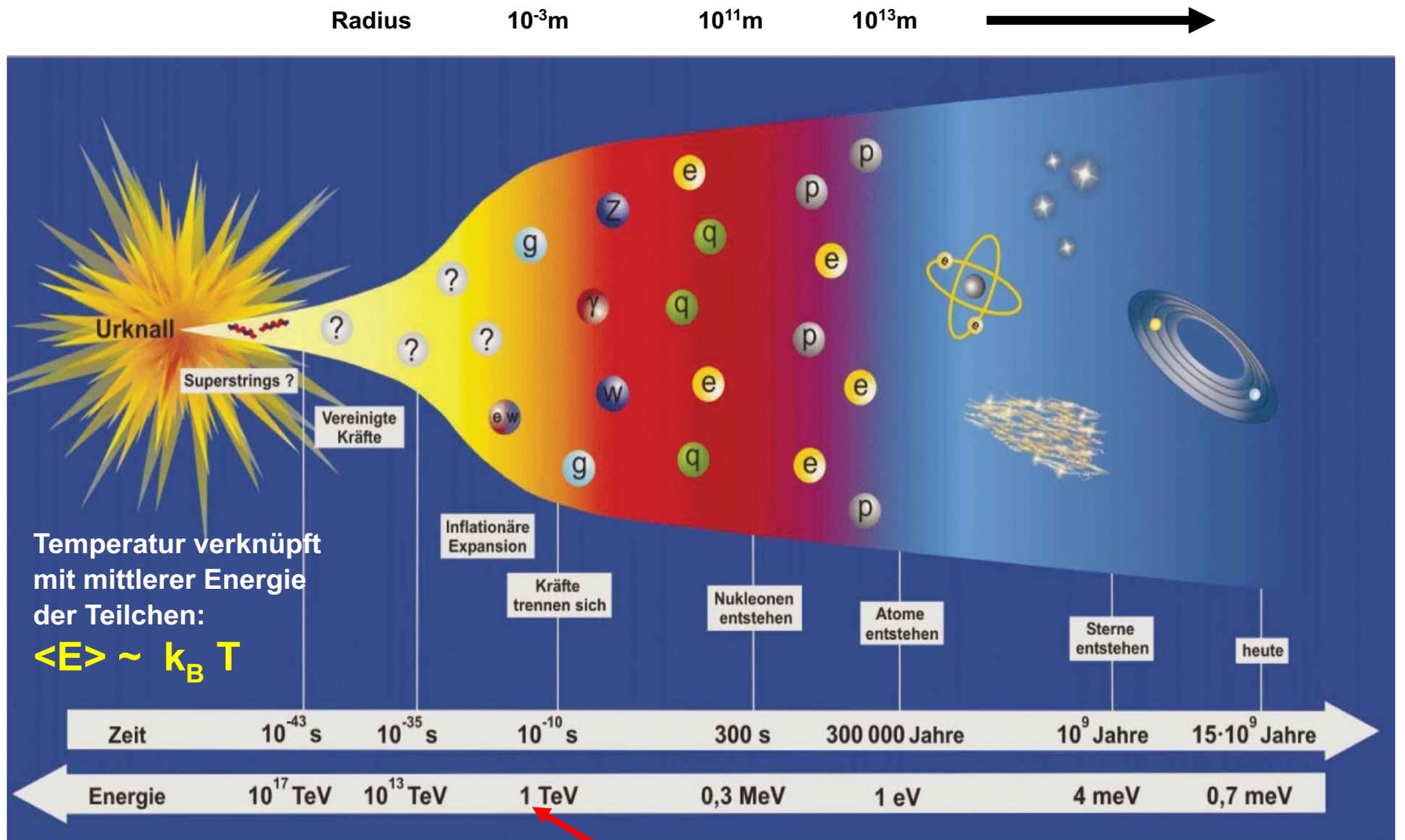
VERSTÄNDNIS VON DER STRUKTUR DER MATERIE UND IHRER KRÄFTE

<==> BESSERES WISSEN ÜBER IHREN URSPRUNG

FÜR DIE SUCHE NACH DIESEM VERSTÄNDNIS :

SCHAFFE ZUSTÄNDE WIE IN DEN ERSTEN ANFÄNGEN DES UNIVERSUMS

Teilchenphysik = Reise in die Vergangenheit des Universums



Temperatur verknüpft mit mittlerer Energie der Teilchen:
 $\langle E \rangle \sim k_B T$

Teilchenbeschleuniger

Der größte Beschleuniger der Welt

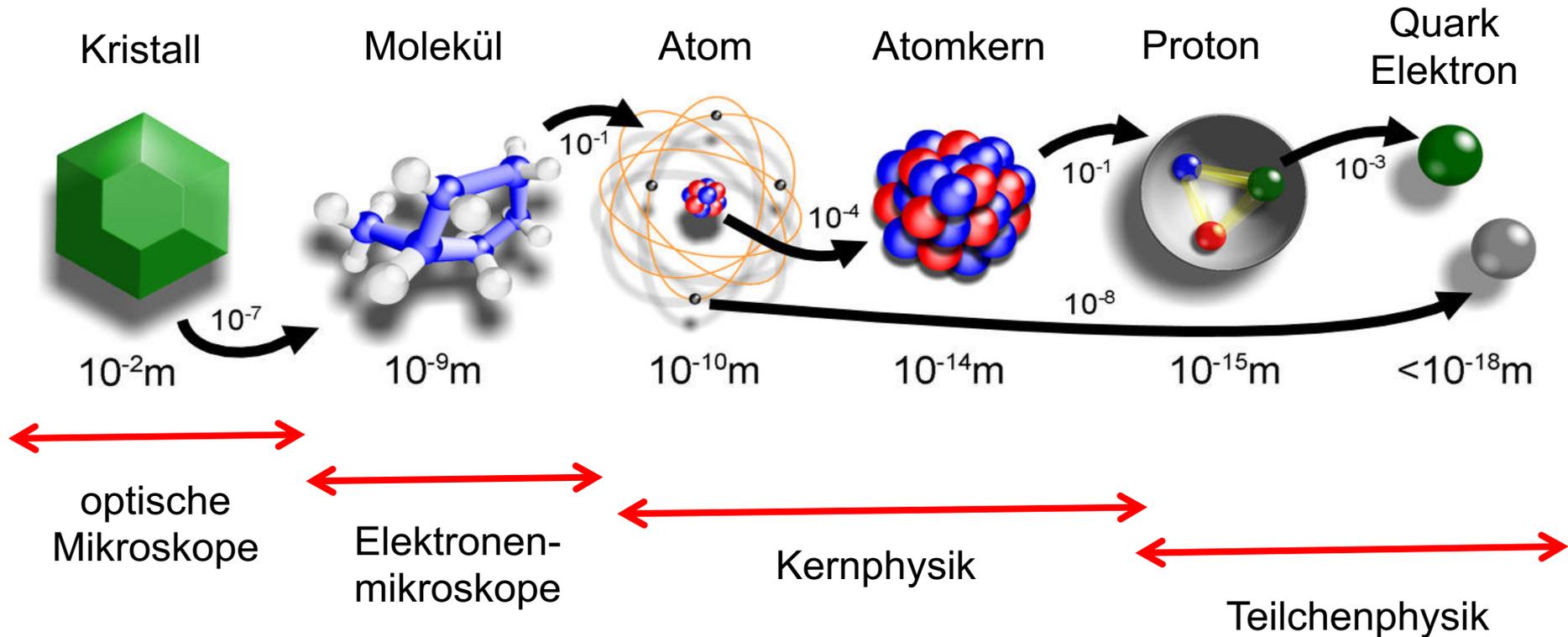
Supraleitende Magnete halten die Protonen auf der Kreisbahn.



größte Herausforderung:

- Magnetfeld von 8,3 Tesla
- Betrieb bei einer Temperatur von 1.9 K

Was bedeutet *Elementar*-Teilchen?



Die elementaren Teilchen sind **unteilbar** und haben keine Struktur, sie sind **punktförmig**.

Komplexe Strukturen entstehen durch „Anordnung“ der elementaren Bausteine.

Das Baukastenprinzip: LEGO



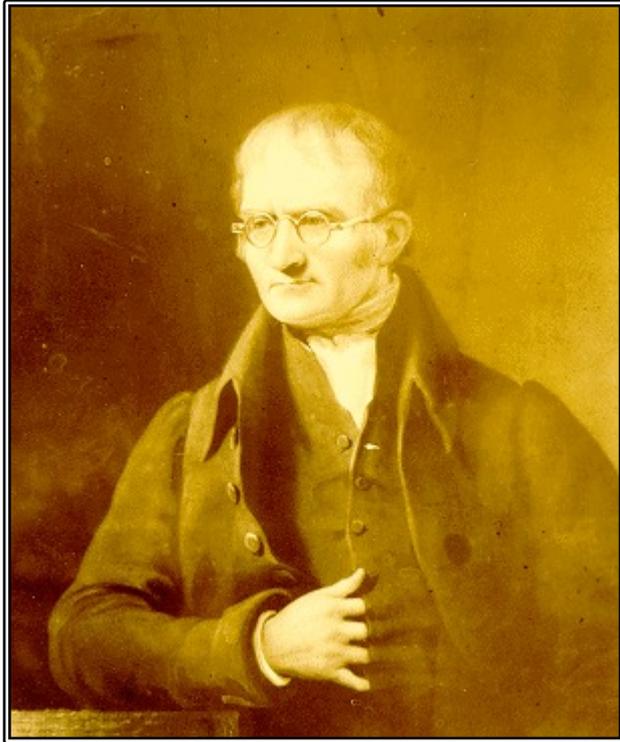
Überschaubare Zahl von
Bausteintypen



Vielzahl von Gebäuden,
Fahrzeugen, ...



Das Ganze ist mehr als seine Teile.

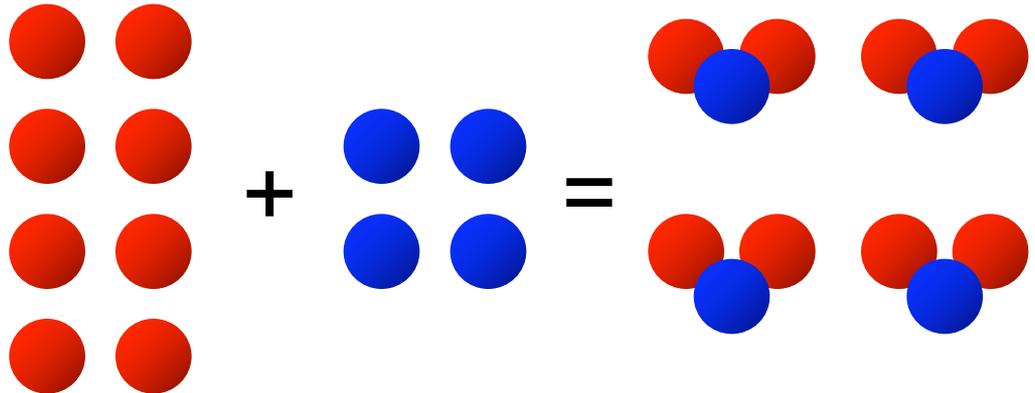


John Dalton
1766 - 1844

Dalton 1803-1808 Lehre von den Atomen als Grundbausteinen der Elemente

Beobachtung:

Chemische Elemente verbinden sich immer in
festen Zahlenverhältnissen miteinander.



Baukastenprinzip: Das Periodensystem



Chemie: Das Periodensystem der Elemente

ca. 120 Atome



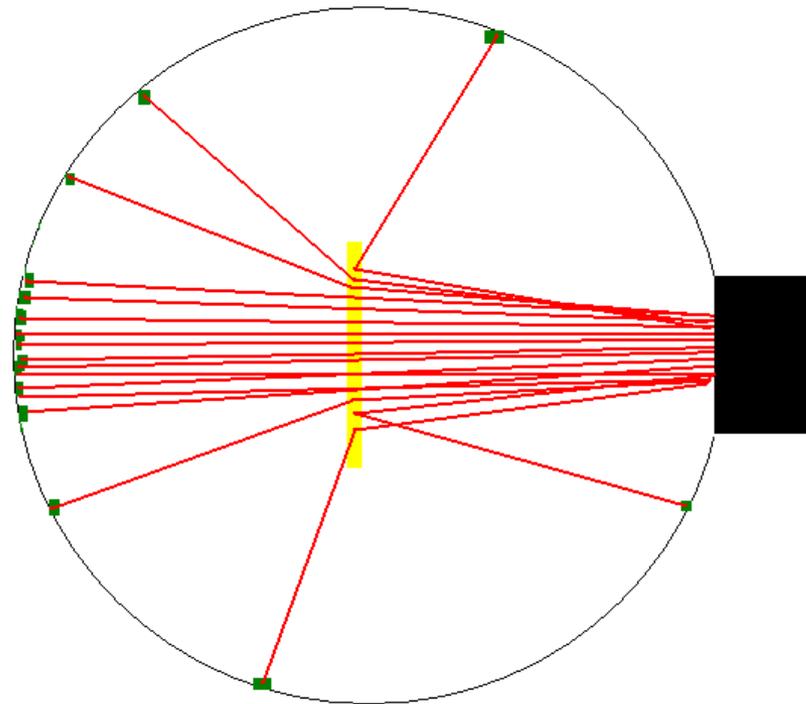
10^7 Chemische
Verbindungen

Hauptgruppe		Nebengruppe										Hauptgruppe						
I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII	
1 H																		2 He
2 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3 Na	12 Mg	III	IV	V	VI	VII	VIII			I	II	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6 Cs	56 Ba	57-71 Lanthanoide	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7 Fr	88 Ra	89-103 Actinoide	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt										
		Lanthanoide		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
		Actinoide		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

¹⁾ Aggregatzustand bei 25 °C (298 K) und 101,325 kPa

Reduktion von Komplexität durch Rückführung auf „wenige“ chemische Elemente (Atomsorten).

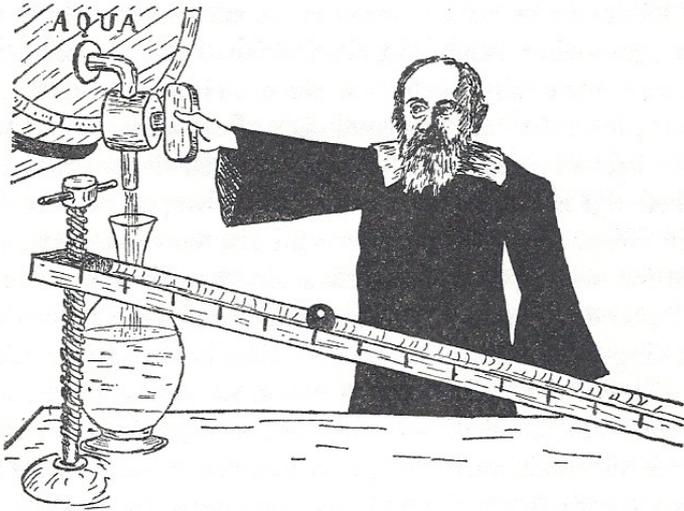
2) Streuexperimente



Wie kann man mikroskopische Objekte beobachten?

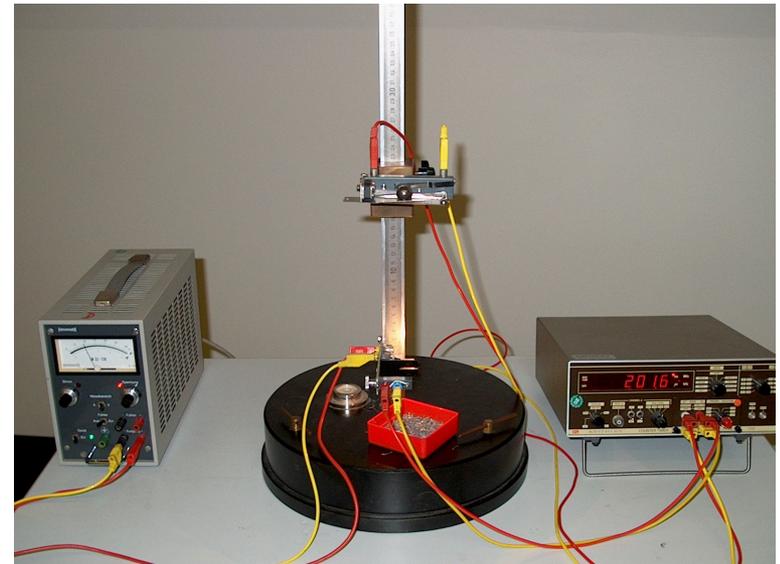
... klassischen Mechanik

- Bestimmung der Fallgesetze durch Galileo Galliei.
- **Direkte** optische Beobachtung der Objekte (hier: rollende Kugel) ist möglich.

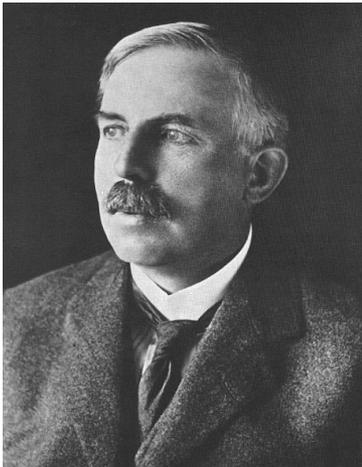
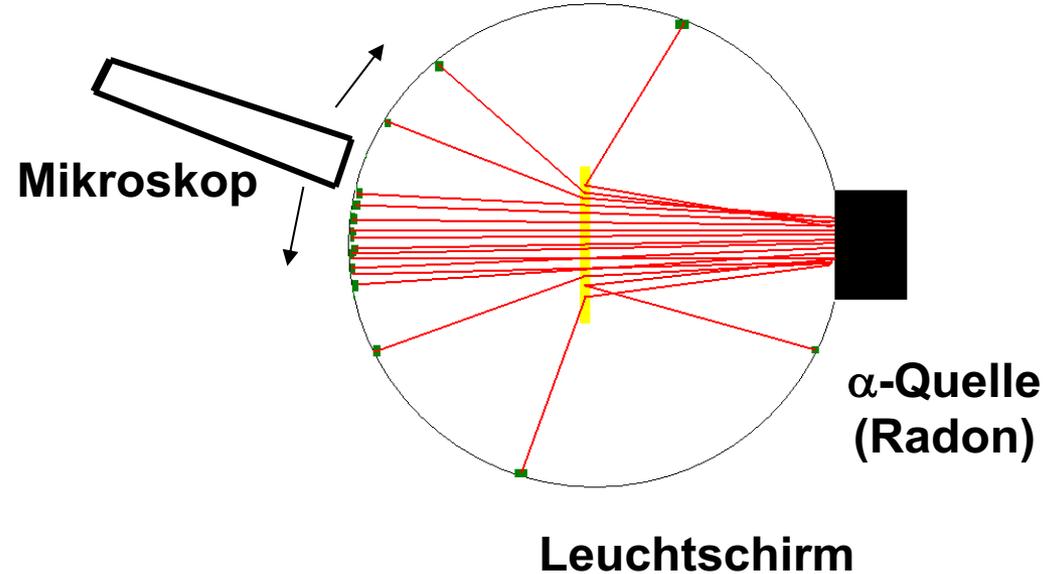
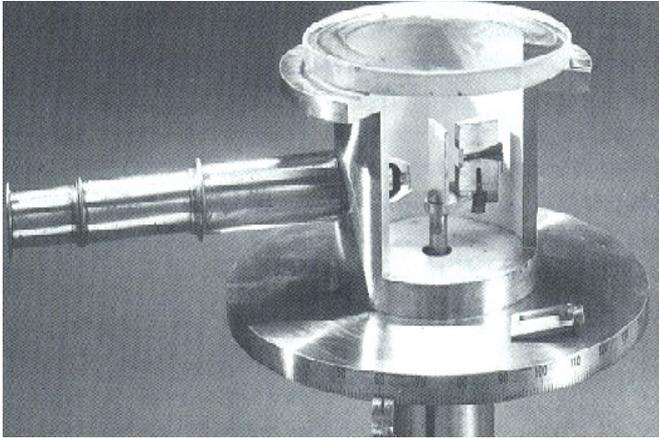


Hörsaalexperiment: Fallturm
Zur Bestätigung der Fallgesetze.

Für die Beobachtung mikroskopischer
Objekte benötigt man ein neues Konzept.

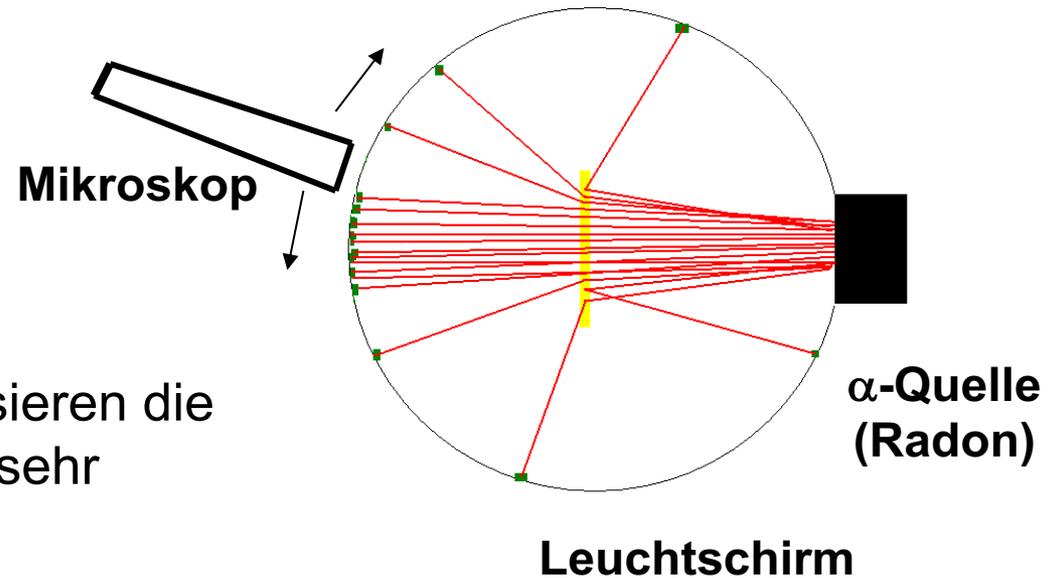


STREUUNG VON ALPHA-TEILCHEN AN EINER GOLDFOLIE (1909)



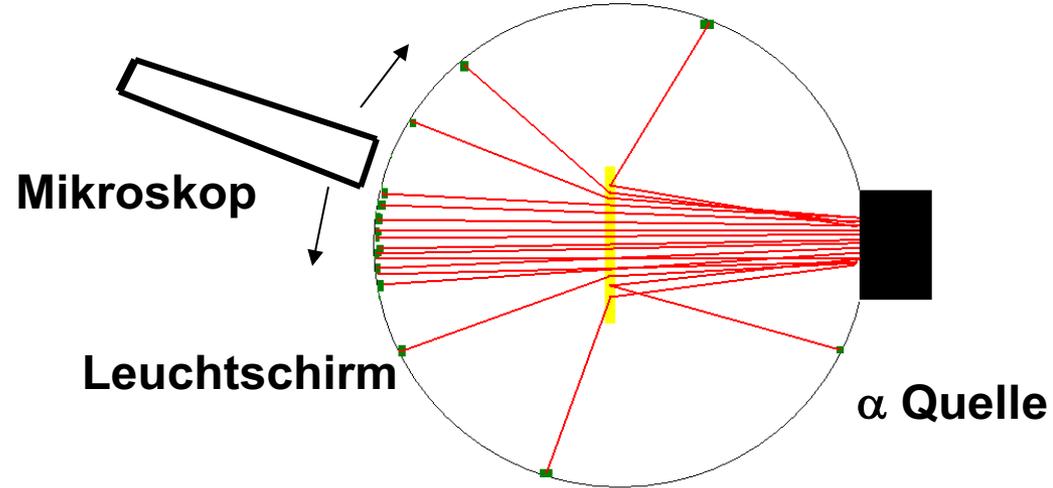
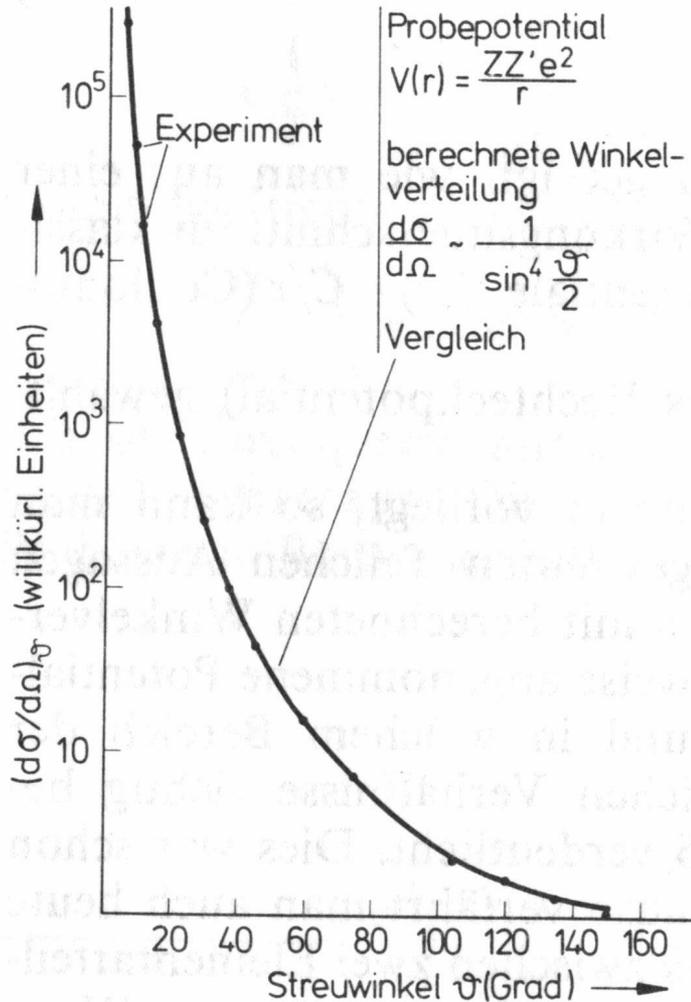
Ernest Rutherford

- Lichtblitze werden gezählt.
- Mikroskop, Leuchtschirm und Vakuumkammer sind drehbar um die α -Quelle und die Goldfolie gelagert.



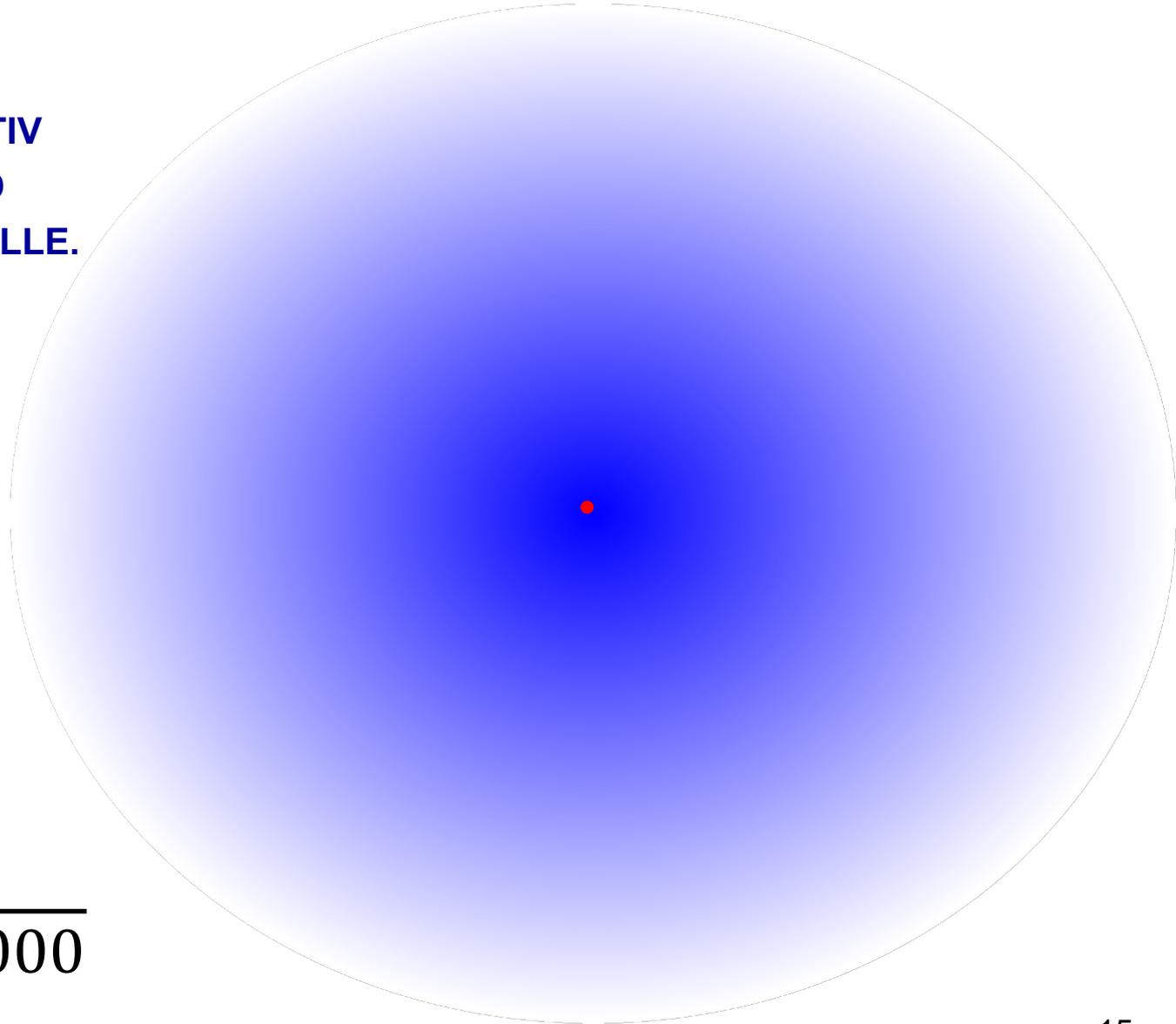
- Die meisten α -Teilchen passieren die Goldfolie ohne oder nur mit sehr geringer **Ablenkung**.
- Zuweilen werden α -Teilchen aber stark abgelenkt, sogar um sehr große Winkel (**Rückstreuung**).

Vorwärtsstreuung dominiert

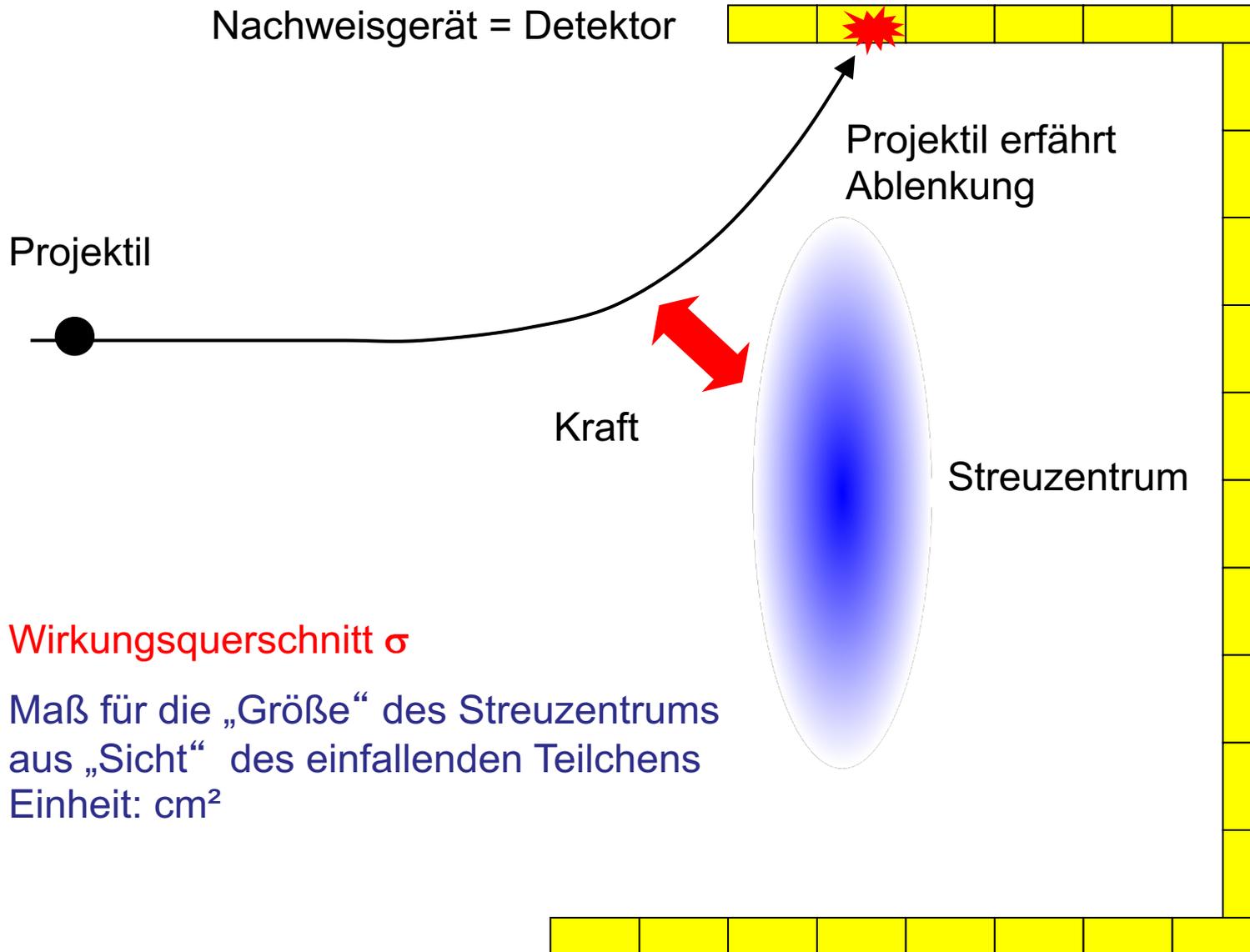


Rückwärtsstreuung ist selten,
kommt aber vor

**ATOME BESTEHEN AUS
EINEM WINZIGEM POSITIV
GELADENEN KERN UND
EINER ELEKTRONENHÜLLE.**



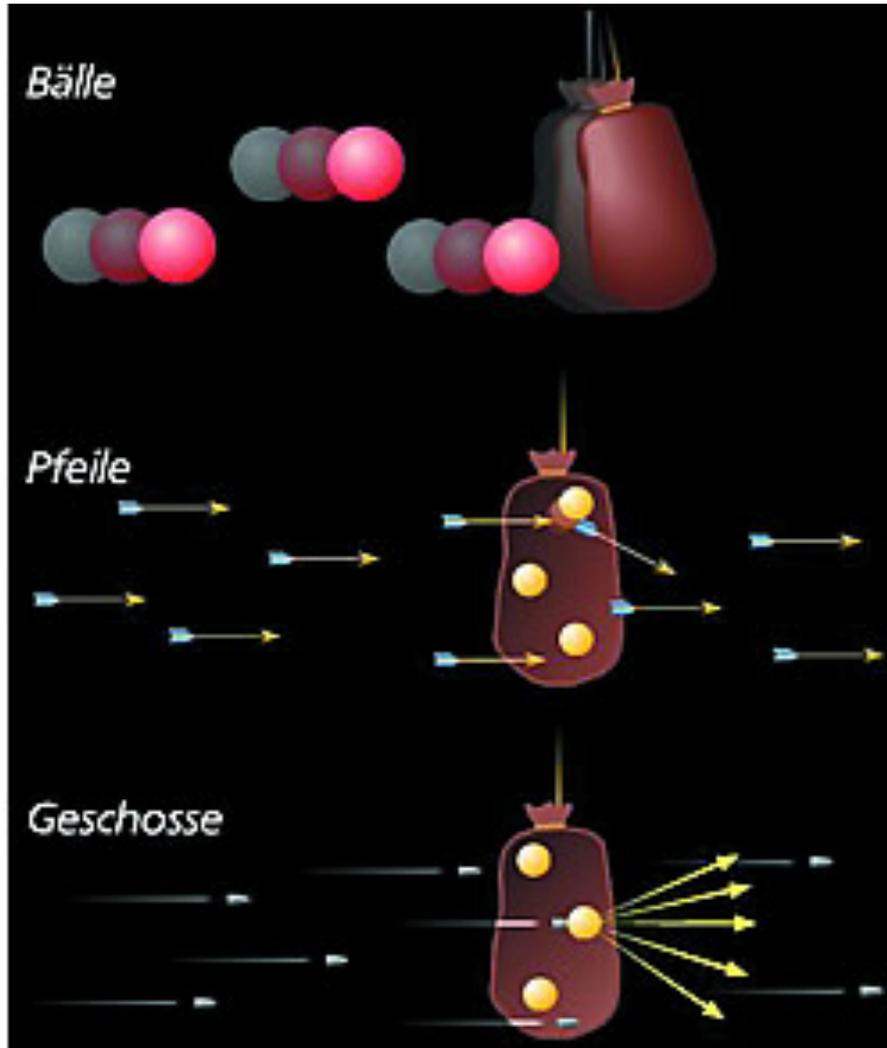
$$\frac{R_{\text{Kern}}}{R_{\text{Hülle}}} = \frac{1}{100.000}$$



Wirkungsquerschnitt σ

Maß für die „Größe“ des Streuzentrums
aus „Sicht“ des einfallenden Teilchens
Einheit: cm^2

... mit Streuung



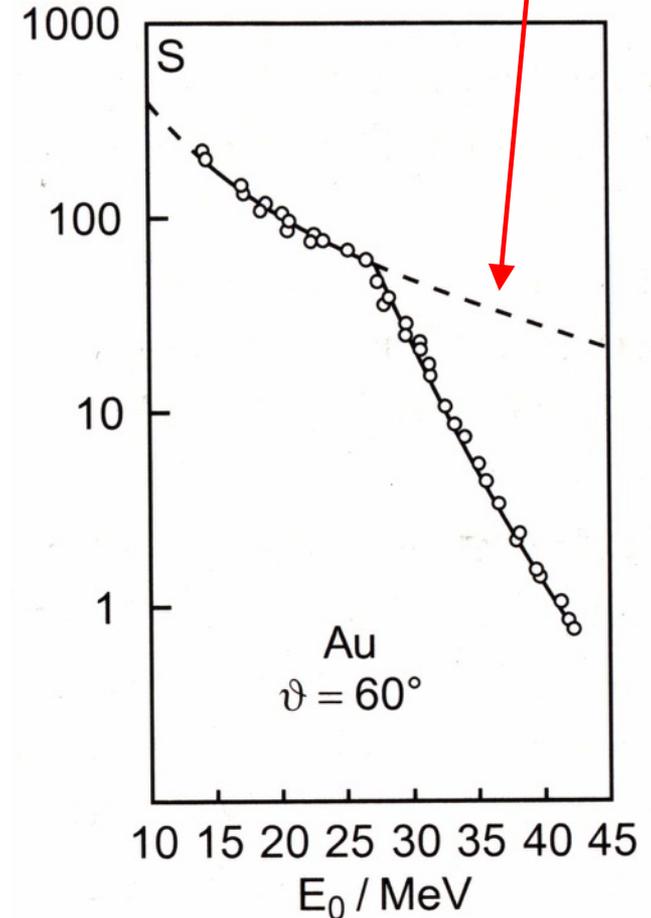
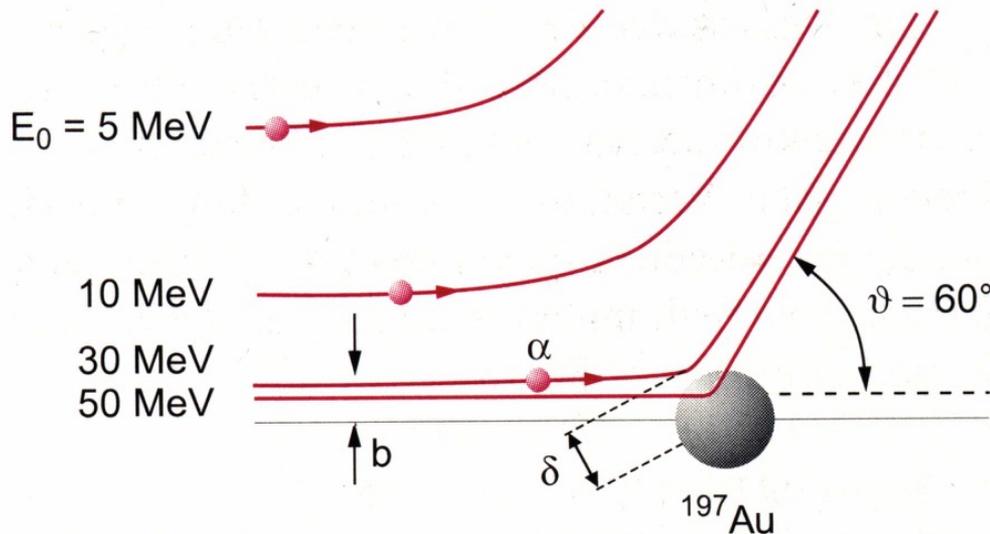
Die Ablenkung der Projektile verrät den Aufbau des Objekts:

- Ablenkung der Bälle
→ Form des Sacks
- Pfeile lassen die Kugeln im Inneren erkennen
- hochenergetische Geschosse lassen die Kugeln zerplatzen und offenbaren deren innere Struktur

(philosophische) Frage:
Hat man nun die Kugeln im Inneren
„gesehen“ ?

Streuung bei festem Streuwinkel, aber zunehmender Energie

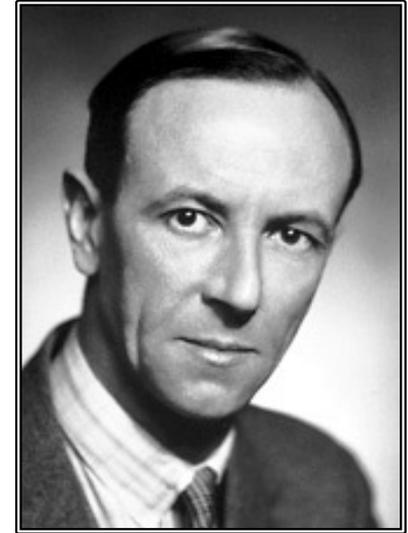
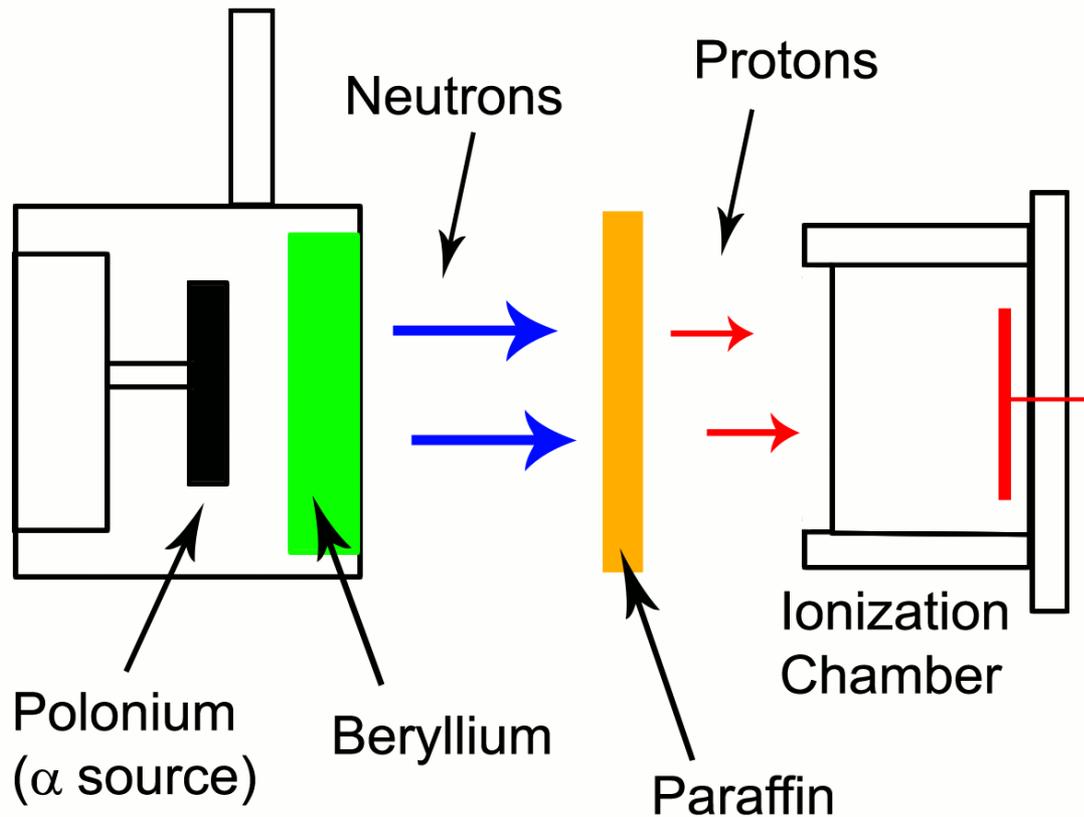
Coulomb-
streuung



- Bei großen Energien weicht die Messkurve von der Coulomb-Streukurve ab.
- Die **Ausdehnung des Goldkerns** spielt eine Rolle.
- Für Stoßparameter $b \leq R_K$ trägt nicht mehr die volle Kernladung bei und Kernkräfte spielen eine Rolle.

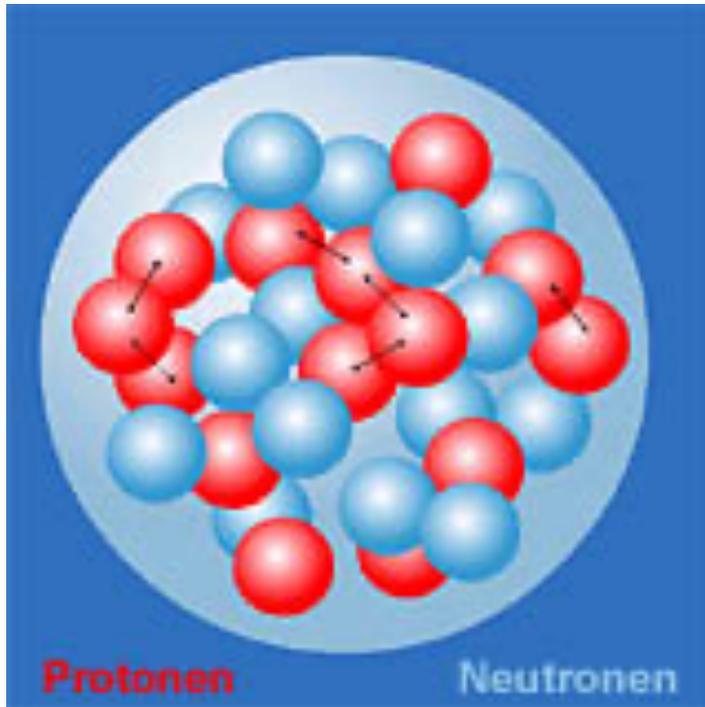
Die Entdeckung des Neutrons

Ein weiteres Beispiel für ein Streuexperiment.

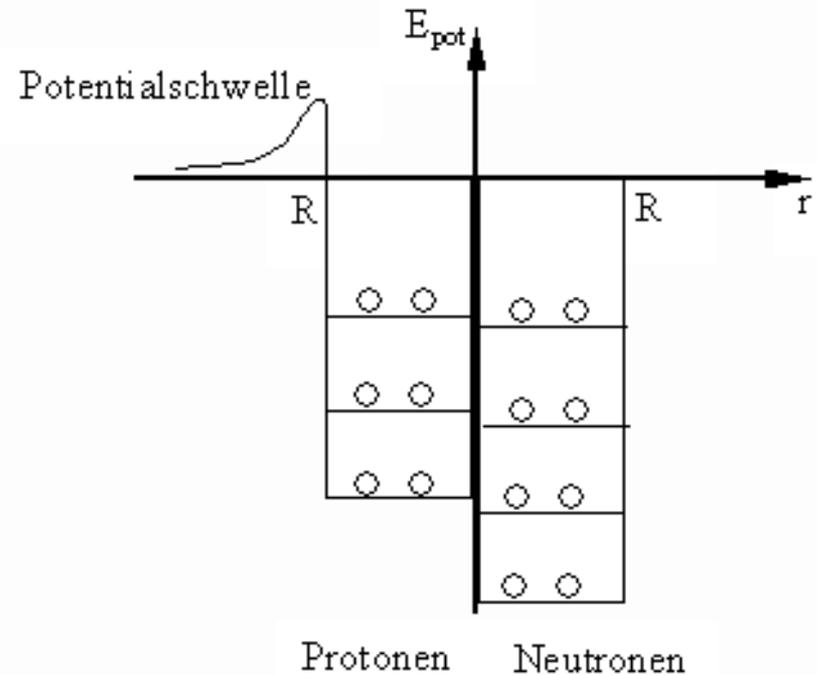


James Chadwick
1932

Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen, ...



Modell eines Potentialtopfes



... die von der starken Kernkraft zusammengehalten werden.

Quantenmechanik:

Materieteilchen haben Wellennatur (Welle-Teilchen-Dualismus)



Louis de Broglie

De Broglie Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

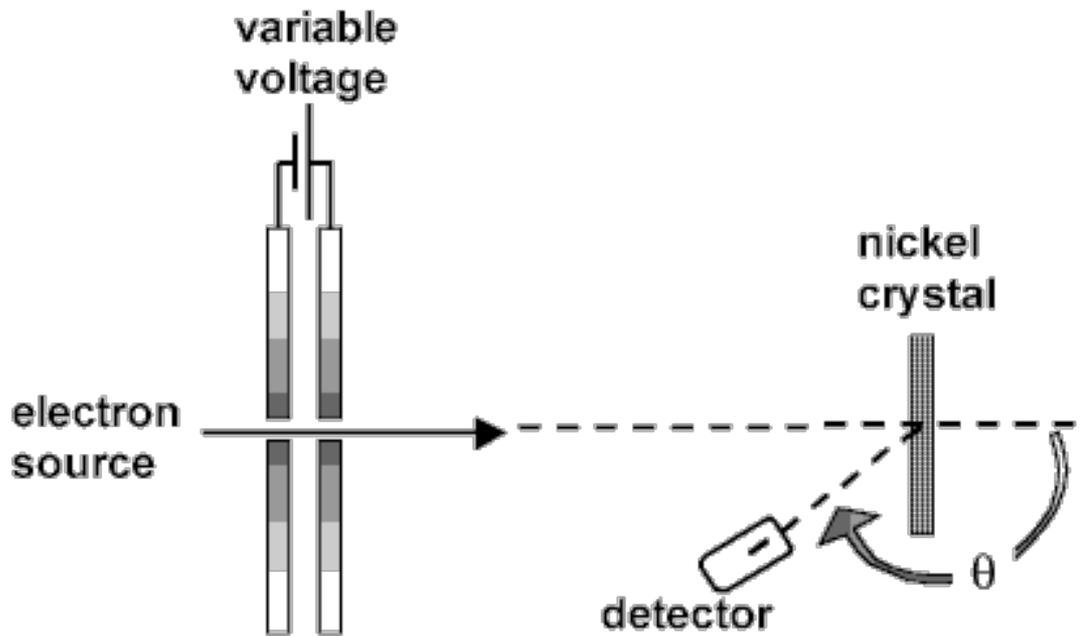
λ = Wellenlänge

h = Plancksches Wirkungsquantum

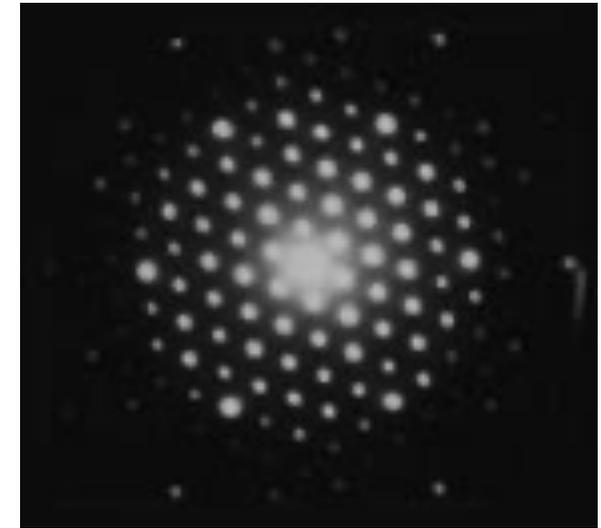
p = Impuls (klassisch: $p = mv$)

... De Broglie-Hypothese

Das Davisson-Germer-Experiment (1927)



Beugungsbild



Beugung ist ein typisches Wellenphänomen und bestätigt die Wellennatur von Elektronen.

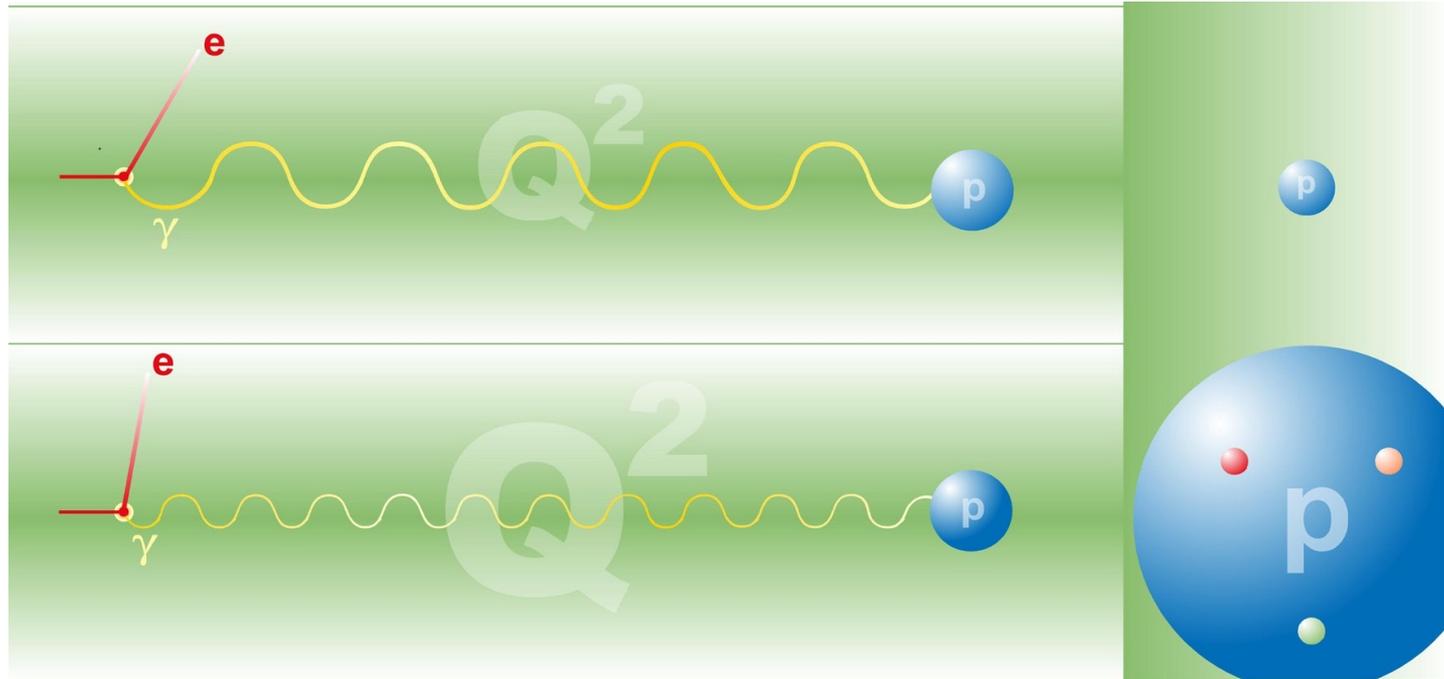
- Behandlung der streuenden Elektronen als **ebene Wellen**.



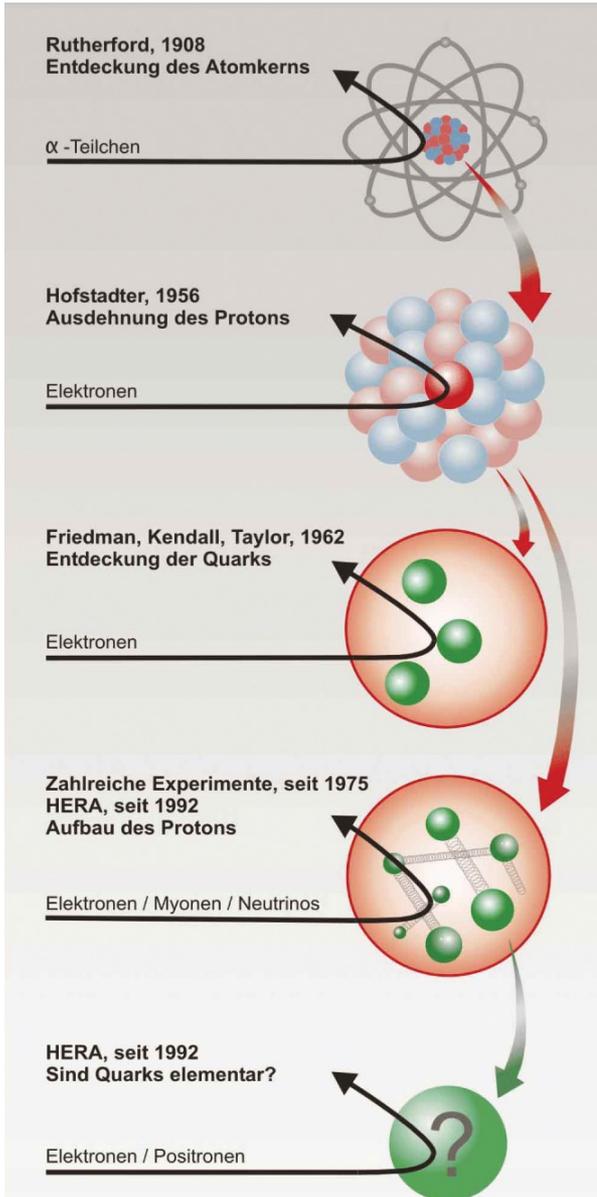
$$\psi_i = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i \vec{p} \cdot \vec{x} / \hbar}$$

$$\psi_f = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i \vec{p}' \cdot \vec{x} / \hbar}$$

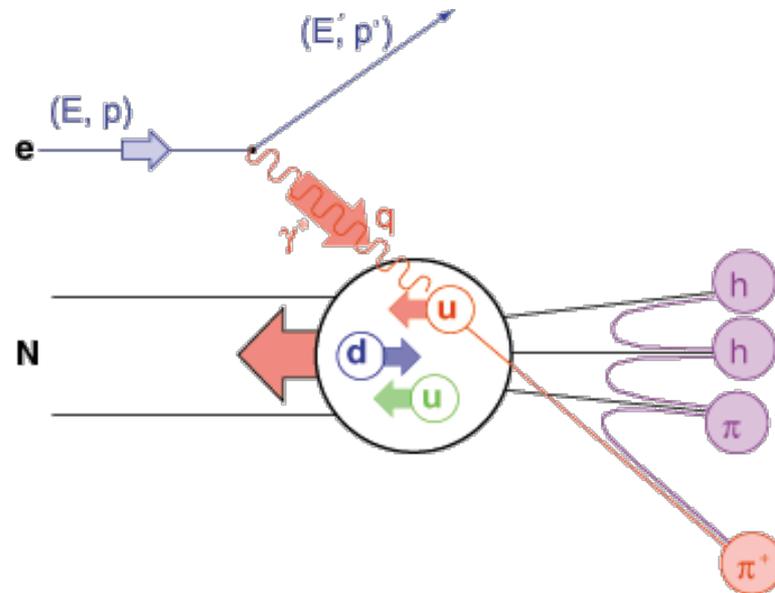
Wellenfunktionen



Je höher der Impulsübertrag Q^2 , desto kleiner ist die Wellenlänge des virtuellen Photons und desto kleinere Strukturen können aufgelöst werden.

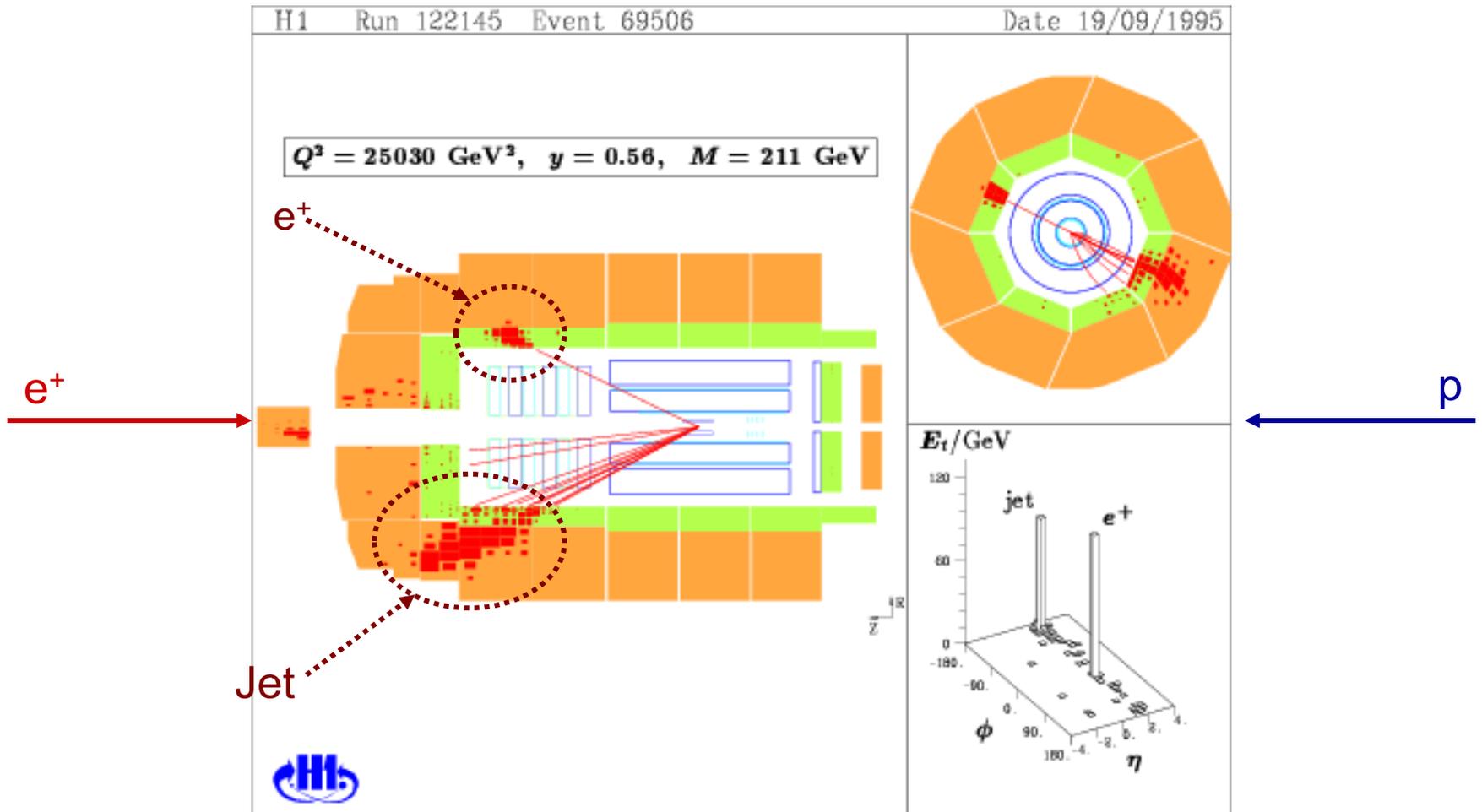


Elektron-Proton-Streuung

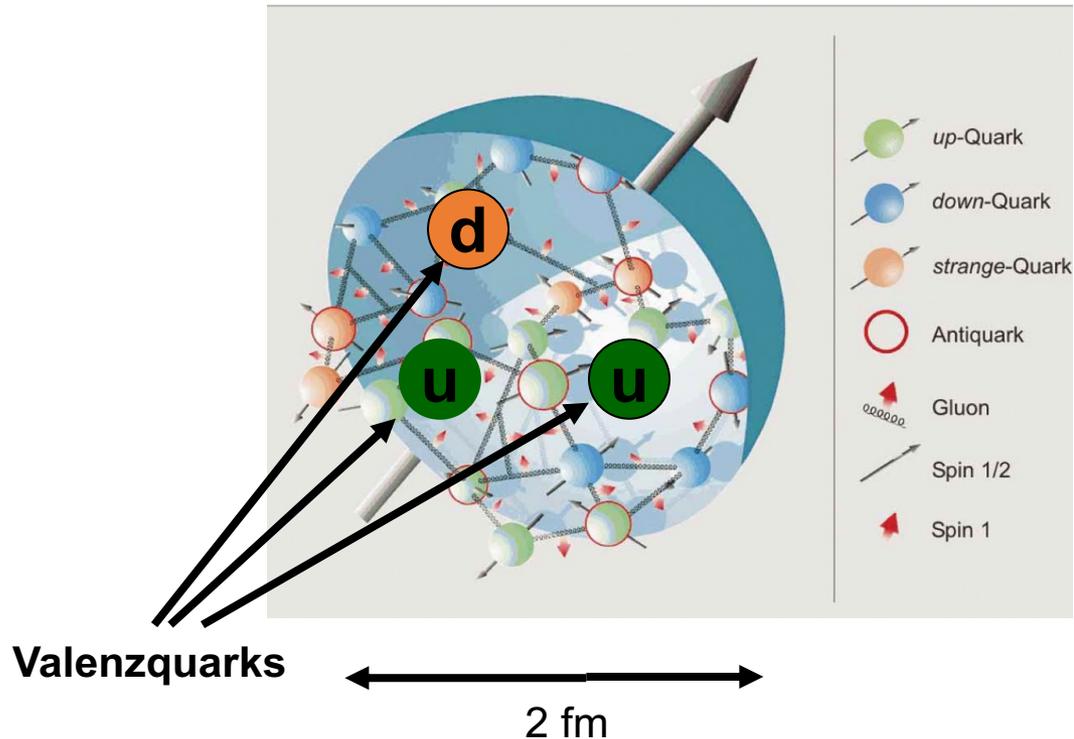


Das Proton wird zerstört.

... am H1-Detektor



...streuung



ERKENNTNIS:

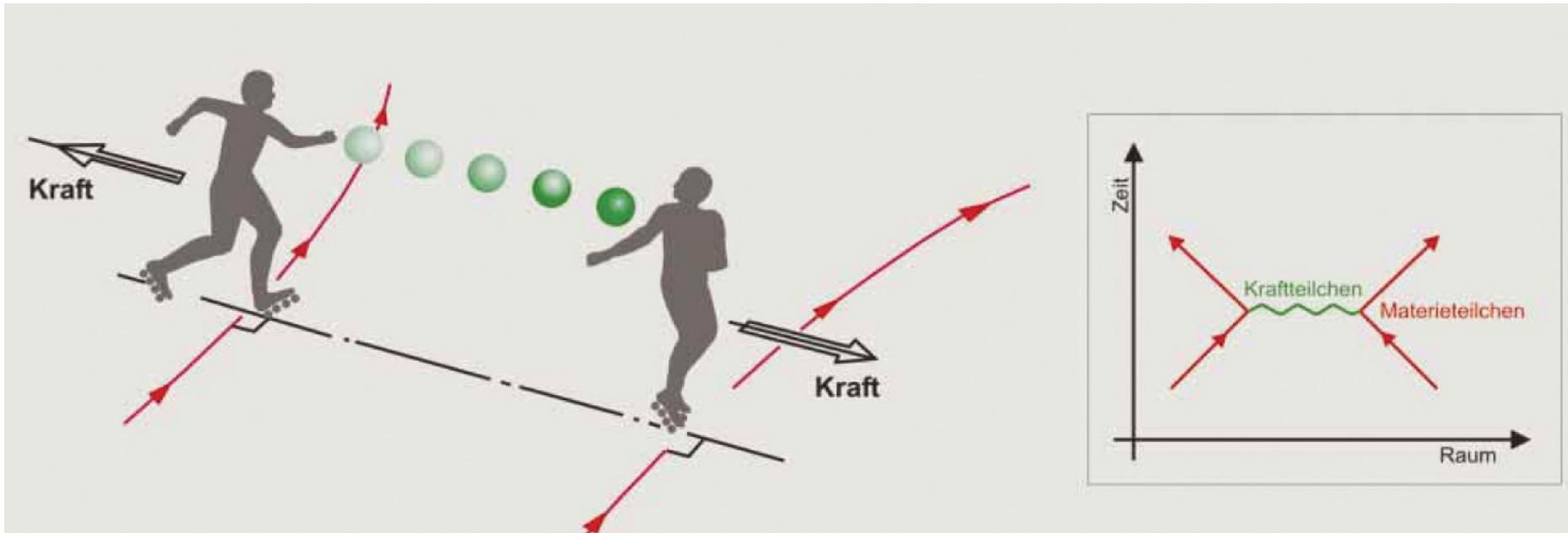
- **STREUUNG AN PUNKTFÖRMIGEN QUARKS, $R < 10^{-18}$ m**
- **GENAUE STRUKTUR DES PROTONS**

3) Das Standardmodell der Teilchenphysik

	1st gen.	2nd gen.	3rd gen.
Q U A R K	 <i>u</i> <i>up</i>	 <i>c</i> <i>charm</i>	 <i>t</i> <i>top</i>
	 <i>d</i> <i>down</i>	 <i>s</i> <i>strange</i>	 <i>b</i> <i>bottom</i>
L E P T O N	 <i>ν_e</i> <i>e neutrino</i>	 <i>ν_μ</i> <i>μ neutrino</i>	 <i>ν_τ</i> <i>τ neutrino</i>
	 <i>e</i> <i>electron</i>	 <i>μ</i> <i>muon</i>	 <i>τ</i> <i>tau</i>

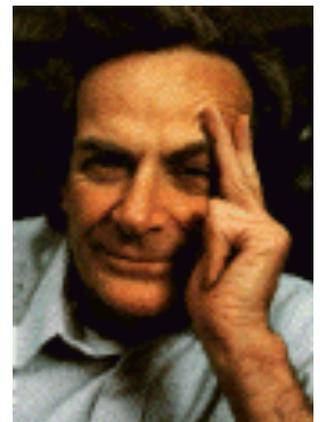
Materieteilchen des
Standardmodells

Bausteine der "normalen" Materie

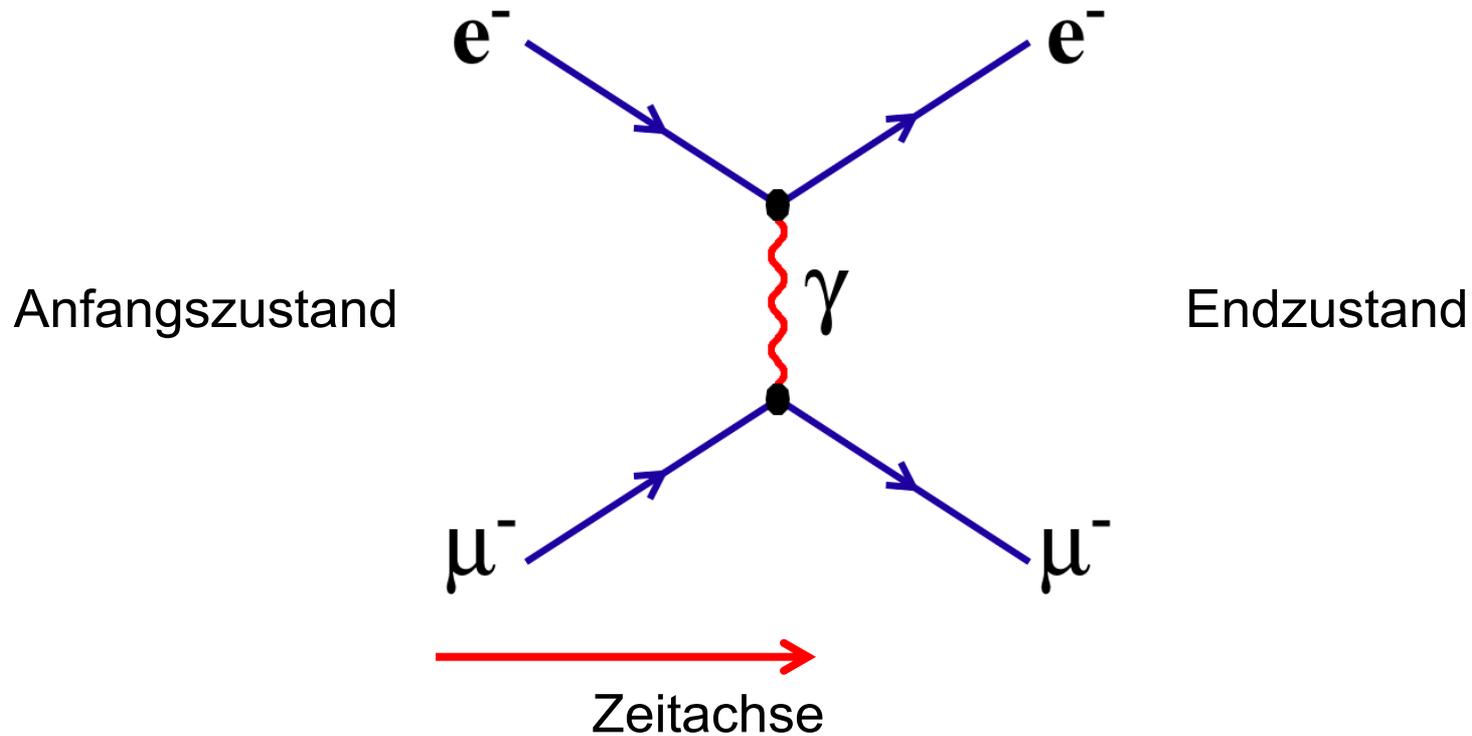


ALLGEMEIN:

- KRÄFTE ENTSTEHEN DURCH AUSTAUSCH VON BOSONEN
- SCHEMATISCHE BESCHREIBUNG DURCH FEYNMAN-DIAGRAMME



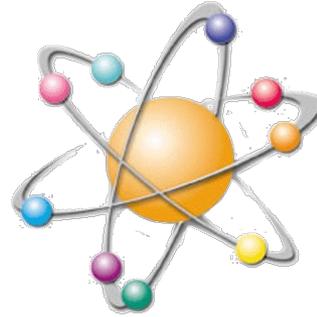
Richard Feynman



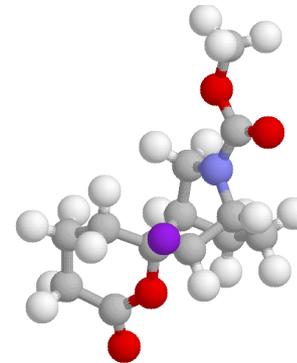
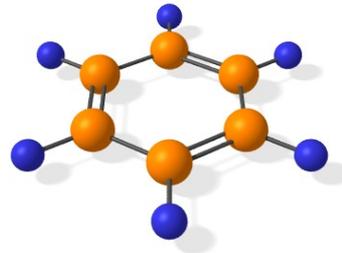
Die elektromagnetische Wechselwirkung



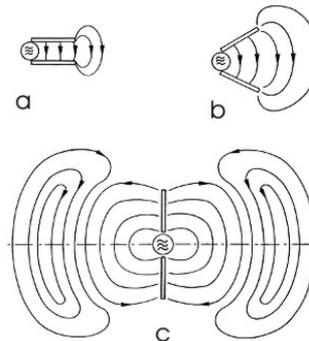
... hält Atome zusammen



... ist Grundlage der
Chemie

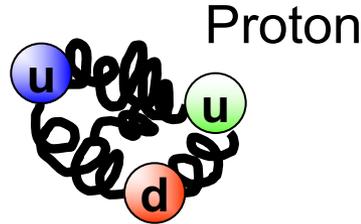
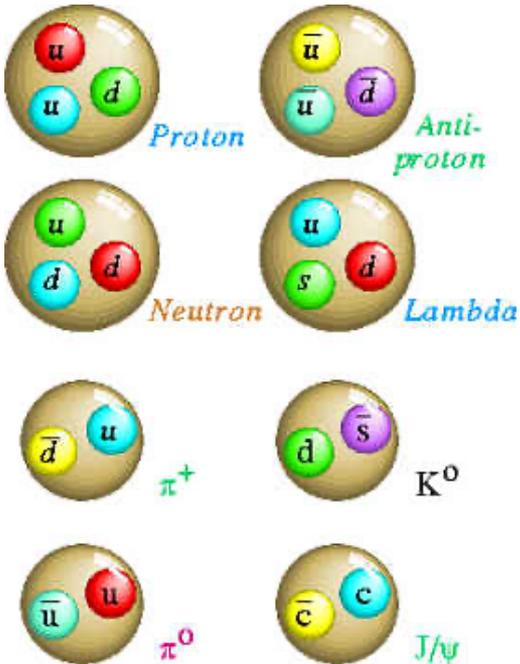


... erzeugt elektromagnetische
Wellen



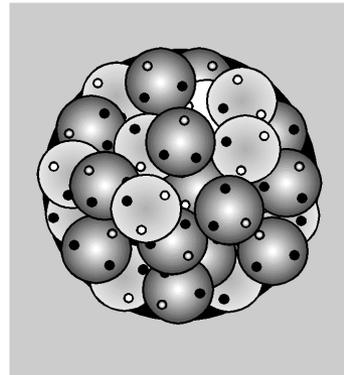
Die starke Wechselwirkung

... bindet Quarks
zu *Hadronen*



- Quarks tragen Farbladung
- *Hadronen* sind farbneutral
- *Gluonen* sind die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung

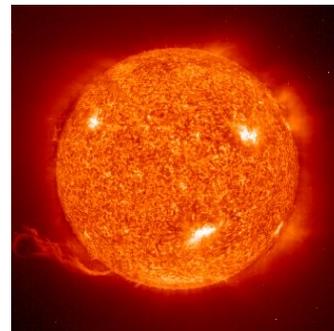
... bindet Protonen und Neutronen zu Atomkernen



Kernenergie wird freigesetzt in ...

... der Sonne

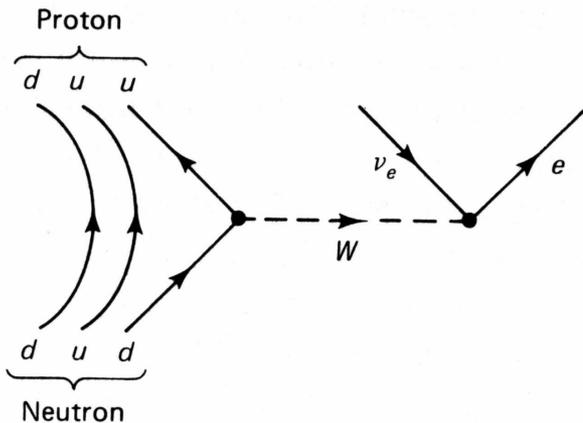
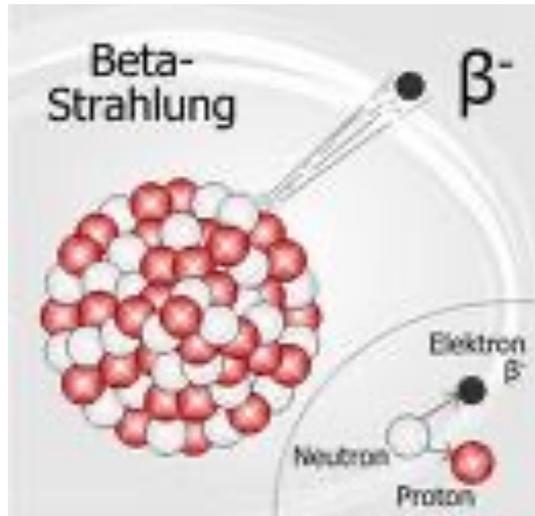
... Kraftwerken



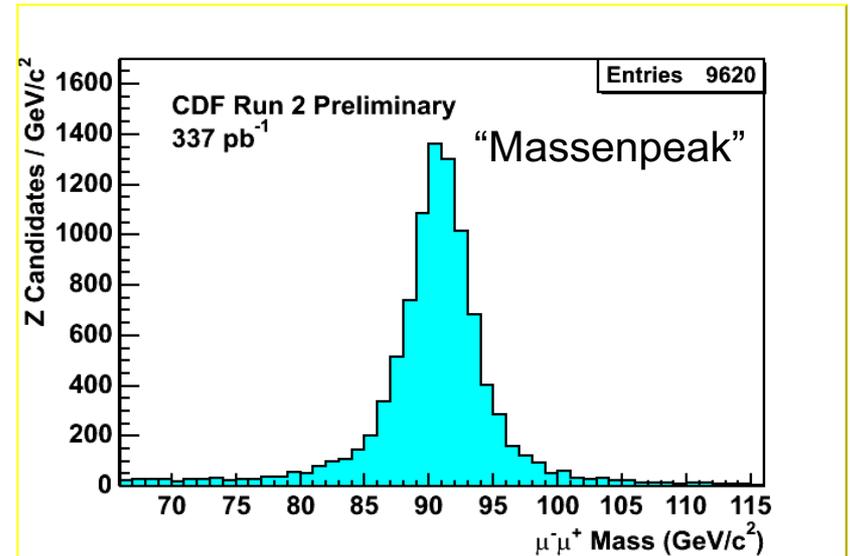
Die starke Wechselwirkung!

Strong

... bewirkt den radioaktiven Beta-Zerfall



... wird vermittelt durch massive Bosonen (Z^0 , W^+ , W^-)



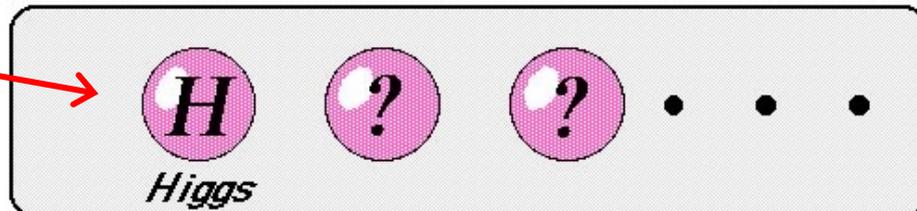
Z^0 : so schwer wie ein Zirkonium-Kern ^{91}Zr

	1st gen.	2nd gen.	3rd gen.
Q U A R K	 <i>u</i> <i>up</i>	 <i>c</i> <i>charm</i>	 <i>t</i> <i>top</i>
	 <i>d</i> <i>down</i>	 <i>s</i> <i>strange</i>	 <i>b</i> <i>bottom</i>
L E P T O N	 <i>ν_e</i> <i>e neutrino</i>	 <i>ν_μ</i> <i>μ neutrino</i>	 <i>ν_τ</i> <i>τ neutrino</i>
	 <i>e</i> <i>electron</i>	 <i>μ</i> <i>muon</i>	 <i>τ</i> <i>tau</i>

Strong Force	 <i>g</i> <i>Gluon</i>
Electro-Magnetic Force	 <i>γ</i> <i>photon</i>
Weak Force	   <i>W⁺</i> <i>W⁻</i> <i>Z</i> <i>W bosons</i> <i>Z boson</i>

wurde im Jahr 2012
gefunden

scalar particle(s)





Danke für Ihre Aufmerksamkeit !