

Teilchenphysik

Was wir heute wissen

Philipp Lindenau

TU Dresden | 10.03.2017

Herzlich willkommen!



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT



Inhalte dieses Vortrags

1. Einführung: Warum Teilchenphysik?
2. Theoretisches: Wie Physiker sich die Welt vorstellen
3. Suche nach dem Higgs-Teilchen: Zutaten um selbst als Forscher aktiv zu werden

Teil 1: Einführung

Warum Teilchenphysik?



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

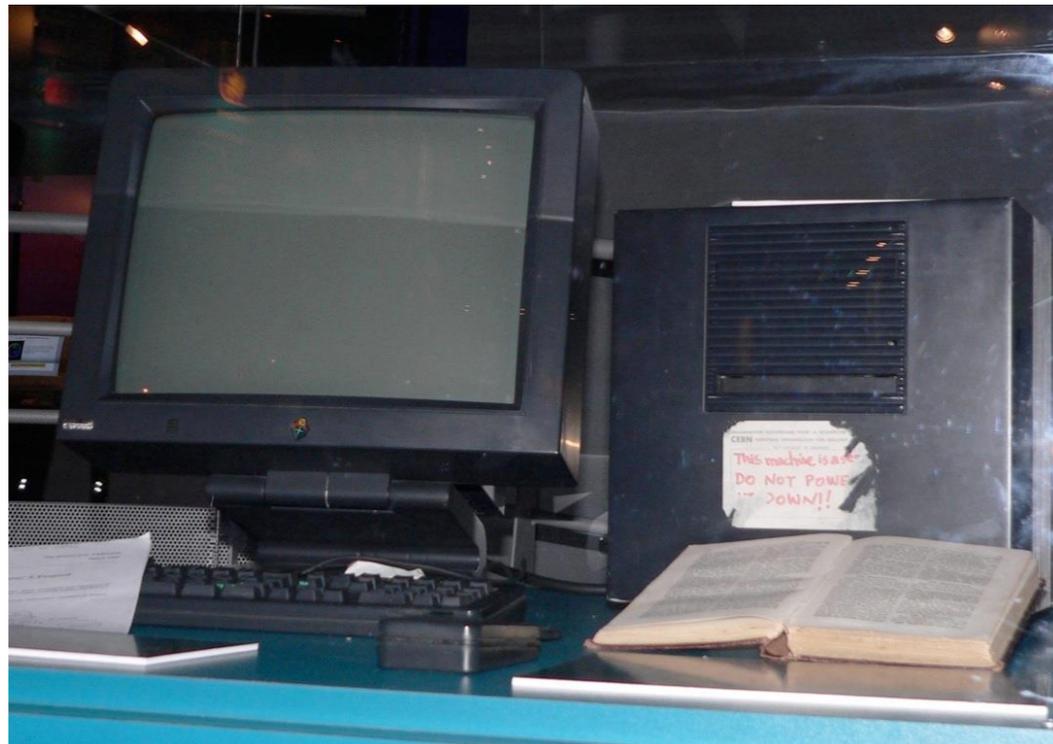


NETZWERK
TEILCHENWELT

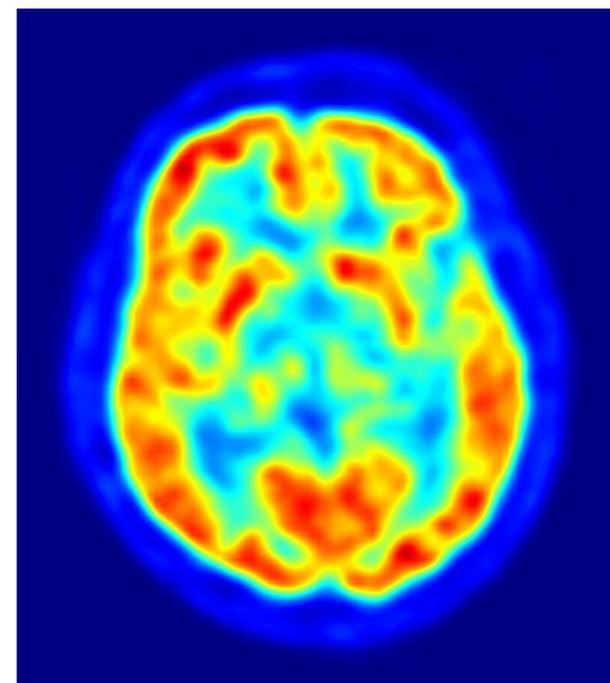
Warum Teilchenphysik?

- Interesse und Neugier!
- Erkenntnisgewinn über Geschichte, Funktionsweise und Aufbau des Universums
- Anwendungen:

World Wide Web

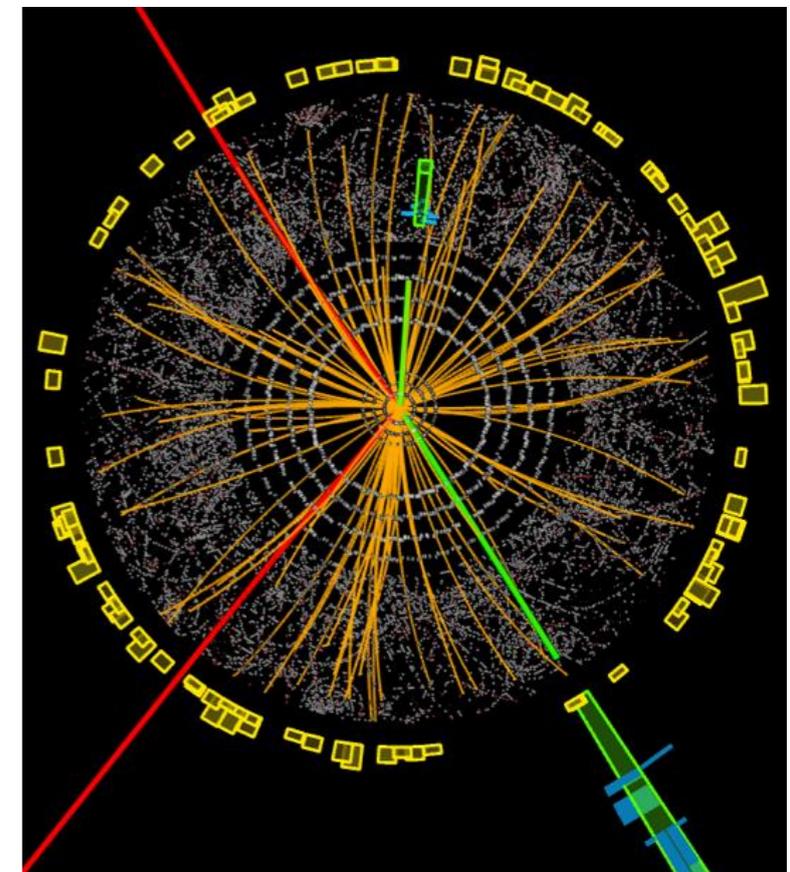
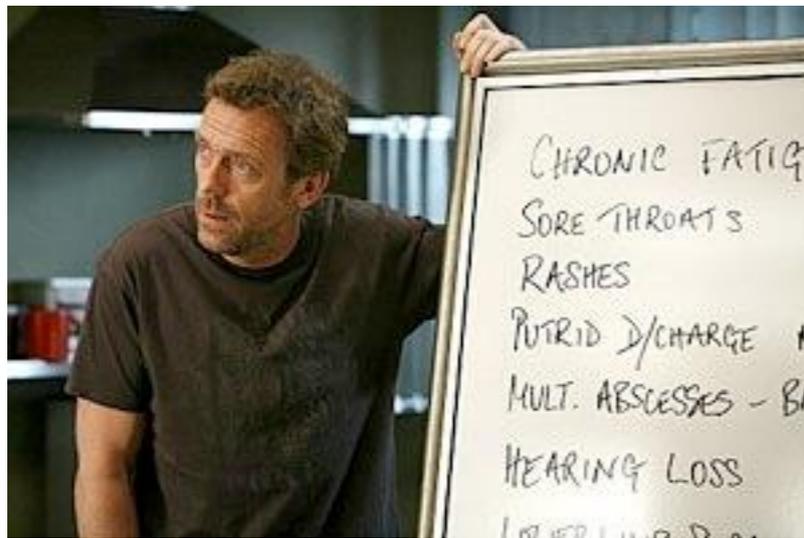


Medizin



Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome
- Teilchenphysik: Interaktion von Teilchen nicht direkt beobachtbar, nur sog. Endzustände

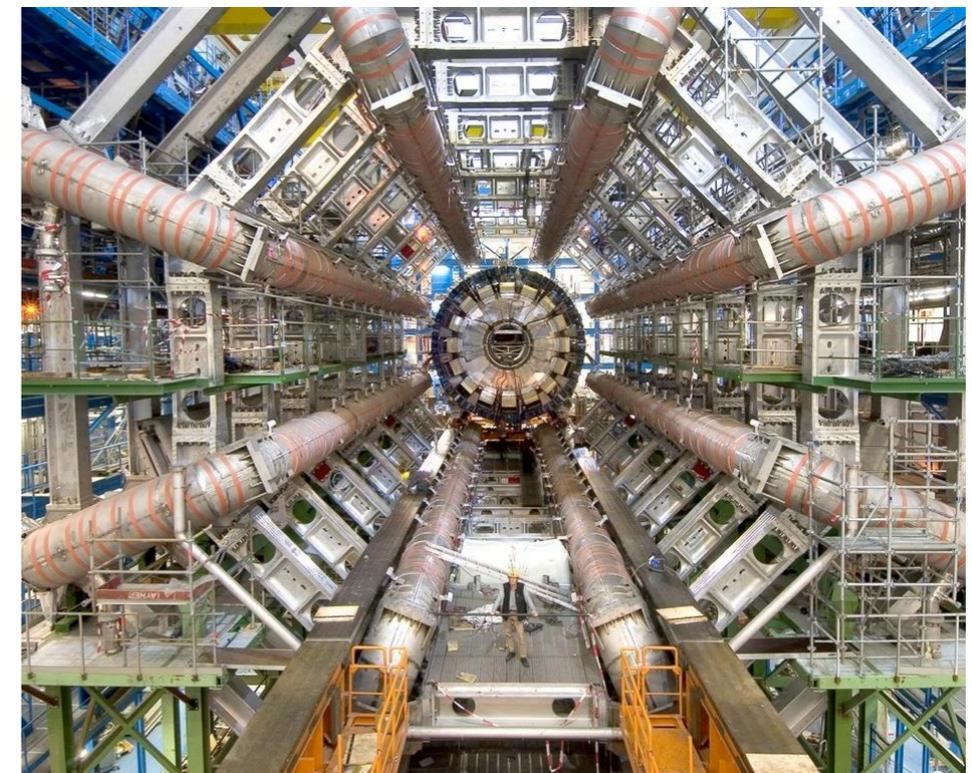


Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: teure, hochkomplexe Maschinen
- Teilchenphysik: teure, hochkomplexe Maschinen

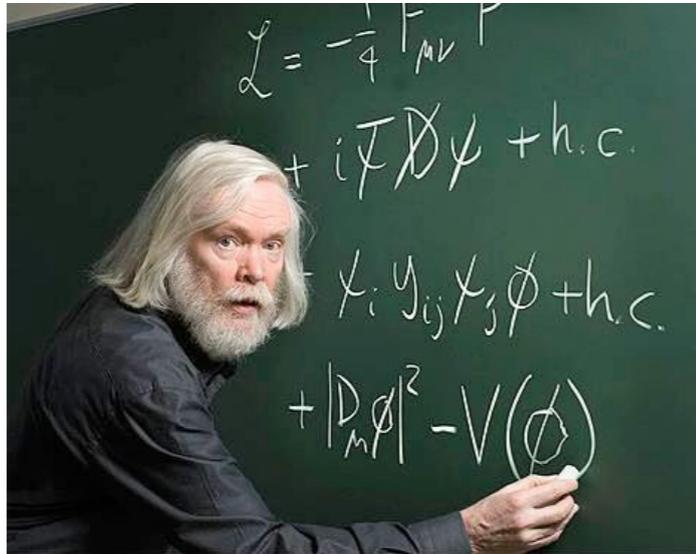


\$1.5 Millionen

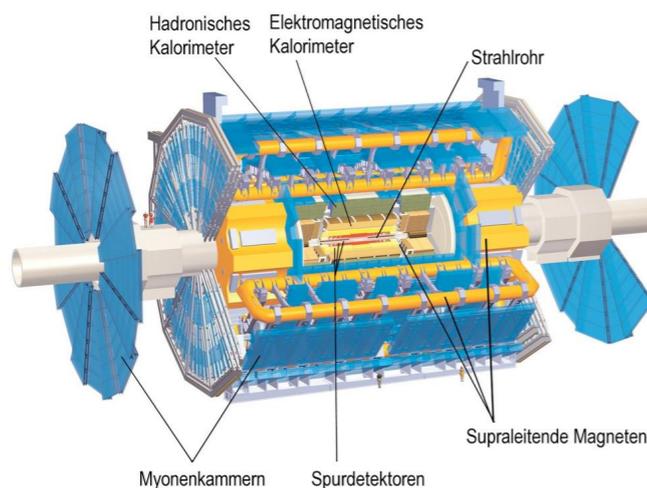


\$450 Millionen

Konkret in der Teilchenphysik



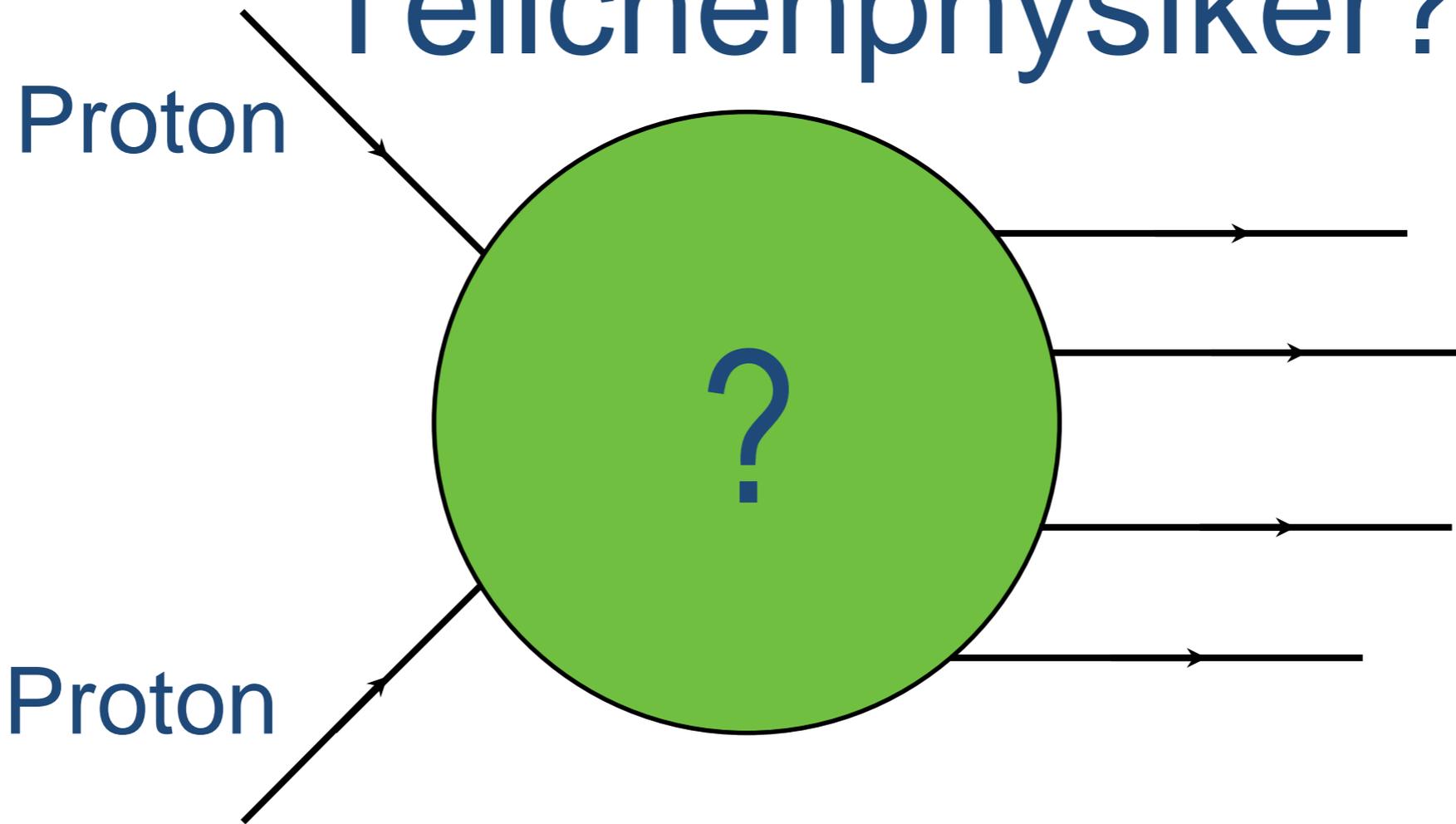
Theorie



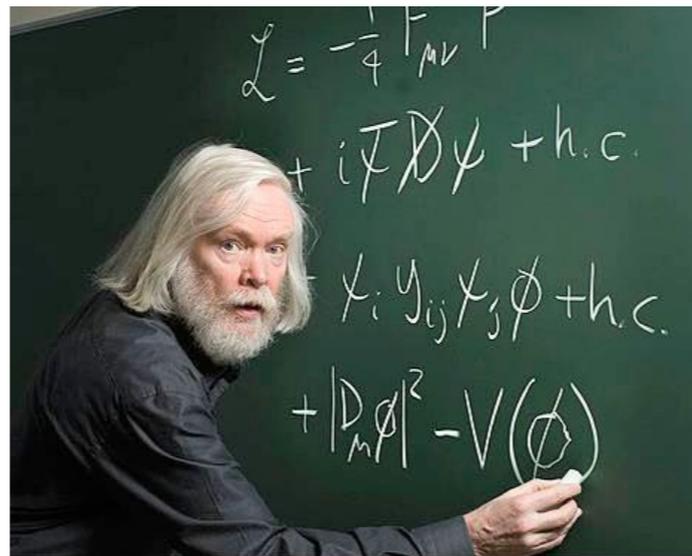
Experiment

- **Standardmodell der Teilchenphysik**
- Macht Vorhersagen über:
 - Art wie Teilchen wechselwirken
 - Häufigkeiten dieser Wechselwirkungen
- z.B. ATLAS u. CMS am LHC
- prüft, ob die Vorhersagen der Theorie stimmen
- Aufnahme von Teilchenkollisionen
- Vergleich der erhaltenen Daten mit den Vorhersagen der Theorie

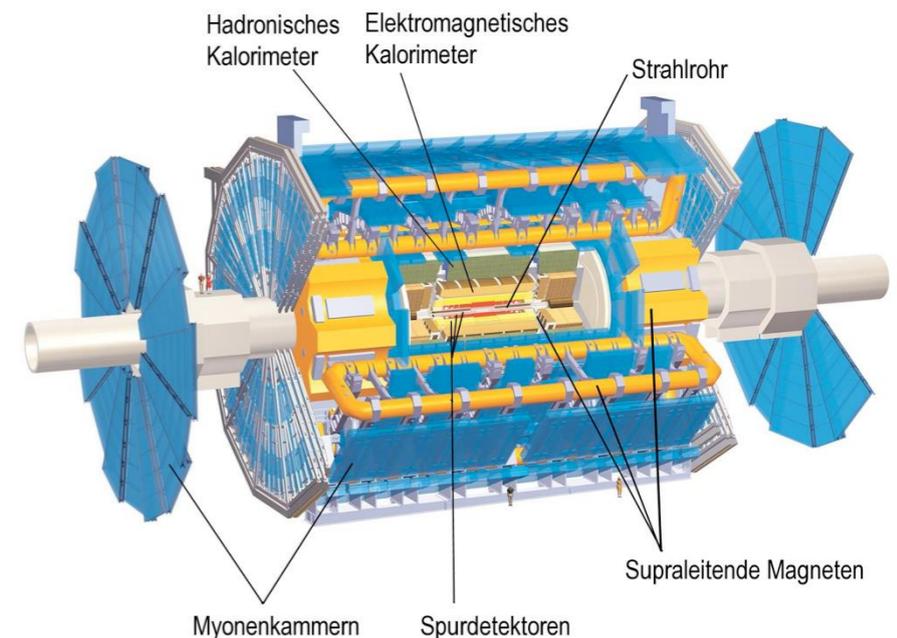
Wie forschen Teilchenphysiker?



Beschleuniger



Theorie



Detektor

Teil 2: Theoretisches

Wie Physiker sich die Welt vorstellen –
Das Standardmodell der Teilchenphysik



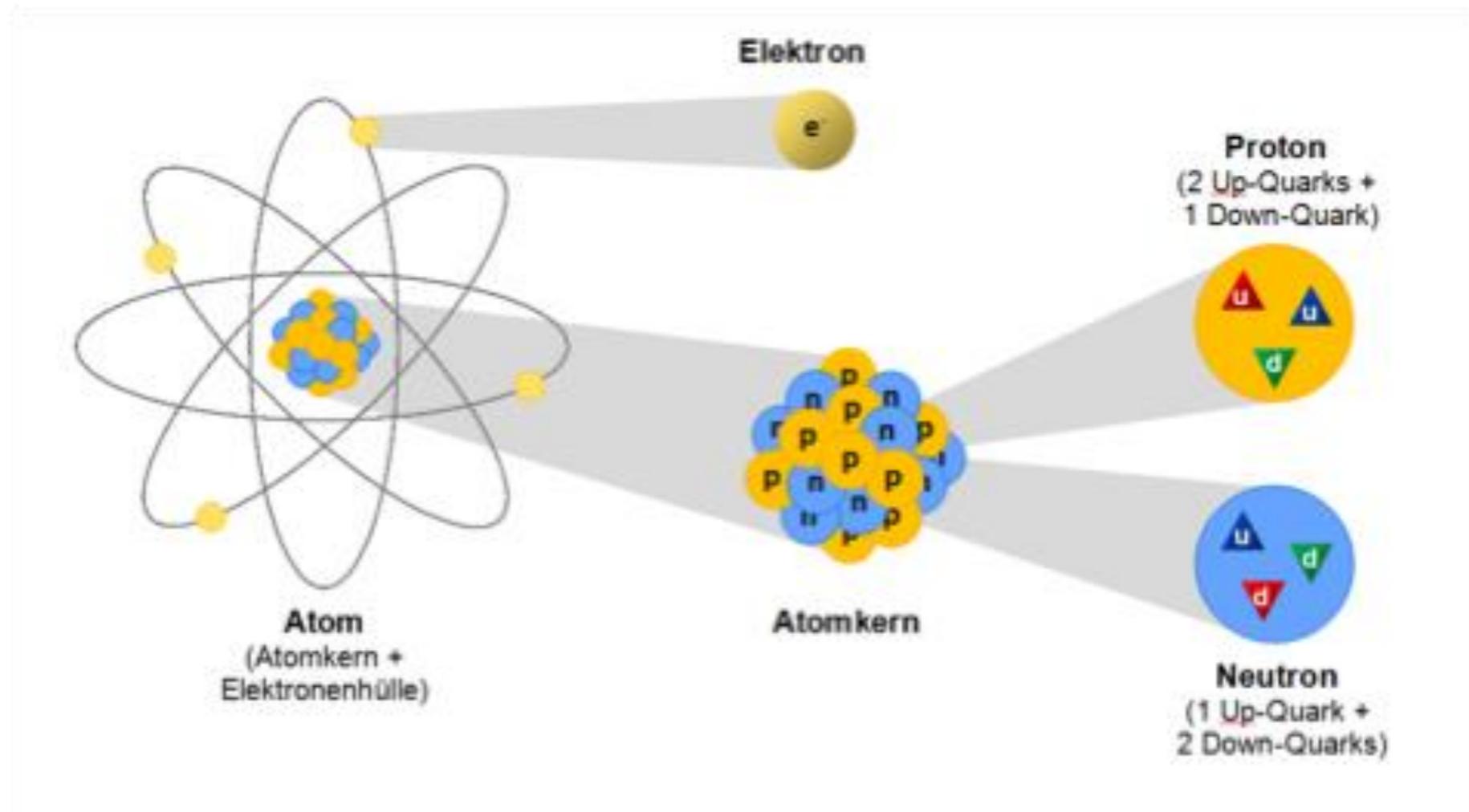
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT

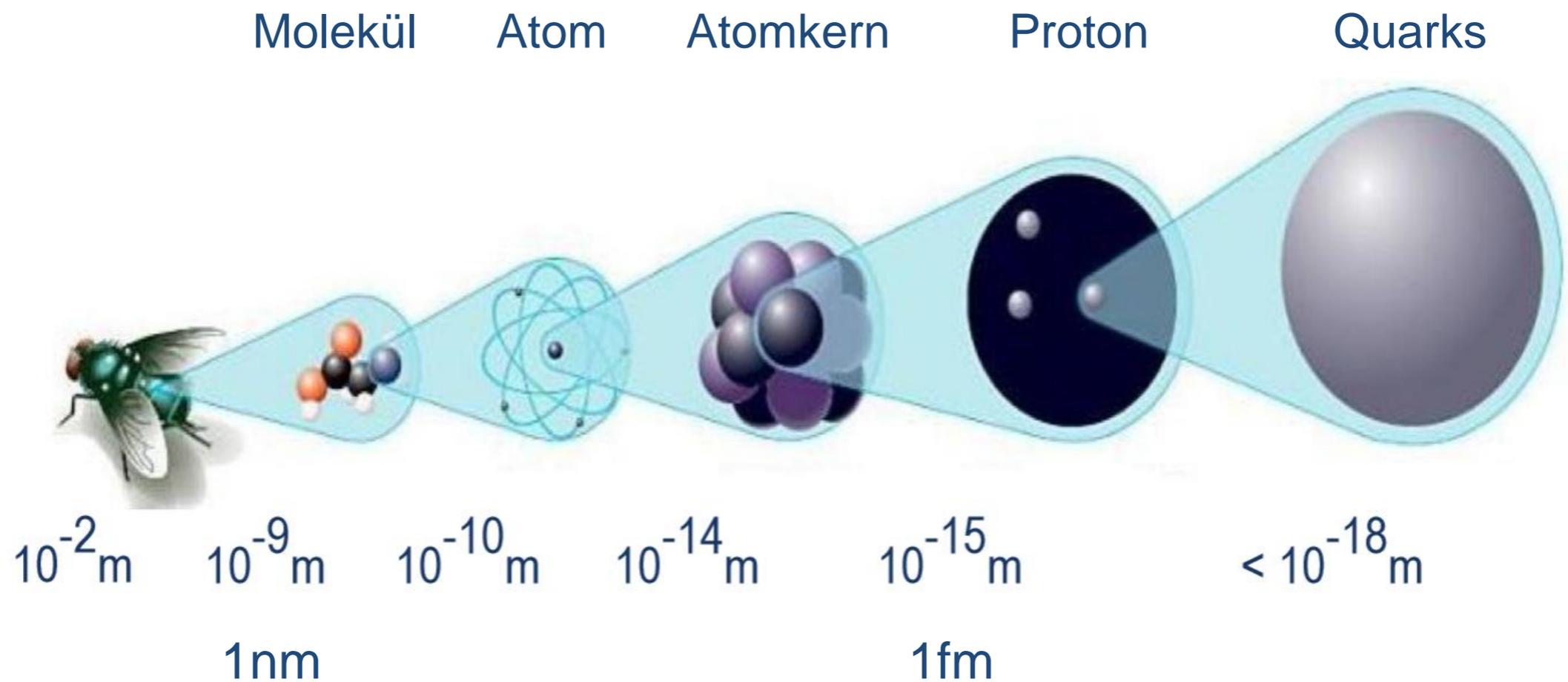
Woraus besteht die Welt?

- Alle Materie besteht letztlich aus **Elementarteilchen** – das sind Teilchen, die nicht aus noch kleineren Teilchen bestehen



- Die stabile Materie in unserem Universum besteht aus Elektronen, Up- und Down-Quarks

Größenordnungen in der Physik



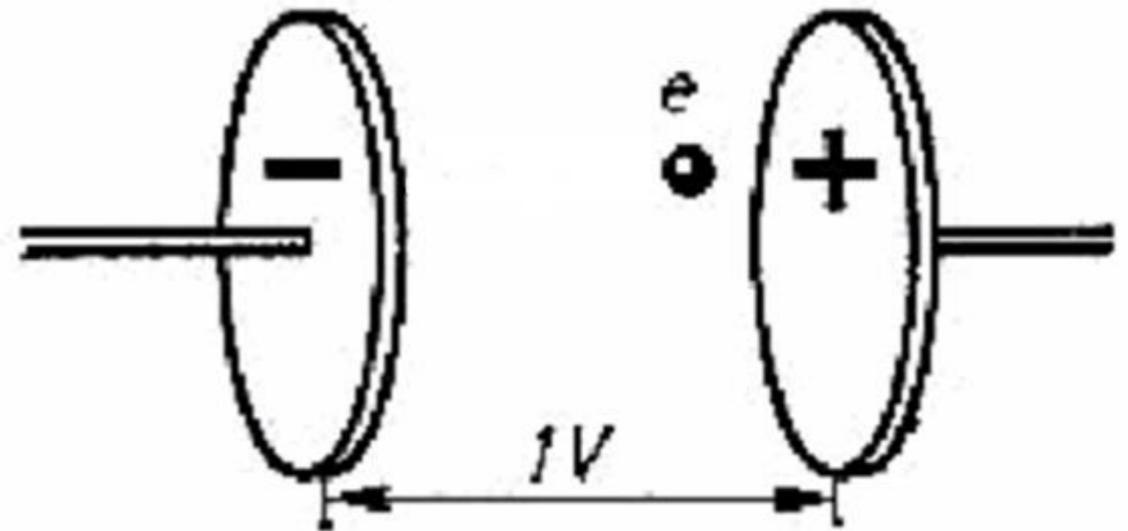
Einheit: Elektronenvolt

- 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchläuft.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$



- Wegen $E=mc^2$ können Massen in eV/c^2 angegeben werden!

(c: Lichtgeschwindigkeit)

- Proton: $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$

Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung Elektrische Ladungszahl Elementarladung

Bsp.: Elektron

$$Q_{\text{Elektron}} = -1 \cdot e$$

Beschränkung auf el. Ladungszahl Z als charakteristische Teilcheneigenschaft

Was ist Physik?



- ▶ Physik versucht die Wirklichkeit / Welt zu beschreiben
- ▶ Am Besten: Möglichst einfach





Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

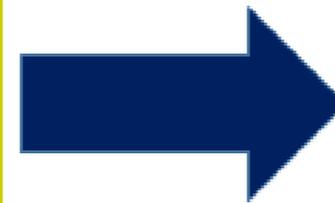
- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung von Raum und Zeit zur *Raumzeit* und Äquivalenz von Masse und Energie ($E = mc^2$) durch A. Einstein

Reduktion

Basiskonzept
Wechselwirkung
= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +
Vernichtung

- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

Hangabtriebskraft,
Wasserkraft,
Gasdruck,
Radiowellen,
Luftreibung,
Radioaktiver Zerfall,
...
...



**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**

Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den **Wechselwirkungen (WW)** zwischen den fundamentalen Bausteinen der Natur.

Gravitation



Elektro-
magnetische
WW

Warum „halten“ die Protonen im Atomkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

Was ist Teilchenphysik?

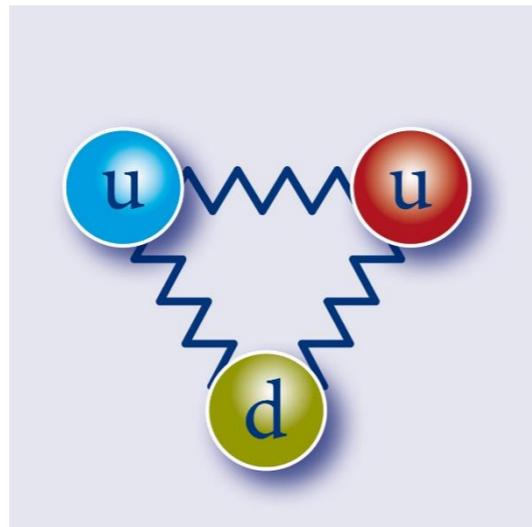
- Lehre von den **Wechselwirkungen (WW)** zwischen den fundamentalen Bausteinen der Natur.

Gravitation



Elektro-
magnetische
WW

Starke WW



Warum scheint die Sonne
seit nunmehr über vier
Milliarden Jahren?
Umwandlung: $p \rightarrow n$

Was ist Teilchenphysik?

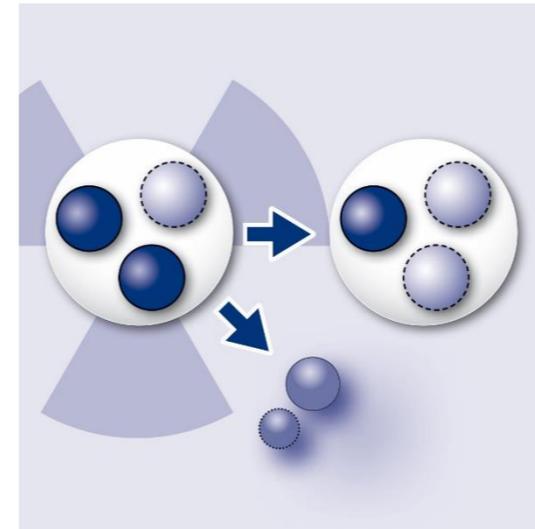
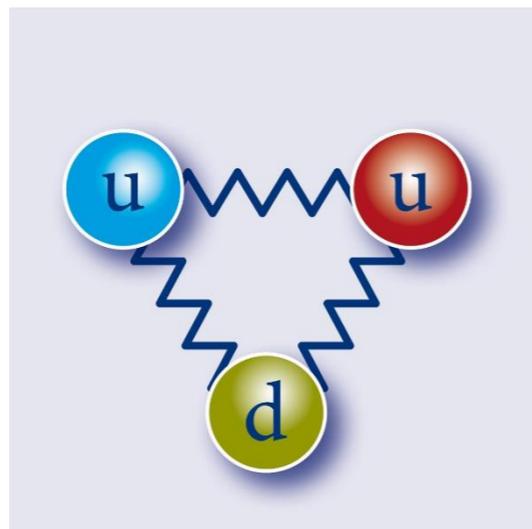
- Lehre von den **Wechselwirkungen (WW)** zwischen den fundamentalen Bausteinen der Natur.

Gravitation



Elektro-
magnetische
WW

Starke WW



Schwache
WW

Wechselwirkungen

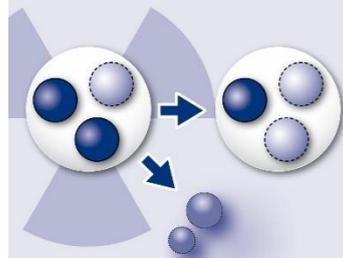
- diese vier fundamentalen Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene



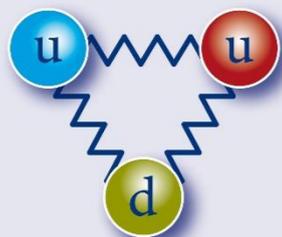
Planetenbewegung



Elektromagnetische Wellen, Zusammenhalt von Atomen, Chemie, Magnetismus



Teilchenumwandlungen (z.B. Beta-Umwandlung, Kernfusion), WW von Neutrinos mit Materie



Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen

Ab jetzt: Vernachlässigung der Gravitation

- Teilchenphysik --> sehr kleine Abstände
- dort Gravitation **sehr viel** schwächer als die anderen drei fundamentalen WW



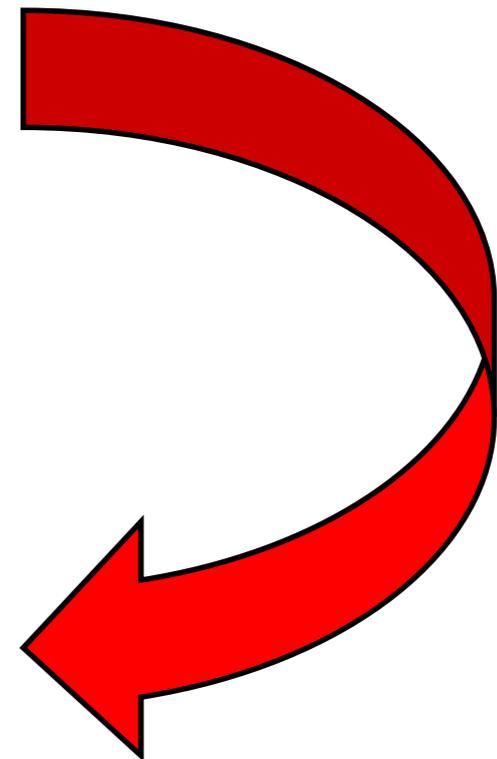
Die Gravitation ist nicht Teil des Standardmodells der Teilchenphysik!

Die fundamentalen WWn lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!

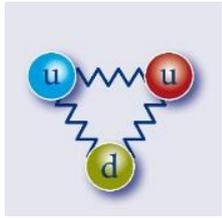
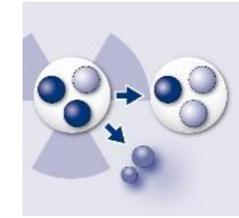
- Coulombsches Gesetz:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

Elektrische Ladungszahl ist wesentliche Einflussgröße in der elektromagnetischen WW und auf die durch diese WW hervorgerufenen Kräfte

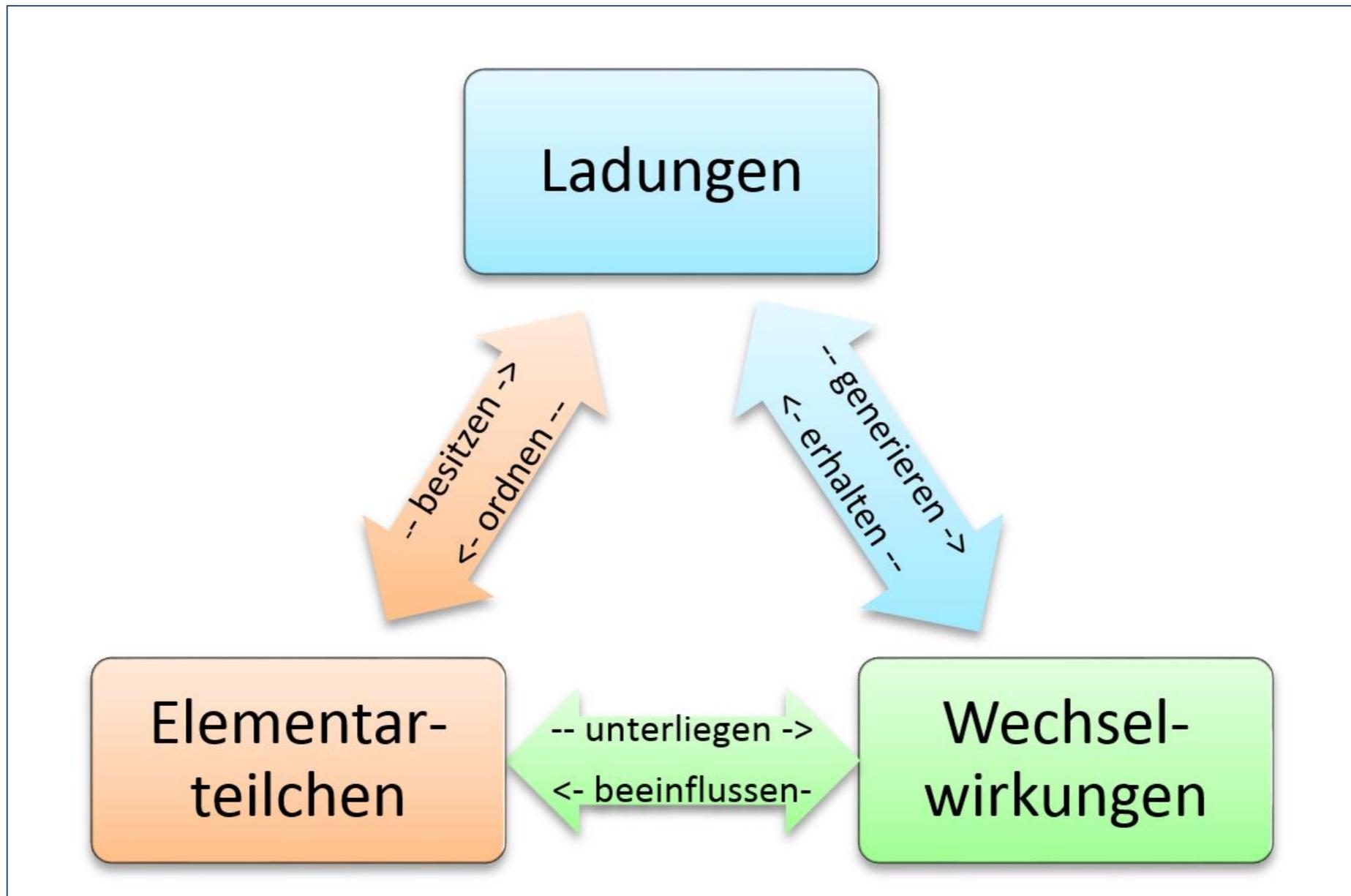


Erweiterung des Ladungsbegriffs



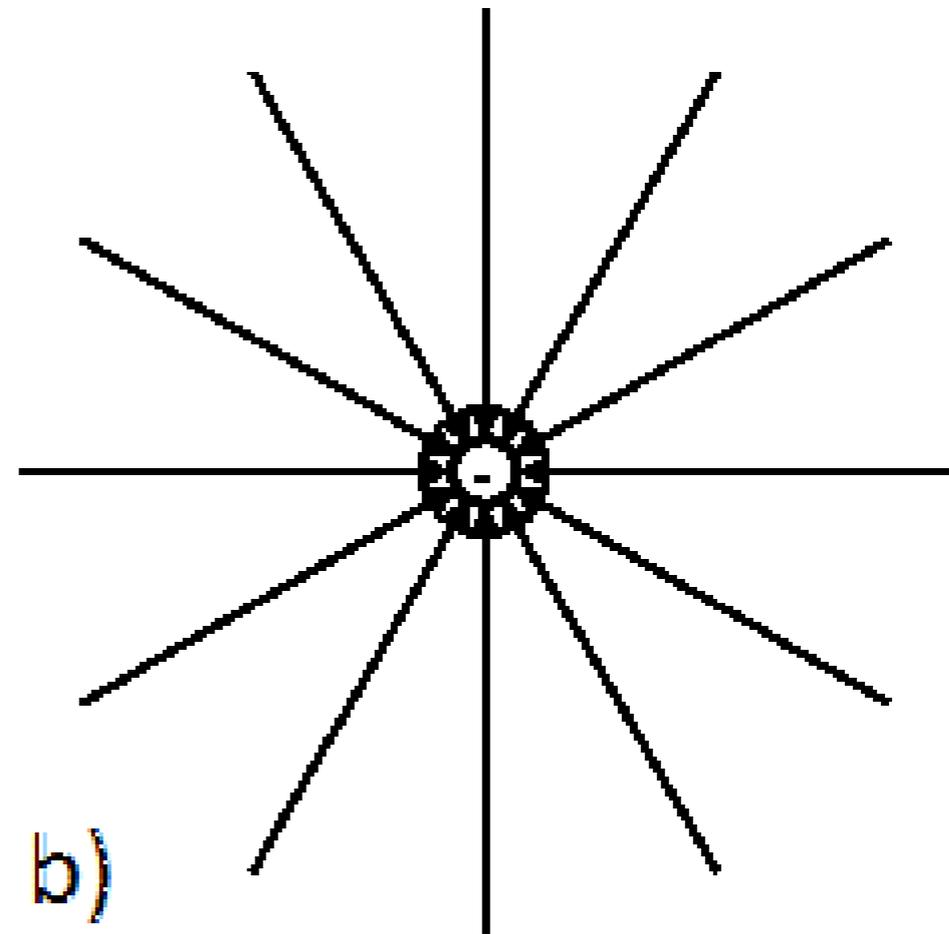
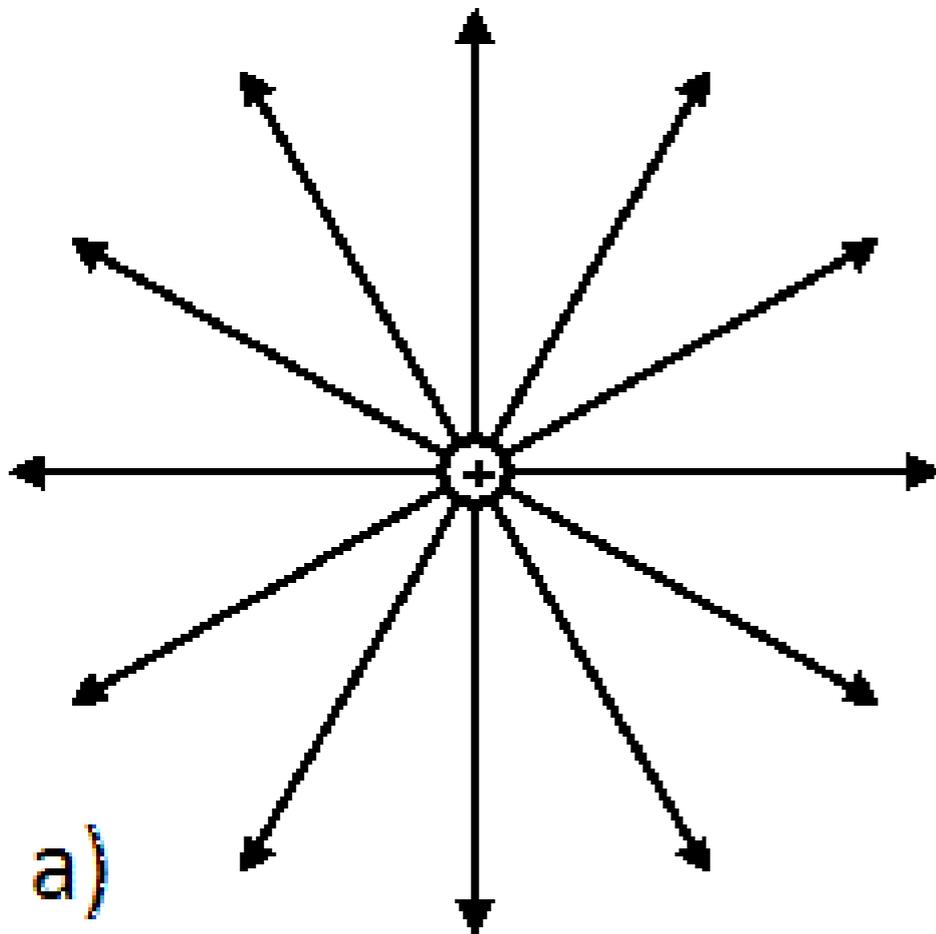
- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Bekannt:
 - Elektrische Ladung (Ladungszahl Z)
- ▶ Neu:
 - Schwache Ladung (Ladungszahl I)
 - Starke (Farb-)Ladung --> Rot, Grün, Blau
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ An den fundamentalen WW nehmen nur Teilchen teil, die die Ladung der entsprechenden WW besitzen
- ▶ Ladungen sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**

Die drei Grundpfeiler des Standardmodells



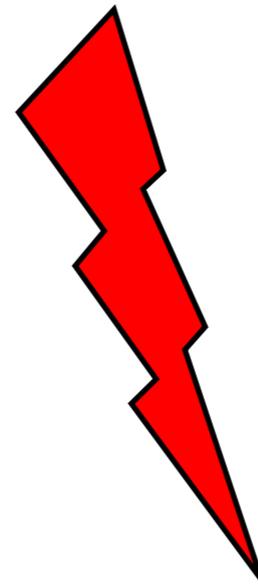
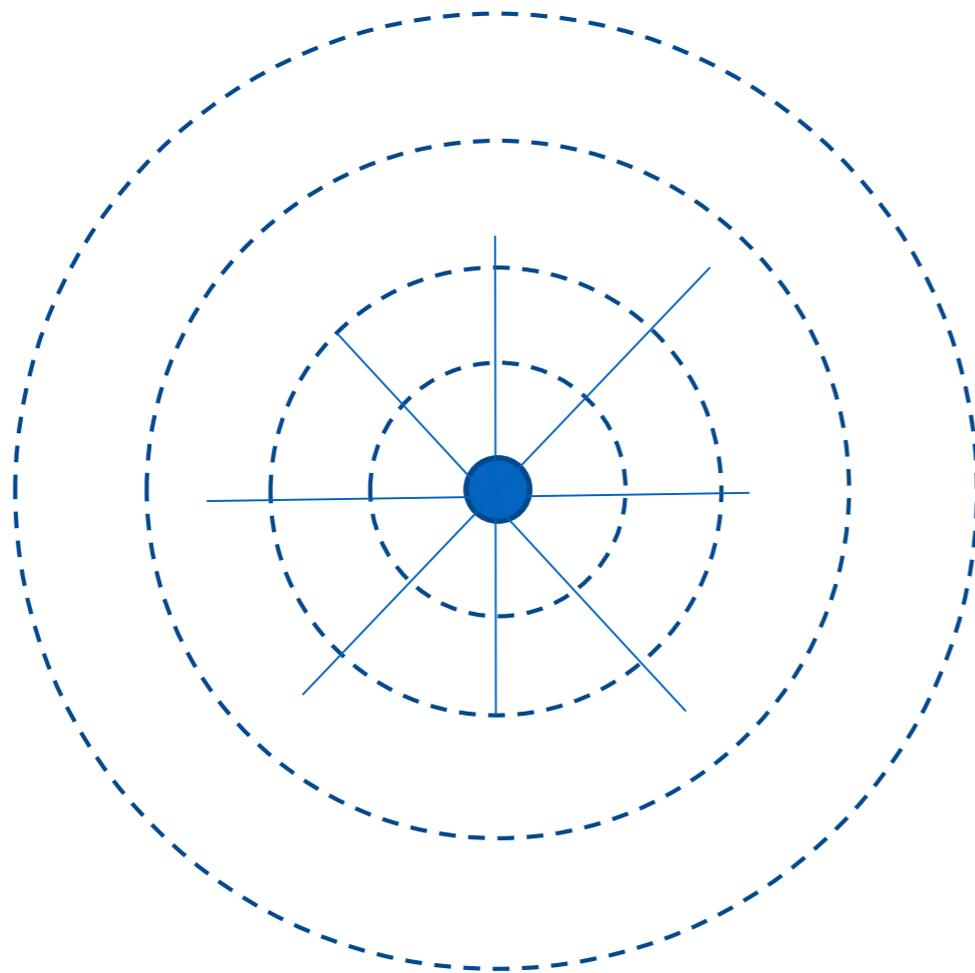
Reichweiten der fundamentalen WWn

- ▶ Nur 2 der 4 fundamentalen WWn besitzen eine unendliche Reichweite:
 - Gravitation und elektromagnetische WW

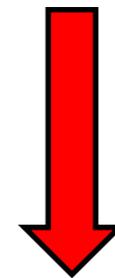


Reichweiten der fundamentalen WWn

- ▶ Reichweite der starken und der schwachen WW ist auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

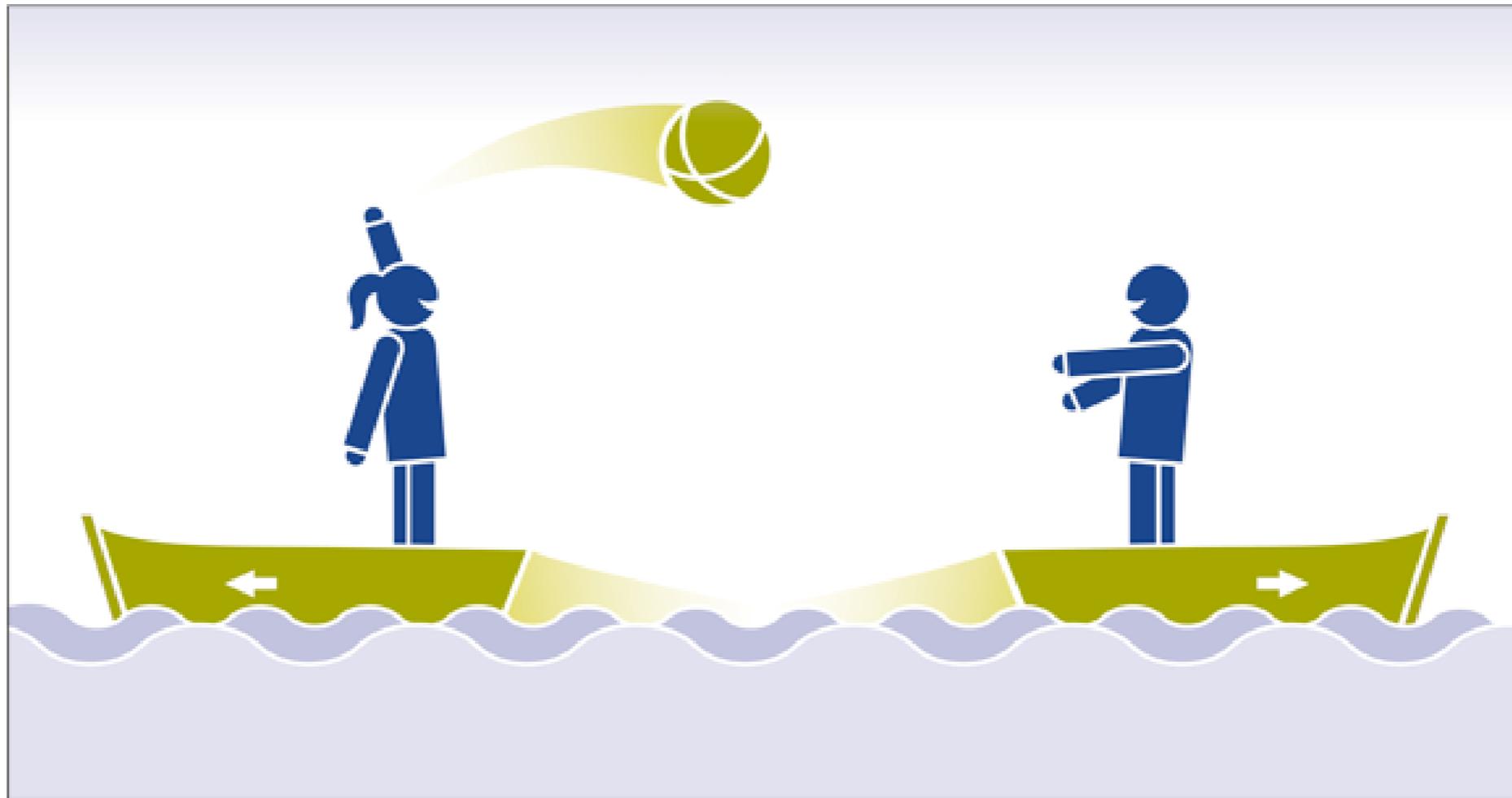


Widerspruch zum
Feldlinienmodell



Neues Modell
notwendig!

Botenteilchen als Vermittler der Wechselwirkungen



- ▶ Die elementaren Materieteilchen “kommunizieren” miteinander, indem sie **Botenteilchen** aussenden bzw. einfangen.

Die Botenteilchen der schwachen WW

► W- und Z-Teilchen

The symbol W^- is centered within a light green trapezoidal shape that is wider at the top and tapers towards the bottom.The symbol W^+ is centered within a light green trapezoidal shape that is wider at the bottom and tapers towards the top.The symbol Z^0 is centered within a light green square.

- besitzen sehr große Massen ($m_W \approx 85 \cdot m_{\text{Proton}}$)
- aus Quantenmechanik folgt --> haben geringe Reichweite

Die Botenteilchen der elektromagnetischen WW

► Photonen („Lichtteilchen“)



- besitzen keine Masse ($m_\gamma = 0$)
- besitzen unendliche Reichweite

Die Botenteilchen der starken WW

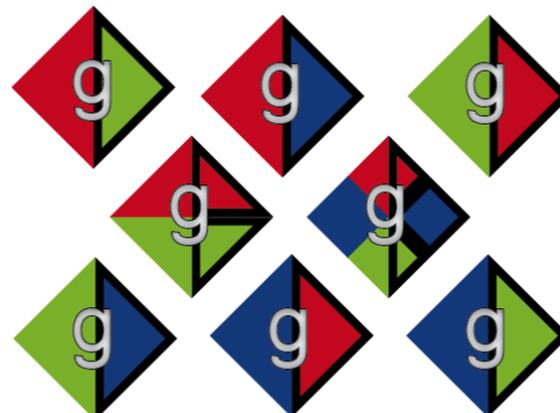
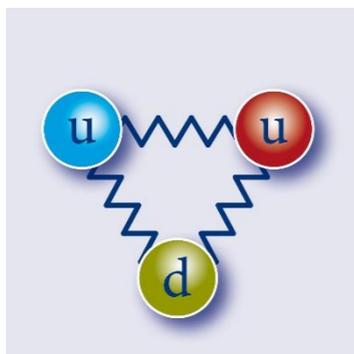
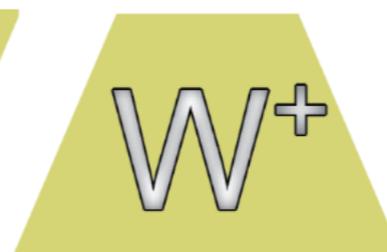
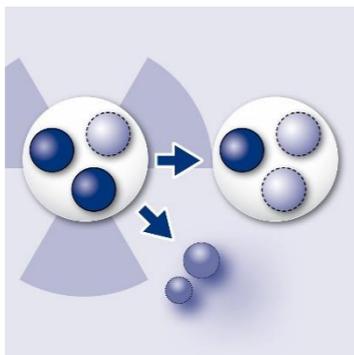
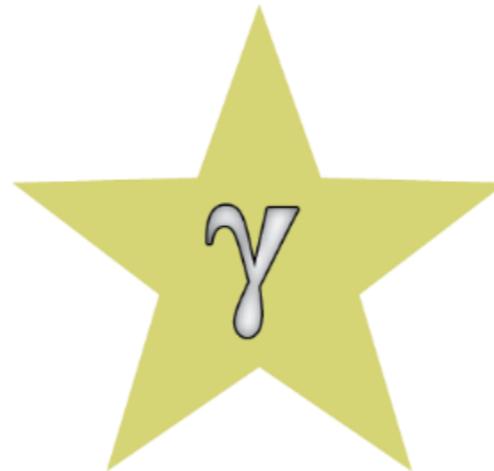
- ▶ Gluonen (engl.: glue=Kleber)



- besitzen keine Masse ($m_{\text{gluon}} = 0$)
- **Aber:** besitzen selbst starke Ladung(en)
 - > können selbst miteinander wechselwirken
 - > starke WW hat begrenzte Reichweite

Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt





Zusammenfassung: Wechselwirkungen

- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
 - (Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke WW)
- ▶ Nur 2 WWn besitzen eine unendliche Reichweite, während die beiden anderen auf subnukleare Abstände beschränkt sind
- ▶ 3 dieser WWn werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben **und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
- ▶ Die Wechselwirkungen des Standardmodells werden **durch Ladungen hervorgerufen**

Diskussion / Fragen

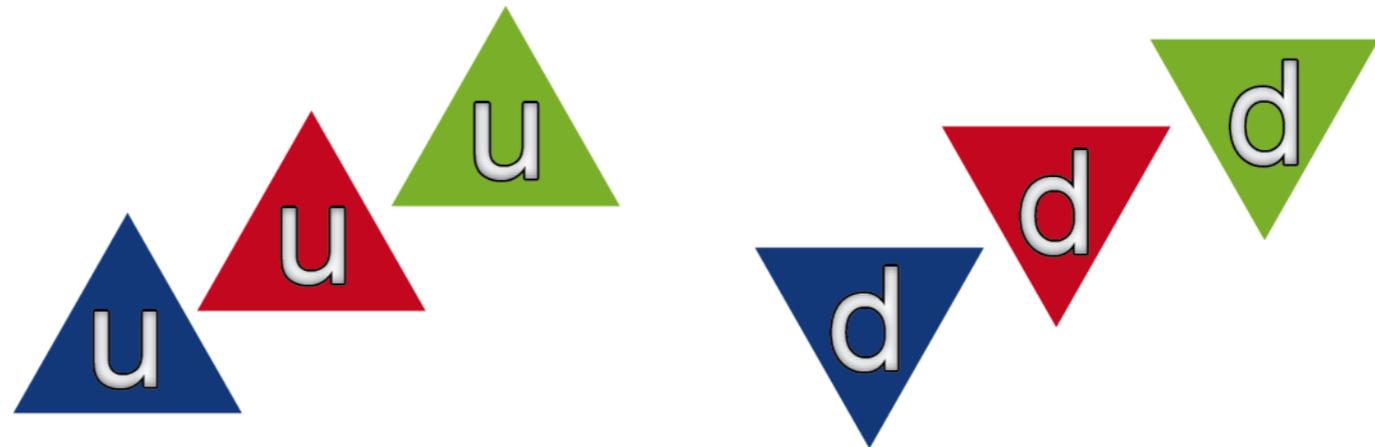


Die Materieteilchen des Standardmodells

▶ Elektron



▶ Quarks

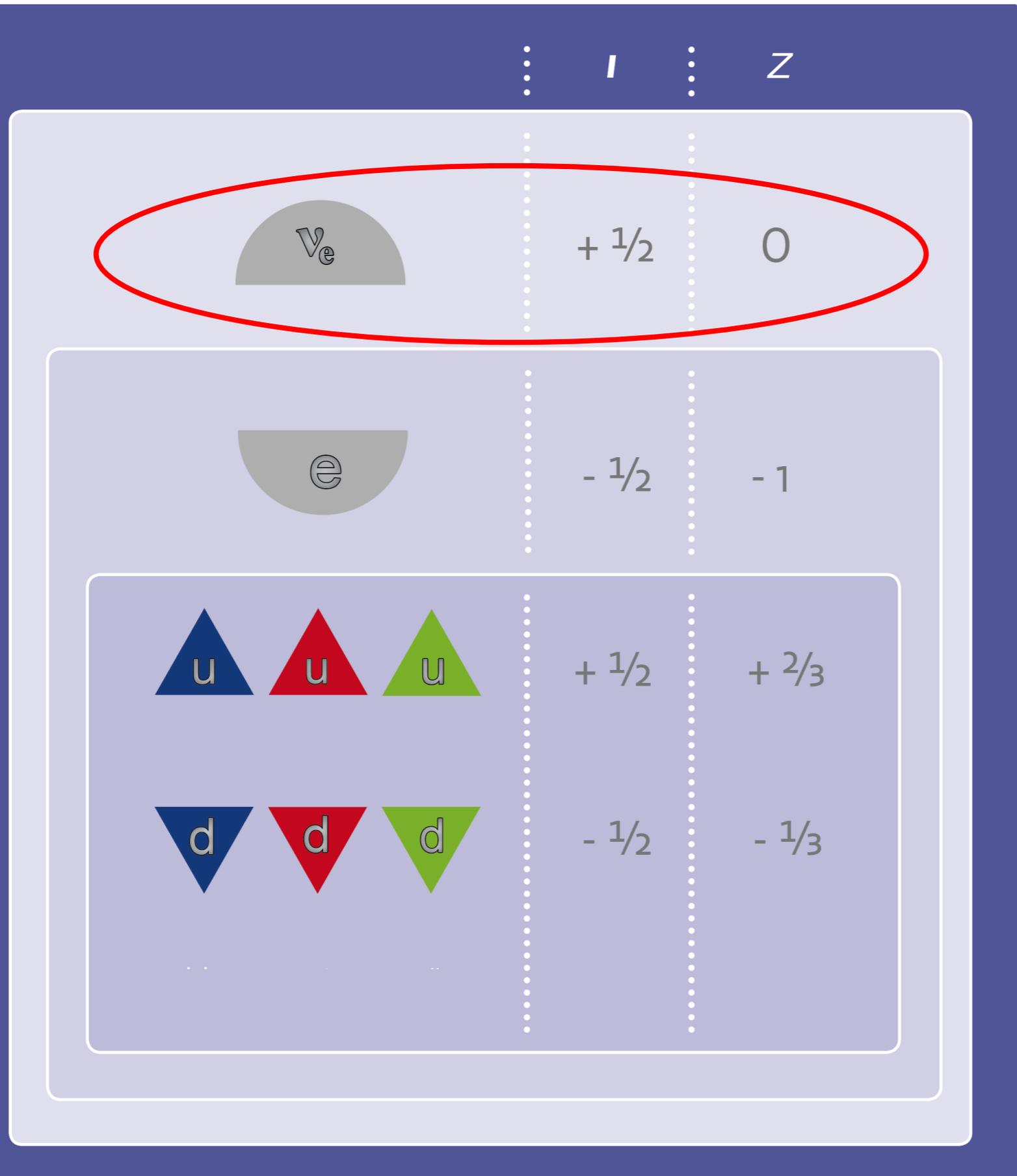


▶ Elektron-Neutrino



	I	Z
ν_e	$+ \frac{1}{2}$	0
e	$- \frac{1}{2}$	-1
u u u	$+ \frac{1}{2}$	$+ \frac{2}{3}$
d d d	$- \frac{1}{2}$	$- \frac{1}{3}$
...		

Alle Materieteilchen besitzen schwache Ladung
 --> unterliegen der schwachen WW



Neutrinos besitzen nur schwache Ladung

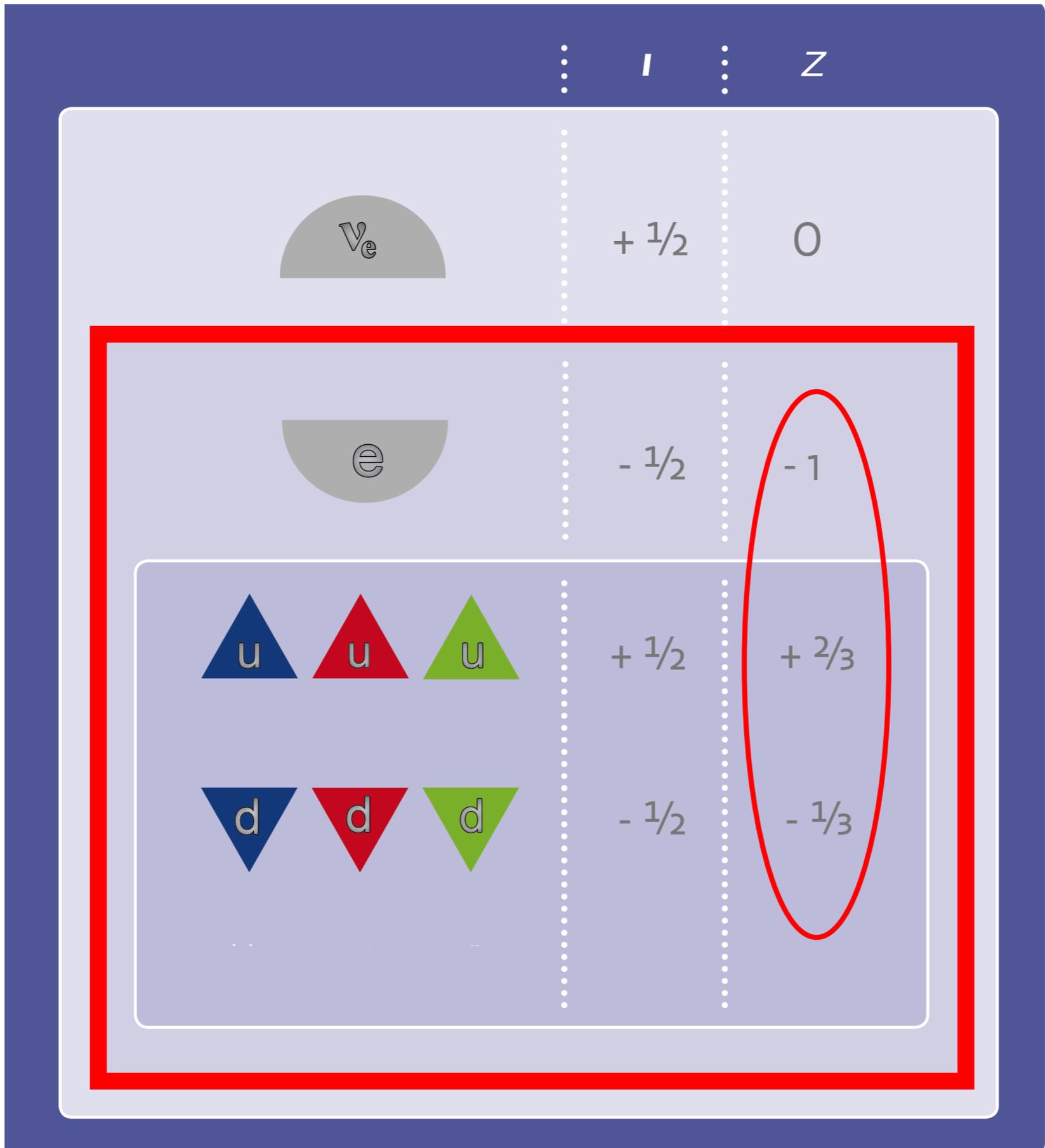
--> unterliegen nur der schwachen WW

--> wechselwirken sehr selten mit Materie

	I	Z
ν_e	$+ \frac{1}{2}$	0
e	$- \frac{1}{2}$	-1
u u u	$+ \frac{1}{2}$	$+ \frac{2}{3}$
d d d	$- \frac{1}{2}$	$- \frac{1}{3}$

Neutrinos besitzen nur schwache Ladung

Nur etwa eins von 1 000 000 000 Neutrinos aus der Sonne wechselwirkt mit einem Teilchen der Erde



Elektronen und Quarks besitzen elektrische Ladung
 --> unterliegen der elektromagnetischen WW

	I	Z
ν_e	$+ \frac{1}{2}$	0
e	$- \frac{1}{2}$	-1
u u u	$+ \frac{1}{2}$	$+ \frac{2}{3}$
d d d	$- \frac{1}{2}$	$- \frac{1}{3}$

Quarks besitzen gebrochenzahlige elektrische Ladungszahlen --> Begriff „Elementarladung“ eigentlich veraltet

	I	Z
ν_e	$+ \frac{1}{2}$	0
e	$- \frac{1}{2}$	-1
u u u	$+ \frac{1}{2}$	$+ \frac{2}{3}$
d d d	$- \frac{1}{2}$	$- \frac{1}{3}$

Nur Quarks
besitzen starke
Farbladung
--> unterliegen
starker WW

	I	Z
ν_e	$+ \frac{1}{2}$	0
e	$- \frac{1}{2}$	-1
u u u	$+ \frac{1}{2}$	$+ \frac{2}{3}$
d d d	$- \frac{1}{2}$	$- \frac{1}{3}$

Quarks treten niemals einzeln auf, sondern nur in gebundenen Systemen, sogenannten **Hadronen** (z.B. Protonen und Neutronen)

Diese Tatsache wird als **Confinement** (Eingesperrtheit) bezeichnet



Ordnung der Materieteilchen

- ▶ Uns umgebende Materie besteht aus Up- und Down-Quarks, Elektronen
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons
 - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron
 - 200 Mal schwerer als das Elektron (Schwere „Kopie“ des Elektrons)
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons



Ordnung der Materieteilchen

- ▶ Entdeckung weiterer elementarer Materieteilchen
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
 - Von jedem der „leichten“ Materieteilchen (u, d, e^-, ν_e) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.



Leptonen

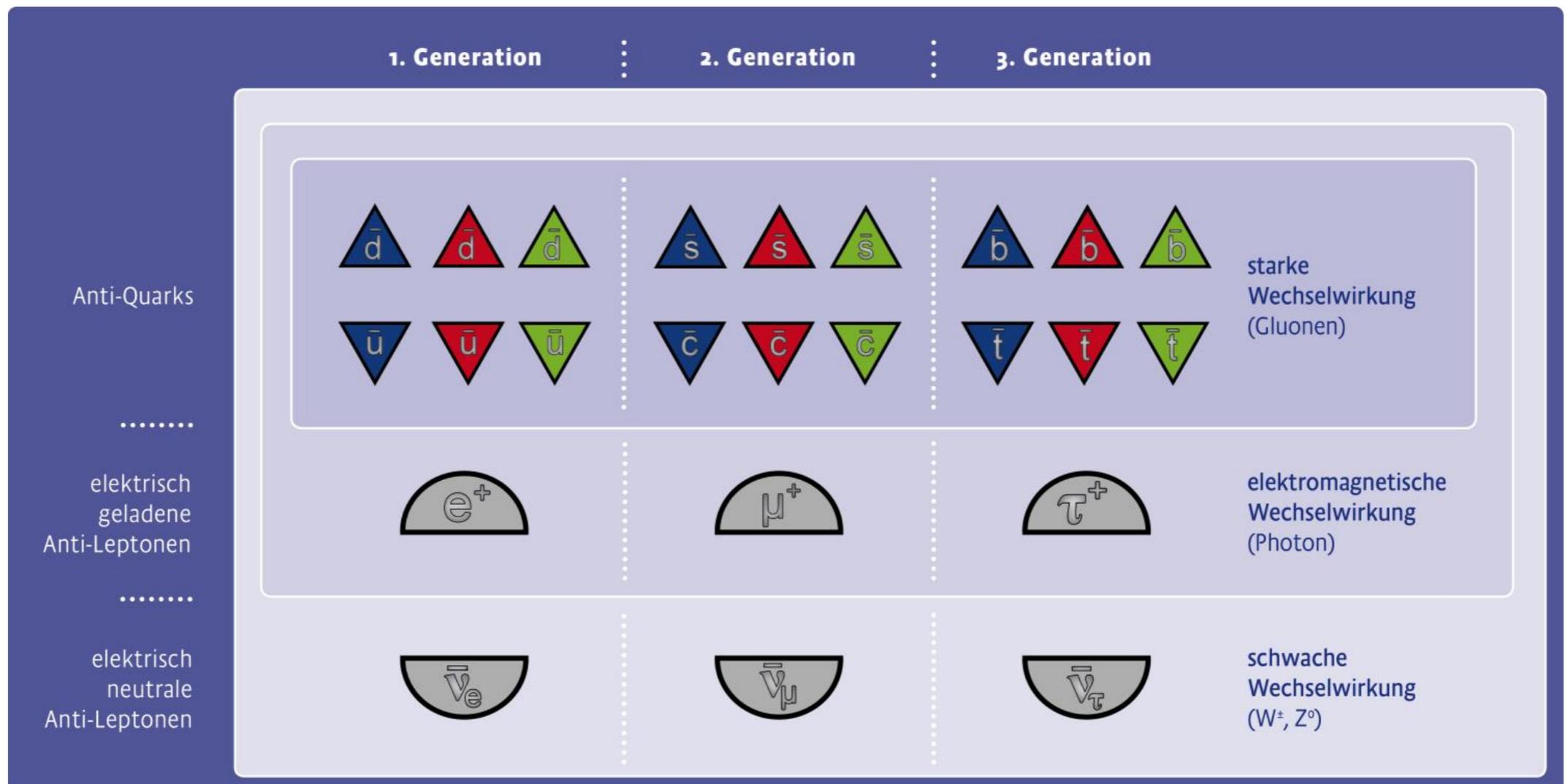


Leptonen

Quarks

Anti-Materieteilchen

- ▶ zu jedem Materieteilchen existiert ein zugeordnetes Anti-Materieteilchen mit gleicher Masse
- ▶ Das zugeordnete Anti-Materieteilchen besitzt genau die entgegengesetzten (mit -1 multiplizierten) Ladungen



Feynman-Diagramme

- Orts-Zeit-Diagramme
- Veranschaulichen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen.
- Jedes Teilchen wird durch eine Linienart dargestellt:



Materieteilchen



Anti-Materieteilchen



W- oder Z-Teilchen,
Photon



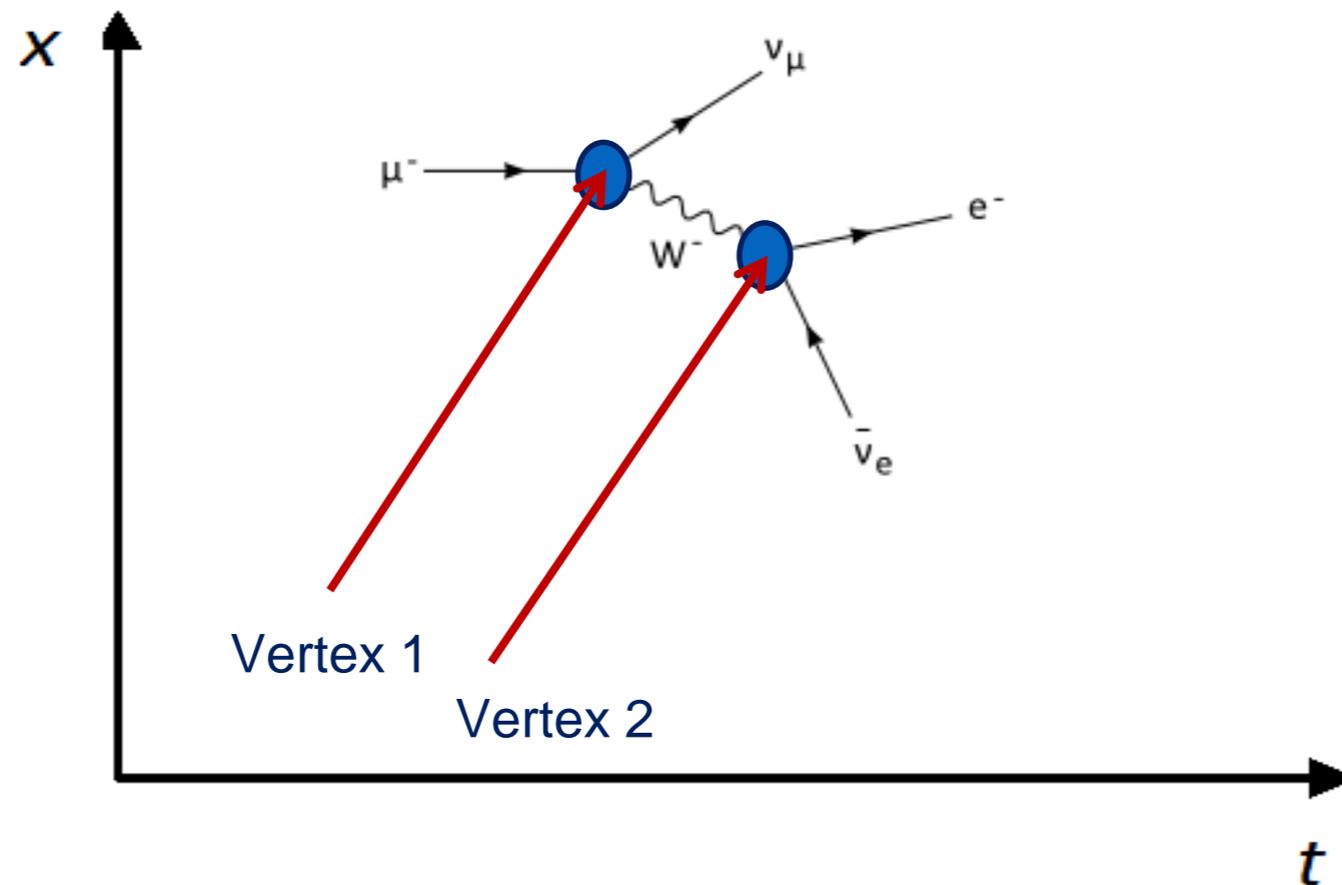
Gluon



Feynman-Diagramme

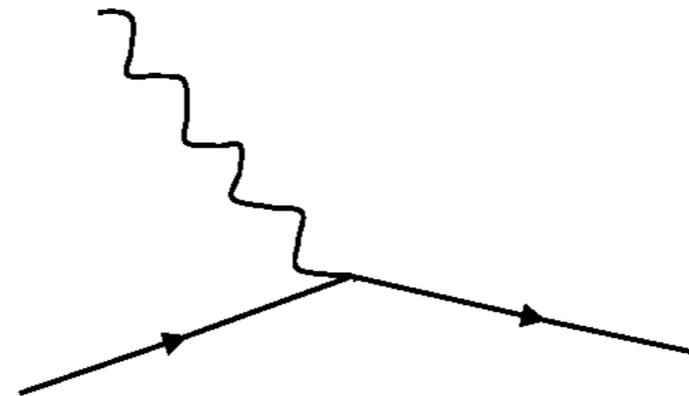
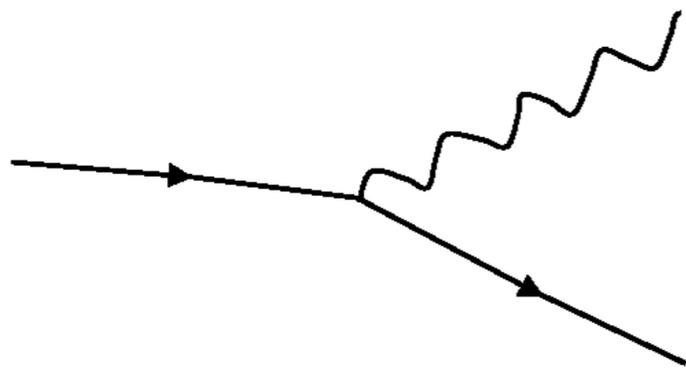
► Begriffsklärung:

- Vertex / Vertices (plural)
- Wechselwirkung wird dadurch dargestellt, dass sich die Teilchenlinien



Grundbausteine der Feynman-Diagramme

► Abstrahlung und **Einfang** eines Botenteilchens



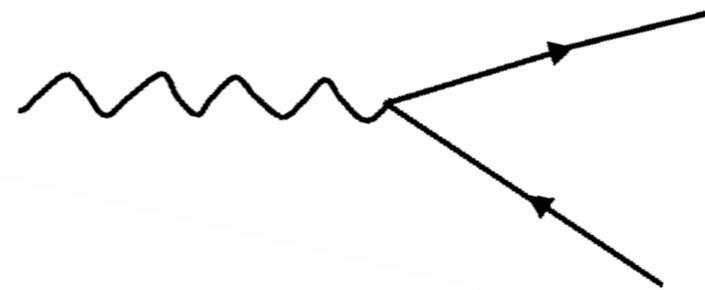
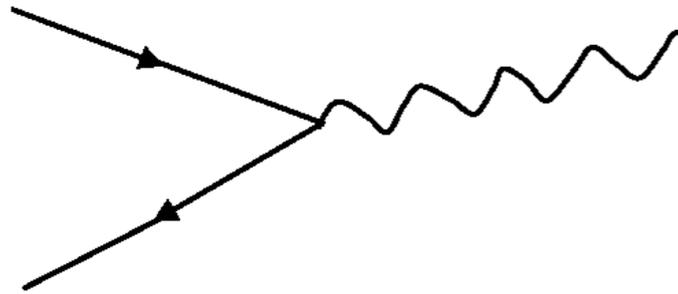
t



t

Grundbausteine der Feynman-Diagramme

► Paarvernichtung und Paarerzeugung



t

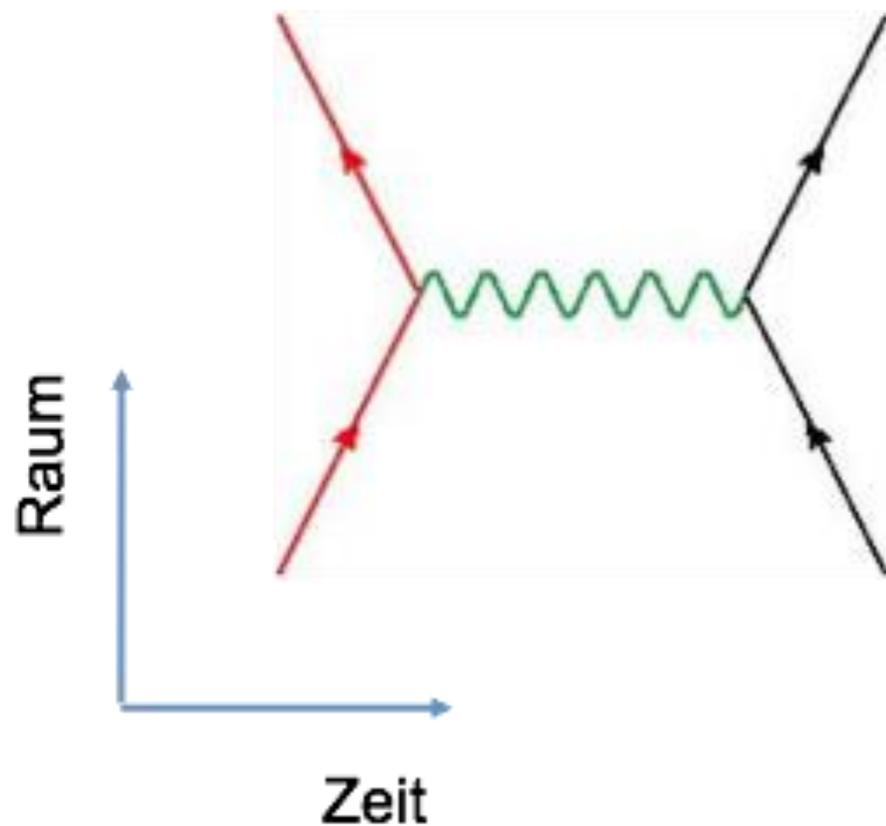


t

Feynman-Diagramme

... zeigen:

- welche Teilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- wie sie wechselwirken
- welche Teilchen danach vorhanden sind

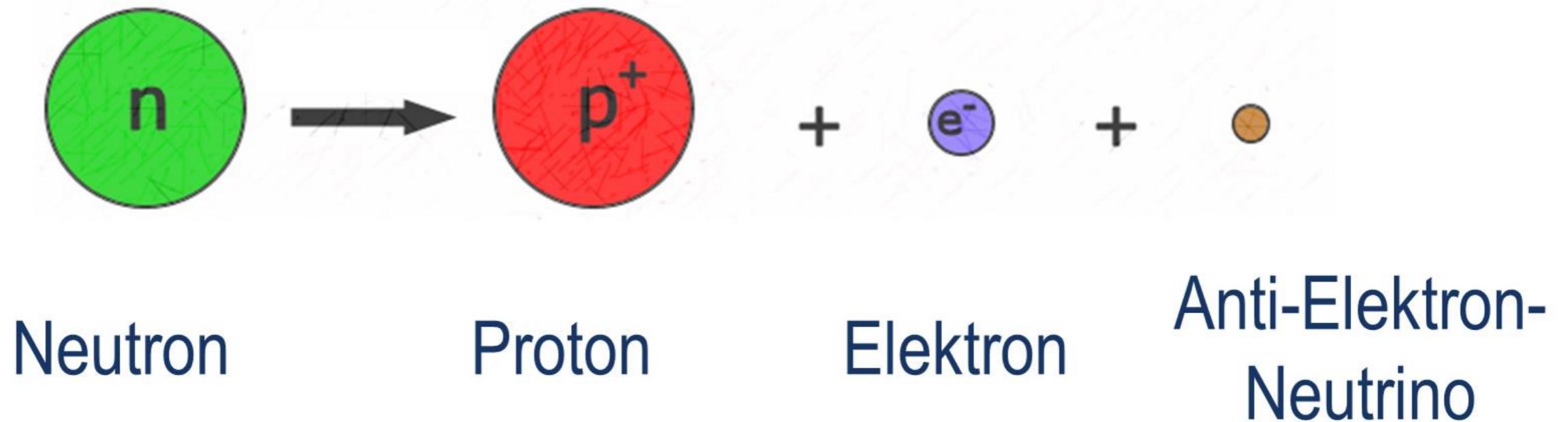


Ein Teilchen und ein Anti-Teilchen treffen aufeinander...

Sie „vernichten“ sich unter Entstehung eines Botenteilchens, z.B. eines Photons.
(Paarvernichtung)

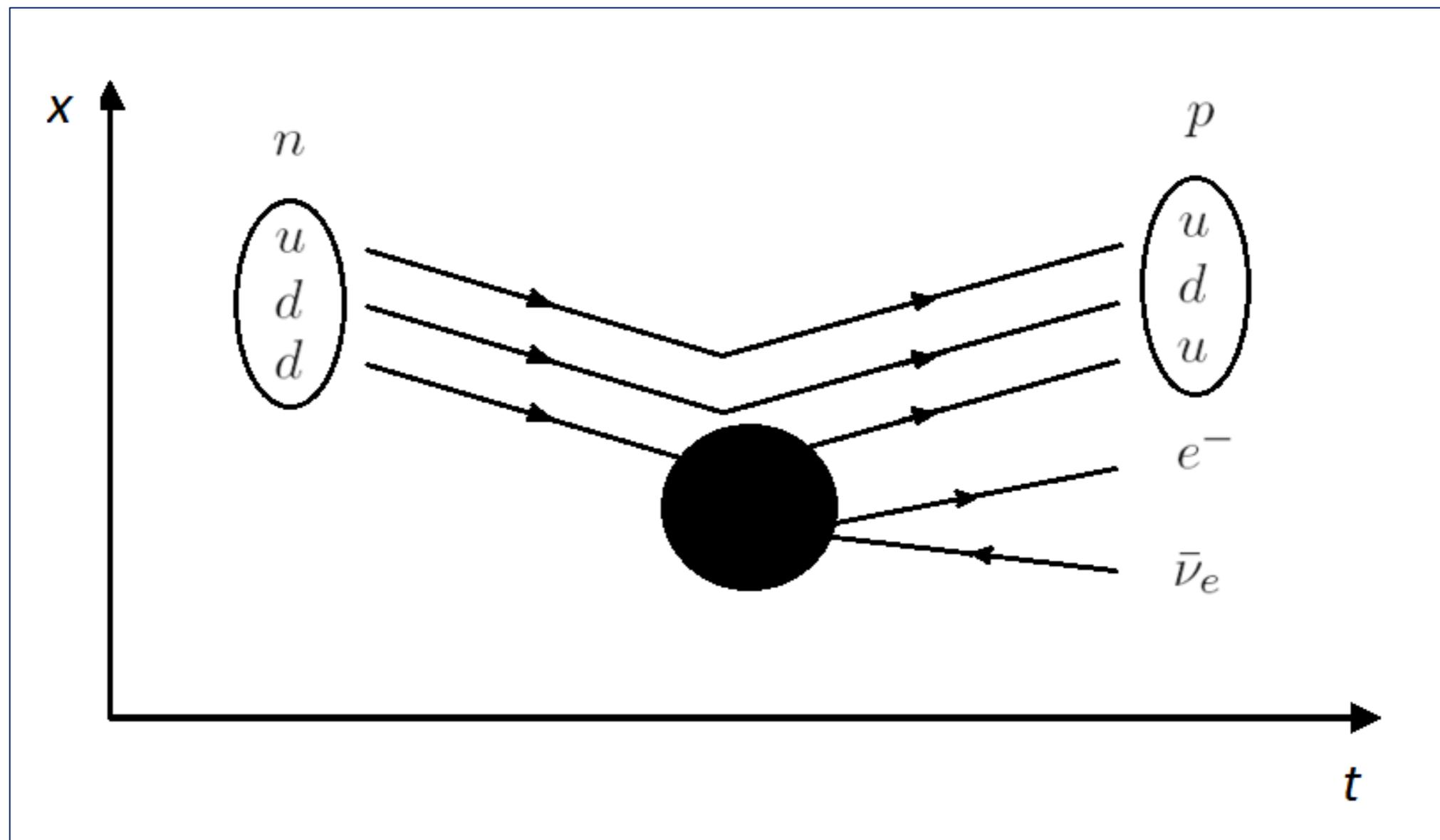
Aus dem Botenteilchen entstehen ein Teilchen und ein Anti-Teilchen. (Paarerzeugung)

Beispiel: β^- -Umwandlung



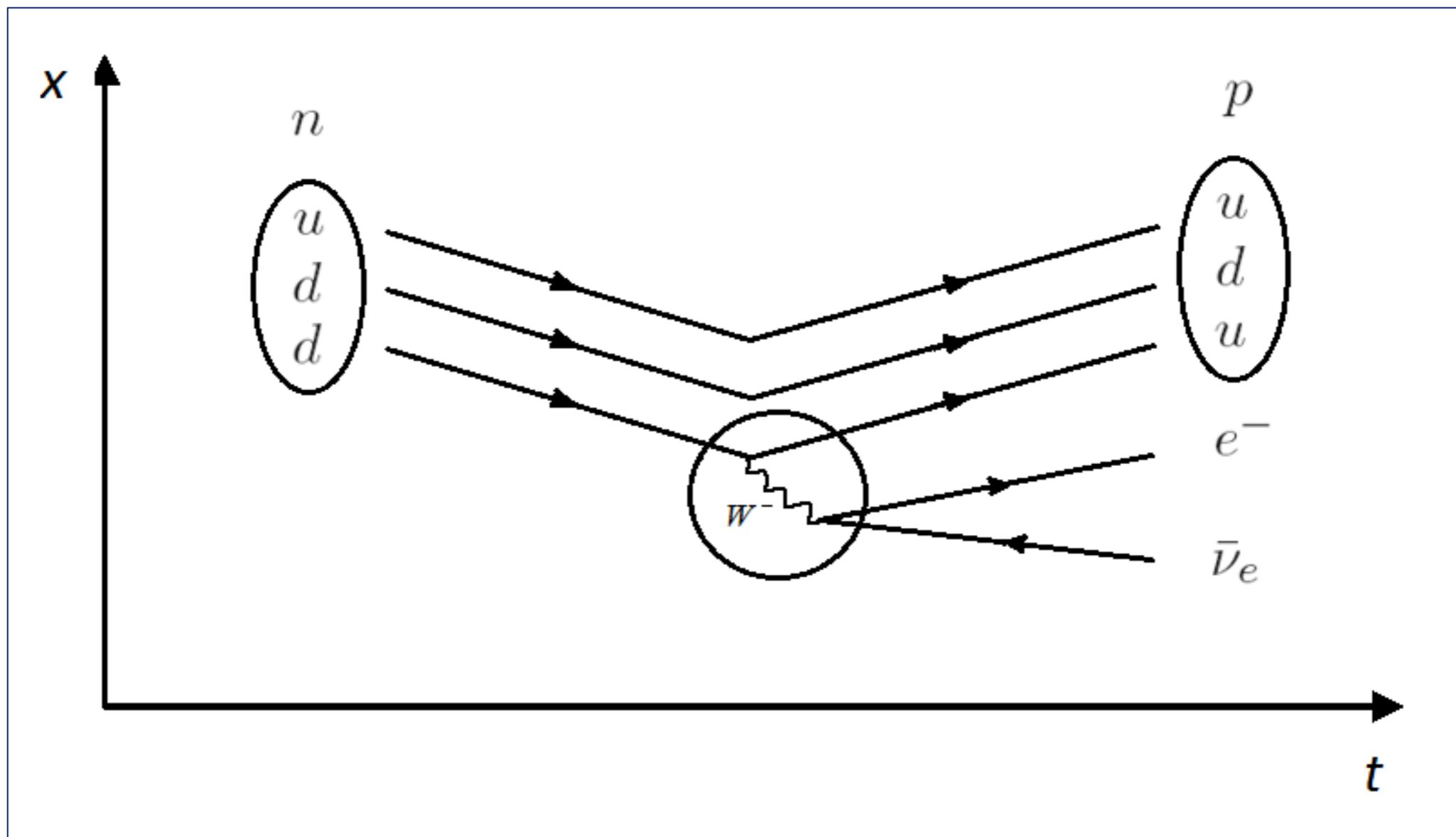
Die β^- -Umwandlung aus Physikersicht

- Im Neutron wandelt sich ein Down-Quark in ein Up-Quark um!



Die β^- -Umwandlung aus Physikersicht

- Im Neutron wandelt sich ein Down-Quark in ein Up-Quark um!



Warum braucht man das Higgs-Teilchen?

- Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- fehlendes Puzzle-Teil → Higgs-Teilchen



$$m_{\text{Higgs}} \approx 125 \text{ GeV}/c^2 \approx 134 \cdot m_{\text{Proton}}$$

Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- Teilchenbeschleuniger --> Erzeugung massereicher Teilchen
- $E = mc^2$ --> Masse ist eine Form von Energie!
- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Beispiel:

- Teilchenkollisionen!
(Bewegungsenergie \rightarrow Masse)

Teil 3: Suche nach dem Higgs-Teilchen

Alle Zutaten, um selbst als Forscher
tätig zu werden!



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT

Die Hauptdarsteller heute: W-Teilchen

- Mit ihrer Hilfe werdet ihr den Aufbau von Protonen erforschen...
- ...und erfahren, wie Physiker nach dem Higgs-Teilchen suchen.

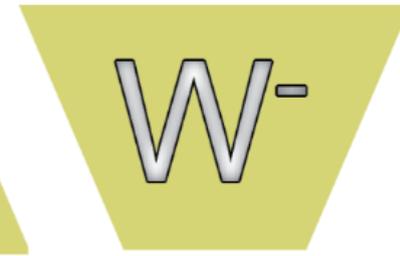
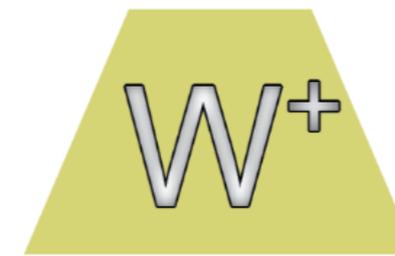
A stylized white 'W' with a minus sign, set against a light green trapezoidal background that is wider at the top and tapers towards the bottom.

W^-

A stylized white 'W' with a plus sign, set against a light green trapezoidal background that is wider at the bottom and tapers towards the top.

W^+

W-Teilchen...

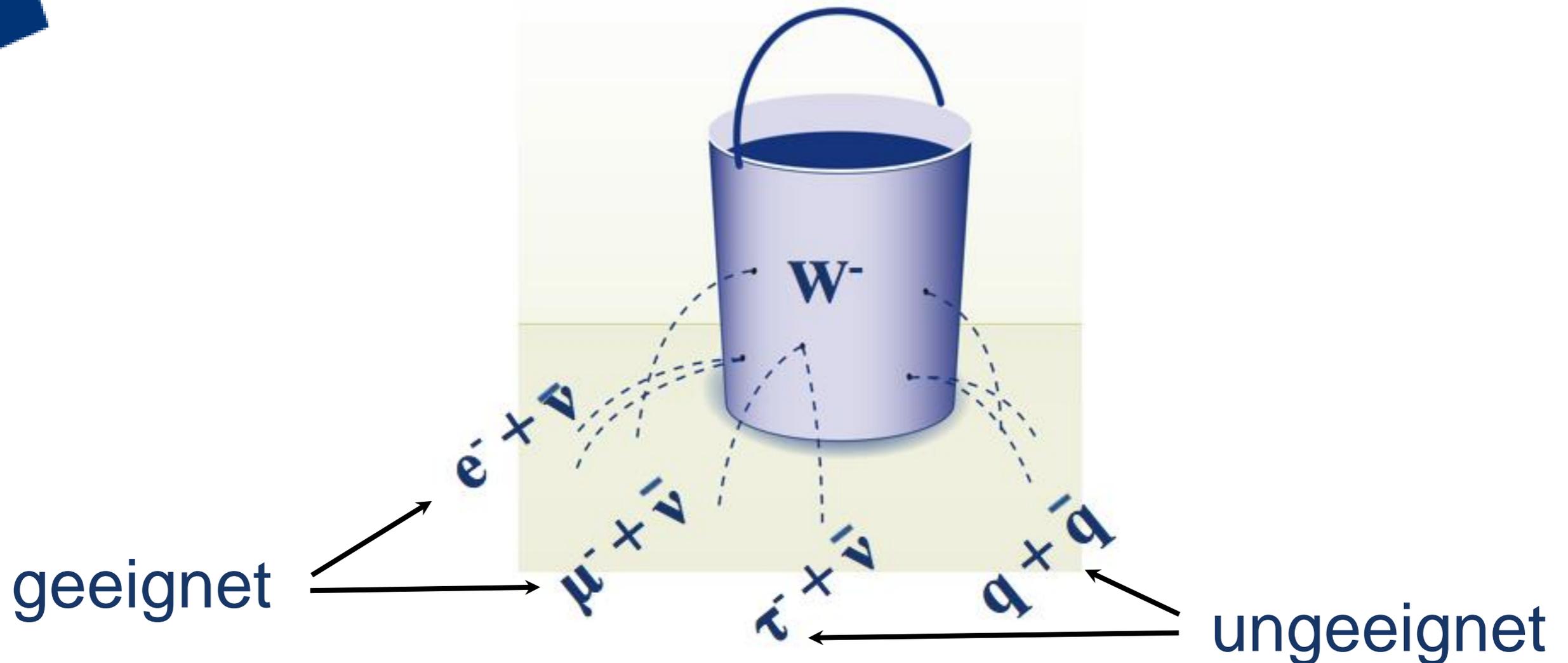


- sind Botenteilchen der schwachen WW
- sind elektrisch geladen: W^+ , W^-
- gehören zu den massereichsten Teilchen die wir kennen ($80,4 \text{ GeV}/c^2$!)
- wandeln sich nach ca. 10^{-25} s in leichtere Teilchen um (kurze Reichweite)

Daher können wir sie nicht direkt im Detektor beobachten, sondern erkennen sie anhand ihrer Umwandlungsprodukte!

Wie findet man W-Teilchen?

- man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



Wie findet man W-Teilchen?

- Ihr sucht heute nach folgenden Umwandlungsprodukten:

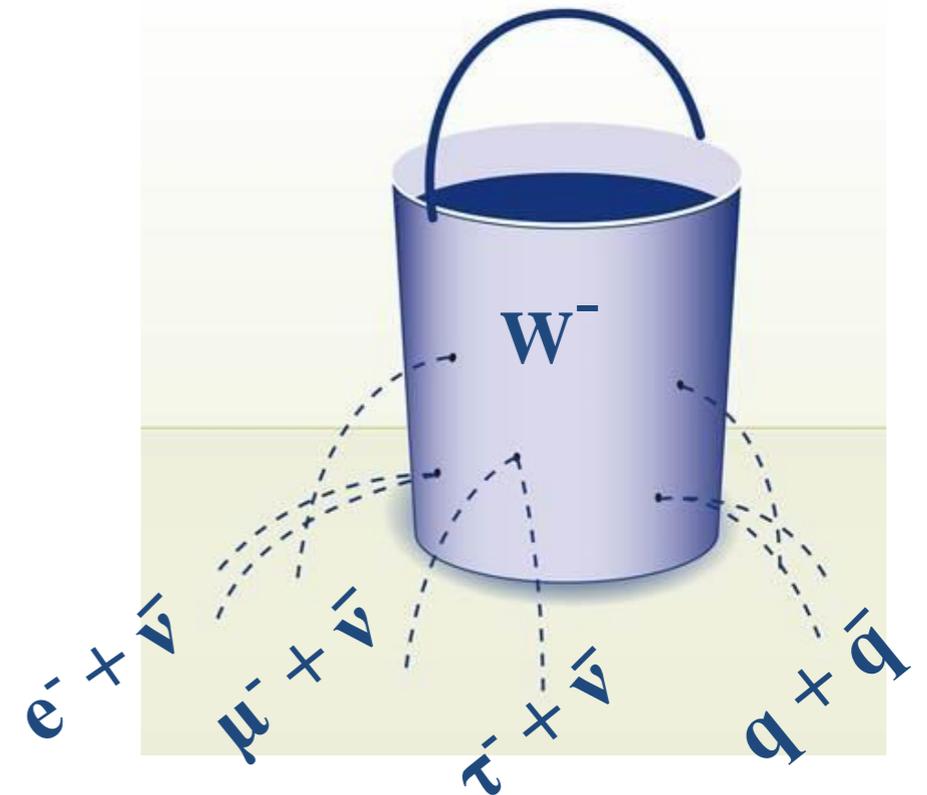
$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$$

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

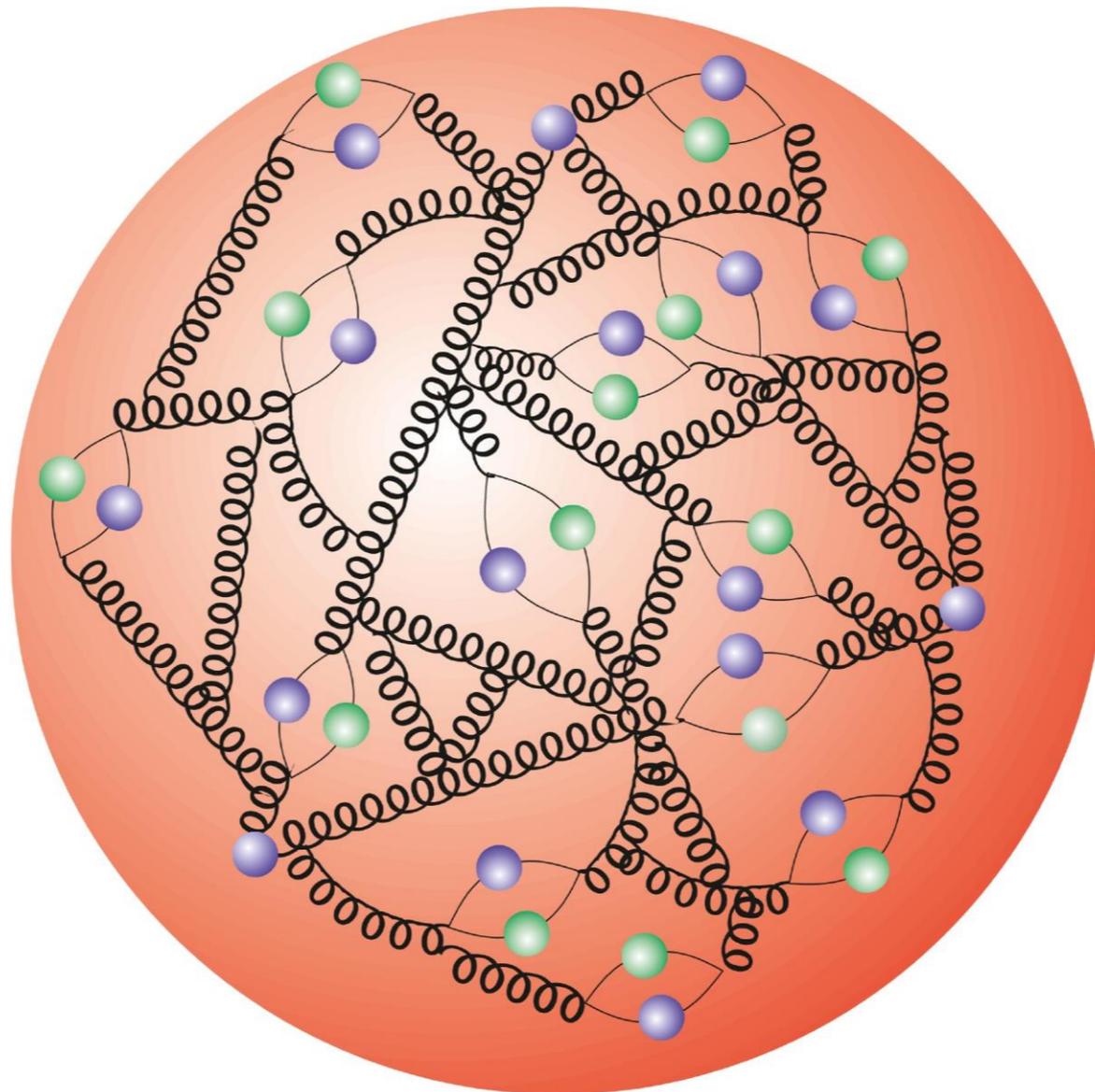
$$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

- Das sind Signalereignisse. Alle anderen Ergebnisse von Kollisionen sind "Untergrund".



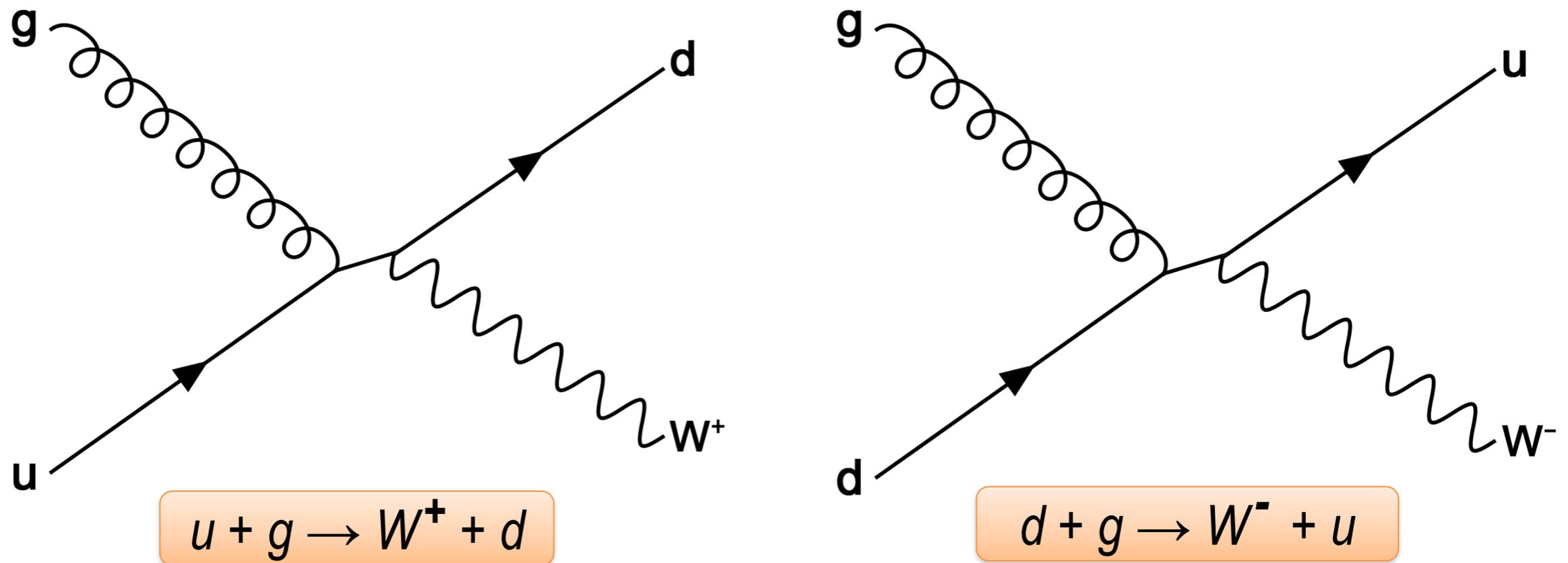
Wie entstehen W-Teilchen?

- Proton besteht aus:
 - 3 permanenten Quarks (up-up-down)
 - Gluonen und Quark-Antiquark-Paaren



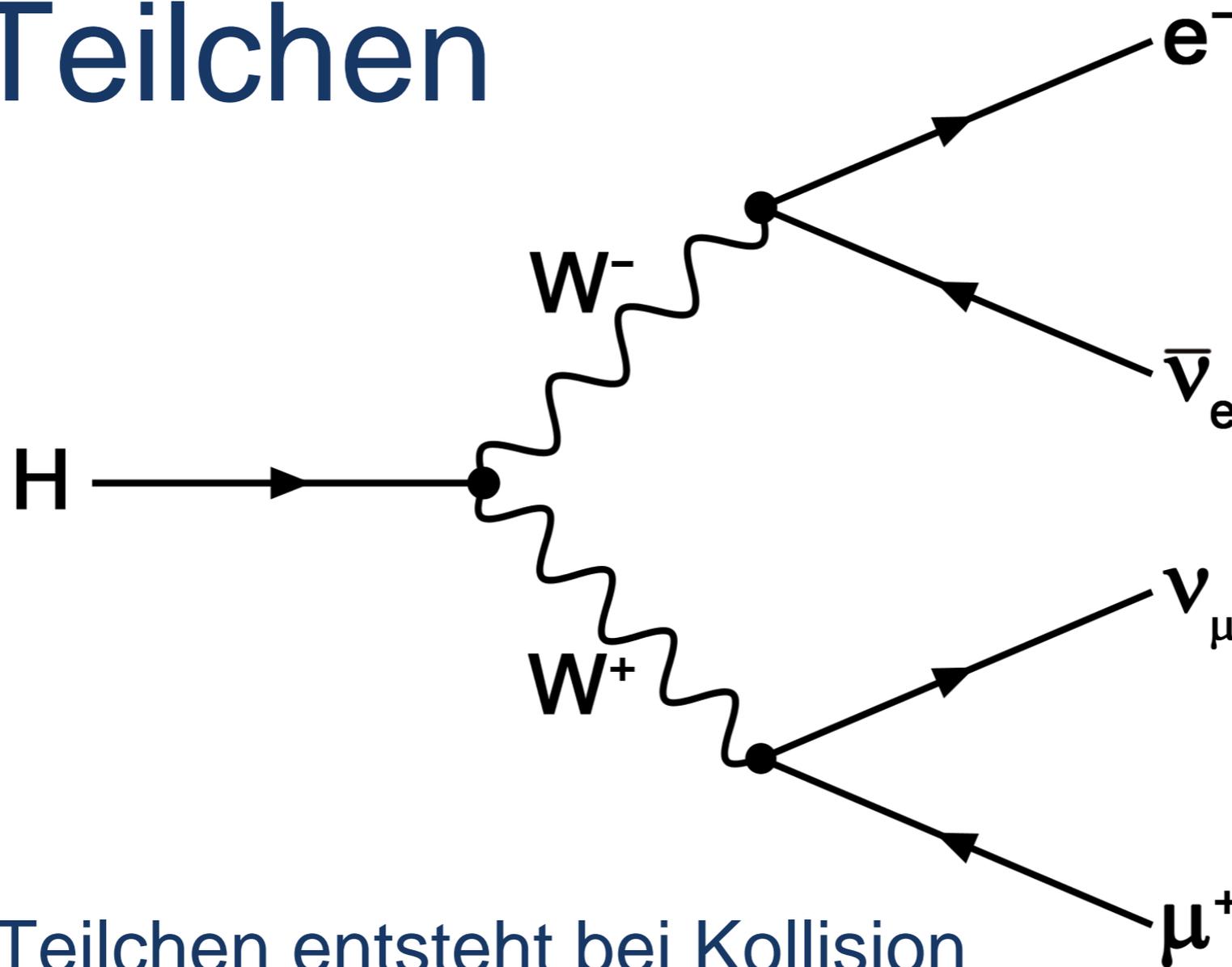
Wie entstehen W-Teilchen?

- Zusammenstoß von Protonen im LHC:



1. Messaufgabe: In welchem Verhältnis entstehen W⁺- und W⁻-Teilchen im LHC?

Die Suche nach dem Higgs-Teilchen



- Higgs-Teilchen entsteht bei Kollision
- Umwandlung des Higgs-Teilchens in 2 W-Teilchen
- W-Teilchen wandeln sich in Leptonen um
- **Aber:** Endprodukte können auch aus anderen Umwandlungen kommen (Untergrund)

Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- Bei der Umwandlung eines Higgs-Teilchens in zwei W-Teilchen entstehen schließlich zwei elektrisch geladene Leptonen
- Diese bewegen unter einem bestimmten Winkel zueinander durch den Detektor
- Dieser Winkel liegt in einem charakteristischen Bereich
- --> Messung des Winkels hilft Untergrundereignisse auszuschließen

2. Messaufgabe: Suche nach W-Teilchen und Bestimmung des Winkels zwischen den detektierten Leptonen



"Wir haben es!" CERN feiert Durchbruch bei Higgs-Suche

04.07.2012 | 11:02 | von Daniel Breuss (DiePresse.com)

Das Higgs-Boson verleiht den Bausteinen des Universums ihre Masse. Seit Jahrzehnten suchen Forscher das Elementarteilchen. Nun wurde am Teilchenbeschleuniger LHC ein neues Teilchen gefunden, das ihm entspricht.

30.11.2009

LHC

Teilchenbeschleuniger knackt Energie-Weltrekord



**Vielen Dank für eure
Aufmerksamkeit!**



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



**NETZWERK
TEILCHENWELT**

Diskussion / Fragen

