# Elementarteilchenphysik II RWTH WS 2007/08

**Thomas Hebbeker**

**Markus Merschmeyer, Arnd Meyer**

## „verstehen, was die Welt im Innersten zusammenhält“

## ... und die Evolution des Universums

- **Wiederholung Grundlagen Elementarteilchenphysik I**
- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**
- **Astroteilchenphysik / Kosmologie**

# Inhalt

- **Wiederholung Grundlagen Elementarteilchenphysik I**

  Materieteilchen und Wechselwirkungen

  Detektoren und Beschleuniger

  Symmetrien und Erhaltungssätze

  Eichtheorien

- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**
- **Astroteilchenphysik / Kosmologie**

# Die 4 Grundbausteine des Sonnensystems

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| Neutrino | 0 | < 2 eV | (Sonne→Erde: $6 \cdot 10^{14} / m^2 / s$ ) |
| Elektron | -1 | 0.5 MeV | |

$$\underbrace{\begin{pmatrix} u\ u\ u \\ d\ d\ d \end{pmatrix}}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| up-Quark | 2/3 | 5 MeV | (3 „Farb“-Varianten) |
| down-Quark | -1/3 | 10 MeV | |

*(nicht „direkt“ beobachtbar)*

**Kerne:** Proton (938 MeV) = u u d, (Neutron), He, Li, ...., **Mesonen** $= q\,\bar{q}$

**Elementarteilchen mit Spin ½ (Fermionen)**

elementar: punktförmig/keine innere Struktur (heutige Messgenauigkeit $\sim 10^{-18}\,m$ )

Zu jedem Teilchen existiert ein **Antiteilchen** mit entgegengesetzter Ladung:

$$\nu \leftrightarrow \bar{\nu} \qquad e^- \leftrightarrow e^+ \qquad u \leftrightarrow \bar{u} \ \ldots$$

# Die 4 Kräfte/Wechselwirkungen

**erfahrbar:** a) Bindungsphänomene b) Dynamik: Streuprozesse, Zerfälle

Gravitation: vernachlässigbar im Mikrokosmos

Elektromagnetische WW:

a) Atom b) $e + p \rightarrow e + p$ (elast. Streuung)

Schwache WW:

a) - b) $d \rightarrow u\, e\, \bar{\nu}$ $(n \rightarrow p\, e\, \bar{\nu})$

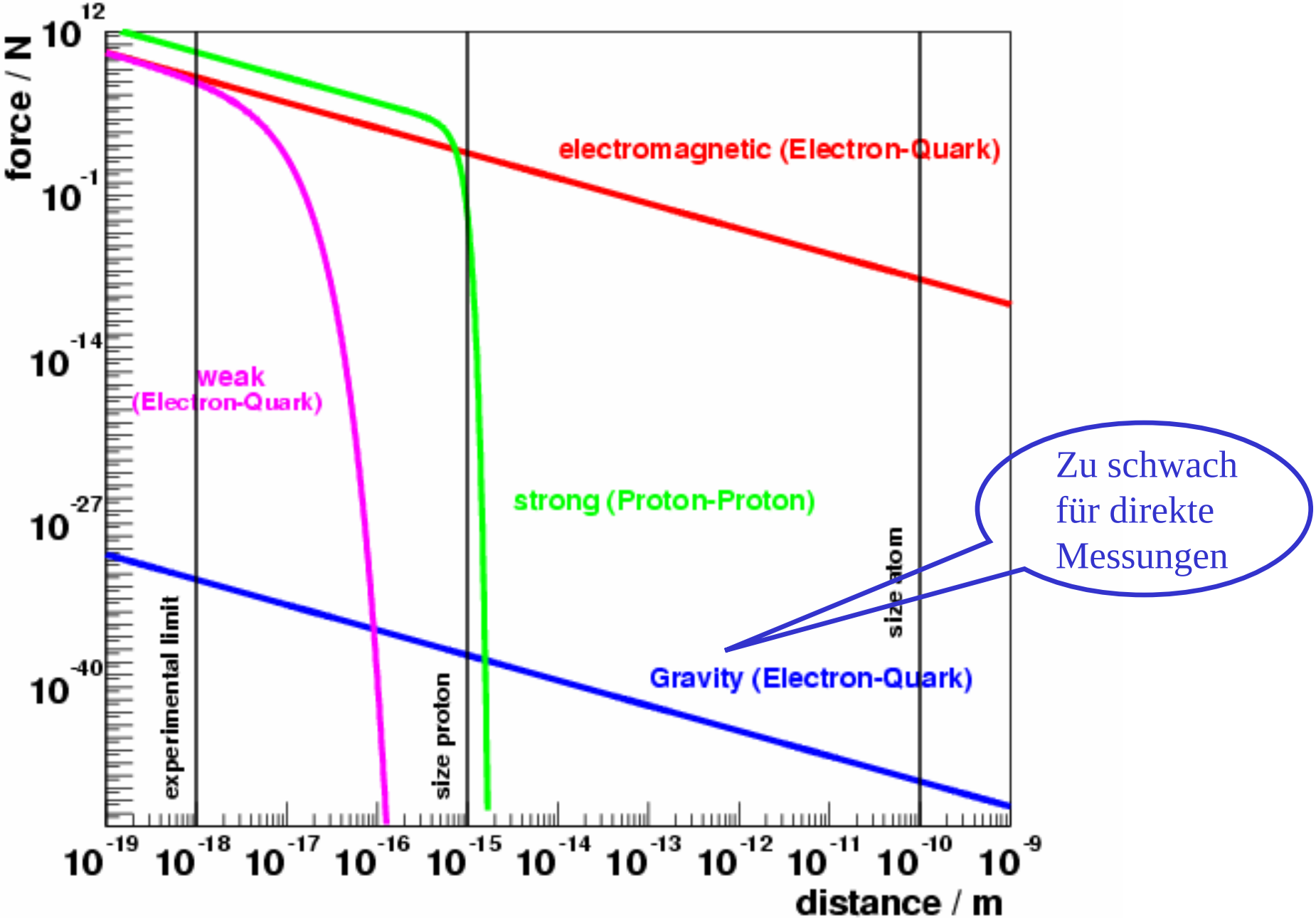
(Beta-Zerfall)

Starke WW:

a) Nukleonen im Kern b) $p + n \rightarrow d$

Quarks im Nukleon (Fusion zu Deuteron)

# Stärke und Reichweite der Kräfte



# Das Standardmodell der Teilchenphysik

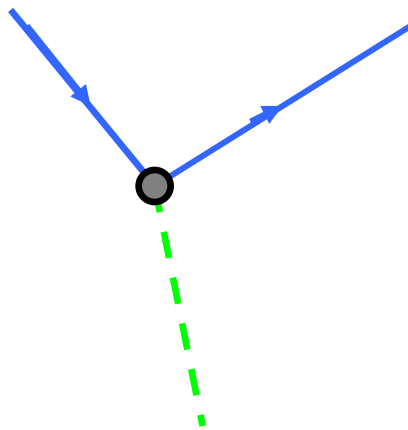
## Materie: Spin ½ - Fermionen:

viele Teilchen

instabil!

Leptonen: $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

Quarks: $\begin{pmatrix} u\,u\,u \\ d\,d\,d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c\,c\,c \\ s\,s\,s \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} t\,t\,t \\ b\,b\,b \end{pmatrix}$



## Wechselwirkungen: Spin 1 – Eichbosonen:

elektroschwach:

| | | |
|---|---|---|
| Photon | $\gamma$ | masselos |
| Z-Boson | Z | 91 GeV |
| W-Boson | $W^+$ $W^-$ | 80 GeV |

stark:

| | | |
|---|---|---|
| Gluon | g | masselos |

**+ Higgs ?**

Experimentelle Daten werden akkurat beschrieben! $(10^{-18}\ m)$

# Die fundamentalen Fermionen

Nobelpreise:

1995 Reines

1988 Steinberger et al

1995 Perl

1990 Friedmann et al

1976 Richter, Ting

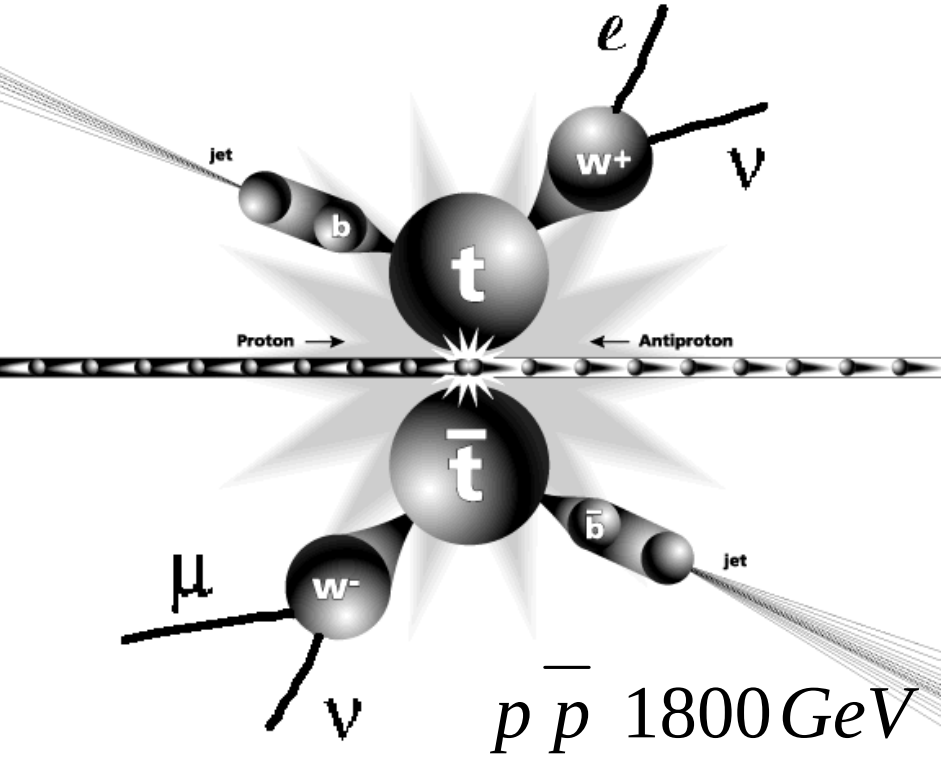
2002 Davis, Koshiba

| Name | $m$ | $\tau/\mathrm{s}$ | Zerfall |
|---|---|---|---|
| e | 511 keV | - | - |
| $\nu_e$ | $<$ ~~3 eV~~ 2 eV | - | - |
| $\mu$ | 0.106 GeV | $2.20 \cdot 10^{-6}$ | $e\ \bar{\nu}_e\ \nu_\mu$ |
| $\nu_\mu$ | $<$ ~~0.19 MeV~~ 2 eV | - | - |
| $\tau$ | 1.78 GeV | $2.96 \cdot 10^{-13}$ | viele |
| $\nu_\tau$ | $<$ ~~18 MeV~~ 2 eV | - | - |
| u | 5 MeV | | - |
| d | 10 MeV | $10^{3}$ | $u\ e^-\ \bar{\nu}_e$ |
| c | 1.3 GeV | $10^{-12}$ | $s\ e^+\ \nu_e$ |
| s | 0.2 GeV | $10^{-9}$ | $u\ e^-\ \bar{\nu}_e$ |
| t | 174 GeV | $10^{-23}$ | $b\ e^+\ \nu_e$ |
| b | 4.3 GeV | $10^{-12}$ | $c\ e^-\ \bar{\nu}_e$ |

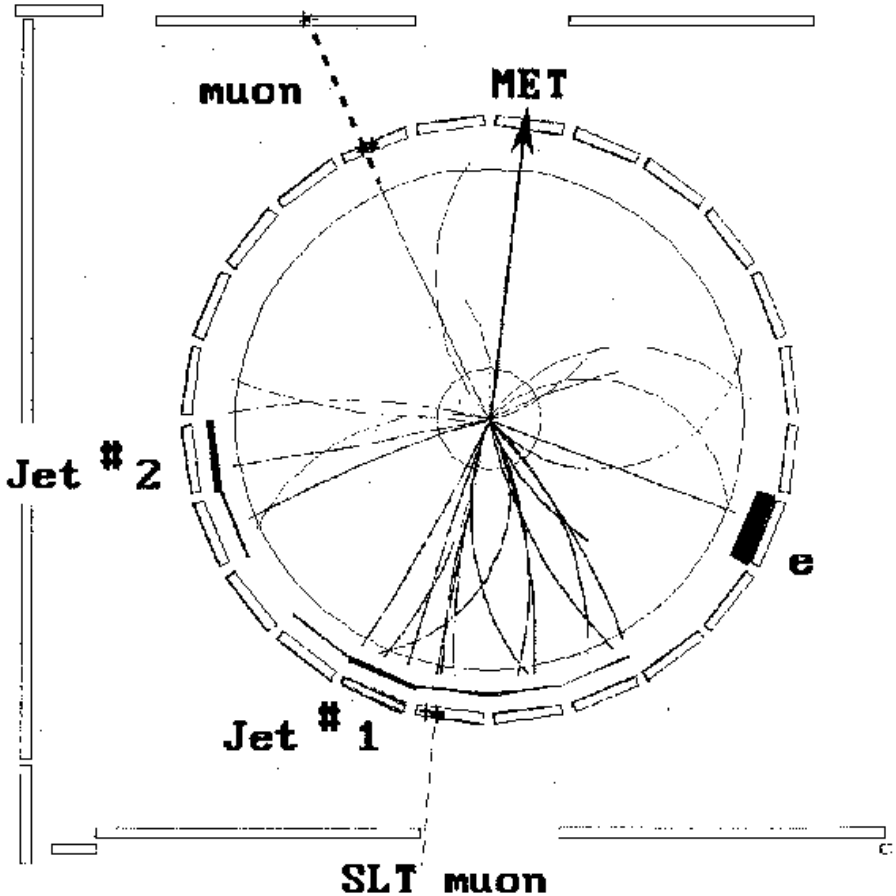
# Entdeckung des top-Quarks

Fermilab, 1995

CDF, D0




$p\,\bar{p}\;\; 1800\,GeV$

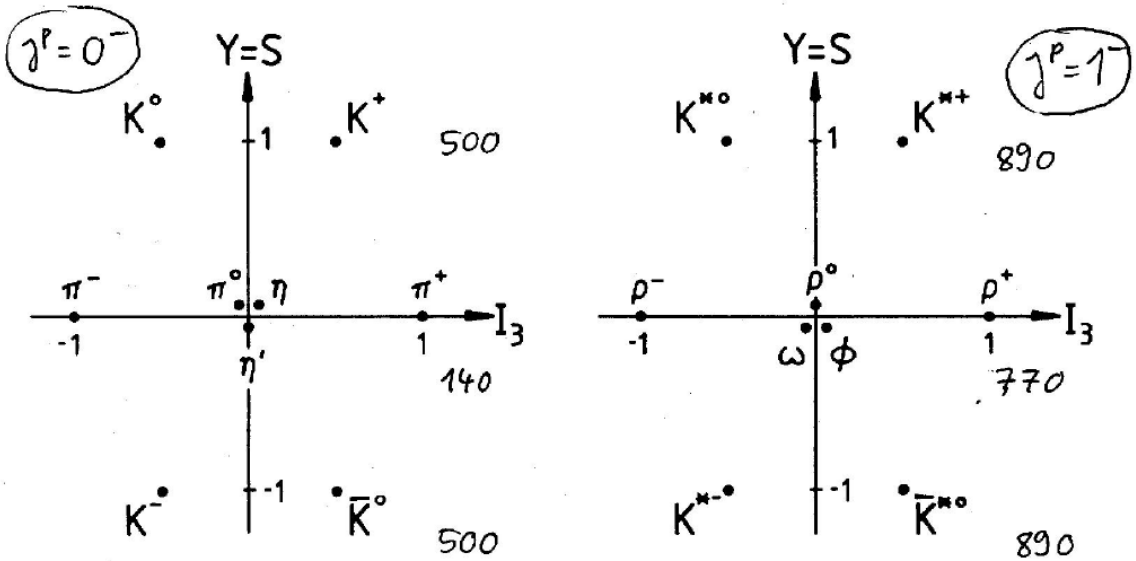



$m = 170.9 \pm 1.9\,GeV$ (Okt 2007)

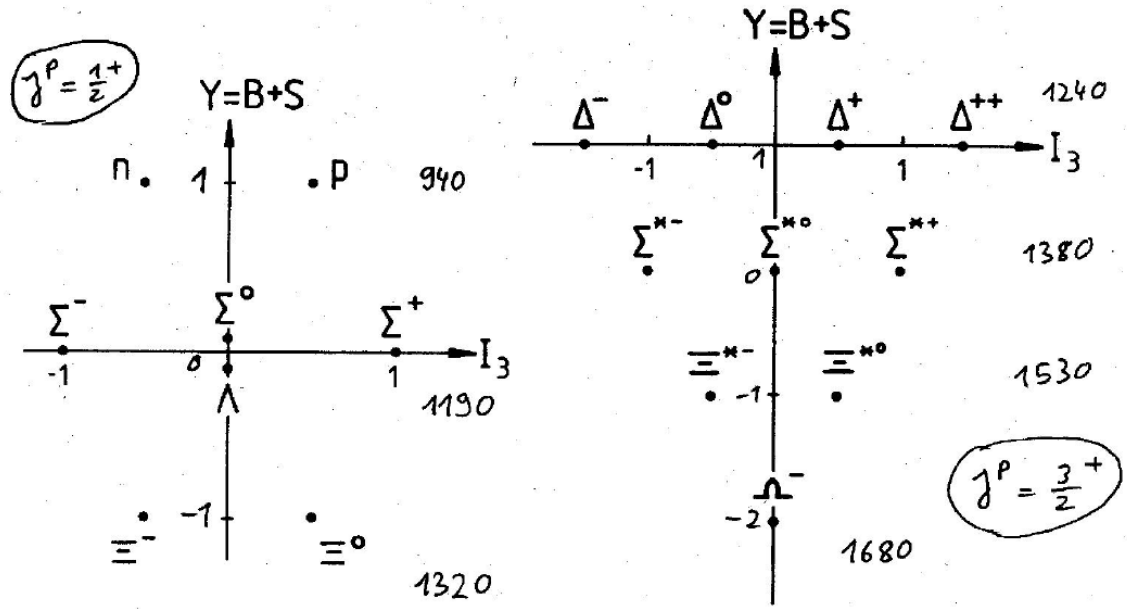
# Hadronen = Quarkbindungszustände

| | Name | Spin | Quarks | $m$/MeV | $\tau$/s | Zerfall |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mesonen | $\pi^+$ | 0 | $u\bar{d}$ | 140 | $3 \cdot 10^{-8}$ | $\mu^+\nu$ |
| | $\pi^0$ | 0 | $u\bar{u}, d\bar{d}$ | 135 | $8 \cdot 10^{-17}$ | $\gamma\gamma$ |
| | $K^+$ | 0 | $u\bar{s}$ | 494 | $10^{-8}$ | $\mu^+\nu(64\%)$ |
| | $K_l^0$ | 0 | $d\bar{s}$ | 498 | $5 \cdot 10^{-8}$ | $\pi e \nu_e(39\%)$ |
| | $\rho^+$ | 1 | $u\bar{d}$ | 768 | $10^{-24}$ | $\pi^+\pi^0$ |
| | $\rho^0$ | 1 | $u\bar{u}, d\bar{d}$ | 768 | $10^{-24}$ | $\pi^+\pi^-$ |
| | $D^+$ | 0 | $c\bar{d}$ | 1869 | $10^{-12}$ | viele |
| | $B^-$ | 0 | $b\bar{u}$ | 5279 | $10^{-12}$ | viele |
| Baryonen | p | 1/2 | uud | 938 | $> 10^{39}$ | - |
| | n | 1/2 | udd | 940 | 900 | $pe^-\bar{\nu}$ |
| | $\Lambda$ | 1/2 | uds | 1116 | $3 \cdot 10^{-10}$ | $p\pi^-(64\%)$ |

# Hadronen im Quarkmodell
# SU(3)-Flavorsymmterie




Mesonen




Baryonen

# Beschreibung der Wechselwirkungen

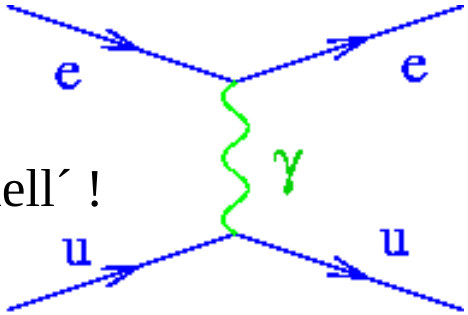
Feynman-Diagramme: Visualisierung und

Berechnung von Wahrscheinlichkeiten

Beispiele:

Elastische Elektron-Quark-Streuung (elm. WW):

Photon
= `virtuell´ !

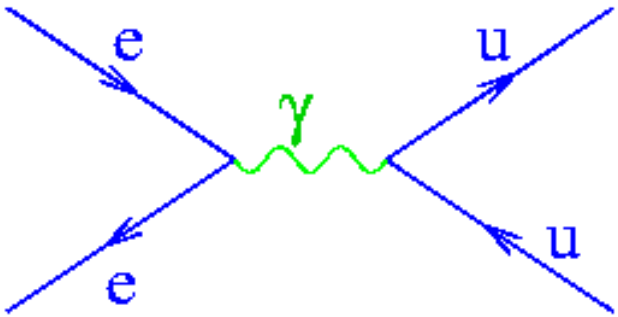



Kräfte: Austauschteilchen

mit Spin 1 (Bosonen)

'neu'

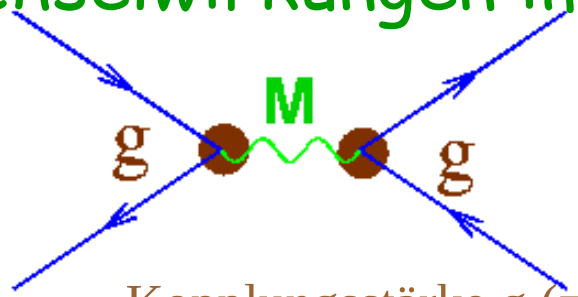
**Erzeugung** eines Quark-Antiquark-Paares in der $e^+e^-$-Annihilation (elm.WW)




Photon = `virtuell´ !

messbar: nur ein- und auslaufende Teilchen !

# Die Wechselwirkungen im Mikrokosmos




Elektroschwache WW:

Nobelpreise 1979, 1999

Glashow, Salam, Weinberg

t'Hooft, Veltman

`Vertex´: Kopplungsstärke g (z.B. el. Ladung)

Bosonmasse M: Reichweite

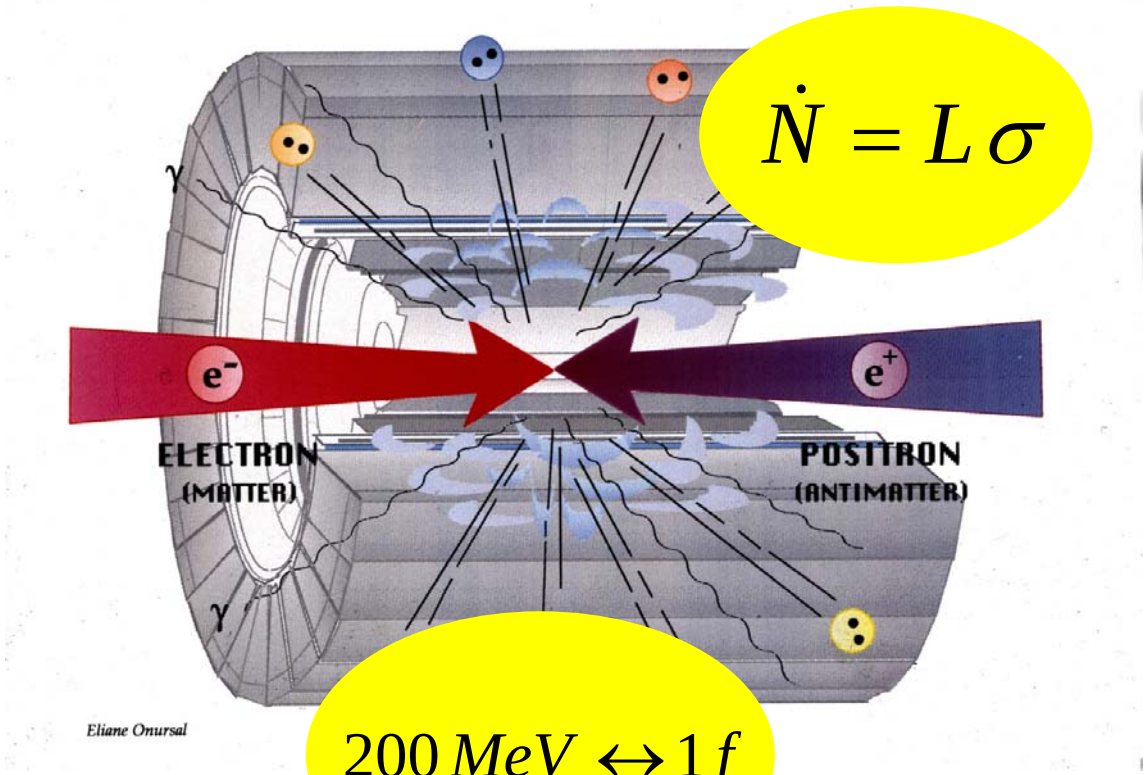
→ Wahrscheinlichkeit

| Boson | Photon g | W-Boson | Z-Boson | Gluon g |
|---|---|---|---|---|
| WW | elm. | schwach | schwach | stark |
| M | 0 | 80.4 | 91.2 | 0 |
| Arten | | + - | | 8 Farbkomb. |
| $\tau$ | - | $10^{-25}\,s$ | $10^{-25}\,s$ | - |
| g | ~ 0.1 | ~ 0.1 | ~ 0.1 | ~ 0.3 |
| R | $\infty$ | ~ 0.001 fm | ~ 0.001 fm | ~ 1 fm ! |
| Partner | Gel. Teilchen | alle | alle | Quarks |

# Methoden der experimentellen Teilchenphysik

Werkzeuge:

- Teilchenbeschleuniger
- Teilchendetektoren




$$\dot{N} = L\sigma$$

$$200\,MeV \leftrightarrow 1\,f$$

Unschärferelation: $\Delta x \approx 1/E$

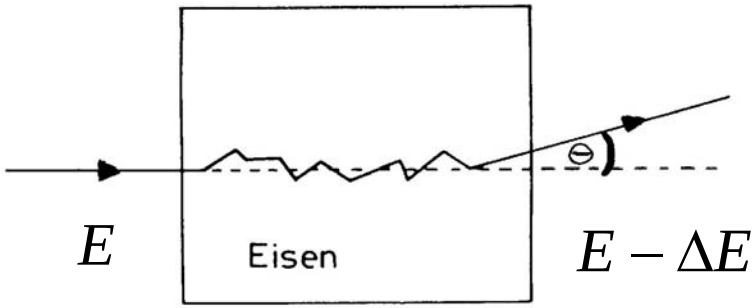
Studium der Kräfte bei hohen Energien:

(Big Bang!)

Neue schwere Teilchen (Masse m):

HOHE ENERGIE !

# Wechselwirkung von (gel.) Teilchen mit Materie

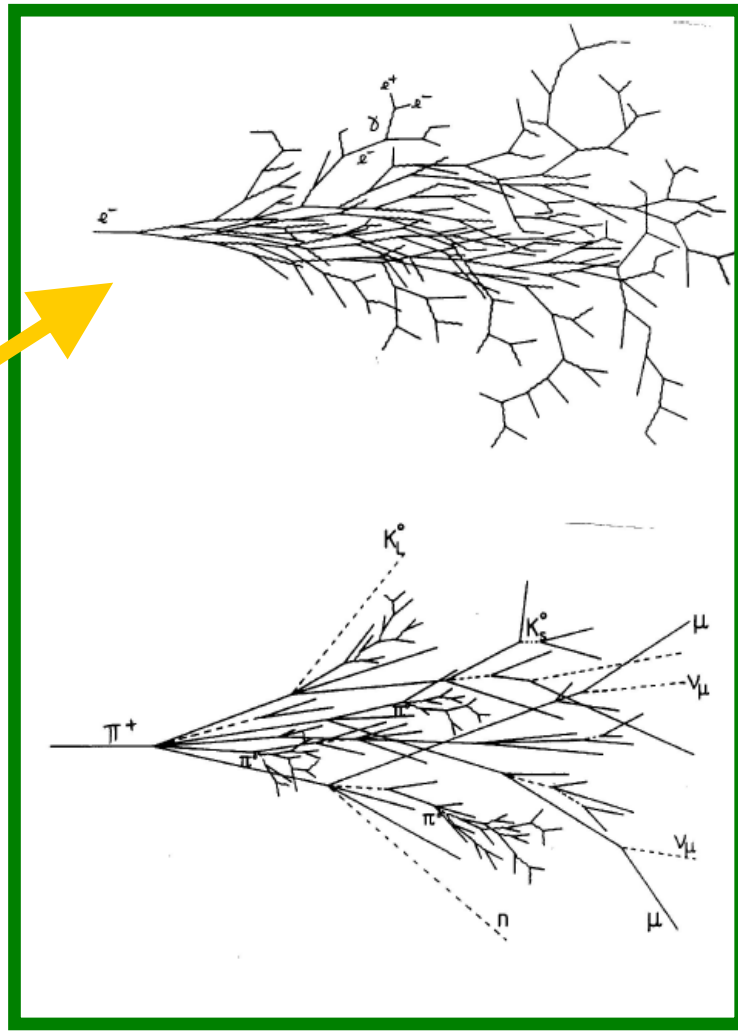



$$\frac{dE}{dx}(Ion.) \approx 2\,\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{cm}} \cdot \frac{\rho}{\rho_0}$$

$$\frac{dE}{dx}(Brems.) \approx \frac{E}{X_0}$$

$$X_0 \approx \frac{330}{Z\,\rho}\,\frac{g}{\mathrm{cm}^2}$$

$$\theta = 13.6\,\mathrm{MeV} \cdot \frac{1}{\beta \cdot p} \cdot \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

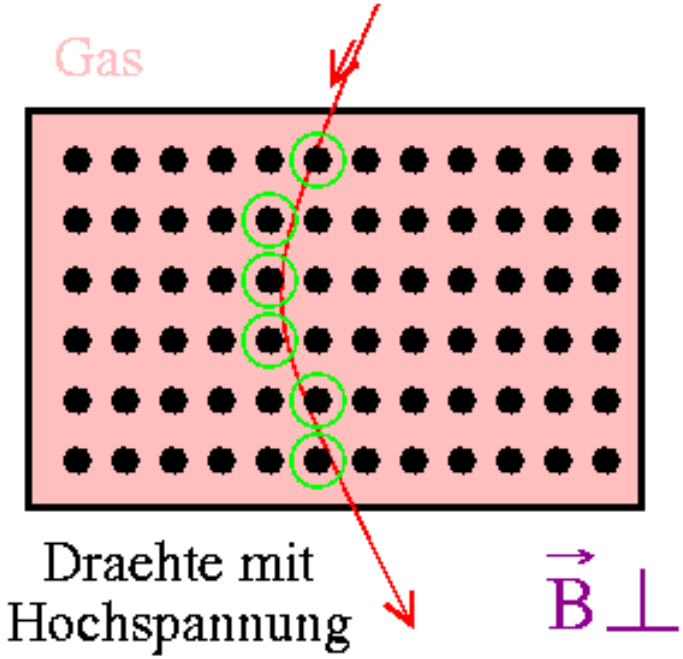


# Teilchendetektoren

Jeder Teilchennachweis via elektromagnetische Wechselwirkung!

Nobelpreis 1992

Charpak



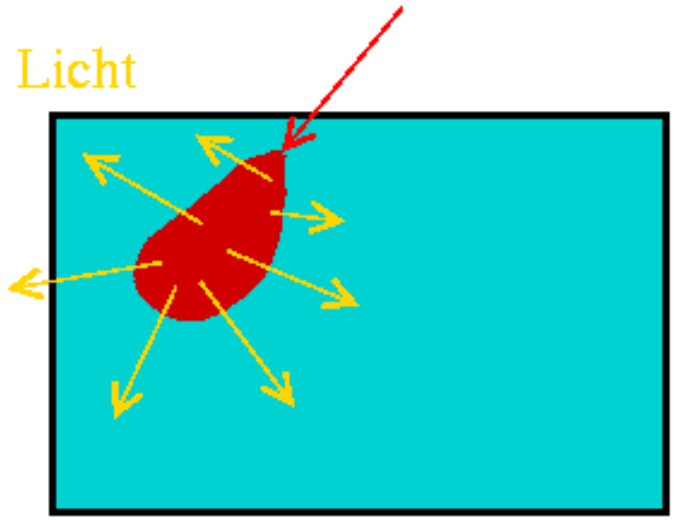

## Spurdetektoren:

**Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt.**

**Ionisation des Gases. Elektronen bewegen sich im elektrischen Feld zum Draht.**

**Ortsauflösung ~ 0.1 mm**

**Aus Krümmung folgt Impuls**




## Kalorimeter:

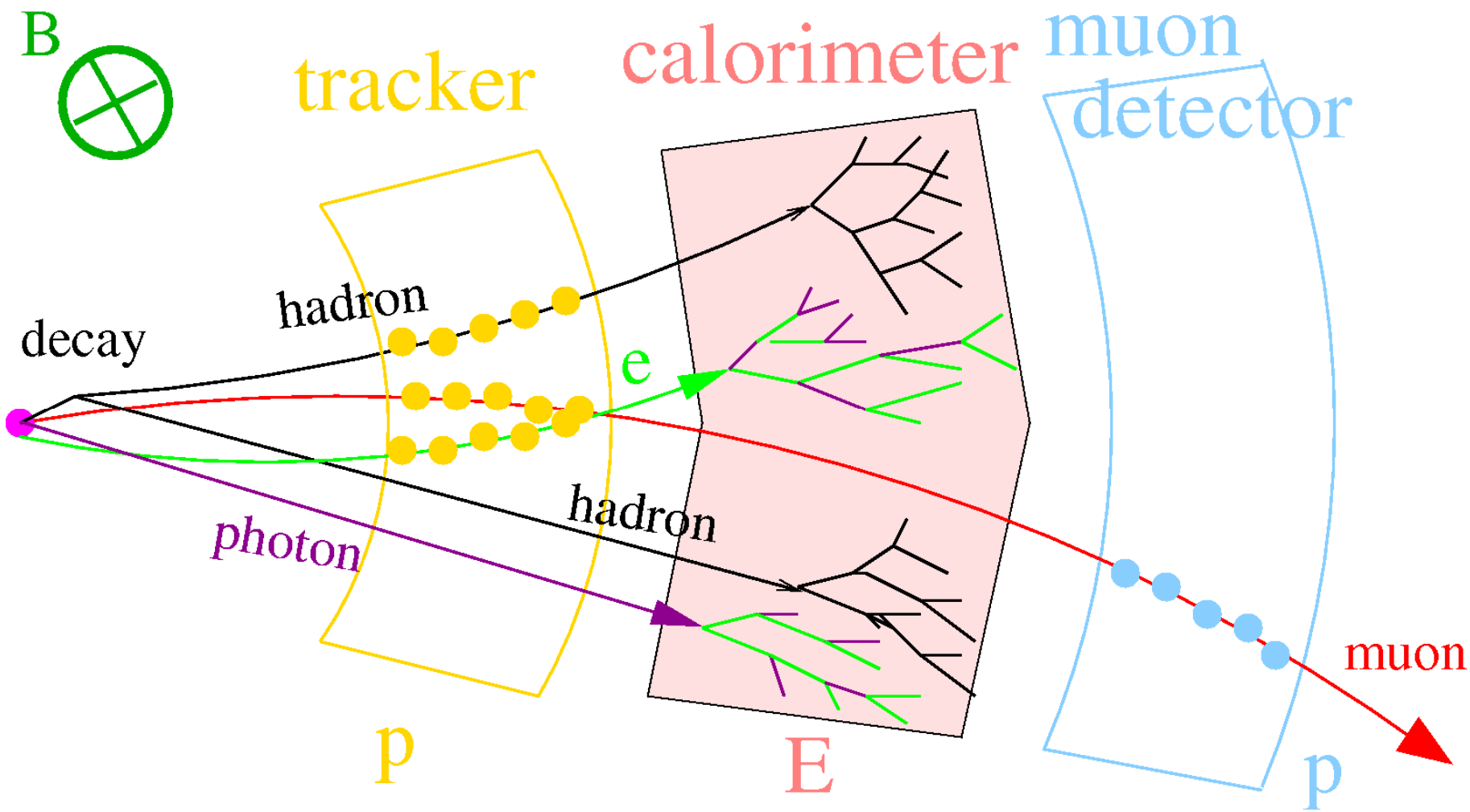
**In Materie enstehen Sekundärteilchen, die das Material anregen.**

**Das entstehende Licht wird nachgewiesen und ist ein Maß für die Energie.**

**Energieauflösung ~ Prozent**

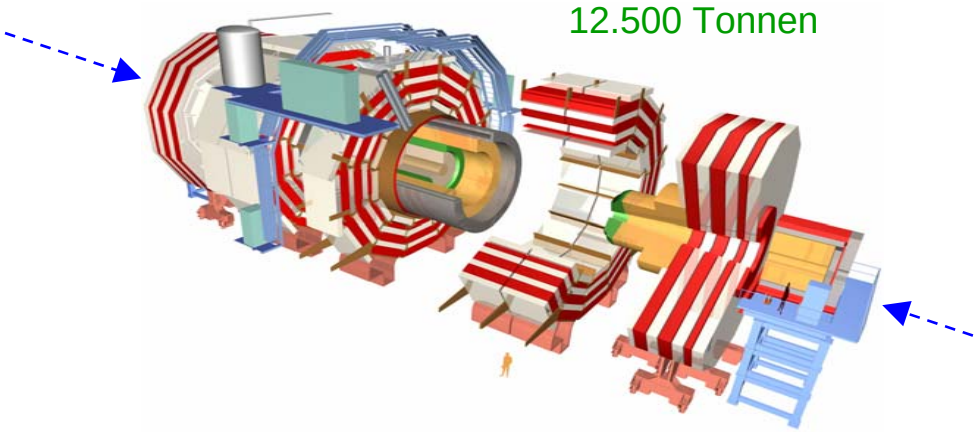
# Universaldetektoren

Nachweisbar: langlebige Teilchen mit elm. und/oder starker Wechselwirkung




Viele Teilchen sind kurzlebig → Nachweis nur über ihre Zerfallsprodukte

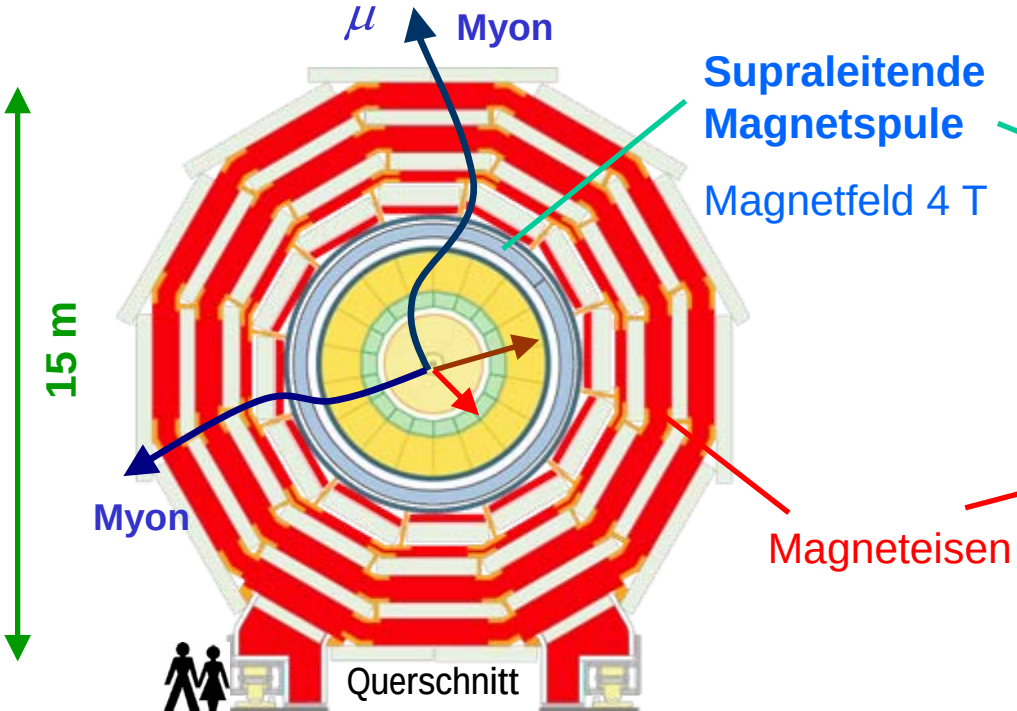
# CMS – Detektor

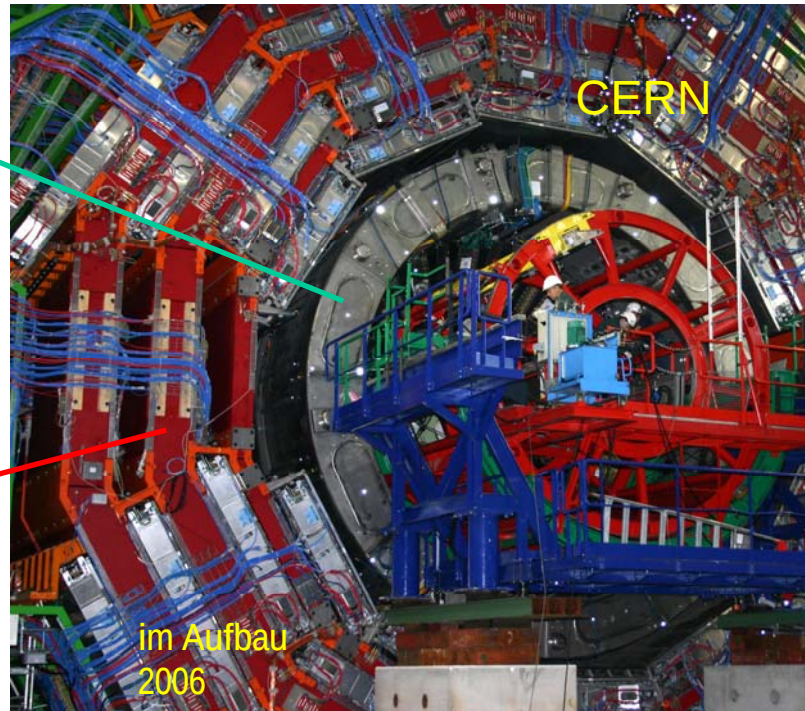



**80 Mio Detektorelemente**

**1000 Teilchen**

40 Millionen mal pro Sekunde

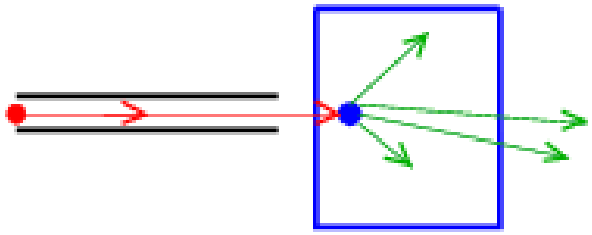


# Teilchenkollisionen

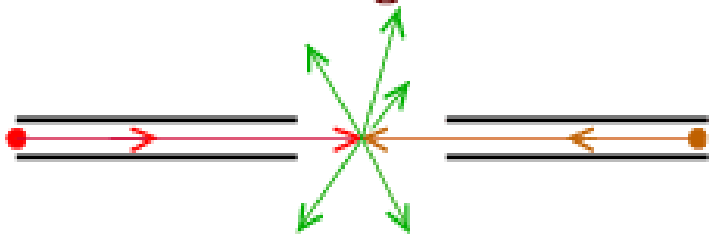
## Drei Möglichkeiten:

- Teilchen werden auf ruhende Materie geschossen



$$s = 2mE$$

- Zwei Beschleuniger schießen Teilchen aufeinander

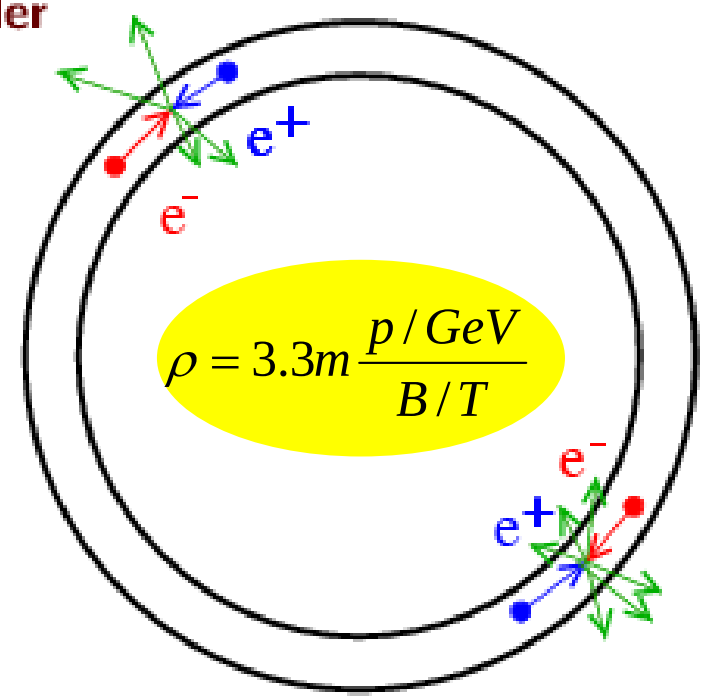


$$s = 4E^2$$

Hohe Kollisionsenergie!

- EIN Ring mit entgegenlaufenden Teilchen und Antiteilchen

Hohe Kollisionsenergie! Elegant!




$$\rho = 3.3m \frac{p/GeV}{B/T}$$

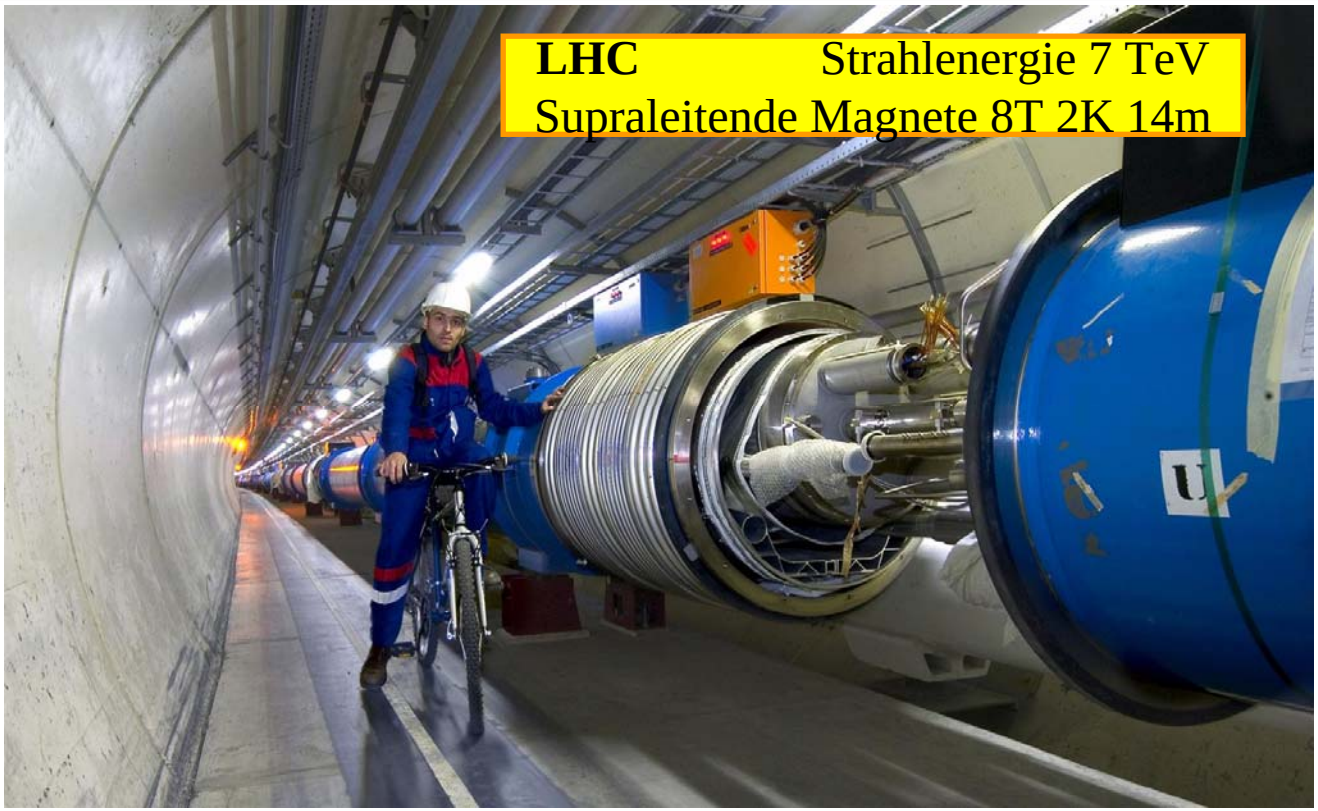
## Teilchensorten:

p, e und Antiteilchen

Kerne

# Grosse Teilchenbeschleuniger

| Name | Zeit | Teilchen | $\rho$ / km | $E$ / GeV |
|---|---|---|---|---|
| HERA, DESY | 1992 - 2007 | $e^-p$, $e^+p$ | 1 | 30 + 900 |
| SPS, CERN | 1981 - 1990 | $p\bar{p}$ | 1 | 300 + 300 |
| TEVATRON, USA | 1987 - 2009 | $p\bar{p}$ | 1 | 1000 + 1000 |
| LHC, CERN | 2008 - 2020 | $pp$ | 4 | 7000 + 7000 |
| SLC, USA | 1989 - 1999 | $e^-e^+$ | $\infty$ | 50 + 50 |
| LEP, CERN | 1989 - 2000 | $e^-e^+$ | 4 | 104 + 104 |



# Drehimpulserhaltung -> Kombination von Drehimpulsen

Note: A $\sqrt{\ }$ is to be understood over *every* coefficient, *e.g.*, for $-8/15$ read $-\sqrt{8/15}$.

Notation:

| $J$ | $J$ | ... |
|---|---|---|
| $M$ | $M$ | ... |
| $m_1$ $m_2$ | | |
| $m_1$ $m_2$ | | Coefficients |
| ⋮ | ⋮ | |

## Clebsch-Gordon

### 1/2×1/2

| $m_1$ $m_2$ | $J=1$, $M=+1$ | $J=1$, $M=0$ | $J=0$, $M=0$ |
|---|---|---|---|
| +1/2 +1/2 | 1 | | |
| +1/2 −1/2 | | 1/2 | 1/2 |
| −1/2 +1/2 | | 1/2 | −1/2 |
| −1/2 −1/2 | | | 1 |

### 1×1/2

| $m_1$ $m_2$ | $J=3/2$, $M=+3/2$ | $J=3/2$, $M=+1/2$ | $J=3/2$, $M=-1/2$ | $J=3/2$, $M=-3/2$ |
|---|---|---|---|---|
| +1 +1/2 | 1 | | | |
| +1 −1/2 | | 1/3 | 2/3 | |
| 0 +1/2 | | 2/3 | −1/3 | |
| 0 −1/2 | | | 2/3 | 1/3 |
| −1 +1/2 | | | 1/3 | −2/3 |
| −1 −1/2 | | | | 1 |

### 2×1/2

| $m_1$ $m_2$ | $J=5/2$, $M=+5/2$ | $J=5/2$, $M=+3/2$ | $J=3/2$, $M=+3/2$ |
|---|---|---|---|
| +2 1/2 | 1 | | |
| +2 −1/2 | | 1/5 | 4/5 |
| +1 +1/2 | | 4/5 | −1/5 |
| +1 −1/2 | | | 2/5 |
| 0 +1/2 | | | 3/5 |
| 0 −1/2 | | | 3/5 |
| −1 +1/2 | | | 2/5 |
| −1 −1/2 | | | 4/5 |
| −2 +1/2 | | | 1/5 |
| −2 −1/2 | | | 1 |

### 3/2×1/2

| $m_1$ $m_2$ | $J=2$, $M=+2$ | $J=2$, $M=+1$ | $J=1$, $M=+1$ |
|---|---|---|---|
| +3/2 +1/2 | 1 | | |
| +3/2 −1/2 | | 1/4 | 3/4 |
| +1/2 +1/2 | | 3/4 | −1/4 |
| +1/2 −1/2 | | | 1/2 |
| −1/2 +1/2 | | | 1/2 |
| −1/2 −1/2 | | | 3/4 |
| −3/2 +1/2 | | | 1/4 |
| −3/2 −1/2 | | | 1 |

### 2×1

| $m_1$ $m_2$ | $J=3$, $M=+3$ | $J=3$, $M=+2$ | $J=3$, $M=+1$ | $J=3$, $M=0$ | $J=2$, $M=+2$ | $J=2$, $M=+1$ | $J=1$, $M=+1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| +2 +1 | 1 | | | | | | |
| +2 0 | | 1/3 | 2/3 | | | | |
| +1 +1 | | 2/3 | −1/3 | | | | |
| +2 −1 | | | 1/15 | 1/3 | 3/5 | | |
| +1 0 | | | 8/15 | 1/6 | −3/10 | | |
| 0 +1 | | | 6/15 | −1/2 | 1/10 | | |
| +1 −1 | | | 1/5 | 1/2 | 3/10 | | |
| 0 0 | | | 3/5 | 0 | −2/5 | | |
| −1 +1 | | | 1/5 | −1/2 | 3/10 | | |
| 0 −1 | | | 6/15 | 1/2 | 1/10 | | |
| −1 0 | | | 8/15 | −1/6 | −3/10 | | |
| −2 +1 | | | 1/15 | −1/3 | 3/5 | | |
| −1 −1 | | | | | | 2/3 | 1/3 |
| −2 0 | | | | | | 1/3 | −2/3 |
| −2 −1 | | | | | | | 1 |

### 3/2×1

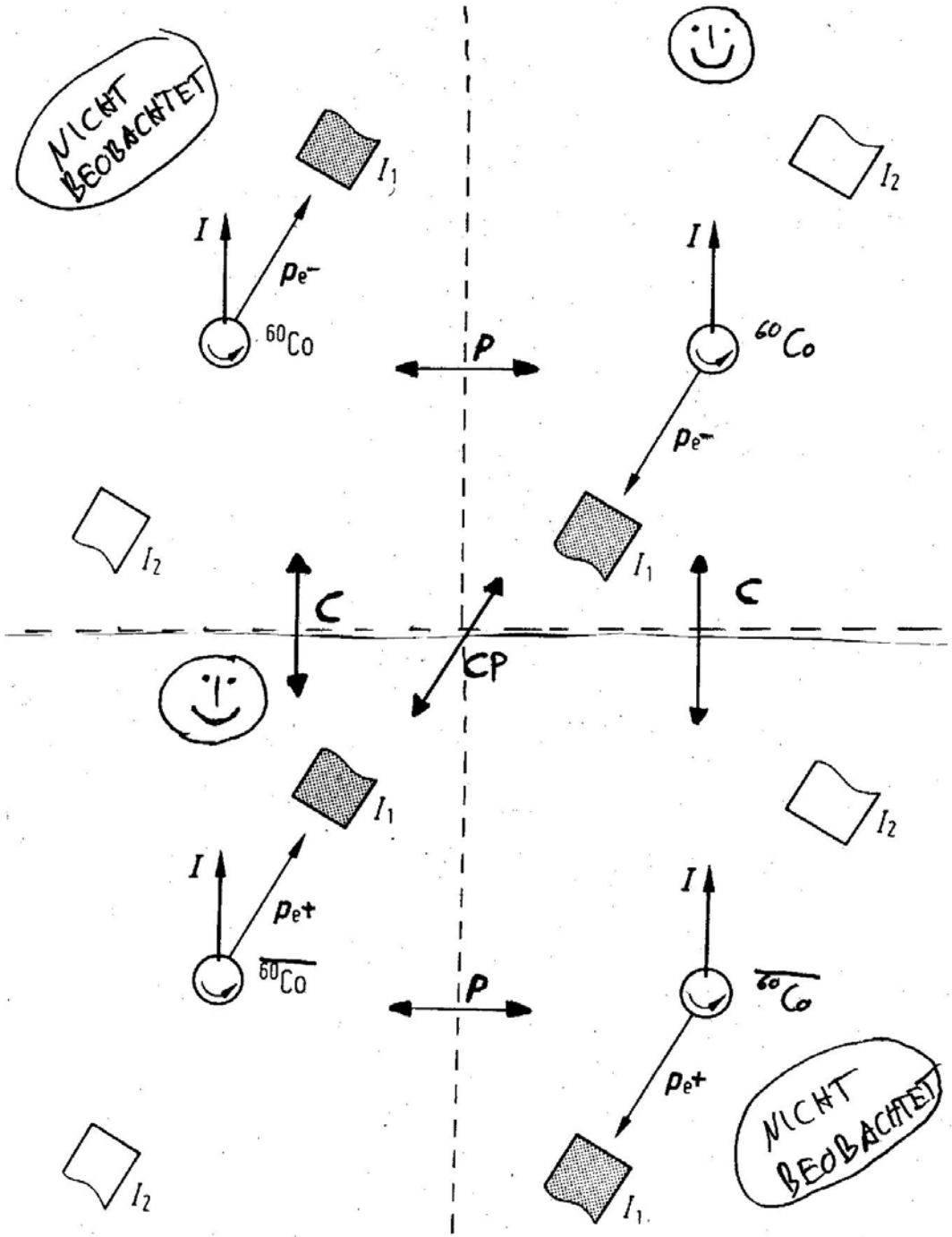
| $m_1$ $m_2$ | $J=5/2$, $M=+5/2$ | $J=5/2$, $M=+3/2$ | $J=5/2$, $M=+1/2$ | $J=3/2$, $M=+3/2$ | $J=3/2$, $M=+1/2$ | $J=1/2$, $M=+1/2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| +3/2 +1 | 1 | | | | | |
| +3/2 0 | | 2/5 | 3/5 | | | |
| +1/2 +1 | | 3/5 | −2/5 | | | |
| +3/2 −1 | | | 1/10 | 2/5 | 1/2 | |
| +1/2 0 | | | 3/5 | 1/15 | −1/3 | |
| −1/2 +1 | | | 3/10 | −8/15 | 1/6 | |
| +1/2 −1 | | | | 3/10 | 8/15 | 1/6 |
| −1/2 0 | | | | 3/5 | −1/15 | −1/3 |
| −3/2 +1 | | | | 1/10 | −2/5 | 1/2 |
| −1/2 −1 | | | | | 3/5 | 2/5 |
| −3/2 0 | | | | | 2/5 | −3/5 |
| −3/2 −1 | | | | | | 1 |

### 1×1

| $m_1$ $m_2$ | $J=2$, $M=+2$ | $J=2$, $M=+1$ | $J=1$, $M=+1$ | $J=2$, $M=0$ | $J=1$, $M=0$ | $J=0$, $M=0$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| +1 +1 | 1 | | | | | |
| +1 0 | | 1/2 | 1/2 | | | |
| 0 +1 | | 1/2 | −1/2 | | | |
| +1 −1 | | | 1/6 | 1/2 | 1/3 | |
| 0 0 | | | 2/3 | 0 | −1/3 | |
| −1 +1 | | | 1/6 | −1/2 | 1/3 | |
| 0 −1 | | | | 1/2 | 1/2 | |
| −1 0 | | | | 1/2 | −1/2 | |
| −1 −1 | | | | | | 1 |

$$\langle j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 J M \rangle = (-1)^{J-j_1-j_2} \langle j_2 j_1 m_2 m_1 | j_2 j_1 J M \rangle$$

# Symmetrieverletzungen: P, C



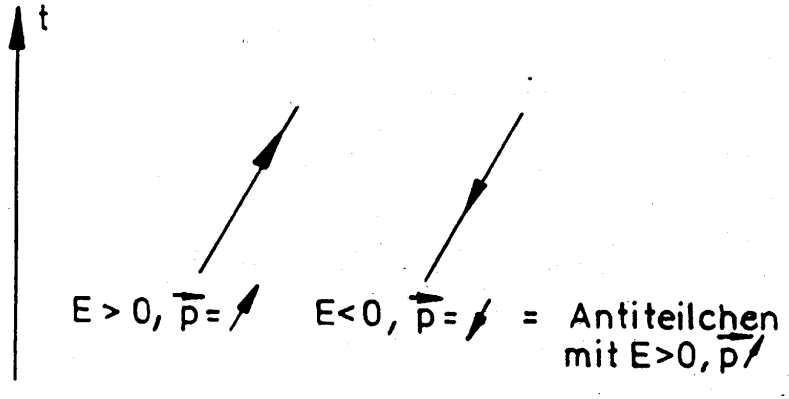

**Schwache WW**

# Eichtheorien – Beispiel QED

## Freies Teilchen:

$$\boxed{\mathcal{L} = \bar{\Psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi}$$

$$\boxed{(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi = 0}$$

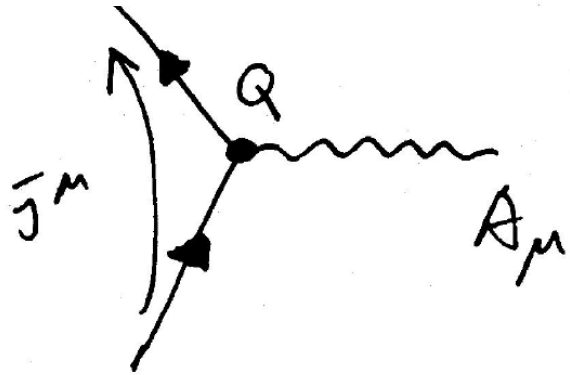



## + lokale Eichinvarianz unter Phasentransformation U(1):

$$\boxed{\mathcal{L} = i\bar{\Psi}\gamma^\mu \partial_\mu \Psi - m\bar{\Psi}\Psi + Q\bar{\Psi}\gamma^\mu \Psi A_\mu - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}$$

$$\Psi \longrightarrow \Psi' = U\Psi \qquad U = e^{i\alpha}$$

$$A_\mu \longrightarrow A'_\mu = A_\mu + \frac{1}{Q} \cdot \partial_\mu \alpha(x)$$



# Inhalt

- **Wiederholung Grundlagen Elementarteilchenphysik I**

- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**

  Elektromagnetische Wechselwirkung

  Starke Wechselwirkung

  Schwache Wechselwirkung

  Higgs

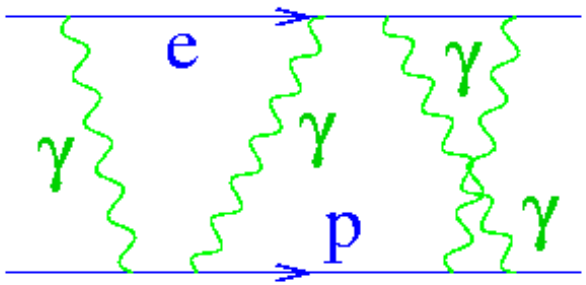
  Oszillationsphänomene

  Neue Teilchen

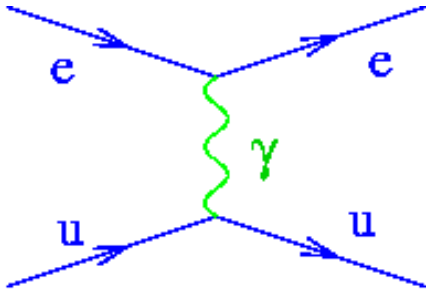
- **Astroteilchenphysik / Kosmologie**

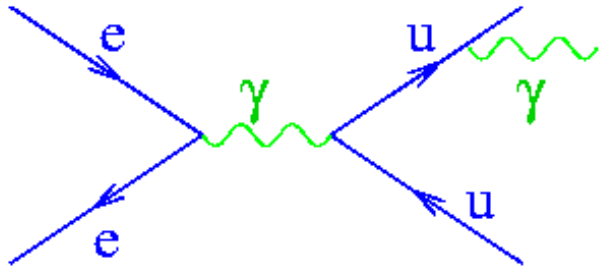
# Elektromagnetische Wechselwirkung

Bindungszustand: H-Atom:



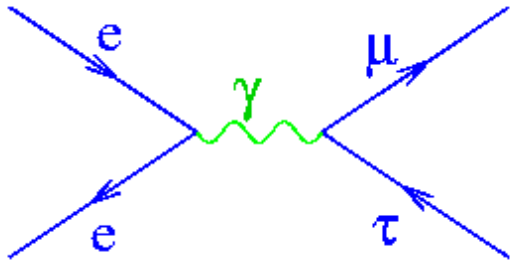

erlaubt:




**Erhaltungssätze:** Ladung (immer), Teilchensorte (elm. WW)

verboten:



# Feynman-Regeln QED

electron in initial state

$u(p)$

incoming electron line

$e^-(p)$

electron in final state

$\bar{u}(p)$

outgoing electron line

$e^-(p)$

positron in initial state

$\bar{v}(q)$

outgoing electron line

$e^+(q)$

positron in final state

$v(q)$

incoming electron line

$e^+(q)$

photon in initial state

$\varepsilon^\mu$

incoming photon line

$\gamma(k)$

photon in final state

$\varepsilon^{\mu *}$

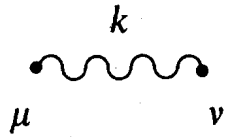
outgoing photon line

$\gamma(k)$

virtual photon

$$\frac{-ig_{\mu\nu}}{k^2 + i\varepsilon}$$

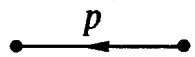
internal photon line




virtual electron

$$i\frac{\not{p} + m}{p^2 - m^2 + i\varepsilon}$$

internal electron line

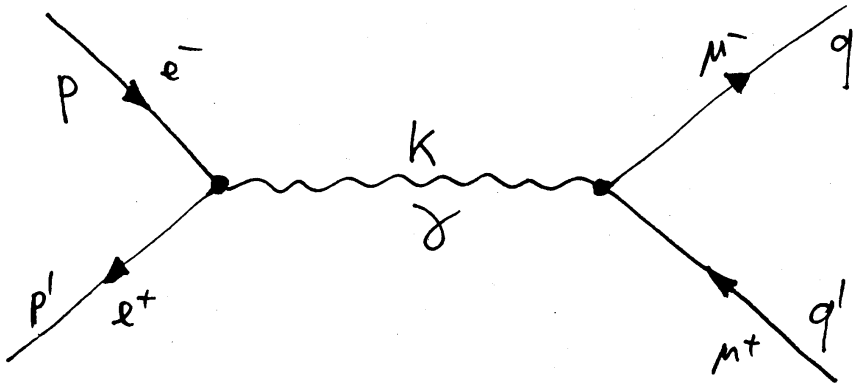



elementary process

$ie\gamma^\mu$

vertex

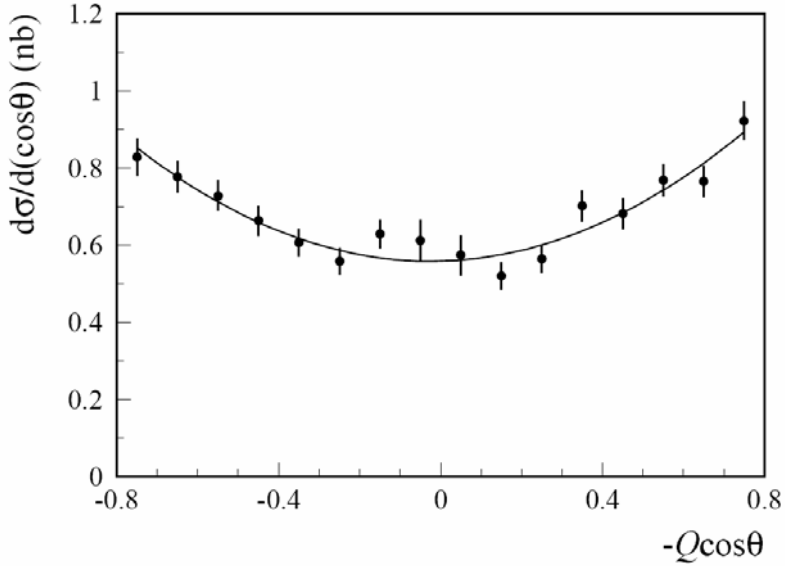
# Berechnung elektromagnetischer Prozesse




$$\mathcal{M} \sim \bar{v}(p')(ie\gamma^\mu)u(p)\,\frac{-ig_{\mu\nu}}{k^2+i\epsilon}\,\bar{u}(q)(ie\gamma^\nu)v(q')$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{64\pi^2 s}\cdot|M|^2 = \frac{1}{4}\cdot\frac{\alpha^2}{s}\cdot(1+\cos^2\theta)$$

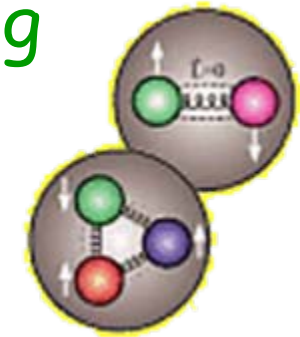
$$\sigma = \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-1}^{1} d\cos\theta \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{4\pi}{3}\cdot\frac{\alpha^2}{s}$$



# Starke Wechselwirkung

**Isolierte Quarks gibt es nicht!**

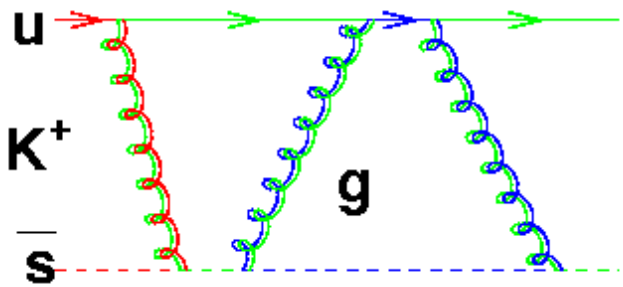
**Beobachtbar sind nur „farbneutrale“ Kombinationen**



Meson $= q\,\bar{q}$

Baryon = q q q

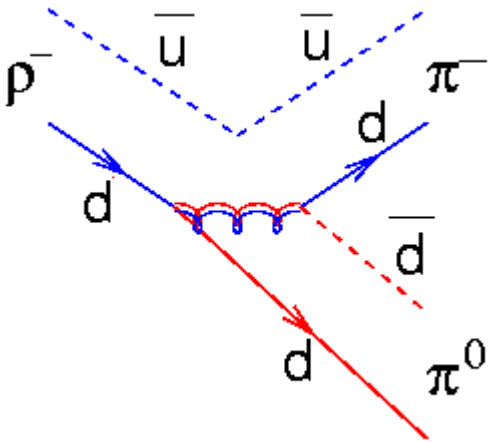
Bindungszustand:




Gluon =

Farbe+Antifarbe

Zerfall:

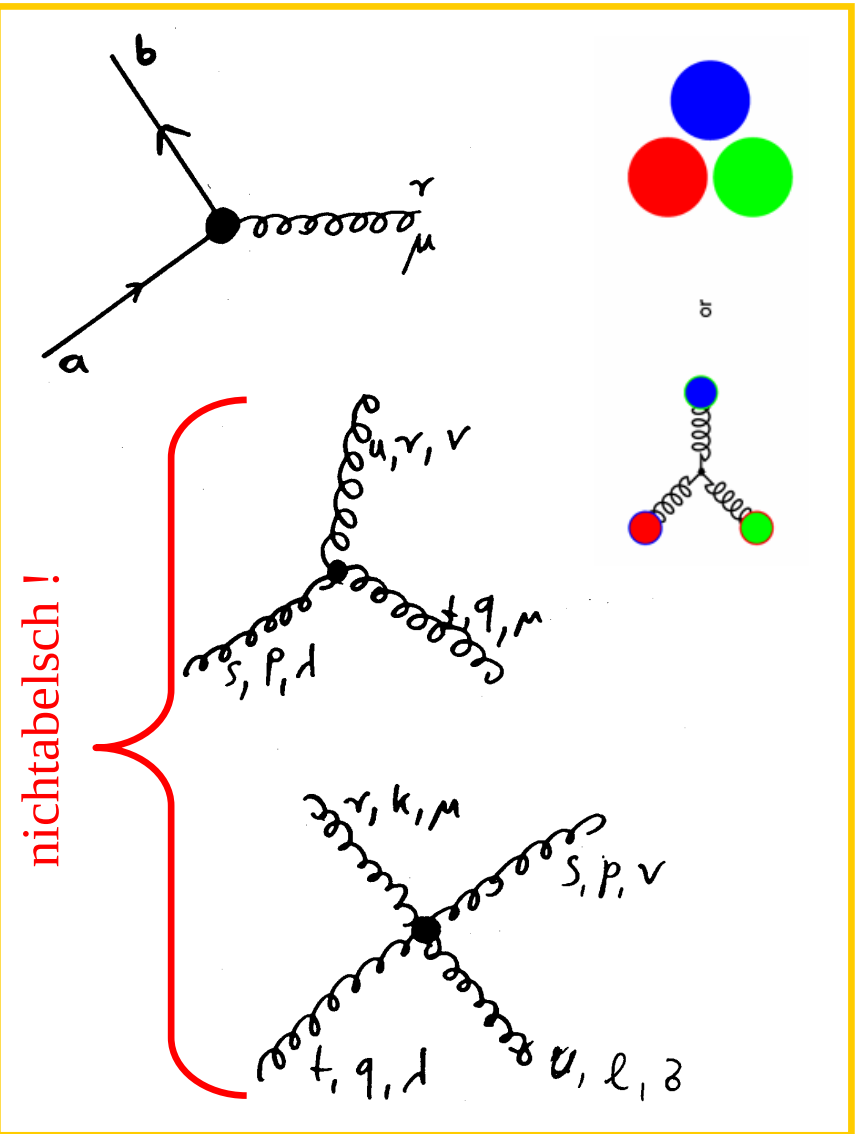


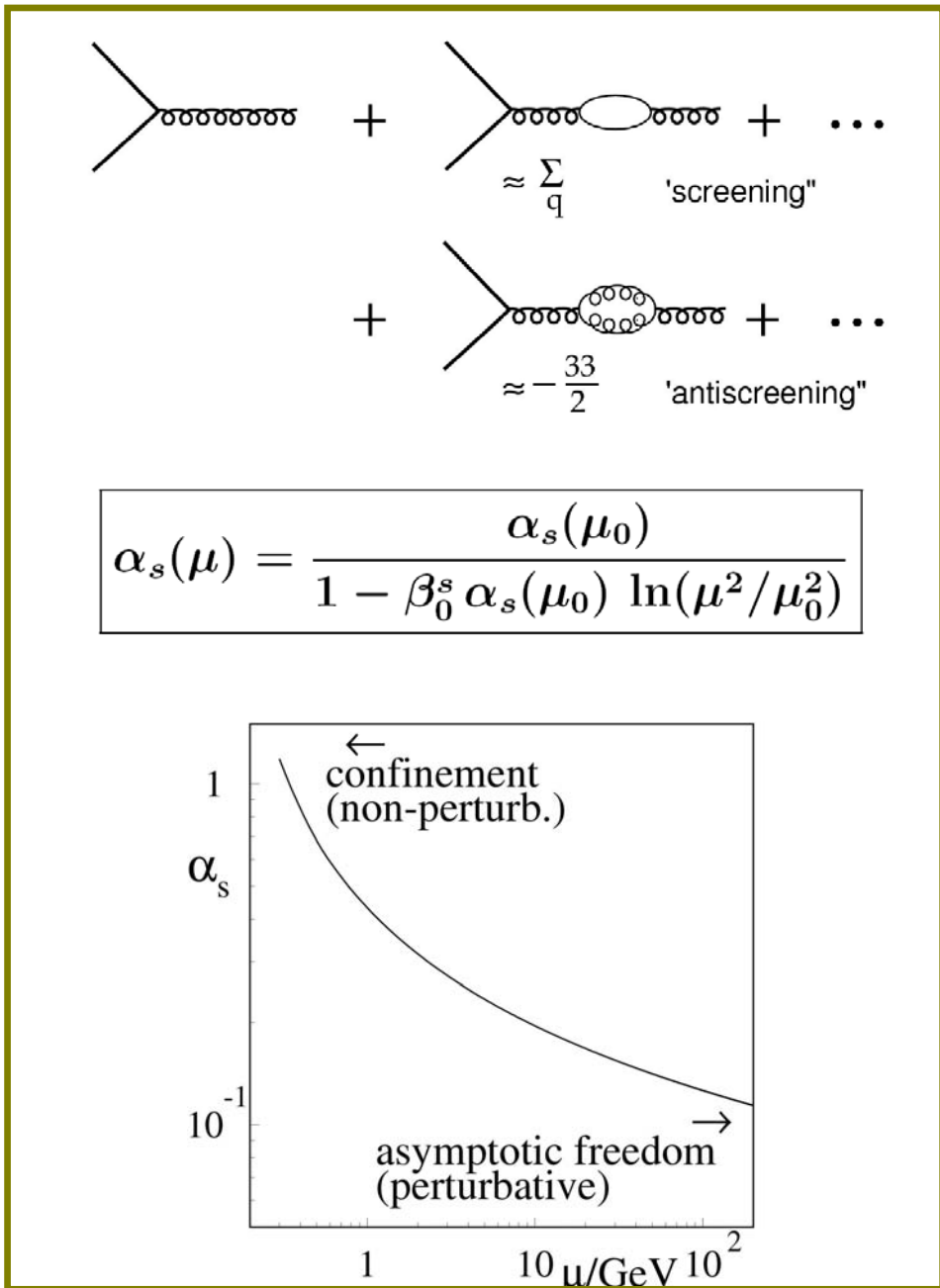

Starke WW:
Nobelpreis 2004:
**Gross, Politzer, Wilczek**

**Erhaltungssätze:** Quarksorte, Farbe

# Quantenchromodynamik

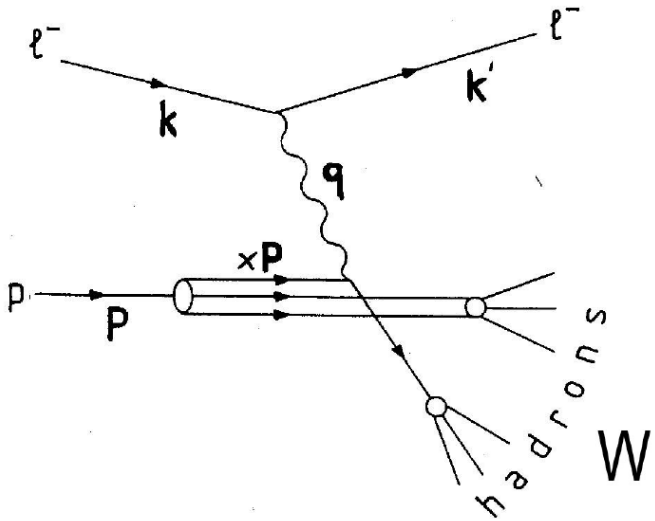
## SU(3)-Farbsymmetrie

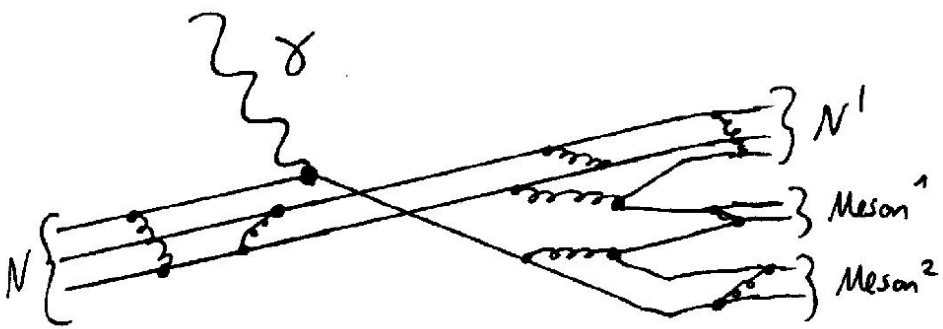


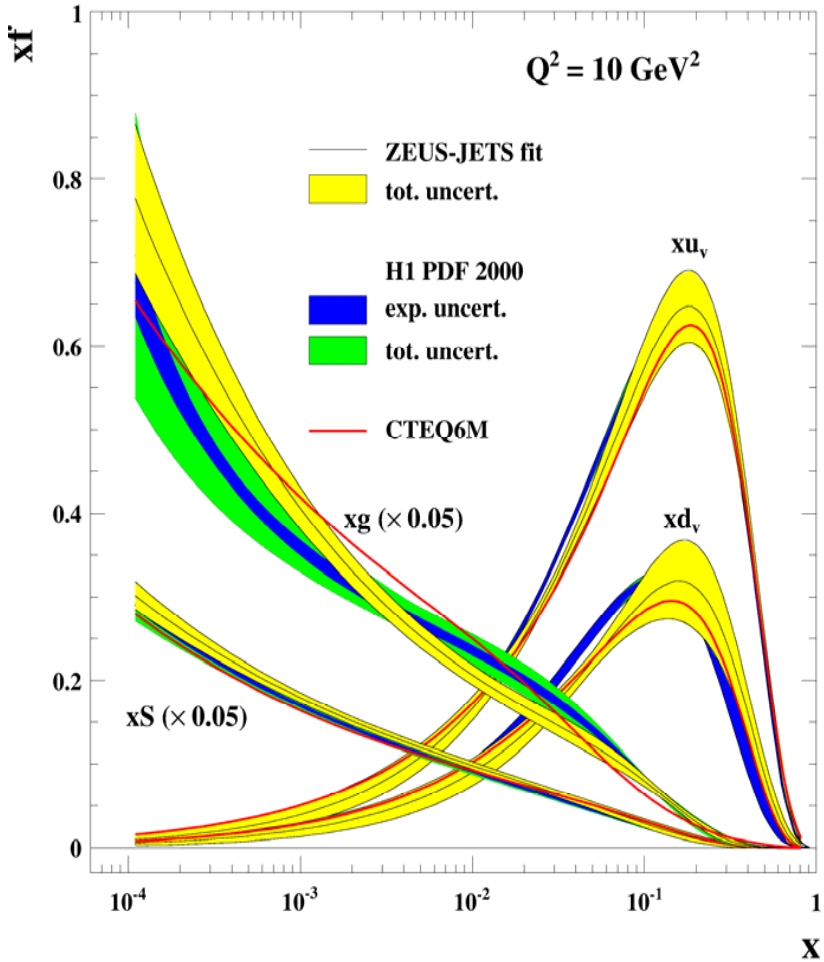




$$\alpha_s(\mu) = \frac{\alpha_s(\mu_0)}{1 - \beta_0^s\, \alpha_s(\mu_0)\, \ln(\mu^2/\mu_0^2)}$$

# Nukleonstruktur



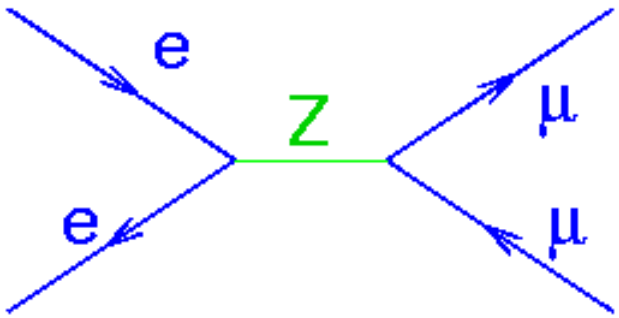



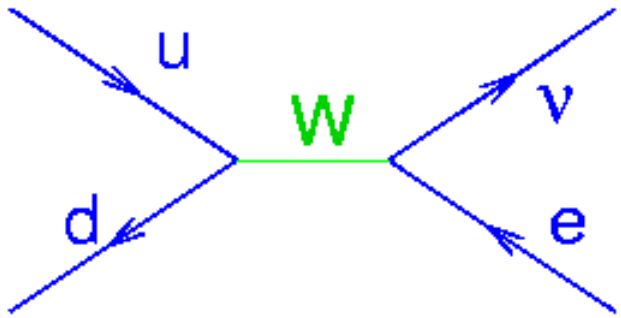




$$\frac{d^2\sigma^{eN}}{dy\,dx} = \frac{2\pi\alpha^2\,sx}{t^2}\cdot\left(1+(1-y)^2\right)\cdot\sum_f Q_f^2\,q_f(x)$$

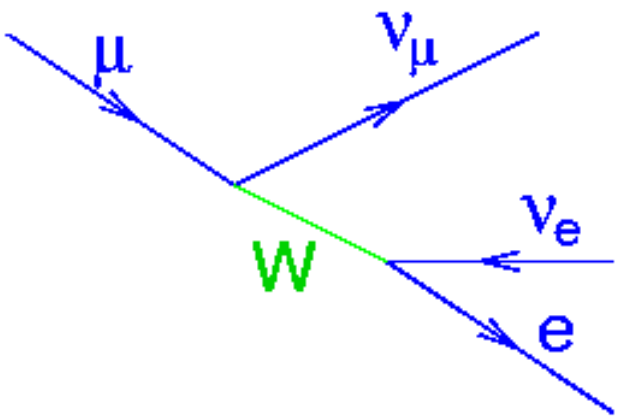
# Schwache Wechselwirkung

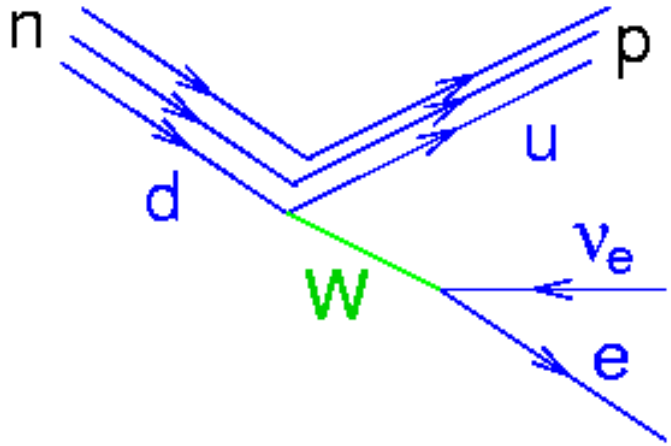
Kollisionsereignis



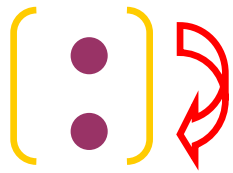




Zerfälle:



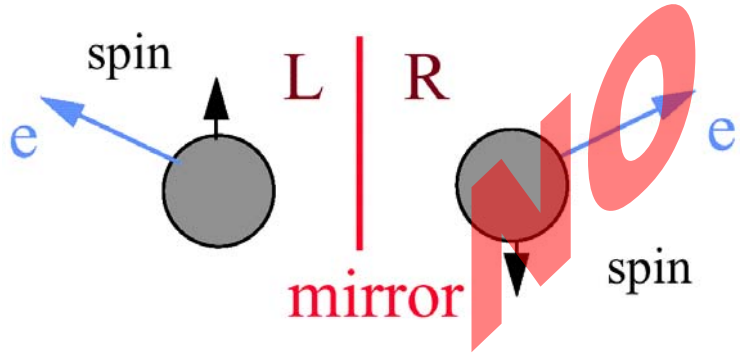




W-Austausch: Teilchenart ist NICHT erhalten !



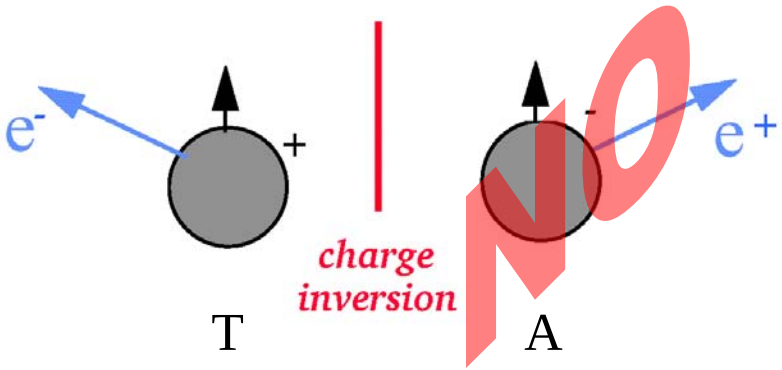
# Symmetrieverletzungen (schwache WW)

## Spiegelsymmetrie **P**




verletzt! (1957)

## Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie **C**




verletzt!

**aber: Kombination C P : ok!** (linkshändiges T ↔ rechtshändiges A)

---

Seit 1964: Experimente:

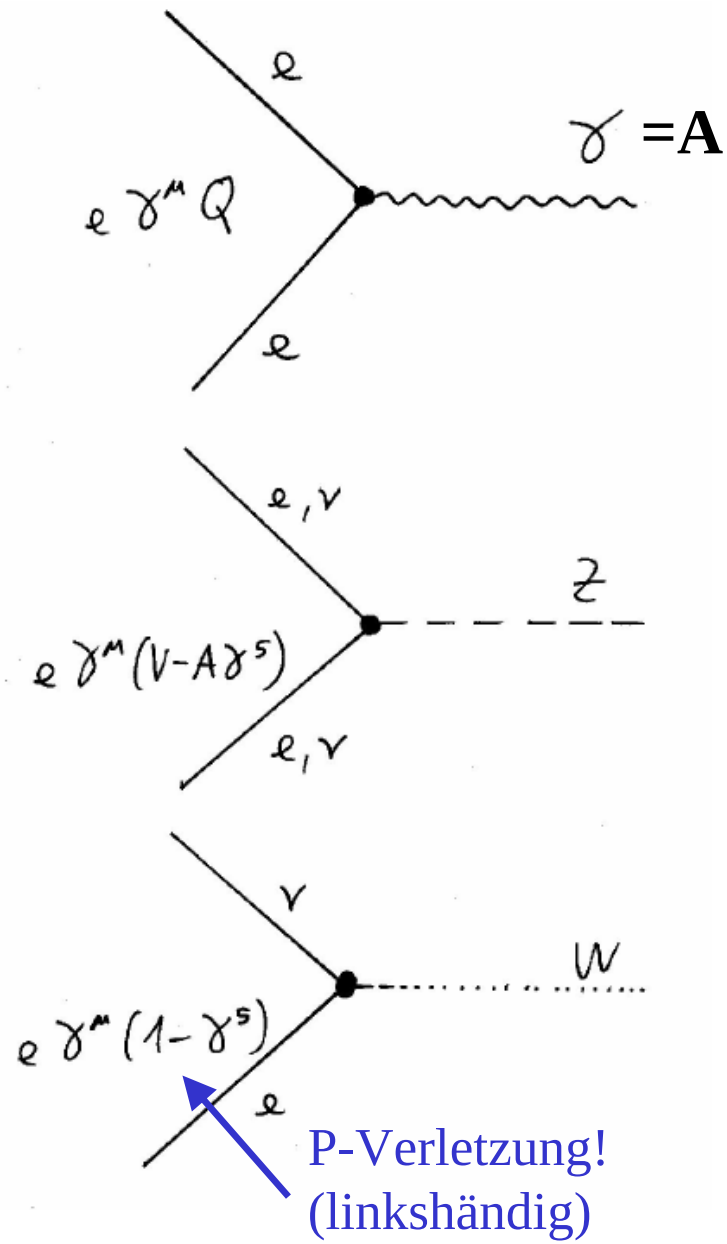
Auch CP ist (schwach) verletzt!

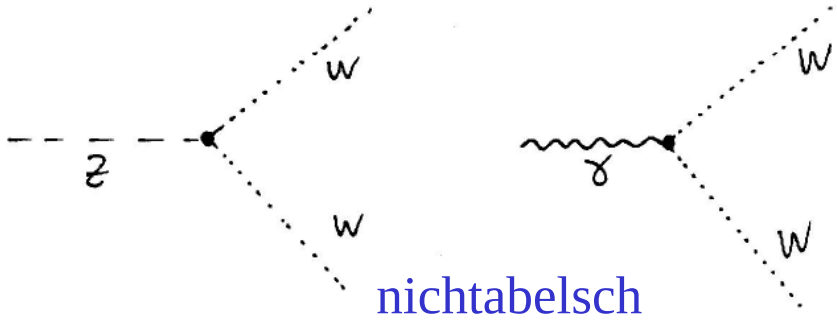
$$B^0 \to J/\psi\ K_s$$

$$\neq$$

$$\overline{B}^0 \to J/\psi\ K_s$$

# Schwache Wechselwirkung – SU(2)xU(1) Eichtheorie




**Eichbosonen:**

$$U(1): \quad B$$

$$SU(2): \; W^1, W^2, W^3$$

$$A = \cos\theta_W \cdot B + \sin\theta_W \cdot W^3$$

$$Z = -\sin\theta_W \cdot B + \cos\theta_W \cdot W^3$$

$$W^{\pm} = (W^1 \mp iW^2)/\sqrt{2}$$

Mischung

# Das Higgs-Boson

Experiment:

$$\frac{M_W}{M_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033}{91.188 \pm 0.002} = 0.8823 \pm 0.0004$$

ABER:
Theorie verlangt:
Alle Teilchen sind **masselos** !

Ausweg: zusätzliches Teilchen:

Higgs

neutral, Spin-0, instabil, (nur) Masse unbekannt

bisher experimentell nicht gefunden: M > 115 GeV

# Das Higgs-Boson

Messung

$$\frac{M_W}{M_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033}{91.188 \pm 0.002} = 0.8823 \pm 0.0004$$

$$= 0.8812 \pm 0.0014$$

Rechnung

zusätzliches Teilchen:

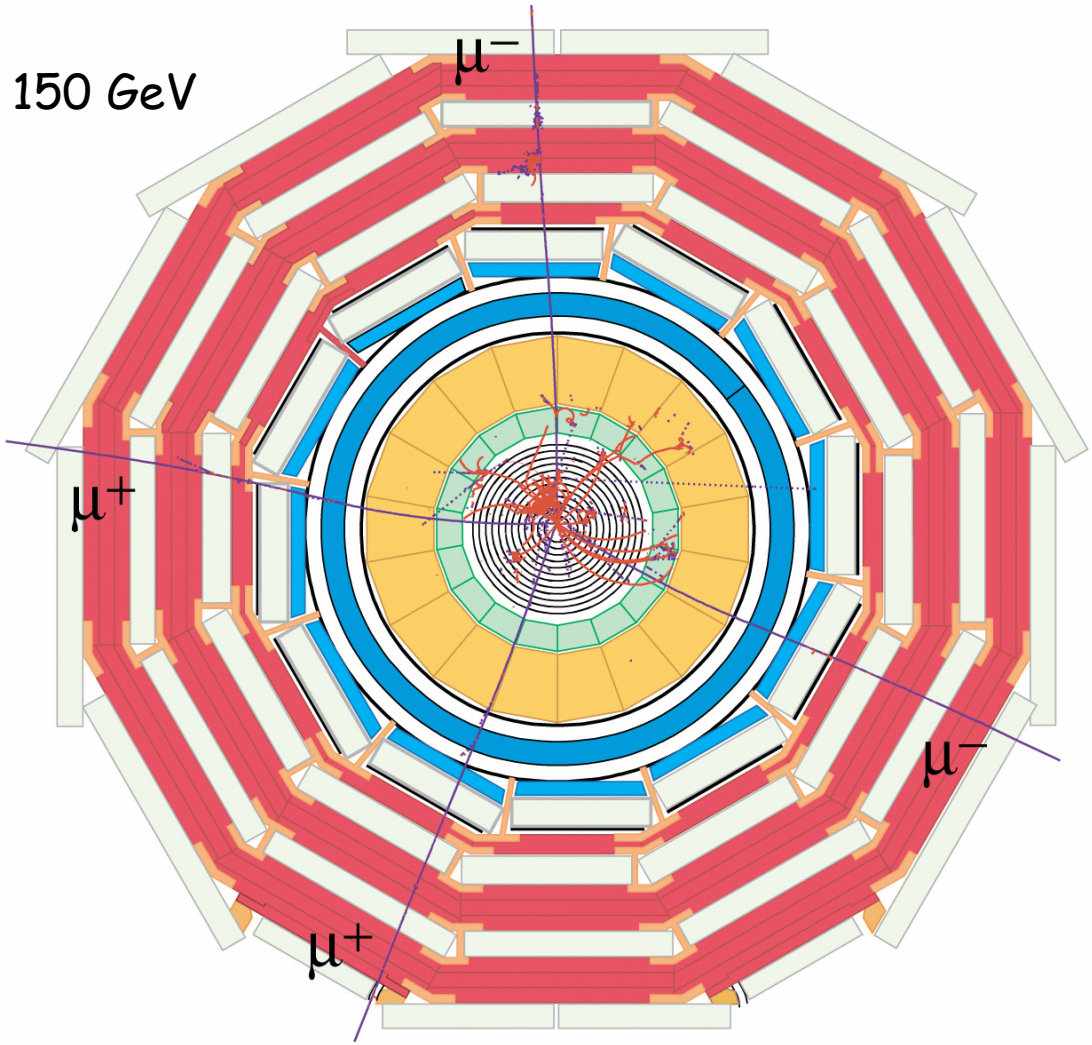
Higgs

neutral, Spin-0, instabil, (nur) Masse unbekannt

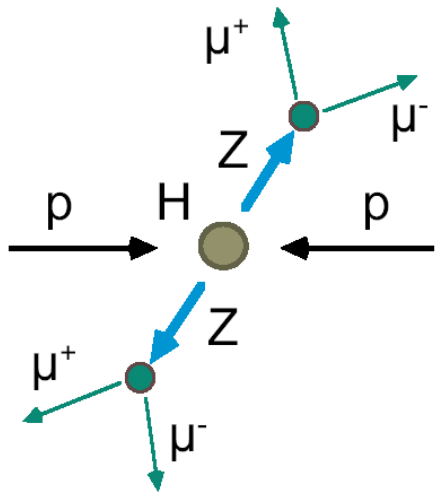
**Standardmodell-Theorie**

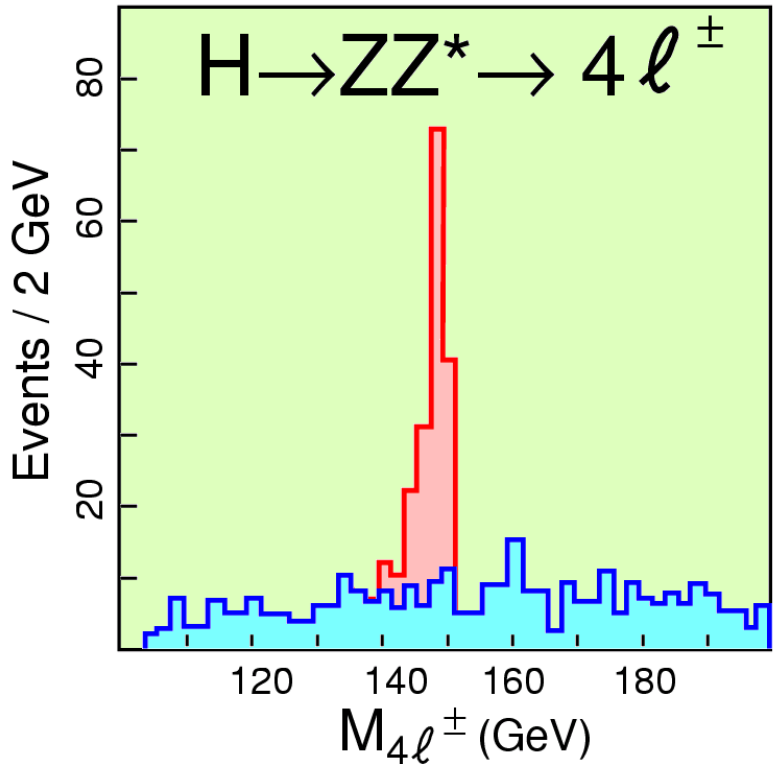
**(mit Higgs) funktioniert hervorragend !**

# Higgs - Entdeckung ?



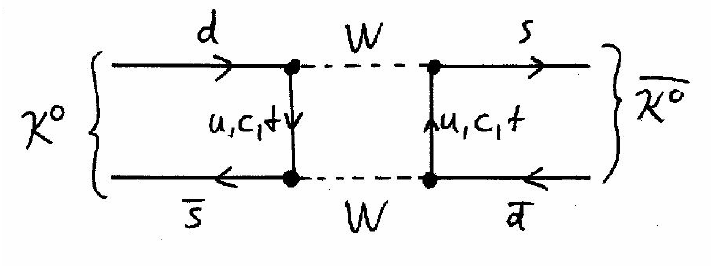

CMS



# Mesonoszillationen

Umwandlungen zwischen Teilchen sind erlaubt, wenn sie nicht verboten sind !



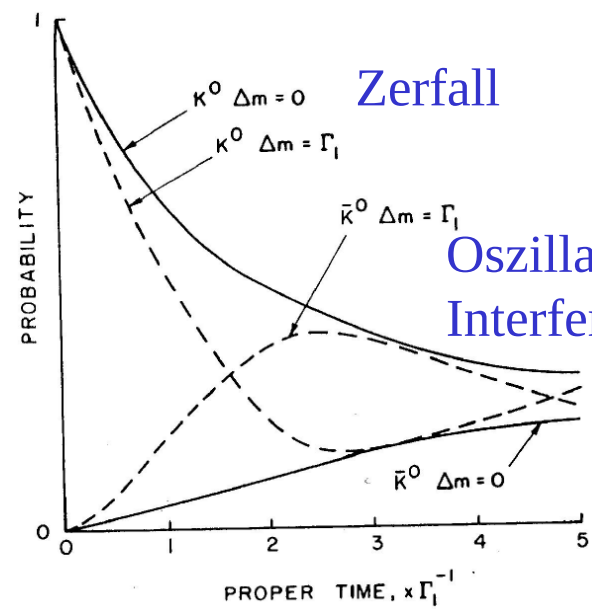

$$K_1 \equiv K_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (K^0 + \overline{K}^0) \qquad K_2 \equiv K_l = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (K^0 - \overline{K}^0)$$

$K_s \rightarrow \pi^0\pi^0$ oder $\pi^+\pi^-$ — kurzlebig, etwas leichter

$K_l \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ oder $\pi^+\pi^-\pi^0$ — langlebig

$$K_i(t) = K_i(0) \cdot e^{-im_i t - \Gamma_i t/2}$$

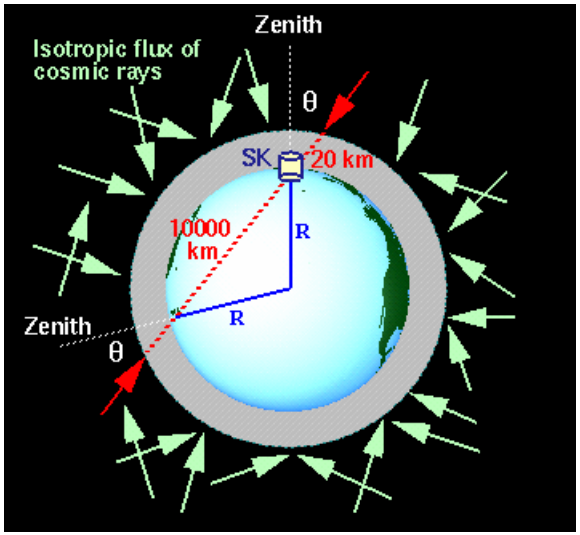
$K^0 = 50\% K_s + 50\% K_l \longrightarrow 1\% K_s + 99\% K_l \sim 50\% K_0 + 50\% \overline{K}_0$




Zerfall

Oszillation= Interferenz

# Neutrino-Oszillationen



Erdatmosphäre:

$$p + A \rightarrow \pi \rightarrow \nu_\mu$$

Nachweis:

$$\nu_\mu + e \rightarrow \mu \rightarrow Cerenkov$$

Ergebnis:

$$\boxed{\text{zu wenige } \mu \text{ , da } \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}$$

# Supersymmetrie

Materieteilchen: Spin ½ ⟷ Austauschteilchen: Spin 1

Postulat: Es gibt eine „**Supersymmetrie**“ zwischen Fermionen und Bosonen:

Zu jedem Teilchen existiert Partner mit Spindifferenz ½

Beispiele:

| Teilchen | Spin | Partner | Spin |
|---|---|---|---|
| Elektron $e$ | 1/2 | Selektron $\tilde{e}$ | 0 |
| Top-Quark $t$ | 1/2 | Stop $\tilde{t}$ | 0 |
| Photon $\gamma$ | 1 | Photino $\tilde{\gamma}$ | 1/2 |
| W-Boson $W$ | 1 | Wino $\tilde{W}$ | 1/2 |

Experimentelle Massengrenzen: > 50 GeV

Verbindung zur Astrophysik: Photino-Variante („Neutralino“) = Dunkle Materie ?

# Inhalt

- **Wiederholung Grundlagen Elementarteilchenphysik I**
- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**
- **Astroteilchenphysik / Kosmologie**

Teilchen aus dem Weltall

Prozesse im frühen, heissen Universum

Evolution des Kosmos

# Teilchenphysik und Astrophysik

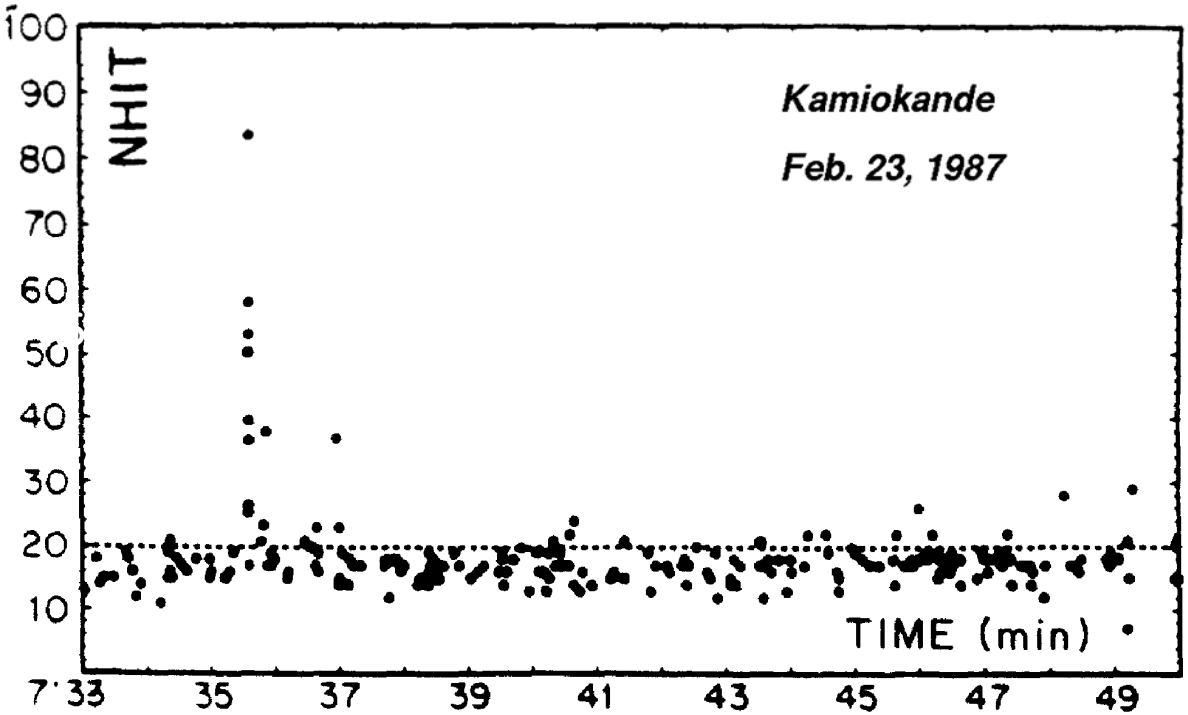
Zusammensetzung Universum

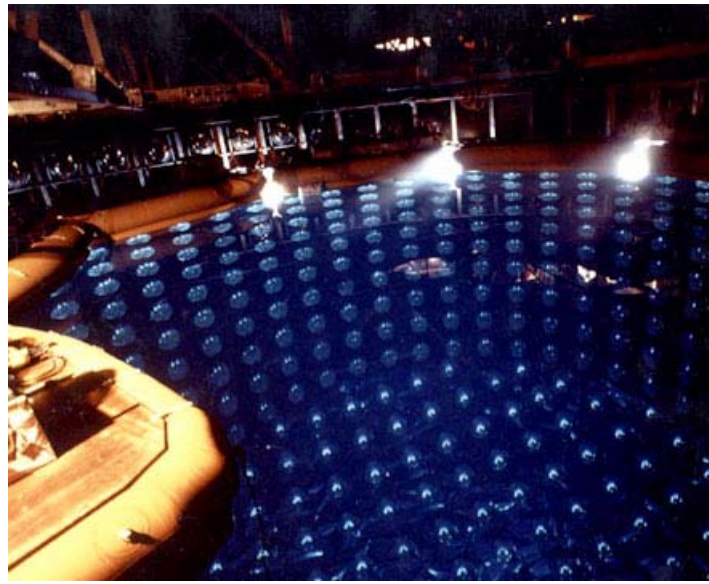
# Neutrinos aus Supernova

**SN 1987A**

(Magellansche Wolke)

$$e + \nu \rightarrow e + \nu + \gamma$$

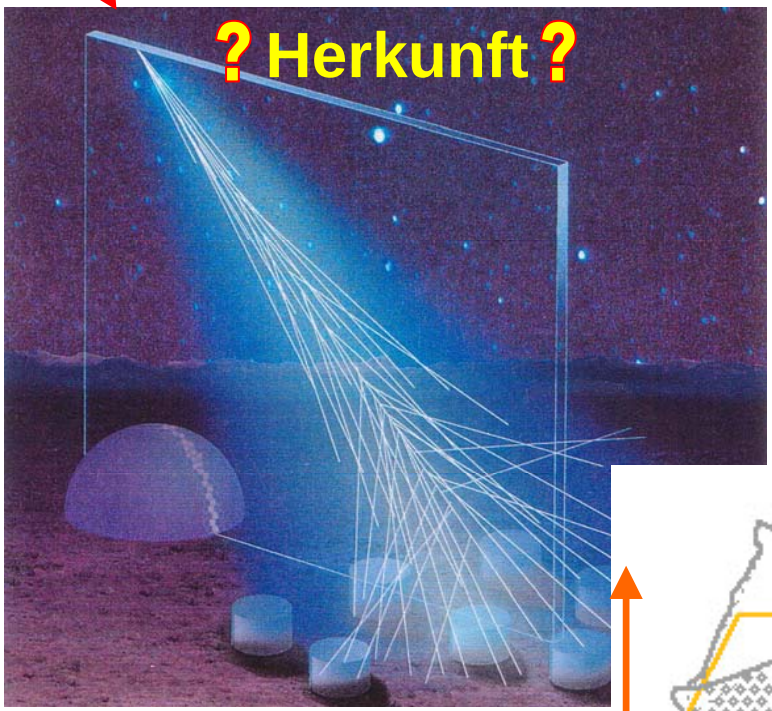


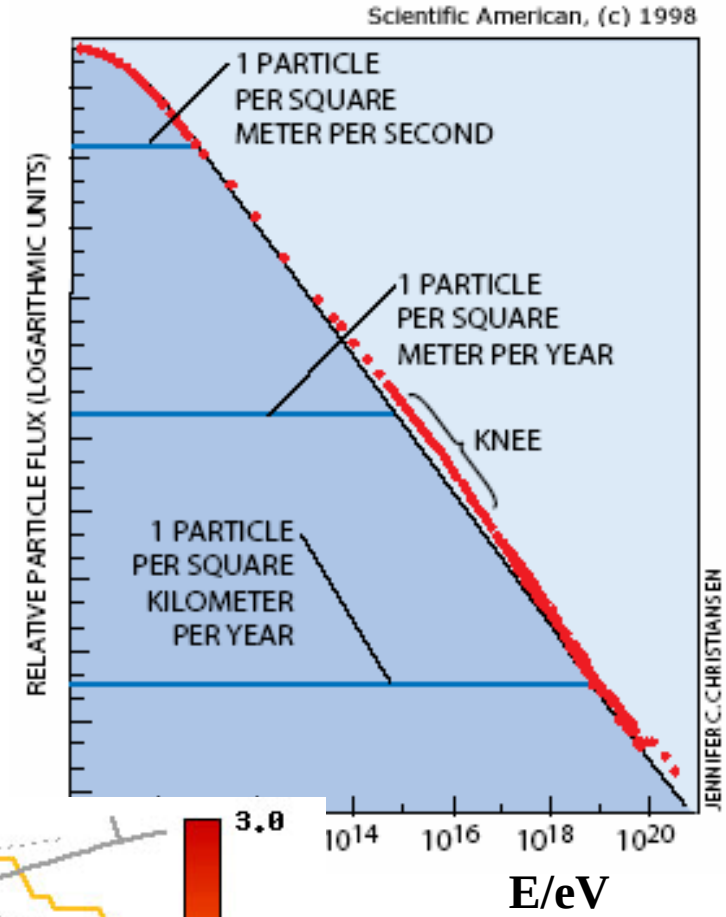



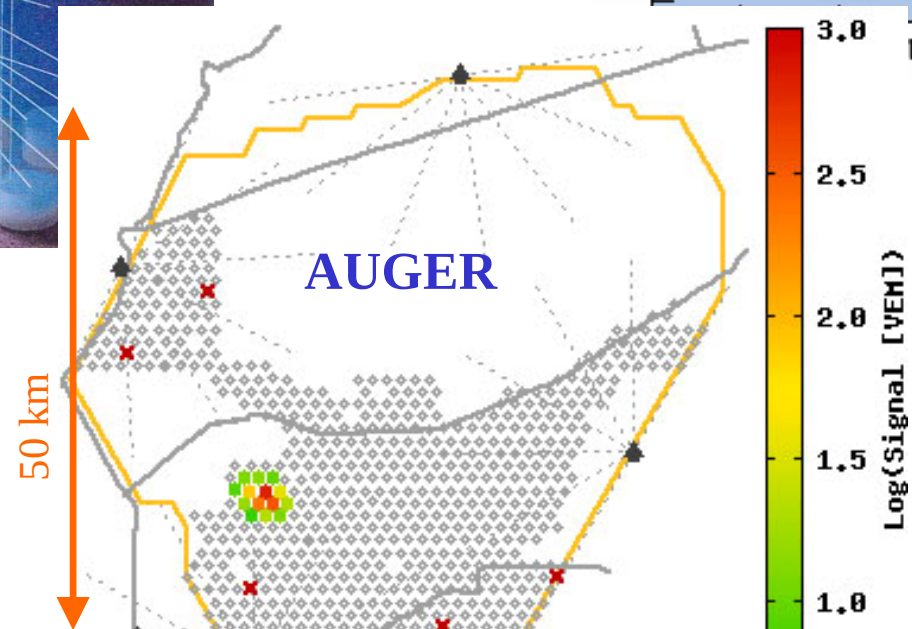
Kamiokande

# Höchstenergetische geladene Strahlung aus dem Weltall

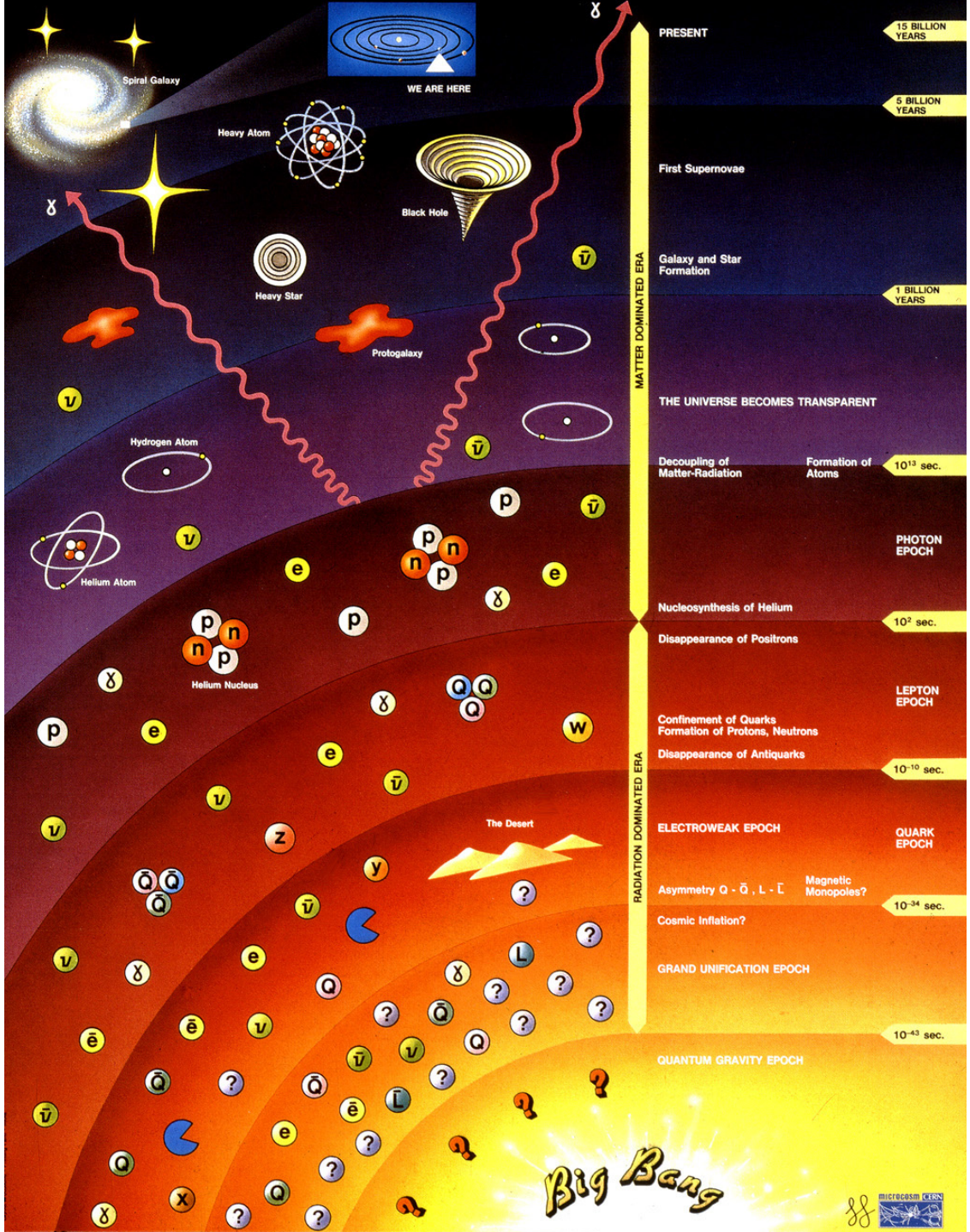
**Energie bis 100,000,000,000 GeV !**



# Teilchenphysik und Kosmologie

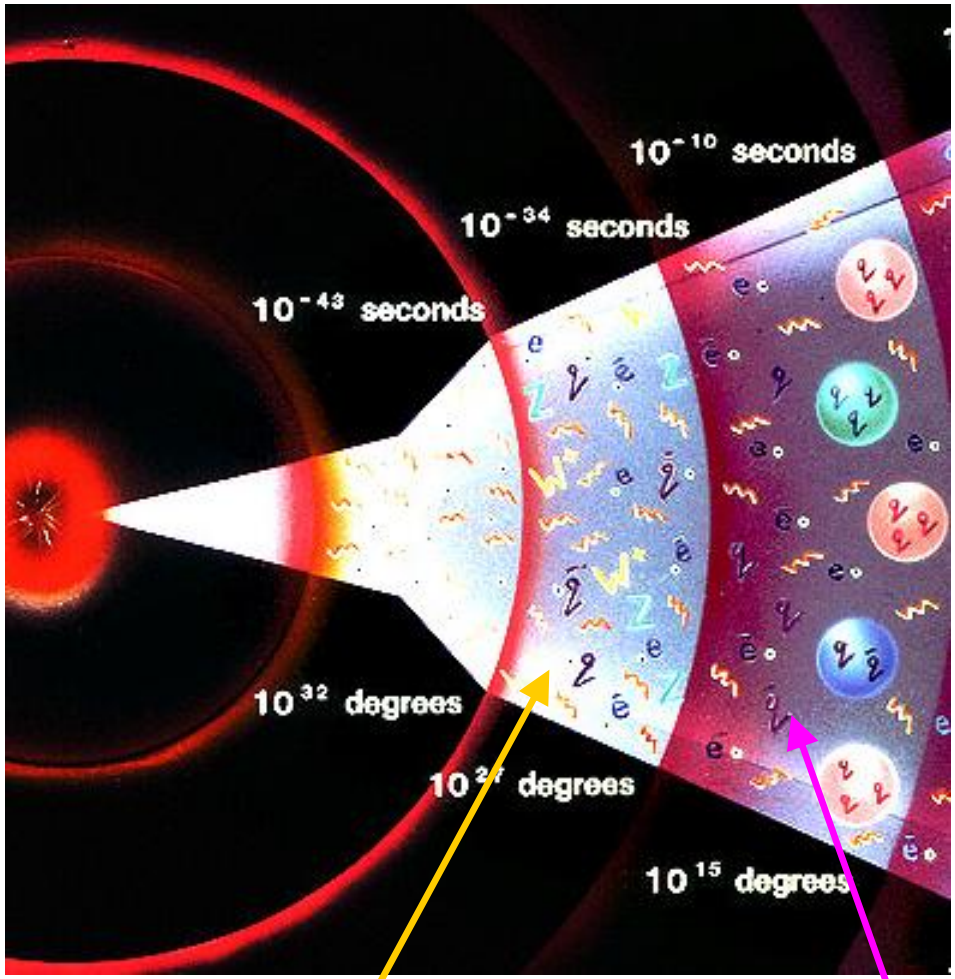



Dunkle Materie = Neutralino ? (Supersymmetrie)

Teilchenbeschleuniger untersuchen Prozesse $10^{-10}$s nach dem Urknall

Materie- Antimaterie-Asymmetrie ?

# Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Kosmos




gleich viele Teilchen und Antiteilchen

fast nur noch Teilchen + Photonen

Kann die im Labor gefundene kleine T-A-Asymmetrie dies erklären ???

.... wahrscheinlich nicht....

1) gleich viele T und A

2) Symmetrie wird „gebrochen“: pro 1000000000 A gibt es 1000000001 T

3) 1000000000 Paare zerstrahlen in Photonen, 1 T bleibt übrig

**???**

# Neutrinos aus dem Urknall

Filmdöschen

**Inhalt:** $35\,cm^3$

**Zusammensetzung pro $cm^3$ :**

$$55\nu_e + 55\overline{\nu}_e$$

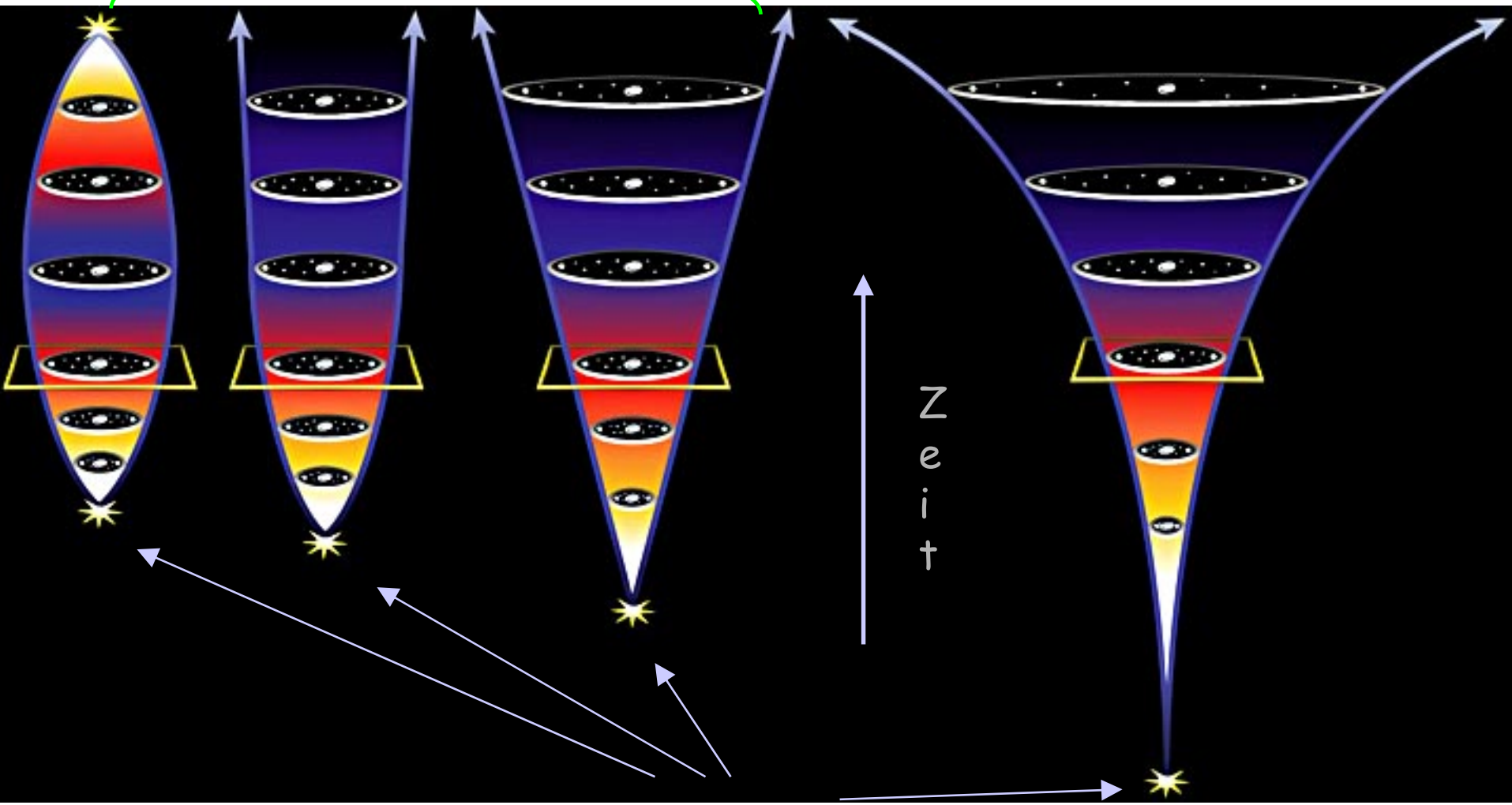
$$55\nu_\mu + 55\overline{\nu}_\mu$$

$$55\nu_\tau + 55\overline{\nu}_\tau$$

**Kinetische Energie:**

$$\sim 0.000001\,eV$$

# Entwicklung des Universums ?
# Hat Einstein Recht ?




In *jedem* Szenarium: Urknall !

# Elementarteilchen-physik II


- 1. Tests der QCD
- 2. Das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung
- 3. Tests der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung
- 4. Bestimmung der Quark-Mischungsparameter
- 5. Mesonoszillationen
- 6. Neutrinooszillationen
- 7. Verletzung von P und C
- 8. CP-Verletzung im K-System
- 9. CP-Verletzung im B-System
- 10. Der Higgs-Mechanismus
- 11. Suche nach dem Higgs-Boson
- 12. Supersymmetrie
- 13. Suche nach Supersymmetrie
- 14. Astrophysik und Astroteilchenphysik
- 15. Kosmologie

„Durch unsere Körper strömen in jeder Sekunde viele Milliarden Neutrinos, und wir machen uns Gedanken über die Benzinpreise ?“