



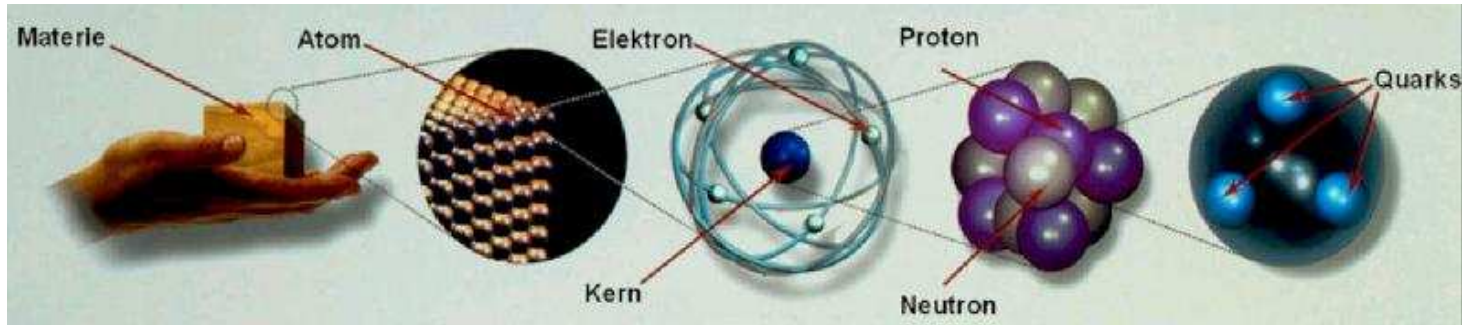
Masterclass 2011
Elementarteilchenphysik

Robert Harlander

Bergische Universität Wuppertal

9. März 2011

Elementarteilchenphysik



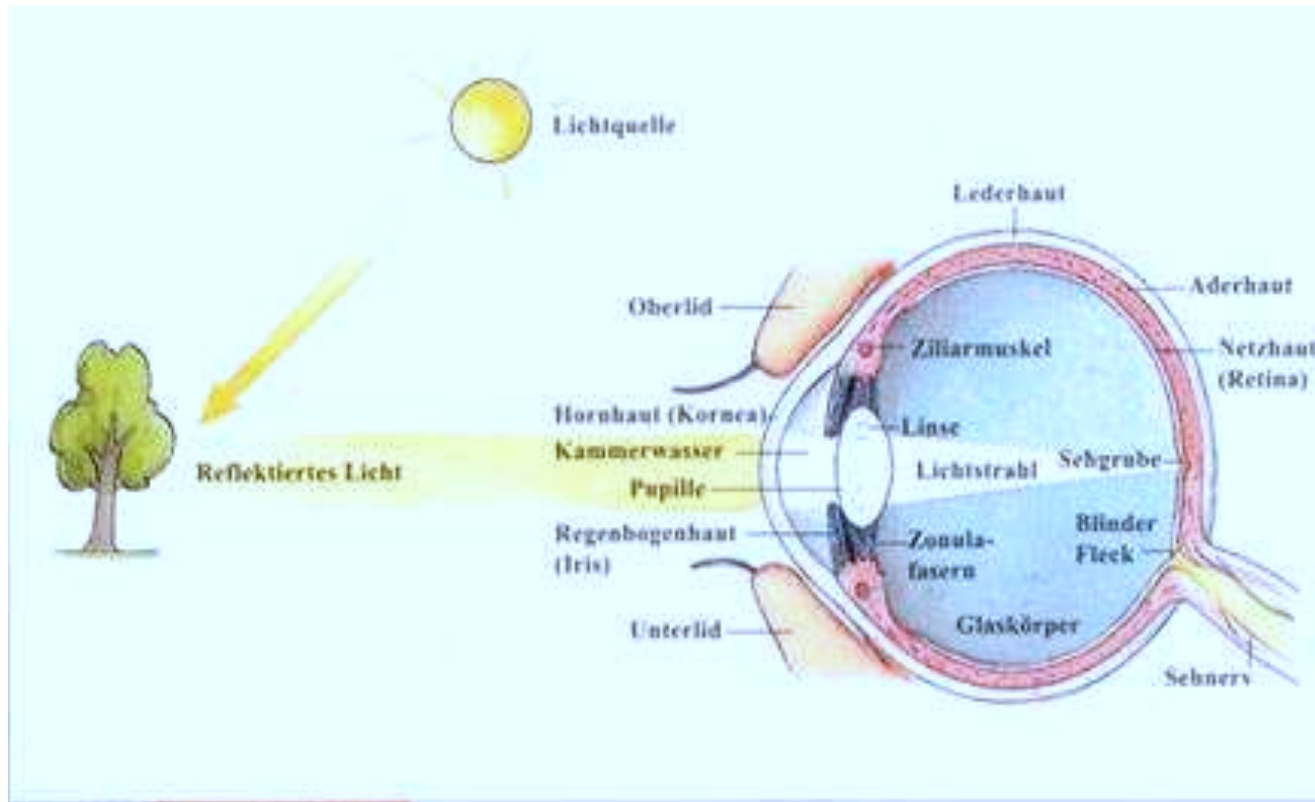
Zentrale Fragen:

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



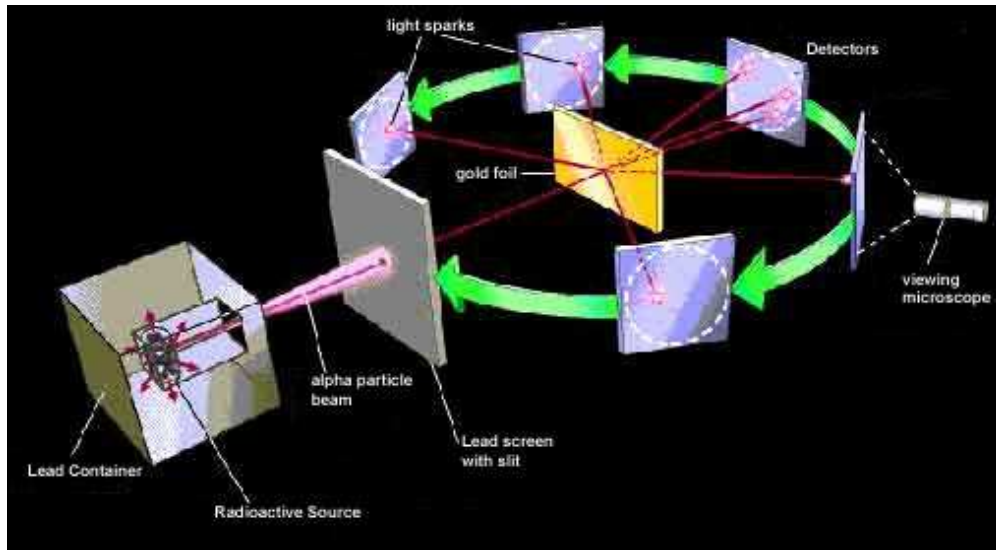
Streu-Experimente

Streu-Experimente



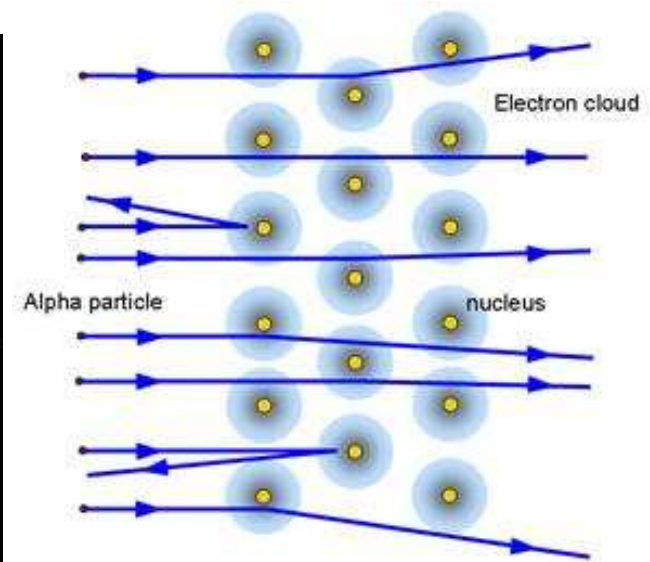
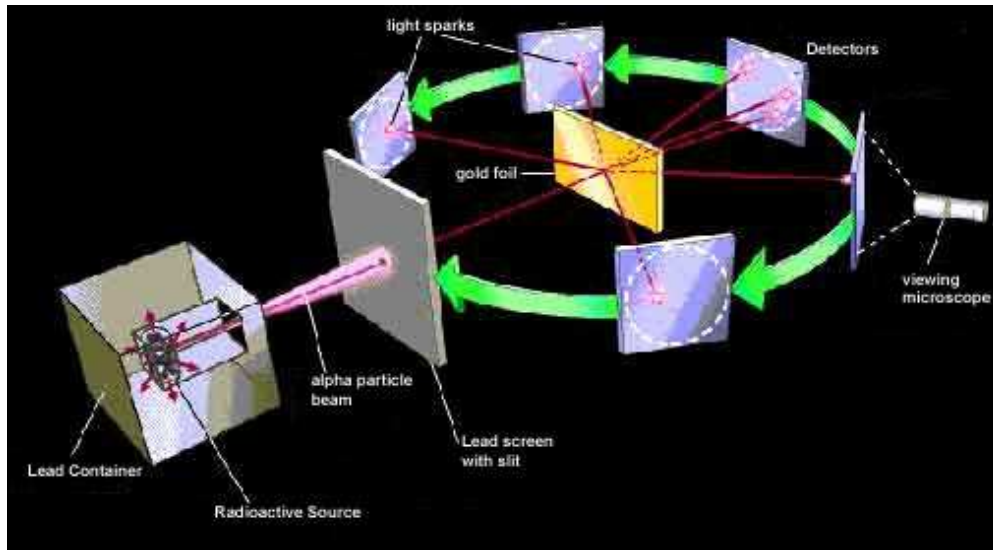
Streu-Experimente

1908 Geiger-Marsden



Streu-Experimente

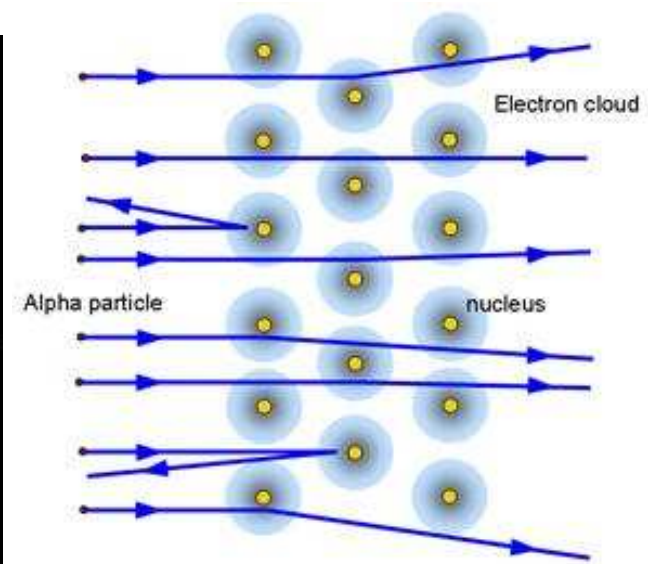
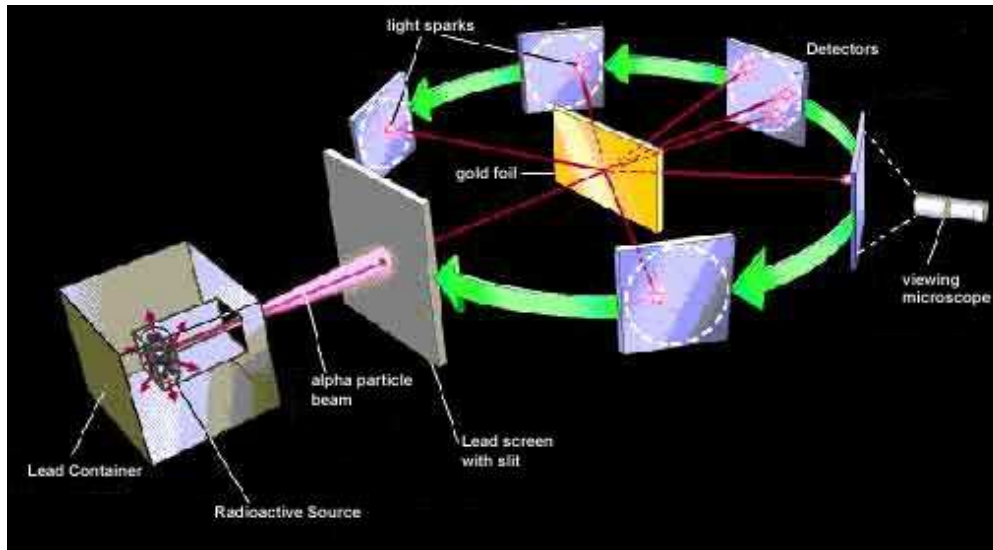
1908 Geiger-Marsden



Rutherford

Streu-Experimente

1908 Geiger-Marsden

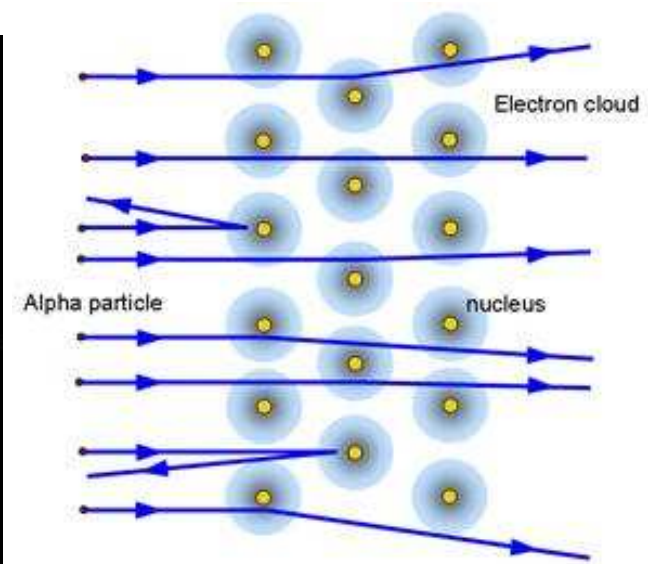
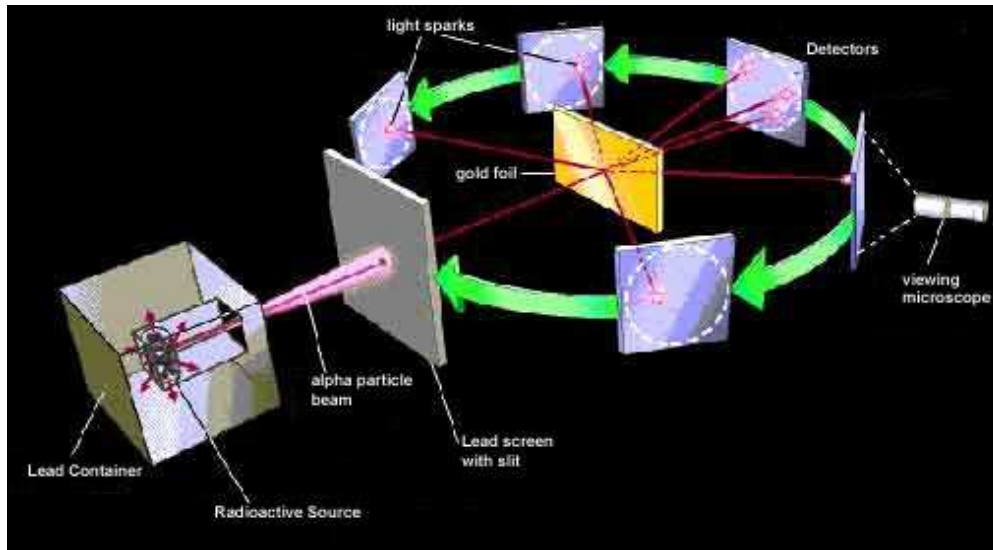


Rutherford

“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.”

Moderne Streu-Experimente

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



Moderne 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

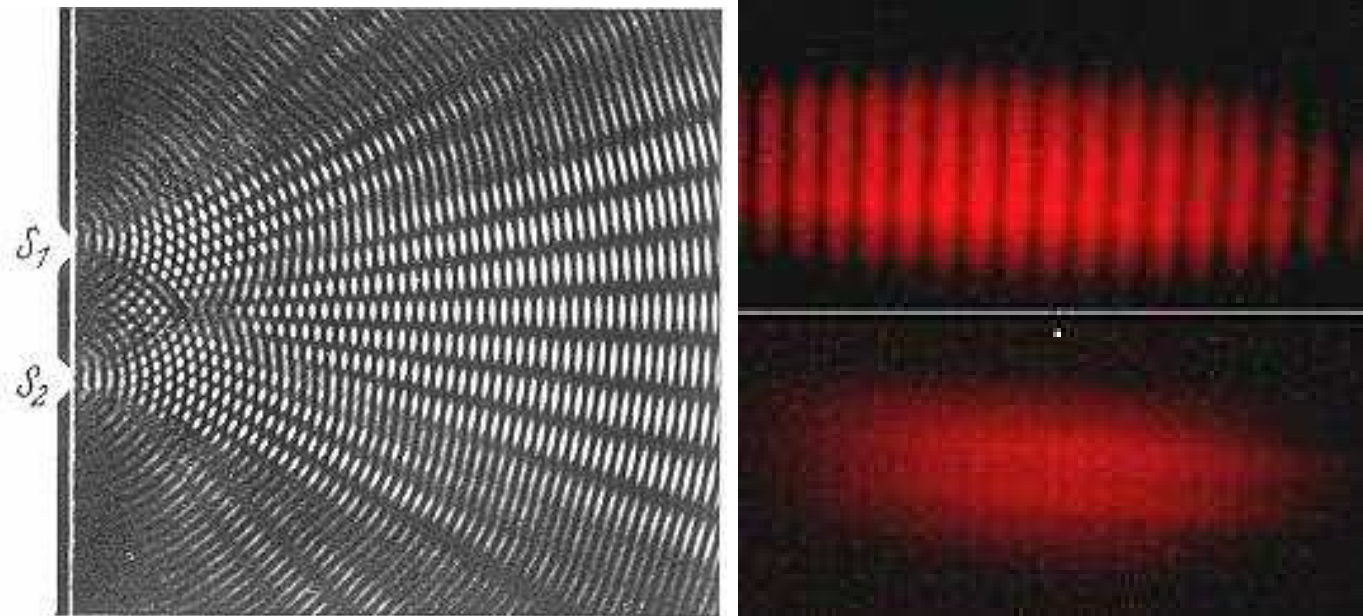
Zwei theoretische Säulen:

- 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

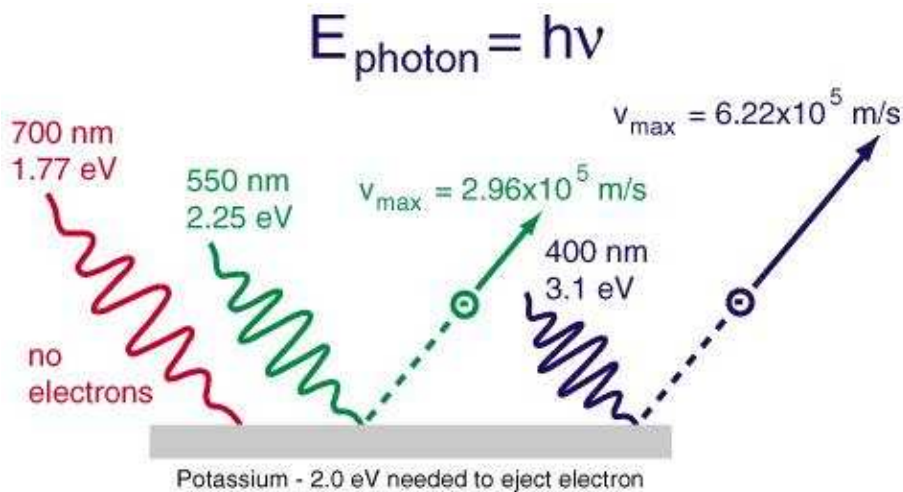
Zwei theoretische Säulen:

- 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

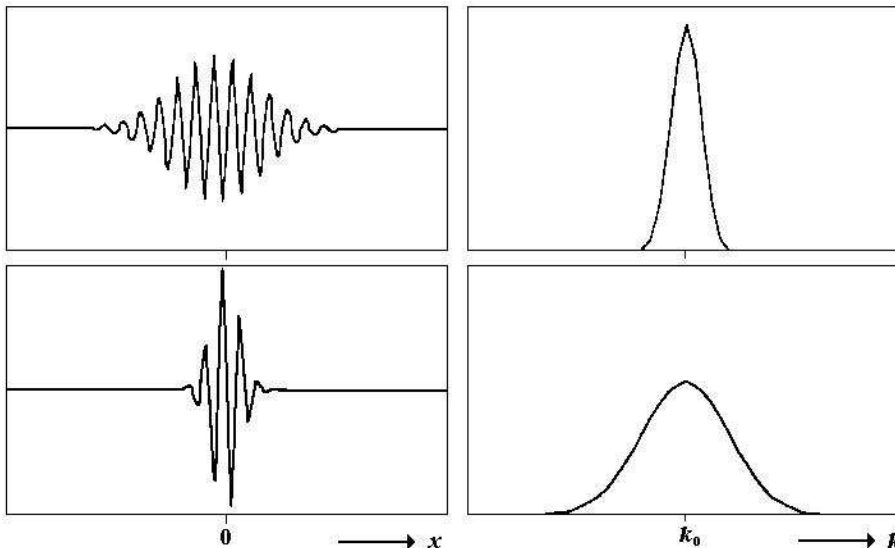
Einstein 1905

Theorie

Zwei theoretische Säulen:

- Quantenmechanik

- Welle-Teilchen-Dualität:



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

De-Broglie-
Wellenlänge

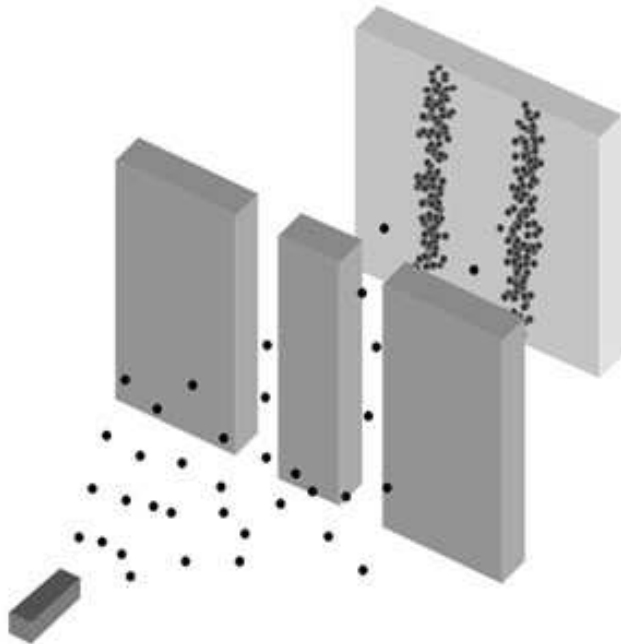
→ Heisenbergsche Unschärferelation:

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

Theorie

Zwei theoretische Säulen:

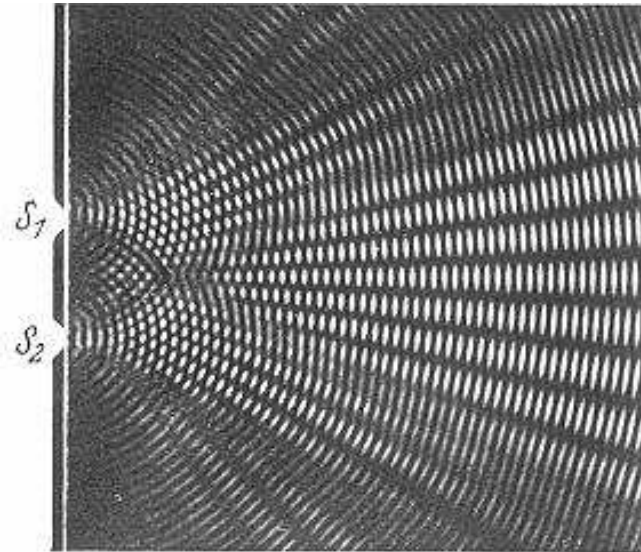
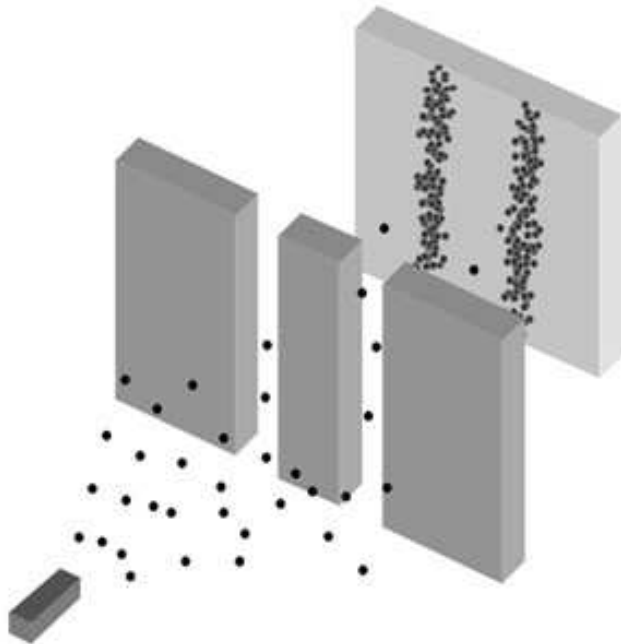
- **Quantenmechanik:** nur **Wahrscheinlichkeiten** vorhersagbar



Theorie

Zwei theoretische Säulen:

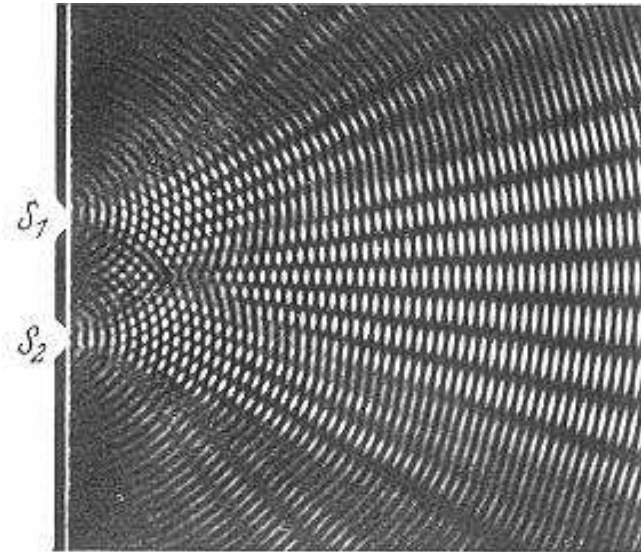
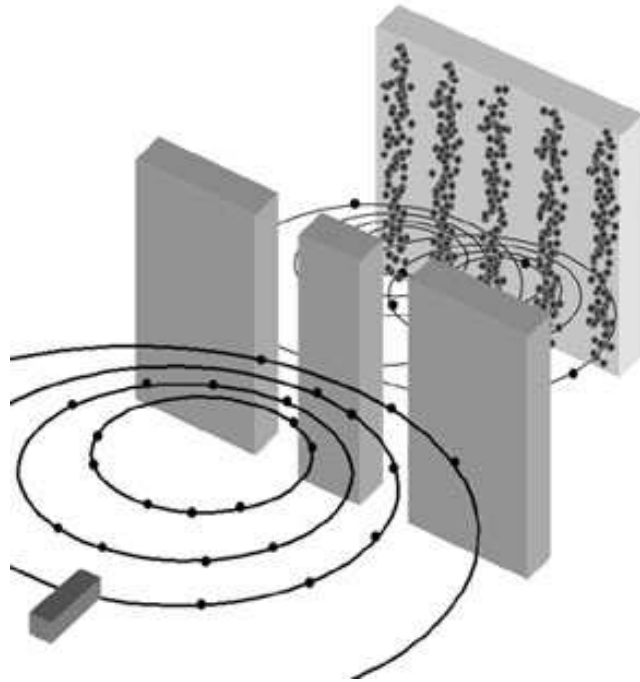
- **Quantenmechanik:** nur **Wahrscheinlichkeiten** vorhersagbar



Theorie

Zwei theoretische Säulen:

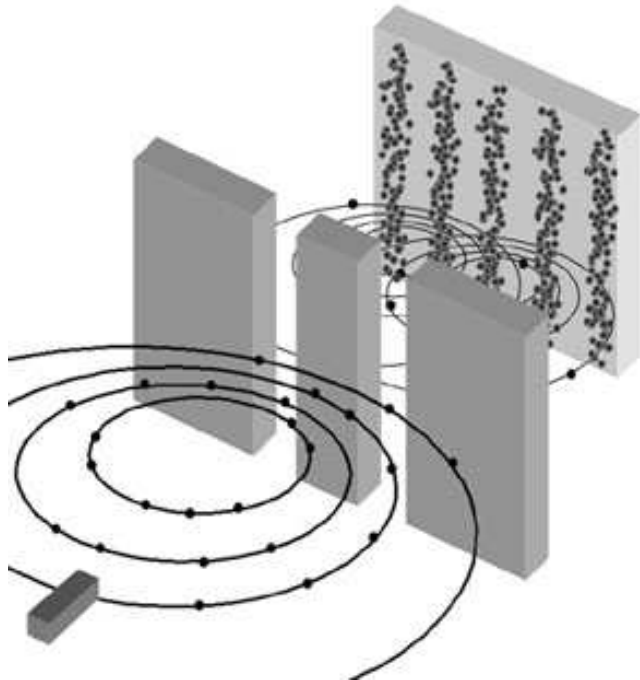
- **Quantenmechanik:** nur **Wahrscheinlichkeiten** vorhersagbar



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! \rightarrow 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! \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

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. $m(e^-) = m(e^+)$

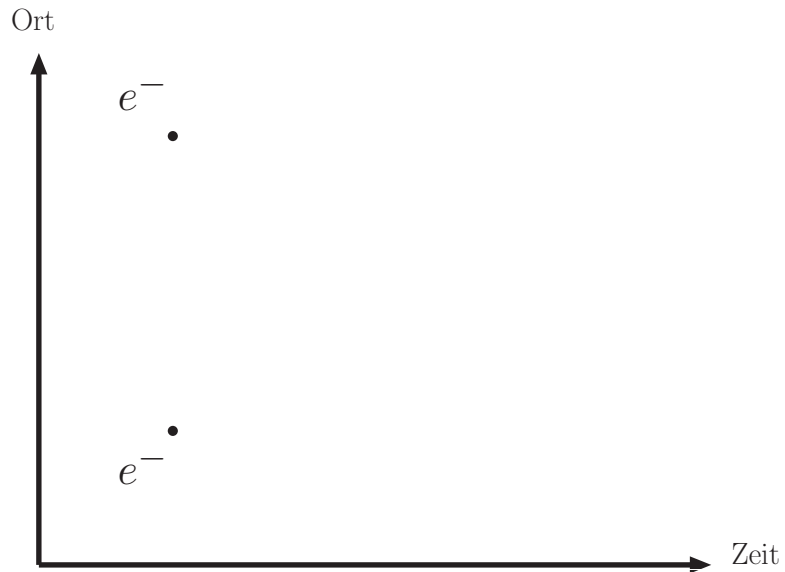
Quantenfeldtheorie

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

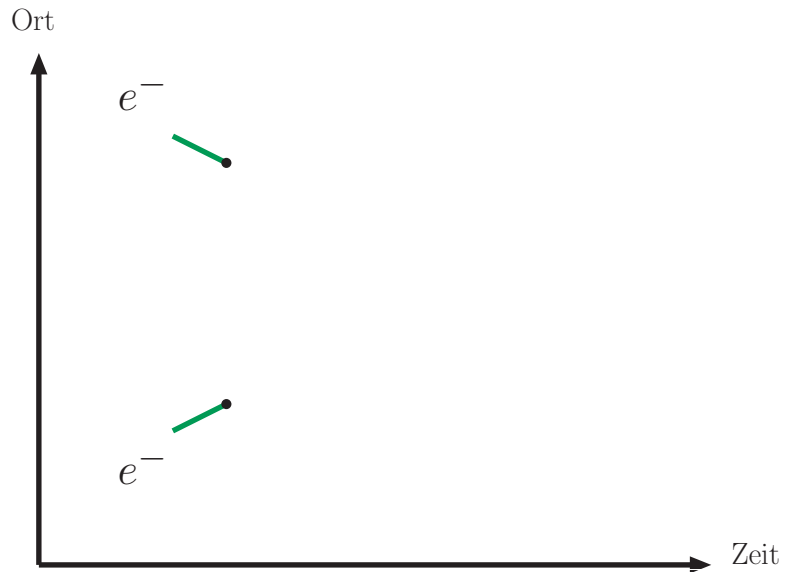
Feynman-Diagramme

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



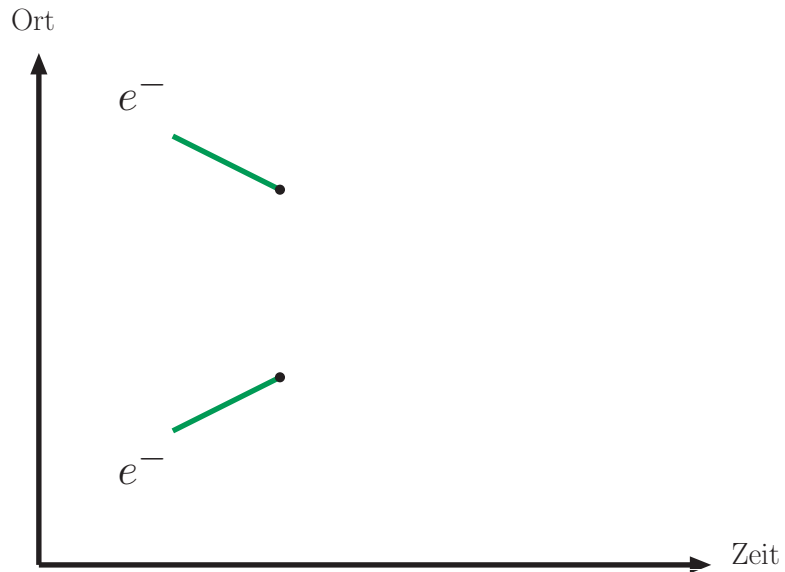
Feynman-Diagramme

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



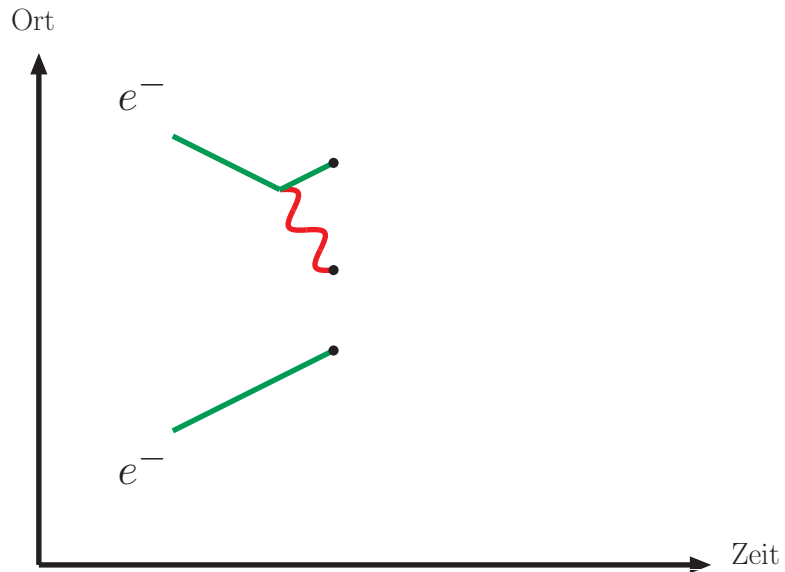
Feynman-Diagramme

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



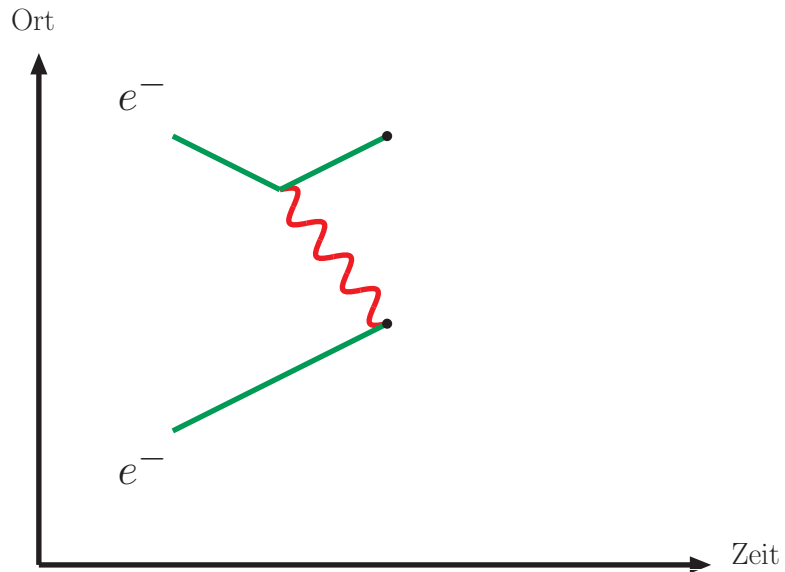
Feynman-Diagramme

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



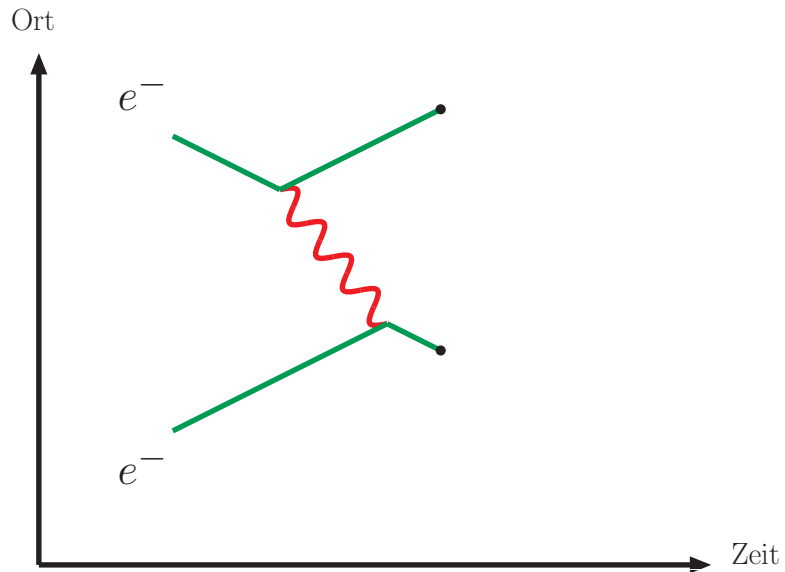
Feynman-Diagramme

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



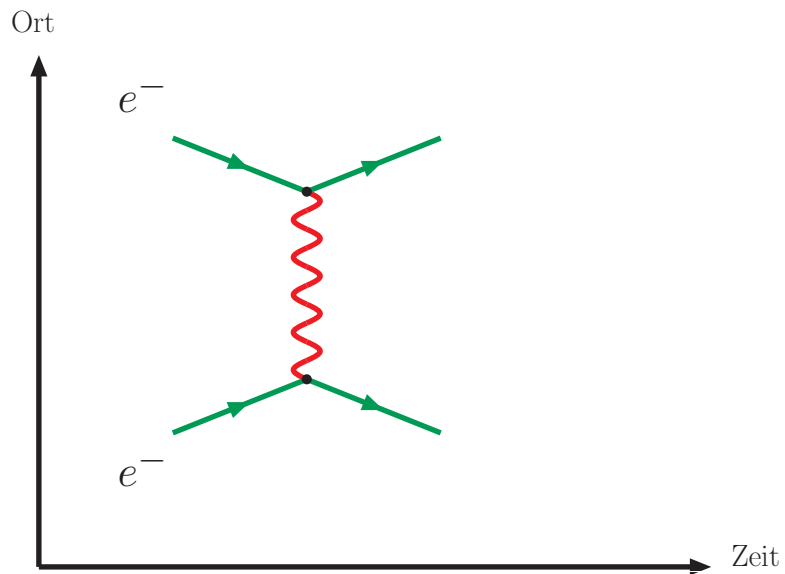
Feynman-Diagramme

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



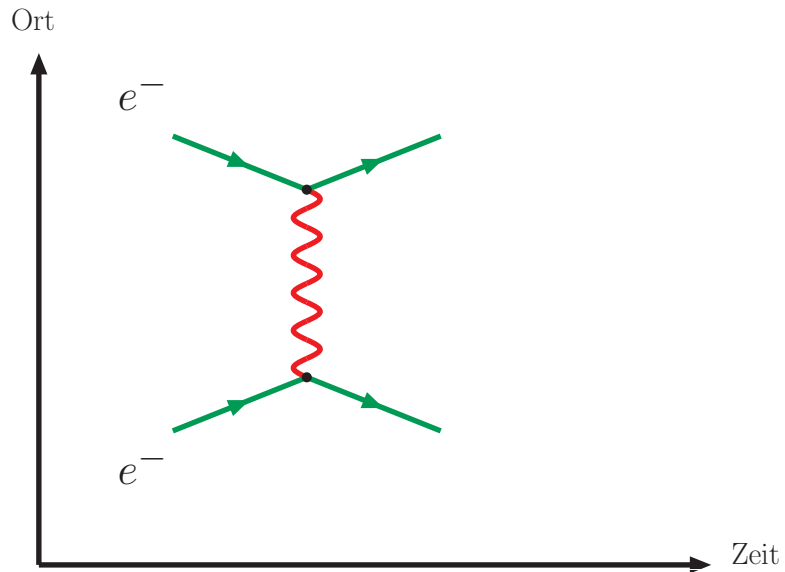
Feynman-Diagramme

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

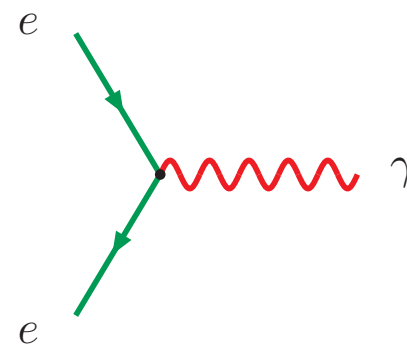


Feynman-Diagramme

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

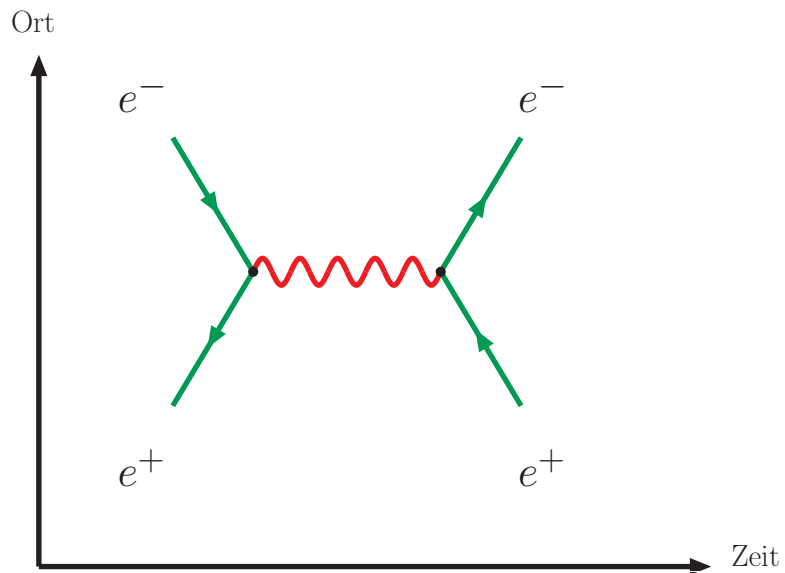


zentraler Baustein: Vertex

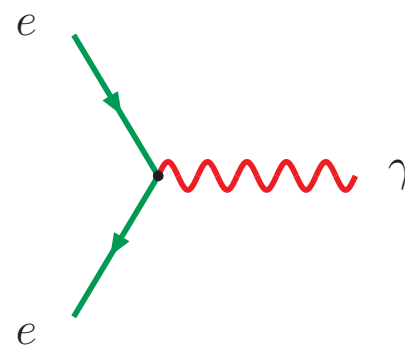


Feynman-Diagramme

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

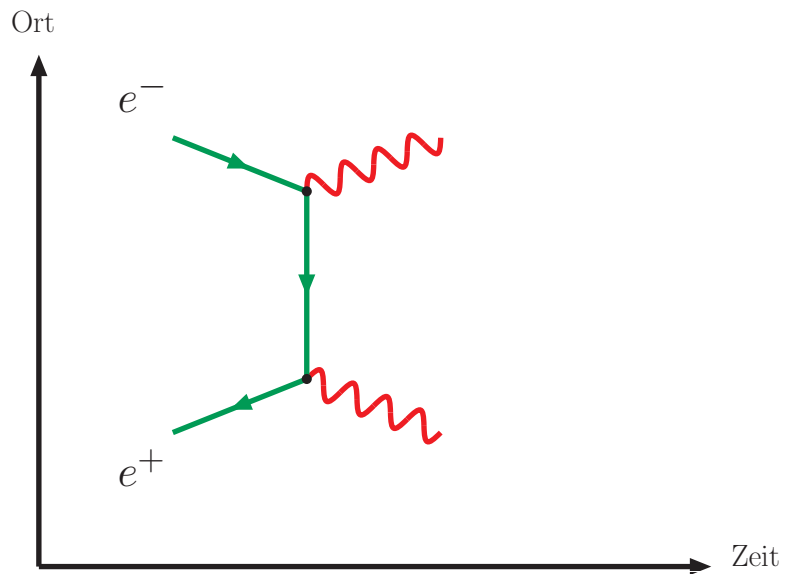


zentraler Baustein: Vertex

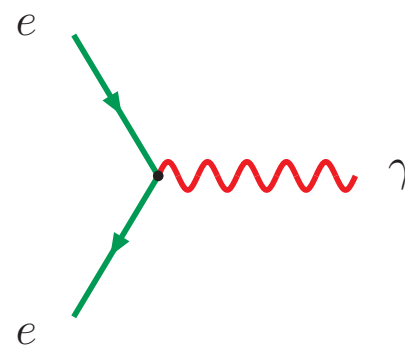


Feynman-Diagramme

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

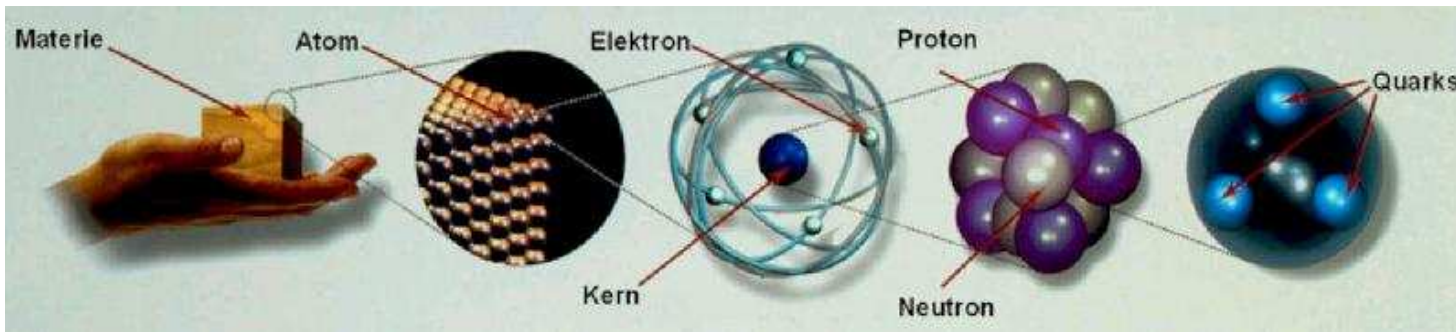
Elementarteilchen

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:

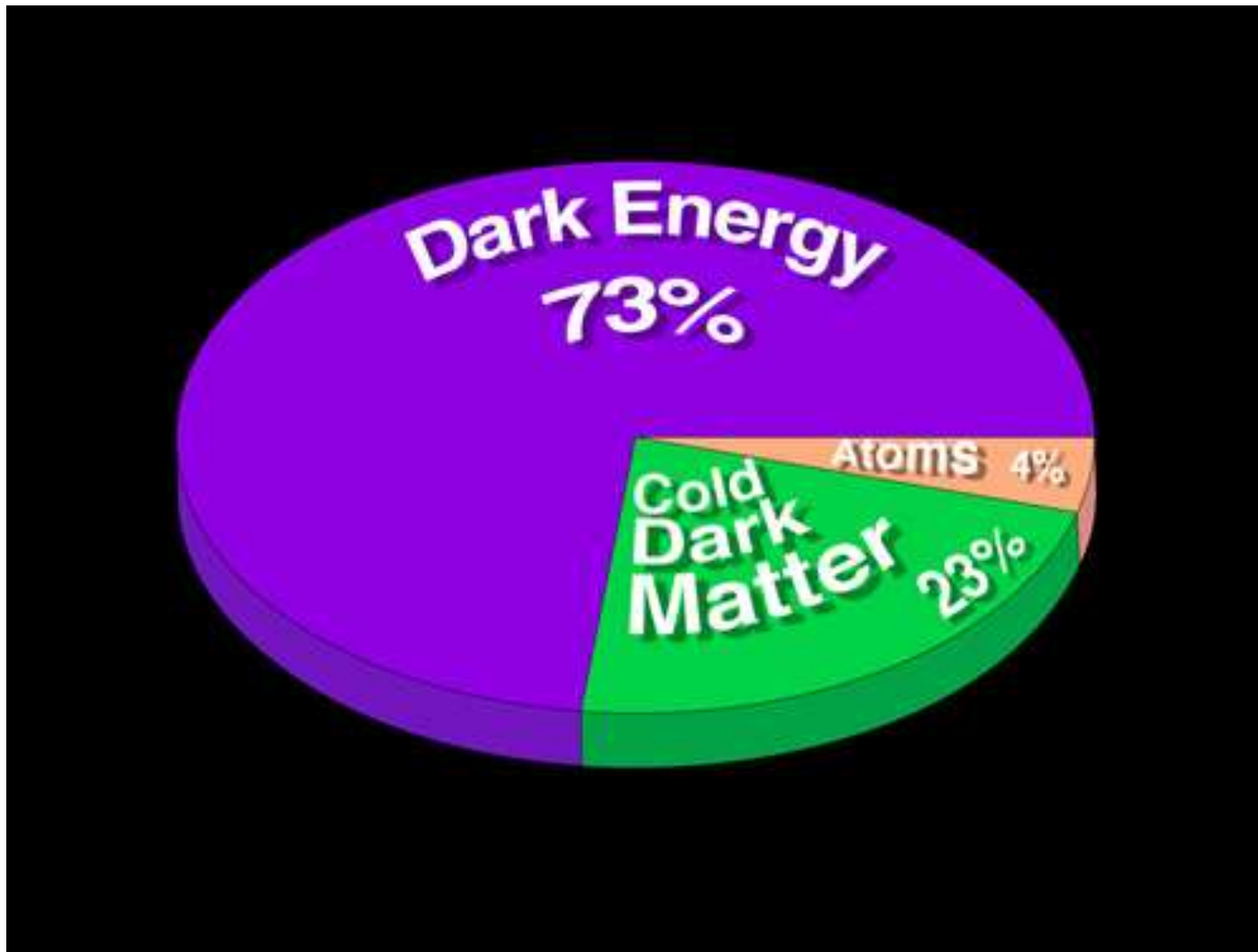
- Proton $p = uud$: Ladung $+1$
- Neutron $n = udd$: Ladung 0



Energiedichte des Universums



Materieverteilung des Universums

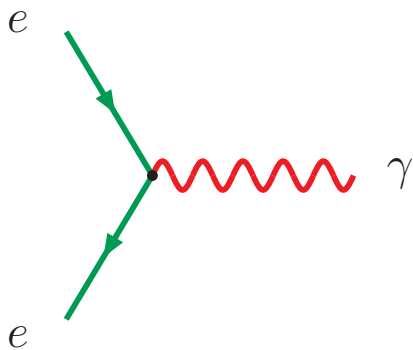


Starke Wechselwirkung

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

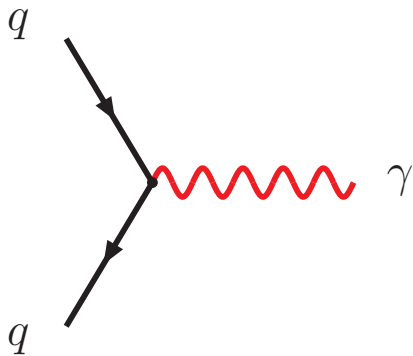
Starke Wechselwirkung

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



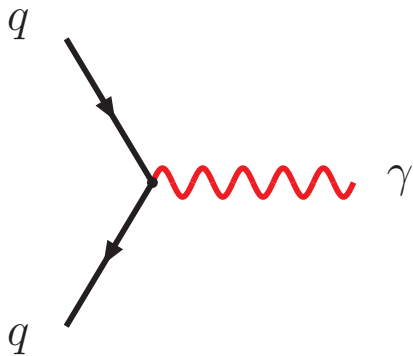
Starke Wechselwirkung

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



Starke Wechselwirkung

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

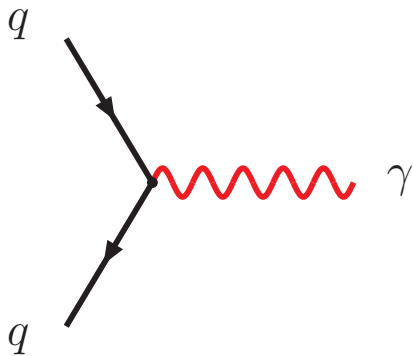


→ zu schwach!

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

Starke Wechselwirkung

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



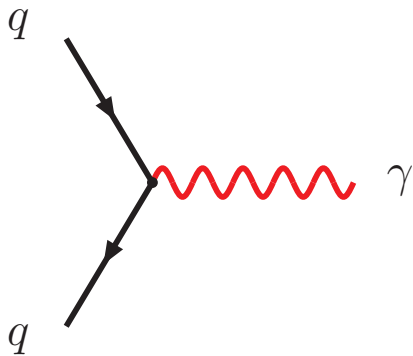
→ zu schwach!

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!

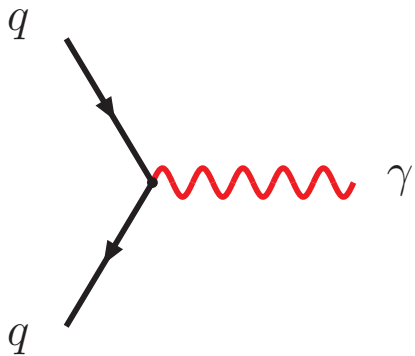
außerdem: $Q(u) = +\frac{2}{3}$, $Q(d) = -\frac{1}{3}$!

Quarks tragen noch andere Ladung:

Starke Wechselwirkung

Starke Wechselwirkung

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

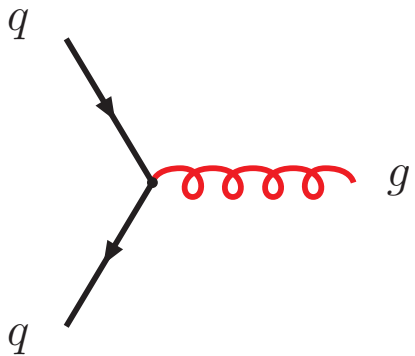


→ zu schwach!

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 Starke Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

Natur der Starke Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

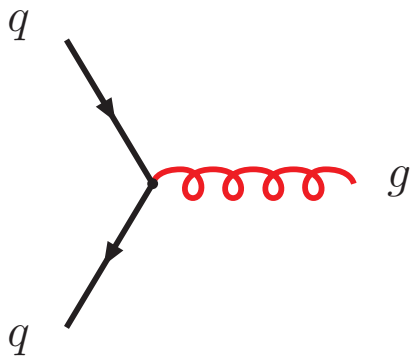
Coulomb

- 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

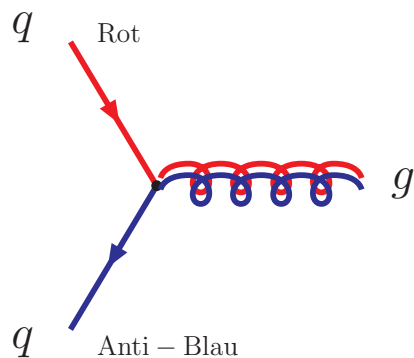
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:



Natur der Starken Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

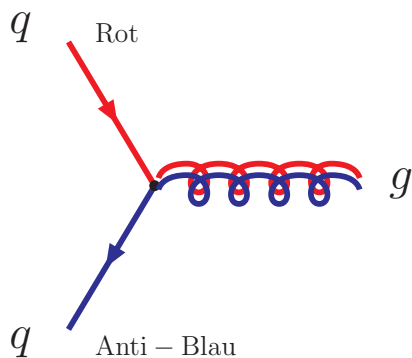
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:



Gluonen tragen selbst Farbladung!

Natur der Starke Wechselwirkung

- Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

Ladung = Vielfaches der Elementarladung

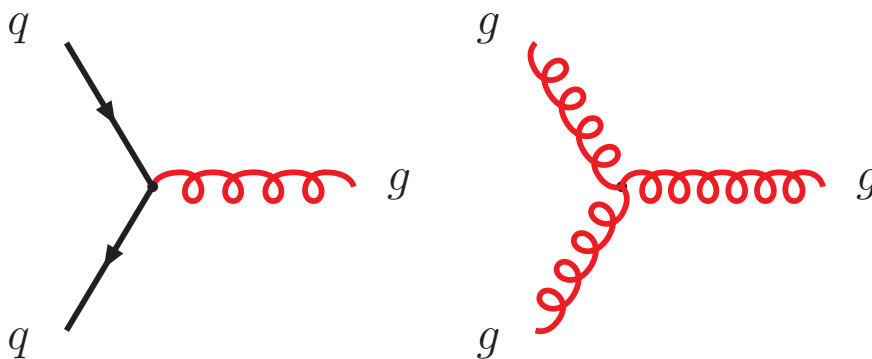
Coulomb

- 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

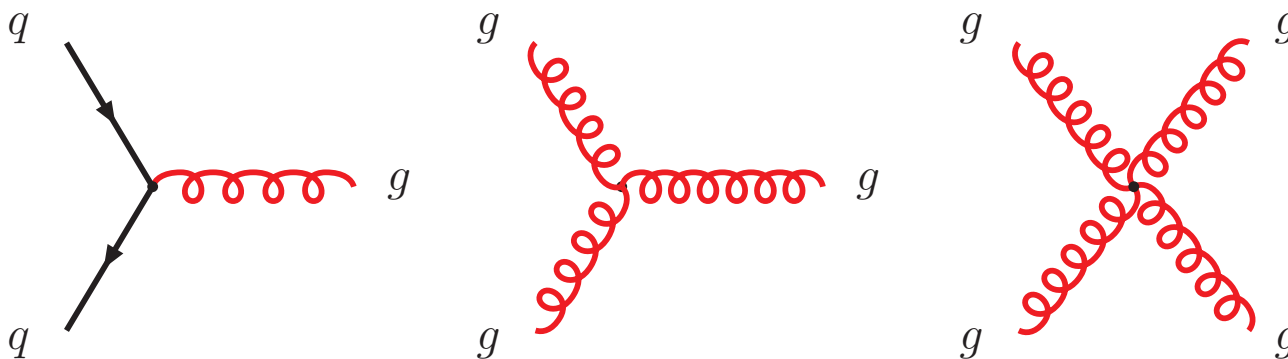
Coulomb

- Starke Wechselwirkung:

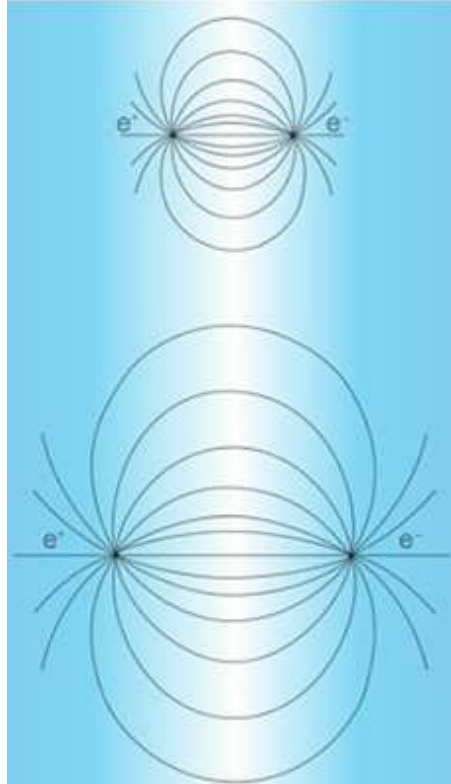
Ladung = Kombination aus drei Ladungs-Arten (Farben)

Rot — Blau — Grün

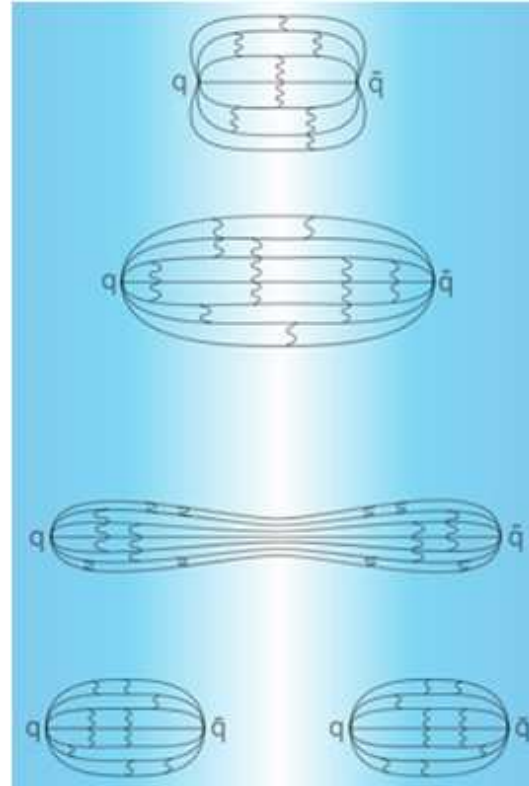
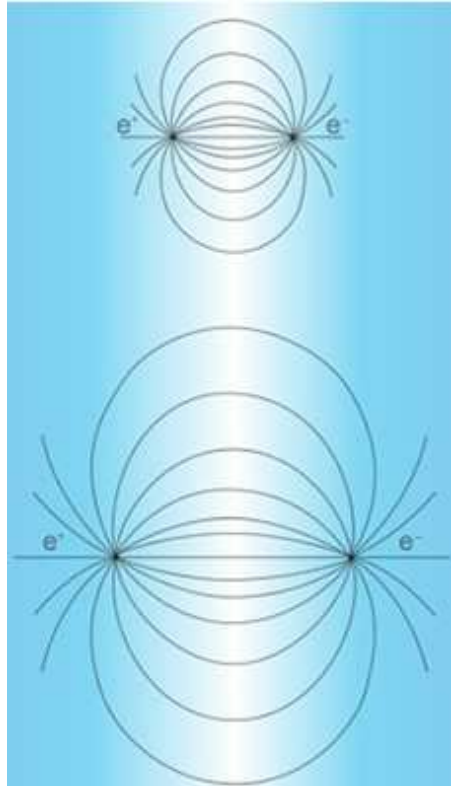
- Quarks treten in 3 verschiedenen Farben auf:



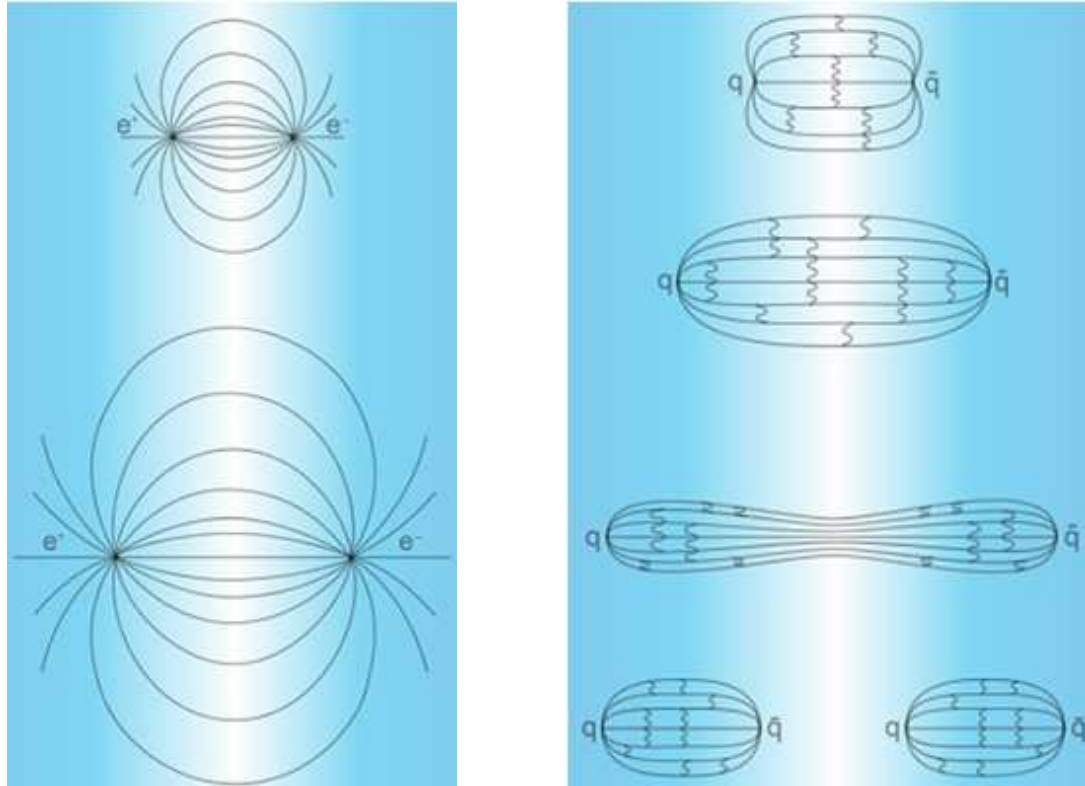
Confinement



Confinement



Confinement

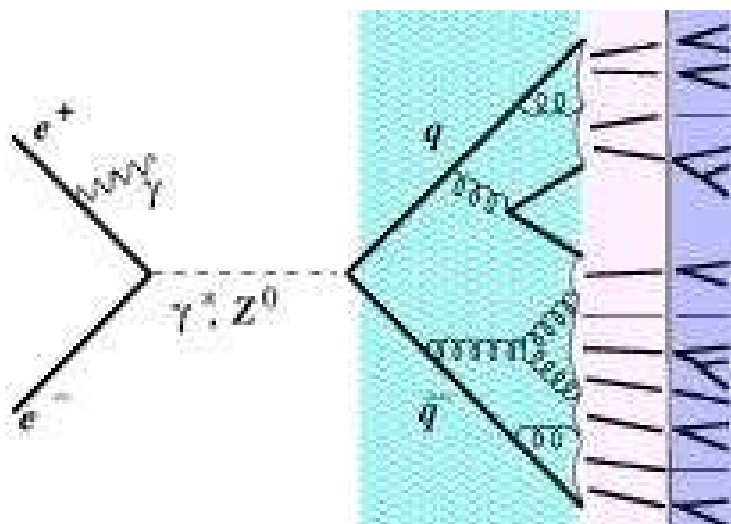


→ Quarks treten nur in „farblosen“ Verbänden auf:

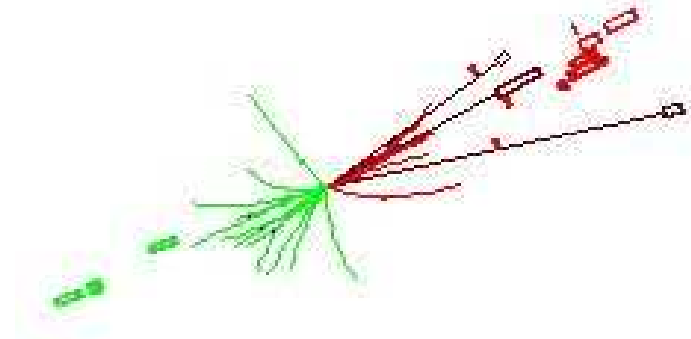
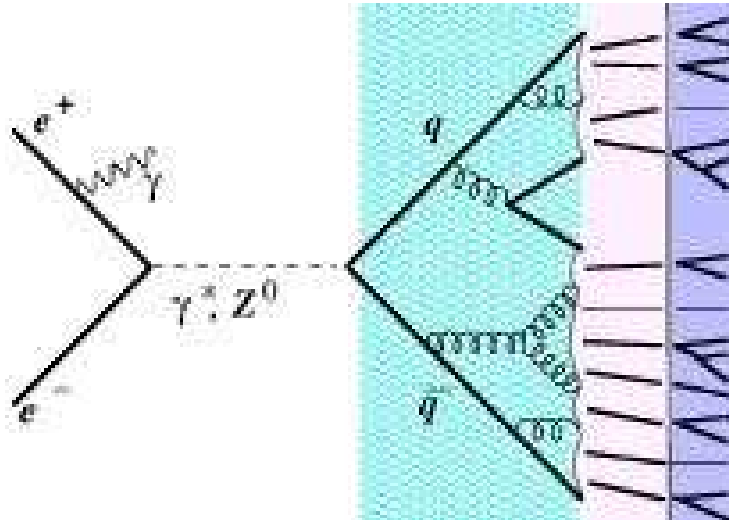
● qqq : Baryonen (z.B. Proton = uud , Neutron = udd)

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

Jets



Jets

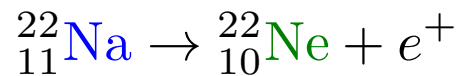




Schwache Wechselwirkung

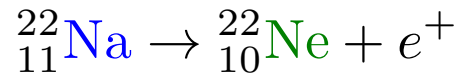
Schwache Wechselwirkung

β -Zerfall: Radioaktiver Zerfall von Kernen, z.B.



Schwache Wechselwirkung

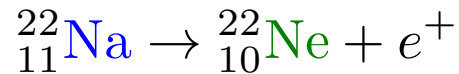
β -Zerfall: Radioaktiver Zerfall von Kernen, z.B.



\Rightarrow elementares Teilchen u „zerfällt“!

Schwache Wechselwirkung

β -Zerfall: Radioaktiver Zerfall von Kernen, z.B.



\Rightarrow elementares Teilchen u „zerfällt“!

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

β -Zerfall

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

β -Zerfall

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

Energie des e^+ :

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

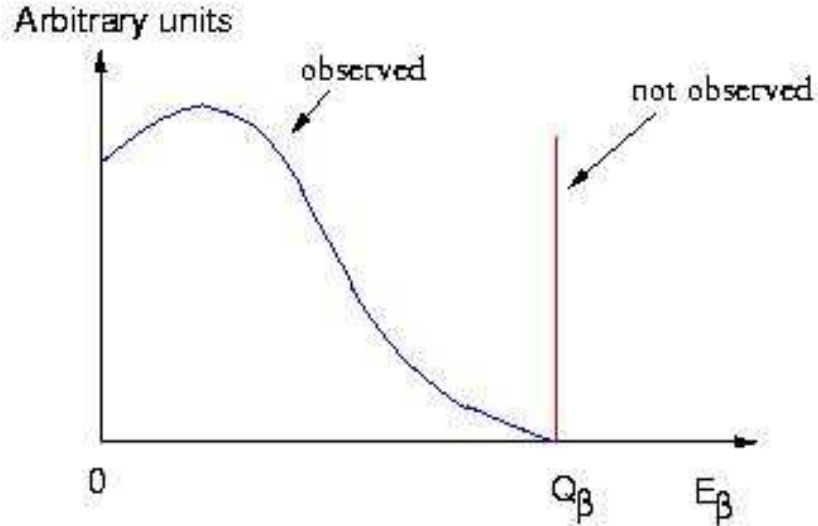
β -Zerfall



Energie des e^+ :

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

aber:



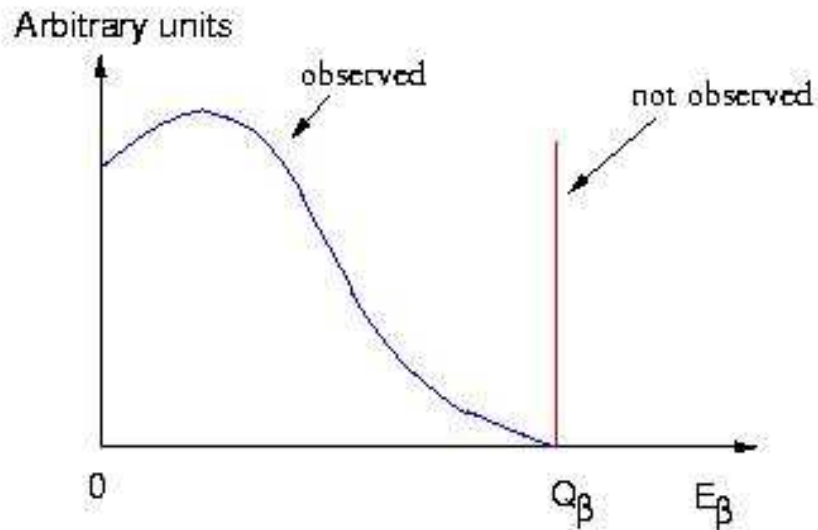
β -Zerfall

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

Energie des e^+ :

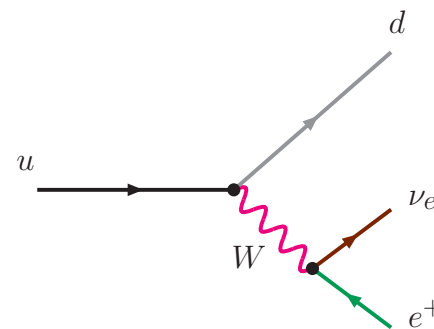
$$E = c^2 \cdot \frac{m_u^2 + m_e^2 - m_d^2}{2m_u}$$

aber:

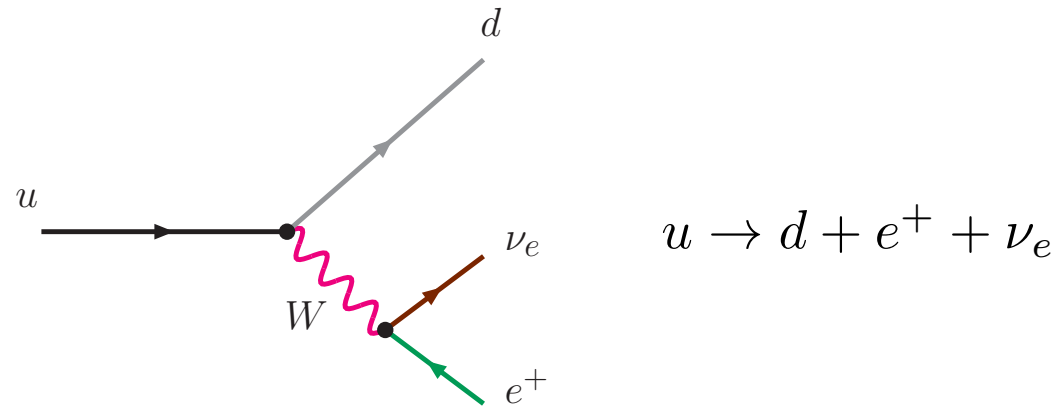


Pauli 1930: **Neutrino!**

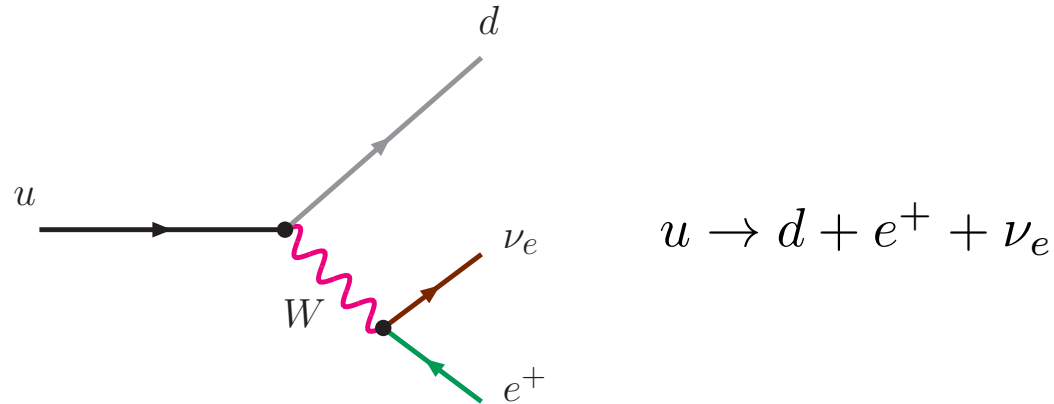
$$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$



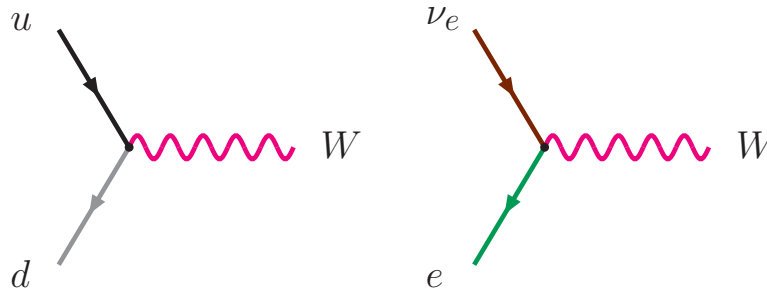
Schwache Wechselwirkung



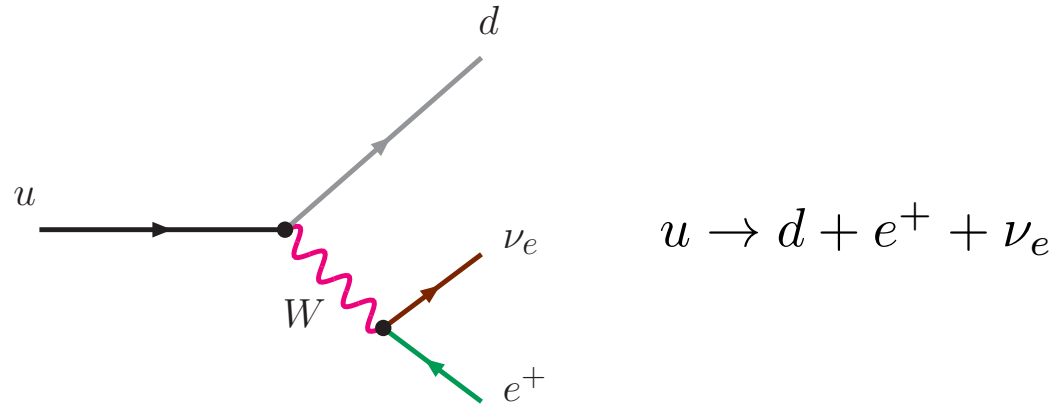
Schwache Wechselwirkung



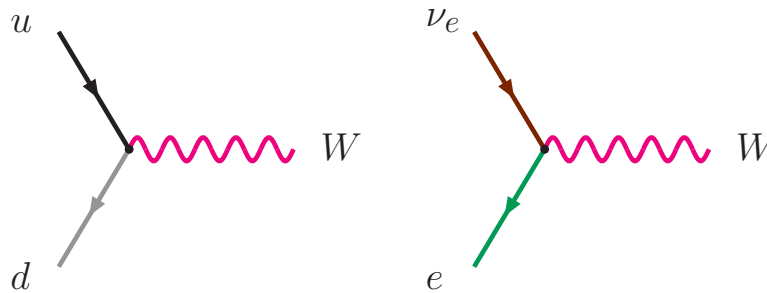
→ neue Wechselwirkung:



Schwache Wechselwirkung

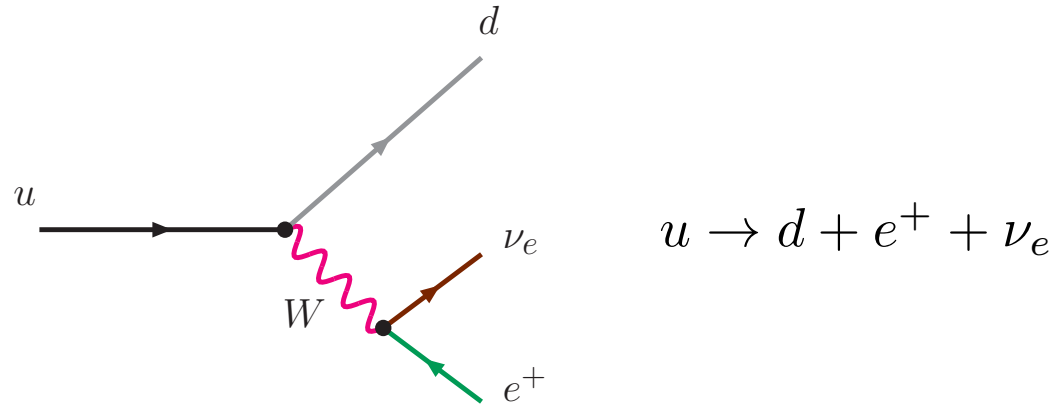


→ neue Wechselwirkung:

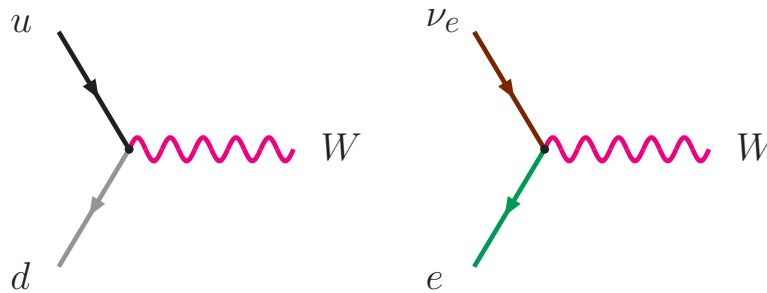


● W -Bosonen: W^+ , W^-

Schwache Wechselwirkung

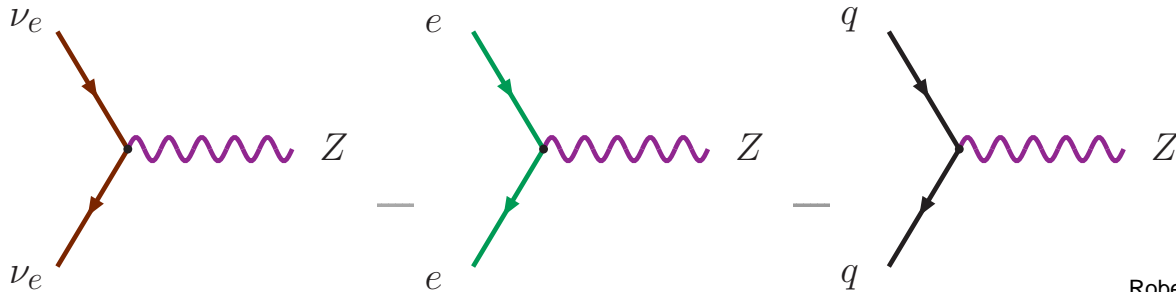


→ neue Wechselwirkung:



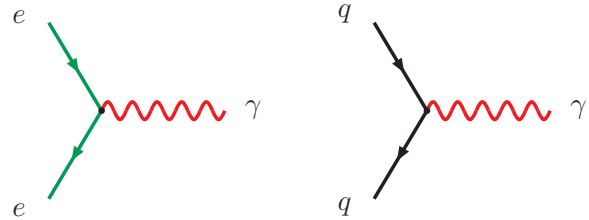
● W -Bosonen: W^+ , W^-

● Mathematik fordert weiteres Austausch-Teilchen: Z^0



Wechselwirkungen

Elektro-Magnetische Wechselwirkung:

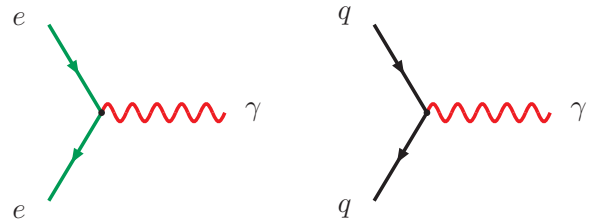


Elektron, Quarks

Photon

Wechselwirkungen

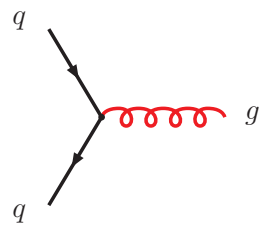
Elektro-Magnetische Wechselwirkung:



Elektron, Quarks

Photon

Starke Wechselwirkung:

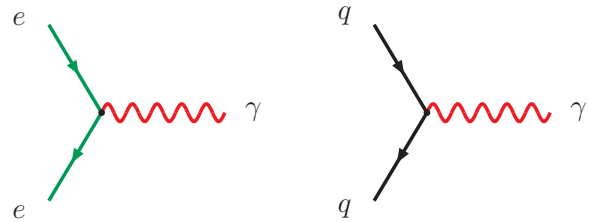


Quarks

Gluonen

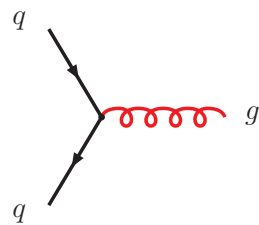
Wechselwirkungen

Elektro-Magnetische Wechselwirkung:



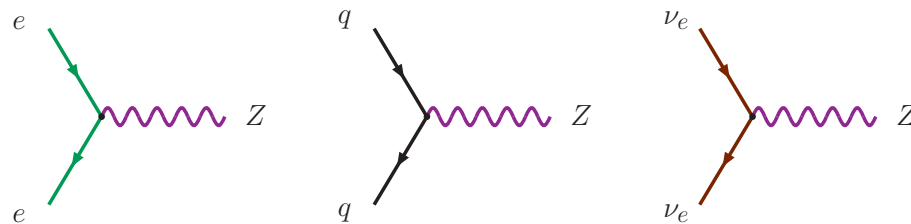
Elektron, Quarks
Photon

Starke Wechselwirkung:



Quarks
Gluonen

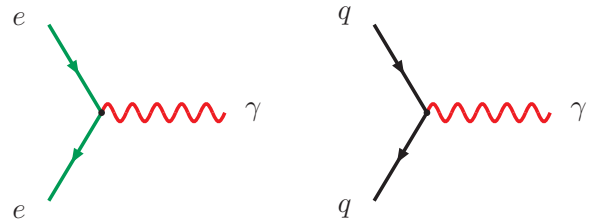
Schwache Wechselwirkung:



Elektron, Quarks,
Neutrinos
Z-Boson

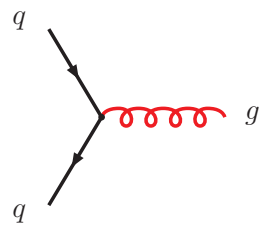
Wechselwirkungen

Elektro-Magnetische Wechselwirkung:



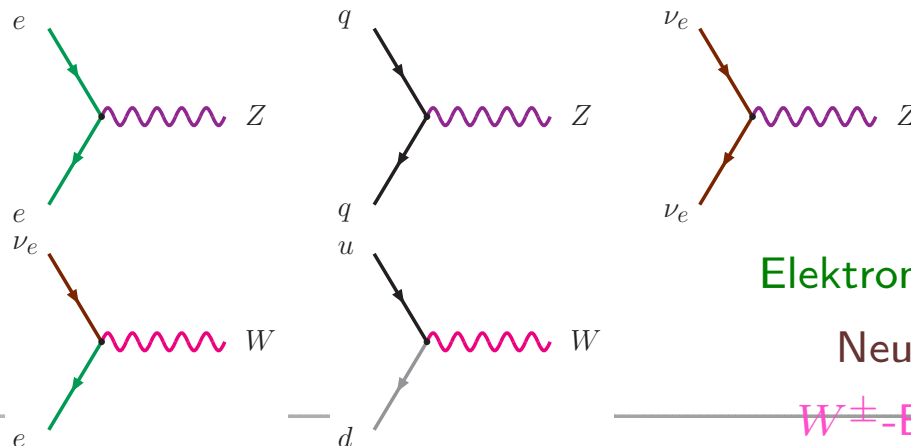
Elektron, Quarks
Photon

Starke Wechselwirkung:



Quarks
Gluonen

Schwache Wechselwirkung:



Elektron, Quarks,
Neutrinos
Z-Boson

Elektron, Quarks,
Neutrinos
W[±]-Bosonen

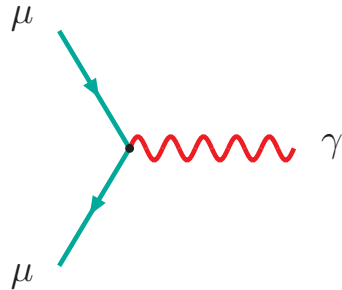
Myon

- 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: $m(\mu) \approx 200 m(e)$

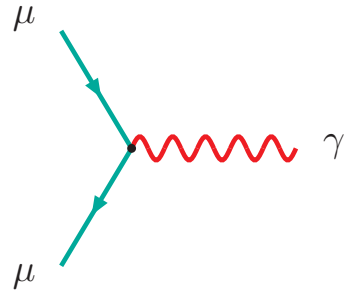
- Ladung -1:



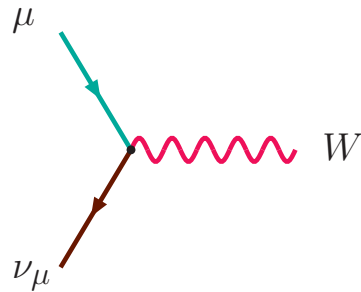
Myon

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

● Ladung -1:



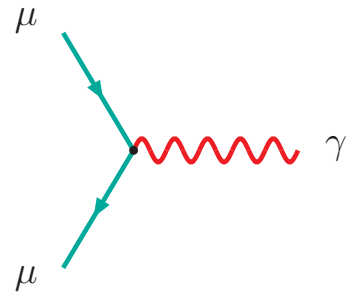
● auch:



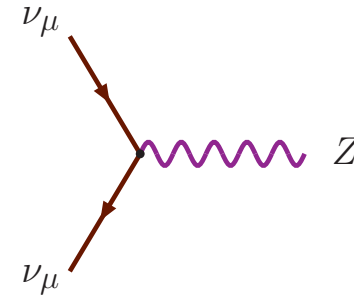
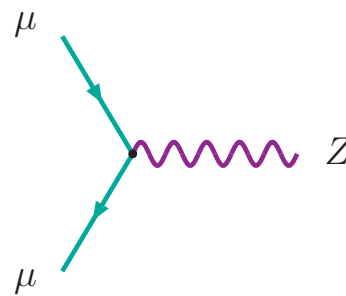
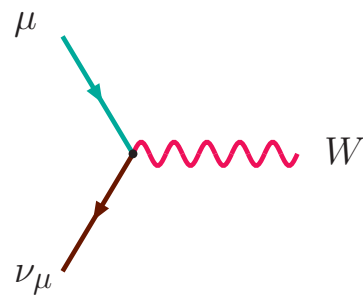
Myon

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

Ladung -1:



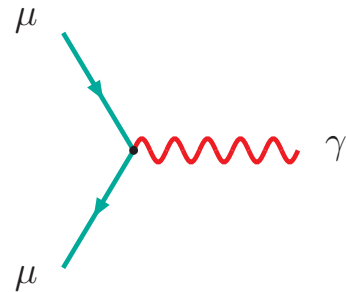
auch:



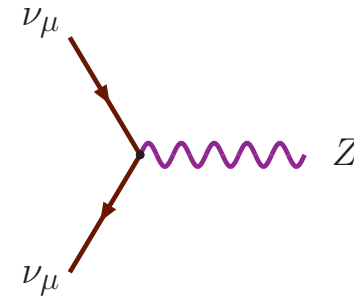
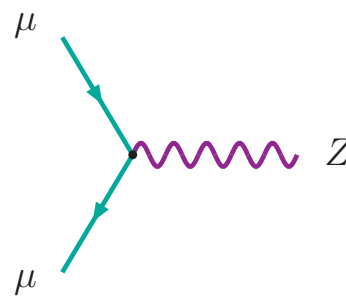
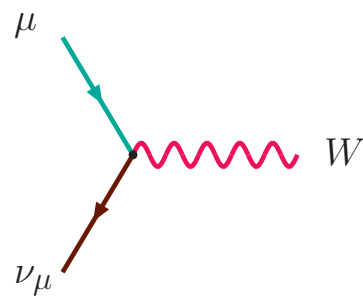
Myon

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

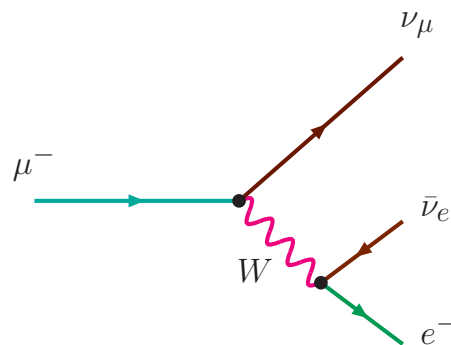
Ladung -1:



auch:



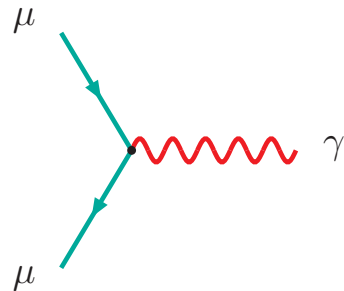
zerfällt:



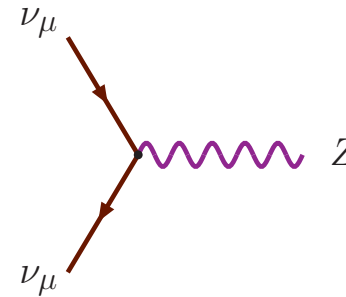
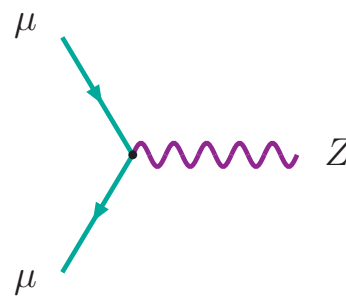
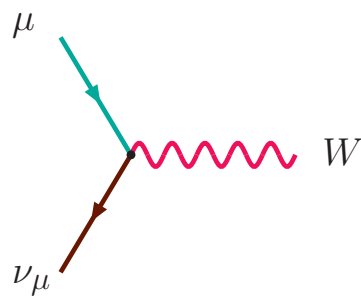
Myon

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

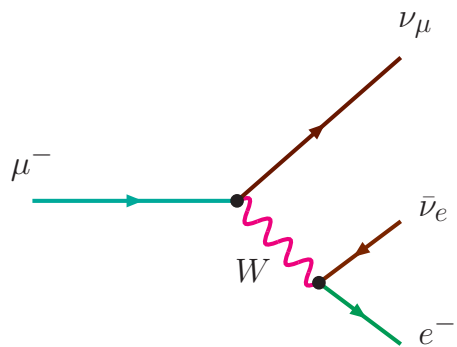
Ladung -1:



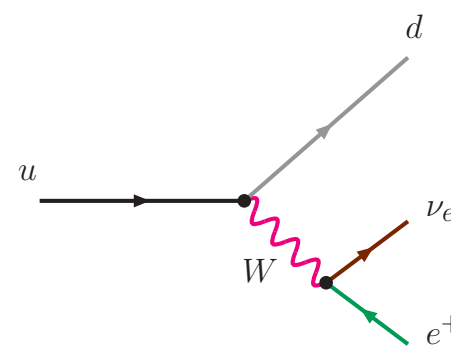
auch:



zerfällt:



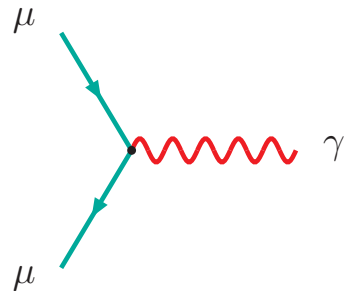
vergleiche:



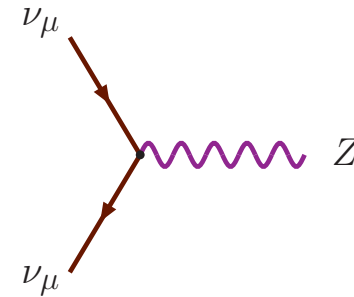
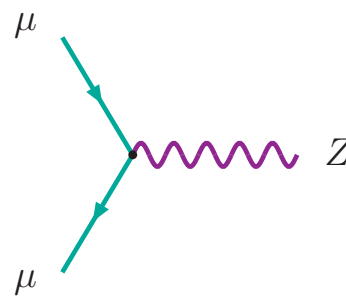
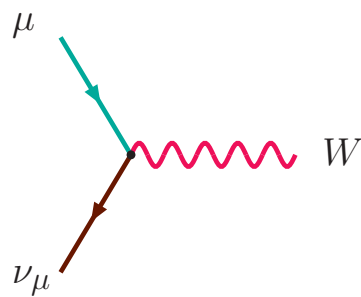
Myon

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

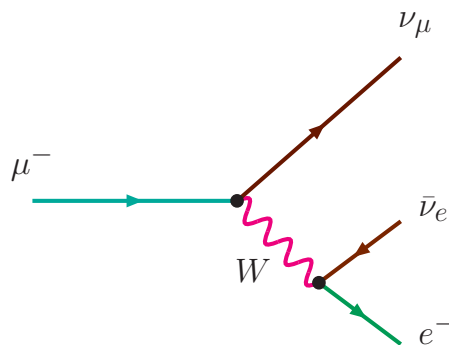
Ladung -1:



auch:



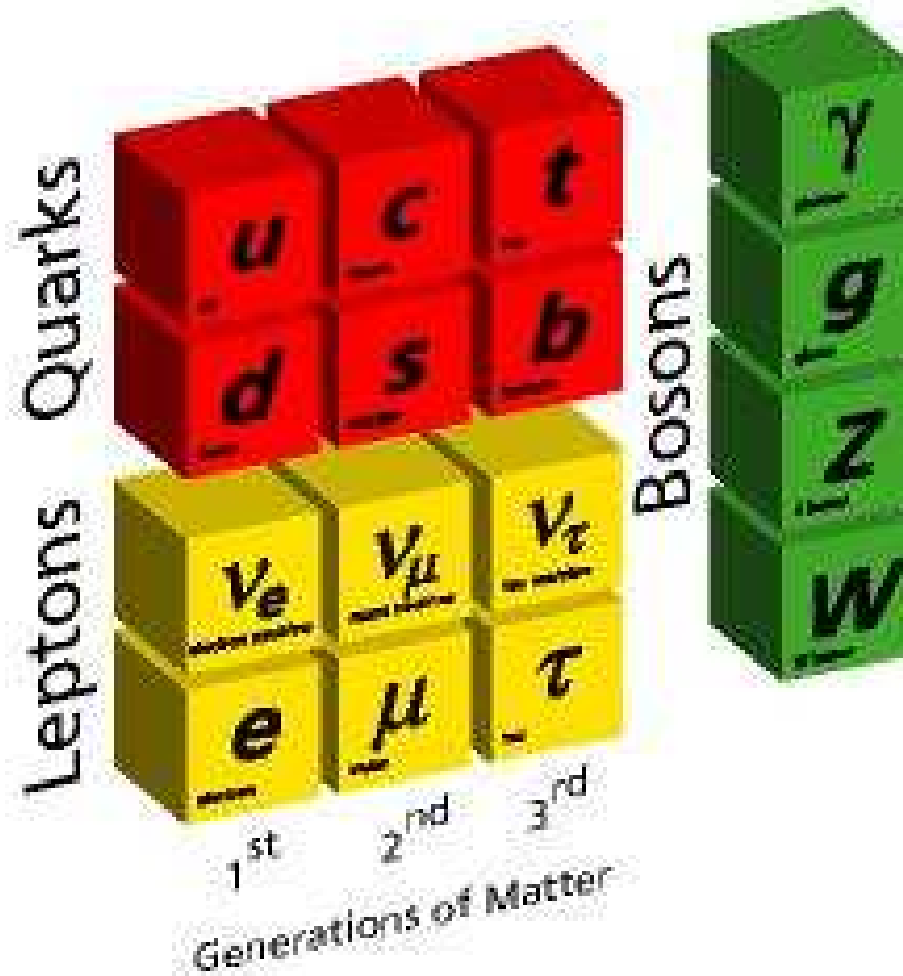
zerfällt:



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

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:
 $m(e^-) = 511 \text{ keV}/c^2$
 $m(p) = 938 \text{ MeV}/c^2$
 $m(\mu^-) = 105 \text{ MeV}/c^2$
- $m(\gamma) = 0, \quad m(\text{Gluon}) = 0$
 $m(W^\pm) = 80,413(48) \text{ GeV}, \quad m(Z) = 91,1875(2.1) \text{ GeV}$

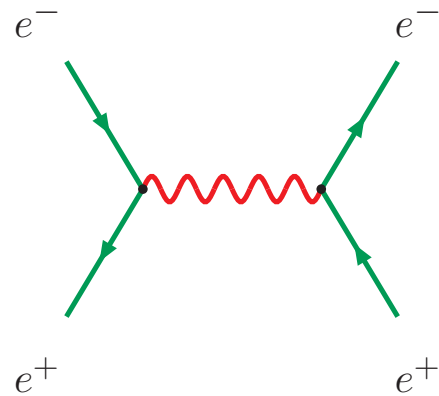
Ereignisse

● Experiment: e^+e^-

Ereignisse

● Experiment: e^+e^-

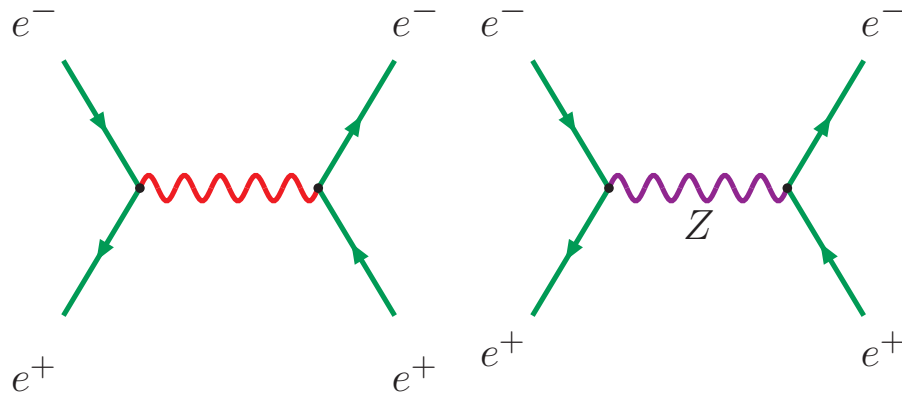
● Mögliche Reaktionen:



Ereignisse

● Experiment: e^+e^-

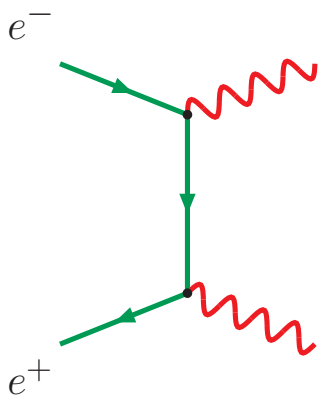
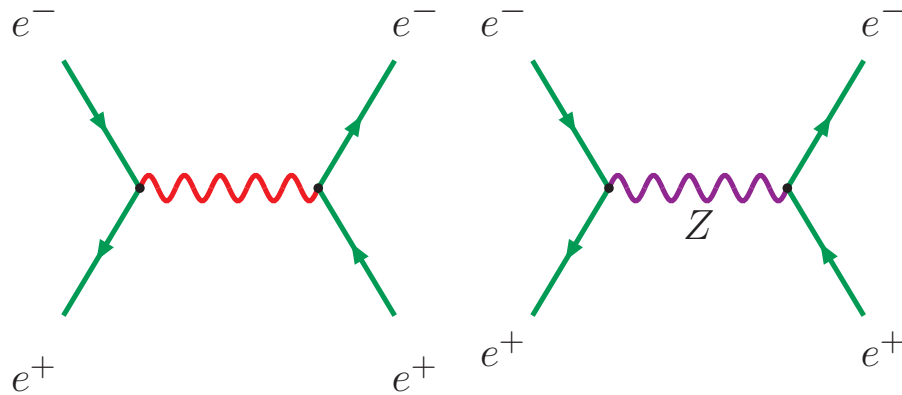
● Mögliche Reaktionen:



Ereignisse

● Experiment: e^+e^-

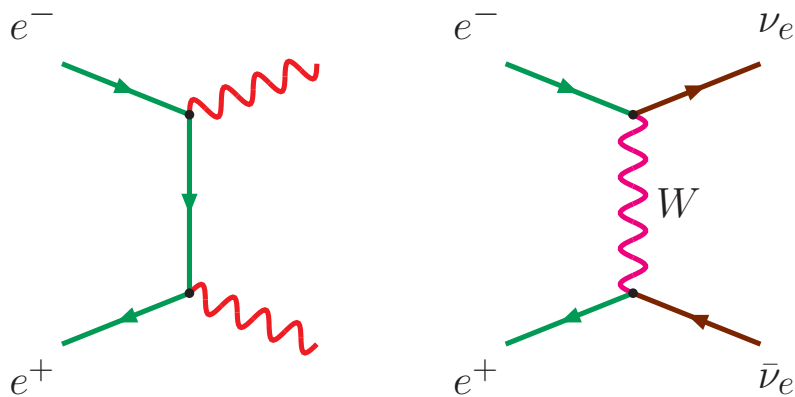
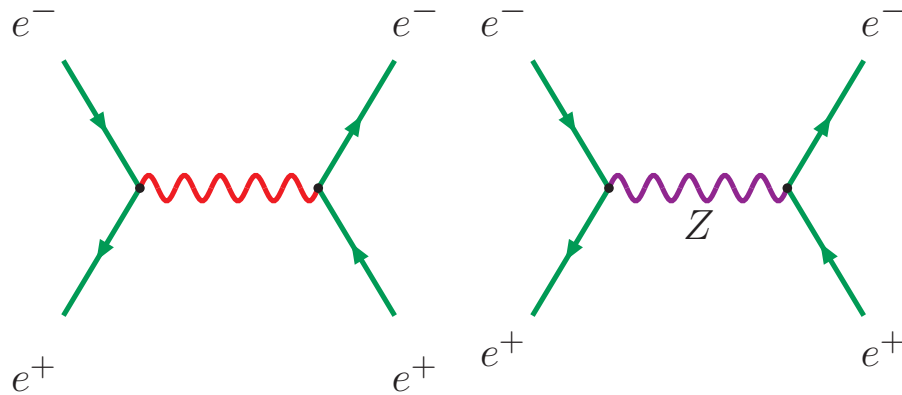
● Mögliche Reaktionen:



Ereignisse

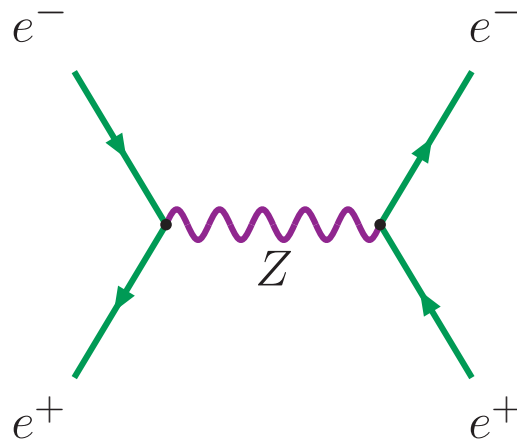
● Experiment: e^+e^-

● Mögliche Reaktionen:



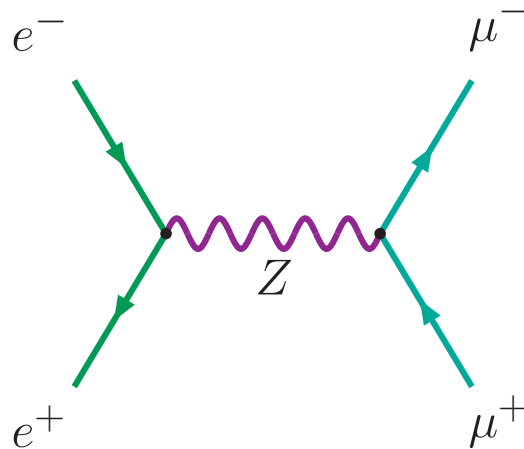
Ereignisse

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



Ereignisse

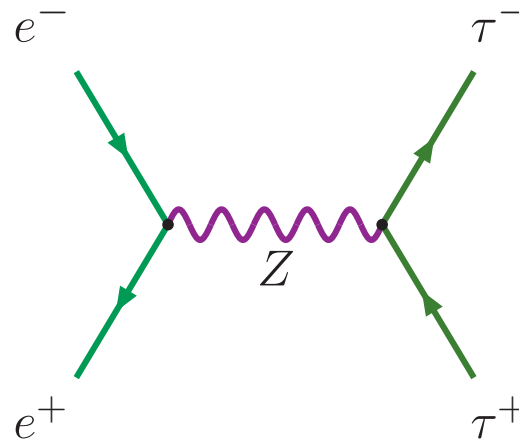
- Experiment: e^+e^-
- falls $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$: fast ausschließlich



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

Ereignisse

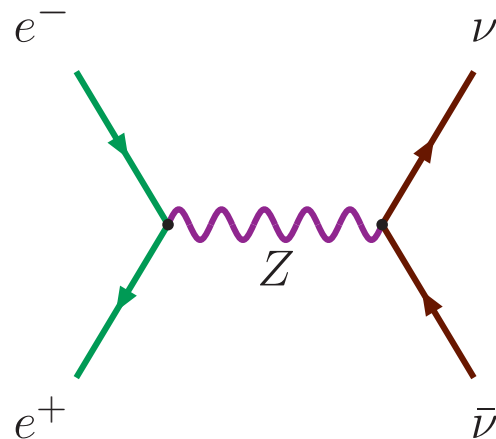
- Experiment: e^+e^-
- falls $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$: fast ausschließlich



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

Ereignisse

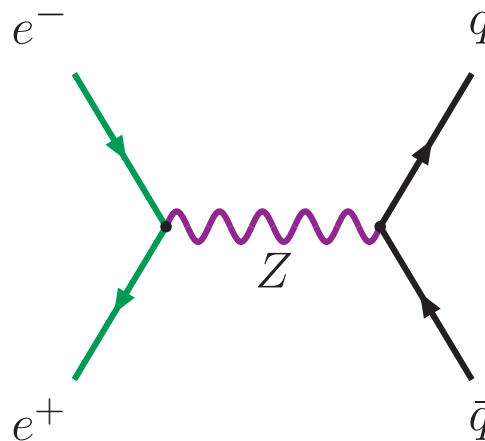
- Experiment: e^+e^-
- falls $E \approx M_Z c^2 = 91.188 \text{ GeV}$: fast ausschließlich



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

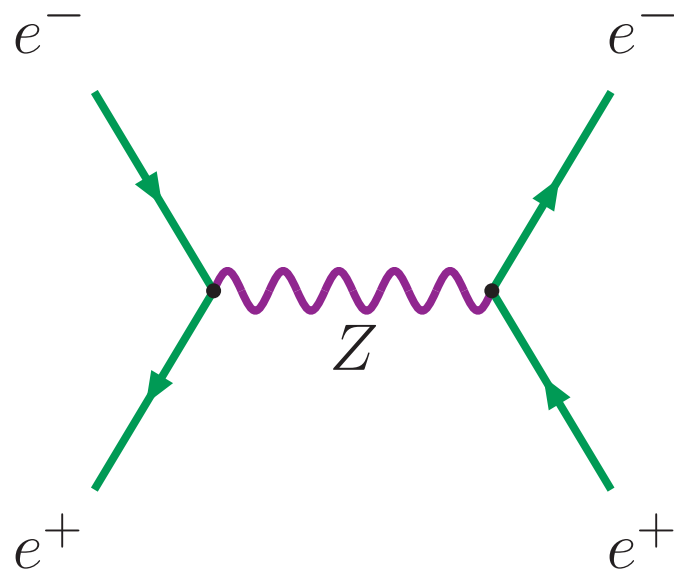
Ereignisse

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

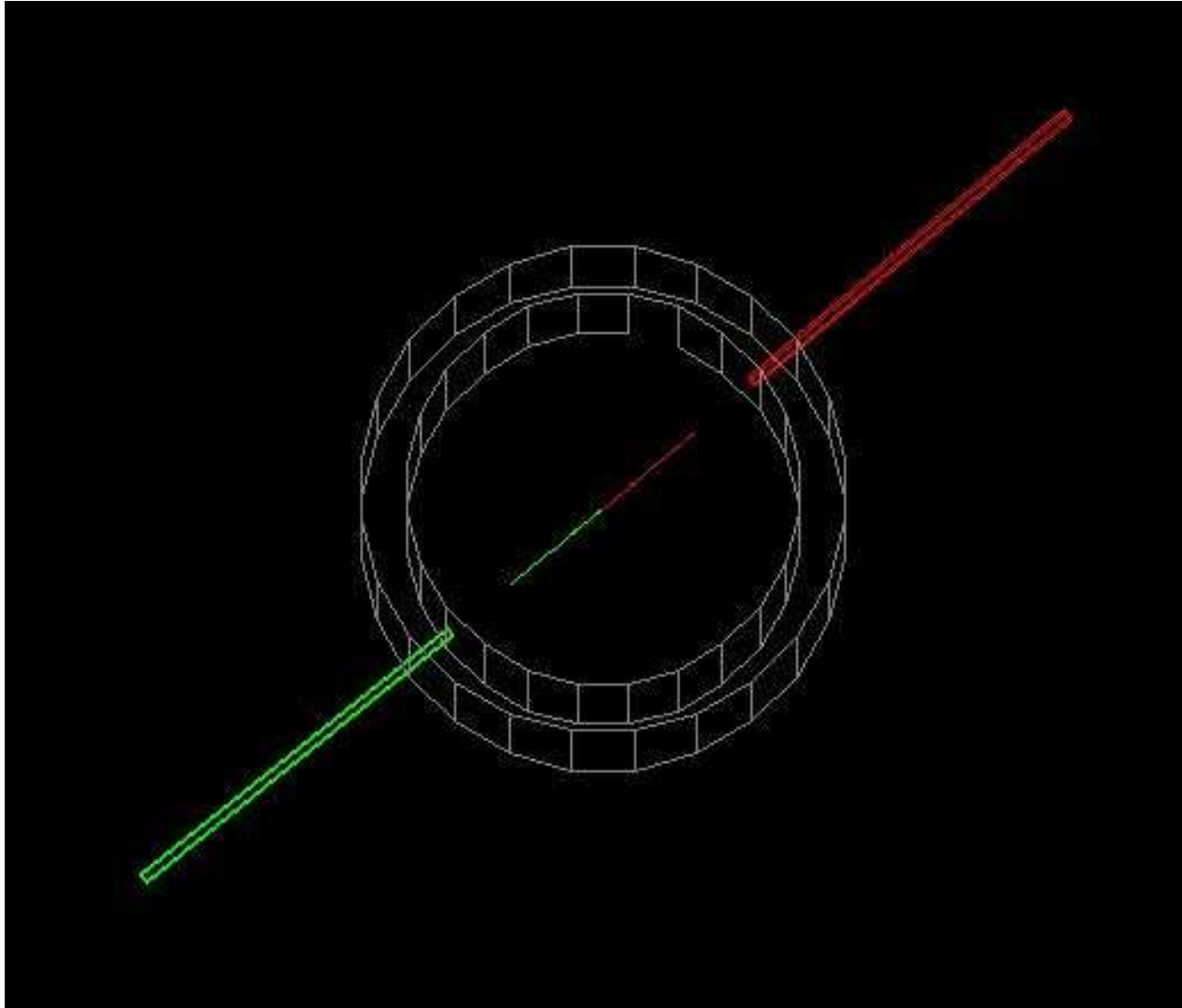


alle außer $q = t$:
 $2m(t) = 346 \text{ GeV}$

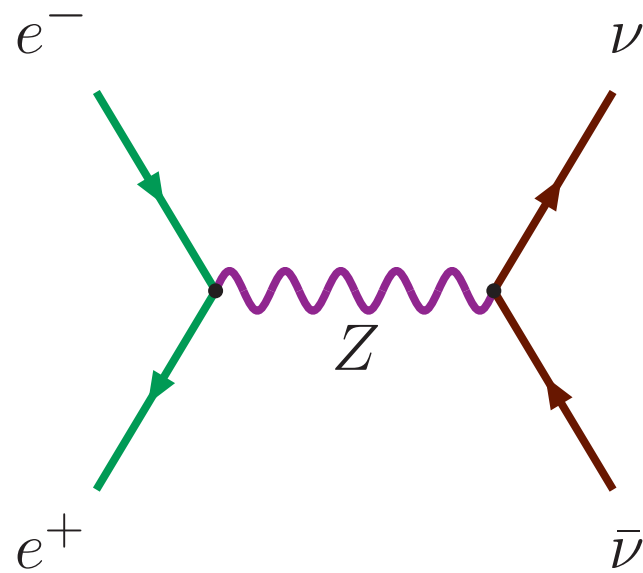
Beobachtung



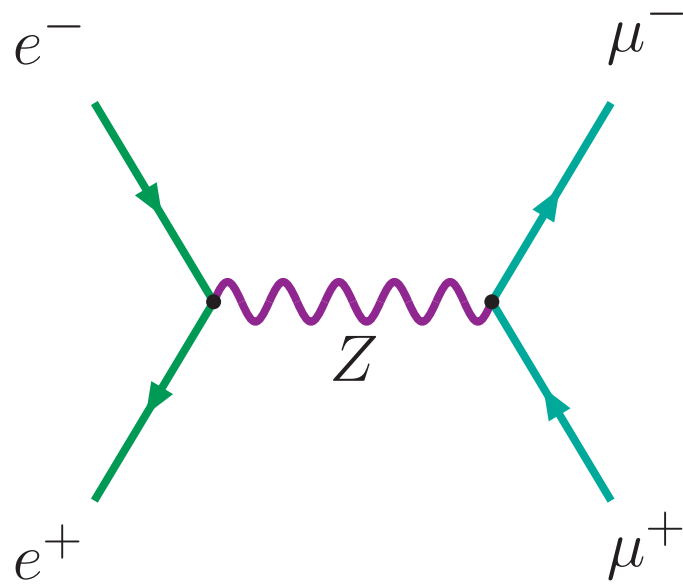
Beobachtung



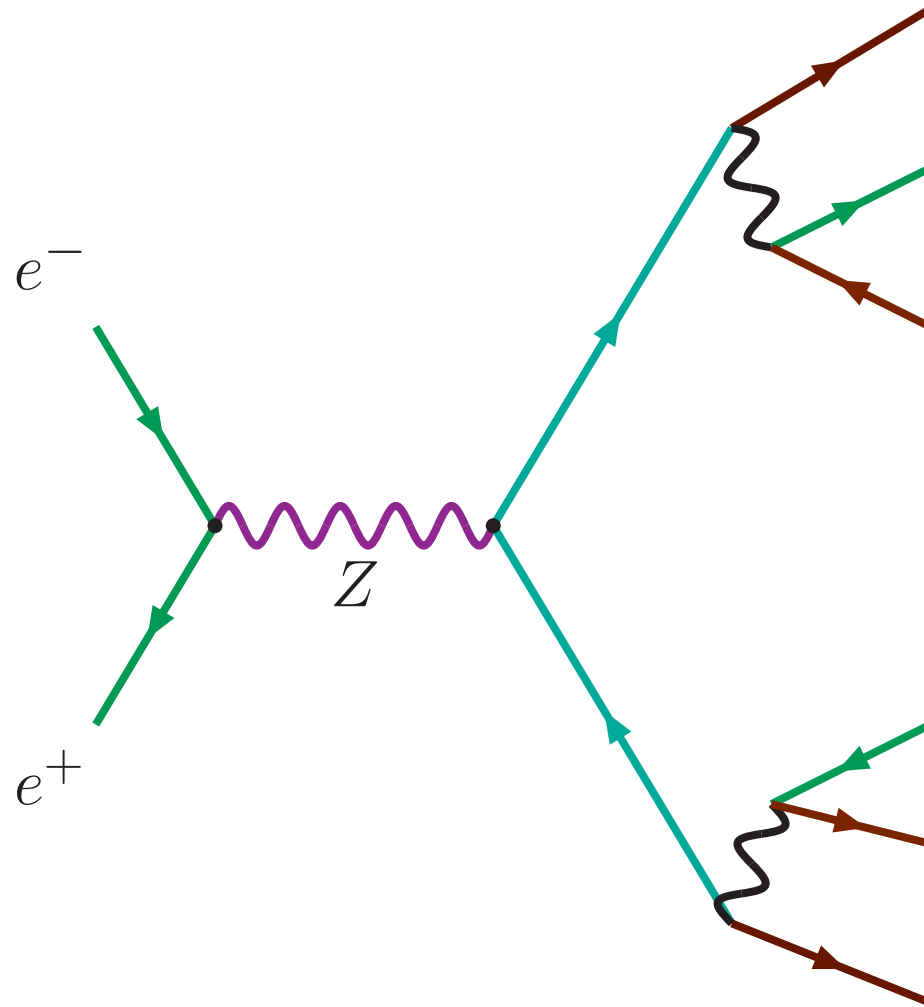
Beobachtung



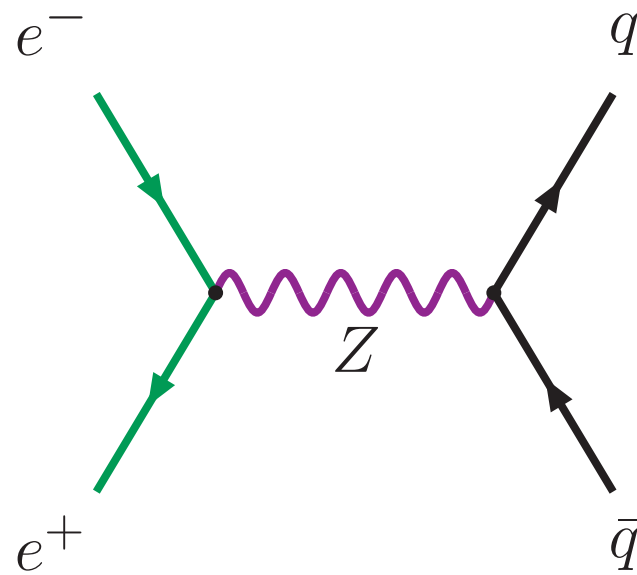
Beobachtung



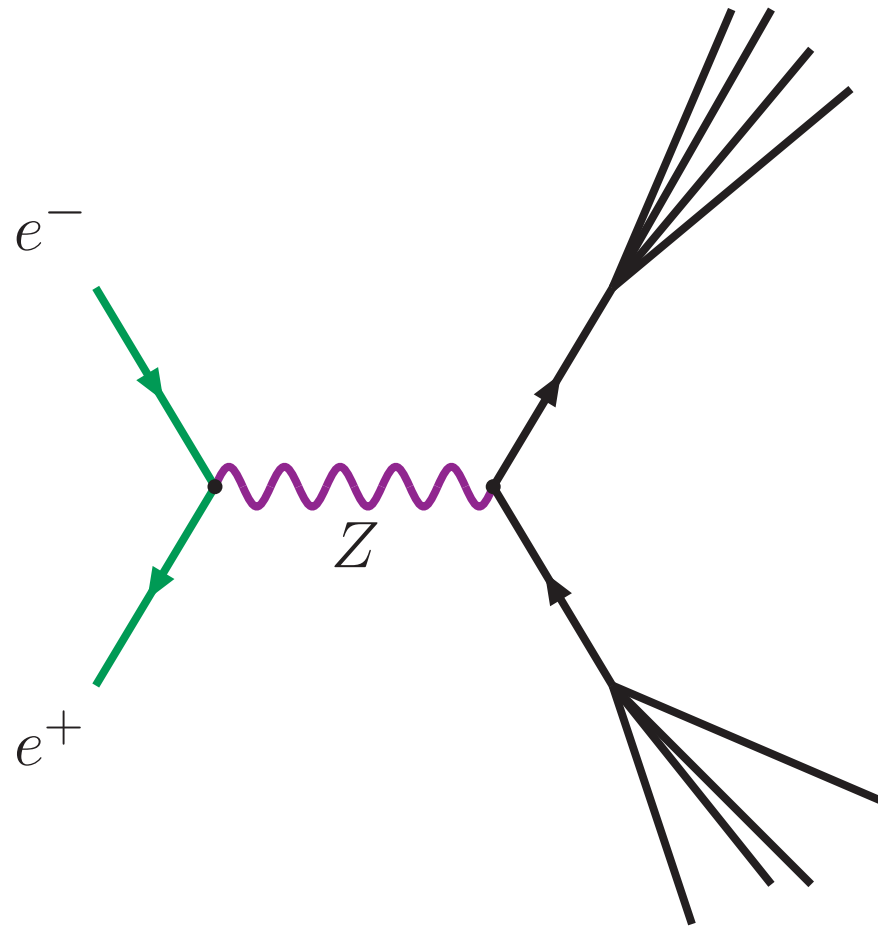
Beobachtung



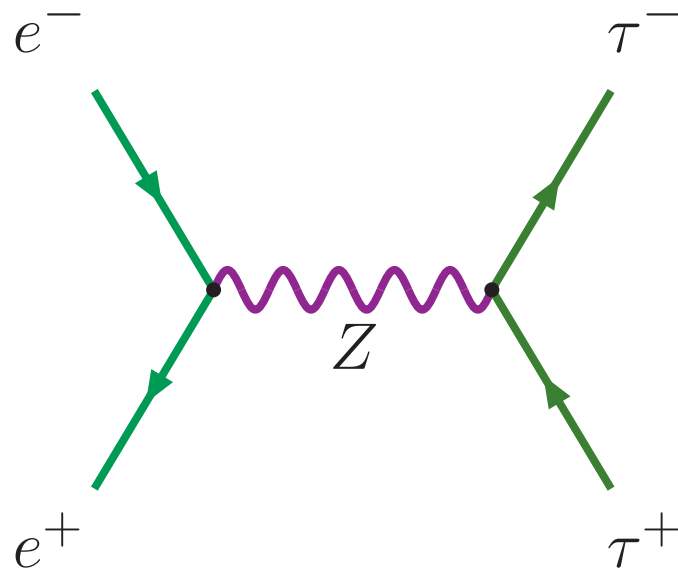
Beobachtung



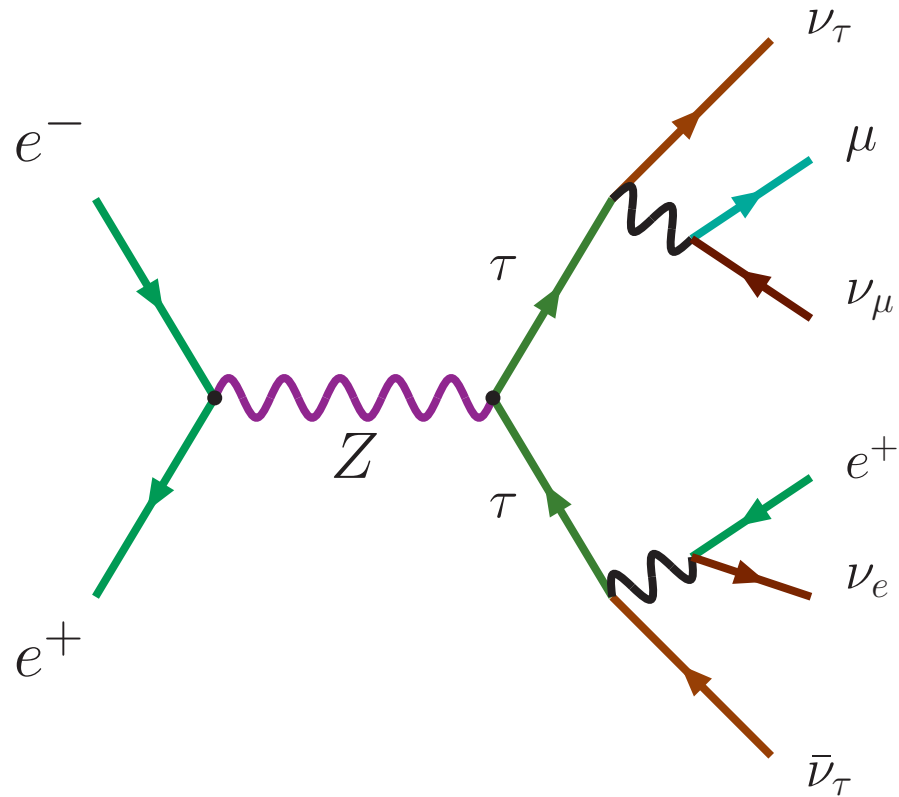
Beobachtung



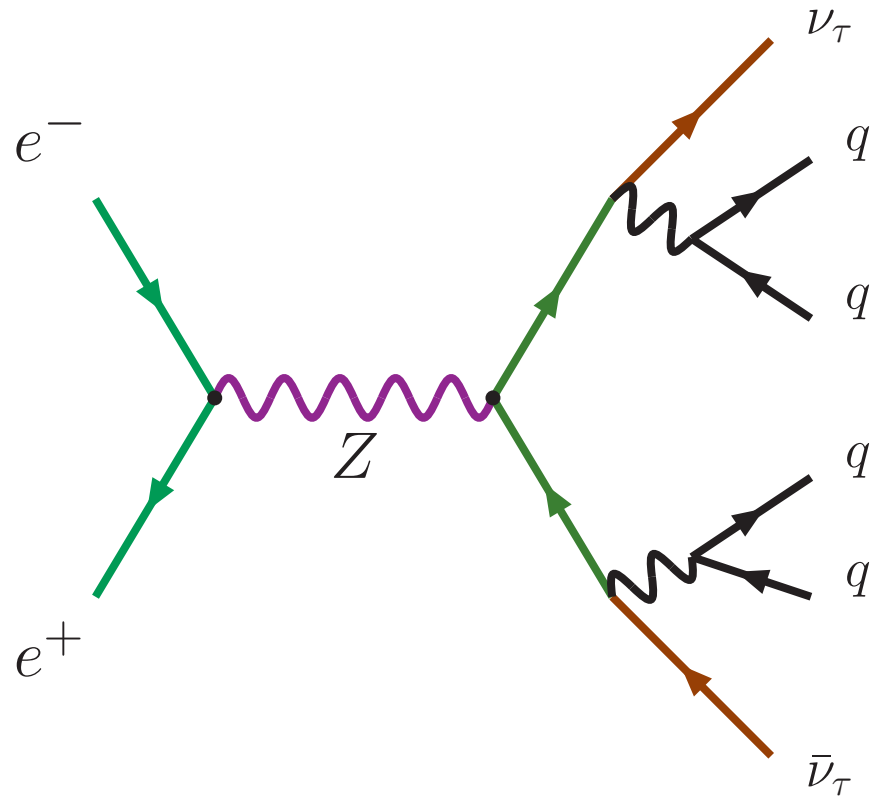
Beobachtung



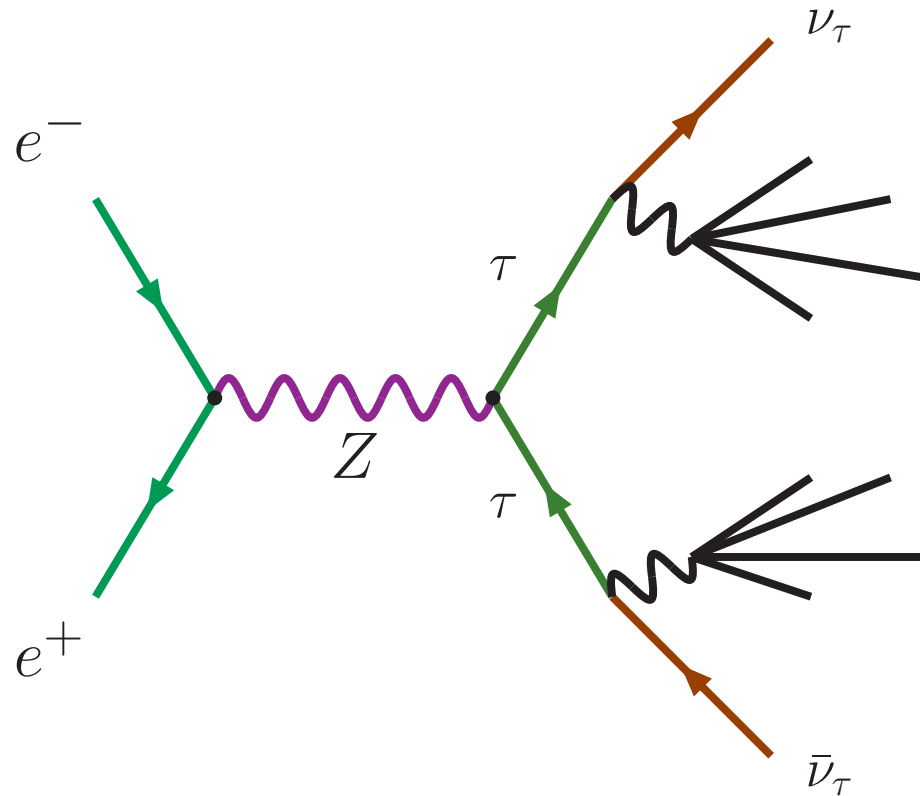
Beobachtung



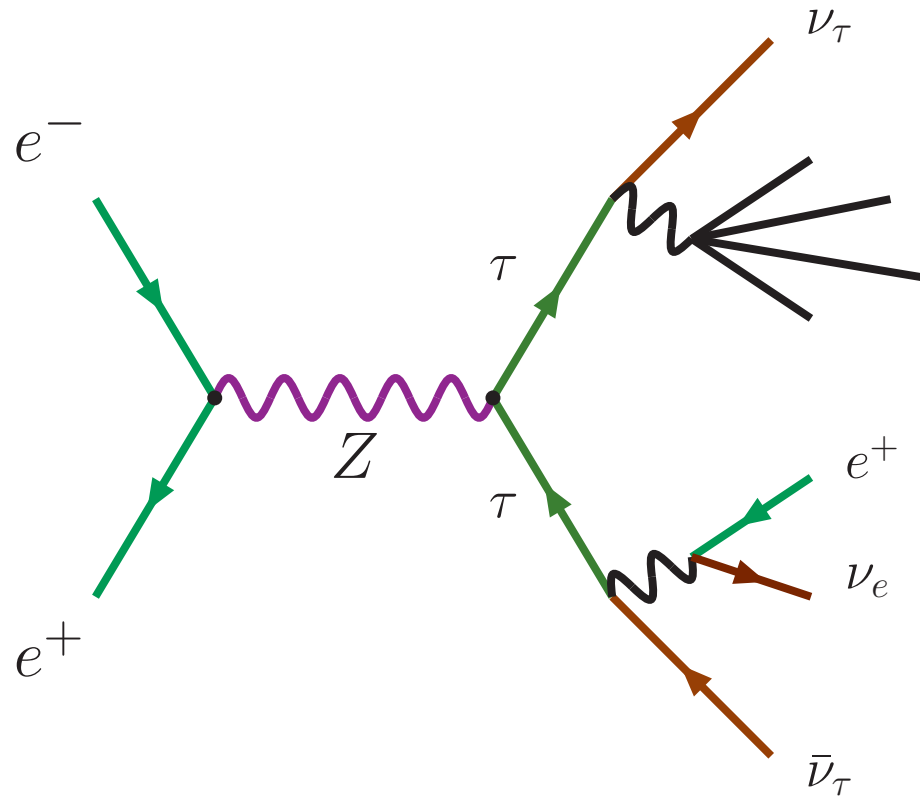
Beobachtung



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?