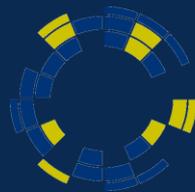


# Schwache Wechselwirkung und Z-Teilchen

Michael Kobel  
[michael.kobel@tu-dresden.de](mailto:michael.kobel@tu-dresden.de)  
Technische Universität Dresden



NETZWERK  
TEILCHENWELT

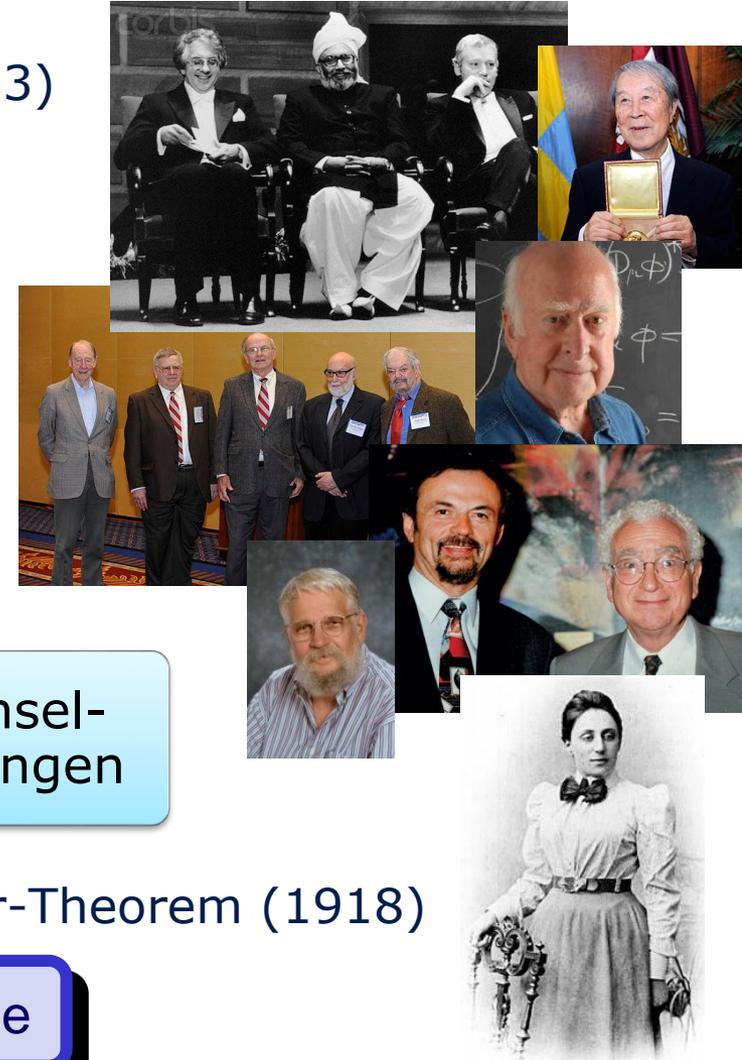
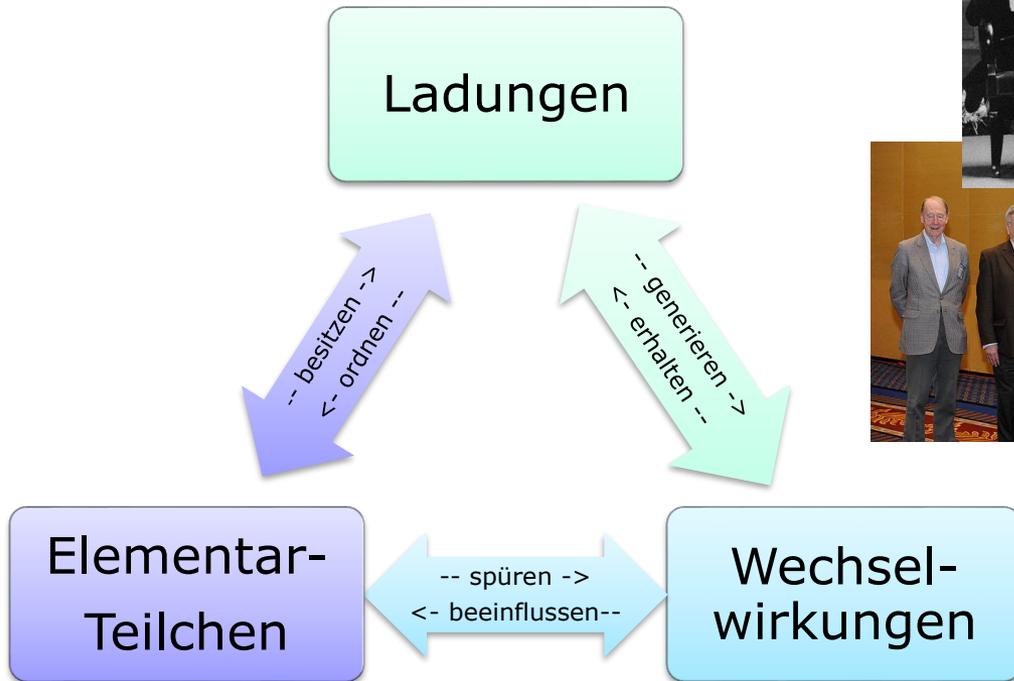


DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

**Online Lehrkräfte-Fortbildung 14.9.2020**

- ❖ \*Kein\* Ziel dieser Einführung ist
  - Systematische Darstellung der Theorie der Elementarteilchen („Standardmodell“)
  - Vollständiger Überblick über Schwache Wechselwirkung, Z-Teilchen oder Brout-Englert-Higgs-Mechanismus
  
- ❖ Statt dessen
  - Grobe Einordnung der im Folgenden auftretenden Begriffe
    1. Fundamentale Wechselwirkungen
    2. Botenteilchen
    3. Rekonstruktion instabiler Teilchen
    4. Rolle von Z- und Higgs-Teilchen

- ❖ Das Standardmodell der Teilchenphysik (hauptsächlich entwickelt von 1961-1973)



- ❖ Basierend auf mathematischem Noether-Theorem (1918)



## ❖ **Fundamentale Wechselwirkungen**

- **Nicht auf andere Wechselwirkungen/Kräfte zurückführbare gemeinsame Beschreibung einer Vielzahl von Prozessen**  
(z.B. Kräfte, Umwandlungen, Streuungen, ...)

## ❖ **Elementarteilchen**

- **Teilchen ohne (dauerhafte) Substruktur**  
(Quantenfluktuationen sind erlaubt)

## ❖ **Ladungen**

- **Charakteristische Eigenschaften von Teilchen, die Wechselwirkungen hervorrufen**  
(und damit Anziehung, Abstoßung, gebundene Zustände, Umwandlungen, etc. ermöglichen)

❖ Kraft ist immer auch Wechselwirkung (Actio = Reactio)

❖ Nun: **Begriff Wechselwirkung wird erweitert**

→ neues Basiskonzept

**Basiskonzept**

**Wechselwirkung**

= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +  
Vernichtung + Strahlung

❖ Umfasst die Phänomene

- **Kraft** (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- **Umwandlung** von Teilchen (z.B.  $\beta$ -Umwandlung / „Zerfall“)
- **Emission / Absorption** von „Feldquanten“ (z.B. Brems**strahlung** )
- **Erzeugung** von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- **Vernichtung** in „Feldquanten“ (z.B. PET:  $e^+e^- \rightarrow 2$  Photonen)

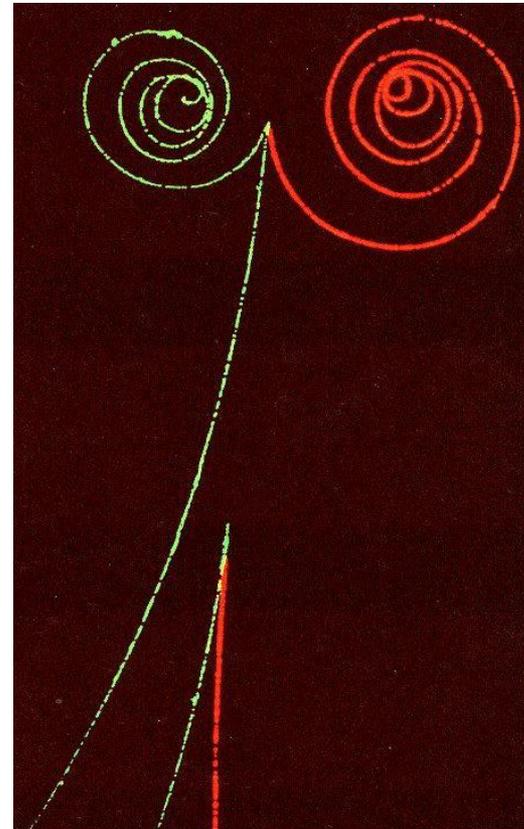
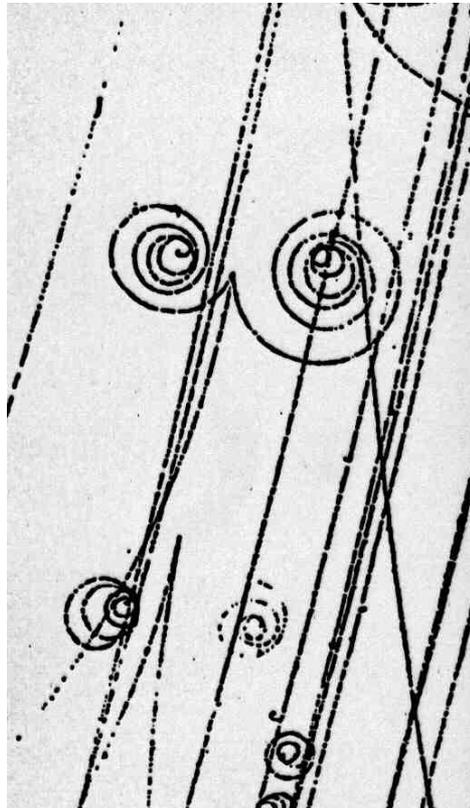
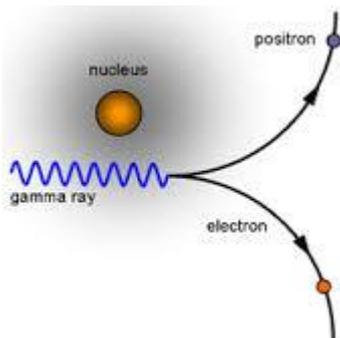
❖ Ziel: **Wir kennen genau 4 fundamentale Wechselwirkungen**

- Zu jeder existiert eine Kraft, oft stehen aber andere Phänomene im Vordergrund

## ❖ Beispiel für Paarerzeugung der emag Wechselwirkung

- Elektron-Positron-Erzeugung aus einem Photon im elektrischen Feld eines Kerns oder eines Elektrons (Photon hinterlässt keine Spur in diesem Detektor)

[http://tap.iop.org/atoms/particles/534/file\\_47333.doc](http://tap.iop.org/atoms/particles/534/file_47333.doc)



Photon +  
ruhendes  
atomares  $e^-$   
->  
 $e^+ e^-$  Paar  
(rot/grün)

bewegtes  
Elektron (grün)

Weiteres  
 $e^+ e^-$  Paar  
aus Photon  
einer  
Bremsstrahlung

## ❖ Wichtige Erkenntnis

- Alle bekannten Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen  
-> Herausforderung für Esoteriker\*innen!
- 3 davon werden tiefgehend im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben und „verstanden“

Hangabtriebskraft,  
Motorkraft,  
Gasdruck,  
Radiowellen,  
Reibung,  
Radioaktivität,  
Leben  
...

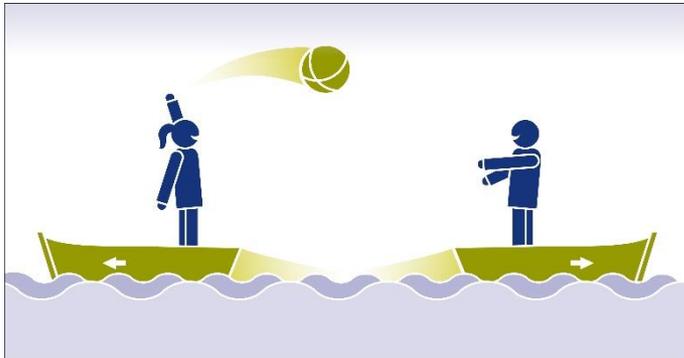


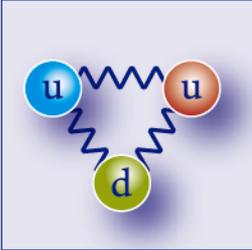
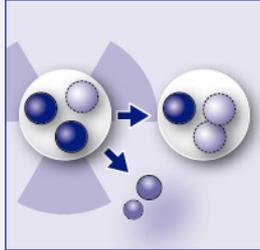
## Vier Fundamentale Wechselwirkungen

1. Gravitation
2. Elektromagnetische WW
3. Schwache WWirkung
4. Starke Wechselwirkung

### ❖ Wechselwirkungen werden durch „Botenteilchen“ vermittelt

- Beispiel:  
klassische  
Analogie für  
abstoßende Kraft



			
	<b>Starke Wechselwirkung</b>	<b>Elektromagnetische Wechselwirkung</b>	<b>Schwache Wechselwirkung</b>
<b>Betroffene Materie-Teilchen</b>	Quarks	Quarks und elektrisch geladene Leptonen	Alle
<b>Zugehörige Ladung</b>	starke Ladung (Farbladung)	elektrische Ladung	schwache Ladung
<b>Austauschteilchen bzw Botenteilchen</b>	Gluonen	Photon	$W^+, W^-, Z^0$
<b>Wirkungen</b>	Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen	Licht, Strom, Magnetismus, Zusammenhalt von Atomen...	Betazerfall, Kernfusion...
<b>Reichweite</b>	$10^{-15}$ m (Protonendurchmesser)	unbegrenzt	$10^{-18}$ m (1/1000 Protonendurchmesser)

Die vierte Wechselwirkung ist die Gravitation. Sie ist mit Abstand die schwächste Wechselwirkung und spielt für Elementarteilchen keine Rolle.



## ❖ Botenteilchen

- Photon und Gluon
  - Masselos
  - Stabil
- $Z^0, W^+, W^-$ 
  - Massiv  $m=80-91 \text{ GeV}/c^2$
  - Instabil  $\tau = 3 \times 10^{-25} \text{ s}$

## ❖ Higgs

- Massiv  $m=125 \text{ GeV}/c^2$
- Instabil  $\tau = 2 \times 10^{-22} \text{ s}$



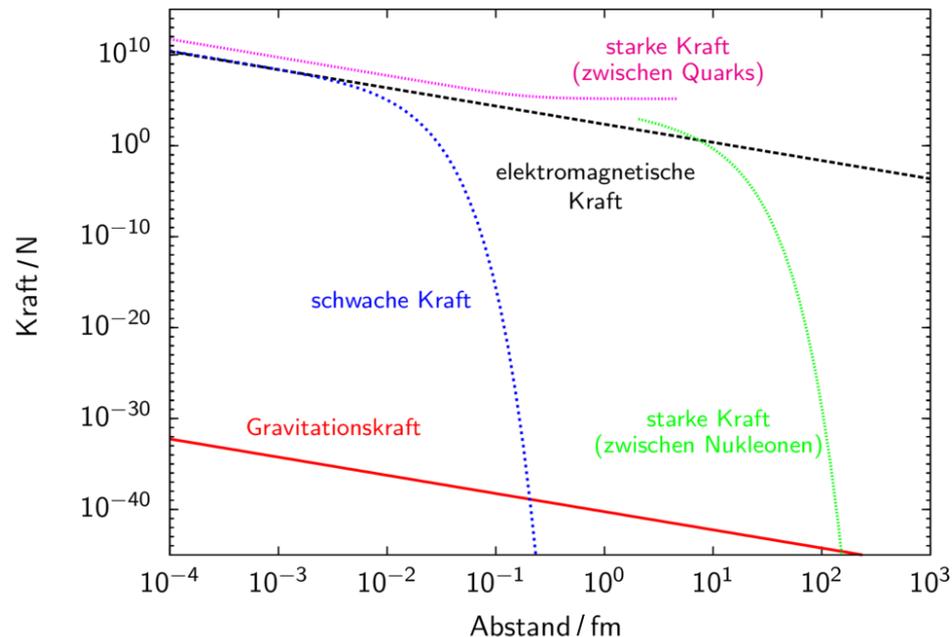
## ❖ Übersicht der Phänomene der Wechselwirkungen

Phänomen	Starke WW	Schwache WW	Emag WW	Gravitation
Kraft	✓	✓	✓	✓
Bindung	✓	✗	✓	✓
Umwandlung	✓	✓	✗	✗
„Strahlung“	✓	✓	✓	✓
Erzeugung	✓	✓	✓	✗
Vernichtung	✓	✓	✓	✗

## ❖ Besonderheiten:

- Keine Bindungen durch schwache WW
- Quarks in Bindungen der starken WW „eingesperrt“
- Keine Umwandlungen durch emagnetische und Gravitations-WWirkung
- Keine gravitative Erzeugung/Vernichtung <-> keine negative Masse
- Sehr unterschiedliche Reichweiten von Kräften & Strahlung  
 <-> unterschiedliche Eigenschaften der Botenteilchen  
 (Gluonen, W+Z („Weakonen“), Photonen, Gravitonen)

- ❖ Kraftgesetze der 4 fundamentalen Wechselwirkungen
  - zusätzlich: die Kraft zwischen Nukleonen (nicht fundamental)



**Abb . 12: Kräfte als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Teilchen.**

Für die elektromagnetische Kraft, die schwache Kraft und die Gravitationskraft ist jeweils die Kraft zwischen einem Elektron und einem Positron dargestellt.

Für die starke Kraft wurde als Beispiel die anziehende Kraft zwischen Quark und Anti-Quark bzw. die Kraft zwischen zwei Nukleonen aufgrund der „kovalenten“ Quarkpaarbindung gewählt.

## ❖ Beispiel Kalium im menschlichen Körper

- für den menschlichen Körper lebensnotwendig:
  - Regelt als Mineralstoff Wassergehalt in den Zellen
  - Wichtiger Elektrolyt der Körperflüssigkeit
- Ca jedes 9000ste Kaliumatom der 100-150g Kalium im Körper ist  $^{40}\text{K}$ 
  - Instabiles Isotop mit 40 Nukleonen (19 Protonen und 21 Neutronen)
  - Zerfällt durch den Betaminus- oder Betapluszerfall mit Halbwertszeit von 1,28 Mrd. Jahren

- Vermittelt durch  $W^{\pm}$ -Bosonen
  - Umwandlung  $p \leftrightarrow n$  über Quarks  $u \leftrightarrow d$
  - Animation:

Legend:

- Proton
- Neutron
- up-Quark
- down-Quark
- Elektron
- Positron
- Antielektronneutrino
- Elektronneutrino
- W- Boson
- W+ Boson

vergangene Zeit seit dem Zerfall:  $0,0 \cdot 10^{-25} \text{ s}$

Timeline: 0s,  $2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ ,  $4 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ , vergangene Zeit seit dem Zerfall

- Schätzen Sie mal:
  - Mit wie vielen Neutrinos / s bestrahlen sie die Umgebung ?

❖ Bedeutung des 4er-Impuls-Quadrates  $(p^\mu)^2 = p^\mu p_\mu$

$$P^\mu = \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

← Gesamtenergie  $E = E_0 + E_{kin}$   
 $\frac{E}{c} = \frac{\gamma mc^2}{c}$

$$\text{Skalarprodukt: } P^\mu P_\mu = \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ \vec{p} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ -\vec{p} \end{pmatrix} = \left(\frac{E}{c}\right)^2 - p^2$$

auch  $P^\mu P_\mu$  ist invariante Größe, also in jedem Bezugssystem gleich groß → betrachte  $P^\mu P_\mu$  in einem Inertialsystem, wo  $p = 0$  dann gilt:

$$P^\mu P_\mu = \left(\frac{E_0}{c}\right)^2 = (mc)^2$$

← Invariante Masse  $m$   
 (entspricht „Betrag“ des Impulsvierervektors)

$$\rightarrow \left(\frac{E}{c}\right)^2 - p^2 = (mc)^2$$

Energie ist eine **Komponente** des Viererimpulses  
 ⇒ KEINE invariante Größe, sondern abhängig vom Bezugssystem

Masse ist der **Betrag** des Viererimpulses  
 ⇒ EINE invariante Größe, unabhängig vom Bezugssystem

Quelle: Erik Heine, Fortbildung SRT, Physik-Didaktik TU Dresden 2018

- ❖ Die Invariante Masse der Summe  $(E/c, \vec{P}) := \Sigma (E_i/c, \vec{p}_i)$  eines Systems aus mehreren Teilchen  $i = 1, \dots, n$  liegt „auf der Massenschale“ des Teilchens im Zwischenzustand

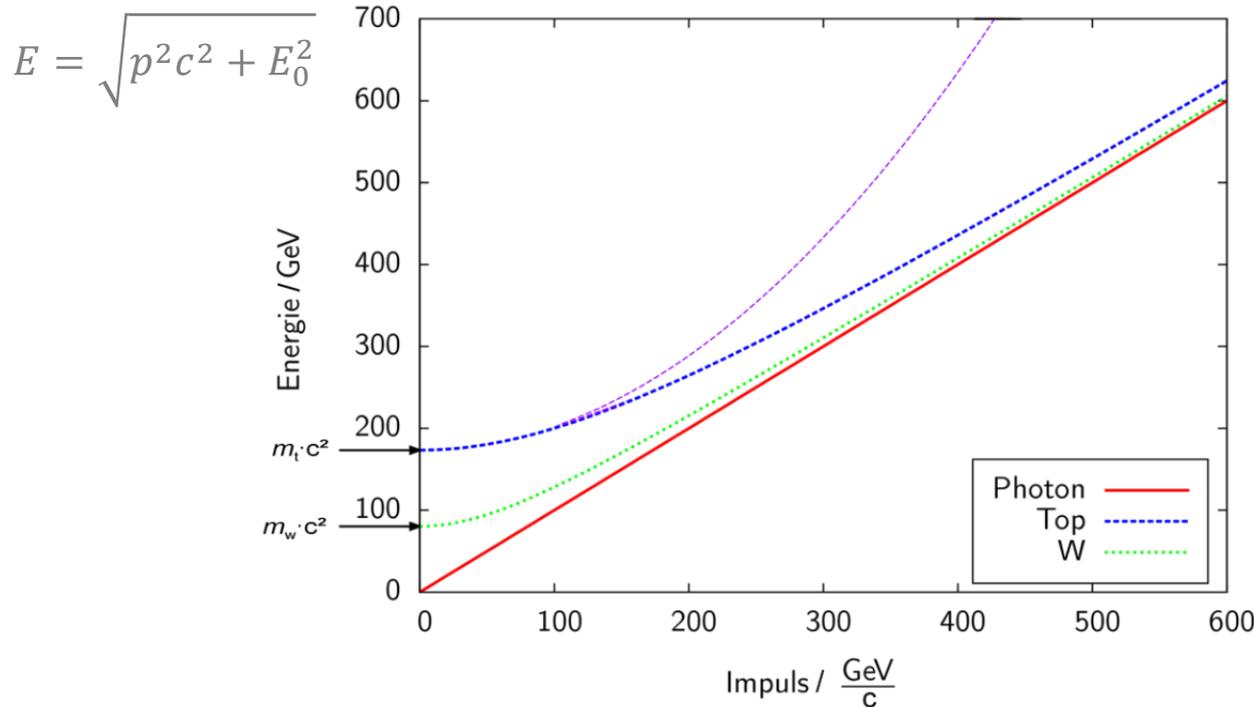


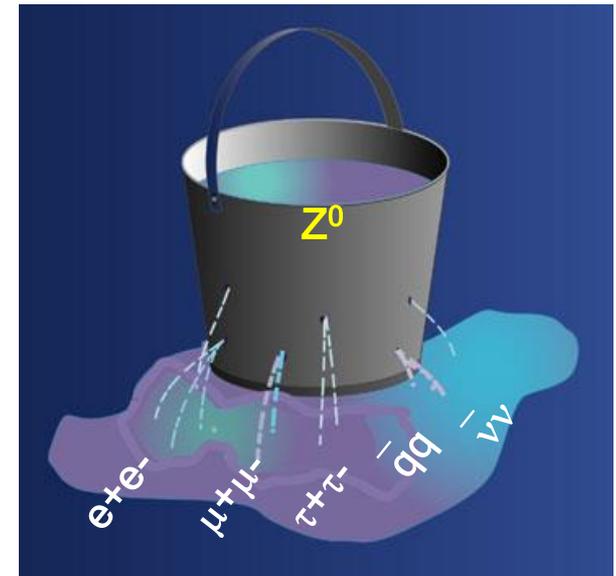
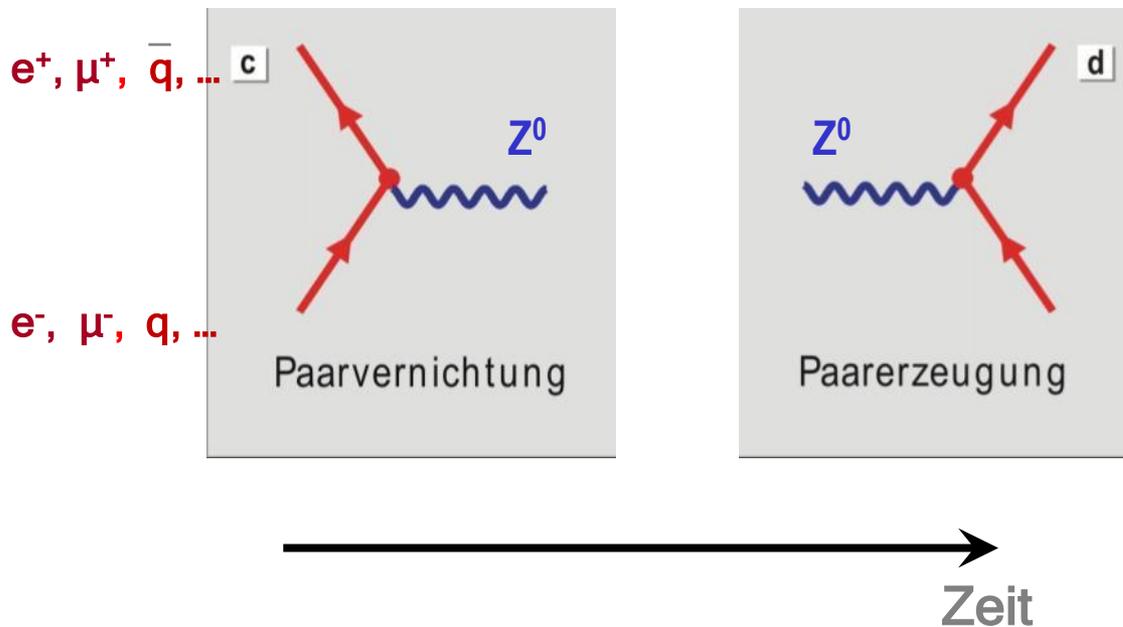
Abb. 40: Energie-Impuls-Beziehung am Beispiel von Photon ( $E = p \cdot c$ ), W-Teilchen und Top-Quark.

Für kleine Impulse gilt beim W-Teilchen und dem Top-Quark näherungsweise

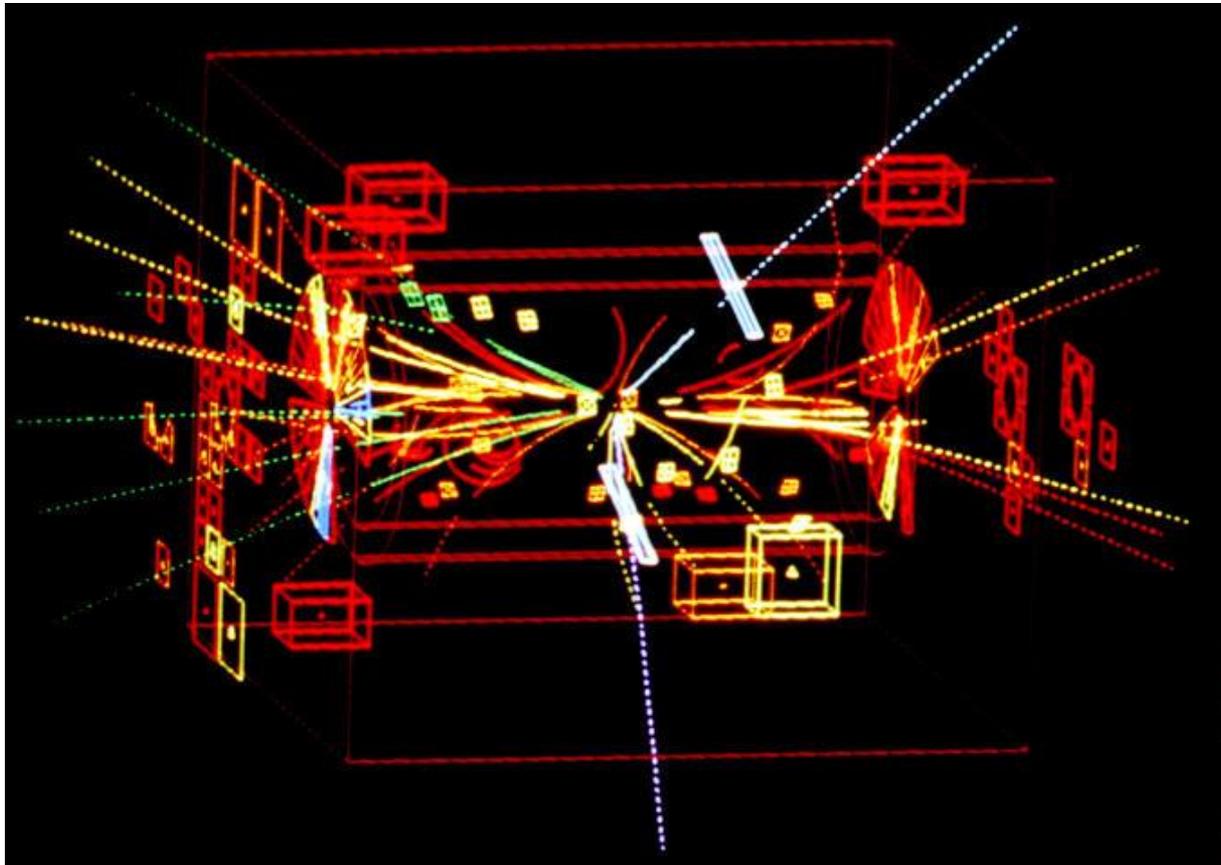
die nicht-relativistische Beziehung  $E = E_0 + \frac{p^2}{2 \cdot m}$ , die für das Top-Quark violett gestrichelt eingezeichnet ist.

Bei großen Impulsen nähern sich die  $E(p)$ -Kurven aller Teilchen der hoch-relativistischen Photon-Gerade  $E(p) = p \cdot c$  an.

- ❖ Die Ruhe-Energie (Masse) des Z Teilchen kann durch Umwandlung genügender kinetischer Energie in Kollisionen erzeugt werden
- ❖ Danach „zerfällt“ das instabile Z praktisch sofort am Entstehungsort
- ❖ Produktion und Zerfall als Feynmandiagramm:

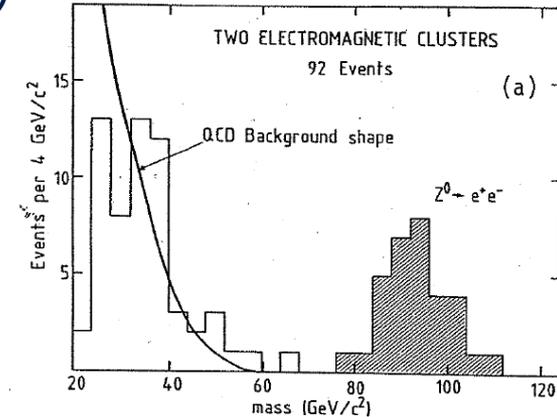


- ❖ Erzeugung des  $Z$  über  $\bar{q}q$ -Vernichtung in Antiproton-Proton Kollisionen
- ❖ Das  $Z$  wird über seinen Zerfall in  $\mu^+\mu^-$  (weiße Spuren) bzw.  $e^+e^-$  und ihrer invarianten Masse rekonstruiert



## ❖ Verteilungen der invarianten Masse (1984)

- Experiment UA1



- Experiment UA2

## ❖ Zwei Anteile:

- Untergrund (weiß)
- „Signal“ schraffiert
- → statistische Auswertungen

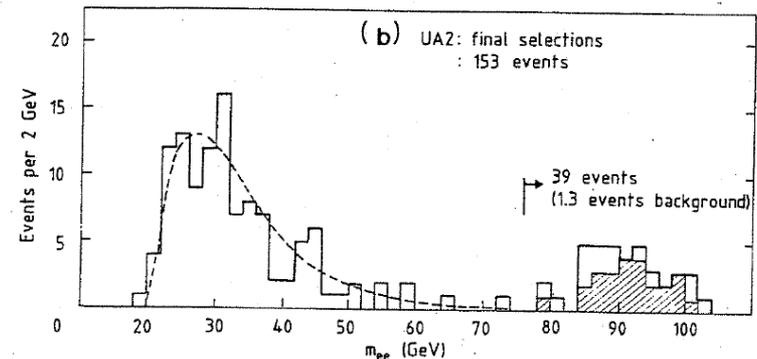


Figure 12.5: (a) The invariant mass distribution for  $e^+e^-$  pairs identified through electromagnetic calorimetry in the UA-1 detector. (Figure supplied by UA-1 Collaboration) (b) The analogous plot for the UA-2 data (Ref. 12.12). In both data sets, the  $Z$  appears well-separated from the lower mass background.

### ❖ Z-Boson: Experimentell und im Alltag

- Ähnliche Eigenschaften wie Photon, nur sehr massiv  $\leftrightarrow$  extrem kurze Reichweite
- $\rightarrow$  verursacht i.a. unmessbar winzige Korrekturen zu elektromagnetischen Prozessen
- Ausnahme: Wechselwirkungen von Neutrinos
  - Wechselwirken nicht über Photonen (elektr. Ladung = 0)
  - Elastische Streuung von Neutrinos (z.B. an Kernen und Elektronen) wird ausschließlich durch das Z vermittelt  $\leftrightarrow$  Kraftwirkung der schwachen Wechselwirkung

### ❖ Z, W und Higgs: Theorie

- Z als elektrisch neutraler Partner der  $W^\pm$  von Theorie verlangt
- Z bestes Laboratorium zu Präzisionstest der schwachen WW
- Z,W Tor zur Untersuchung des Mechanismus der Massenerzeugung
  - Symmetrien erfordern auch masselose W und Z-Teilchen
  - Massen entstehen durch überall vorhandenes „Hintergrundfeld“
  - Higgs-Teilchen sind Anregungen dieses Brout-Englert-Higgs-Feldes und einzige Möglichkeit, es zu untersuchen

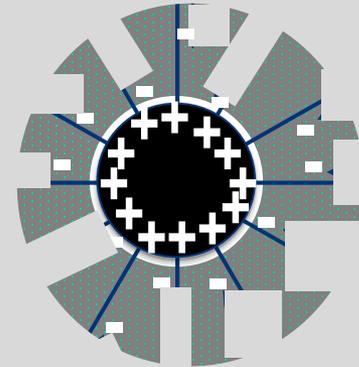
## ❖ Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

- Einfügen von Dielektrikum
- Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch Polarisierung
- Abgeschirmtes Feld  
→ Endliche Reichweite  $\lambda_w = 0,002 \text{ fm}$

## ❖ Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

- Brout-Englert-Higgs-Feld ist polarisierbares Medium der Schwachen Wechselwirkung  
→ „Dischwachladikum“
- Abgeschirmtes Feld  
→ Masse der Botenteilchen

$$m_Z c^2 = \frac{\hbar c}{\lambda_w} = \frac{0,2 \text{ GeV fm}}{\lambda_w} = 100 \text{ GeV}$$





## ❖ Fundamentale Wechselwirkungen

- Eines der drei Basiskonzepte des Standardmodells
- Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich einer oder mehrerer der 4 fundamentalen Wechselwirkungen zuordnen
- Das Standardmodell beschreibt 3 der 4 WWen mit zugehörigen Ladungen

## ❖ Botenteilchen

- Wechselwirkungen werden durch Botenteilchen vermittelt
- Diese koppeln an die Ladung der jeweiligen Wechselwirkung
- Ihre Eigenschaften dominieren die Phänomenologie der Wechselwirkungen

## ❖ Rekonstruktion instabiler Teilchen

- Erfolgt über Nachweis der „Zerfalls“-produkte
- Ihre Masse ergibt sich über die „invariante Masse“ der Zerfallsprodukte

## ❖ Rolle von Z- und Higgs-Teilchen

- Z: Eines der Botenteilchen der Schwachen Wechselwirkung
- H: Anregung des BEH-Feldes, Tor zur Untersuchung der Massenerzeugung