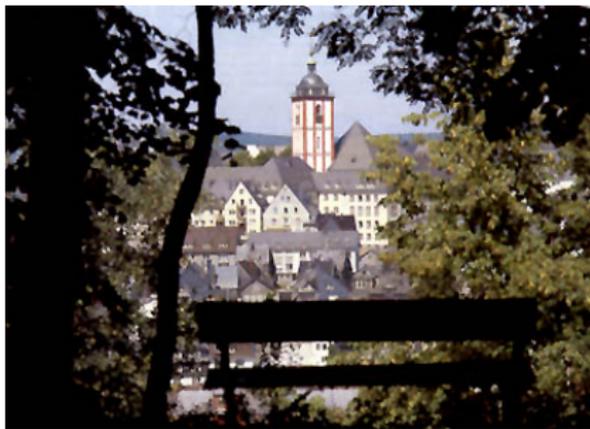


# Die Struktur des Photons



Siegen, 29. Juli 2004

Richard Nisius (MPI München)

[nisius@mppmu.mpg.de](mailto:nisius@mppmu.mpg.de)



**Einleitung**

**QED Struktur**

**Hadronische Struktur**

**Zusammenfassung**

## Das Photon und seine Geschichte

Name	$\gamma$
Ladung	0
Masse	0
Spin Parität	$J^{PC} = 1^{--}$
Lebensdauer	$\infty$
Geschwindigkeit	$c$
Kopplungsstärke	$\alpha$
Natur	Welle / Teilchen

- 8.11.1895 — Röntgen entdeckt die X-Strahlen, erster Nobelpreis für Physik 1901.
- 1900 — Planck interpretiert Licht durch 'Energiequanten',  $E = h\nu$ , mit  $h = 1.05 \cdot 10^{-16}$  eVs.
- 1905 — Einstein erklärt den Photoeffekt durch 'Photonen'.
- 1922 — Entdeckung der Comptonstreuung  $e\gamma \rightarrow e'\gamma'$ .

1927 — Heisenberg formuliert die Unbestimmtheitsrelation, z.B.  $\Delta p \Delta x \geq \hbar$ .

1930 — Erster Versuch der Messung der Photon-Photon Streuung von Hughes et al.

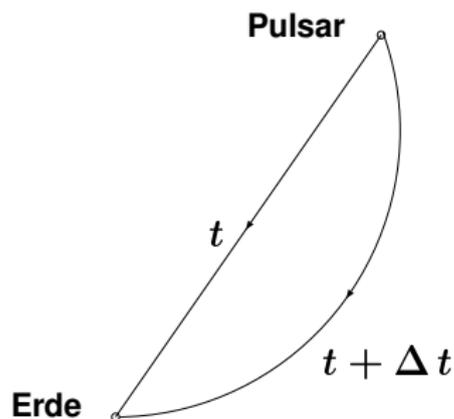
1936 — Erste Berechnung der Photon-Photon Streuung durch Euler und Kockel.

1965 — Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch Penzias and Wilson.

1981 — Erste Messung der hadronischen Photonstrukturfunktion durch PLUTO.

**Das Photon hat eine lange, bewegte Geschichte, sowohl als Welle, als auch als Teilchen.**

## Die Bestimmung der Ladungsobergrenze



- Pulsare sind weit von der Erde entfernte Quellen von Photonen.
- Falls Photonen eine Ladung haben, so wirkt auf sie die Lorentzkraft und ihre Bahnen im Magnetfeld sind gekrümmt.
- Daraus resultiert eine energieabhängige Laufzeitvariation von  $\frac{\Delta t}{t} = \frac{Q^2 B^2 l^2}{6E^2}$ .
- Aus der beobachteten Dispersion der Photonpulse des Pulsars PSR 1937+21 ergibt sich eine Ladungsobergrenze von  $Q < 5 \cdot 10^{-30} Q_e$ , G. Raffelt, Phys. Rev. D50 (1994) 7792.
- Das Studium der Plasmabewegungen im Sonnenwind liefert eine Massengrenze von  $m_\gamma < 1.2 \cdot 10^{-22} m_e$ , D.D. Ryutov, Plasma Phys. Control. Fusion 39 (1997) A73.

Ein gutes Zusammenspiel von Teilchen und Astroteilchenphysik.

## Das Photon in unserer Welt

### Beobachtung

### Photonenergie

Kosmische Hintergrundstrahlung

meV

Molekülrotationen

eV

Urlaubssonne

Atomspektren des Wasserstoffs

keV

Röntgenstrahlung

MeV

$e^+e^-$  Paarerzeugung

GeV



Bremsstrahlung bei LEP

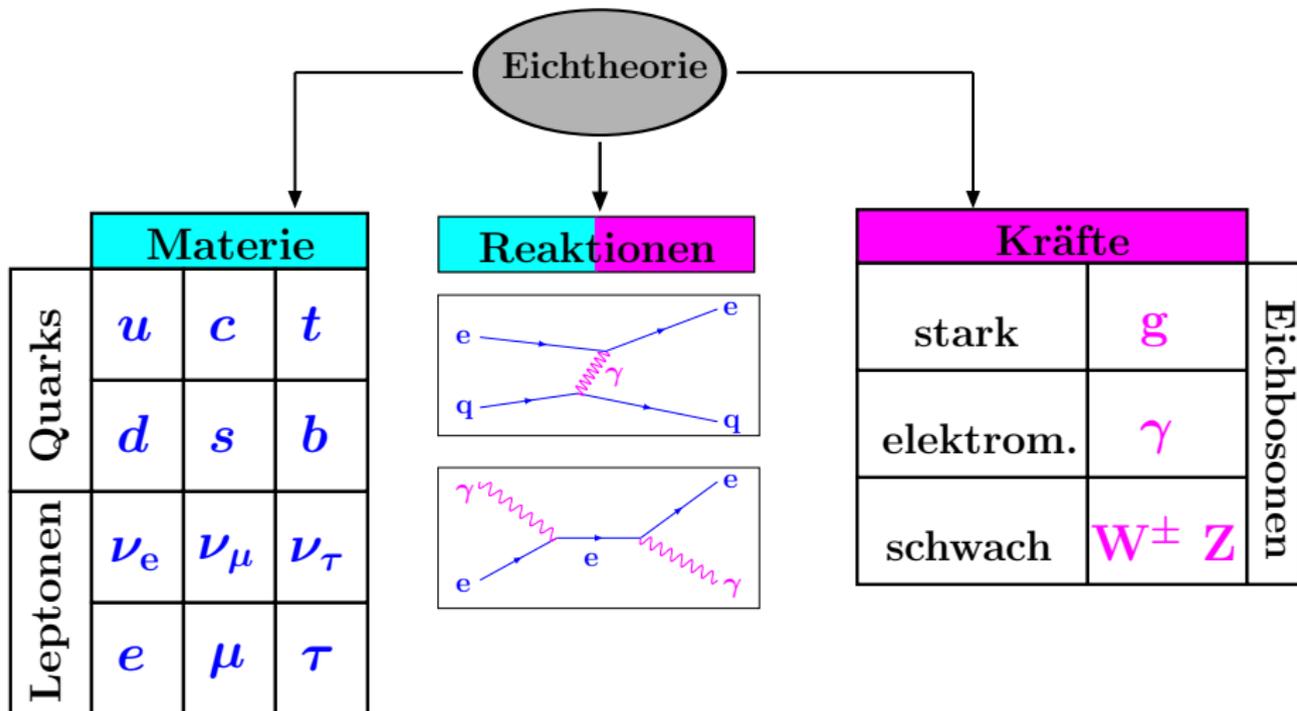
TeV



Bremsstrahlung bei TESLA

Kosmische Strahlung

## Das Photon im Standardmodell



**Das Photon ist das Eichboson der elektromagnetischen Wechselwirkung.**

## Photon-Photon Streuung - anno 1930 und heute

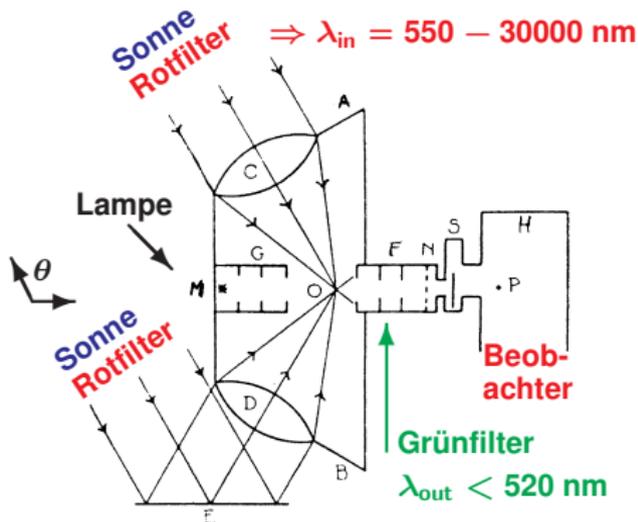


Fig. 2. Diagram of apparatus.

- $\gamma_1(\lambda_{in})\gamma_2(\lambda_{in}) \rightarrow \gamma'_1(\lambda_{out})\gamma'_2(\lambda_{out})$
- $\lambda_{out} = \lambda_{in}(1 + \cos \theta)$
- Es wurde kein Licht beobachtet, also:

$$\sigma < 3 \cdot 10^8 \text{ pb.}$$

- Durch Nutzung monochromatischer Laser hoher Leistung sowie der Nachweismöglichkeit weniger Photonen wurde die Sensitivität extrem verbessert. Es wurde kein Signal gesehen, also:

$$\sigma < 10^{-13} \text{ pb}$$

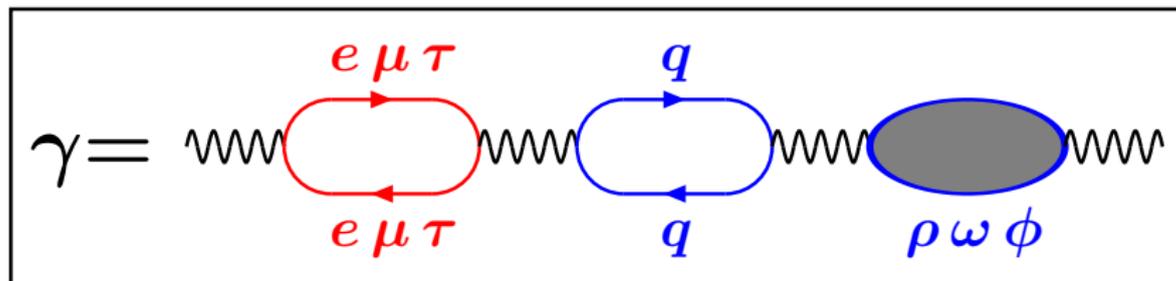
- Euler & Kockel (1936): Für  $E_\gamma = h\nu \ll m_e c^2$  gilt:  $\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} = 7.3 \cdot 10^{-30} \cdot \left(\frac{h\nu}{\text{eV}}\right)^6 \text{ pb.}$   
Damit folgt für  $\lambda = 400 - 800 \text{ nm}$

$$\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} = (1 - 64) \cdot 10^{-28} \text{ pb}$$

Es fehlen immer noch 15 Größenordnungen.

## Warum wir von Photonstruktur sprechen

- Die Struktur des Photon ist ein rein quantenmechanischer Effekt.

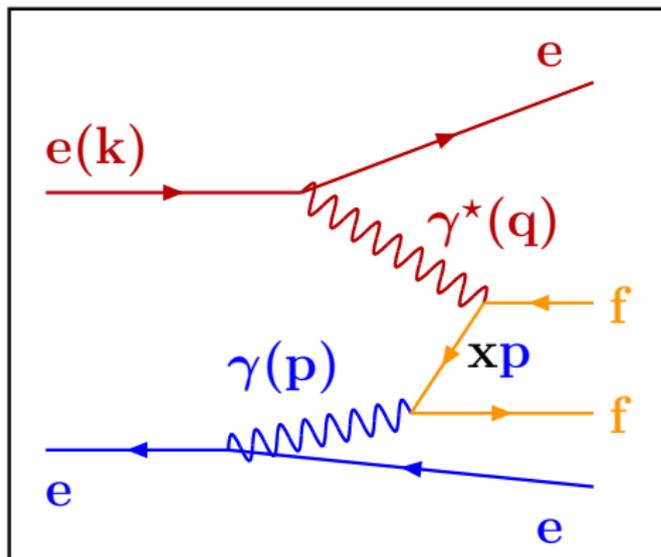


- Wegen der Heisenbergschen Unschärferelation kann das Photon für einen kurzen Zeitraum in einen **leptonischen** oder **hadronischen** Zustand (vereinbar mit seinen Quantenzahlen) fluktuieren.
- Die typische Lebensdauer  $\Delta t = 1/\Delta E$  dieser Fluktuationen **steigt mit der Photonenergie und fällt mit der Photonvirtualität.**



Messungen zur Photonstruktur bevorzugen quasi-reele, hochenergetische Photonen.

## Tief-inelastische Elektron Photon Streuung



$Q^2 = -q^2 \gg 0 \Rightarrow$  dieses Elektron ist  
im Detektor sichtbar.

$$\mathbf{x} = \frac{Q^2}{Q^2 + W^2}, \quad \mathbf{y} = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}}$$

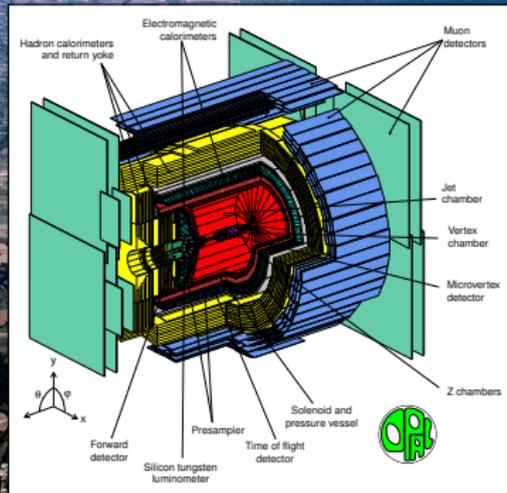
$P^2 = -p^2 \approx 0 \Rightarrow$  dieses Elektron bleibt  
im Strahlrohr.

– Der differentielle WQS:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} \approx \mathbf{k}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, Q^2) \cdot F_2^\gamma(\mathbf{x}, Q^2, P^2)$$

Die Strukturfunktion  $F_2^\gamma$  parametrisiert die Struktur des Photons.

## Der Large Electron Positron Collider (1989 - 2000): $E = 90 - 209 \text{ GeV}$

 $e^-$  $e^+$ 

**Datenstatistik:**

160/pb mit  $E \approx 90 \text{ GeV}$

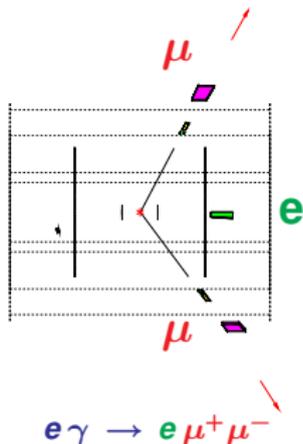
700/pb mit  $E > 160 \text{ GeV}$

## Zwei Ereignisse

```
Run.event: 5198-223277 Date: 94625 Time: 1194501rx(Nr.: 2 Surp.: 7.3) Ecal(Nr.: 3 SurEn.: 1.4) Hcal(Nr.: 4 SurEn.: 3.3)
Ebeam: 45.62 Evls: 10.5 Emiss: 80.7 Vtx: (-0.62, 0.34, 0.47) Muon(Nr.: 2) Sec Vtx(Nr.: 0) Fast(Nr.: 0 SurEn.: 0.0)
Bv:4:029 BunchId: 11 ThrustId: 8489 AplanId: 9973 QblatId: 4978 SpherrId: 4199
```

Event type bits

```
4 Low mult. presel.
12 Tagged two phot.
20 S phot. muon veto
30 "Physics" selection
1 Z0 type physics
```



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

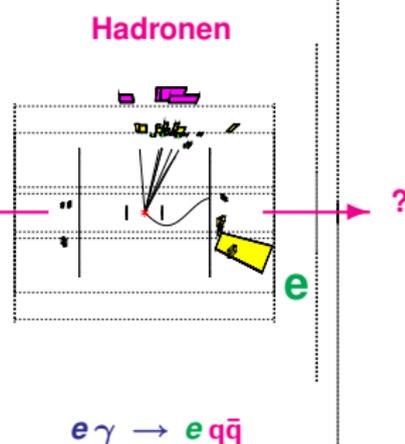
200 cm. 510 20 50 GeV

- Eine klare Topologie mit guter Massenauflösung.

```
Run.event: 6422-47894 Date: 95817 Time: 15594001rx(Nr.: 8 Surp.: 12.4) Ecal(Nr.: 19 SurEn.: 46.8) Hcal(Nr.: 6 SurEn.: 3.4)
Ebeam: 45.64 Evls: 58.0 Emiss: 33.3 Vtx: (-0.85, 0.11, 1.11) Muon(Nr.: 0) Sec Vtx(Nr.: 0) Fast(Nr.: 0 SurEn.: 0.0)
Bv:4:028 BunchId: 213 ThrustId: 7845 AplanId: 8856 QblatId: 4769 SpherrId: 8370
```

Event type bits

```
4 Low mult. presel.
8 Single phot. presel.
12 Tagged two phot.
13 High pT muon veto
24 S phot. EM ass. tag
25 S phot. EM ass. tag
26 S phot. in-time tag
27 S phot. EM ass. tag
28 S phot. High pT tag
29 S phot. no Hcal tag
31 long-lived decays
30 "Physics" selection
1 Z0 type physics
```



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

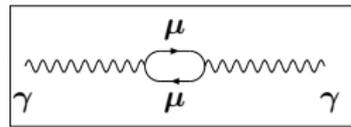
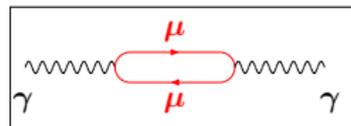
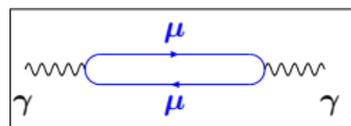
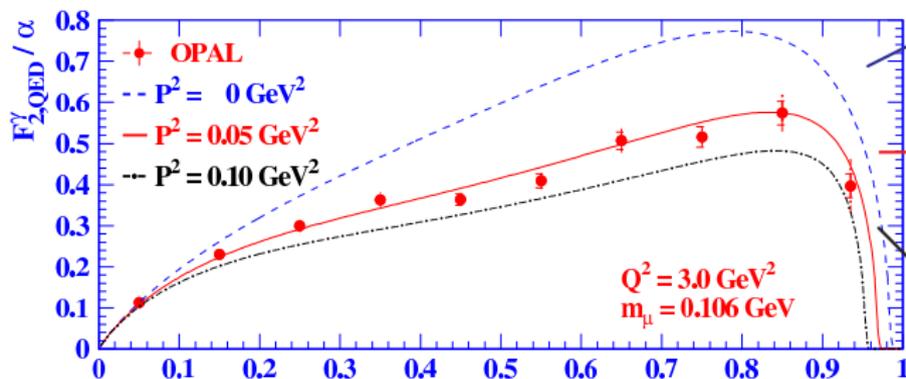
200 cm. 510 20 50 GeV

- Das gestreute Elektron ist klar sichtbar.
- Der hadronische Endzustand kann teilweise entlang der Strahlachse verschwinden.

Der hadronische Endzustand ist wesentlich schwerer zu messen.

## Die Struktur virtueller Photonen ist unterdrückt

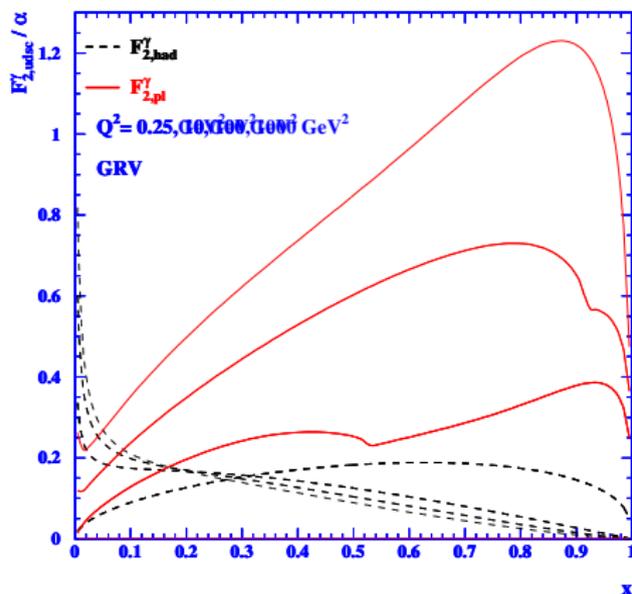
- Die Messung der Reaktion  $e\gamma \rightarrow e\mu^+\mu^-$  liefert:



- Für  $P^2 = 0$  ist das Photon reel und  $F_{2,QED}^\gamma$  ist maximal.
- Die Vorhersage des Standardmodells ist  $P^2 = 0.05 \text{ GeV}^2$ .
- Für  $P^2 \gg 0$  ist das Photon virtuell und  $F_{2,QED}^\gamma$  ist reduziert.

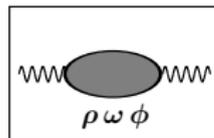
Die Vorhersage wird von den Daten quantitativ bestätigt.

## Die beiden Beiträge zur hadronischen Strukturfunktion $F_2^\gamma$

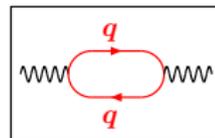


– Die partonische Interpretation von  $F_2^\gamma$

$$F_2^\gamma(x, Q^2) = x \sum_{k=1}^{n_f} e_{q_k}^2 (q_k^\gamma + \bar{q}_k^\gamma)$$



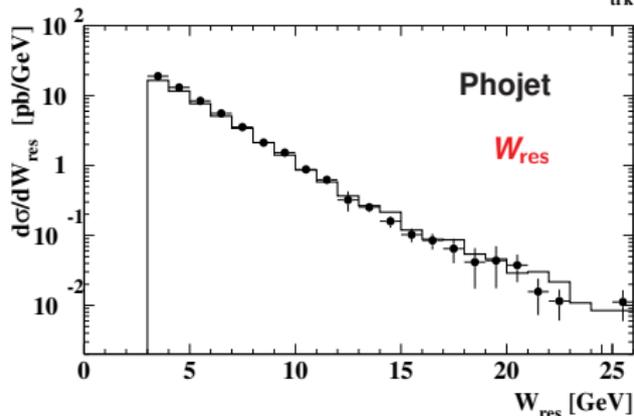
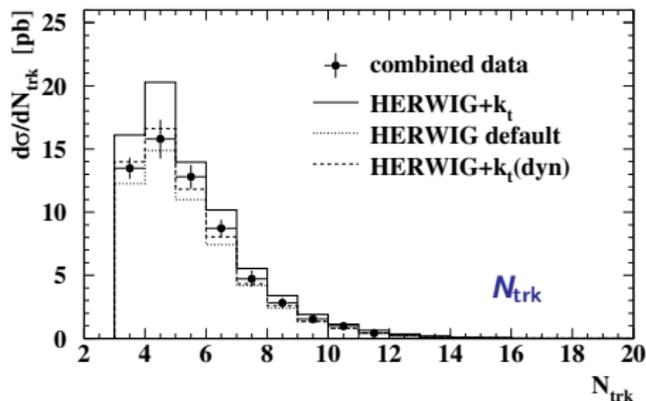
**hadronartig**  
*nicht-perturbativ*  
 e.g. VMD( $\rho, \omega, \phi$ )  
 kleines- $x$



**punktartig**  
*perturbativ*  
**großes- $x$**

Man versucht die zwei Komponenten experimentell zu separieren.

## Die Anpassung der Monte Carlo Modelle



- Die Beschreibung des hadronischen Endzustands ist nicht perfekt.
- Die LEP Daten liefern konsistente Abweichungen für mehrere Observablen.
- Kombination der LEP Daten in LEP WG zur Verringerung der Fehler, z.B.:
  - 1) geladene Multiplizität  $N_{\text{trk}}$
  - 2) invariante Masse  $W_{\text{res}}$
- Adjustieren von Modellparametern in Zusammenarbeit mit den Autoren der Monte Carlo Programme.

**Erfolgreiche Modelloptimierung durch kombinierte LEP Daten.**

## Die Entfaltung von $F_2^\gamma$ aus den Daten

### Die Aufgabe

- Finde die zugrunde liegende Funktion  $f(x)$  aus der beobachteten Verteilung:  

$$g^{\text{det}}(x_{\text{vis}}) = \int A(x_{\text{vis}}, x) f(x) dx + U(x_{\text{vis}})$$

### Die Lösung

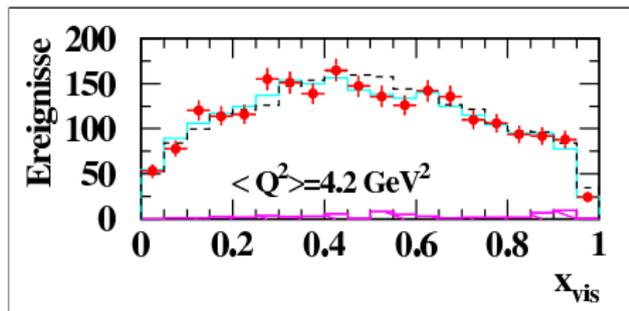
- Monte Carlo (MC) Simulation vieler Ereignisse und Entfaltung der Verteilung.
- Simulation vieler MC Signalereignisse  $\Rightarrow A(x_{\text{vis}}, x)$ .
- Simulation vieler MC **Untergrundereignisse**  $\Rightarrow U(x_{\text{vis}})$ .
- Integral  $\rightarrow$  Matrixgleichung, löse numerisch (mit Regularisierung), i.e. Anpassung von  $\tilde{g}^{\text{det}}(x_{\text{vis}}, \text{MC})$  an die **Datenverteilung**  $g^{\text{det}}(x_{\text{vis}}, \text{Da})$  durch Variation von  $\tilde{f}(x) = f(x) \cdot c(x)$ .

### Das Ergebnis

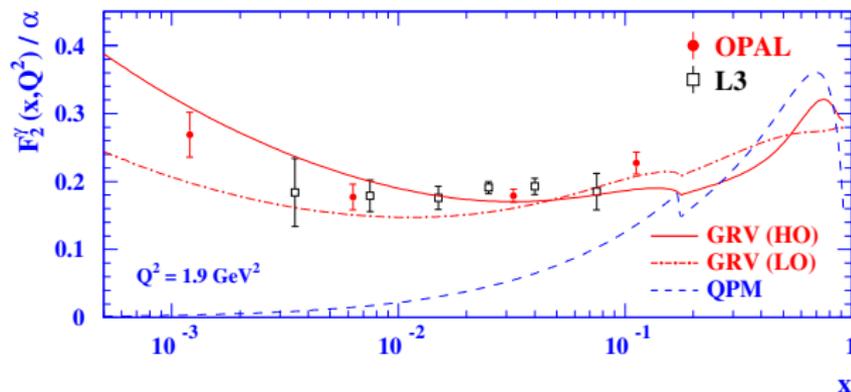
- Die Verteilungen  $\tilde{g}^{\text{det}}(x_{\text{vis}}, \text{MC})$  und  $g^{\text{det}}(x_{\text{vis}}, \text{Da})$  sind im Rahmen ihrer Fehler identisch.

Die Strukturfunktion ist:

$$F_2^\gamma(x, \text{Da}) = c(x) \cdot F_2^\gamma(x, \text{MC})$$



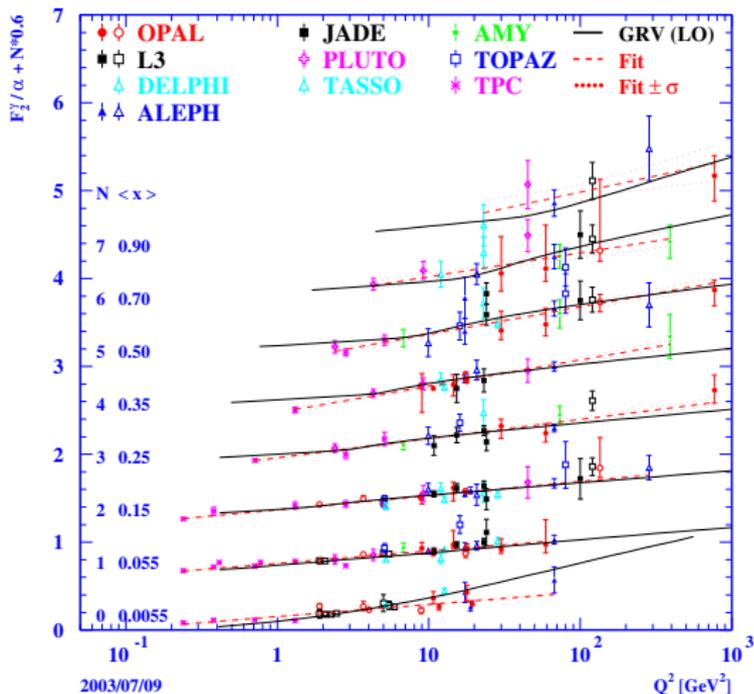
## Die Messungen von $F_2^\gamma$ bei kleinem $x$ und $Q^2$



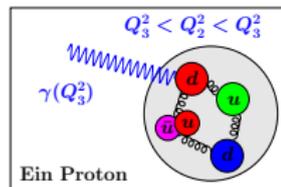
- Die LEP Daten bestimmen  $F_2^\gamma$  mit etwa 5-20% Genauigkeit.
- Der vorhergesagte Anstieg von  $F_2^\gamma$  ist sehr moderat.
- Das QPM ist viel zu niedrig.
- Die QCD Vorhersagen von GRV beschreiben die Messungen.

Der kinematische Bereich ist zu klein, um den Anstieg bei kleinem  $x$  zu testen.

## Die Skalenverletzung der hadronischen Struktur des Photons

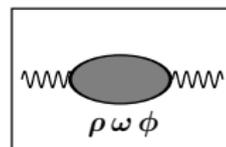


– Das Proton ist ein Hadron.



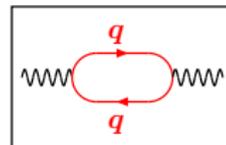
Die Struktur ist  $Q^2$  abhängig.

– Das Photon hat eine **hadronartige**



$\equiv$  Proton

und eine **punktartige**

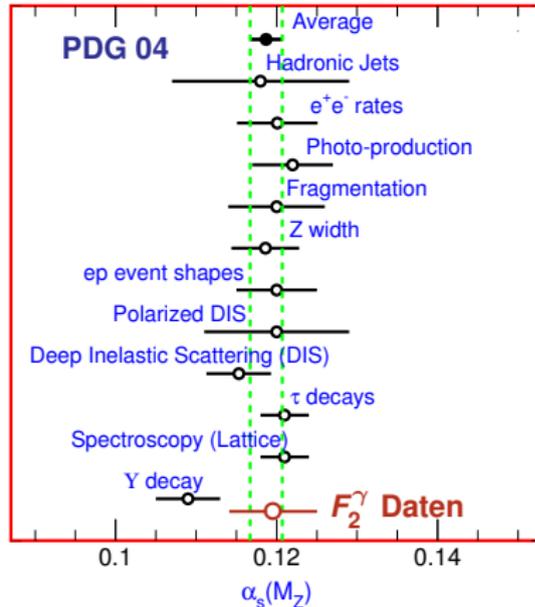
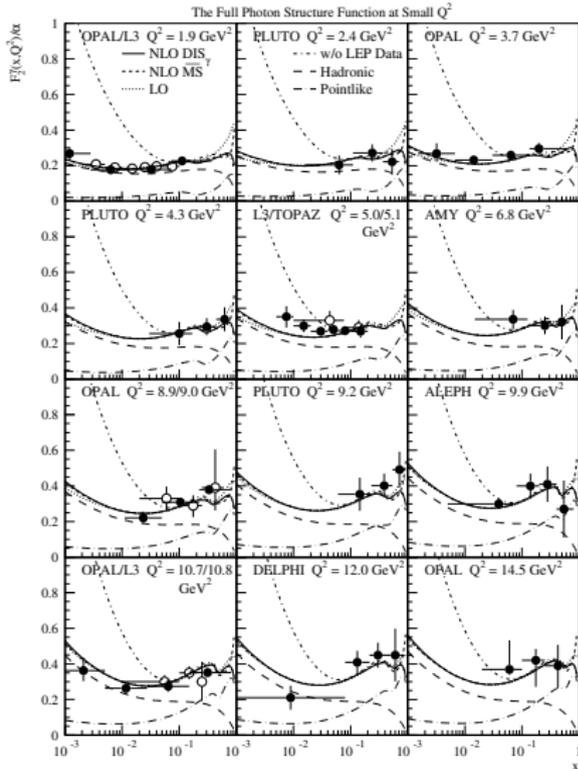


$\neq$  Proton

Komponente.

Wegen der punktartigen Komponente steigt  $F_2^\gamma$  mit  $Q^2$  für alle Werte von  $x$ .

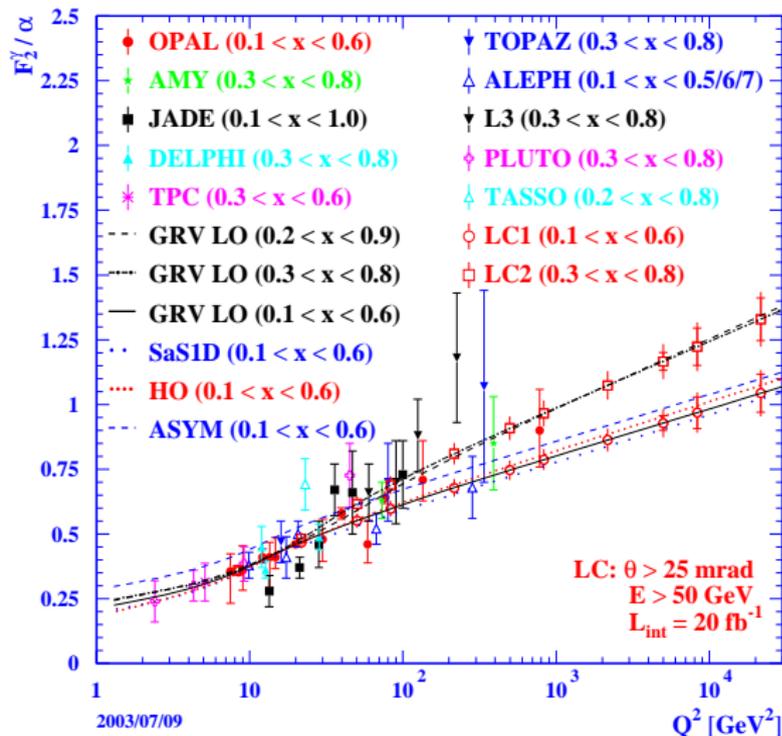
# Der $\alpha_s$ Wert aus Messungen von $F_2^\gamma$



$$\alpha_s(M_{Z^0}^2) = 0.1198 \pm 0.0054$$

S. Albino et al., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 122004

## Die Zukunft der Messung der Evolution von $F_2^\gamma$



### Die Erweiterung der Messung

- An einem zukünftigen Linearbeschleuniger kann der Bereich in  $Q^2$  um einen Faktor 40 erweitert werden.
- Bei höchsten  $Q^2$  ist diese QCD Vorhersage am verlässlichsten.

Der Linearbeschleuniger wird diese QCD Vorhersage sehr genau testen.

## Zusammenfassung

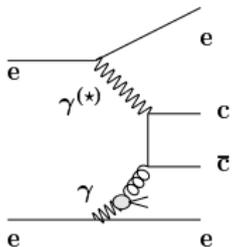
- Das Photon spielt bei vielen Phänomenen in der Natur eine wichtige Rolle.
- Unsere Kenntnis über die Eigenschaften des Photons stammen sowohl aus der Astroteilchenphysik als auch der Teilchenphysik.
- Die Struktur des Photons entspringt aus Quantenfluktuation und wurde am LEP Beschleuniger im Detail untersucht.
- Wie von der Heisenbergschen Unschärferelation vorhergesagt, ist die Struktur virtueller Photonen unterdrückt.
- Die punkartige Komponente der hadronischen Struktur des Photons führt (anders als im Fall des Protons) zu einer mit  $Q^2$  ansteigenden Struktur für alle Werte von  $x$ .

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**

## Die Messung des Charm Anteils - $F_{2,c}^\gamma$

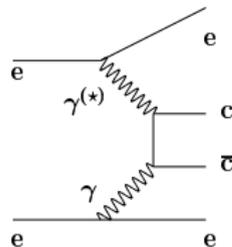
hadronartig:

hängt von  $f_g^\gamma$  ab,  
dominiert bei  
kleinem- $x$ .

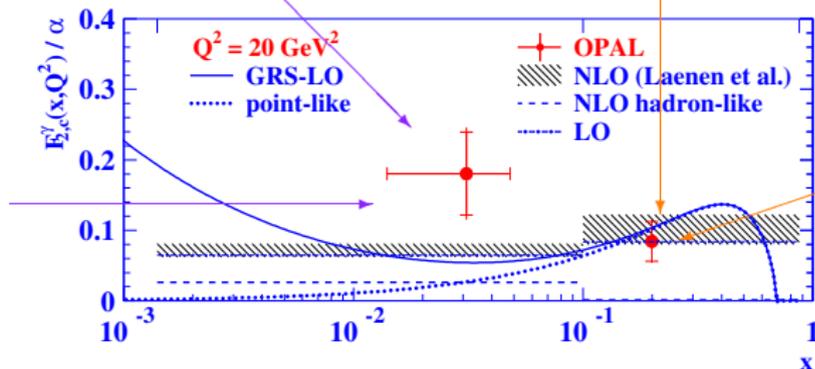


punktartig:

pQCD Vorhersage,  
dominiert bei  
großem- $x$ .



größeres  
 $f_g^\gamma$  ?



NLO =  $f(\alpha_s, m_c)$   
perfekte Beschrei-  
bung

**Auch hier sind noch nicht die Daten aller LEP Experimente ausgewertet.**

## Bestimmung von $\alpha_s$ aus $F_2^\gamma$ Daten

### Treatment of experimental data:

- Use correlation matrix if exists
- Treat sys. errors as uncorrelated
- Neglect  $P^2$  effect and rad. cor.
- Symmetrise asymmetric errors
- Abandon TPC/2 $\gamma$  data

### Assumptions made for the fits:

- Fixed flavour scheme, uds as active flavours
  - Bethe-Heitler charm  $m_c = 1.5 \pm 0.1 \text{ GeV}$
  - Perform DIS $_\gamma$  and  $\overline{\text{MS}}$  fits
- 1 p.l.:  $Q_0^2 = \Lambda^2$ , hadron-like  $\equiv 0$
  - 2 full:  $uds(Q_0^2) = Nx^\alpha(1-x)^\beta$ ,  $g(Q_0^2) = 0$

### 1 Point-like fit:

Use data with ( $x > 0.45$ ,  $Q^2 > 59 \text{ GeV}^2$ ) and fit  $\alpha_s$

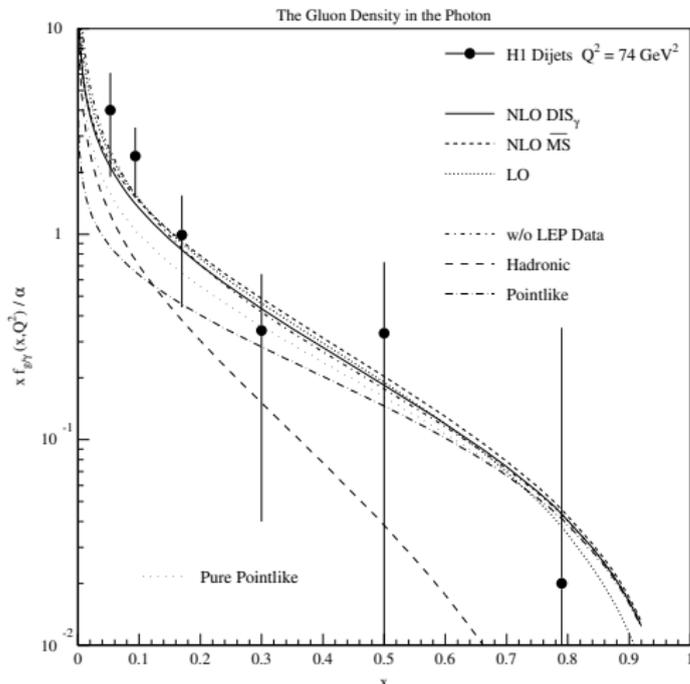
$$\alpha_s(M_{Z_0}^2) = 0.1183 \pm 0.0050 \text{ (exp.) } \begin{matrix} +0.0029 \\ -0.0028 \end{matrix} \text{ (theo.)}$$

### 2 Full fit:

Use all data, 5 parameter fit for ( $N, \alpha, \beta, \alpha_s, Q_0^2$ )

$$\alpha_s(M_{Z_0}^2) = 0.1198 \pm 0.0028 \text{ (exp.) } \begin{matrix} +0.0034 \\ -0.0046 \end{matrix} \text{ (theo.)}$$

## Comparison of $f_{g/\gamma}$ from $F_2^\gamma$ with the HERA result



### Consistency check

- Gluon from fit to  $F_2^\gamma$  data is at the low end of the H1 result
- Both the point-like and the hadron-like components from the full fit are needed to describe the data
- The pure point-like result shows the interplay between a longer evolution and non-vanishing PDFs at the starting scale

### Include HERA data in the fit