

Moderne Experimentalphysik II

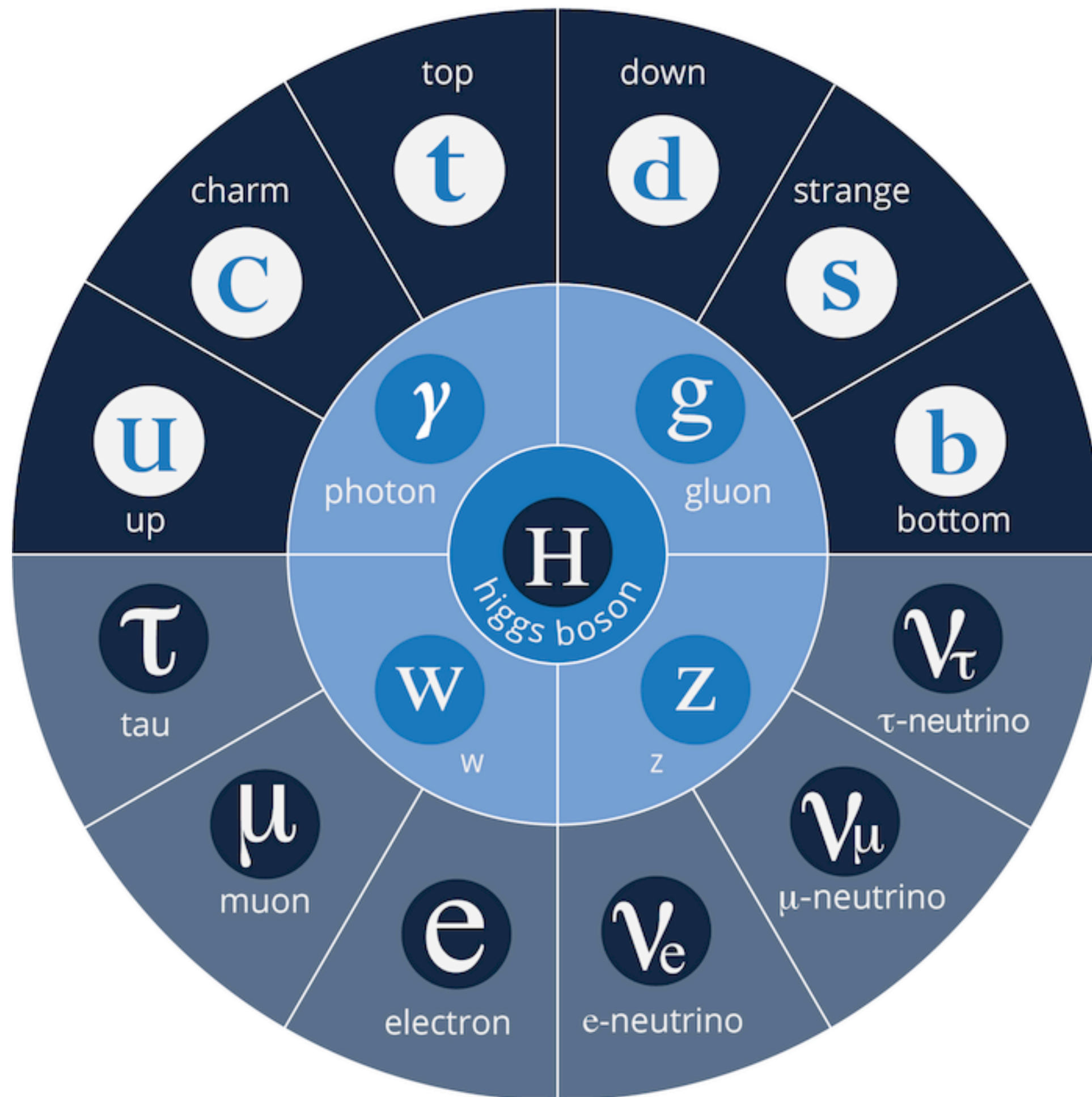
Teilchenphysik - Vorlesung 11

Professor Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu)
Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



■ 5. Wechselwirkungen

- 5.1 Quarkonium
- 5.2 Farbwechselwirkung in der QCD
- 5.3 Elektroschwache Prozesse
- 5.4 Elektroschwache Vereinheitlichung
- 5.5 Schlüsselexperiment der elektroschwachen Wechselwirkung
- 5.6 Quarkmischung



Recap: Farbwechselwirkung

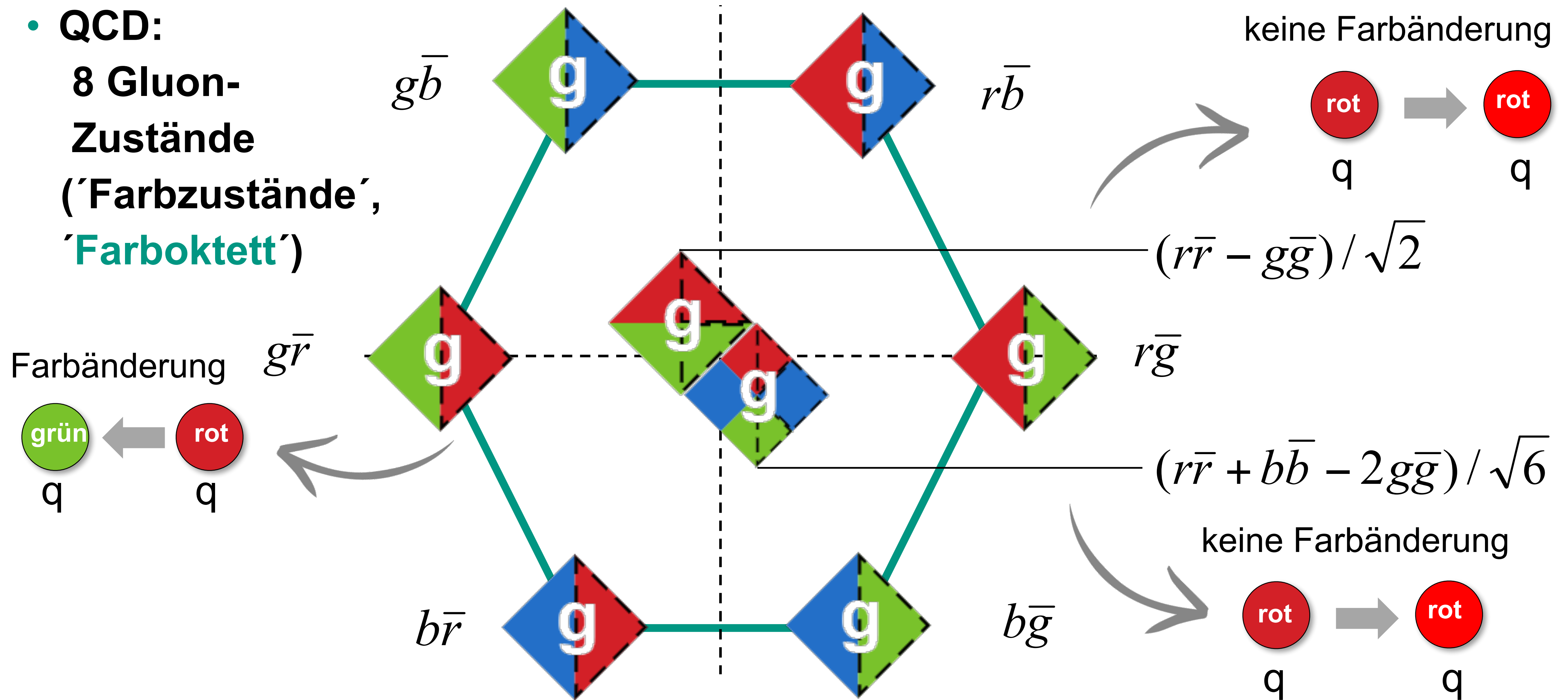
■ Wie viele Gluon gibt es?

- 1) 1
- 2) 3
- 3) 8
- 4) 9



Recap: Gluonen als Farboktett: 2 farbneutrale Gluonen

- QCD:
8 Gluon-Zustände
(‘Farbzustände’,
‘**Farboktett**’)



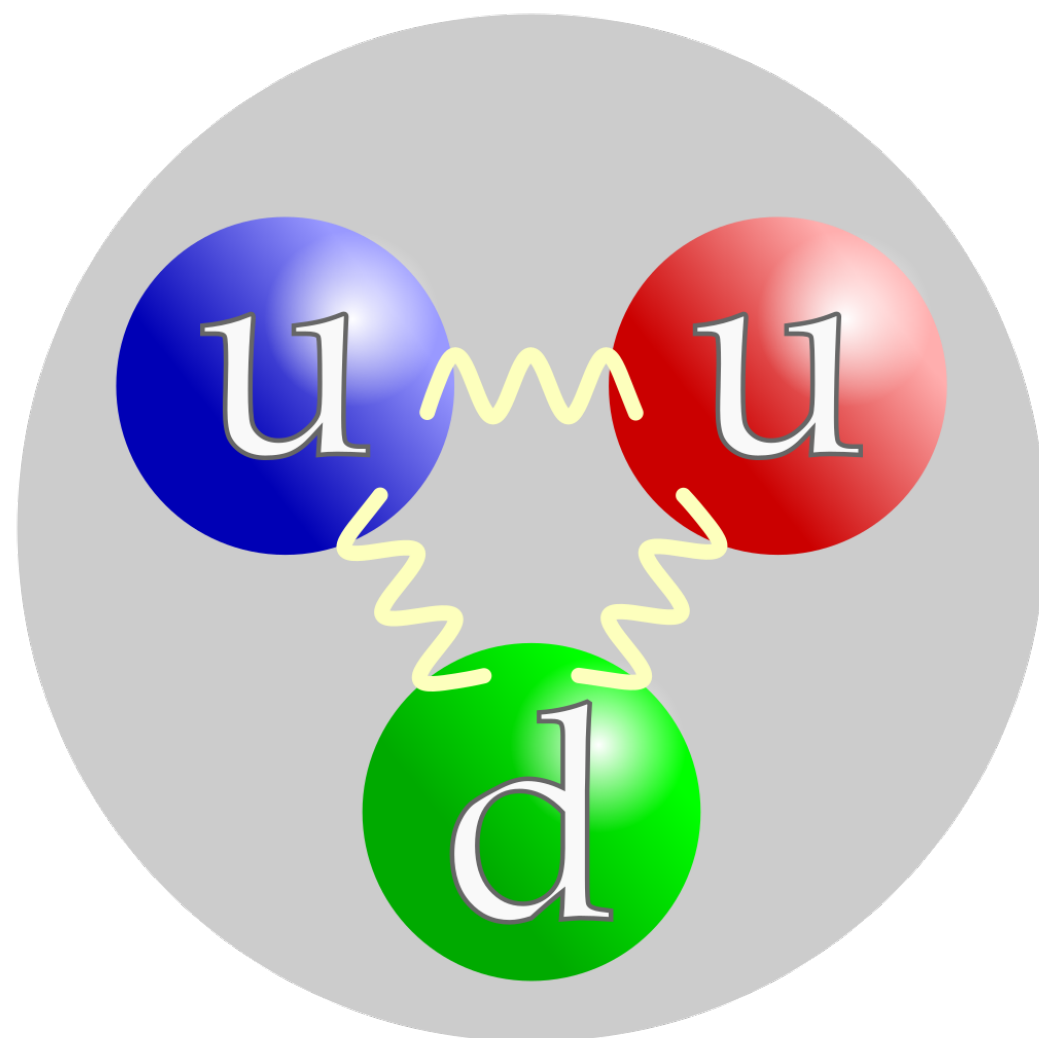
Recap: Farbwechselwirkung

- Ist die Farbladung in Wechselwirkungen erhalten?
 - 1) Ja, die Farbladung ist in allen Prozessen erhalten
 - 2) Ja, aber nur in QCD Prozessen
 - 3) Nein, die Farbladung kann in Prozessen verändert werden

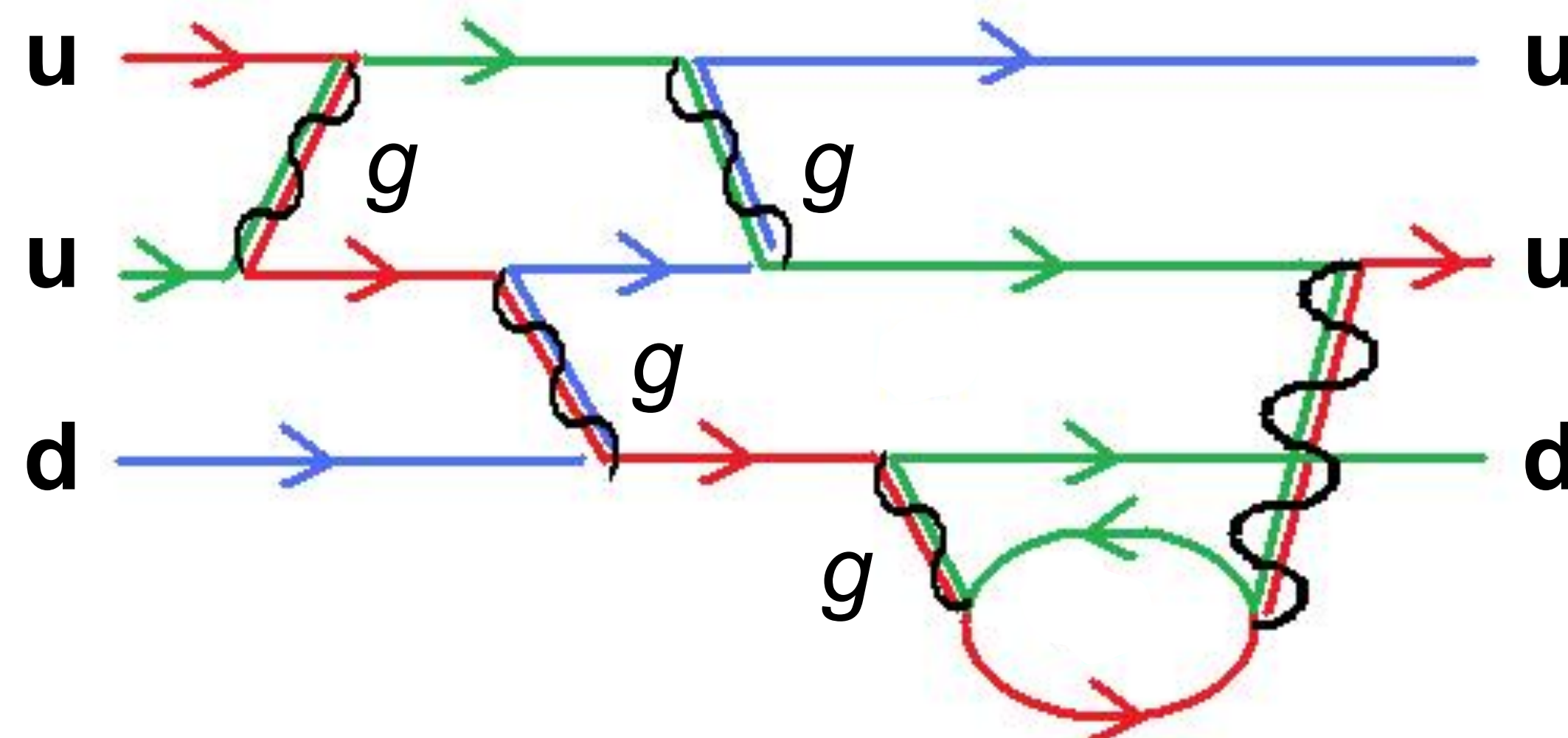


Recap: Farbe und $SU(3)_c$ Gruppe

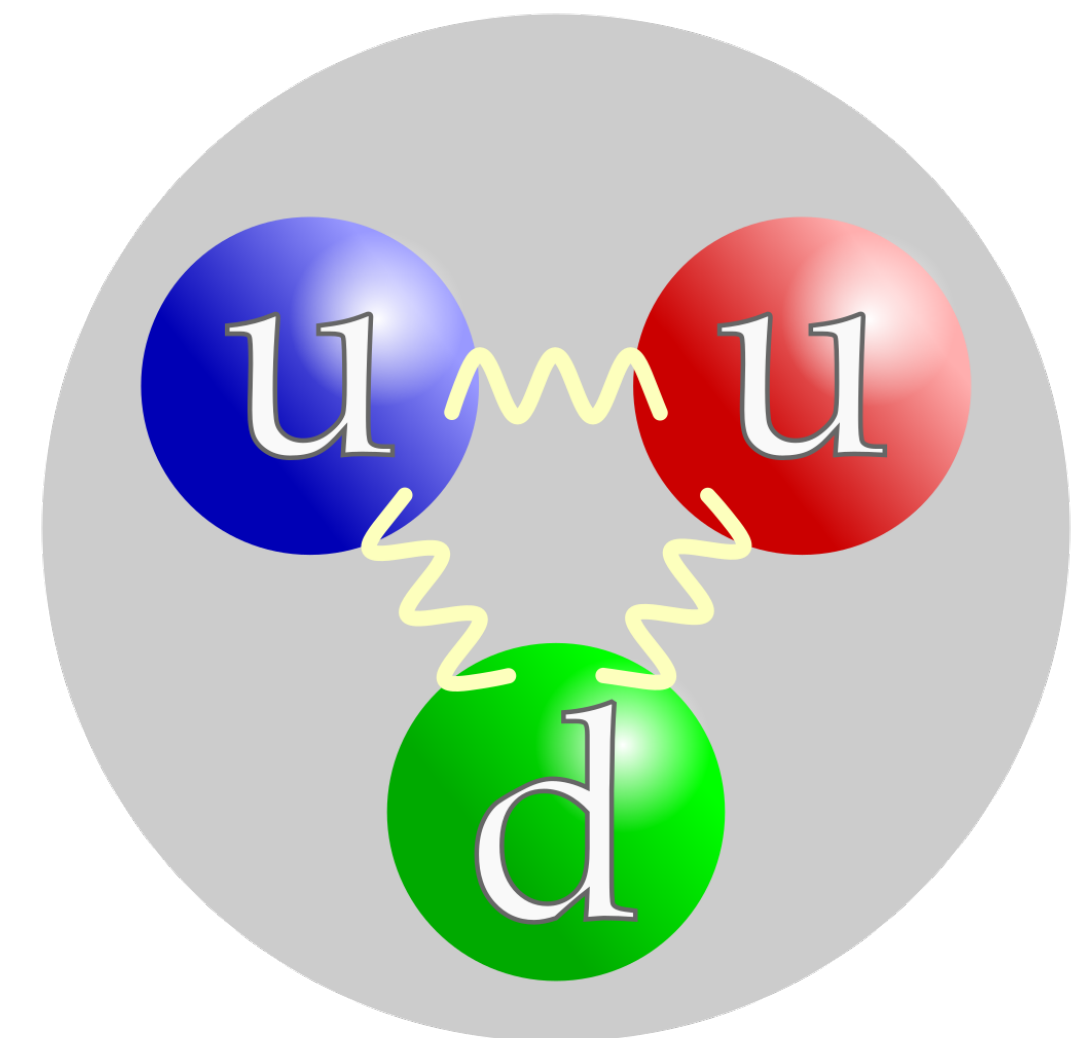
- Gluonwechselwirkung im Nukleon: Valenz- & See-Quarks



Gluonwechselwirkungen
zwischen Valenzquarks

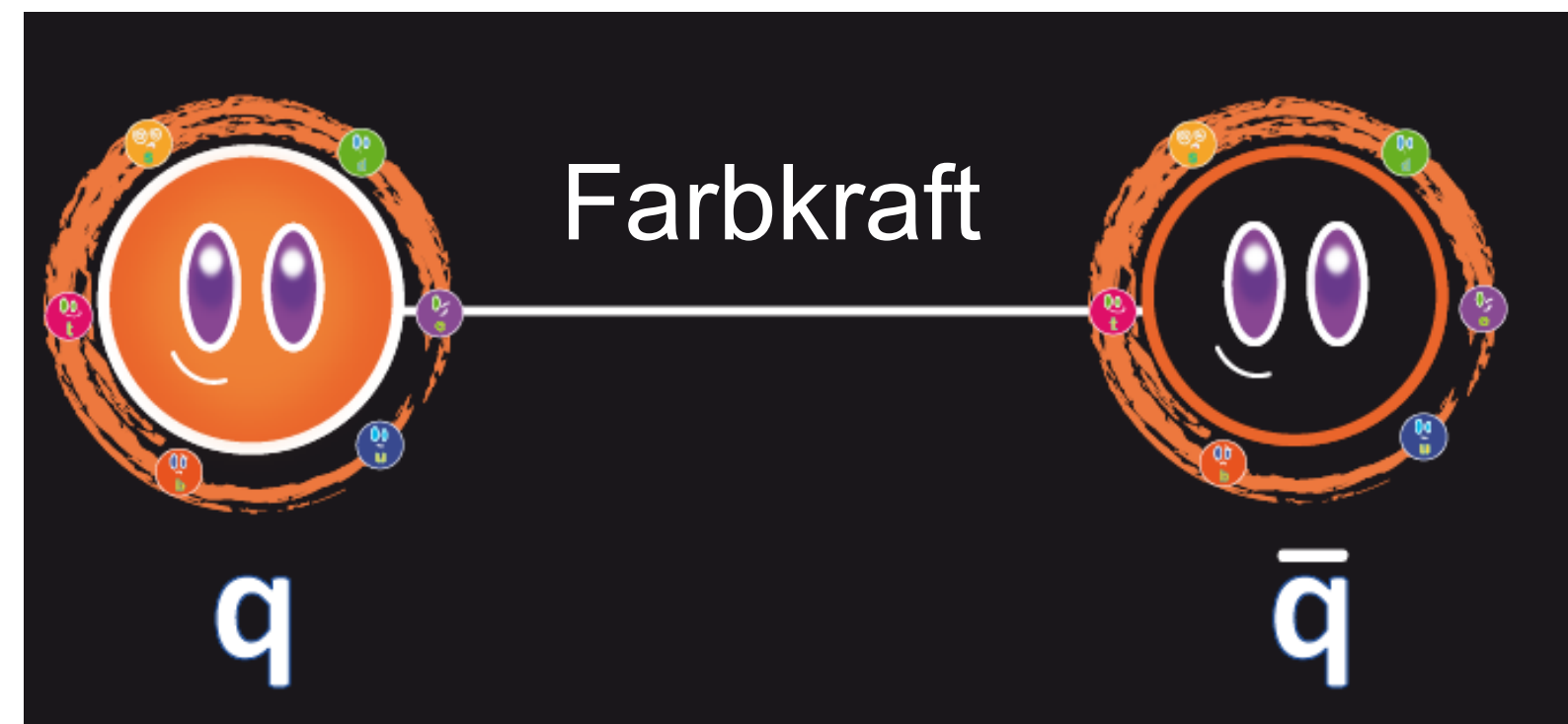


Seequarks $q\bar{q}$

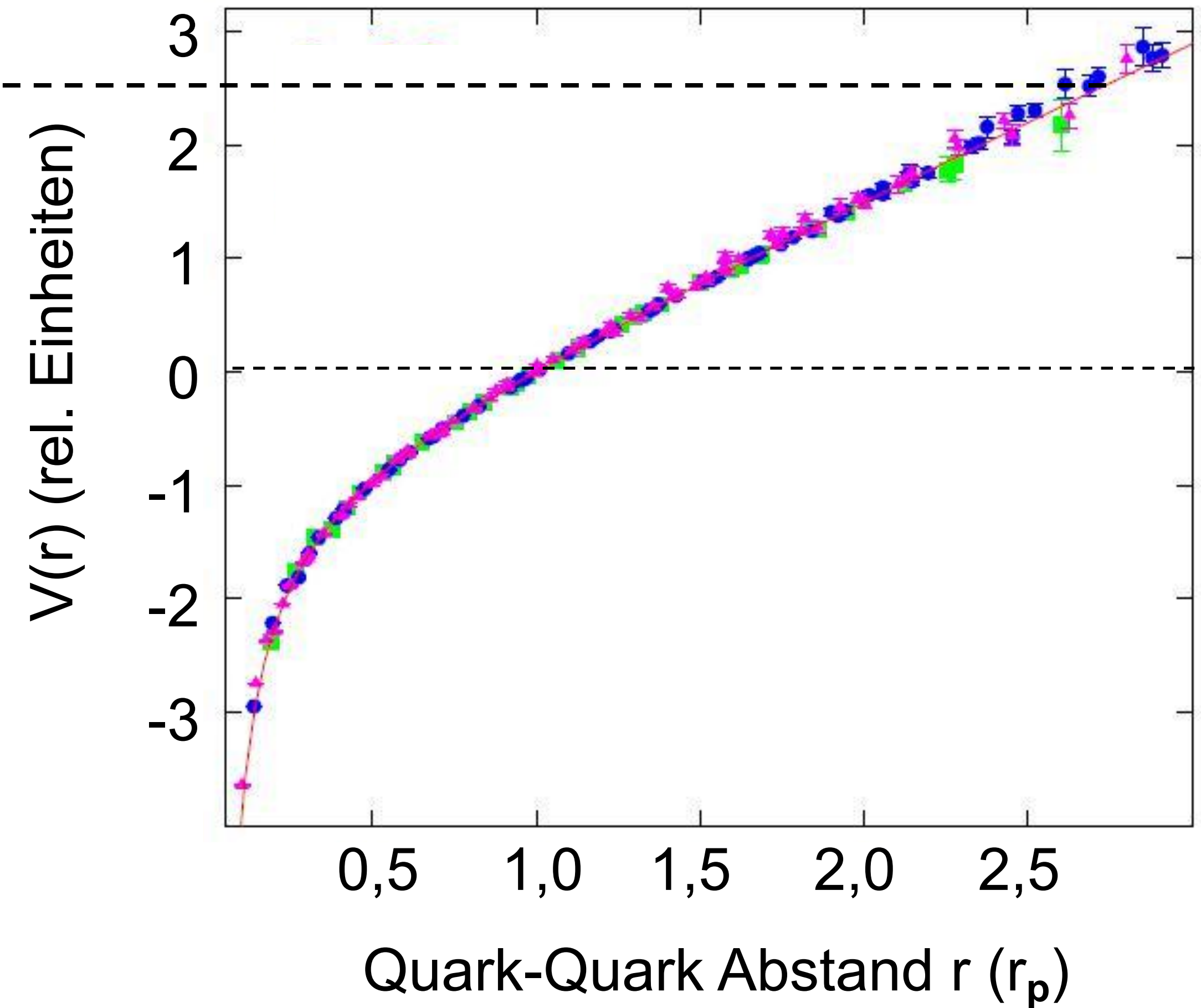
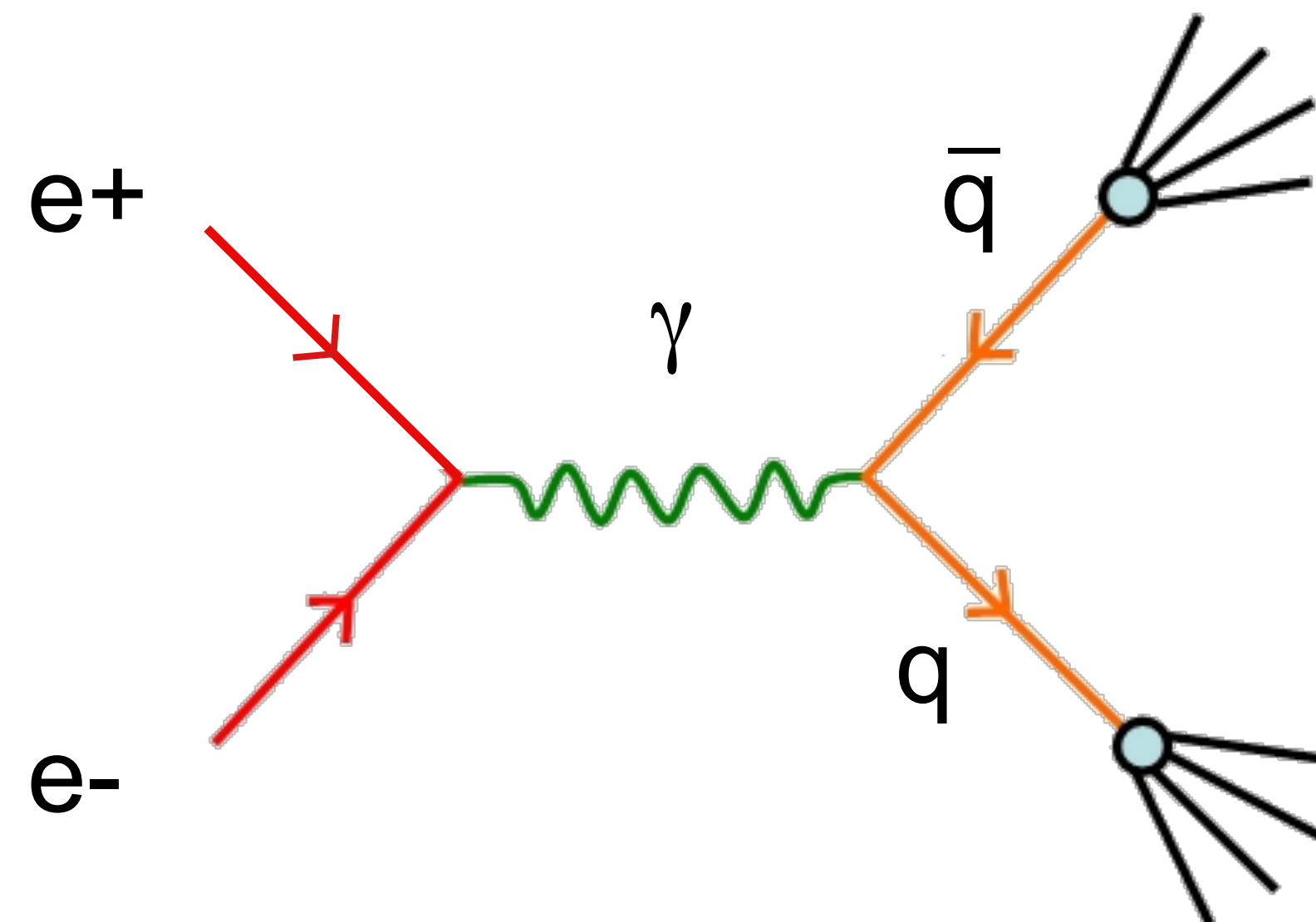


Quark-Quark Potenzial - Hadronisierung

- QCD: bei großen Abständen bilden sich Quark-Antiquark-Paare aus Vakuum



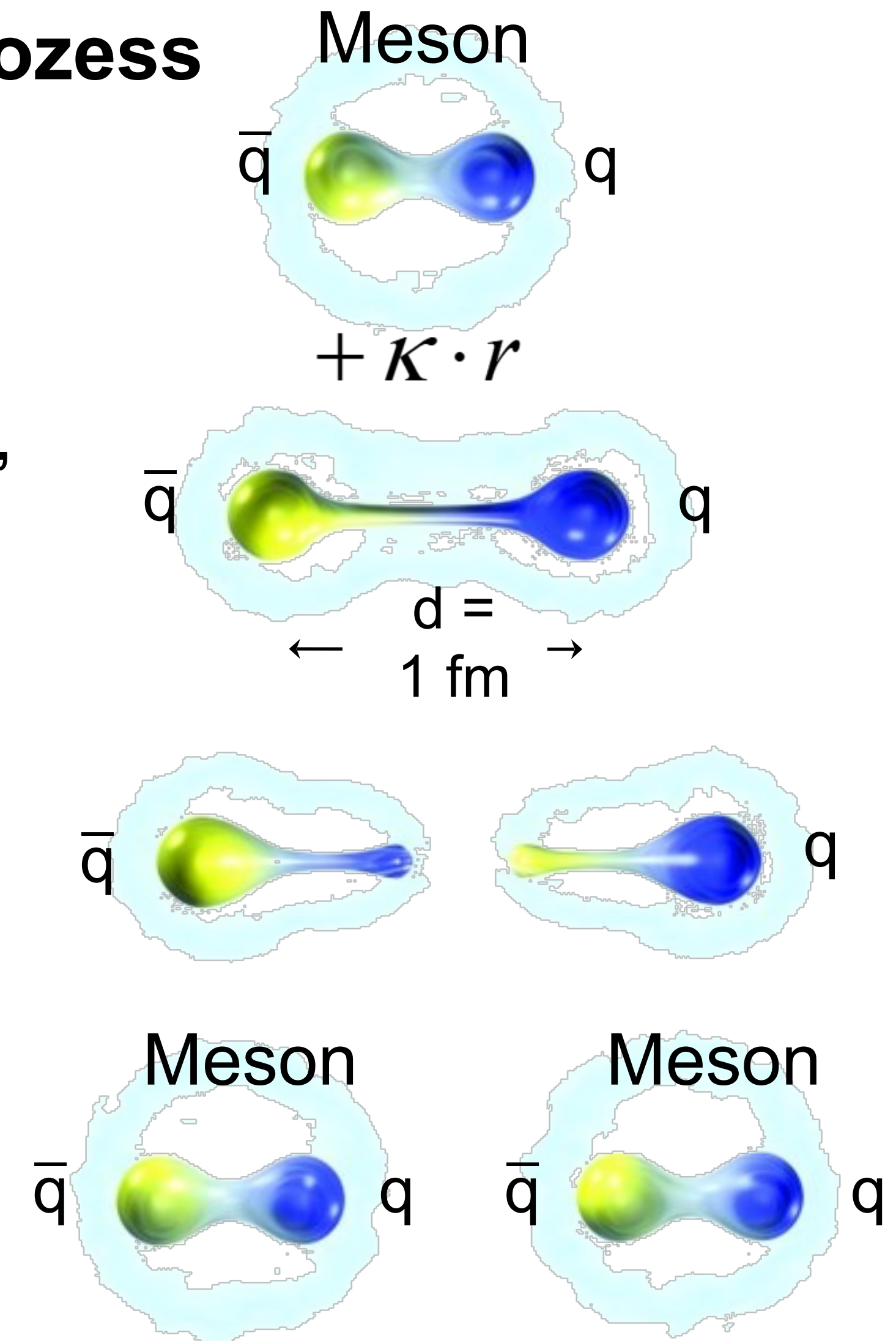
große
Abstände:
Kopplung α_s
groß



Quark-Confinement & Jet-Strukturen

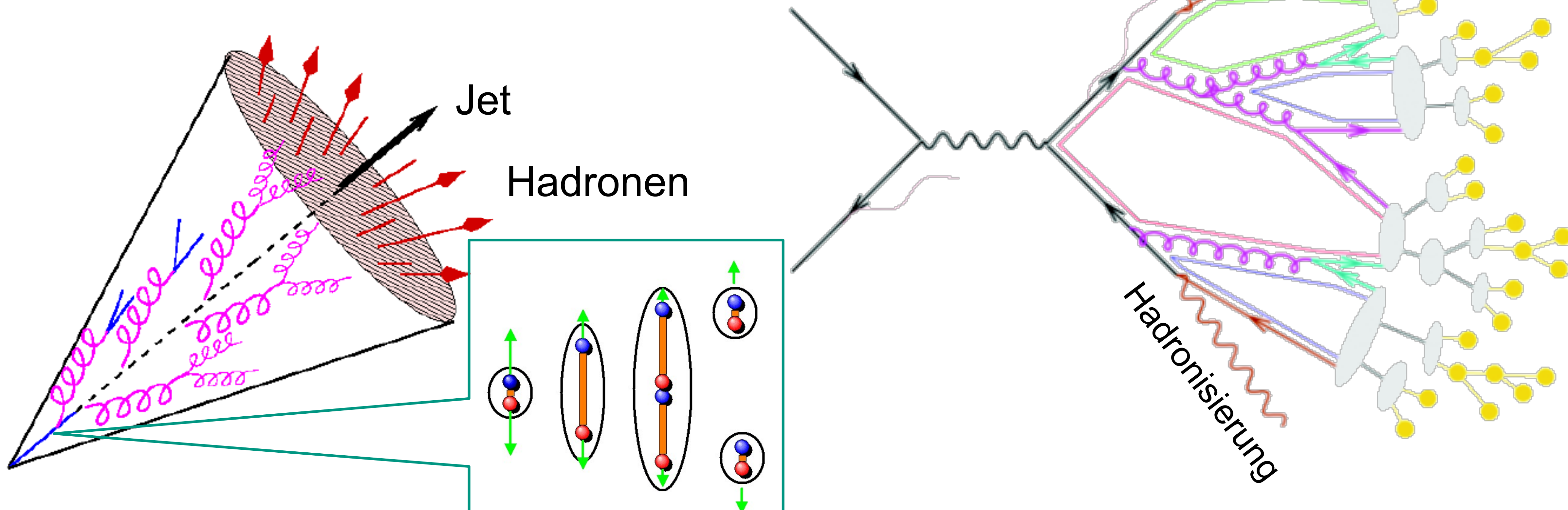
- **Trennung von Quark-Antiquark nach hartem Stoß-Prozess**

- räumliche Trennung des Quark-Antiquark-Paars
- Energie im farbelektrischen Flussschlauch wird groß,
bei $d = 1 \text{ fm}$ ergibt sich Energie $E \sim 0,9 \text{ GeV}$
- es bildet sich ein weiteres Quark-Antiquark-System
- Prozess kann sich mehrmals wiederholen:
Bildung zahlreicher Quark-Antiquark Paare
Ä Ausbildung eines **hadronischen Jets**



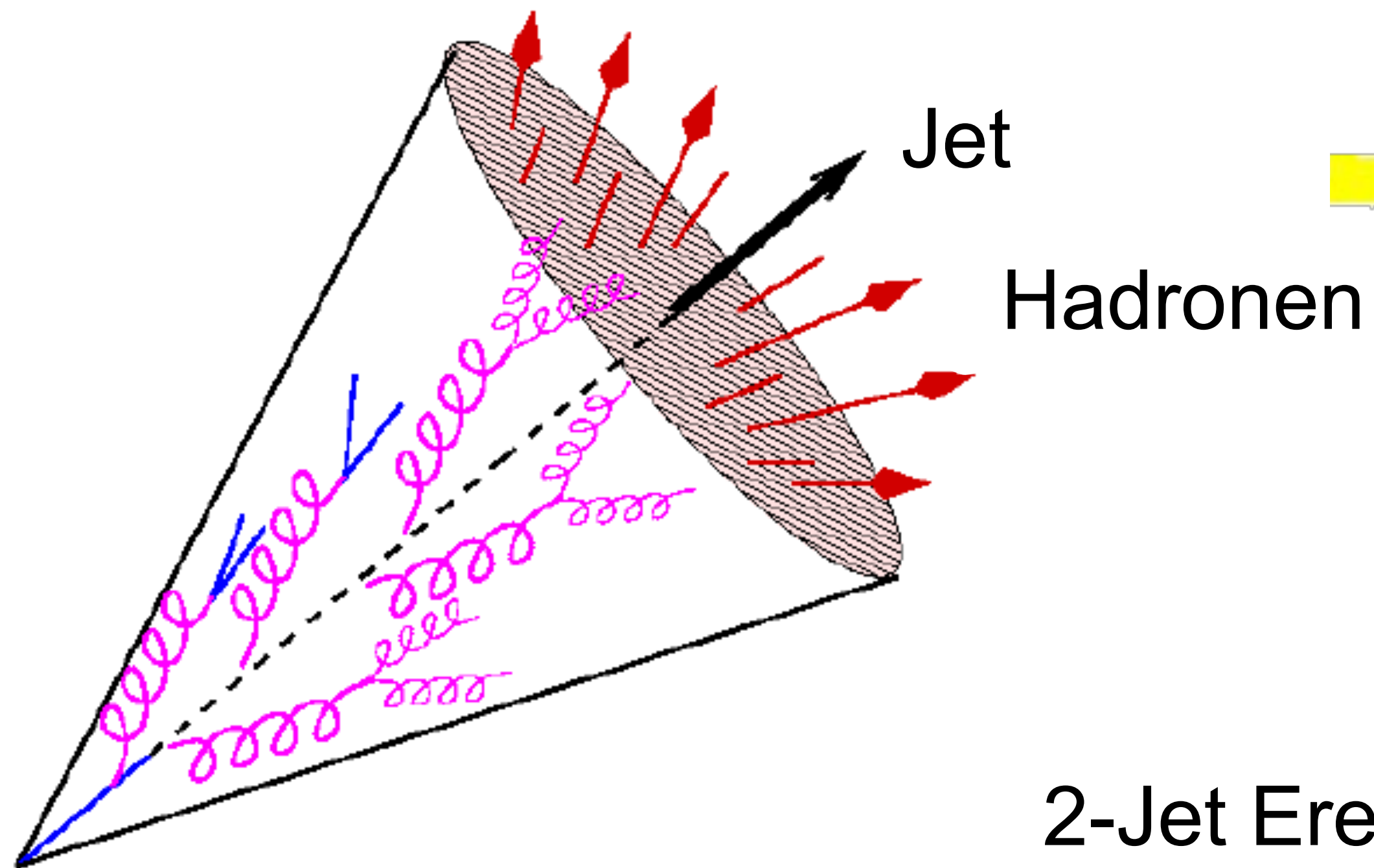
Hadronische Jets

- **Ausbildung eines hadronischen Jets**
 - Hadronjet: Pionen, schwere Mesonen, Nukleonen, Hyperonen

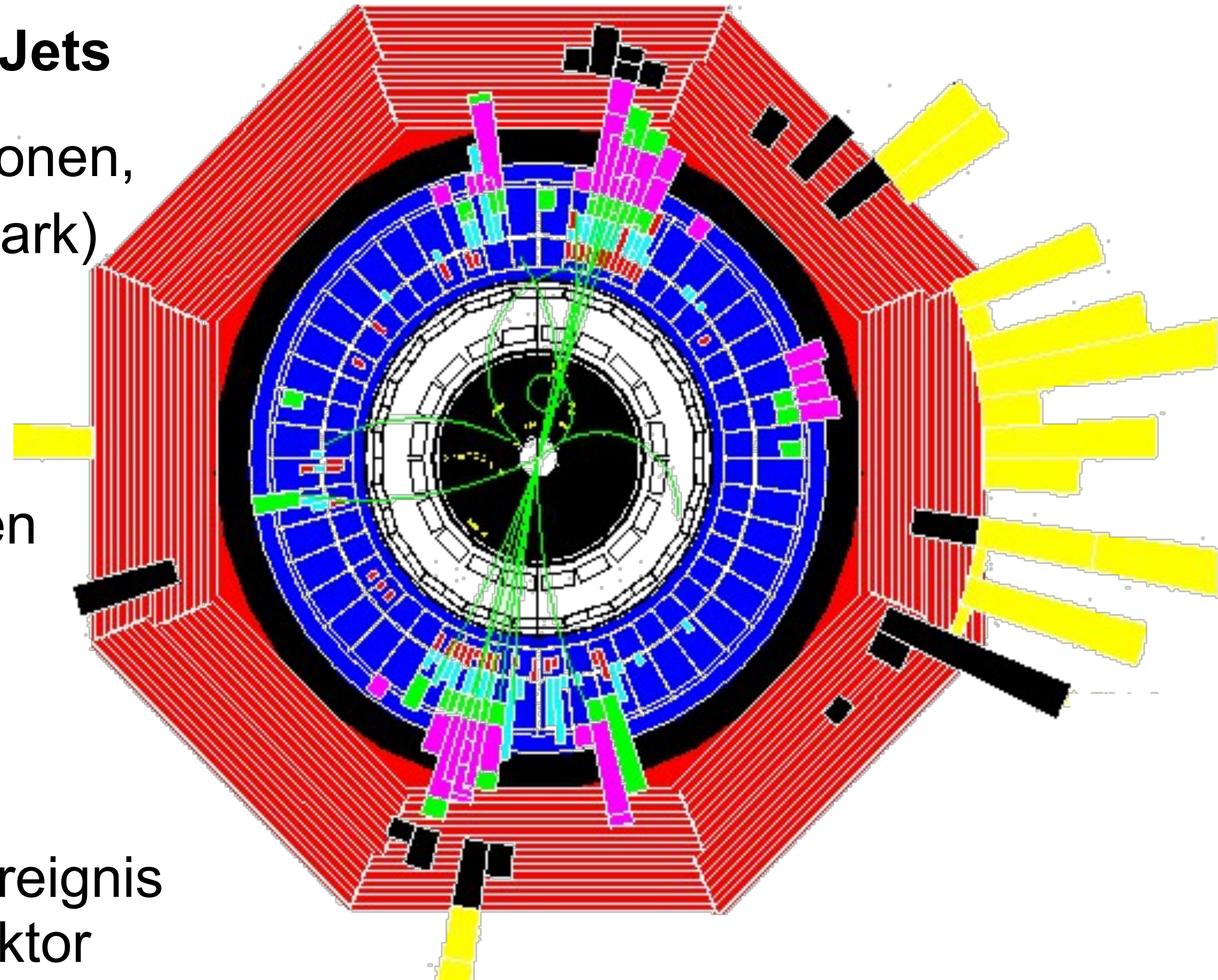


Hadronische Jets

- **Ausbildung eines hadronischen Jets**
 - Hadronjet: Pionen, schwere Mesonen, Nukleonen, Hyperonen (mit s-Quark)

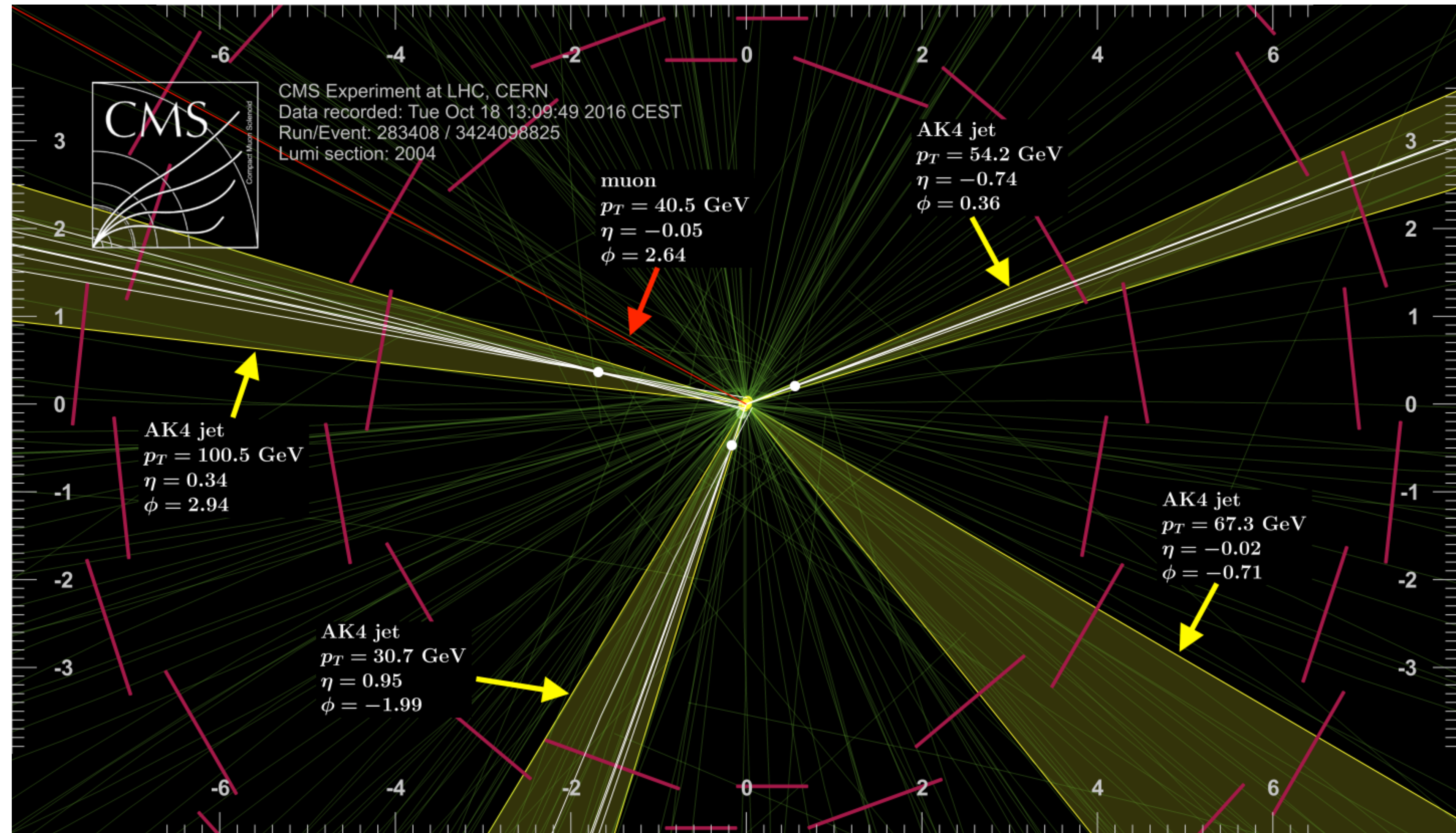


2-Jet Ereignis
in Detektor



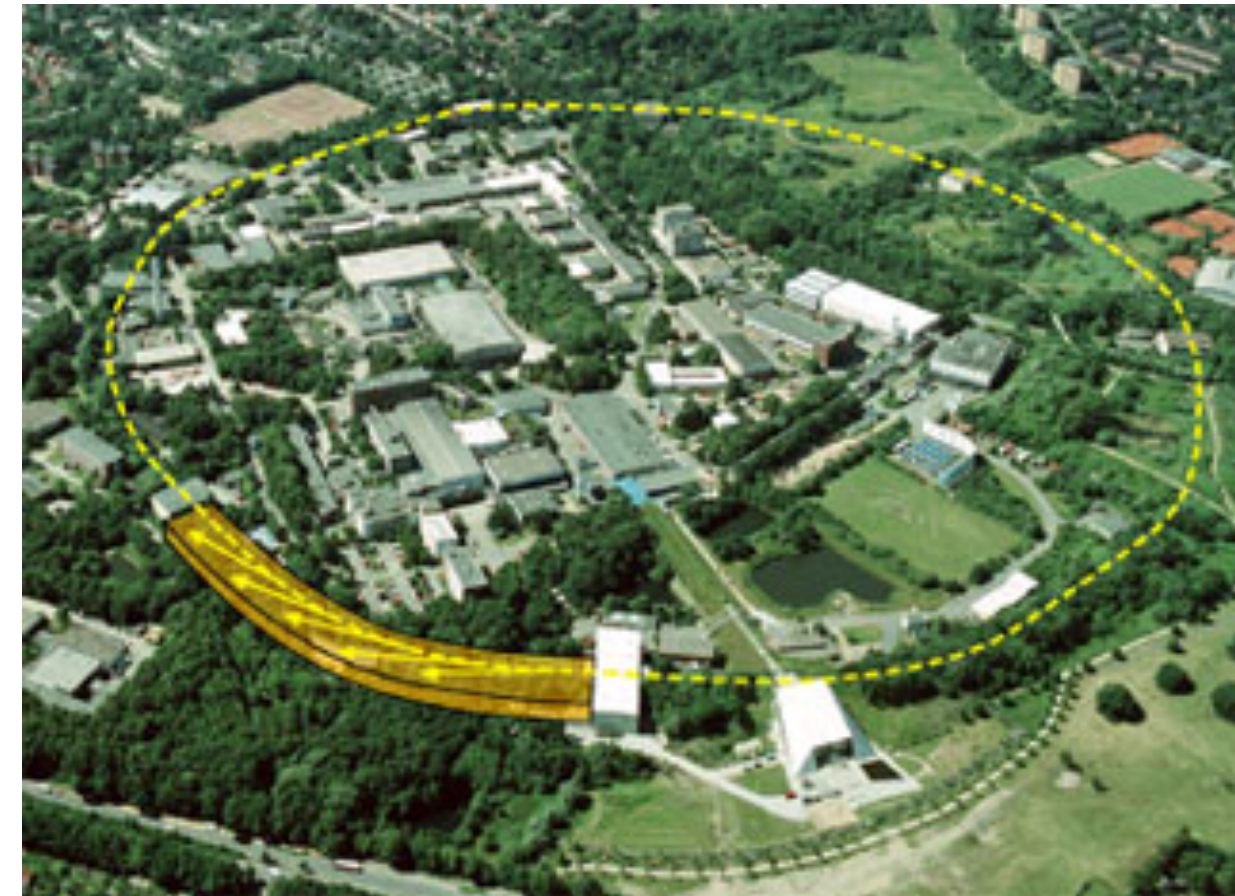
Hadronische Jets –Analysen: Tool bei CMS

- Analyse von E_T und P_T und **Jet-Multiplizität**: Rückschlüsse auf **primären Vertex**



Entdeckung des Gluons mit TASSO an PETRA

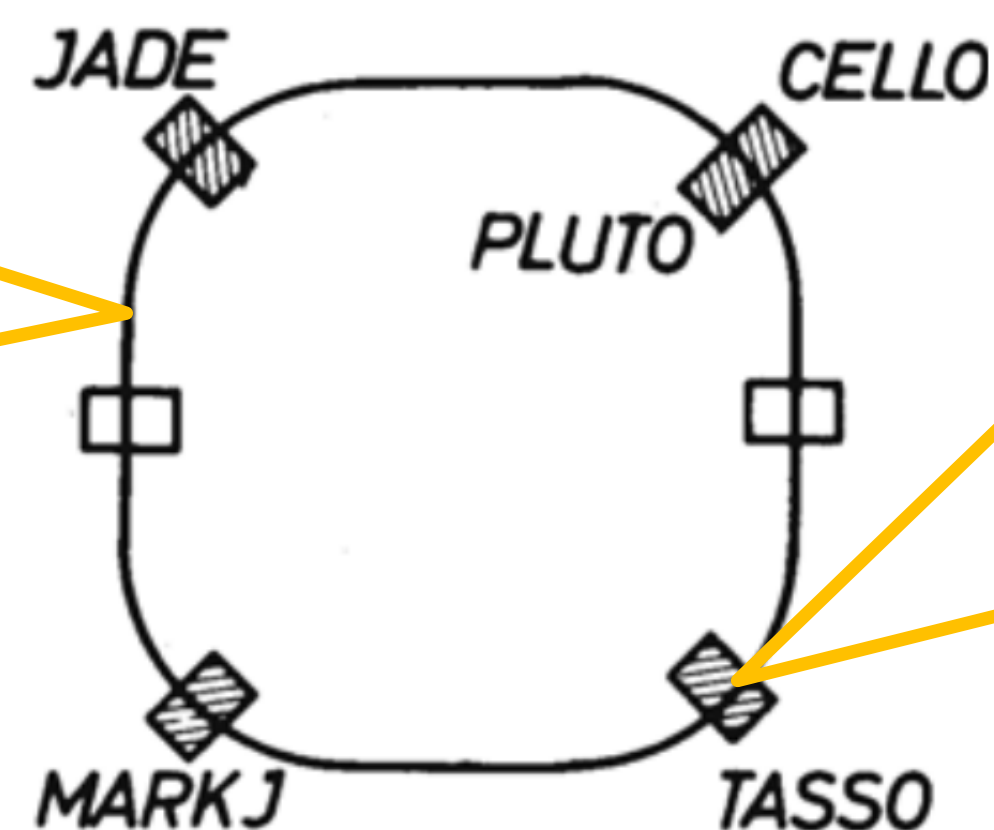
- **Beobachtung von 3-Jet-Events im TASSO- Experiment**
- Entdeckung des Gluons



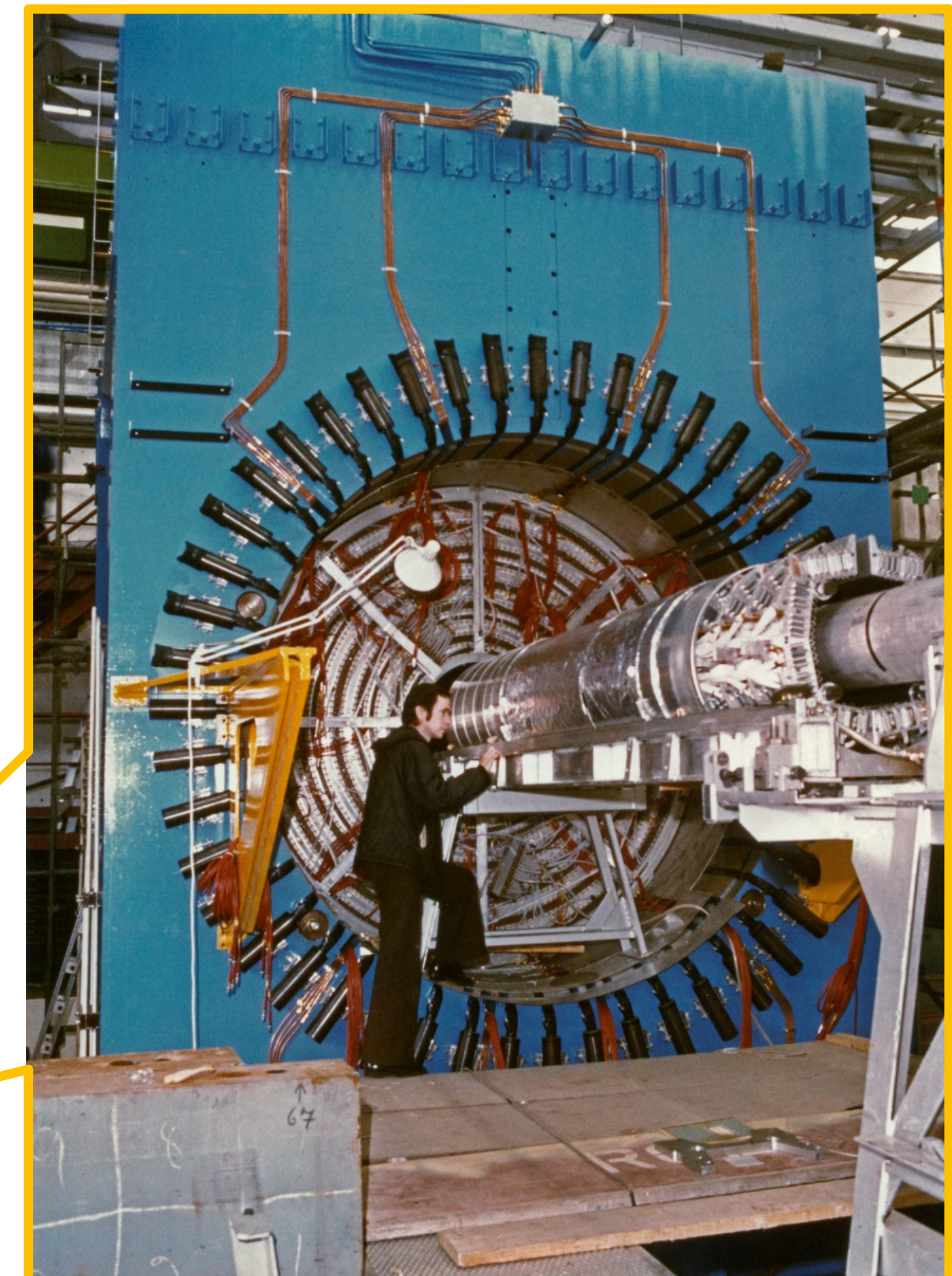
PETRA: Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage



15 GeV Beam-Energie

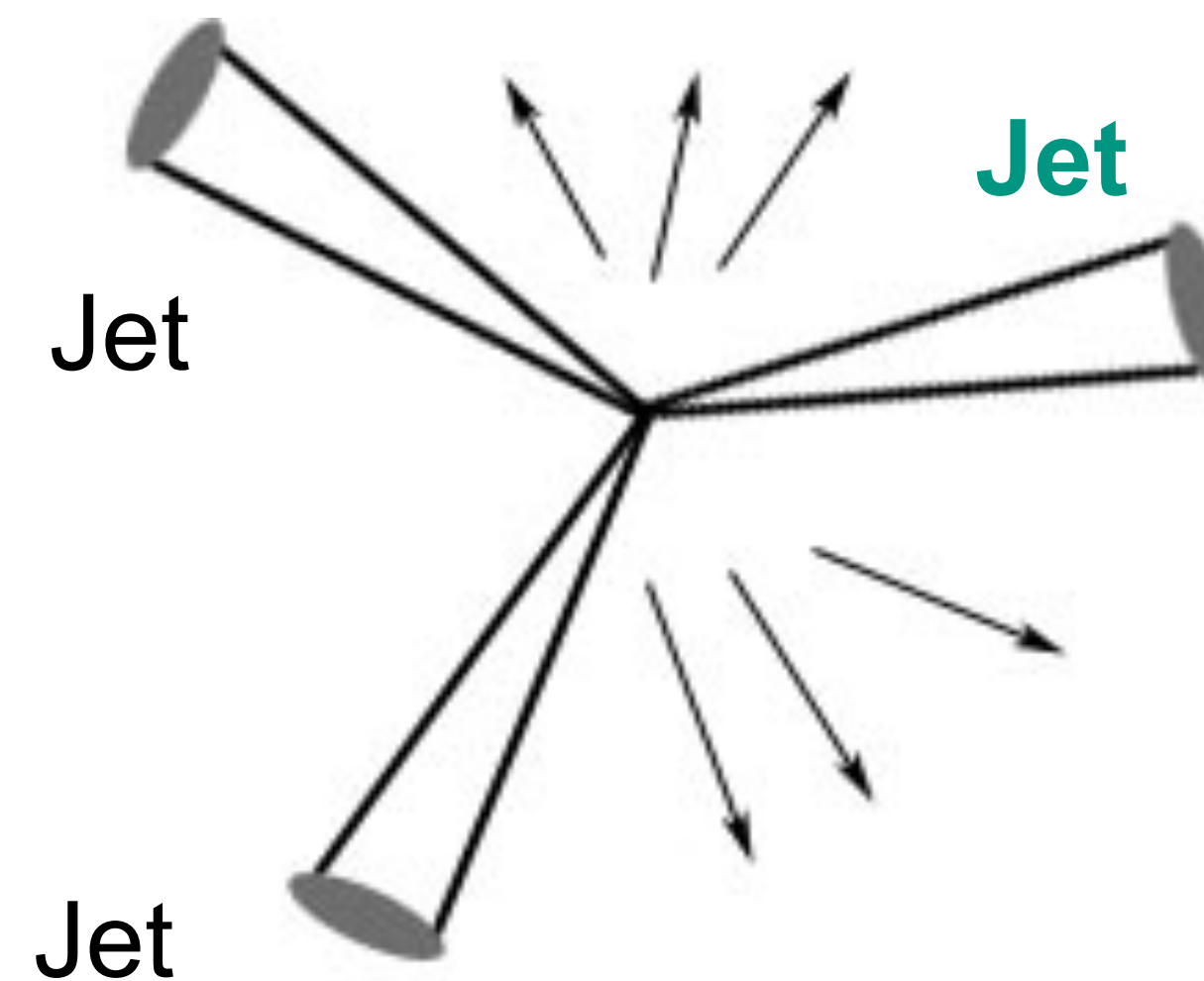
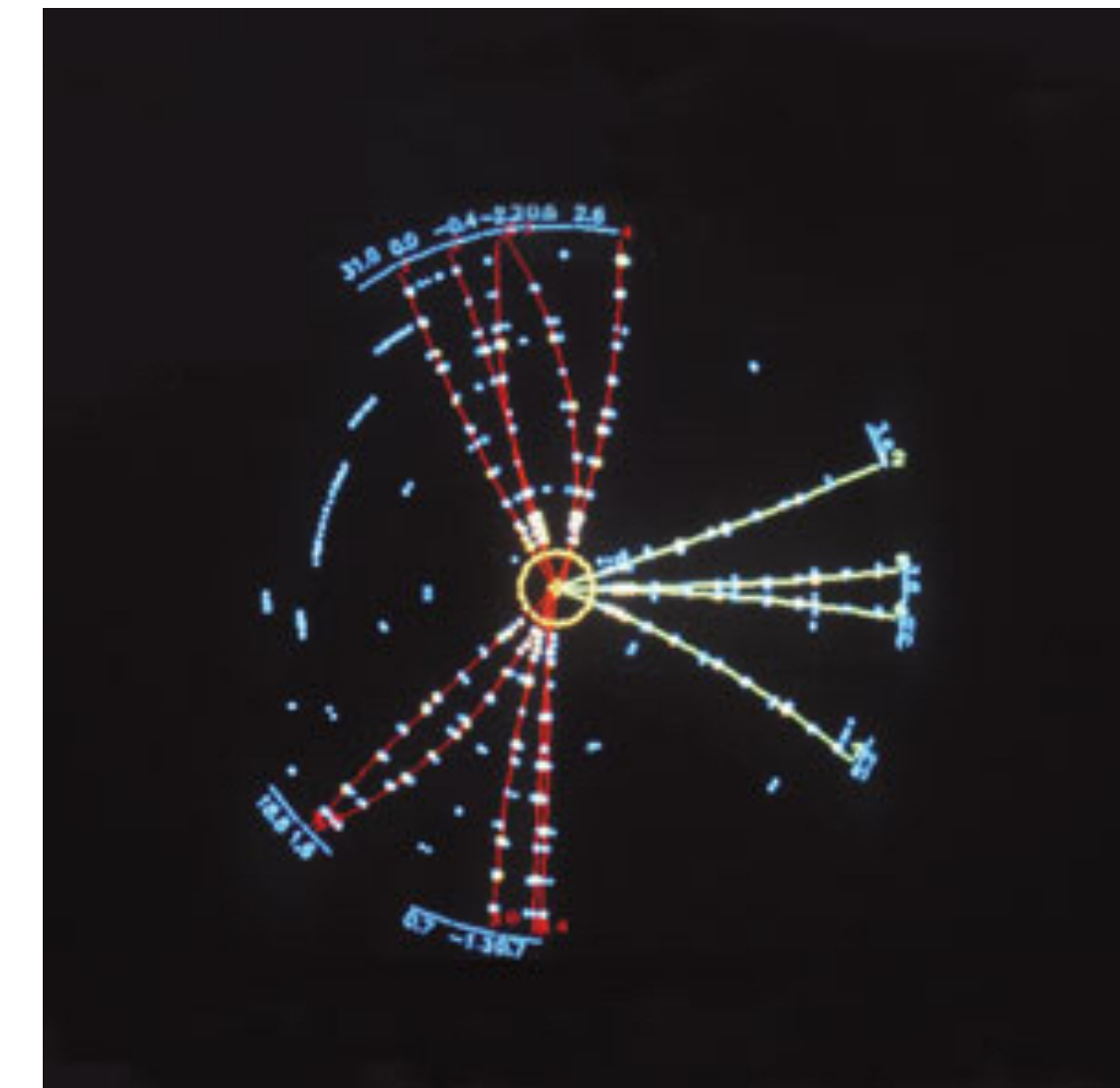
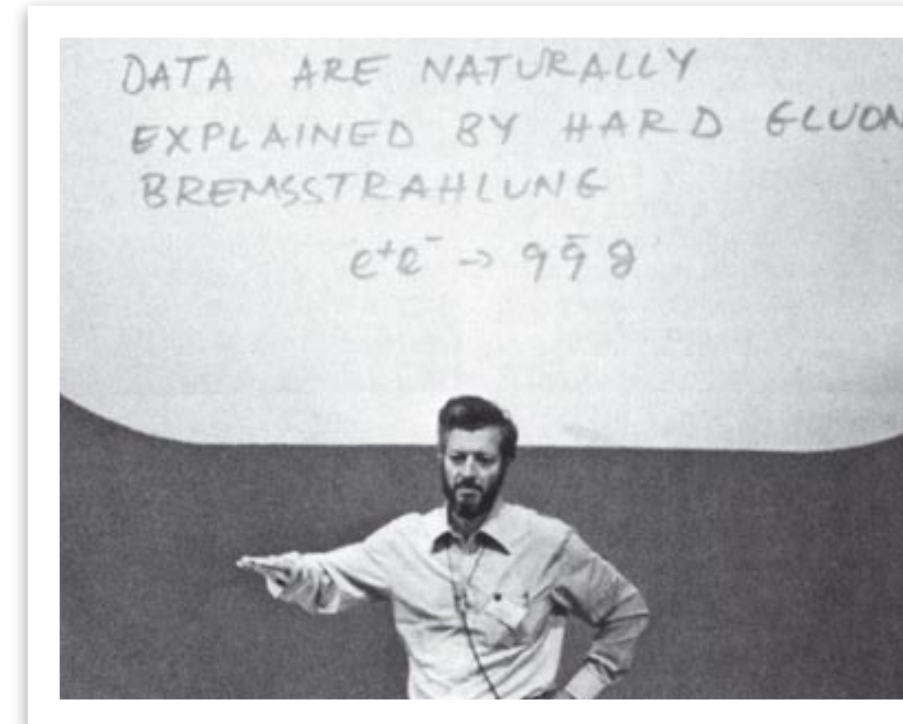
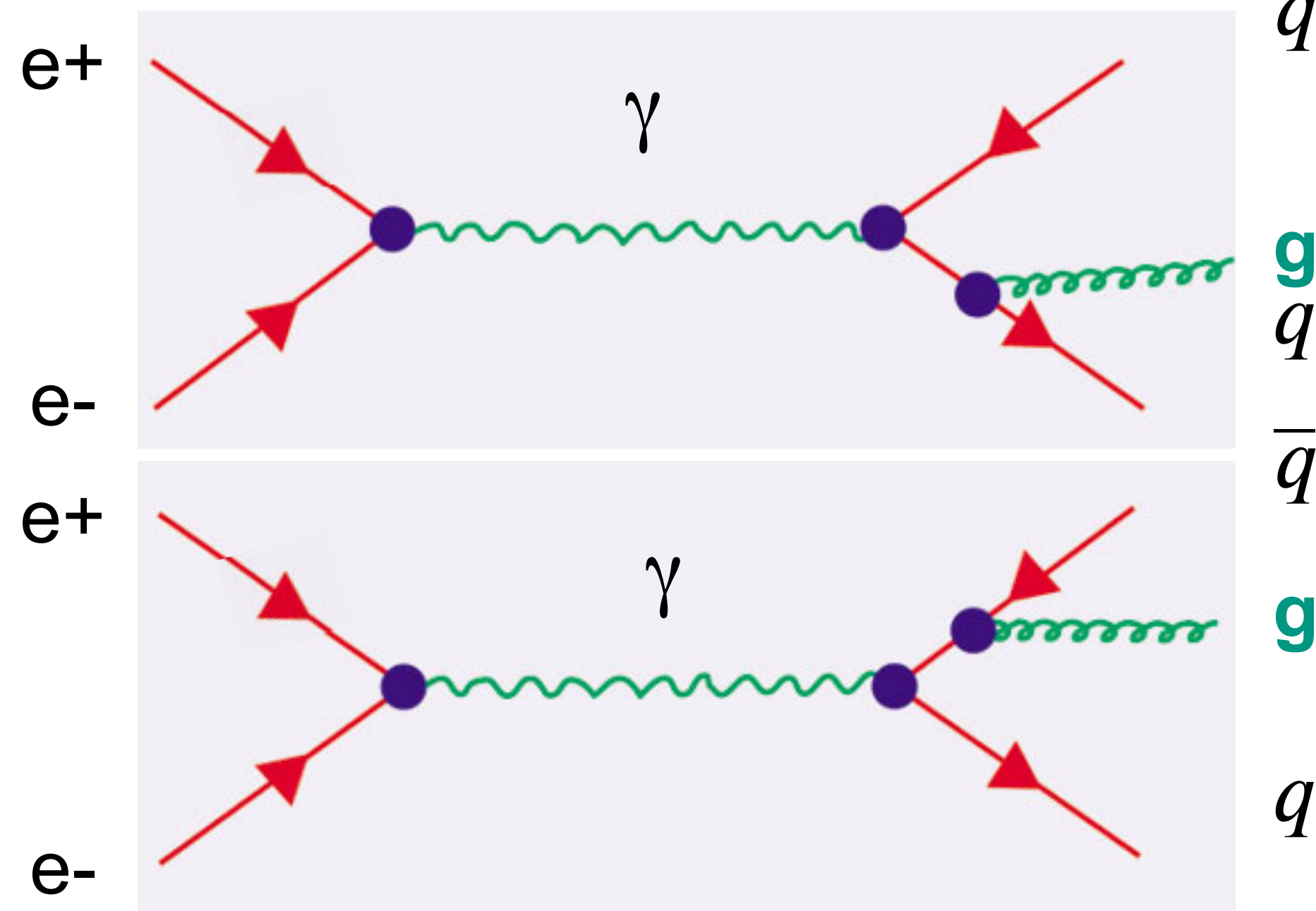


TASSO Detektor



Entdeckung des Gluons über 3-Jet Ereignisse

- **Quark-Jets aus e^+e^- -Kollisionen**
 - Nachweis über „**Gluon-Bremsstrahlung**“



Quark – Antiquark
Jets und Abstrahlung
eines **harten Gluons**:
Beobachtung einer
- 3 Jet Struktur

Q: DESY

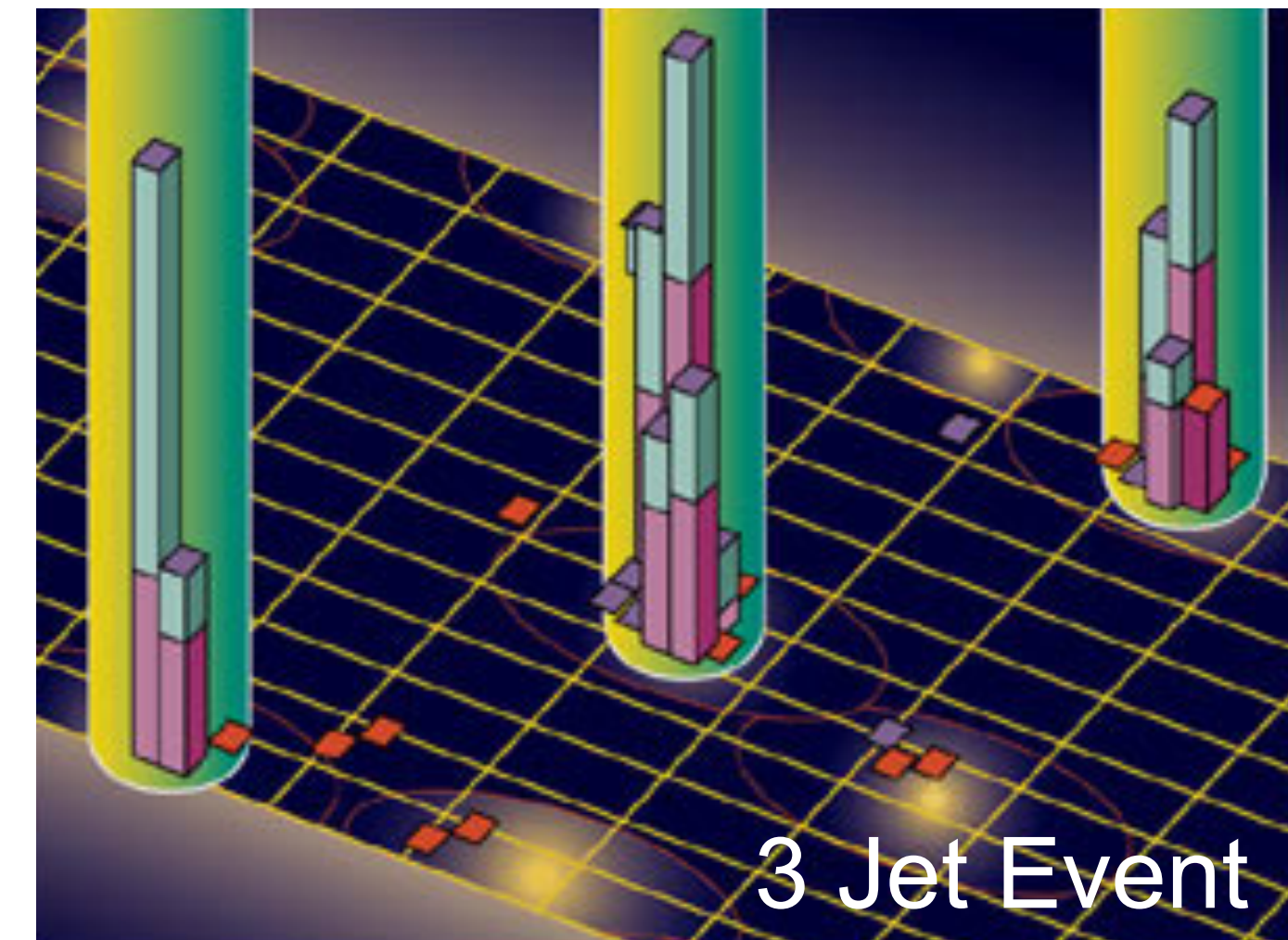
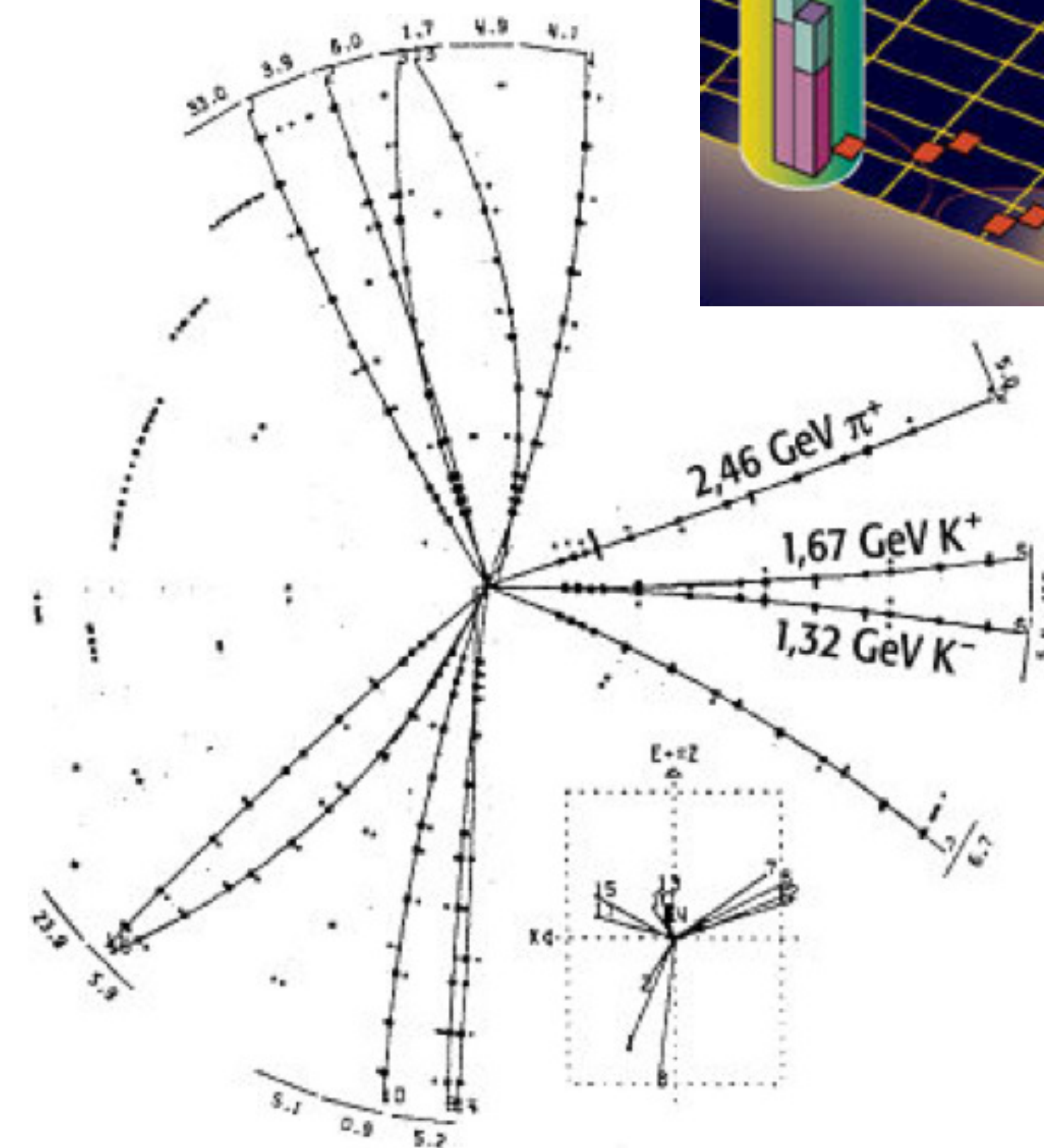
Entdeckung des Gluons über 3-Jet Ereignisse

- Quark-Jets aus e^+e^- -Kollisionen
 - Nachweis über „**Gluon-Bremsstrahlung**“



kein Nobelpreis für den ersten Nachweis von Gluonen am DESY

1995: EPS Preis für 4 Detektoren

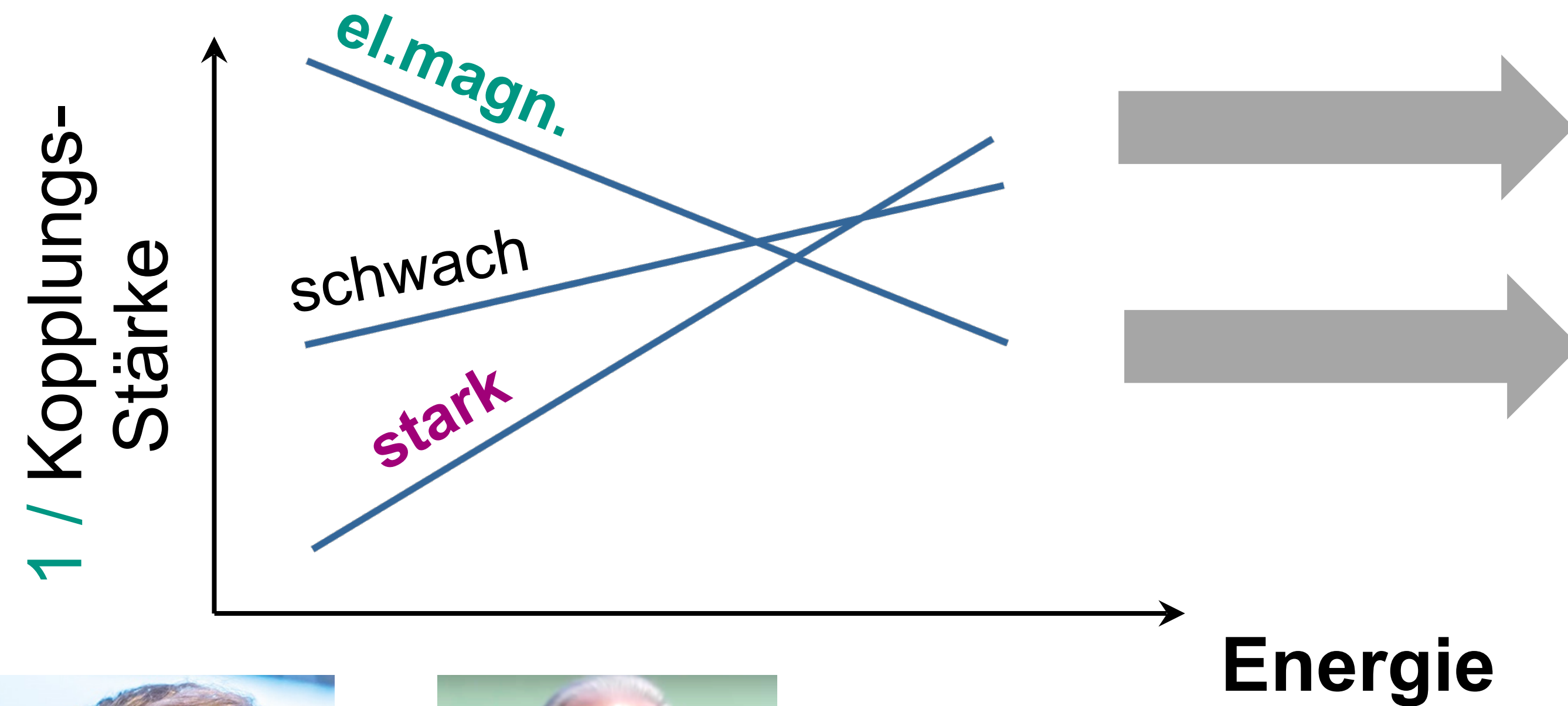


Quark – Antiquark
Jets und Abstrahlung
eines harten Gluons
- **3 Jet Struktur**

Q: DESY, nobelprize

Laufen der Kopplungskonstanten*

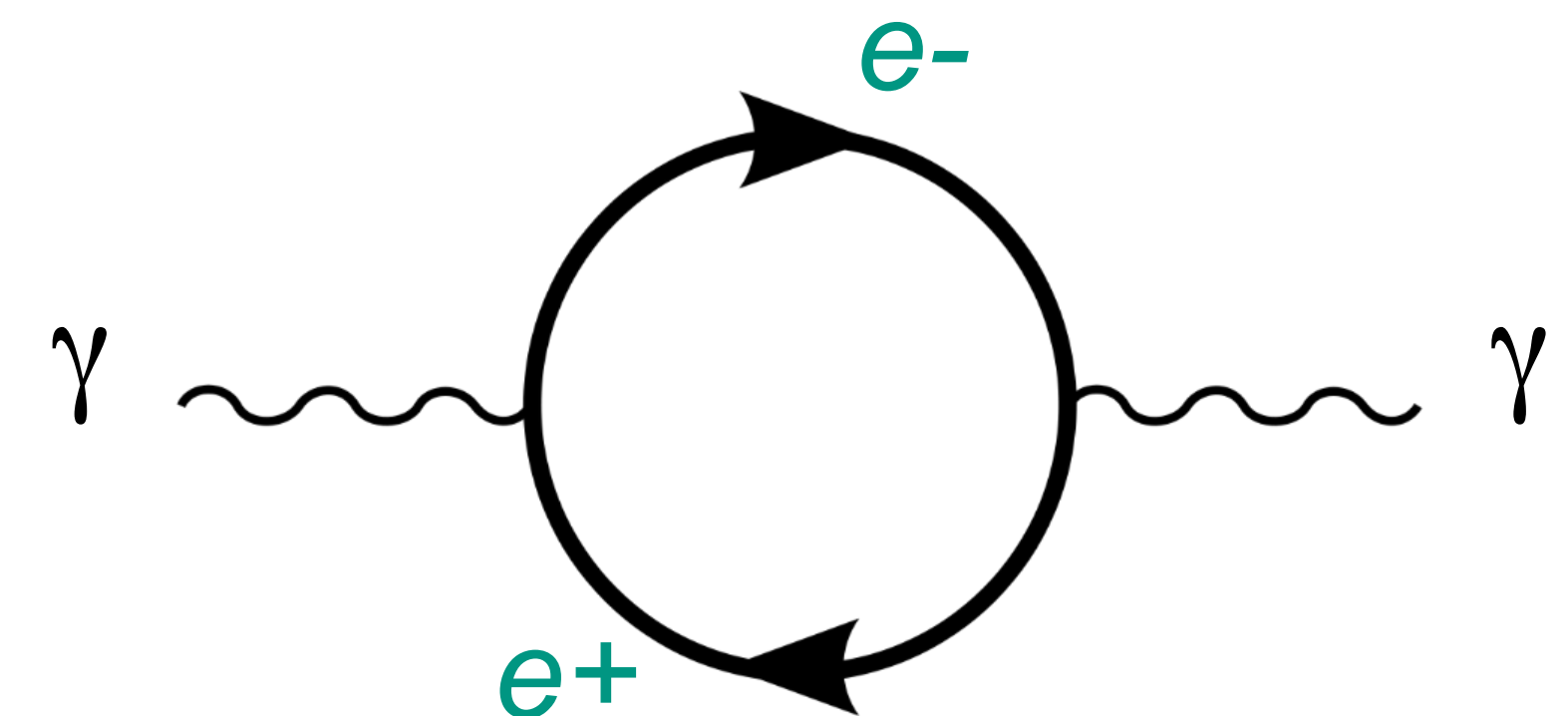
- Stärke der Wechselwirkungen ist abhängig von Q^2



starke Wechsel-Wirkung wird SCHWÄCHER

elektromagnetische Wechsel-Wirkung wird STÄRKER

QED: Effekte des Vakuums



W. De Boer (KIT)



U. Amaldi

Teilchen & Kräfte im SM

QED: Vakuumpolarisation

- **Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung**

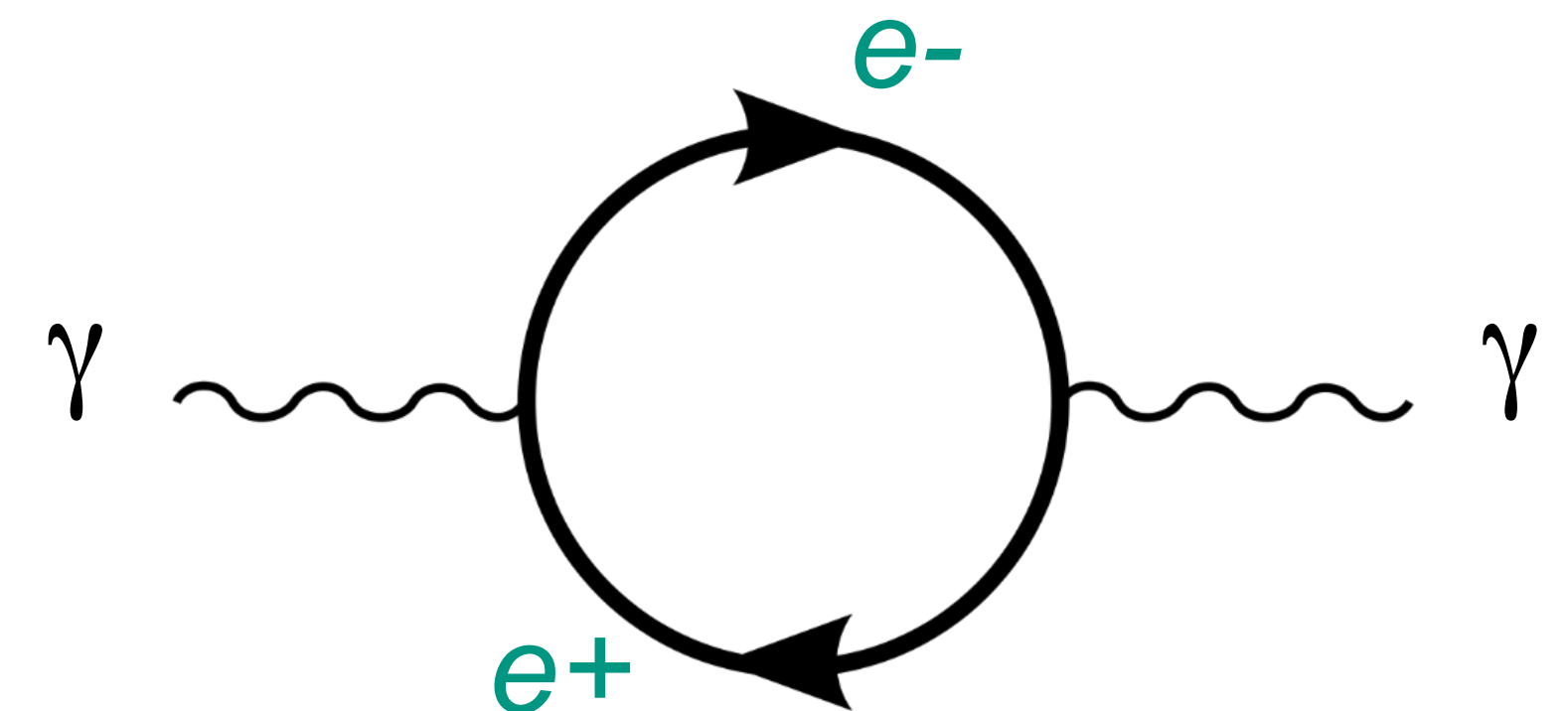
- abhängig vom Impulsübertrag Q^2 zwischen beteiligten Teilchen
- Grund: Vakuumzustand der QED ist komplex, da polarisierbar

- Kopplungsstärke* der elektromagnetischen Wechselwirkung - **Feinstrukturkonstante** α

$$\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 \cdot hc} \approx \frac{1}{137}$$

- Photon als Träger der em. Wechselwirkung

QED: Vakuum mit Quanten-Fluktuationen, virtuelle e^+e^- Paare

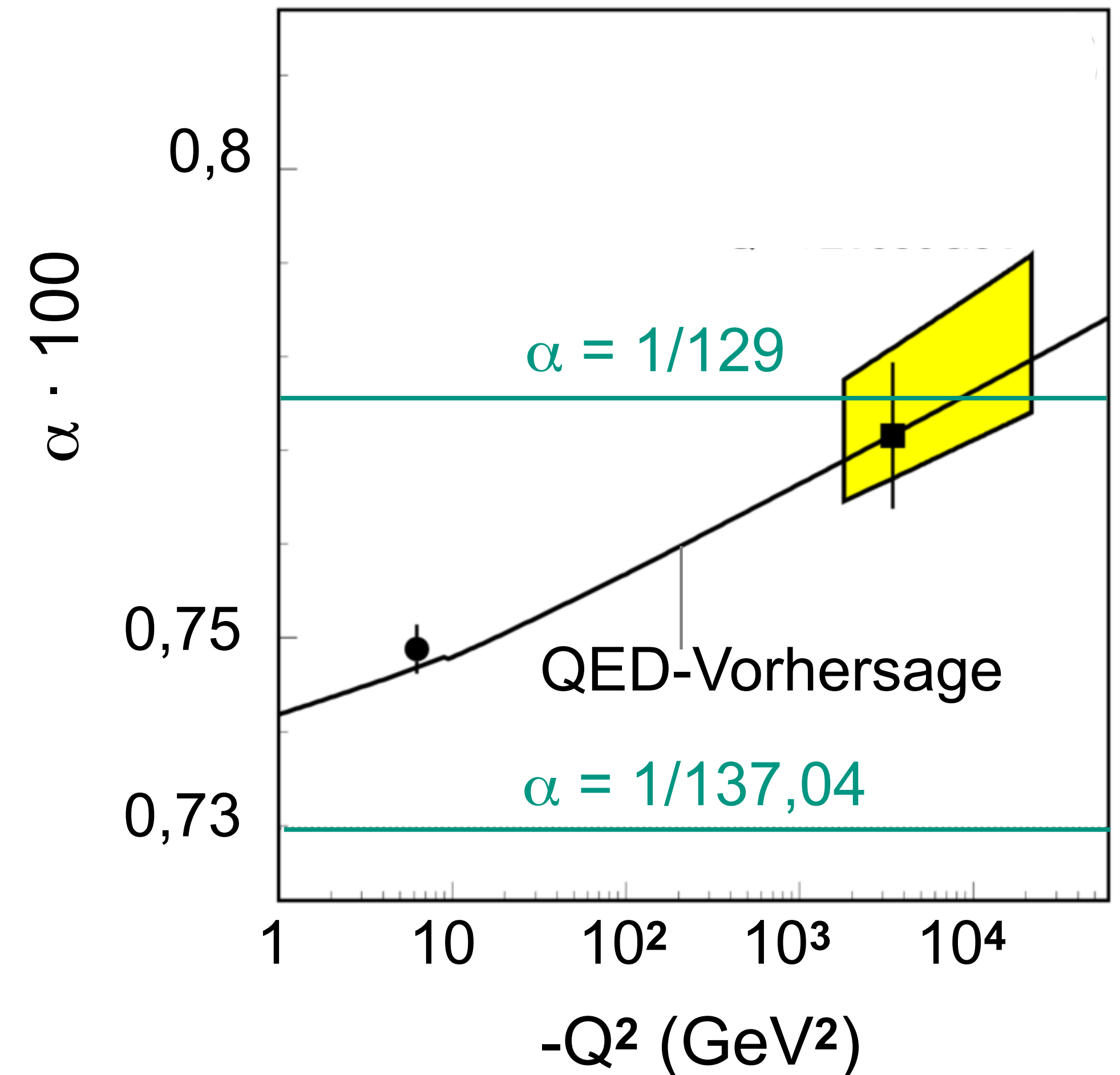
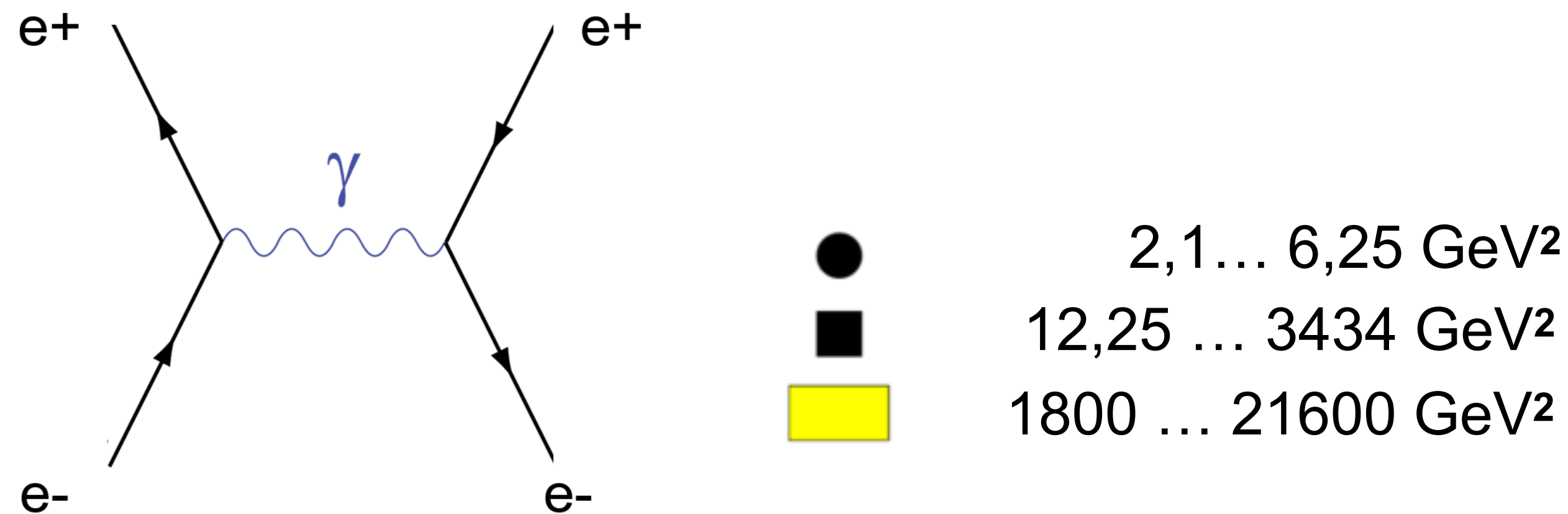


Laufende Kopplung α in der QED

- Impulstransfer Q^2 als ein Maß für den Abstand zur Ladung q

- beobachtbar z.B. in $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ Streuung am LEP (hohe Schwerpunkts-Energie $\sqrt{s}$)

- Daten: L3 Experiment am LEP-Ring
Bhabha-Streuung bei

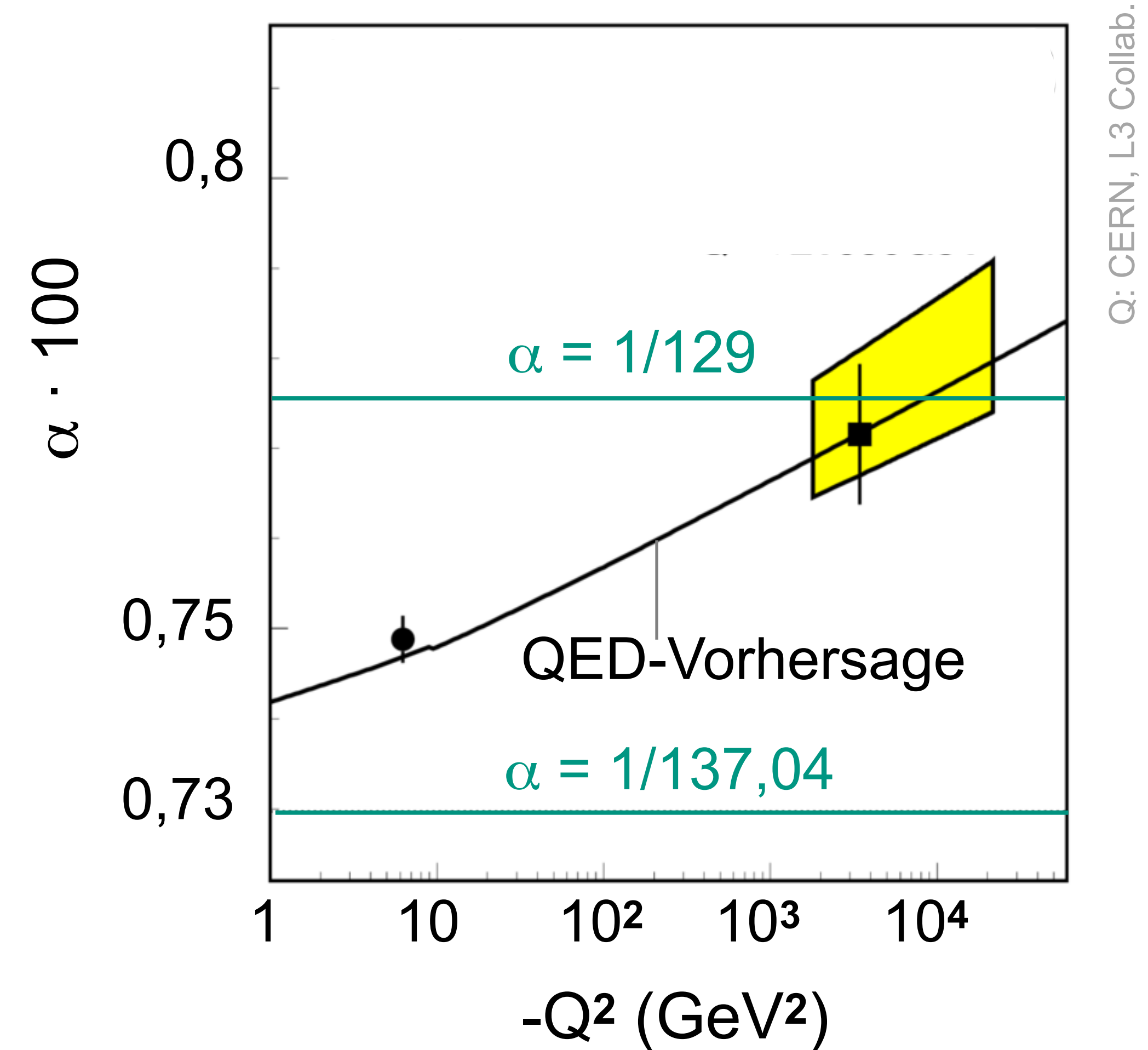
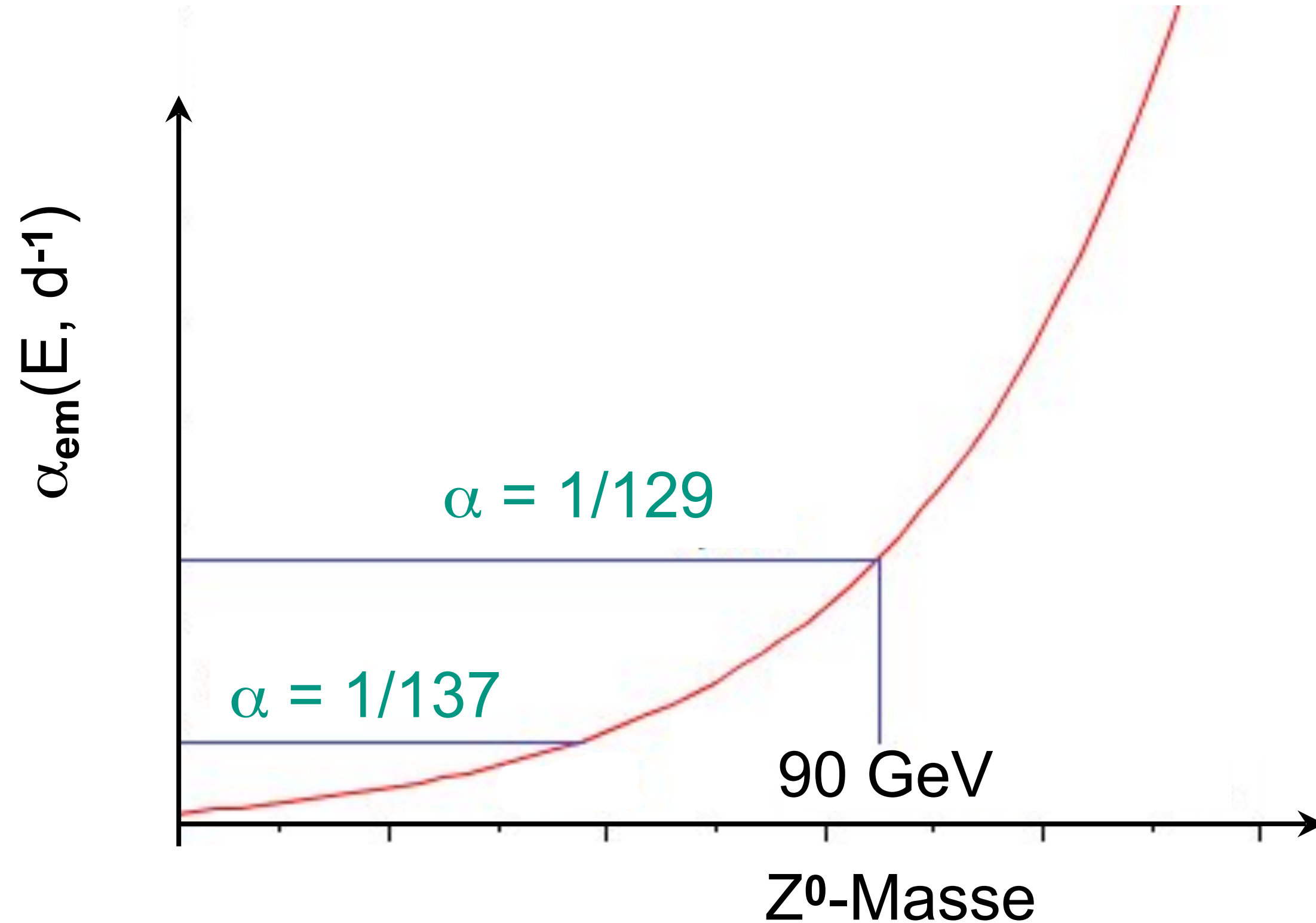


Q: wikipedia, CERN, L3 Collab.

Laufende Kopplung α in der QED

- **Elektromagnetische Kopplung α wird stärker**

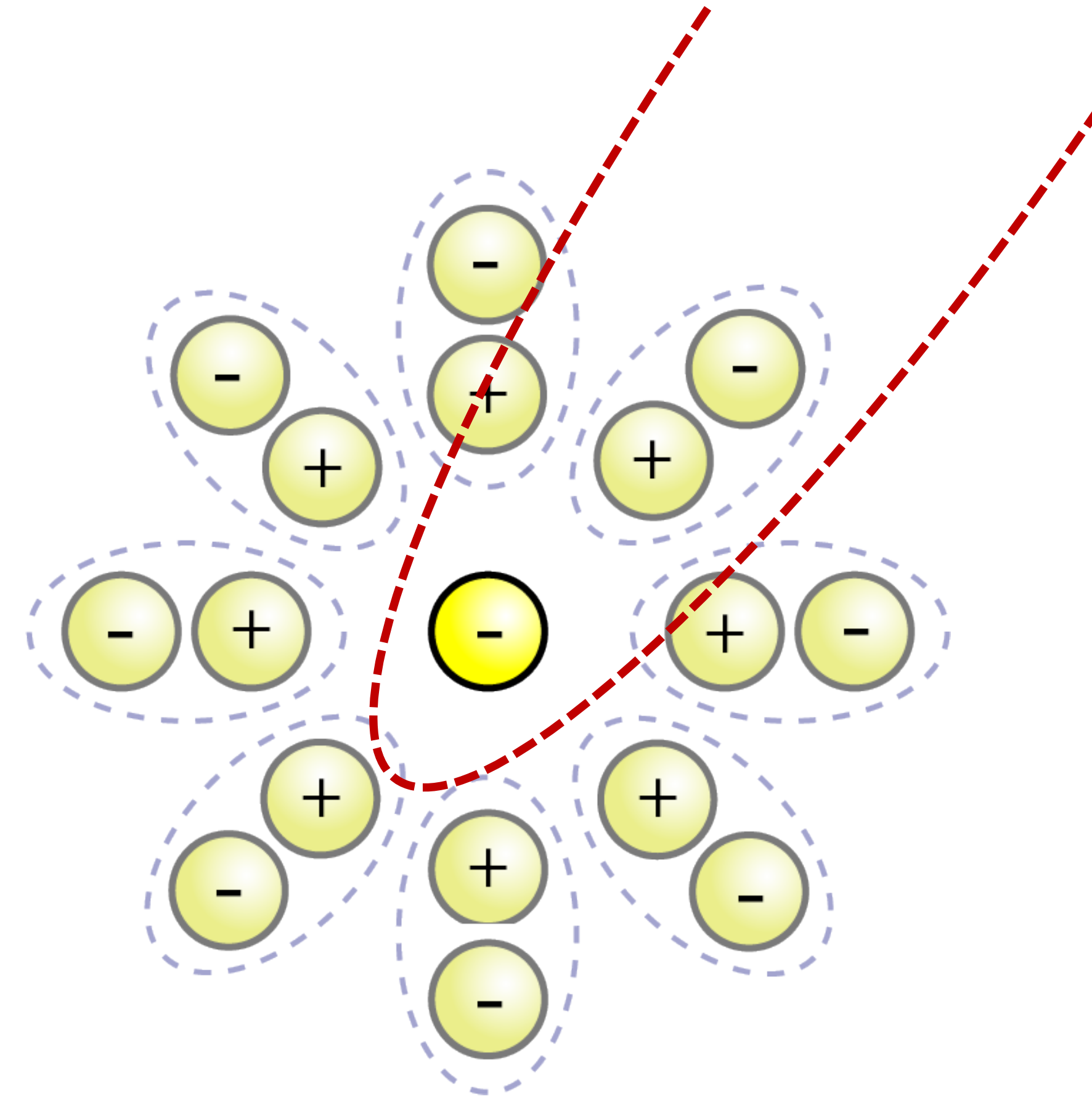
- für höhere Energien / Impulsüberträge q^2
- für kleinere Abstände r



Effektive Ladung e_{eff} in der QED

- **QED: Abschirmung der „nackten“ Ladung**

- ein „nacktes“ Elektron umgeben von **virtuellen e^+e^- Paaren** (QED)
- elektrische Ladung wird **abgeschirmt**, „nackte“ Ladung ist größer !
- mit wachsendem Abstand d wird die effektive elektrische Ladung **e_{eff}** kleiner
- bei kürzeren Abständen (höhere Energie): größere „nackte“ Ladung des Elektrons wird sichtbar



Q: wikipedia

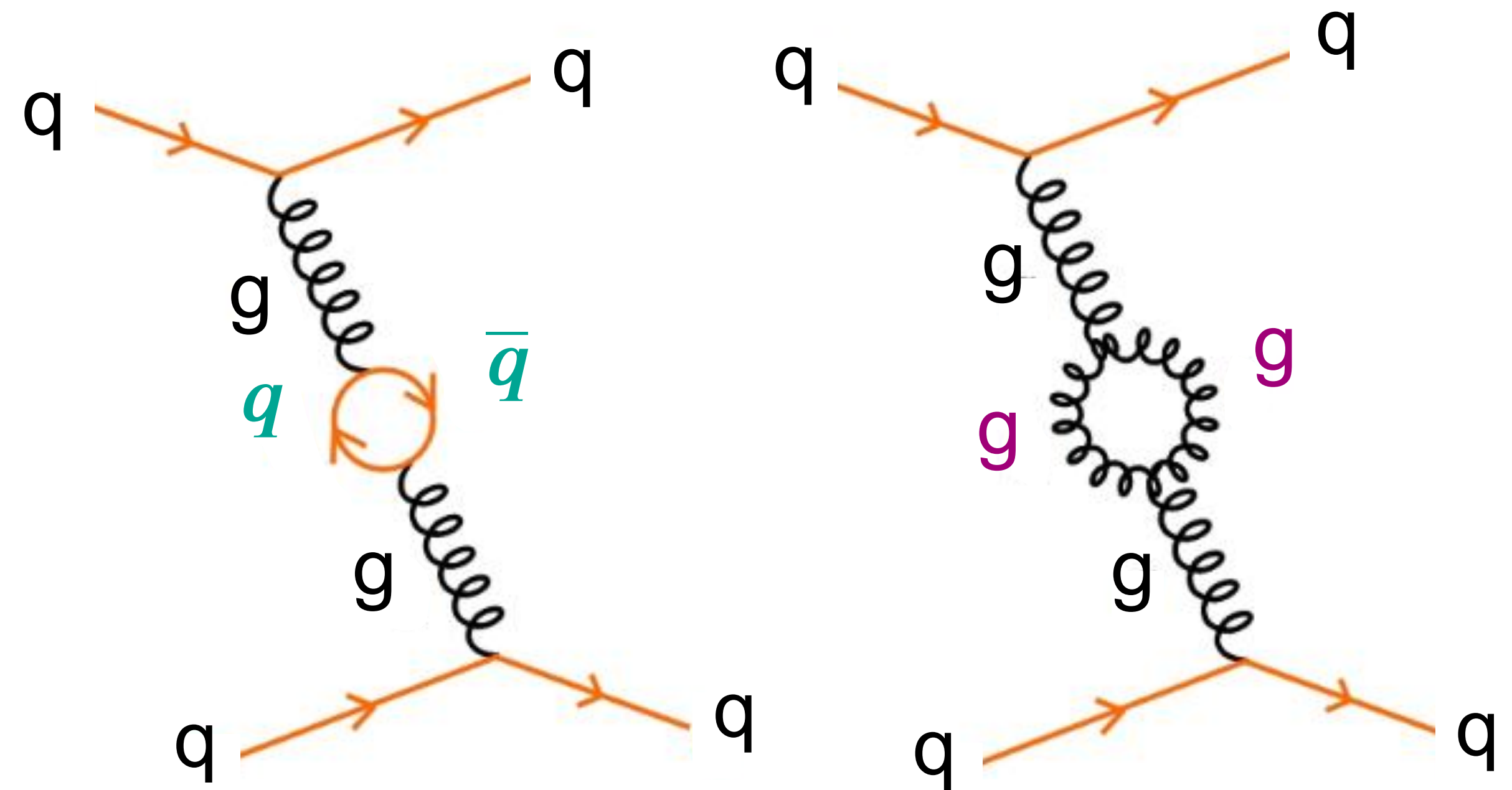
QCD: Vakuumpolarisation

- **Stärke der starken Wechselwirkung**

- abhängig vom Impulsübertrag Q^2 zwischen beteiligten Teilchen
- Grund: Vakuumzustand der QCD ist komplex, da **Emission von Gluonen**

- **Kopplungsstärke** α_s der starken Wechselwirkung

- im Gegensatz zum Photon in der QED: das **Gluon in der QCD trägt selber eine Farbladung!**



Q: cronodon

QCD: Vakuumpolarisation

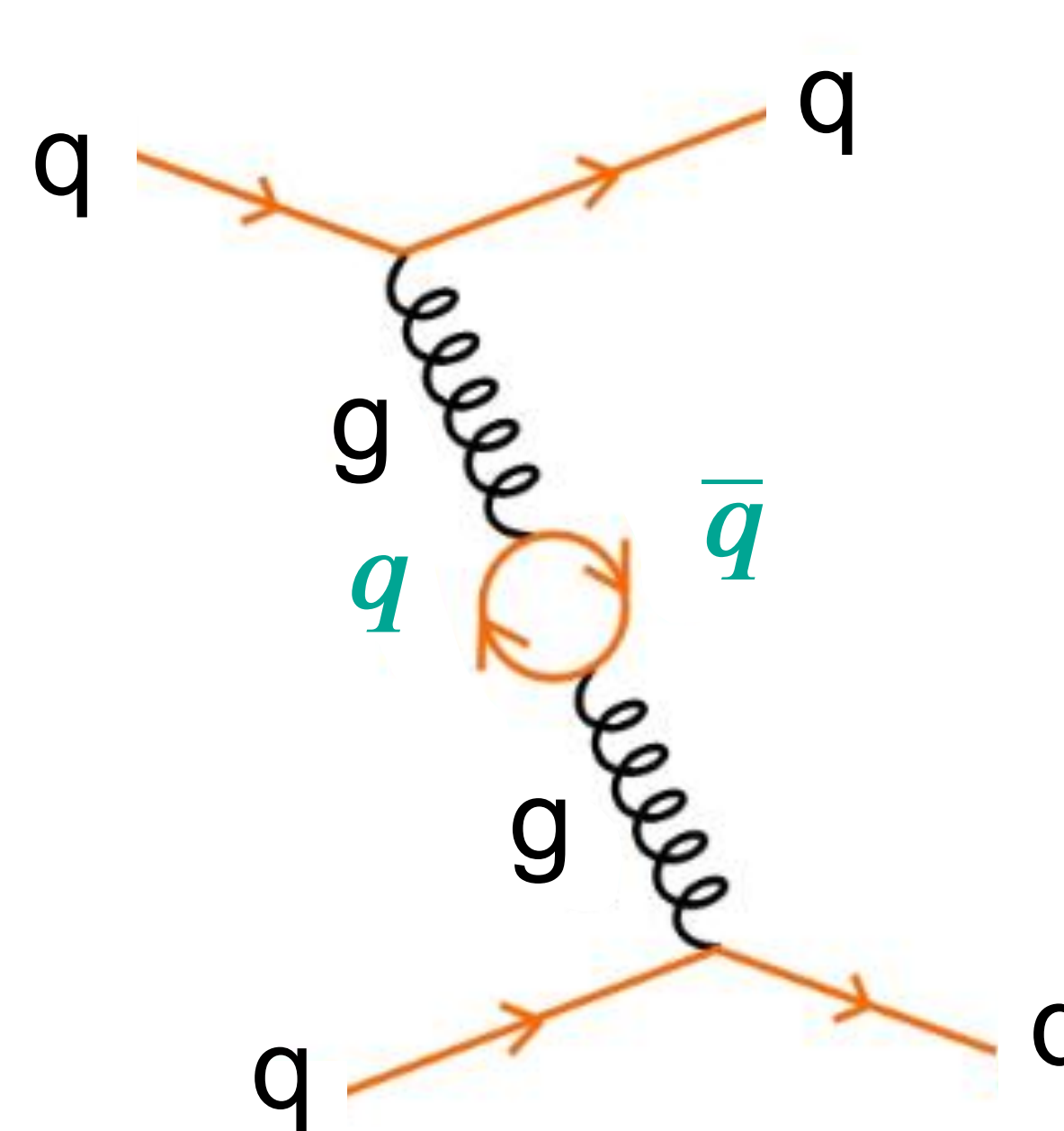
- **Abschirmung** der Farbladung eines „nackten“ Quarks

- Erzeugung von **virtuellen Quark-Antiquark** $q\bar{q}$ Paaren (analog zur QED)
die $q\bar{q}$ -Paare tragen aber **keine Netto-Farbladung**

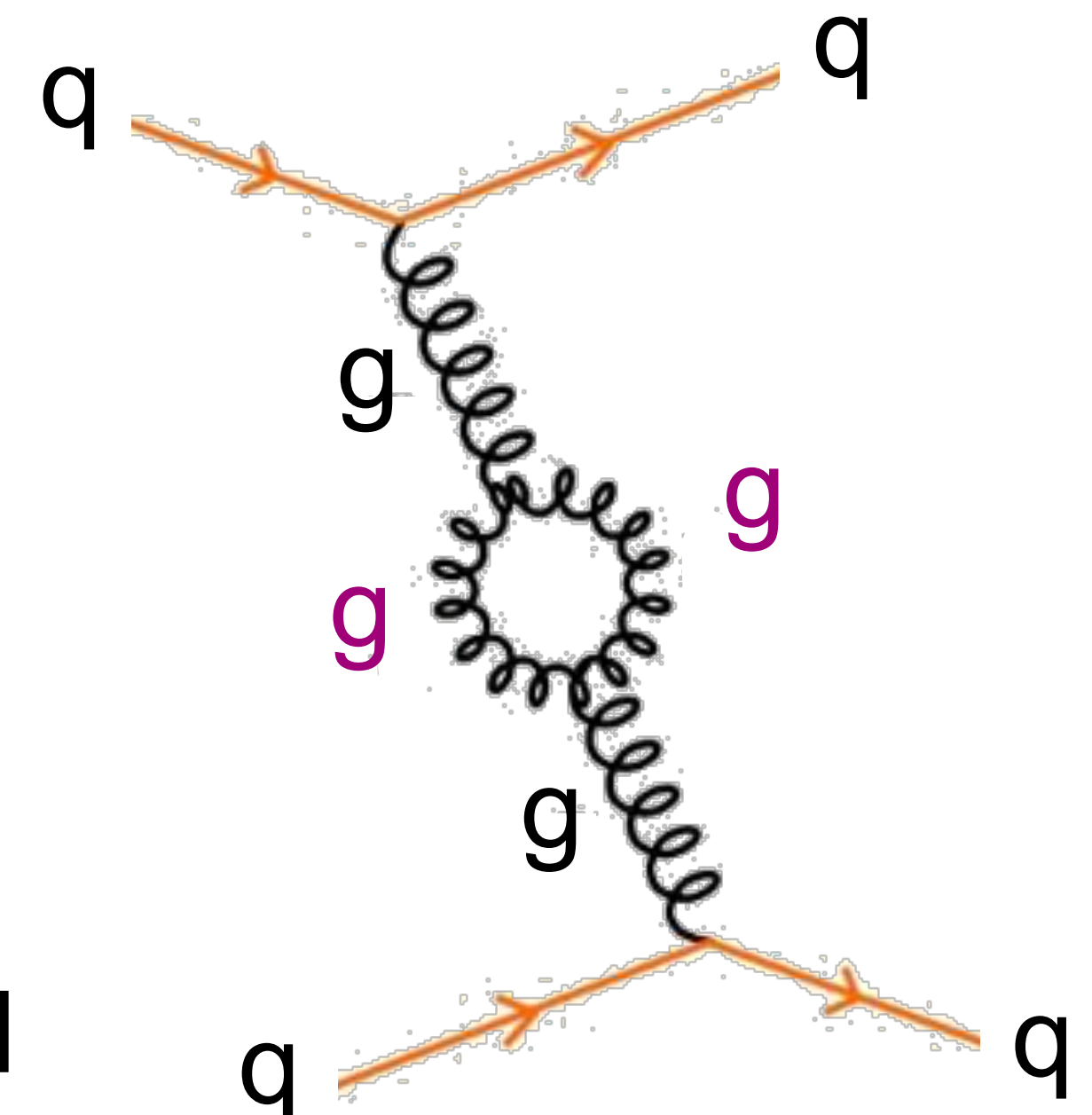
- **Anti-Abschirmung** der Farbladung eines „nackten“ Quarks

- die vom Quark emittierten **virtuellen Gluonen** nehmen Farbladungen mit, und verteilen diese auf ein größeres Volumen (dominant bei kleinen Abständen)

Q: cronodon



Screening Korrektur



Anti-Screening Korrektur

Laufende Kopplung α_s in der QCD

- **Starke Kopplung α_s wird schwächer / kleiner**
 - für höhere Energien / Impulsüberträge Q^2 / Massenskalen μ
 - für kleinere Abstände r
- **Laufen der starken Kopplung α**
 - schwächere gluonische Anti-Abschirmung

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(\mu^2)}{1 + \frac{33 - 2 \cdot n_f}{12\pi} \cdot \alpha_s(\mu) \cdot \ln\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

Gluonen

Quarks

Quarks

Zahl n_f der Flavourarten

Gluonen

Zahl n_c der Farbladungen

$11 \cdot n_c$

Laufende Kopplung α_s in der QCD

- **Starke Kopplung α_s bei verschiedenem Impulstransfer im Vergleich mit QCD**

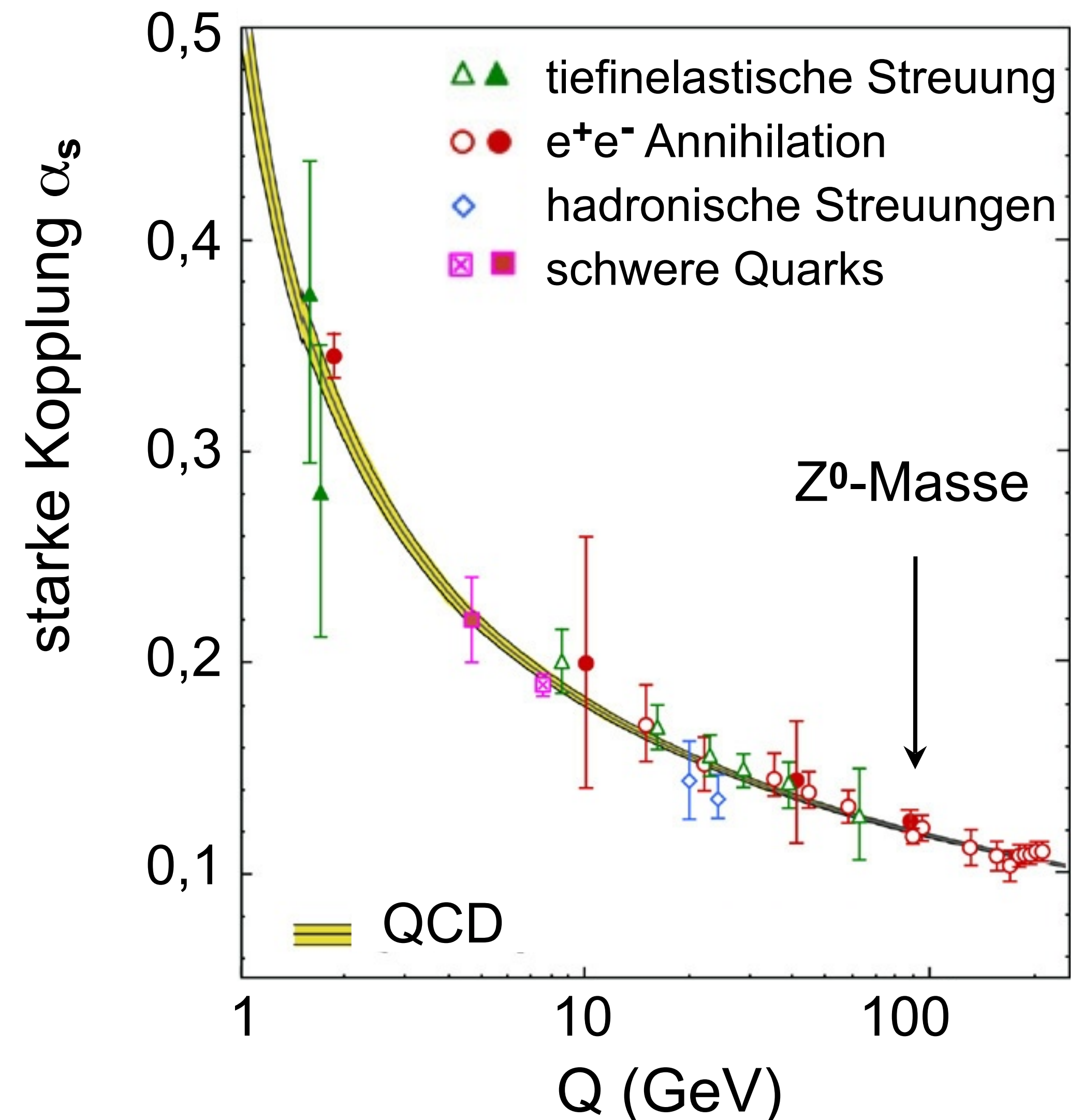
- Energie-Bezugspunkt für α_s ist die Masse des Z^0 -Bosons (90 GeV)

$$\alpha_s(M_Z) = 0,1179 \pm 0,0010$$

- α_s hängt implizit von der Zahl der **Farbfreiheitsgrade n_c** ab, aus Anpassung an experimentelle Daten:

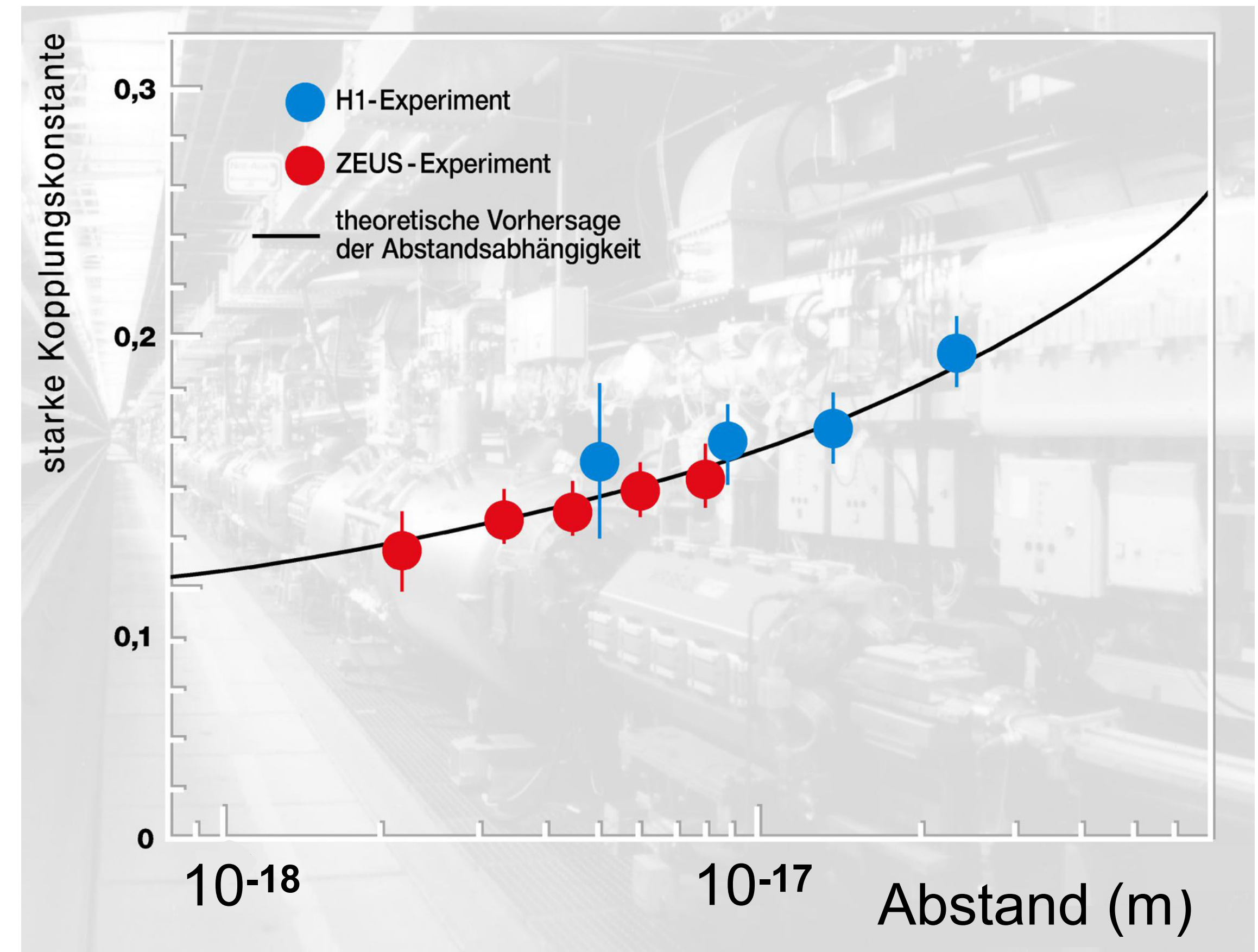
$$n_c = 3,03 \pm 0,12$$

3 Farbfreiheitsgrade der QCD



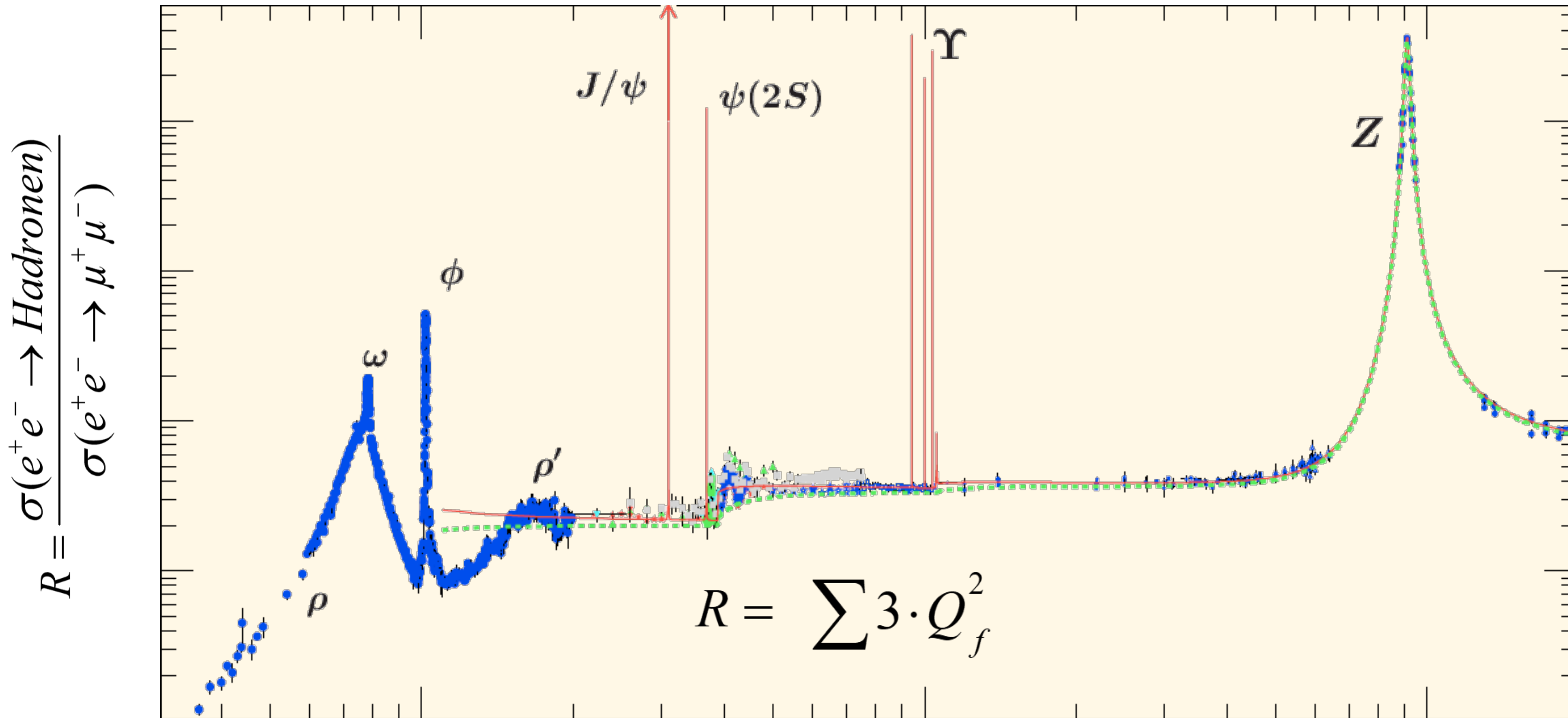
Laufende Kopplung α_s in der QCD - Messung

- **Starke Kopplung α_s wird schwächer / kleiner für kleinere Abstände**
 - Messungen von α_s an **HERA** (**H**adron-**E**lektron-**R**ing **A**nlage) am DESY
 - Experimente H1 und ZEUS



Katzen





RECAP/ EINSCHUB – ANZAHL DER FARBLADUNGEN

Anzahl der Quark-Farbladungen & -Flavours

- **Elektron-Positron-Annihilation am Collider in Hadronen**

- e⁺e⁻ Annihilation im s-Kanal (virtuelle Photonen) & Erzeugung von

Quark-Antiquark Paaren: $u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}, c\bar{c}, \dots$

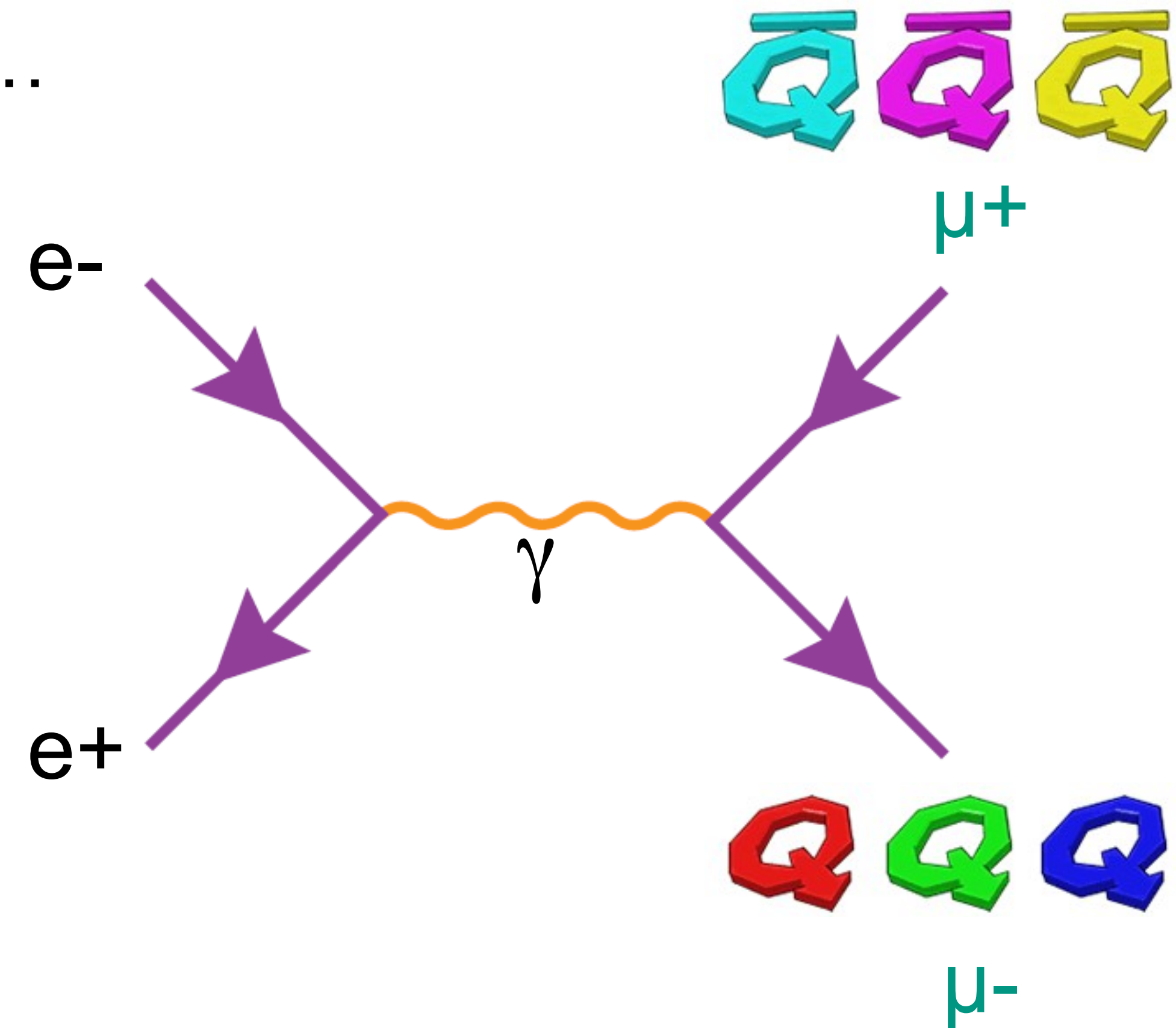
Lepton-Antilepton Paaren: $e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$

- **nichtresonante Quark-Antiquark Erzeugung**

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = \sum_f Q_f^2 \cdot \frac{4\pi \cdot \alpha^2}{s} \quad \begin{array}{l} \text{starke} \\ \text{Kopplung} \end{array}$$

Q_f^2
 (Ladung)² der
 Quarkflavours

s
 (Schwerpunktsenergie)²



Anzahl der Quark-Farbladungen & -Flavours

- Erzeugung von Lepton-Paaren – benutze $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ zur Normierung

Lepton-Antilepton Paare: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$

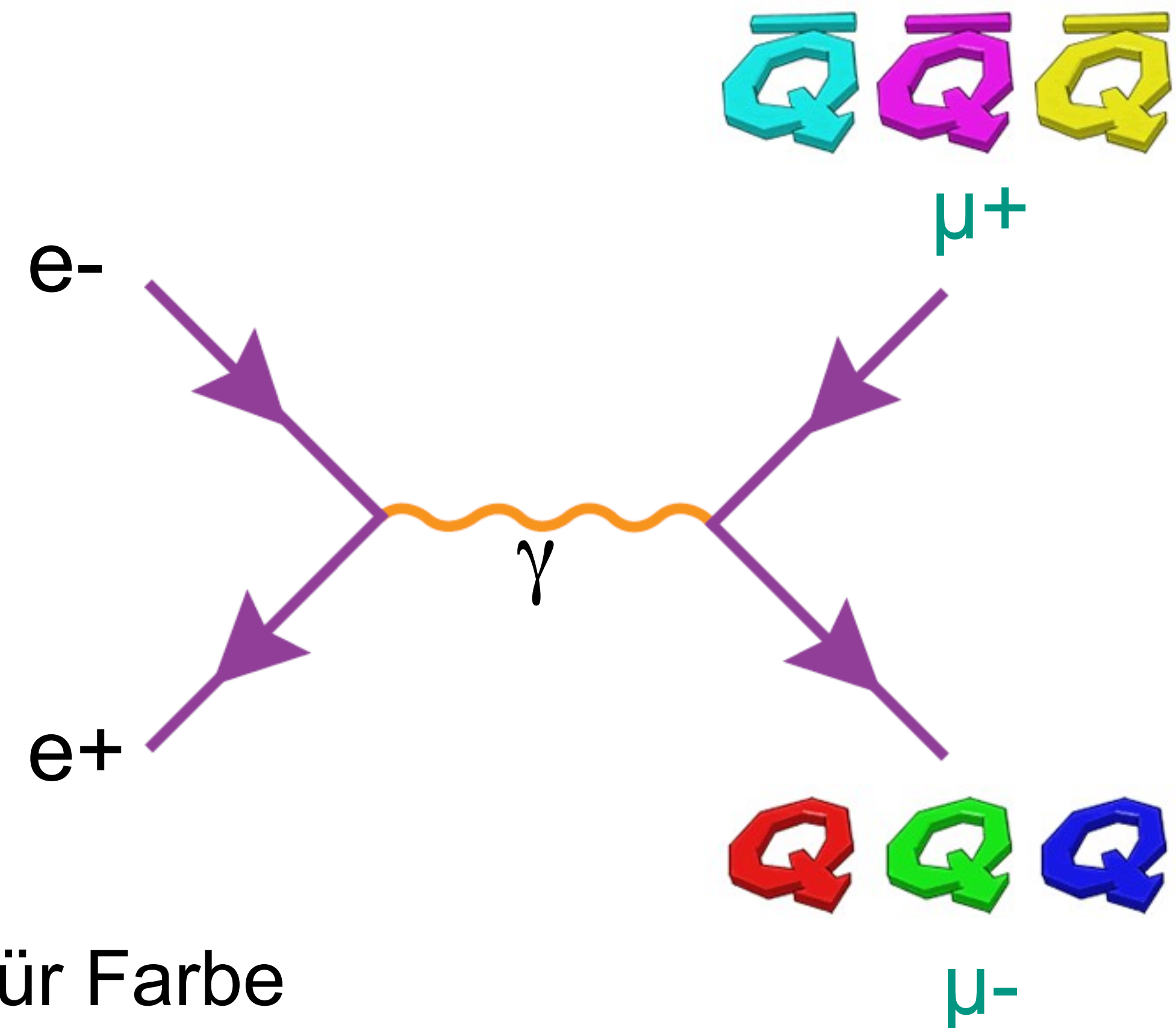
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{\pi \cdot \alpha^2}{3E^2} = \frac{4\pi \cdot \alpha^2}{3s}$$

|
Strahlenergie

- Wirkungsquerschnittsverhältnis R

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \sum 3 \cdot Q_f^2$$

Faktor 3 für Farbe



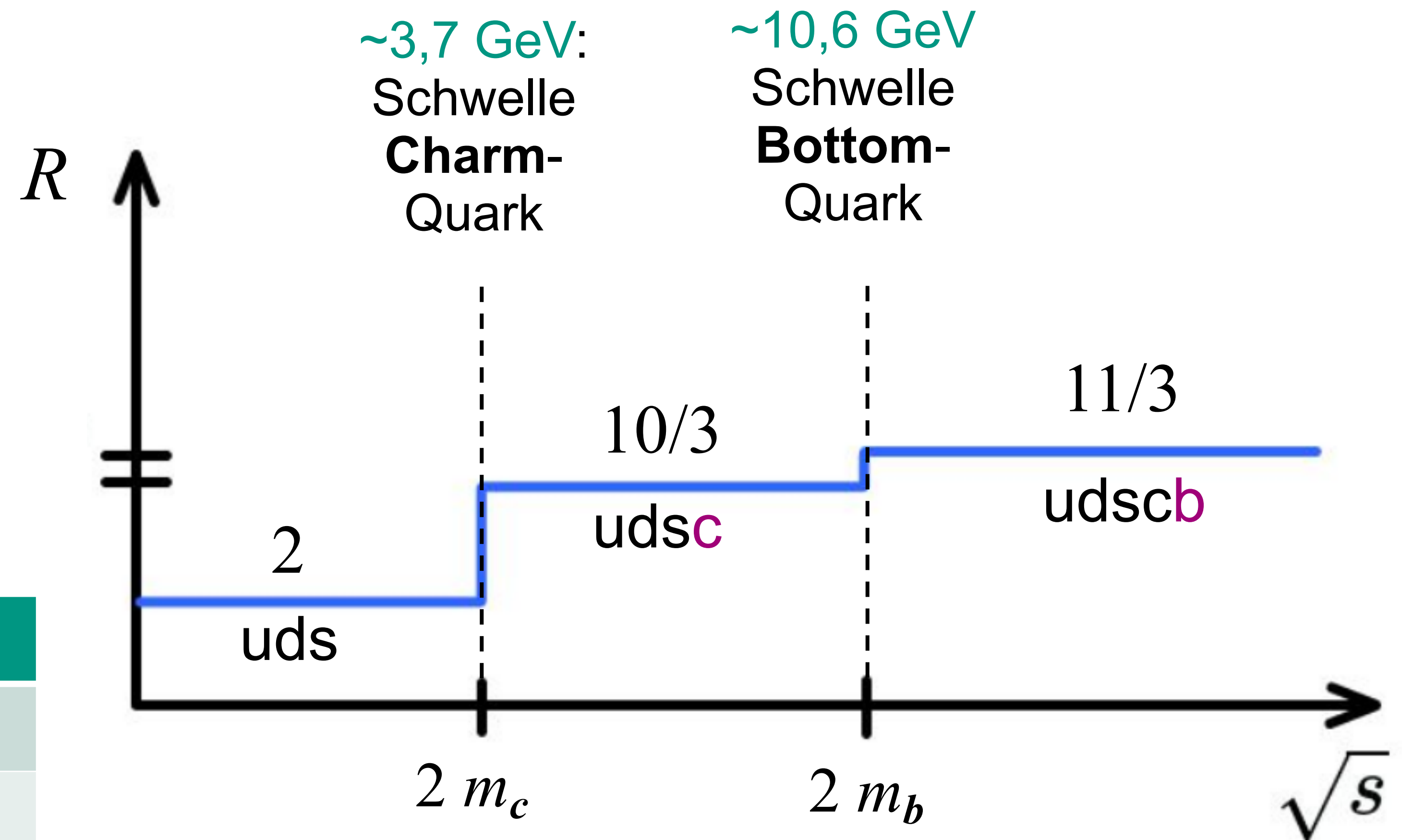
Anzahl der Quark-Farbladungen & -Flavours

- **Experimentelle Beobachtungen**

- ab der kinematischen Schwelle wird ein **neuer Flavourzustand** (s,c,b) erzeugt

$$R = \sum 3 \cdot Q_f^2$$

	u	d	s	c	b
Q_f^2	2/3	-1/3	-1/3	2/3	-1/3
	4/9	1/9	1/9	4/9	1/9



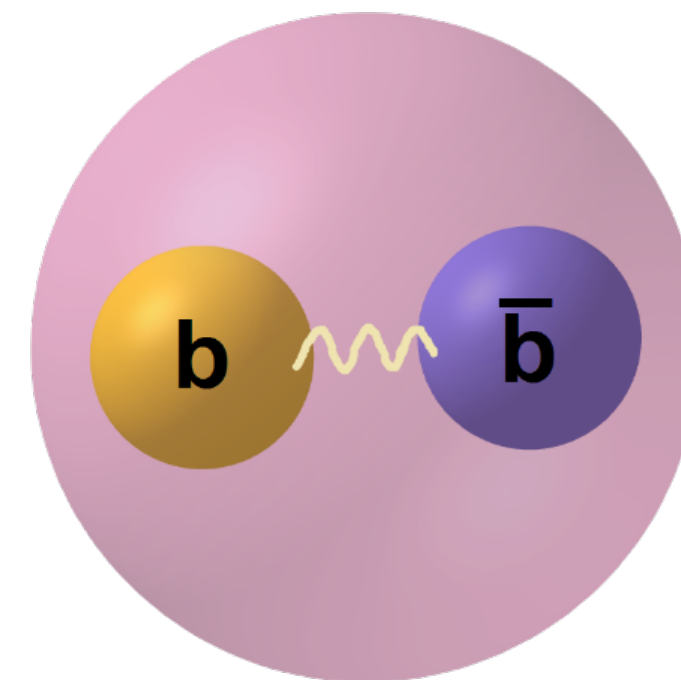
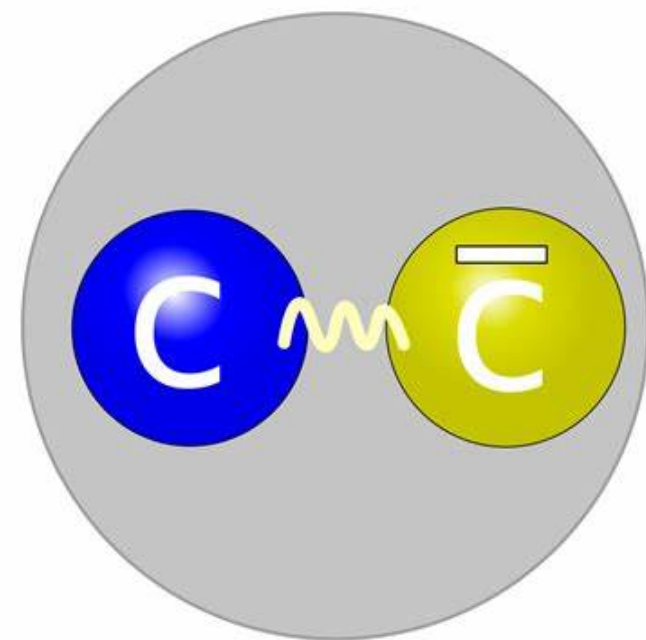
Anzahl der Quark-Farbladungen & -Flavours

- **Experimentelle Beobachtungen**

- man beobachtet 5 **Quark-Flavour-Zustände** (top zu schwer für $t\bar{t}$)
- ohne Einbeziehung der **3 Farbfreiheitsgrade** keine Übereinstimmung

- **Resonanzen**

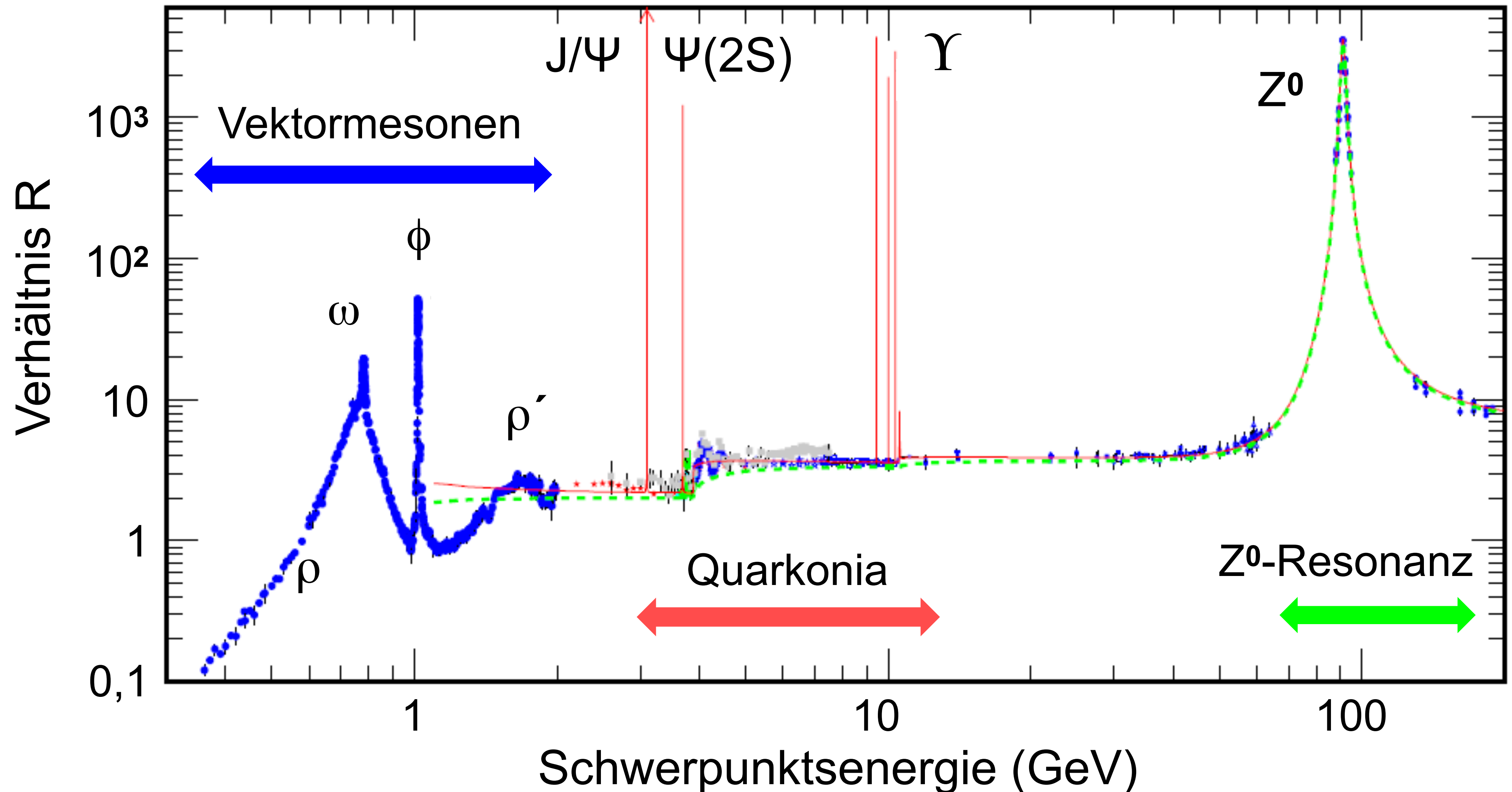
- direkt an der kinematischen Schwelle beobachtet man Resonanzen*
wie das **J/ψ (Charmonium)** oder **Υ (Bottomonium)**



Gesamtüberblick der Hadronproduktion

• Hadronen

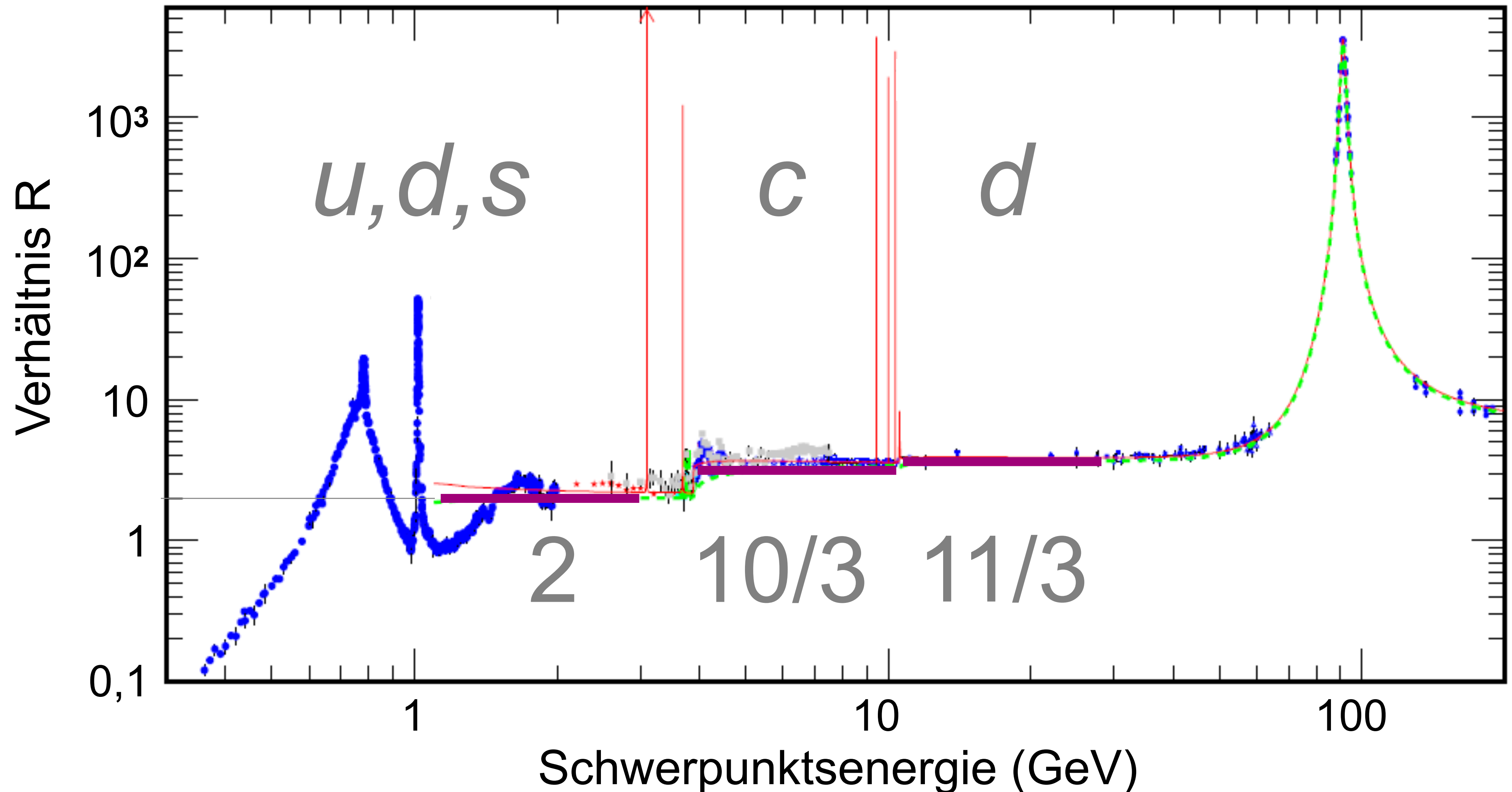
- niedrige Energien:
Vektor-Mesonen
 ρ , ω , ϕ , ρ'
- mittlere Energien:
Quarkonia
 J/ψ , Υ und Anregungen



Gesamtüberblick der Hadronproduktion

- **Hadronen**

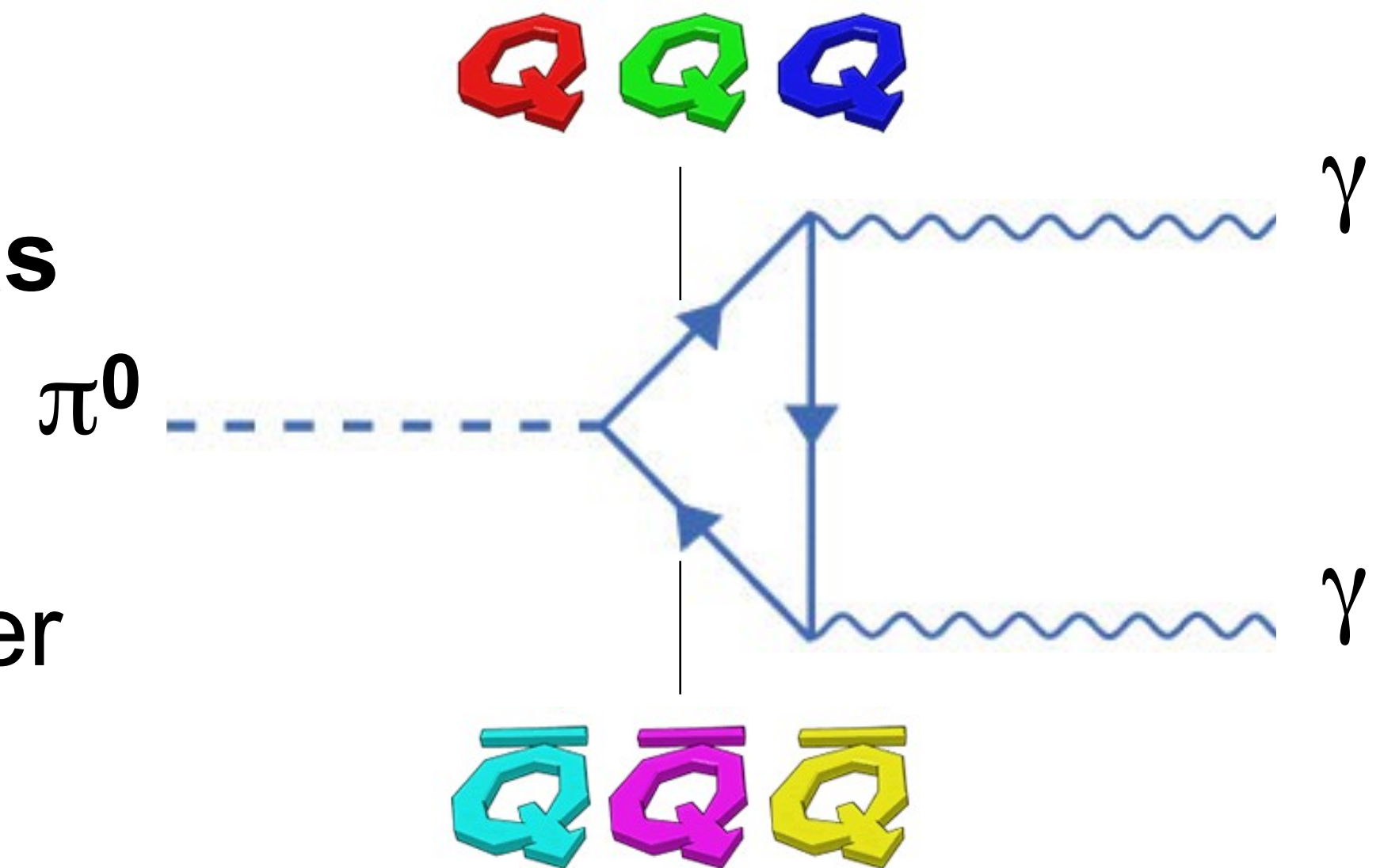
- niedrige Energien:
Vektor-Mesonen
 $\rho, \omega, \phi, \rho'$
- mittlere Energien:
Quarkonia
 $J/\psi, \Upsilon$ und Anregungen



Weitere Evidenz für Farbladungen

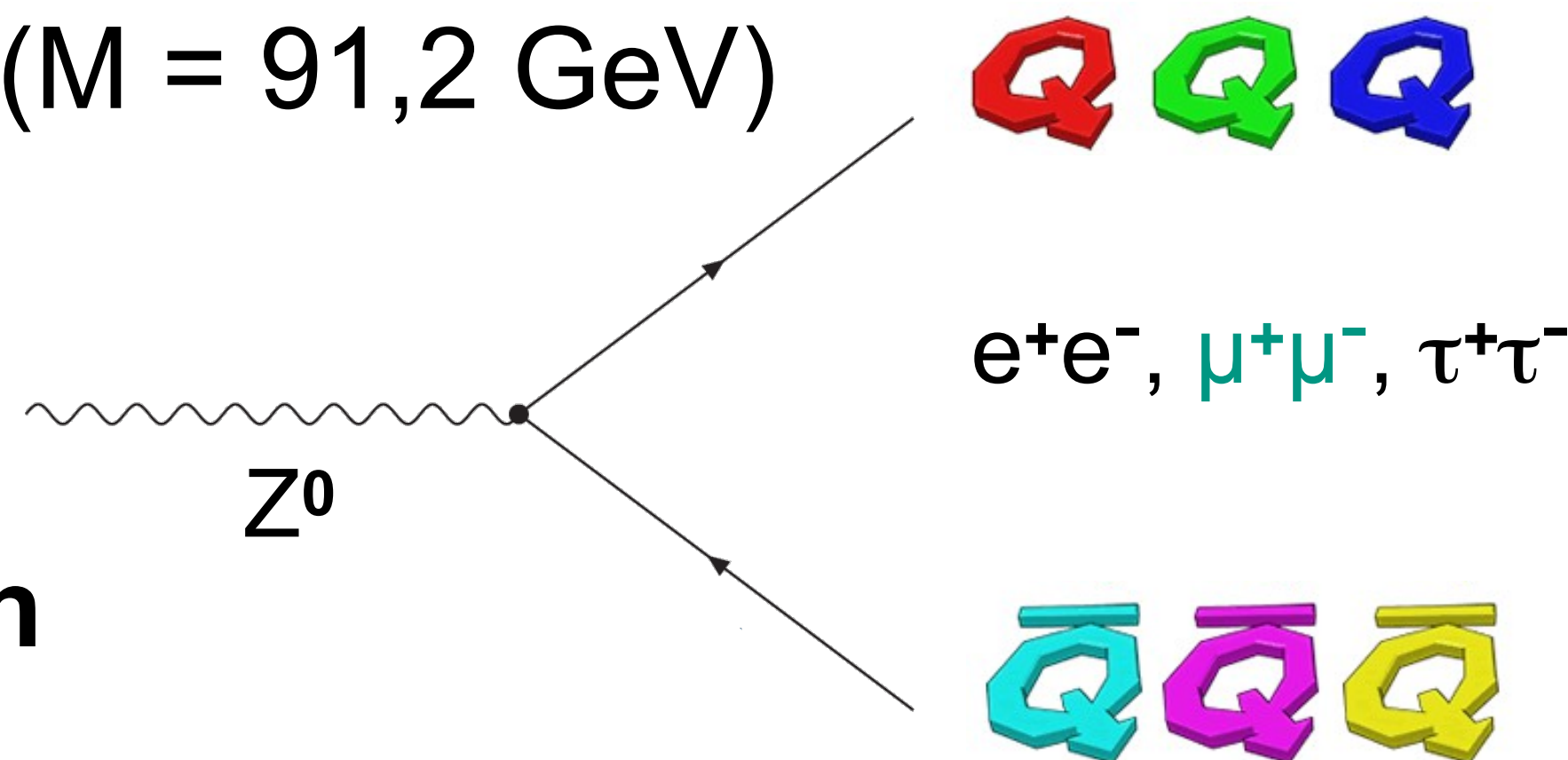
- **Zerfallsrate neutraler Pionen in Gammas**

- Quark-Dreieck: virtuelle (Anti-)Quarks kommen in 3 Farben (Antifarben), daher
Amplitude $\times 3$ - Zerfallsrate $\times 9$

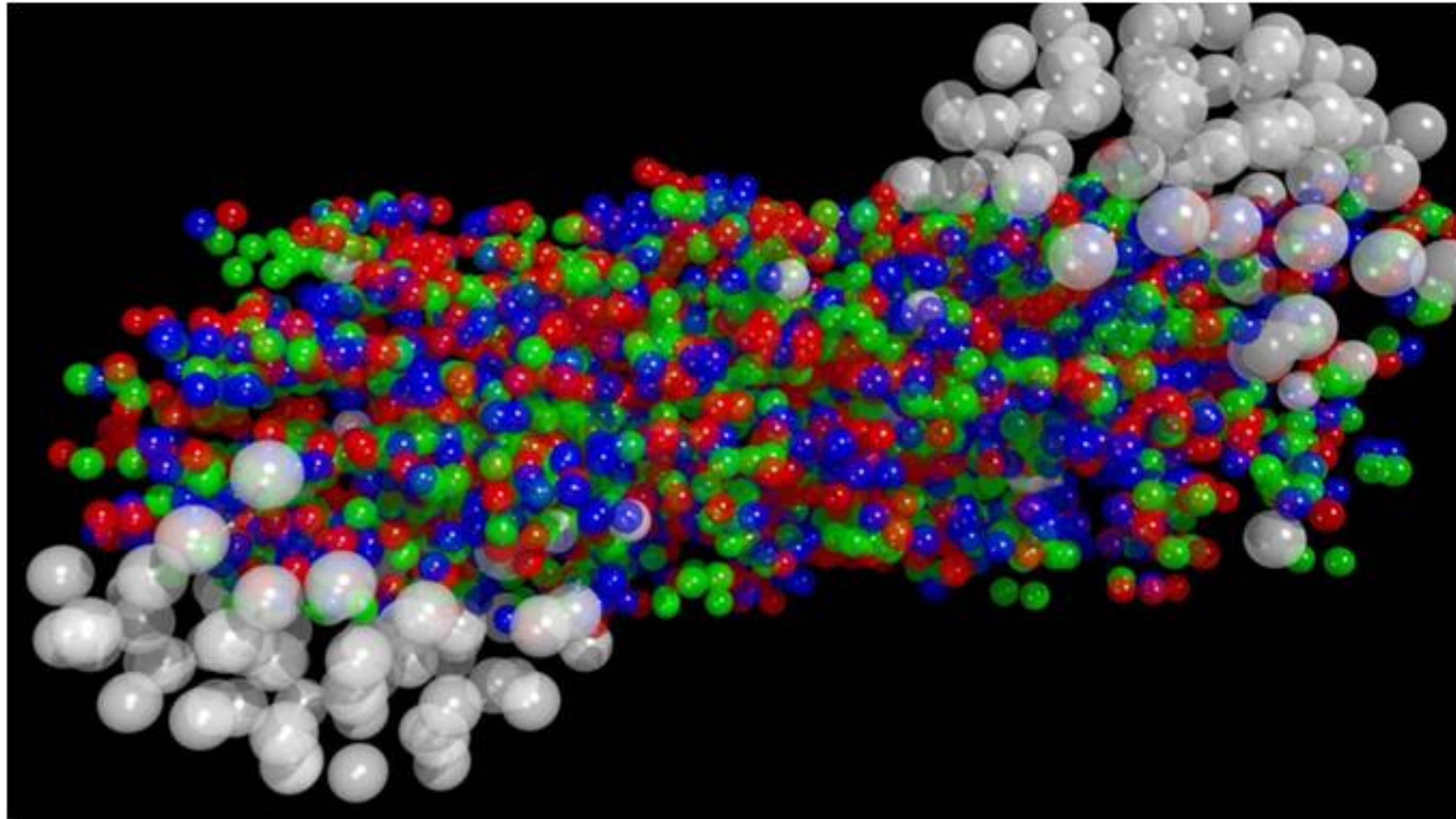


- **Partielle Zerfallsbreite des Z^0 in Quark-Antiquarks**

- Zerfall des Z^0 Bosons ($M = 91,2 \text{ GeV}$)
- Zerfälle in Quarks/
Antiquarks:
Farbladung zeigt sich



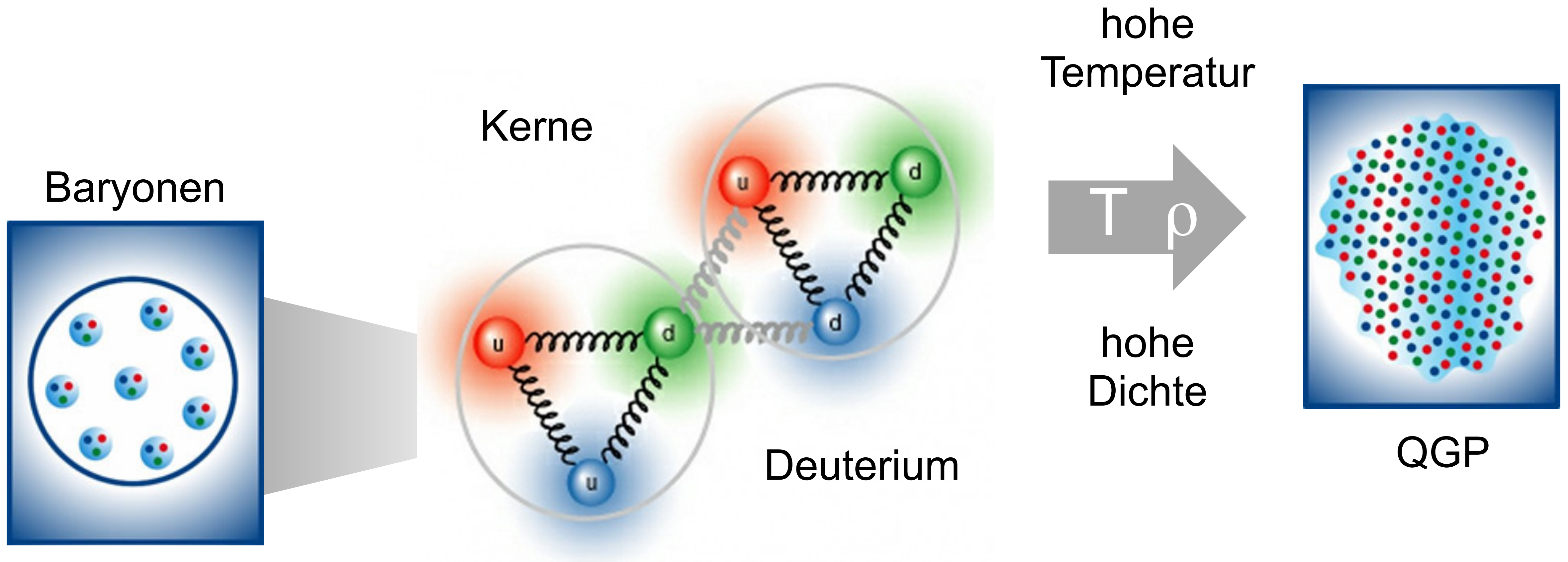
Z^0 -Zerfall mit Jets



EINSCHUB – QUARK-GLUON PLASMA?

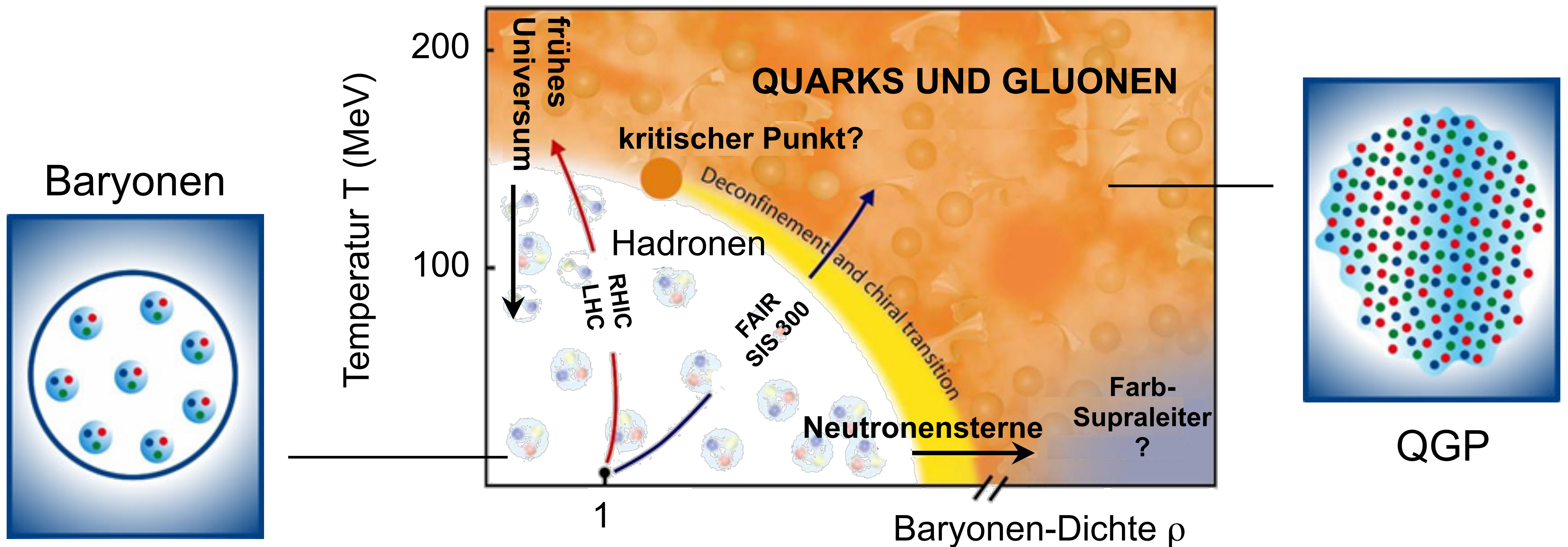
Quark-Gluon Plasma (QGP)

- **Kernmaterie unter normalen Bedingungen: Quarks und Gluonen bilden Baryonen und Kerne wie Deuterium**



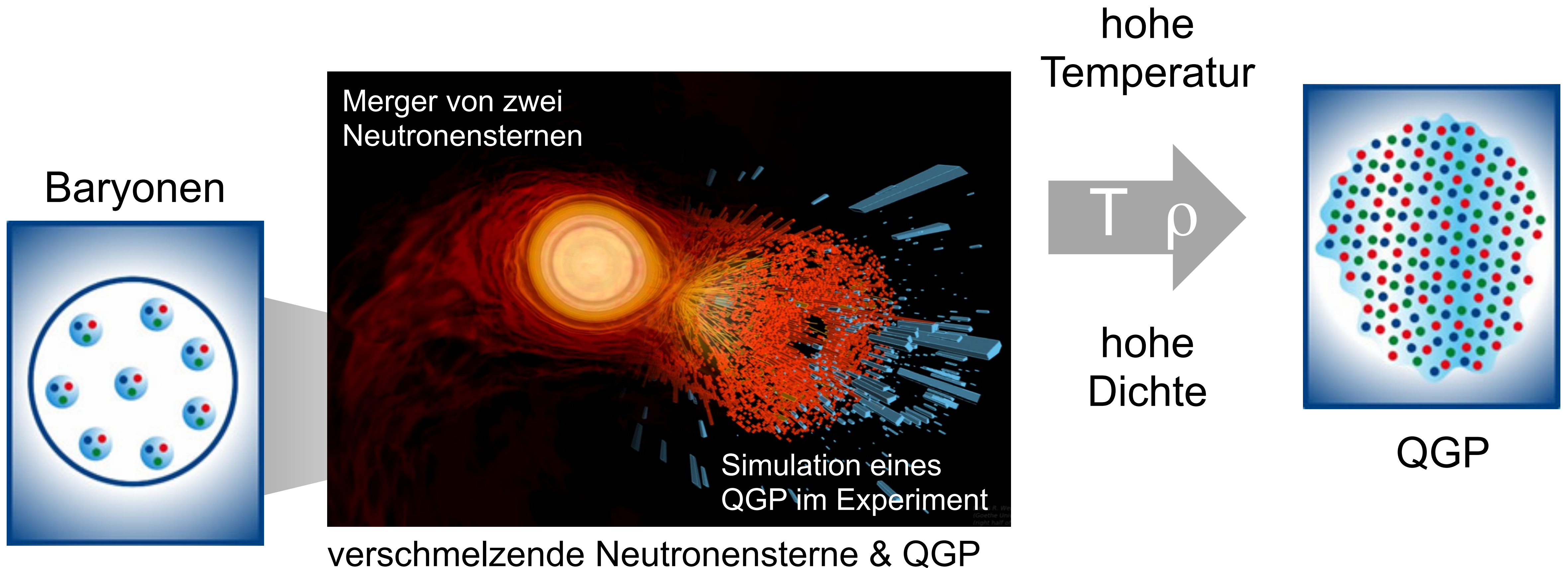
Quark-Gluon Plasma (QGP)

- Kernmaterie und extremen Bedingungen: hohe Temperatur (200 MeV) bzw. hohe Dichte: Übergang von Kernen zu einem **Quark-Gluon Plasma**?



Quark-Gluon Plasma (QGP)

- **Kernmaterie unter normalen Bedingungen: Quarks und Gluonen bilden Baryonen und Kerne wie Deuterium**



Quark-Gluon Plasma (QGP) – schwere Ionen

- **Ultra-relativistische Schwerionen-Reaktionen**

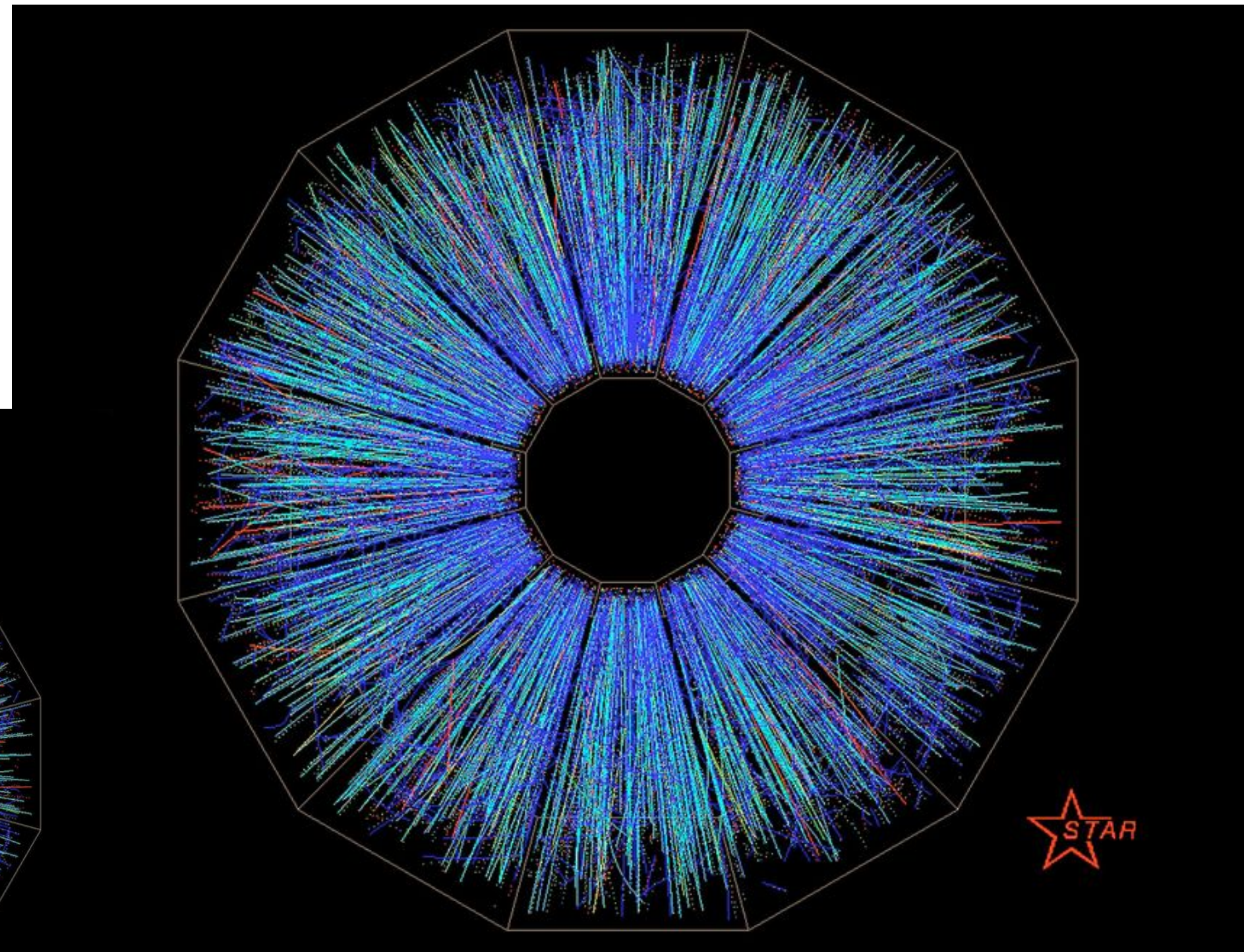
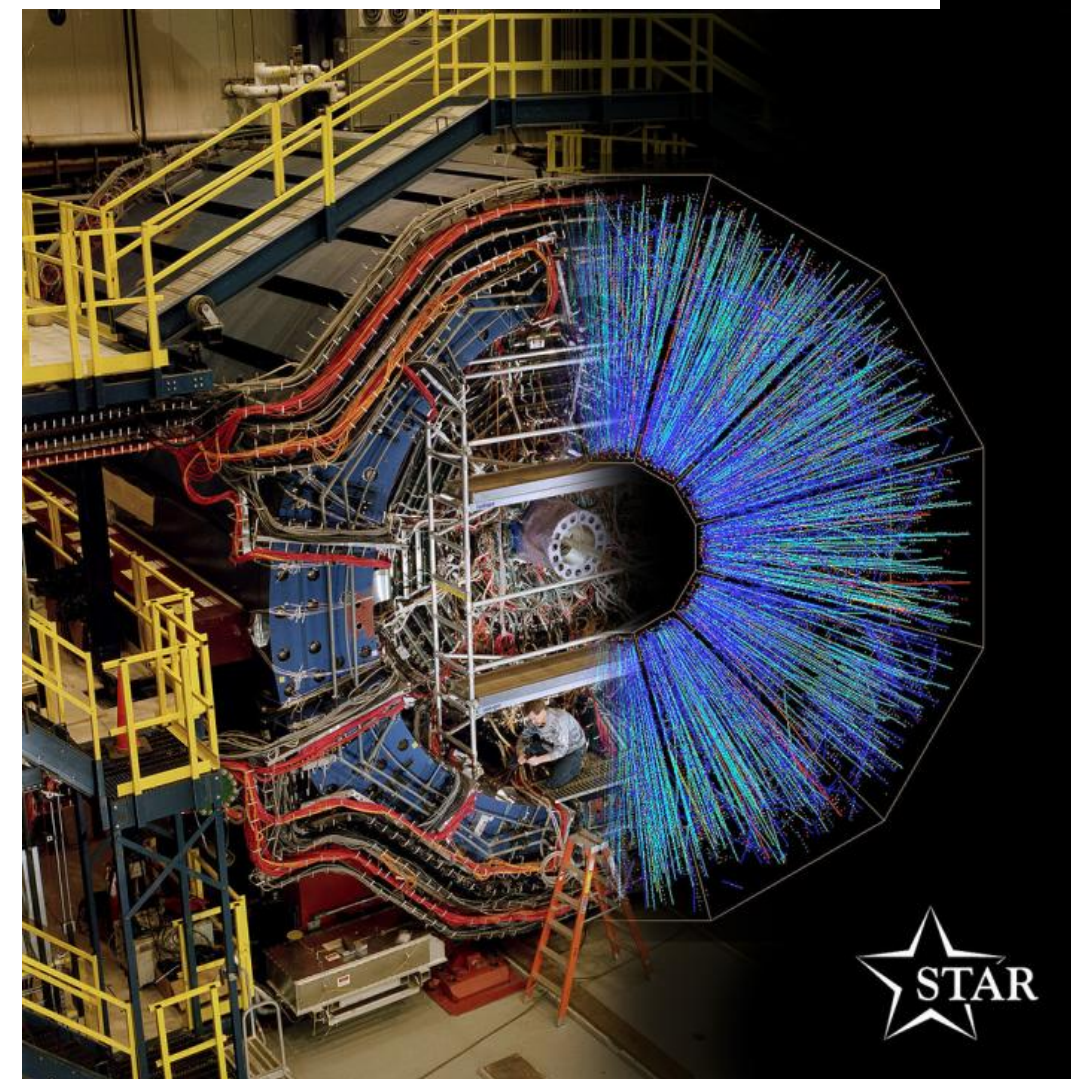
- Ziel: Nachweis einer neuen Zustandsform der Materie – das QGP

- **niedriges T & niedriges ρ :**

‘Kondensat’ von farbneutralen Hadronen
 3 Quarks & Gluonen gebunden in Nukleonen
 (Protonen, Neutronen)

- **hohes T oder hohes ρ :**

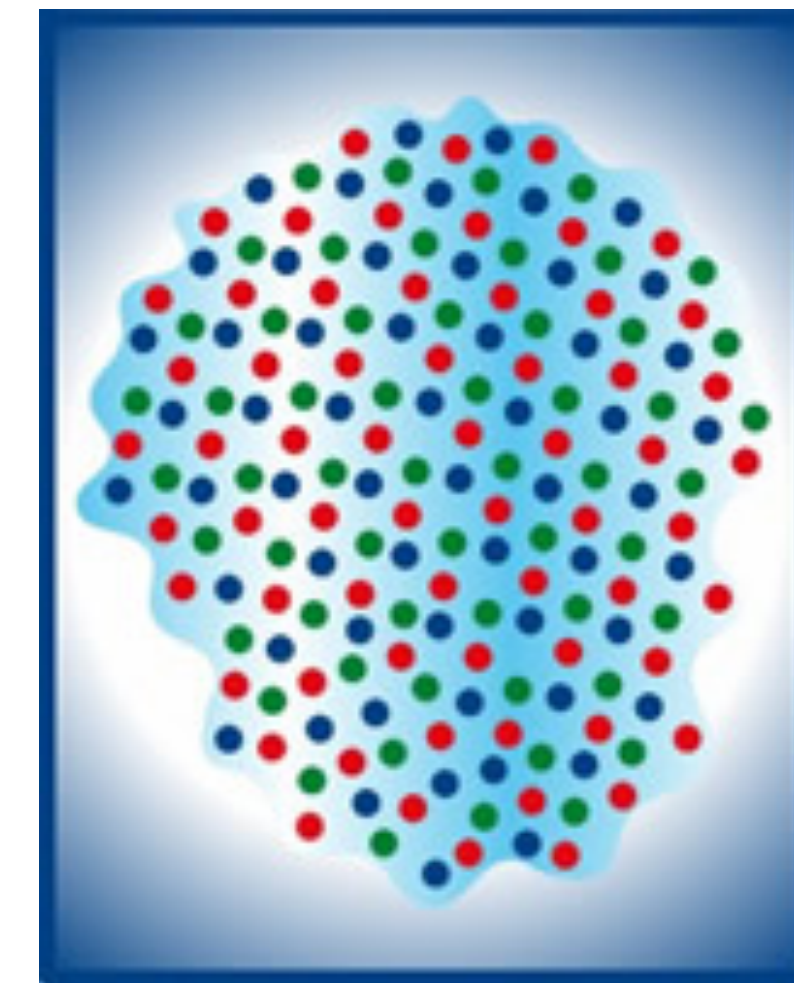
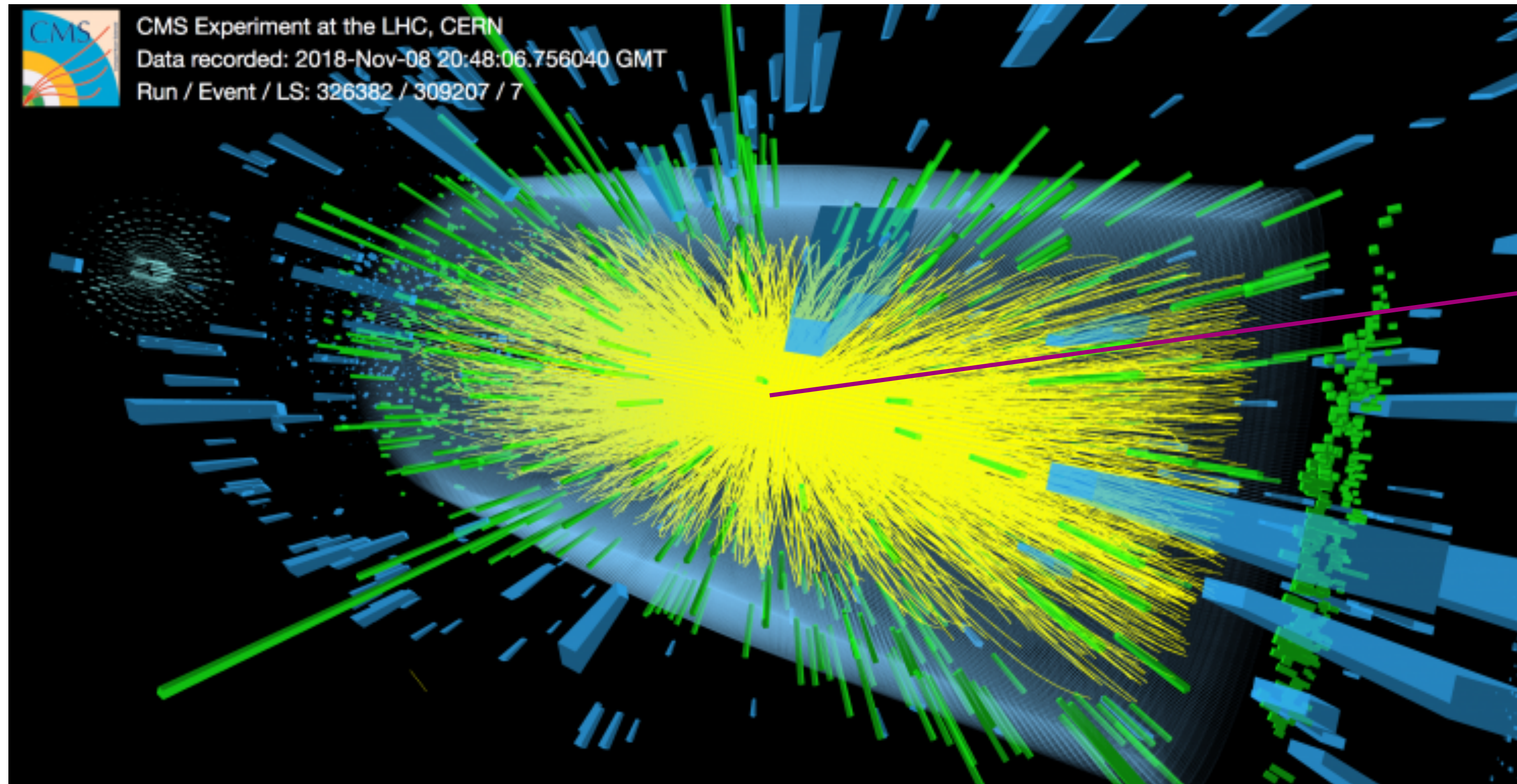
‘freie’ Quarks und Gluonen
 experimentelles Studium
 des **Phasen-Übergangs**
 im frühen Universum



STAR Experiment am **Relativistic Heavy Ion Collider RHIC**

Quark-Gluon Plasma (QGP) – schwere Ionen am LHC

- **Ultra-relativistische Schwerionen-Reaktionen am LHC: Pb-Pb**
 - Ziel: Nachweis einer neuen Zustandsform der Materie – das QGP
 - **Signatur: Anreicherung von $s\bar{s}$ Zuständen** (zustände mit Strangeness)

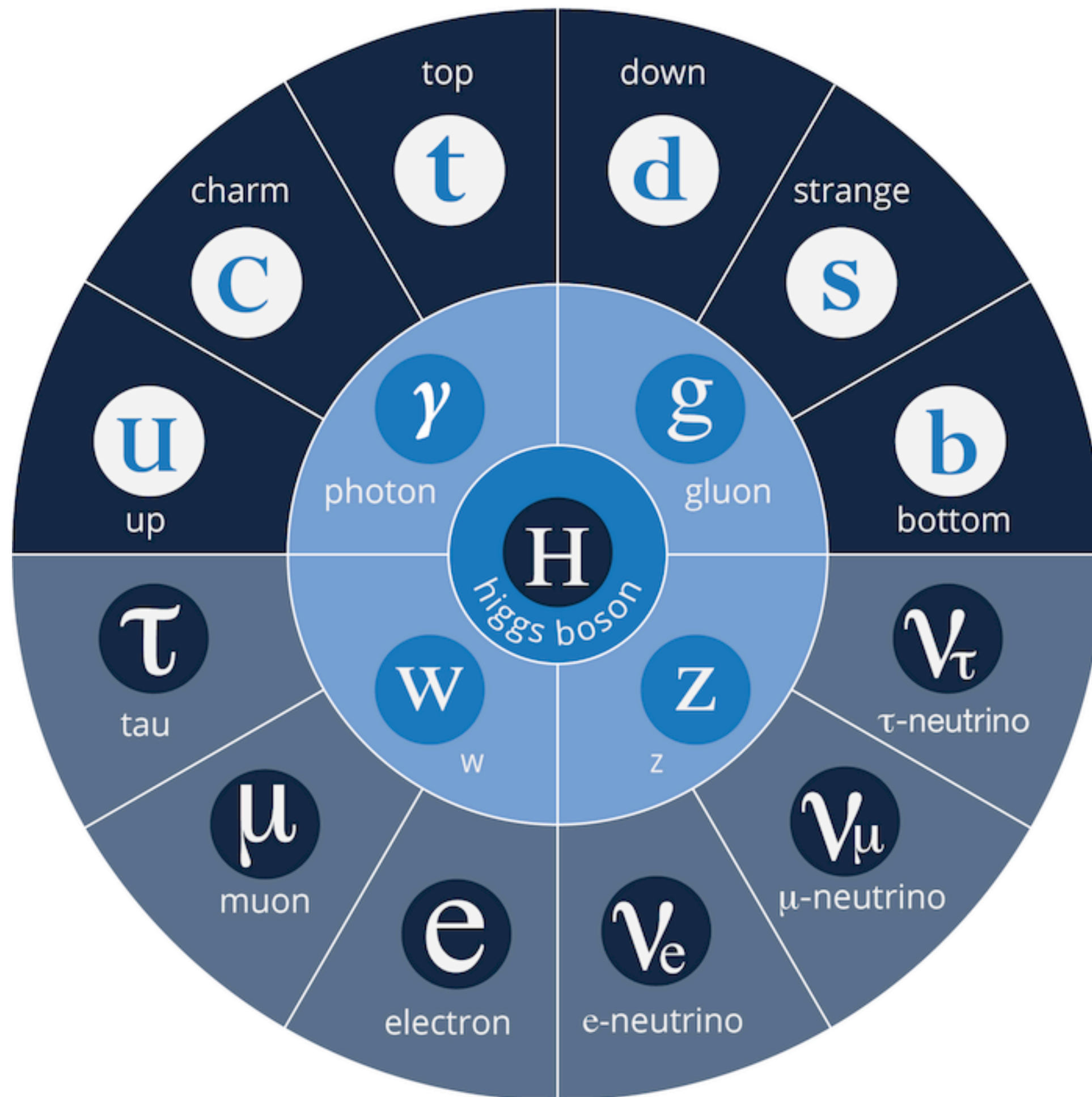


QGP



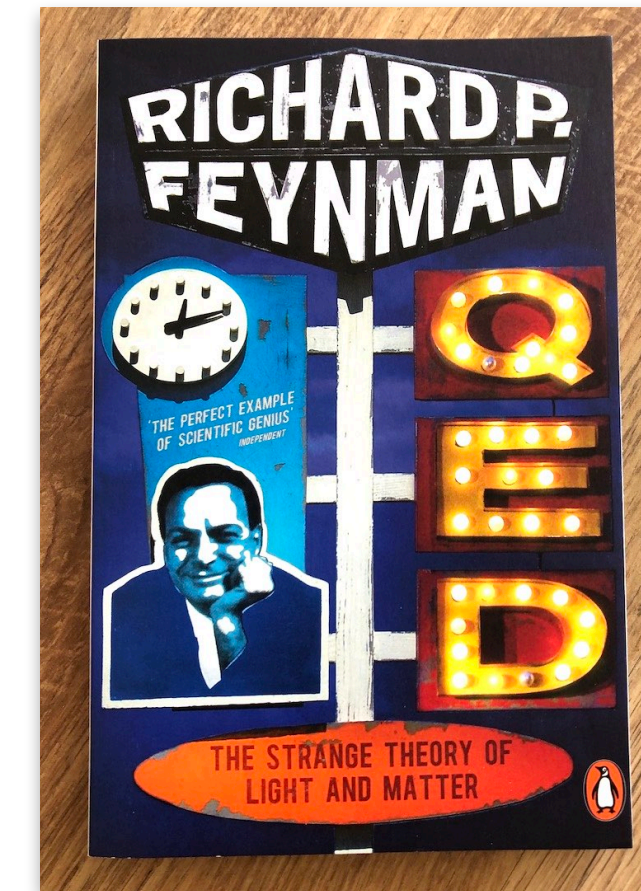
■ 5. Wechselwirkungen

- 5.1 Quarkonium
- 5.2 Farbwechselwirkung in der QCD
- **5.3 Elektroschwache Prozesse**
- 5.4 Elektroschwache Vereinheitlichung
- 5.5 Schlüsselexperiment der elektroschwachen Wechselwirkung
- 5.6 Quarkmischung



- Forschungsgeschichte
Quantenelektrodynamik (QED):
 - 1920er/1930er Jahre: Quantentheorie der Wechselwirkung elektromagn. Strahlung mit Materie, Störungstheorie
(Dirac, Bethe, Jordan, Weisskopf, Feshbach, Oppenheimer, ...)
 - 1950er Jahre: Quantentheorie der Elektro- und Magnetostatik sowie der Elektrodynamik
(Feynman, Tomonaga, Stückelberg, Schwinger)

→ erfolgreiches Vorbild für Eichtheorie der schwachen WW

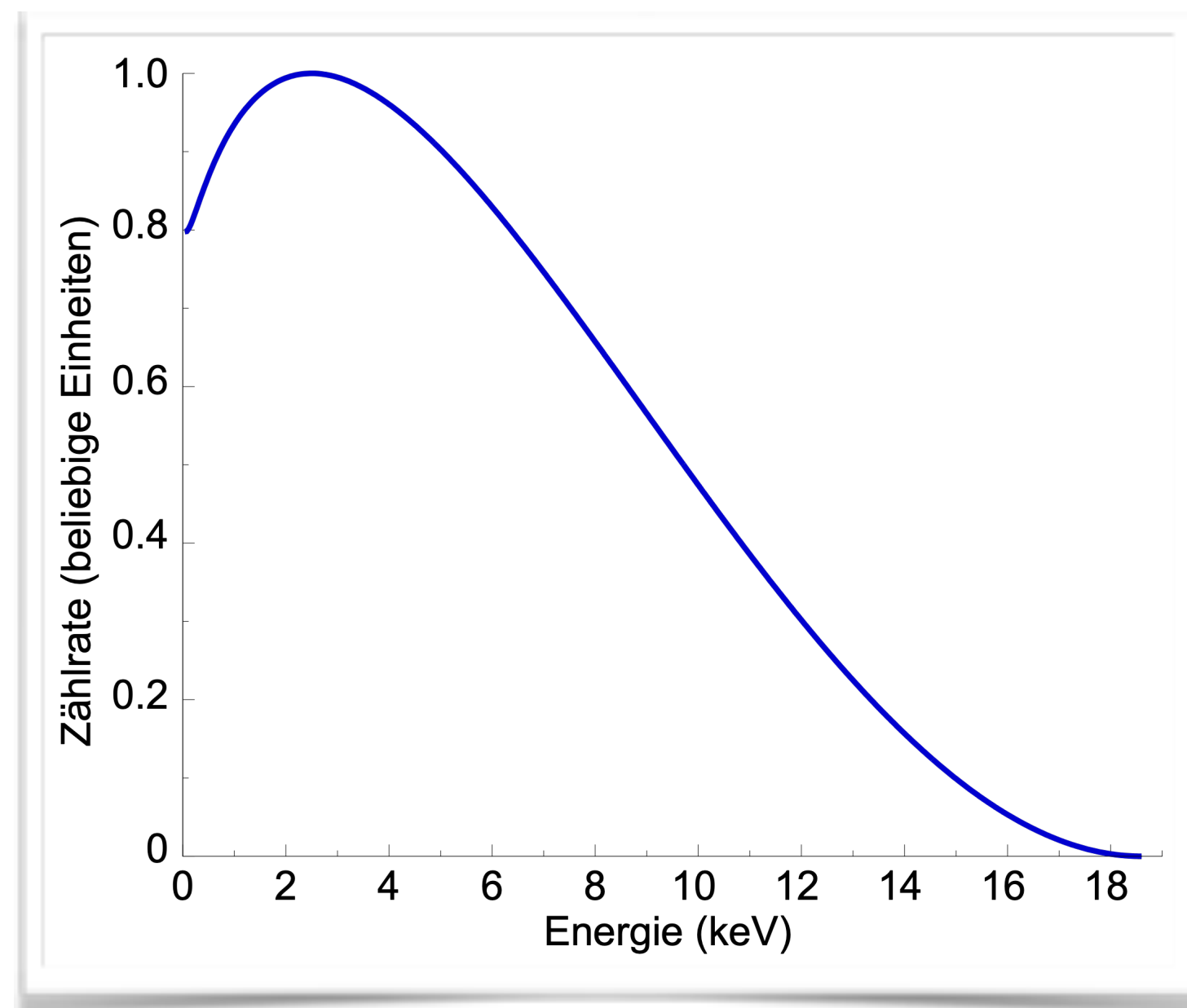


R. Feynman:
"QED - Die Seltsame Theorie
des Lichts und der Materie"

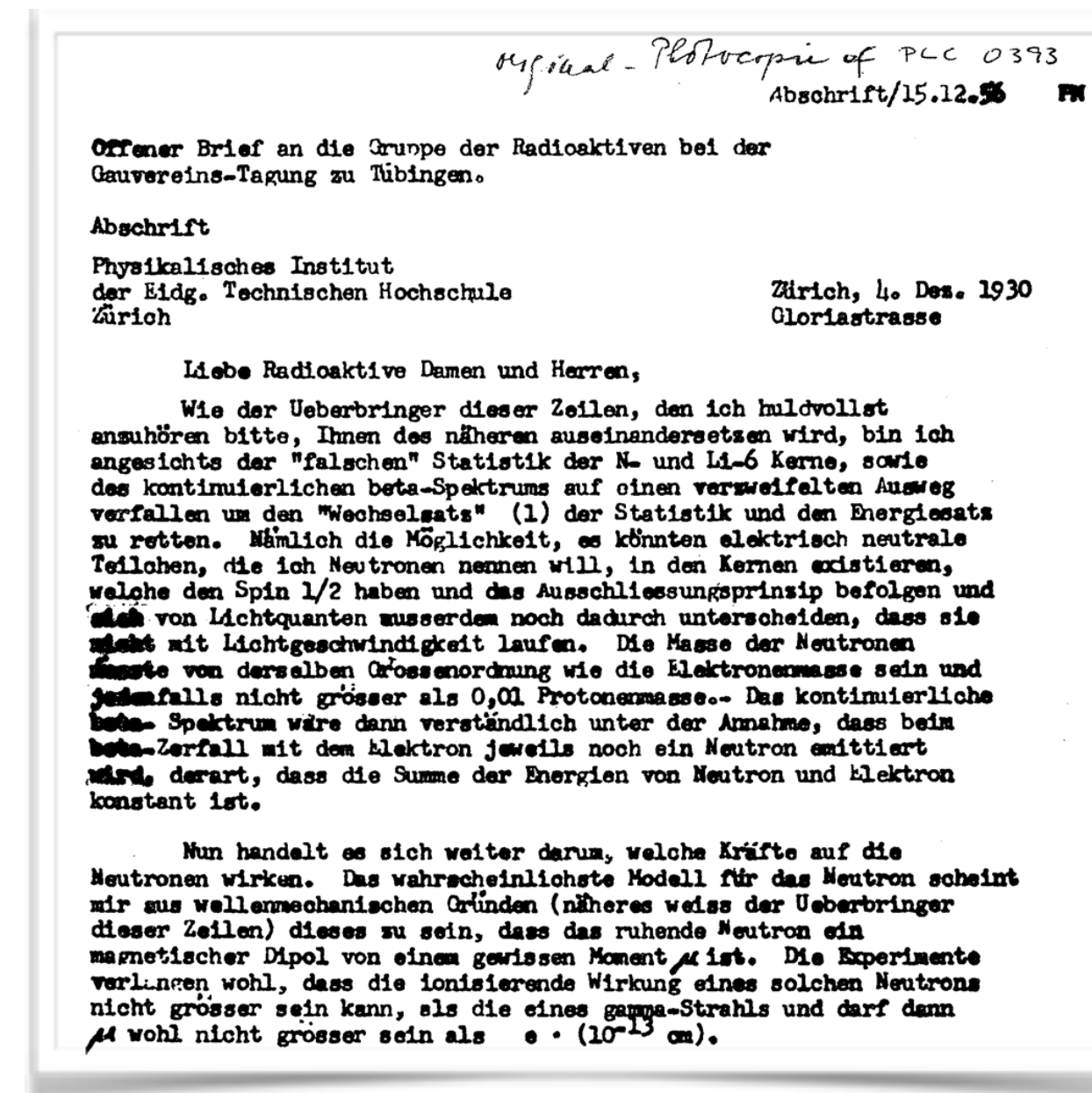


Erste Shelter Island Conference, 1947

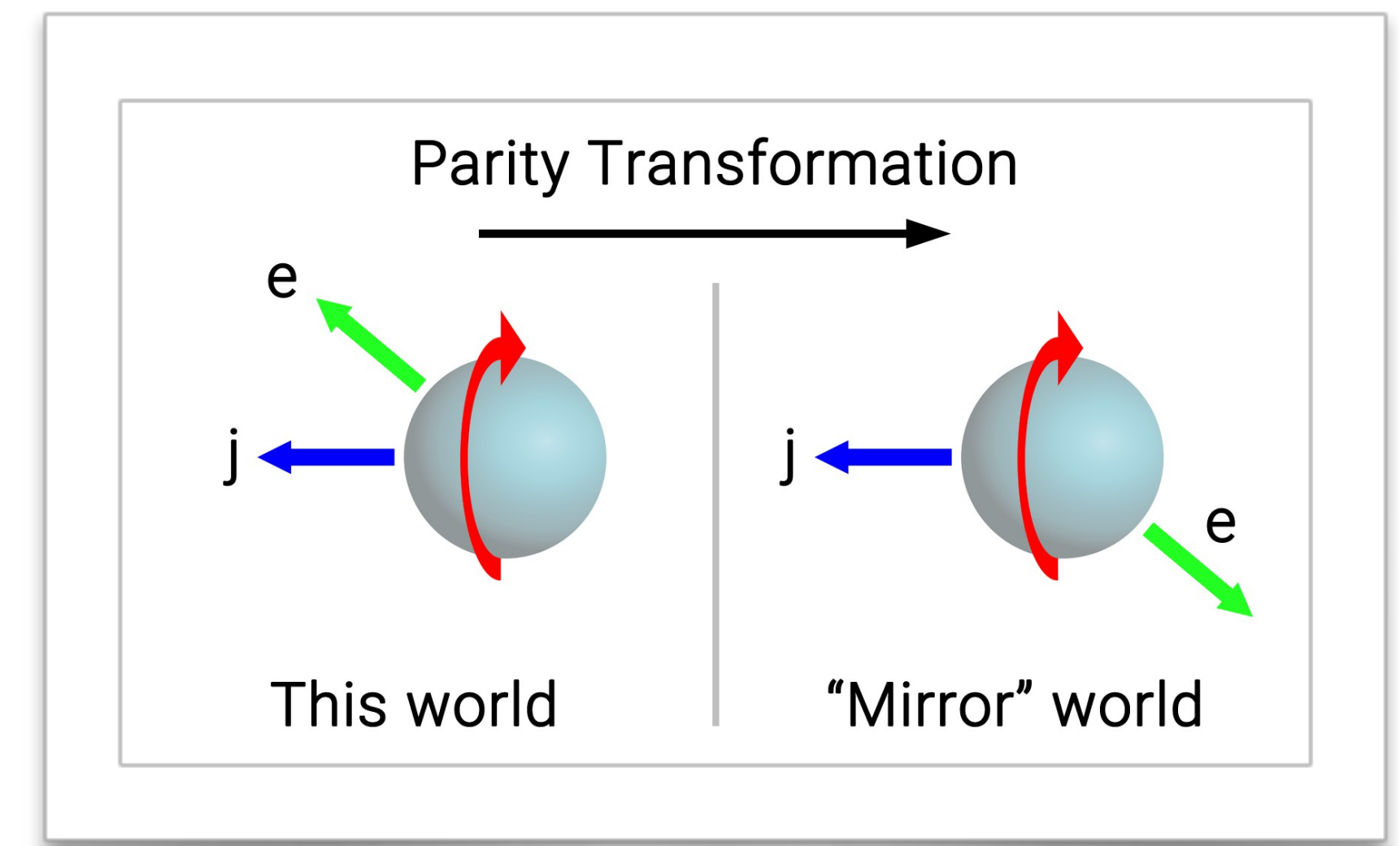
- Forschungsgeschichte schwache Wechselwirkung:
 - 1914: kontinuierliches Betaspektrum
 - 1930er Jahre: Paulis Neutrino-Postulat → Fermi-Theorie des Betazerfalls
 - 1950er Jahre: Symmetrien P und C maximal verletzt (Wu, Goldhaber)



Zykure, [KATRIN_Spectrum.svg](#), CC BY-SA 3.0



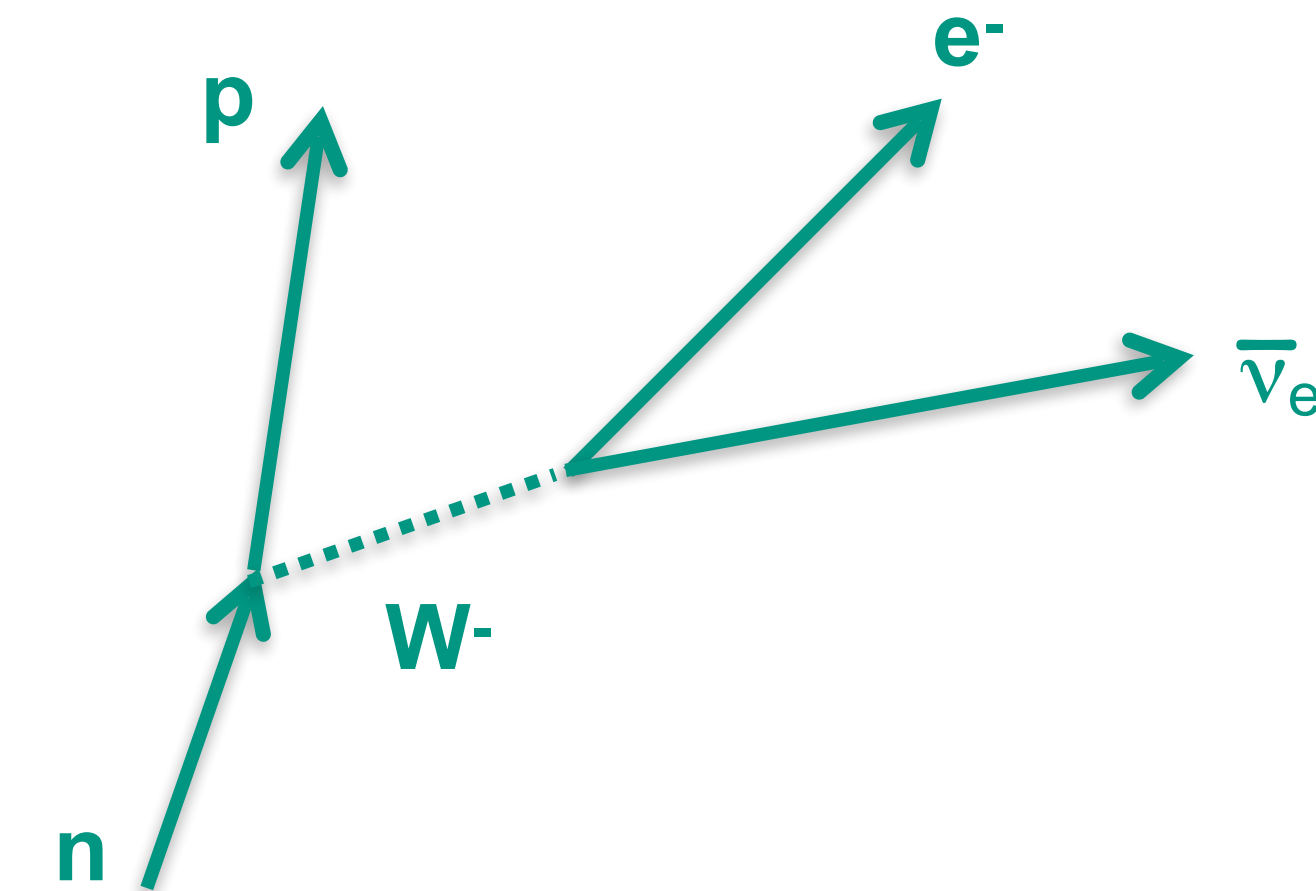
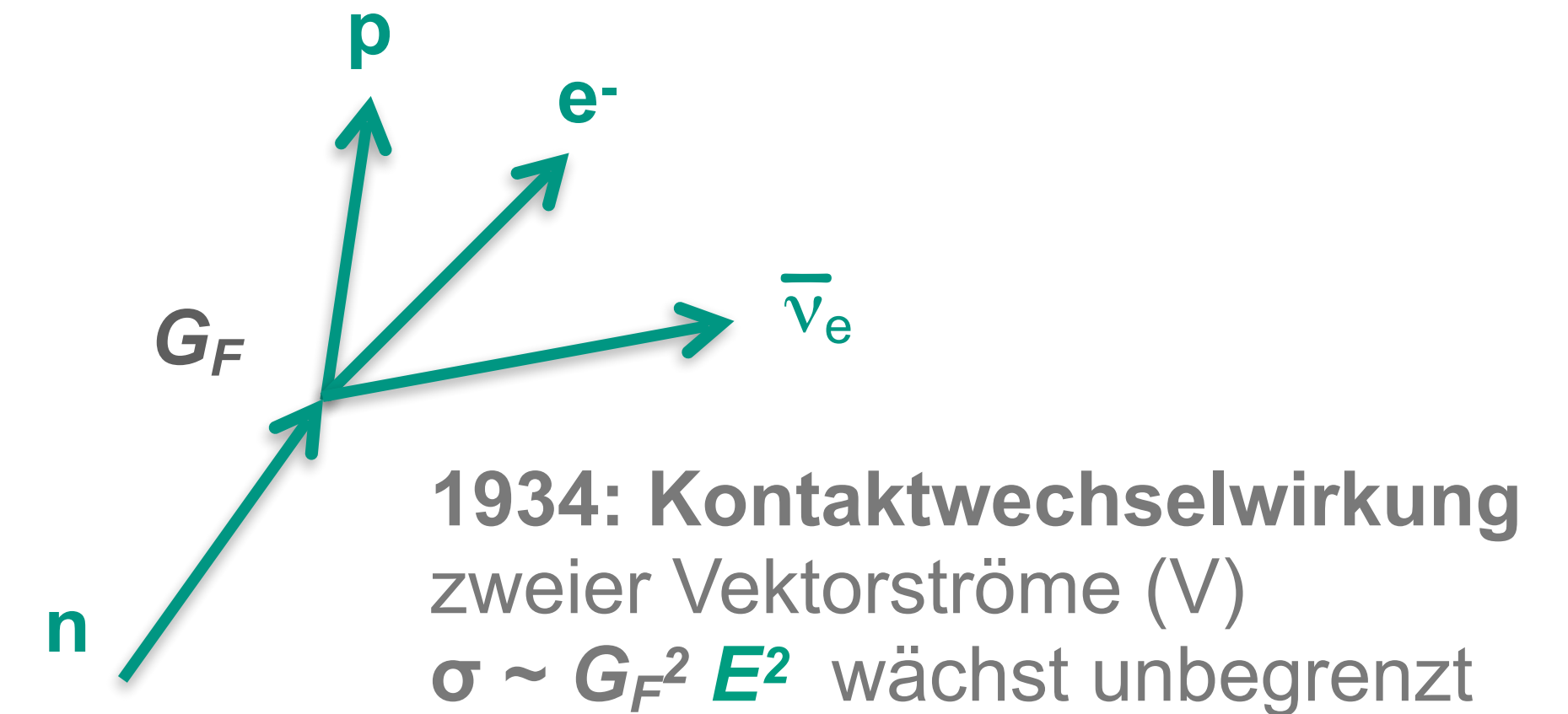
z. B. in [W. Pauli: Wissenschaftlicher Briefwechsel, Bd. II \(Springer 1985\)](#)



wikimedia commons, [Parity_transformation.png](#)

Elektroschwache Wechselwirkung

- Ab den späten 1950er Jahren: Entwicklung der **Elektroschwachen Vereinheitlichung**
- Aufbauend auf Fermis punktartiger “**4-Fermion-Wechselwirkung**” (Niederenergie-Näherung) und auf dem **Formalismus der QED**
- Einbindung der Austauschteilchen, dadurch in breitem Energiebereich gültig



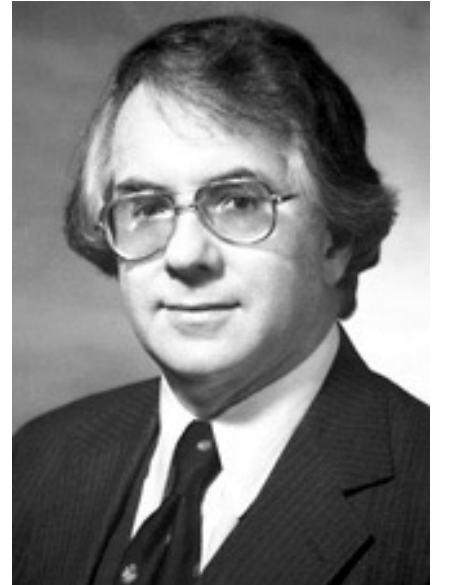
1938: Austauschboson (Yukawa, Klein *et al.*)
verhindert Divergenz von σ bei hohen Energien
später: paritätsverletzende Ströme, V-A Struktur

- Entwicklung der **Elektroschwachen Vereinheitlichung** mit drei **Forderungen**:
 - **Eichfreiheit**: Erfüllung einer zugrundeliegenden **Eichsymmetrie**
d. h. Effekte der Kraft sind gleich an allen Punkten in Raum und Zeit
 - **Renormierbarkeit**:
Theorie soll keine “unphysikalischen” Unendlichkeiten enthalten
 - Kompatibilität mit **empirischen Beobachtungen**:
z. B. Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung,
Massen der Eichbosonen (masseloses Photon, aber schwere W/Z,
d. h. effektiv “versteckte/gebrochene” Symmetrie bei niedrigen Energien)

Elektroschwache Wechselwirkung

- Von der schwachen zur **elektroschwachen Wechselwirkung**:
 - 1958: **V–A-Theorie** („V minus A“), verbesserte Theorie der schwachen Wechselwirkung mit Paritätsverletzung (Feynman, Gell-Mann; Sudarshan, Marshak)
 - 1961: **vereinheitlichte Theorie** der schwachen und elektro-magnetischen Wechselwirkung mit Eichgruppe $SU(2) \times U(1)$ (Glashow)
 - 1964: Massen der Elementarteilchen durch **Higgs-Mechanismus** (Brout, Englert; Higgs; Goldstone, Jona-Lasinio, Nambu; Guralnik, Hagen, Kibble)
 - 1968: Anwendung des Higgs-Mechanismus auf $SU(2) \times U(1)$ -Symmetrie → **elektroschwache Theorie** (Salam, Weinberg)

S.L. Glashow



A. Salam



S. Weinberg

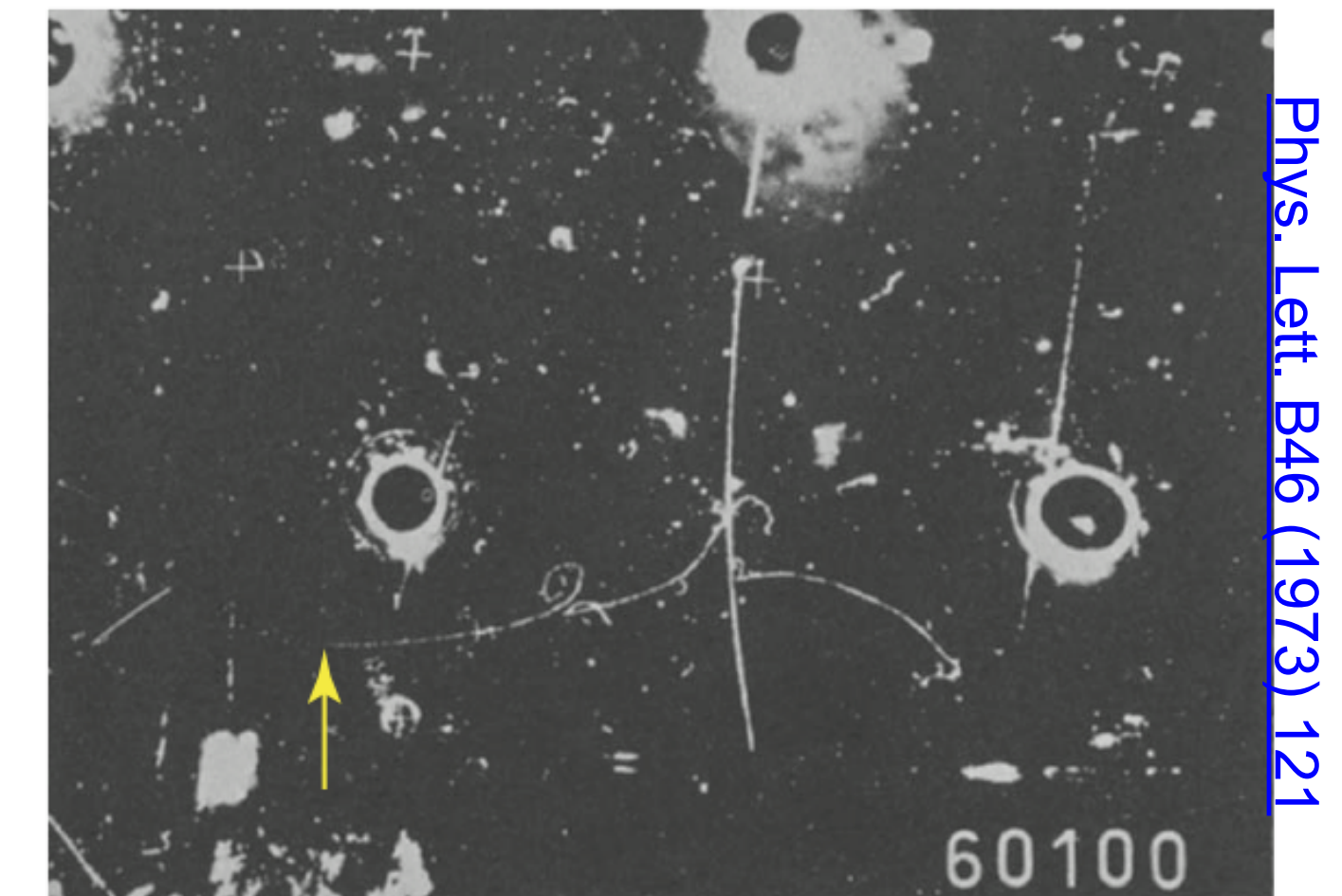


[NobelPrize.org](https://www.nobelprize.org)

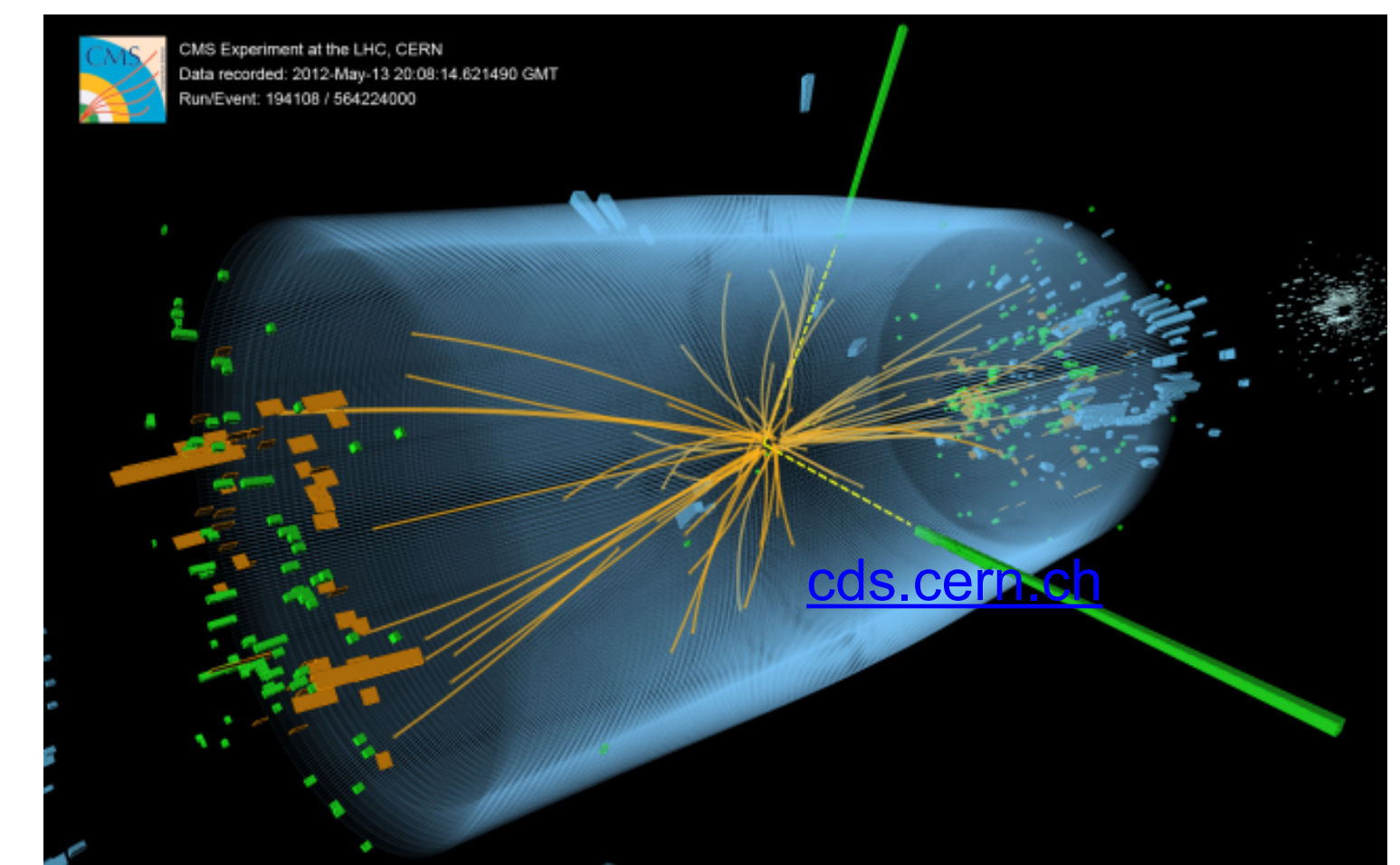
Elektroschwache Wechselwirkung

- Experimentelle und theoretische **Etablierung** der elektroschwachen Wechselwirkung:
 - 1971: **Renormierbarkeit** ($\approx$ mathematische Konsistenz) der elektroschwachen Theorie ('t Hooft, Veltman)
 - 1973: Entdeckung **neutrale Ströme** (CERN)
 - 1981: Entdeckung **W- und Z-Bosonen** (CERN)
 - ab 1989: **Präzisionsphysik** an der Z-Resonanz (CERN, SLAC)
 - 2012: Entdeckung **Higgs-Boson** (CERN)

Kandidat für neutralen Strom (1973)



Kandidat für Higgs-Boson-Zerfall in $\gamma\gamma$ (2012)





Welche Aussagen zur Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung sind korrekt?

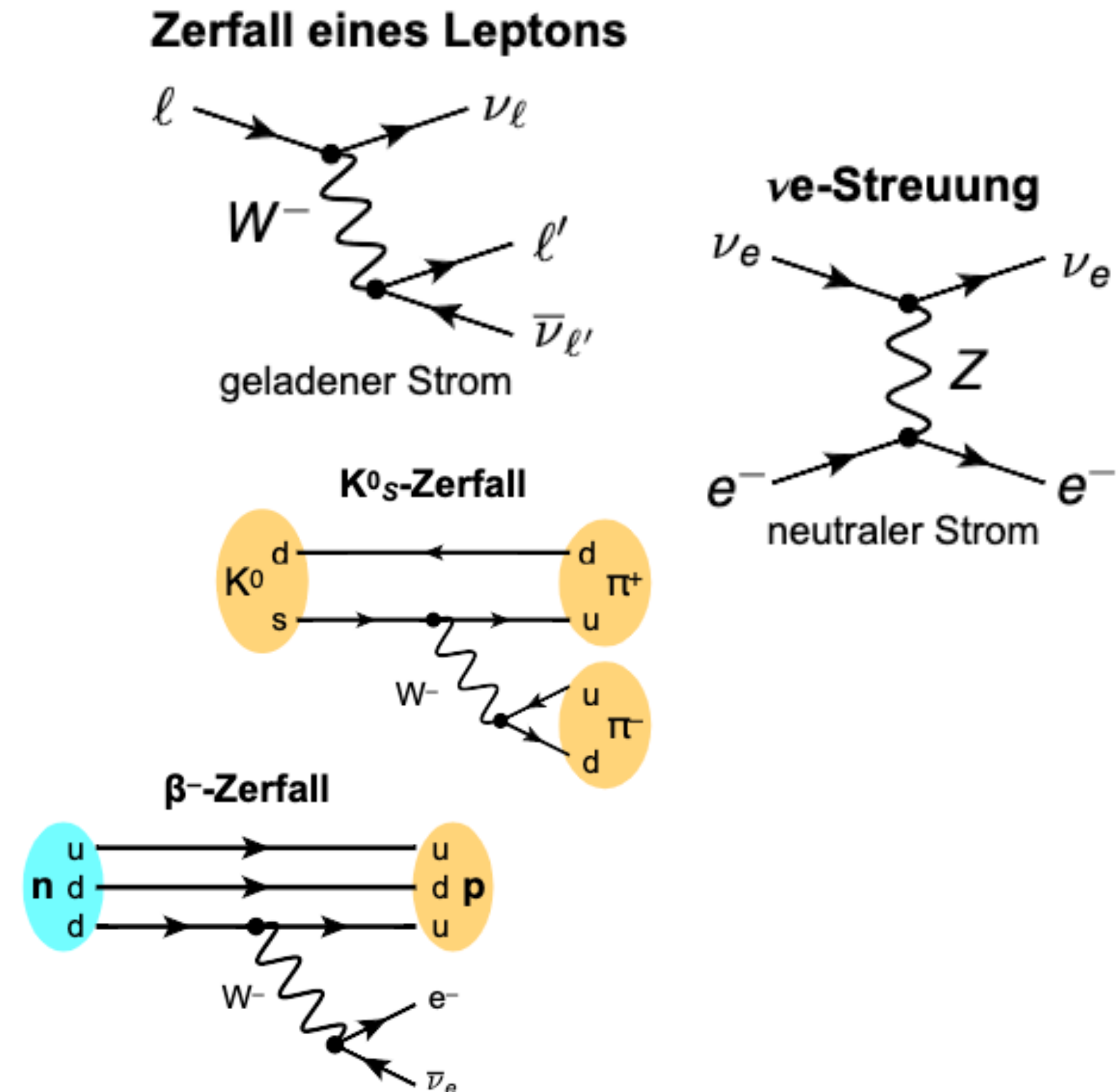
- A. Die Kopplung der schwachen Wechselwirkung enthält Vektor- und Axialvektoranteile mit gleich großem Betrag und gleichem Vorzeichen.
- B. Die elektroschwache Vereinheitlichung ist eine nach dem Modell der Quantenelektrodynamik erstellte Quantenfeldtheorie.
- C. Bei Energien oberhalb von ca. 100 GeV manifestiert sich eine spontane elektroschwache Symmetriebrechung.

Welche Aussagen zur Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung sind korrekt?

- A. Die Kopplung der schwachen Wechselwirkung enthält Vektor- und Axialvektoranteile mit gleich großem Betrag und gleichem Vorzeichen.
- B. Die elektroschwache Vereinheitlichung ist eine nach dem Modell der Quantenelektrodynamik erstellte Quantenfeldtheorie.
- C. Bei Energien oberhalb von ca. 100 GeV manifestiert sich eine spontane elektroschwache Symmetriebrechung.

Klassifikation von Prozessen

- **Leptonische Prozesse:** ausschließlich **Leptonen in Anfangs- und Endzustand**, keine Beeinflussung durch QCD
- **Hadronische** (auch: nichtleptonische) Prozesse: **ausschließlich Hadronen** involviert, ggf. großer Einfluss der **Bindungszustände** der Quarks
- **Semileptonische Prozesse:** **Leptonen und Hadronen** im Anfangs- und/oder Endzustand, Bindung der Quarks i.d.R. nicht vernachlässigbar

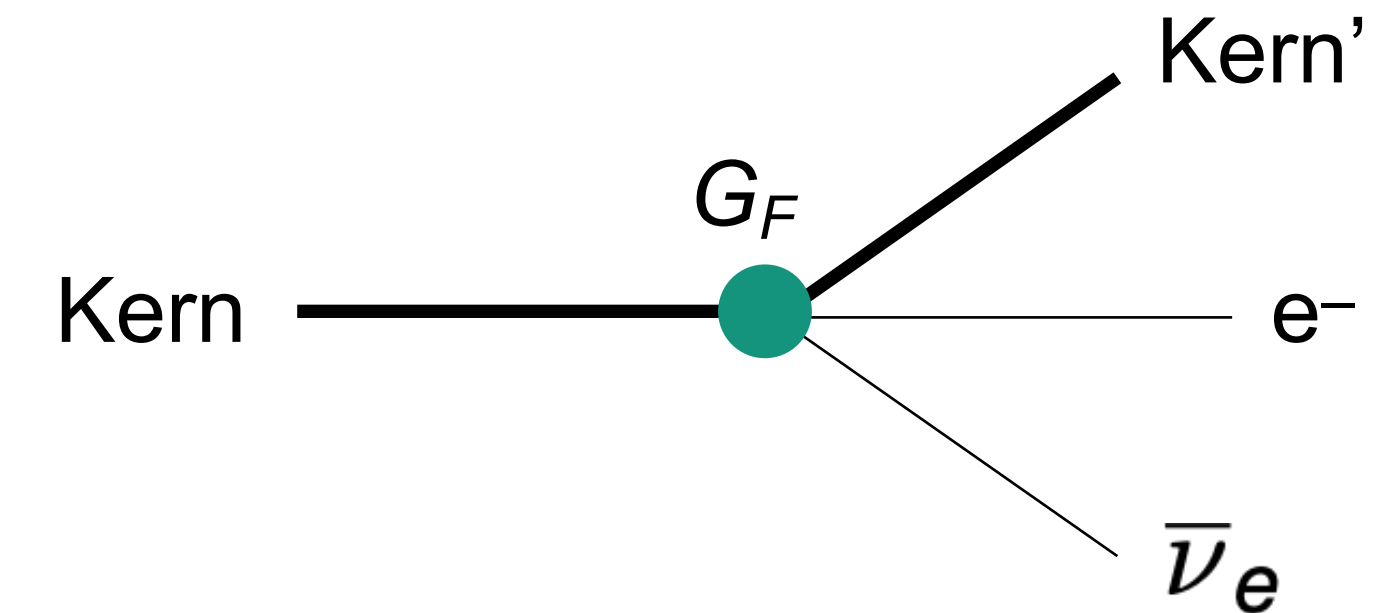


β-Zerfall: Zerfallskonstante

- Berechnung der Zerfallskonstante $\lambda = 1/\tau$: **Fermis Goldene Regel**

$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar} \underbrace{|\langle f | \mathcal{M}_{fi} | i \rangle|^2}_{\text{Dynamik}} \underbrace{\rho(E_f)}_{\text{Phasenraum}}$$

- **Dynamik** des Zerfalls (heute: geladener Strom)
 - **Fermi-Theorie** der schwachen Wechselwirkung (1934): **Kontaktwechselwirkung** mit effektiver Kopplungskonstante G_F (Fermikonstante)
 - Sehr gute Näherung, da alle Massen $\ll m_W$: ersetze Propagator des W-Bosons durch Konstante $\sim 1/m_W^2$



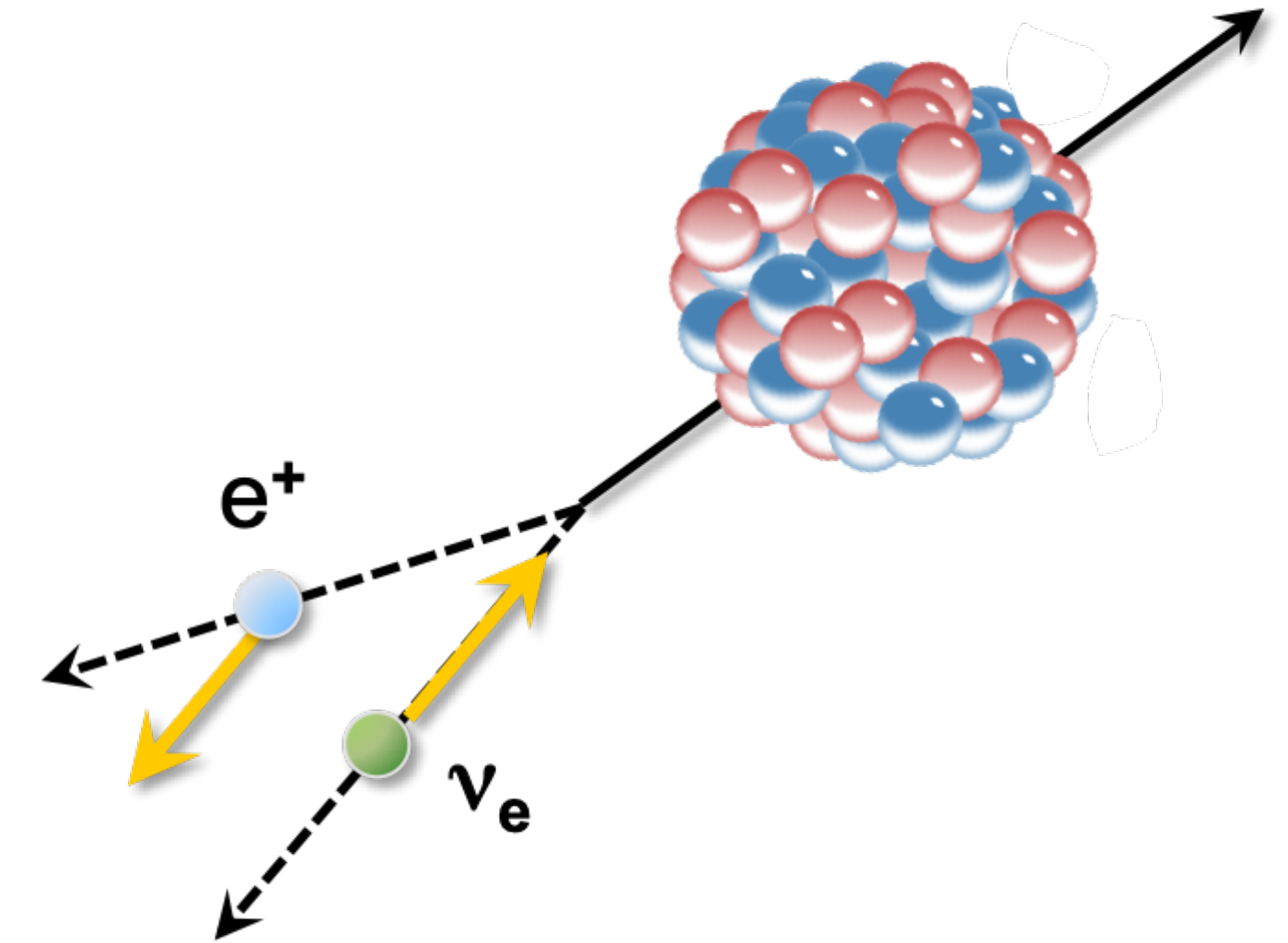
$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \left(\frac{g}{2\sqrt{2}} \right)^2 \frac{(\hbar c)^3}{(m_W c^2)^2}$$

mit

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = 1,1663787(6) \text{ GeV}^{-2}$$

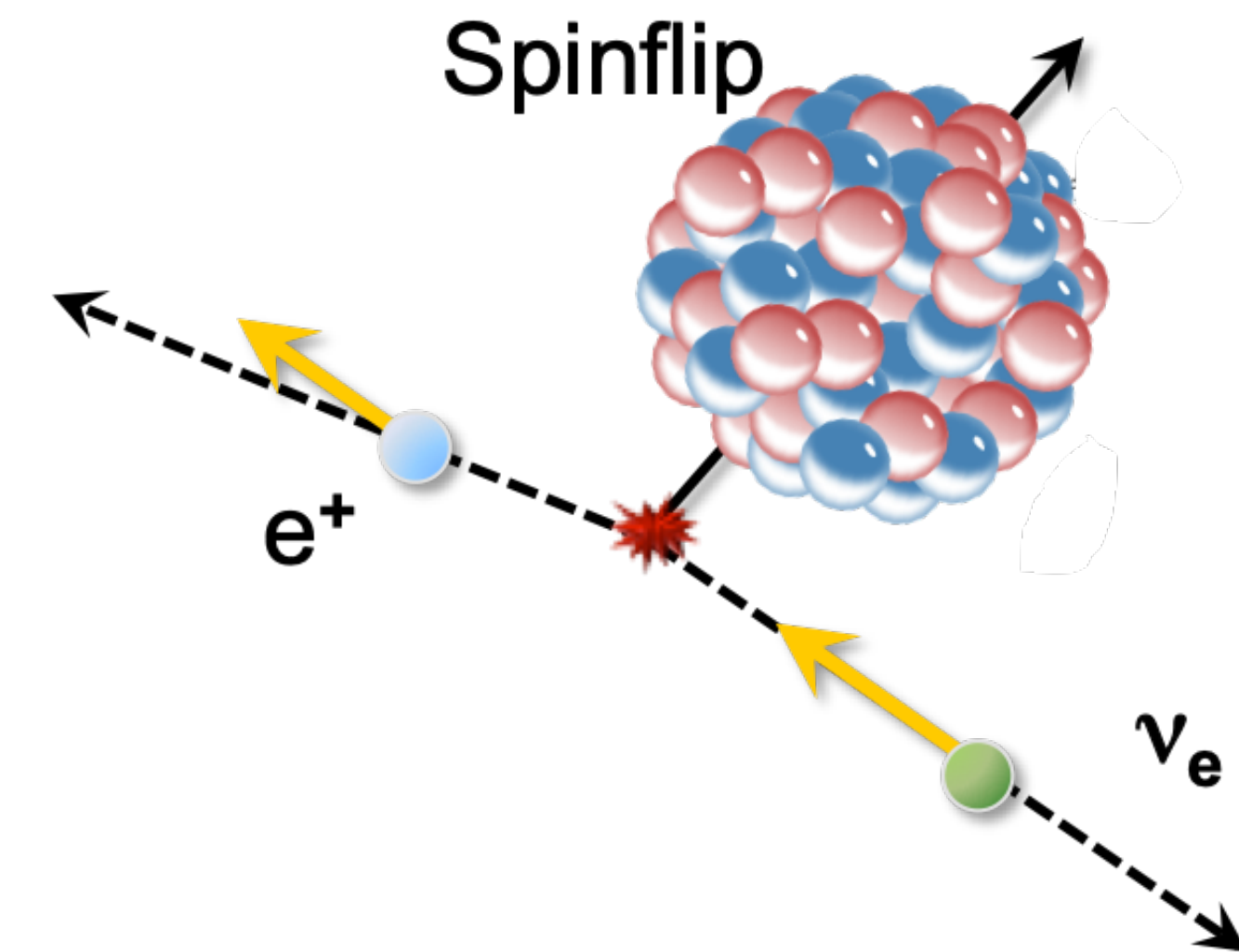
β -Zerfall: Fermi-Übergänge

- Beobachtung: Leptonen (e , ν_e) bevorzugt **parallel** emittiert mit antiparallelen Spins, keine Vorzugsrichtung → **keine Änderung von Kernspin** ($J_f = J_i$) und **Parität**
- Theoretische Beschreibung: **Vektorkopplung**
 - Analogie zur elektromagnetischen Wechselwirkung, **Paritätserhaltung**
- Übergangsmatrixelement: $M_{fi} \approx \text{const.} \cdot G_F$
 - In guter Näherung konstant, **unabhängig von Kernstruktur**
 - Physikalisches Argument: de-Broglie-Wellenlängen von Elektron und Neutrino viel größer als Kernradius
 - Überlapp der Wellenfunktionen mit **gesamtem** Kern

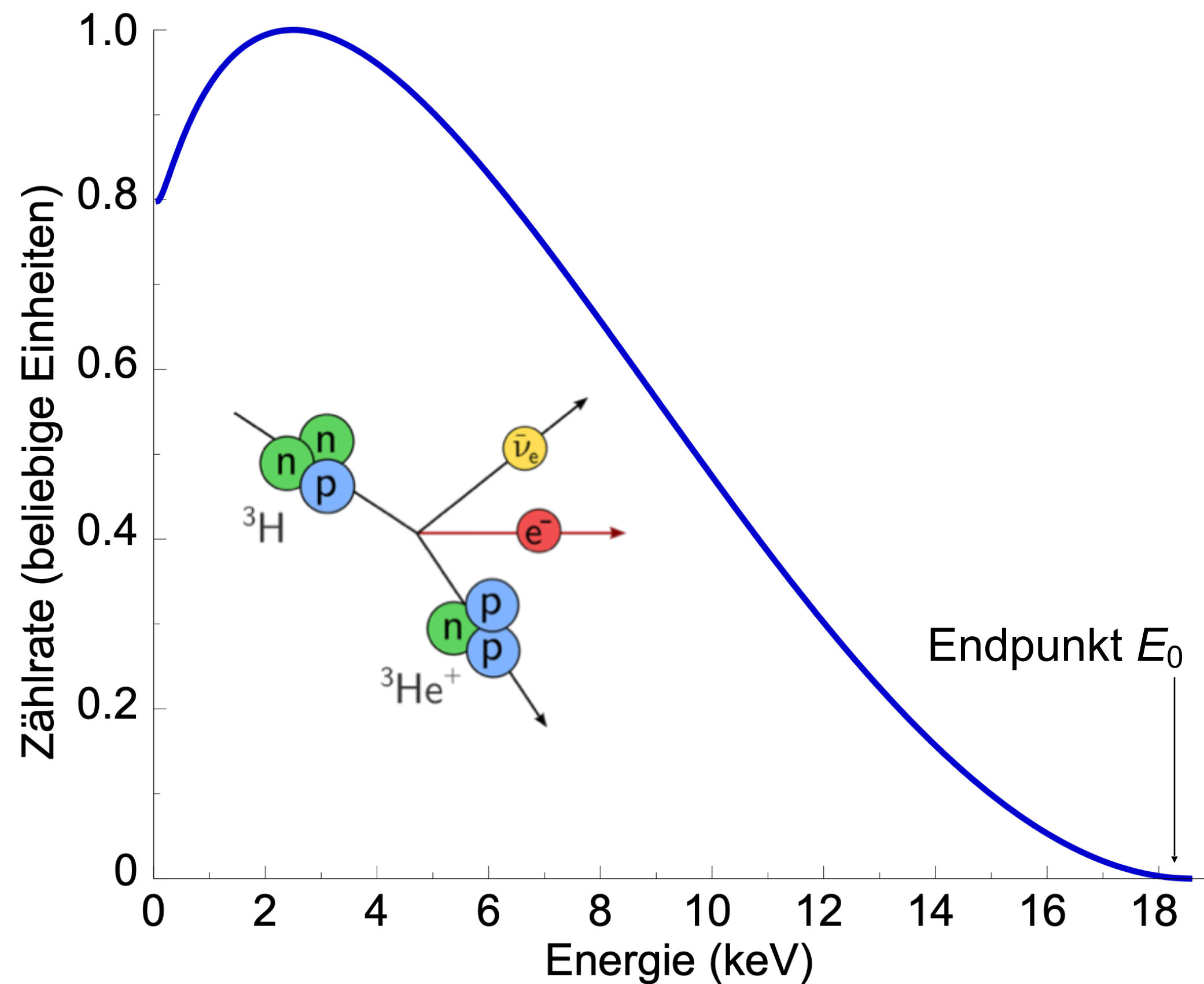


β -Zerfall: Gamow-Teller-Übergänge

- Beobachtung: Leptonenimpulse bevorzugt **antiparallel**, bei parallelen Spins. **Vorzugsrichtung** relativ zu Kernspin (siehe Wu-Experiment)
→ Kern: **Spinflip** ($\Delta S = \pm 1$) möglich, **keine** Änderung der **Parität**
- Theoretische Beschreibung:
Axialvektorkopplung
→ **Paritätsverletzung**
- Matrixelement abhängig von Nukleonstruktur (Spin-Dichte der Quarks)
- Auch möglich: **Mischung** aus Gamow-Teller- und Fermi-Übergang



Elektronen-Energiespektrum für ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$



[KATRIN_Spectrum.svg](#), CC BY-SA 3.0

- Übererlaubter Übergang zw. Spiegelkernen:
($Z=1, N=2$) $\rightarrow$ ($Z=2, N=1$)
→ Matrixelement (fast) energieunabhängig
- Halbwertszeit $t_{1/2} = 12.3$ a
- Maximalenergie (Endpunkt) $E_0 = 18.6$ keV

Energiespektrum

$$\frac{d\lambda}{dE_e} = \frac{2\pi}{\hbar} \underbrace{|\langle f | \mathcal{M}_{fi} | i \rangle|^2}_{\sim \text{const} \cdot G_F} \frac{d\rho}{dE_e}$$

$$\frac{d\lambda}{dE_e} \sim p_e^2 \cdot (E_\nu^2 - m_\nu^2 c^4) \frac{E_\nu}{\sqrt{E_\nu^2 - m_\nu^2 c^4}}$$

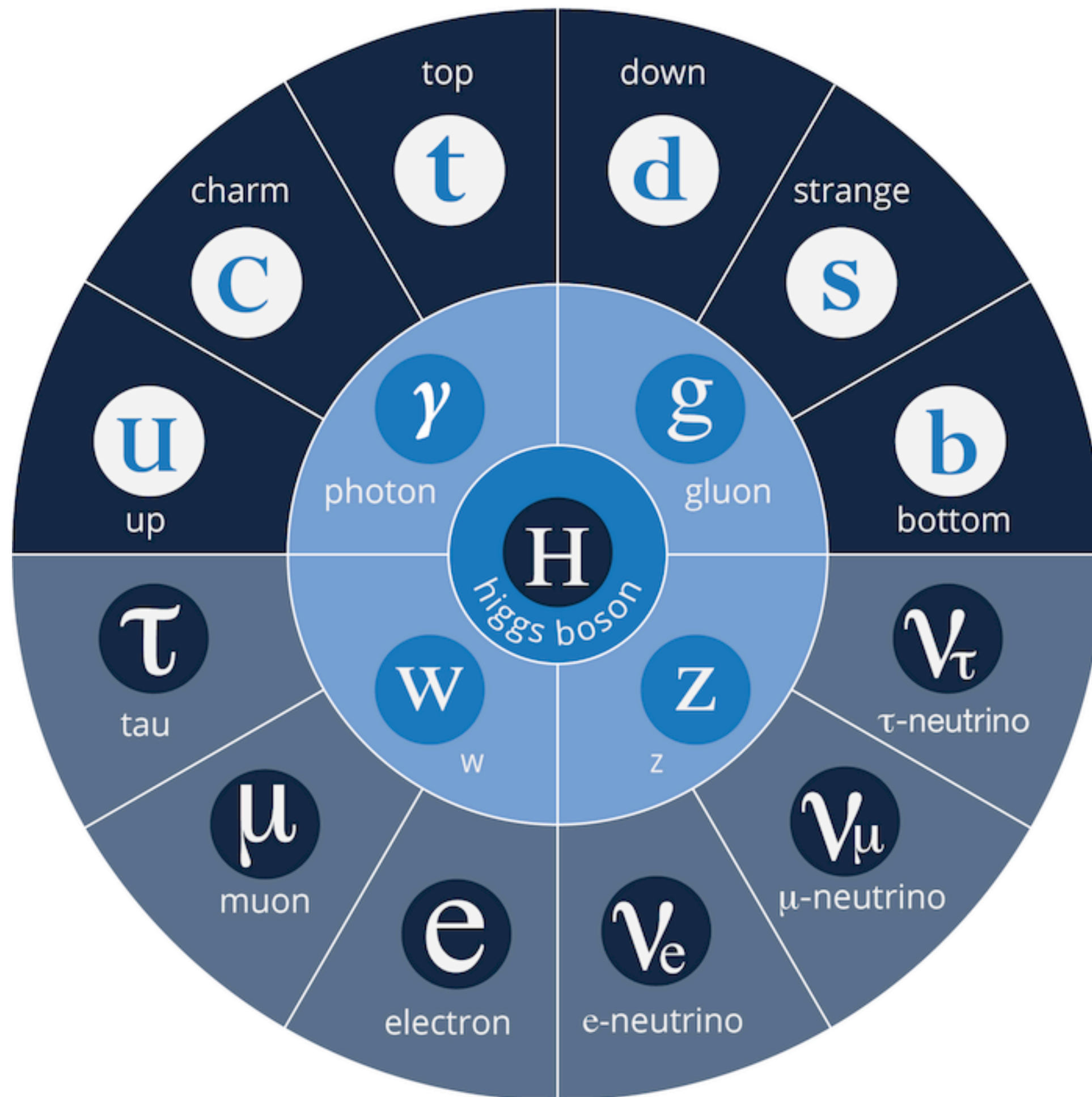
$$\sim \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2 c^4}{(E_0 - E_e)^2}} \rightarrow 1 \text{ für } m_\nu \rightarrow 0$$

Kurze Zusammenfassung

- **Klassifikation** elektroschwacher Prozesse:
leptonisch, semileptonisch, hadronisch
- **Vielfältige Phänomene**, reduzierbar auf folgende elementaren Prozesse
 - **Geladener Strom**: Austausch von **W-Bosonen**
→ Ladungs- und Flavoränderung, ggf. Paritätsverletzung
 - **Neutraler Strom**: Austausch von **Z-Bosonen**
 - Quarks in Hadronen gebunden: Beeinflussung durch **QCD-Effekte**
- Beispiele:
 - Betazerfall: **Fermi-Theorie**, Fermi- und Gamow-Teller-Übergänge
 - Pionzerfall: Zerfall in Elektronen stark **helizitätsunterdrückt**

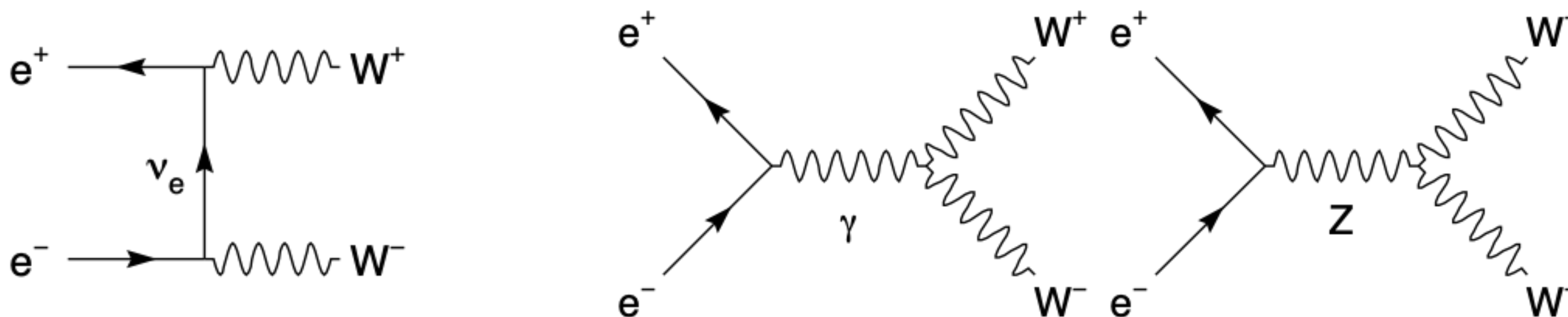
■ 5. Wechselwirkungen

- 5.1 Quarkonium
- 5.2 Farbwechselwirkung in der QCD
- 5.3 Elektroschwache Prozesse
- **5.4 Elektroschwache Vereinheitlichung**
- 5.5 Schlüsselexperiment der elektroschwachen Wechselwirkung
- 5.6 Quarkmischung



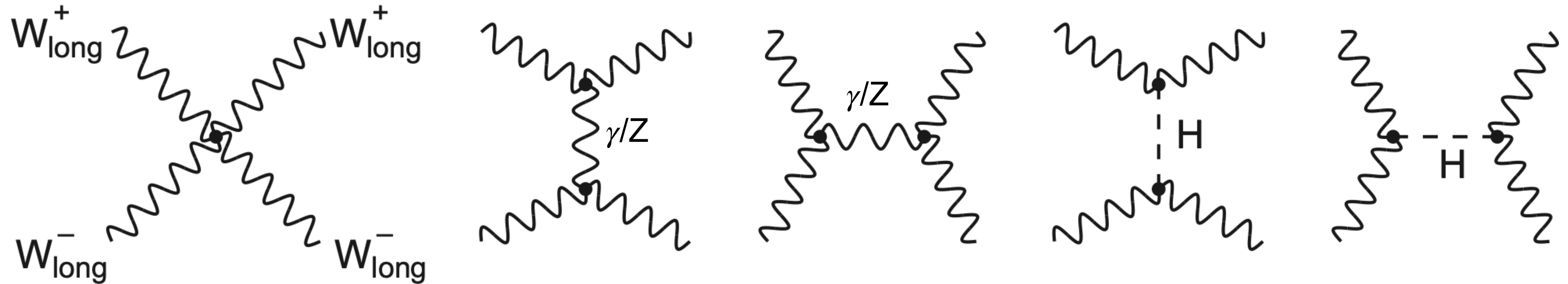
Probleme der V–A-Theorie

- Historisch: V–A-Theorie als **Kontaktwechselwirkung** (vgl. Fermi-Theorie)
- Problem: **inkonsistente** Theorie mit **Divergenzen**
 - Erwartete **Wirkungsquerschnitte** wachsen quadratisch mit Schwerpunktsenergie: $\sigma \sim s \rightarrow$ Lösung: Austausch **massiver** W-Bosonen (Yukawa, Klein; 1938)
 - **WW-Paarproduktion** divergent in V–A-Theorie
 $\rightarrow$ Lösung: Kopplung **zwischen Eichbosonen**, massives **neutrales** Boson



Probleme der V–A-Theorie

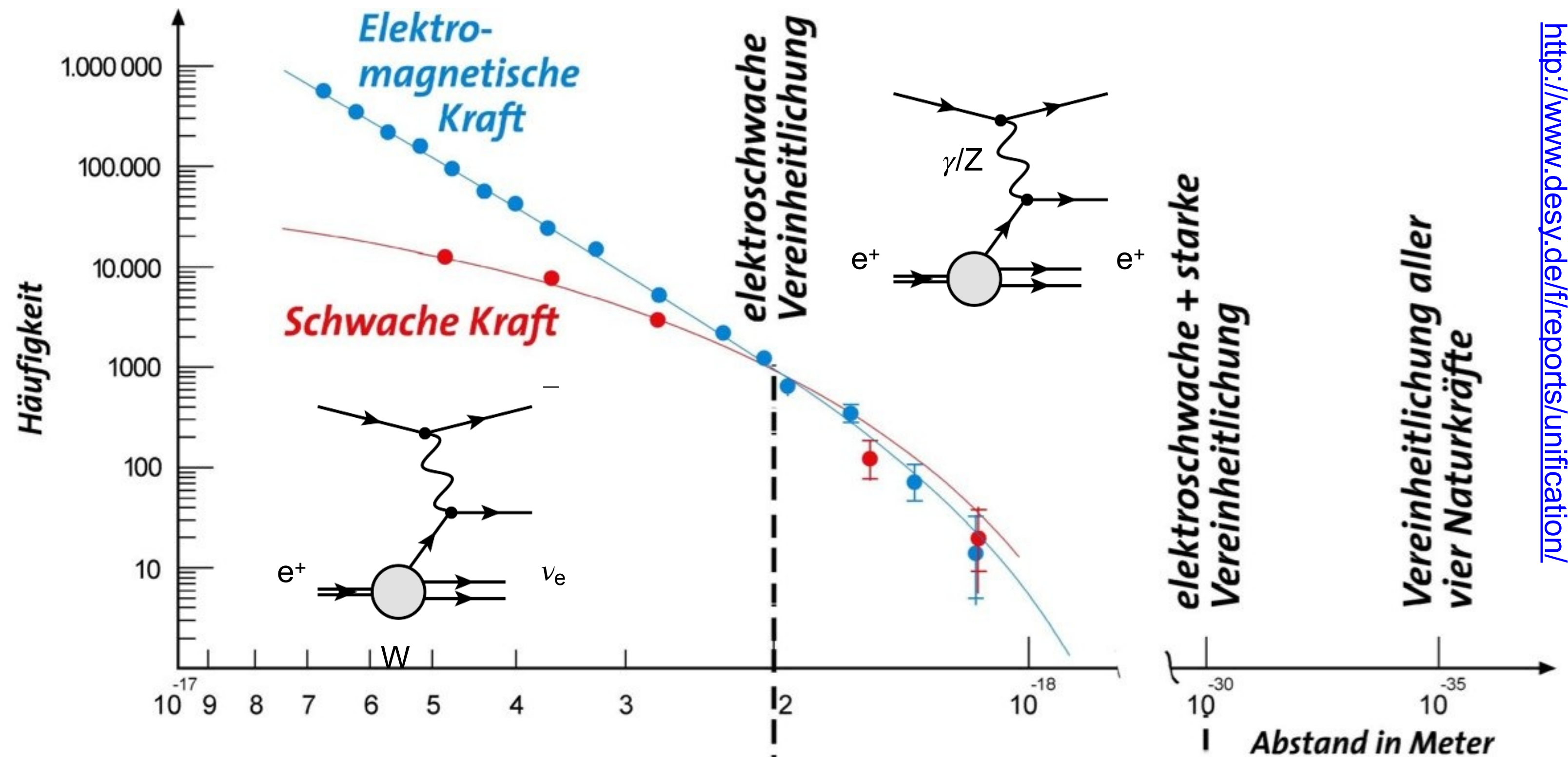
- Problem: **inkonsistente** Theorie mit **Divergenzen**
 - Streuung von **W-Bosonen mit longitudinaler Polarisation** divergent
 - Lösung: Austausch von **skalaren Teilchen**



- Gesucht: **konsistente Theorie der schwachen Wechselwirkung** mit zusätzlichem **neutralem Eichboson** ($\rightarrow$ Z-Boson) und **skalarem Teilchen** ($\rightarrow$ Higgs-Boson; $m_H < (8\pi\sqrt{2}/(3G_F))^{1/2} \sim 1 \text{ TeV}$)

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Glashow, Salam, Weinberg (1961–1968): **vereinheitlichte** Theorie der **elektromagnetischen** Wechselwirkung und der **schwachen** Wechselwirkung
→ **dieselbe Kopplung** bei sehr hohen Energien



Elektroschwache Vereinheitlichung

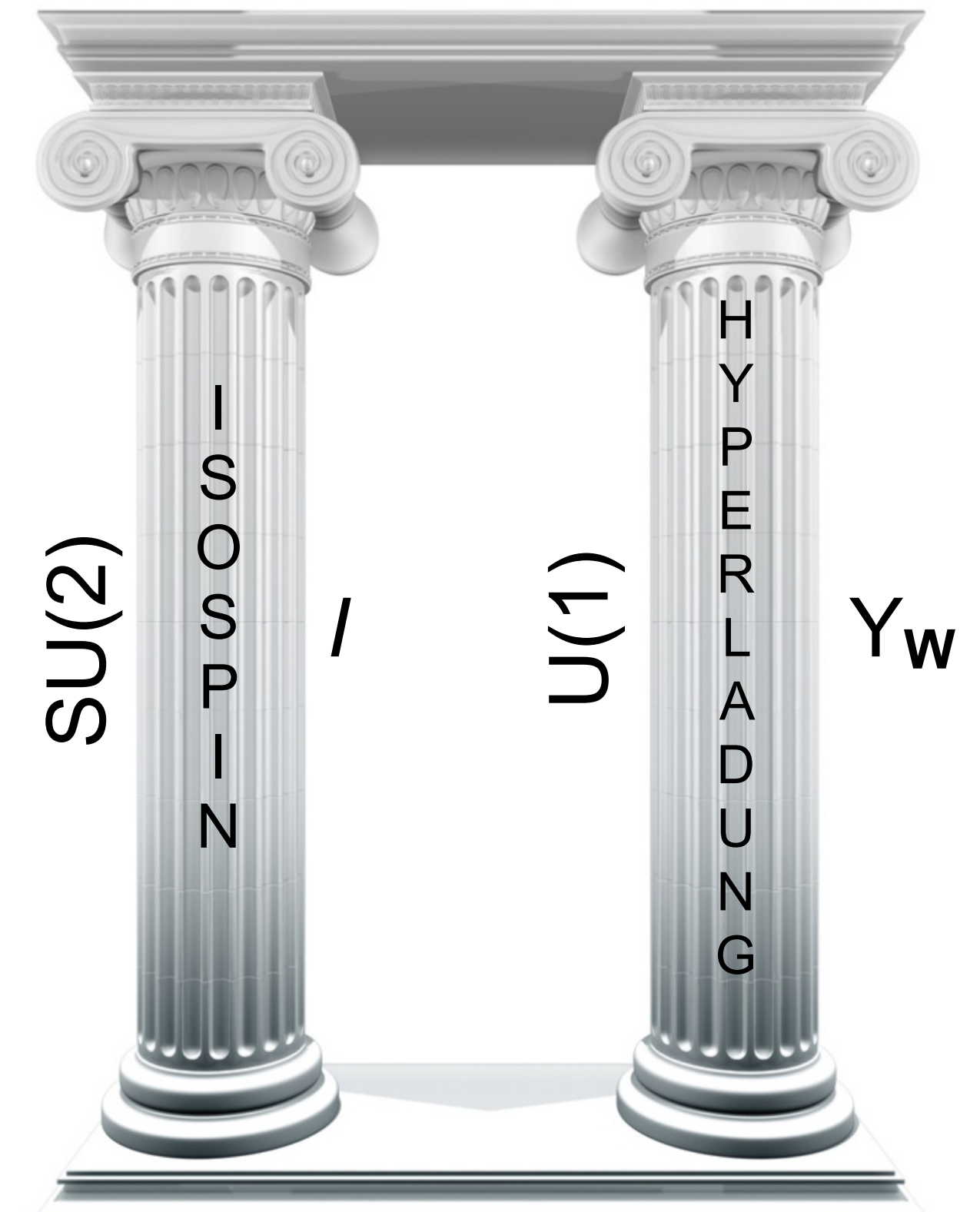
- Erster Versuch: weiteres **neutrales schweres Eichboson** (Spin 1)
 - W-Bosonen als **Triplett** (W^1, W^2, W^3) des schwachen Isospins ($I = 1$ mit $I_3 = \pm 1, 0$)
 - SU(2)-Gruppe (vgl. Pionen) $\rightarrow$ Auf- und Absteigeoperatoren für Isospin:

$$W_{\mu}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} (W_{\mu}^1 \mp W_{\mu}^2), \quad W_{\mu}^0 = W_{\mu}^3$$

- Vorhersage: W^0 koppelt (wie $W^{\pm}$) nur an linkshändige Fermion-Doublets $\rightarrow$ **Widerspruch** zu Experiment:
 - Neutrales Boson koppelt auch an rechtshändige Fermion-Singulets
 - Kopplungsstärke hängt ab von elektrischer Ladung

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Besser: zusätzliche U(1)-Symmetrie der **schwachen Hyperladung** ($\neq$ U(1)-Symmetrie der QED)
→ neues Feld mit Eichboson B_μ , Singulett $I = 0$, $I_3 = 0$
- Nur **linkshändige** Teilchen koppeln über **schwache Isospinladung** an W_μ -Feld
- **Alle** Teilchen koppeln über **schwache Hyperladung** Y_W an B_μ -Feld
- Sowohl W^0 als auch B koppeln an Fermionen, ohne deren schwachen Isospin und damit ihren Typ zu ändern
- Aber: W^0 und B sind **keine** physikalischen Teilchen!
→ Mischung über “**Weinberg-Drehung**”



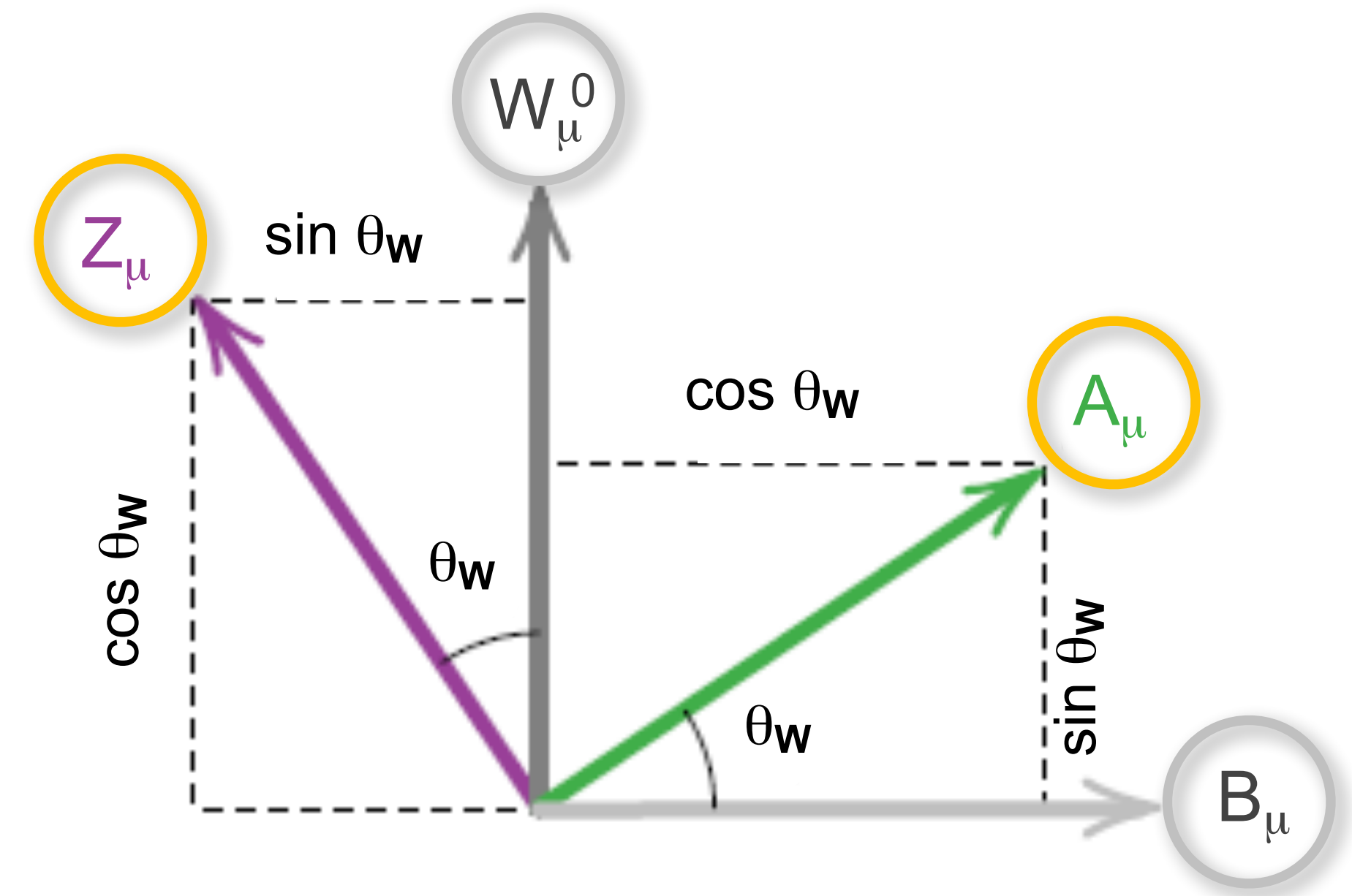
elektroschwache WW.

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Darstellung als **Drehung im schwachen Isospin-Raum**:
Photon und Z^0 als orthogonale Linearkombinationen der B und W^0

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & \sin \theta_W \\ -\sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W_\mu^0 \end{pmatrix}$$

- **Weinberg-Winkel** θ_W misst die Stärke der elektromagnetischen relativ zur schwachen Wechselwirkung: $e = g \sin \theta_W$ und regelt Kopplung des Photons (nicht an ν)
- Experimenteller Wert aus ν -e Streuung, Z^0 -Breite: $\sin^2 \theta_W \approx 0,23$
[$a_W \sim g \cdot g$ etwa 4x stärker als $a_{em} \sim e \cdot e$: nur Propagator-Term führt zu geringerer effektiver Stärke!]



- Quantenzahlen der Fermionen: Unterscheidung nach **Chiralität**
 - **Linkshändige** Fermionen (rechtshändige Antifermionen): **Isospin-Doublets**
→ Übergänge innerhalb der Doublets: **Austausch von $W^\pm$ -Bosonen**

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L,$$

Leptonen

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$$

Quarks

$$\text{mit } I = \frac{1}{2}, \begin{cases} I_3 = +\frac{1}{2} \\ I_3 = -\frac{1}{2} \end{cases}$$

q': Quarkmischung (→ später)

- **Rechtshändige** Fermionen (und linkshändige Antifermionen):
Isospin-Singulets ($I = I_3 = 0$) → **keine** Kopplung an W-Bosonen

$$e_R^-, \nu_{e,R}^-, \mu_R^-, \nu_{\mu,R}^-, \tau_R^-, \nu_{\tau,R}^-$$

Leptonen

$$u_R, d'_R, c_R, s'_R, t_R, b'_R$$

Quarks

✗: im Standardmodell nicht enthalten

Elektroschwache Quantenzahlen

- Erinnerung: **Gell-Mann–Nishijima-Formel**

Elektroschwache Quantenzahlen (nach Chiralität): $Q = I_3 + \frac{Y_W}{2}$

Fermion	Chiralität	Isospin (I, I_3)	Hyperladung Y_W	Ladung Q (e)
Neutrinos: ν_e, ν_μ, ν_τ	L	(1/2, +1/2)	-1	0
	R	im Standardmodell nicht enthalten		
Geladene Leptonen: e^-, μ^-, τ^-	L	(1/2, -1/2)	-1	-1
	R	(0, 0)	-2	-1
up-artige Quarks: u, c, t	L	(1/2, +1/2)	+1/3	+2/3
	R	(0, 0)	+4/3	+2/3
down-artige Quarks: d', s', b'	L	(1/2, -1/2)	+1/3	-1/3
	R	(0, 0)	-2/3	-1/3