

Lutz Feld

Elementarteilchenphysik

- ein sehr kurzer Überblick über ein großes Forschungsgebiet
- keinesfalls ein Ersatz für die Vorlesung Teilchen und Kerne
- Schwerpunkt auf der Struktur des Standardmodells und möglicher Erweiterungen

Fragen

- Was sind die elementaren Bausteine der Materie?
- Welche Kräfte wirken zwischen ihnen?
- Wie können wir möglichst viel über die elementaren Teilchen und ihre Dynamik lernen?
- Wie ist die makroskopische Welt aus diesen Komponenten zusammengesetzt?
- Welche möglichst einfache Theorie kann alle Beobachtungen beschreiben?
- Warum ist die Welt gerade so wie sie ist?
- Wie ist die Welt entstanden?



Einheiten & Größenordnungen

- Energieeinheit in der Teilchenphysik ist das „Elektronvolt“:

$$1 \text{ eV} = 1 \text{ Elementarladung} \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} \quad \text{Kilo - Elektronvolt}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \quad \text{Mega - Elektronvolt}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} \quad \text{Giga - Elektronvolt}$$

- In der Teilchenphysik geben Lichtgeschwindigkeit und Planck'sches Wirkungsquantum die Skala vor

$$c = 1 \quad \hbar \equiv \frac{h}{2\pi} = 1 \quad k = 1$$

- Damit haben alle Größen als Einheit eine bestimmte Potenz der Energie:

E		E	E
p	$= E/c$	E/c	E
m	$= E/c^2$	E/c^2	E
λ	$= h/p$	hc/E	$1/E$
t	$\propto h/E$	h/E	$1/E$
T	$= E/k$	E/k	E

- Nützliche Umrechnungsfaktoren:

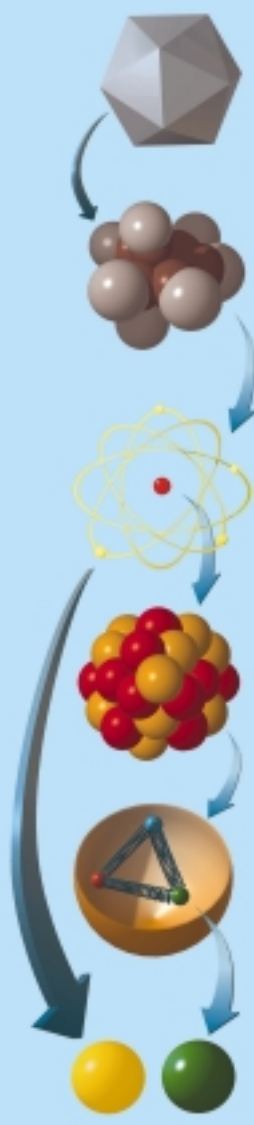
$$\hbar c \approx 200 \text{ MeV fm}$$

$$1 \text{ GeV} \approx 10^{13} \text{ K}$$

Auflösungsvermögen

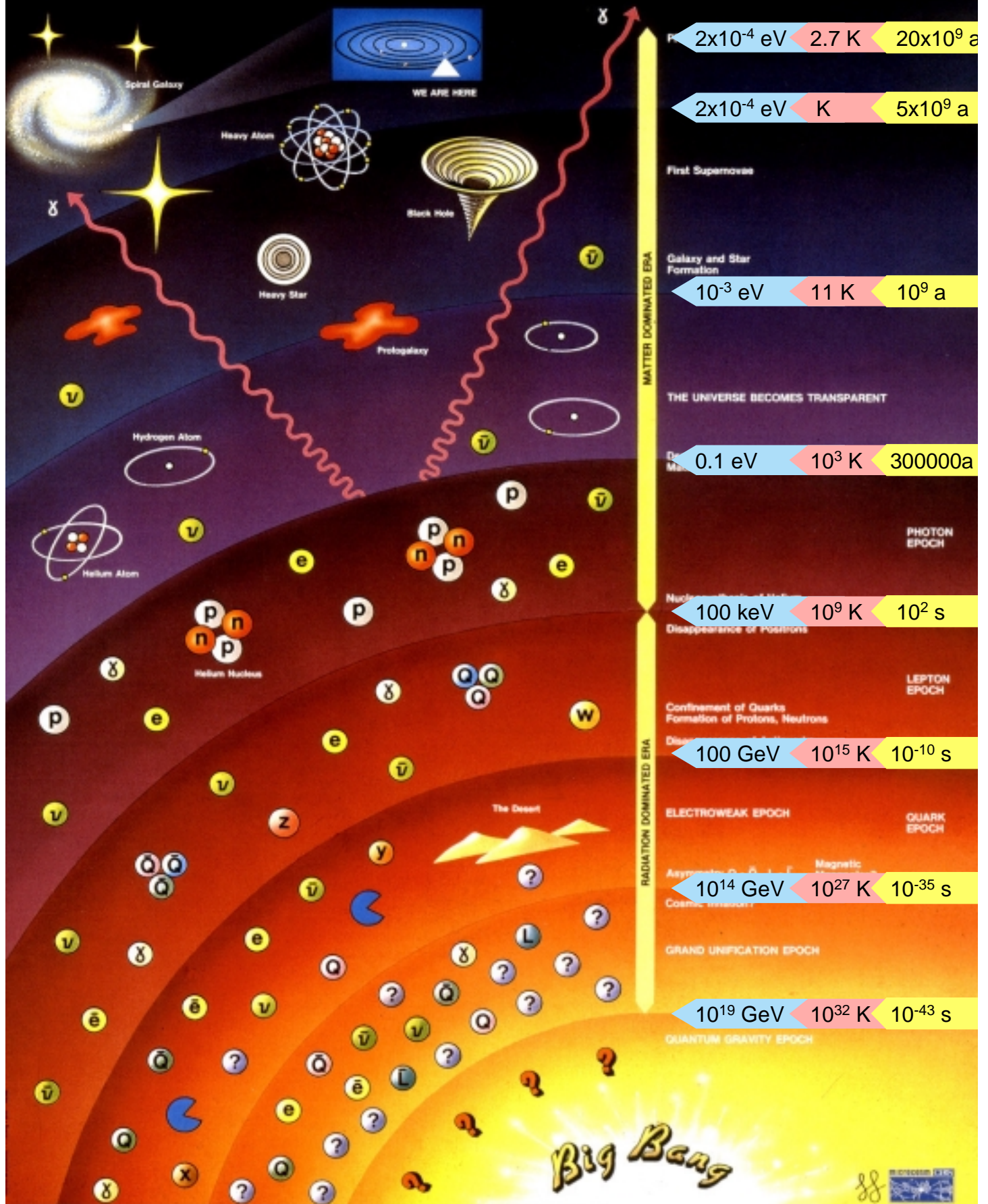
Wellenlänge bestimmt das Auflösungsvermögen

$$E = pc = \frac{hc}{\lambda} \quad (m \approx 0)$$

Objekte und ihre Größe	Beobachtungs- instrument	typische Energie
 <p> $\lesssim 0.01$ m Crystal $1/10,000,000$ 10^{-9} m Molecule $1/10$ 10^{-10} m Atom $1/10,000$ 10^{-14} m Atomic nucleus $1/10$ 10^{-15} m Proton $1/1,000$ $< 10^{-18}$ m Electron, Quark </p>	<p>Lichtmikroskop</p> <p>Elektronenmikroskop</p> <p>Streuexperimente niederenergetisch</p> <p>Streuexperimente hochenergetisch</p>	<p>1 eV</p> <p>10 keV</p> <p>100 MeV</p> <p>100 GeV</p>

Auflösen **kleiner** Strukturen erfordert **hohe** Energie

History of the Universe



Teilchenphysik & Kosmologie

- zur Untersuchung kleinster Strukturen benötigt man hochenergetische Proben (d.h. mit kleiner Wellenlänge)
- bei den hohen Energien treten neue Phänomene und Teilchen auf
- die Untersuchung des Ursprungs des Weltalls führt ebenfalls zu immer höheren Energien
- gibt es eine Theorie die die Prozesse bis zu höchsten Energien konsistent beschreiben kann?
- die Teilchenphysik und die Kosmologie führen auf die gleichen Fragen und suchen gemeinsam nach Lösungen

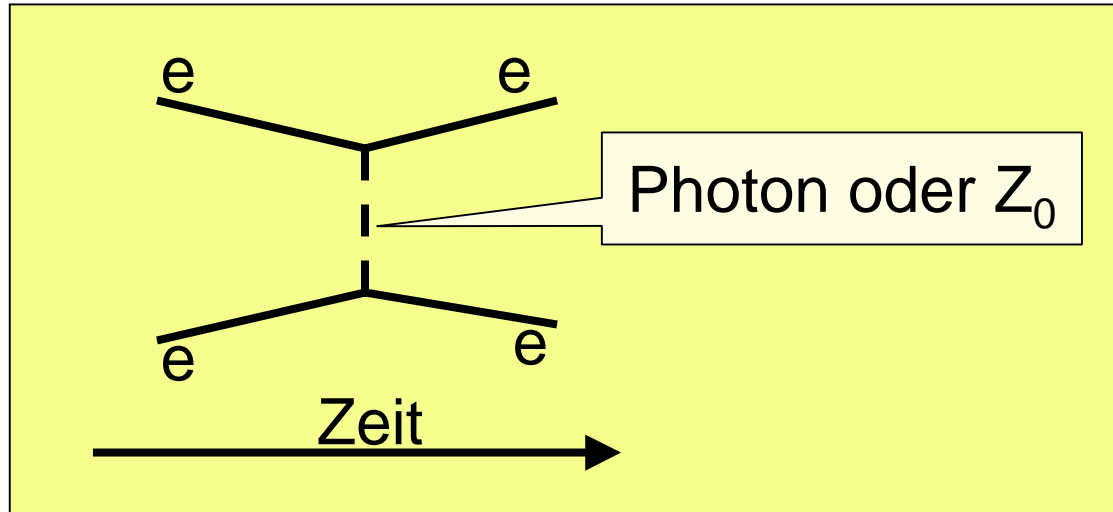
Elementare Kräfte & Teilchen

Kräfte werden vermittelt durch Bosonen (Spin 1)					
Wechselwirk.	Stärke	Reichweite	Austausch teilchen	Masse (GeV)	q
stark	1	1 fm	8 Gluonen	0	0
elektromag.	1/137	unendlich	Photon	0	0
schwach	10^{-6}	0.001 fm	$W^{+/-}, Z_0$	80,91	+/-1,0
Gravitation	10^{-40}	unendlich	Graviton (Spin 2)	0	0

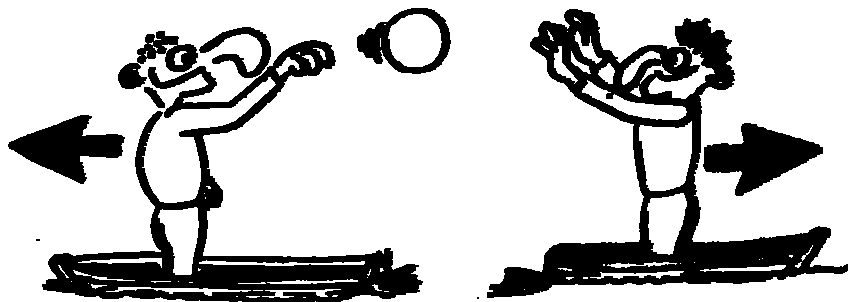
Fermionen (Spin 1/2) mit je einem Antiteilchen								
	F _{lavour} Masse (GeV)			q	Wechselw.			
					stark	elmag.	schw.	Grav.
Quarks	U _p 0.003	C _{charm} 1.3	t _{op} 175	+2/3	x	x	x	x
	d _{own} 0.006	S _{trange} 0.1	b _{ottom} 4.3	-1/3	x	x	x	x
Leptonen	ν_e <3x10 ⁻⁹	ν_μ <2x10 ⁻⁴	ν_τ <2x10 ⁻²	0	-	-	x	x
	e 0.00051	μ 0.106	τ 1.777	-1	-	x	x	x

Austauschteilchen

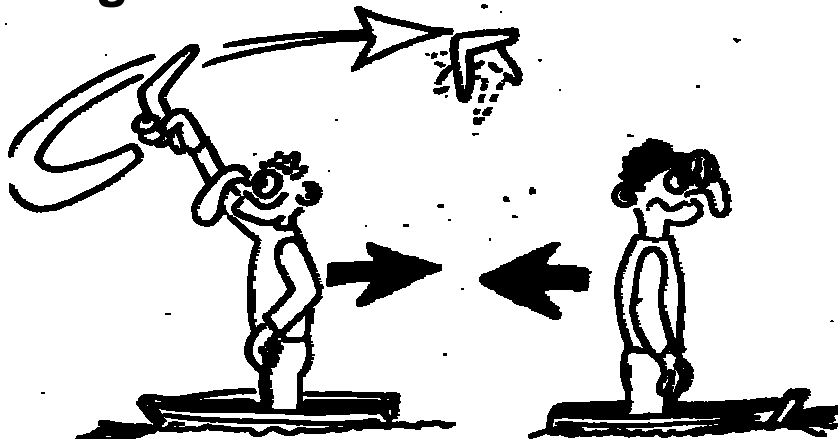
- Kraftwirkung wird durch den **Austausch eines Bosons** beschrieben



- **Abstoßung**

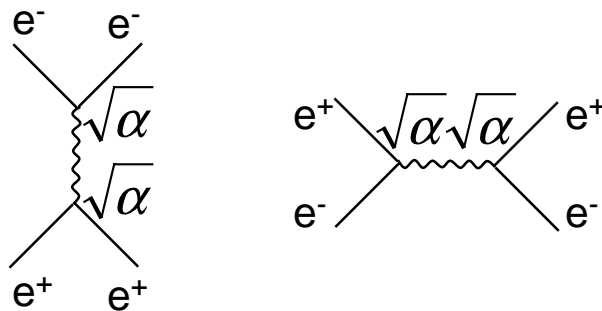


- **Anziehung**

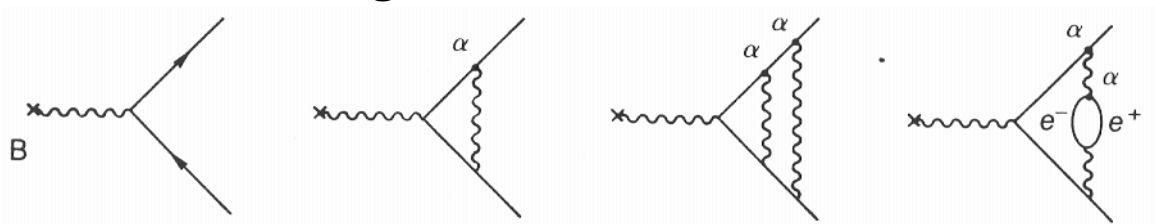


Quanten-Elektro-Dynamik

- **QED** ist der Prototyp für die Quantenfeldtheorie einer Wechselwirkung
- **Photon** ist Feldquant der QED
- elektrisch geladene Teilchen wechselwirken durch Austausch eines Photons
- Beispiel: Elektron-Positron-Streuung









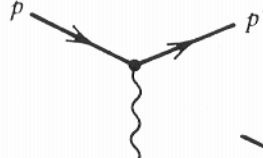
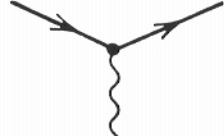


- **Kopplungsstärke** an jedem Vertex: $\sqrt{\alpha}$ $\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi} \approx \frac{1}{137}$
- solche Diagramme heißen **Feynman-Diagramme**; es gibt genaue Regeln wie man die Diagramme in Wirkungsquerschnitte umsetzt: **Feynman-Regeln**
- alle Diagramme mit einer bestimmten Anzahl $\sqrt{\alpha}$ bilden eine bestimmte Ordnung der **Störungsreihe**
- **höhere Ordnungen**



QED-Feynman-Regeln

Feynman Rules for $-i\mathcal{M}$

		Multiplicative Factor
● External Lines		
Spin 0 boson (or antiboson)		1
Spin $\frac{1}{2}$ fermion (in, out)		u, \bar{u}
antifermion (in, out)		\bar{v}, v
Spin 1 photon (in, out)		$\epsilon_\mu, \epsilon_\mu^*$
● Internal Lines—Propagators (need $+i\epsilon$ prescription)		
Spin 0 boson		$\frac{i}{p^2 - m^2}$
Spin $\frac{1}{2}$ fermion		$\frac{i(\not{p} + m)}{p^2 - m^2}$
Massive spin 1 boson		$\frac{-i(g_{\mu\nu} - p_\mu p_\nu / M^2)}{p^2 - M^2}$
Massless spin 1 photon (Feynman gauge)		$\frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2}$
● Vertex Factors		
Photon—spin 0 (charge $-e$)		$ie(p + p')^\mu$
Photon—spin $\frac{1}{2}$ (charge $-e$)		$ie\gamma^\mu$

Loops: $\int d^4k/(2\pi)^4$ over loop momentum; include -1 if fermion loop and take the trace of associated γ -matrices

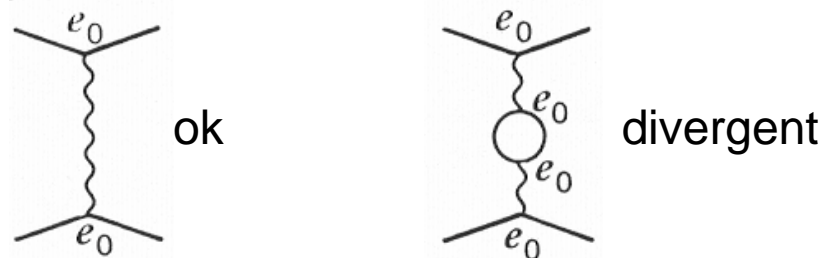
Identical Fermions: -1 between diagrams which differ only in $e^- \leftrightarrow e^-$ or initial $e^- \leftrightarrow$ final e^+

QED: Lokale Eichsymmetrie

- QED kann aus einer lokalen **U(1)-Eichsymmetrie** hergeleitet werden
- **globale** Eichsymmetrie $\psi(\vec{x}) \rightarrow e^{i\alpha} \psi(\vec{x})$
führt zur Erhaltung der elektrischen Ladung (Noether-Theorem)
- die Aufenthaltsdichte bzw. Ladungsverteilung $e|\psi(\vec{x})|^2$ ändert sich nicht wenn man eine **lokale** Eichtransformation durchführt: $\psi(\vec{x}) \rightarrow e^{i\alpha(\vec{x})} \psi(\vec{x})$
- die **Lagrangedichte** $L = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi$ ändert sich!
- die Lagrangedichte kann invariante gemacht werden durch Einführung eines **Vektorfeldes** A_μ das sich nach $A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \alpha$ transformiert und Übergang zur „**kovarianten** Ableitung“ $D_\mu \equiv \partial_\mu - ieA_\mu$
- $$\begin{aligned} L &= \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi \\ &= \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi && \text{Dirac – Gl. für Elektron} \\ &\quad + e\bar{\psi}\gamma^\mu \psi A_\mu && \text{Elektron - Photon - Kopplung} \\ &\quad + \text{Energie des Photon - Feldes} \end{aligned}$$
- ein **Masseterm** $\frac{1}{2} m^2 A_\mu A^\mu$ ist nicht eichinvariant

Renormierung & laufende Kopplung

- Berechnung höherer Ordnungen führt auf ein Problem: die Wirkungsquerschnitte **divergieren!**



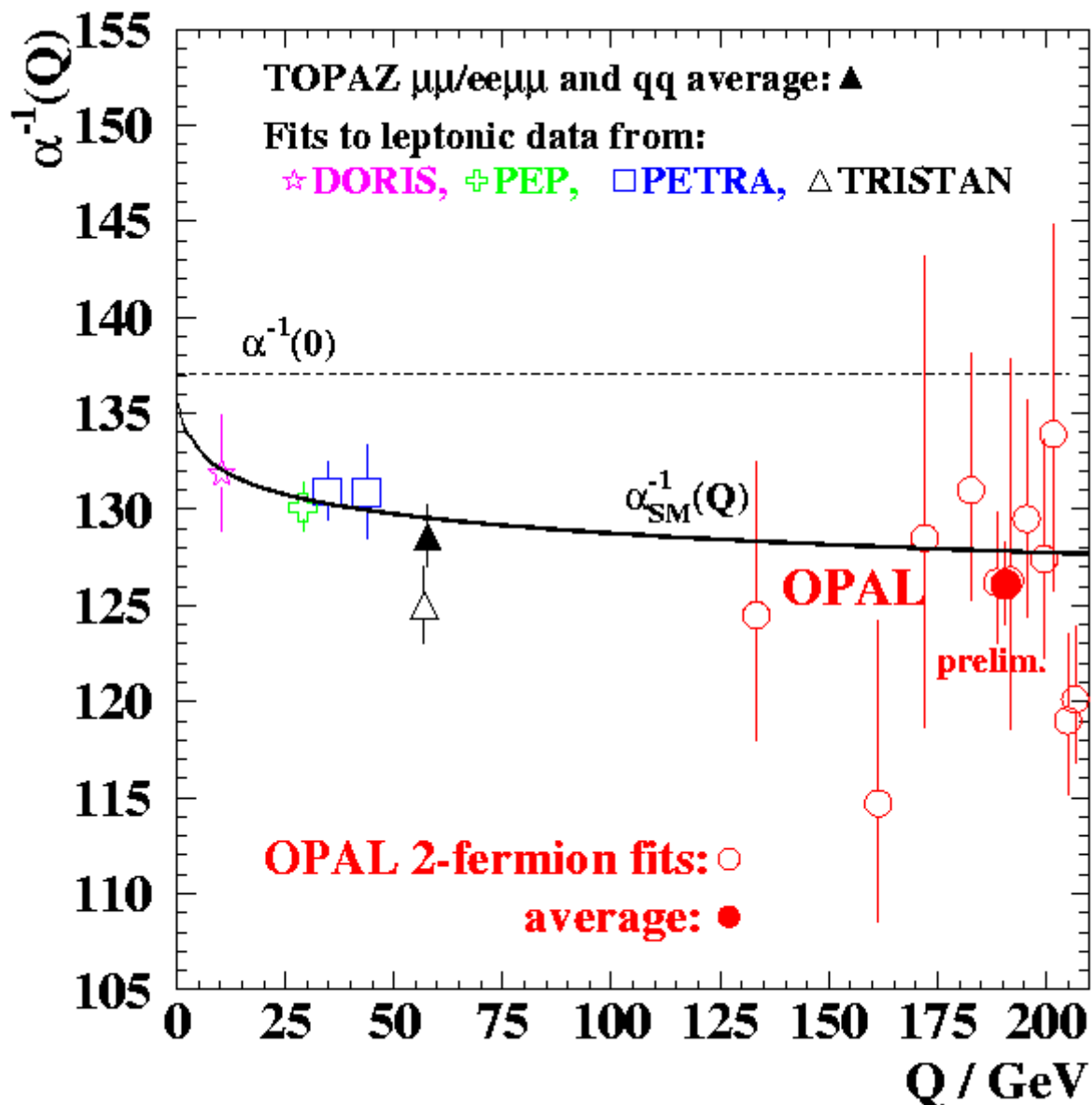
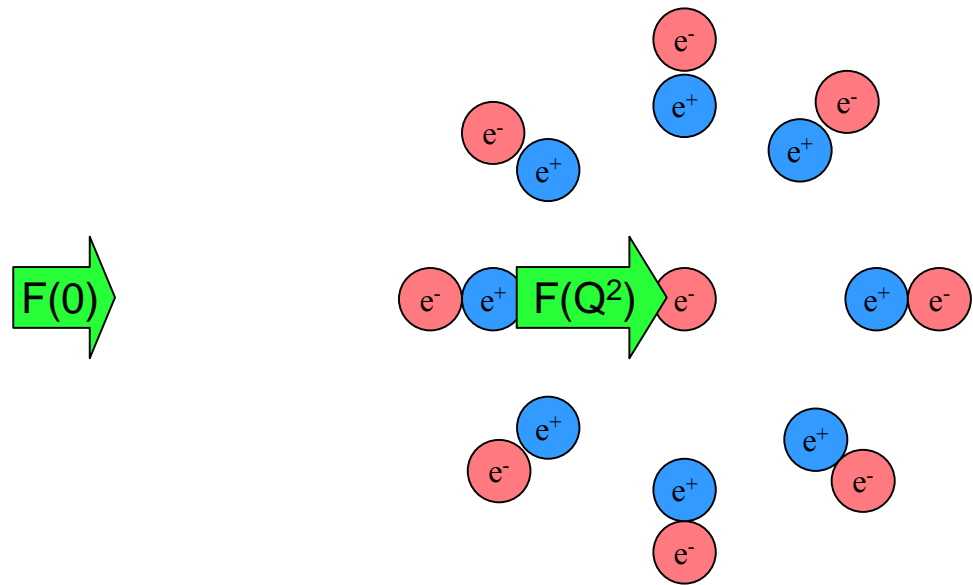
- die Lösung heißt „**Renormierung**“: divergente Terme werden durch eine Neudefinition der Kopplungskonstante absorbiert (die Kopplung an den Feynman-Graphen muß ja nicht die beobachtete Elementarladung sein)

The diagram illustrates the renormalization process. It shows an equation where a tree-level diagram with coupling e is equal to a sum of diagrams in brackets, evaluated at $Q^2 = \mu^2$. The bracketed sum includes the tree-level diagram with coupling e_0 , minus the one-loop diagram with coupling e_0 , plus higher-order terms. This is then simplified to the tree-level diagram with coupling e_0 multiplied by a factor in curly braces: $\left\{ \frac{1}{1 + \text{one-loop diagram with } e_0}} \right\}$.

$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi} \log\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

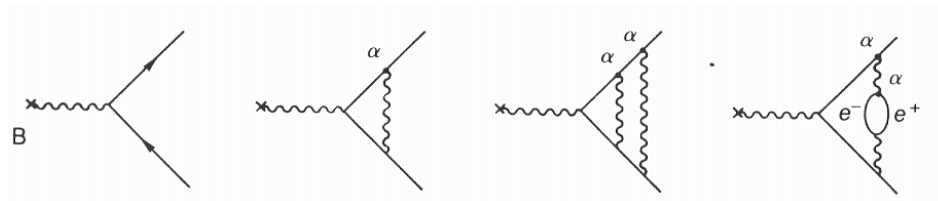
- mit Renormierung erhält man endliche Wirkungsquerschnitte, die allerdings von der „**Renormierungsskala**“ μ abhängen; diese Abhängigkeit wird umso schwächer je mehr Ordnungen einbezogen werden; die **Kopplungskonstante läuft**
- jede lokale Eichtheorie ist **renormierbar**

Laufende Kopplung: QED



QED: Präzisionstests

- QED-Rechnungen liefern **sehr genaue Vorhersagen**, die mit den Messungen sehr gut übereinstimmen
- Beispiel: **anomales magnetisches Moment**
 - Dirac-Theorie $\mu = g\mu_B s$ mit $\mu_B \equiv \frac{e\hbar}{2mc}$, $g = 2$, $s = \frac{1}{2}$
 - mit Strahlungskorrekturen:



- für das **Elektron**:

$(g-2)/2 \cdot 10^{-12}$	Wert	Fehler
Rechnung	1159652201	27
Messung	1159652188.4	4.3
Unterschied	12.6	27

- seit kurzem gibt es eine noch genauere Messung die für das **Myon**, die eine knapp 3 Sigma Abweichung von der (genaueren) Rechnung zeigt:

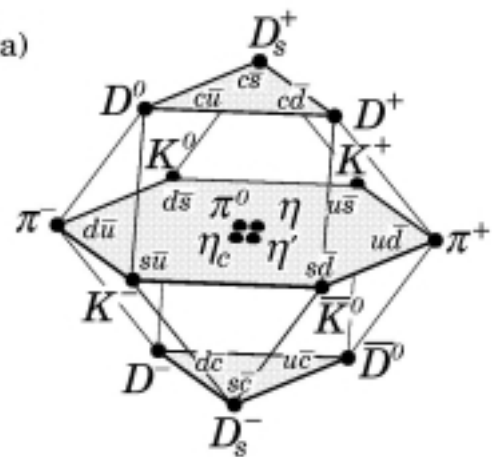
$(g-2)/2 \cdot 10^{-10}$	Wert	Fehler
Rechnung	11 659 159.6	6.7
Messung	11 659 203	15
Unterschied	43	16

Hinweis auf „neue Physik“? Supersymmetrie?

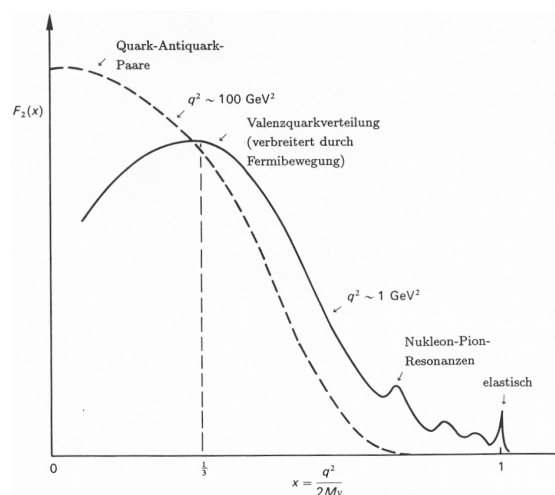
Drei Wege zu den Quarks

Quarks wurden noch nie als freie Teilchen beobachtet.
Wie hat man sie dann gefunden?

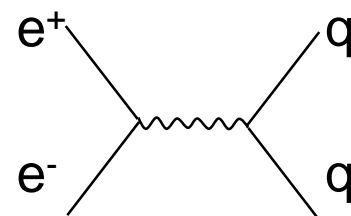
1. Ordnung im Teilchenzoo (a)



2. Streu-Experimente



3. Vernichtungsreaktionen



Ordnung im Teilchenzoo

- an den **Teilchenbeschleunigern** wurden in den 50er und 60er Jahren (und danach) eine große Zahl „Elementarteilchen“ entdeckt, über 100
- **Ordnung** nach Masse, Spin, Ladung, Lebensdauer, Verhalten unter best. Ww, ...

- Beispiel: Neutron und Proton werden zu einem „**Isospin-Dublett**“ zusammengefasst

$$\begin{array}{ll} \text{Proton} & \left| \frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \right\rangle \quad \text{oder} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \text{Neutron} & \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \quad \text{oder} \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{array}$$

- Neutron und Proton bilden eine „**fundamentale Darstellung**“ einer SU(2)-Gruppe, die Generatoren sind die Pauli-Matrizen

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- Isospin zusammengesetzter Systeme

$$\text{Triplett} \quad \begin{cases} |1,1\rangle = pp \\ |1,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(pn + np) \\ |1,-1\rangle = nn \end{cases}$$

$$\text{Singlett} \quad \begin{cases} |0,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(pn - np) \end{cases}$$

- wenn der Isospin erhalten ist (z.B. starke Ww) kann man damit Verhältnisse von Wirkungsquerschnitten vorhersagen

Ordnung im Teilchenzoo

- Entdeckung „**seltsamer**“ (*strange*) Teilchen 1947
 - werden schnell erzeugt -> starke Ww
 - zerfallen langsam -> schwache Ww
 - Einführung der Hyperladung $Y=B+S$ neben Isospin
 - > neue Symmetriegruppe muß zwei gleichzeitig diagonale Generatoren deren Eigenwerte Isospin und Hyperladung darstellen
 - > SU(3)
- wenn SU(3)-Symmetrie vorliegt muß es Gruppen von Hadronen mit gleichem Spin, Masse etc geben, die unter den SU(3)-Transformationen invariant sind

- Darstellungen der SU(3)
fundamentale Darstellungen

$$3 = \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \bar{3} = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{d} \\ \bar{s} \end{pmatrix}$$

höhere Darstellungen

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

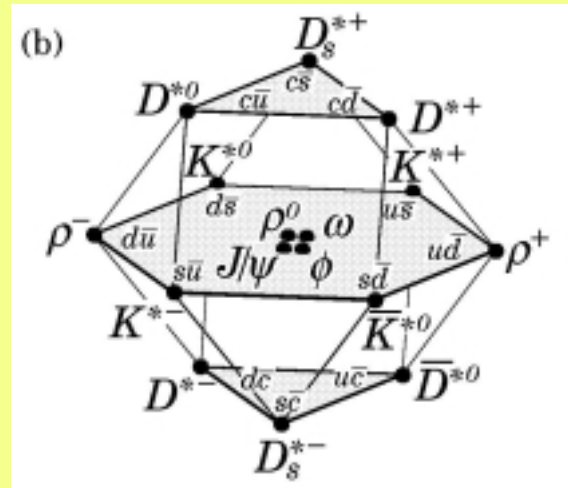
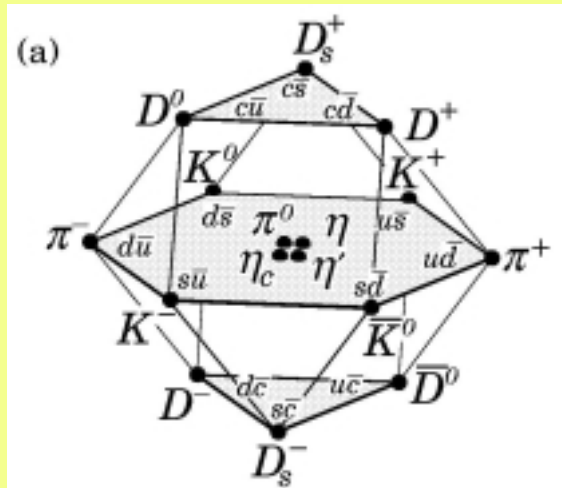
- Baryonen passen in ein Spin-1/2 Oktett und ein Spin-3/2 Dekuplett, Mesonen analog
- Gell Mann, Zweig 1964: die fundamentale Darstellung der Flavour-SU(3) entspricht drei physikalischen Teilchen, genannt „Quarks“
Hadronen sind aus Quarks zusammengesetzt

Meson- und Baryon-Multipletts

Mesonen: Quark-Antiquark

pseudoskalare
Spin 0, Parität -1

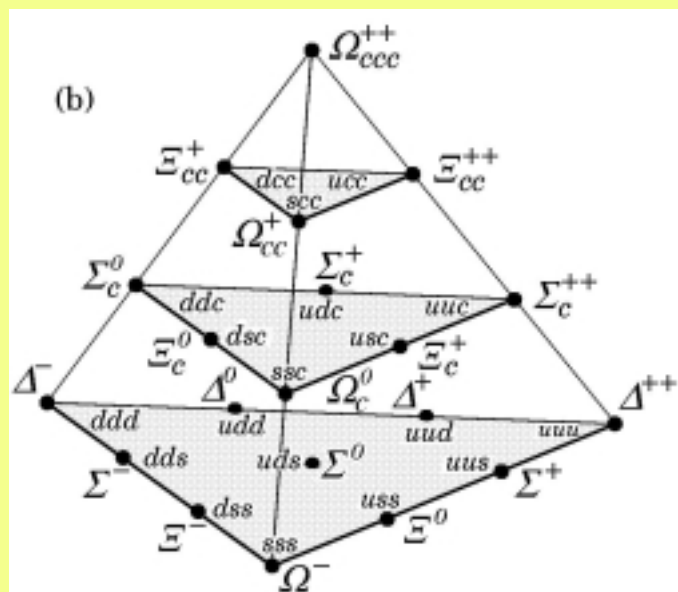
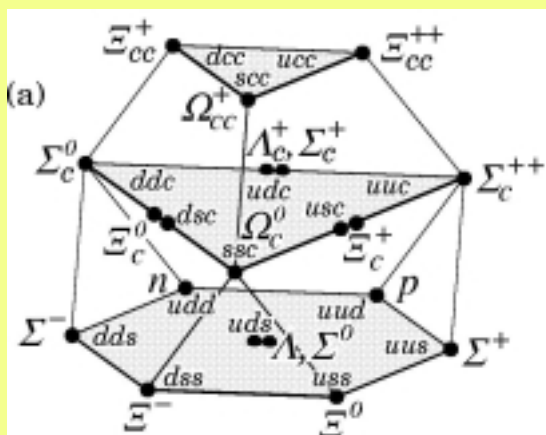
Vektormesonen Spin 1, Parität -1



Baryonen: Quark-Quark-Quark

Spin 1/2, Parität +1

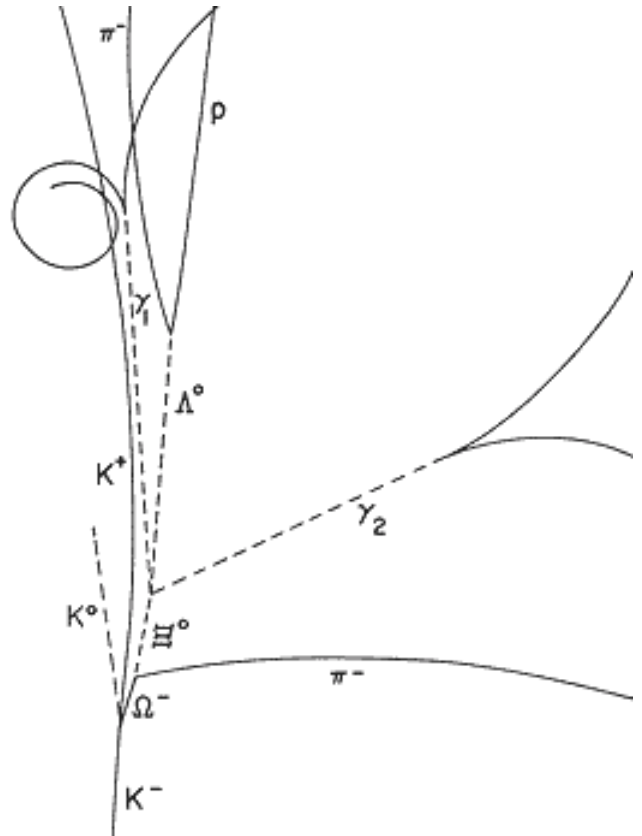
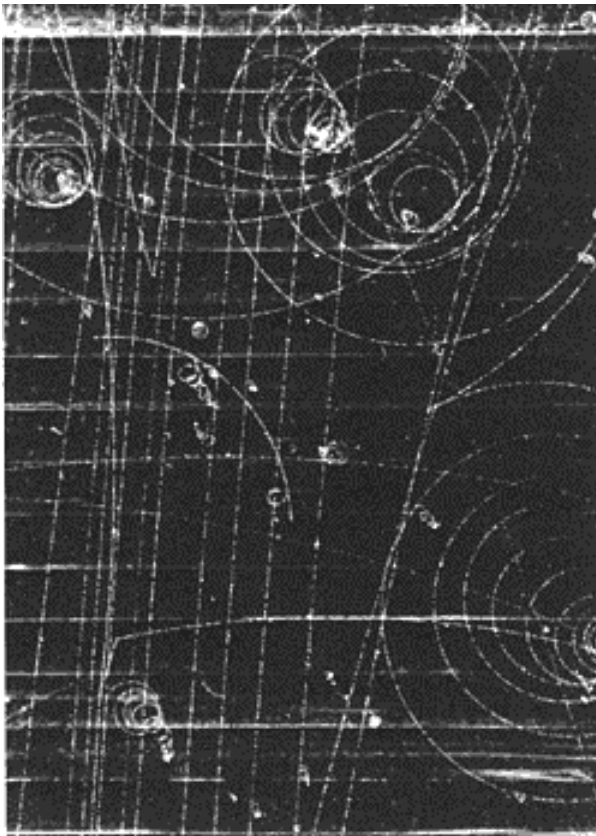
Spin 3/2, Parität +1



Ω^- wurde so 3 Jahre vor seiner Entdeckung vorhergesagt

Ω^-

- vorhergesagt durch Quarkmodell
- entdeckt 1964 am Brookhaven National Laboratory in einer großen Blasenkammer



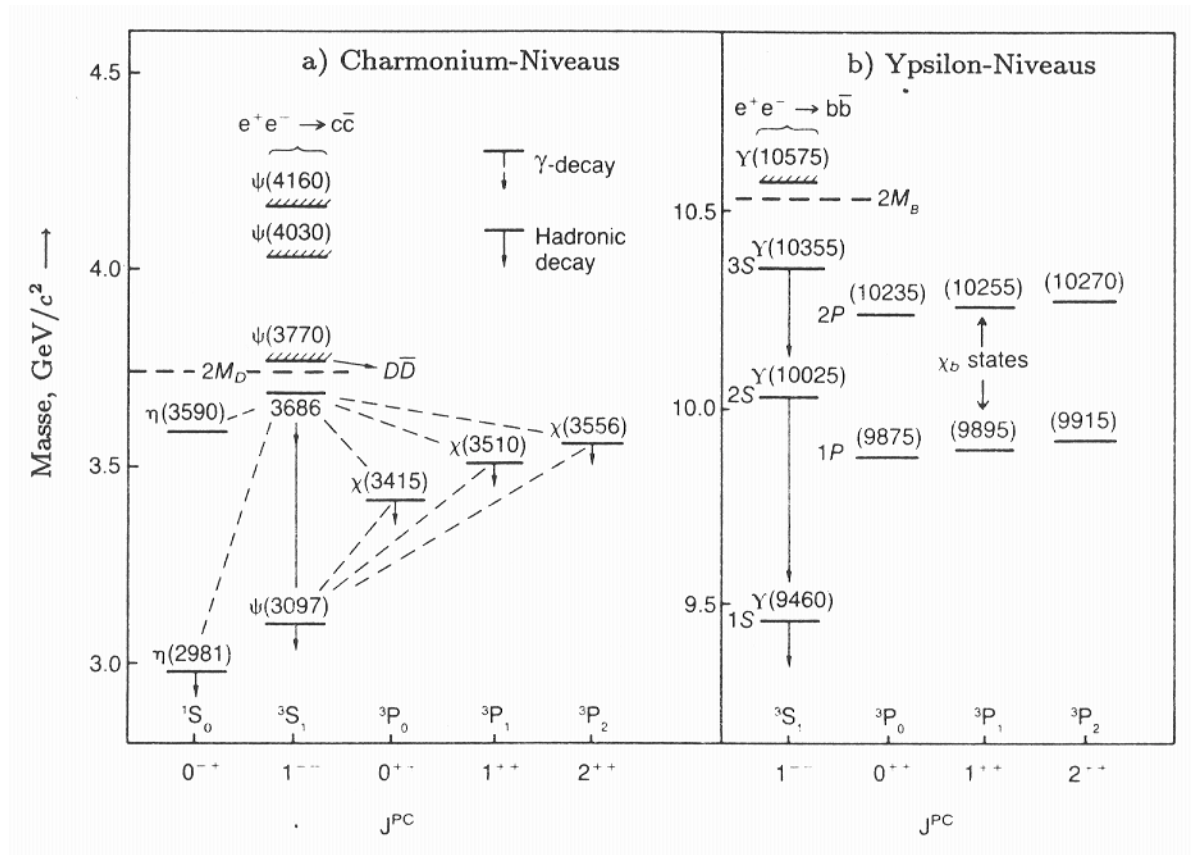
Teilchenzoo - verstanden

- alle beobachteten Teilchen passen in das Quarkmodell
- alle vom Modell vorhergesagten Teilchen werden auch beobachtet
- viele **Anregungszustände**

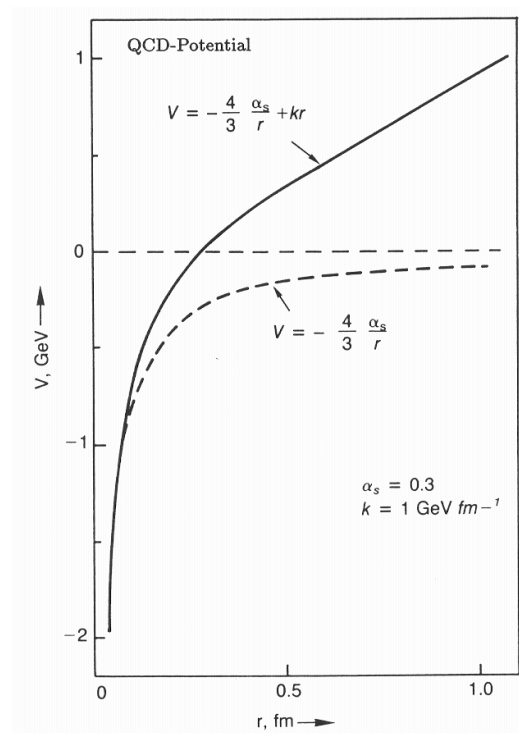
$N^{2S+1}L_J$	J^{PC}	$u\bar{d}, u\bar{u}, d\bar{d}$ $I = 1$	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$ $I = 0$	$c\bar{c}$ $I = 0$	$b\bar{b}$ $I = 0$	$\bar{s}u, \bar{s}d$ $I = 1/2$	$c\bar{u}, c\bar{d}$ $I = 1/2$	$c\bar{s}$ $I = 0$	$\bar{b}u, \bar{b}d$ $I = 1/2$	$\bar{b}s$ $I = 0$	$\bar{b}c$ $I = 0$
1^1S_0	0^{-+}	π	η, η'	η_c		K	D	D_s	B	B_s	B_c
1^3S_1	1^{--}	ρ	ω, ϕ	$J/\psi(1S)$	$\Upsilon(1S)$	$K^*(892)$	$D^*(2010)$	D_s^*	B^*	B_s^*	
1^1P_1	1^{+-}	$h_1(1235)$	$h_1(1170), h_1(1380)$	$h_c(1P)$		K_{1B}^{\dagger}	$D_1(2420)$	$D_{s1}(2536)$			
1^3P_0	0^{++}	$a_0(1450)^*$	$f_0(1370)^*, f_0(1710)^*$	$\chi_{c0}(1P)$	$\chi_{b0}(1P)$	$K_0^*(1430)$					
1^3P_1	1^{++}	$a_1(1260)$	$f_1(1285), f_1(1420)$	$\chi_{c1}(1P)$	$\chi_{b1}(1P)$	K_{1A}^{\dagger}					
1^3P_2	2^{++}	$a_2(1320)$	$f_2(1270), f_2'(1525)$	$\chi_{c2}(1P)$	$\chi_{b2}(1P)$	$K_2^*(1430)$	$D_2^*(2460)$				
1^1D_2	2^{-+}	$\pi_2(1670)$	$\eta_2(1645), \eta_2(1870)$			$K_2(1770)$					
1^3D_1	1^{--}	$\rho(1700)$	$\omega(1650)$	$\psi(3770)$		$K^*(1680)^{\dagger}$					
1^3D_2	2^{--}					$K_2(1820)$					
1^3D_3	3^{--}	$\rho_3(1690)$	$\omega_3(1670), \phi_3(1850)$			$K_3^*(1780)$					
1^3P_4	4^{++}	$a_4(2040)$	$f_4(2050), f_4(2220)$			$K_4^*(2045)$					
2^1S_0	0^{-+}	$\pi(1300)$	$\eta(1295), \eta(1440)$	$\eta_c(2S)$		$K(1460)$					
2^3S_1	1^{--}	$\rho(1450)$	$\omega(1420), \phi(1680)$	$\psi(2S)$	$\Upsilon(2S)$	$K^*(1410)^{\dagger}$					
2^3P_2	2^{++}		$f_2(1810), f_2(2010)$		$\chi_{b2}(2P)$	$K_2^*(1980)$					
3^1S_0	0^{-+}	$\pi(1800)$	$\eta(1760)$			$K(1830)$					

Meson-Spektroskopie

es wurden viele Anregungszustände beobachtet, z.B bei **Charmonium** und **Bottomium**



damit sind Rückschlüsse auf das **Bindungs-Potential** möglich



Relativistische Kinematik

- **Spezielle Relativitätstheorie:** physikalischen Gesetze in allen Inertialsystemen gleich (insbesondere die Lichtgeschwindigkeit)
- **Lorentz-Transformationen** zwischen Inertialsystemen lassen $(c^2t^2 - \mathbf{x}^2)$ invariant
- „**Vierervektor**“ ist jeder Satz aus 4 Größen, die sich wie (ct, \mathbf{x}) transformieren, Notation:

$$(ct, \vec{x}) \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3) \equiv x^\mu$$

- nach der speziellen Relativitätstheorie ist

$$\left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right) \equiv (p^0, p^1, p^2, p^3) \equiv p^\mu$$

auch ein Vierervektor

- für ein freies Teilchen

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 = m^2 c^2 \quad m : \text{Ruhemasse}$$

- **Lorentz-invariantes Skalarprodukt**

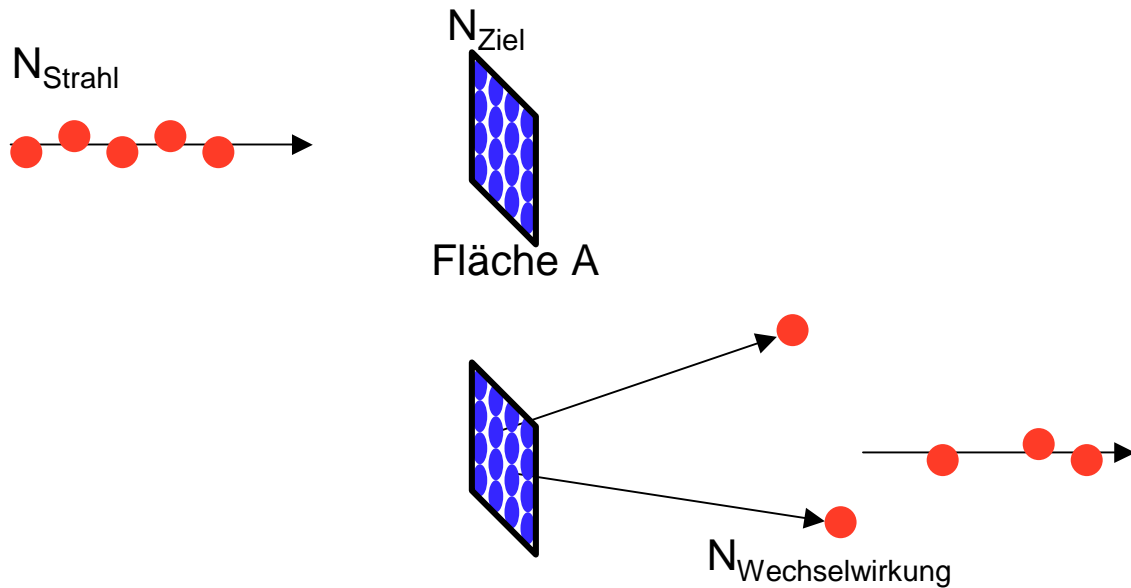
$$A \cdot B \equiv A^0 B^0 - \vec{A} \cdot \vec{B} = A_\mu B^\mu = A^\mu B_\mu \quad \text{mit } A_\mu \equiv (A^0, -\vec{A})$$

implizite Summation über gleiche Indizes

- Schwerpunktsenergie:

$$s \equiv \left(\sum_i p_i \right)^2$$

Wirkungsquerschnitt



$$\text{Wirkungsquerschnitt } \sigma \equiv \frac{N_{\text{Wechselwirkung}}}{N_{\text{Strahl}} N_{\text{Ziel}}} A$$

$$\text{Fermi's goldene Regel } W = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{fi}|^2 \frac{dN}{dE_f}$$

$$\text{Matrixelement } M_{fi} = \langle f | H_{\text{Störung}} | i \rangle$$

partieller Wirkungsquerschnitt

$$d\sigma = \frac{1}{\text{Fluß}} |M_{fi}|^2 d(\text{Phasenraum})$$

Streuexperimente (elmag.)

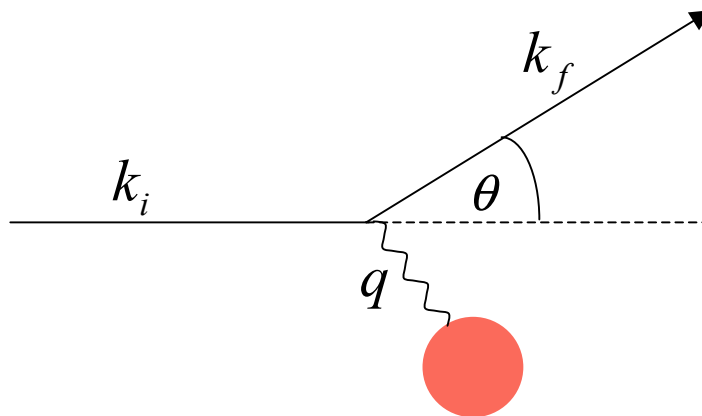
Auflösungsvermögen eines Mikroskops (reelle Photonen)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{n \sin \theta} = \frac{1}{p \sin \theta} = \frac{1}{n p_t} \quad ; \quad n \sin \theta : \text{numerische Apertur}$$

Im Streuexperiment sind die Photonen virtuell und das Auflösungsvermögen wird durch das Quadrat ihres Viererimpulses gegeben ($i=\text{initial}$, $f=\text{final}$)

$$Q^2 \equiv -q^2 \equiv (k_i - k_f)^2 = (E_i - E_f)^2 - (\vec{p}_i - \vec{p}_f)^2 \neq 0$$

Elastische Streuung: kein Energieübertrag auf das Streuobjekt



Winkelverteilung wird mit der Streuung an punktförmigen Objekt verglichen

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega} \Big|_{\text{punktförmig}} \left| F(Q^2) \right|^2$$

$F(Q^2)$ ist ein „Formfaktor“, seine Fouriertransformierte beschreibt die Dichteverteilung des Objekts an dem gestreut wird

- punktförmiges Streuobjekt: $F(Q^2)=1$
- ausgedehntes Streuobjekt: $F(Q^2)$ verschwindet für große Q^2

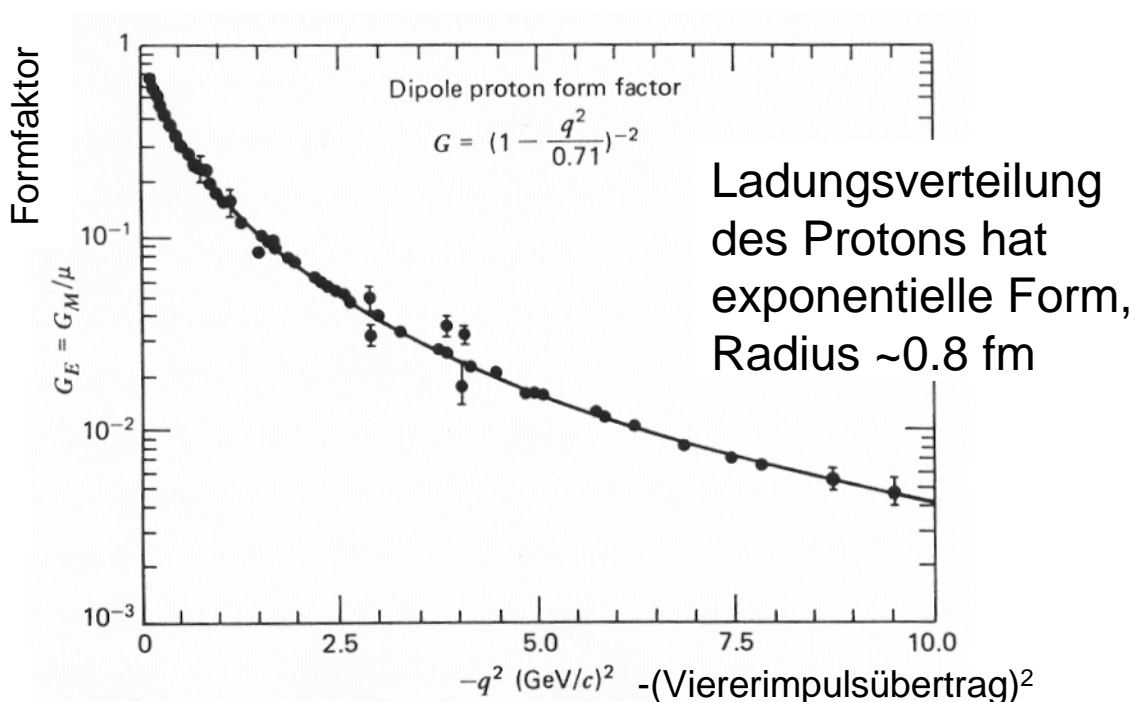
Elastische ep-Streuung

Spins und magnetische Momente müssen berücksichtigt werden

-> der punktförmige Wirkungsquerschnitt wäre Dirac-Streuung

-> es ergeben sich zwei Formfaktoren

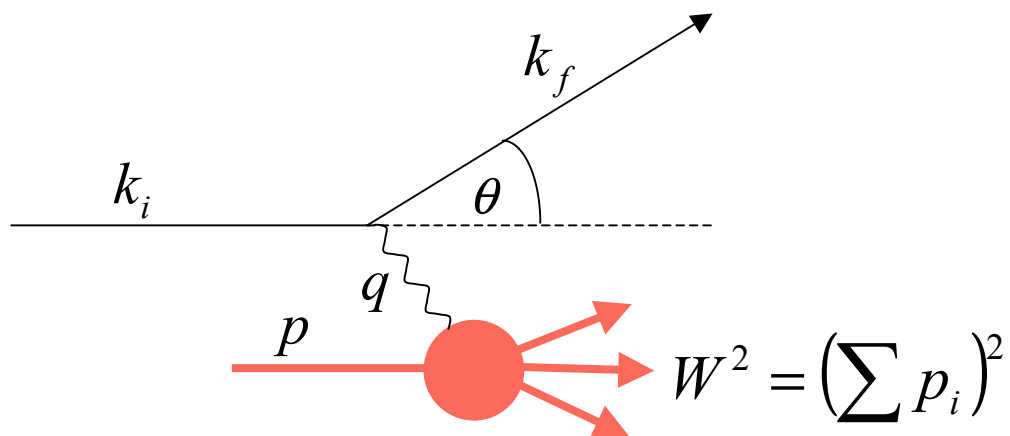
$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{lab} = \frac{\alpha^2}{4E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \frac{E_f}{E_i} \left(\frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{1 + \tau} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2\tau G_M^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right), \quad \tau \equiv -q^2 / 4m_p^2$$



Inelastische ep-Streuung

höheres Auflösungsvermögen = höhere Energie

dann ist die Streuung aber nicht mehr elastisch, sondern das Proton wird angeregt oder bricht sogar auseinander -> **inelastische Streuung**



neben Q^2 braucht man eine zweite Variable um die Reaktion zu beschreiben:

- invariante Masse W des Proton-Systems
- **SkalenvARIABLE**

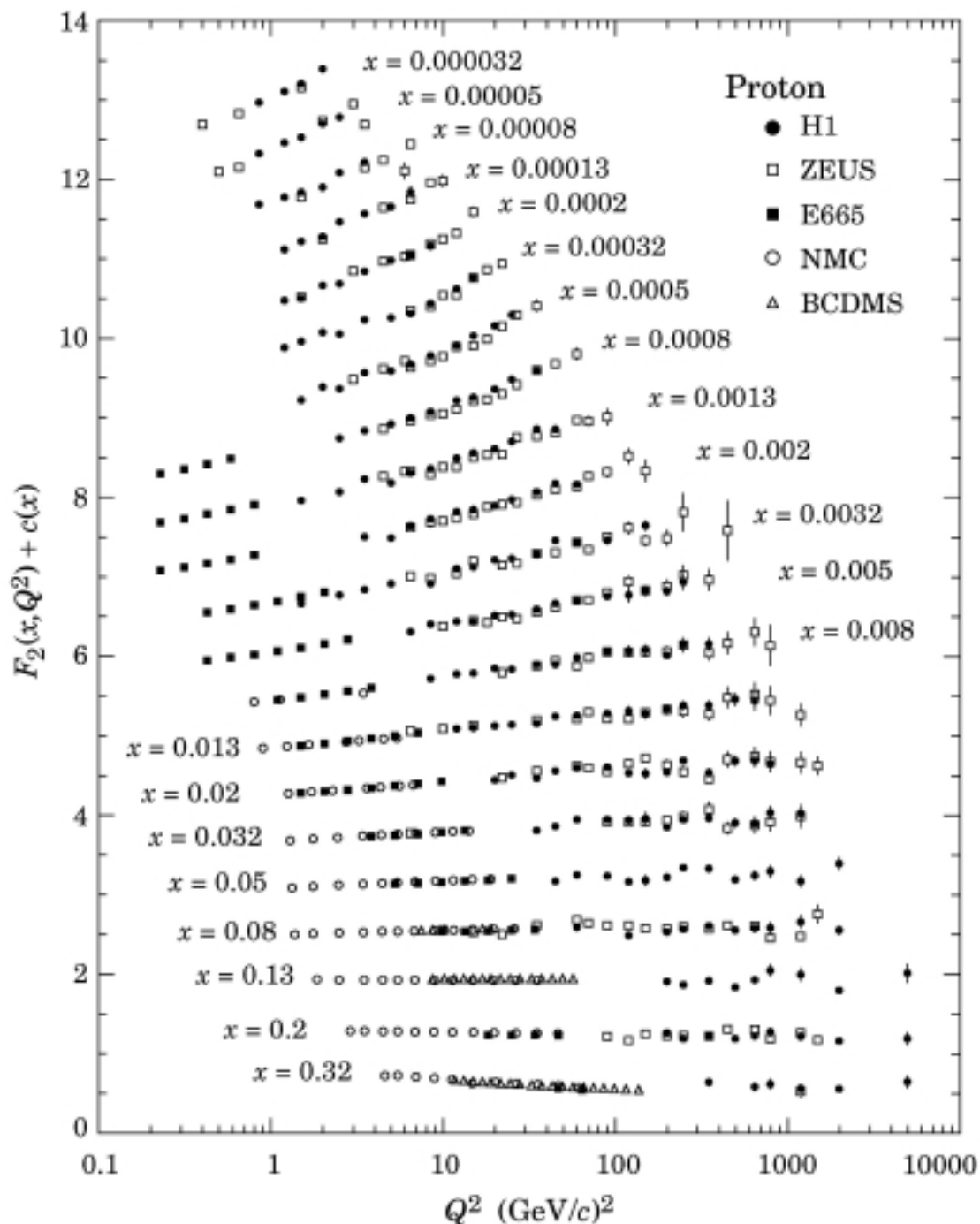
$$x \equiv \frac{Q^2}{2p \cdot q} = \frac{Q^2}{W^2 - m_p^2 + Q^2}$$

der Wirkungsquerschnitt lautet dann

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 dx} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^2} \frac{1}{x} \frac{E_f}{E_i} \left(F_2(x, Q^2) \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{Q^2}{2m_p^2 x^2} 2xF_1(x, Q^2) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

mit den beiden Strukturfunktionen F_1 und F_2

Scaling und Partonen

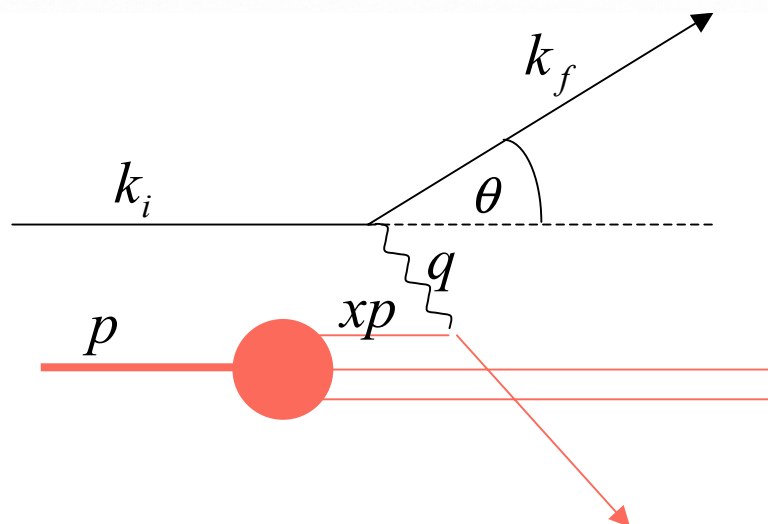
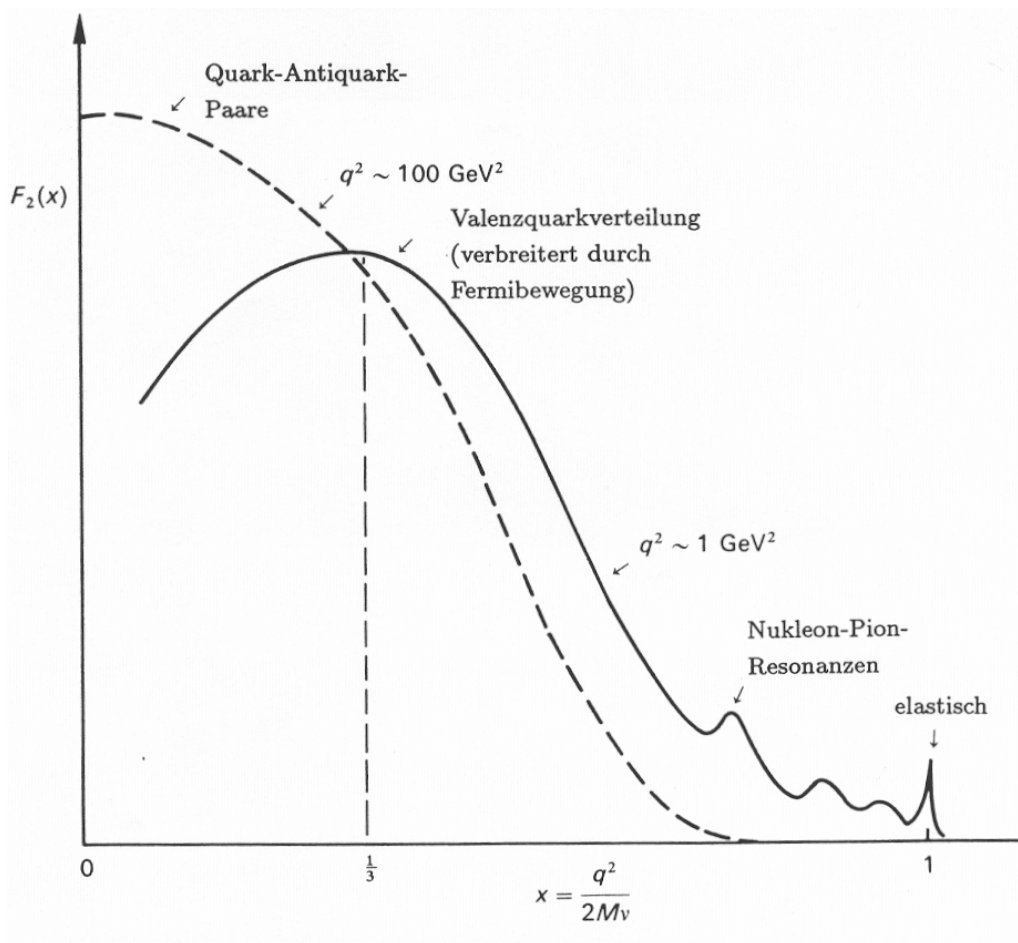


F_2 hängt offenbar nur schwach von Q^2 ab

-> **Bjorken-Scaling**

-> Streuung findet an **punktförmigen** Bestandteilen des Protons statt, den „**Partonen**“

Interpretation von x

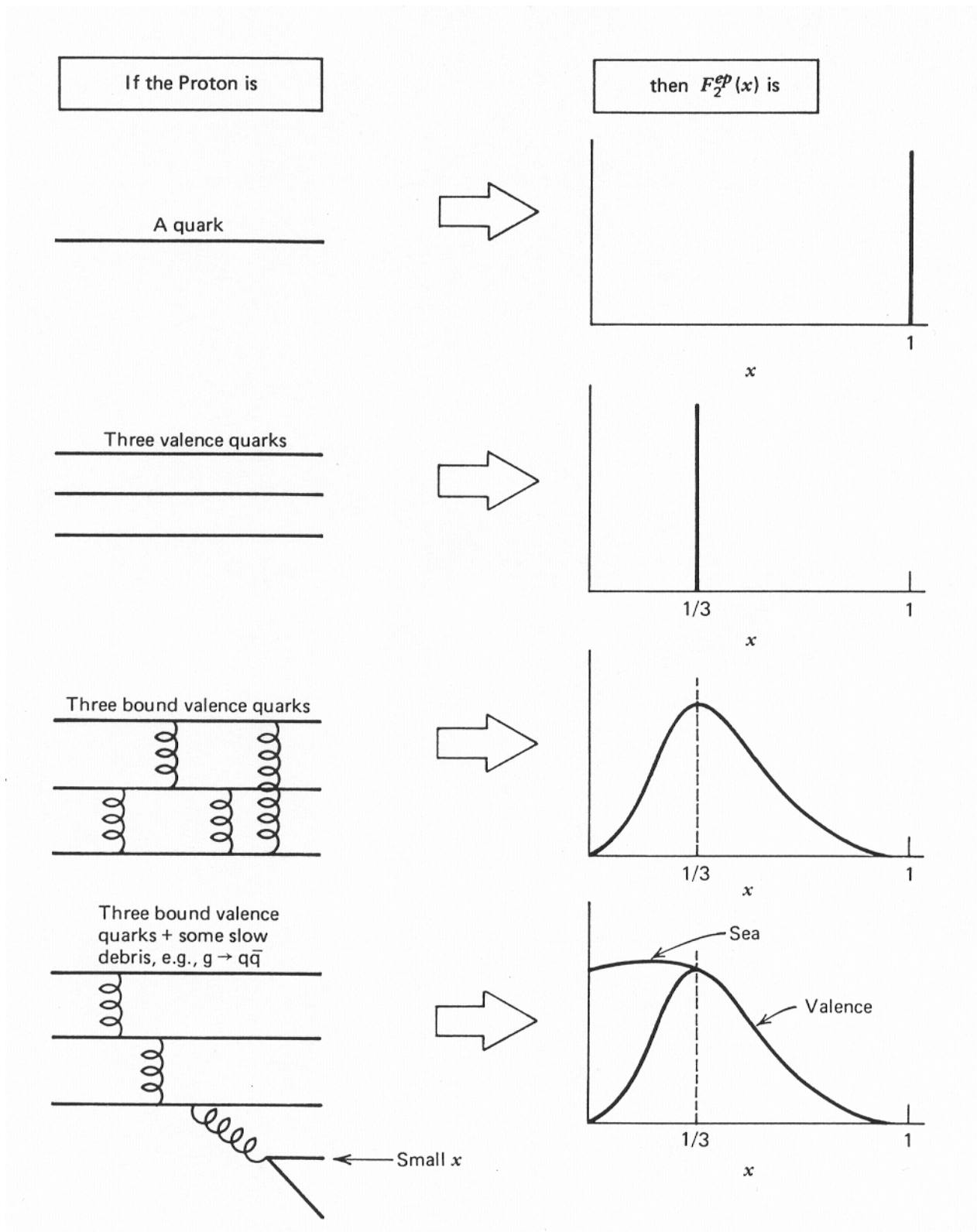


$$0 \approx m_{parton}^2 = (xp + q)^2 = x^2 p^2 + 2x p \cdot q + q^2 \approx 2x p \cdot q - Q^2$$

$$\Rightarrow x = \frac{Q^2}{2 p \cdot q}$$

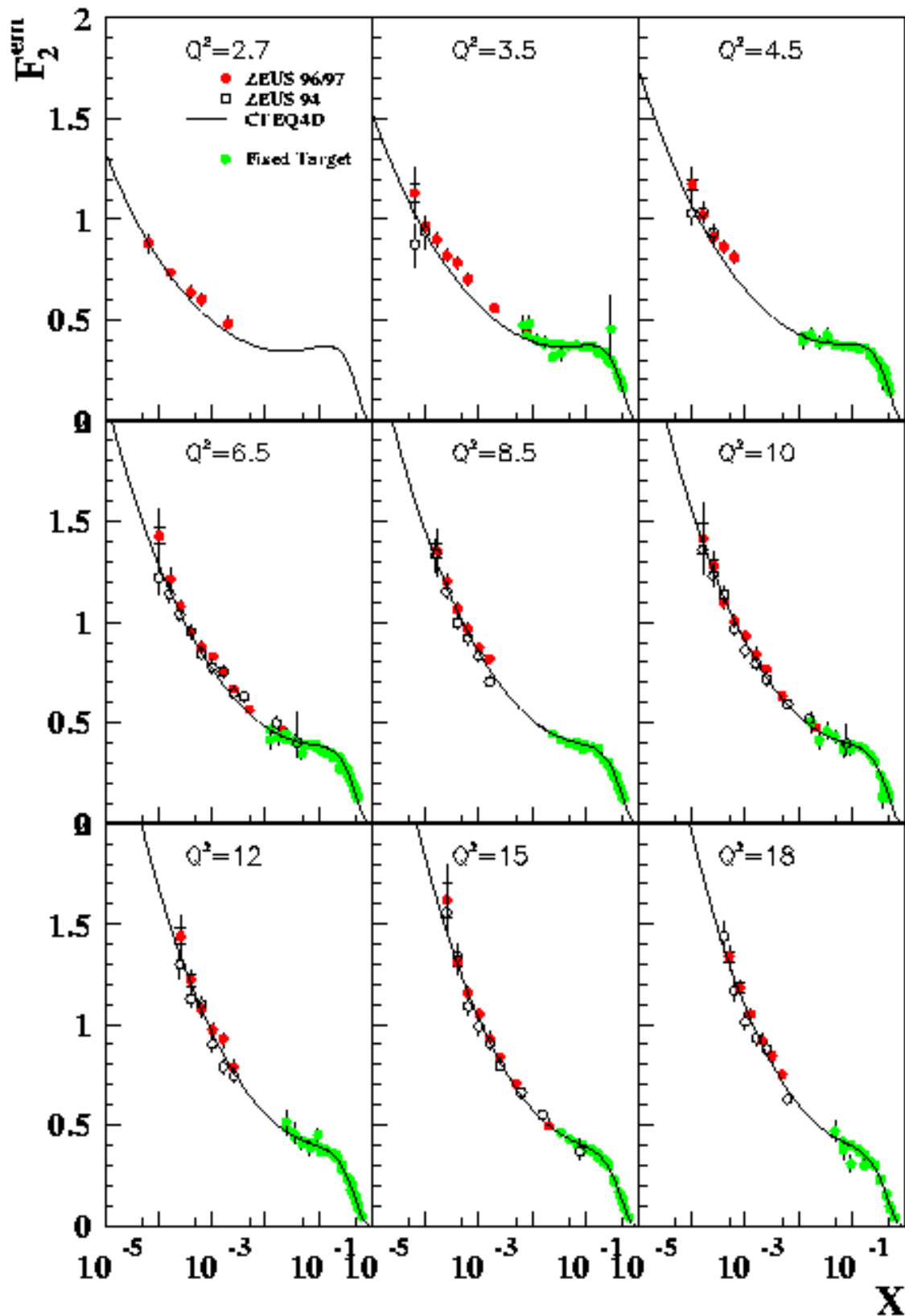
x: Anteil des getroffenen Partons am Protonimpuls

Erwartung für $F_2(x)$



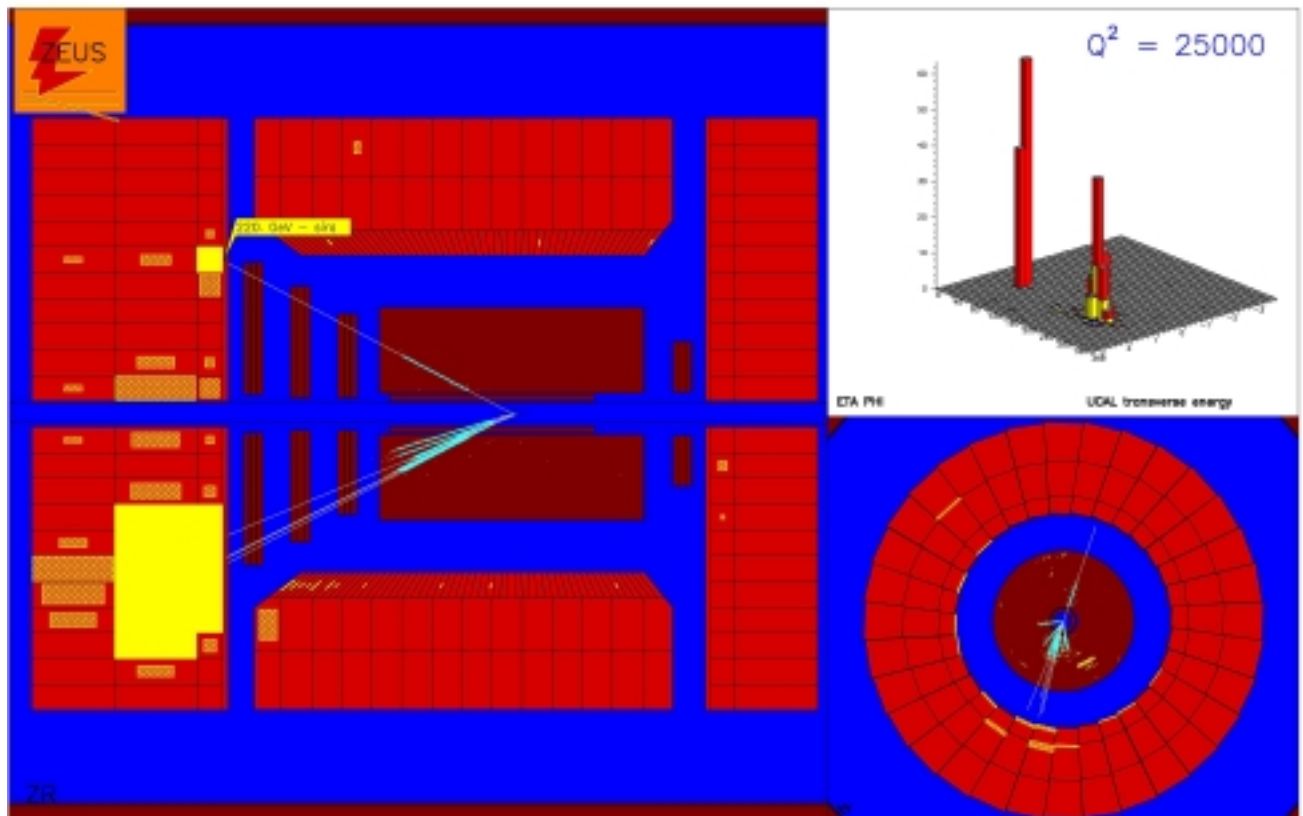
F_2 -Anstieg bei kleinen x

ZEUS Preliminary 1996-97



HERA (DESY, Hamburg)

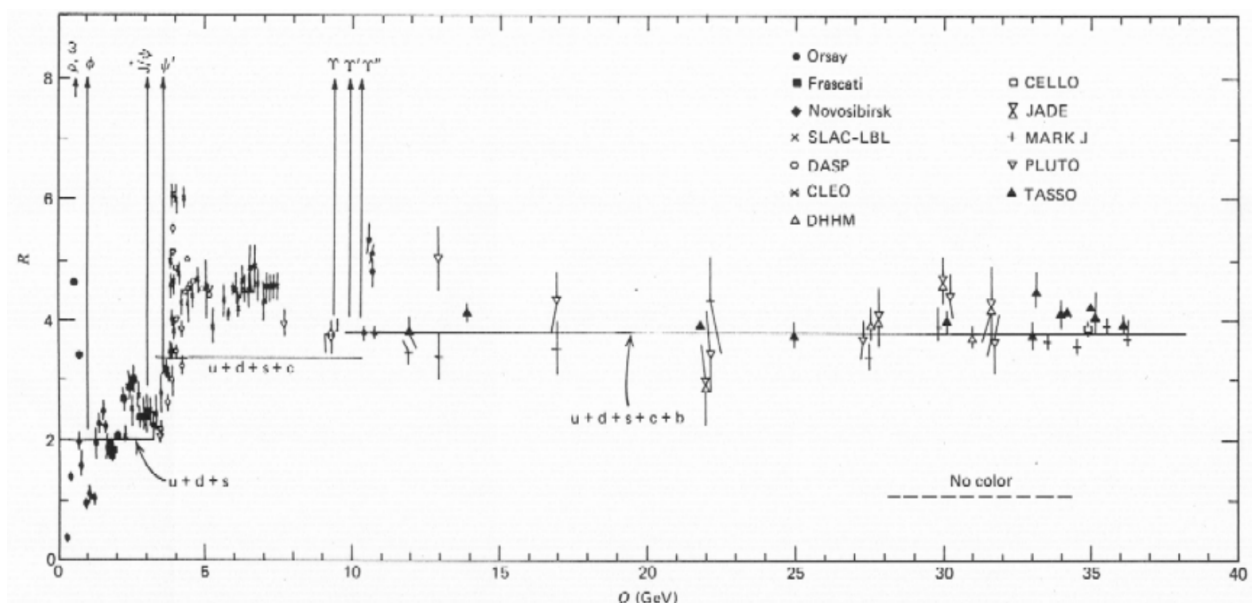
- seit 1992 in Betrieb
- Elektronen oder Positronen (27.5Gev) kollidieren mit Protonen (920GeV)
- Schwerpunktsenergie 318 GeV
- vier Experimente: H1, ZEUS, Hermes, HERA-B



R-Verhältnis

$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\left| \begin{array}{c} e^+ \\ e^- \end{array} \right| \sqrt{\alpha} e_q \sqrt{\alpha} \left| \begin{array}{c} q \\ q \end{array} \right|^2}{\left| \begin{array}{c} e^+ \\ e^- \end{array} \right| \sqrt{\alpha} \sqrt{\alpha} \left| \begin{array}{c} \mu^+ \\ \mu^- \end{array} \right|^2} = \sum_q e_q^2$$

$$R = \begin{cases} \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{2}{3} & \text{für } u, d, s \\ \frac{2}{3} + \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{10}{9} & \text{für } u, d, s, c \\ \frac{10}{9} + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{11}{9} & \text{für } u, d, s, c, b \end{cases}$$



$R \rightarrow 3R !!!$

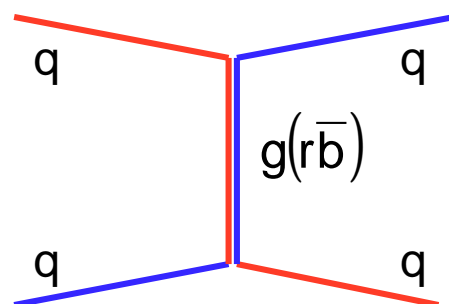
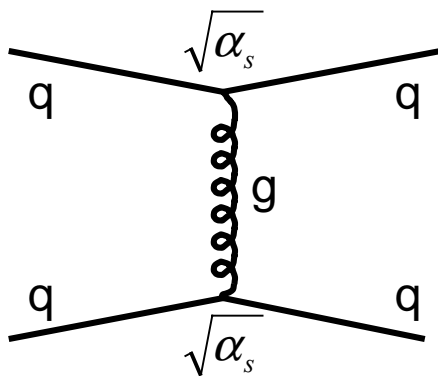
Quarks kommen in 3 Sorten vor:

rot, grün, blau

Quanten-Chromo-Dynamik

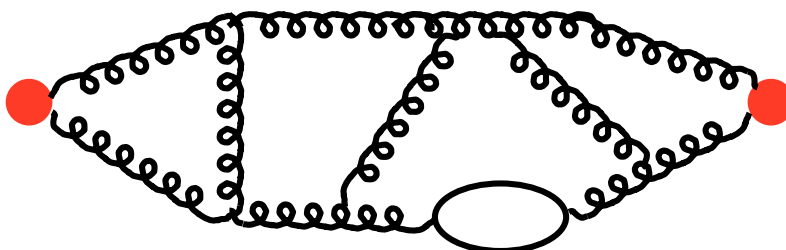
- Theorie die eine Kraft zwischen Quarks vermittelt welche
 - bei kleinen Abständen ähnlich wie QED ist
 - bei großen Abständen konstant wird (*confinement*)
- lokale Eichsymmetrie bezüglich **SU(3)_{Farbe}**
- Kopplungsstärke $\sqrt{\alpha_s}$
- SU(3) hat 8 Generatoren -> 8 Eichbosonen: **Gluonen**
- SU(3) ist nicht-abelsch -> Eichbosonen koppeln aneinander, die Gluonen tragen Farbe/Antifarbe
- hohe Energien, kleine Abstände:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r}$$

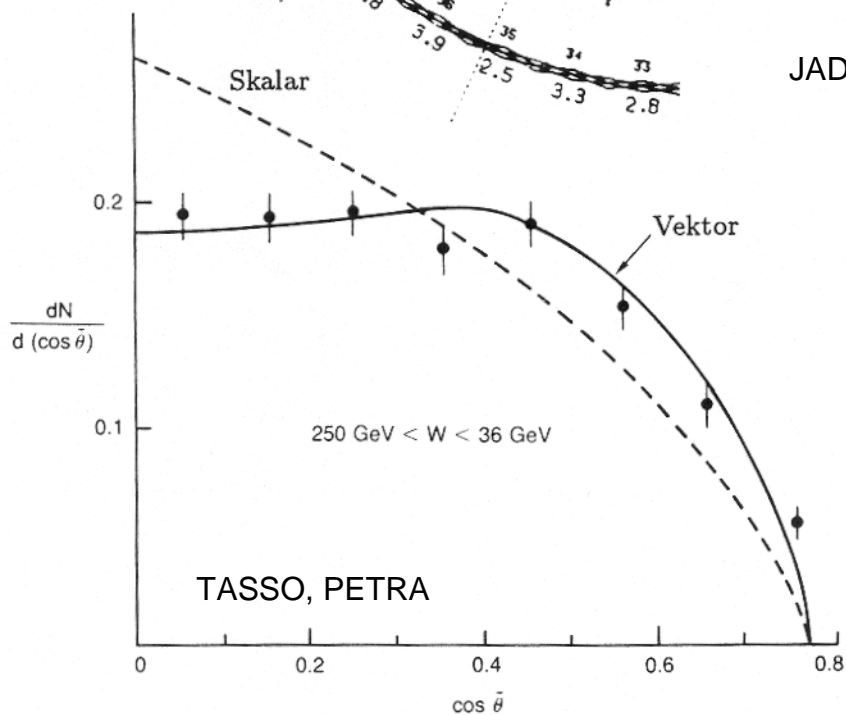
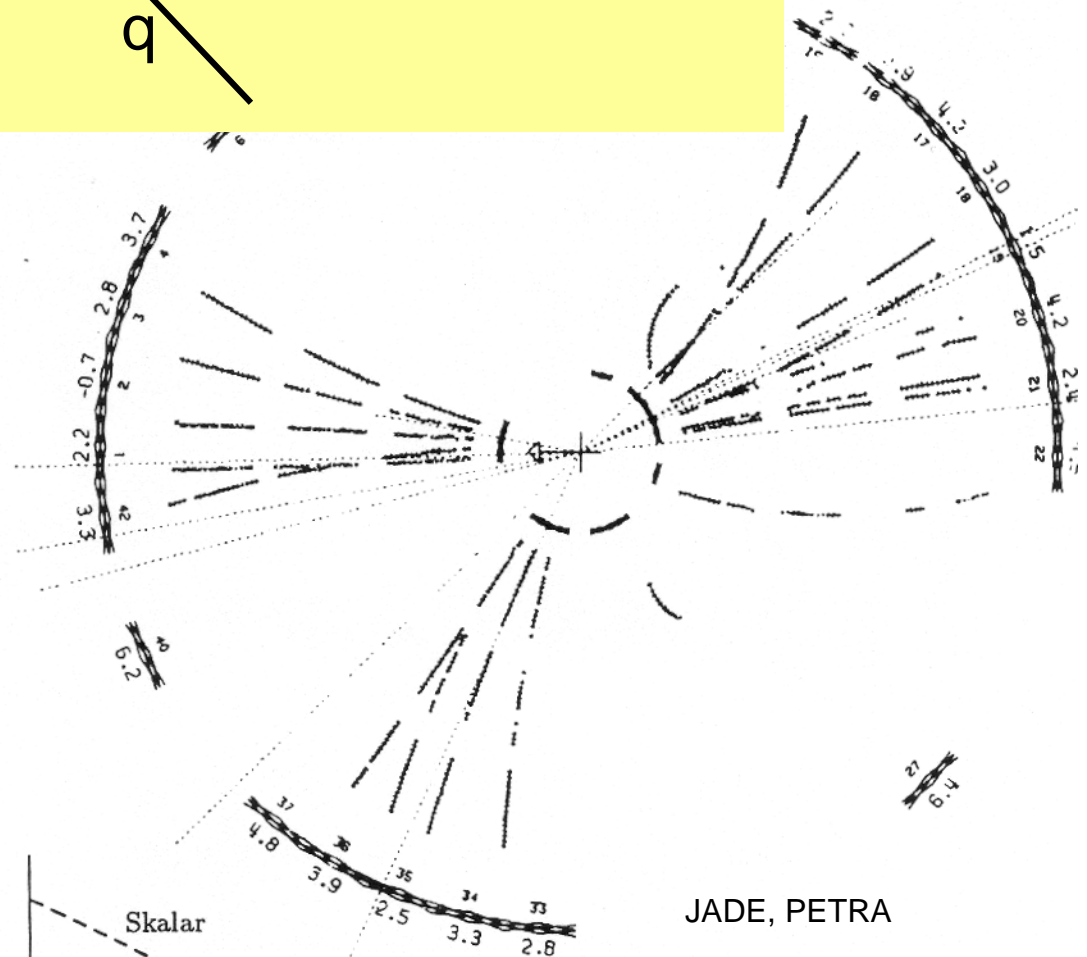
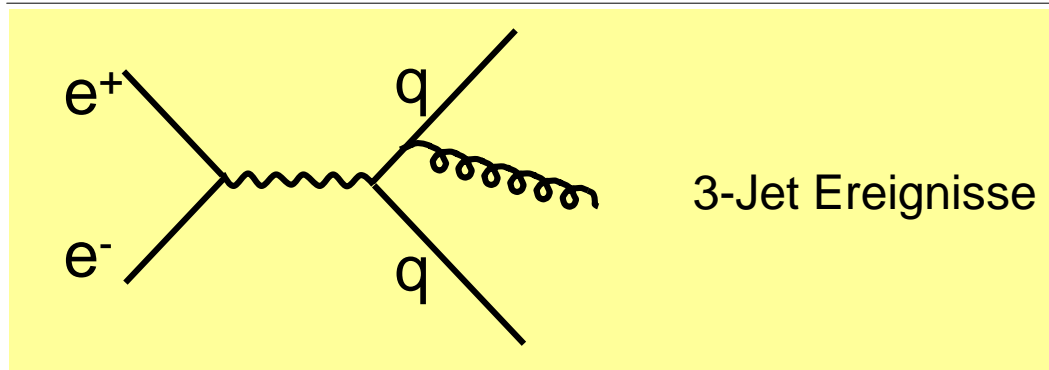


- Einschnürung des Farbfeldes bei wachsendem Abstand:

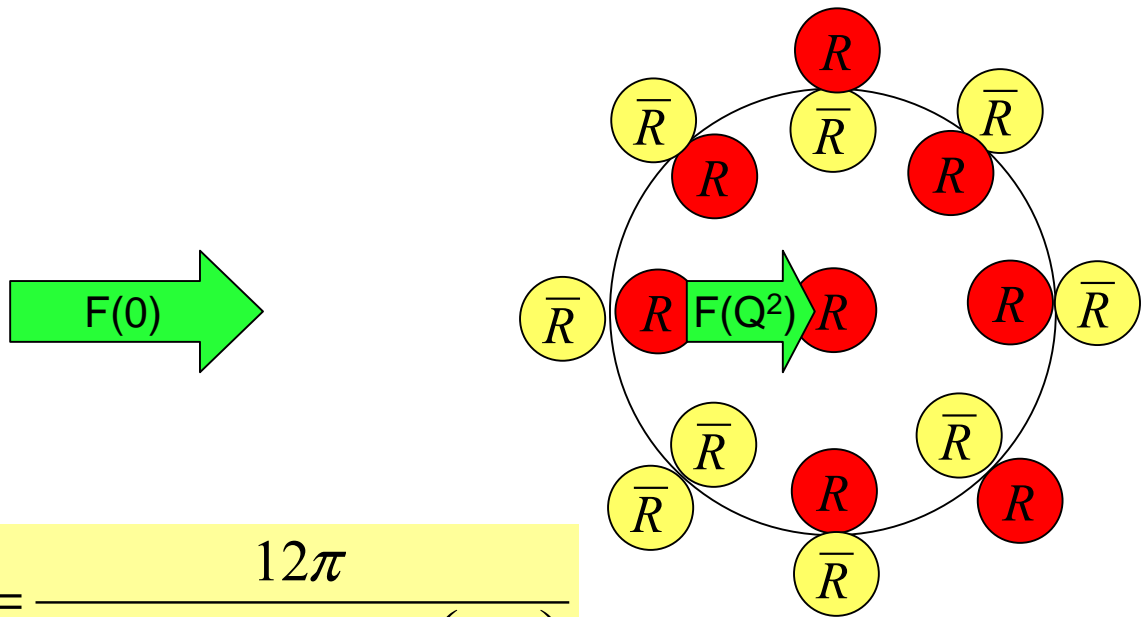
$$V(r) = kr$$



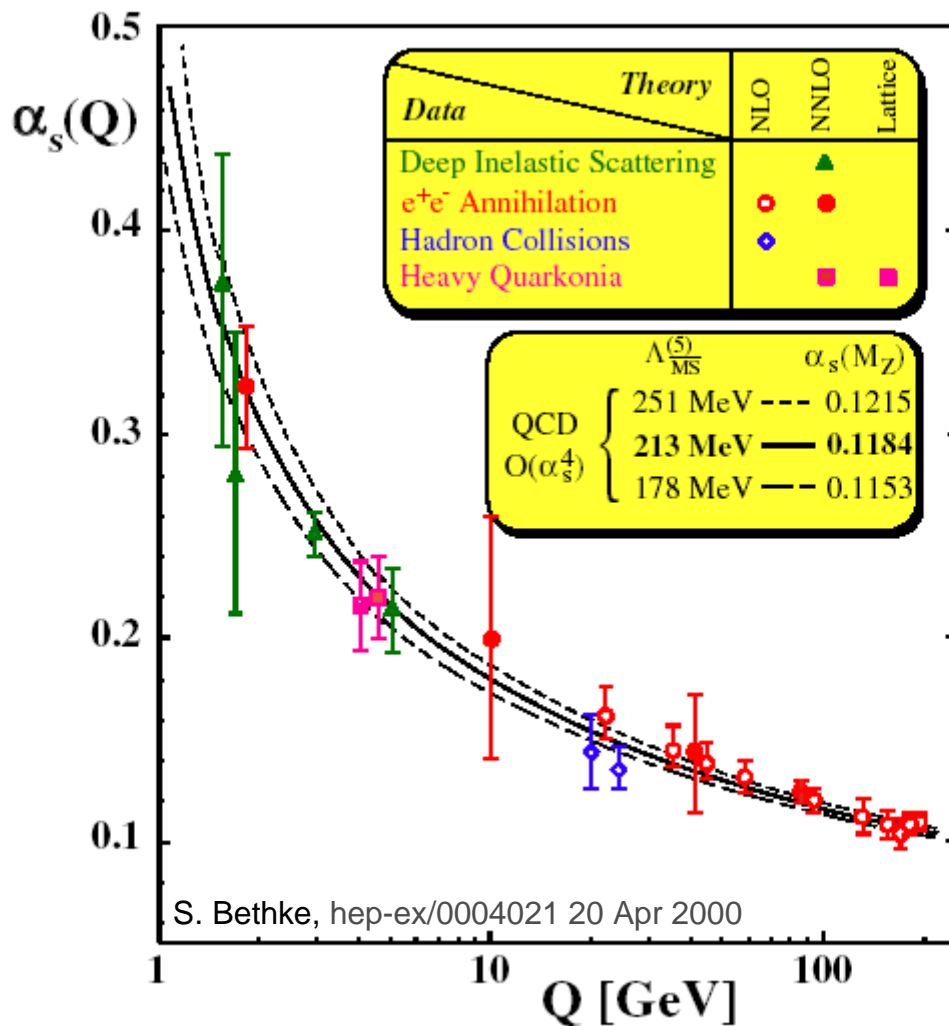
Entdeckung der Gluonen (DESY, 1979)



Laufende Kopplung QCD

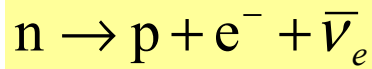


$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2n_{flavour}) \log\left(\frac{Q^2}{\Lambda^2}\right)}$$



Schwache Wechselwirkung

- schwache Wechselwirkung vermittelt radioaktive Zerfälle wie den **Betazerfall**



- sie tritt nur in Erscheinung wenn Übergänge mit der elmag. oder starken Ww verboten sind
- nur die schwache Ww kann Übergänge zwischen verschiedenen Quarks und zwischen verschiedenen Leptonen erzeugen
- Neutrinos wechselwirken nur schwach
- „schwach“ bedeutet lange Zerfallszeiten (10^{-8} bis 10^3 s), kleine Wirkungsquerschnitte
- sehr kurze Reichweite ($\sim 10^{-18}$ m)
- Fermi-Theorie (1933): Punktwechselwirkung

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} G_F |M|^2 \frac{dN}{dE}$$

$$|M|^2 \text{ konstant, von Ordnung } 1$$

$$G_F \approx 1.02 \times 10^{-5} \frac{1}{m_p^2} \approx 8.7 \times 10^{-5} \text{ MeV fm}^3$$

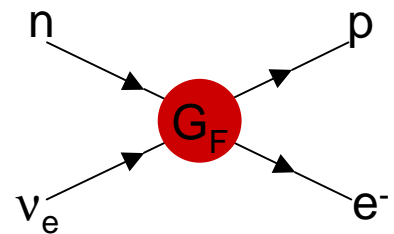
- Fermikonstante ist dimensionsbehaftet

W-Bosonen

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Punktwechselwirkung

- > G_F hat Einheit (Energie)⁻²
- > Wirkungsquerschnitte \sim Energie
- > verletzt Unitritt



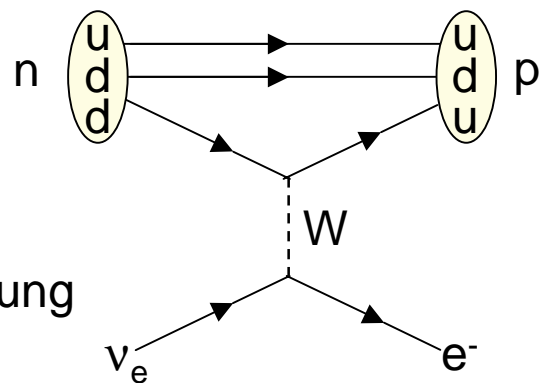
führe **geladenes Vektorboson W** als Austauscheteilchen ein
(Glashow, Salam, Weinberg 1967/68)

-> Propagator im Matrixelement:

$$\frac{1}{M_W^2 - q^2}$$

q^2 klein im Betazerfall -> Identifizierung

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2}$$



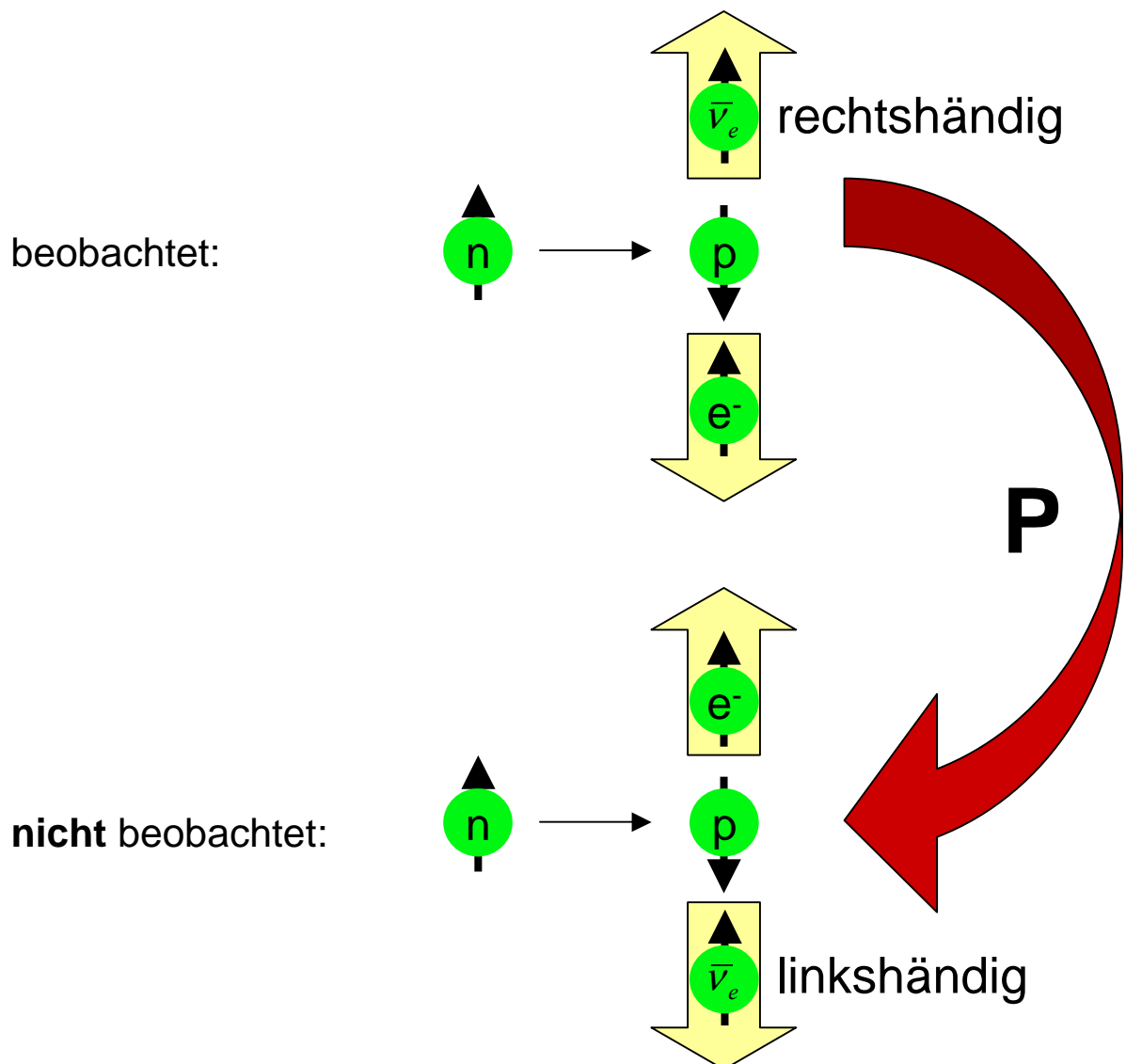
W-Boson wurde 1983 am CERN entdeckt: $M_W \approx 81 \text{ GeV}$

damit folgt daß $g \approx 1$

die schwache Wechselwirkung ist schwach und kurzreichweitig, weil das Austauschboson so schwer ist;
die Kopplung ist vergleichbar mit QED

Paritätsverletzung

- **Paritätstransformation P** = Spiegelung am Ursprung
- elektromagnetische und starke W w sind invariant unter **P**
- Betazerfall verletzt **P** -Symmetrie maximal denn die entstehenden Anti-Neutrinos sind **rechtshändig** (Wu, 1957)



-> **V-A Theorie** (Feynman, Gell-Mann, ..., 1958)

CP-Verletzung

- **Ladungskonjugation C** ändert das Vorzeichen aller ladungsartigen inneren Quantenzahlen
- elektromagnetische und starke Ww sind invariant unter **C**
- schwache Ww ist nicht invariant unter **C** (wie **P**)
- schwache Ww verletzt sogar **CP**, wenn auch nur leicht mit einem Anteil in der Größenordnung 10^{-3}
- CP-Verletzung zuerst im **Kaon-System** beobachtet bei Zerfällen in 2 bzw. 3 Pionen, wird jetzt im B-Meson-System vermessen
- weiteres Beispiel:

$$\begin{array}{c} K_L \rightarrow e^+ \nu_e \pi^- \quad \text{häufiger} \\ \updownarrow \mathbf{CP} \\ K_L \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \pi^+ \end{array}$$

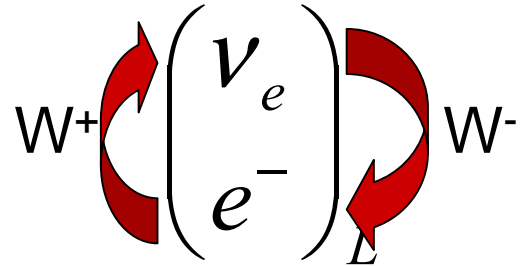
- CP-Verletzung könnte bei der Entstehung der **Materie-Antimaterie-Asymmetrie** eine entscheidende Rolle spielen

Geladene und neutrale Ströme

- geladene** Ströme vermitteln Übergänge in folgenden Doublets

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$$



- um Übergänge z.B. von s nach u erklären zu können schlug **Cabbibo** vor (1963) daß die „schwachen“ und „starken“ Eigenzustände der Quarks verschieden seien:

$$\begin{aligned} d' &= d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \\ s' &= -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c \end{aligned} \quad \theta_c \approx 0.21$$

Verallgemeinerung auf (d', s', b') :

Cabbibo-Kobayashi-Maskawa-Matrix

- 1973 wurden am CERN **neutrale** schwache Ströme beobachtet:

$$\begin{aligned} \nu_\mu + N &\rightarrow \nu_\mu + X \\ \bar{\nu}_\mu + e^- &\rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^- \end{aligned}$$

die Neutrinos sind auch hier alle linkshändig,
die anderen Teilchen treten aber auch rechtshändig auf

- 1983 wurde das dazugehörige Austauschboson am CERN entdeckt: das **Z_0**

Elektroschwache Vereinigung

- bei Energien oberhalb der Masse der schwachen Vektorbosonen sind elektromagnetische und schwache W ähnlich
- die W -Bosonen wirken auf den Dubletts des schwachen Isospins, also wäre $SU(2)_I$ eine naheliegende Symmetriegruppe, um die schwache W aus einer lokalen Eichinvarianz abzuleiten; 3 Generatoren: W^+, W^-, Z^0 ?
- Problem: Z^0 koppelt auch an rechtshändige Teilchen
- Idee (Glashow, Weinberg, Salam, 1961-68): Z^0 und A (Photon) sind gemischte Zustände aus dem W^0 und einem geeignet konstruierten „ B “ (ergibt sich als Eichboson einer $U(1)_Y$ zur „schwachen Hyperladung“ $Y=2(Q-I_3)$)

$$A = B \cos \theta_W + W^0 \sin \theta_W$$

$$Z = -B \sin \theta_W + W^0 \cos \theta_W$$

θ_W ist der Weinberg-Winkel $\sin^2 \theta_W \approx 0.23$

- aus der lokalen Eichinvarianz unter $SU(2)_I \otimes U(1)_Y$ ergibt sich die gesamte elektroschwache W .
- für die Kopplungen g der $SU(2)$ und g' der $U(1)$ gilt

$$g \sin \theta_W = g' \cos \theta_W = e$$

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2} \Rightarrow M_W = \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{8G_F}} \frac{e}{\sin \theta_W} = 78 \text{ GeV}$$

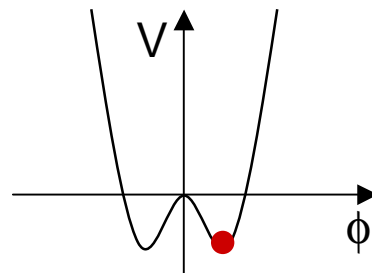
Higgs-Mechanismus

- die W- und Z-Bosonen sind sehr schwer (80,91 GeV)
- Masseterme der Form $\frac{M^2}{2} W_\mu W^\mu$ zerstören die Eichinvarianz und damit die Renormierbarkeit
- Higgs-Mechanismus (Higgs 1964):
Masseterme werden durch Kopplung der Bosonen an ein neues „Higgs-Feld“ erzeugt, dessen Vakuum-Erwartungswert nicht verschwindet, sondern geeignet gewählt wird (spontane Symmetriebrechung)
- derart erzeugte Masseterme erhalten die Renormierbarkeit (t'Hooft 1971)

$$\phi \equiv \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix} \quad \text{Higgsfelder als Isospin - Doublet}$$

$$L = \left| (i\partial_\mu - g\vec{T} \cdot \vec{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu) \phi \right|^2 - \left(\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 \right) \quad \text{mit } \mu^2 < 0 \text{ und } \lambda > 0$$

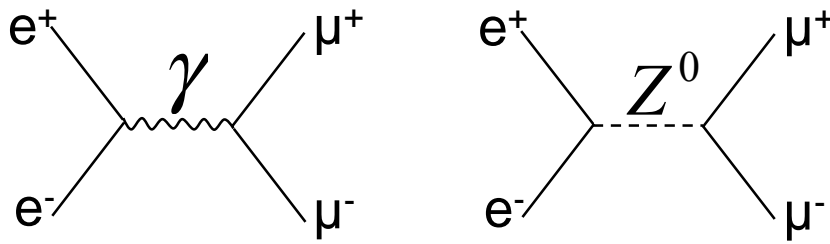
$$\text{Wähle } \phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} \quad \text{mit } v^2 \equiv -\frac{\mu^2}{\lambda}$$



$$L(\phi_0) = \left(\frac{1}{2} v g \right)^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{1}{8} v^2 (g W_\mu^3 - g' B_\mu)^2 + 0 \cdot (g' W_\mu^3 - g B_\mu)^2$$

$$\begin{aligned} M_W &= \frac{1}{2} v g \\ M_Z &= \frac{1}{2} v \sqrt{g^2 + g'^2} \\ M_A &= 0 \end{aligned} \quad \frac{M_W}{M_Z} = \cos \theta_W$$

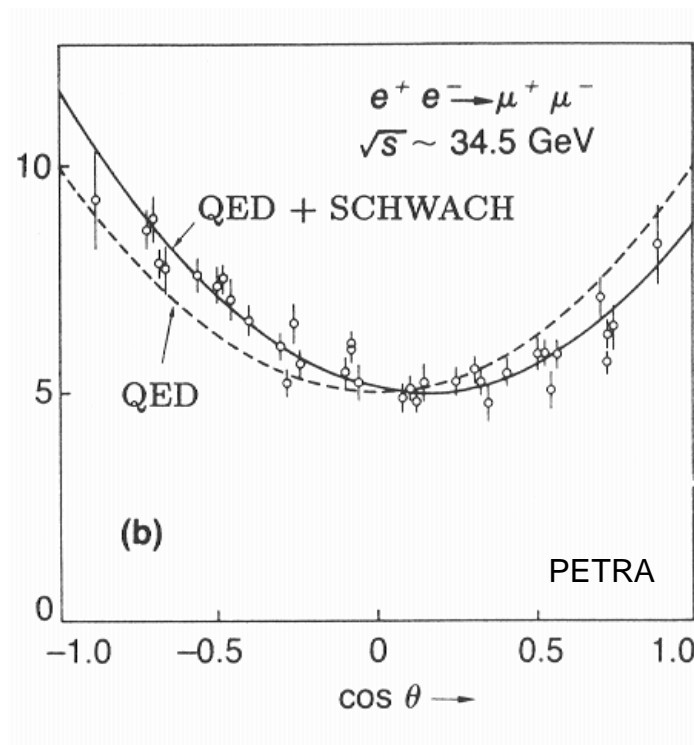
Photon- Z^0 -Interferenz



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s} [A_0(1 + \cos^2 \theta) + A_1 \cos \theta]$$

$$\gamma: \quad A_0 = 1 \quad A_1 = 0$$

$$Z^0: \quad A_0 = f(V - A \text{ Parameter}) \quad A_1 = f(V - A \text{ Parameter}) \neq 0$$

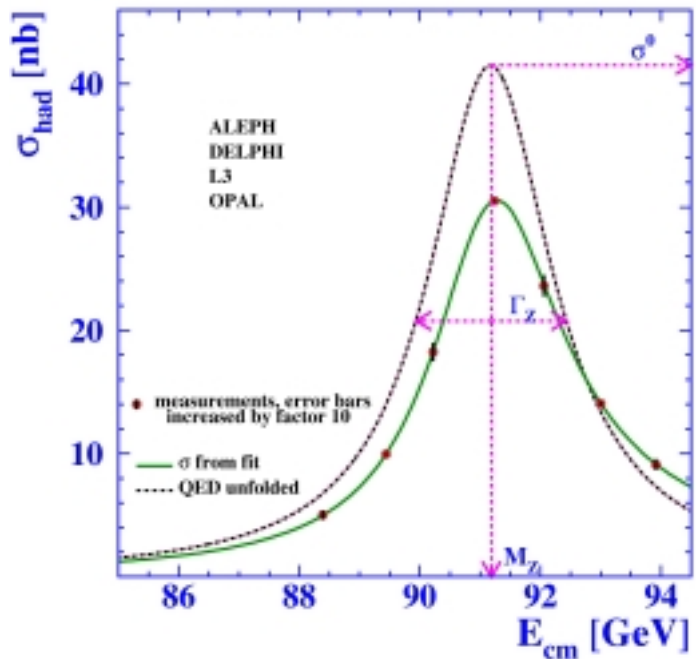


Messung der Asymmetrie erlaubt Bestimmung
des Weinbergwinkels

Z⁰-Präzisionsmessungen an LEP

$$\begin{aligned}
 m_Z &= 91.1875 \pm 0.0021 \text{ GeV}, \\
 \Gamma_Z &= 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}, \\
 \sigma_h^0 &= 41.540 \pm 0.037 \text{ nb}, \\
 R_\ell &= 20.767 \pm 0.025, \\
 A_{\text{FB}}^{0,\ell} &= 0.0171 \pm 0.0010.
 \end{aligned}$$

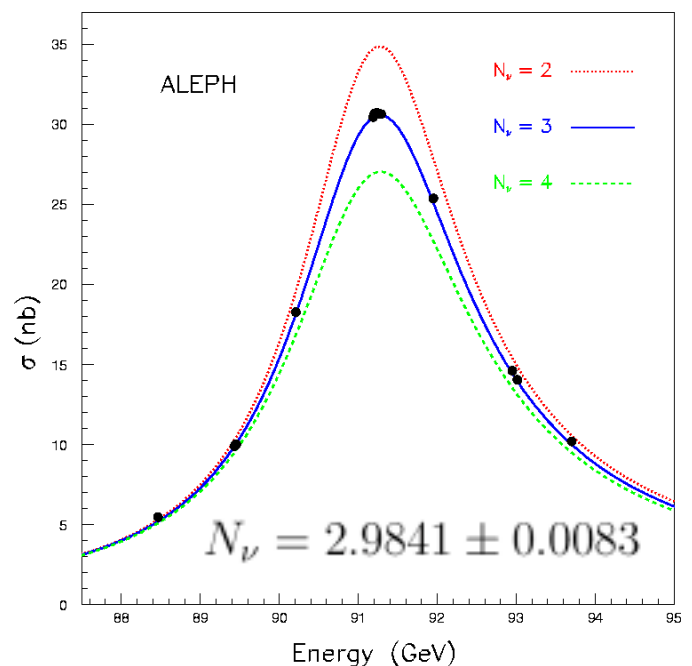
$$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}} = 0.23099 \pm 0.00053$$



$$\sigma_{ff}^Z = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{ff}}{\Gamma_Z^2} \frac{s\Gamma_Z^2}{(s - m_Z^2)^2 + s^2 \Gamma_Z^2 / m_Z^2} \quad \text{Breit - Wigner - Formel}$$

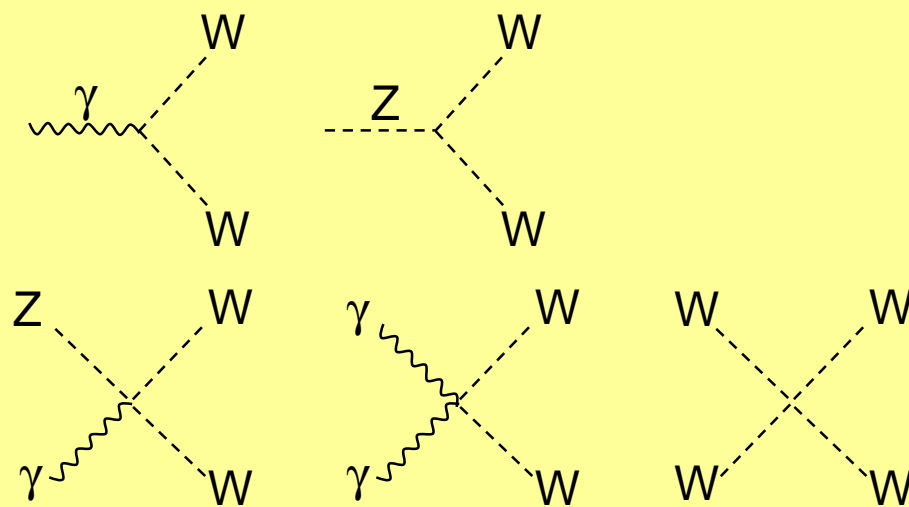
$$\text{Anzahl der Neutrino - Familien : } N_\nu = \frac{\Gamma_Z - \Gamma_{\text{hadrons}} - 3\Gamma_{ll}}{\Gamma_\nu}$$

without lepton universality	
Γ_{had} [MeV]	1745.8 ± 2.7
Γ_{ee} [MeV]	83.92 ± 0.12
$\Gamma_{\mu\mu}$ [MeV]	83.99 ± 0.18
$\Gamma_{\tau\tau}$ [MeV]	84.08 ± 0.22
with lepton universality	
Γ_{inv} [MeV]	499.0 ± 1.5
Γ_{had} [MeV]	1744.4 ± 2.0
$\Gamma_{\ell\ell}$ [MeV]	83.984 ± 0.086
$\Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_{\ell\ell}$	5.942 ± 0.016
σ_ℓ^0 [nb]	2.0003 ± 0.0027

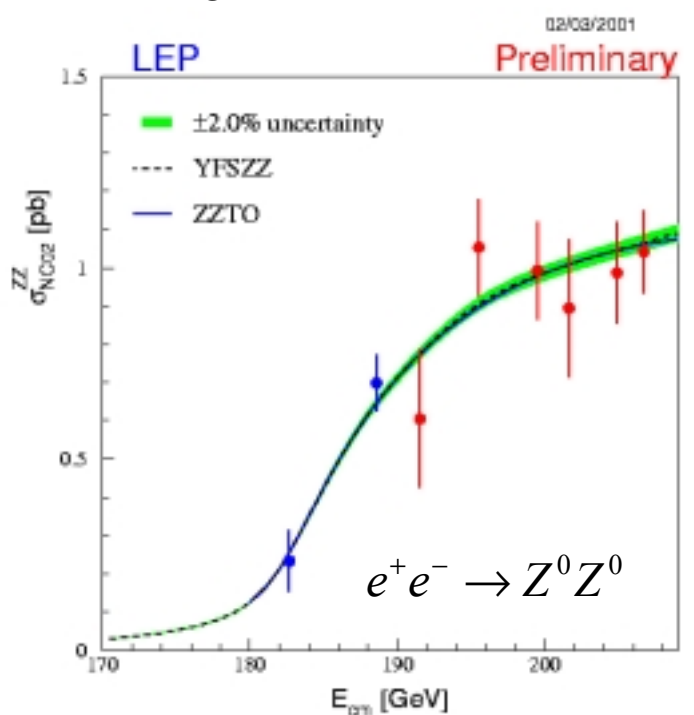
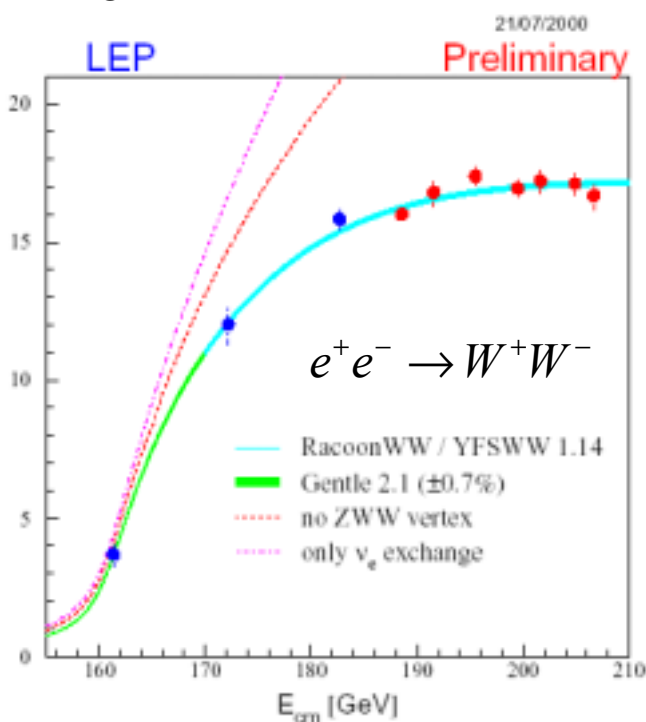
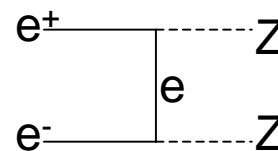
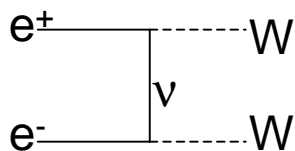
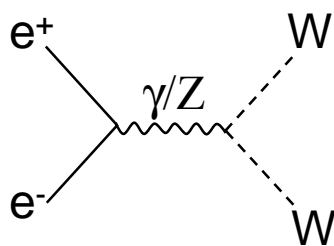
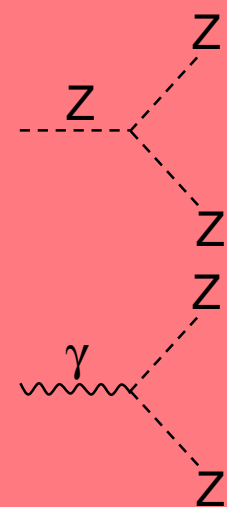


Boson-Selbstwechselwirkung

vom SM vorhergesagt

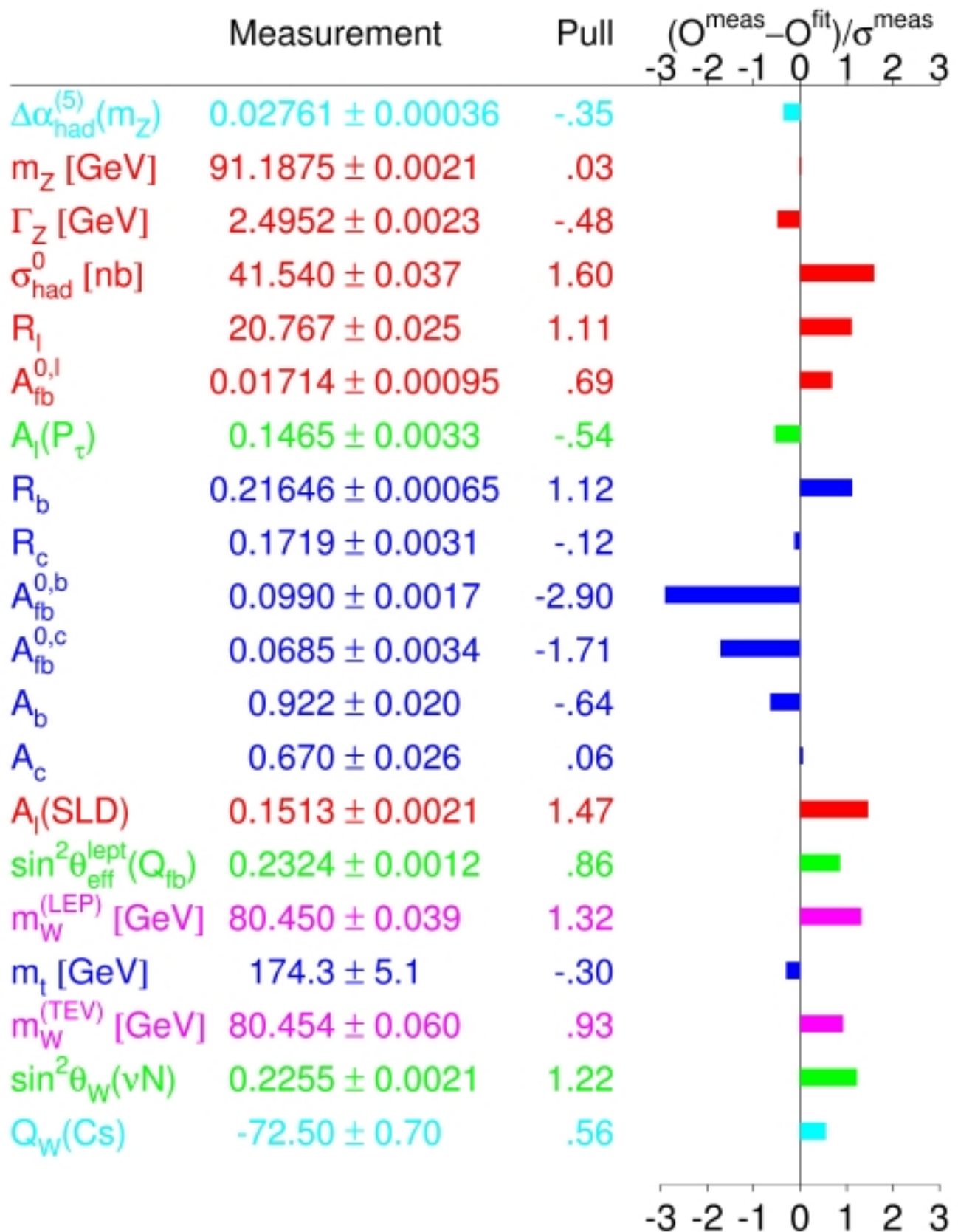


verboten



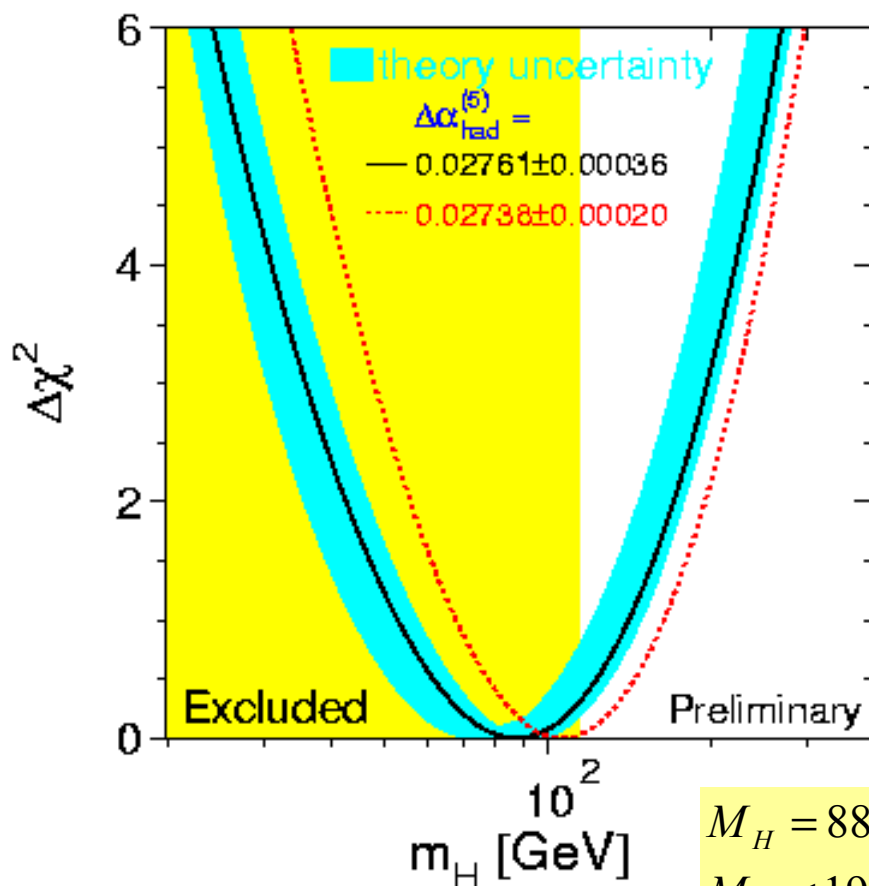
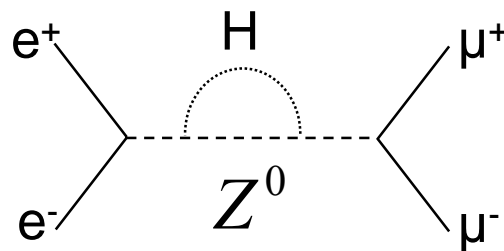
Standardmodell vs. Daten

Summer 2001



Und das Higgs?

- alle direkten Suchen bisher negativ
LEP2: $m_H > 114 \text{ GeV}$ (95%C.L.)
- Higgs-Strahlungskorrekturen tragen zu
Standardmodell-Meßgrößen bei ($\sim \log(m_H)$)
-> indirekte Bestimmung der Higgsmasse

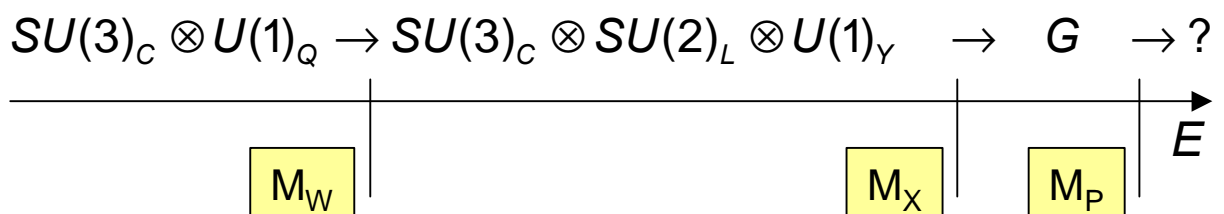


$$M_H = 88^{+53}_{-35} \text{ GeV}$$

$$M_H < 196 \text{ GeV (95\% C.L.)}$$

Große Vereinheitlichung

- das Standardmodell funktioniert sehr gut; warum sollen wir darüber hinaus gehen?
 - Gravitation** ist nicht eingeschlossen, und eine Quantentheorie der Gravitation allein ist nicht renormierbar
 - die elektroschwache Theorie ist keine vollständige Vereinigung, da es zwei unabhängige Kopplungen gibt, bzw. der **Weinbergwinkel nicht vorhergesagt** wird
 - die **Zahl der Familien** erscheint willkürlich
 - Quantisierung** der elektrischen Ladung ist unverstanden, warum ist $|Q(e)|=|Q(p)|$ mit einer Genauigkeit von 10^{-20} ?
 - es gibt im SM 18 **freie Parameter**:
 $\alpha, \theta_W, \Lambda_{QCD}, M_H, \lambda, CKM(3 \text{ Winkel}, 1 \text{ Phase})$
 $m_e, m_u, m_d, m_\mu, m_c, m_s, m_\tau, m_t, m_b$
- eine **Grand Unified Theory (GUT)** enthält eine große Symmetriegruppe G , aus der bei einer Skala M_X durch Symmetriebrechung die bekannten Gruppen entstehen:
 $G \supset SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
alle Kopplungen leiten sich aus der einen Kopplung der GUT ab



- bei der „**Planck-Masse**“ $M_P \equiv (G_N)^{-1/2} \approx 10^{19} \text{ GeV}$ muß die Gravitation berücksichtigt werden

Vereinigung der Kopplungen

- die Eichgruppe legt Laufen der Kopplung mit Q fest (Renormierungsgruppengleichung)

$$\alpha_1 = C^2 \frac{g'}{4\pi}; \quad (C^2 \text{ ist ein C.G. - Koeffizient der Gruppe } G)$$

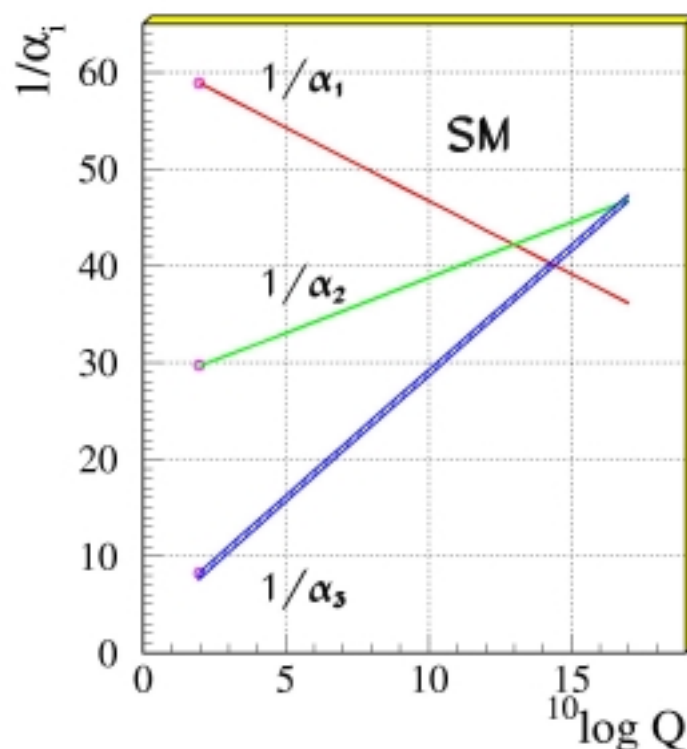
$$\alpha_2 = \frac{g}{4\pi}$$

$$\alpha_3 = \alpha_s$$

$$\frac{1}{\alpha_i(\mu)} = \frac{1}{\alpha_G} + b_i \log \frac{M_X}{\mu}; \quad b_i \equiv \frac{1}{6\pi} (-11N_{\text{Gruppe}} + 4n_{\text{Generationen}})$$

$$N_{\text{Gruppe}} = 0, 2, 3 \text{ f\"ur } U(1), SU(2), SU(3)$$

$$n_{\text{Generationen}} = 3$$

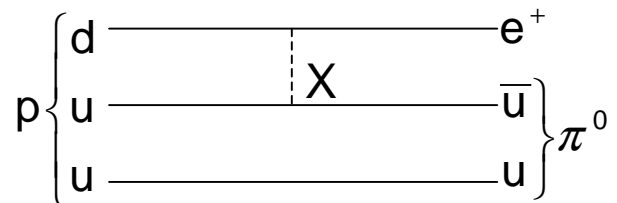


- $M_X \approx 10^{15} \text{ GeV}$

GUT-Vorhersagen

- **neue Eichbosonen** (X,Y) führen zu Übergängen zwischen Quarks und Leptonen in den G-Multipletts

- Folge: **Protonzerfall**



$$\tau_p \approx \frac{1}{\alpha^2} \frac{M_X^4}{m_p^5} \approx 10^{30 \pm 1} \text{ a} \quad \text{für } M_X = 10^{15} \text{ GeV}$$

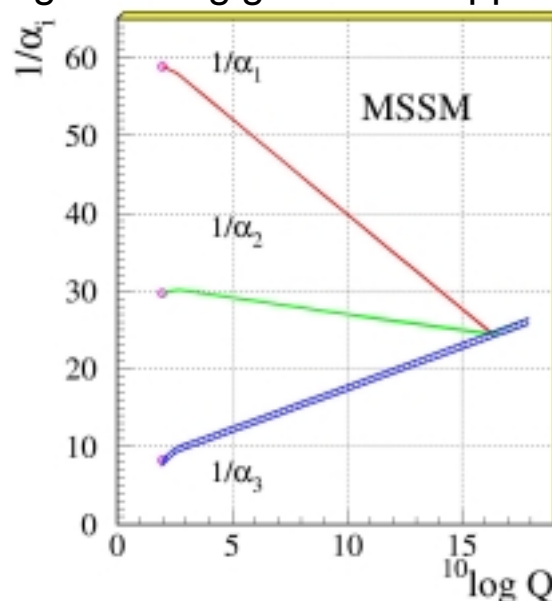
$$\text{Messung: } \tau_p > 5 \times 10^{32} \text{ a}$$

- Q ist Generator der (nicht-abelschen) G
 - hat diskrete Eigenwerte, d.h. **elektr. Ladung quantisiert**
 - Spur(Q)=0, d.h. Summe der Ladungen eines Multipletts verschwindet: verbindet Ladung der Leptonen und Quarks
 - |Q(e)|=|Q(p)| erklärbar
 - SU(5) Multiplett $\langle \nu_e, e^-, \bar{d}_r, \bar{d}_g, \bar{d}_b \rangle \rightarrow Q(d) = \frac{1}{3} Q(e)$
- $\sin^2 \theta_w = \frac{3}{8}$ an der GUT - Skala (SU(5))
- $\frac{m_b}{m_\tau} \approx 3$
- **kleine Neutrinomassen**
- **magnetische Monopole**
- mögliche **Gruppen**: SU(5), SO(10), E₆

SUSY

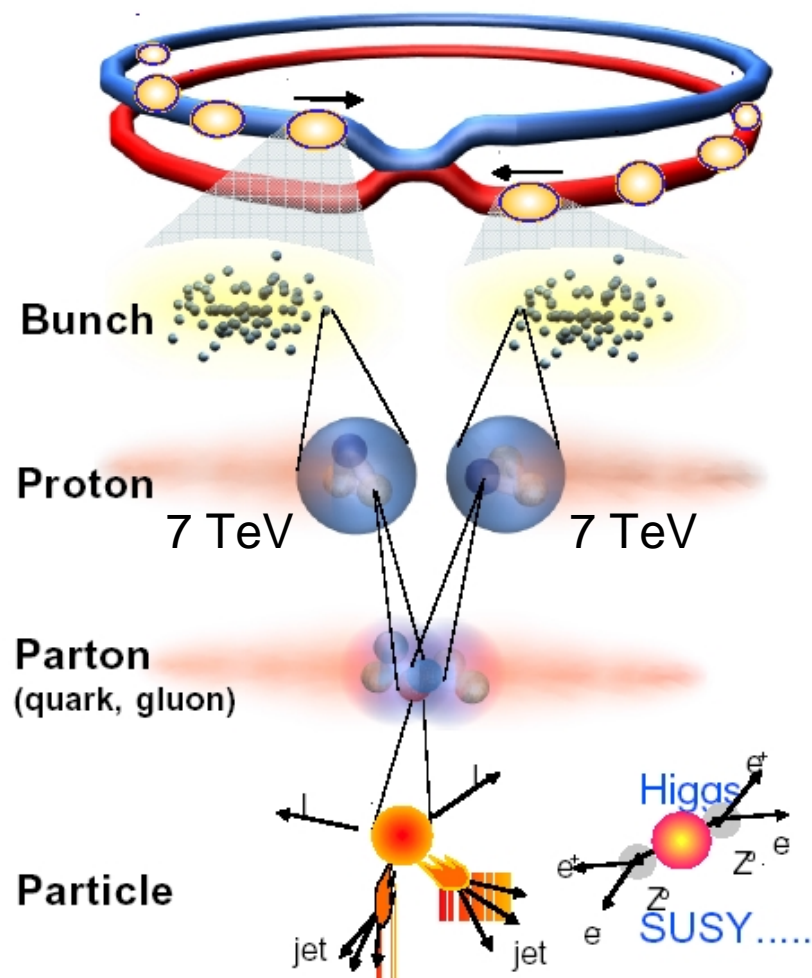
- diese GUTs haben einige **Schwierigkeiten**:
 - zwei Skalen, die 13 Größenordnungen auseinanderliegen:
 $M_X/M_W=10^{13}$,
Strahlungskorrekturen zur Higgsmasse
$$\delta M_H \propto \left(M_X^2 - m^2\right)_{\text{Bosonen}} - \left(M_X^2 - m^2\right)_{\text{Fermionen}}$$

(Hierarchie-Problem)
 - Kopplungen treffen sich nicht in einem Punkt
- **SUperSYmmetrie** postuliert daß es zu jedem Fermion ein Boson mit gleichen Eigenschaften gibt, und umgekehrt
 - dies löst das Hierarchie-Problem
 - die Energieabhängigkeit der Kopplungen ändert sich:



- $M_X \approx 10^{16} \text{ GeV}$
- damit steigt die vorhergesagte Proton-Lebensdauer über die derzeitig gemessene Untergrenze
- offenbar muß SUSY gebrochen sein, denn die supersymmetrischen Partner wurden bisher nicht gefunden
- lokale SUSY führt auf ein Spin-2 Eichboson, das als Graviton gedeutet werden kann -> SUGRA

Large Hadron Collider



Geschichte der Teilchenphysik

- 1897 • Elektron
- 1905 • Photon
- 1919 • Proton
- 1930 • Neutrino-Hypothese
- 1932 • Neutron
 - Positron
- 1933 • anomales magnetisches Moment des Protons
Substruktur
- 1936 • Myon
- 1947 • Pion und langlebiger V-Teilchen (K^0 , Λ) in kosm. Höhenstrahlung
- 1953 • V-Teilchen an Beschleunigern produziert
-> "strangeness" als neue innere Quantenzahl
"Teilchenzoo"
 - Elektron-Neutrino direkt nachgewiesen
- 1964 • statisches Quark-Modell, Farbe
- 1969 • dynamisches Quarkmodell
- 1973 • Elektro-schwache Theorie
 - neutrale Ströme
 - Theorie der starken Ww: QCD
- 1974 • Tau-Lepton
c-Quark
- 1977 • b-Quark
- 1979 • Gluon
- 1983 • W- und Z-Bosonen
- 1990 • 3 Neutrino-Generationen
- 1995 • t-Quark
- 2000 • Tau-Neutrino

Zusammenfassung

Die Welt besteht aus
Quarks und Leptonen,
die durch die Eichbosonen einer
spontan gebrochenen
 $SU(3)_C \otimes SU(2)_I \otimes U(1)_Y$
sowie durch Gravitation
miteinander wechselwirken

- das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt (fast) alle Messungen sehr gut
- es ist aber nicht vollständig
- es gibt ziemlich viele freie Parameter
- die große vereinheitlichte Theorie ist noch nicht gefunden
- neue experimentelle Ergebnisse sind nötig um den fundamentalen Aufbau unserer Welt besser zu verstehen

Literatur

- **„Quarks & Leptons“**,
F. Halzen, A.D. Martin, Wiley, 1984
- **„Particle Physics and Cosmology“**,
P.D.B. Collins, A.D. Martin, E.J. Squires, Wiley, 1989
- **„Hochenergiephysik“**,
D.H. Perkins, Addison-Wesley, 1990
„Introduction to High Energy Physics“,
D.H. Perkins, Cambridge University Press, 2000.
- **„Teilchenphysik“**,
C. Berger, Springer, 1992
- **„Elementarteilchen“**,
K. Bethge, U.E. Schröder, Wiss. Buchges., 1991
- **„Teilchenastrophysik“**,
H.V. Klapdor-Kleingrothaus, K. Zuber, Teubner, 1997