

Eine Reise in das Innere des Protons

J. Pretz

RWTH Aachen/ FZ Jülich



Aachen, 22. November 2014

- **Was ist ein Proton?**
Aufbau der Materie
- **Wie sieht das Innere des Protons aus?**
Streuexperimente
- **Gibt es noch offene Fragen?**
Aktueller Stand der Forschung

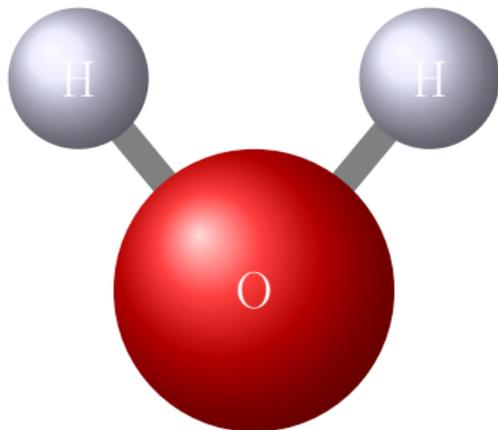
Was ist ein Proton?

Aufbau der Materie



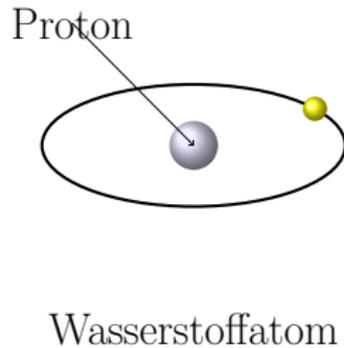
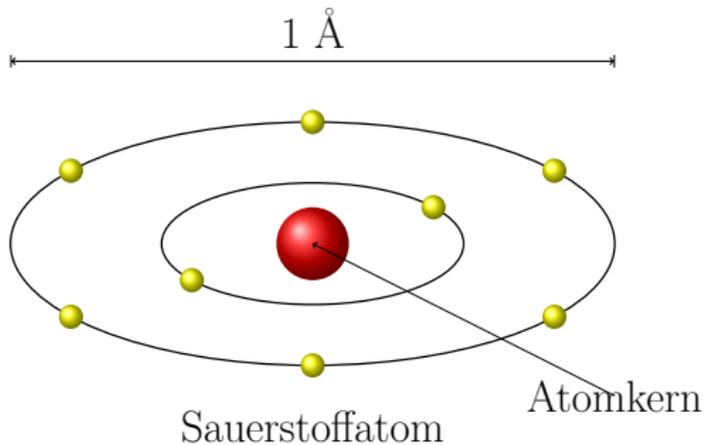
Aufbau der Materie

$$0,000.000.000.1 \text{ m} = 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$$

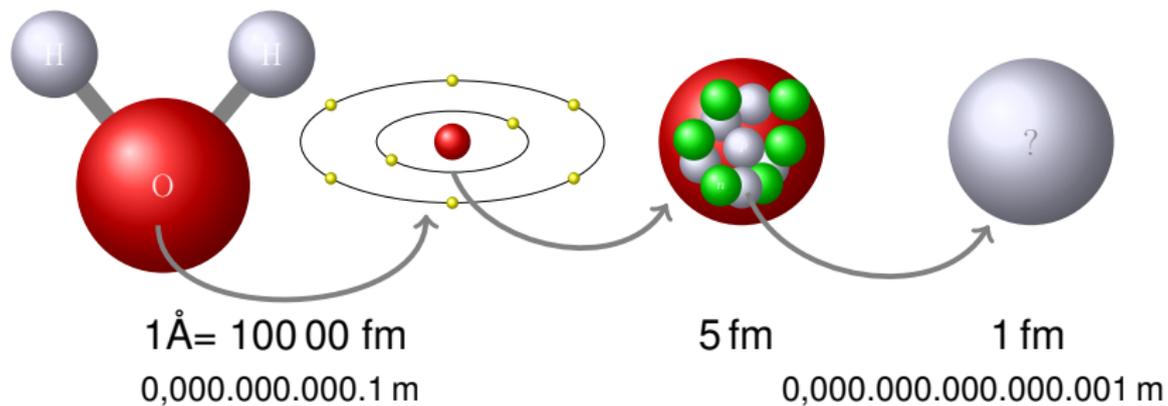


Wassermolekül

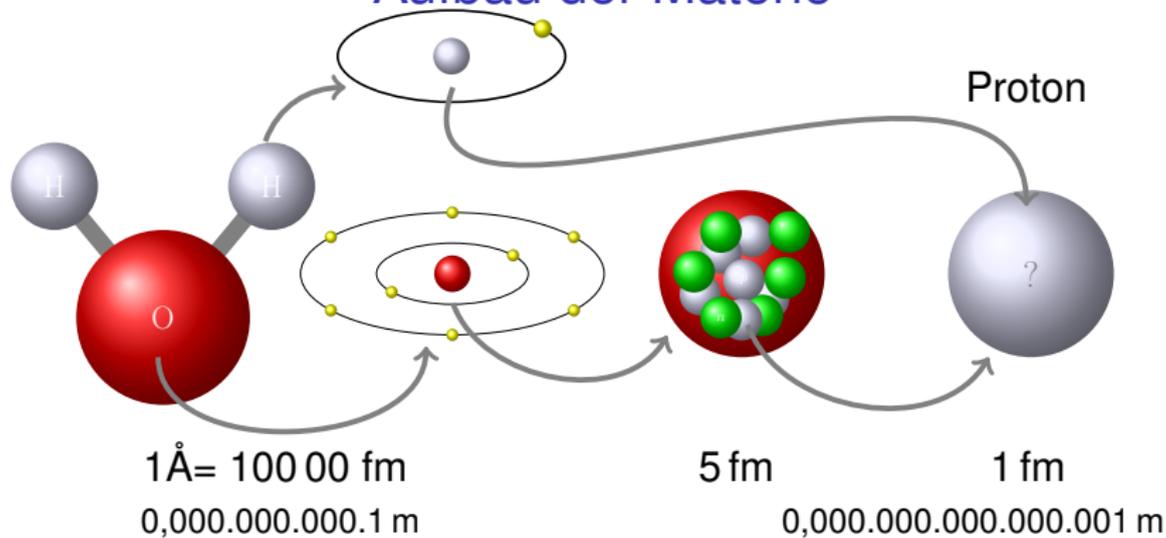
Aufbau der Materie



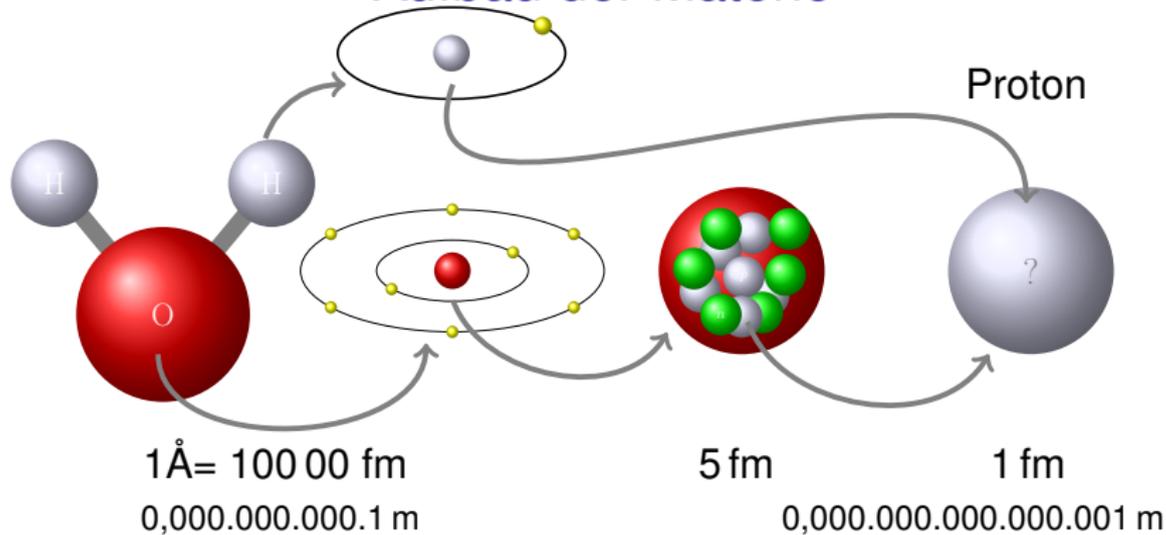
Aufbau der Materie



Aufbau der Materie



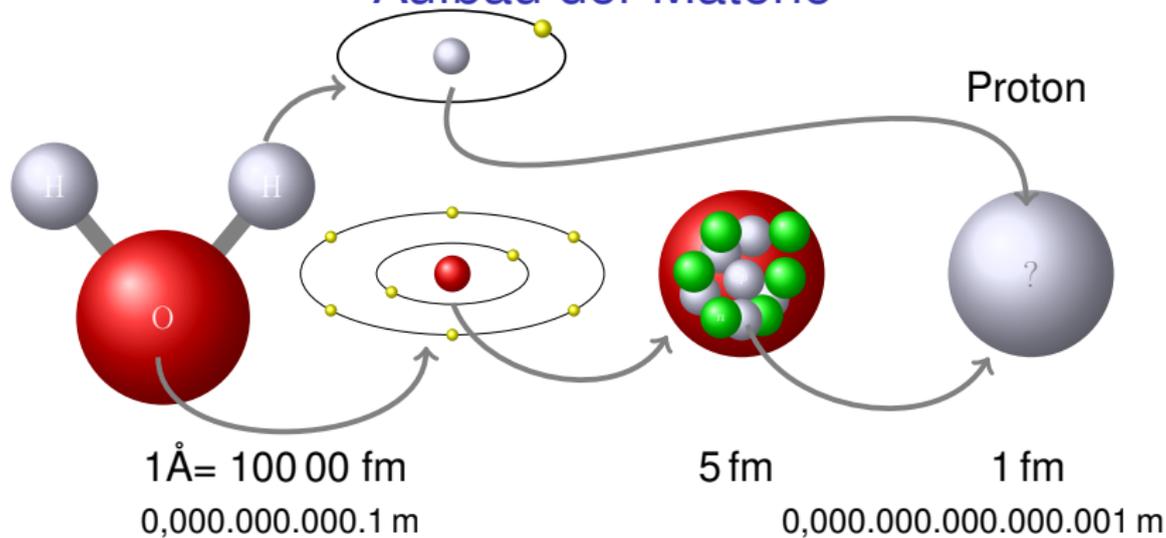
Aufbau der Materie



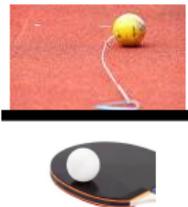
Größenverhältnisse: $\frac{\text{Kern}}{\text{Atomhülle}} \approx$



Aufbau der Materie



Massenverhältnisse: $\frac{\text{Kern}}{\text{Atomhülle}} \approx$



Was ist ein Proton?

- **Protonen** sind zusammen mit **Neutronen** und **Elektronen** die Bausteine der Materie

Was ist ein Proton?

- **Protonen** sind zusammen mit **Neutronen** und **Elektronen** die Bausteine der Materie
- Masse: $m = 1,7 \cdot 10^{-27}$ kg



$4 \cdot 10^{24}$ Protonen

Was ist ein Proton?

- **Protonen** sind zusammen mit **Neutronen** und **Elektronen** die Bausteine der Materie

- Masse: $m = 1,7 \cdot 10^{-27}$ kg

- Das Proton ist elektrisch positiv geladen.

Ladung: 1 Elementarladung e ,
 $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C



$4 \cdot 10^{24}$ Protonen



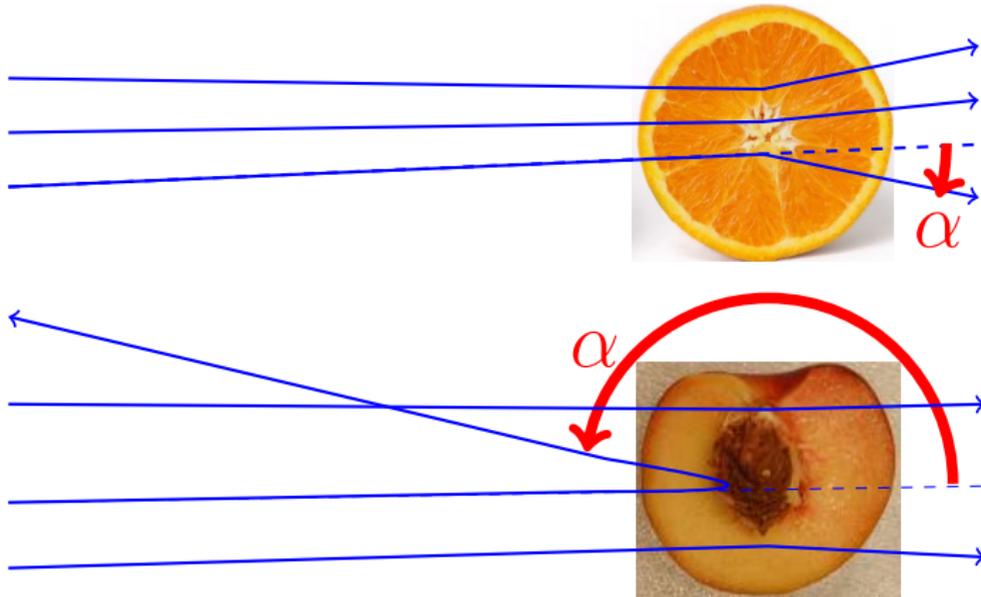
$5 \cdot 10^{22}$ e

Was sieht das Innere des
Protons aus?

Wie lernt man etwas über die Struktur von Objekten?

Wie lernt man etwas über die Struktur von Objekten?

Prinzip eines Streuexperiments:

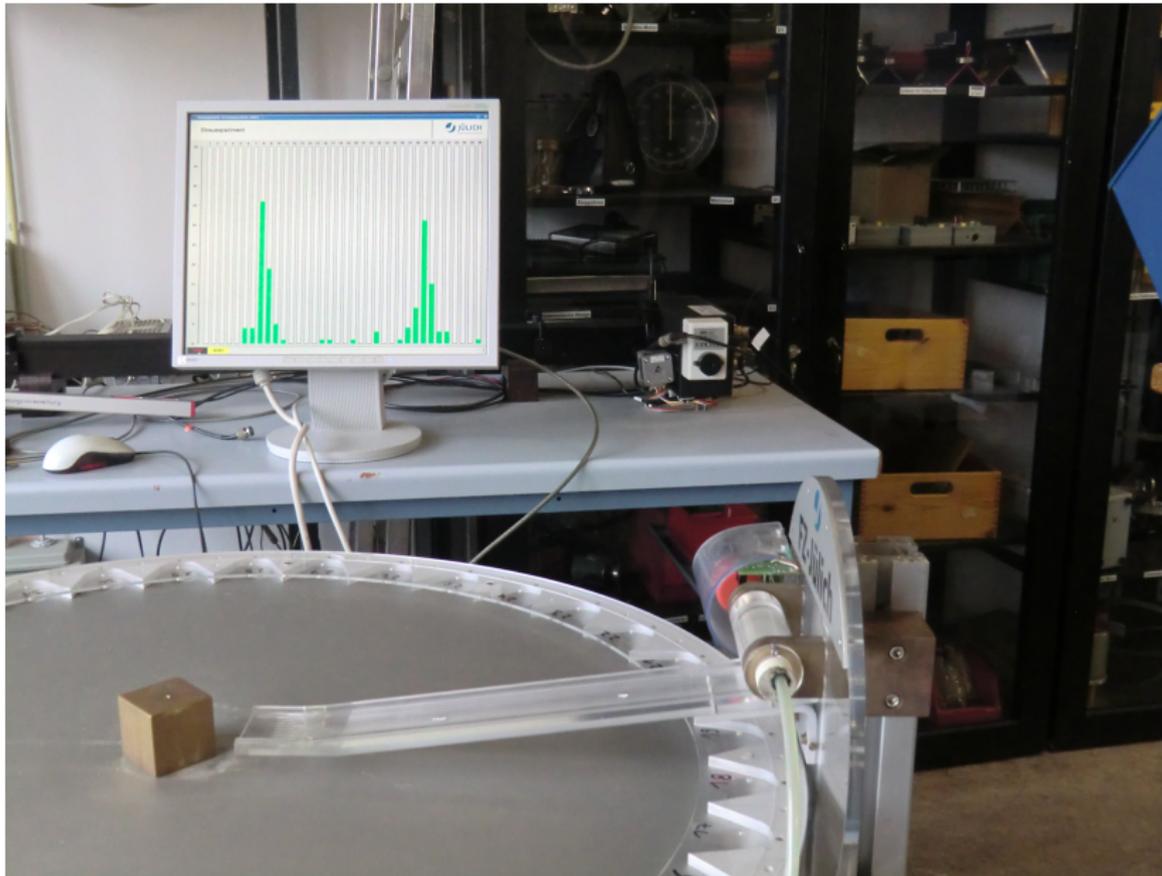


Prinzip eines Streuexperimentes

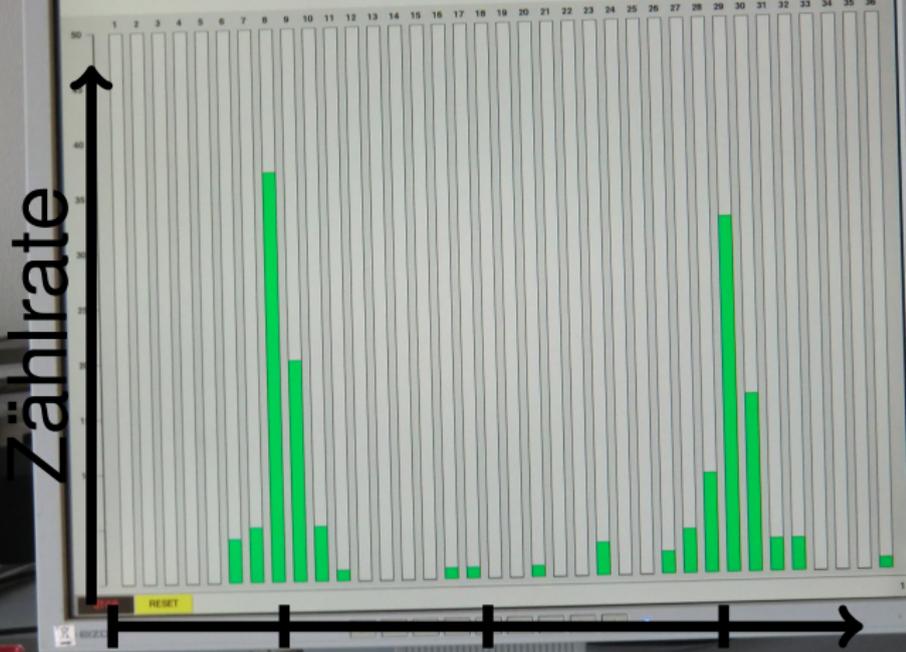
Schieße mit Projektilen auf zu untersuchendes Objekt. Die Winkelverteilung der gestreuten Projektile gibt Aufschluss über die innere Struktur des Objekts.

- Streuexperimente an Teilchenbeschleunigern sind bis heute das Hauptwerkzeug zur Untersuchung von Teilchen!

Exp.: Streuung

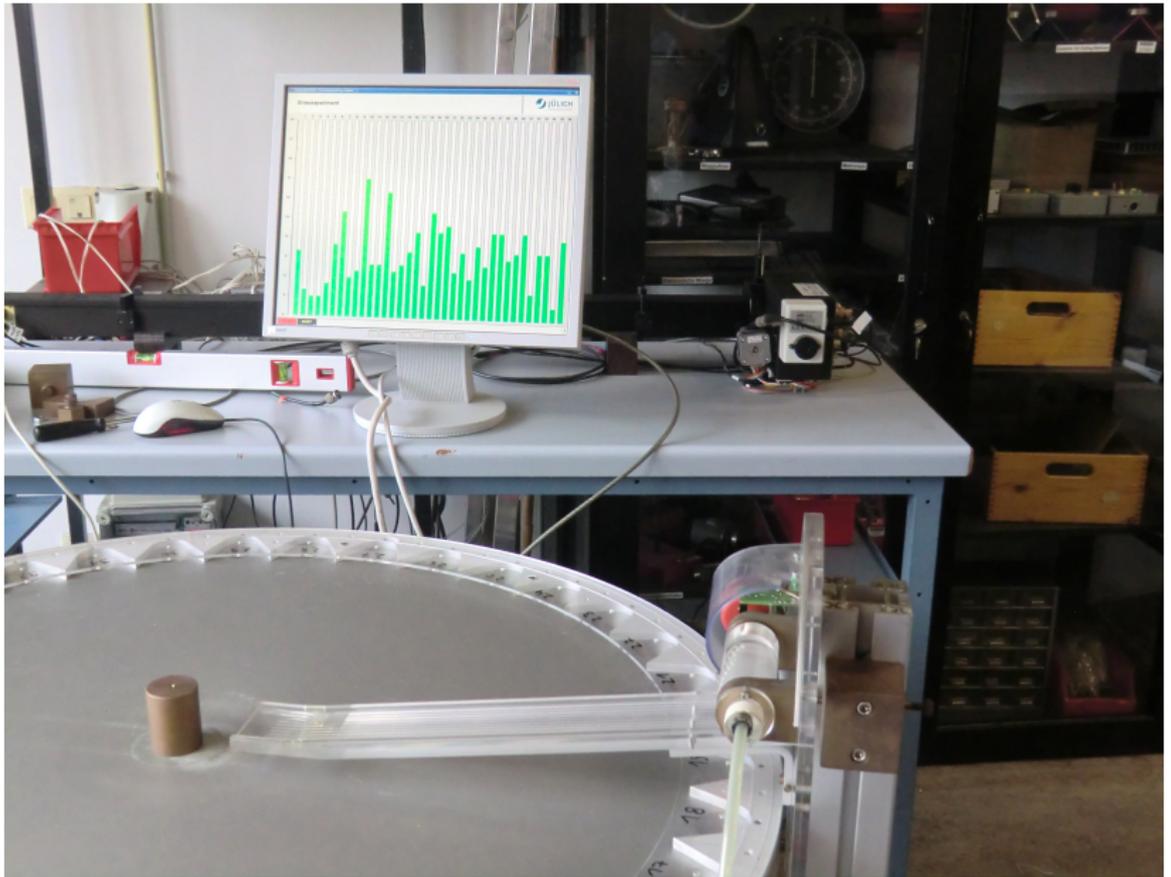


Streuexperiment



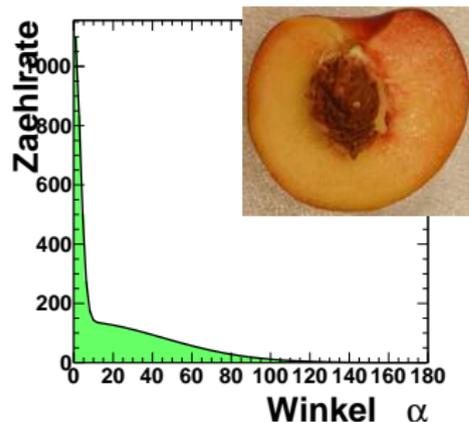
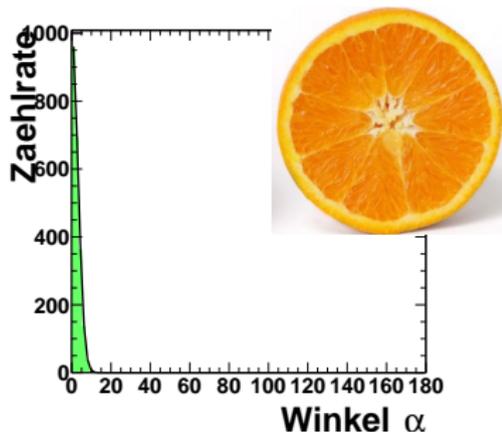
Zählrate

0° 90° 180° -90° α

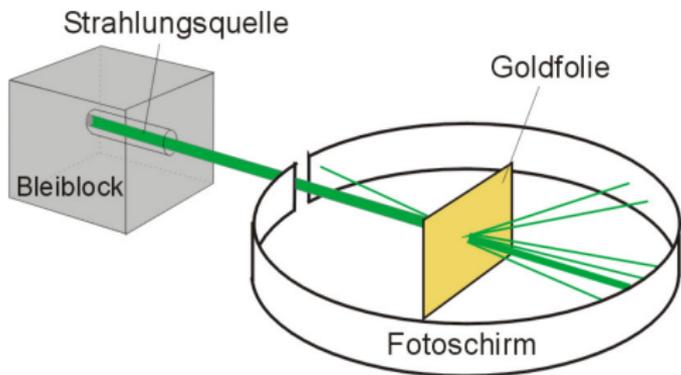




Prinzip eines Streuexperimentes



Prinzip eines Streuexperimentes



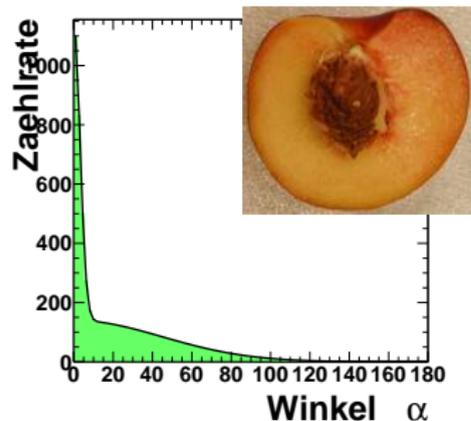
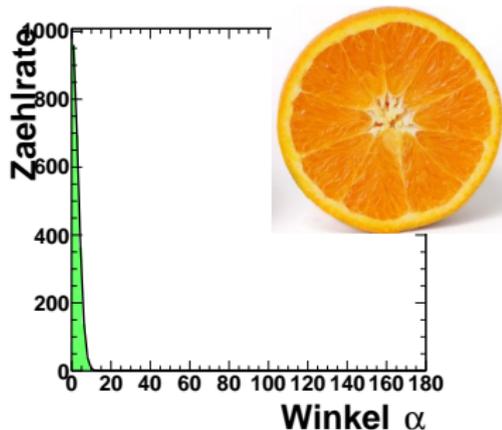
IDN Uni Bremen



Ernest Rutherford
Nobelpreis 1908
(Chemie)

Historische Bemerkung: Rutherford-Experiment (1911):
 α -Teilchen (Heliumkerne) auf Goldfolie

Prinzip eines Streuexperimentes



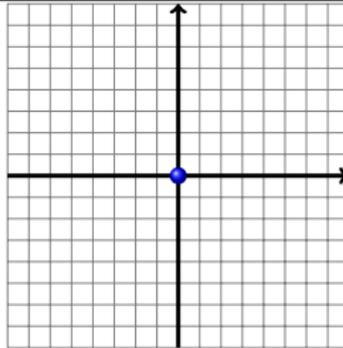
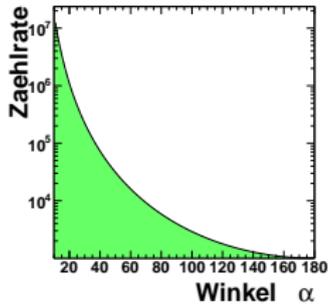
Historische Bemerkung: Rutherford-Experiment (1911):
Atom sieht eher wie ein Pfirsich als eine Orange aus:
Hülle ist fast leer, Masse konzentriert sich auf kleinen Kern.

Beispiele

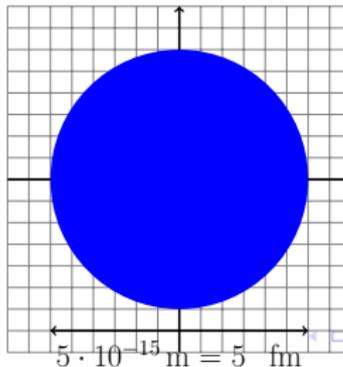
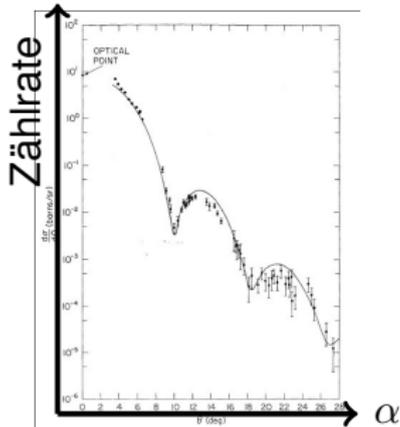
Winkelverteilung

Form

Beispiel

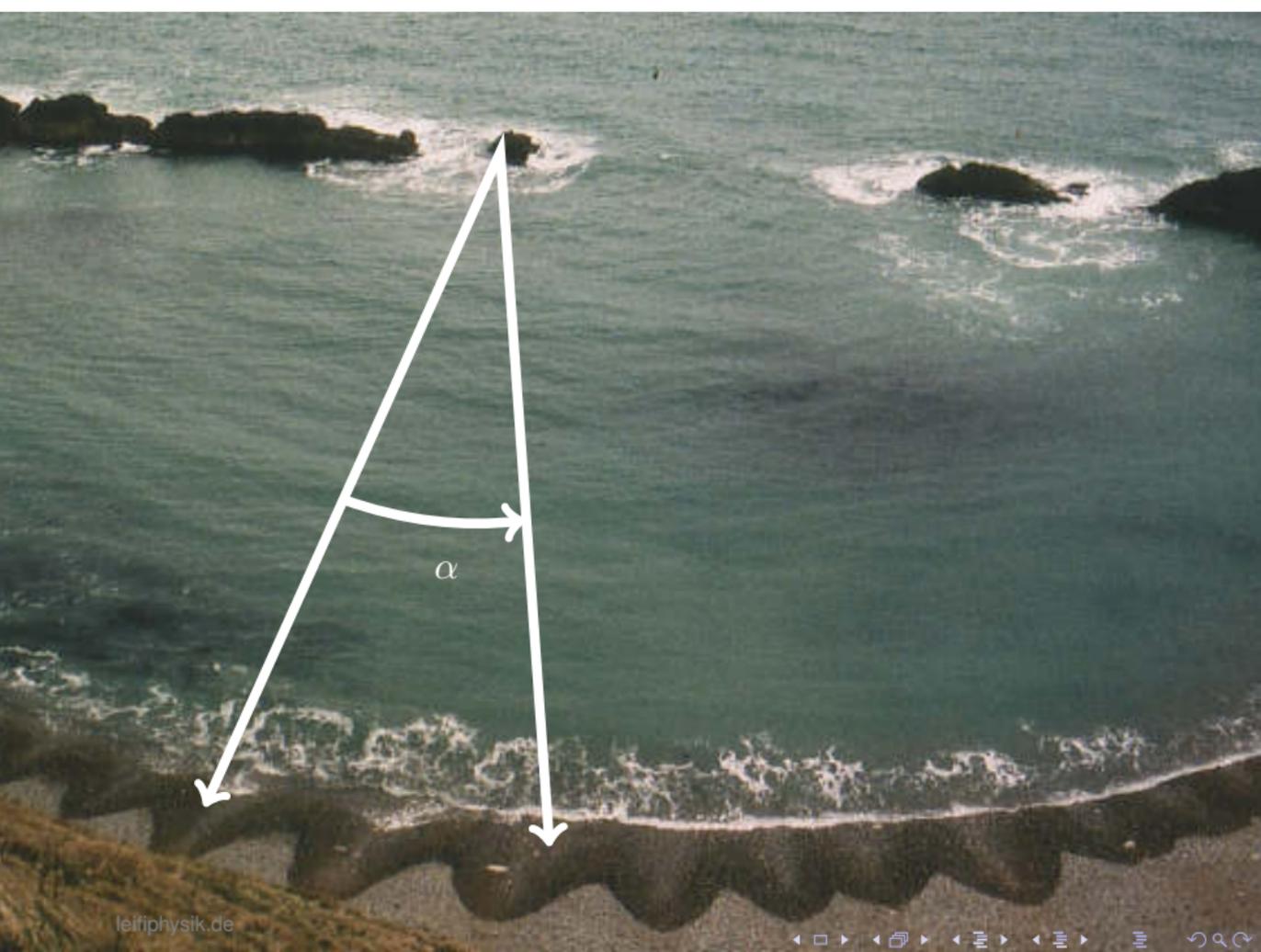


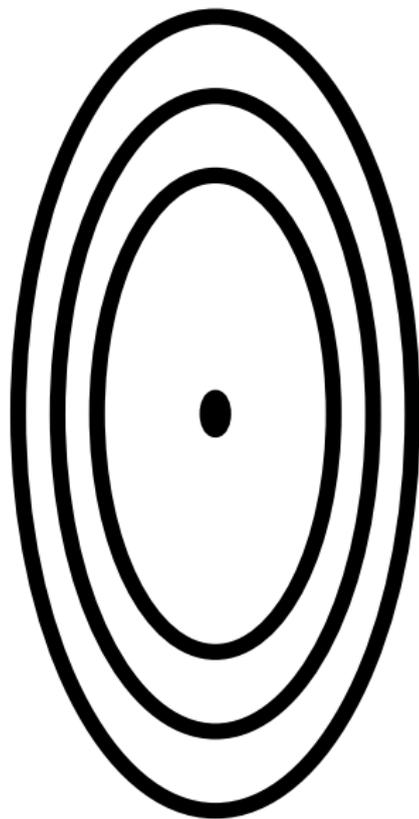
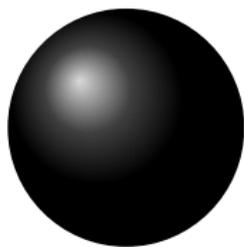
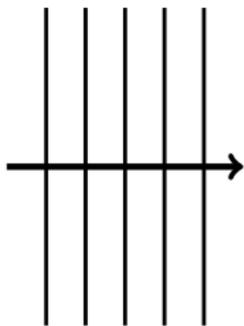
Elektron

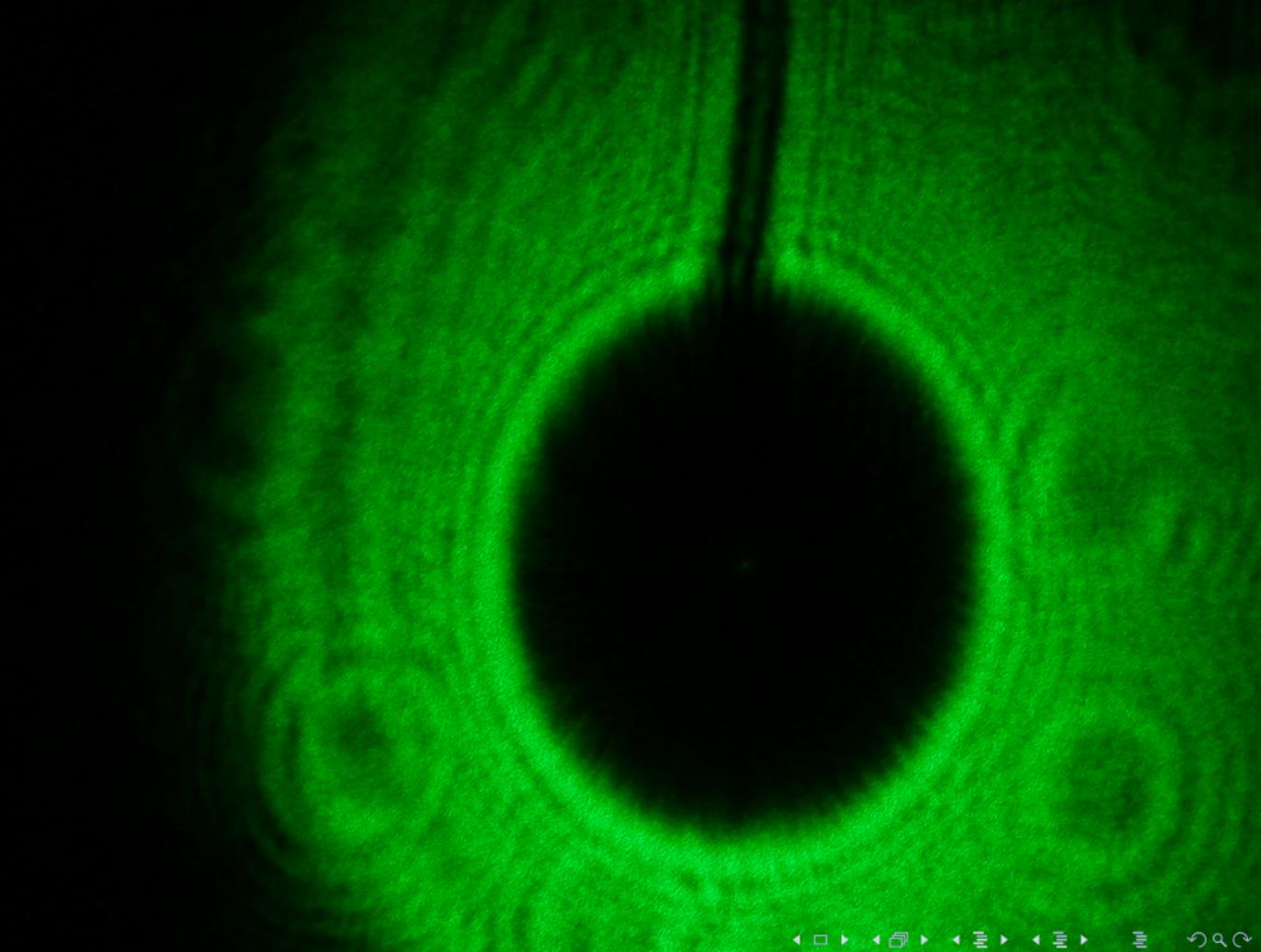


Atomkern



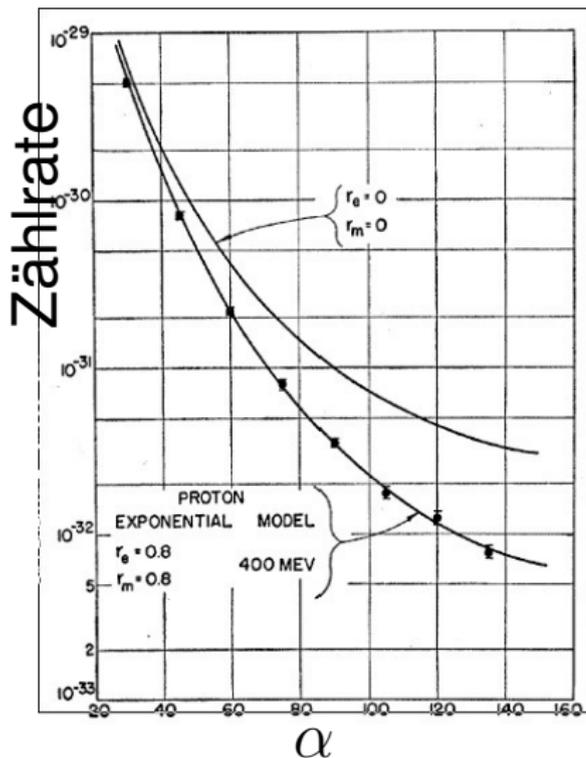






Wie sieht die Winkelverteilung für das Protons aus?

Elektron-Proton-Streuung



R. Hofstadter

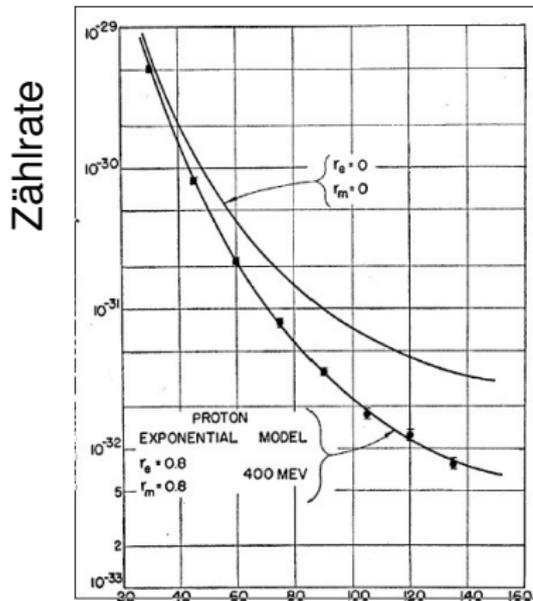
Nobelpreis 1961

Erwartung für punktförmiges Teilchen

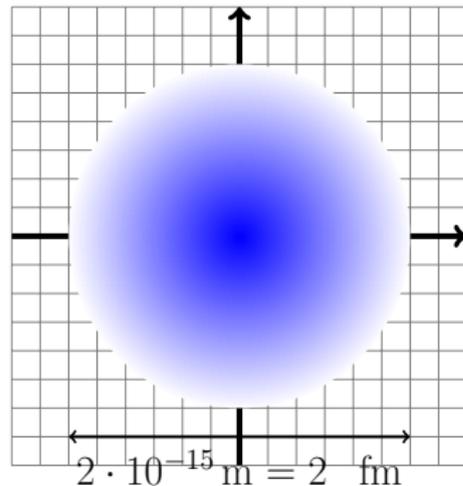
Räumliche Ausdehnung des Protons

Winkelverteilung

Form

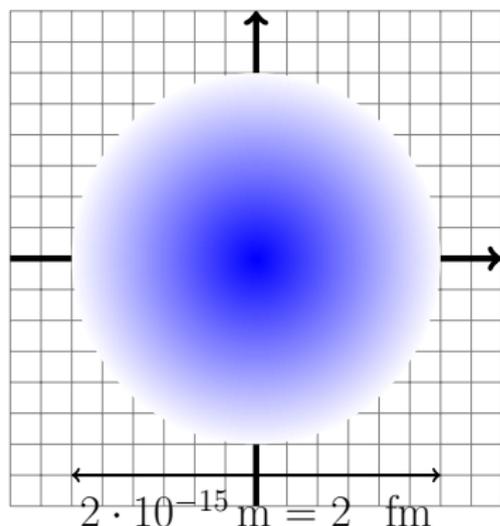


α



Räumliche Ausdehnung des Protons

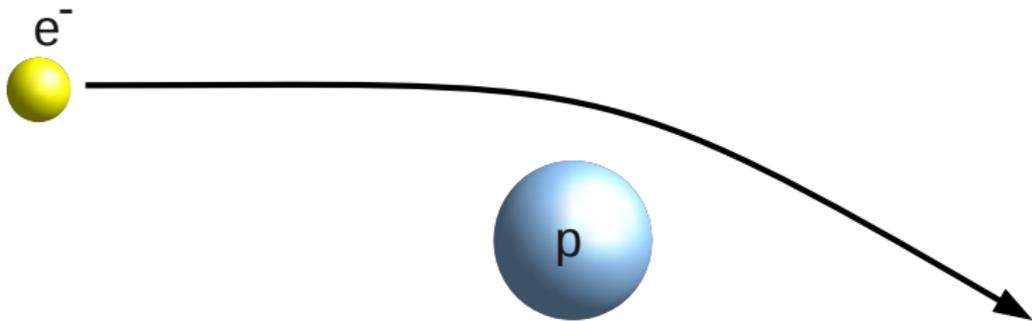
- Proton hat endliche Ausdehnung.
- Radius $\approx 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$
- Rand ist nicht genau definiert.
- Ladung ist eher im Zentrum konzentriert.



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Bisher: **elastische Streuung:**

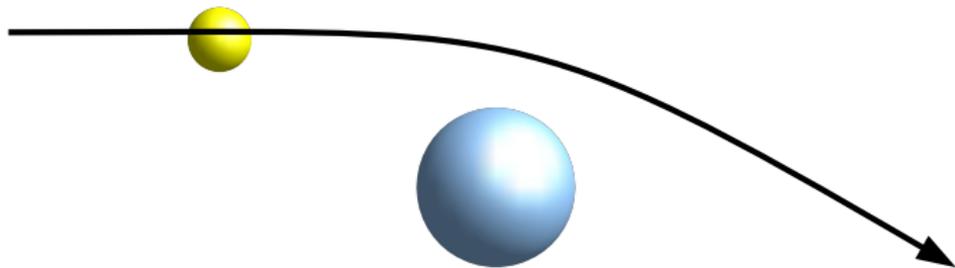
$$e^- + p \rightarrow e^- + p$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Bisher: **elastische Streuung:**

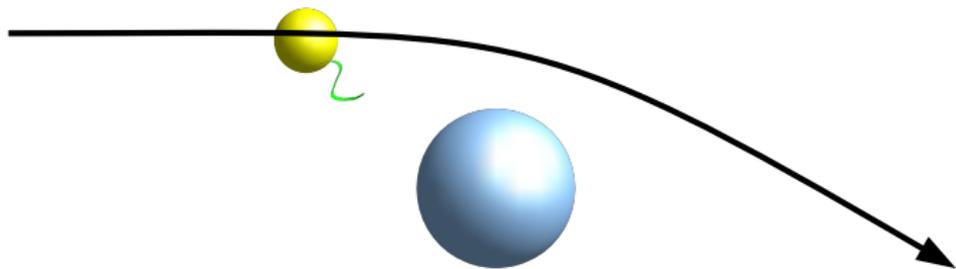
$$e^- + p \rightarrow e^- + p$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Bisher: **elastische Streuung:**

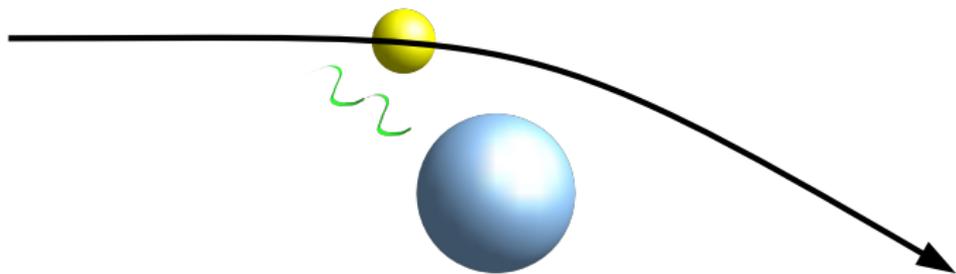
$$e^- + p \rightarrow e^- + p$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Bisher: **elastische Streuung:**

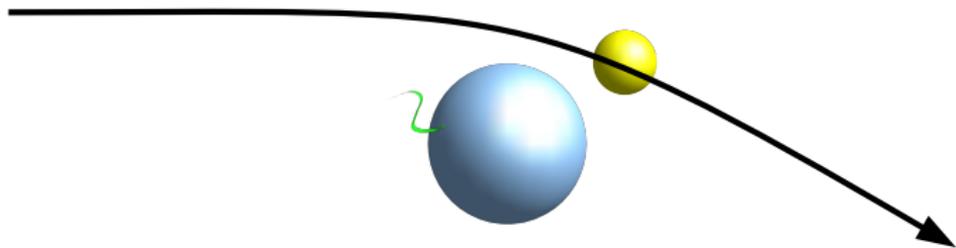
$$e^{-} + p \rightarrow e^{-} + p$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Bisher: **elastische Streuung:**

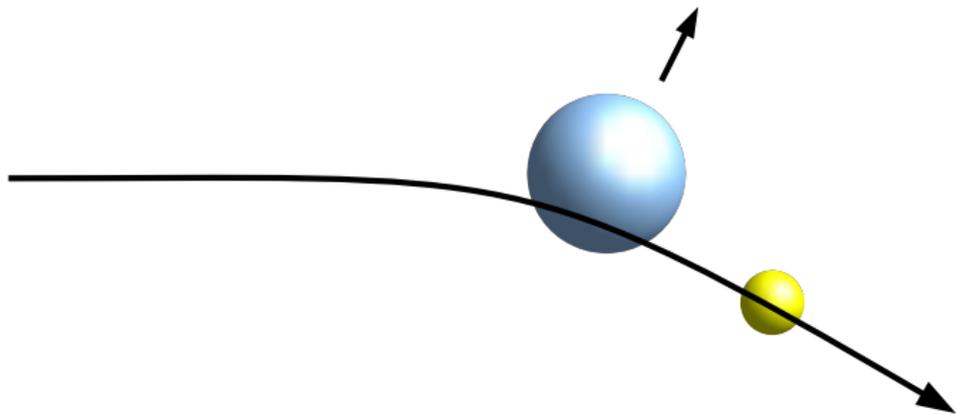
$$e^- + p \rightarrow e^- + p$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Bisher: **elastische Streuung:**

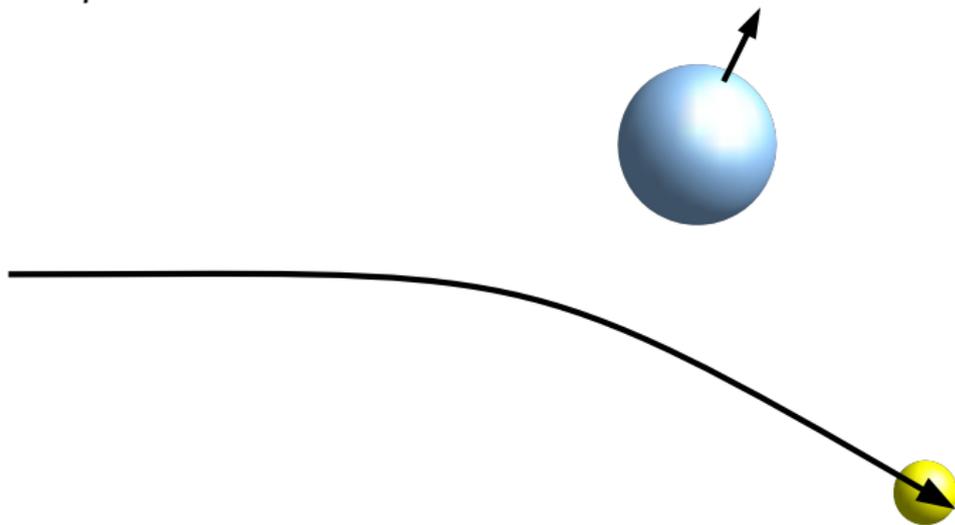
$$e^- + p \rightarrow e^- + p$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Bisher: **elastische Streuung:**

$$e^- + p \rightarrow e^- + p$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

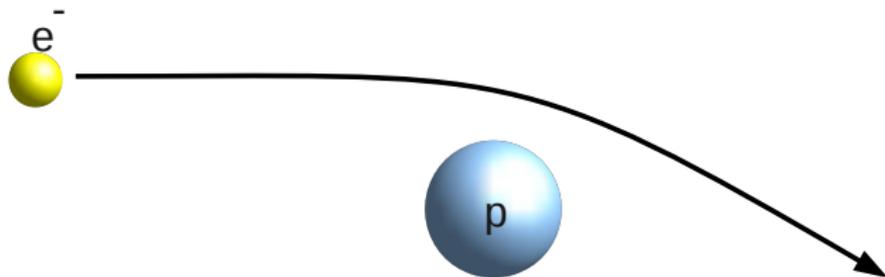
Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Das Proton bricht auseinander (**inelastische Streuung**):

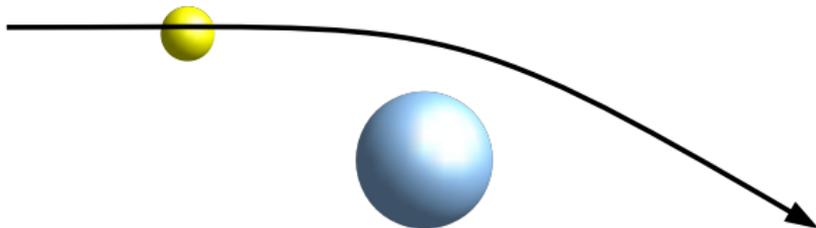
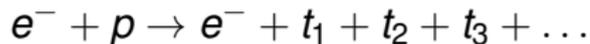
$$e^- + p \rightarrow e^- + t_1 + t_2 + t_3 + \dots$$



Elastische ↔ inelastische Streuung

Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Das Proton bricht auseinander (**inelastische Streuung**):

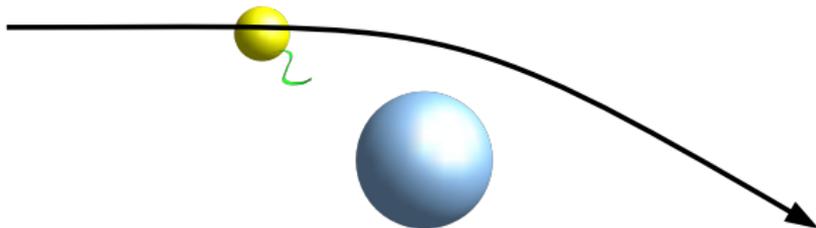


Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Das Proton bricht auseinander (**inelastische Streuung**):

$$e^- + p \rightarrow e^- + t_1 + t_2 + t_3 + \dots$$

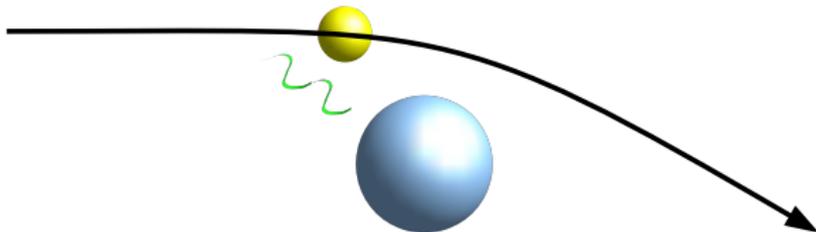


Elastische ↔ inelastische Streuung

Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Das Proton bricht auseinander (**inelastische Streuung**):

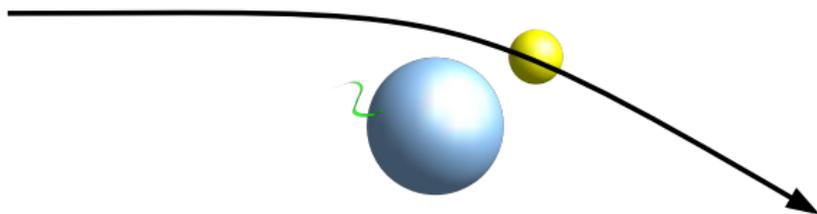
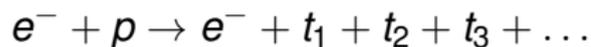
$$e^{-} + p \rightarrow e^{-} + t_1 + t_2 + t_3 + \dots$$



Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Das Proton bricht auseinander (**inelastische Streuung**):

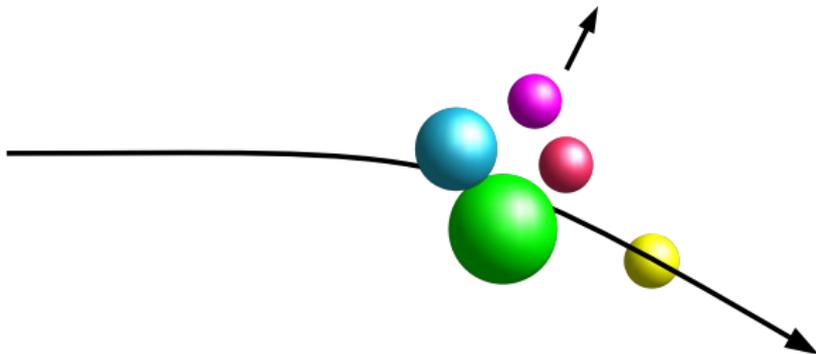


Elastische \leftrightarrow inelastische Streuung

Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Das Proton bricht auseinander (**inelastische Streuung**):

$$e^- + p \rightarrow e^- + t_1 + t_2 + t_3 + \dots$$

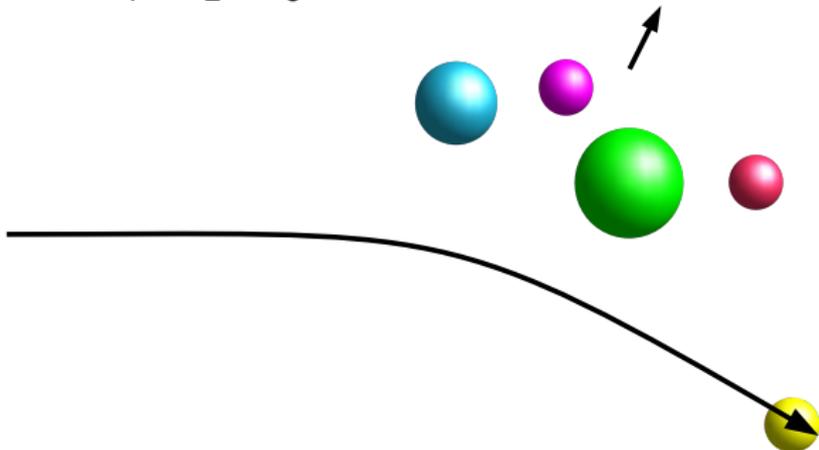


Elastische ↔ inelastische Streuung

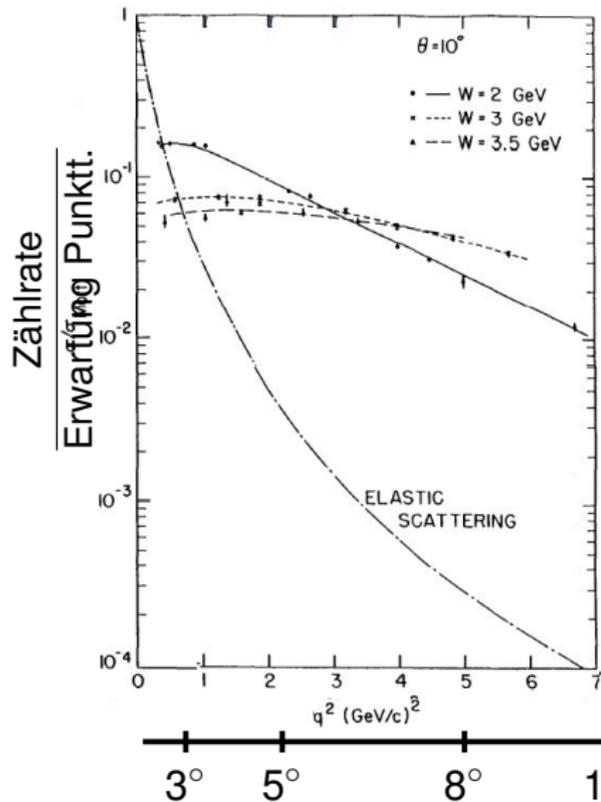
Was passiert, wenn man Protonen mit Elektronen höherer Energie beschießt?

Das Proton bricht auseinander (**inelastische Streuung**):

$$e^- + p \rightarrow e^- + t_1 + t_2 + t_3 + \dots$$



(Tief) inelastische Streuung

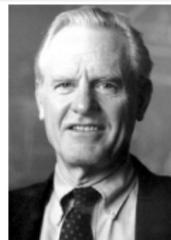


Zählrate
Erwartung Punktt. \approx konst.

⇒ Hinweise auf Streuung
an punktförmigen
Teilchen im Proton!



J. Friedman



H. Kendall

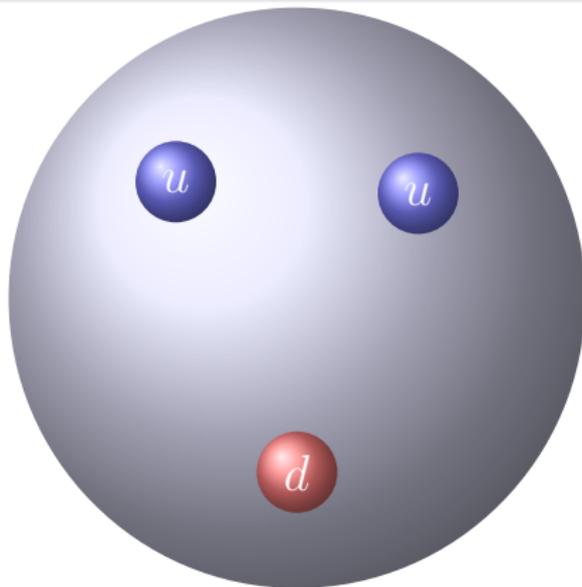


R. Taylor

Nobelpreis 1990

Tiefinelastische Streuung

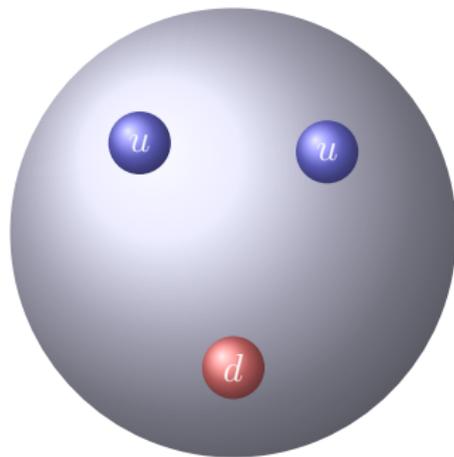
Aus dieser Beobachtung $\left(\frac{\text{Zählrate}}{\text{Erwartung Punktt.}} \approx \text{konst.} \right)$
lässt sich inelastische Streuung auffassen als
elastische Streuung an Punktteilchen (**Quarks**) im Proton.



Weitere Experimente mit noch höherer Strahlenergie und größerer Genauigkeit ergeben das folgende Bild des Protons:

- Streuung am Proton wird als Streuung an **Quarks** interpretiert. **Quarks** haben drittelzahlige Ladungen:

	up	down	strange
Quark	u	d	s
Ladung/e	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$
Antiquark	\bar{u}	\bar{d}	\bar{s}
Ladung/e	$-2/3$	$1/3$	$1/3$

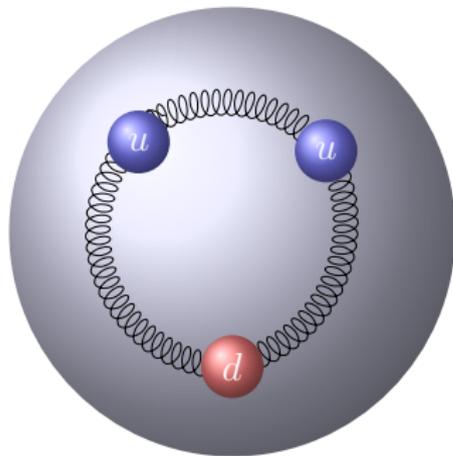


Weitere Experimente mit noch höherer Strahlenergie und größerer Genauigkeit ergeben das folgende Bild des Protons:

- Streuung am Proton wird als Streuung an **Quarks** interpretiert. **Quarks** haben drittelzahlige Ladungen:

	up	down	strange
Quark	u	d	s
Ladung/e	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$
Antiquark	\bar{u}	\bar{d}	\bar{s}
Ladung/e	$-2/3$	$1/3$	$1/3$

- **Quarks** werden durch **Glukonen** im Proton zusammengehalten

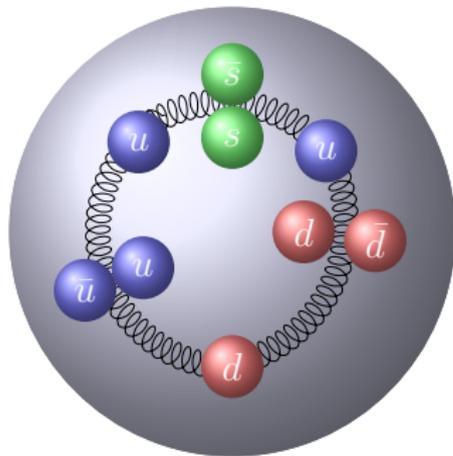


Weitere Experimente mit noch höherer Strahlenergie und größerer Genauigkeit ergeben das folgende Bild des Protons:

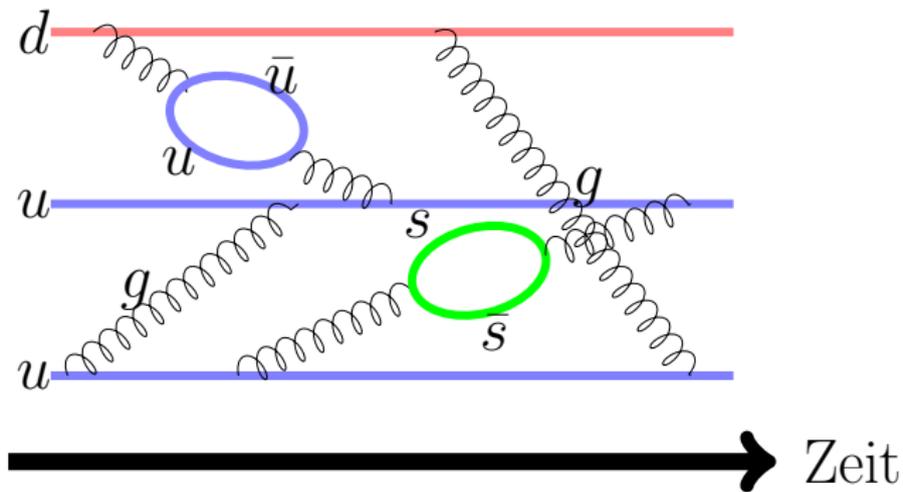
- Streuung am Proton wird als Streuung an **Quarks** interpretiert. **Quarks** haben drittelzahlige Ladungen:

	up	down	strange
Quark	u	d	s
Ladung/ e	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$
Antiquark	\bar{u}	\bar{d}	\bar{s}
Ladung/ e	$-2/3$	$1/3$	$1/3$

- **Quarks** werden durch **Gluonen** im Proton zusammengehalten
- **Gluonen** können **Quark-Antiquark-Paare** bilden.

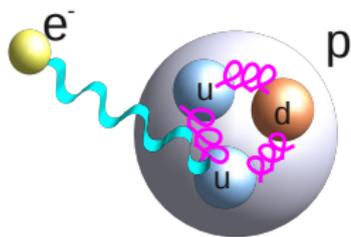


Dynamisches Bild des Protons:

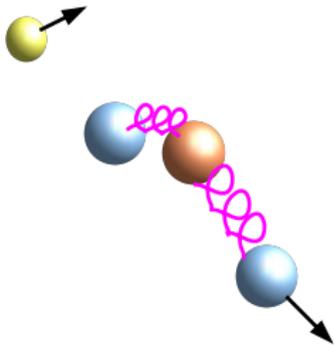
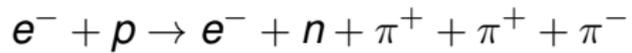


Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

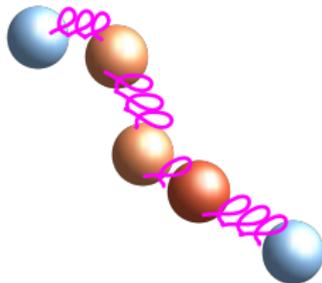


Streuung am Proton im Quarkmodell



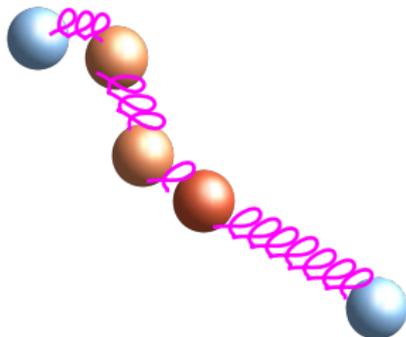
Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



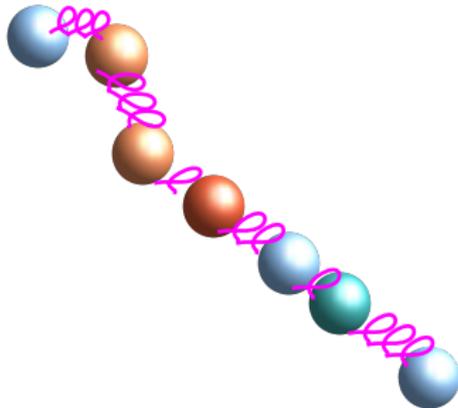
Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



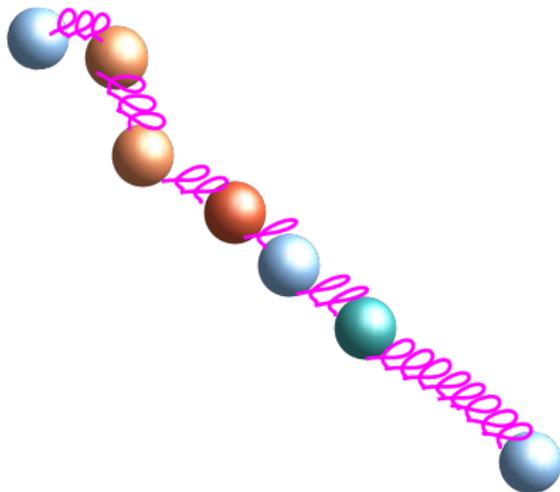
Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



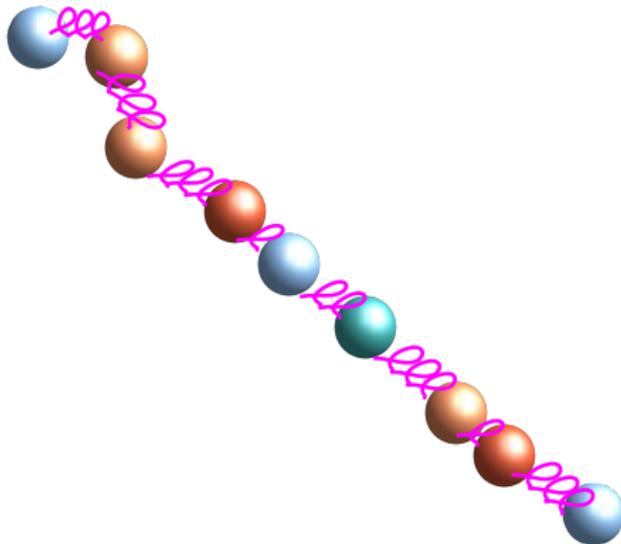
Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



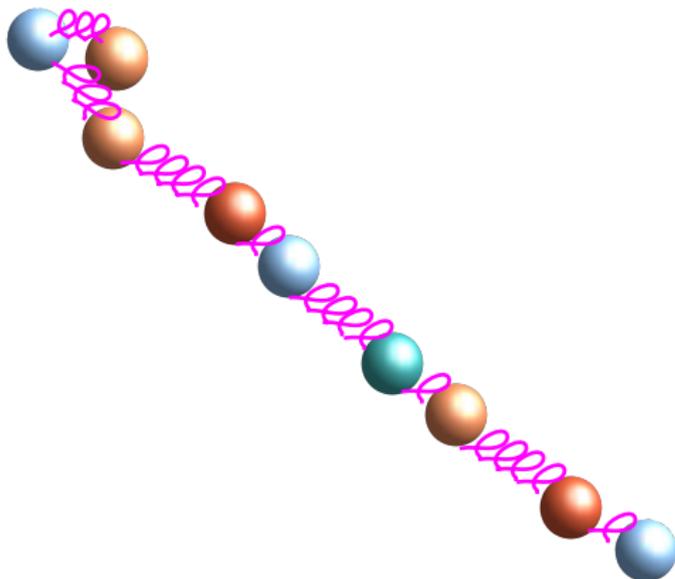
Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



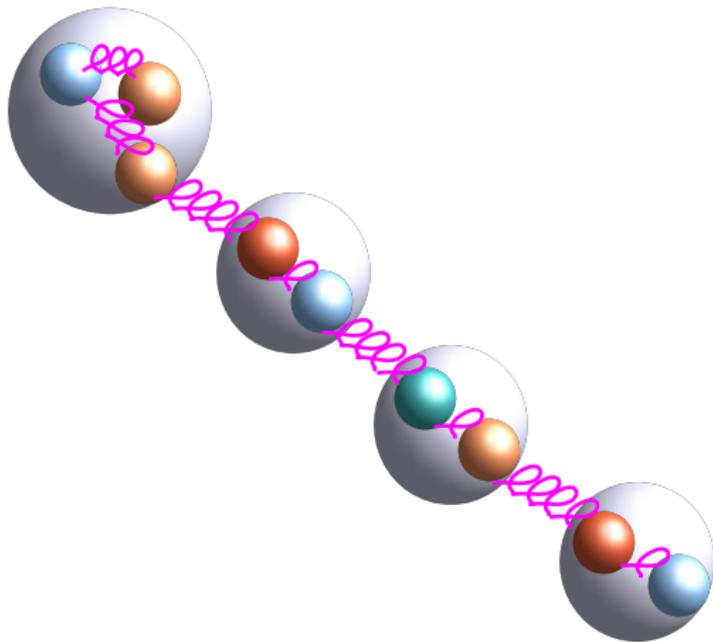
Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



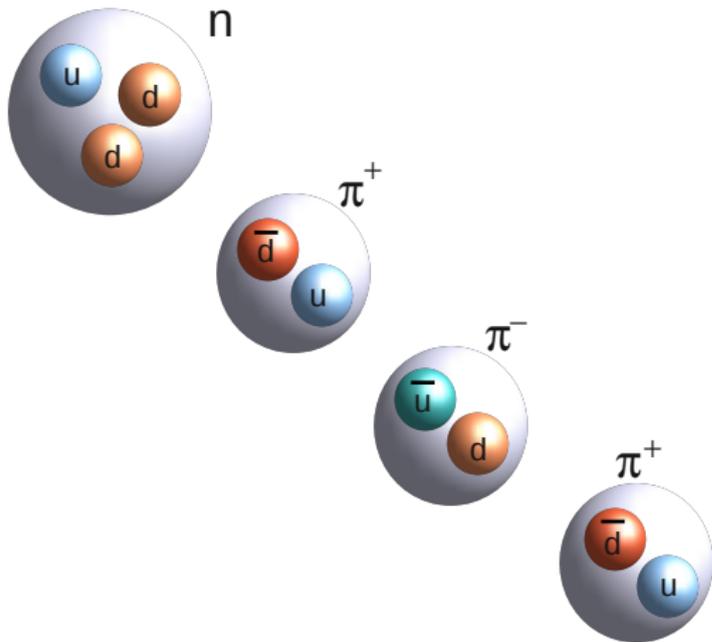
Streuung am Proton im Quarkmodell

$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



Streuung am Proton im Quarkmodell

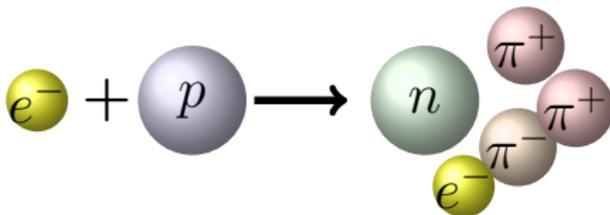
$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



Woraus besteht das Proton?



⇒ Uhr besteht aus 4 Zahnrädern, 9 Schrauben, 3 Federn,
...



Proton besteht **nicht** aus 1 Neutron, zwei positiv geladenen Pionen und einem negativ geladenen Pion

Woraus besteht das Proton?

- Bei Beschuss des Protons mit Projektilen immer höherer Energie entstehen neue Teilchen, die nicht Bestandteile des Protons sind ($E = mc^2$).
- Obwohl die Frage nach den Bestandteilen nicht so einfach zu beantworten ist, ist es doch gelungen Streuprozesse zu beschreiben.

Zur Entdeckung des Higgsbosons

(Reaktion am LHC: Proton + Proton \rightarrow Higgsboson + ...)

ist ein Verständnis der Protonstruktur unabdingbar.

Gibt es noch offene
Fragen?

Offene Fragen

- Protonradius
- Spinstruktur
- Elektrisches Dipolmoment

Spektrum

DER WISSENSCHAFT



ARTENBILDUNG

Buntbarsche:
Evolution
im Zeitraffer

APRIL 2014

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

4/14

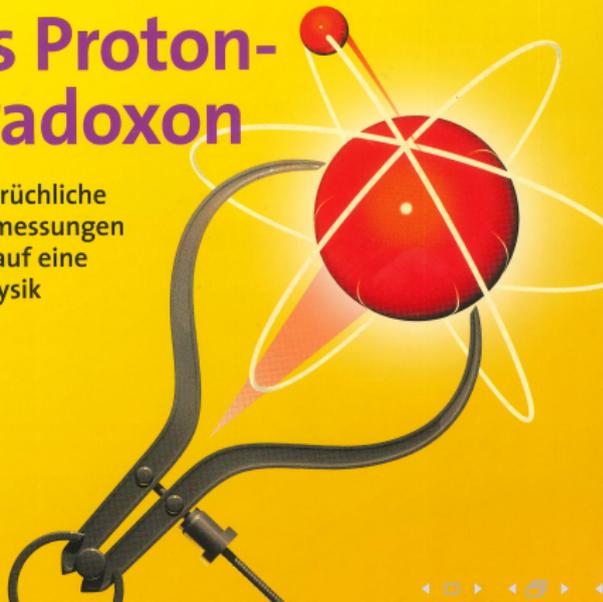
QUANTENTHEORIE
Ist die Natur
digital oder analog?

KREBSTHERAPIE
Mit Stromstößen
gegen Tumoren

ARCHÄOLOGIE
Die Erfindung
der Landwirtschaft

Das Proton- Paradoxon

Widersprüchliche
Größenmessungen
deuten auf eine
neue Physik



8,20 € (D/A) | 8,50 € (U) | 14,- \$E
DB179E



Spinstruktur des Protons

Proton	
Masse/kg	$1,7 \cdot 10^{-27}$
Ladung/e	+1

Spinstruktur des Protons

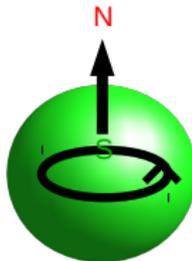
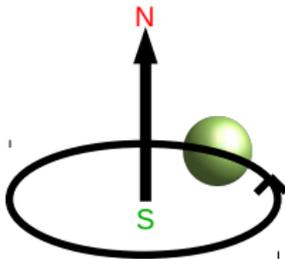
Proton	
Masse/kg	$1,7 \cdot 10^{-27}$
Ladung/e	+1
Für Elementarteilchen tritt noch eine eigentümliche Eigenschaft hinzu:	
Spin / \hbar	1/2

damit verbunden das magnetische Moment μ .

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ Plancksche Wirkungsquantum}$$

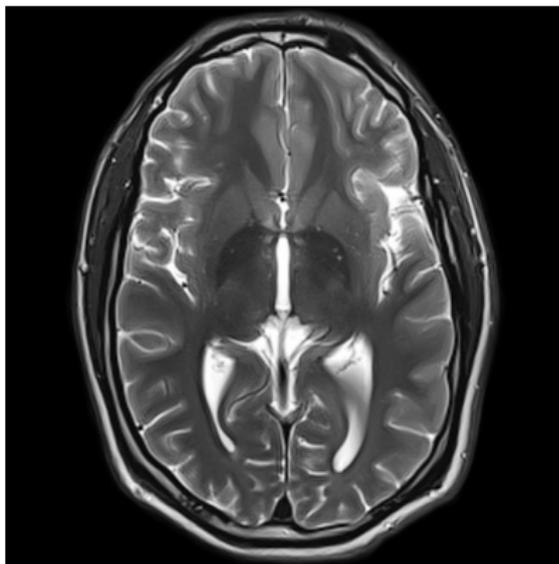
Was ist Spin?

- In der klassischen Physik ist mit einem Magnetfeld immer auch ein elektrischer Strom, d.h. Bewegung eines geladenen Teilchens verbunden.
- Ein Teilchen mit Spin erzeugt auch ein Magnetfeld, wenn es ruht.

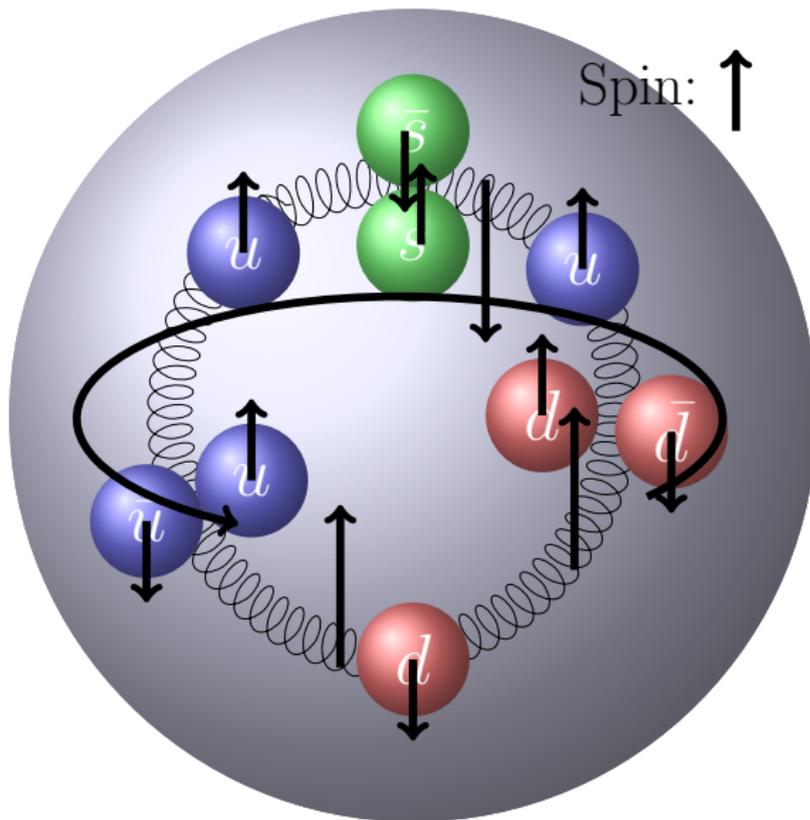


Kernspintomographie

Ausnutzen des Protonspins in
der Medizin:
Kernspintomographie
(Magnet-Resonanz-
Tomographie)



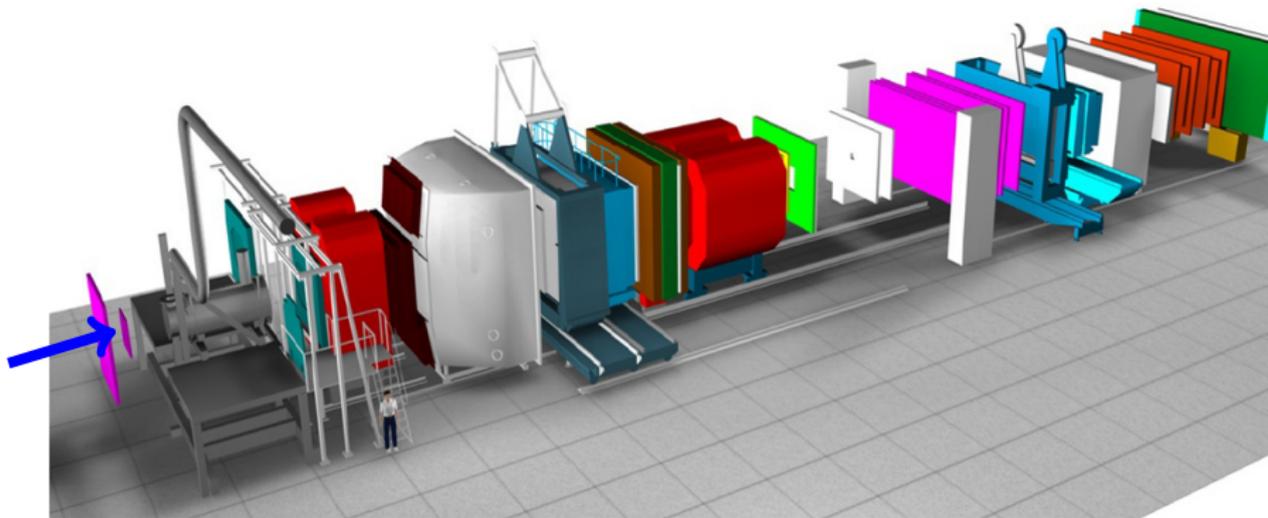
Proton Spin Puzzle



CERN

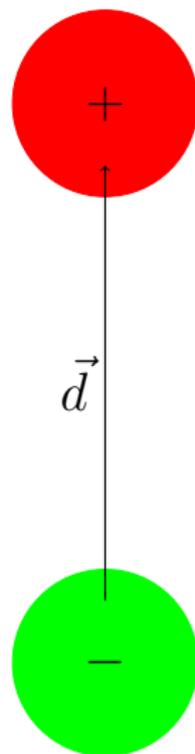


COMPASS Experiment am CERN



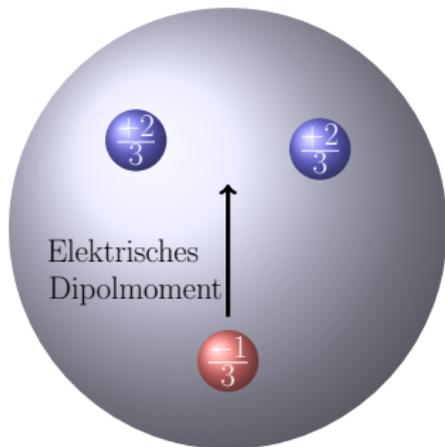
Elektrische Dipole ...

... entstehen immer dann, wenn positive und negative Ladungen getrennt sind.



Elektrisches Dipolmoment bei Elementarteilchen

- **Fragestellung:** Haben positive und negative Ladungen unterschiedliche Schwerpunkte im Proton?
- Wäre das Proton so groß wie die Erde, erwartet man einen Unterschied zwischen positivem und negativem Ladungsschwerpunkt, der der Dicke eines menschlichen Haares entspricht.
- Die Beantwortung dieser Frage hängt eng mit der Frage warum in unserem Universum keine Antimaterie mehr vorhanden ist zusammen.



COoler SYnchrotron COSY in Jülich



Zusammenfassung

- Was ist ein Proton?
Ein Bestandteil der Atomkerne und mit Neutron und Elektron Baustein der Materie.

Zusammenfassung

- Was ist ein Proton?
Ein Bestandteil der Atomkerne und mit Neutron und Elektron Baustein der Materie.
- Wie sieht das Innere des Protons aus?
Es hat eine komplexe, dynamische Struktur aus **Quarks** und **Gluonen**.

Zusammenfassung

- Was ist ein Proton?
Ein Bestandteil der Atomkerne und mit Neutron und Elektron Baustein der Materie.
- Wie sieht das Innere des Protons aus?
Es hat eine komplexe, dynamische Struktur aus **Quarks** und **Gluonen**.
- Gibt es noch offene Fragen?
Ja!

Zusammenfassung

- Was ist ein Proton?
Ein Bestandteil der Atomkerne und mit Neutron und Elektron Baustein der Materie.
- Wie sieht das Innere des Protons aus?
Es hat eine komplexe, dynamische Struktur aus **Quarks** und **Gluonen**.
- Gibt es noch offene Fragen?
Ja!

Dank an D. Eversmann und R. Tölle (FZ Jülich)

Spare

Auflösung \approx Wellenlänge

- Sichtbares Licht $\lambda = 400 - 700 \text{ nm} = 0.0004 - 0.0007 \text{ mm}$

Energie der Lichtteilchen 2-3 eV

(Umrechnungsfaktor $1 \text{ eV} = 5,8 \cdot 10^{-13} \text{ kWh}$, $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ GeV} = 1,000,000,000 \text{ eV}$)

- Für Teilchen gilt die de Broglie Beziehung:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{\text{Planckkonstante}}{\text{Impuls}}$$

Desto höher der Impuls, desto besser die Auflösung.

Strahlenergie/GeV \approx Impuls	Wellenlänge λ/fm	Verfügbarkeit von Beschleuniger Beschleuniger im Jahr
0.1	10	\approx 1950
1	1	\approx 1960
100	0.01	heute

Elektron-Proton-Streuung

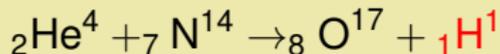
- Zur Entdeckung des Atomkerns benutzte Rutherford α -Teilchen geringer Energie.
- In den 1950-er Jahren standen dann Beschleuniger zur Verfügung, die Elektronen mit einer Energie von ≈ 200 MeV erzeugen konnte, so dass das Elektron in den Kern bzw. in das Proton eindringen konnte. (\Rightarrow Abtasten der Ladungsverteilung im Proton)
- Desto höher die Energie des Strahls, desto tiefer kann man in das Proton blicken, desto größer ist das Auflösungsvermögen

Elektron-Proton-Streuung

< 100 MeV	Proton sieht aus wie Punktteilchen mit Ladung $+e$ und anomalen magnetischem Moment
einige 100 MeV	elastische Streuung Elektron "dringt" in Proton ein \Rightarrow Messung der Ladungsverteilung
einige GeV	inelastische Streuung Proton wird durch Projektil in seine Bestandteile zerlegt

Entdeckung des Protons

Rutherford -Experiment 1919



Beschuss von Bor, Fluor, Neon, Natrium, ... mit Heliumkernen lieferten immer einen Wasserstoffkern im Endzustand

⇒ Wasserstoffkern ist etwas besonders, Bezeichnung **Proton**

Zeittafel

1911	Rutherfordversuch, Entdeckung des Atomkerns
1919	Entdeckung des Protons als leichtestem Atomkern
1933	Erste Hinweise auf innere Struktur des Protons
1932	Entdeckung des Neutron
1955	Bestimmung des Protonradius durch elastische Streuung
1963	Quarkmodell
1968	Identifizierung von Quarks als Bausteine des Protons
≈1975	Gluonen tragen wesentlich zum Protonimpuls bei
1971	Beginn zur Untersuchung der Spinstruktur

Magnetisches Moment

- Stärke des mit dem Spin verknüpften Magnetfeld: **magnetisches Moment** μ .
- Für ein elementares Teilchen mit Spin $1/2$ gilt $\mu = \frac{e\hbar}{2m}$

	Elektron	Proton
Spin $/\hbar$ (Eigendrehimpuls)	1/2	1/2
magnetisches Moment $/\frac{e\hbar}{2m}$	1	

Magnetisches Moment

- Stärke des mit dem Spin verknüpften Magnetfeld: **magnetisches Moment** μ .
- Für ein elementares Teilchen mit Spin 1/2 gilt $\mu = \frac{e\hbar}{2m}$

	Elektron	Proton
Spin / \hbar (Eigendrehimpuls)	1/2	1/2
magnetisches Moment / $\frac{e\hbar}{2m}$	1	2,79

Historisch war das “anomale magnetische” Moment von **2,79** der erste Hinweis auf die Substruktur des Protons.
(Otto Stern, 1933, Nobelpreis 1941)