

# Konzepte für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern

Oliver Kortner

Max-Planck-Institut für Physik, München

17.10.2022



- Zweisemestrige Vorlesung.
- **Zeit im Wintersemester:** Jeden Montag von 10.00 Uhr bis 11.30 Uhr.  
**Raum:** PH II 127  
**Sprache:** Deutsch, Englisch auf Wunsch der Teilnehmer.
- **Medien:** Kopie der Folien bzw. der Tafelanschrift wird zu Beginn jeder Vorlesung verteilt und elektronisch auf <https://indico.mpp.mpg.de/event/8491/> hinterlegt.
- **Mündliche Abschlussprüfung:** Termin nach Vereinbarung am Ende der Vorlesungszeit.

## Lehrbücher über Teilchendetektoren

K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, Teubner 1992.

W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer 1993.

H. Kolanoski, N. Wermes, *Teilchendetektoren, Grundlagen und Anwendungen*, ISBN 978-3-662-45349-0.

## Statistische Methoden

F. James, *Statistical Methods in Experimental Physics (2Nd Edition)*, ISBN-13: 978-9812705273.

## Projektbeschreibungen

Die ATLAS-Arbeitsgemeinschaft, *ATLAS Phase-II Upgrade Scoping Document*, CERN-LHCC-2015-020.

Die CMS-Arbeitsgemeinschaft, *CMS Phase II Upgrade Scope Document*, CERN-LHCC-2015-019.

Die FCC-Projekt-Webseite: <https://fcc.web.cern.ch/>

# Einleitung

# Standardmodell der Teilchenphysik

- Unterhalb einer Skala von  $10^{-10}$  m ist die Materie nicht kontinuierlich verteilt, sondern diskret, sie besteht aus Teilchen.
- Im sogenannten **Standardmodell der starken und elektroschwachen Wechselwirkung** treten folgende Elementarteilchen auf:

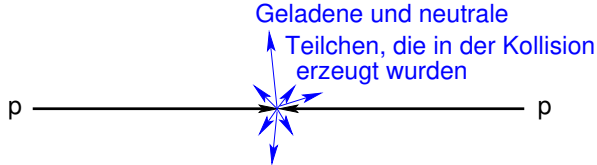
## Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
mass		$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
		<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>Z</b> Z boson	
		<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>W</b> W boson	

QUARKS (left side of fermion table)  
LEPTONS (left side of fermion table)  
SCALAR BOSONS (right side of boson table)  
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (right side of boson table)

Standardmodell mit beeindruckender Genauigkeit durch Experimente an Beschleunigern bestätigt.

Auswahl experimenteller Tests des Standardmodells auf den folgenden Folien.



In einer Kollision erzeugbare Teilchen im Endzustand

Leptonen

- Neutrinos: stabil, nur schwach geladen.  $\Rightarrow$  Keine Wechselwirkung, die zu einem messbaren elektrischen Signal in den Detektorkomponenten führt.
- Elektronen: stabil, elektrische geladen.  $\Rightarrow$  Elektrische Signale in den Detektorkomponenten.
- Myonen: instabil, aber, da ultrarelativistisch, im Laborsystem so langlebig, dass sie nicht im Detektor zerfallen; elektrisch geladen.  $\Rightarrow$  Elektrische Signale in den Detektorkomponenten.
- $\tau$ -Leptonen: instabil.  $\Rightarrow$  Nur über ihre Zerfallsprodukte nachweisbar.

## Weitere in einer Kollision erzeugbare Teilchen im Endzustand

### Hadronen

- In der elementaren Kollision entstehen zunächst Quarks und Gluonen. Wegen des Confinements sieht man nicht diese nicht, sondern sogenannte Jets aus Hadronen, die aus den Quarks und Gluonen entstanden sind.
- Besondere Rolle zweier Quarks:
  - b-Quarks bilden langlebige b-Hadronen, was die Identifizierung von b-Quarkjets ermöglicht.
  - t-Quarks sind so kurzlebig, dass sie keine Hadronen bilden können. Sie sind über ihren Zerfall  $t \rightarrow Wb$  nachweisbar.

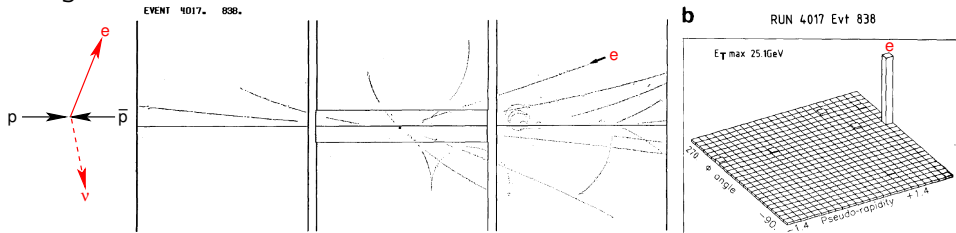
### Photonen

Photonen sind stabil. Sie sind zwar elektrisch neutral, können aber in Materie elektromagnetische Schauer erzeugen, die im Detektor nachgewiesen werden können.

# Entdeckung des $W$ -Bosons am $Spp\bar{p}S$

- Umbau des Super-Proton-Synchrotrons (SPS) am CERN zum Super-Proton-Antiproton-Synchrotron ( $Spp\bar{p}S$ ) mit einer Schwerpunktsenergie von 540 GeV.
- Entdeckung des  $W$ -Bosons durch das UA1-Experiment 1983 ([https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)91177-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)91177-2)).

Ereigniskandidat:

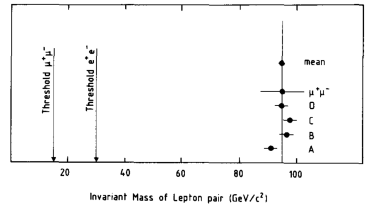
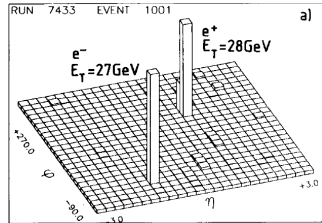
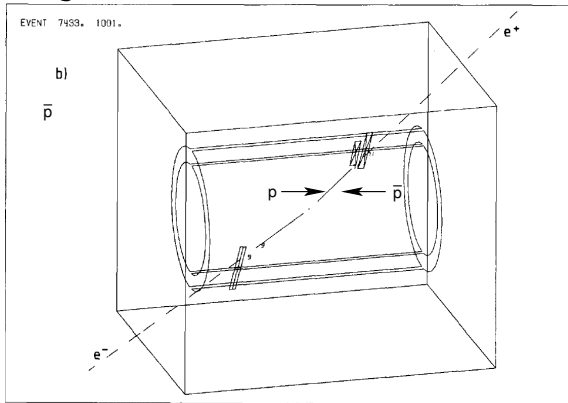




# Entdeckung des $Z$ -Bosons am $Spp\bar{S}$

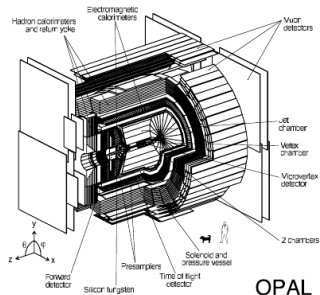
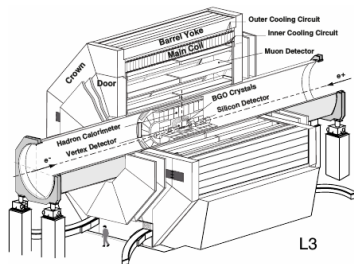
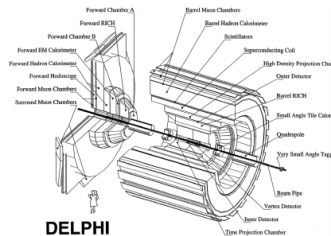
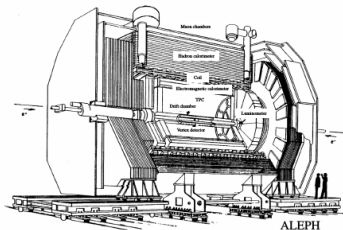
- Entdeckung des  $Z$ -Bosons ein halbes Jahr später ([https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)90188-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90188-0))

Ereigniskandidat:



# Präzisionsmessungen am $Z$ - und $W$ -Pol am LEP

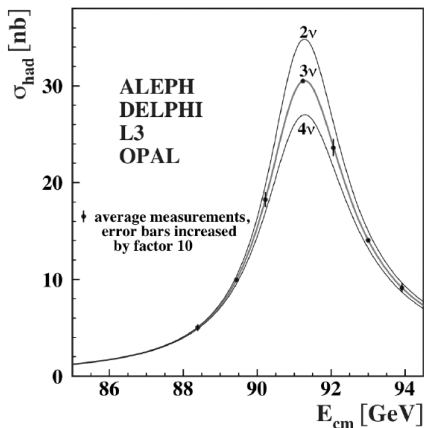
- Large Electron-Positron Collider (LEP) zur genauen Vermessung der  $W$ - und  $Z$ -Bosonen von 1989 bis 2000.
- 4 Experimente am LEP:



- Hadronischer Wirkungsquerschnitt am  $Z$ -Pol:

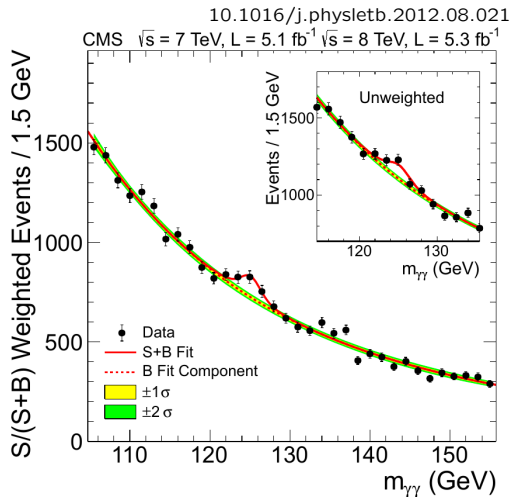
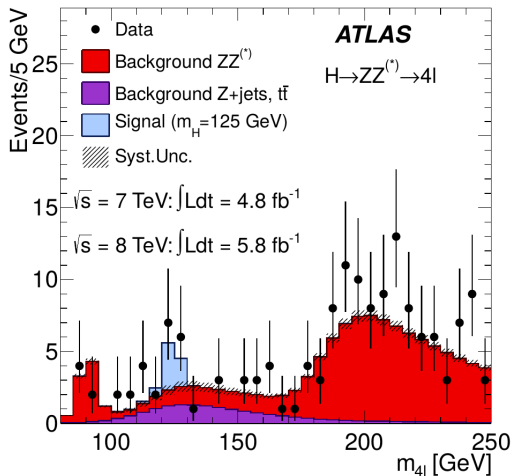
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow jj) = \sigma_{had}^0 = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{had}}{\Gamma_Z^2}.$$

- PrecisionPhys. Rept. 427, 257-454 (2006):





## Entdeckung durch ATLAS und CMS



Experimentelle Belege für die Unvollständigkeit des Standardmodells

- Existenz nichtverschwindender Neutrinomassen aufgrund der Beobachtung von Neutrinooszillationen.
- Existenz nichtbaryonischer dunkler Materie im Universum.
- Für die Baryogenese im Universum benötigte Baryonenzahl- und CP-Verletzung.

Um die richtige Erweiterung des Standardmodells zu finden, benötigt man zusätzliche (konkrete) experimentelle Befunde. Eine wichtige Quelle sind Experimente an bestehenden (LHC) und zukünftigen Hadroncollidern:

- HL-LHC: Ausbau des LHC zum Hochluminositäts-LHC (ab 2024).
- Mittel- bis langfristiges Ziel:
  - FCC (Future Circular Collider): pp-Collider mit 100 TeV Schwerpunktsenergie in einem neuen 80 km langen Tunnel mit starken Strahlführungsdipolmagneten.

## Wintersemester

1. Wechselwirkung von Teilchen mit Materie.
2. Teilchenidentifikation.
3. Konzepte für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern.
4. Detektoren für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern.

## Sommersemester

1. Grundlagen der Ausleseelektronik von Teilchendetektoren.
2. Methoden der statistischen Datenauswertung.
3. Rekonstruktion von  $pp$ -Kollisionsereignissen.
4. Triggerkonzept für zukünftige Colliderexperimente.