

.....Wasserstoff.....

“Saturday Morning Physics”:

Ringvorlesung der Fakultät für Physik und
Astronomie

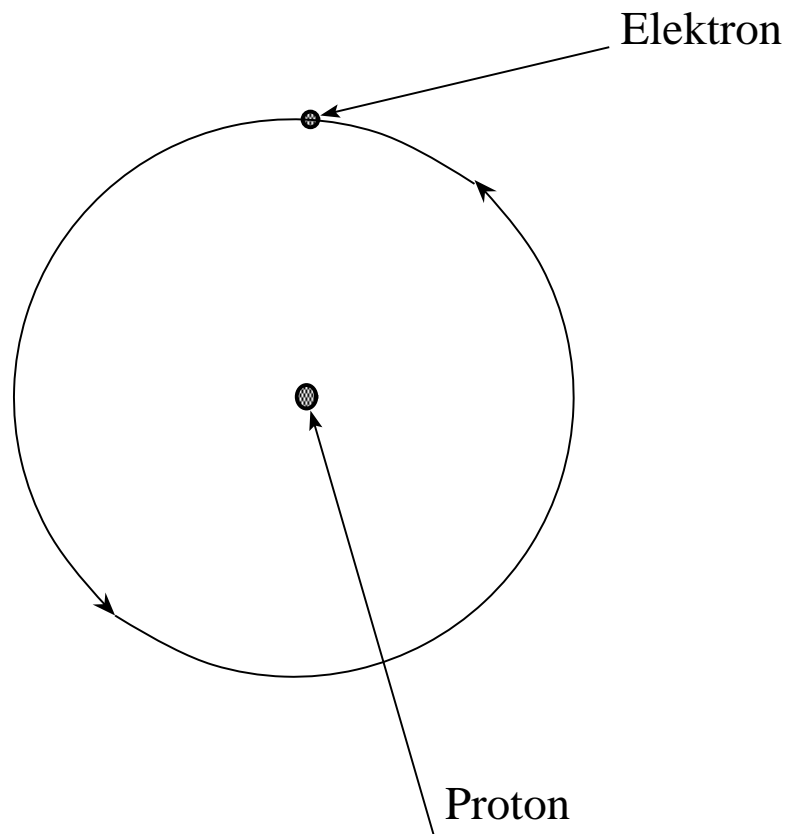
Ruhr-Universität Bochum

Das Proton

Ein weites Feld aus Quark und Leim

K. Goeke

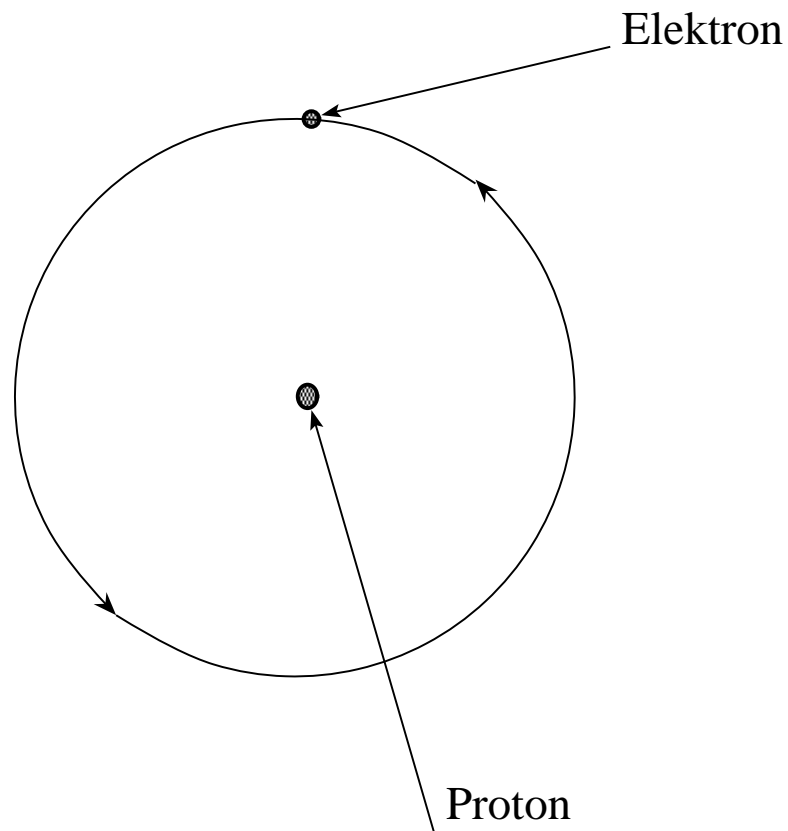
Das Wasserstoffatom



Proton:..... Quarks.....(James Joyce: Finnegans Wehg)

..... Gluonen.....(engl. glue: Leim)

Größenverhältnisse:



$$1 \text{ m} = 10 \text{ Milliarden Atomradien} = 10^{10} R_H$$

$$1 \text{ Atomradius } R_H = 100\,000 \text{ Protonenradien} = 10^5 R$$

$$1 \text{ Protonenradius } R = 1 \text{ Femtometer} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$1 \text{ Elektronenradius} = 0 \text{ (Punktteilchen)}$$

Forschung über Proton - Warum?

Grundlagenforschung: Zweckfrei, erkenntnisorientiert

Protonen/Neutronen \Rightarrow 99.9% der gesamten Materie

\Rightarrow komplizierteste Teilchen

Struktur des Protons \Rightarrow Struktur der Elementarteilchen

\Rightarrow Struktur des Universums

Quantenfeldtheorie \Rightarrow Teilchenphysik

\Rightarrow Kosmologie

\Rightarrow Festkörperphysik

\Rightarrow Chaos-Forschung

\Rightarrow Mathematik

Beschleuniger \Rightarrow technologische Innovationen

Transfer \Rightarrow anwendungsorientierte Forschung

Thema: Proton - aktuell?

Struktur von Protonen und Neutronen:

- Proton wurde vor 100 Jahren entdeckt
- Nobelpreis Physik 1999: 't Hooft, Veltman
“Nicht-abelsche Eichtheorien sind perturbativ re-
normierbar”
- Sommer 1999: Masse des Neutrinos ist von Null
verschieden
- DESY (Hamburg): SPIEGEL-Artikel

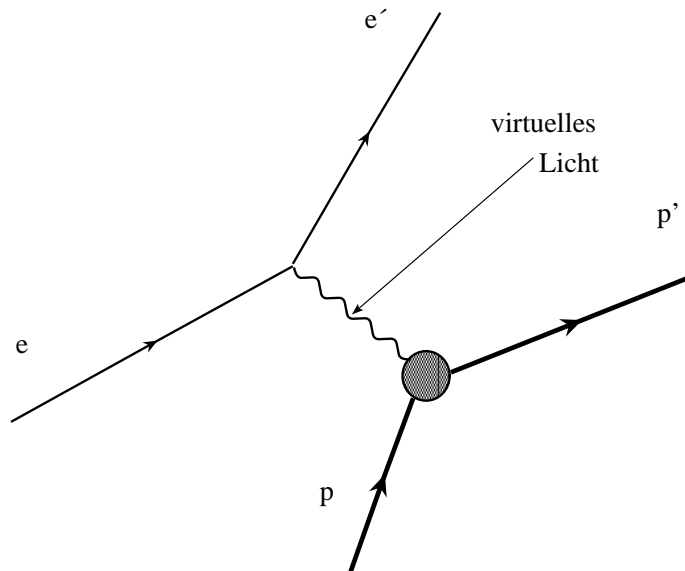
Experimente am Proton

Mikroskop: Sichtbares Licht ?

Auflösung unzureichend, denn:

$$\text{Wellenlänge } \lambda = 10^{-6} m \gg R = 10^{-15} m$$

Elektronenbeschleuniger: Virtuelles Licht kleiner Wellenlänge.....!



Auflösung ausreichend, denn:

$$\text{Wellenlänge } \lambda < R \quad \lambda \ll R$$

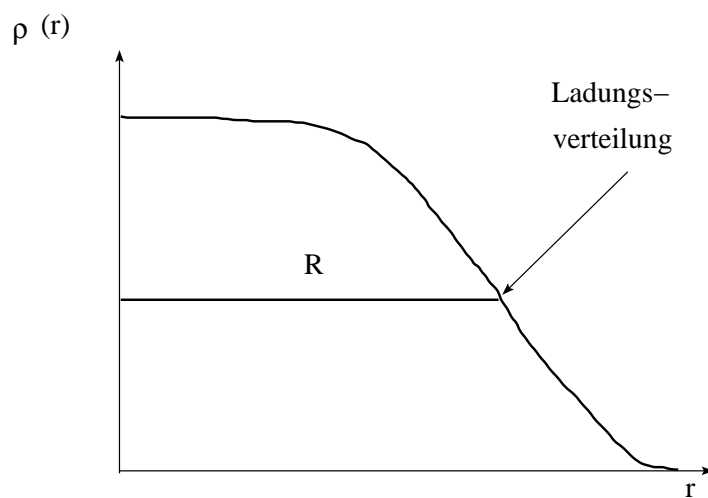
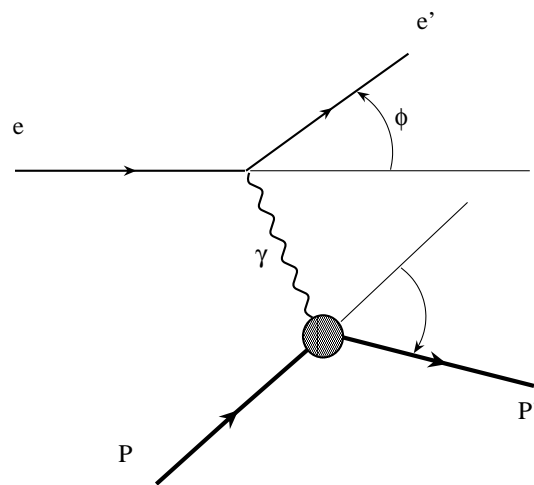
Prinzip: Elektronen geladen \Rightarrow beschleunigt \Rightarrow ,hohe Energie \Rightarrow kleine Wellenlänge

Niederenergie e^- -Streuung: Hofstadter 1960

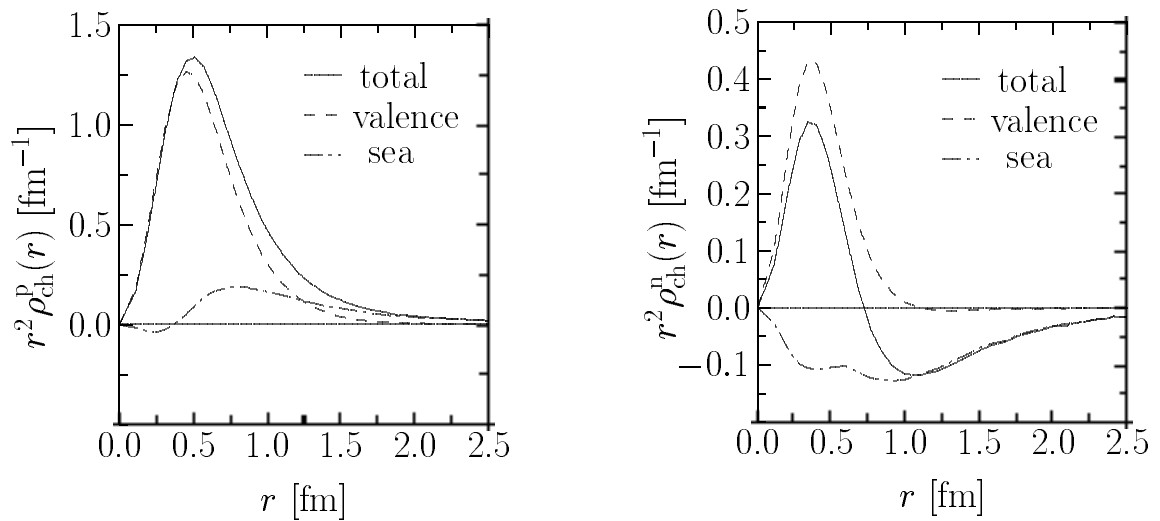
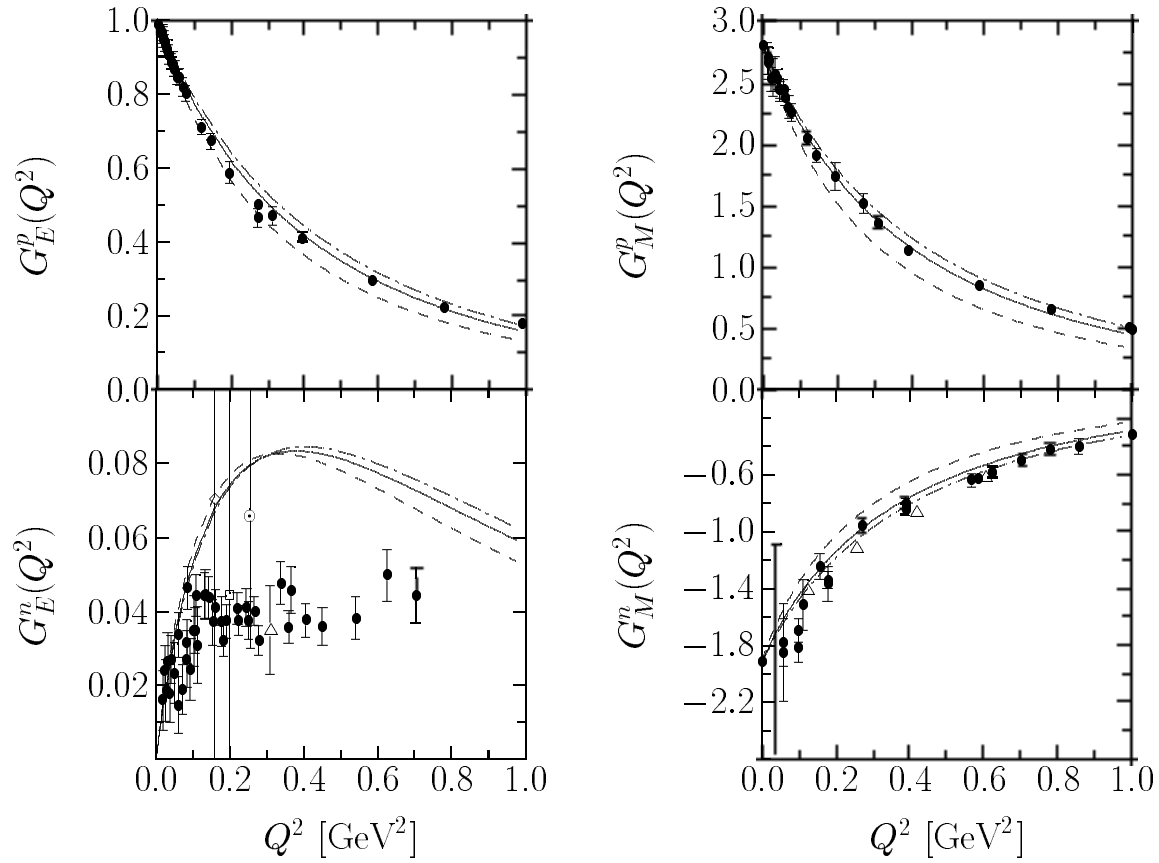
Diffuses geladenes Kugelchen, $R \simeq 1 \text{ Femtometer}$

Keine innere Struktur erkennbar ($\lambda \simeq R$)

Ladungsverteilung und Formfaktor vermessen



Nukleon: Ladungs- und Magnetverteilung



Hochenergie e^- -Streuung: 1970

Friedman, Kendall, Taylor: Nobelpreis 1990

Proton "zerschossen": Innere Struktur erkennbar ($\lambda \ll R$)

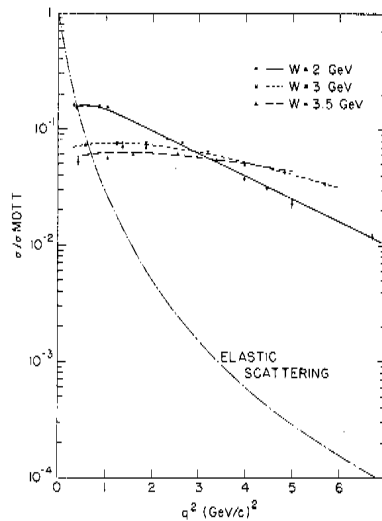
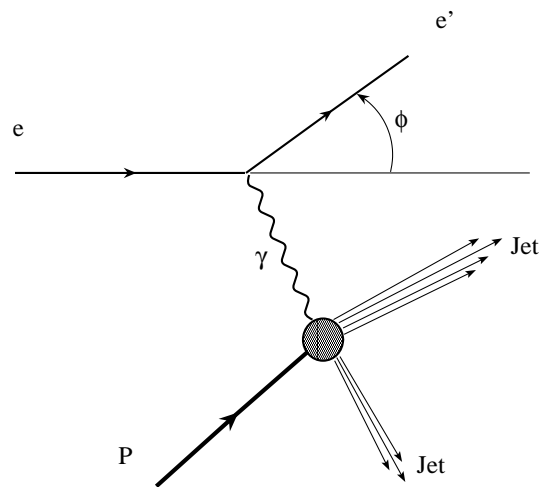
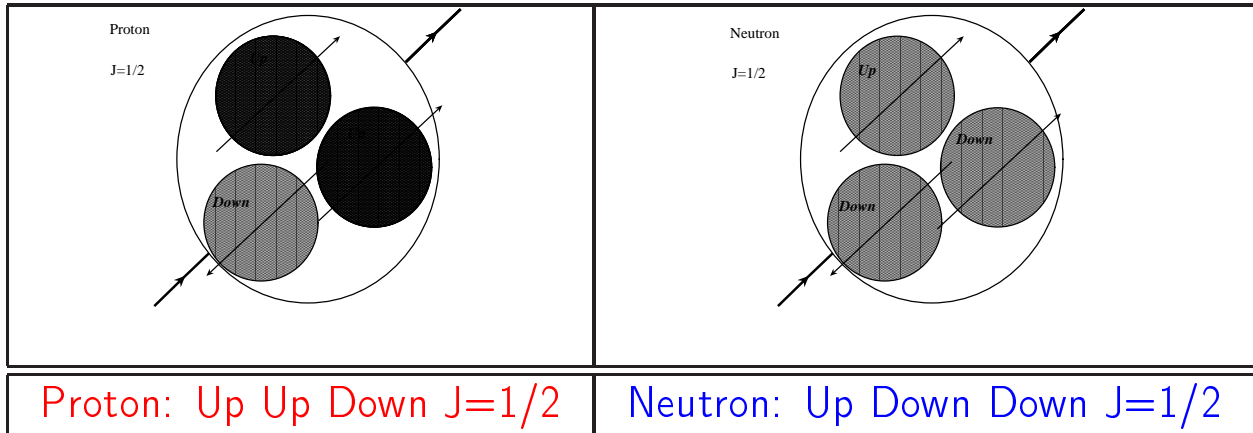


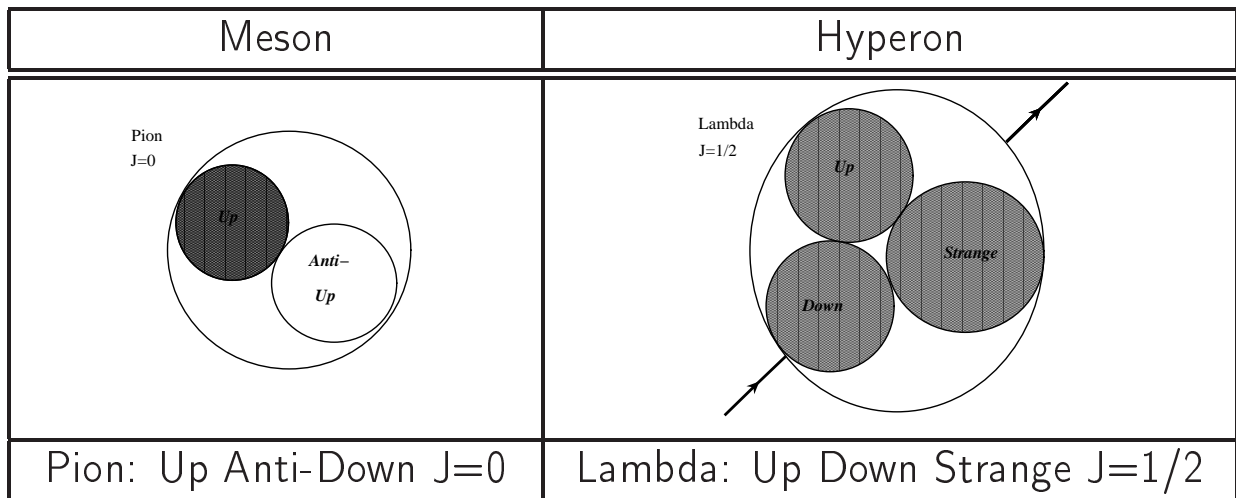
Fig: Totaler (groß) und elastischer (klein) Reaktionsquerschnitt vs. Impulstransfer Q^2 .

Theorie 1970: Konstituentenquarks

Gell-Mann (Nobelpreis 1969), Ne'eman, Zweig

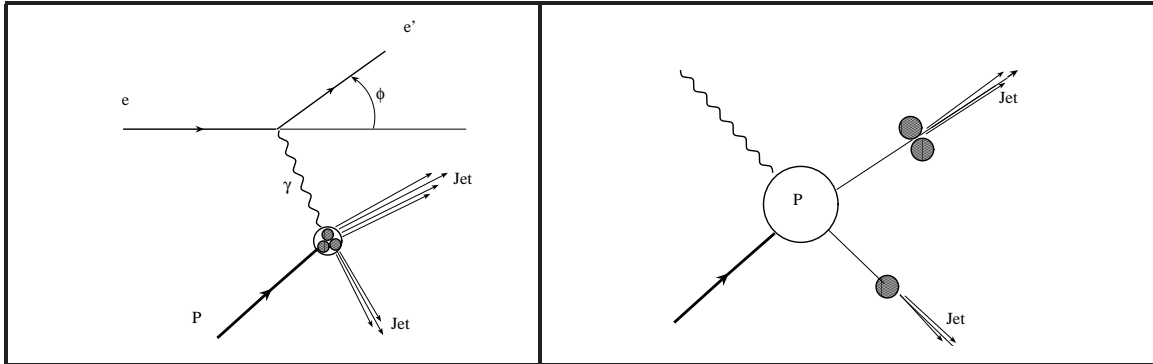


Quark (massiv, end. Radius)	Spin [\hbar]	Ladung [e]	Masse [M_P]
Up	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\sim \frac{1}{3}$
Down	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$\sim \frac{1}{3}$
(Strange)	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$> \frac{1}{3}$



Hochenergie-Puzzle: Jets

Erwartung:



Puzzle:

- 1) Jets bestehen NICHT aus Konstituenten-Quarks
- 2) EIN Proton beschossen, aber:

VIELE Teilchen im Jet

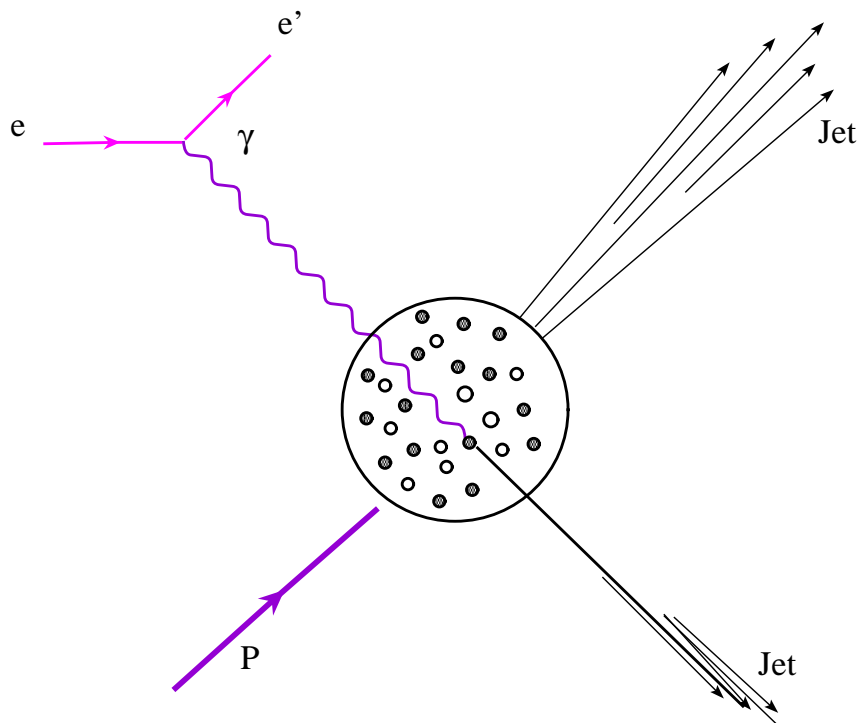
ETLICHE Protonen im Jet

Partonen

Phänomenologie:

Proton scheint aus vielen "Quarks" und "Antiquarks" zu bestehen:

Partonen, punktförmig, masselos, anders als Konstituenten-Quarks

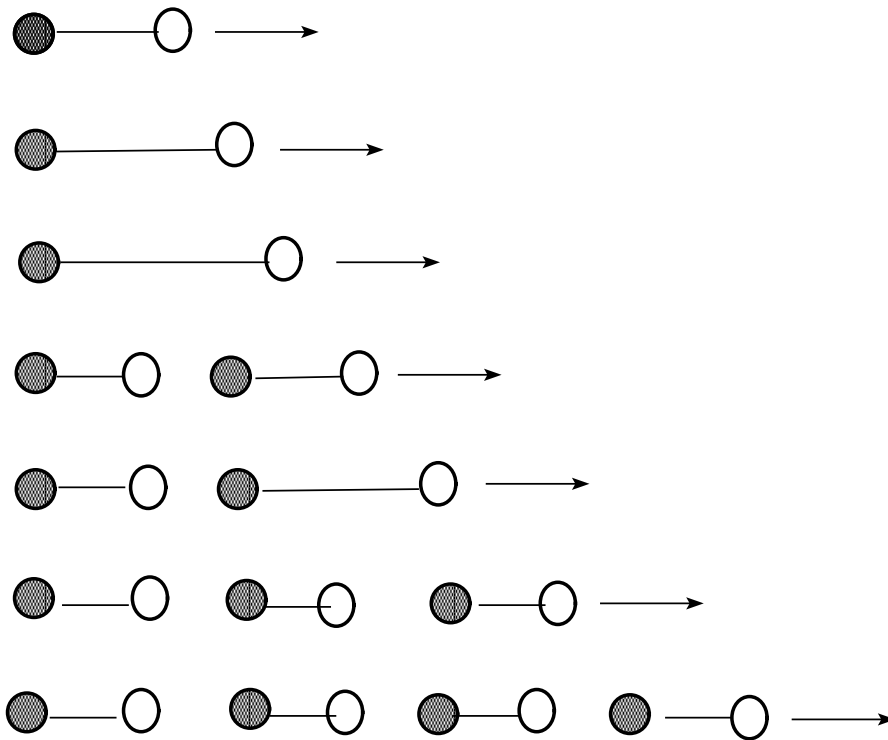


Aber: Keine Quarks im Jet !

Confinement

Confinement

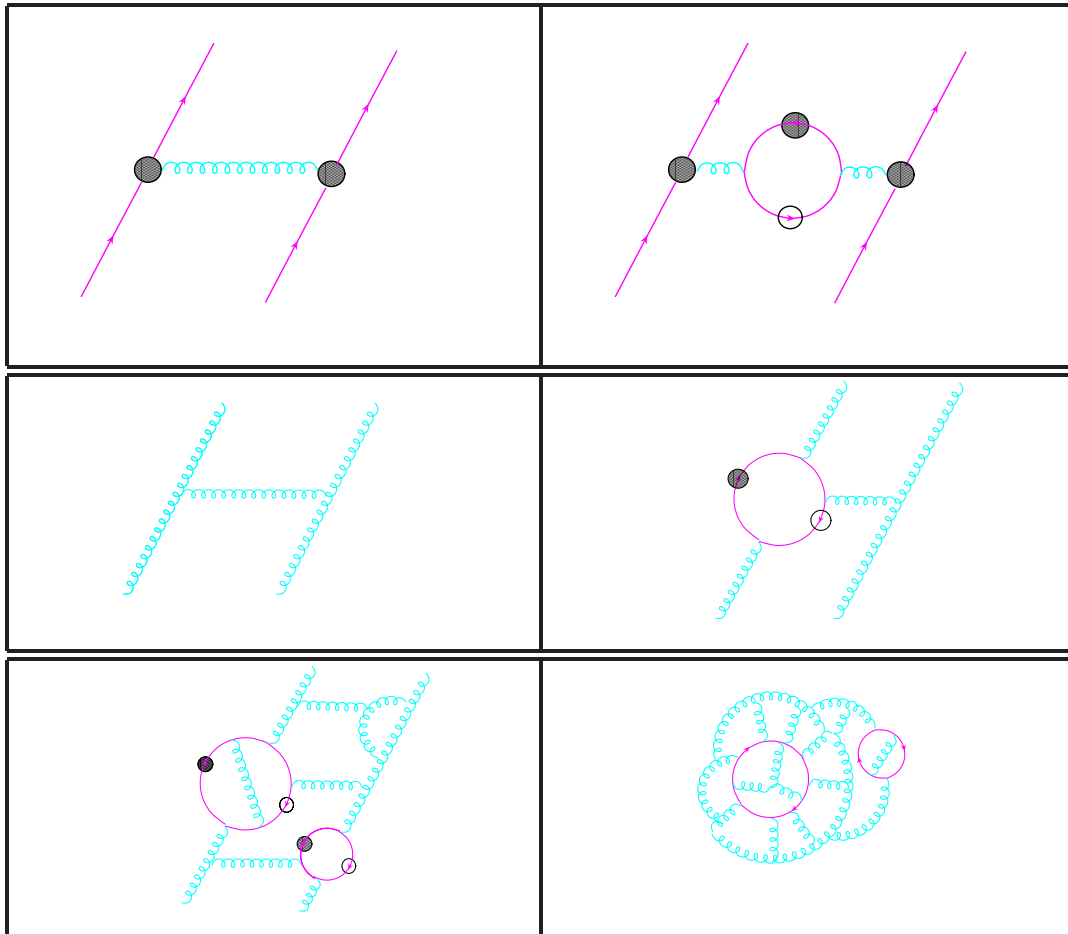
EIN Meson: Ziehe Quark und Antiquark auseinander



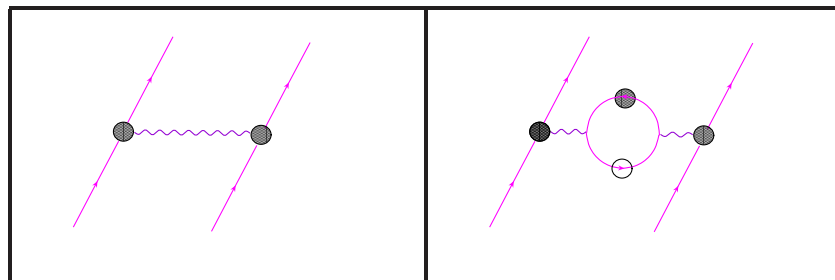
Resultat: Aufbruch in MEHRERE Mesonen !

Jets: Mesonen, Protonen, Neutronen, Antiprotonen
etc.

Gluonen



Photonen:

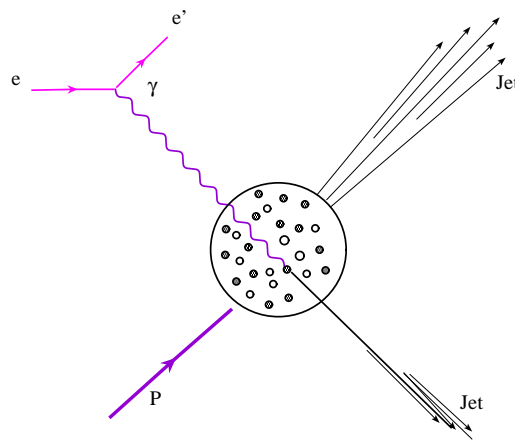


Glukonen im Experiment

Proton: Quarks, Antiquarks und Glukonen

Problem:

Glukonen nicht elektrisch geladen \Rightarrow **Glukonen unsichtbar**



Gesamtimpuls aller Quarks \approx 50% des Nukleon-Impulses

Gesamtdrehimpuls aller Quarks \approx 50% des Nukleon-Drehimpulses

GLUKONEN \approx 50% DES NUKLEONS

Quanten Chromodynamik (QCD)

Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung

..Teilchen: Quarks

..Eichbosonen: Gluonen

Eigenschaften:

..Nicht-abelsche Eichtheorie

..Renormierbar (Nobelpreis 1999: 't Hooft, Veltman)

..Asymptotische Freiheit ($E \gg M_N$)

..Confinement ($E \approx M_N$?)

..Spontane Chirale Symmetriebrechung

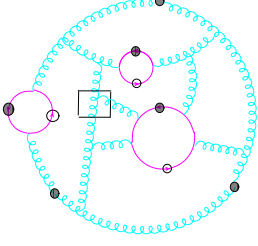
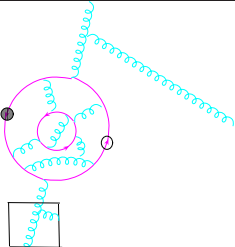
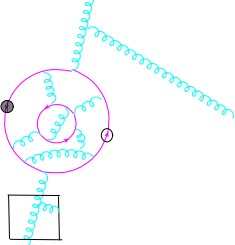
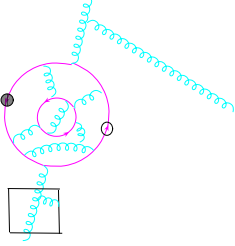
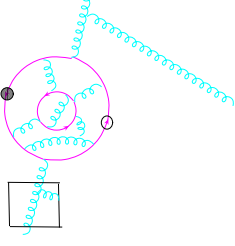
Beweis:

..Selbstähnlichkeit (streckenweise) bei hohen Energien

..Renormierungsgruppen-Gleichungen

..nicht-perturbative QCD

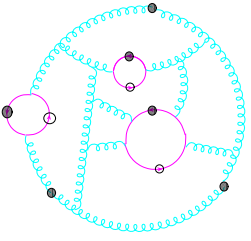
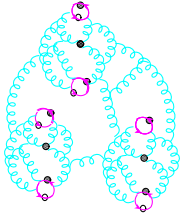
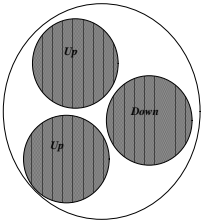
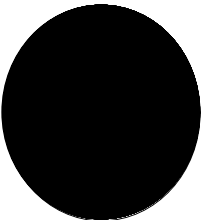
Zu hohen Energien: Selbstähnlichkeit

	Energie=5 GeV
	Energie =10 GeV
	Energie = 15 GeV
	Energie = 20 GeV
	Energie =25 GeV

perturbative QCD: $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_3 \rightarrow E_4 \rightarrow$

Zu niedrigen Energien ?

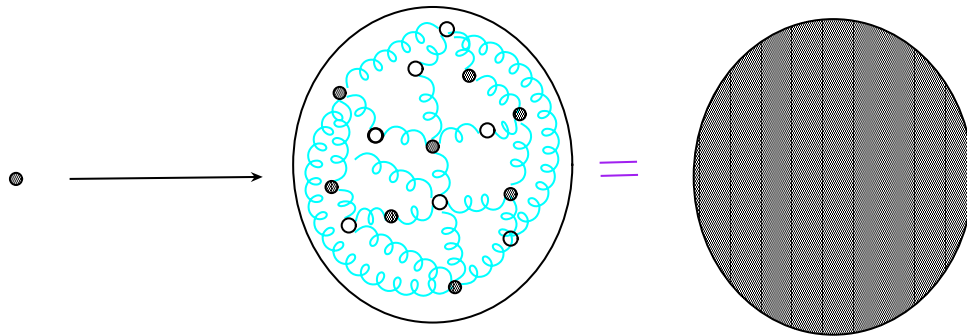
nicht-perturbative QCD: Theoretisch **noch nicht** verstanden !

	Energie = 5 GeV	pert. QCD
	Energie = 3 GeV	nicht-pert. QCD
	Energie = 2 GeV	nicht-pert. QCD
	Energie = 1 GeV	nicht-pert. QCD

Übergang $q \rightarrow Q$

Übergang: Große Energien \rightarrow kleine Energien $\Rightarrow q \rightarrow Q$

QCD-Quark ($m_q = 0$) \rightarrow Konstituenten-Quark ($M_Q = \frac{1}{3}M_N$)



Bei Energien $E \cong M_N$:

Nukleon: 3 Konstituentenquarks

Konstituentenquark:

Ein QCD-Quark und Gluonen mit QCD-Quark-Antiquark-Paaren.

Diese alle "sieht" man bei hochenergetischer Elektronenstreuung.

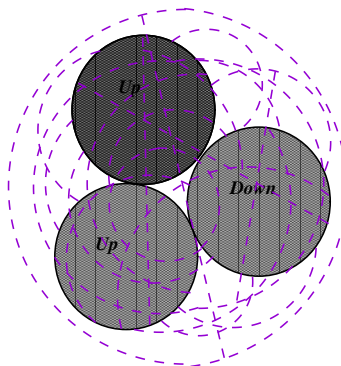
Konstituentenquark: Baustein der Baryonen und Mesonen.

Baryonen und Mesonen

<p>Proton $J=1/2$</p>	<p>Delta+ $J=3/2$</p>
<p>Proton: Up Up Down $J=1/2$</p>	<p>Delta+: Up Up Down $J=3/2$</p>

Meson	Hyperon
<p>Pion $J=0$</p>	<p>Lambda $J=1/2$</p>
<p>Pion: Up Anti-Down $J=0$</p>	<p>Lambda: Up Down Strange $J=1/2$</p>

Dynamisch: Pion-Feld umgibt das Nukleon



Zusammenfassung

Kleine Abstände = Große Energien ($E \gg M_N$)

Große Abstände = Kleine Energien ($E \ll M_N$)

Quarks:

große Energien:Wechselwirkungsfreie Teilchen

mittlere Energien:Ballung mit Gluonen zu Konstituentenquarks

kleine Energien:Confinement

Nukleon bei großen Energien :

QCD-Quarks und -Antiquarks

Gluonen

Nukleon bei mittleren Energien :

3 Konstituentenquarks

Pionwolke

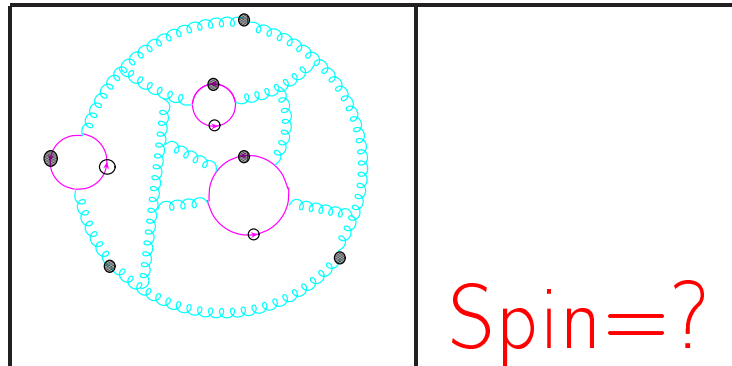
Nukleon bei kleinen Energien :

Ladungsverteilung

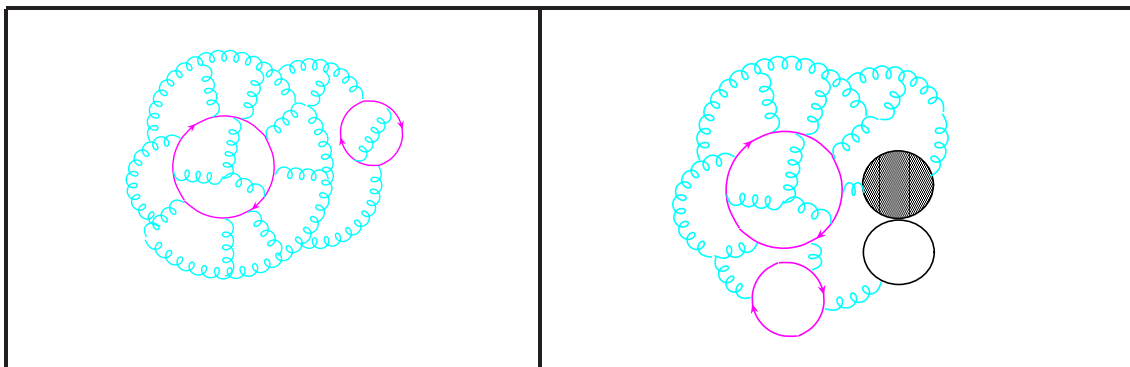
Magnetverteilung

Bochumer Ausblick: Experimente

Spin des Protons: Quarks und Gluonen

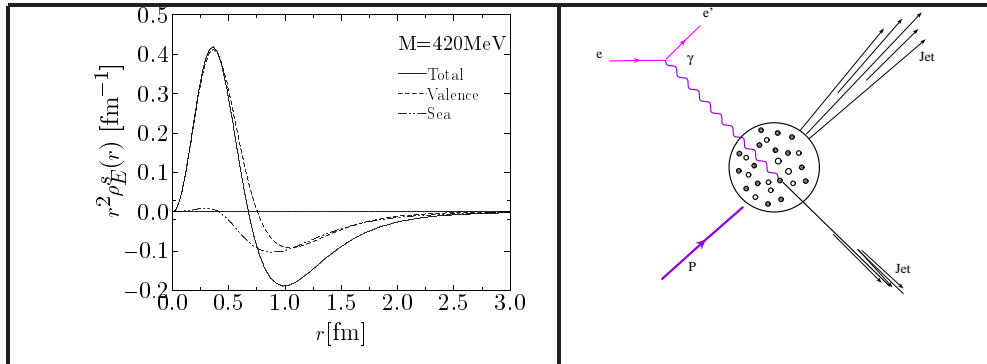


Experimente: Glue-Bälle und "Hybride"

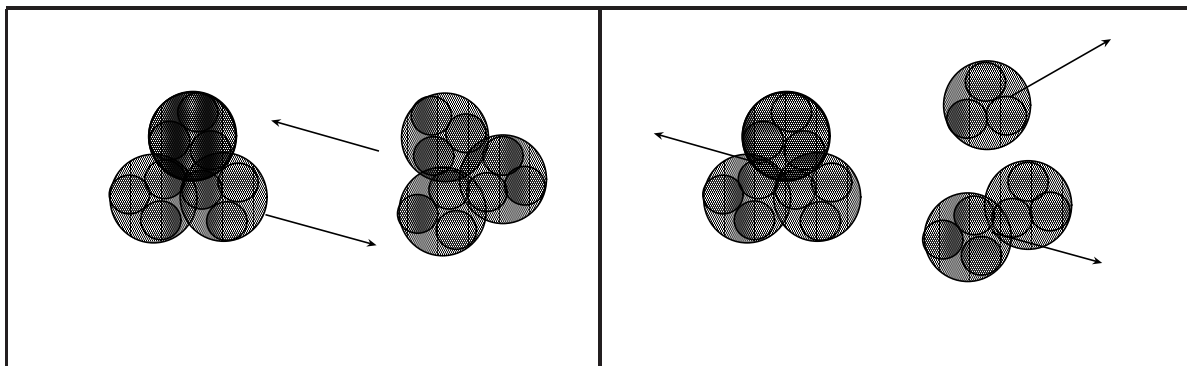


Bochumer Ausblick: Rechnungen

Pion Wolke, strange Quarks, e^- -Streuung



Reaktionen leichter Atomkerne



Kräfte

