



---

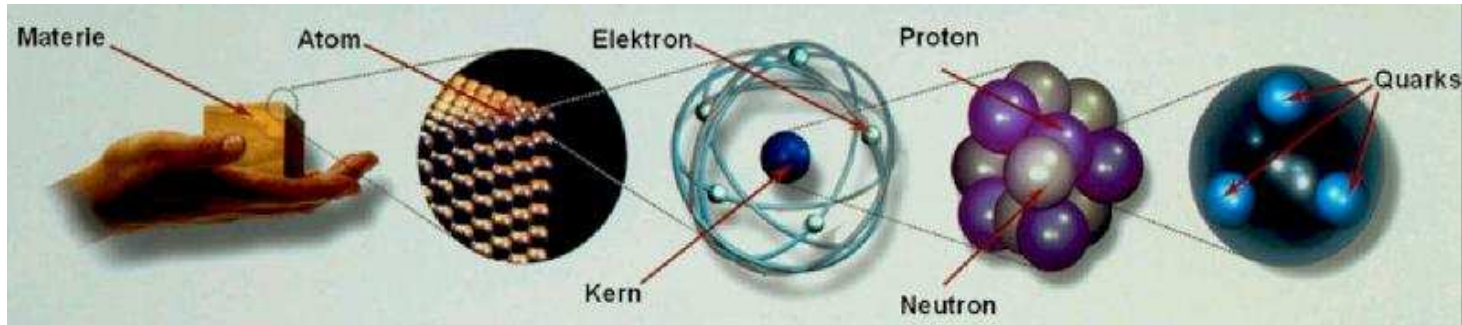
*Masterclass 2010*  
***Elementarteilchenphysik***

Robert Harlander

Bergische Universität Wuppertal

17. Februar 2010

# Elementarteilchenphysik

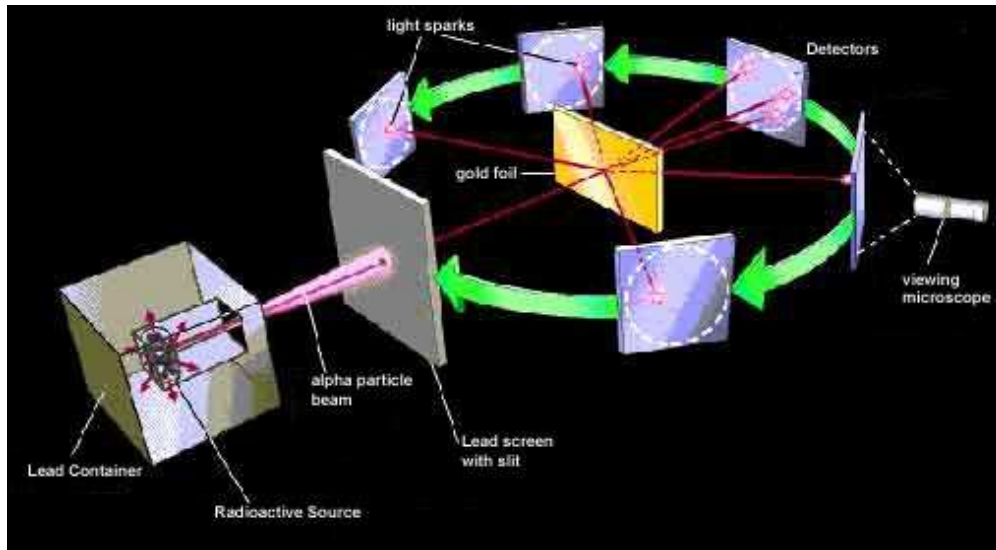


## Zentrale Fragen:

- Was sind die **fundamentalen Bausteine** der Materie?  
(Teilchen? Strings?? ...)
- Was hält sie in Materie zusammen?  
(Coulomb-Kraft, ...)

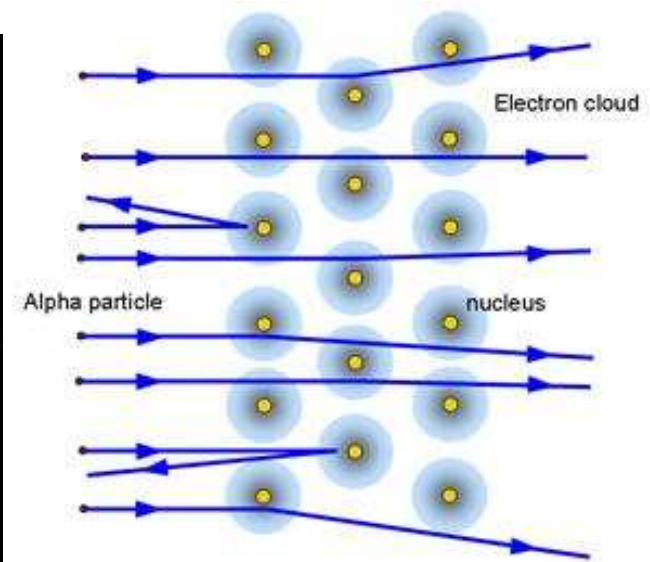
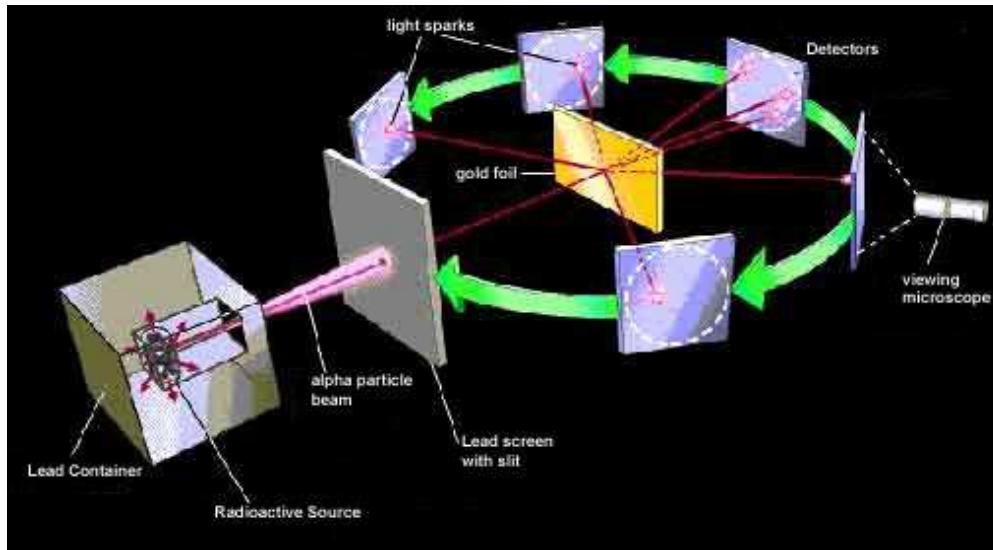
# Streu-Experimente

1908 Geiger-Marsden



# Streu-Experimente

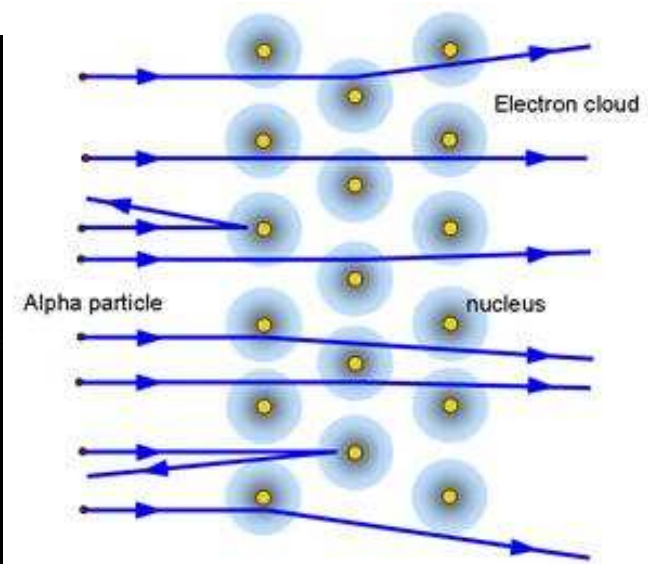
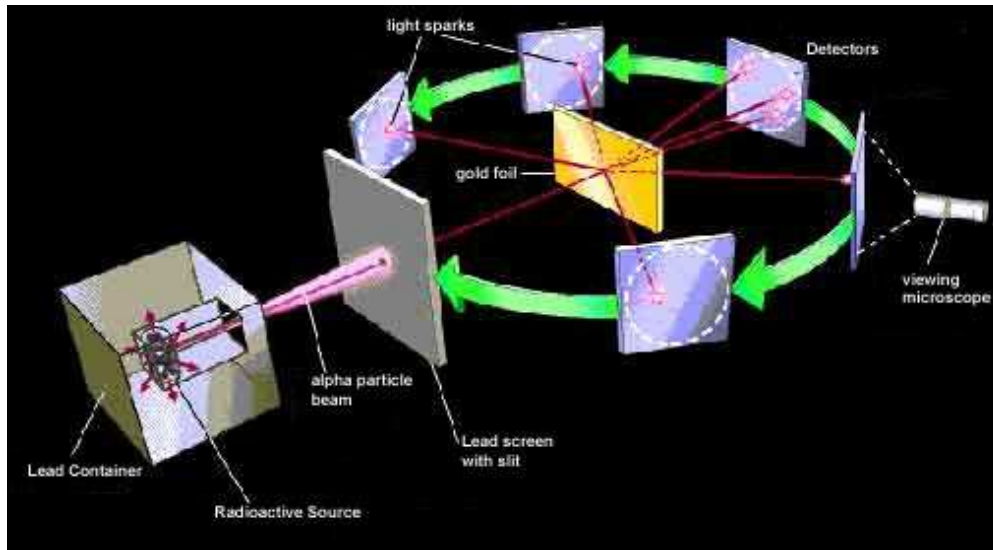
1908 Geiger-Marsden



Rutherford

# Streu-Experimente

1908 Geiger-Marsden

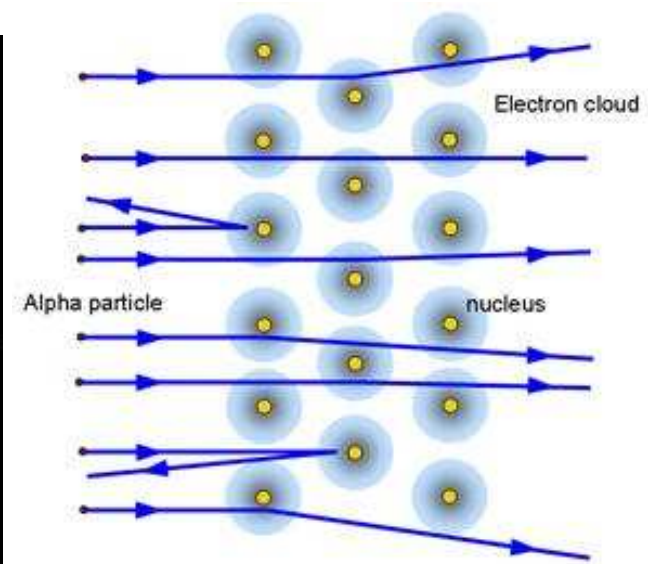
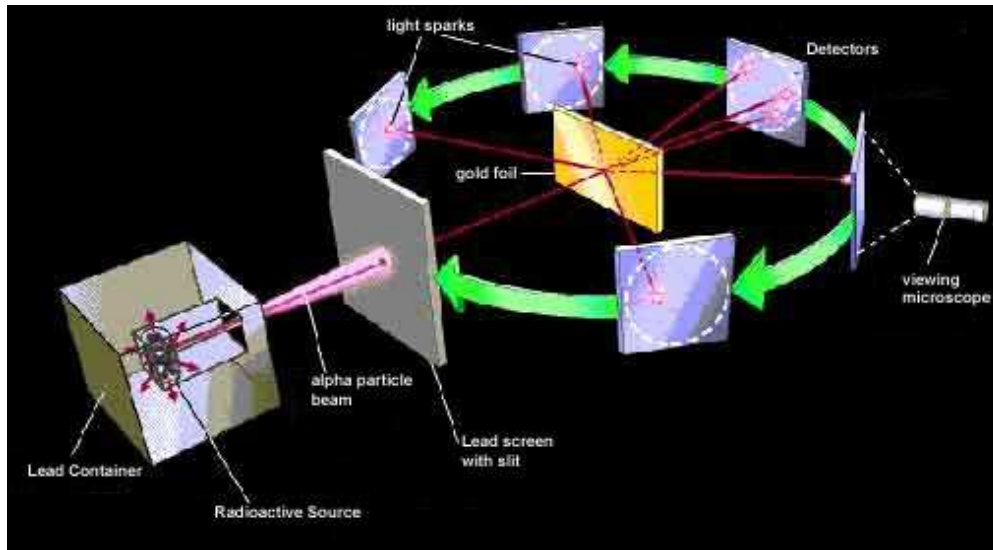


Rutherford

*“It was almost as incredible as if you fired a fifteen inch shell at a piece of tissue paper and it came back to hit you.”*

# Streu-Experimente

1908 Geiger-Marsden



Rutherford

*“It was almost as incredible as if you fired a fifteen inch shell at a piece of tissue paper and it came back to hit you.”*

*“All science is either physics or stamp collecting.”*

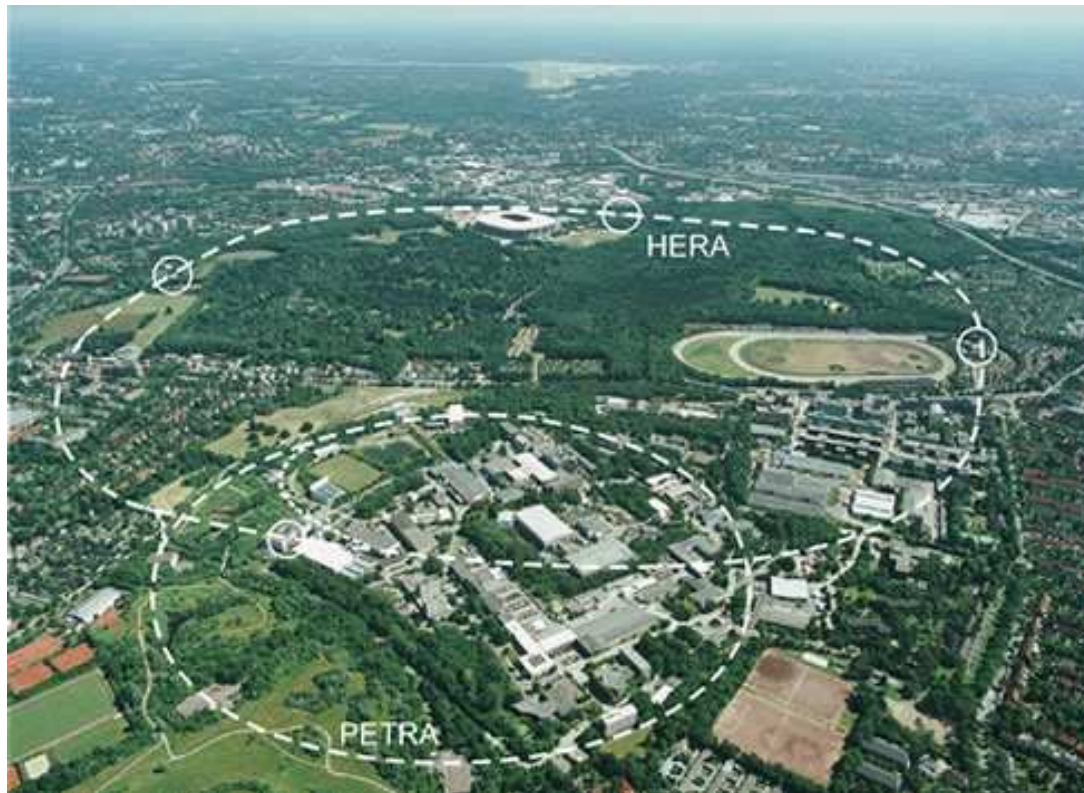
# Heutige Streu-Experimente

- SLAC (Stanford, USA):  $e^+e^-$  Elektron – Positron



# Heutige Streu-Experimente

- DESY (Hamburg):  $e p$  Elektron – Proton





# Heutige Streu-Experimente

- Tevatron (Fermilab):  $p\bar{p}$  Proton – Anti-Proton



# Heutige Streu-Experimente

- CERN (Genf):  $pp$  Proton – Proton



# Theorie

---

Zwei theoretische Säulen:

● (Spezielle) Relativitätstheorie:

$$E = mc^2 \quad \text{wobei} \quad m = m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

● (Spezielle) Relativitätstheorie:

$$E = mc^2 \quad \text{wobei} \quad m = m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Wir verwenden nur  $m_0$  (Ruhemasse);

Dann gilt

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + \vec{p}^2 c^2}, \quad c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

● (Spezielle) Relativitätstheorie:

$$E = mc^2 \quad \text{wobei} \quad m = m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Wir verwenden nur  $m_0$  (Ruhemasse);

Dann gilt

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + \vec{p}^2 c^2}, \quad c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

Beachte:

- für  $m_0 \neq 0$  ist stets  $v < c$
- für  $m_0 = 0$  ist stets  $v = c$

# Theorie

---

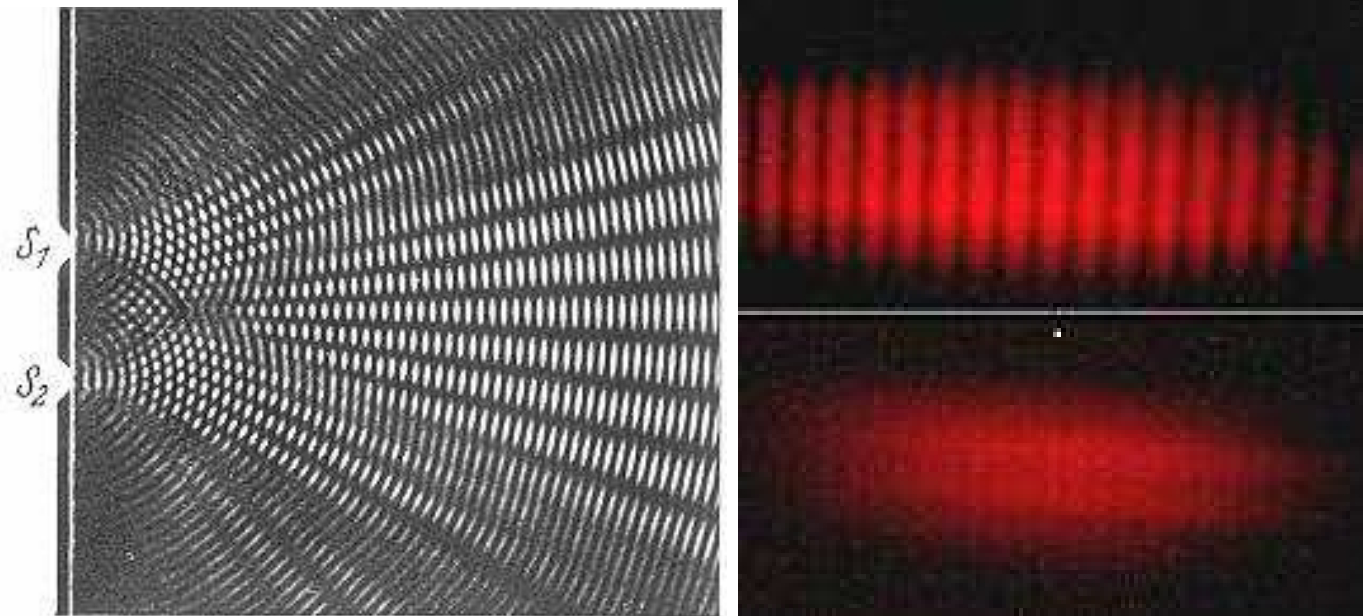
Zwei theoretische Säulen:

- Quantenmechanik

# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

- Quantenmechanik
  - Welle-Teilchen-Dualität, z.B. Licht:
    - zeigt Welleneigenschaften



# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

- Quantenmechanik

- Welle-Teilchen-Dualität, z.B. Licht:

- zeigt aber auch Teilcheneigenschaften:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js — Plancksches Wirkungsquantum



# Theorie

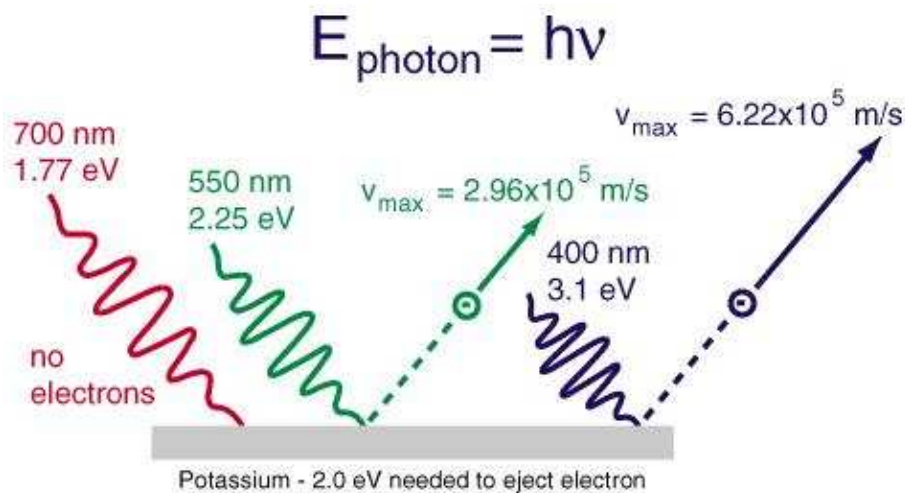
Zwei theoretische Säulen:

- Quantenmechanik
  - Welle-Teilchen-Dualität, z.B. Licht:

- zeigt aber auch Teilcheneigenschaften:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js — Plancksches Wirkungsquantum



Photoelectric effect

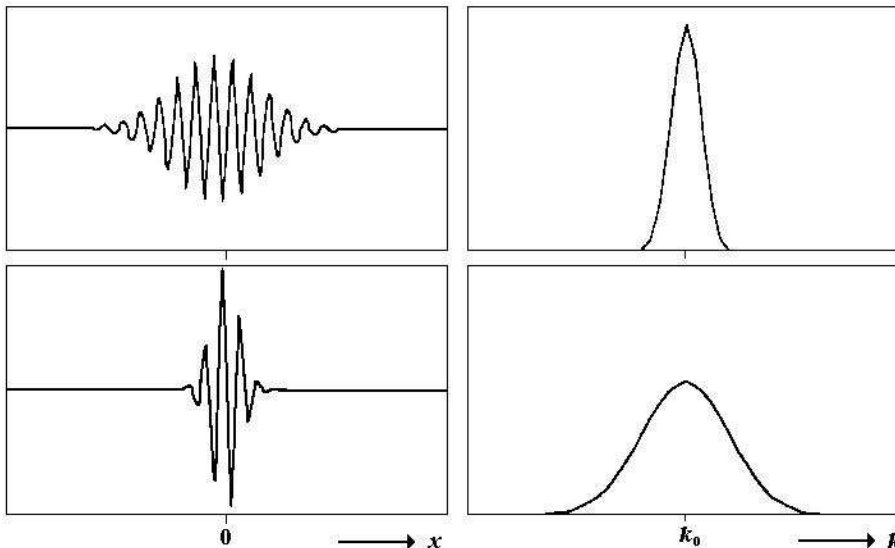
Einstein 1905

# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

## ● Quantenmechanik

### ● Welle-Teilchen-Dualität:



$$p = \frac{h}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

De-Broglie-  
Wellenlänge

→ Heisenbergsche Unschärferelation:

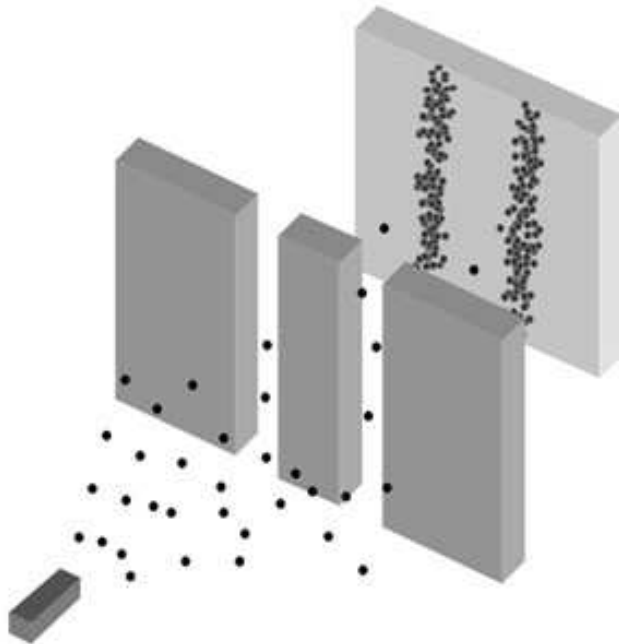
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

# Theorie

---

Zwei theoretische Säulen:

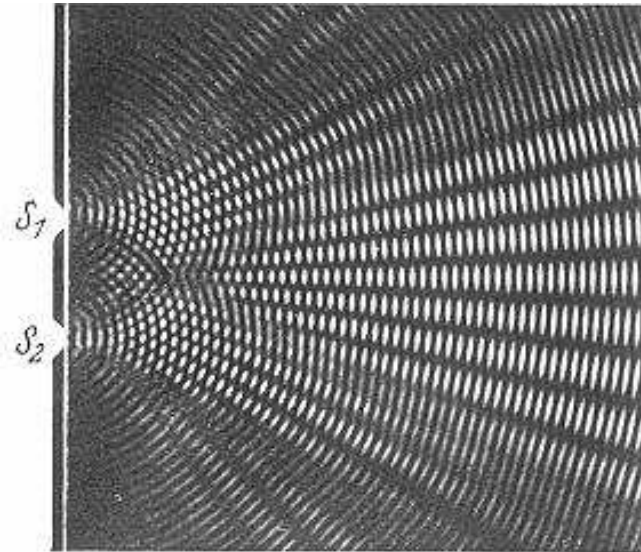
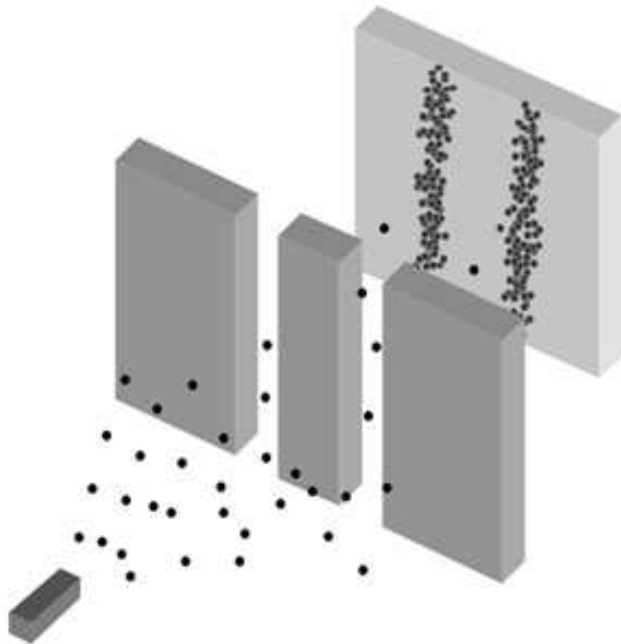
- **Quantenmechanik:** nur **Wahrscheinlichkeiten** vorhersagbar



# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

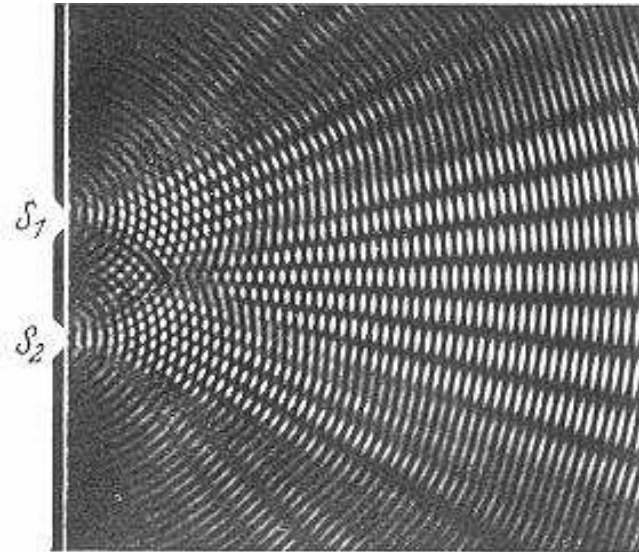
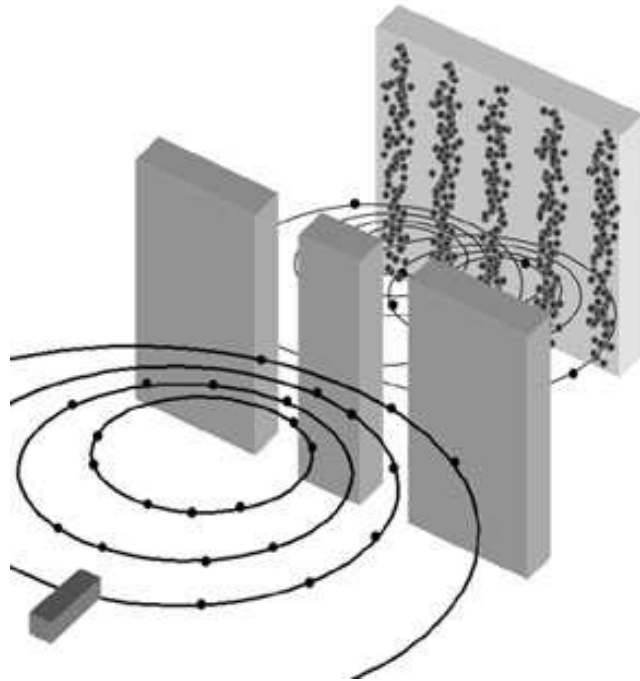
- **Quantenmechanik:** nur **Wahrscheinlichkeiten** vorhersagbar



# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

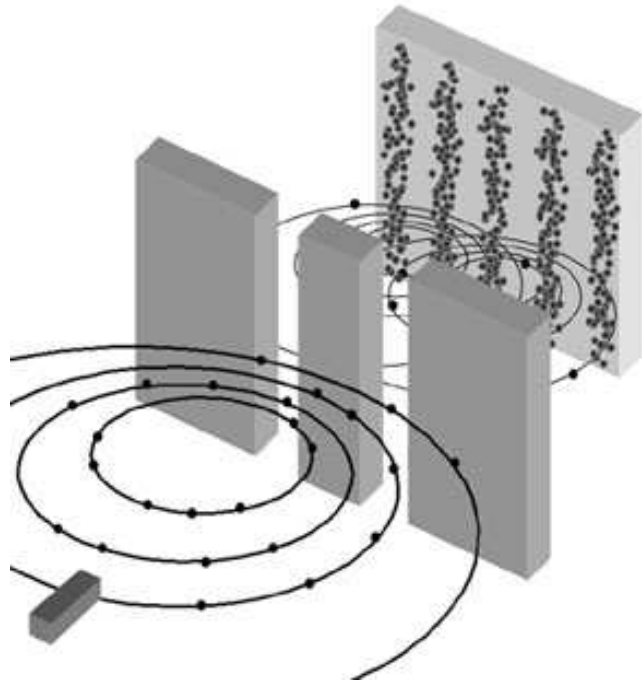
- **Quantenmechanik:** nur **Wahrscheinlichkeiten** vorhersagbar



# Theorie

Zwei theoretische Säulen:

- **Quantenmechanik:** nur **Wahrscheinlichkeiten** vorhersagbar



# Quantenfeldtheorie

---

Relativitätstheorie  $\oplus$  Quantenmechanik = Quantenfeldtheorie

# Quantenfeldtheorie

Relativitätstheorie  $\oplus$  Quantenmechanik = Quantenfeldtheorie

- es gibt elementare Teilchen (punktförmig!) mit
  - Spin 0: noch keines entdeckt! → Higgs?
  - Spin 1/2: Elektron, Quarks, ...
  - Spin 1: Photon, Gluon, Z, W
  - Spin 3/2: Gravitino???
  - Spin 2: Graviton?



# Quantenfeldtheorie

Relativitätstheorie  $\oplus$  Quantenmechanik = Quantenfeldtheorie

- es gibt elementare Teilchen (punktförmig!) mit
  - Spin 0: noch keines entdeckt! → Higgs?
  - Spin 1/2: Elektron, Quarks, ...
  - Spin 1: Photon, Gluon, Z, W
  - Spin 3/2: Gravitino???
  - Spin 2: Graviton?
- Teilchen können erzeugt und vernichtet werden  
aber Erhaltungssätze müssen erfüllt sein

# Quantenfeldtheorie

Relativitätstheorie  $\oplus$  Quantenmechanik = Quantenfeldtheorie

- es gibt elementare Teilchen (punktförmig!) mit
  - Spin 0: noch keines entdeckt! → Higgs?
  - Spin 1/2: Elektron, Quarks, ...
  - Spin 1: Photon, Gluon, Z, W
  - Spin 3/2: Gravitino???
  - Spin 2: Graviton?
- Teilchen können erzeugt und vernichtet werden  
aber Erhaltungssätze müssen erfüllt sein
- Zu jedem Teilchen gibt es ein Anti-Teilchen  
Elektron  $e^- \leftrightarrow$  Positron  $e^+$ , etc.  $m(e^-) = m(e^+)$

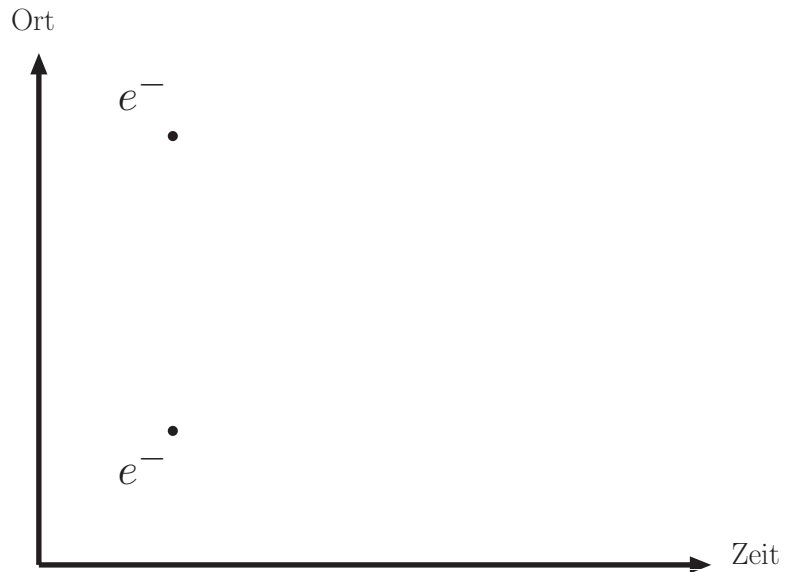
# Quantenfeldtheorie

Relativitätstheorie  $\oplus$  Quantenmechanik = Quantenfeldtheorie

- es gibt elementare Teilchen (punktförmig!) mit
  - Spin 0: noch keines entdeckt!  $\rightarrow$  Higgs?
  - Spin 1/2: Elektron, Quarks, ...
  - Spin 1: Photon, Gluon, Z, W
  - Spin 3/2: Gravitino???
  - Spin 2: Graviton?
- Teilchen können erzeugt und vernichtet werden  
aber Erhaltungssätze müssen erfüllt sein
- Zu jedem Teilchen gibt es ein Anti-Teilchen  
Elektron  $e^- \leftrightarrow$  Positron  $e^+$ , etc.  $m(e^-) = m(e^+)$
- Wechselwirkung durch Austausch von Teilchen

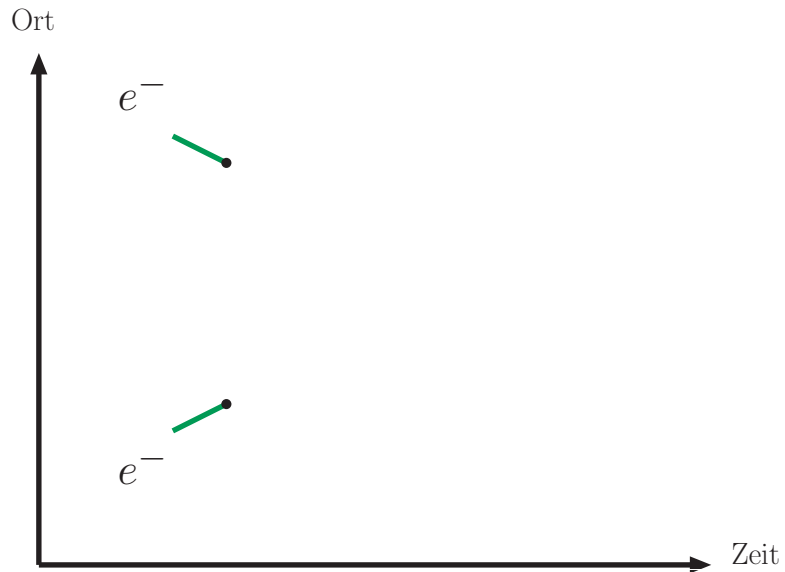
# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$



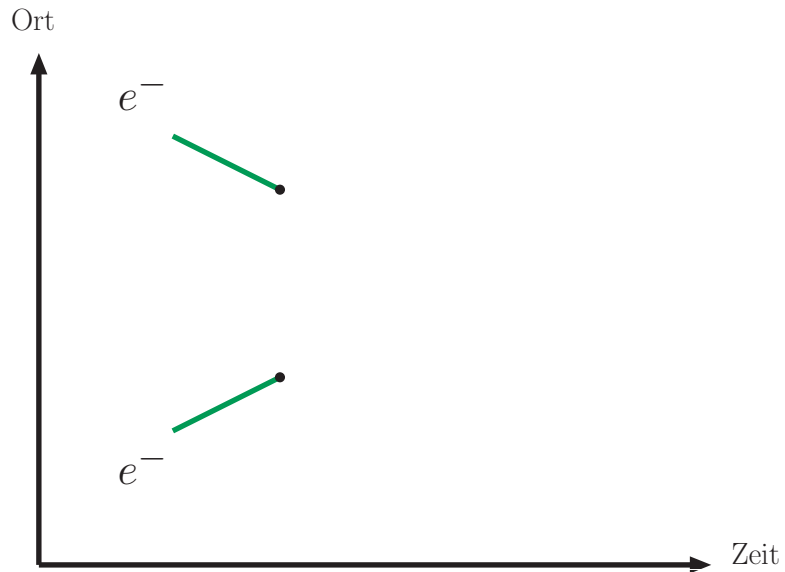
# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$



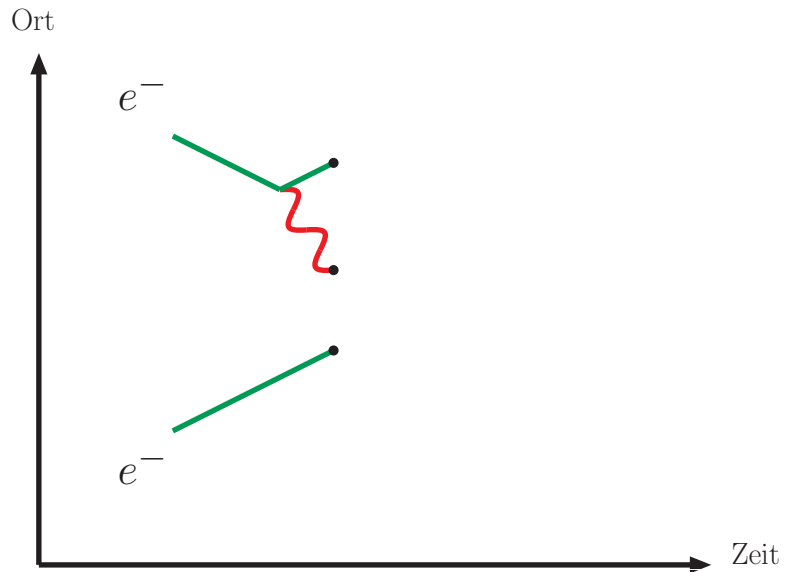
# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$



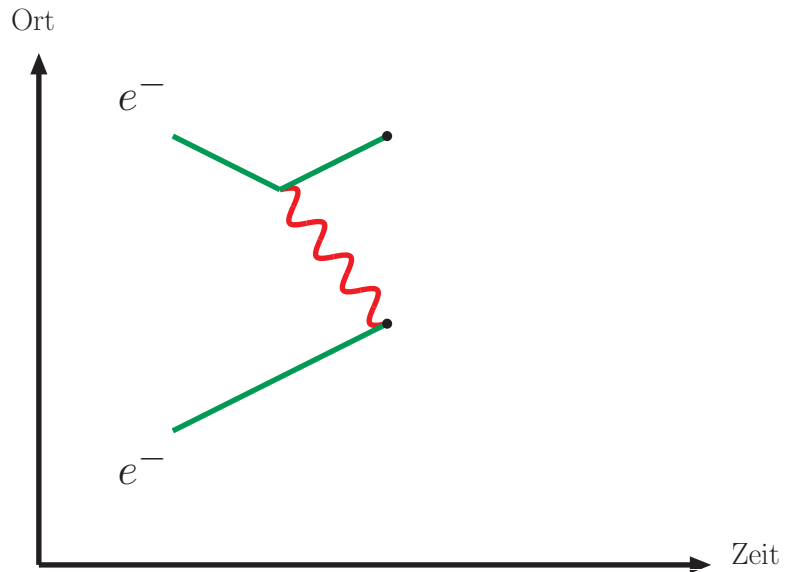
# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$



# Feynman-Diagramme

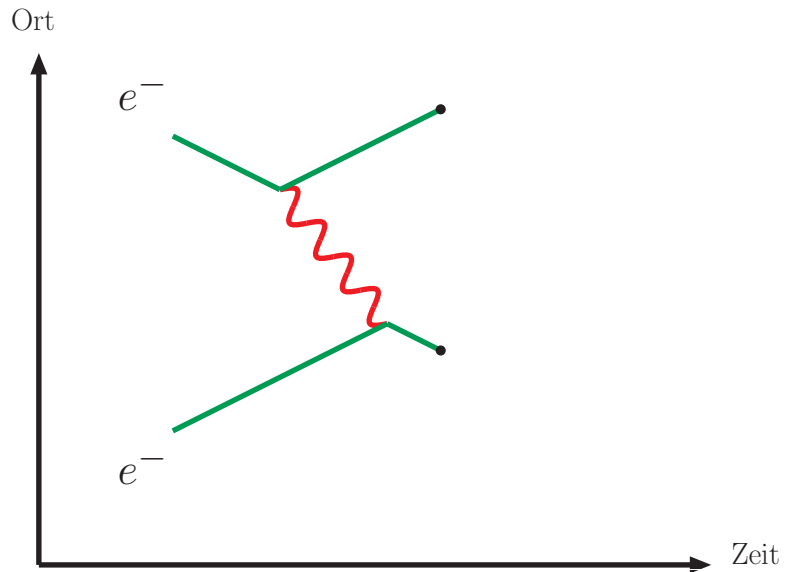
Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$





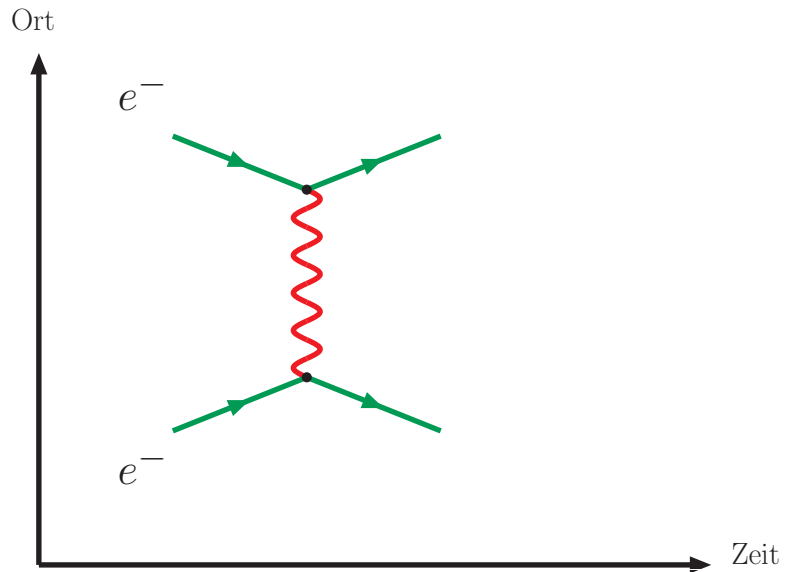
# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$



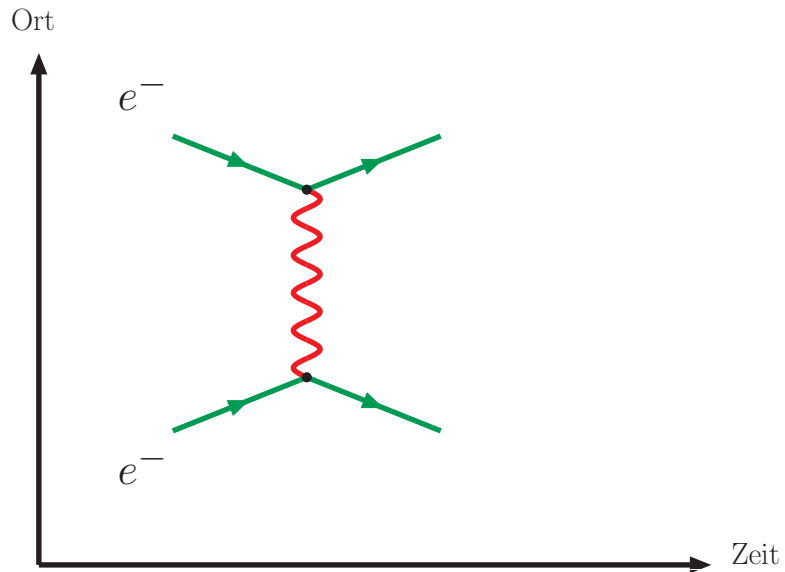
# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$

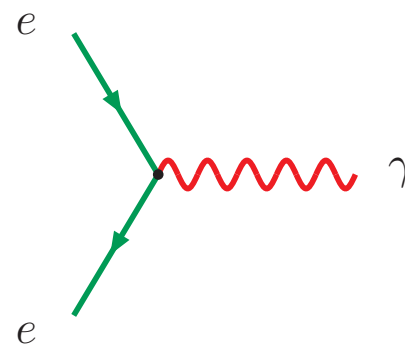


# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e(p_1) + e(p_2) \rightarrow e(p_3) + e(p_4)$

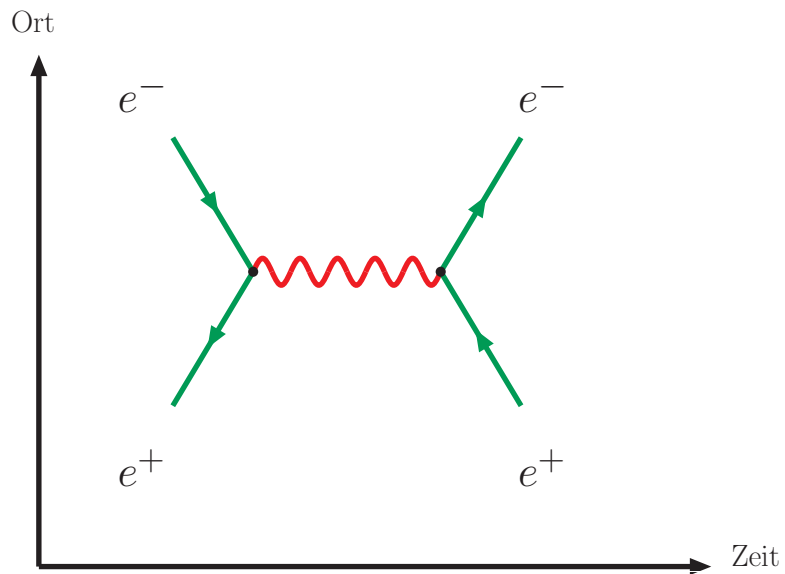


zentraler Baustein: Vertex

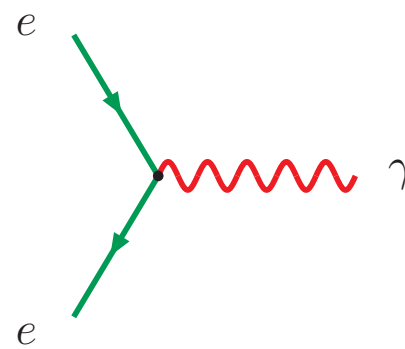


# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow e^-(p_3) + e^+(p_4)$

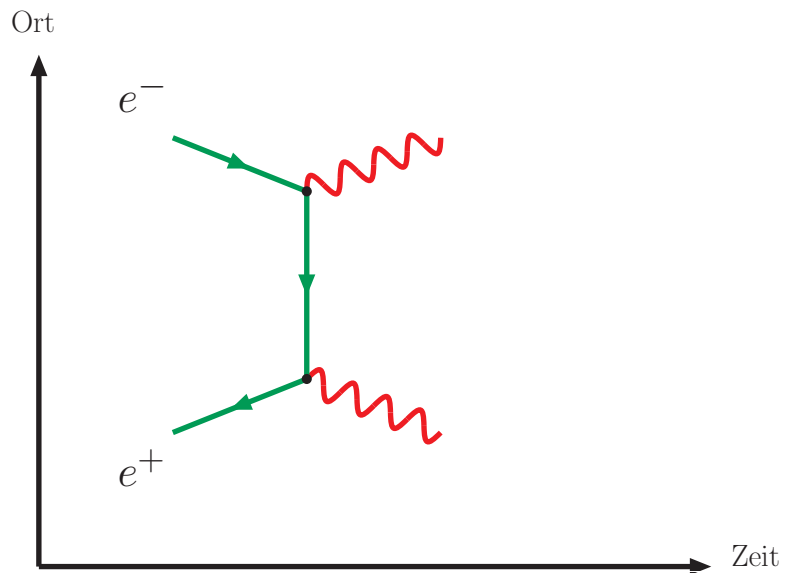


zentraler Baustein: Vertex

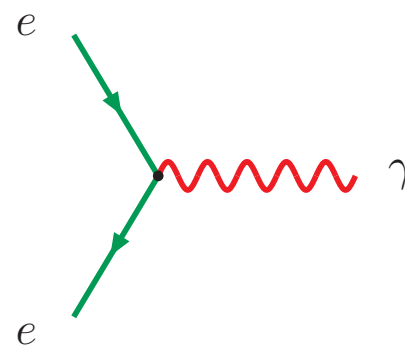


# Feynman-Diagramme

Darstellung einer **Streu-Reaktion**:  $e^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow \gamma(p_3) + \gamma(p_4)$



zentraler Baustein: Vertex



# *Elementarteilchen*

---

Die uns umgebende (stabile) Materie ist aufgebaut aus

# Elementarteilchen

---

Die uns umgebende (stabile) Materie ist aufgebaut aus

• Elektron  $e^-$ ,      Ladung  $-1$

# Elementarteilchen

---

Die uns umgebende (stabile) Materie ist aufgebaut aus

- Elektron  $e^-$ ,      Ladung  $-1$
- Up-Quark  $u$ ,      Ladung  $+\frac{2}{3}$



# Elementarteilchen

Die uns umgebende (stabile) Materie ist aufgebaut aus

- Elektron  $e^-$ , Ladung  $-1$
- Up-Quark  $u$ , Ladung  $+\frac{2}{3}$
- Down-Quark  $d$ , Ladung  $-\frac{1}{3}$

# Elementarteilchen

Die uns umgebende (stabile) Materie ist aufgebaut aus

- Elektron  $e^-$ , Ladung  $-1$
- Up-Quark  $u$ , Ladung  $+\frac{2}{3}$
- Down-Quark  $d$ , Ladung  $-\frac{1}{3}$

Daraus aufgebaut:

- Proton  $p = uud$ : Ladung  $+1$
- Neutron  $n = udd$ : Ladung  $0$

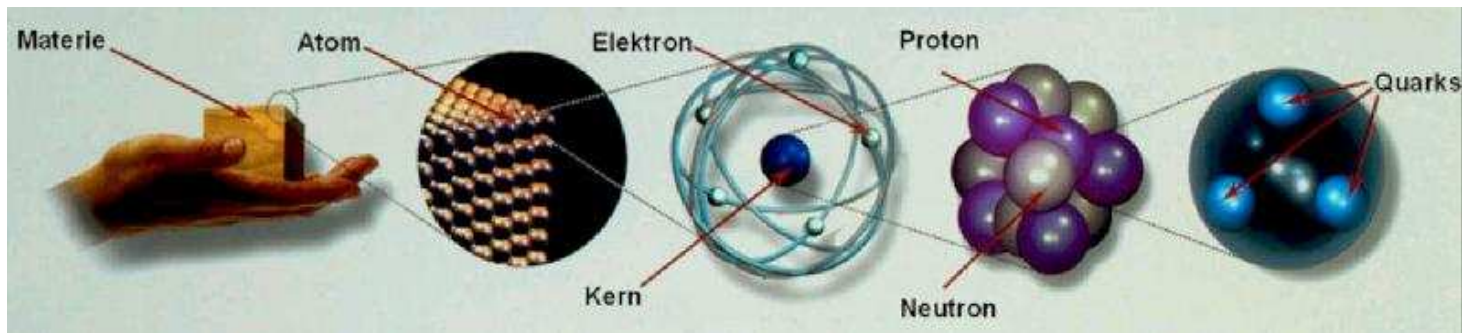
# Elementarteilchen

Die uns umgebende (stabile) Materie ist aufgebaut aus

- Elektron  $e^-$ , Ladung  $-1$
- Up-Quark  $u$ , Ladung  $+\frac{2}{3}$
- Down-Quark  $d$ , Ladung  $-\frac{1}{3}$

Daraus aufgebaut:

- Proton  $p = uud$ : Ladung  $+1$
- Neutron  $n = udd$ : Ladung  $0$

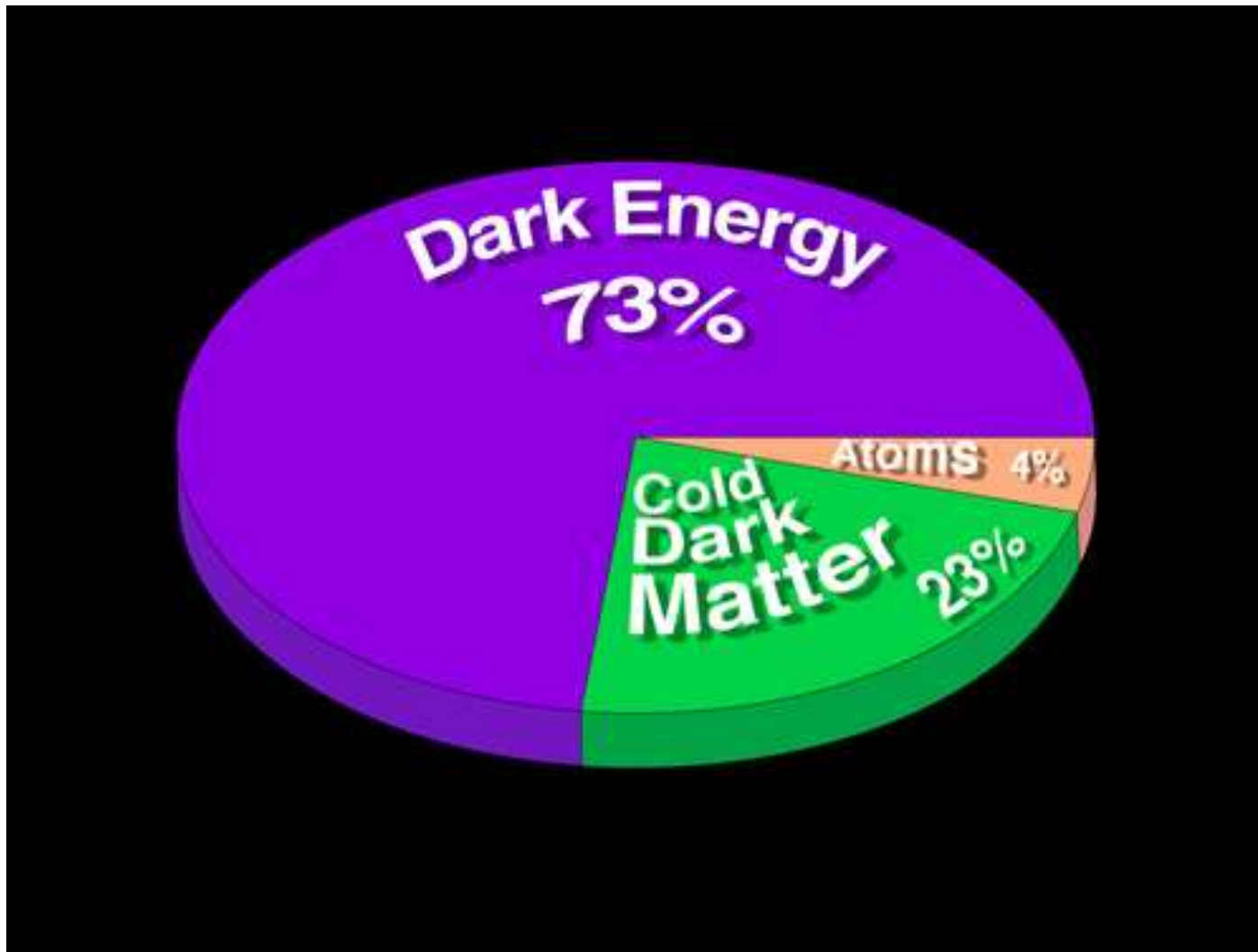




# ***Energiedichte des Universums***

---

# Materieverteilung des Universums



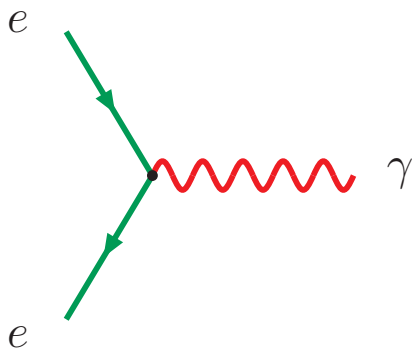
# Starke Wechselwirkung

---

Was hält  $(p = uud)$  und  $(n = udd)$  zusammen?

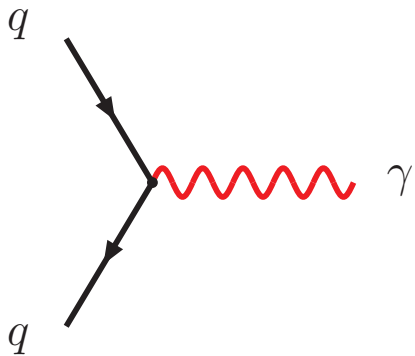
# Starke Wechselwirkung

Was hält  $(p = uud)$  und  $(n = udd)$  zusammen?



# Starke Wechselwirkung

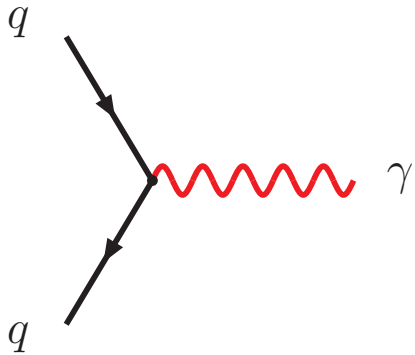
Was hält  $(p = uud)$  und  $(n = udd)$  zusammen?





# Starke Wechselwirkung

Was hält ( $p = uud$ ) und ( $n = udd$ ) zusammen?

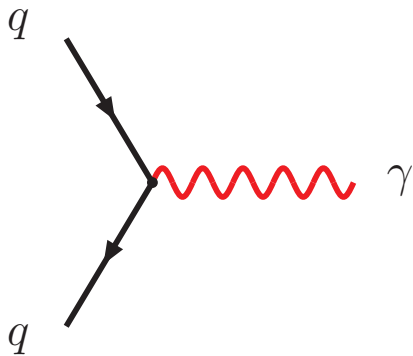


→ zu schwach!

außerdem:  $Q(u) = +\frac{2}{3}$  ,  $Q(d) = -\frac{1}{3}$ !

# Starke Wechselwirkung

Was hält ( $p = uud$ ) und ( $n = udd$ ) zusammen?



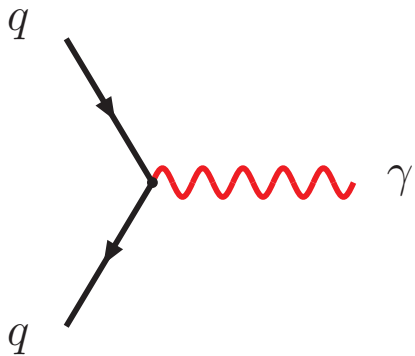
→ zu schwach!

außerdem:  $Q(u) = +\frac{2}{3}$  ,  $Q(d) = -\frac{1}{3}$ !

Quarks tragen noch andere Ladung:

# Starke Wechselwirkung

Was hält ( $p = uud$ ) und ( $n = udd$ ) zusammen?



→ zu schwach!

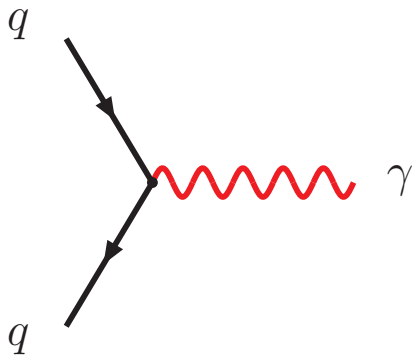
außerdem:  $Q(u) = +\frac{2}{3}$  ,  $Q(d) = -\frac{1}{3}$ !

Quarks tragen noch andere Ladung:

Starke Wechselwirkung

# Starke Wechselwirkung

Was hält ( $p = uud$ ) und ( $n = udd$ ) zusammen?

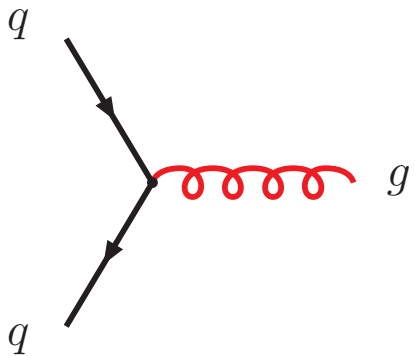


→ zu schwach!

außerdem:  $Q(u) = +\frac{2}{3}$  ,  $Q(d) = -\frac{1}{3}$ !

Quarks tragen noch andere Ladung:

Starke Wechselwirkung



$g = \text{Gluon}$

# Natur der Starken Wechselwirkung

---

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

Coulomb

# Natur der Starken Wechselwirkung

---

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

# Natur der Starken Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

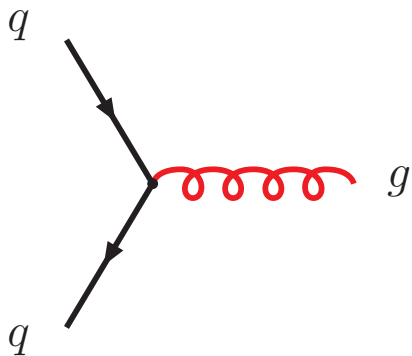
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:



# Natur der Starke Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

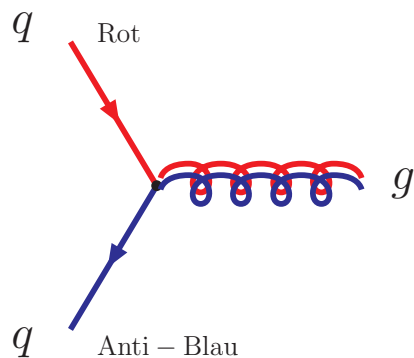
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:





# Natur der Starke Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

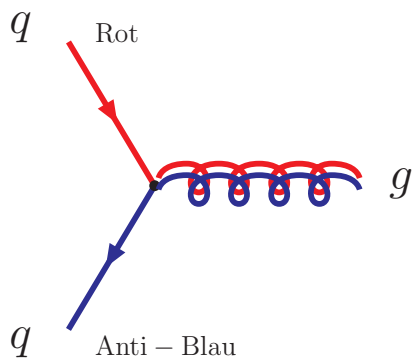
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:



Gluonen tragen selbst Farbladung!

# Natur der Starke Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

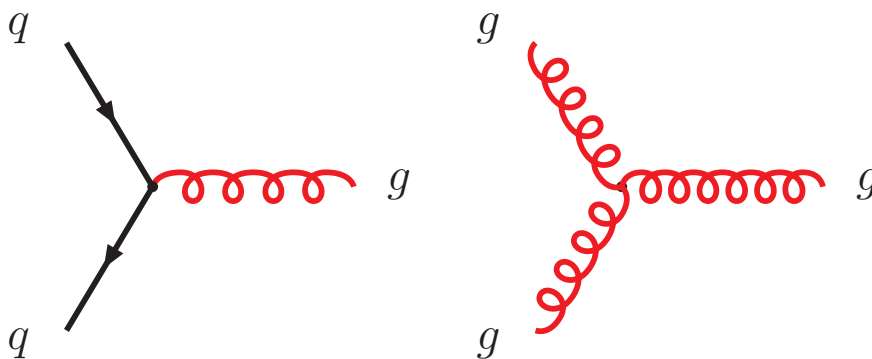
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:



# Natur der Starke Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

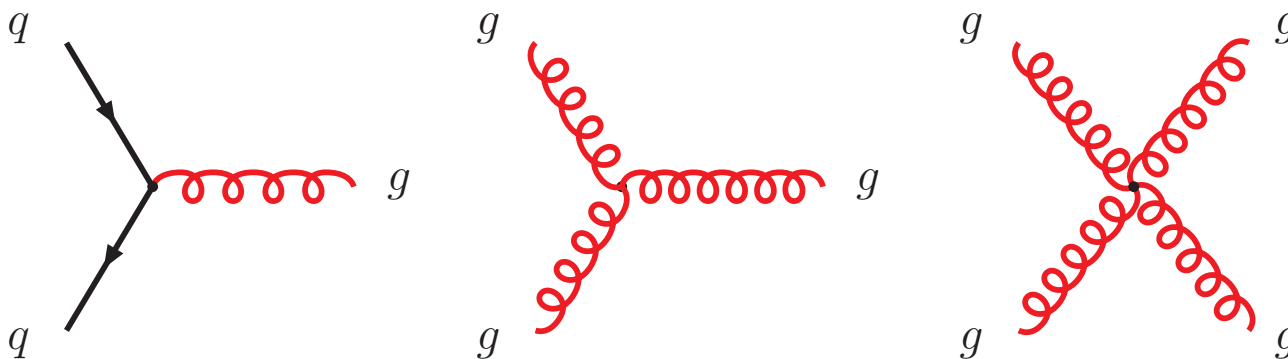
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

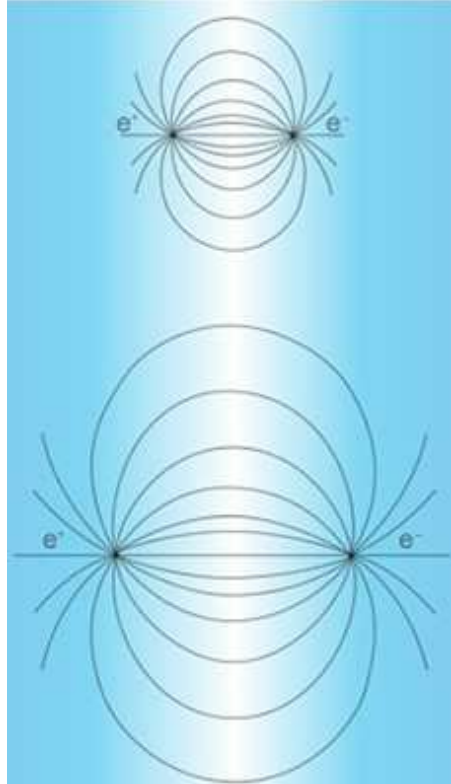
Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

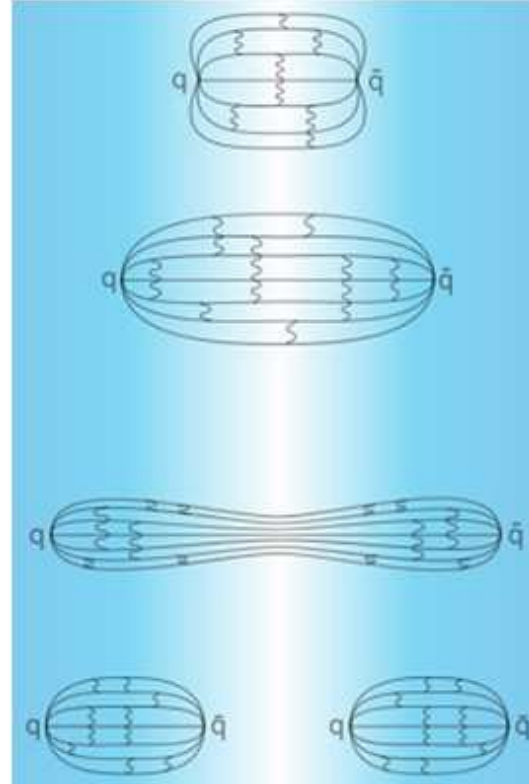
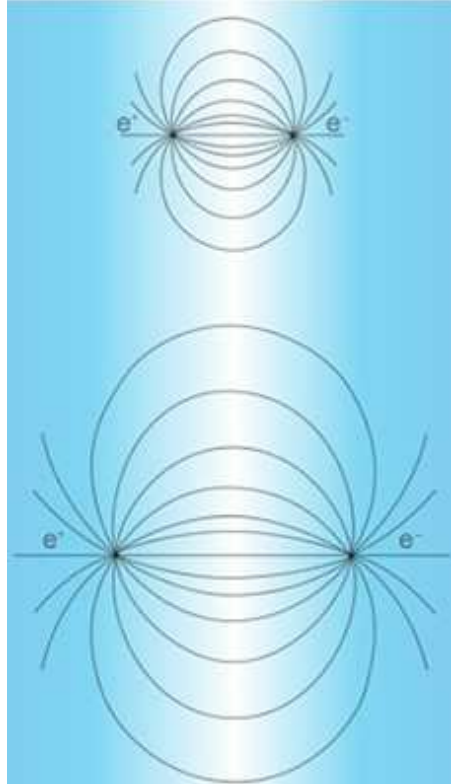
- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:



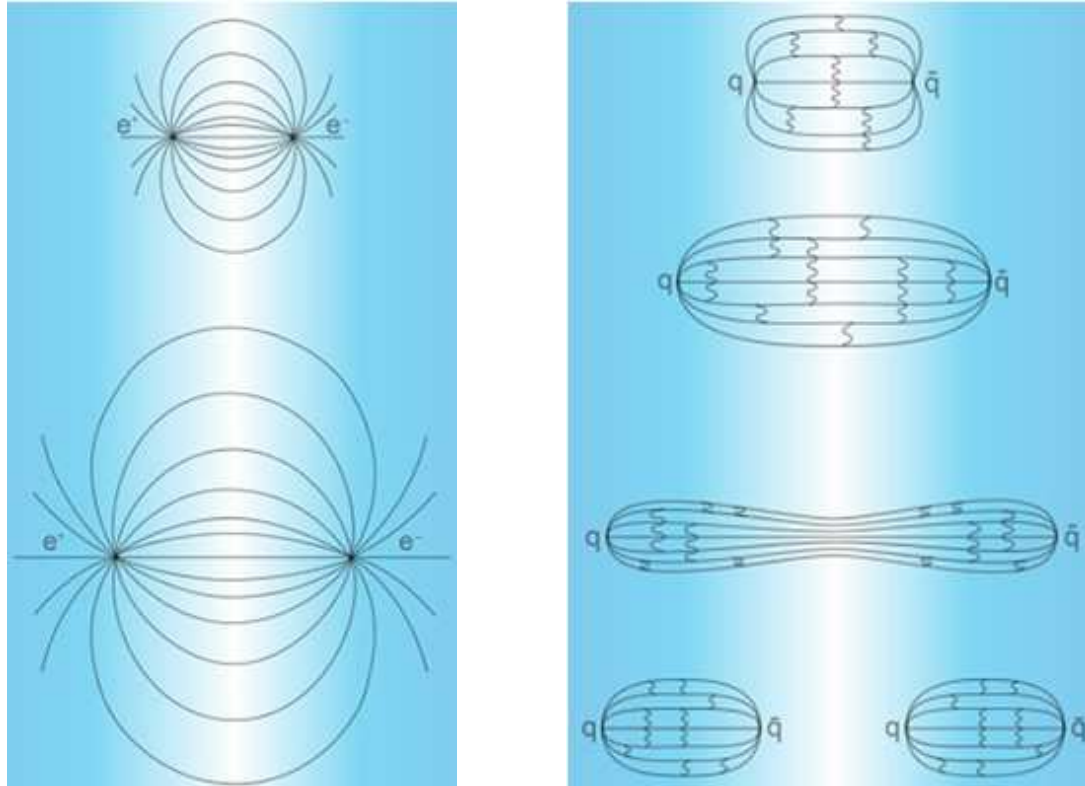
# Confinement



# Confinement



# Confinement

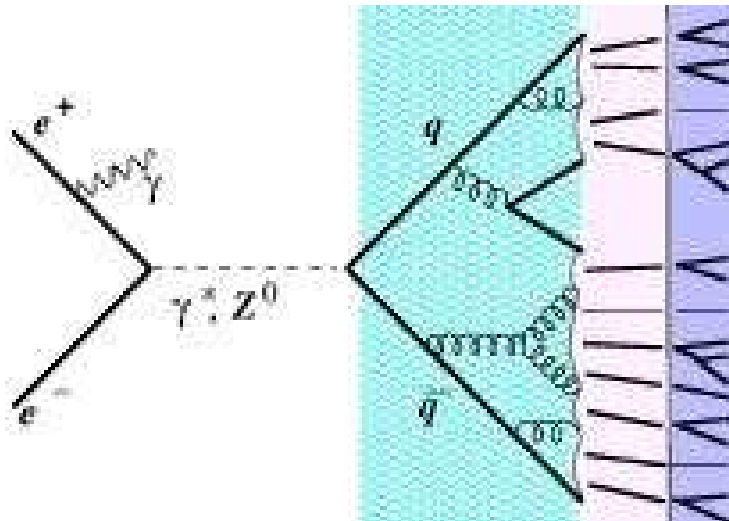


→ Quarks treten nur in „farblosen“ Verbänden auf:

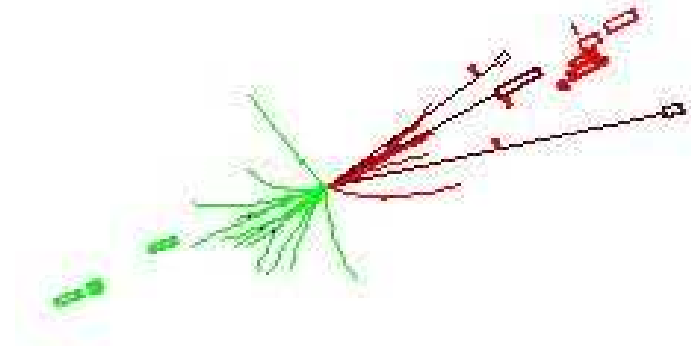
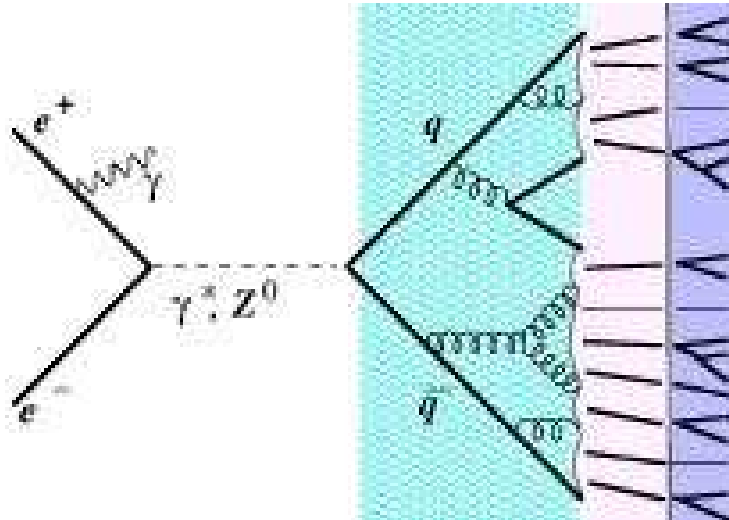
●  $qqq$ : Baryonen (z.B. Proton =  $uud$ , Neutron =  $udd$ )

●  $q\bar{q}$ : Mesonen (z.B. Pionen =  $u\bar{d}$ , ...)

# Jets



# Jets





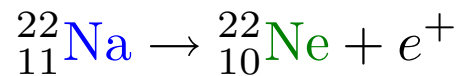


# ***Schwache Wechselwirkung***

---

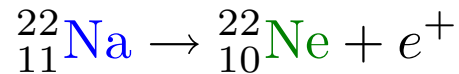
# Schwache Wechselwirkung

$\beta$ -Zerfall: Radioaktiver Zerfall von Kernen, z.B.



# Schwache Wechselwirkung

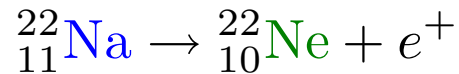
$\beta$ -Zerfall: Radioaktiver Zerfall von Kernen, z.B.



$\Rightarrow$  elementares Teilchen  $u$  „zerfällt“!

# Schwache Wechselwirkung

$\beta$ -Zerfall: Radioaktiver Zerfall von Kernen, z.B.



$\Rightarrow$  elementares Teilchen  $u$  „zerfällt“!

Quantenfeldtheorie:  $u$  wird vernichtet,  $d$  und  $e^+$  werden erzeugt.

# $\beta$ -Zerfall

---

$$u \rightarrow d + e^+$$

# $\beta$ -Zerfall

---

$$u \rightarrow d + e^+$$

Energie des  $e^+$ :

$$E = c^2 \cdot \frac{m_u^2 + m_e^2 - m_d^2}{2m_u}$$

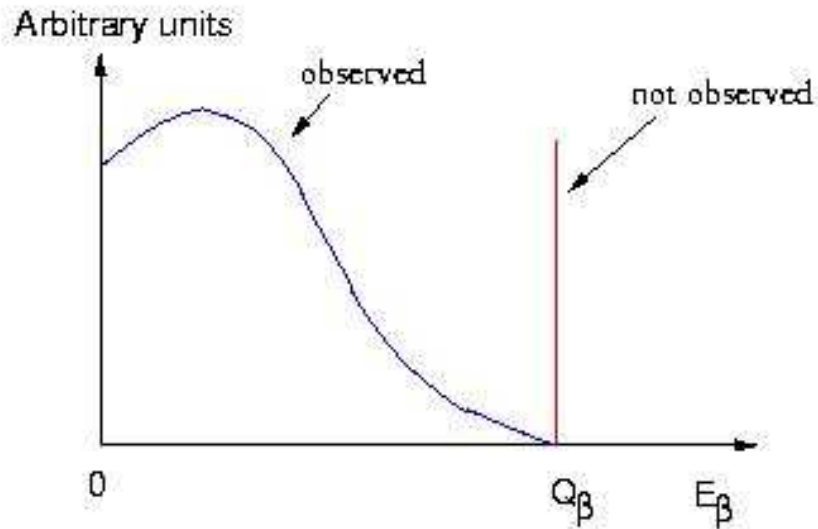
# $\beta$ -Zerfall



Energie des  $e^+$ :

$$E = c^2 \cdot \frac{m_u^2 + m_e^2 - m_d^2}{2m_u}$$

aber:



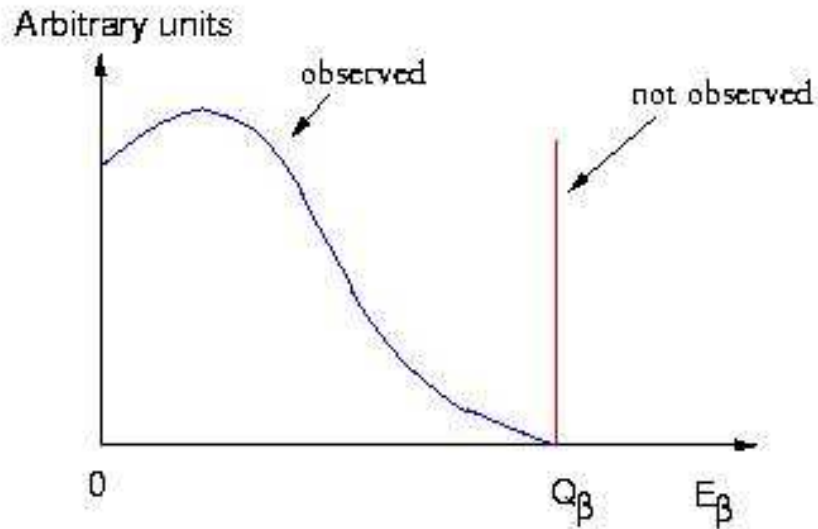
# $\beta$ -Zerfall

$$u \rightarrow d + e^+$$

Energie des  $e^+$ :

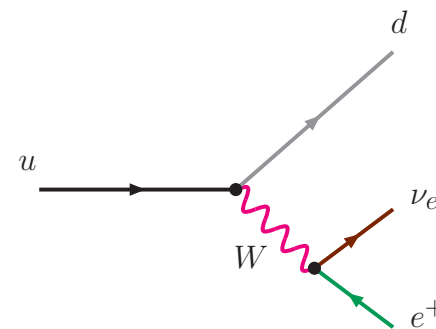
$$E = c^2 \cdot \frac{m_u^2 + m_e^2 - m_d^2}{2m_u}$$

aber:



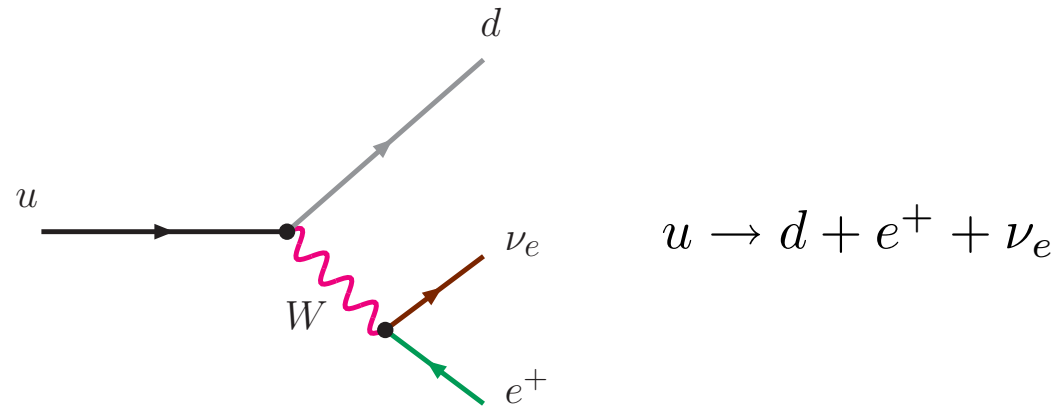
Pauli 1930: **Neutrino!**

$$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$

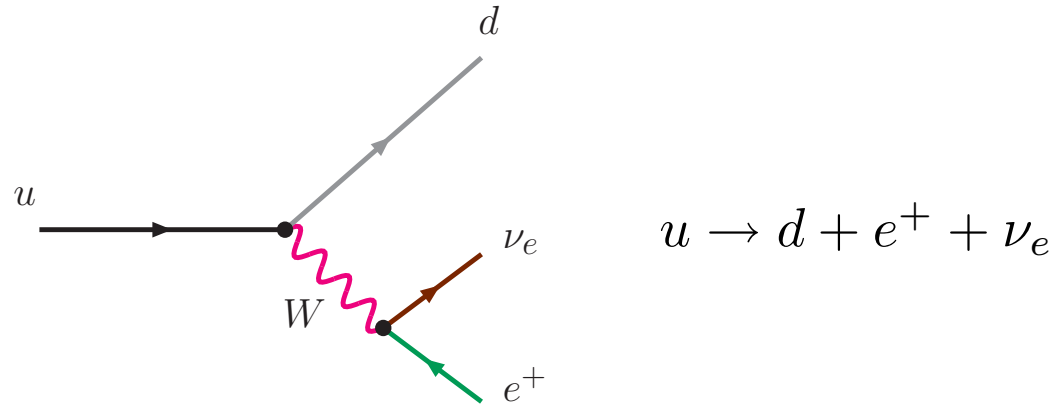




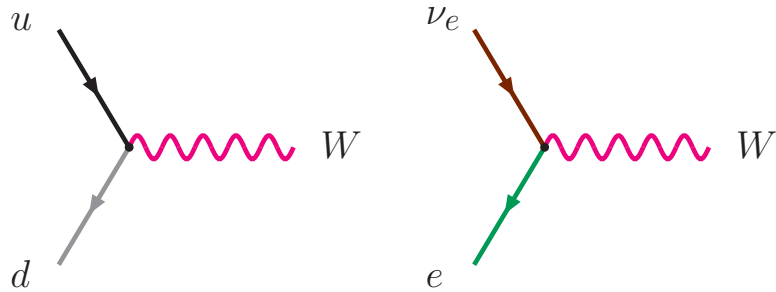
# Schwache Wechselwirkung



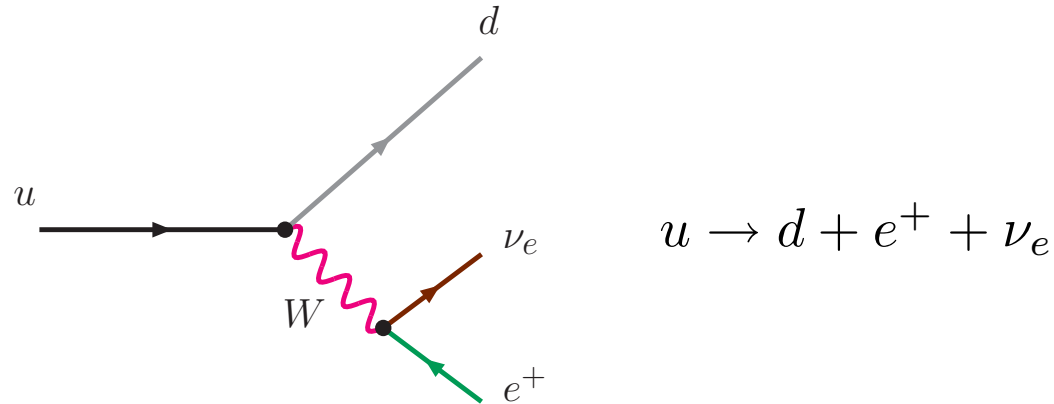
# Schwache Wechselwirkung



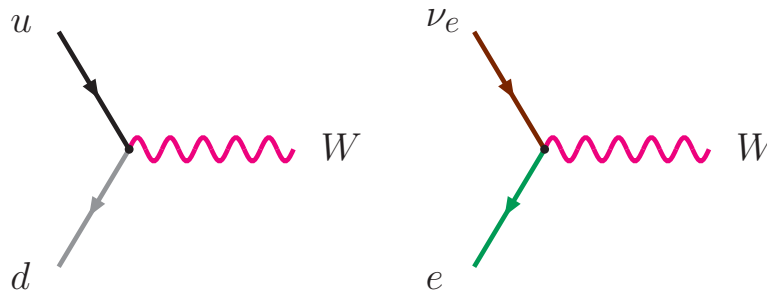
→ neue Wechselwirkung:



# Schwache Wechselwirkung

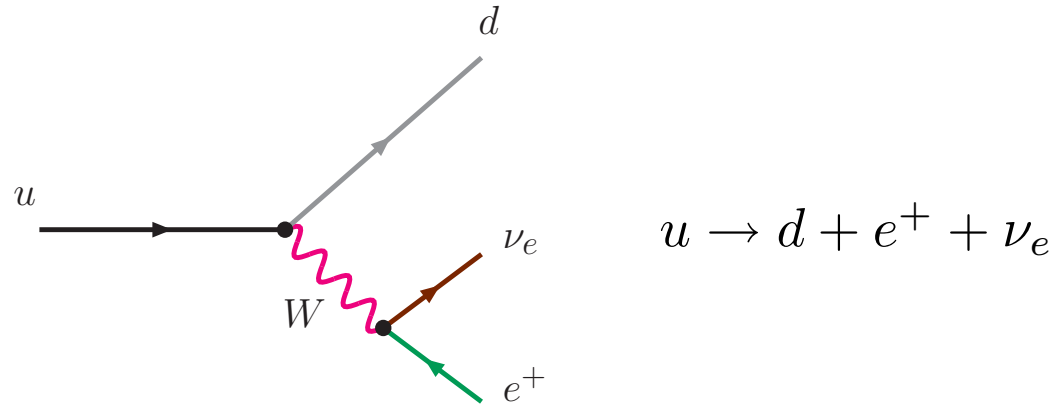


→ neue Wechselwirkung:

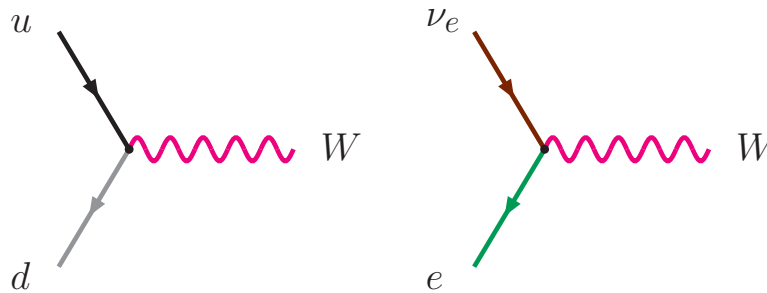


●  $W$ -Bosonen:  $W^+$ ,  $W^-$

# Schwache Wechselwirkung

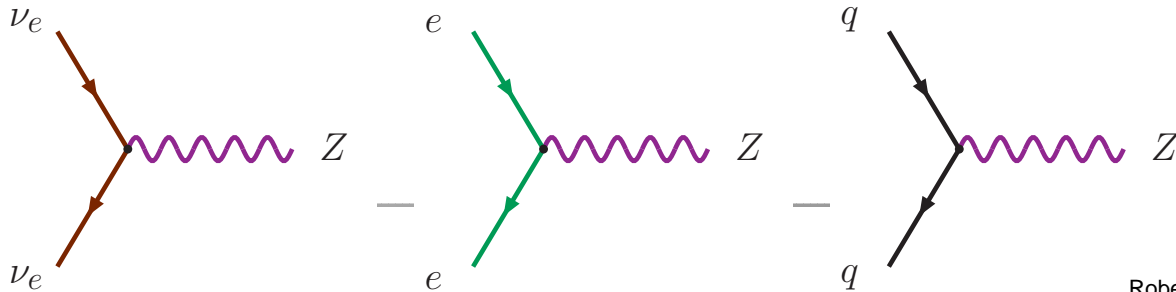


→ neue Wechselwirkung:



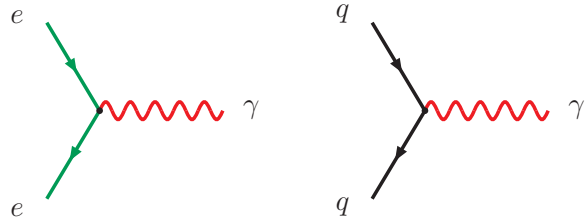
●  $W$ -Bosonen:  $W^+$ ,  $W^-$

● Mathematik fordert weiteres Austausch-Teilchen:  $Z^0$



# Wechselwirkungen

## Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

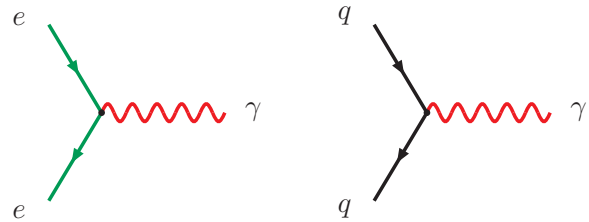


Elektron, Quarks

Photon

# Wechselwirkungen

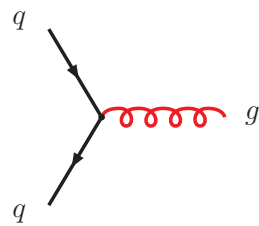
## Elektro-Magnetische Wechselwirkung:



Elektron, Quarks

Photon

## Starke Wechselwirkung:

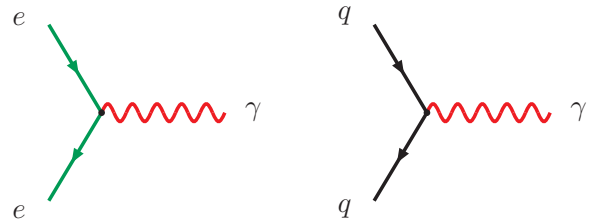


Quarks

Gluonen

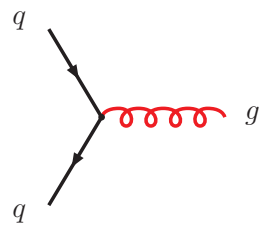
# Wechselwirkungen

## Elektro-Magnetische Wechselwirkung:



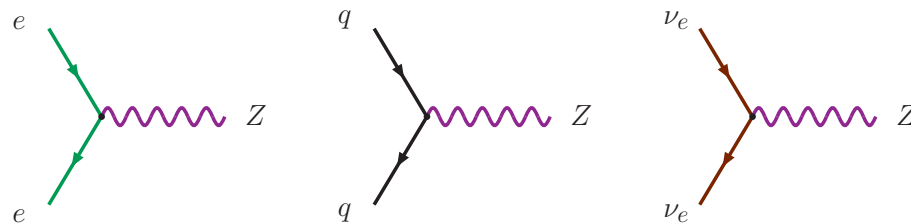
Elektron, Quarks  
Photon

## Starke Wechselwirkung:



Quarks  
Gluonen

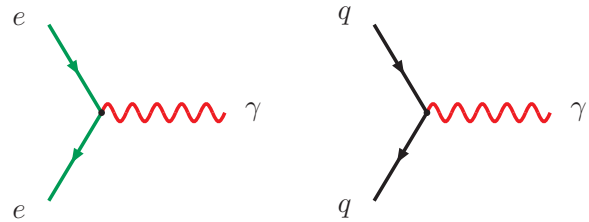
## Schwache Wechselwirkung:



Elektron, Quarks,  
Neutrinos  
Z-Boson

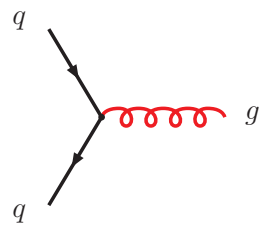
# Wechselwirkungen

## Elektro-Magnetische Wechselwirkung:



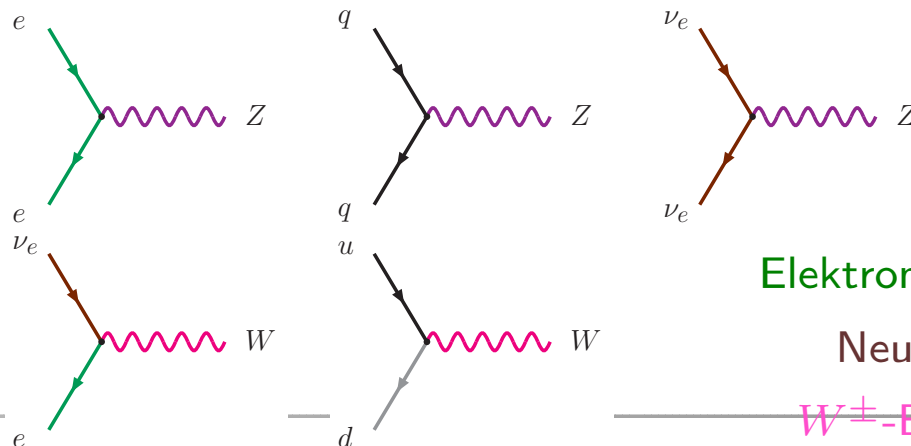
Elektron, Quarks  
Photon

## Starke Wechselwirkung:



Quarks  
Gluonen

## Schwache Wechselwirkung:



Elektron, Quarks,  
Neutrinos  
Z-Boson

Elektron, Quarks,  
Neutrinos  
W<sup>±</sup>-Bosonen



# Myon

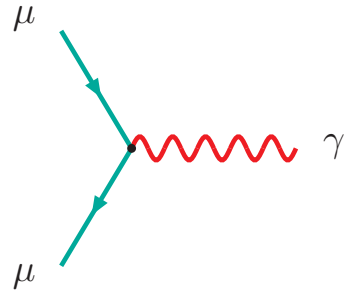
---

- in der Höhenstrahlung entdeckt
- identisch zum Elektron, bis auf Masse:  $m(\mu) \approx 200 m(e)$

# Myon

- in der Höhenstrahlung entdeckt
- identisch zum Elektron, bis auf Masse:  $m(\mu) \approx 200 m(e)$

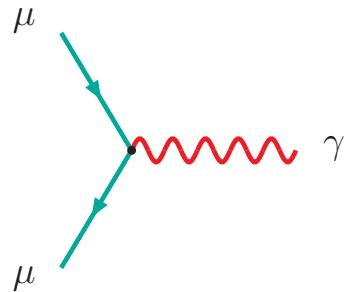
- Ladung -1:



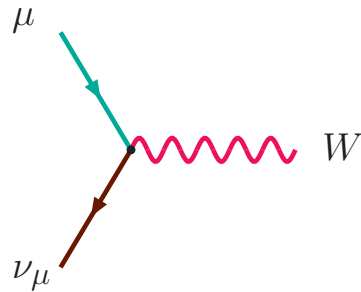
# Myon

- in der Höhenstrahlung entdeckt
- identisch zum Elektron, bis auf Masse:  $m(\mu) \approx 200 m(e)$

● Ladung -1:



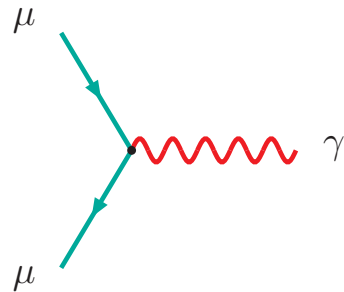
● auch:



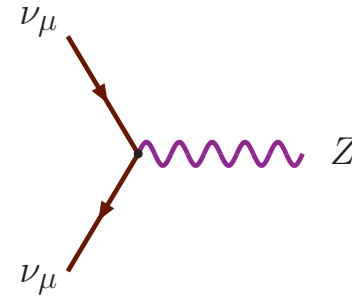
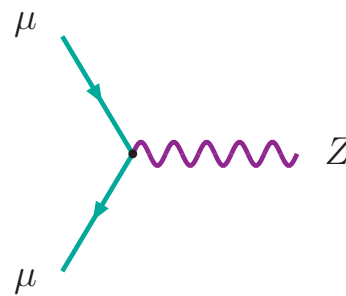
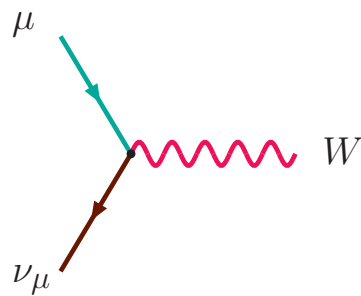
# Myon

- in der Höhenstrahlung entdeckt
- identisch zum Elektron, bis auf Masse:  $m(\mu) \approx 200 m(e)$

Ladung -1:



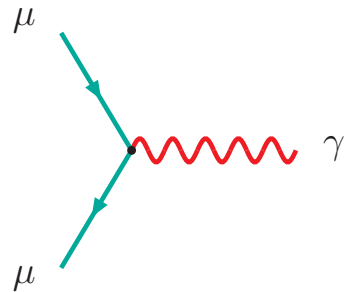
auch:



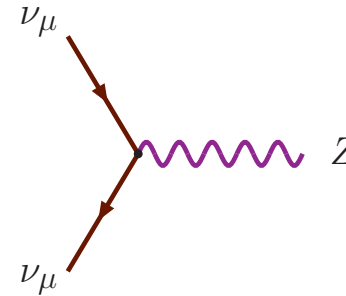
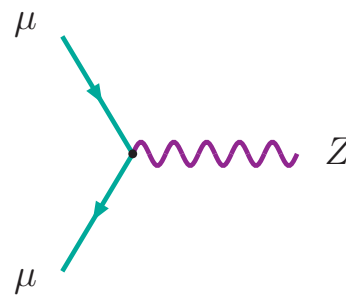
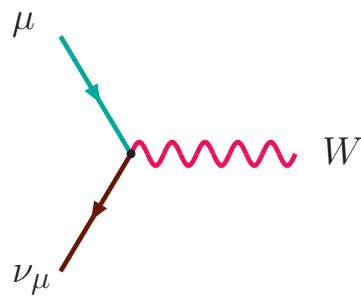
# Myon

- in der Höhenstrahlung entdeckt
- identisch zum Elektron, bis auf Masse:  $m(\mu) \approx 200 m(e)$

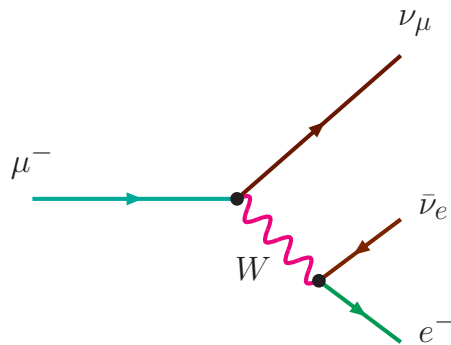
Ladung -1:



auch:



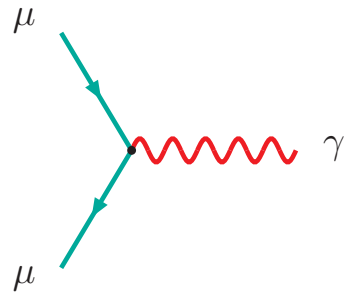
zerfällt:



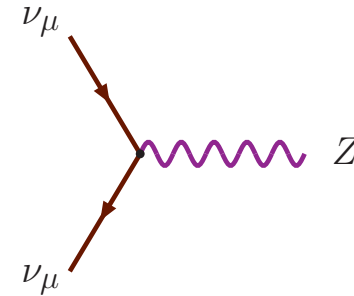
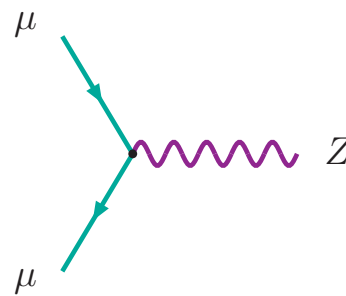
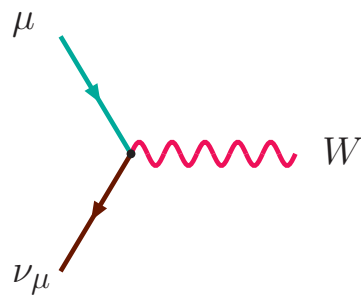
# Myon

- in der Höhenstrahlung entdeckt
- identisch zum Elektron, bis auf Masse:  $m(\mu) \approx 200 m(e)$

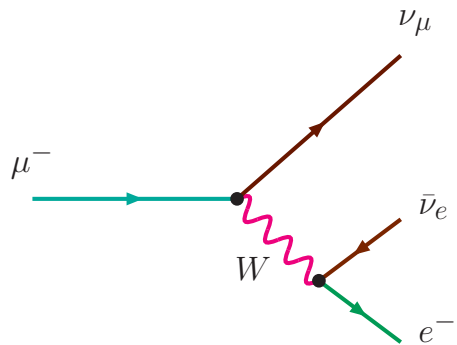
Ladung -1:



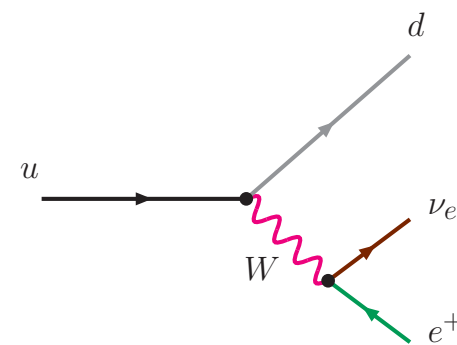
auch:



zerfällt:



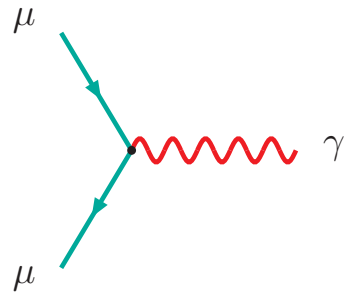
vergleiche:



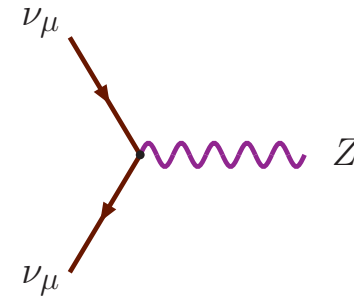
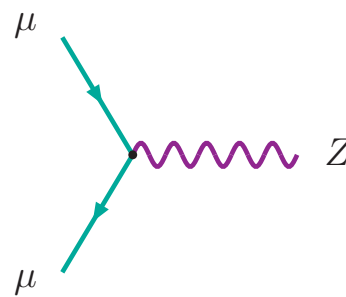
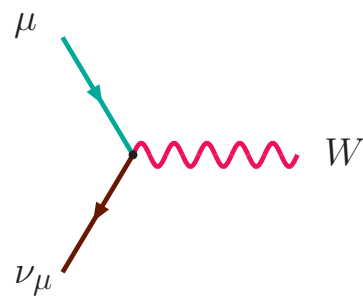
# Myon

- in der Höhenstrahlung entdeckt
- identisch zum Elektron, bis auf Masse:  $m(\mu) \approx 200 m(e)$

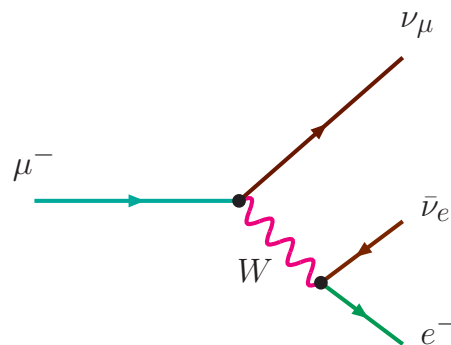
Ladung -1:



auch:



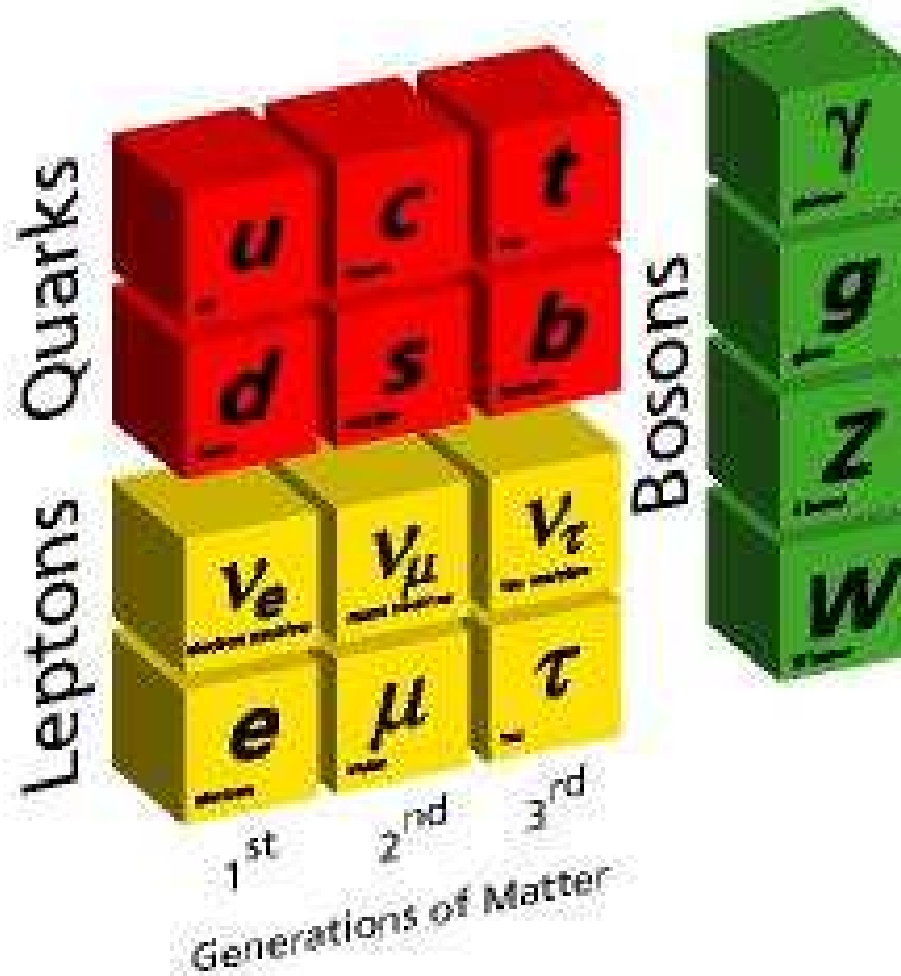
zerfällt:



$$\tau_{1/2} = 2.2 \mu s$$

# Standardmodell

## Elementary Particles





# Massive $W, Z$

---

- Besonderheit der Schwachen Wechselwirkung:  
Austausch-Teilchen  $W^\pm, Z^0$  sind **massiv**

# Massive $W, Z$

---

- Besonderheit der Schwachen Wechselwirkung:  
Austausch-Teilchen  $W^\pm, Z^0$  sind **massiv**
- N.B.: Einheiten für Masse

# Massive $W, Z$

---

- Besonderheit der Schwachen Wechselwirkung:  
Austausch-Teilchen  $W^\pm, Z^0$  sind **massiv**
- N.B.: Einheiten für Masse
  - Einheiten für Energie:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
Energie, die Elektron aufnimmt, wenn es Spannung 1V durchläuft

# Massive $W, Z$

- Besonderheit der Schwachen Wechselwirkung:  
Austausch-Teilchen  $W^\pm, Z^0$  sind **massiv**
- N.B.: Einheiten für Masse
  - Einheiten für Energie:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
Energie, die Elektron aufnimmt, wenn es Spannung 1V durchläuft
  - $E = mc^2 \Rightarrow [m] = [E]/c^2 = \text{eV}/c^2$

# Massive $W, Z$

- Besonderheit der Schwachen Wechselwirkung:  
Austausch-Teilchen  $W^\pm, Z^0$  sind **massiv**
- N.B.: Einheiten für Masse
  - Einheiten für Energie:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
Energie, die Elektron aufnimmt, wenn es Spannung 1V durchläuft
  - $E = mc^2 \Rightarrow [m] = [E]/c^2 = \text{eV}/c^2$
  - Beispiele:  
 $m(e^-) = 511 \text{ keV}/c^2$   
 $m(p) = 938 \text{ MeV}/c^2$   
 $m(\mu^-) = 105 \text{ MeV}/c^2$

# Massive $W, Z$

- Besonderheit der Schwachen Wechselwirkung:  
Austausch-Teilchen  $W^\pm, Z^0$  sind **massiv**
- N.B.: Einheiten für Masse
  - Einheiten für Energie:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
Energie, die Elektron aufnimmt, wenn es Spannung 1V durchläuft
  - $E = mc^2 \Rightarrow [m] = [E]/c^2 = \text{eV}/c^2$
  - Beispiele:  
 $m(e^-) = 511 \text{ keV}/c^2$   
 $m(p) = 938 \text{ MeV}/c^2$   
 $m(\mu^-) = 105 \text{ MeV}/c^2$
- $m(\gamma) = 0, \quad m(\text{Gluon}) = 0$   
 $m(W^\pm) = 80,413(48) \text{ GeV}, \quad m(Z) = 91,1875(2.1) \text{ GeV}$

# Ereignisse

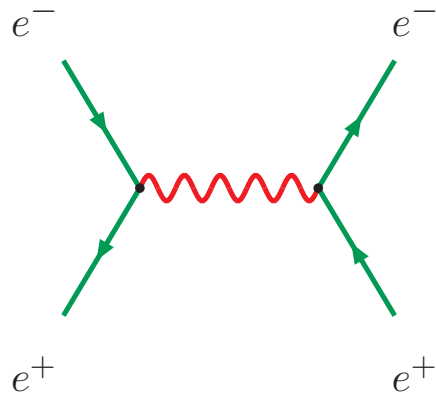
---

● Experiment:  $e^+e^-$

# Ereignisse

● Experiment:  $e^+e^-$

● Mögliche Reaktionen:

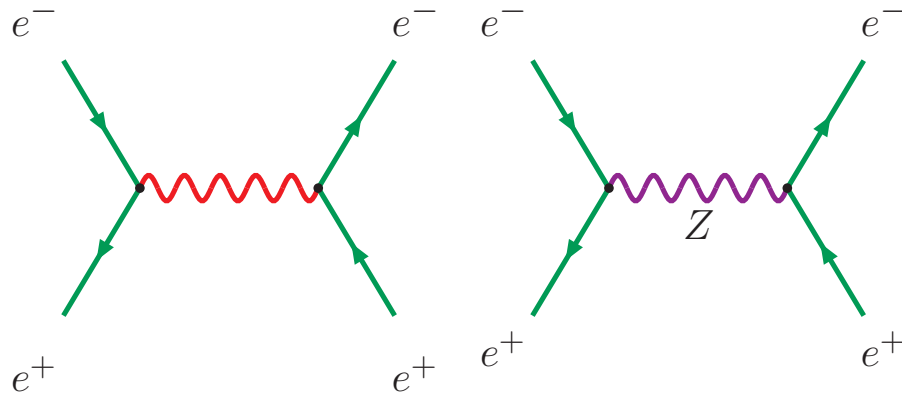




# Ereignisse

● Experiment:  $e^+e^-$

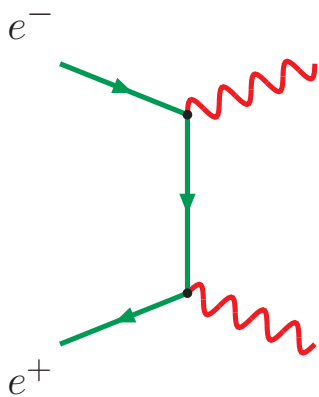
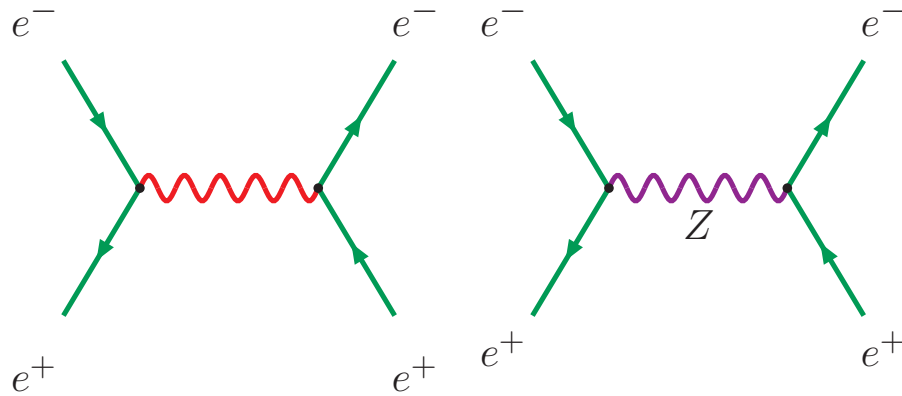
● Mögliche Reaktionen:



# Ereignisse

● Experiment:  $e^+e^-$

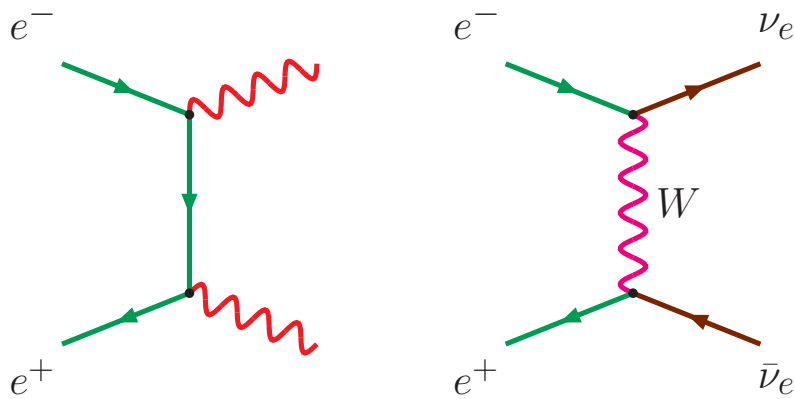
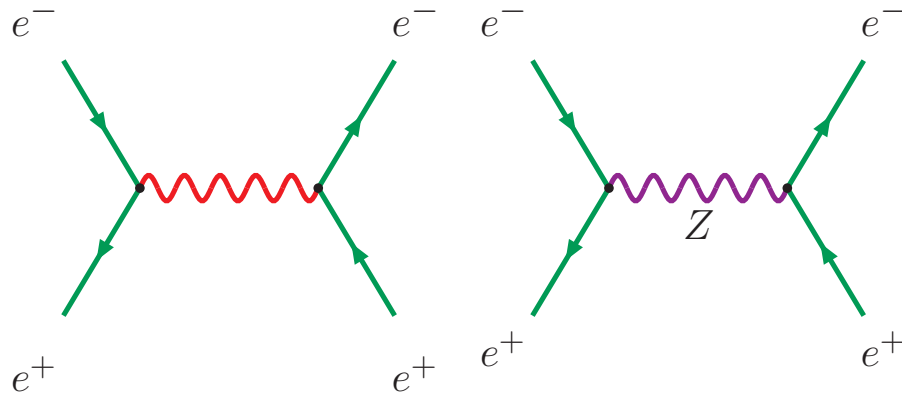
● Mögliche Reaktionen:



# Ereignisse

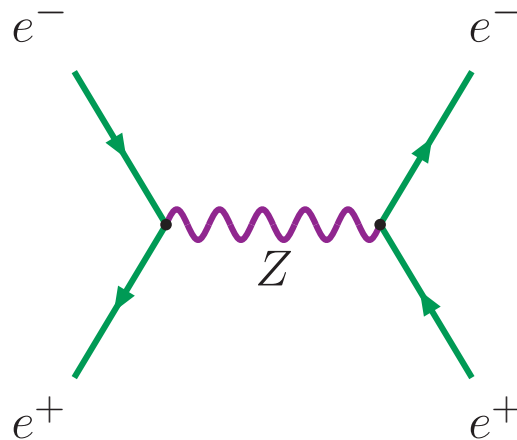
● Experiment:  $e^+e^-$

● Mögliche Reaktionen:



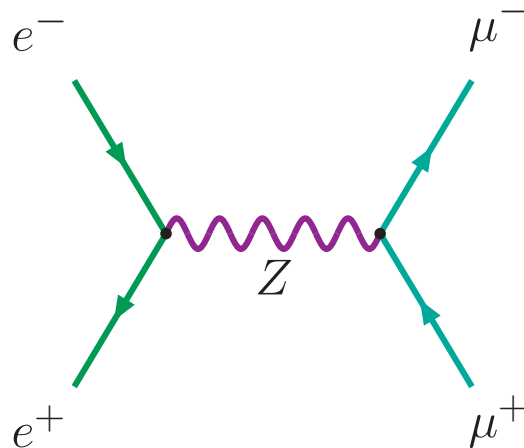
# Ereignisse

- Experiment:  $e^+e^-$
- falls  $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$ : fast ausschließlich



# Ereignisse

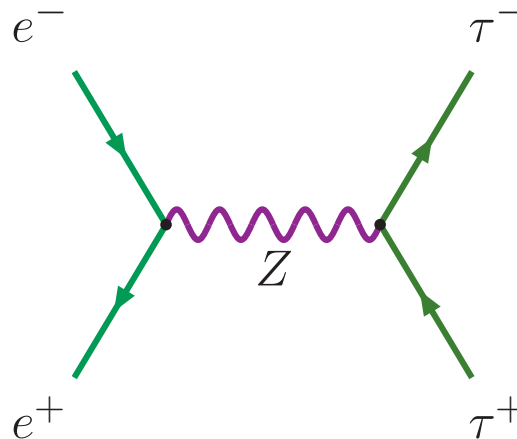
- Experiment:  $e^+e^-$
- falls  $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$ : fast ausschließlich



$$2 m(\mu) = 0.210 \text{ GeV}$$

# Ereignisse

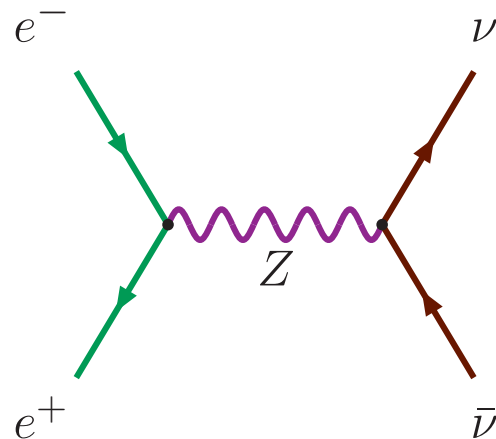
- Experiment:  $e^+e^-$
- falls  $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$ : fast ausschließlich



$$2 m(\tau) = 3.5 \text{ GeV}$$

# Ereignisse

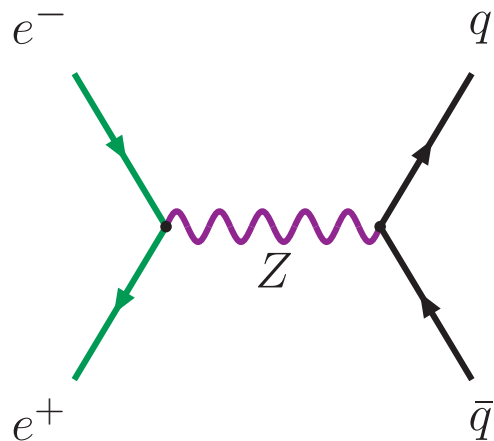
- Experiment:  $e^+e^-$
- falls  $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$ : fast ausschließlich



$$2m(\nu) \approx 0 \text{ GeV}$$

# Ereignisse

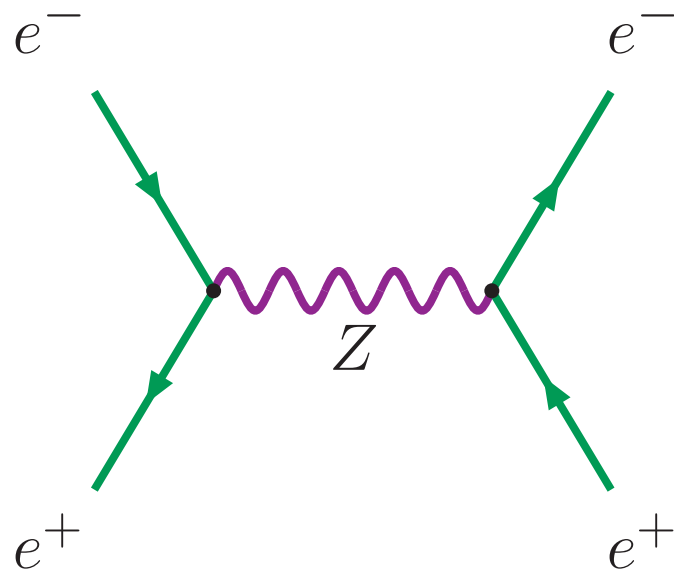
- Experiment:  $e^+e^-$
- falls  $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$ : fast ausschließlich



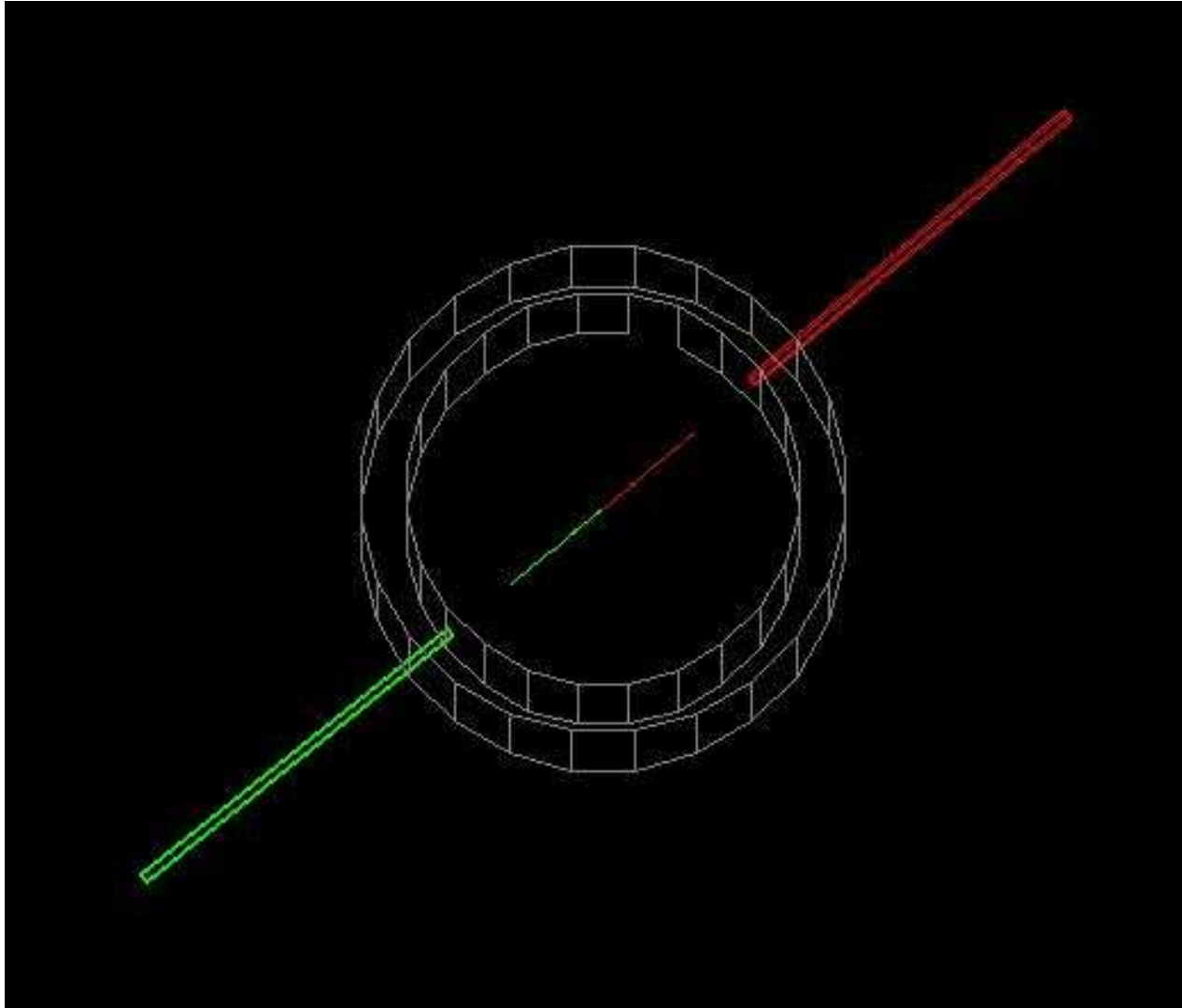
alle außer  $q = t$ :  
 $2m(t) = 346 \text{ GeV}$



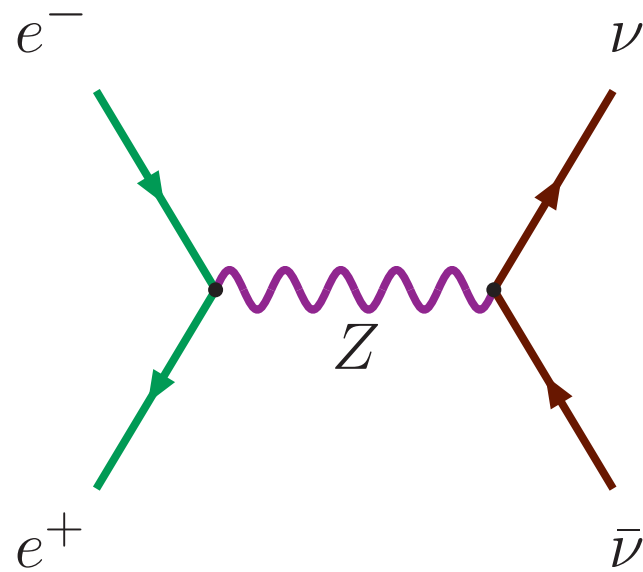
# Beobachtung



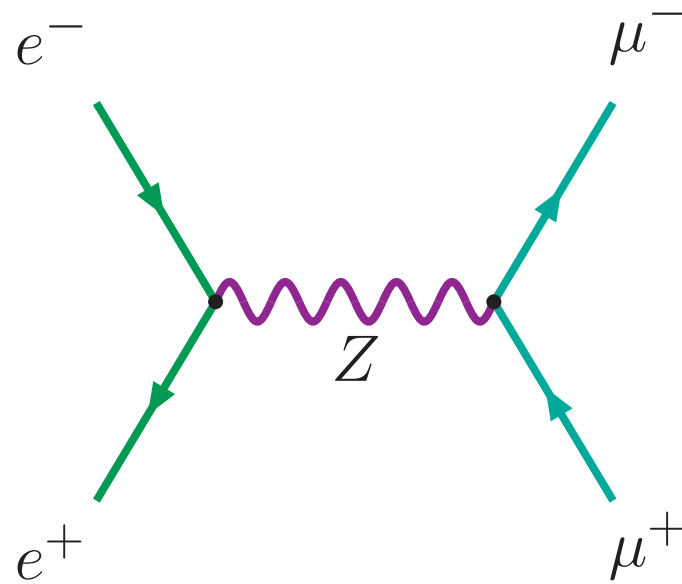
# Beobachtung



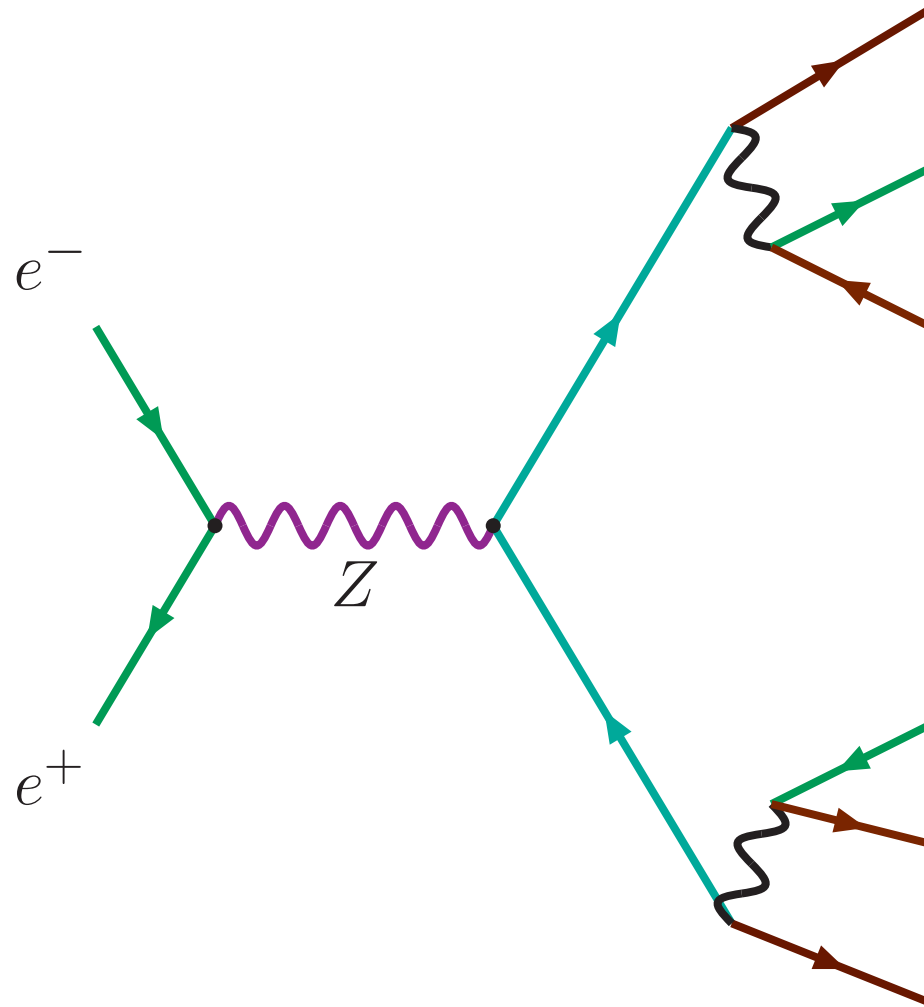
# Beobachtung



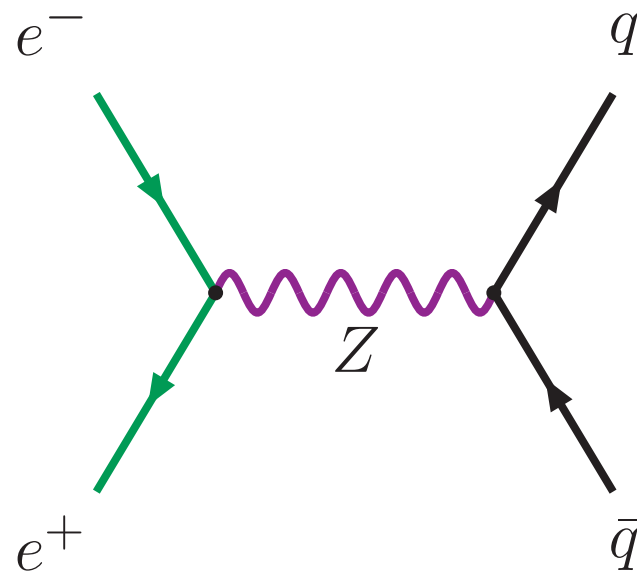
# Beobachtung



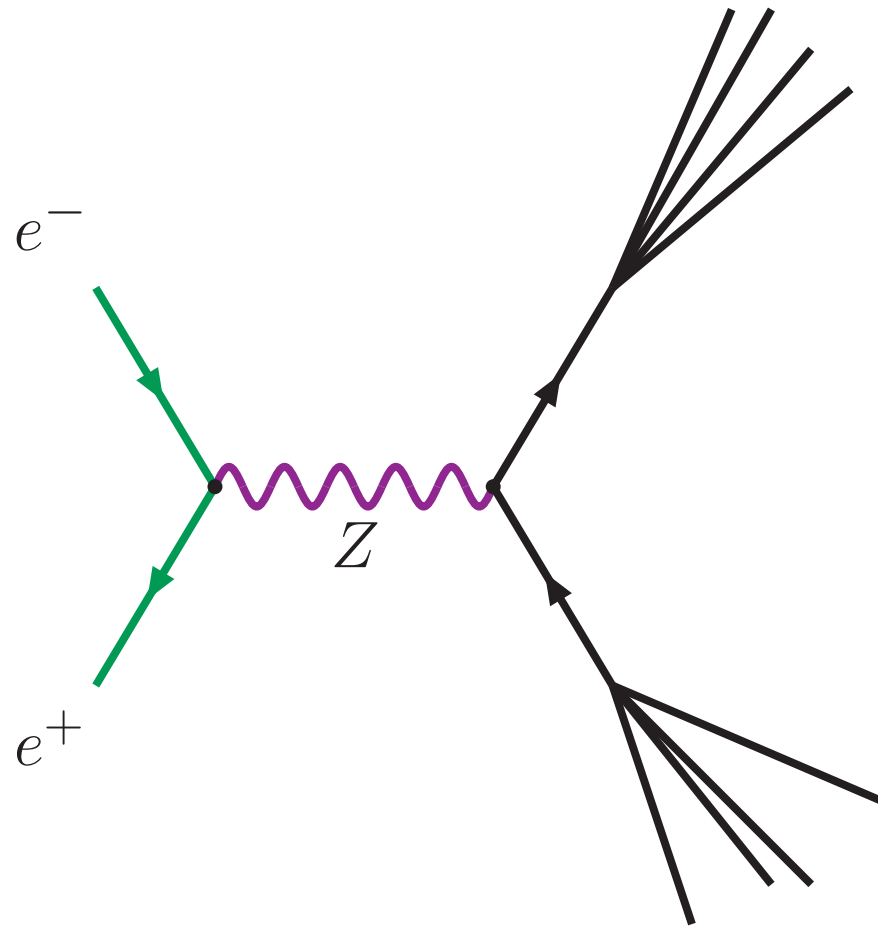
# Beobachtung



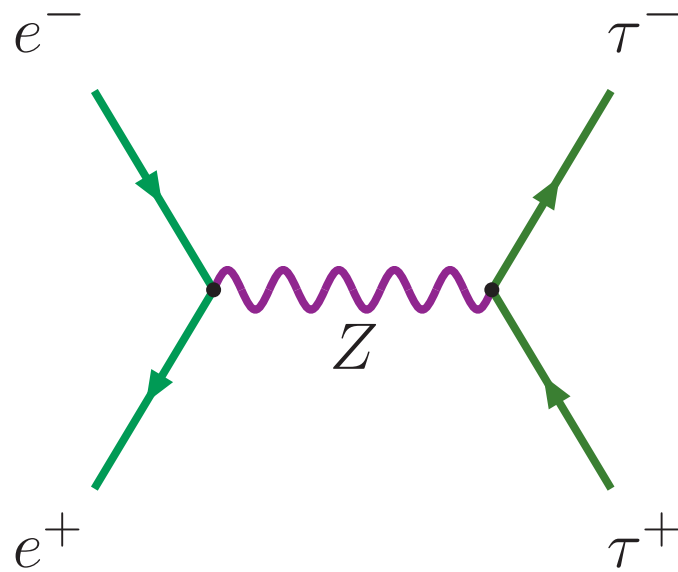
# Beobachtung



# Beobachtung

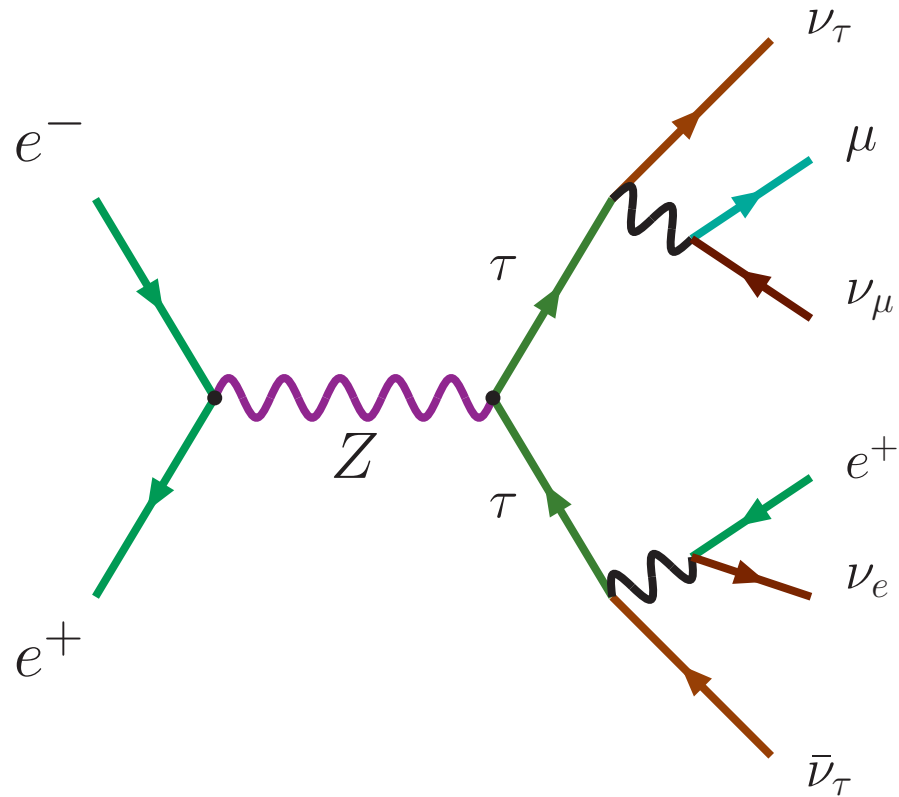


# Beobachtung

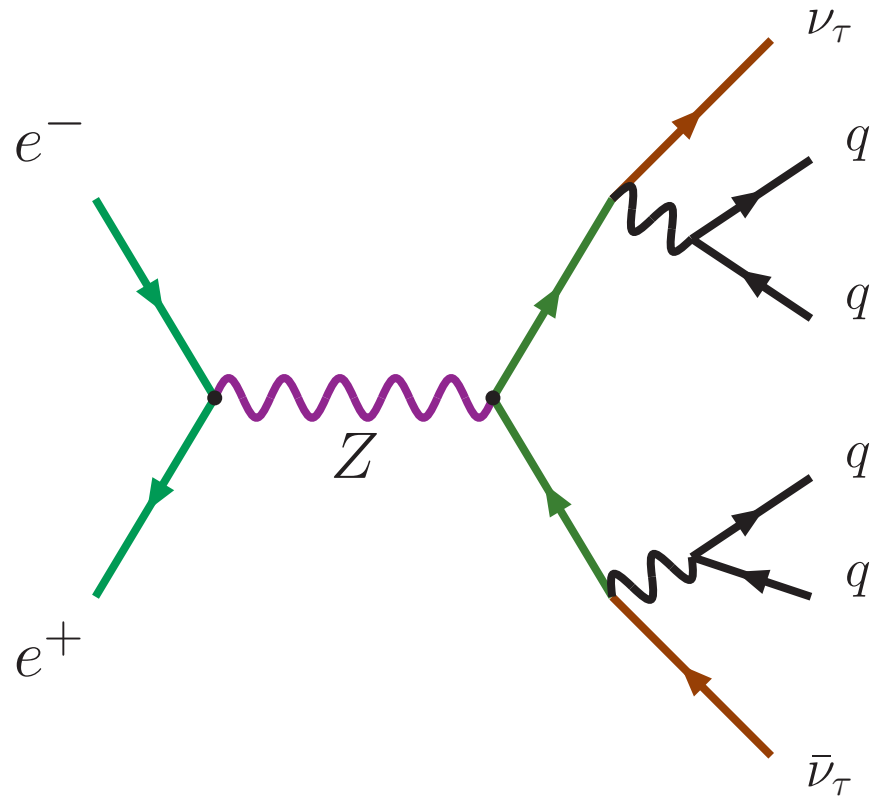




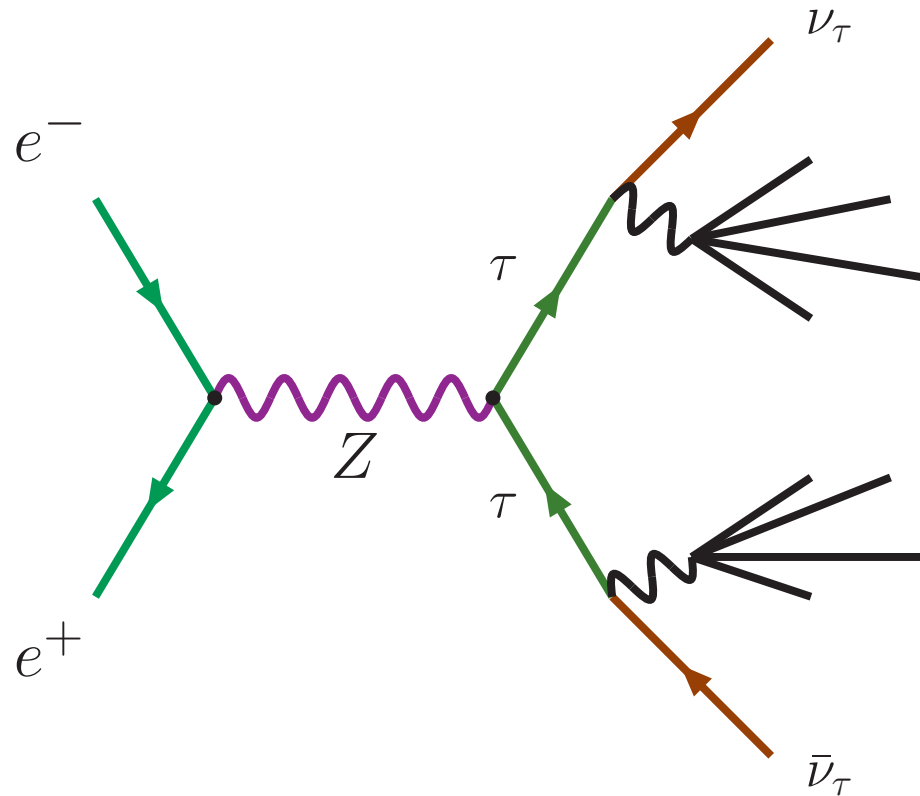
# Beobachtung



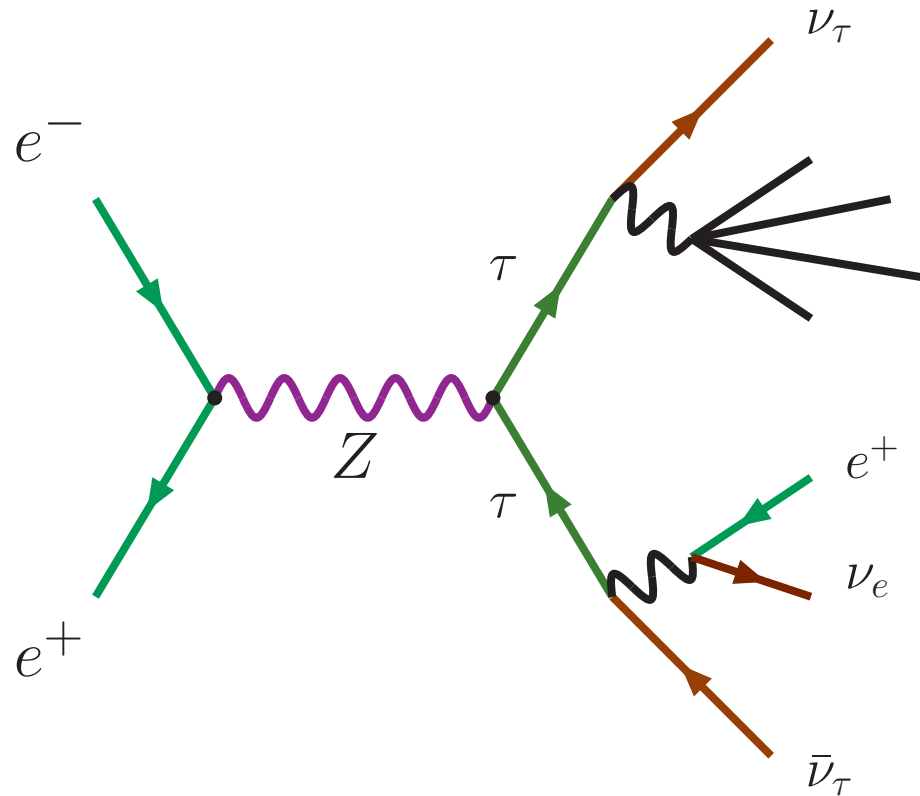
# Beobachtung



# Beobachtung



# Beobachtung



# Schlußbemerkungen

---

- elegante **mathematische Struktur** der Elementarteilchen
  - nur konsistent für  $M = 0!$
  - aber:  $M_W = 80.4 \text{ GeV}$ ,  $M_Z = 91.188 \text{ GeV}$
  - einfachste(?) Lösung: neues Teilchen
    - Higgs-Boson

# Schlußbemerkungen

- elegante **mathematische Struktur** der Elementarteilchen
  - nur konsistent für  $M = 0!$
  - aber:  $M_W = 80.4 \text{ GeV}$ ,  $M_Z = 91.188 \text{ GeV}$
  - einfachste(?) Lösung: neues Teilchen  
→ **Higgs-Boson**
- **Standardmodell** erklärt viel, **und vieles nicht**
  - 3 Familien?
  - $m(\nu) \approx 0$ ,  $m(e) \ll m(t)$ , ...?
  - **Gravitation?**

# Schlußbemerkungen

- elegante **mathematische Struktur** der Elementarteilchen
  - nur konsistent für  $M = 0!$
  - aber:  $M_W = 80.4 \text{ GeV}$ ,  $M_Z = 91.188 \text{ GeV}$
  - einfachste(?) Lösung: neues Teilchen  
→ **Higgs-Boson**
- **Standardmodell** erklärt viel, **und vieles nicht**
  - 3 Familien?
  - $m(\nu) \approx 0$ ,  $m(e) \ll m(t)$ , ...?
  - **Gravitation?**
- weiterführende Theorien:
  - **Supersymmetrie:**  $e \leftrightarrow \tilde{e}$ ,  $q \leftrightarrow \tilde{q}$ ,  $\gamma \leftrightarrow \tilde{\gamma}$ , ...
  - **Stringtheorie:** Fäden statt Punkt-Teilchen?