

Moderne Experimentalphysik II

Teilchenphysik - Vorlesung 10

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



Evaluation

■ Vorlesung

- <https://onlineumfrage.kit.edu/evasys/online.php?p=25QET>



■ Übung

- <https://onlineumfrage.kit.edu/evasys/online.php?p=JFUKU>



Recap: CP-Verletzung

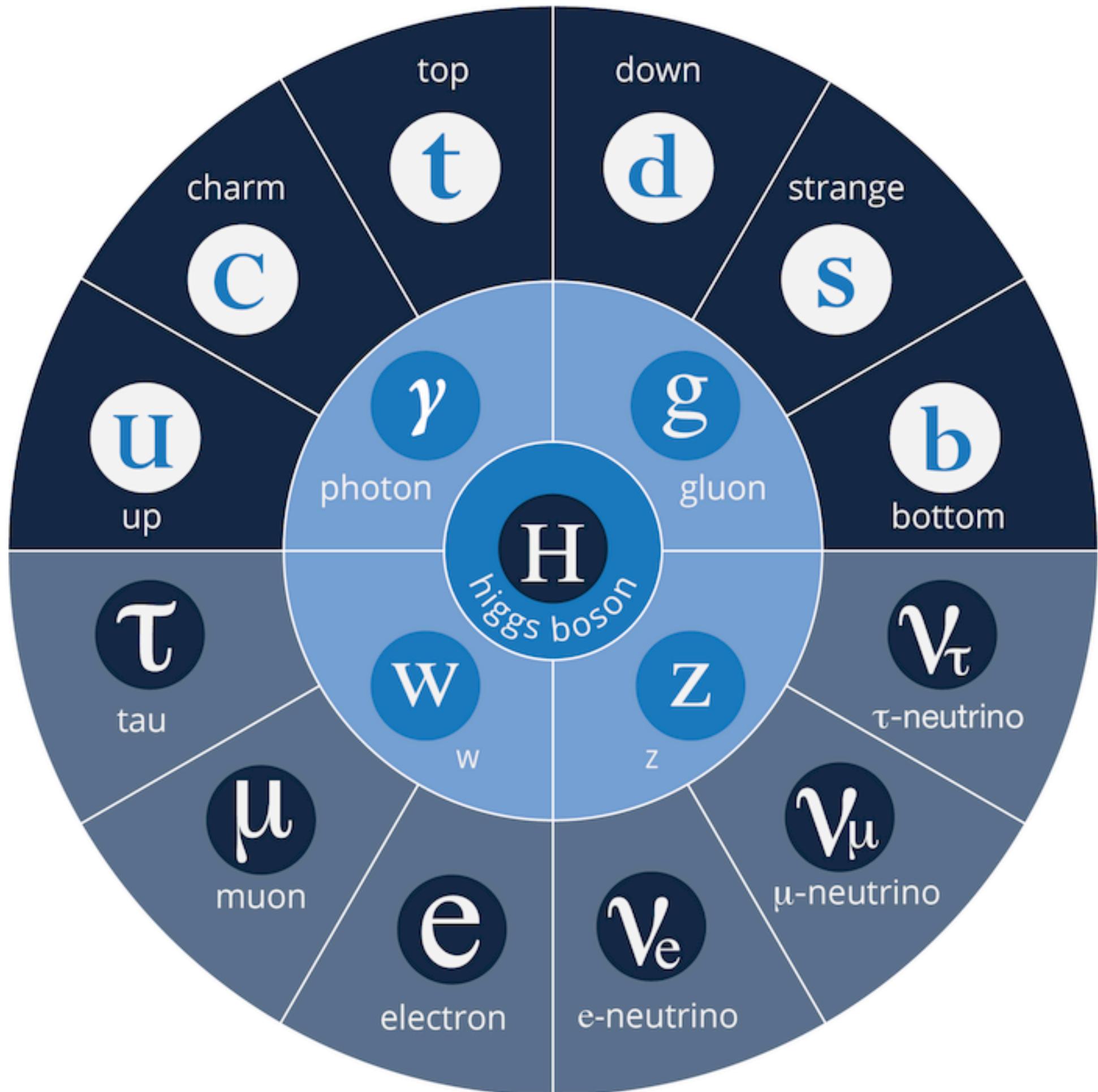
- Cronin & Fitch haben CP-Verletzung in Zerfällen von neutralen Kaonen nachgewiesen. Wie gross ist dieser Effekt?
 - 1) Maximal, i.e. 100%
 - 2) 0.02
 - 3) 0.002
 - 4) 0.0002
 - 5) 0.00002



Recap: CP –Verletzung & SUSY

- **Verletzung von CP im System der neutralen Kaonen**
 - CP -Verletzung auf Level $\varepsilon = 0,2\%$ bei schwachem Zerfall $K_L \rightarrow 2 \pi$
 - indirekte CP -Verletzung über Mischung $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$, direkt: 10^{-6}
 - CP -Verletzung auch im System $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$, aber bei Hadronen noch immer zu klein für die Baryon-Asymmetrie im Universum
- **Grundlagen der Supersymmetrie (SUSY)**
 - Erweiterung der SM-Teilchen um Superpartner (Bosonen \leftrightarrow Fermionen)
 - SUSY-WIMP: thermische Erzeugung der „**Kalten Dunklen Materie**“

■ 5. Wechselwirkungen



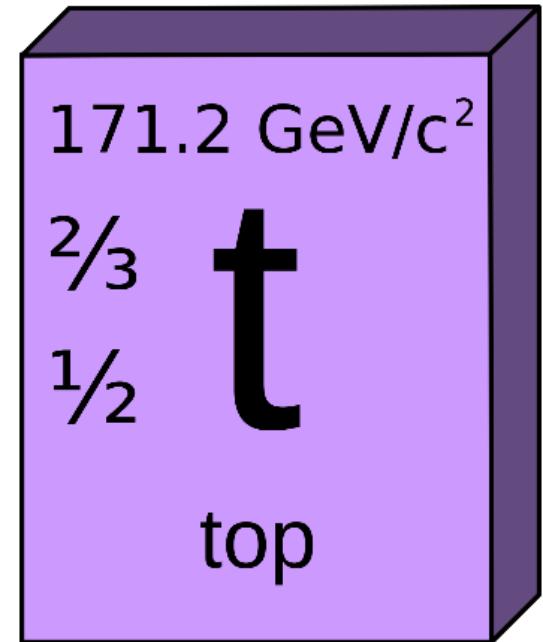
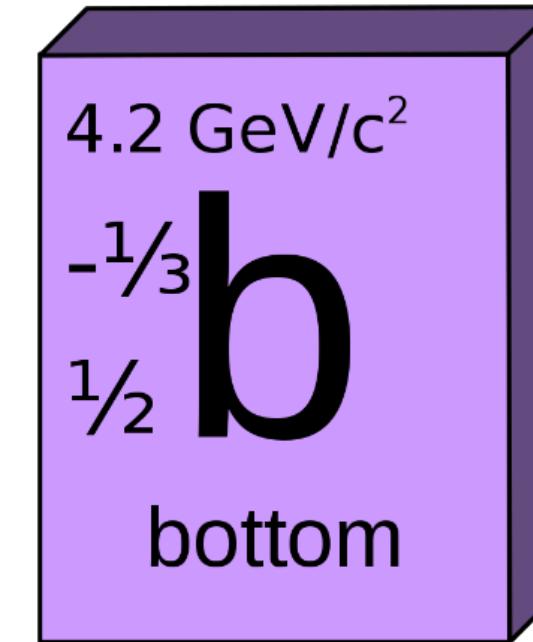
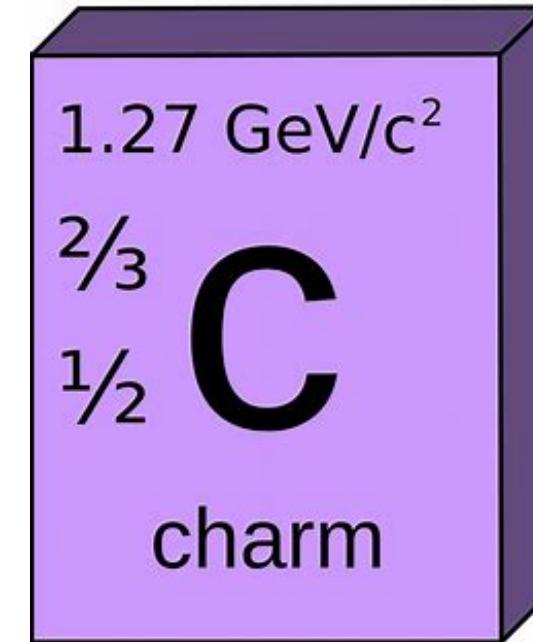
- 5.1 Quarkonium
- 5.2 Farbwechselwirkung in der QCD
- 5.3 Elektroschwache Prozesse
- 5.4 Elektroschwache Vereinheitlichung
- 5.5 Schlüsselexperiment der elektroschwachen Wechselwirkung
- 5.6 Quarkmischung

schwere Quarks: *charm, bottom, top*

■ Erzeugungsmechanismen

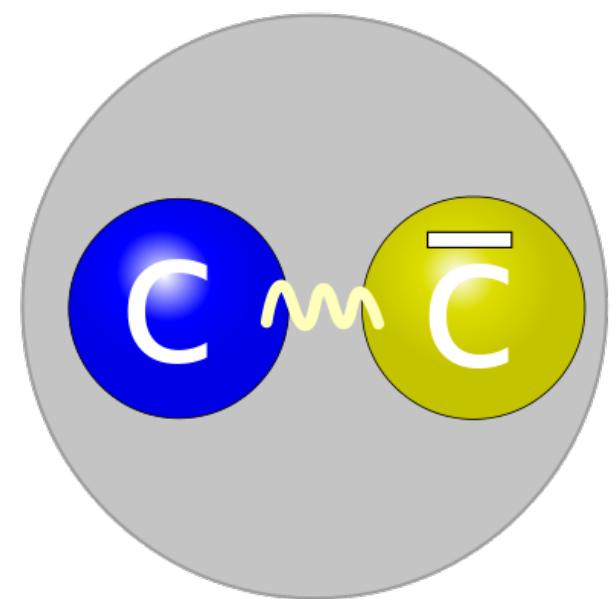


- paarweise Produktion in Prozessen der starken & elektromagnetischen Ww. als **Quark-Antiquark** $q\bar{q}$ Systeme
- erhaltene Flavourquantenzahlen: **charm** c , **bottom** b , **top** t



■ Quarkonium: gebundenes $q\bar{q}$ System

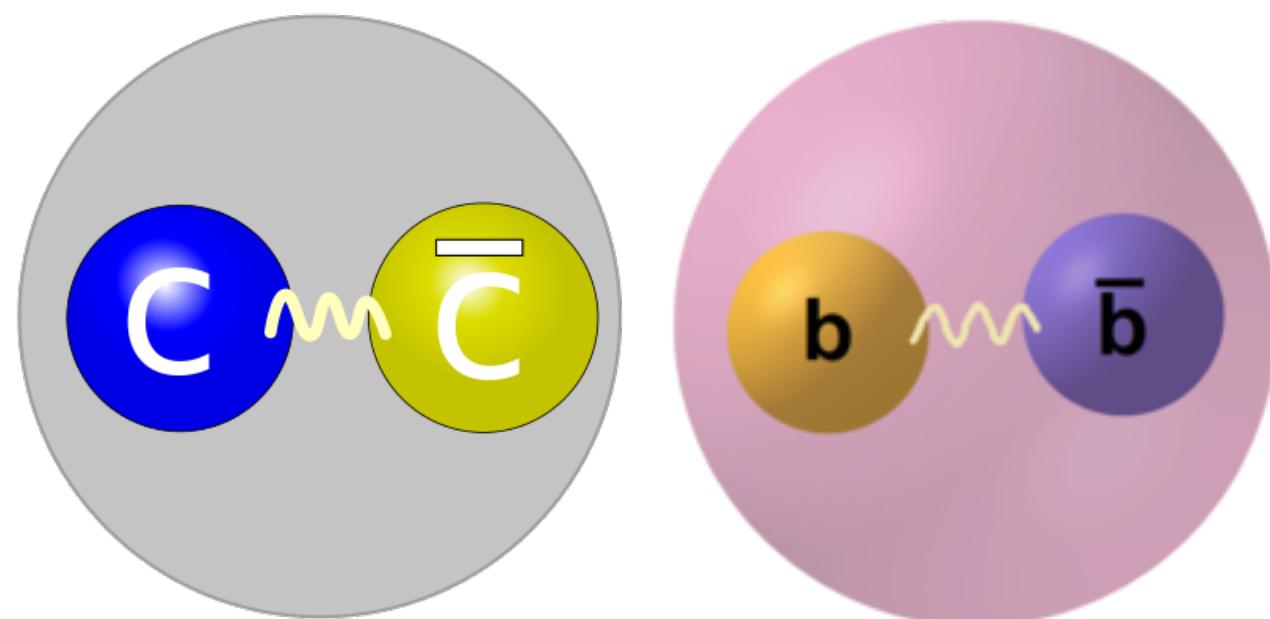
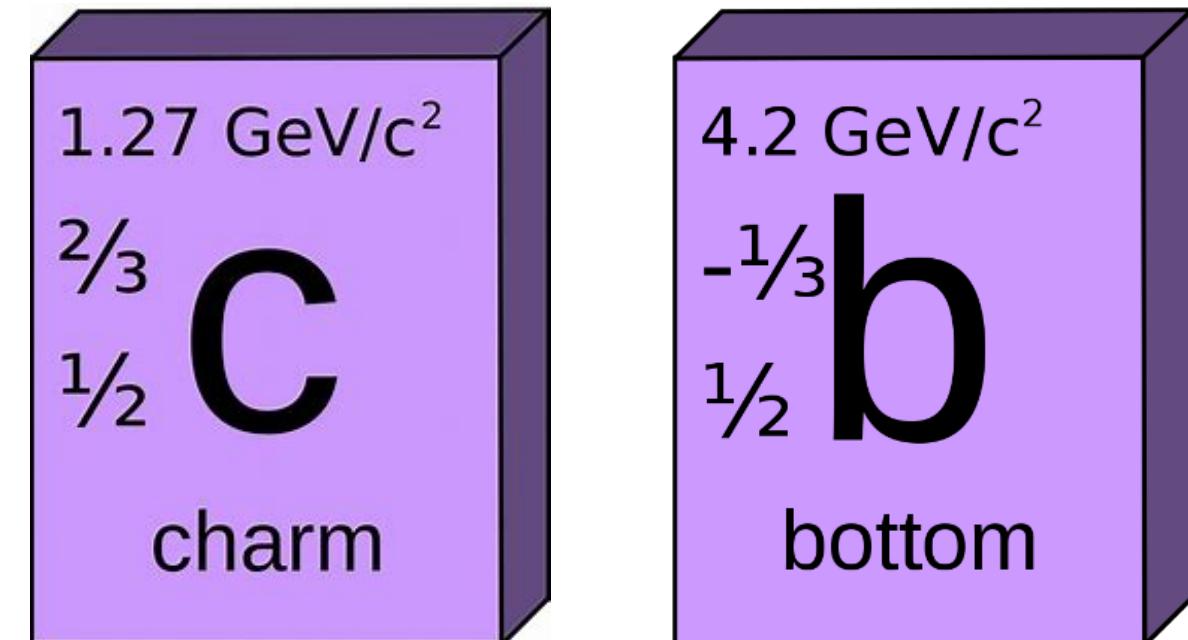
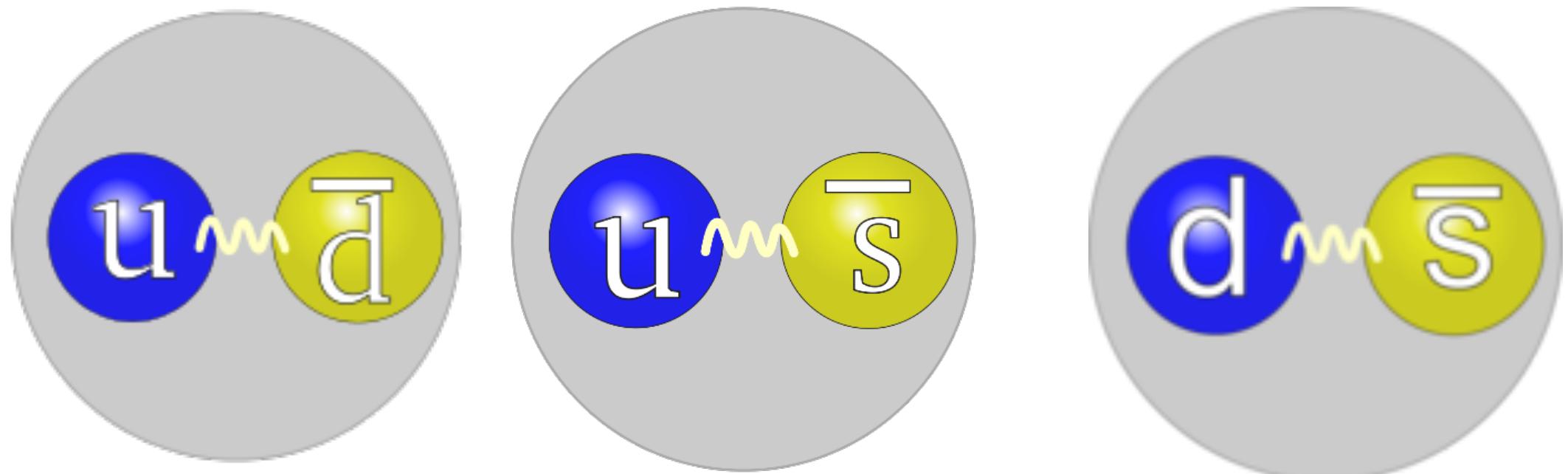
- Charmonium: $c\bar{c}$ – Bindungszustand
- QCD-Analogon zu **Positronium** (e^+e^-)
- QCD: Untersuchung des Quark-Quark Potenzials



Quarkonia, nachgefragt

- **Warum nur bei den schweren Quarks?**

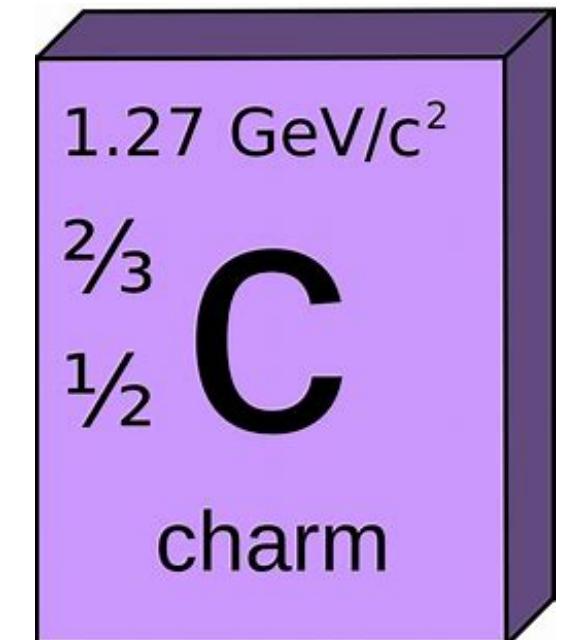
- wir beobachten nur Charmonium und Bottomonium (Grundzustand) !
- wieso beobachten wir dies nicht bei den leichten Quarks u, d, s ?



⇒ leichte Quarks *mischen* zu Pionen, Kaonen, ...

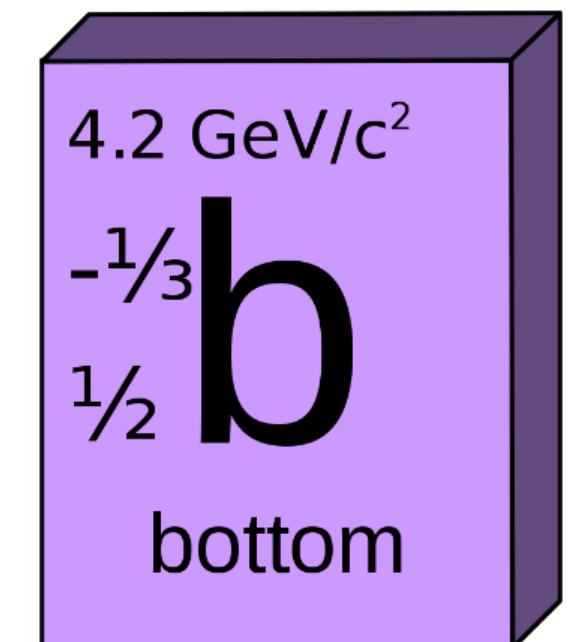
■ Charm-Quark c

- 1970: postuliert durch S. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani über GIM-Mechanismus (*kommt später*)
- 1974: erster experimenteller Nachweis durch konkurrierende Teams von B. Richter & S. Ting



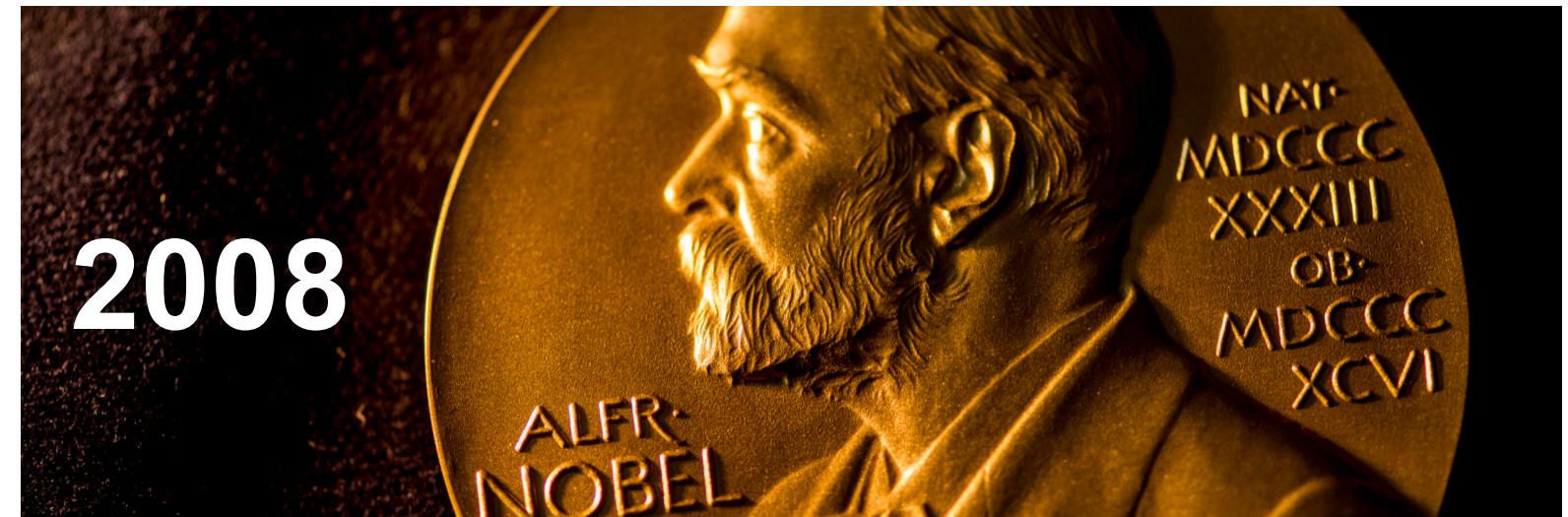
■ Bottom-Quark b , Top-Quark t

- 1973: postuliert durch M. Kobayashi, T. Maskawa
- 1977: b - erster experimenteller Nachweis durch L. Lederman
- 1995: t - erster experimenteller Nachweis durch CDF & D0 (Tevatron)



schwere Quarks: Historie

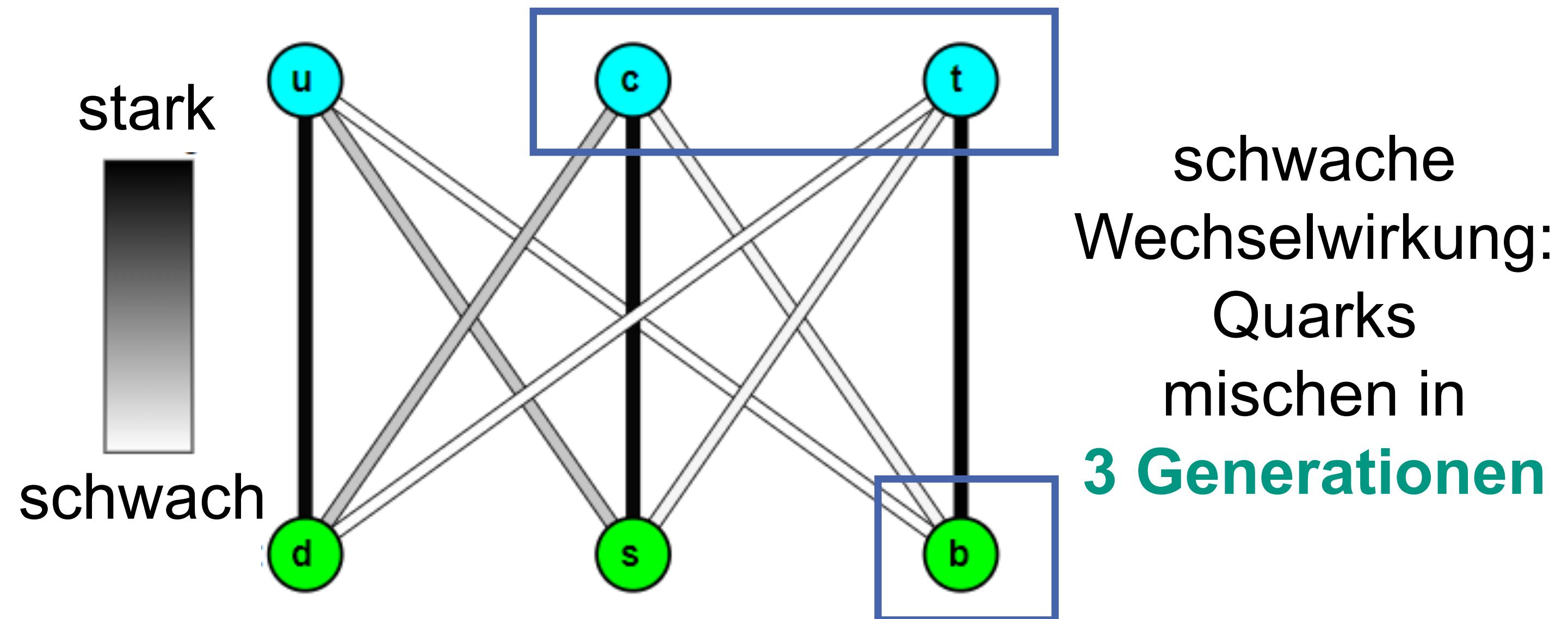
- 1973: Kobayashi & Maskawa untersuchen CP -verletzende Prozesse & sagen die Existenz von drei Quark-Generationen voraus



Q: nobelprize, wiki commons

Makoto Kobayashi

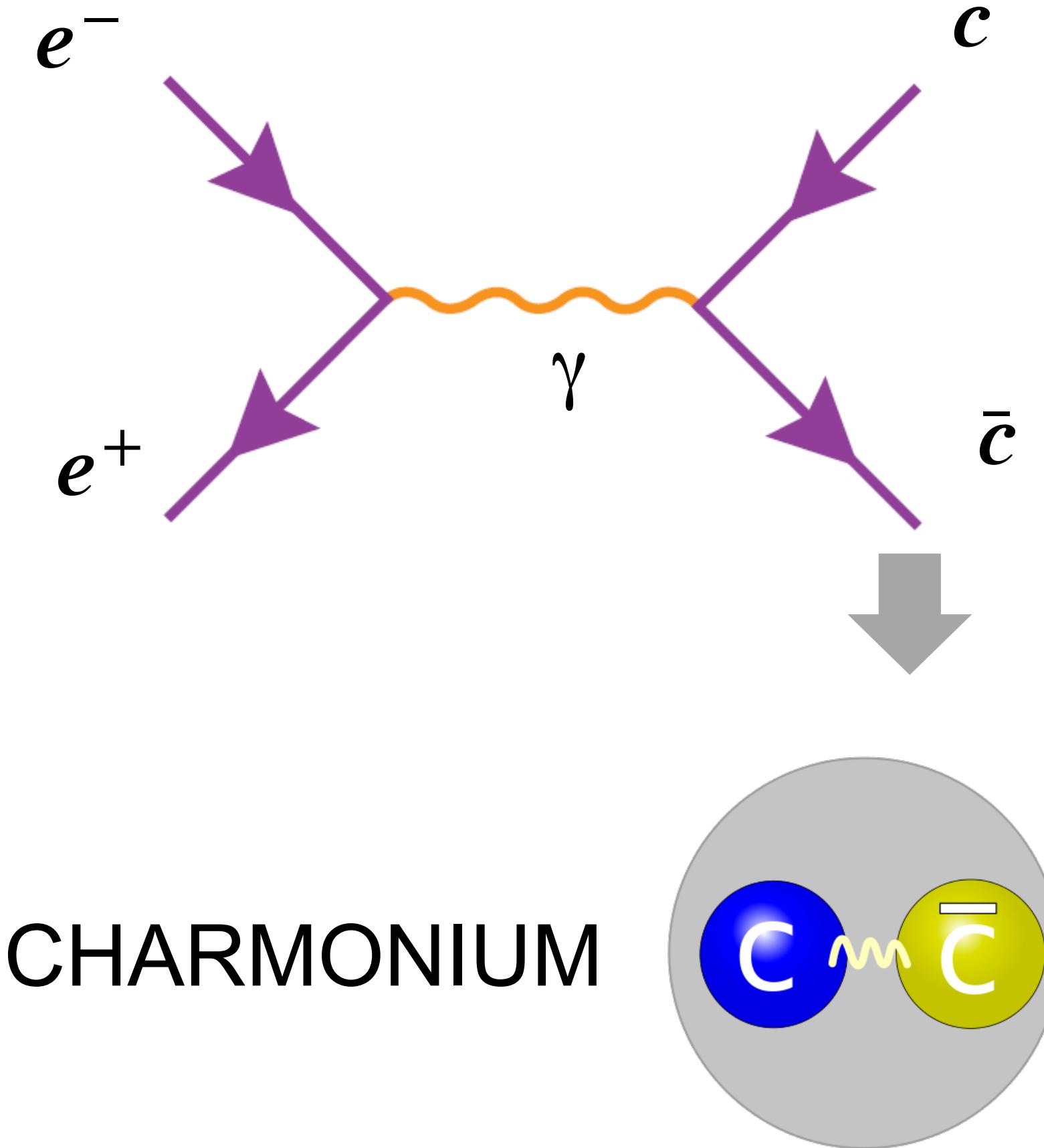
Toshihide Maskawa



"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature."

Entdeckung des *charm*-Quarks: das J/ Ψ

- Die November-Revolution: zwei Teams auf der Spur des *charm* - Quarks



Q: wiki commons, GIS Geography, seadoc, SLAC, BNL



Entdeckung des *charm*-Quarks: das J/ Ψ

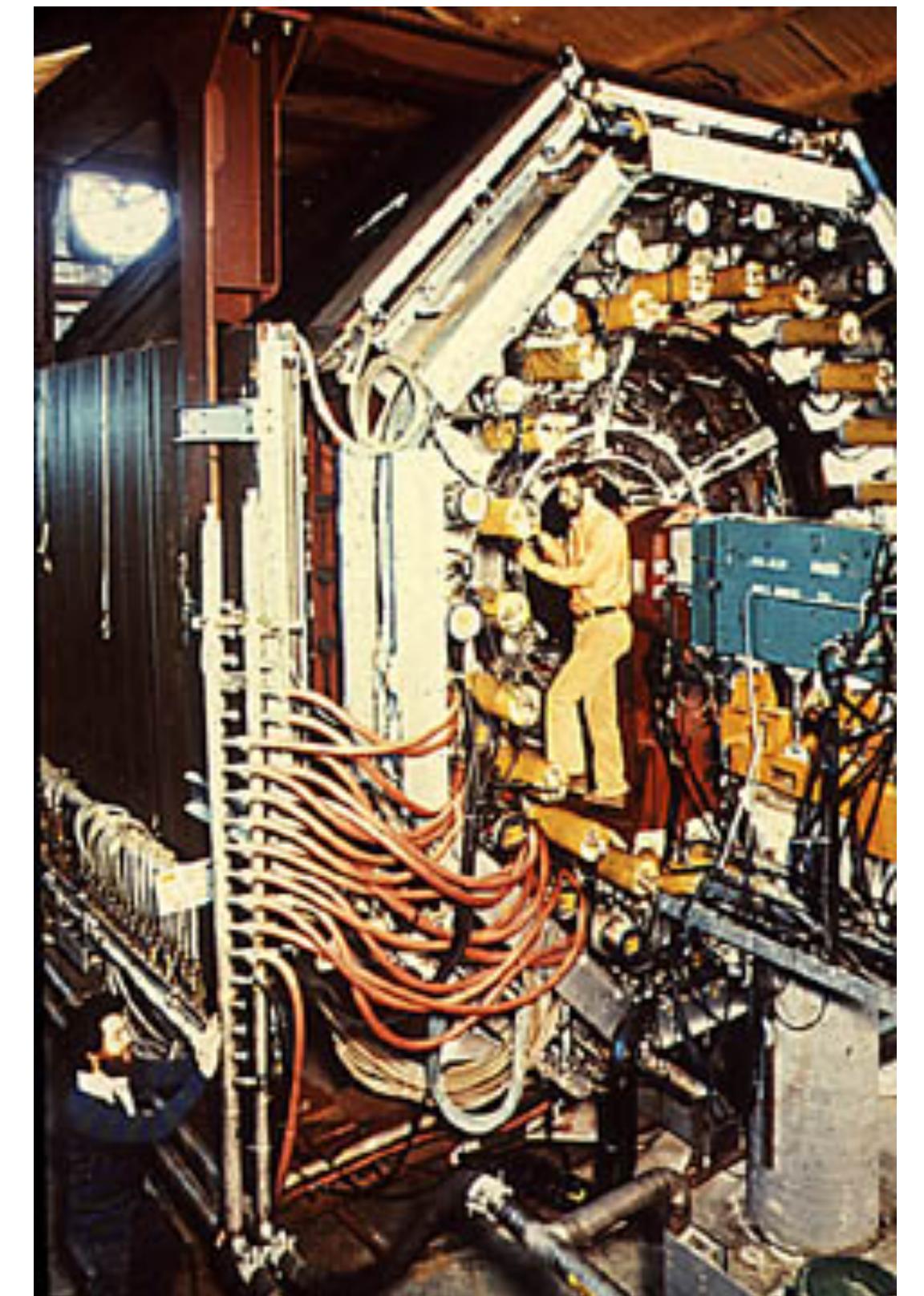
- US-Westküste am SLAC: Team 1 um Burton Richter
 - Experiment MARK I am SPEAR $e^+ - e^-$ Speicherring (auf dem Parkplatz...)

SPEAR $e^+ - e^-$ Speicherring mit $E = 1,3 - 2,4 \text{ GeV}$ –
Resonanz bei $\sqrt{s} = 3,1 \text{ GeV}$!



Mark I Detektor
am SPEAR

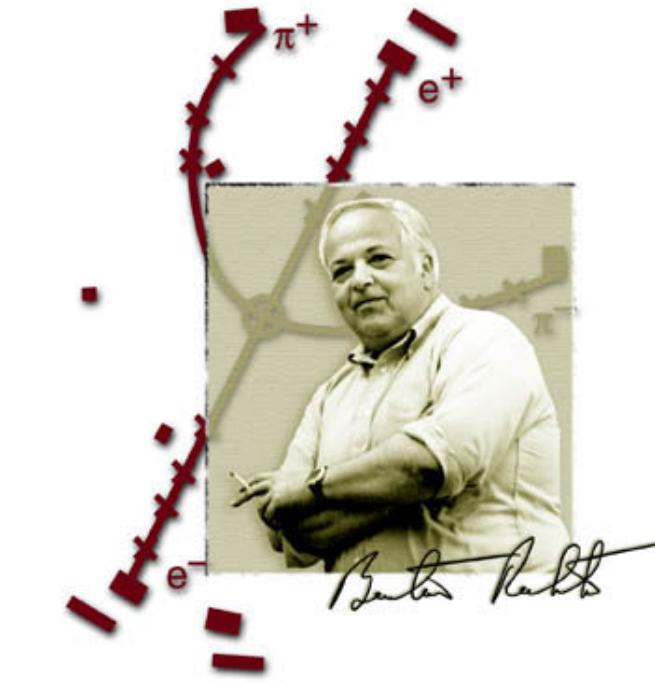
**Stanford Positron Electron
Asymmetric Ring**



Entdeckung des *charm*-Quarks: das J/ Ψ

- US-Westküste am SLAC: Team 1 um Burton Richter

- Identifikation des Zerfalls-Signaturen des Psi:
klare Identifikation!



G Goldhaber

Martin Perl

Burt Richter

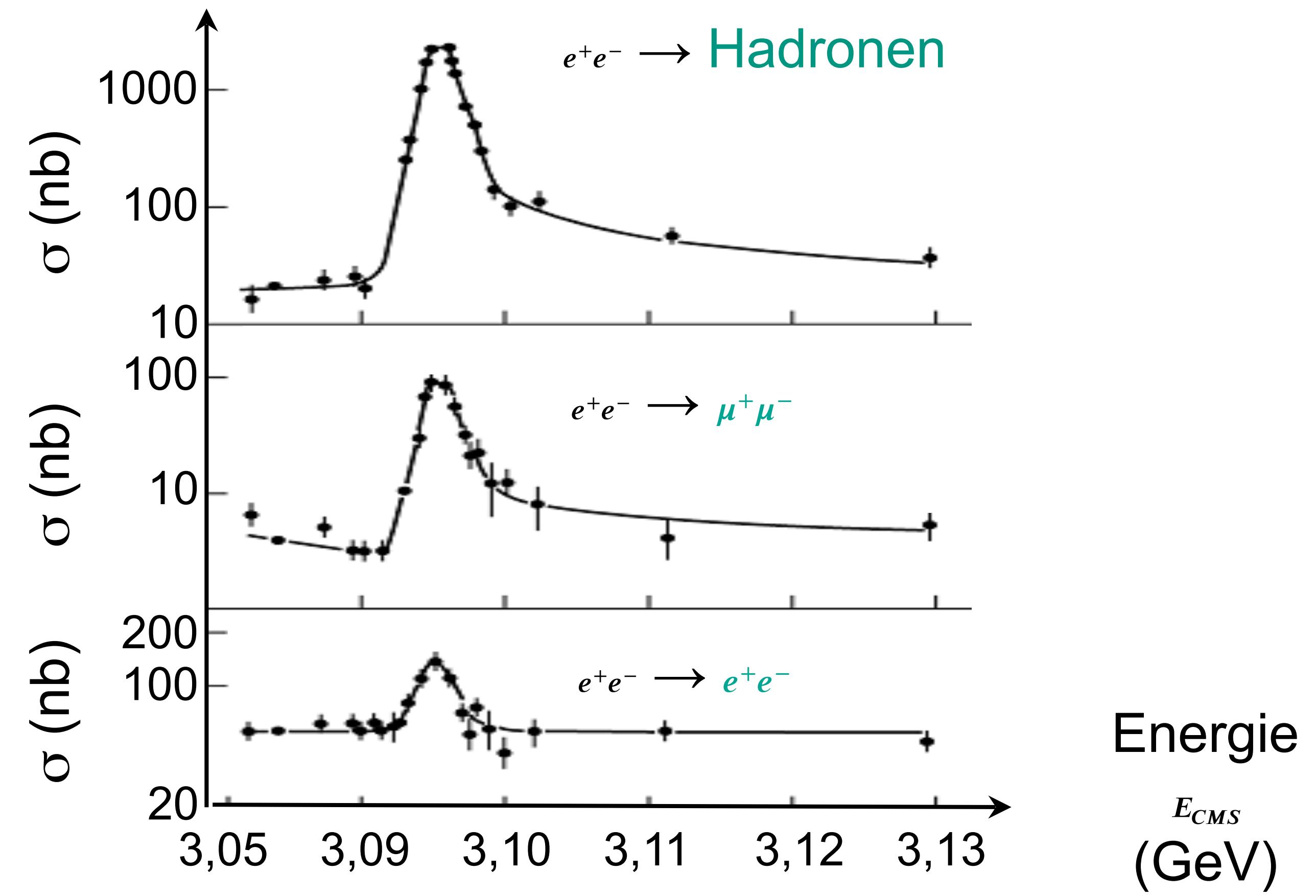
ein Psi Ψ



Entdeckung des *charm*-Quarks: das J/ Ψ

- US-Westküste am SLAC: Team 1 um Burton Richter

- Identifikation des Zerfalls-Signaturen des Psi:
klare Resonanz in E_{CMS} !

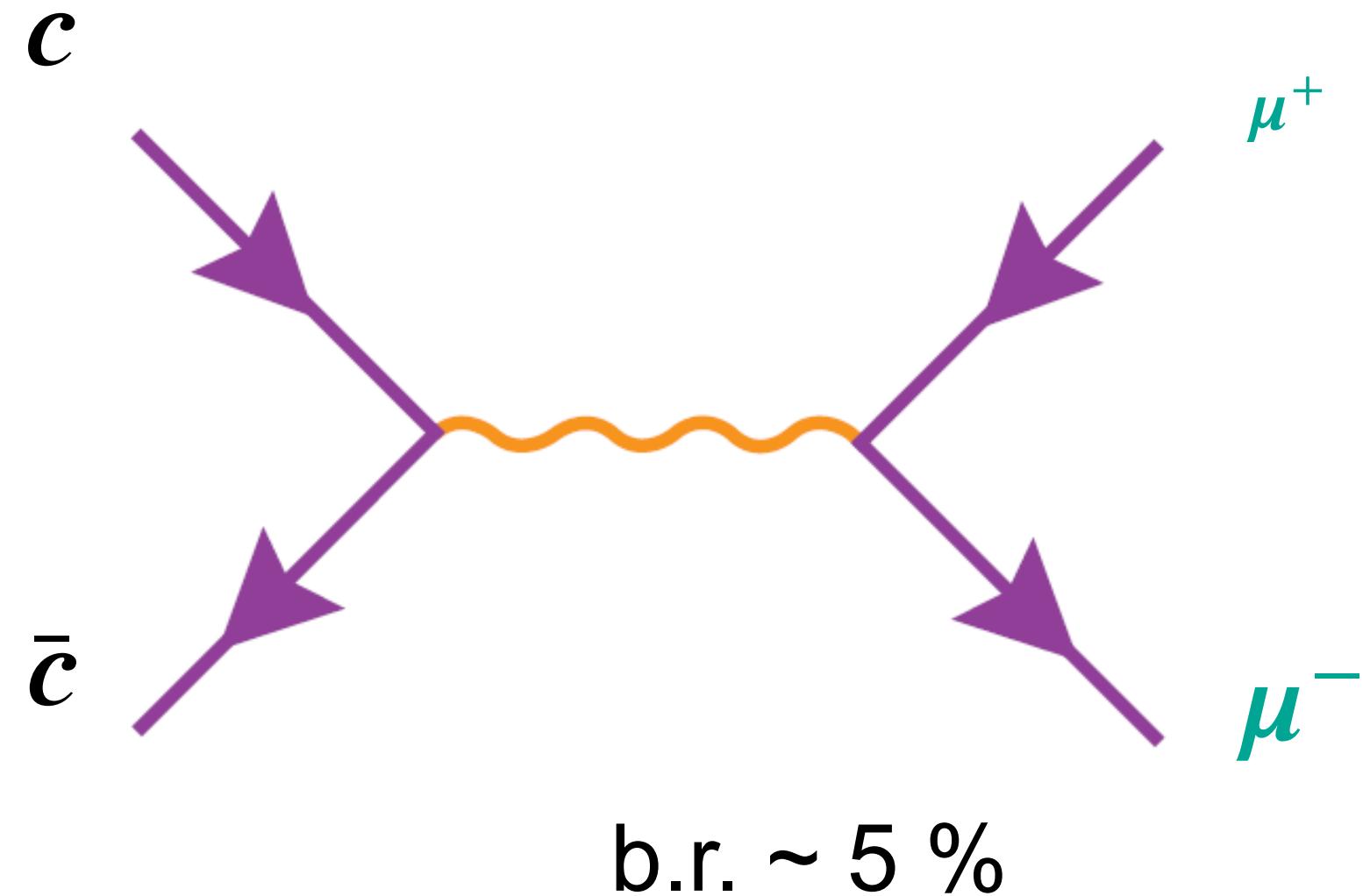


Entdeckung des *charm*-Quarks: das J/ Ψ

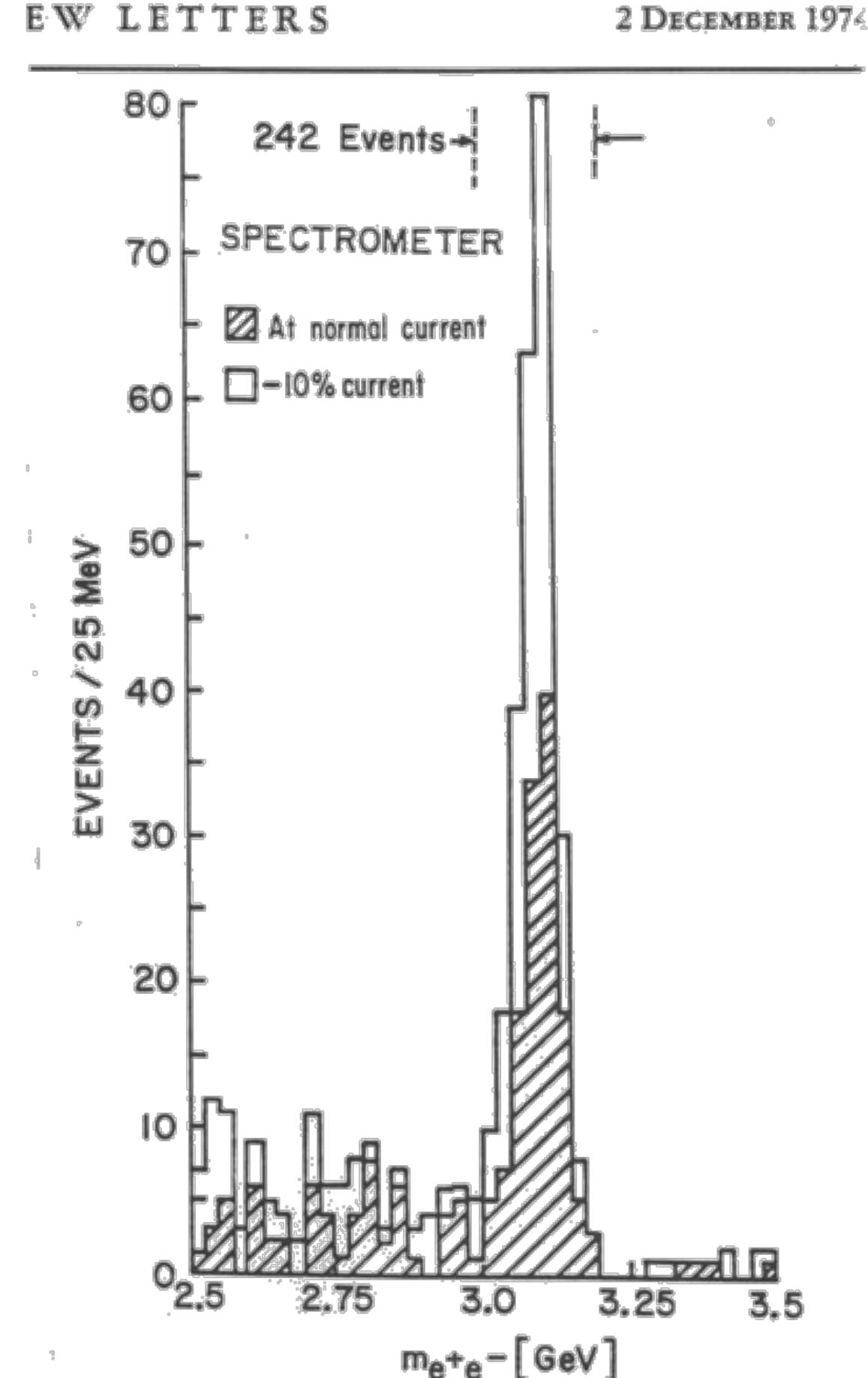
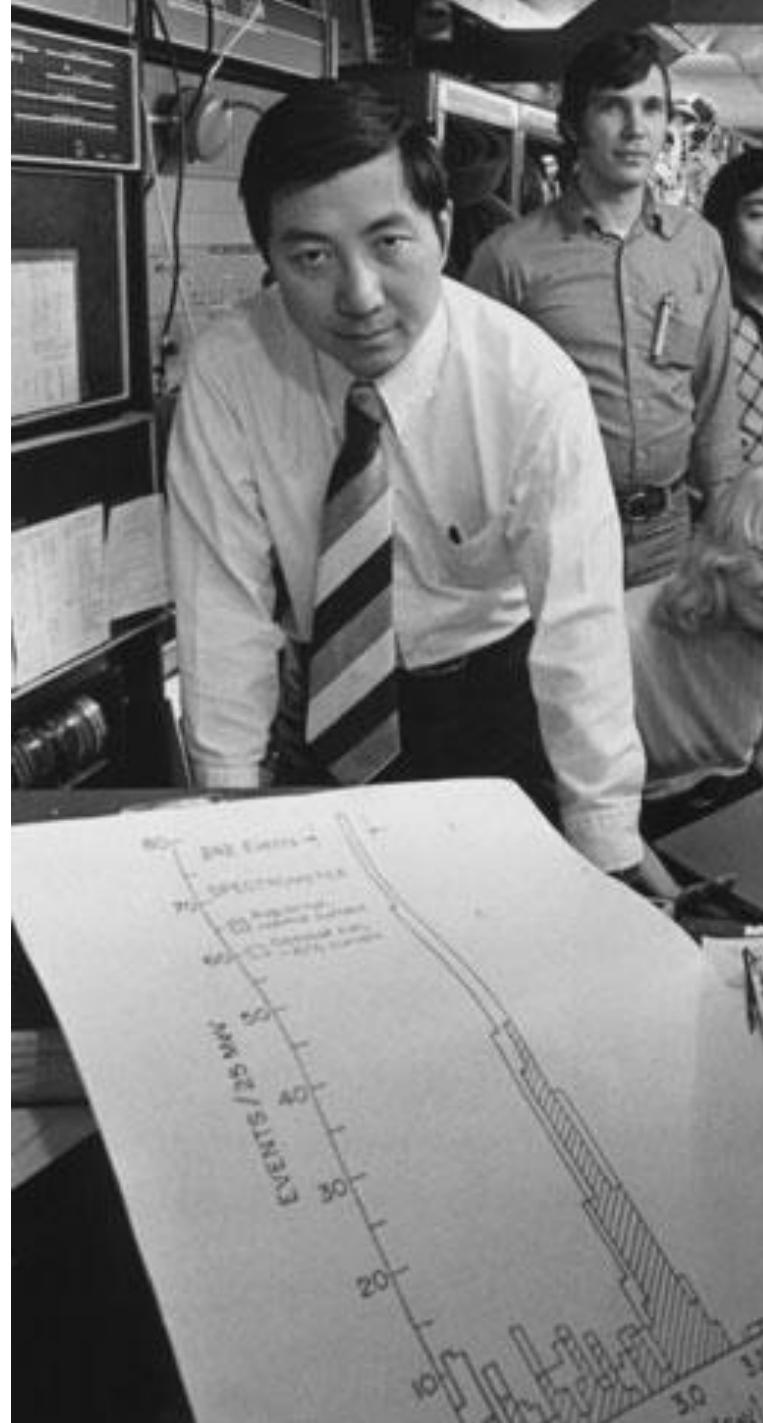
■ Ostküste am BNL: Team 2 um Sam Ting am AGS*

- 28 GeV p^- Beschleuniger: Suche nach $c\bar{c}$
- Protonen treffen auf Be-Target

$$\begin{aligned} p + \text{Be} &\rightarrow X + \mu^+ + \mu^- \\ &\rightarrow X + e^+ + e^- \end{aligned}$$



experimentelle Beobachtung:
Massenpeak bei $M = 3,1 \text{ GeV}$



November-Revolution: die Entdeckung des *charm*

- November-Revolution 1974: der wichtigste Schritt auf dem Weg hin zur Erkenntnis, dass die Quarktheorie eine physikalische Realität widerspiegelt
 - 11.11.1974: die Teams um Burton Richter (SLAC) & Sam Ting (BNL) verkünden gemeinsam die Entdeckung des Charm-Quarks
 - die enge Charmonium-Resonanz bei $M = 3,1 \text{ GeV}$ wird unter dem Doppelnamen **J/Ψ** bekannt

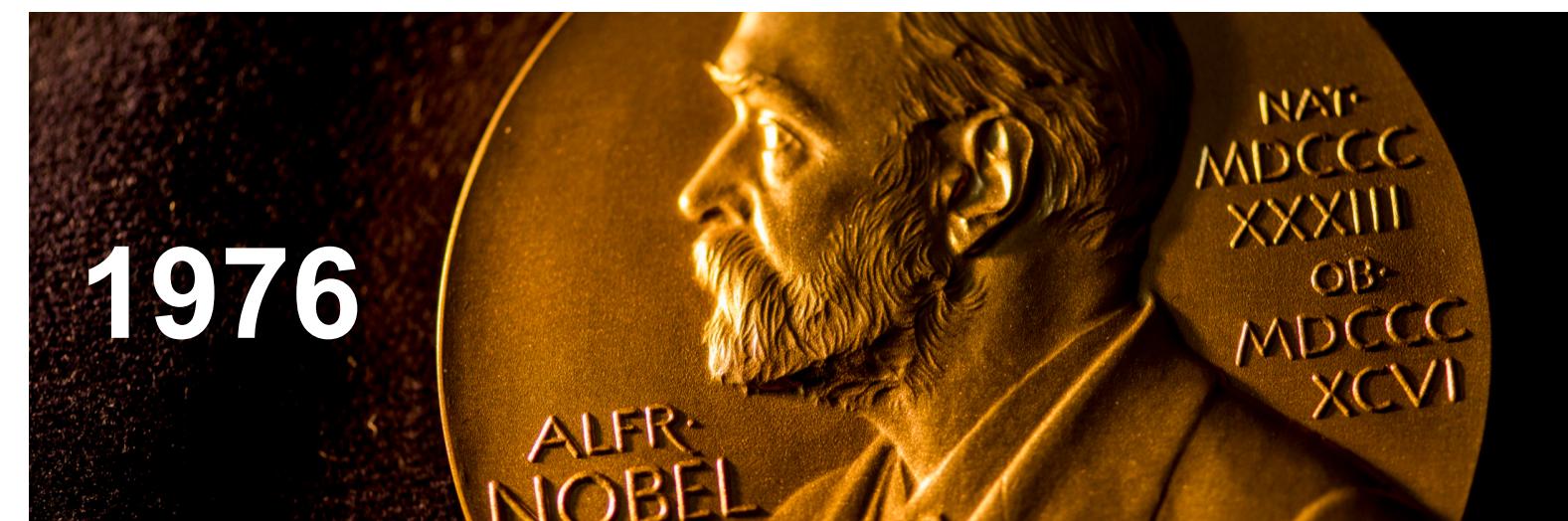


Burt Richter

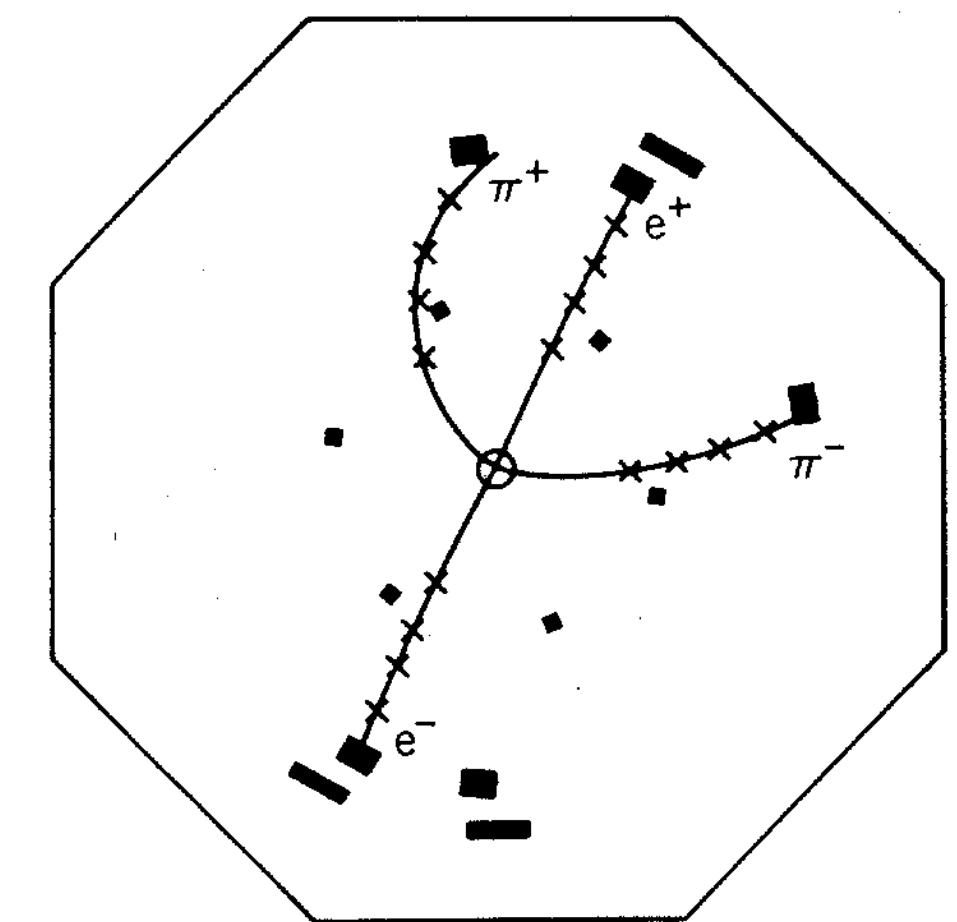
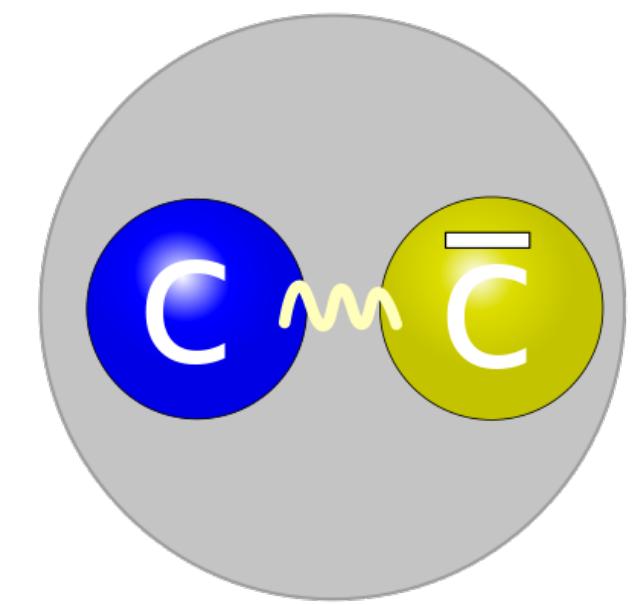


Sam Ting

丁肇中



*"for their pioneering work in the discovery of a **heavy elementary particle of a new kind.**"*



das J/Ψ : eine langlebige, schmale Resonanz!

- Charmonium als Prototyp von Quarkonia (= Bindungszustände der schweren Quarks $charm, bottom$)
 - Charmonium: ein langlebiger gebundener Zustand eines $c\bar{c}$ mit schmaler Zerfallsbreite $\Gamma \Rightarrow$ Breit-Wigner Resonanz*
 - Charmonium erzeugt aus virtuellem Photon: Spin = 1, $P = -1$

Eigenschaften von J/Ψ	
Masse (MeV)	$3096,916 \pm 0,011$
Lebensdauer τ (s)	$7,2 \cdot 10^{-21}$
Zerfallsbreite Γ (keV)	$93,2 \pm 2,1$

$JPC = 1--$

} starke Ww.
erhält die
 $charm$ -Flavour!!

Angeregte Charmonium-Zustände

■ Psi-Resonanzen bei höherer Schwerpunktsenergie bei SPEAR

- kurz nach J/Ψ-Entdeckung: Beobachtung weiterer Resonanzen

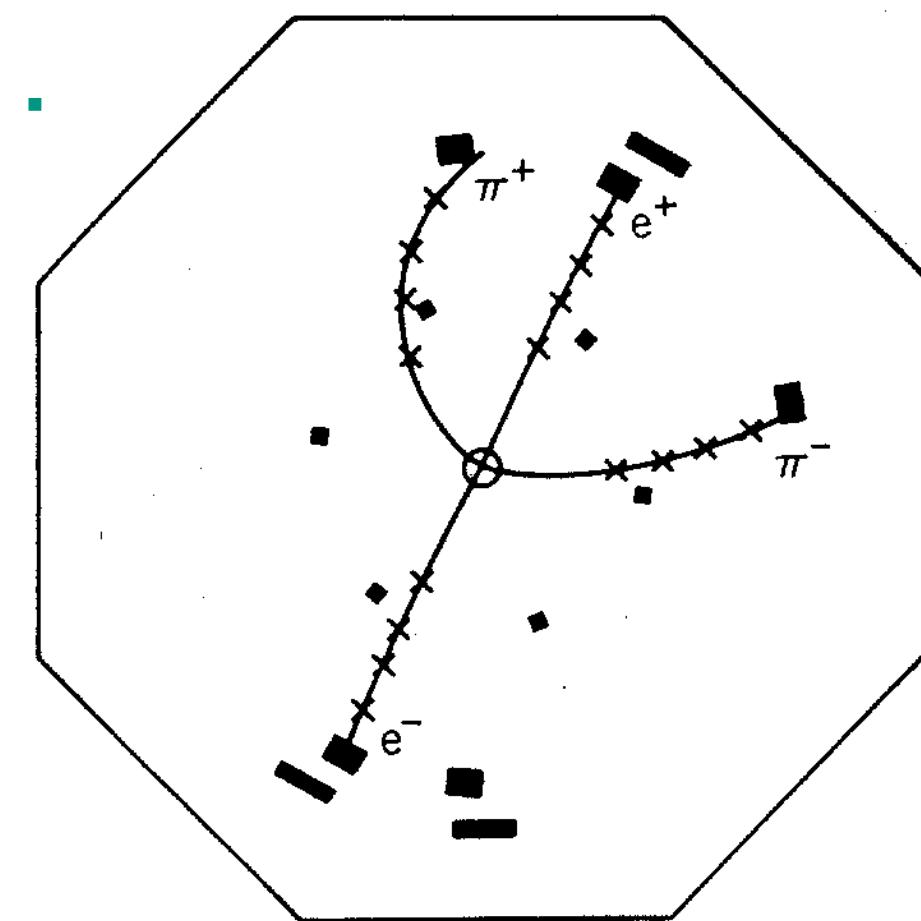
Beispiel: $\Psi(2S) \rightarrow J/\Psi (\rightarrow e^+ + e^-) + \pi^+ + \pi^-$

- Anregungen des Spin-1 Systems von Charmonium

Resonanz	Masse (MeV)	Breite Γ (MeV)
J/Ψ (1S)	3097	0,087
Ψ (2S)	3686	0,277
Ψ (3770)	3770	24
Ψ (4040)	4040	52
Ψ (4160)	4160	78

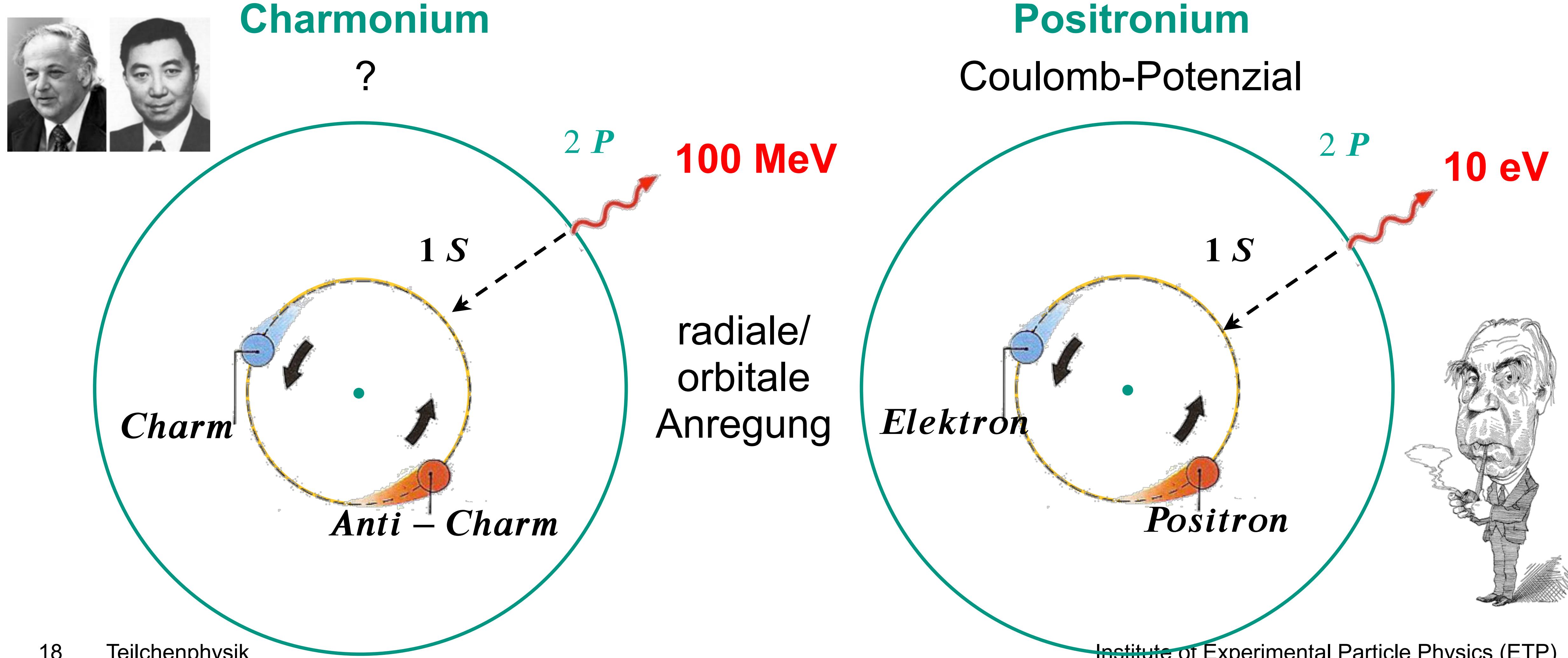
Teilchen „schreibt“
seinen Namen...

Zerfallssignatur eines
 Ψ' = Ψ (2S)
im MARK I Detektor



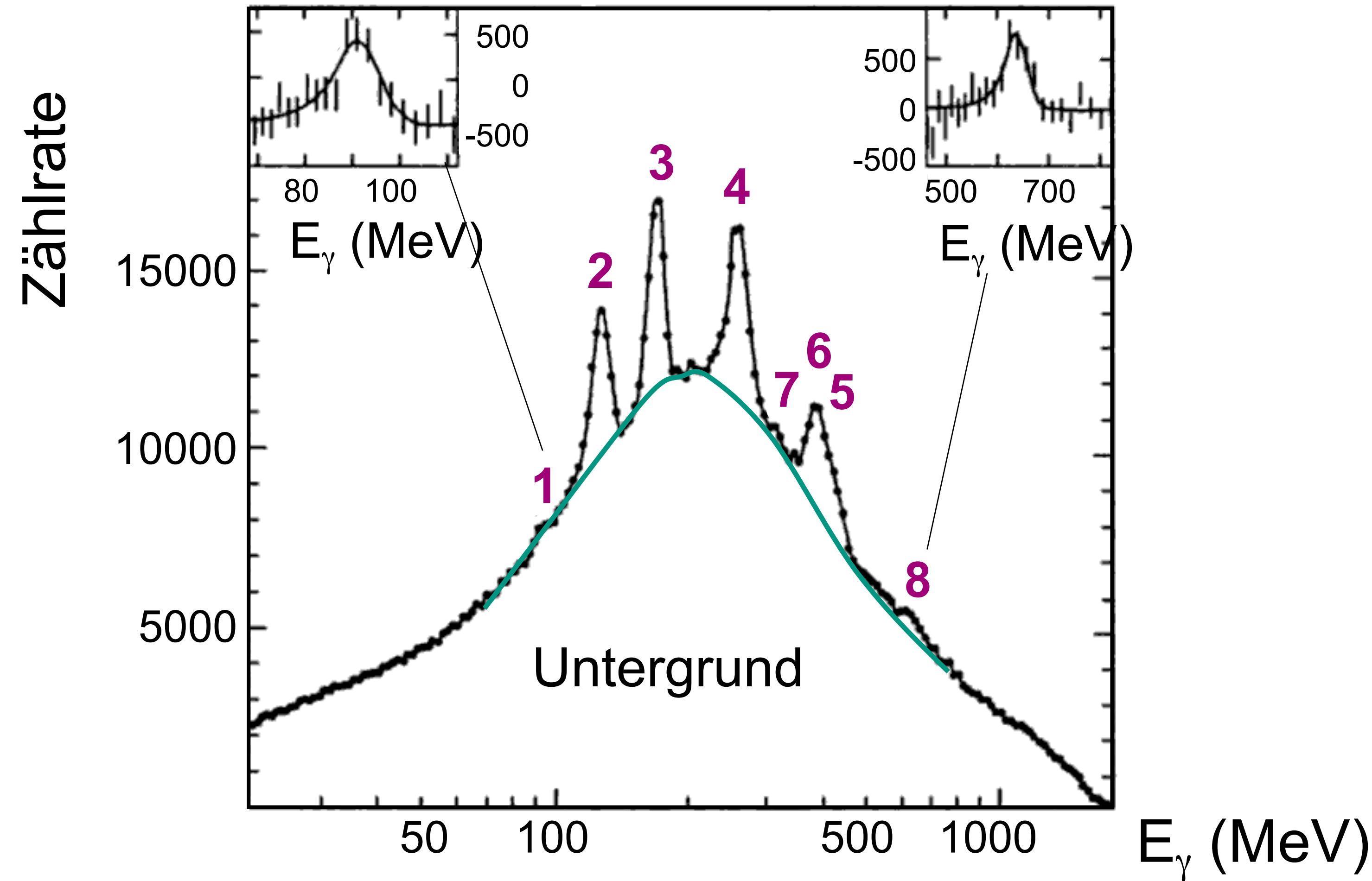
Charmonium und Positronium

- gebundene Zustände von starker & elektromagnetischer Wechselwirkung



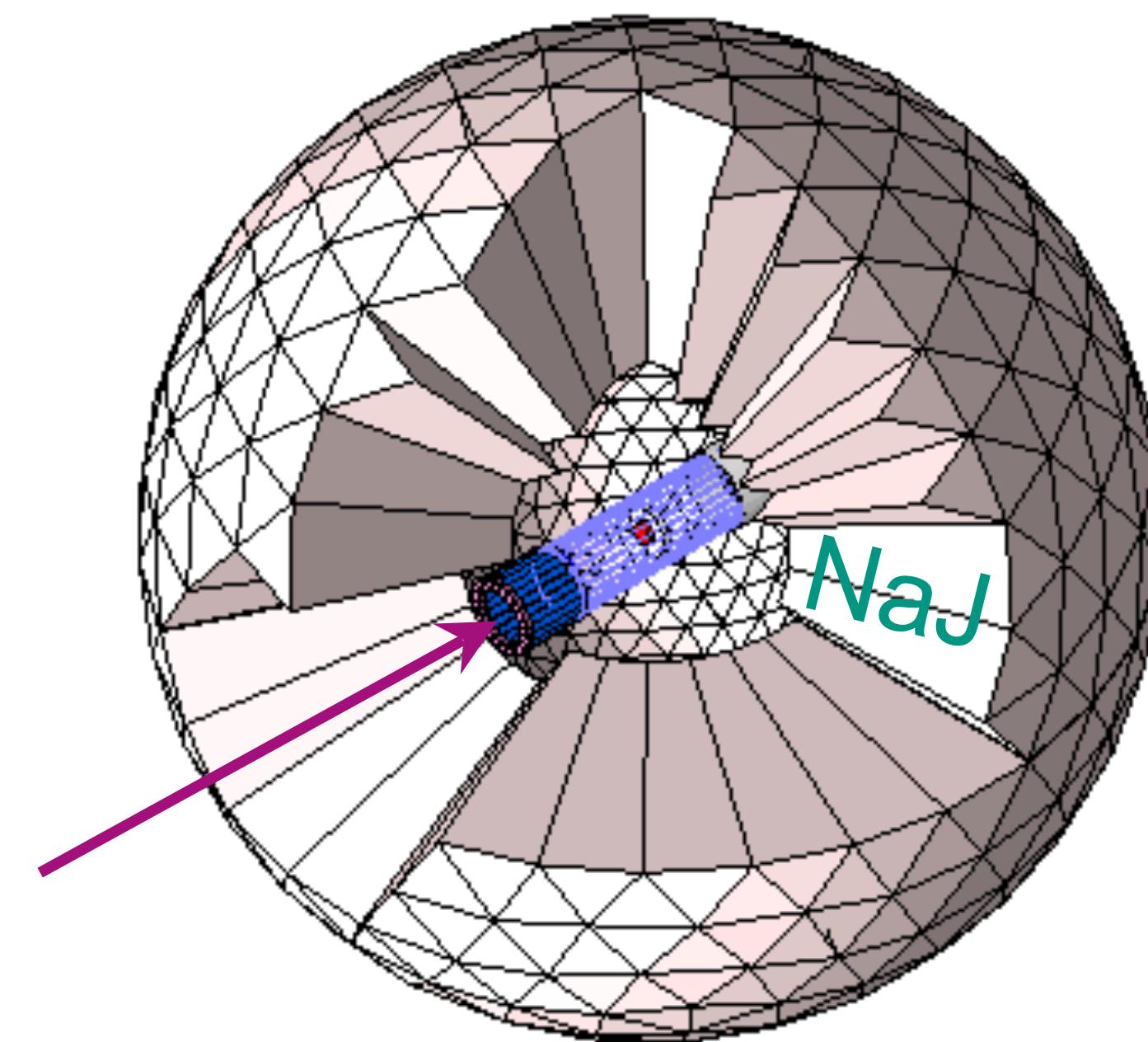
Zerfall angeregter Charmonium-Resonanzen

- Beobachtung von **Gamma-Kaskaden** aus dem Zerfall angeregter Zustände



Crystal-Ball

NaJ-Detektor am SPEAR Ring
zur Charmonium-Spektroskopie



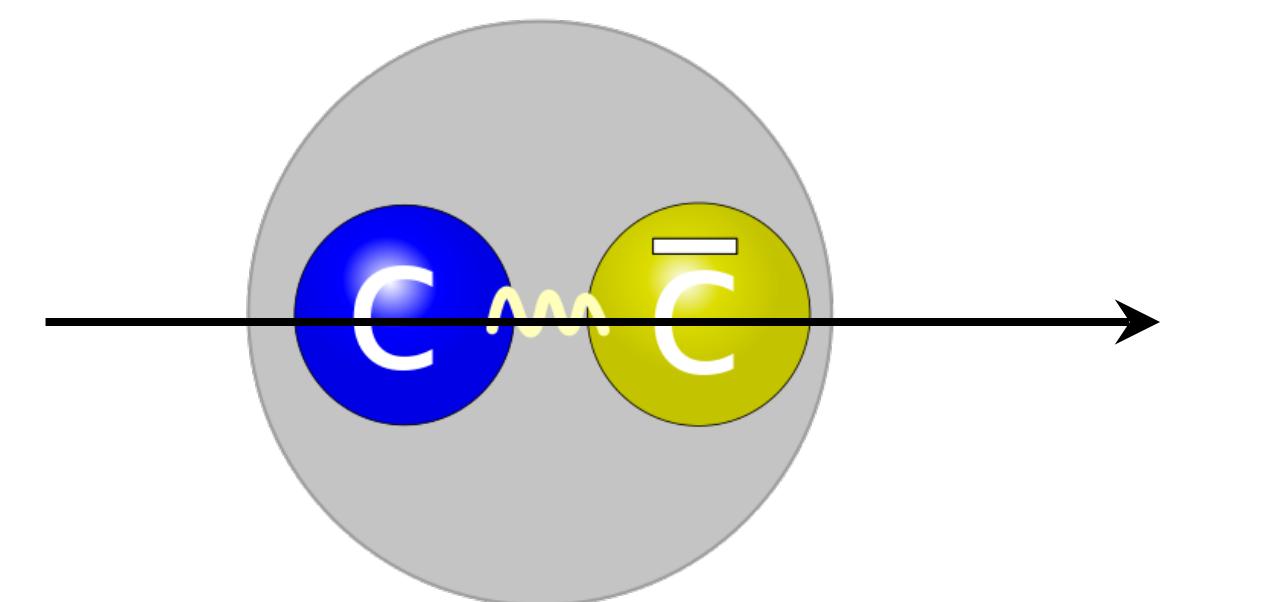
Charmonium Termschema aus Gamma-Kaskade

- Rekonstruktion des Zerfalls von Ψ' ($2\ ^3S_1$)

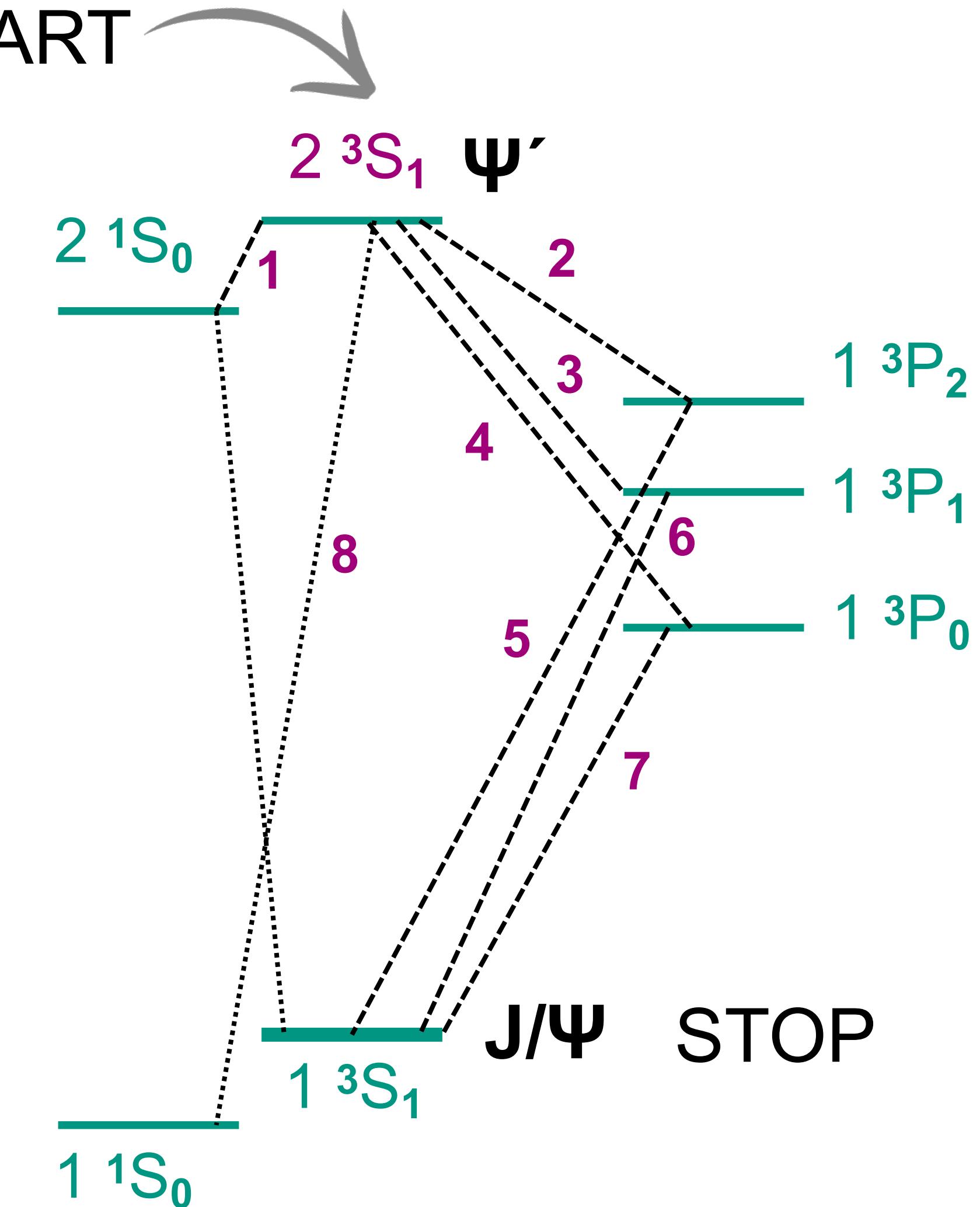
Notation der Meson-Spektroskopie*:

n: radiale Anregung (Hauptquantenzahl)

l: orbitale Anregung (Bahndrehimpuls)



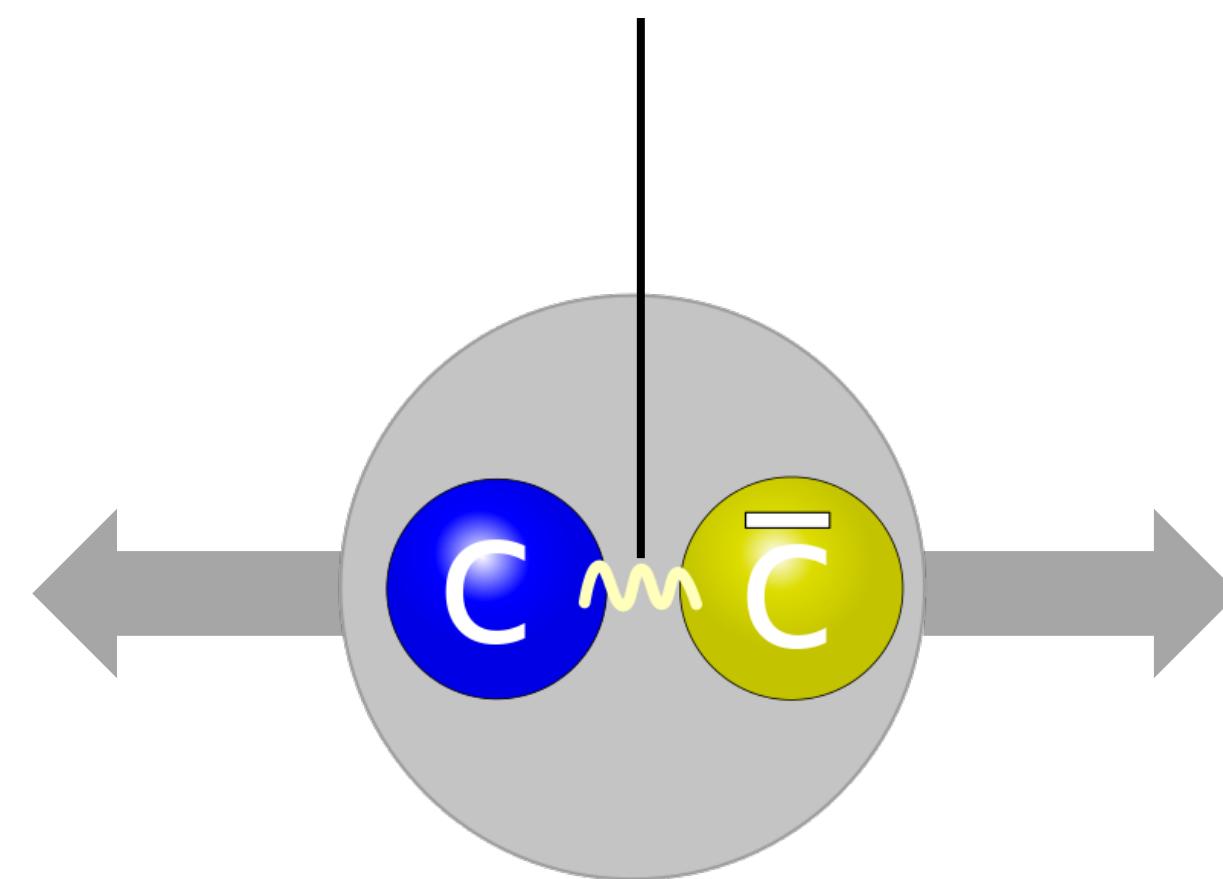
*Notation der Kernphysik: $n = N+1$ ($N = \#$ der radialen Knoten)



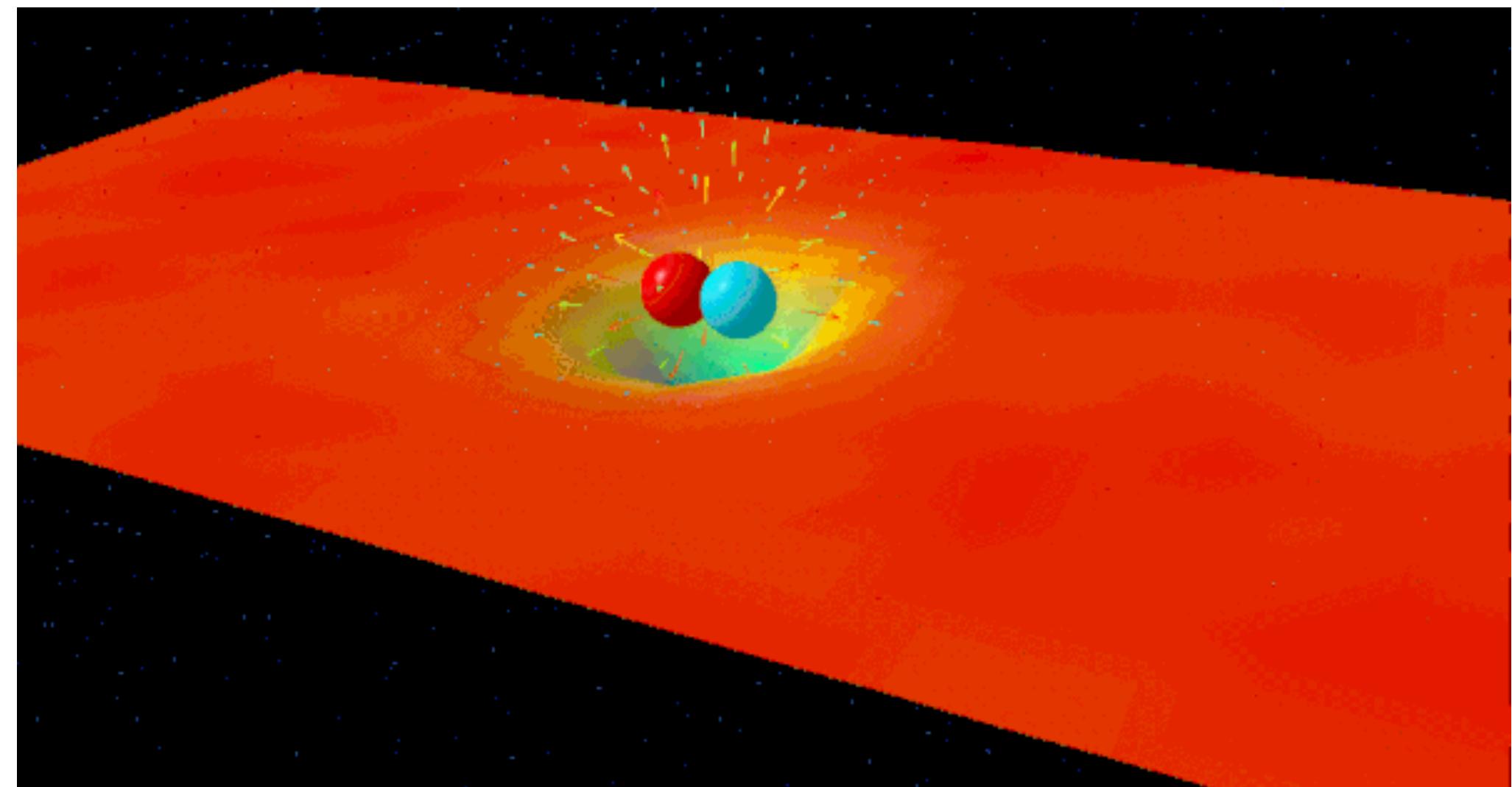
Anregung von Charmonium

- Rekonstruktion des Quark-Quark-Potenzials
 - Hauptquantenzahl n : radiale Anregungen von Charmonium

wie ändert sich das
Quark-Quark-Potenzial?

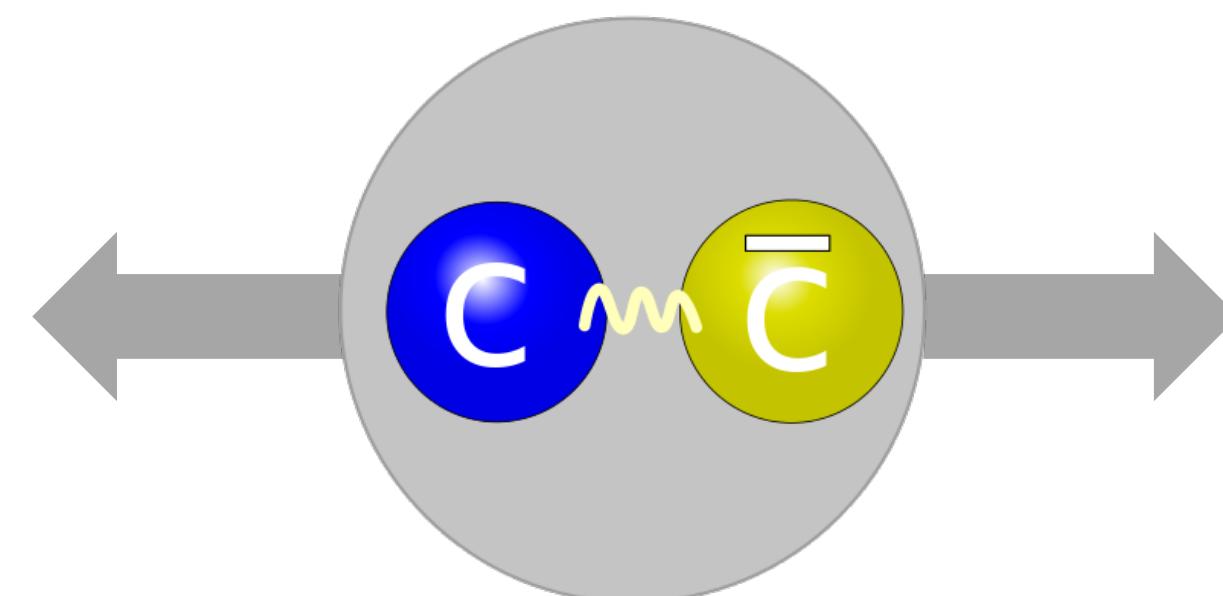


Änderungen des
Abstands r



Farbkraft zwischen einem
System aus zwei Quarks

- Rekonstruktion des **Quark-Quark-Potenzials*** aus Charmonium-Spektroskopie
 - Vergleich mit $1/r$ Potenzial von **Positronium**
 - QCD-Potenzial bei $n = 1,2$ (kleine Abstände) ist **Coulomb-artig**
 - große Abstände: **linear anwachsendes Quark-Quark Potenzial**



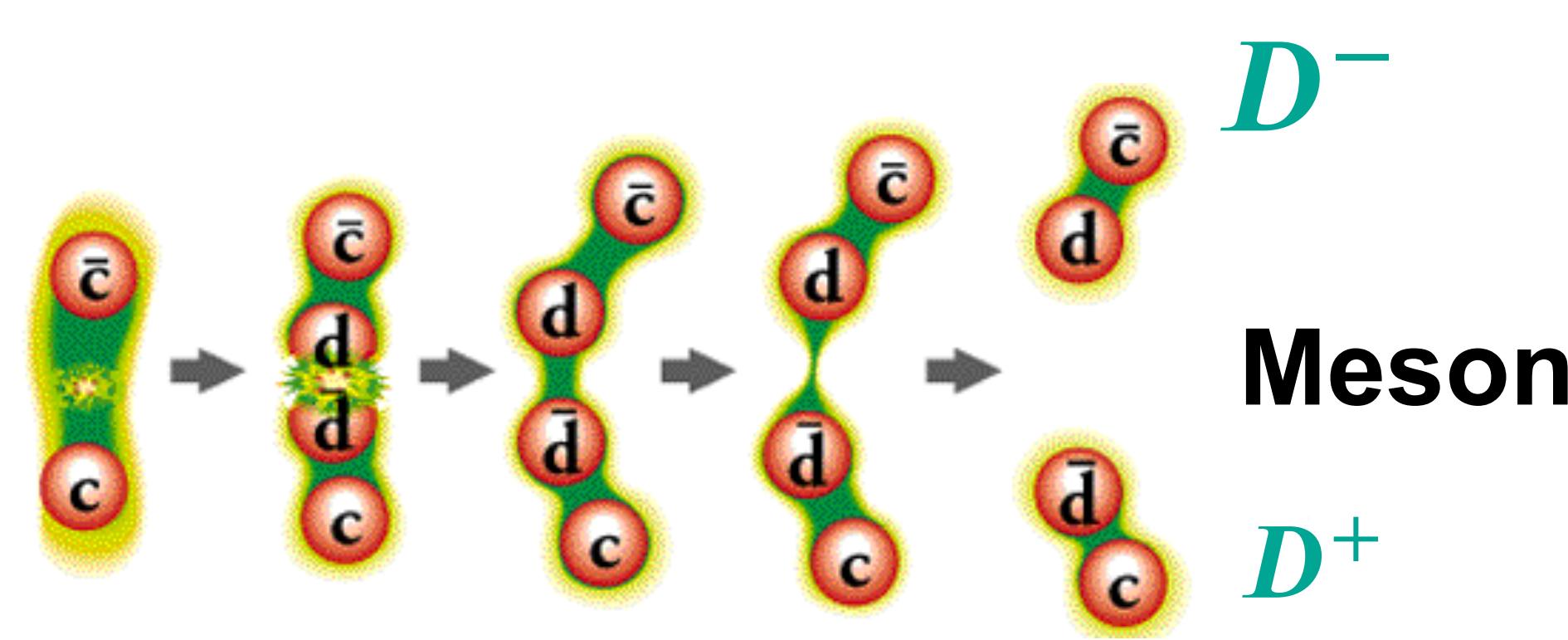
Änderungen des
Abstands r

$$V(r) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\alpha_s(r) \cdot \hbar c}{r} + \kappa \cdot r$$

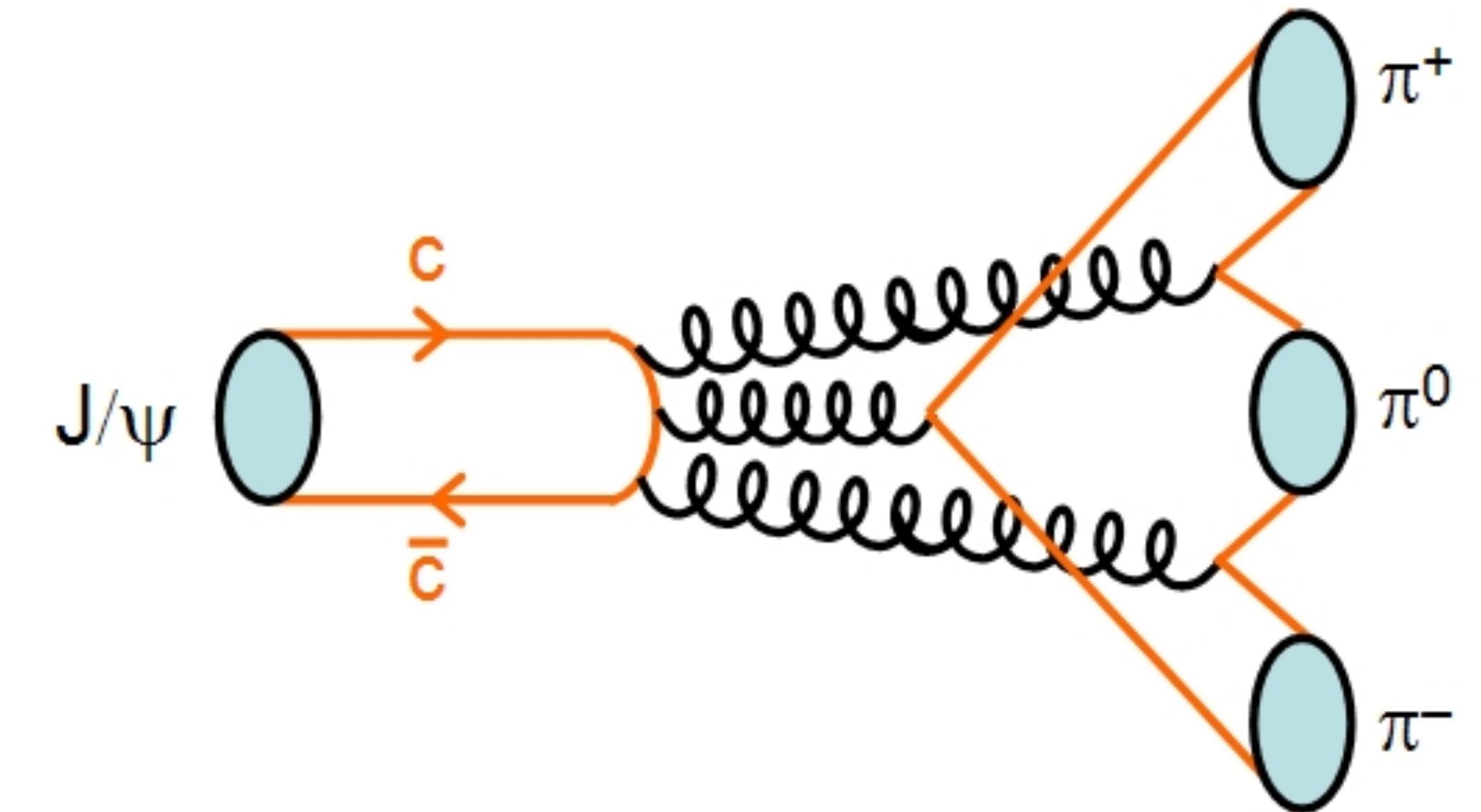
| |
starke Kopplung Abstand Konstante

Hadronische Charmonium-Zerfälle

- Hoch angeregte Zustände: hadronische Zerfallskanäle
 - ab 3,7 GeV: hadronische Zerfälle von Charmonium möglich



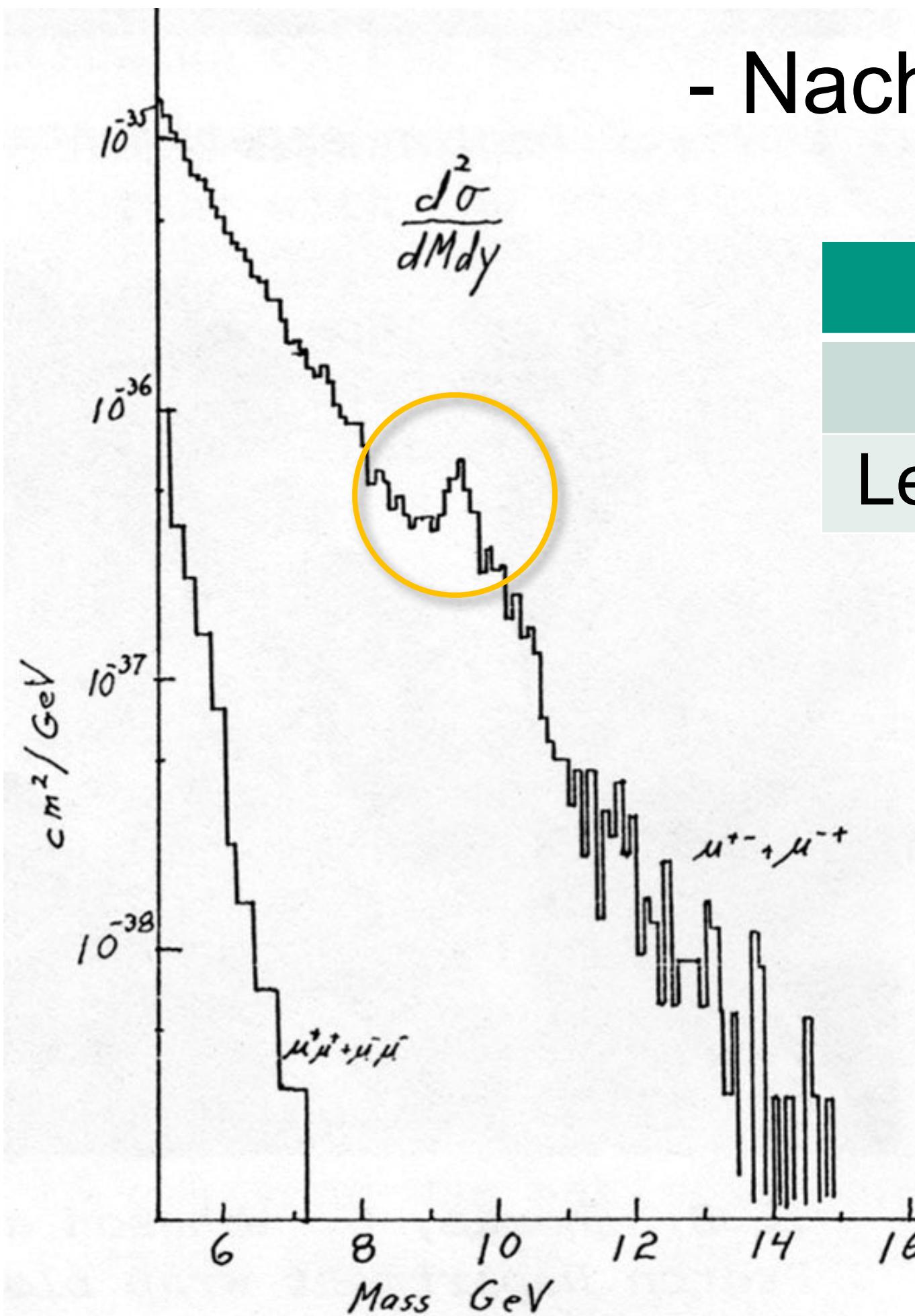
D-Mesonen mit „offenen“ charm-Quarks*



Abstrahlung von Gluonen
(Träger starke Kraft)*

Bottomonium – das Upsilon γ

- Entdeckung eines gebundenen Zustands aus Bottom Quark-Antiquark



- Nachweis im Fermilab-Experiment E288 bei $E_p = 400 \text{ GeV}$

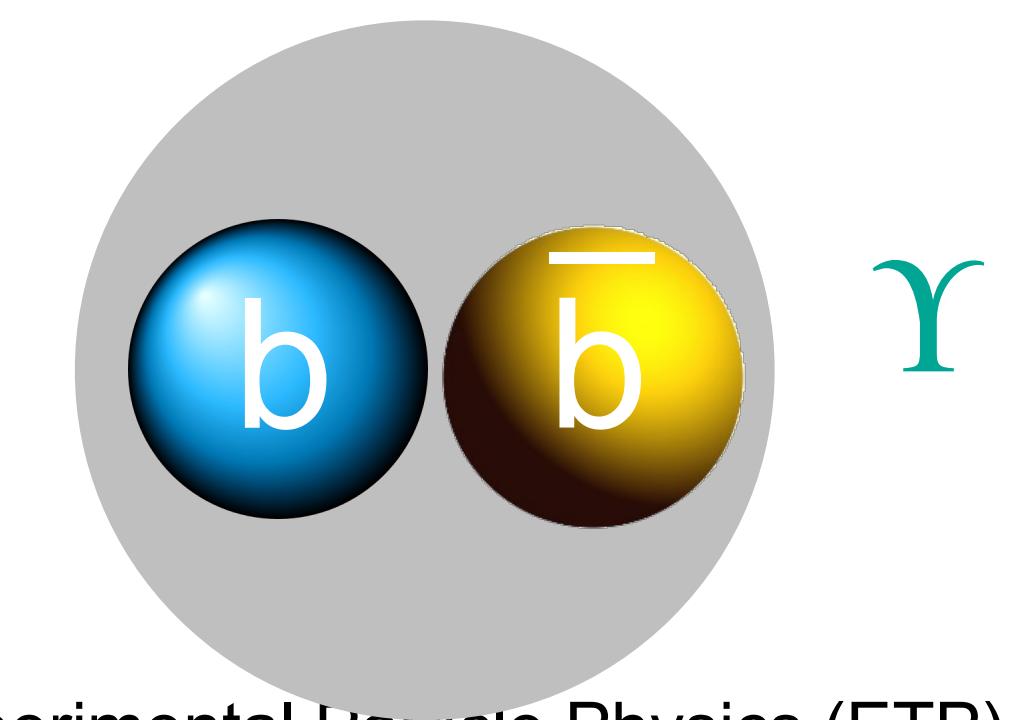
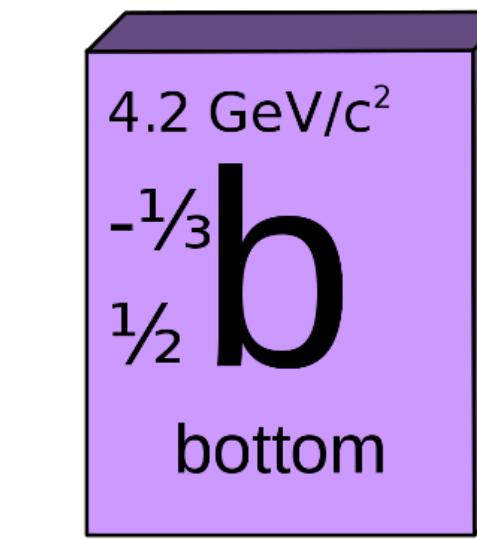
Eigenschaften von	
Masse (MeV)	$9460,30 \pm 0,26$
Lebensdauer τ (s)	$1,21 \cdot 10^{-20}$



Leon
Lederman

Orginalpublikation:
Auftragung der invarianten Masse

Resonanz	Masse (MeV)	Breite Γ (MeV)
(1S)	9460	0,053
(2S)	10023	0,043
(3S)	10355	0,026
(4S)	10580	20
(10860)	10865	110



Katzen

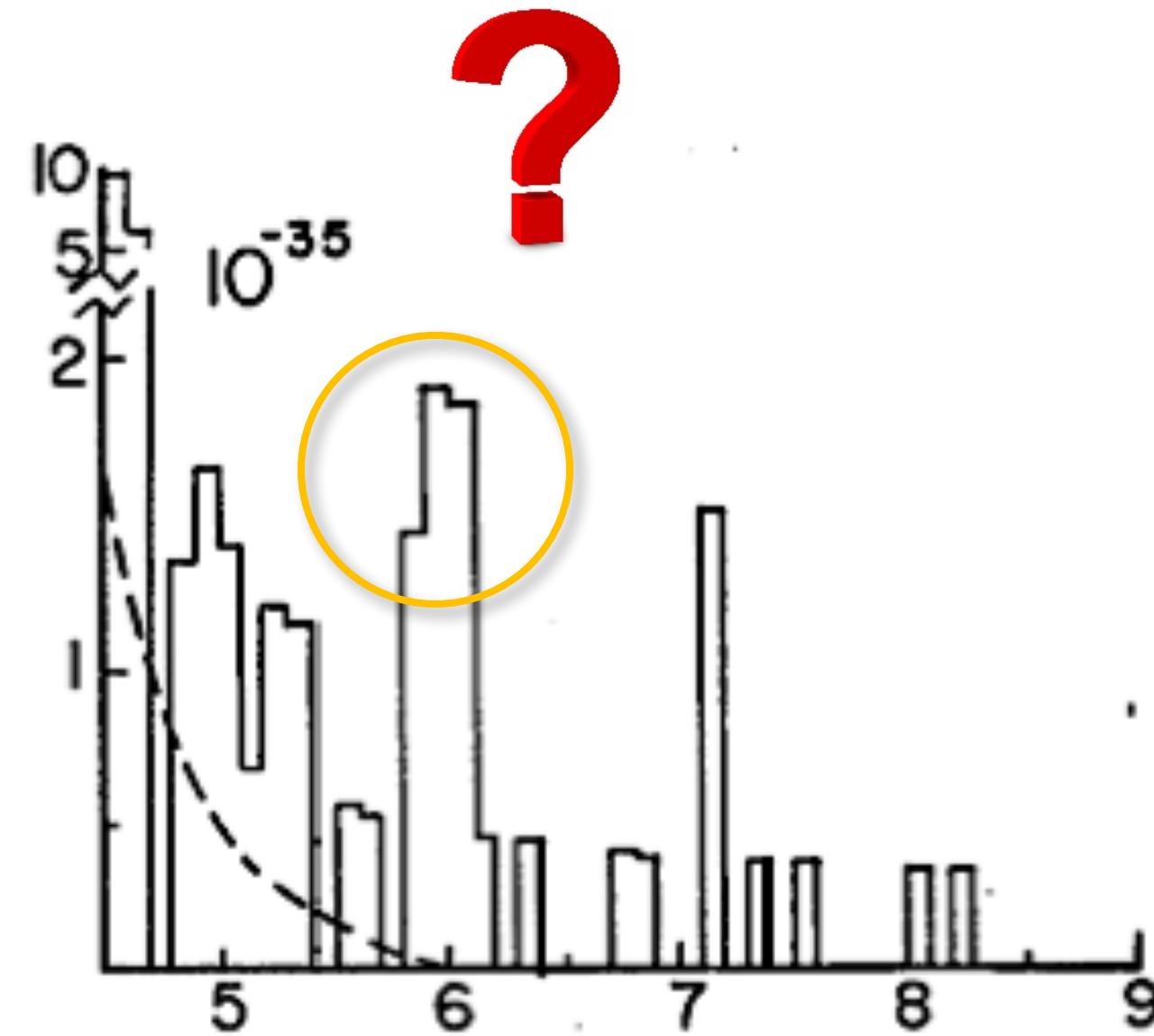
- Kibby



Bottomonium – das „Oops-Leon“ γ

- 1976: „Entdeckung“ eines Peaks bei $\sqrt{s} = 6 \text{ GeV}$

- statistische Fluktuation im Fermilab-Experiment E288



Orginalpublikation:
Auftragung der invarianten Masse

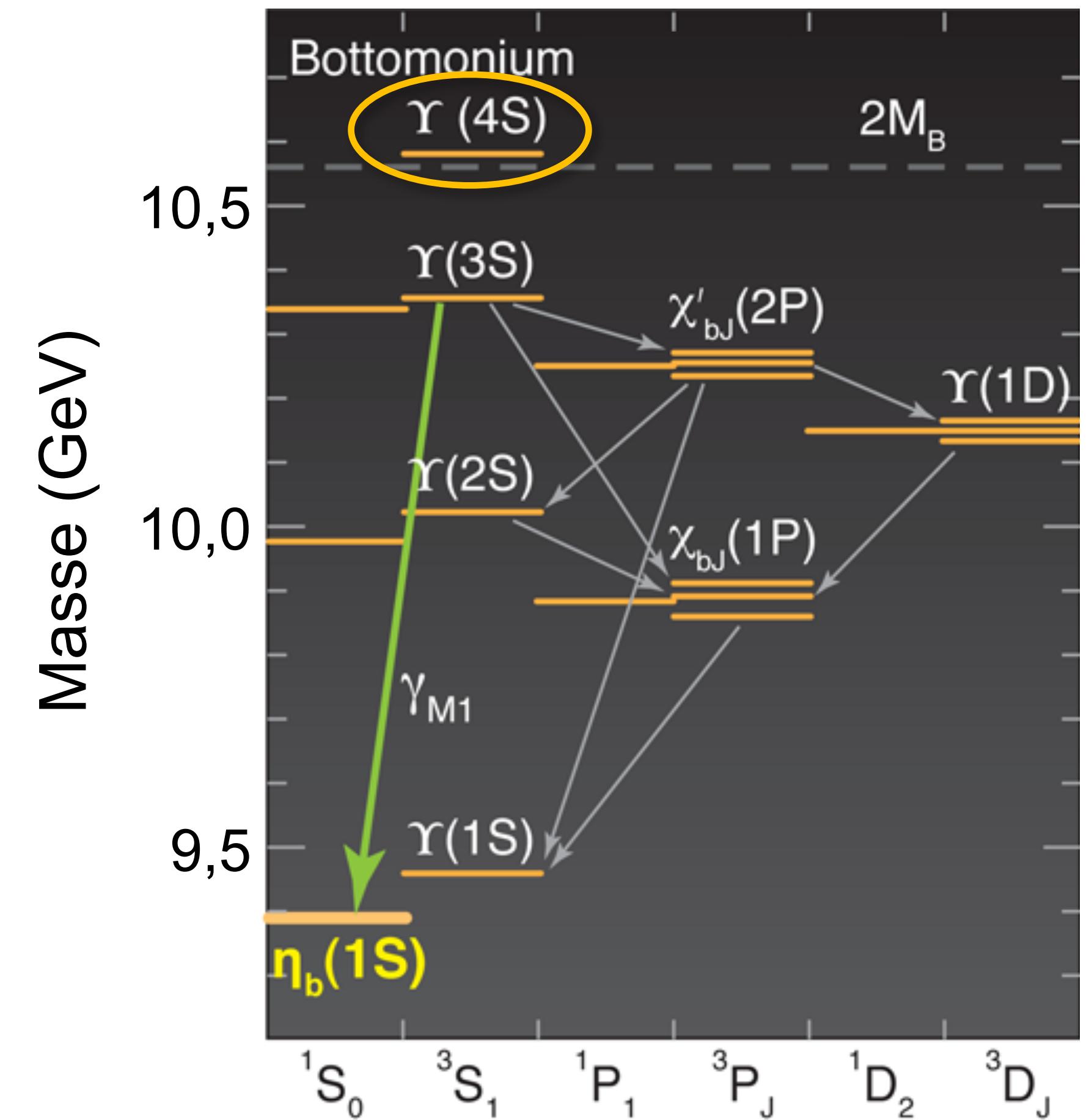
„blinde“
Analysen*



für die Entdeckung eines
neuen Effekts wird eine
Signifikanz $> 5.0 \sigma$ gefordert

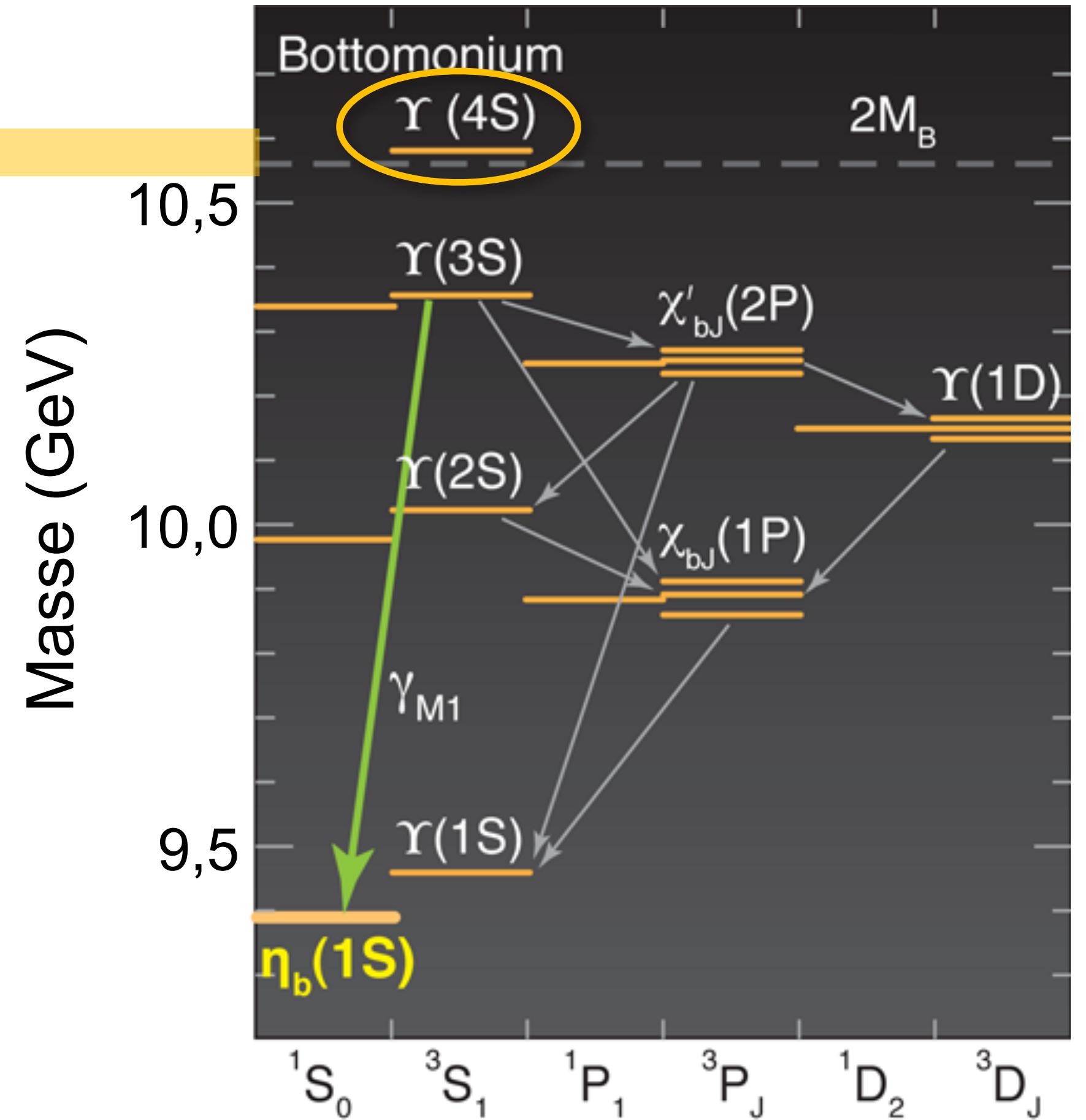
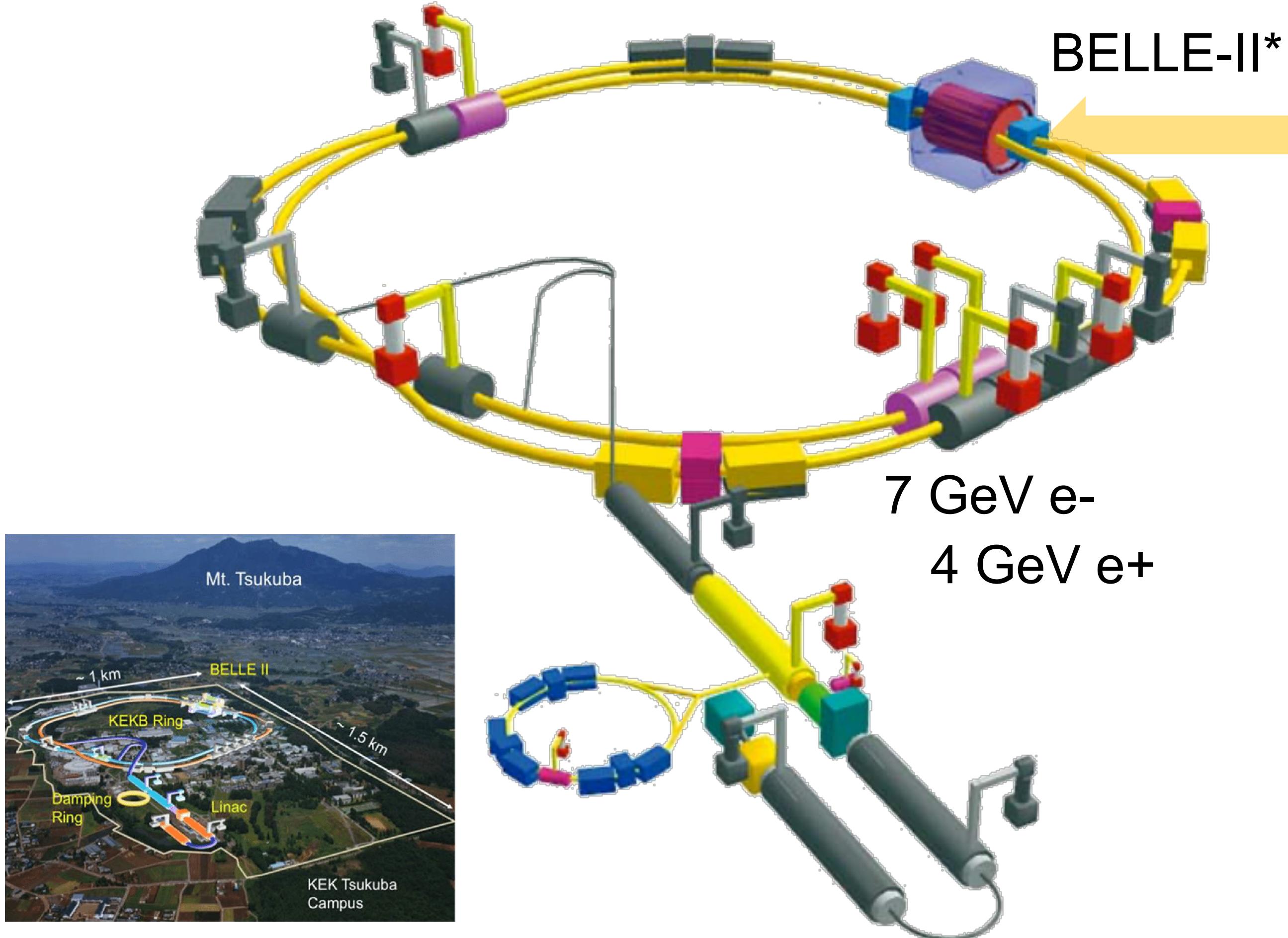
Bottom-Quark und B-Factories

- **Bottomonium-Spektroskopie und der $\Upsilon(4S)$ Zustand**
 - ähnliche Spektroskopie wie beim Charmonium
 - die **kinematische Schwelle** für den Zerfall in Mesonen mit Bottom-Quarks liegt bei **10,558 GeV**
 - $\Upsilon(4S)$ Resonanz bei **10,57 GeV** ideal zur Erzeugung von Mesonen mit bottom-Quarks („**B-Physik**“)



Bottom-Quark und B-Factories

- SuperKEKB – eine moderne B-Fabrik

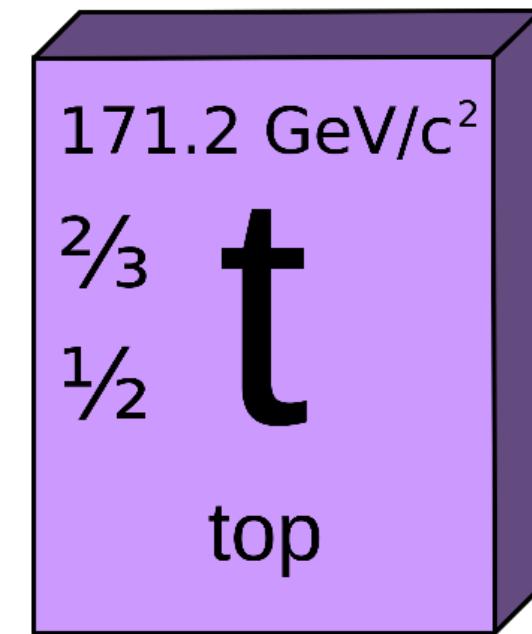


Q: KEK, SuperKEKB

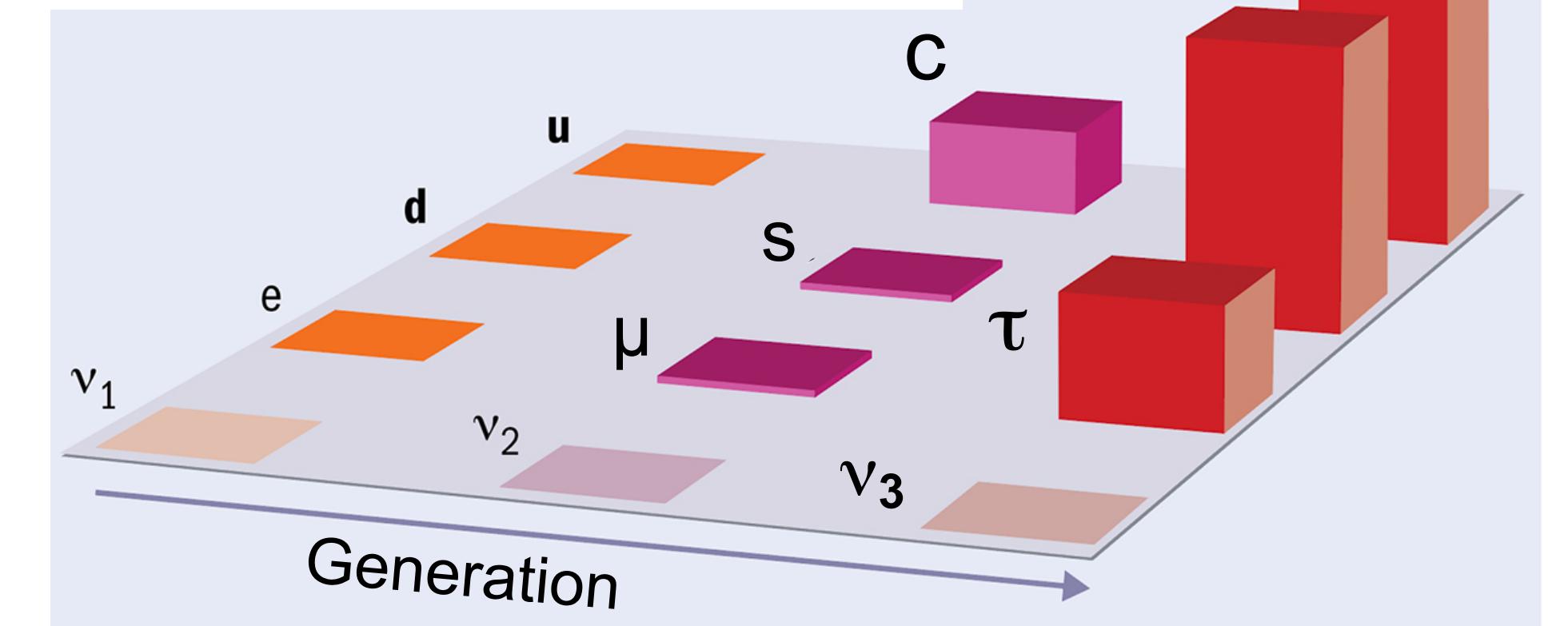
Top Quark - Eigenschaften

- **Top Quark: das schwerste bekannte Elementarteilchen**

- große Masse durch starke Kopplung an das **Higgs-Feld***
- extrem kurze Zerfallszeit über **schwache Wechselwirkung** ($t \rightarrow b$)
- Top zerfällt bevor es über die starke Wechselwirkung mit Gluonen interagiert ($\sim 10^{-23}$ s), daher **kein „Topomonium“**

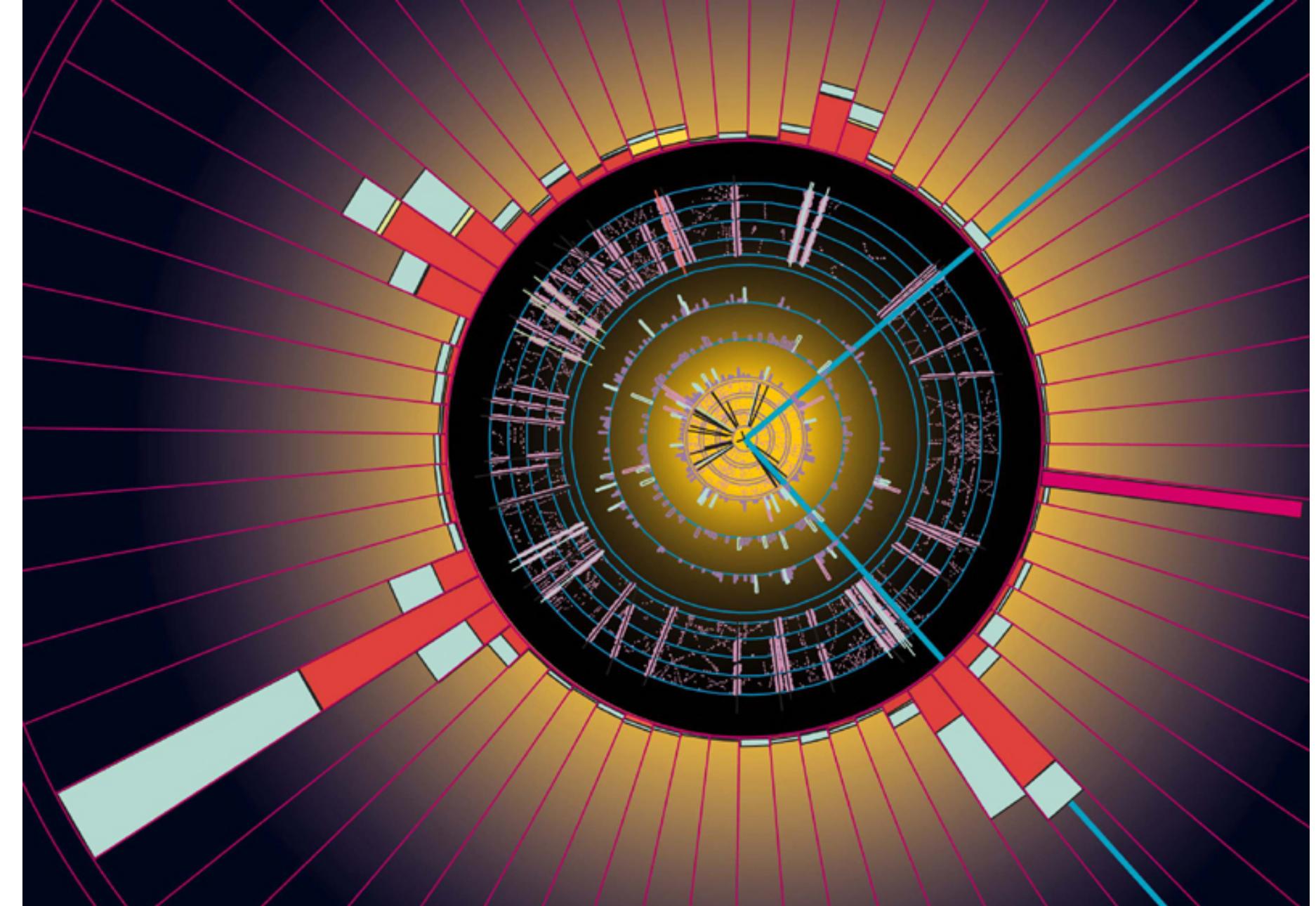
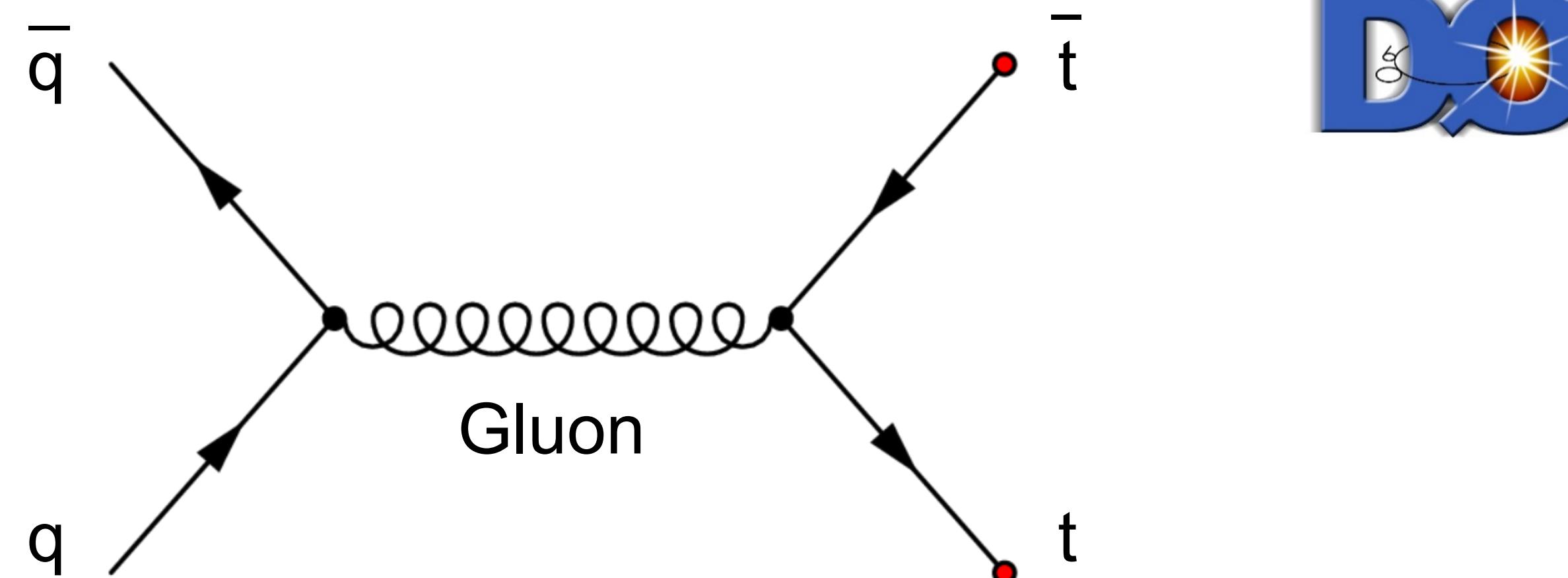


Eigenschaften des top-Quarks	
Masse (GeV)	$172,76 \pm 0,3$
Lebensdauer τ (s)	$4,2 \cdot 10^{-25}$
Zerfall (schwache Ww.)	$t \rightarrow b + W^+$



Top Quark – erster Nachweis über Paarproduktion

- Erster Nachweis am Fermilab über Top-Anti-Top Paare (1995)
 - die beiden Experimente CDF und DØ am Tevatron beobachten **Top-Antitop-Paare** über hadronische Erzeugung

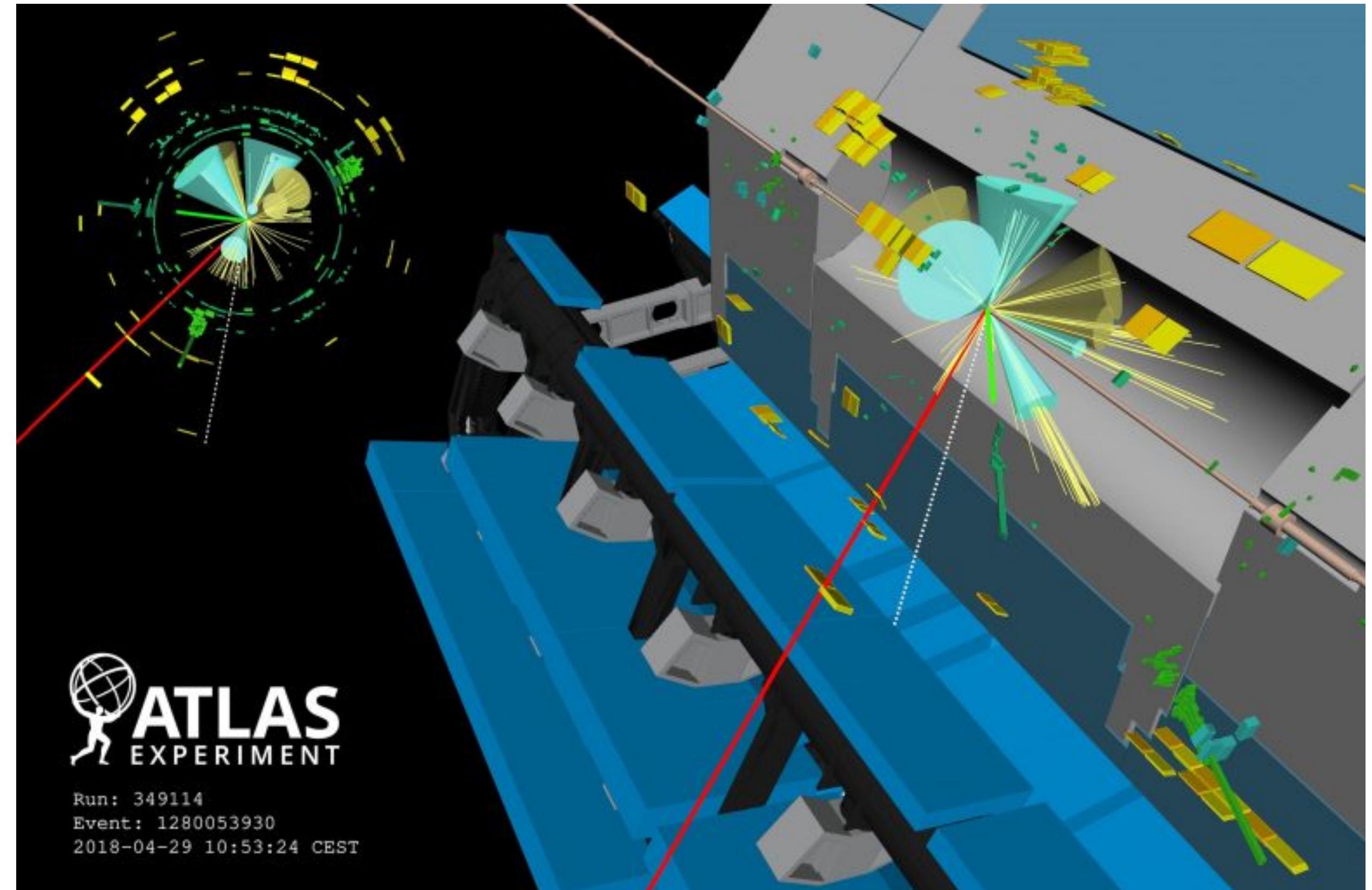
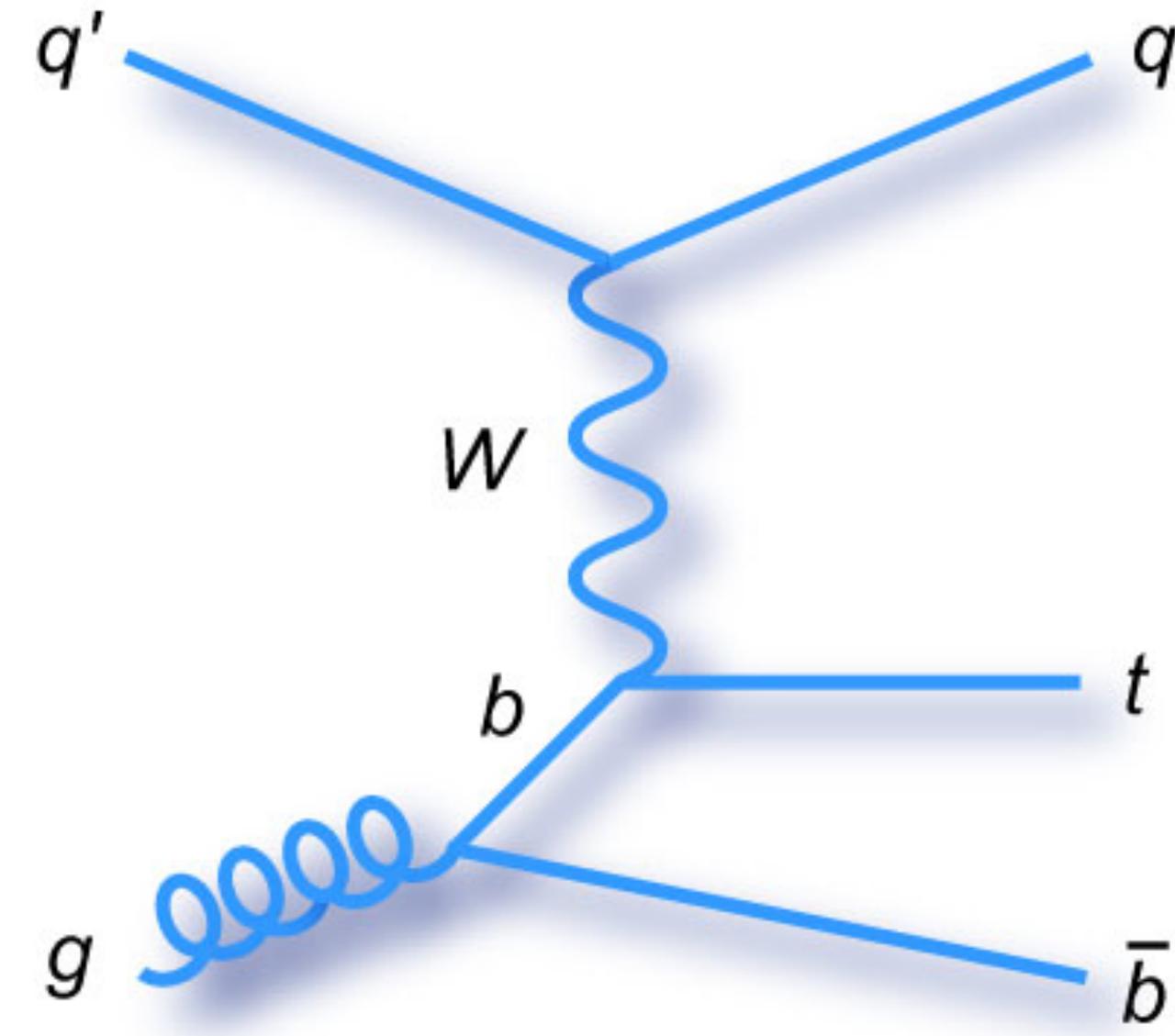


Top Quark – moderne Untersuchungen

- Top-Quark Analysen auch am LHC

- einzelne Top-Quark (2009)

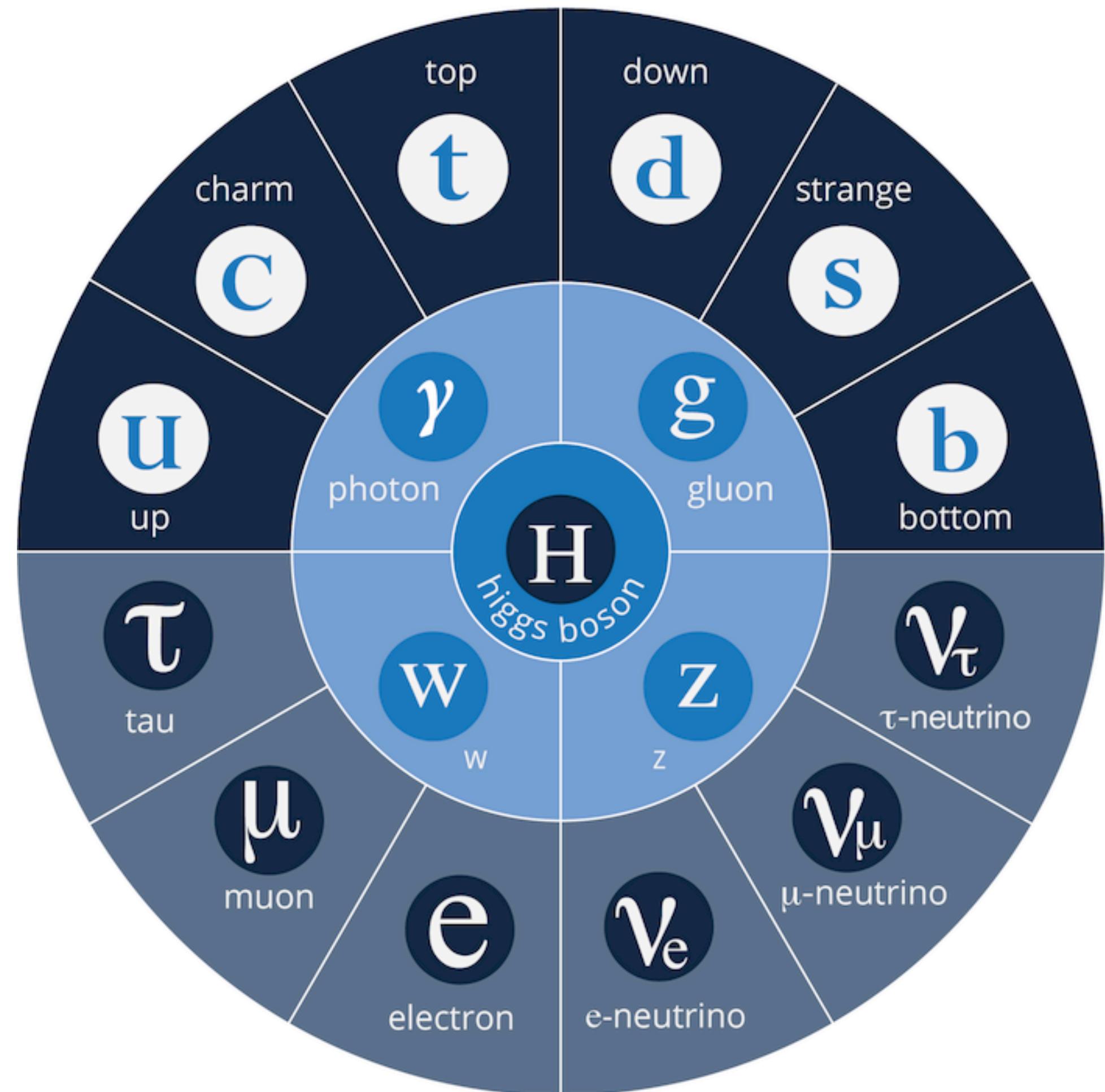
Erzeugung einzelner Tops
über schwache Wechselwirkung



ATLAS/CMS: Ereignis mit 4 Top-Quarks (2020)

■ 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



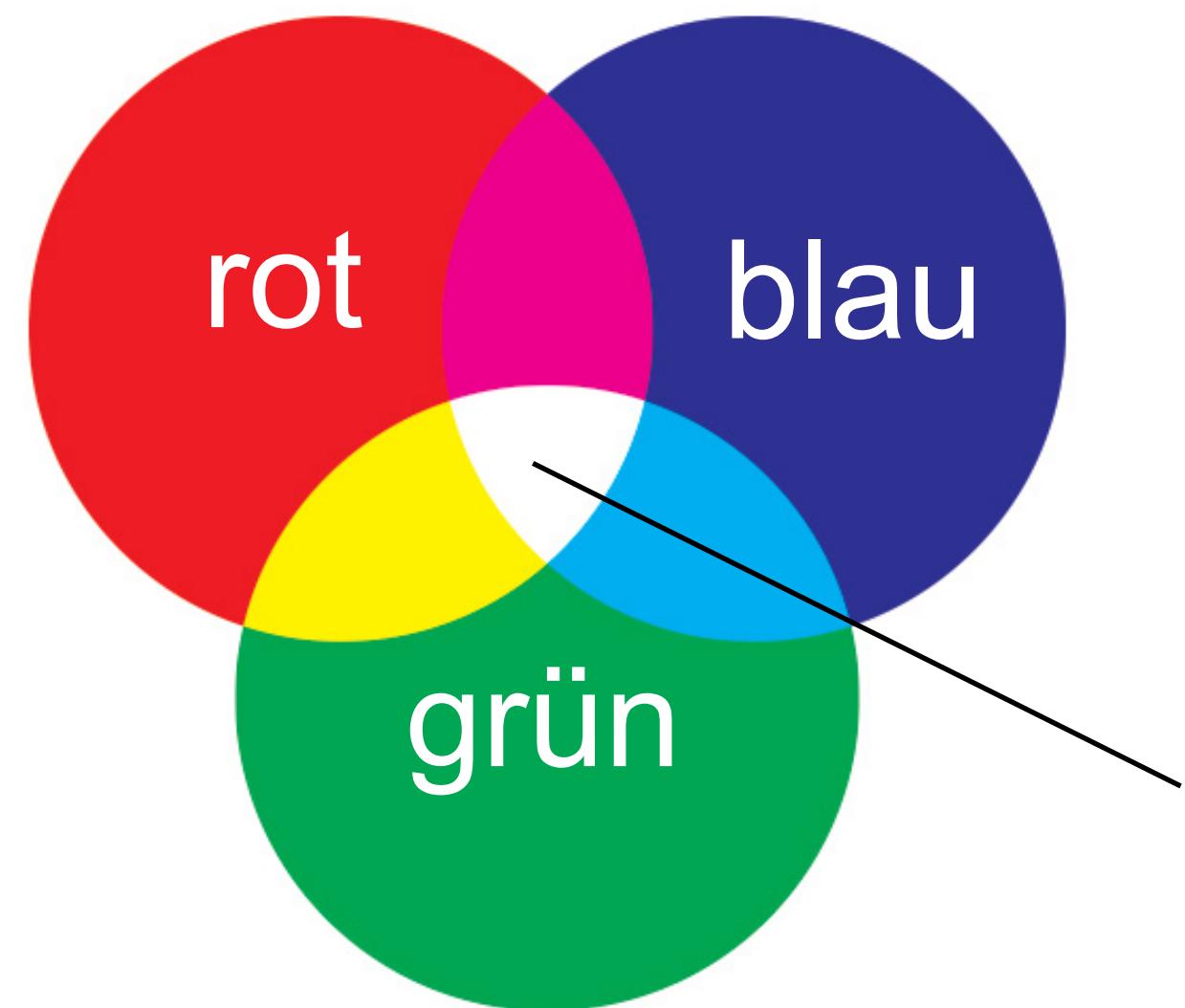
Farbe als Freiheitsgrad in der QCD

- **Farbladung von Quarks**

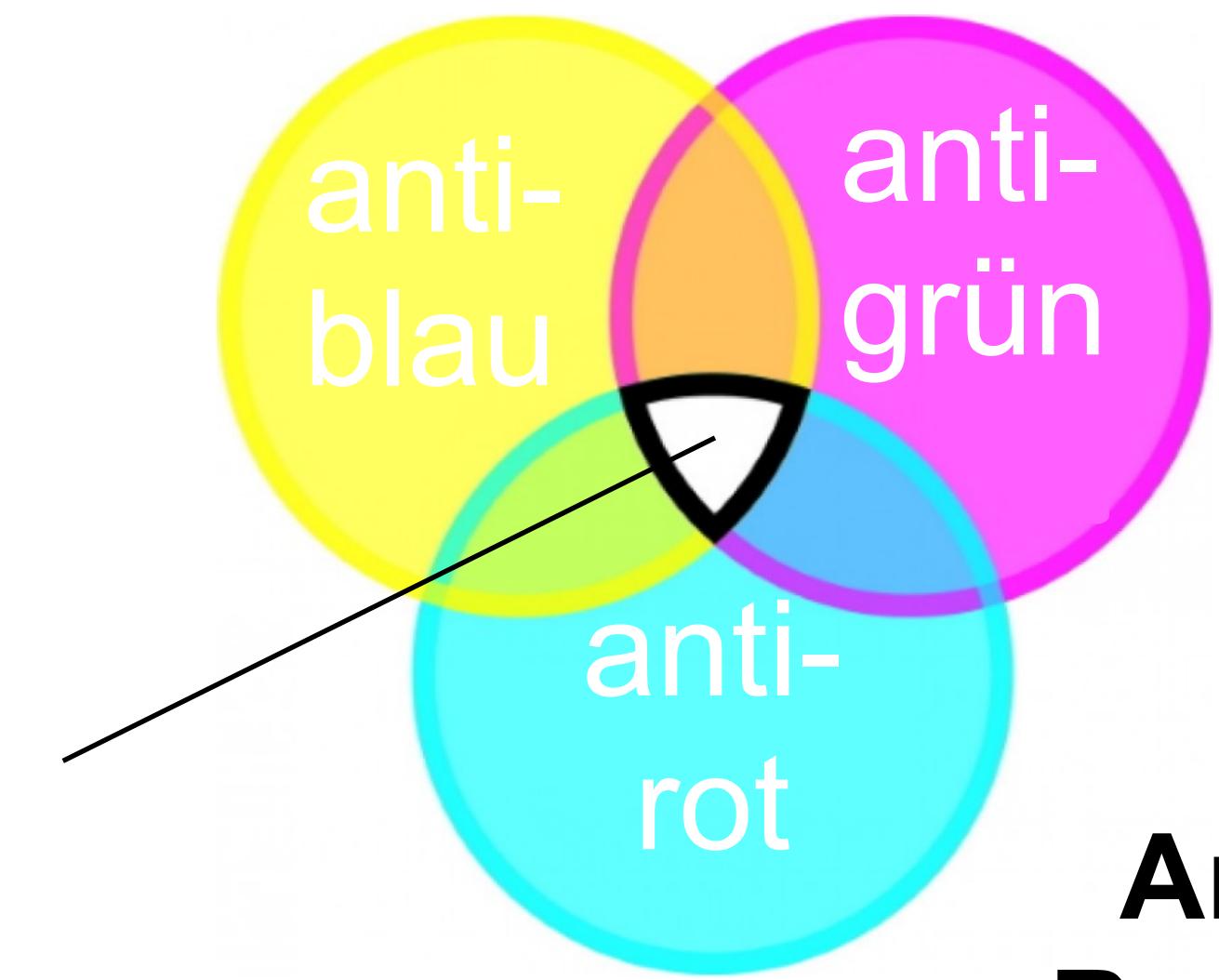
- Quark-Farbladungen: r (**rot**), g (**grün**), b (**blau**)

- Antiquarks mit Ladungen: **anti-rot, anti-grün, anti-blau**

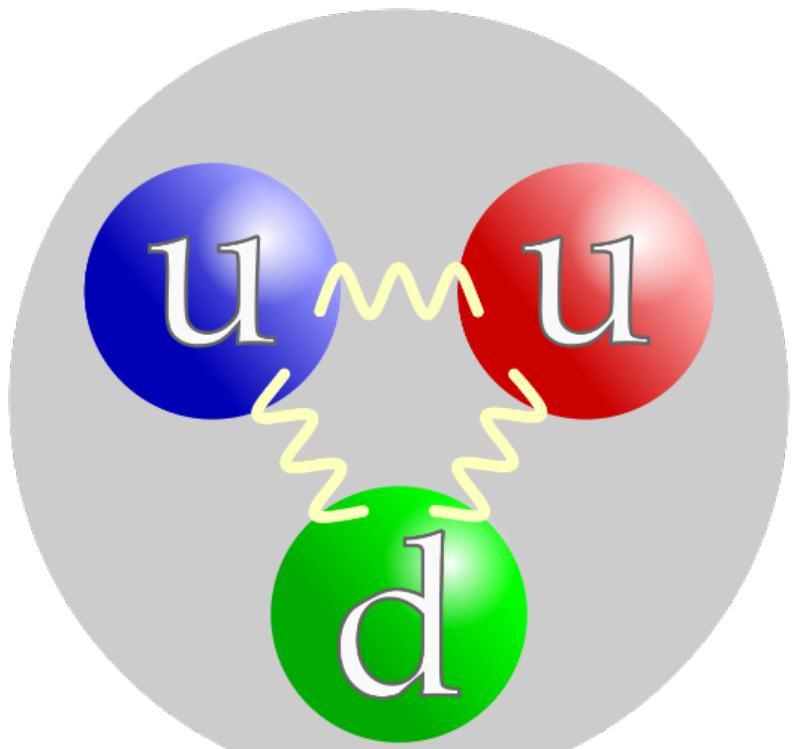
Baryon



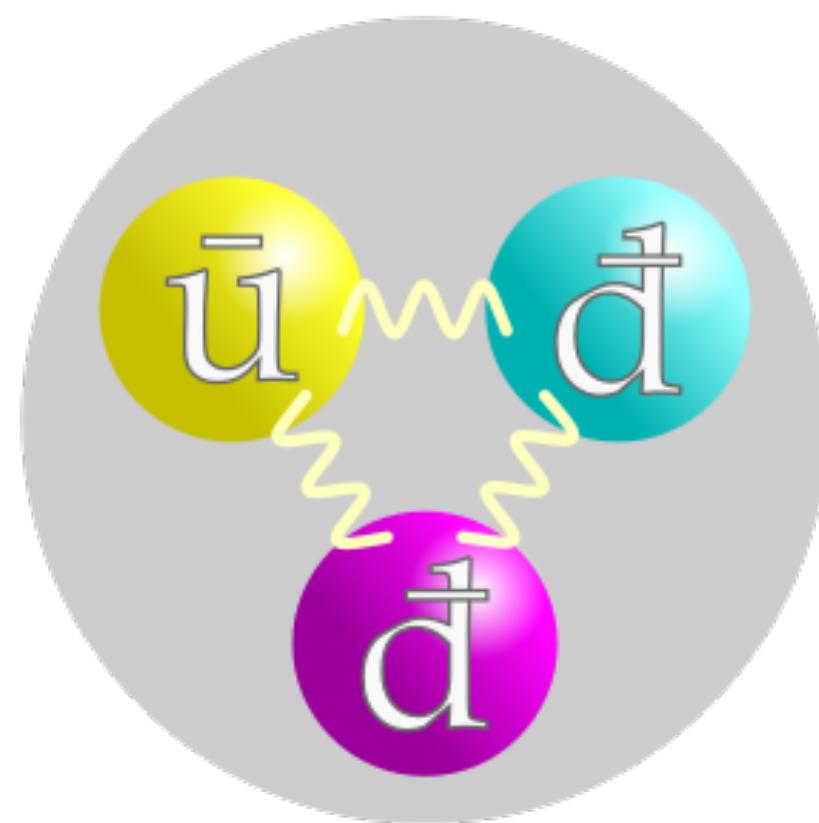
farb-
neutral



**Anti-
Baryon**



Proton



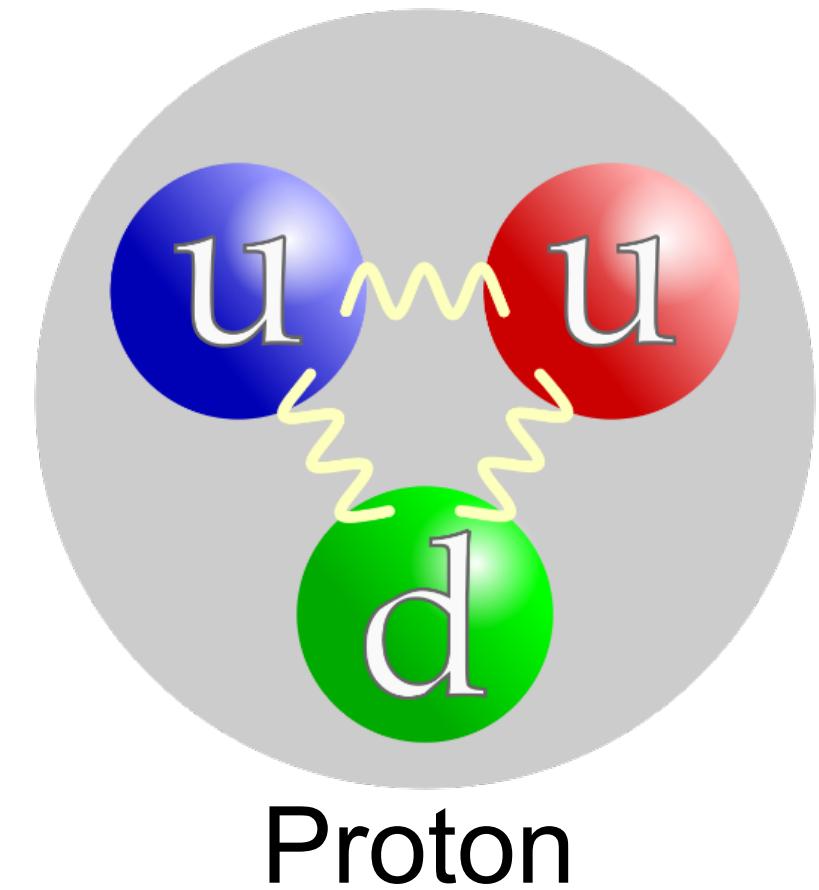
Anti-
Neutron

Farbe als Freiheitsgrad in der QCD

- **Farbladung von Quarks**

- Quark-Farbladungen: r (**rot**), g (**grün**), b (**blau**)

- Antiquarks mit Ladungen: **anti-rot**, **anti-grün**, **anti-blau**

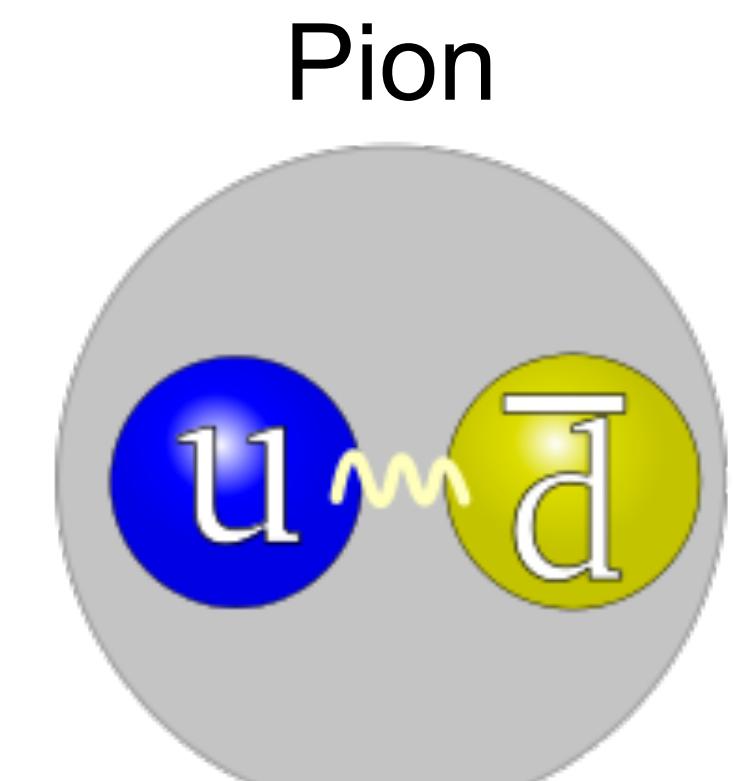


- **Farbneutralität von Hadronen**

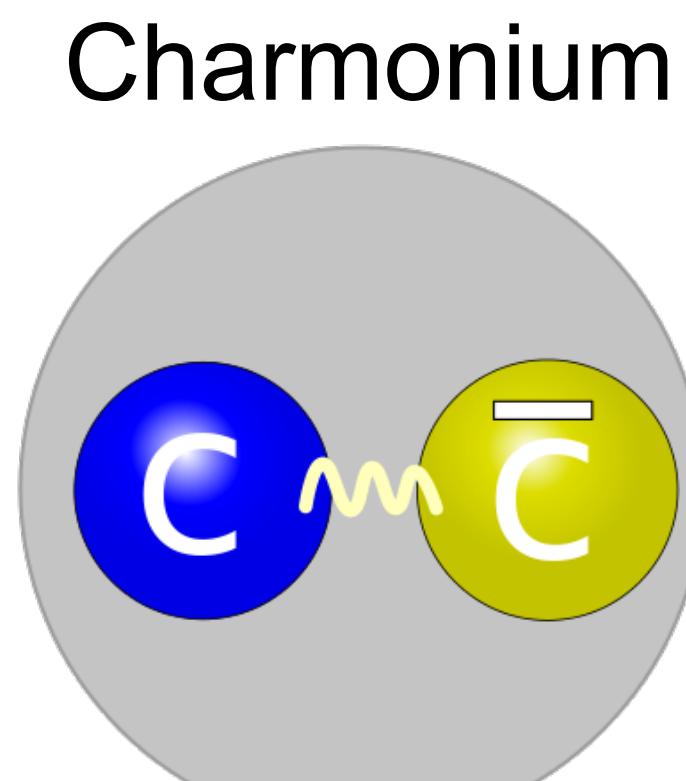
- Gruppentheorie: SU(3)

- **Baryonen**: qqq ist **immer** farbneutral

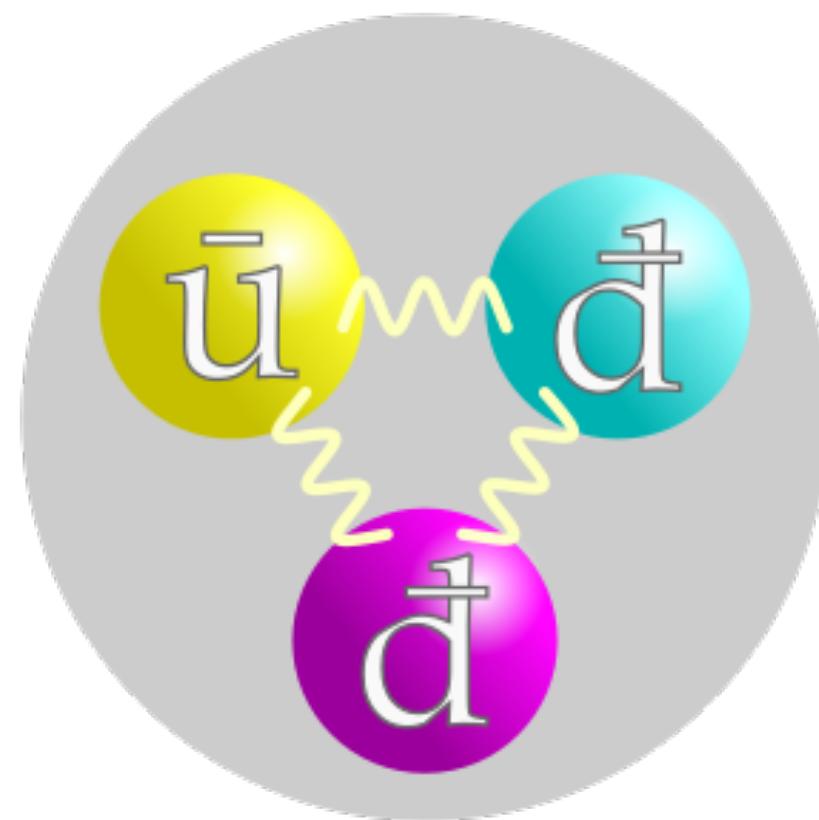
- **Mesonen**: $q\bar{q}$ ist **immer** farbneutral



blau & anti-blau



blau & anti-blau



Farbe als Freiheitsgrad in der QCD

- **Farbladung von Quarks**

- Quark-Farbladungen: r (**rot**), g (**grün**), b (**blau**)

- Antiquarks mit Ladungen: **anti-rot**, **anti-grün**, **anti-blau**

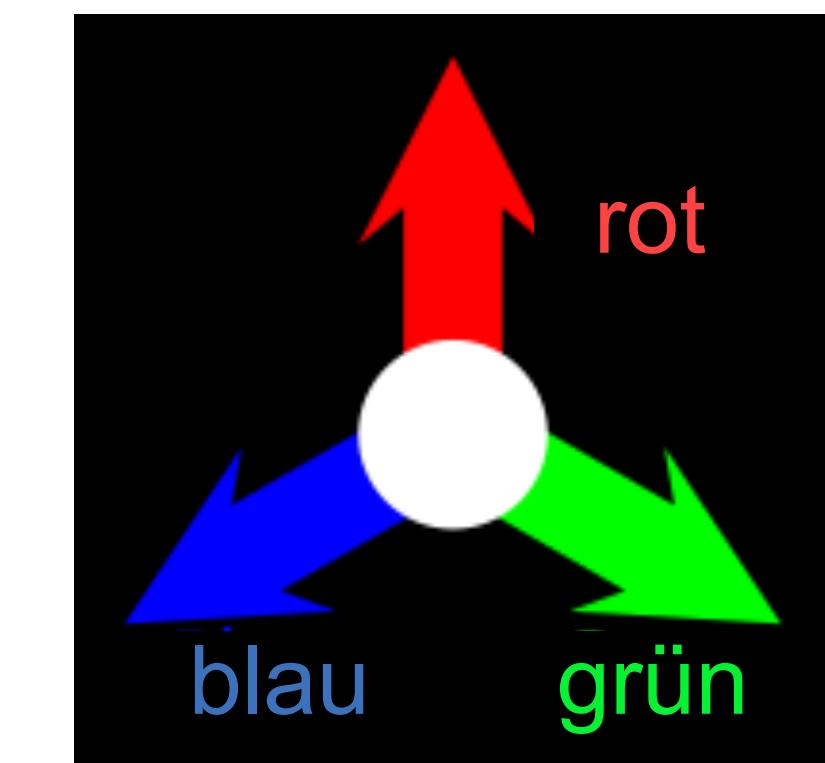
- **Farbneutralität von Hadronen**

- Gruppentheorie: SU(3)

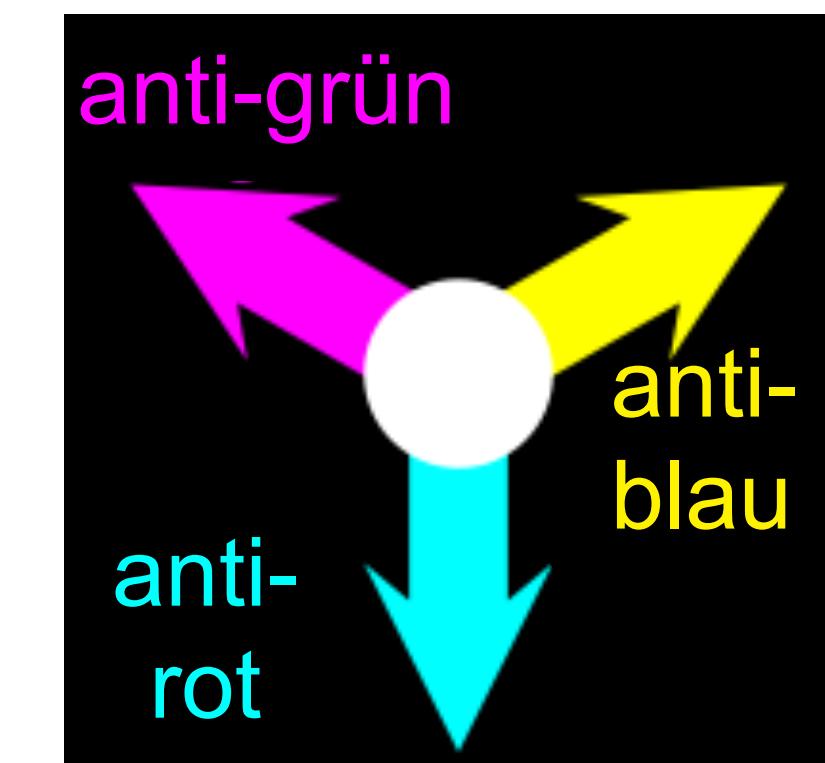
- **Baryonen**: qqq ist immer farbneutral

- **Mesonen**: $q\bar{q}$ ist immer farbneutral

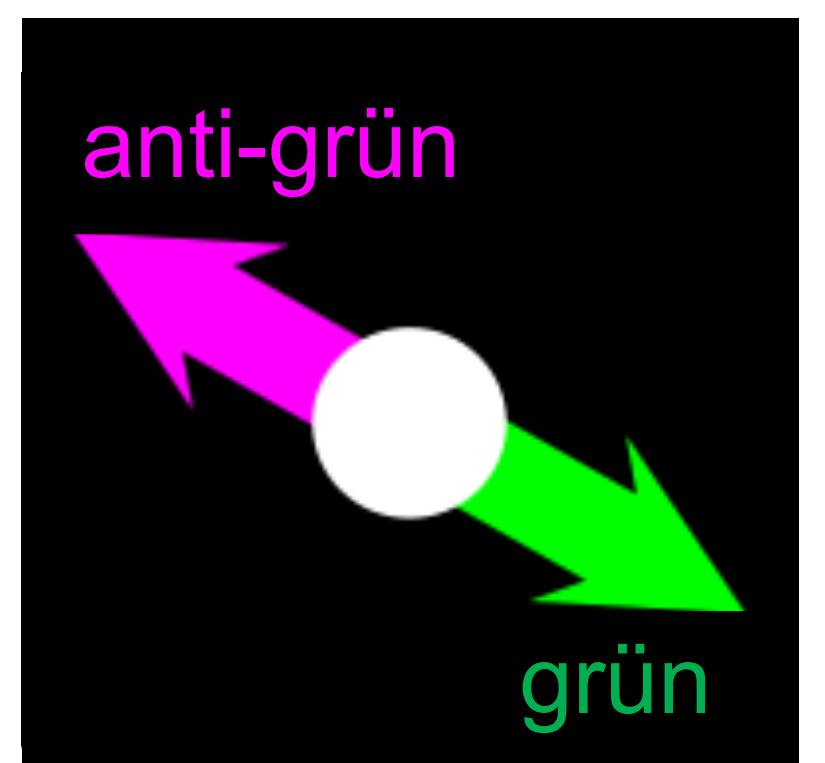
Baryon qqq



Antibaryon



Meson $q\bar{q}$



Farbe und verallgemeinertes Pauli-Prinzip

- **Baryonen als Farb-Singulett-Zustände**

- Verallgemeinertes Pauli-Prinzip:

die Gesamtwellenfunktion eines Baryons muss unter der Berücksichtigung von allen Quark-Freiheitsgraden antisymmetrisch sein

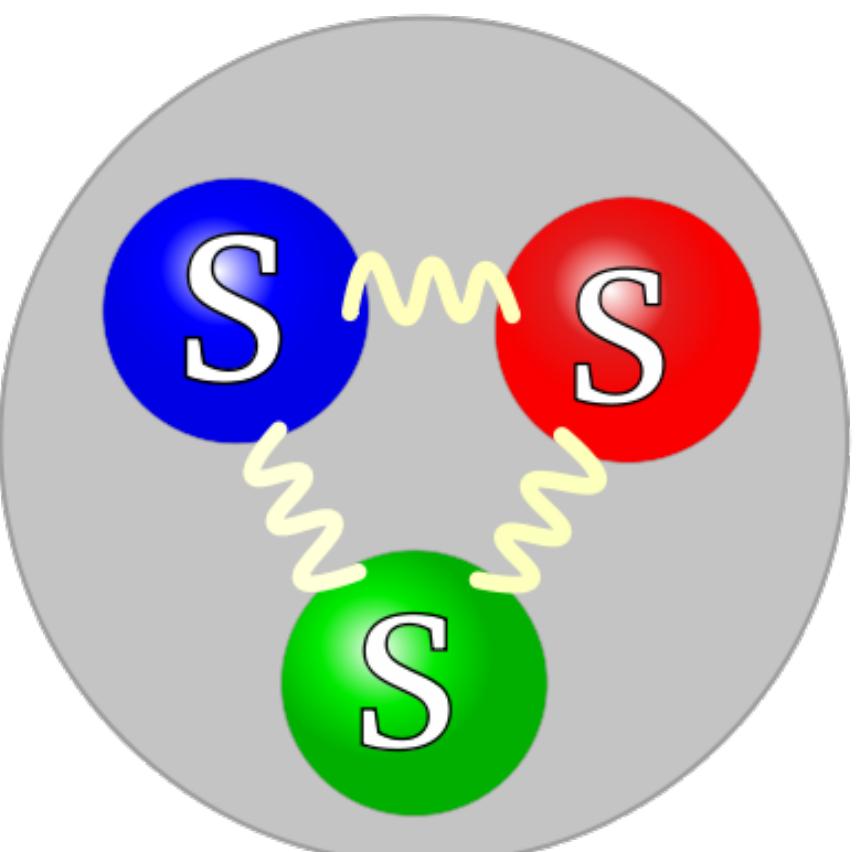
- **Beispiele: die Resonanzen Δ^{++} und Ω^-**

- ohne die Existenz des Farb-Freiheitsgrades verletzen die beiden Resonanzen Ω^- (sss) und Δ^{++} (uuu) das Pauli-Prinzip

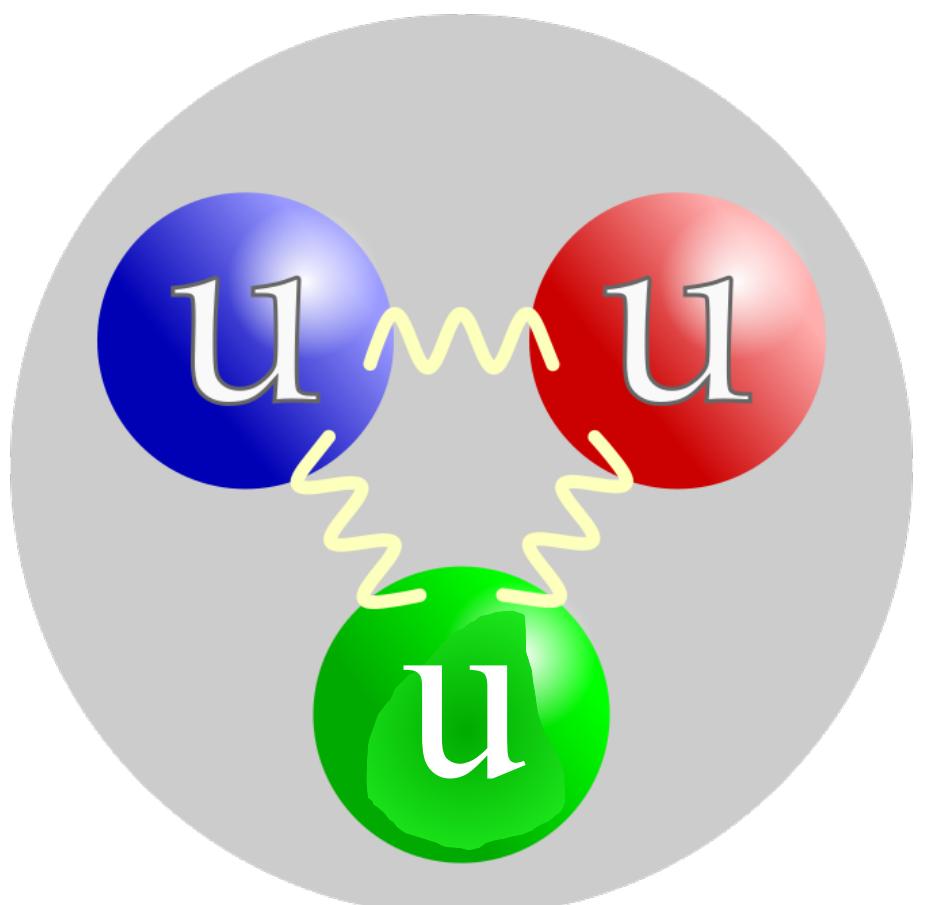


Pau↑↓

Resonanz Ω^-



Resonanz Δ^{++}



Farbe und verallgemeinertes Pauli-Prinzip

- Baryonen-Resonanzen und Pauli-Prinzip**

$$\Delta^{++} = |uuu\rangle \cdot |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle \cdot |\ell=0\rangle$$

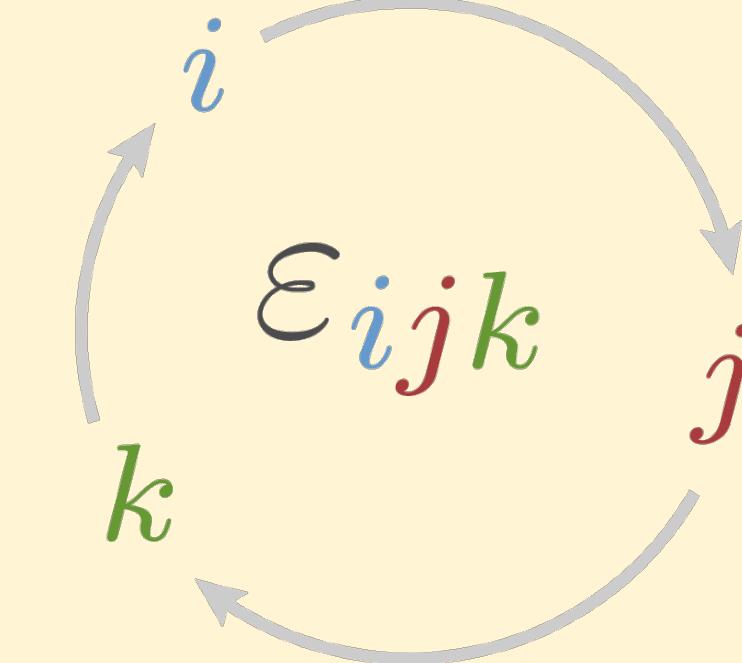
Flavour Spin Orbital- ℓ

symmetrische Gesamtwellenfunktion

$$\Delta^{++} = |uuu\rangle \cdot |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle \cdot |\ell=0\rangle \cdot \left| \frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon^{ijk} q_i q_j q_k \right\rangle$$

Farbfreiheitsgrade

anti-symmetrische Gesamtwellenfunktion



Levi-Civita Symbol ϵ

$\epsilon_{ijk} = +1$ für
gerade Permutation

$\epsilon_{ijk} = -1$ für
ungerade Permutation

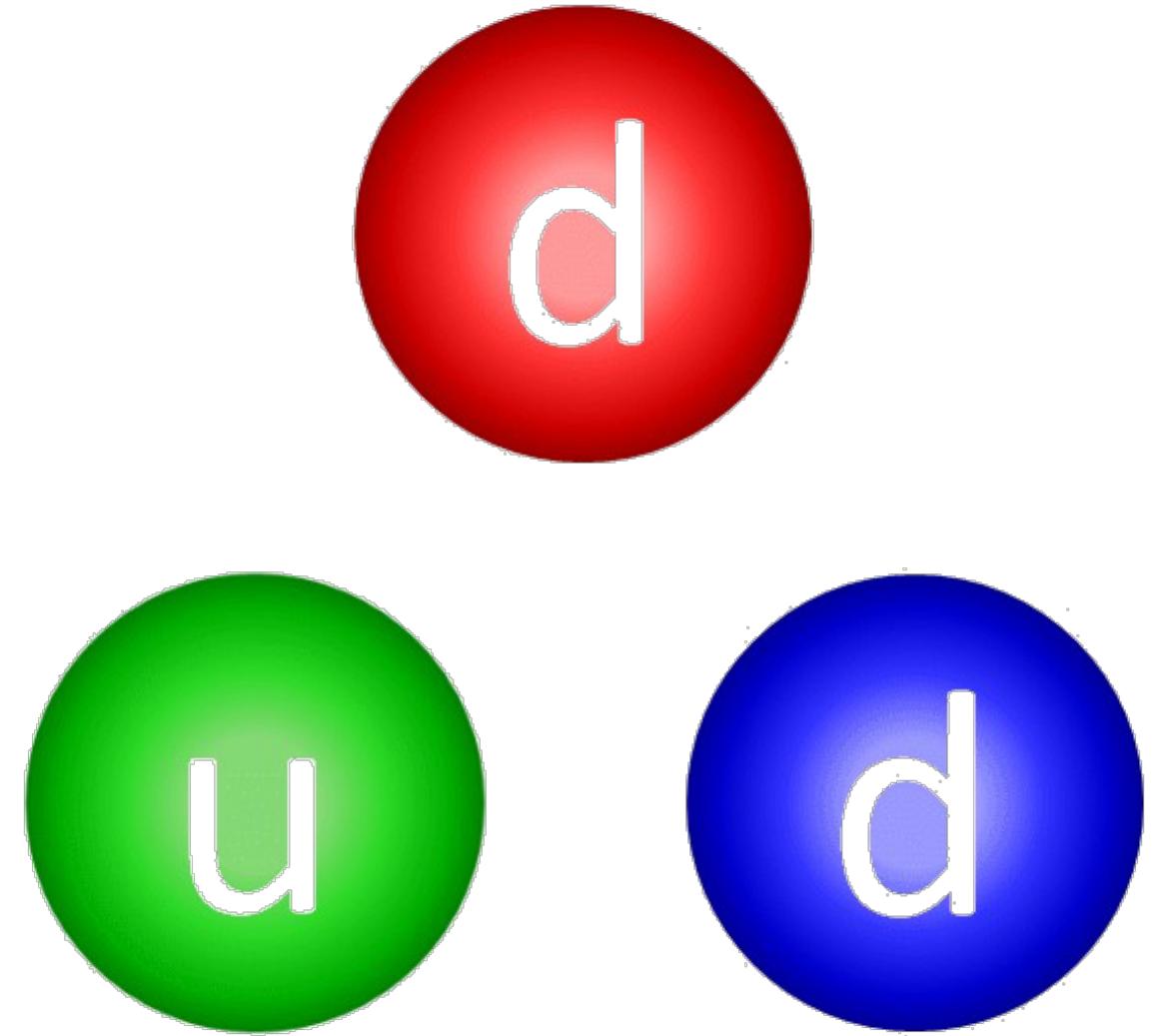
$\epsilon_{ijk} = 0$ für
2 gleiche Indices (Farben)

Summation über die
Farbindices i, j, k von 1 bis 3

Farbe – allgemeine Eigenschaften

- **Farbladung in der QCD**

- Teilchen mit Farbladung unterliegen der QCD und damit der **starken Wechselwirkung**
- Farbladung ist in allen QCD Prozessen erhalten
- Farbladung der Quarks/Antiquarks führt zu **gebundenen Zuständen**
- gebundene Quarks ändern ständig ihre Farbe durch **Gluon-Austausch-Prozesse**



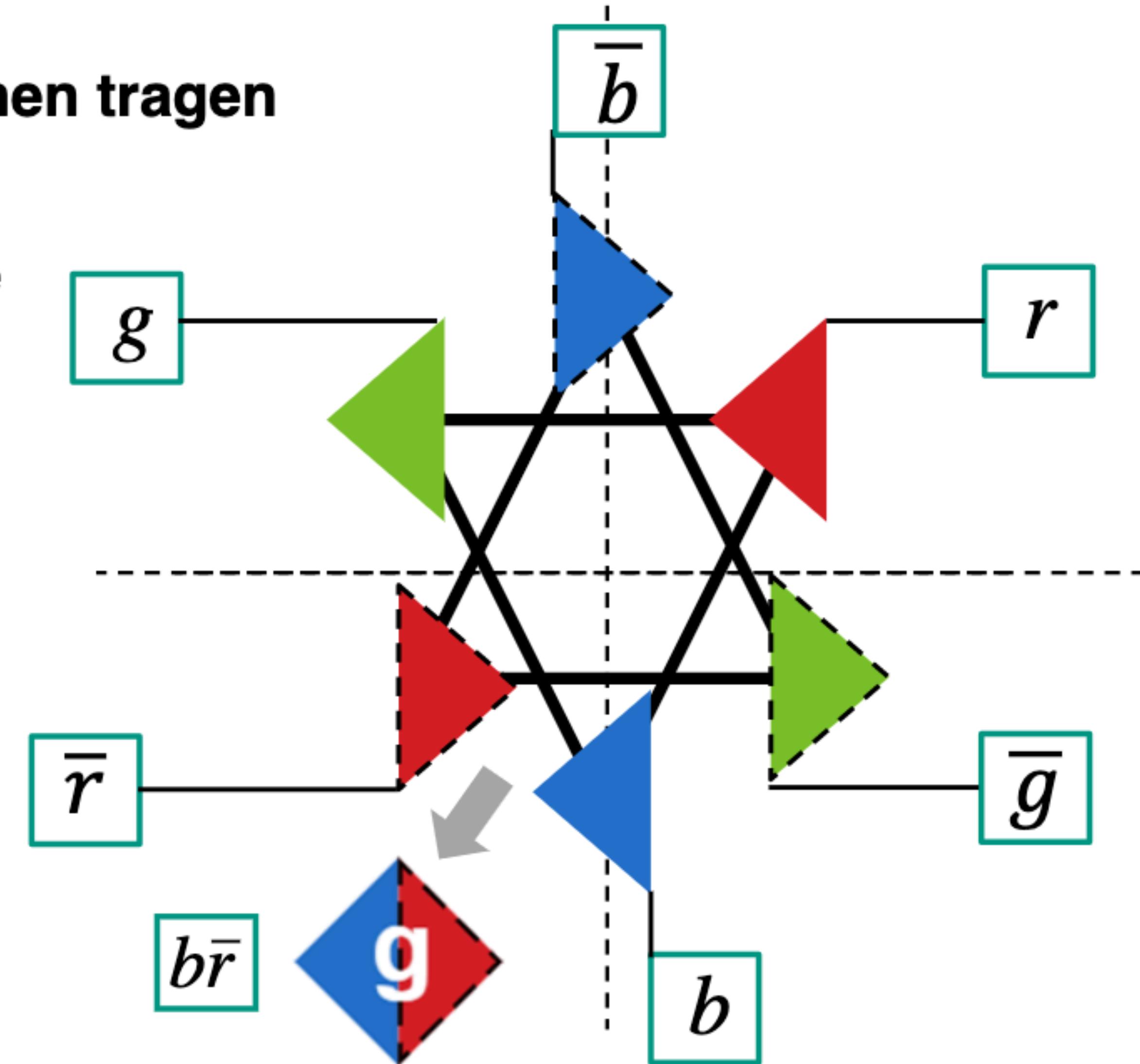
Katzen

- Enja



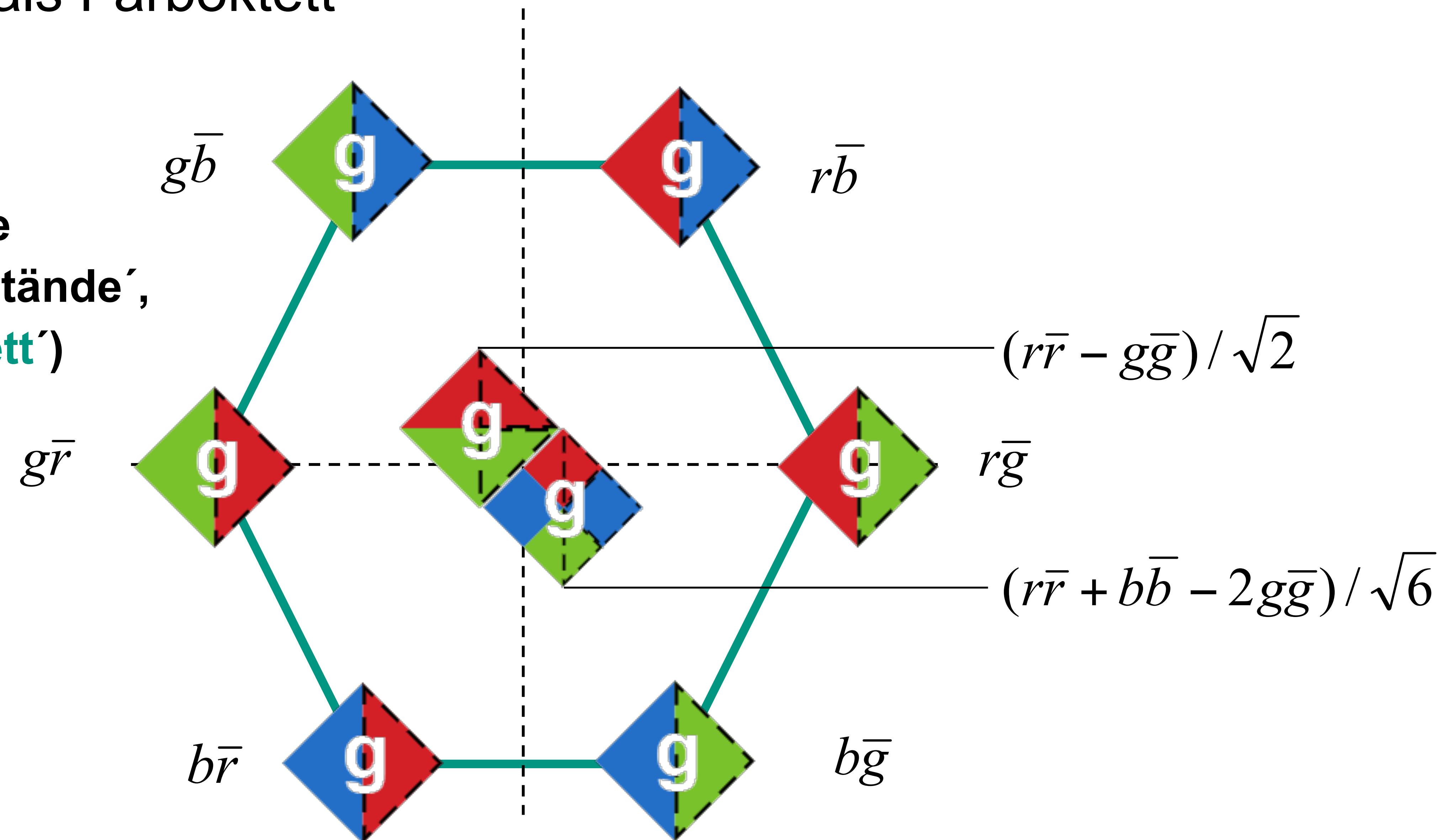
Gluonen als Farboktett

- QCD: Gluonen tragen
 - Farbe
 - Anti-Farbe



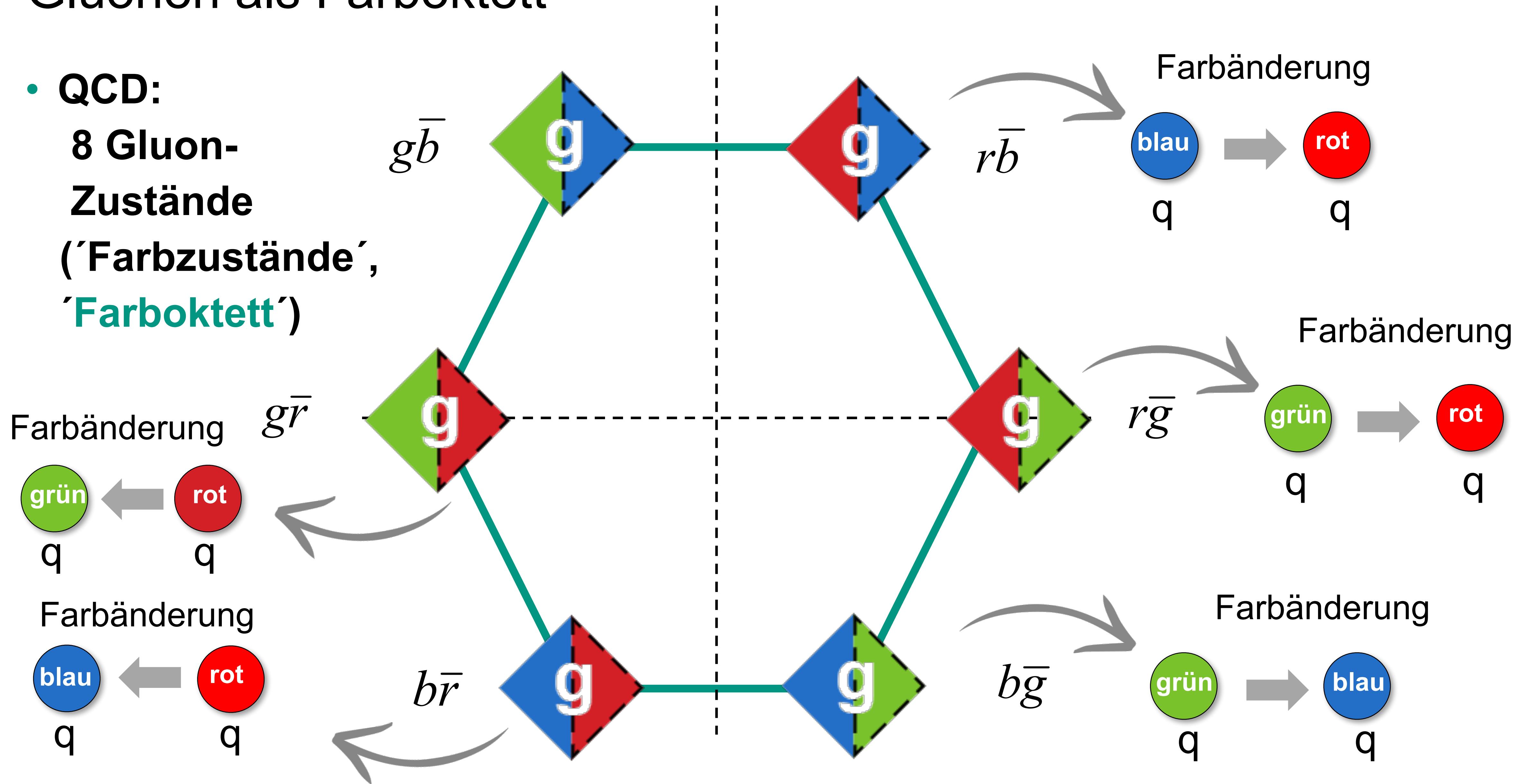
Gluonen als Farboktett

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



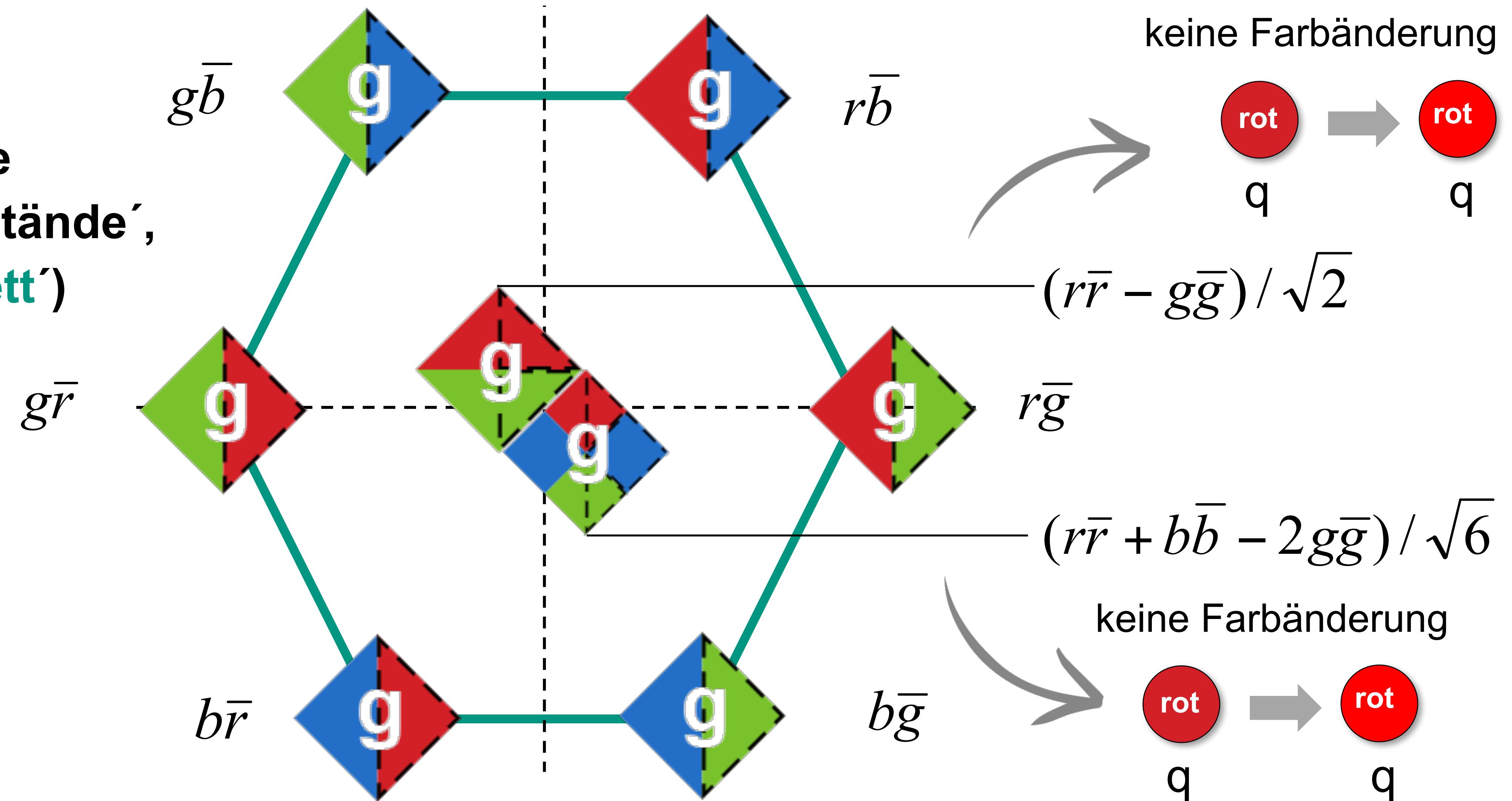
Gluonen als Farboktett

- QCD:
- 8 Gluon-Zustände ('Farbzustände', 'Farboktett')



Gluonen als Farboktett: 2 farbneutrale Gluonen

- QCD:
8 Gluon-Zustände
 ('Farbzustände',
 'Farboktett')



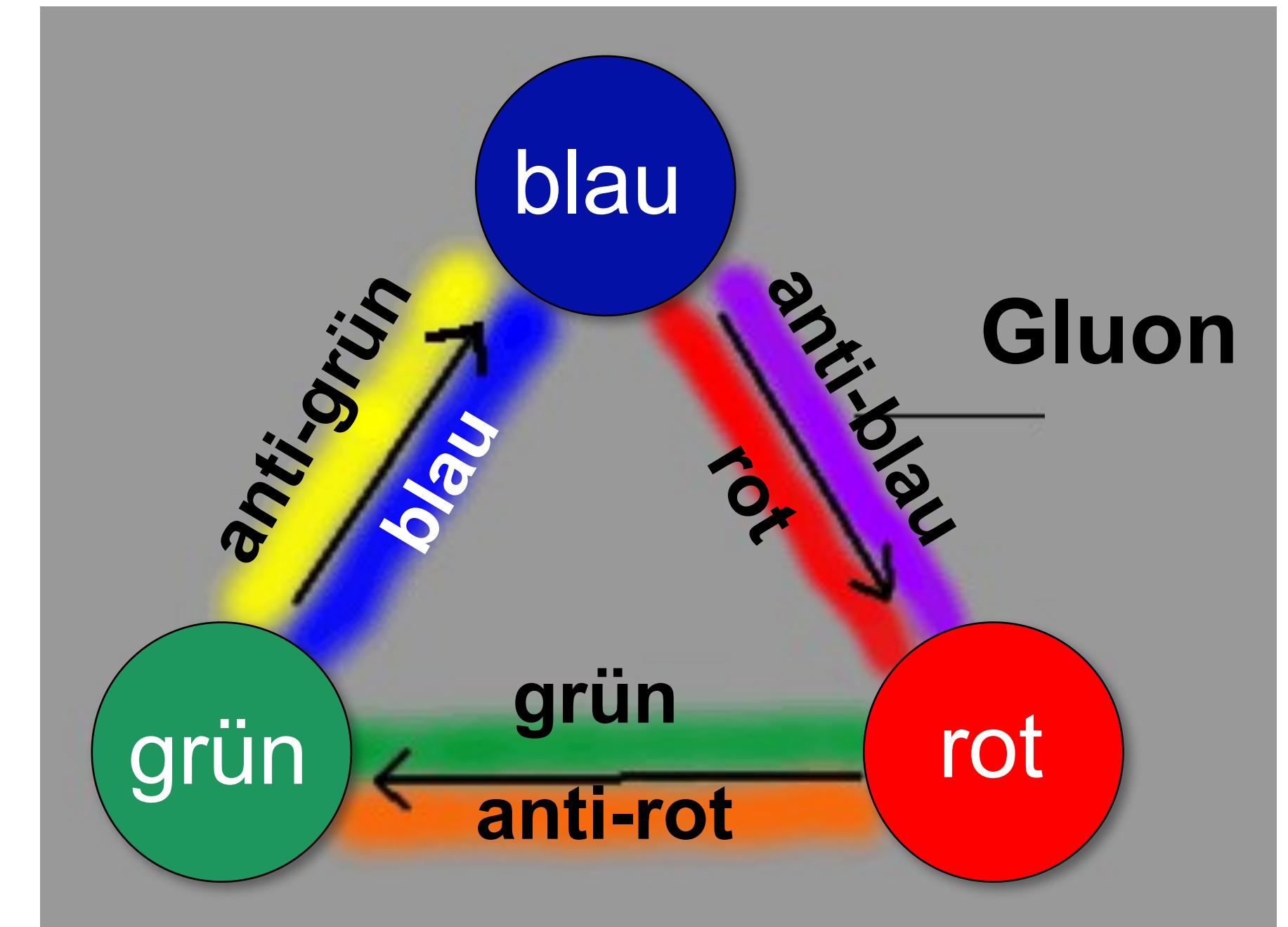
Gluonen

- QCD: 8 Gluonzustände ('Farbzustände', 'Farboktett')

- alle 8 Gluon Zustände sind linear unabhängig
- jedes Gluon = **masseloses Spin 1 – Boson**
- jedes Gluon trägt eine **Farbe + Anti-Farbe**

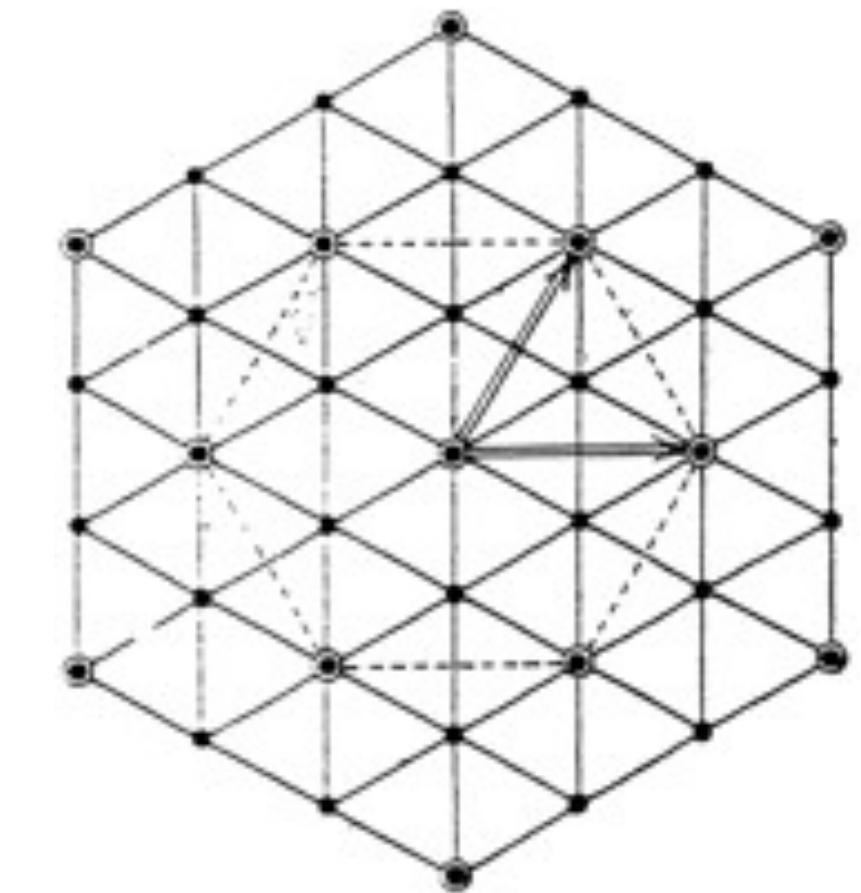
- **farbändernde**
Gluonen

- 6 farbändernde Gluonen
- 2 farbneutrale Kombinationen
keine Änderung der Quark-Farbe



Gluonen & SU(3)

- QCD: 8 Gluonzustände ('Farbzustände', 'Farboktett')
 - alle 8 Gluon Zustände sind linear unabhängig
 - jedes Gluon = **masseloses Spin 1 – Boson**
 - jedes Gluon trägt eine **Farbe + Anti-Farbe**
- Farbe und die SU(3) Symmetrie-Gruppe
 - Farbladungen spannen einen 3-dim. **Farbladungsraum** auf
 - SU(3) – Eichgruppe wird durch 8 Parameter beschrieben – **8 Gluonen**



QCD:
 Spezielle Unitäre
 Gruppe SU(3)
 [Lie-Gruppe]

Gluonen

- QCD: 8 Gluonzustände ('Farbzustände', 'Farboktett')

- auch in anderen **Linearkombinationen** darstellbar

$$-i(r\bar{b} - b\bar{r})/\sqrt{2}$$

$$-i(r\bar{g} - g\bar{r})/\sqrt{2}$$

$$-i(b\bar{g} - g\bar{b})/\sqrt{2}$$

$$(r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})/\sqrt{6}$$

$$(b\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2}$$

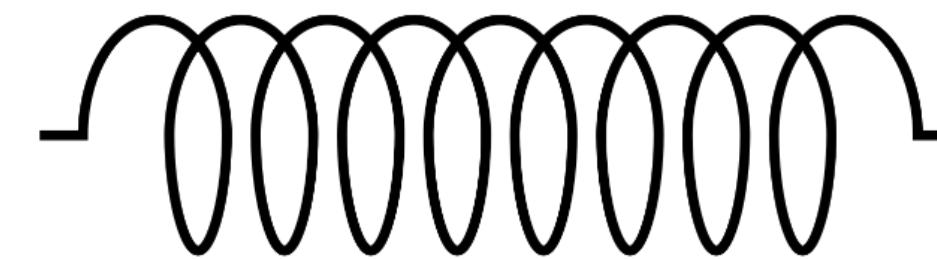
$$(r\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2}$$

$$(r\bar{r} - b\bar{b})/\sqrt{2}$$

$$(r\bar{b} + b\bar{r})/\sqrt{2}$$

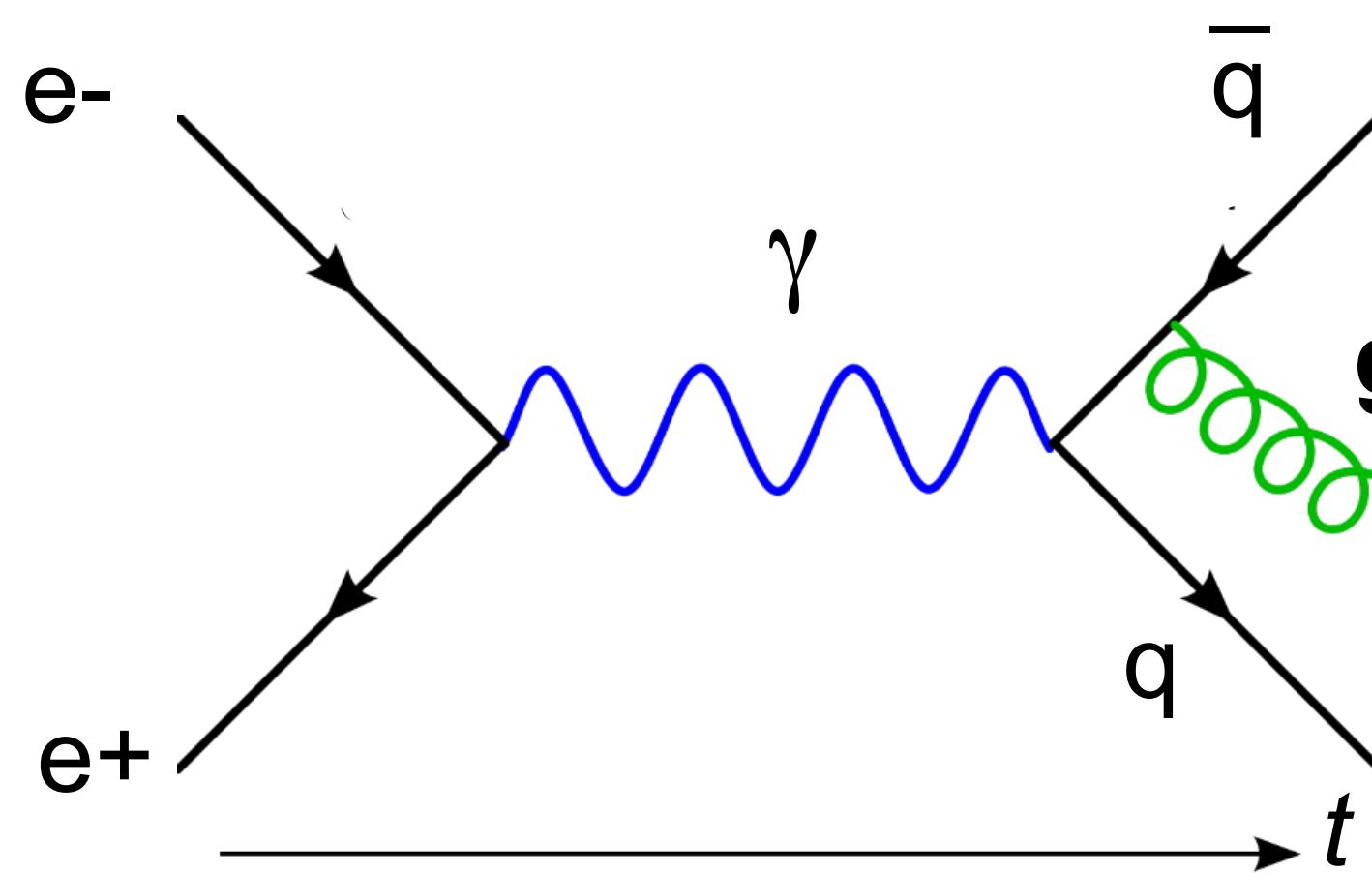
Gluonen in Feynman-Diagrammen

- **Gluon in einem Feynman-Diagramm: g**

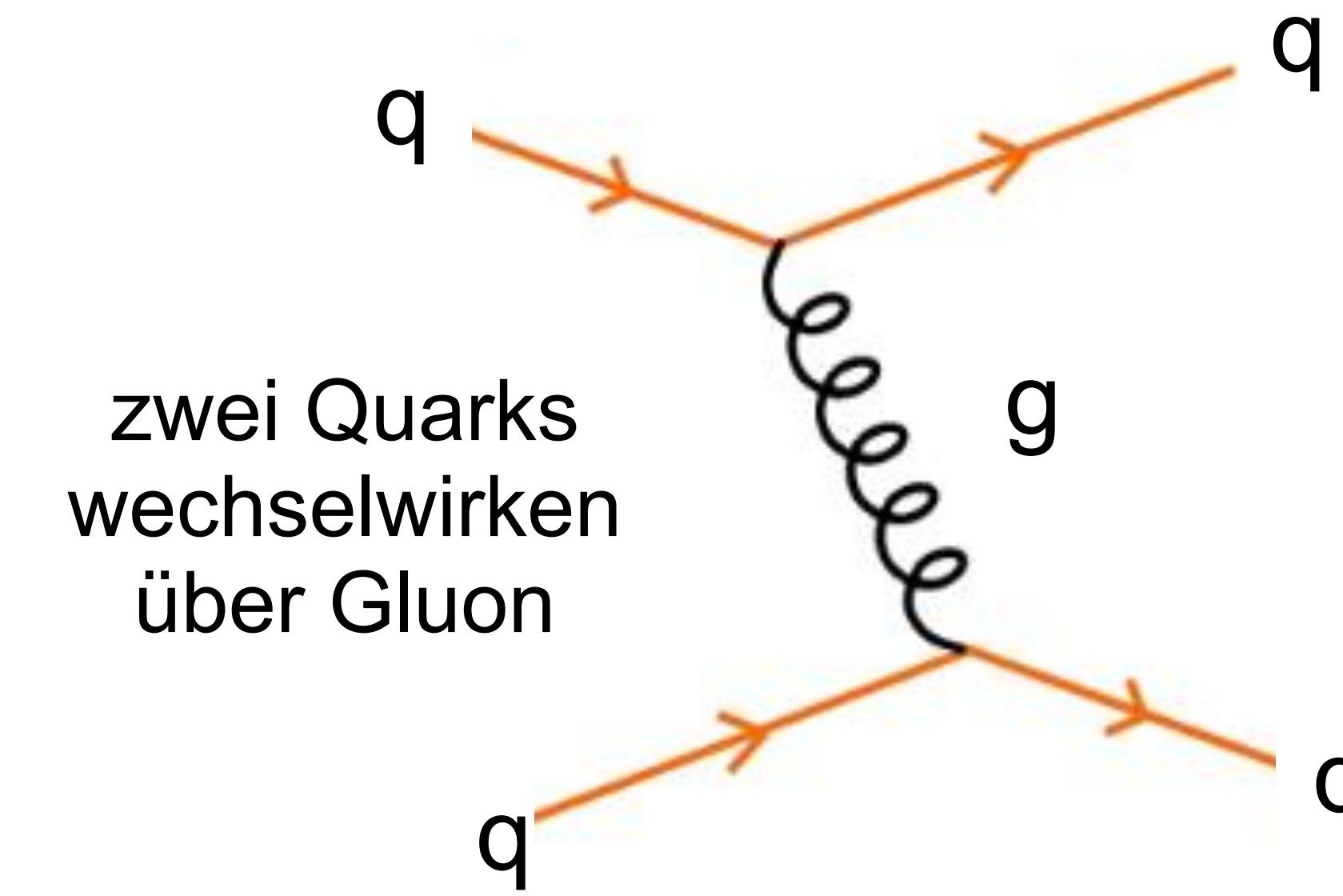


masseloses $S = 1$
Eichboson mit Farbladung

- **Gluon in einem Feynman-Diagramm: Beispiele**



Antiquark
strahlt ein
Gluon ab



zwei Quarks
wechselwirken
über Gluon

Farbe und QCD: Bindungszustände

- **Regeln der Quantenchromodynamik QCD**

 - gleiche Farbladungen stoßen sich ab

 - Farbe & Antifarbe ziehen sich an

Meson als $q\bar{q}$ — Bindungszustand

Meson



 - antisymmetrische Zustände im Farbraum ziehen sich an, **Baryon** (qqq)

 - Farbe & Antifarbe ziehen sich an, **Baryon** (qqq)



Baryon

- **weitere exotische Bindungszustände?**

 - Suche nach exotischen Zuständen

Exotische Bindungszustände

- **Exotischer Zustand Tetraquark**

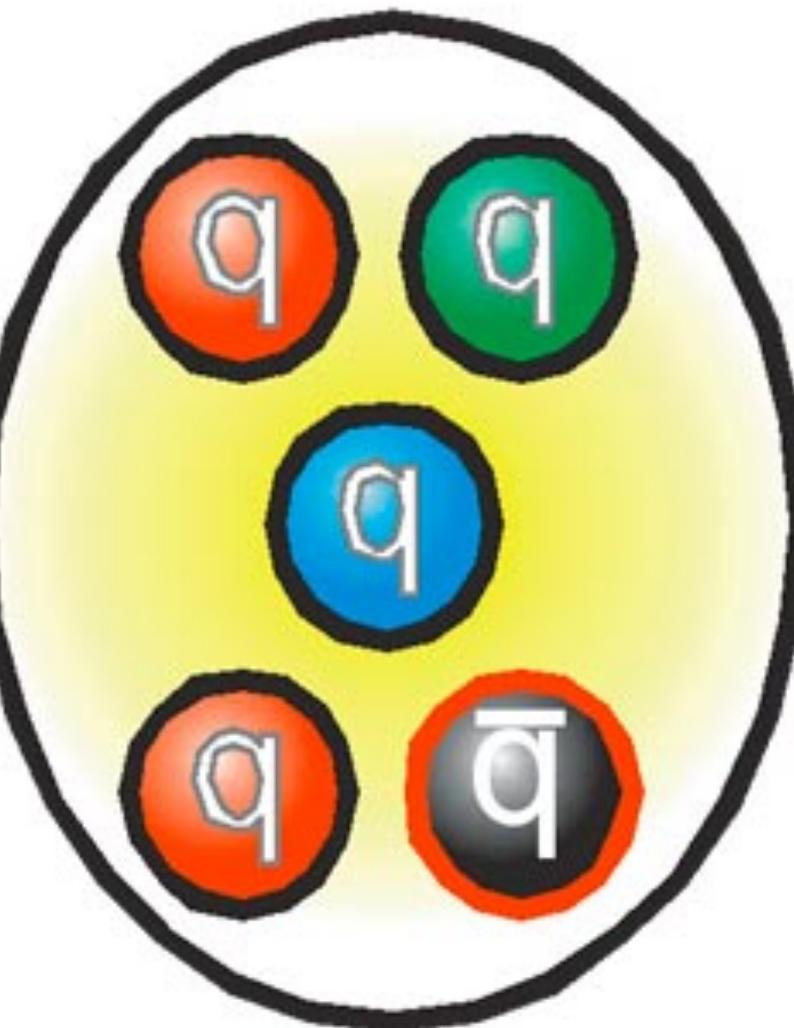
- Zustand aus 2 Quarks & 2 Antiquarks
- oft: leichtes Quark-Antiquark-Paar & schweres Quark-Antiquark Paar ($c\bar{c}$ $b\bar{b}$)
- Existenz von QCD erlaubt, viele aktuelle Resultate, die auf Existenz hinweisen

Tetraquark



- **Exotischer Zustand Pentaquark**

- Zustand von 4 Quarks & 1 Antiquark
- Eigenschaften noch unklar

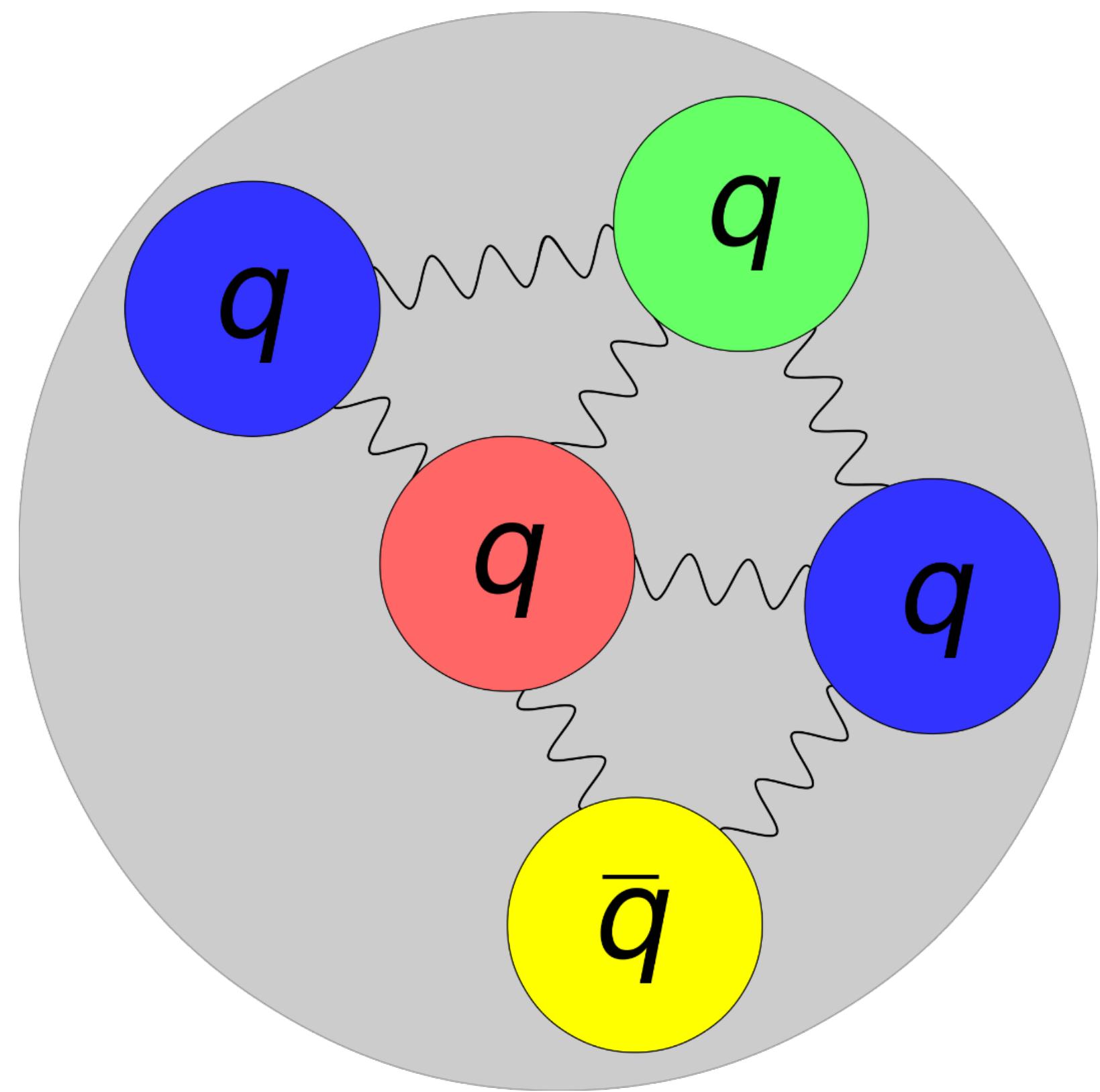


Pentaquark

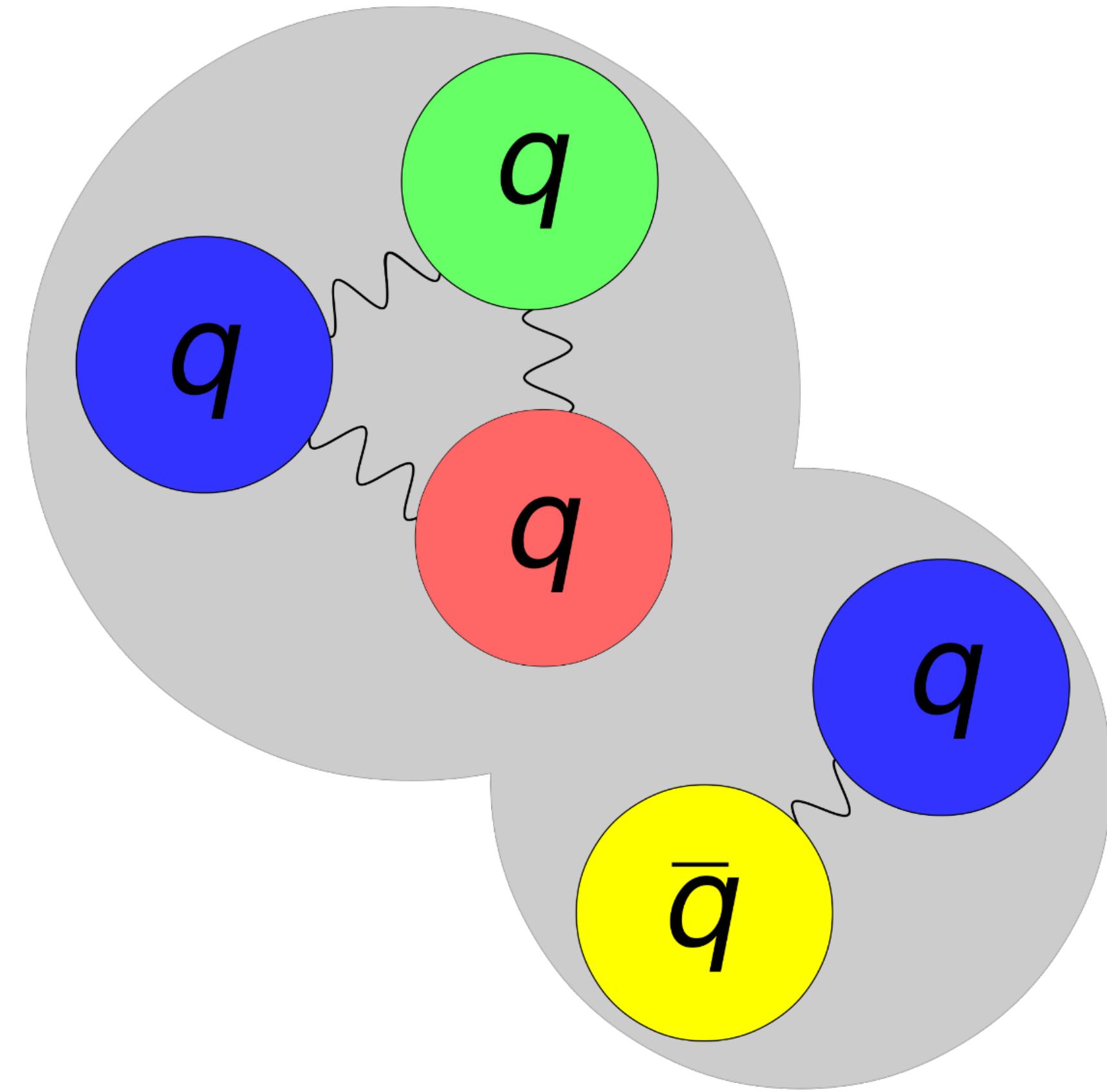
Exotischer Bindungszustand Pentaquark

- **Verschiedene theoretische Modelle für Pentaquarks**

Bag-Modell



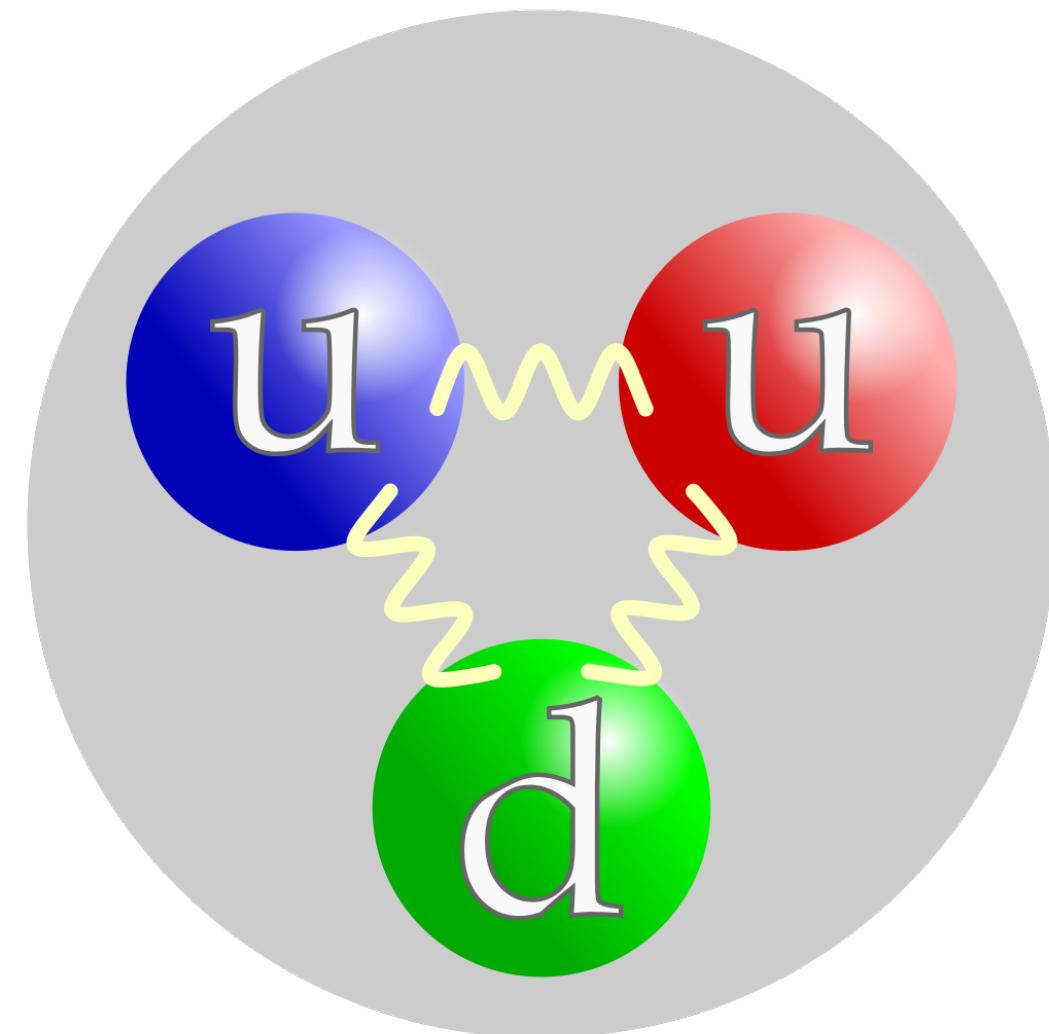
Molekül-Modell (Baryon + Meson)



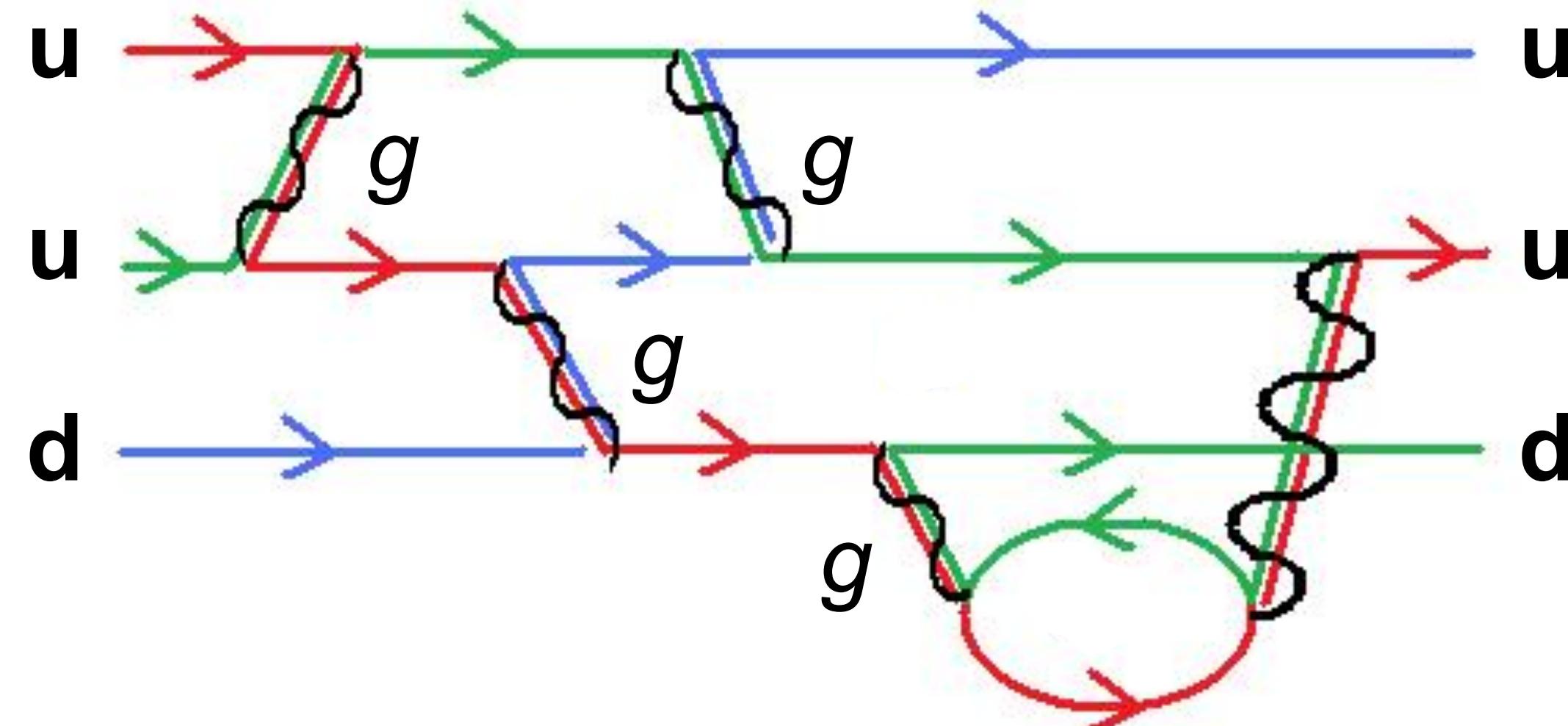
Q: wikipedia

Farbe und SU(3)_c Gruppe

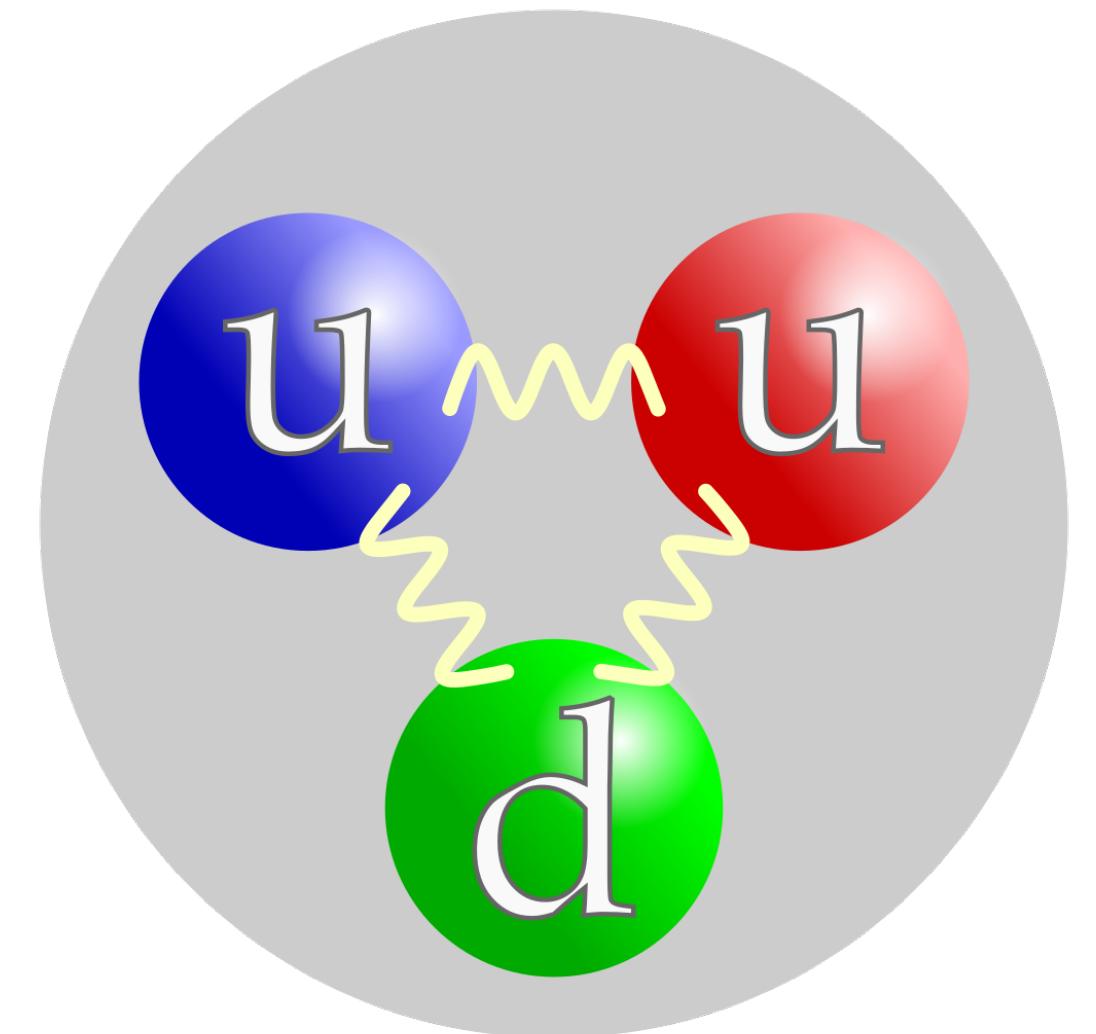
- Gluonwechselwirkung im Nukleon: Valenz- & See- Quarks



Gluonwechselwirkungen
zwischen Valenzquarks



Seequarks $q\bar{q}$



Gluonen – Selbstwechselwirkung

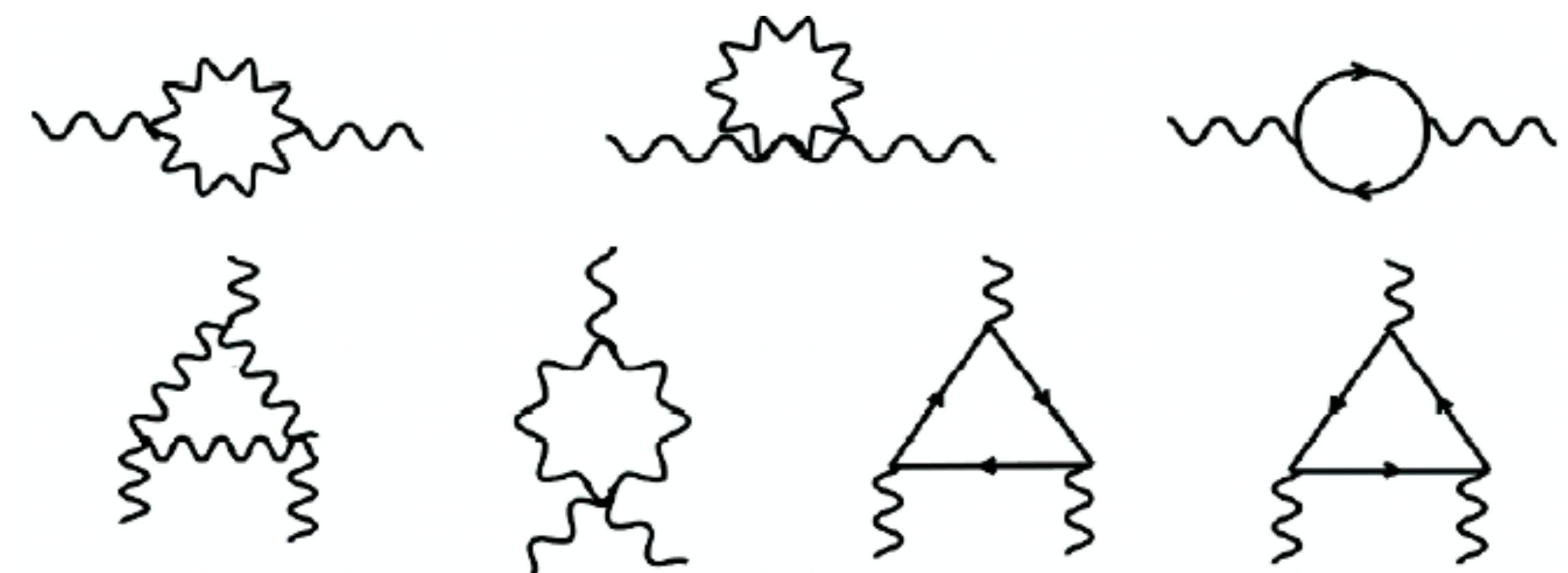
- **QED - Quantenelektrodynamik**

- Photonen (γ) als Eichbosonen tragen selbst keine elektrische Ladung & unterliegen als neutrale Teilchen **keiner Selbstwechselwirkung**

- **QCD - Quantenchromodynamik**

- Gluonen (g) tragen selbst **QCD-Farbladungen** und können daher nicht nur mit Quarks sondern auch **untereinander in Wechselwirkung** treten

- Selbstwechselwirkung von Gluonen führt zum Auftreten von komplexeren **QCD-Vertexgraphen**



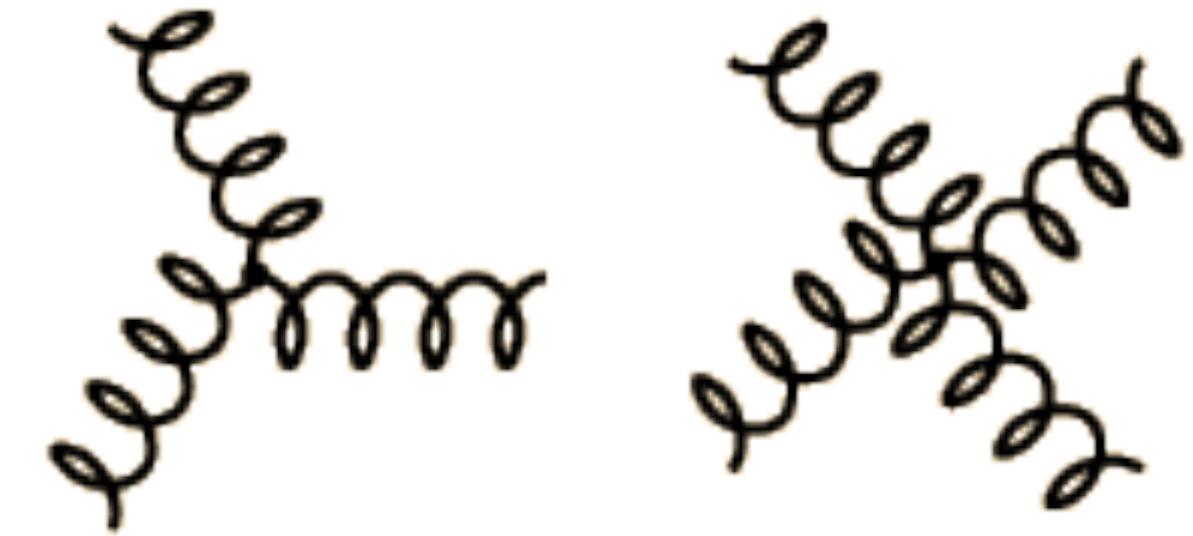
Gluonen – Selbstwechselwirkung

- **Gebundene Zustände durch Gluon-Selbstwechselwirkung?**

- Hypothetische Glueballs: **gebundener Zustand nur aus zwei oder drei Gluonen ($B = 0$, $Q = 0$, keine Farbe, aber Masse!)**

- **Glueball-Eigenschaften ($M = 1 - 1,7 \text{ GeV}$)**

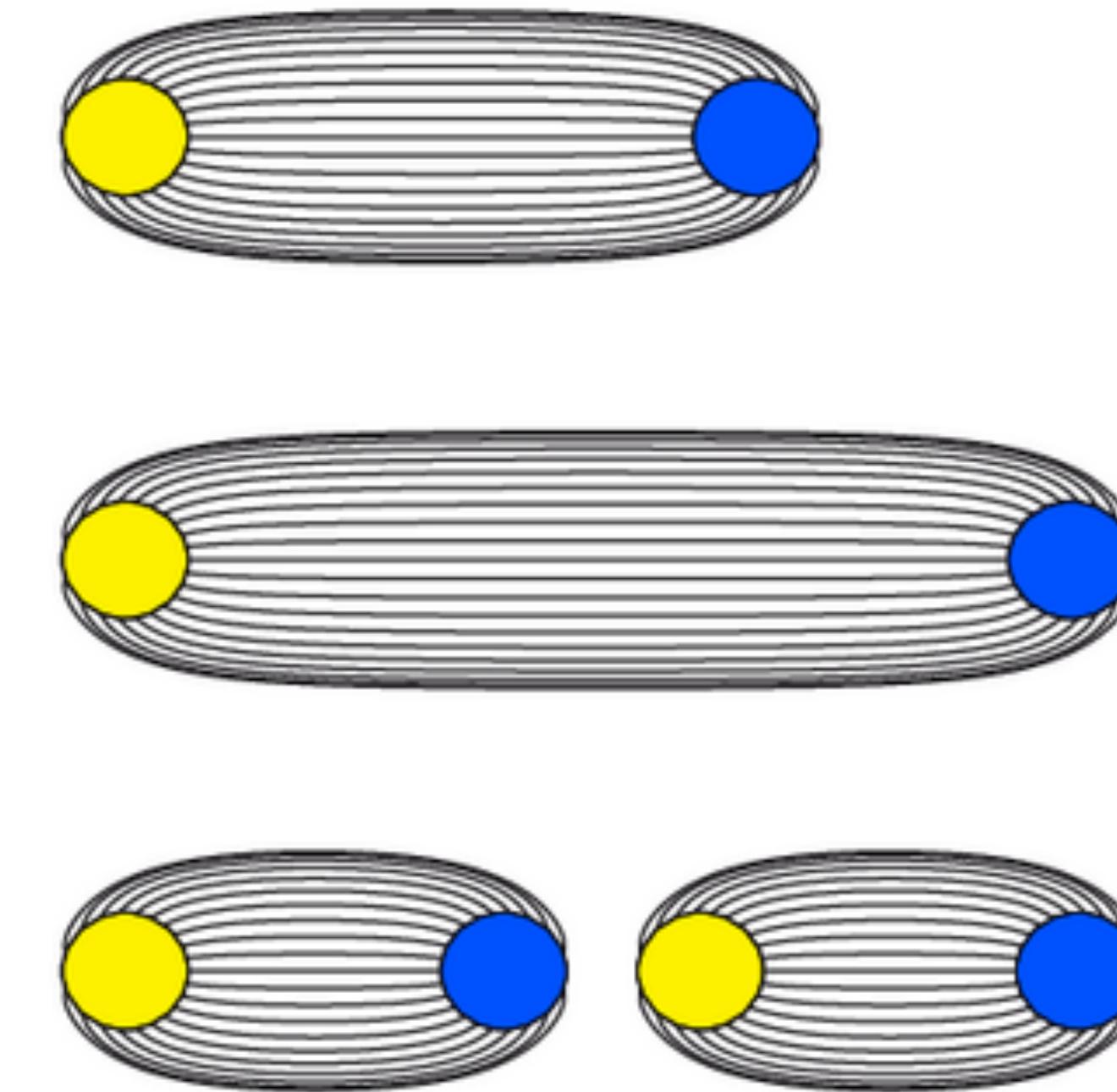
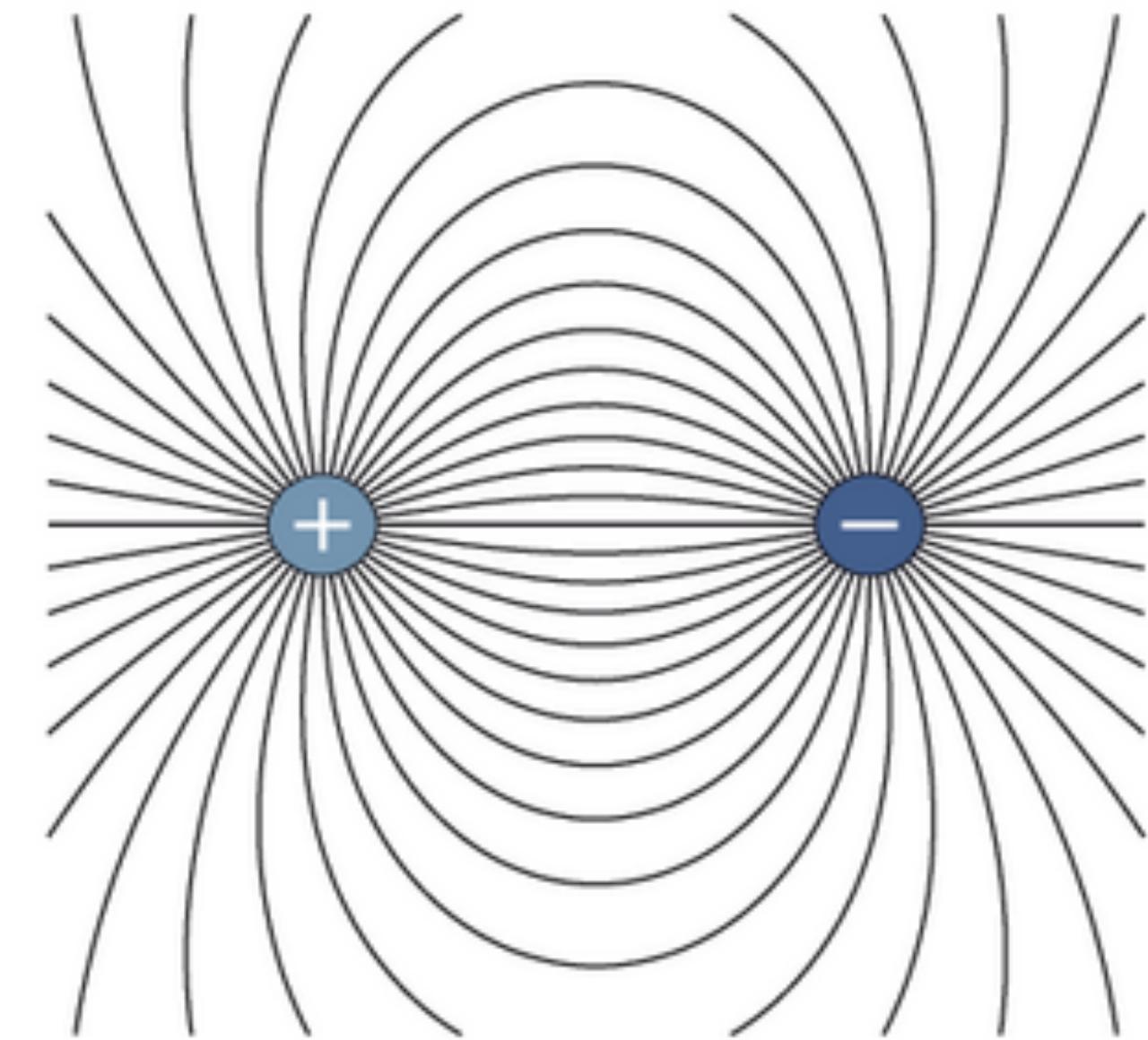
- Doppel-Gluon-Glueball (**gg**) mit $J = 0$
(skalar) oder $J = 2$
- Tripel-Gluon-Glueball (**ggg**) mit $J = 1$
(vektoriell) oder $J = 3$
- Zerfall in Pion- (Kaon-) Paare, bisher nur Kandidaten, aber (noch) kein Beweis



Gluonen: Fluss-Schlüsse und Confinement

- QED: Dipolfeld und QCD: Farb-Schlüsse der Gluonen

QED: Feld von
Elektrischen
Ladungen
(Photonen)



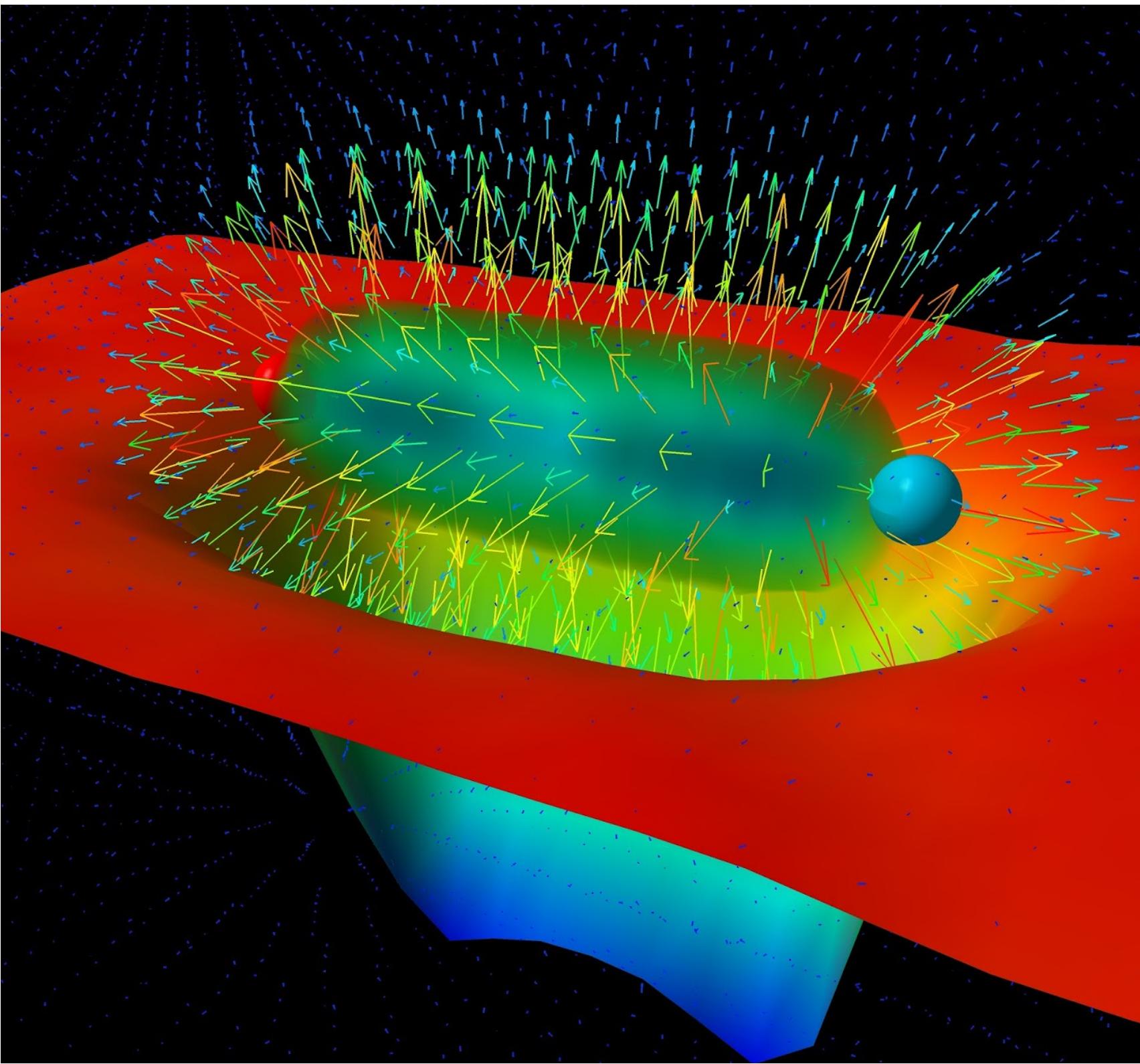
QCD: Farb-Fluss-
Schlüsse mit
Gluonen

- bei räumlicher Trennung von Quarks entstehen zylindrische **Farb-Fluss-Schlüsse** mit konstanter Feldstärke über Länge der Fluss-Röhre

Gluonen: Fluss-Schlüsse und Confinement

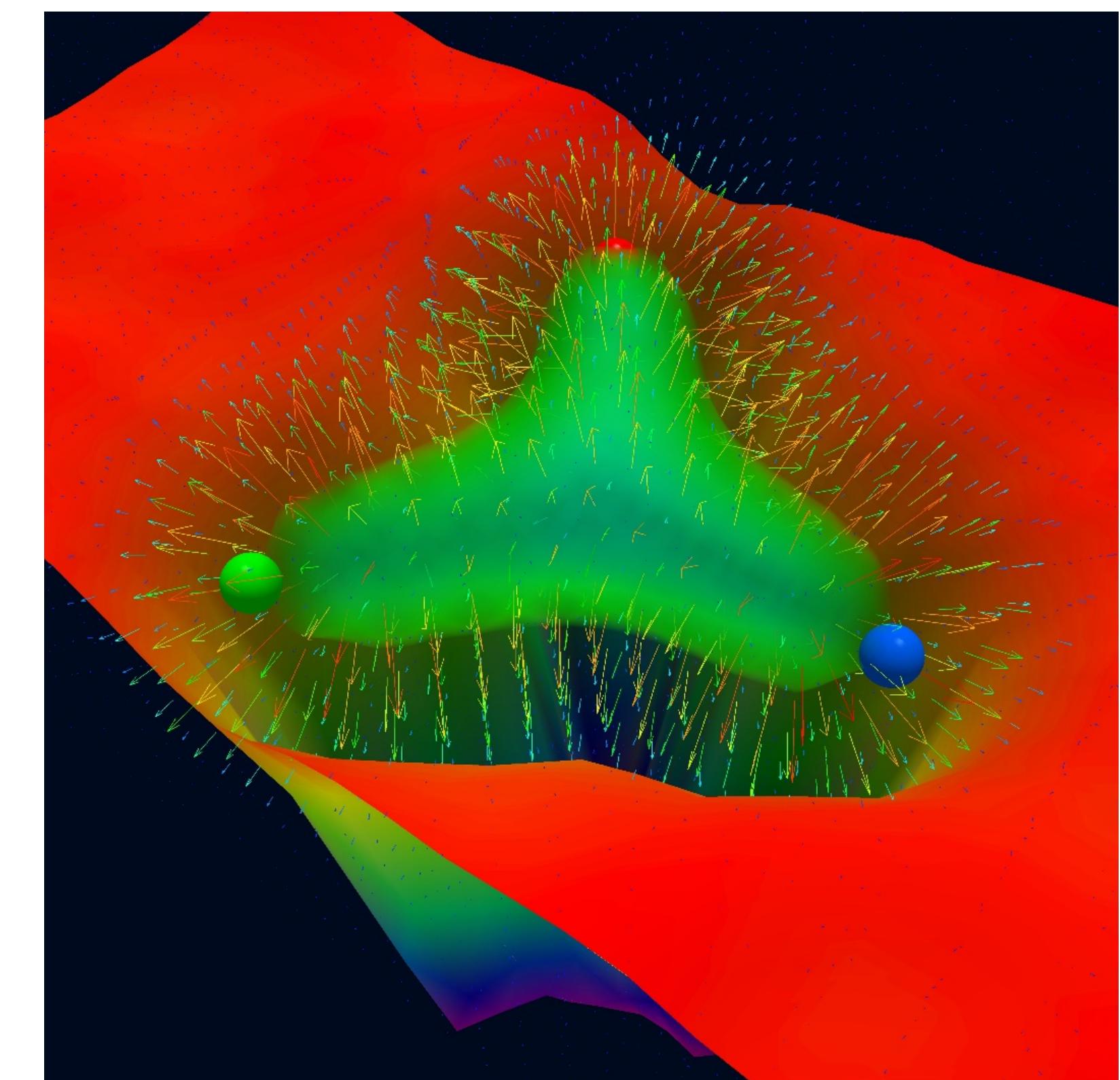
- **Farb-Flussschlüsse durch Gluon-Gluon Selbstwechselwirkung**
 - bei räumlicher Trennung von Quarks entstehen zylindrische **Farb-Flussschlüsse** mit konstanter Feldstärke über Länge der Fluss-Röhre

Quark-
Antiquark
Paar



Q: U of Adelaide: D. Leinweber

Baryon



Quark-Quark Potenzial

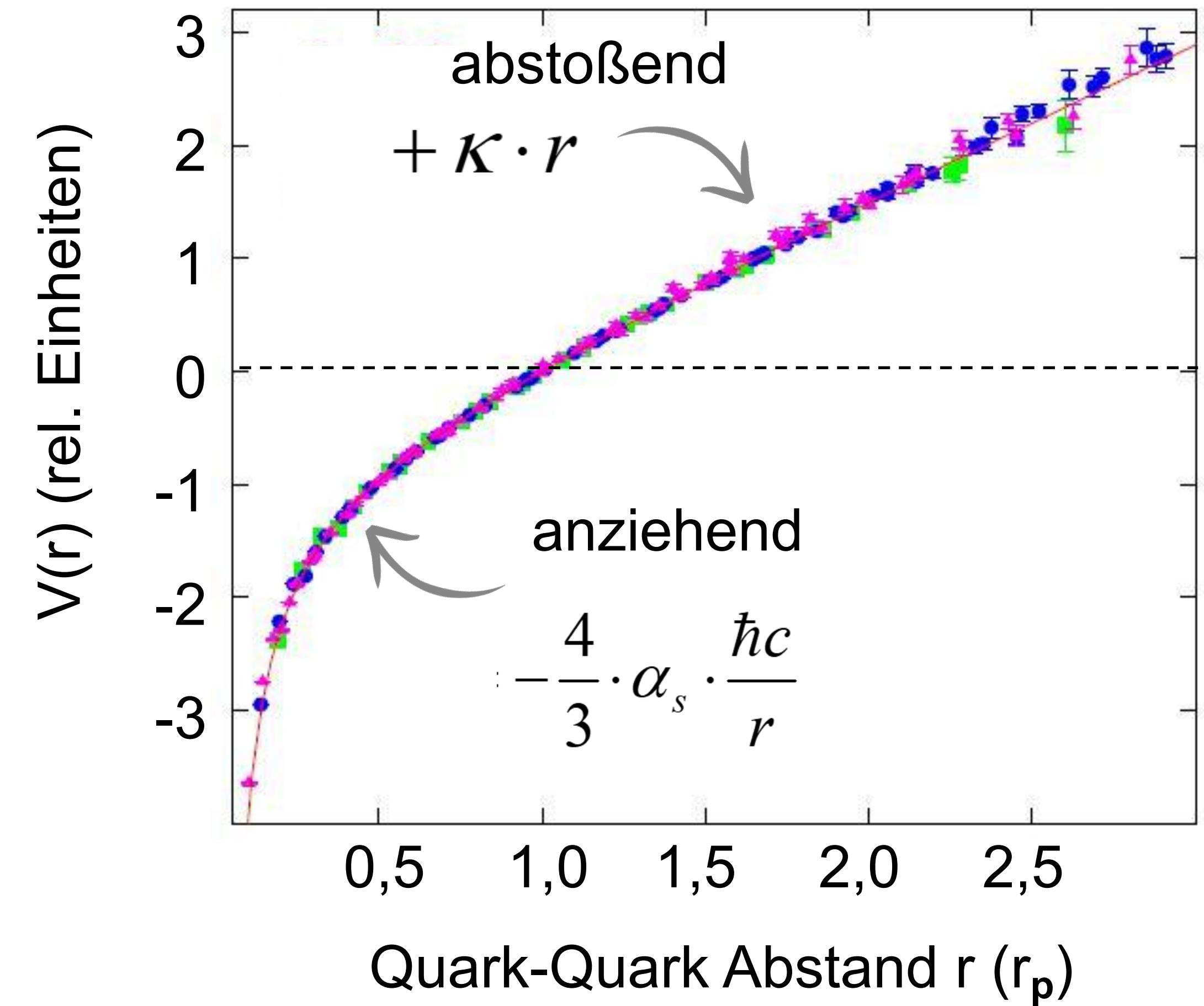
- **Quark-Quark Potenzial**

- Quark-Antiquark-Potenzialansatz mit:
 1/r 'Coulombansatz'
 linearer Term

$$V(r) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\alpha_s(r) \cdot \hbar c}{r} + \kappa \cdot r$$

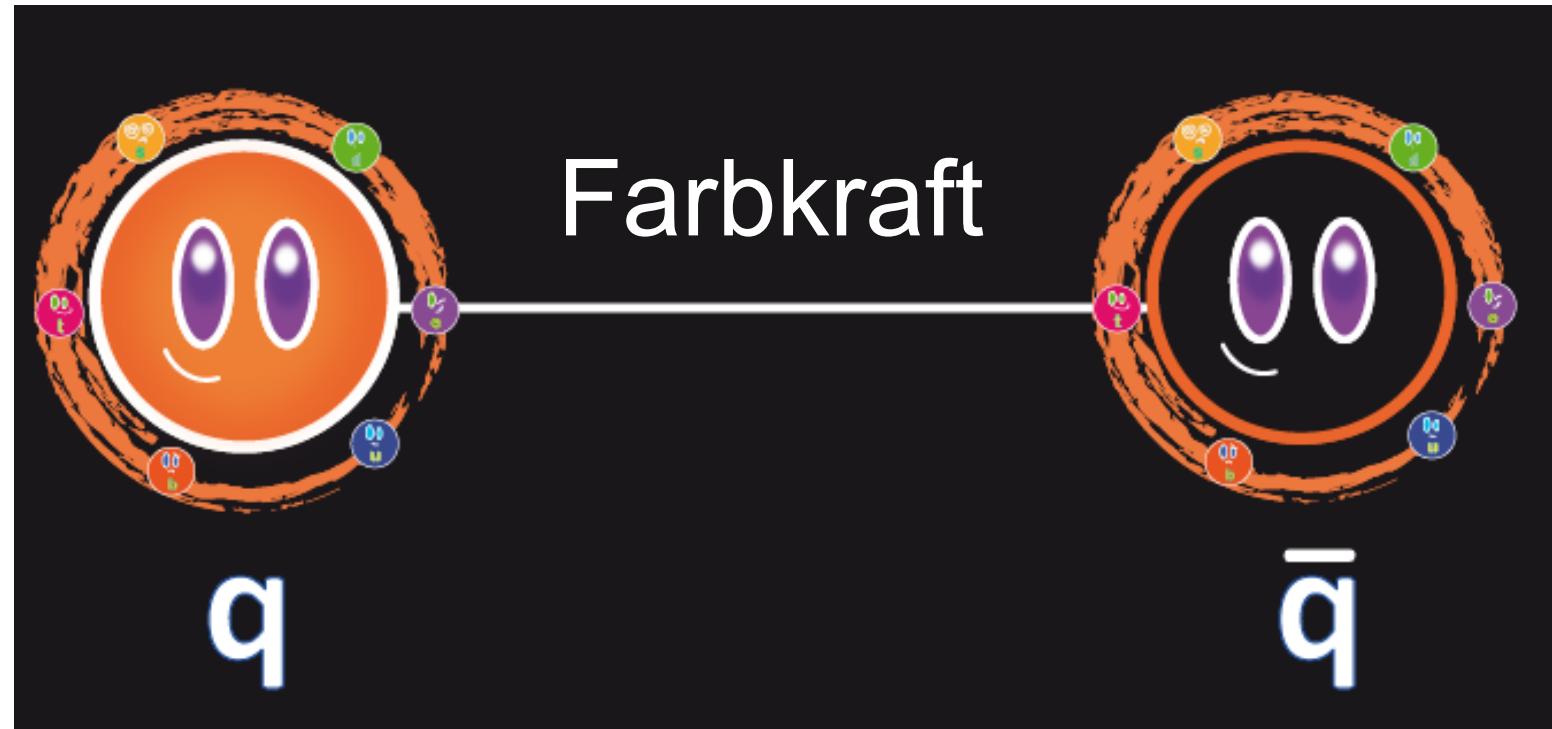
$\alpha_s \sim 0.3$

E_{pot} nimmt für große r stark zu!
- Quark-Confinement in ~ 1 fm

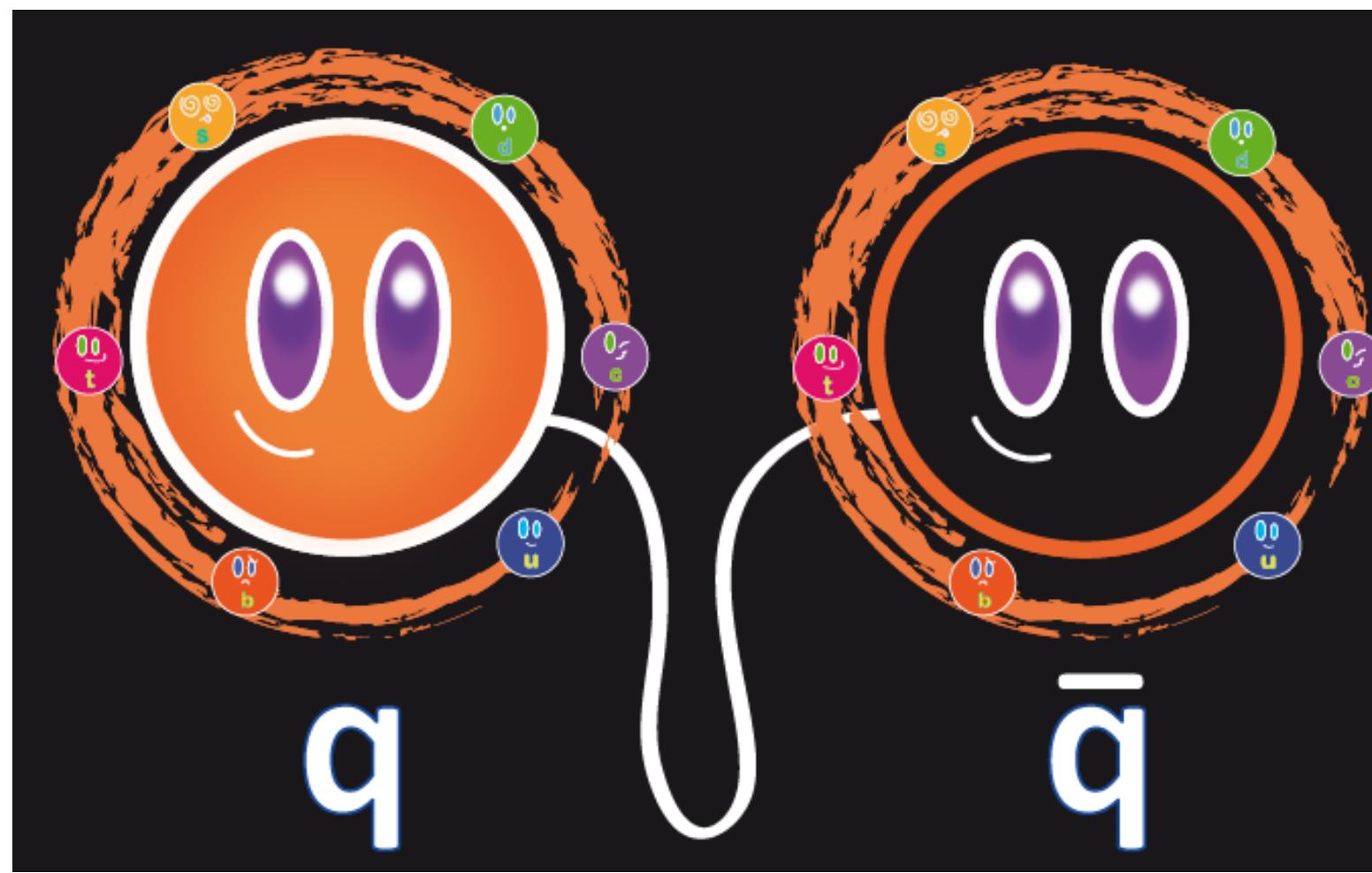


Quark-Quark Potenzial - asymptotische Freiheit

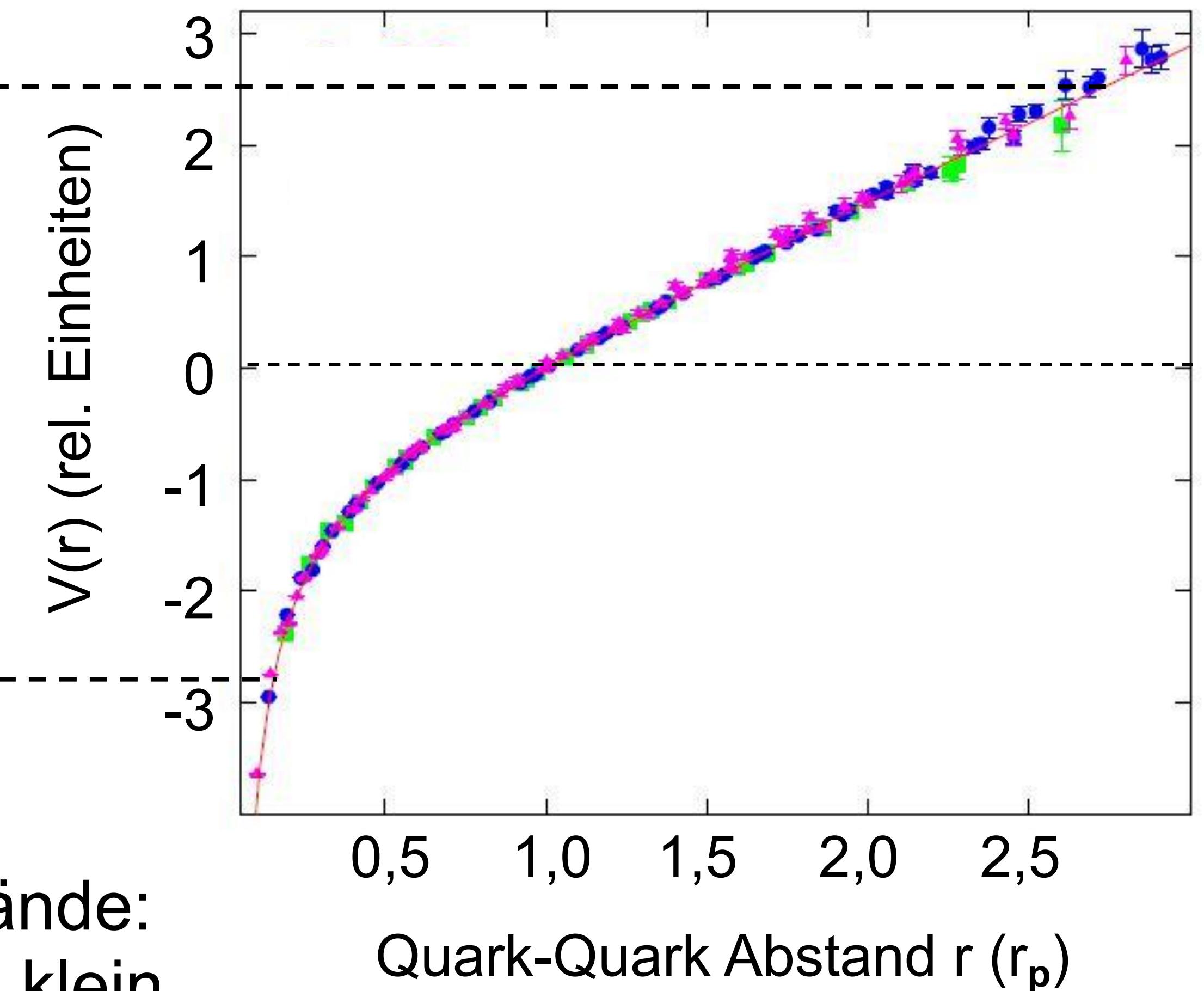
- QCD: bei kleinen Abständen verhalten sich Quarks wie freie Teilchen



große
Abstände:
Kopplung α_s
groß



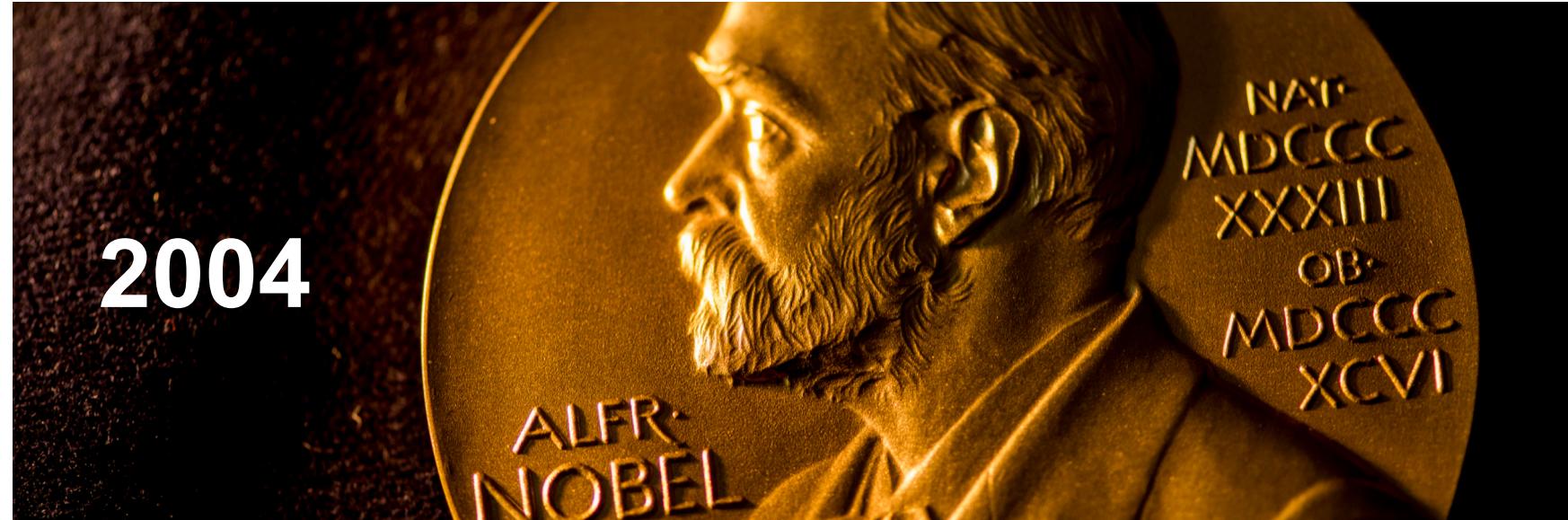
kleiner Abstände:
Kopplung α_s klein



Asymptotische Freiheit

- **Asymptotische Freiheit: quasi-freie Quarks**

- bei **extrem kurzen Abständen** sollten sich **Quarks** entsprechend der QCD wie nahezu **freie Teilchen** verhalten (Wilczek, Gross, Politzer)



Frank Wilczek

David J. Gross

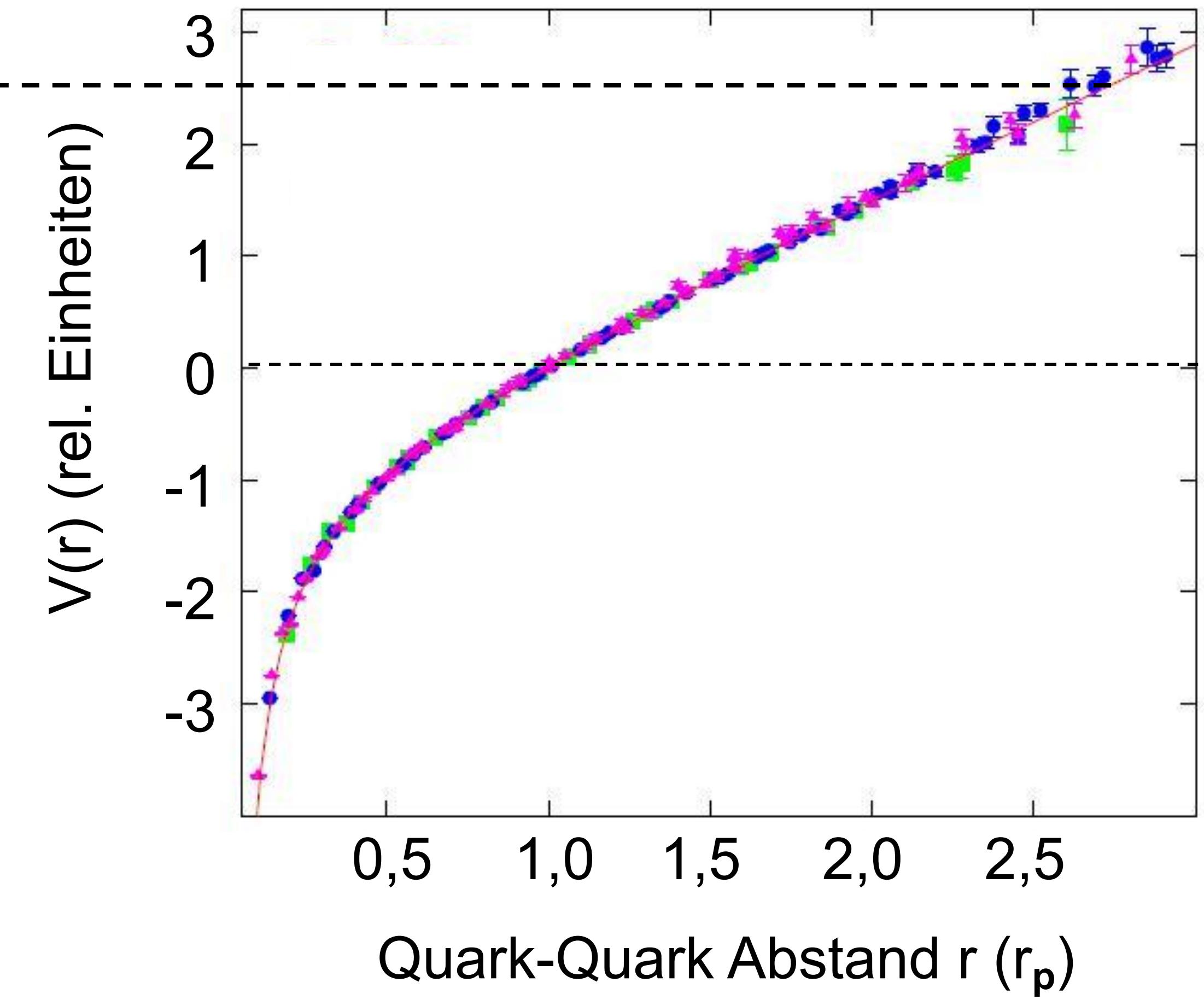
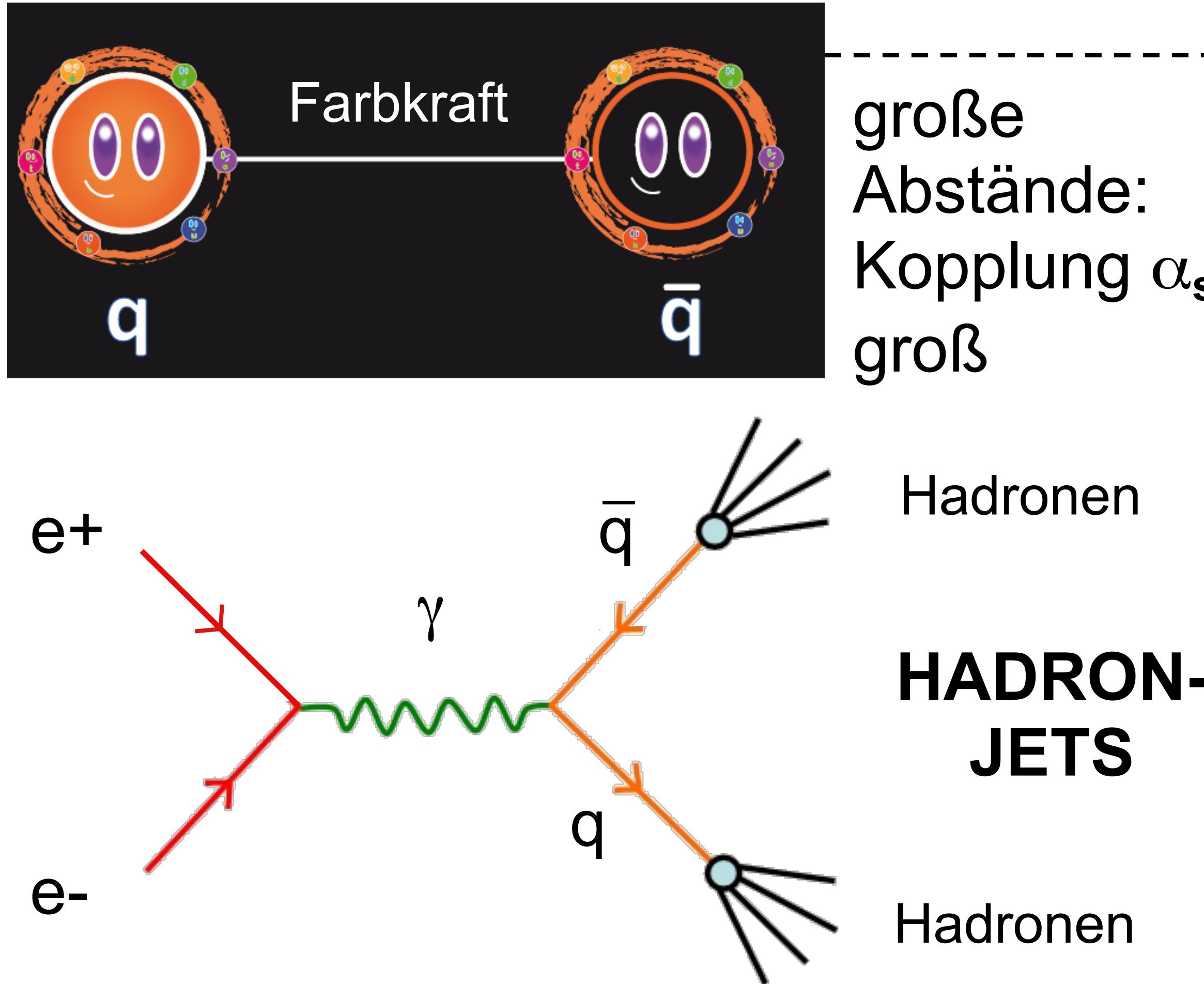
H. David Politzer

- dieser Effekt der QCD ermöglicht die Anwendung des **Quark-Parton Modells** zur Interpretation der tiefinelastischen eN-Streuung

*"for the discovery of **asymptotic freedom** in the theory of the strong interaction"*

Quark-Quark Potenzial - Hadronisierung

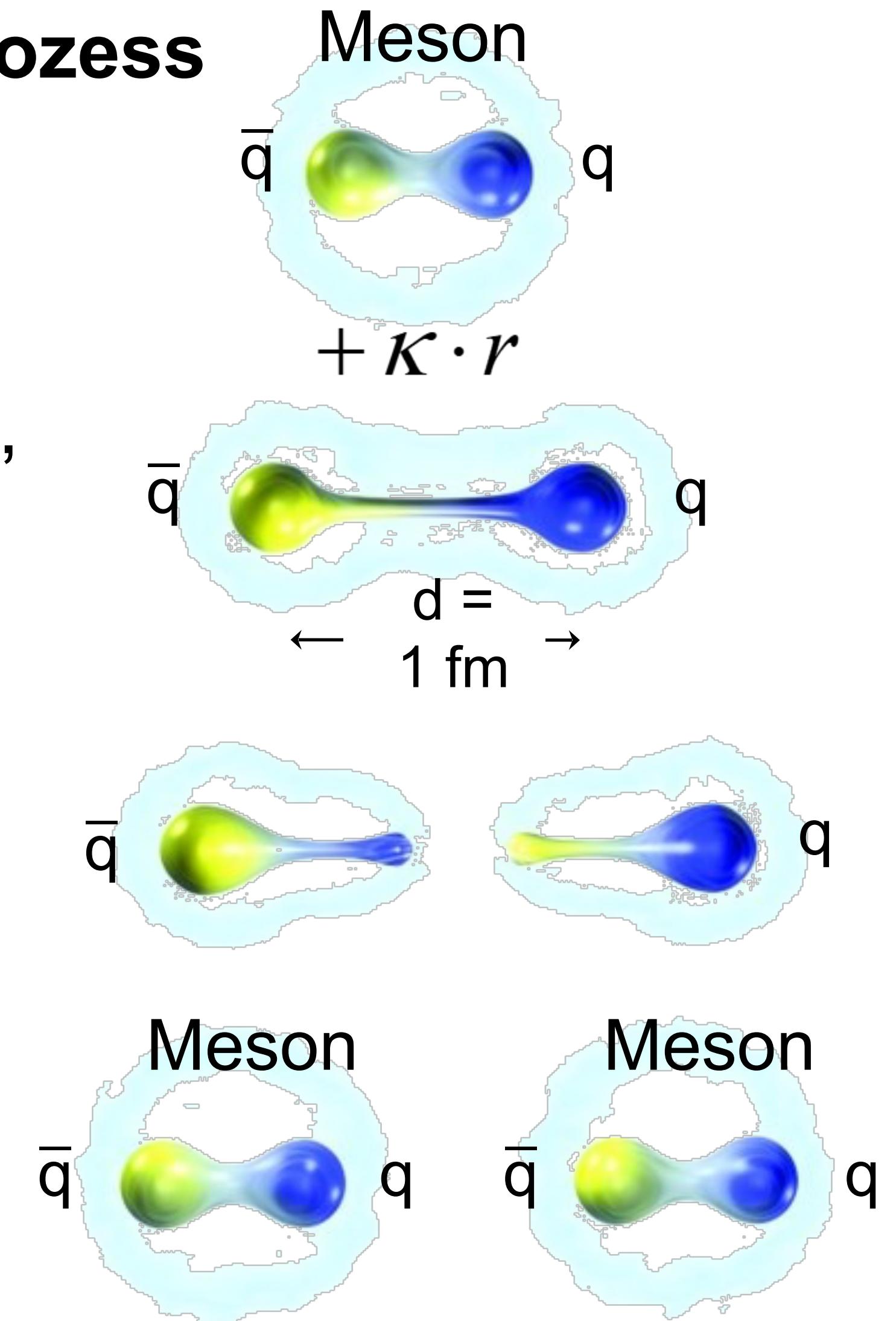
- QCD: bei großen Abständen bilden sich Quark-Antiquark-Paare aus Vakuum



Quark-Confinement & Jet-Strukturen

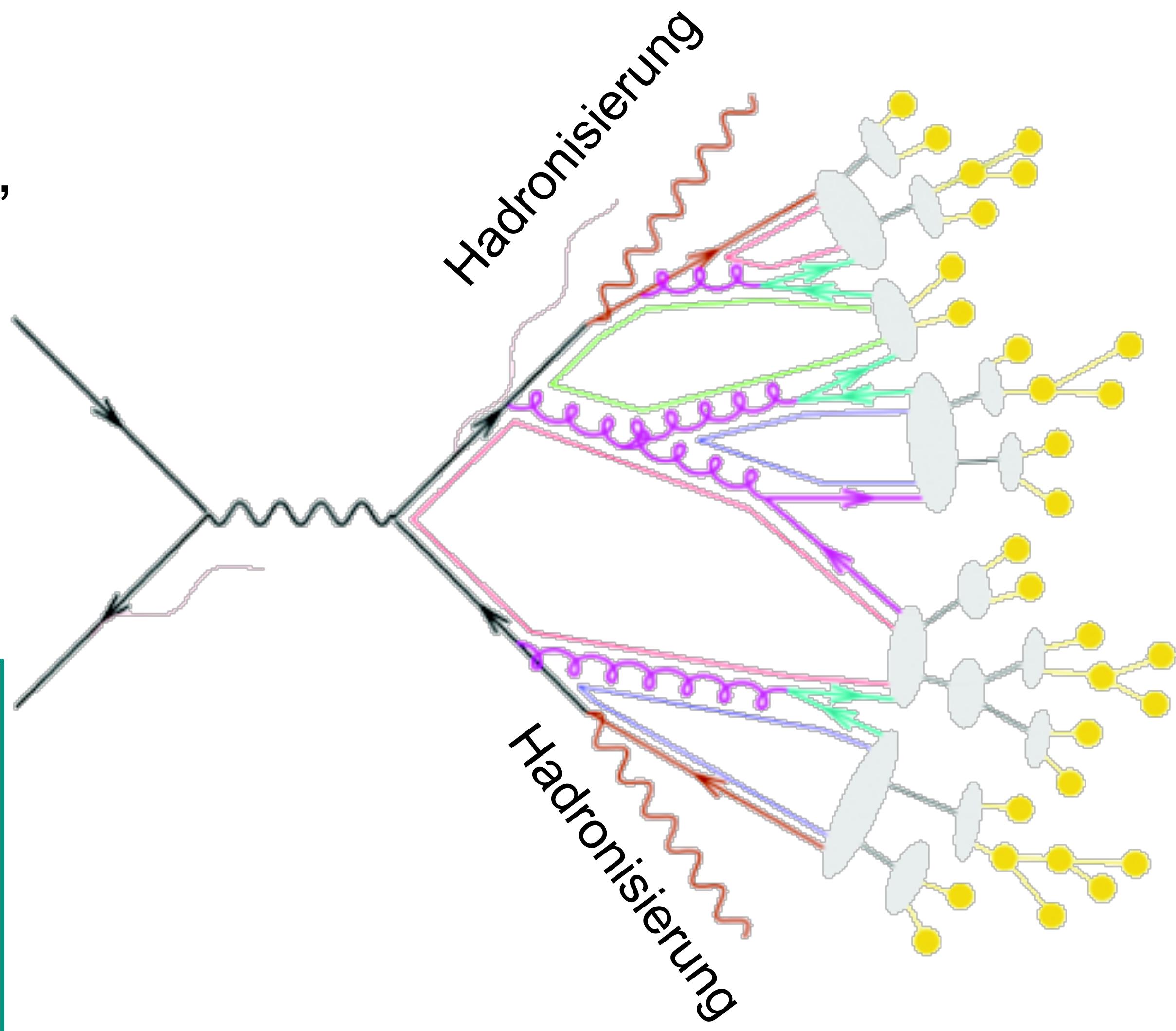
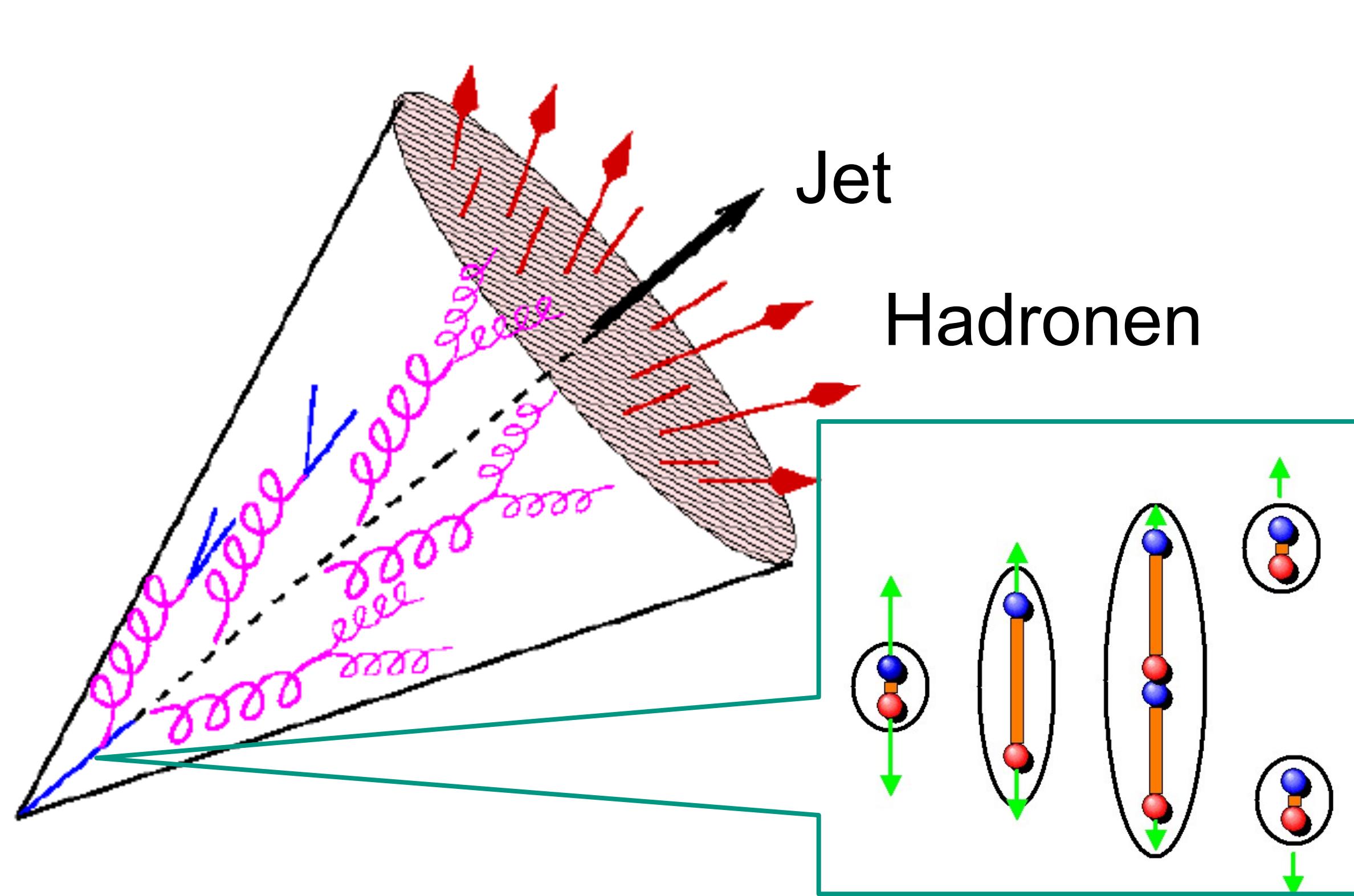
- **Trennung von Quark-Antiquark nach hartem Stoß-Prozess**

- 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**



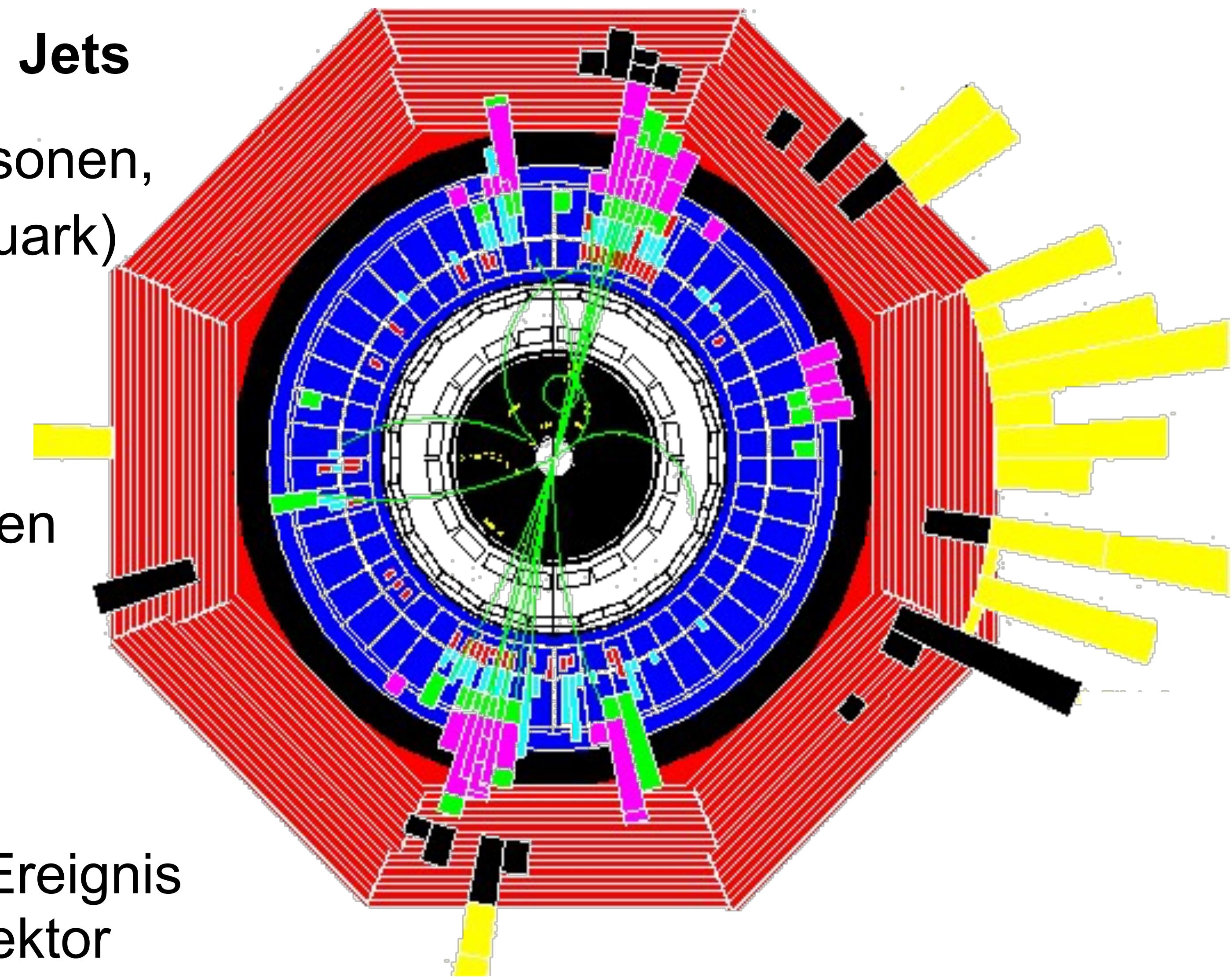
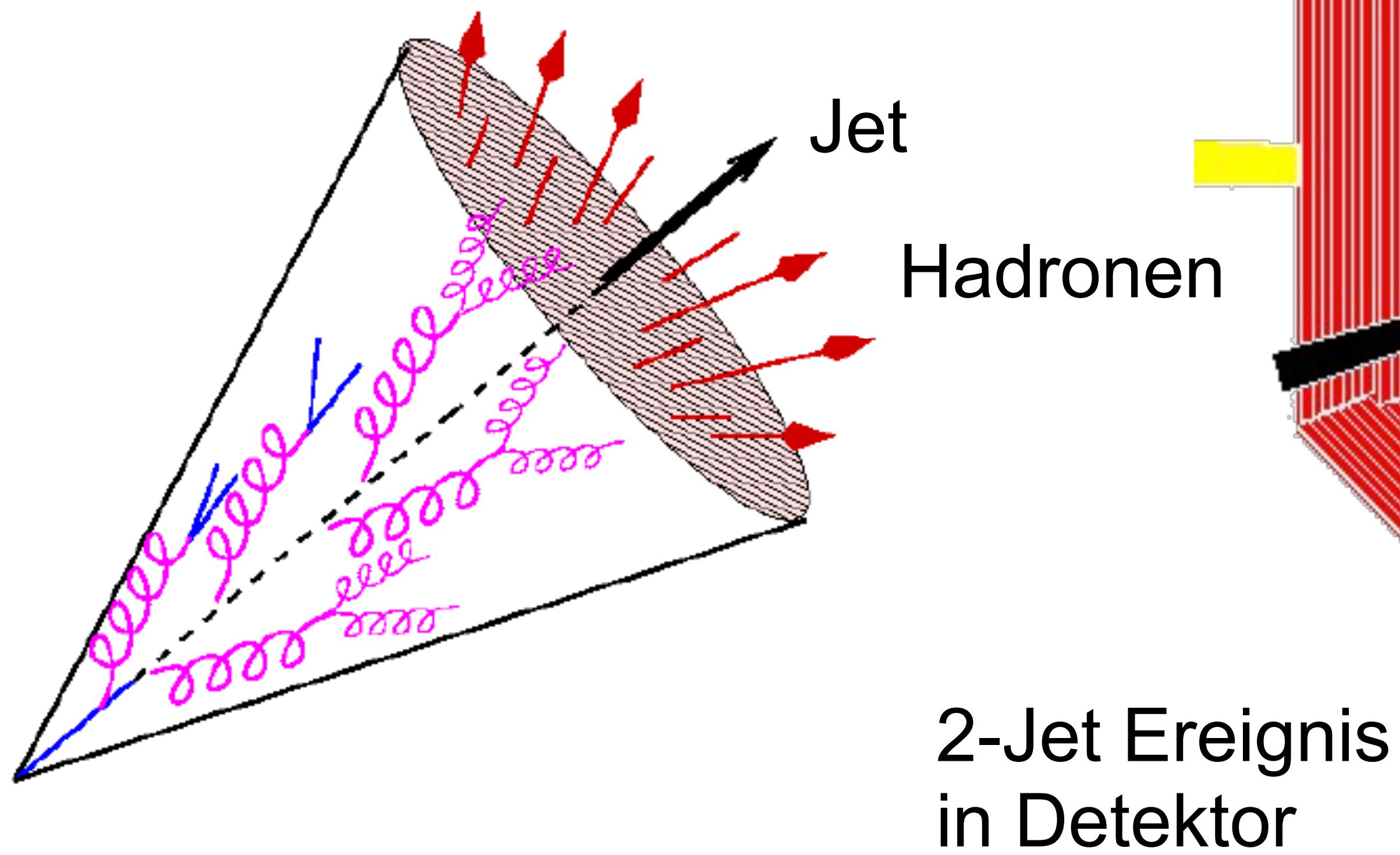
Hadronische Jets

- **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)



Hadronische Jets –Analysen: Tool bei CMS

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

