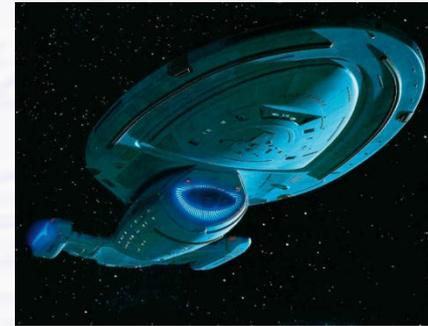


# ***Teilchenphysik - 2***

- **Geschichte der Teilchenphysik, Das Standardmodell**
- **Quarks, Antimaterie, Wechselwirkungen**
- **Gluonen, Generationen,  $Z^0$**
- **Higgs-Mechanismus: Analogien, Entdeckung**
- **Jenseits des Standardmodells**

# Antimaterie

- Sehr populär seit Star Trek (Raumschiff Enterprise) und Illuminati
- Antiteilchen** verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse aber mit umgekehrter Ladung



Name	Elektrische Ladung [e]	Masse [GeV/c <sup>2</sup> ]	Elektrische Ladung [e]	(Anti-) Name
<b>Elektron</b>	- 1	0.0005	<b>+ 1</b>	<b>Positron</b>
<b>Proton</b>	<b>+ 1</b>	0.938	- 1	<b>Antiproton</b>
Neutron	0	0.941	0	Antineutron

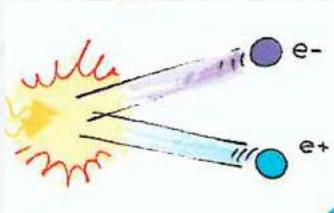
Neutron: Ladungen der Quarks im Neutron kehren sich um

Wasserstoff

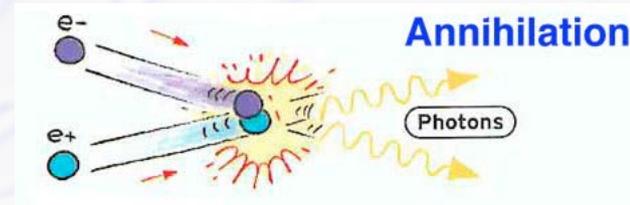
Anti-Wasserstoff

# Antimaterie

- Erzeugung von Antiteilchen zusammen mit normalen Materieteilchen aus **Umwandlung von Energie in Masse**



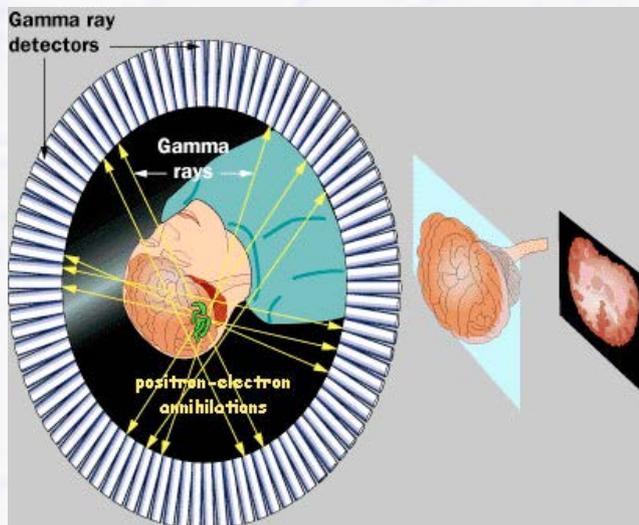
$$E \rightarrow mc^2$$



$$mc^2 \rightarrow E$$

- Antiteilchen sind Alltag**

→ **Beispiel: Positronen Emissions Tomographie (PET)**



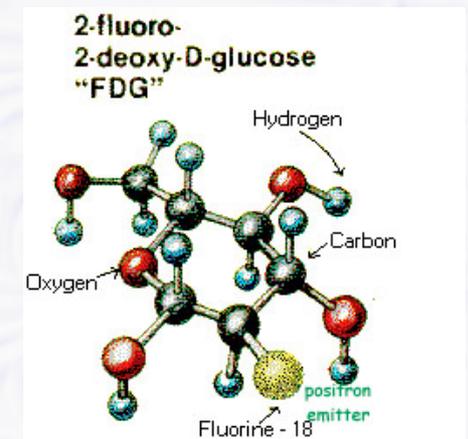
Verwendung von **radioaktiv markiertem Zucker**

Zucker ist bevorzugt an Stellen hohen Energiebedarfs vorhanden

**F<sub>18</sub> zerfällt unter Aussendung eines Positrons (Antimaterie)**

**Annihilation mit Elektron unter Aussendung zweier Photonen**

**Nachweis der Photonen durch Detektor, damit Rekonstruktion der Orte hohen Energiebedarfs im Körper**



# Antimaterie

## ● Wesentliche Botschaften

- **Antiteilchen** verhalten sich **wie normale Teilchen mit umgekehrter Ladung**
  - auch neutrale Teilchen mit innerer (geladener) Struktur haben Antiteilchen
- Bei der Umwandlung von Energie in Materie entstehen **immer Teilchen und Antiteilchen zusammen**
- **Teilchen** und **Antiteilchen** können **annihilieren** und sich zu reiner Energie (Photonen) zurück wandeln
- **Antiteilchen** sind bereits seit langem **Teil unseres Alltags**
  - Beispiel: Positronen Emissions Tomographie (PET) zur medizinischen Diagnostik

# Wechselwirkungen

## ● Austausch von Kräften zwischen (Anti-)Materie-Teilchen erfolgt durch 4 verschiedene Wechselwirkungen

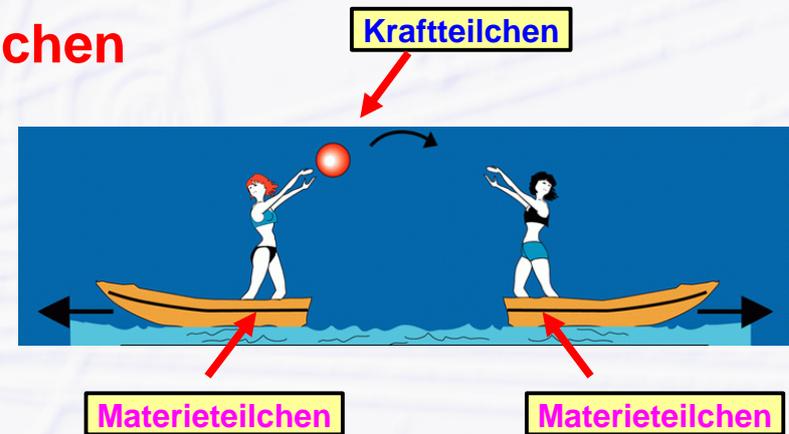
→ Vermittlung der Kräfte durch **Kraftteilchen**

→ **Kraftteilchen sind Bosonen**

- ganzzahliger Spin

→ **Materieteilchen sind Fermionen**

- halbzahliger Spin



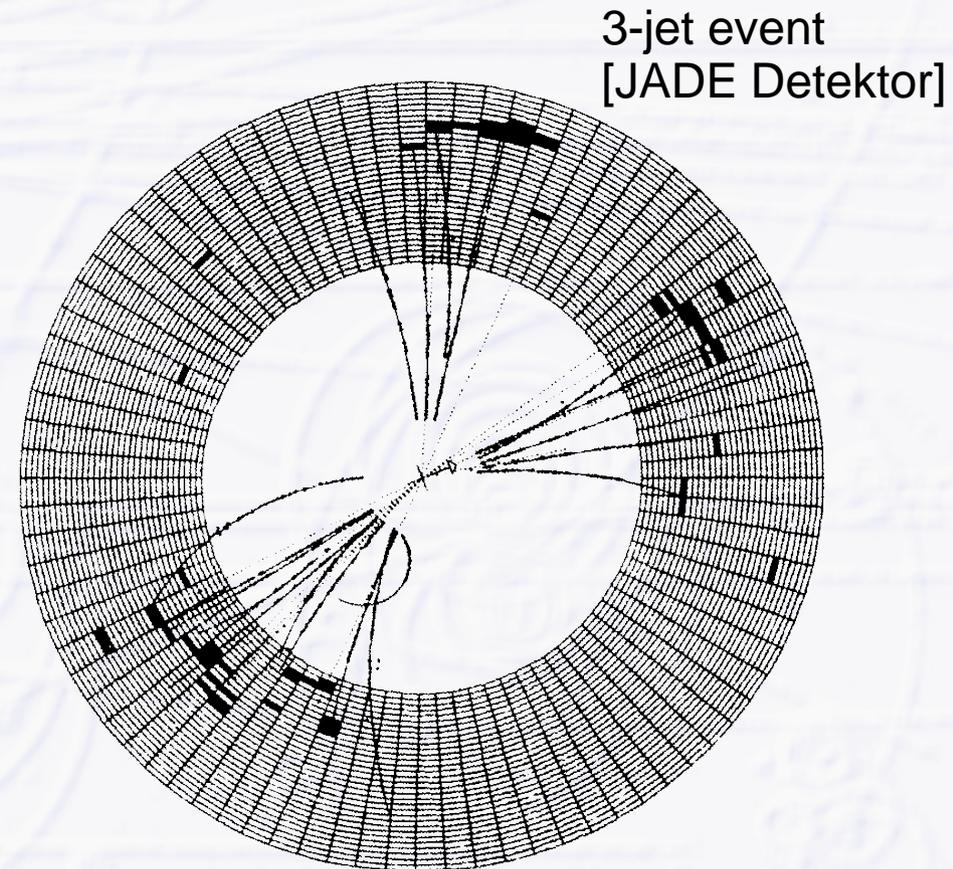
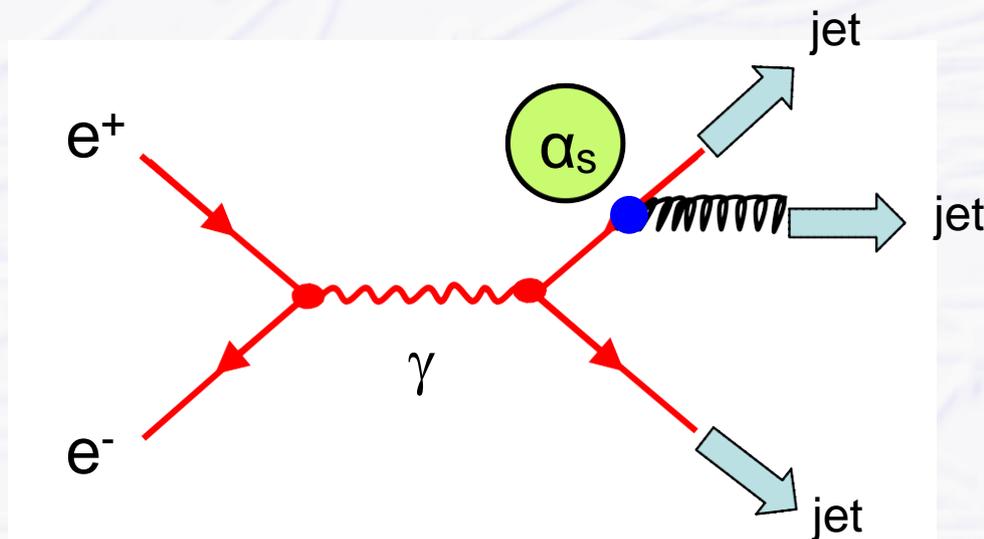
Wechselwirkung	relative Stärke	Reichweite	Kraftteilchen	Wirkung
stark	1	$10^{-15}$ m	8 Gluonen	Kernkraft, Zusammenhalt von Protonen, Neutronen etc.
elektromagnetisch	$10^{-2}$	$\infty$	Photon	Elektrizität, Magnetismus, Licht
schwach	$10^{-5}$	$10^{-18}$ m	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	Radioaktivität, Zerfälle
Gravitation	$10^{-38}$	$\infty$	“Graviton”	Schwerkraft

# Nachweis des Gluons 1979

- **PETRA  $e^+e^-$  collider am DESY/Hamburg**

→ Erzeugung von Quark – Antiquark Paaren (2 Jets)

- **Abstrahlung eines Gluons erzeugt 3. Jet**



$$\frac{\# \text{ 3 - jet events}}{\# \text{ 2 - jet events}} \sim \alpha_s(s)$$

# Kopplungsstärke

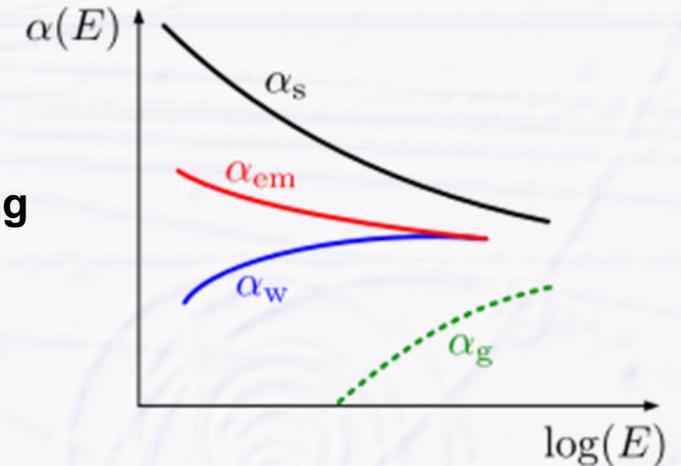
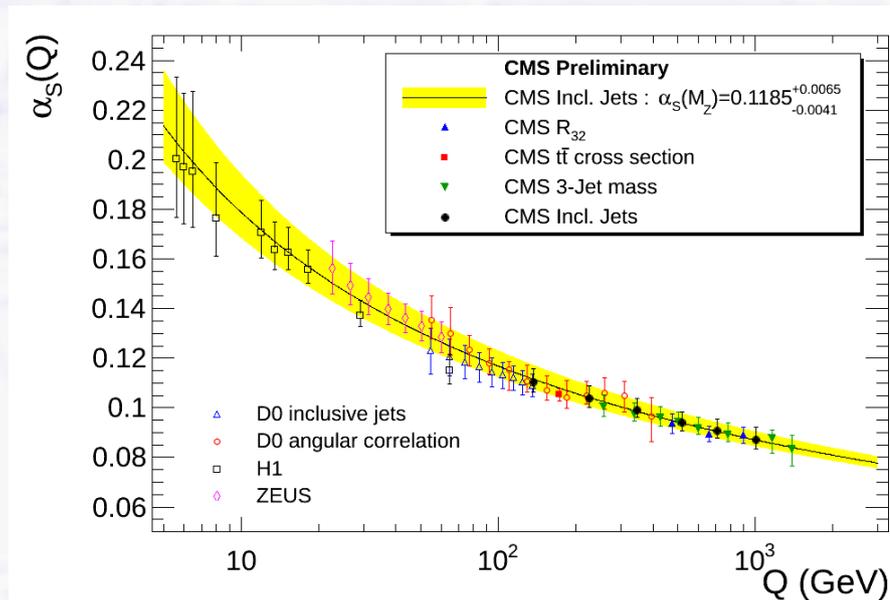
- Die Stärken der Wechselwirkungen (Kopplungsstärke) sind nicht konstant!

→ Kopplungsstärken sind **energieabhängig**

- Kopplungsstärke der elektro-magnetischen WW für kleine E („Feinstrukturkonstante“)

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{2c\epsilon_0 h} \approx \frac{1}{137} \approx 0.0073$$

- gemessenes „running“  $\alpha_s$  der starken Wechselwirkung



**Ursache:**

→ **Vakuumfluktuationen**

# Vakuumfluktuationen

## Das Vakuum ist nicht leer!

→ Heisenberg'sche Unschärferelation:  $\Delta x \Delta p \geq h$

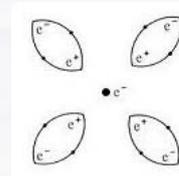
- Ort und Impuls eines Teilchens können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden

→ aber auch:  $\Delta E \Delta t \geq h$

- für eine kurze Zeit  $\Delta t$  kann die Energie  $\Delta E$  aus dem Vakuum "geborgt" werden

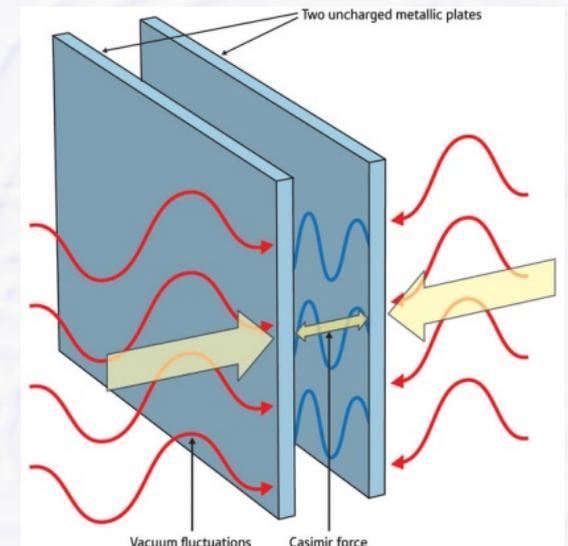
## Ursache für kurzzeitig auftauchende & verschwindende Teilchen – Antiteilchen Paare aus dem Vakuum

→ z.B. Abschirmung der Elektronladung



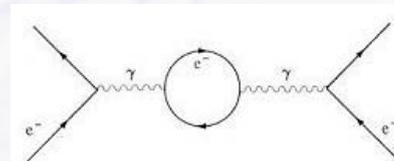
→ Messbar durch Casimir-Effekt

- äußerer Druck auf 2 Metallplatten mit kleinem Abstand
- nicht alle Moden passen zwischen die Platten
- Wellencharakter der Teilchen!



## Das Vakuum ist kompliziert!

- viele zusätzliche Beiträge, z.B. Schleifen

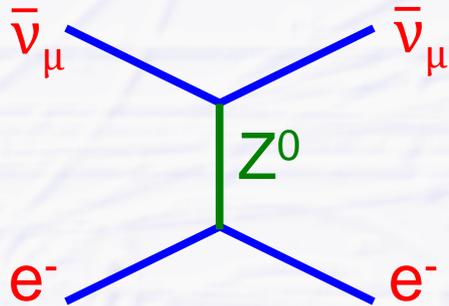


# “Neutrale Ströme”

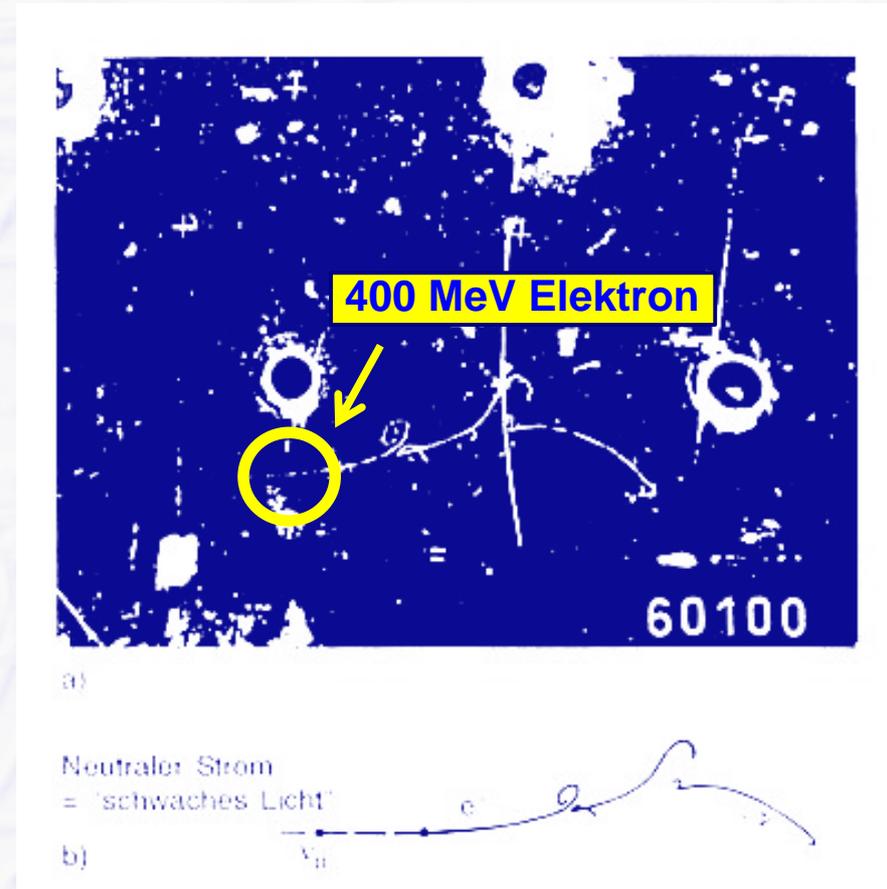
## ● Indirekter Hinweis auf Existenz des $Z^0$ am CERN 1973

→ elastischer Stoß eines Neutrinos mit einem Elektron der Atomhülle

- schwache Wechselwirkung, Austausch eines  $Z^0$  (“schwaches Licht”)
- keine el.-magn. Wechselwirkung, kein Photonaustausch

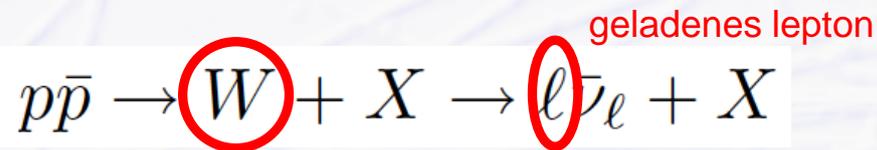


$\bar{\nu}_\mu \rightarrow$

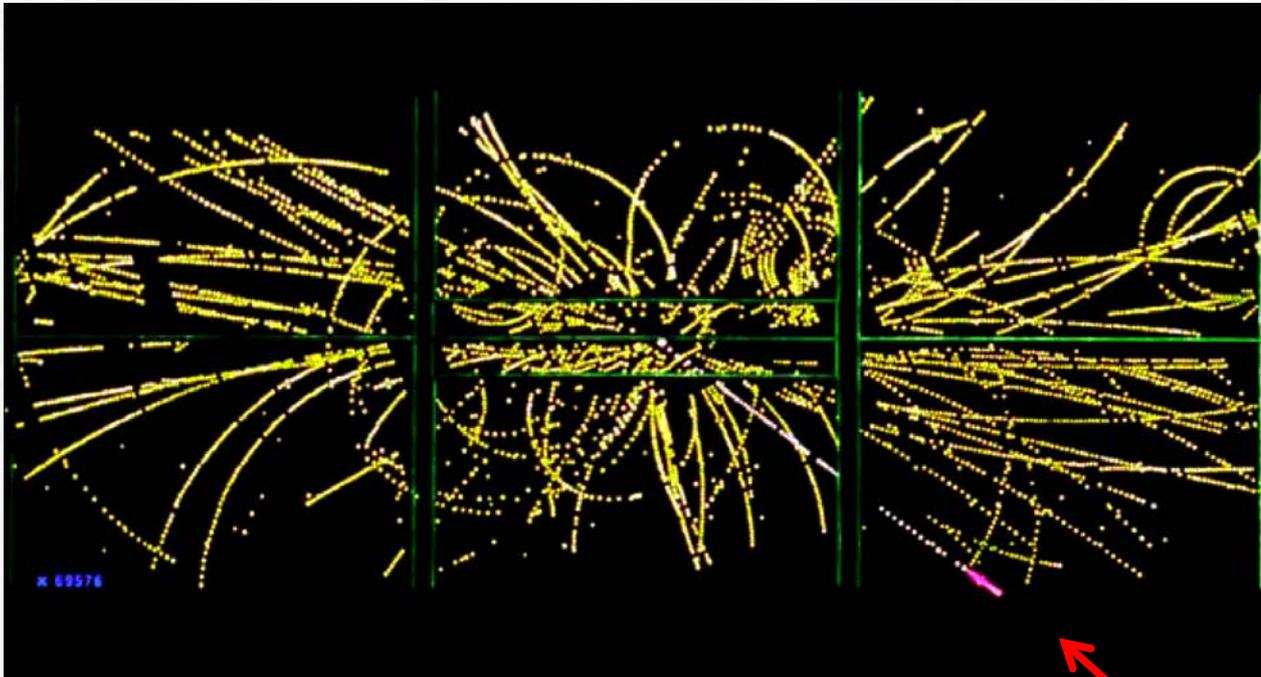


# Direkte Entdeckung des $W$ und $Z^0$

- **SppS collider am CERN 1983** (Nobelpreis 1984, C. Rubbia + S. van der Meer)
  - Super Proton Synchrotron betrieben als Proton – Antiproton Collider
  - 2 Experimente/Detektoren: UA1 + UA2 (Underground Area 1 + 2)



Kollision im  
UA1 Spurdetektor



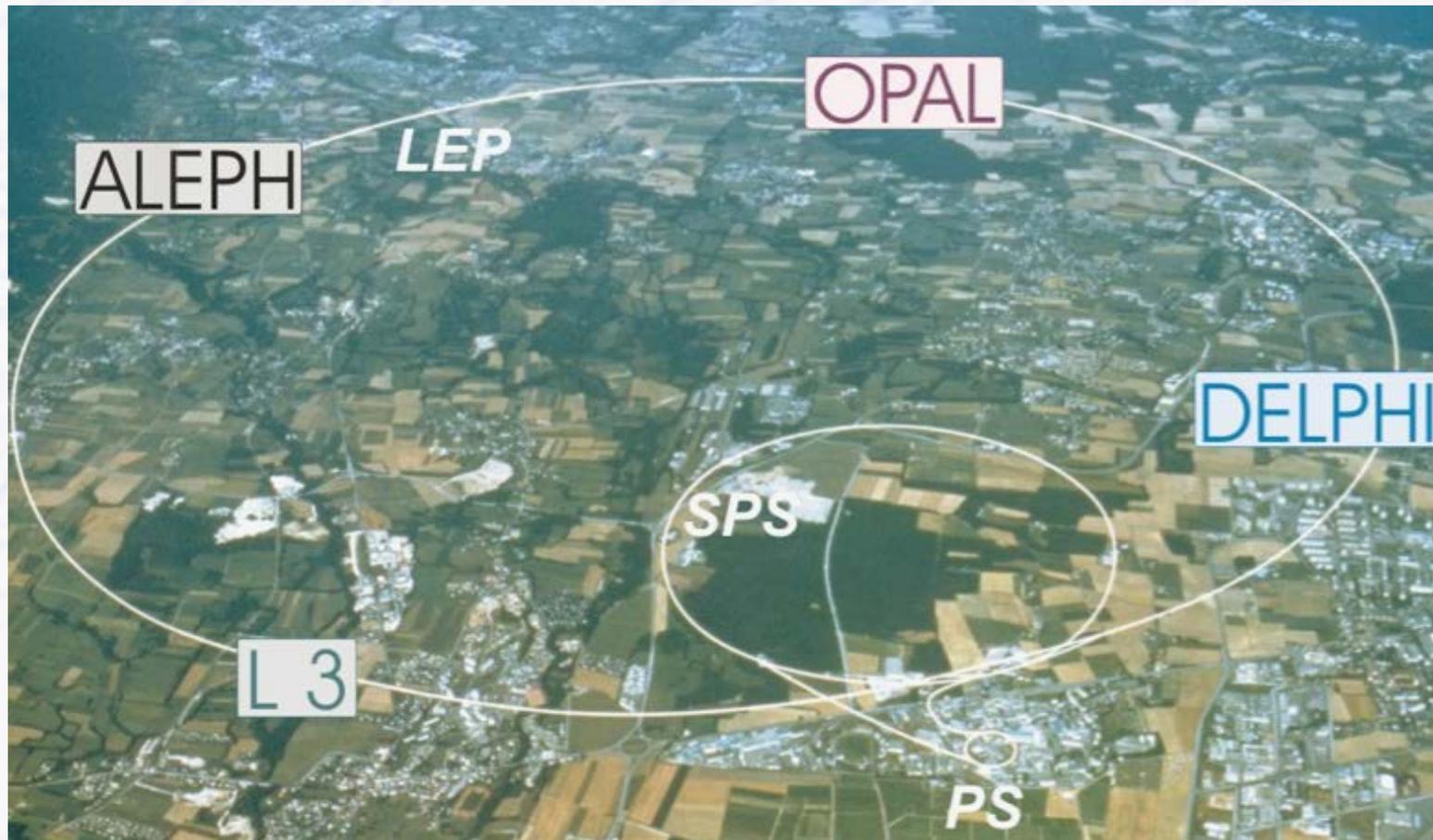
hochenergetisches Elektron

# Der LEP $e^+e^-$ Collider

## ● Heutiger LHC Tunnel war geplant für LEP (1989 – 2000)

◦ LEP = **L**arge **E**lektron **P**ositron collider

→ Tunnelquerschnitt berücksichtigt aber schon möglichen LHC

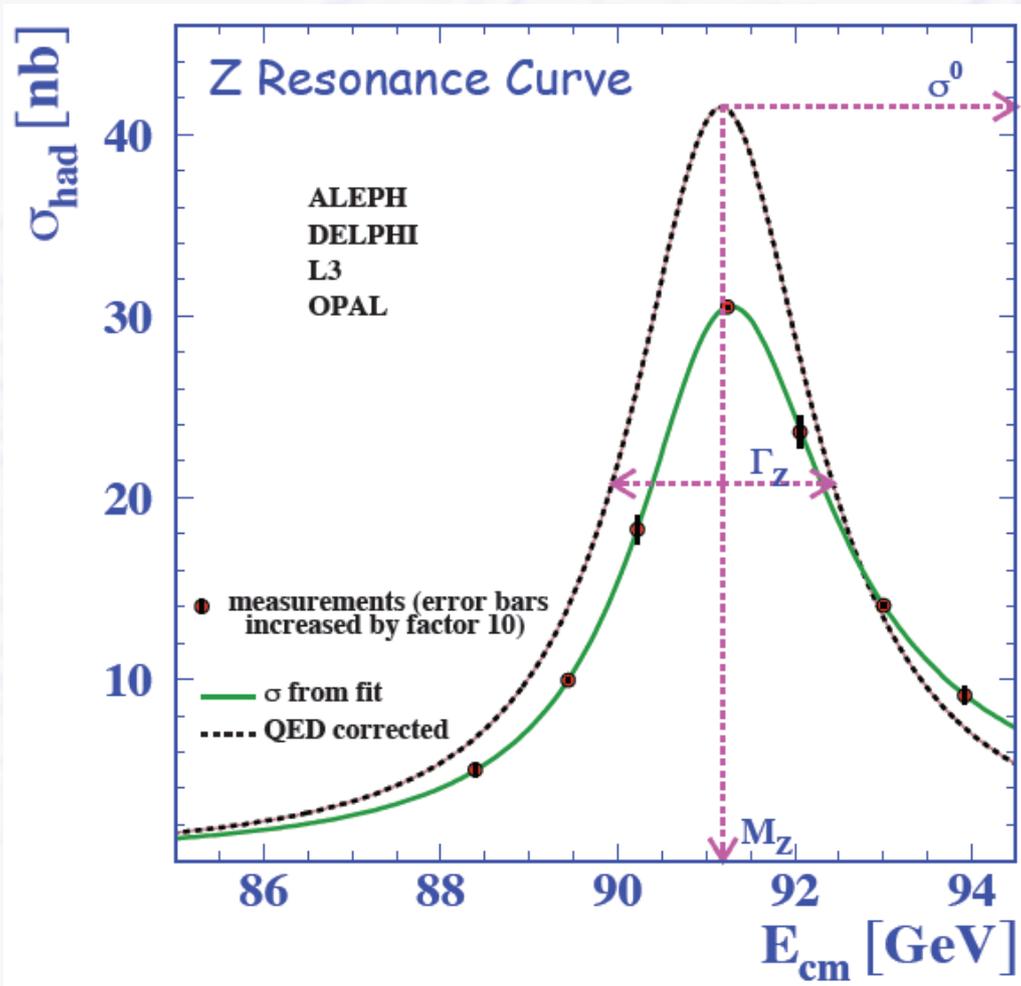


$E_{cm}$  von 90 GeV  
bis 200 GeV

4 Experimente

# Vermessung der $Z^0$ Resonanzkurve

- Kurvenform: Breit-Wigner (wie Spektralline oder harmonischer Oszillator)



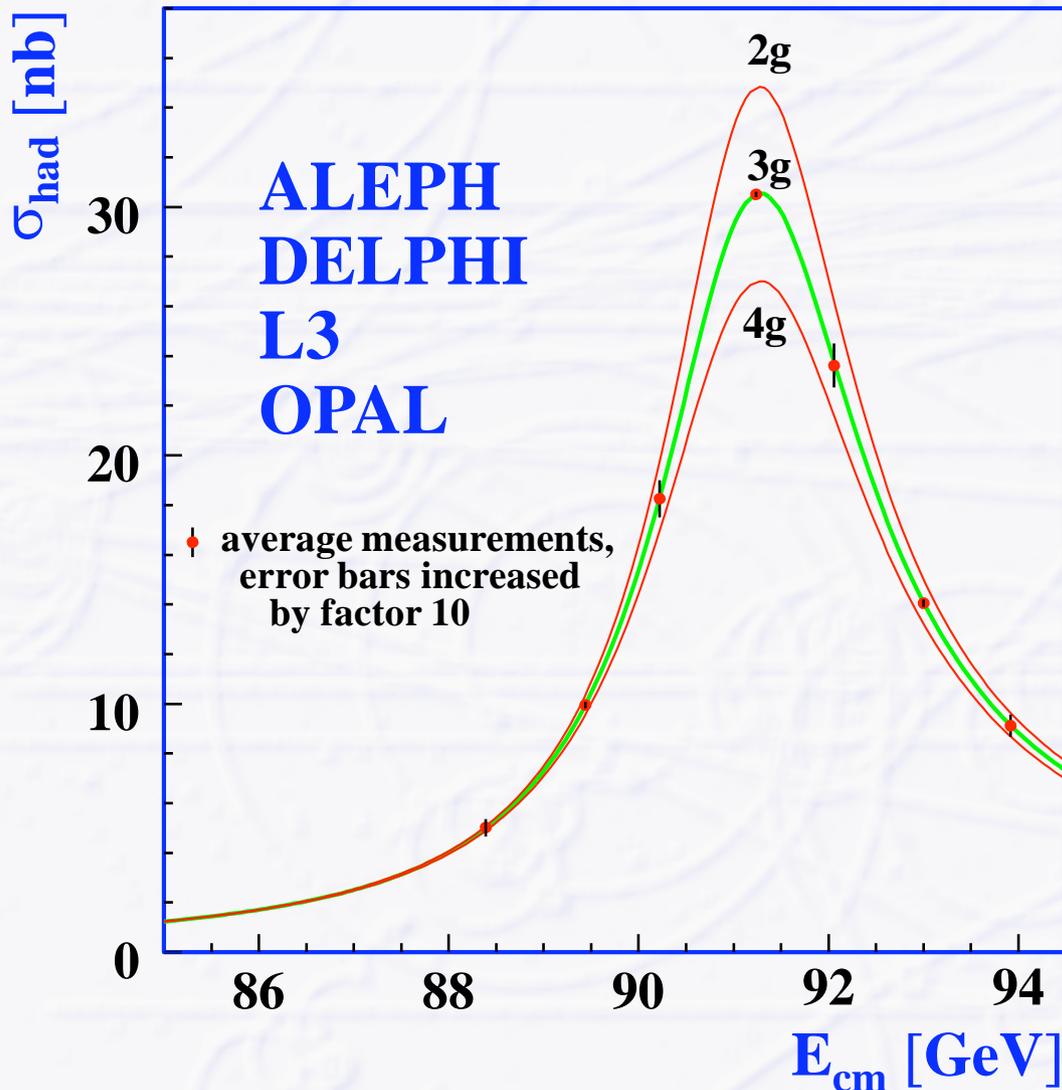
$$\sigma^0(s) \approx 12\pi \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{m_Z^2} \cdot \frac{s}{(s - m_Z^2)^2 + \Gamma_Z^2 m_Z^2}$$

- Resonance position  $\rightarrow M_Z$
- Peak cross section  $\rightarrow \Gamma_e \Gamma_f$
- Resonance width  $\rightarrow \Gamma_Z$

Form der Resonanzkurve stark abhängig von zusätzlichen Beiträgen höherer Ordnung (Vakuumpolarisation etc.)

# Anzahl der Generationen

- $Z^0$  Resonanzform abhängig von Anzahl der (leichten) Neutrino-Generationen



$$\Gamma_Z = \Gamma_{\text{had}} + 3\Gamma_{\ell} + \underbrace{N_{\nu}}_{\substack{\text{number of} \\ \text{light neutrinos}}} \underbrace{\Gamma_{\nu}}_{\text{leptonic width}}$$

**Anzahl der leichten(!) neutrino Generationen:**

$$N_{\nu} = 2.9840 \pm 0.0082$$

“leicht” = Zerfälle  $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$   
müssen möglich sein:  $M_{\nu} < \frac{1}{2} M_Z$