

# Eine Reise in das Innere des Protons

Jörg Pretz

Physikalisches Institut, Universität Bonn



Antrittsvorlesung

28. Mai 2008

# Outline:

- 1 Was ist ein Proton?

# Outline:

- 1 Was ist ein Proton?
- 2 Wie sieht das Innere des Protons aus?

# Outline:

- 1 Was ist ein Proton?
- 2 Wie sieht das Innere des Protons aus?
- 3 Haben wir das Innere des Protons verstanden?

# Outline:

- 1 Was ist ein Proton?
- 2 Wie sieht das Innere des Protons aus?
- 3 Haben wir das Innere des Protons verstanden?
- 4 Zusammenfassung

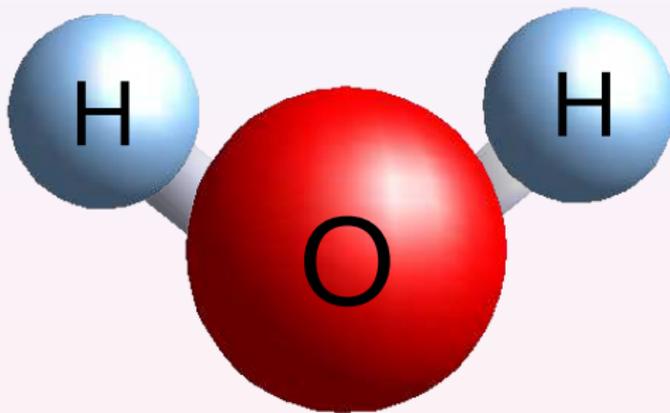
# Was ist ein Proton?

# Aufbau der Materie



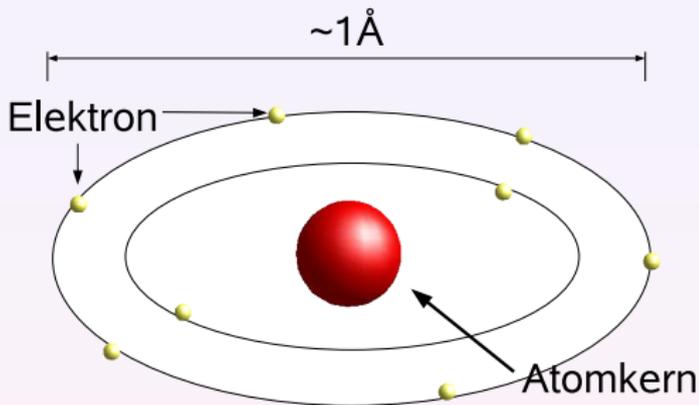
# Aufbau der Materie

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

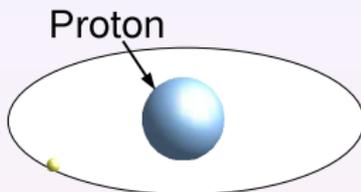


Wassermolekül

# Aufbau der Materie

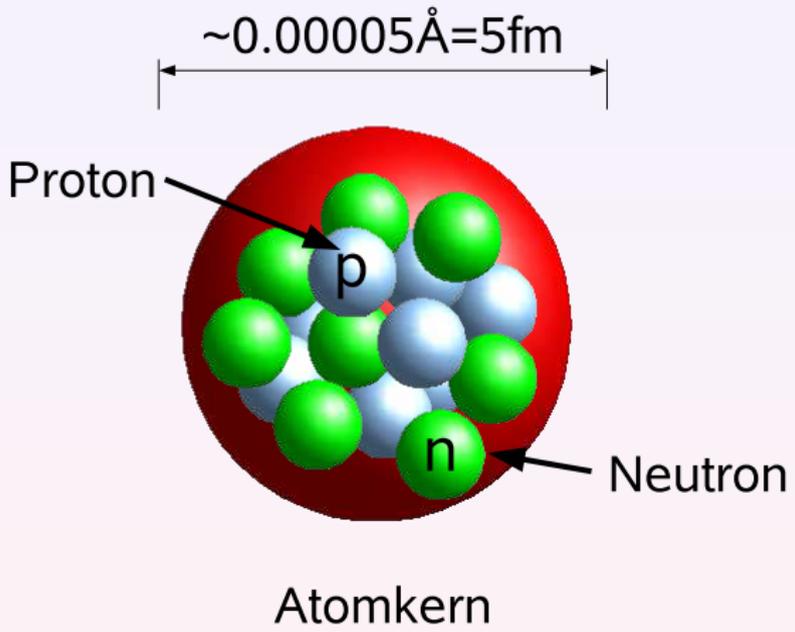


Sauerstoffatom



Wasserstoffatom

# Aufbau der Materie

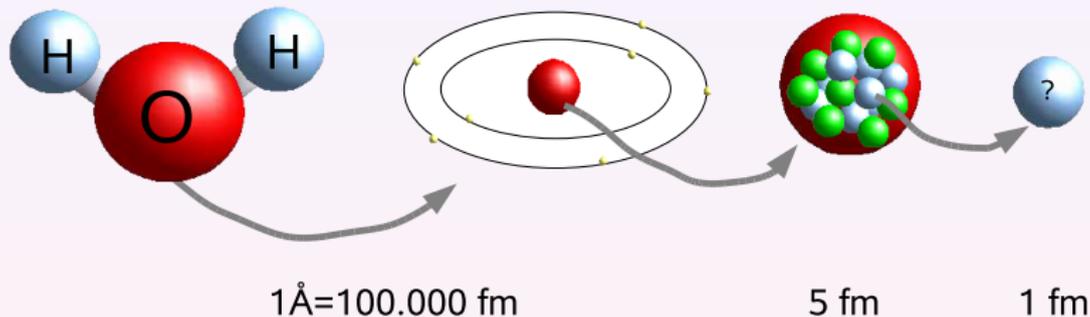




# Aufbau der Materie

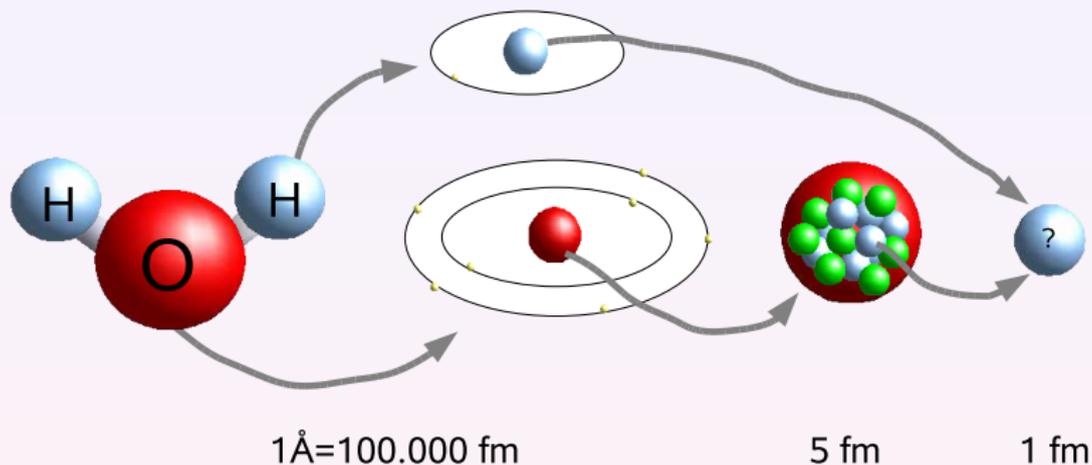


# Aufbau der Materie



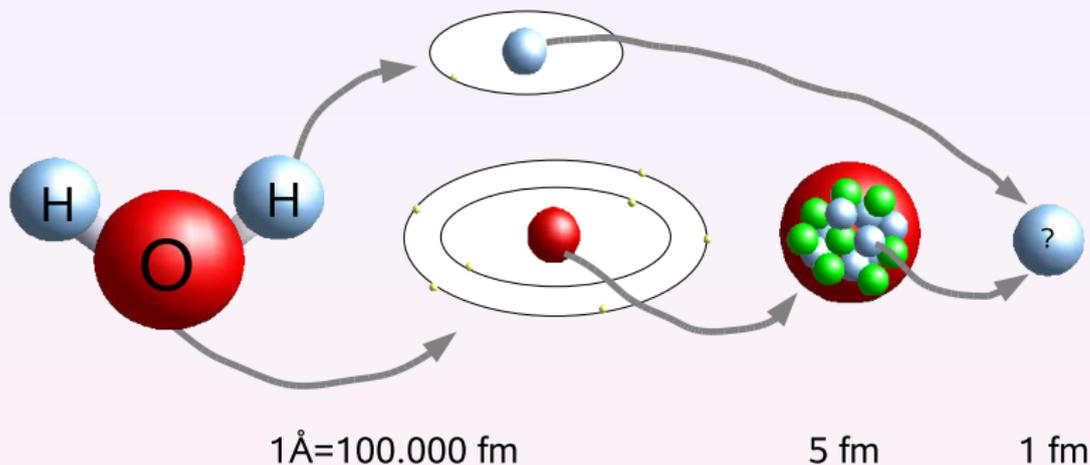
$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 0,000.000.000.000.001 \text{ m}$$

# Aufbau der Materie



$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 0,000.000.000.000.001 \text{ m}$$

# Aufbau der Materie



$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 0,000.000.000.000.001 \text{ m}$$

$$\text{Größenverhältnisse: } \frac{\text{Kern}}{\text{Atom}} \approx \frac{\text{Stecknadelkopf}(1\text{mm})}{\text{Mittelkreis auf Fußballfeld}(20\text{m})}$$

$$\text{Massenverhältnisse: } \frac{\text{Kern}}{\text{Atomhülle}} \approx \frac{\text{Kugel beim Kugelstoßen}(7277\text{g})}{\text{Tischtennisball}(2.7\text{g})}$$

# 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  $e$ ,  
 $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$



$4 \cdot 10^{24}$  Protonen



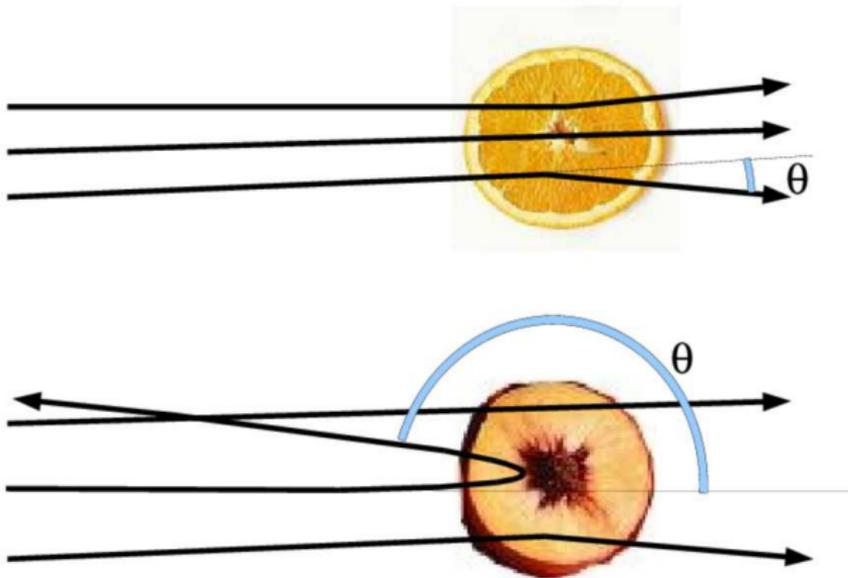
$5 \cdot 10^{22}$  e

# Wie 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:

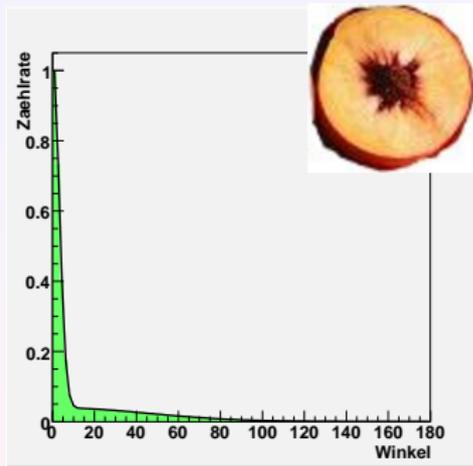
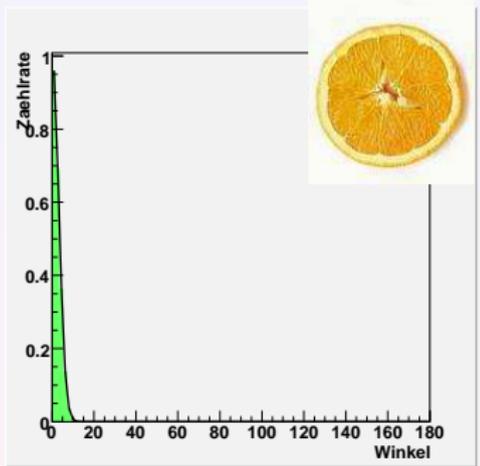


# Prinzip eines Streuexperiments

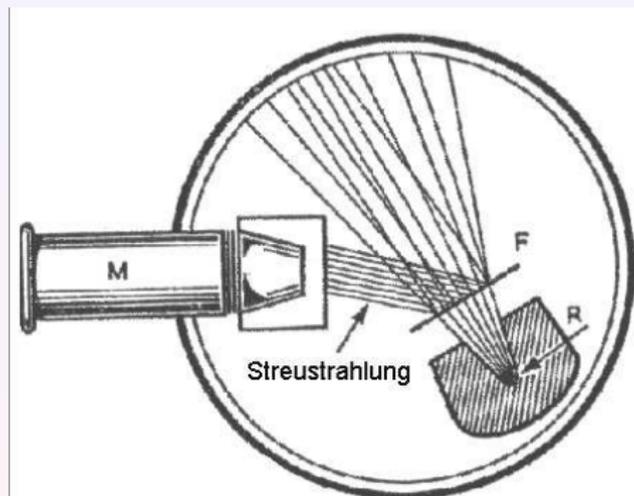
Schieße mit Projektilen auf zu untersuchendes Objekt.  
Die Winkelverteilung der gestreuten Projektile gibt Aufschluss  
über die innere Struktur des Objekts.

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

# Prinzip eines Streuexperimentes

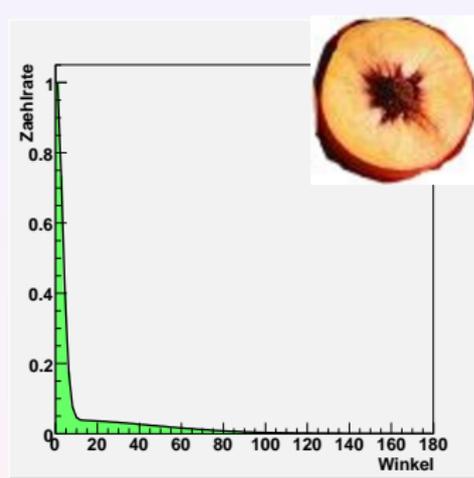
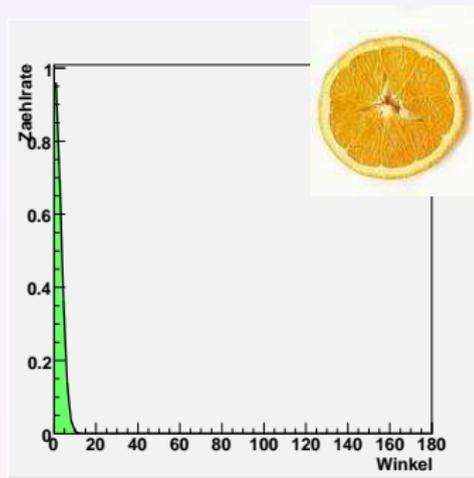


# Prinzip eines Streuexperiments



Historische Bemerkung: Rutherford-Experiment (1911):  
 $\alpha$ -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.

# Formfaktor

Statt Winkelverteilung direkt zu betrachten,  
definiere Formfaktor:

$$\text{Formfaktor} = \frac{\text{gemessene Winkelverteilung}}{\text{Erwartung für Punktteilchen}}$$

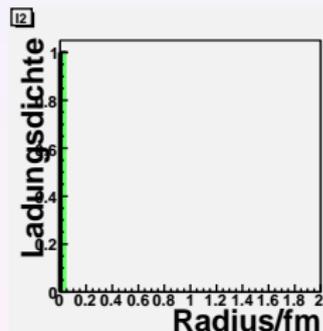
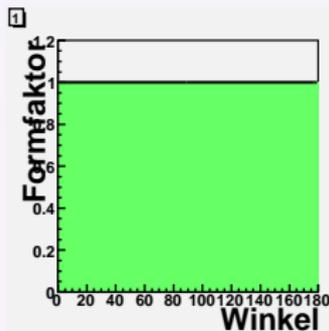
- **Formfaktor** gibt an, wie stark die Ausdehnung eines Teilchens von der Punktförmigkeit abweicht.

# Formfaktor

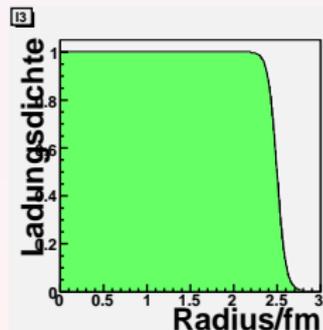
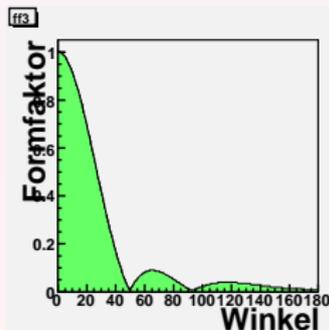
Formfaktor

Räumliche Ausdehnung

Beispiel



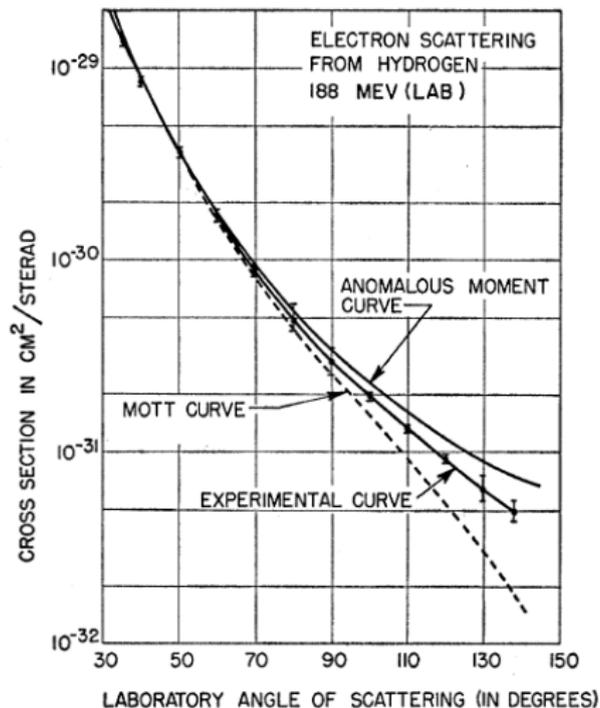
## Elektron



## Atomkern

# Wie sieht der Formfaktor des Protons aus?

Hofstadter 1955 (Nobelpreis 1961): Elektron-Proton-Streuung

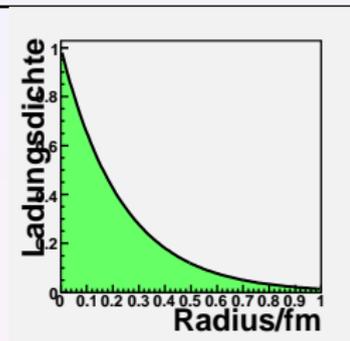
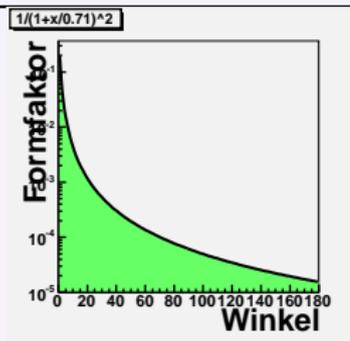




# Räumliche Ausdehnung des Protons

Formfaktor

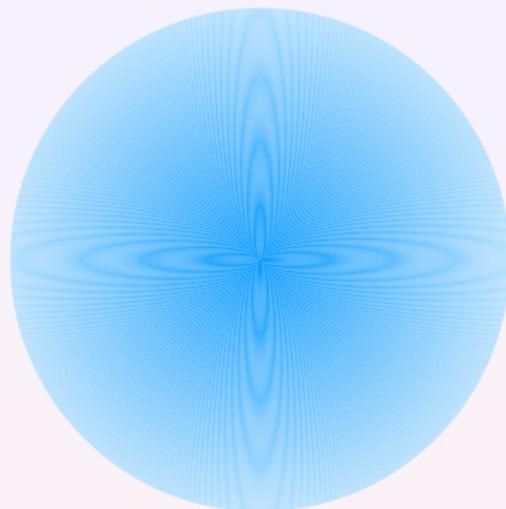
Räumliche Ausdehnung



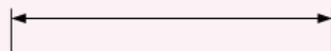
# Proton

# Räumliche Ausdehnung des Protons

- Proton hat endliche Ausdehnung.
- Radius  $\approx 1$  fm
- Ladung ist eher im Zentrum konzentriert.
- Rand ist nicht genau definiert.

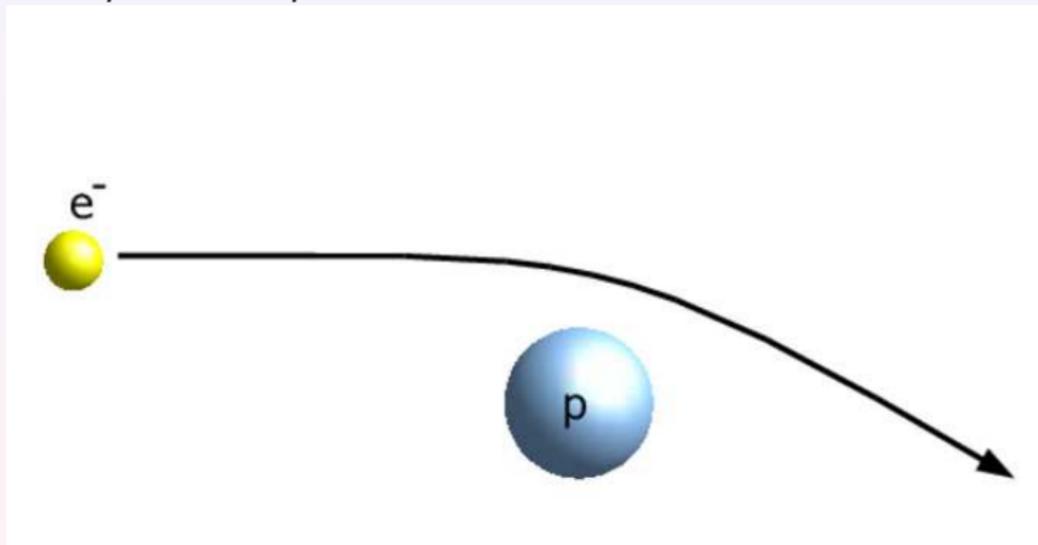


1 fm



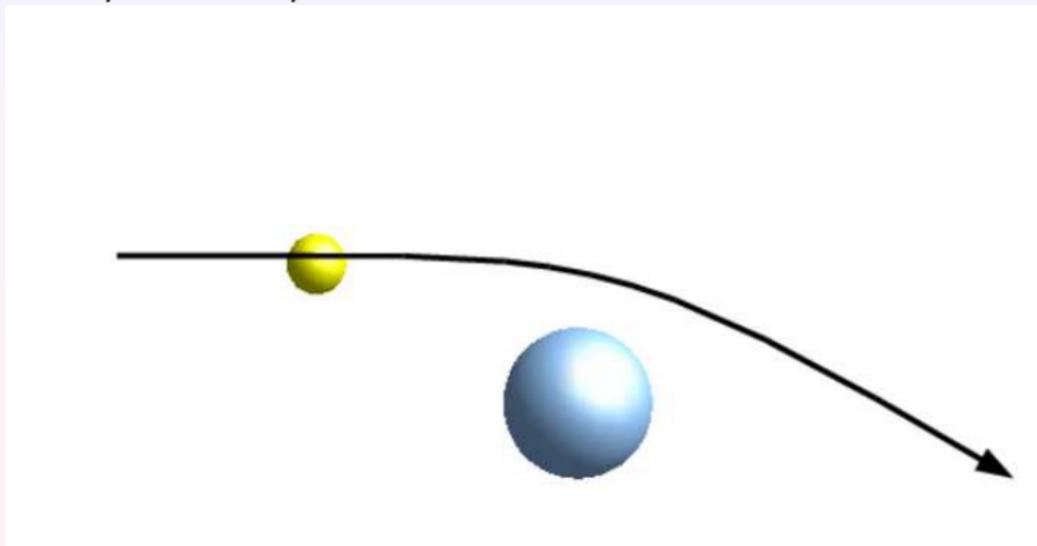
# Elastische ↔ inelastische Streuung

Bisher **elastische Streuung**:



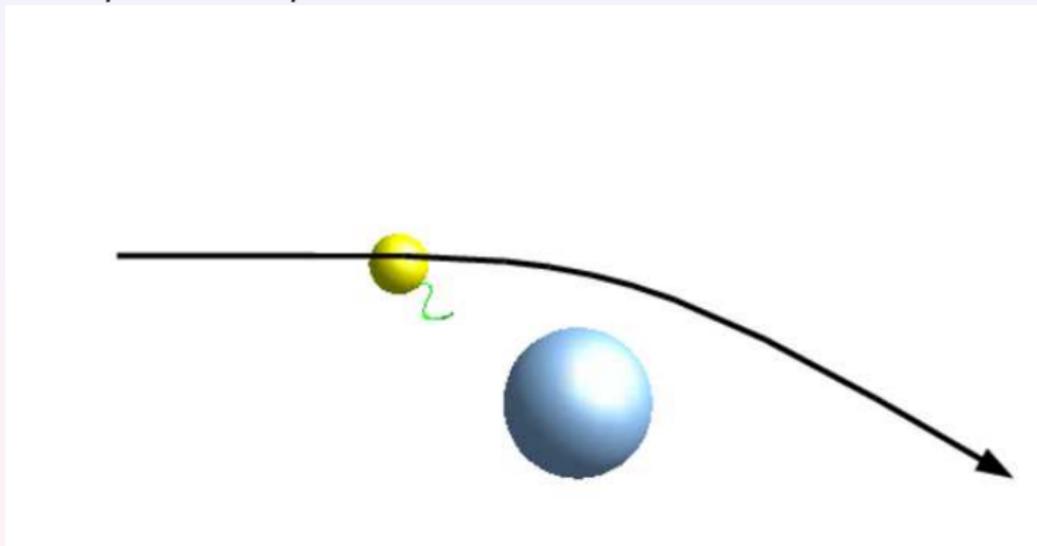
# Elastische ↔ inelastische Streuung

Bisher **elastische Streuung**:



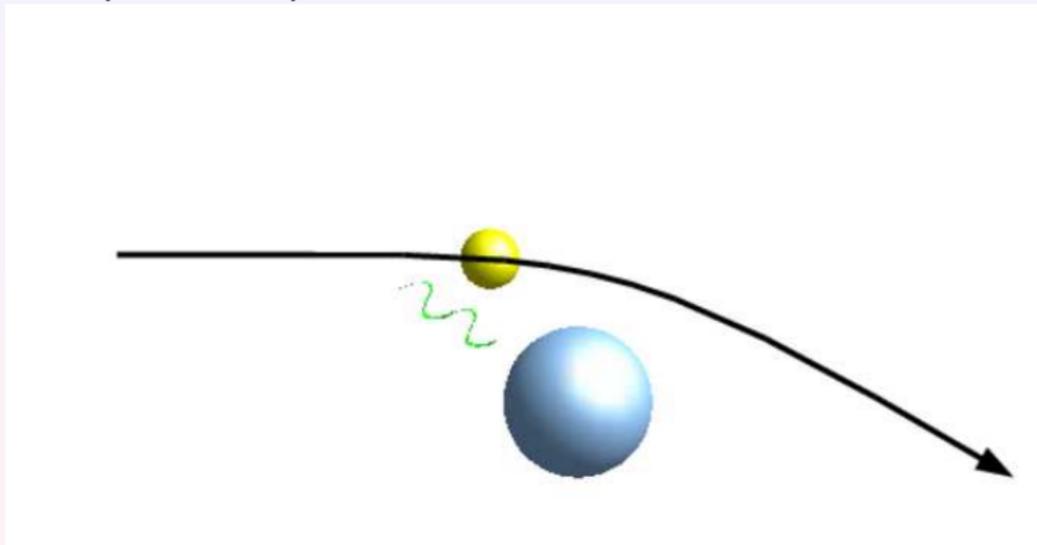
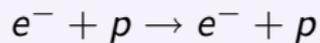
# Elastische ↔ inelastische Streuung

Bisher **elastische Streuung**:



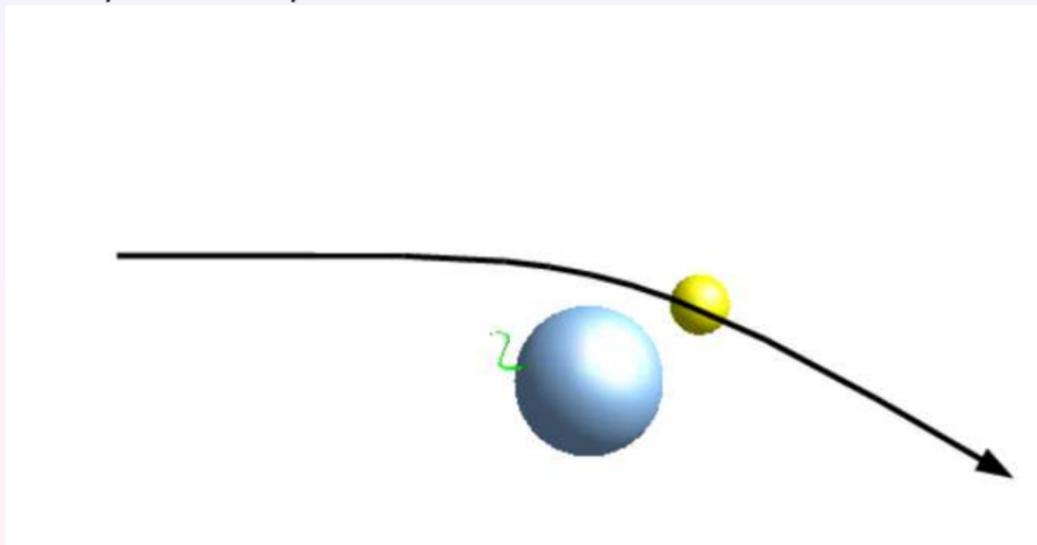
# Elastische ↔ inelastische Streuung

Bisher **elastische Streuung**:



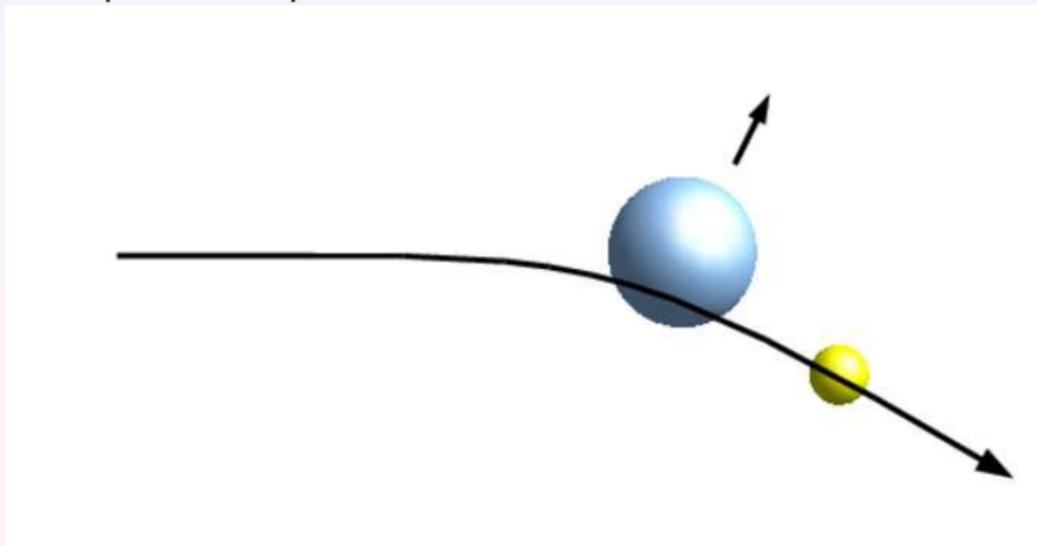
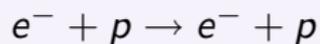
# Elastische ↔ inelastische Streuung

Bisher **elastische Streuung**:



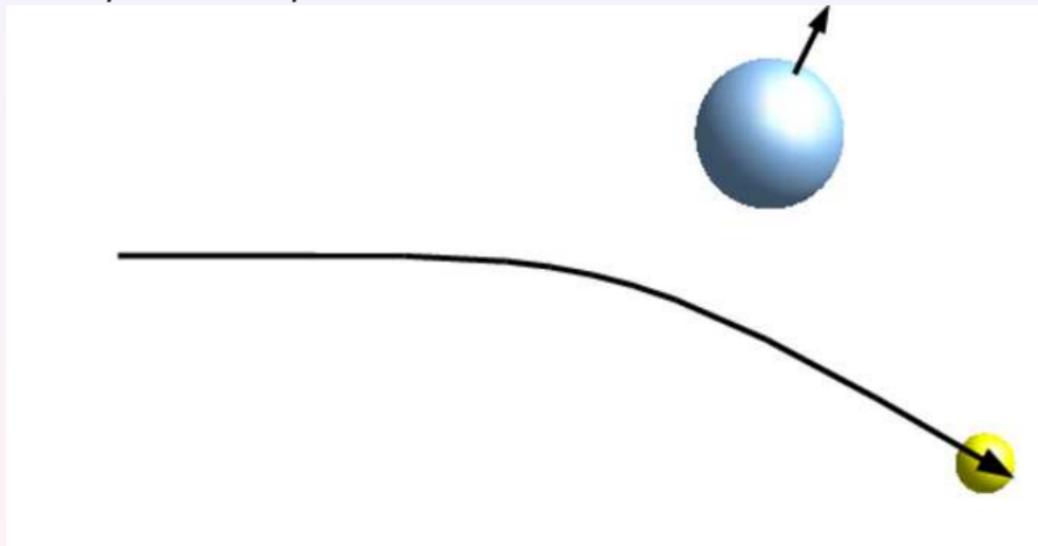
# Elastische ↔ inelastische Streuung

Bisher **elastische Streuung**:



# Elastische ↔ inelastische Streuung

Bisher **elastische Streuung**:



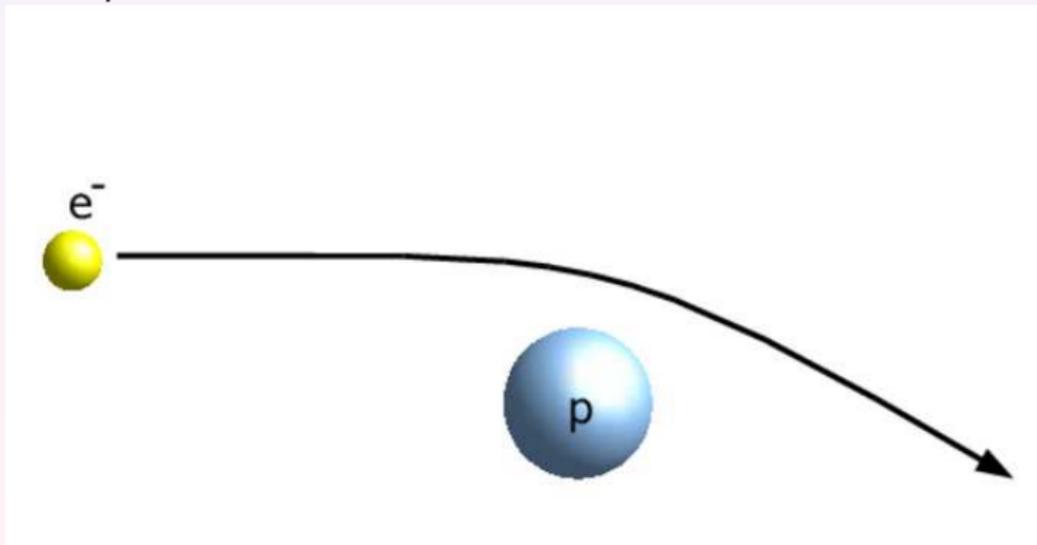
# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

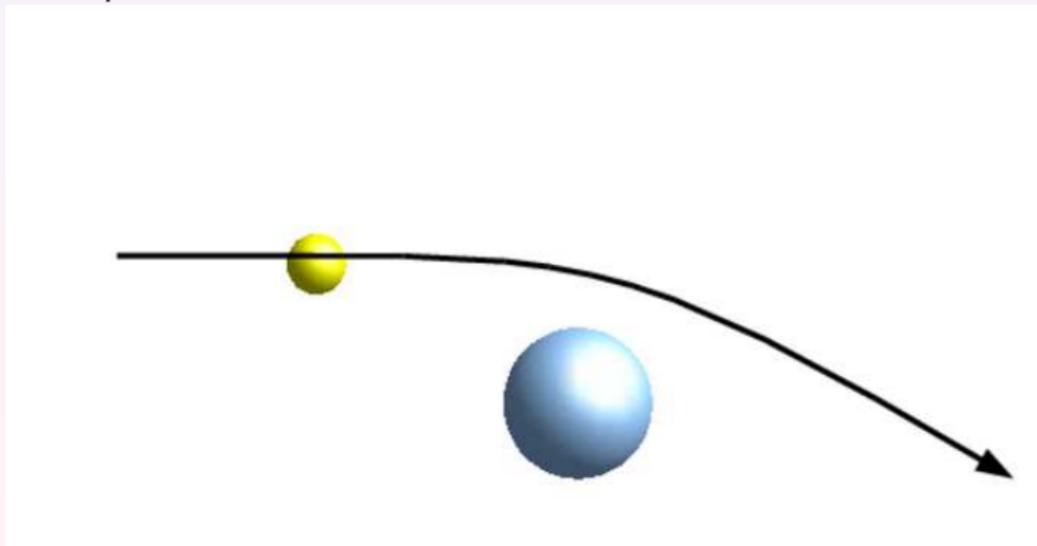
Das Proton bricht auseinander (**Inelastische Streuung**):



# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

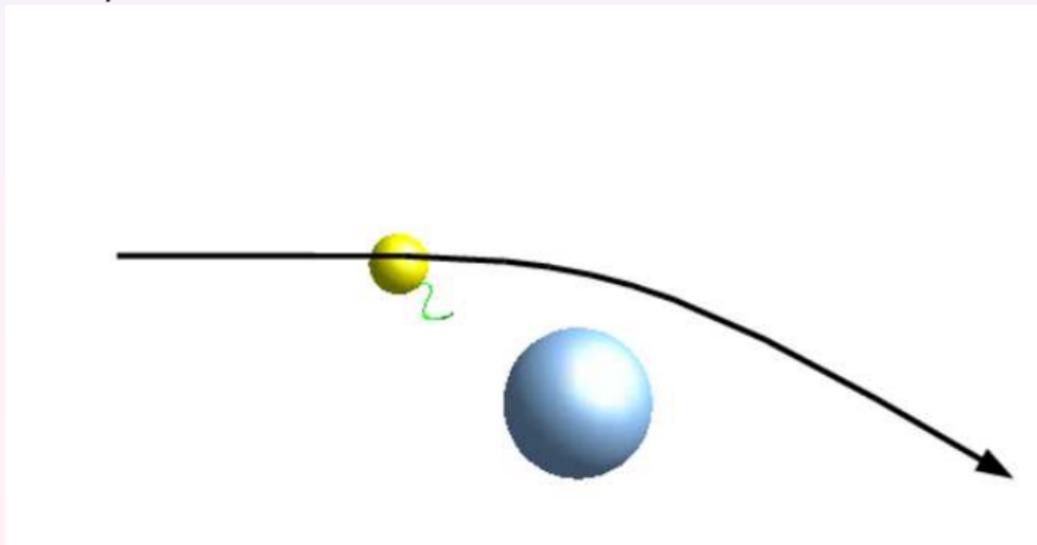
Das Proton bricht auseinander (**Inelastische Streuung**):



# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

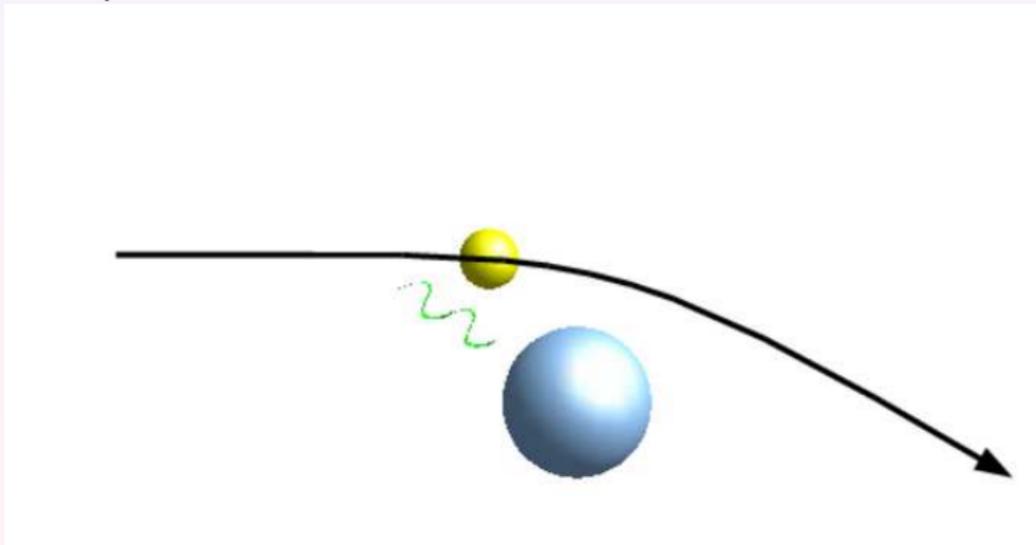
Das Proton bricht auseinander (**Inelastische Streuung**):



# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

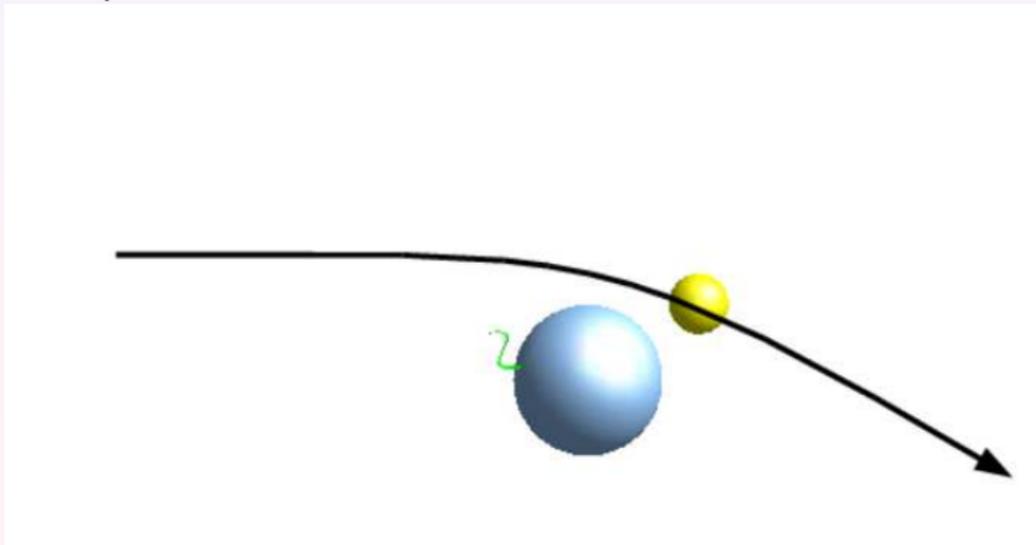
Das Proton bricht auseinander (**Inelastische Streuung**):



# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

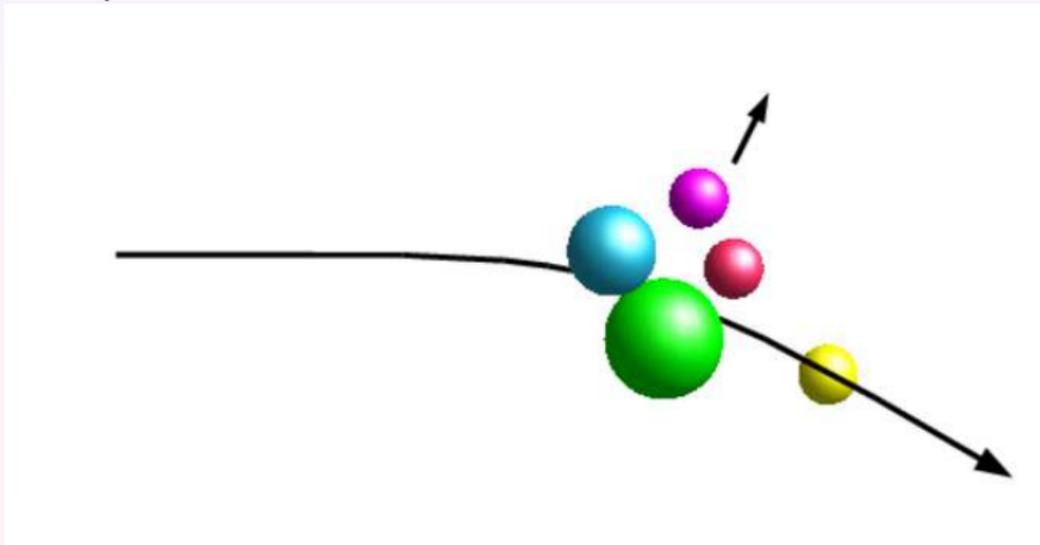
Das Proton bricht auseinander (**Inelastische Streuung**):



# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

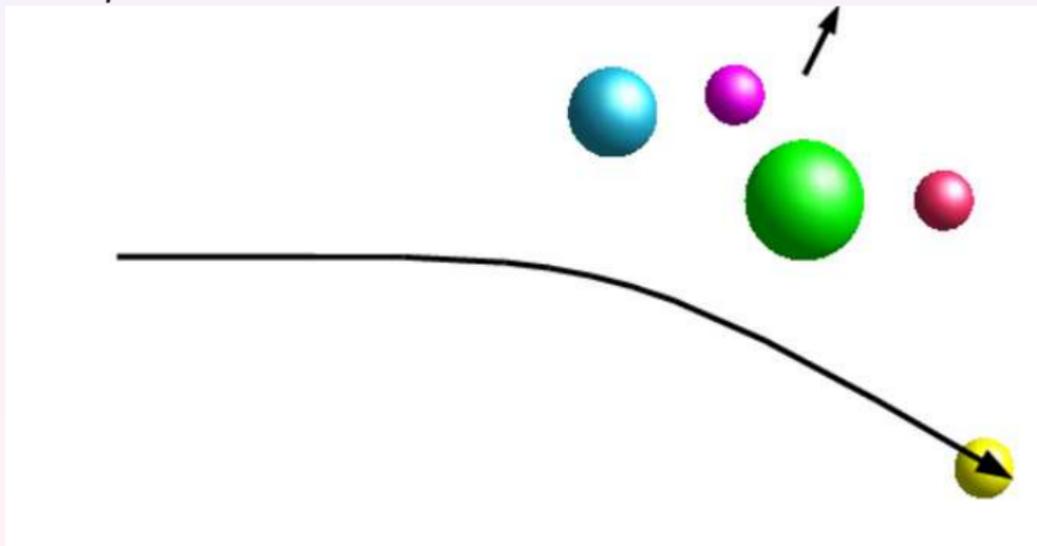
Das Proton bricht auseinander (**Inelastische Streuung**):



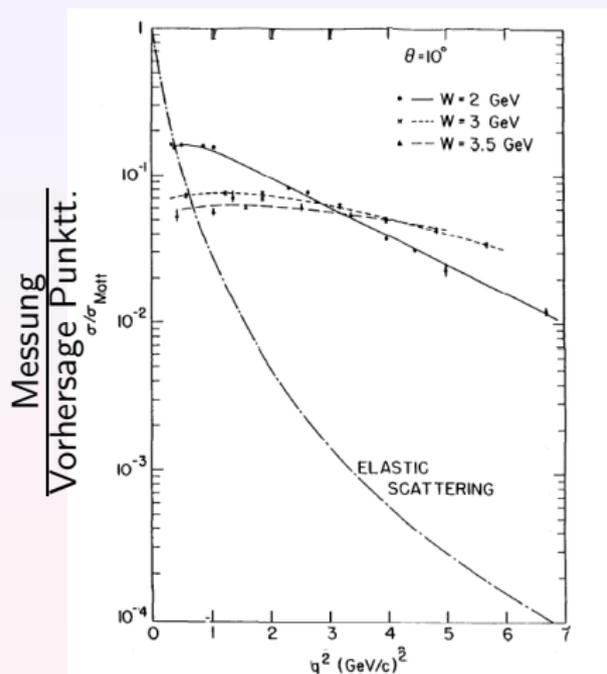
# Elastische ↔ inelastische Streuung

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

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



# Verteilung bei (tief)inelastischer Streuung



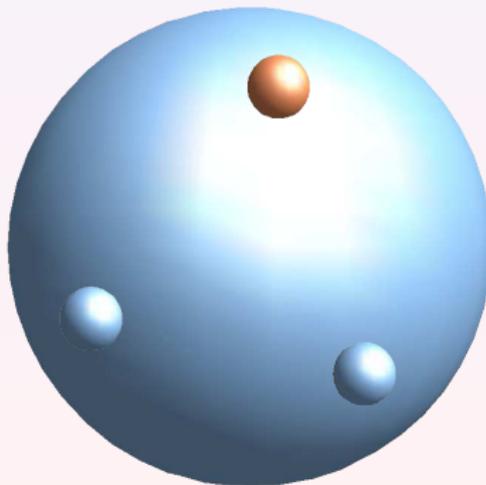
Messung  
Vorhersage Punktt.  $\approx$  konst.

⇒ Hinweise auf Streuung  
an punktförmigen  
Teilchen im Proton!

(J. Friedman, H. Kendall, R. Taylor, Ende 1960er, Nobelpreis 1990)

# Tiefinelastische Streuung

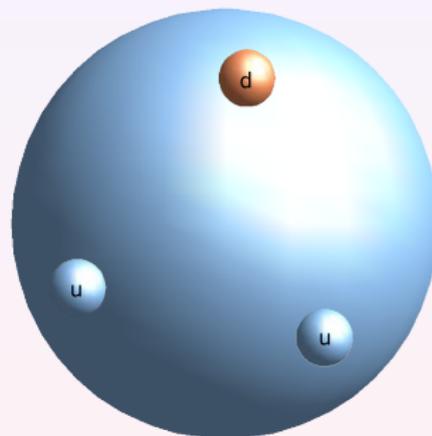
Aus dieser Beobachtung ( $\frac{\text{Messung}}{\text{Vorhersage Punkt.}} \approx \text{konst.}$ )  
lässt sich inelastische Streuung auffassen  
als elastische Streuung an Punktteilchen im Proton.



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:

Quark	u	d
Ladung/e	$2/3$	$-1/3$

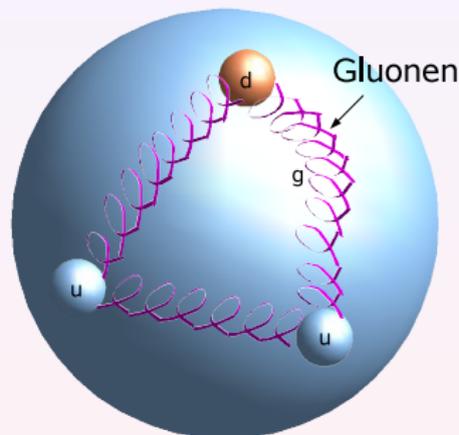


Weitere Experimente mit noch höherer Strahlenergie und größerer Genauigkeit ergeben das folgende Bild des Protons:

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

Quark	u	d
Ladung/e	2/3	-1/3

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

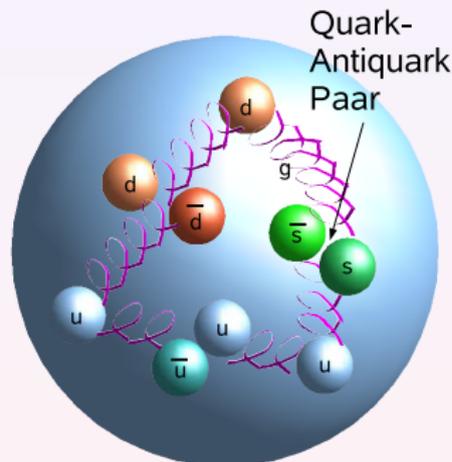


Weitere Experimente mit noch höherer Strahlenergie und größerer Genauigkeit ergeben das folgende Bild des Protons:

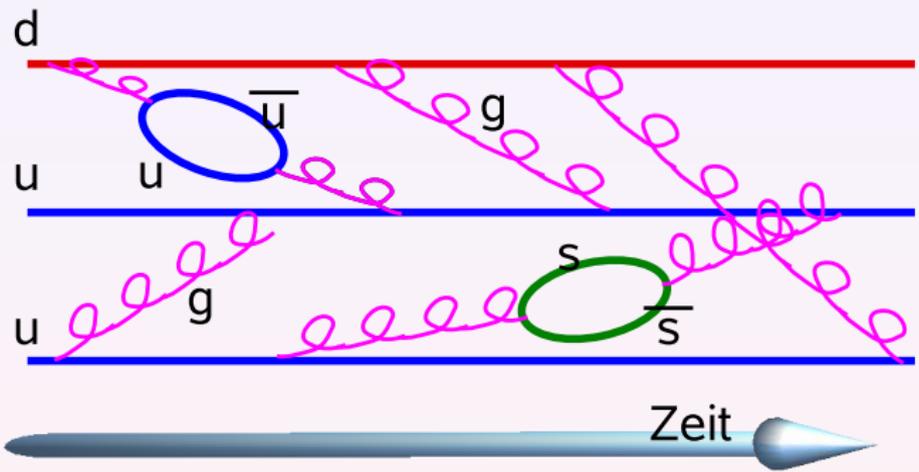
- Streuung am Proton wird als Streuung an **Quarks** interpretiert. **Quarks** haben drittelzahlige Ladungen:

Quark	u	d
Ladung/e	2/3	-1/3

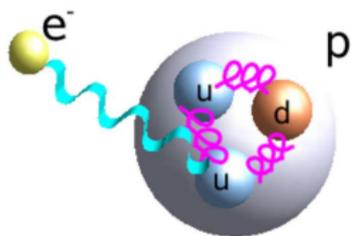
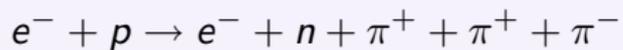
- **Quarks** werden durch **Gluonen** im Proton zusammengehalten
- **Gluonen** können **Quark-Antiquark-Paare** bilden.



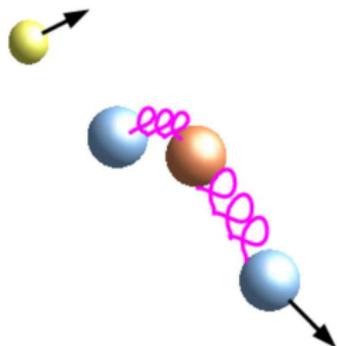
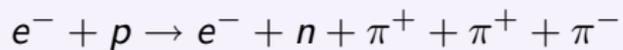
# Dynamisches Bild des Protons:



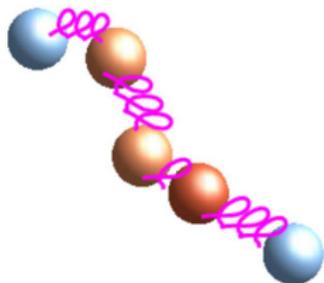
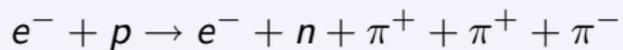
# Streuung am Proton im Quarkmodell



# Streuung am Proton im Quarkmodell

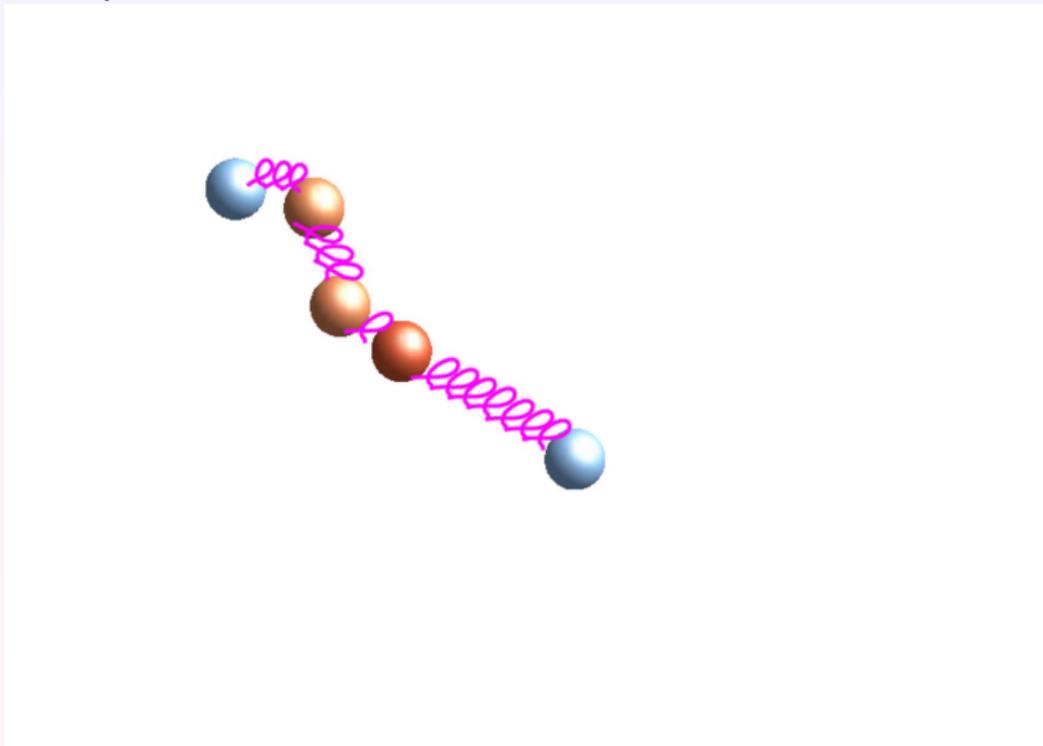


# Streuung am Proton im Quarkmodell

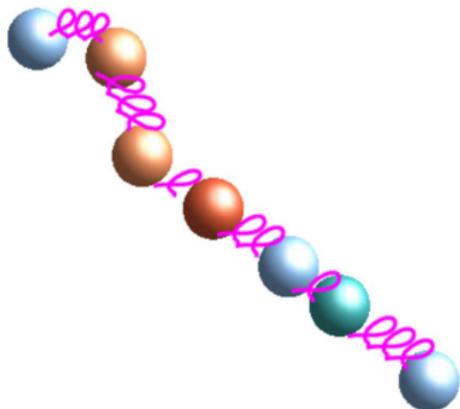
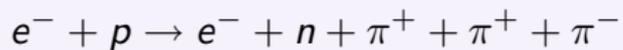


# Streuung am Proton im Quarkmodell

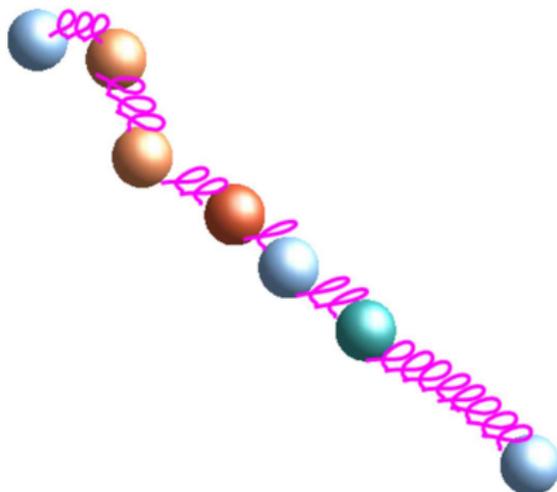
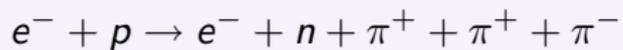
$$e^- + p \rightarrow e^- + n + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



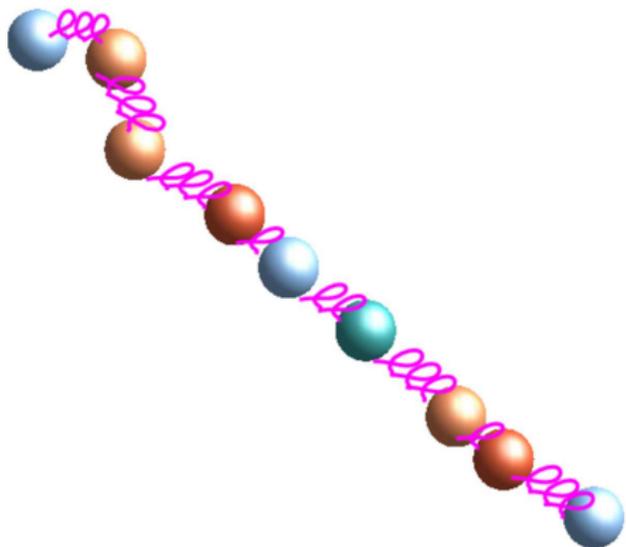
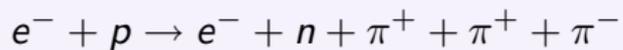
# Streuung am Proton im Quarkmodell



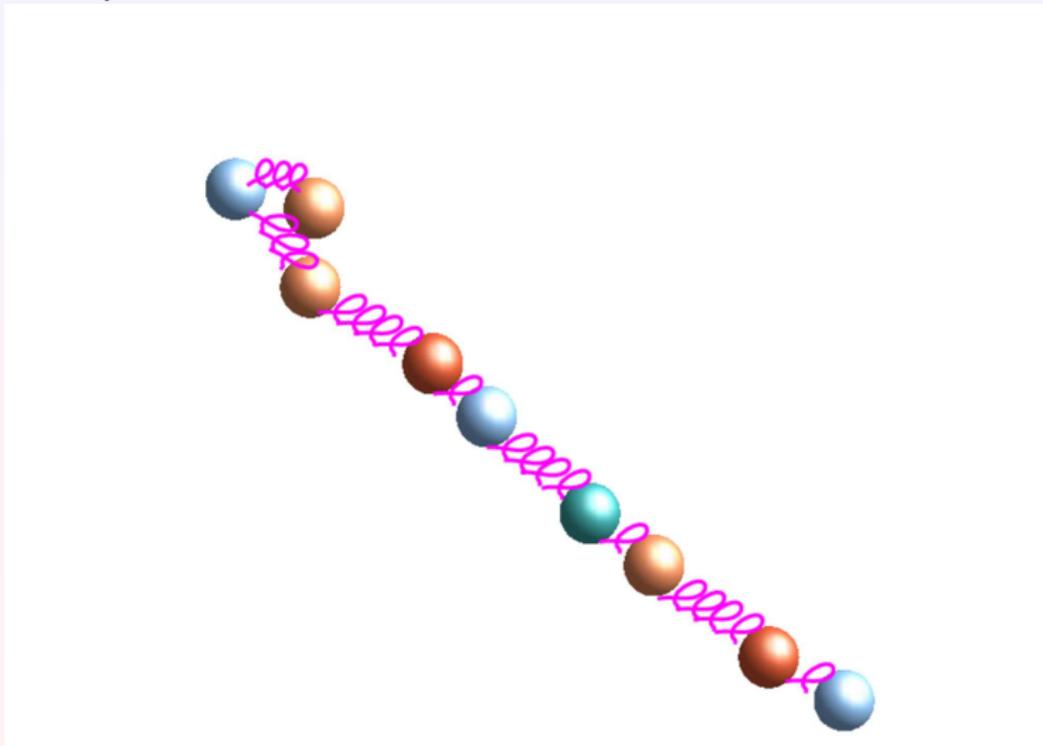
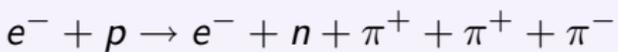
# Streuung am Proton im Quarkmodell



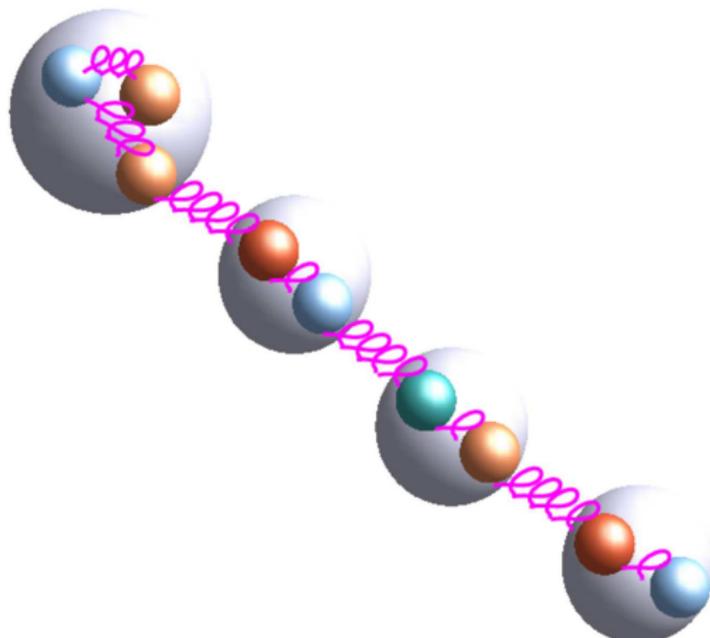
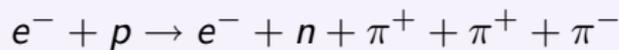
# Streuung am Proton im Quarkmodell



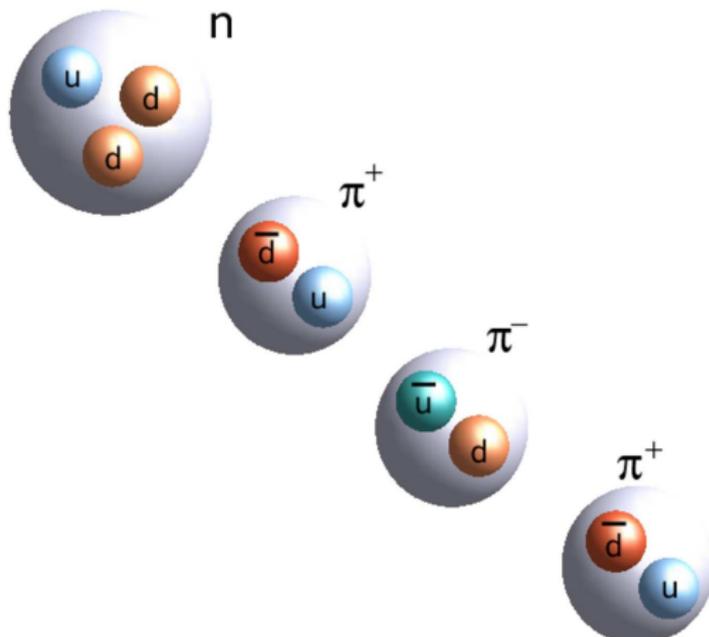
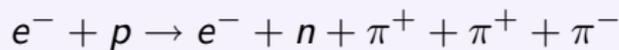
# Streuung am Proton im Quarkmodell



# Streuung am Proton im Quarkmodell



# Streuung am Proton im Quarkmodell



Haben wir das Innere  
des Protons verstanden?

Haben wir das Innere  
des Protons verstanden?  
Nein!

# Eigenschaften des Protons

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

# Eigenschaften des Protons

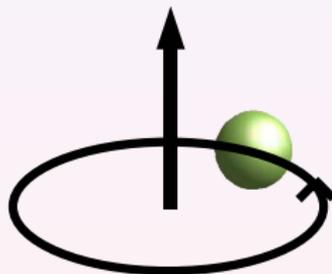
	Proton
Masse/kg	$1,7 \cdot 10^{-27}$
Ladung/e	+1
Für mikroskopische Teilchen tritt noch eine eigentümliche Eigenschaft hinzu:	
Spin / $\hbar$ (Eigendrehimpuls)	1/2

- Elektronen, Neutronen, Quarks, ... haben ebenfalls einen Spin von  $1/2 \hbar$

$\hbar$ : Plancksches Wirkungsquantum

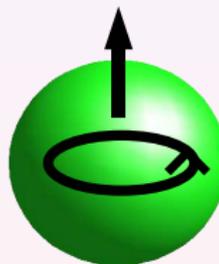
# Was ist Spin?

- 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.



Bahndrehimpuls

$$n \hbar$$



Spin (Eigendrehimpuls)

$$n \frac{\hbar}{2}$$

# Magnetisches Moment

- Stärke des mit dem Spin verknüpften Magnetfeld:  
**magnetisches Moment**  $\mu$  .
- 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

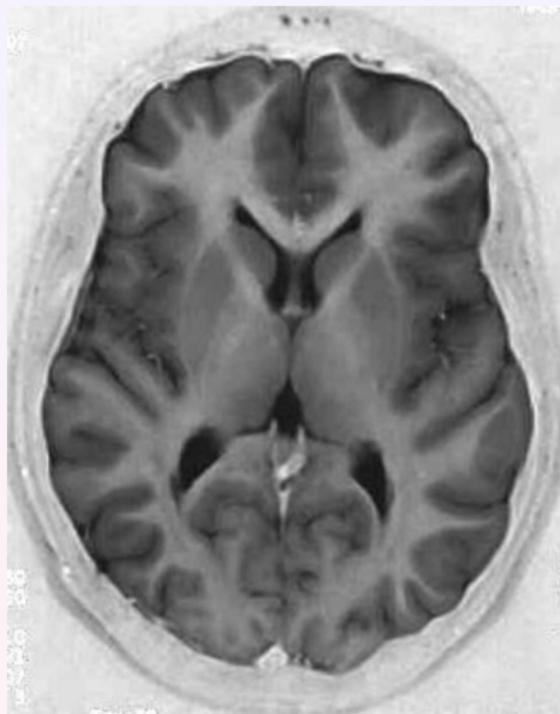
- Stärke des mit dem Spin verknüpften Magnetfeld:  
**magnetisches Moment**  $\mu$  .
- Für ein elementares Teilchen mit Spin  $1/2$  gilt  $\mu = \frac{e\hbar}{2m}$

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

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

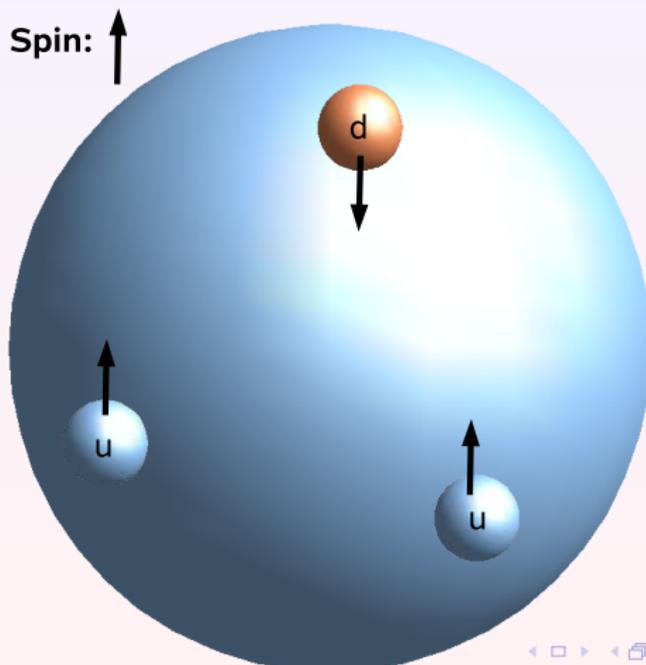
# Kernspintomographie

Ausnutzen des Spins in der  
Medizin:  
Kernspintomografie  
(Magnet-Resonanz-  
Tomographie)



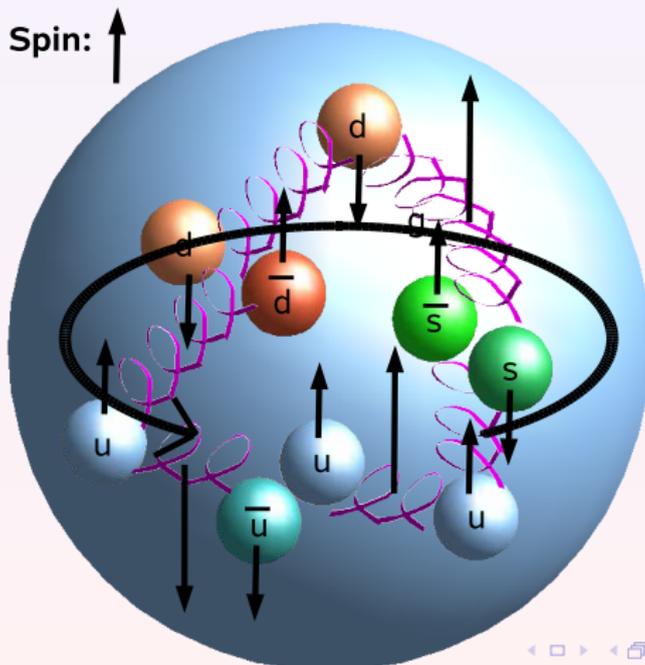
# Wie setzt sich der Spin des Protons aus seinen Bestandteilen zusammen?

Naives Bild:



# Wie setzt sich der Spin des Protons aus seinen Bestandteilen zusammen?

Realistischeres Bild:



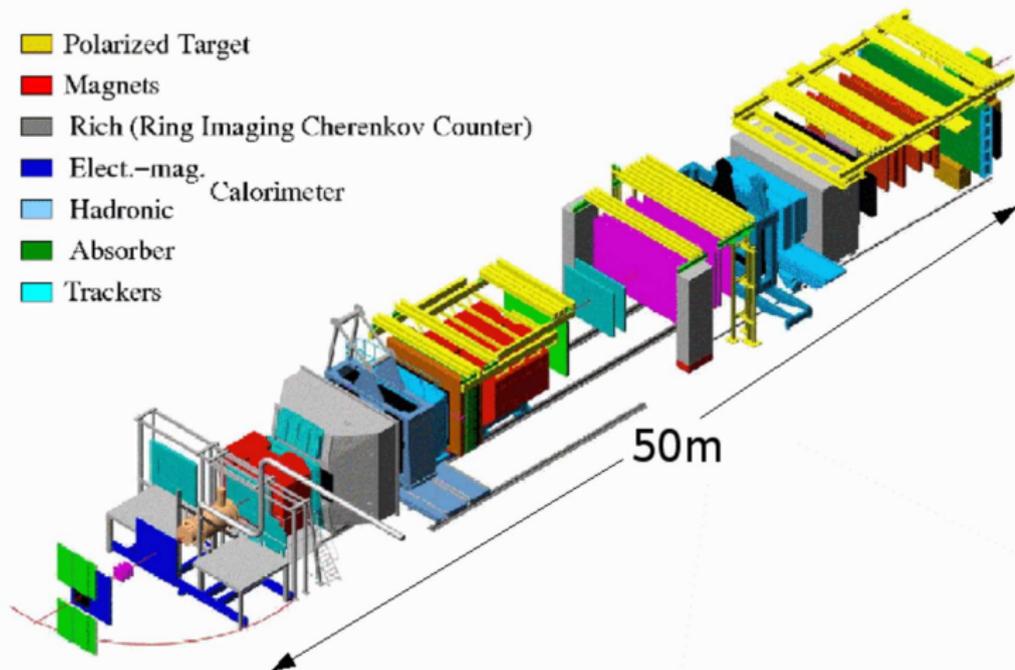
# Beispiel eines Experimentes, um all dies zu verstehen:

COMPASS- Experiment am europäischen  
Forschungszentrum CERN



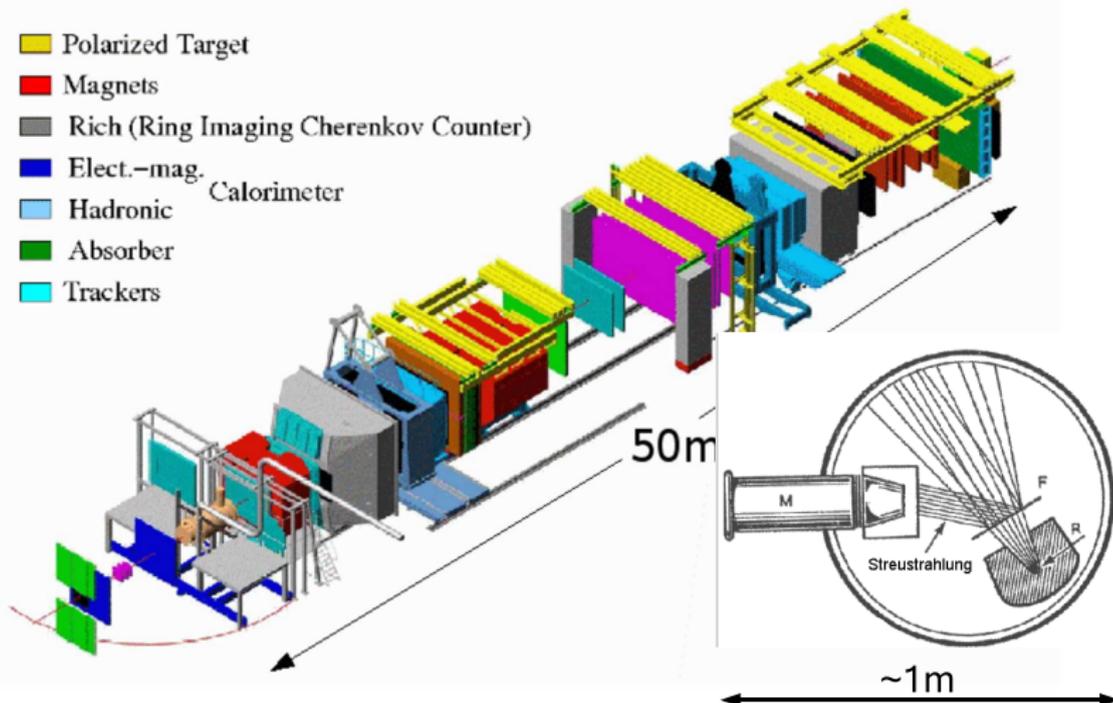


# COMPASS Experiment

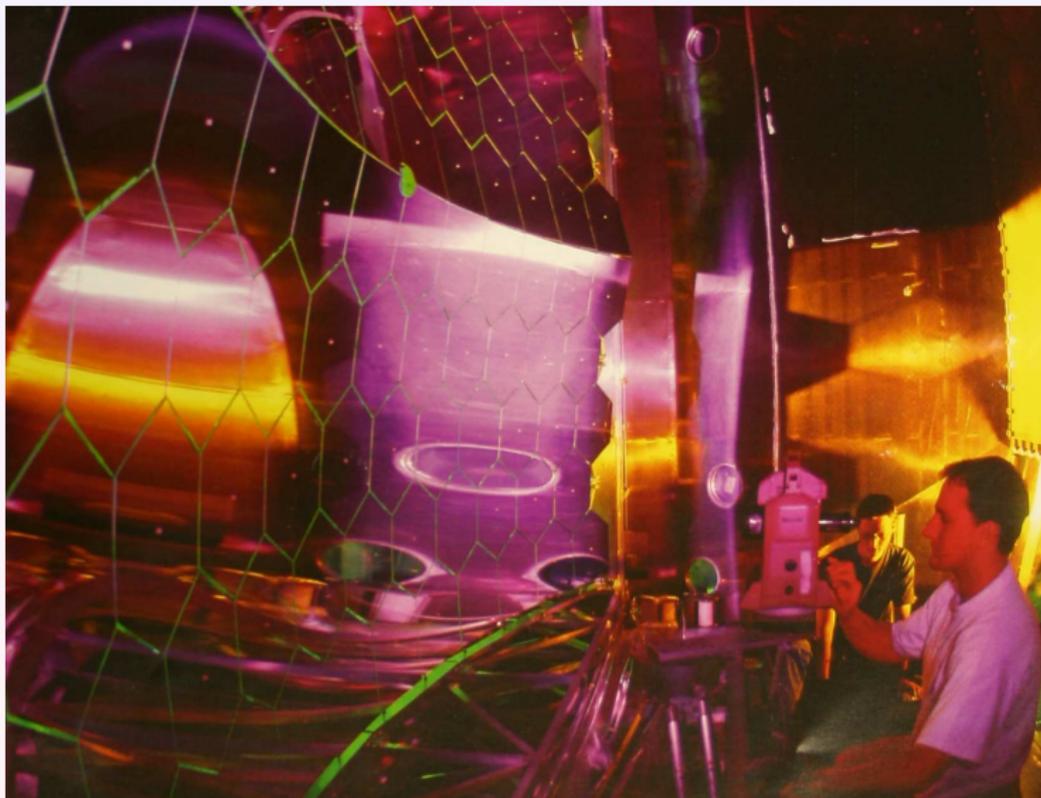


# COMPASS Experiment

- Polarized Target
- Magnets
- Rich (Ring Imaging Cherenkov Counter)
- Elect.-mag. Calorimeter
- Hadronic
- Absorber
- Trackers



# COMPASS Experiment



# COMPASS Experiment

- Internationale Kollaboration von  $\approx 200$  Physikern aus 15 Ländern
- Kosten der Experiment-Hardware  $\approx 30$  Millionen Euro
- $\approx 250.000$  Auslesekanäle
- Pro Jahr etwa 100 TByte = 100.000 Gigabyte an Daten

# COMPASS Experiment

- Internationale Kollaboration von  $\approx 200$  Physikern aus 15 Ländern
- Kosten der Experiment-Hardware  $\approx 30$  Millionen Euro
- $\approx 250.000$  Auslesekanäle
- Pro Jahr etwa 100 TByte = 100.000 Gigabyte an Daten

## Hauptforschungsziel:

Verständnis des komplexen Zusammenspiels von Quarks und Gluonen zum Spin des Protons.

# COMPASS Experiment

## Bisherige Forschungsergebnisse des COMPASS-Experiments:

- Quarkspin trägt nur etwa 25% zum Spin des Protons bei.  
(Bestätigung früherer Messungen)

# COMPASS Experiment

## Bisherige Forschungsergebnisse des COMPASS-Experiments:

- Quarkspin trägt nur etwa 25% zum Spin des Protons bei.  
(Bestätigung früherer Messungen)
- Auch Gluonen tragen weniger zum Protonspin bei, als von den meisten theoretischen Modellen erwartet.

# COMPASS Experiment

## Bisherige Forschungsergebnisse des COMPASS-Experiments:

- Quarkspin trägt nur etwa 25% zum Spin des Protons bei. (Bestätigung früherer Messungen)
- Auch Gluonen tragen weniger zum Protonspin bei, als von den meisten theoretischen Modellen erwartet.
- Wie so oft, es werden mehr Fragen aufgeworfen als beantwortet, ...

# Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- Was ist ein Proton?

Ein Baustein der Atomkerne und wichtiger Bestandteil der Materie.

# Zusammenfassung

- Was ist ein Proton?

Ein Baustein der Atomkerne und wichtiger Bestandteil der Materie.

- Wie sieht das Innere des Protons aus?

Es hat eine komplexe, dynamische Struktur aus **Quarks** und **Gluonen**.

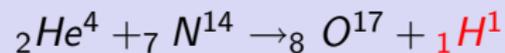
# Zusammenfassung

- Was ist ein Proton?  
Ein Baustein der Atomkerne und wichtiger Bestandteil der Materie.
- Wie sieht das Innere des Protons aus?  
Es hat eine komplexe, dynamische Struktur aus **Quarks** und **Gluonen**.
- Haben wir das Innere des Protons verstanden?  
Nein! Obwohl das Proton eines der zuerst entdeckten Teilchen ist und im Aufbau der Materie eine wichtige Rolle spielt, gibt es den Physikern immer noch viele Rätsel auf!

Spare

# 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

# Das Quarkmodell der Hadronen

- Anfang der 1960er Jahre waren über 100 “Elementarteilchen” bekannt: Proton  $p$ , Neutron  $n$ , Pionen  $\pi^+, \pi^-, \pi^0$ , Kaonen  $K^+, K^-, K^0, \overline{K^0}, \dots$
- Aufgrund ihre Eigenschaften werden diese Teilchen **Hadronen** genannt.
- Idee, dass diese wiederum aus elementarerer Bausteinen aufgebaut sind
- Gell-Mann und Ne’eman schlugen 1963 das Quarkmodell vor

# Das Quarkmodell

Die Bausteine der Hadronen sind Quarks!

Zunächst nur 3+3, mit denen man alle bis dahin bekannten Hadronen aufbauen konnte

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

# Das Quarkmodell

Die Bausteine der Hadronen sind Quarks!

Zunächst nur 3+3, mit denen man alle bis dahin bekannten Hadronen aufbauen konnte

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

z.B.

Proton	$p = uud$
Neutron	$n = ddu$
Pion	$\pi^- = \bar{u}d$

# Das Quarkmodell

Die Bausteine der Hadronen sind Quarks!

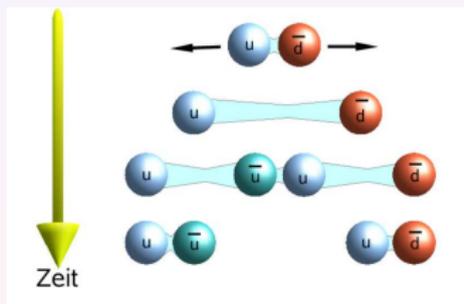
Zunächst nur 3+3, mit denen man alle bis dahin bekannten Hadronen aufbauen konnte

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

Proton	$p = uud$	Ladung = $+1e$ ✓
Neutron	$n = ddu$	Ladung = $0$ ✓
Pion	$\pi^- = \bar{u}d$	Ladung = $-1e$ ✓

# Warum hat man noch nie ein freies Quark gesehen?

- Im Gegensatz zur Gravitationskraft nimmt die starke Kraft, die zwischen Quarks wirkt mit zunehmenden Abstand zu!
- Beim Versuch zwei Quarks zu trennen, entstehen neue Quark-Antiquarkpaare:



- Energie wird in Materie (Quark-Antiquarkpaare) verwandelt ( $E = mc^2$ )
- **Quarks können aus Prinzip nicht als freie Teilchen beobachtet werden!**

# Zeittafel

1911	Rutherfordversuch Entdeckung des Atomkerns
1919	Entdeckung des Protons als leichtesten Atomkern
1933	Erste Hinweise auf innere Struktur des Protons
19??	Entdeckung des Neutron
1955	Bestimmung des Protonradius durch elastische Streuung
1963	Quarkmodell
1970	Identifizierung von Quarks als Bausteine des Protons
197?	Gluonen tragen wesentlich zum Protonimpuls bei

# Zeittafel

198?	Beginn zur Untersuchung der
198?	Spinstruktur des Nukleons
>2010	Impuls-Ort-Verteilung