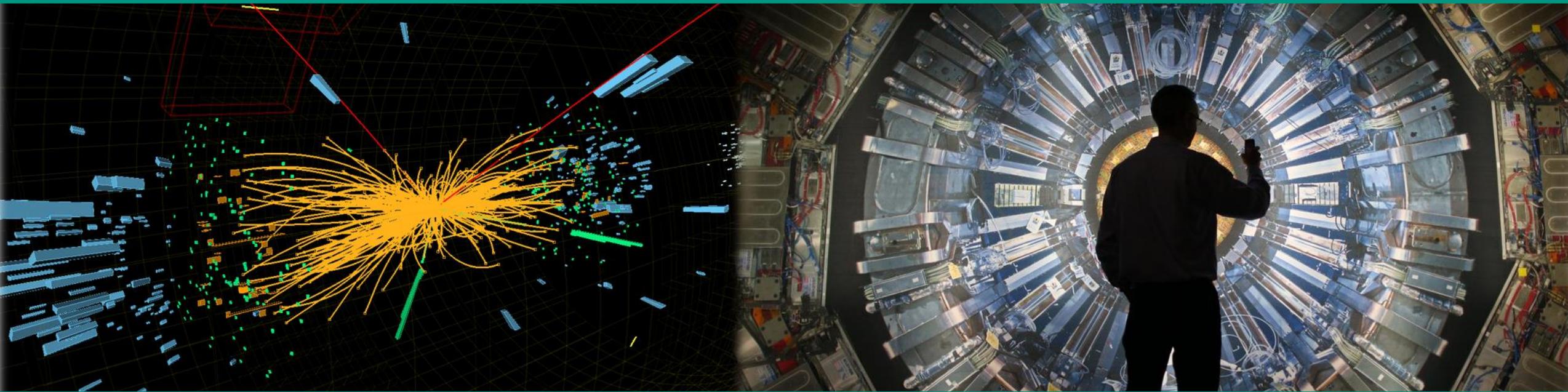


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 15

20.6.2023



Recap: Flavoursymmetrie $SU(3)_{flavour}$

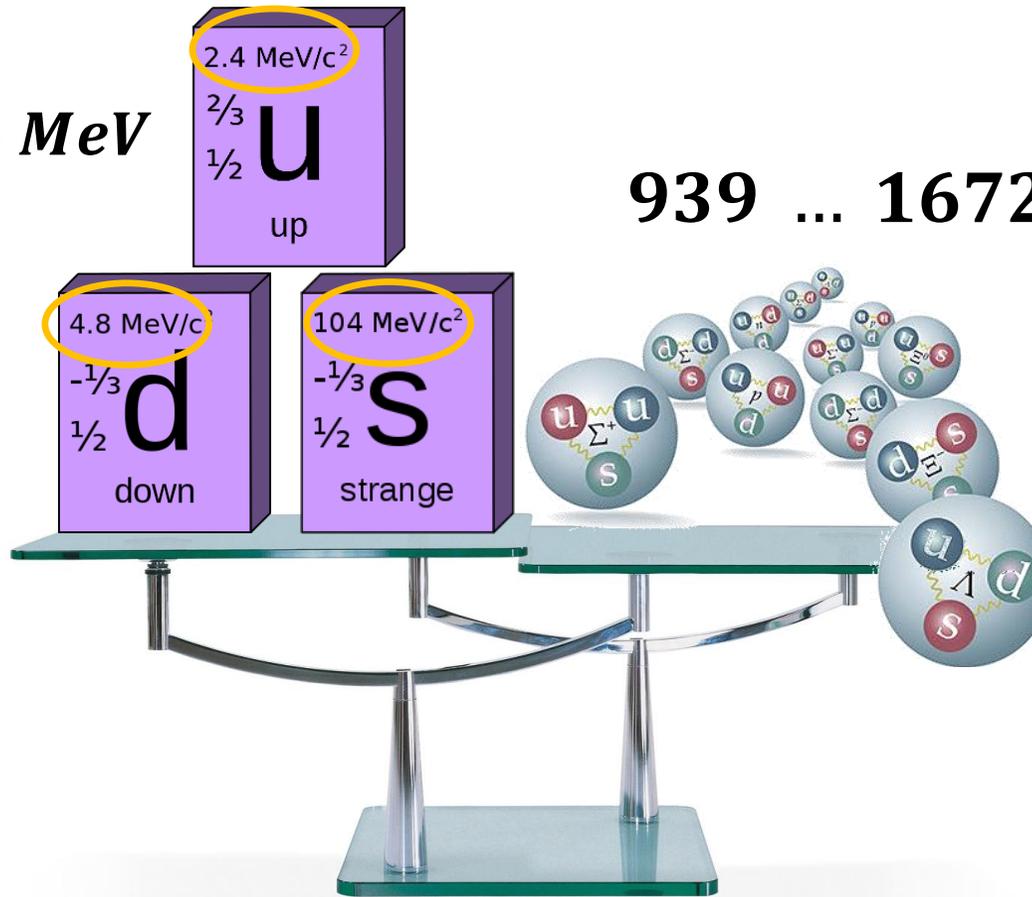
■ Teilchenmischung & Flavoursymmetrien

- Beispiele: neutrale Kaonen, Neutrinos, η – Mesonen
- Gell-Mann, Nishijima: $Q = I_3 + \frac{1}{2} \cdot Y$ (Hyperladung)
- **Mesonen-Oktett:** $q\bar{q}$ – Zustände aus u, d, s – Quarkflavours mit Spin $S = 0$
- **Baryonen-Oktett:** qqq – Zustände aus u, d, s – Quarkflavours mit Spin $S = \frac{1}{2}$
- **Baryonen-Dekuplett:** qqq – Zustände mit Spin $S = \frac{3}{2}$ flavour-symmetrische Resonanzen Δ^- (ddd) Δ^{++} (uuu) und Ω^- (sss) erfordern neuen antisymmetrischen Freiheitsgrad der **Farbladung**



Pauli ↑ ↓

2 ... 100 MeV

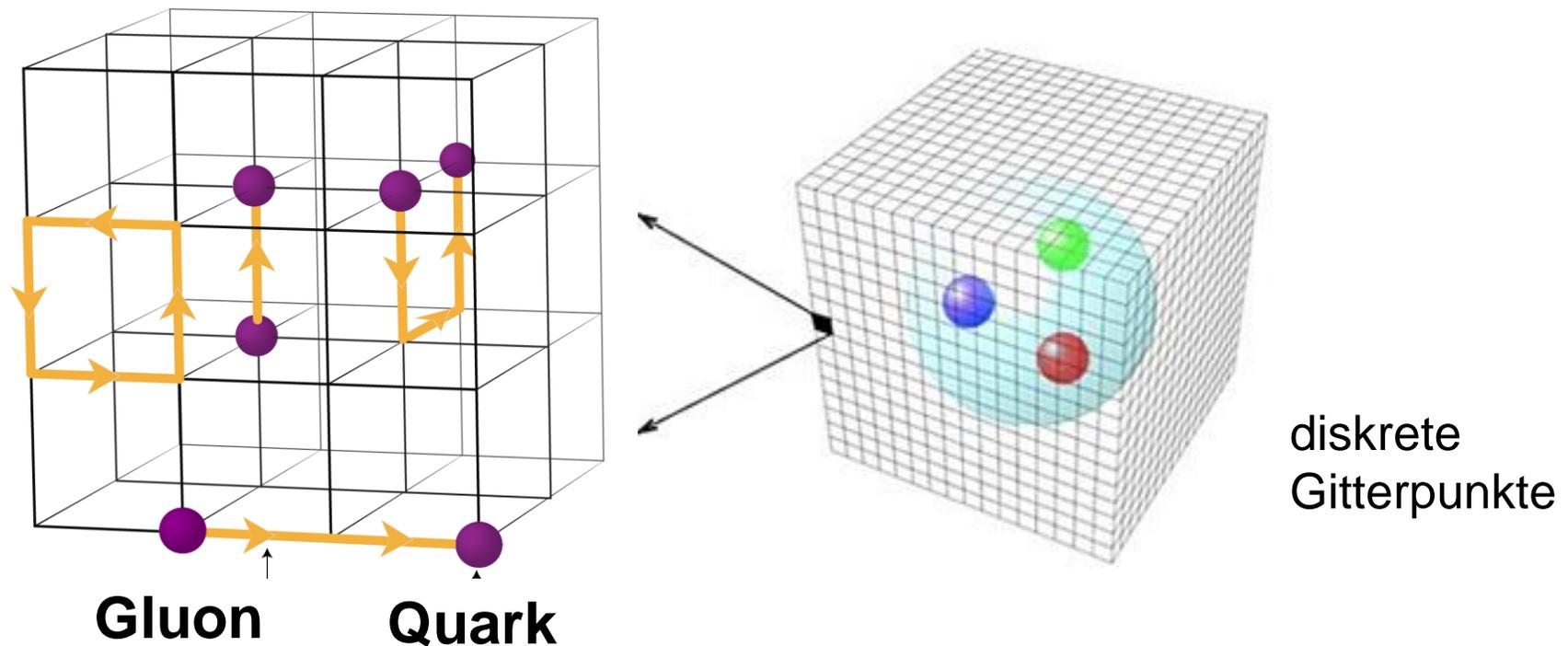


EINSCHUB: HADRON– UND QUARK–MASSEN

Quarkmassen

■ *QCD* – Quarkmassen m sind abhängig von der Energieskala μ : $m(\mu)$

- freie Quarks nicht beobachtbar: Masse muss daher in *QCD* – Störungstheorien extrapoliert werden (‘**Gittereichtheorie**’ als ‘**effektive Theorie**’)



Quarkmassen

■ *QCD* – Quarkmassen m sind abhängig von der Energieskala μ : $m(\mu)$

- ‘nacktes’ Quark: **Stromquarkmasse** (‘*current quark mass*’)

⇒ benutzt für Feynman-Diagramme, Lagrange-Funktion

up – Quark:

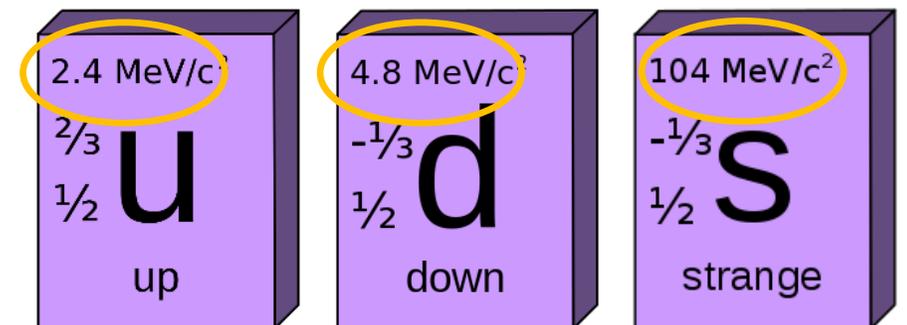
$$m = 1,8 \dots 3 \text{ MeV}$$

$$m = (2,01 \pm 0,14) \text{ MeV (Gitter – } QCD)$$

down – Quark:

$$m = 4,5 \dots 5,3 \text{ MeV}$$

$$m = (4,79 \pm 0,16) \text{ MeV (Gitter – } QCD)$$



Q: wikicommons

Quarkmassen

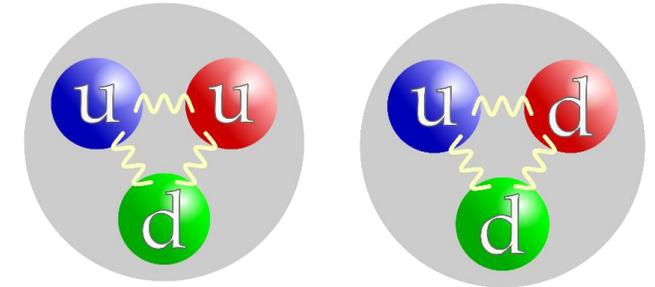
■ *QCD* – Quarkmassen m sind abhängig von der Energieskala μ : $m(\mu)$

- Konstituentenquarkmasse

Masse des **Nukleons** $\gg m(\text{up}), m(\text{down})$

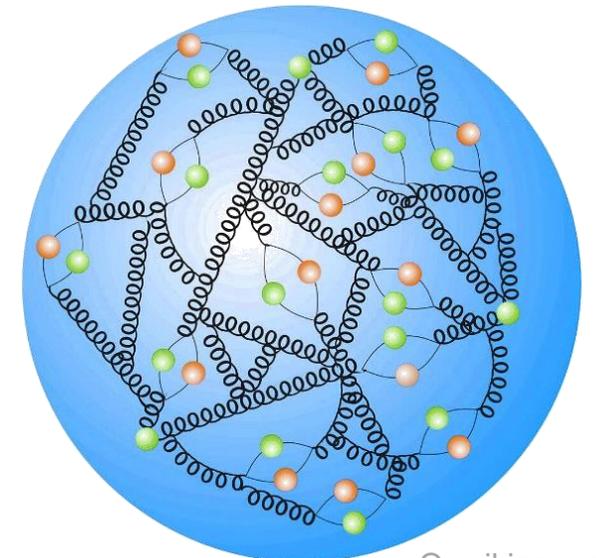
m (Proton) = **938,272 MeV**

m (Neutron) = **939,565 MeV**



- 'effektive' Masse von *up*, *down* Quarks $m \sim 300 \text{ MeV}$

- Großteil der Masse des Nukleons aus Bindungsenergie der *QCD* – Wechselwirkung: (**Gluonen, Seaquarks**)

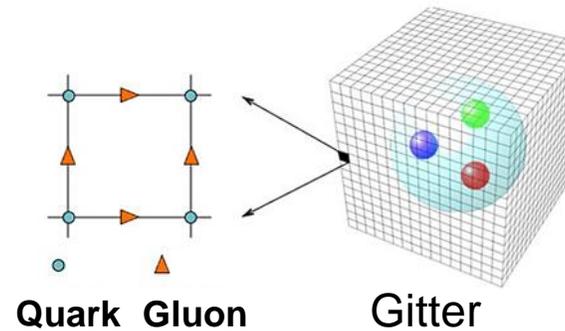


Q: wikicommons

Quarkmassen

■ Baryonmasse entsteht zu **> 90%** durch **QCD – Vakuumeffekte**

- aktuelle **Gitter-Eichtheorie**
Berechnungen der **QCD** – Beiträge zur Protonmasse (2019)

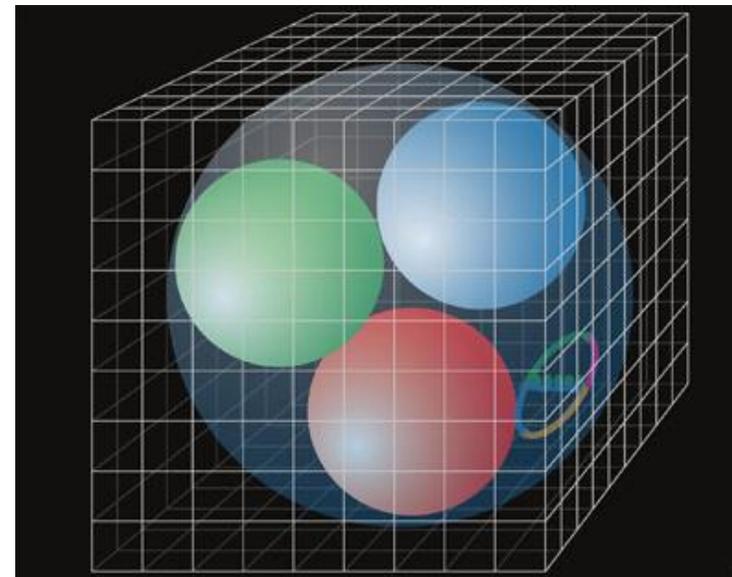


$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{q}_j (i\gamma^\mu D_\mu + m_j) q_j$$

where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + if_{bc}^a A_\mu^b A_\nu^c$
and $D_\mu \equiv \partial_\mu + it^a A_\mu^a$
That's it!

Masse des Protons (QCD)

Proton	~ 940 MeV
Quarks: Energie	~ 32 %
Gluonen: Energie	~ 36 %
‘Anomalie’ – Term	~ 23 %
<i>u, d, s</i> Massenterme	~ 9 %

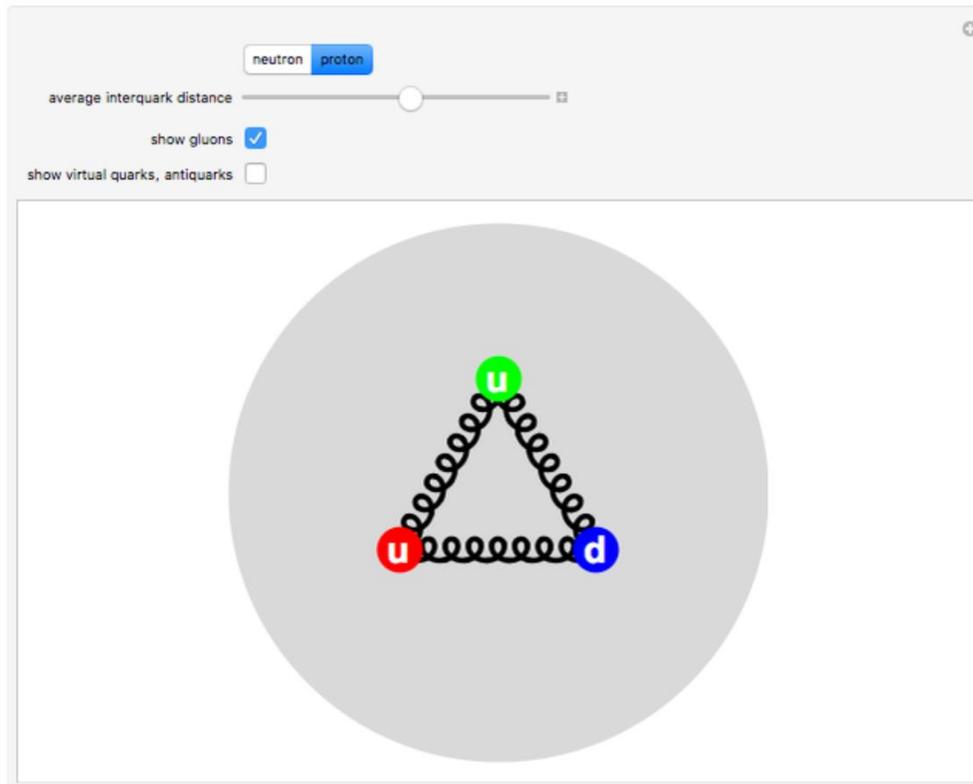


QCD – Lagrangian
auf dem Gitter

Quarkmassen

- Baryonmasse entsteht zu $> 90\%$ durch *QCD* – Vakuumeffekte: interaktiv

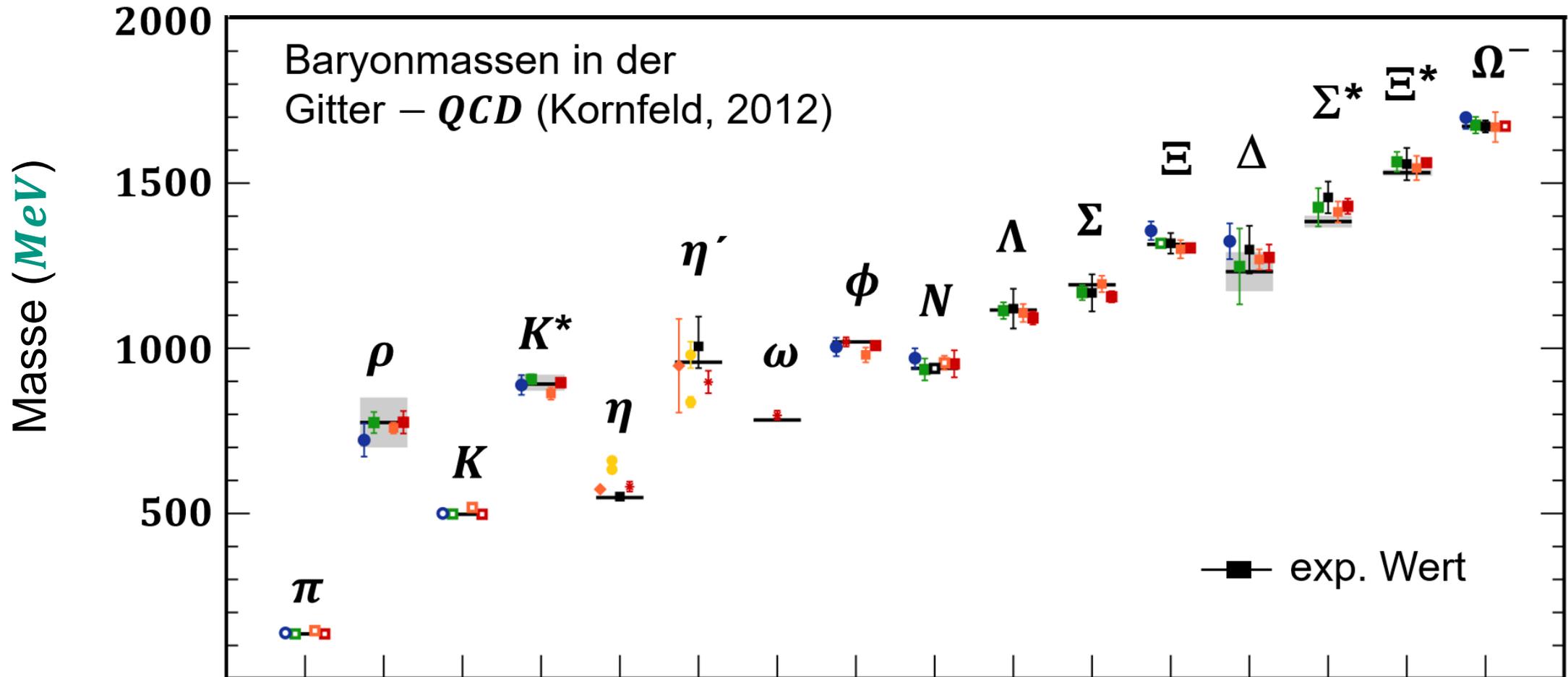
How the Proton and Neutron Got Their Masses

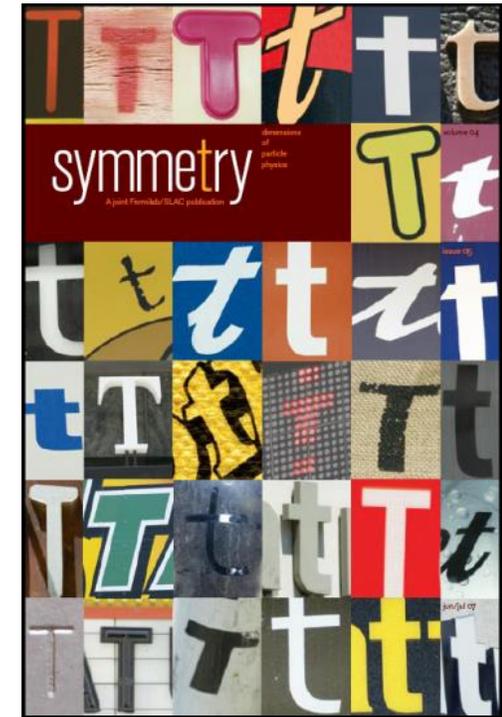
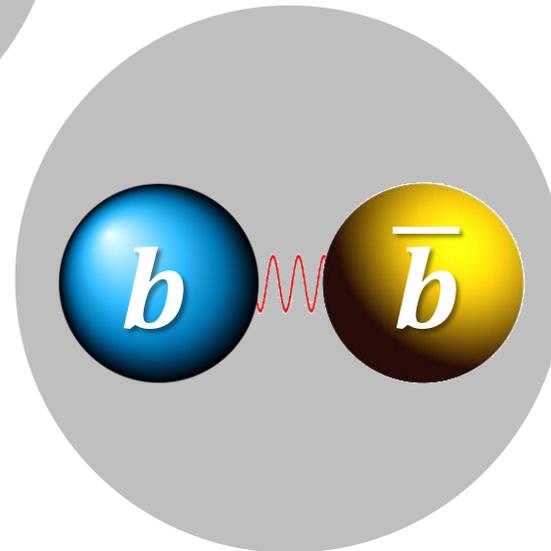
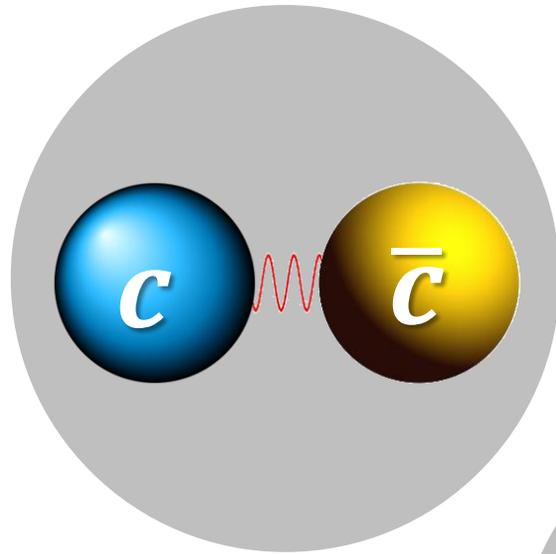
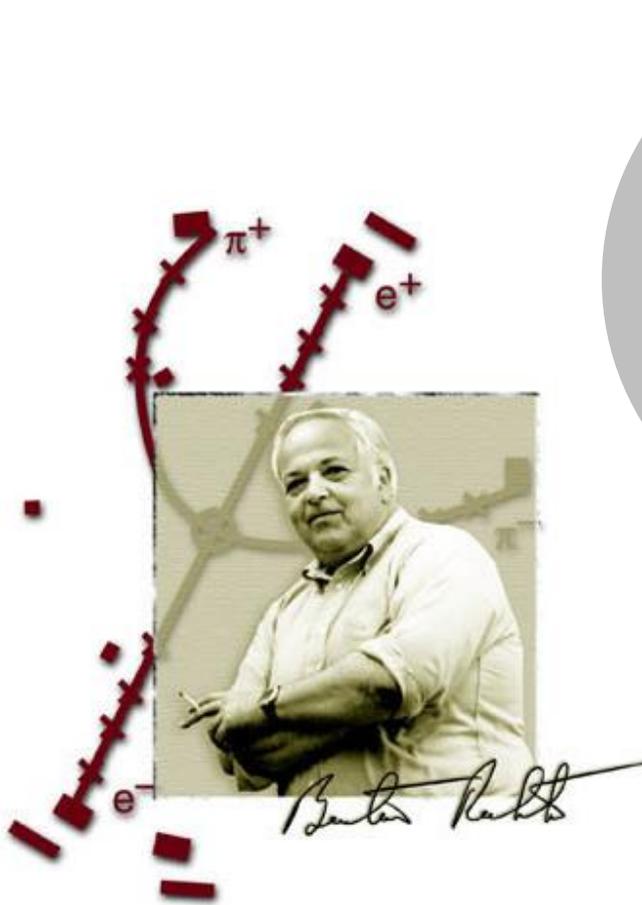


[How the Proton and Neutron Got Their Masses – Wolfram Demonstrations Project](#)

Hadronmassen in aktueller Gitter- QCD

- Baryonmassen: sehr gute Beschreibung durch die 'effektive' Gitter- QCD





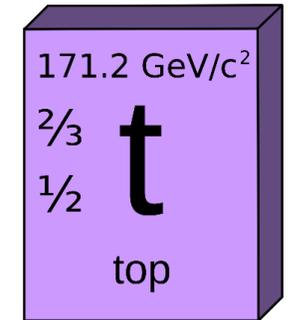
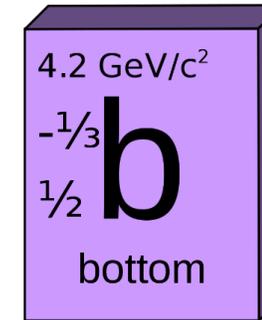
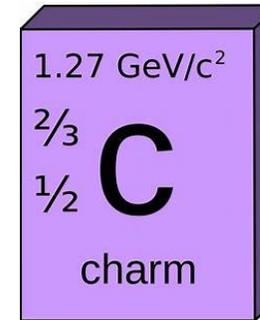
KAPITEL 6.2: QUARKONIUM

schwere Quarks: *charm, bottom, top*

■ Erzeugungsmechanismen



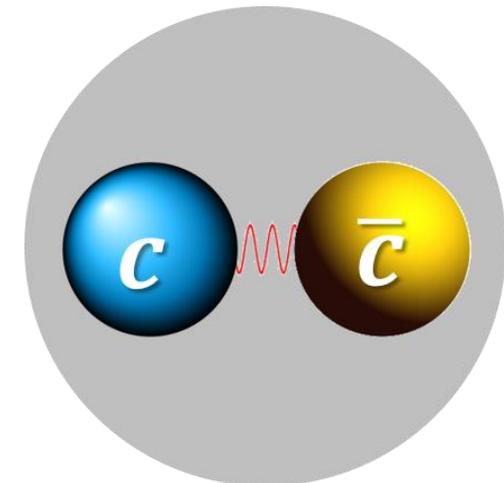
- paarweise Produktion in Prozessen der starken & elektromagnetischen Ww. als **Quark–Antiquark $q\bar{q}$** Systeme



- erhaltene Flavourquantenzahlen: **charm C , bottom B' , top T**

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

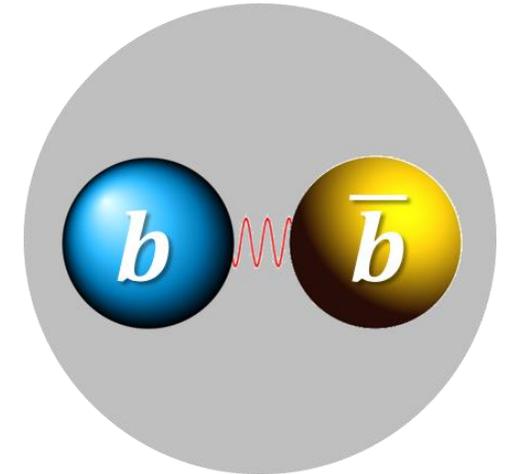
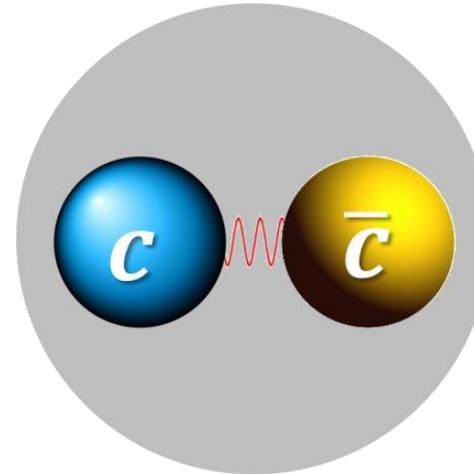
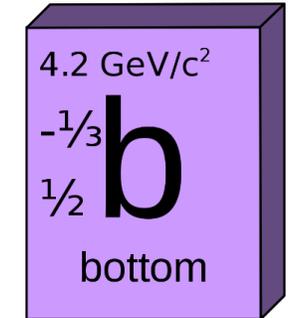
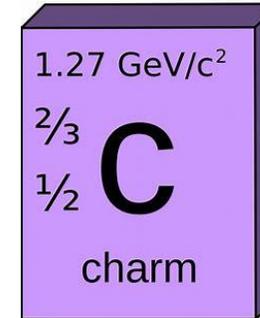
- **Charmonium: $c\bar{c}$** – Bindungszustand
- **QCD** – Analogon zu **Positronium** (e^+e^-)
- **QCD**: Untersuchung des **Quark–Quark Potentials**



Quarkonia, nachgefragt

■ Warum nur bei den schweren Quarks c und b ?

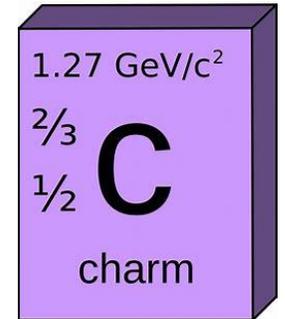
- wir beobachten nur **Charmonium** & **Bottomonium** (Grundzustand) !
- wieso beobachten wir dies nicht bei den leichten Quarks u, d, s ?



schwere Quarks: kurze Historie

■ Charm–Quark c

- **1970**: postuliert durch S. **G**lashow, J. **I**liopoulos, L. **M**aiani über den sog. **GIM** – Mechanismus (*kommt später*)
- **1974**: erster experimenteller Nachweis durch konkurrierende Teams von **B. Richter** & **S. Ting**



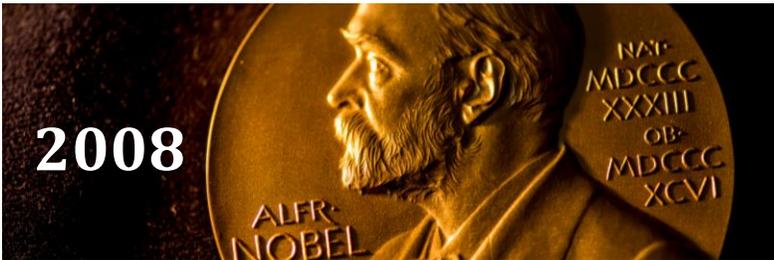
■ Bottom–Quark b , Top–Quark t

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

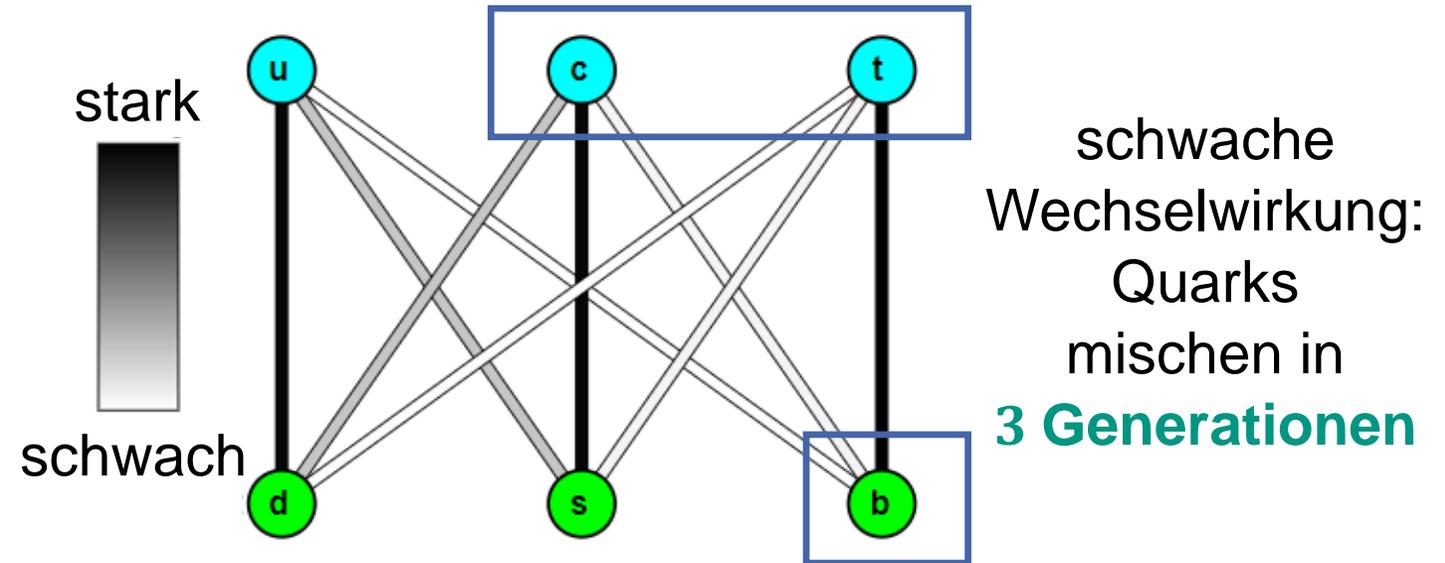
1970 postuliert durch S. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani
über den sog. GIM – Mechanismus (kommt später)

schwere Quarks: Historie

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



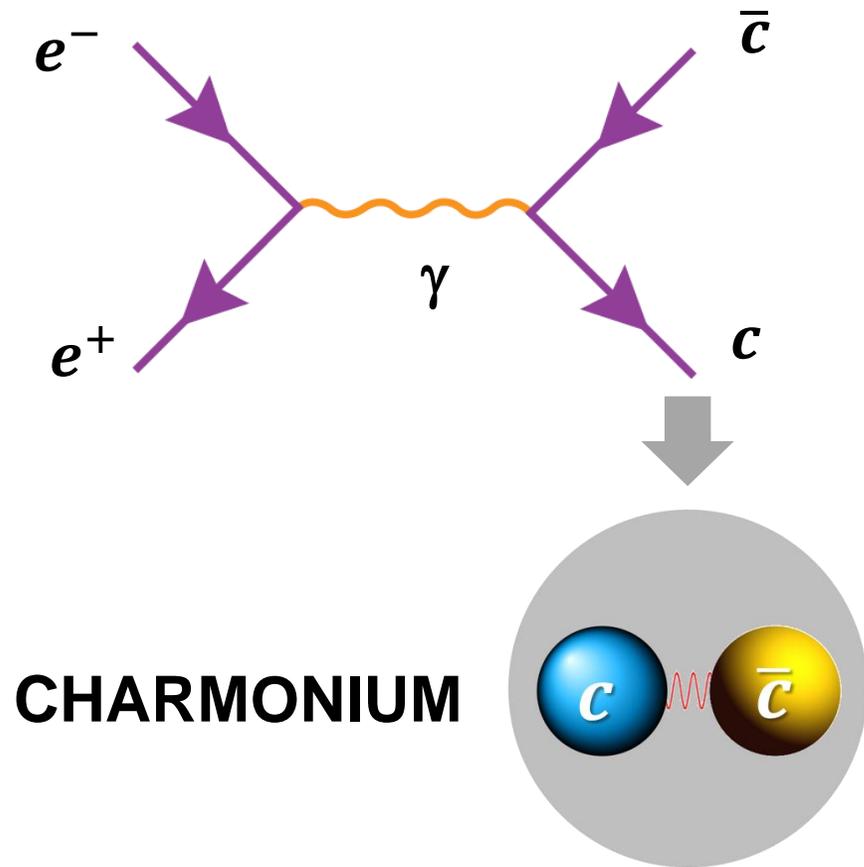
Makoto Kobayashi Toshihide Maskawa



"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 c – Quarks: das J/ψ

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



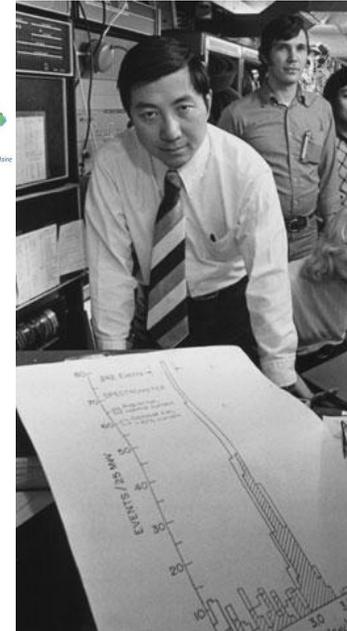
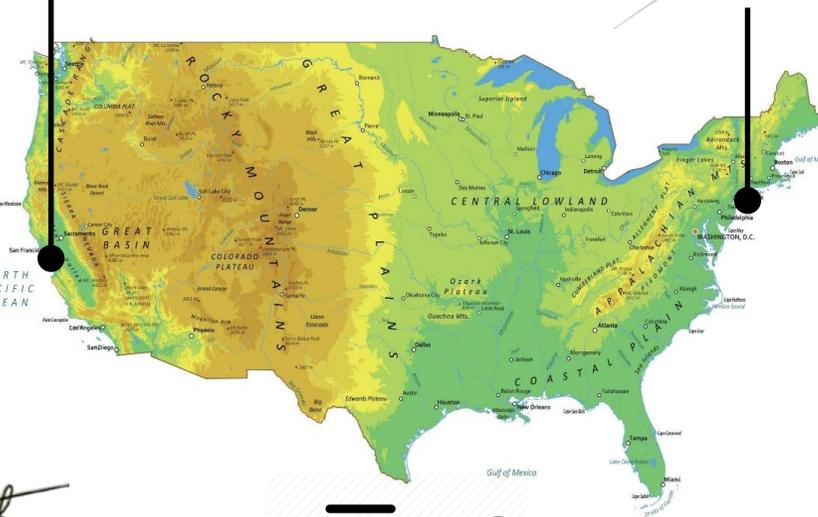
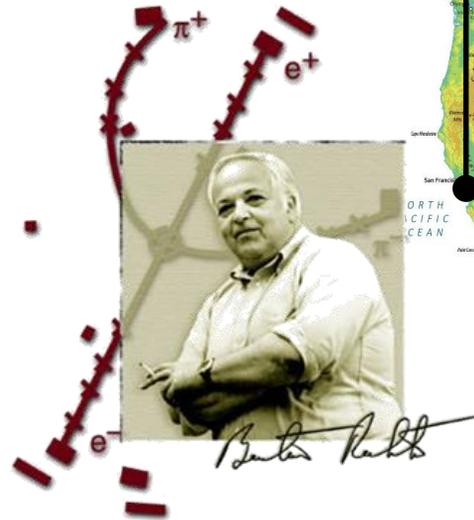
CHARMONIUM



SLAC
NATIONAL
ACCELERATOR
LABORATORY



BROOKHAVEN
NATIONAL LABORATORY



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

Entdeckung des c – Quarks: das J/ψ

■ US – Westküste am *SLAC*: Team 1 um *Burton Richter*

- Experiment *MARK I* am *SPEAR* $e^+ - e^-$ Speicherring (auf einem Parkplatz...)

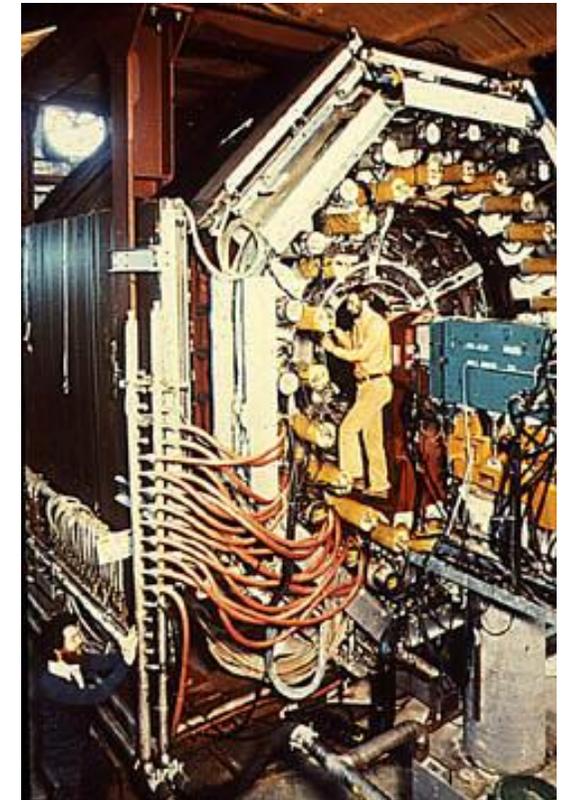
Speicherring mit $E = 1,3 \dots 2,4 \text{ GeV}$ –

Beobachtung einer Resonanz bei $\sqrt{s} = 3,1 \text{ GeV}$!



Mark I Detektor
am *SPEAR*

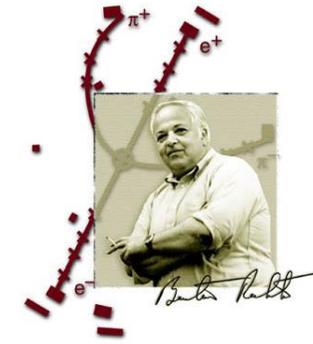
Stanford *P*ositron *E*lectron
*A*symmetric *R*ing



Entdeckung des c – Quarks: das J/ψ

■ US – Westküste am SLAC: Team 1 um *Burton Richter*

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



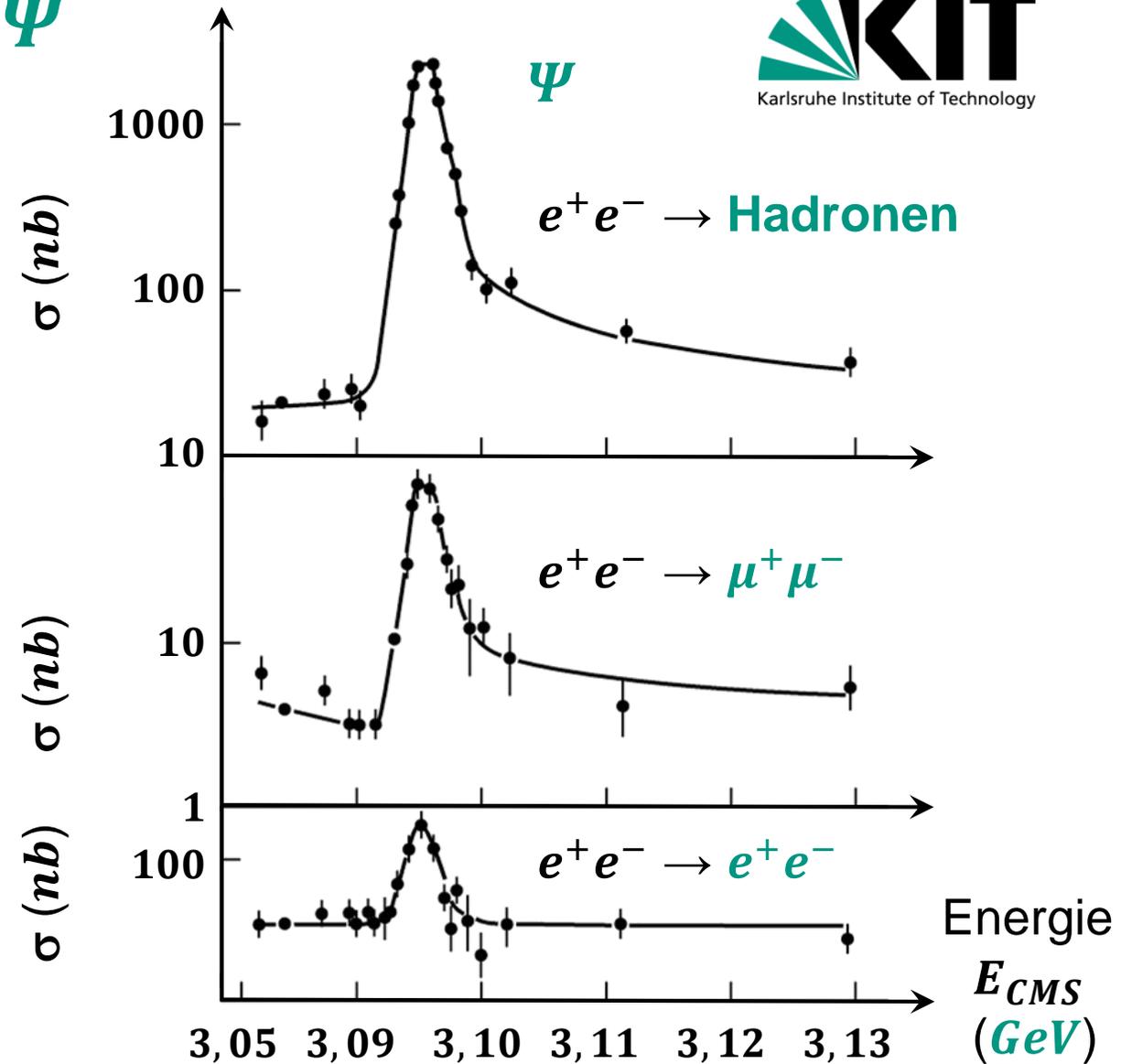
ein
 Ψ

Maurice Goldhaber *Burt Richter*
Martin Perl

Entdeckung c – Quark: das J/ψ

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

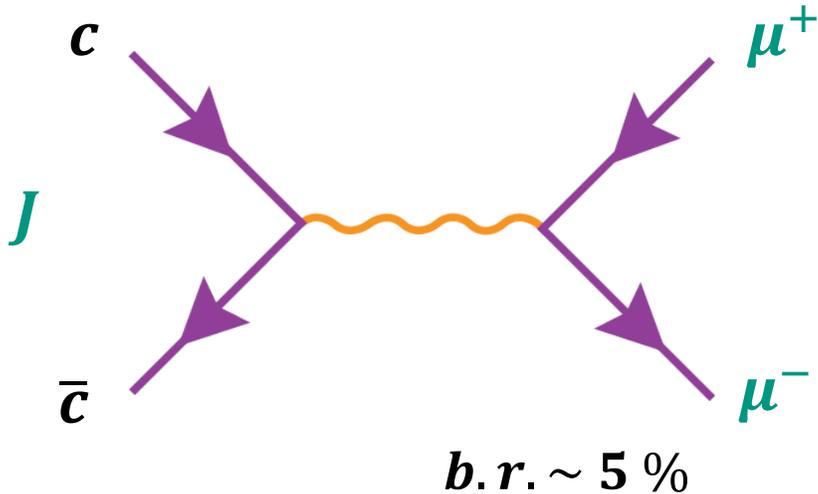
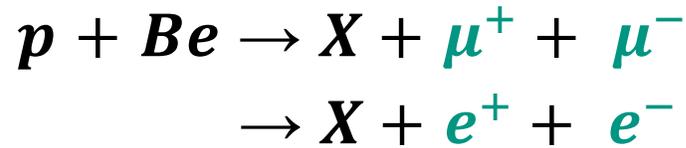
- Identifikation der Zerfalls-Signaturen des ψ :
klare Resonanz in E_{CMS} !



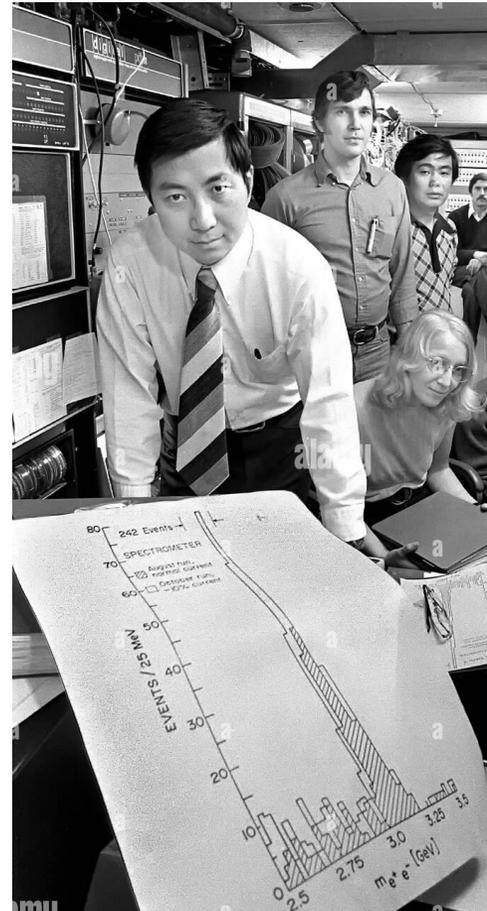
Q: SLAC, wiki commons

Entdeckung des c – Quarks: das J/ψ

- **US – Ostküste am BNL:**
Team 2 um Sam Ting am AGS*
 - 28 GeV p treffen auf Be – Target:



Sam
Ting



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

EW LETTERS

2 DECEMBER 1974

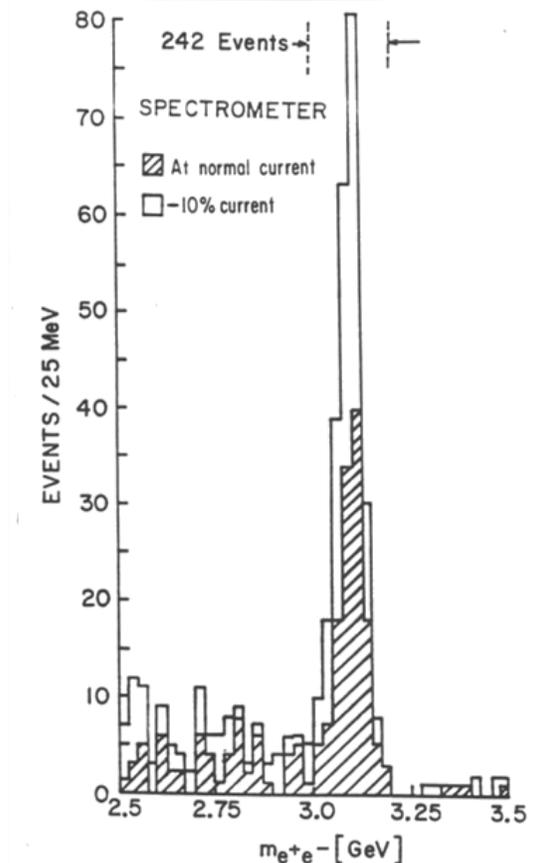


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J/ψ . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

November-Revolution: Entdeckung des c – Quarks Karlsruhe Institute of Technology

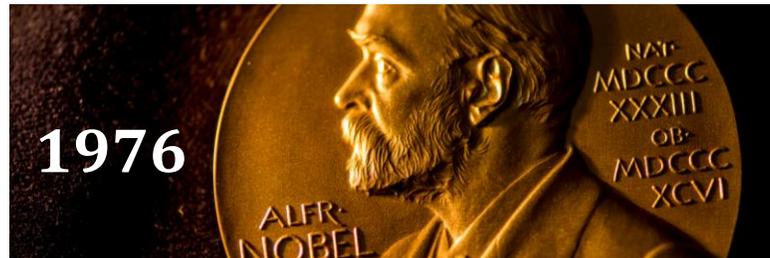
- **November-Revolution 1974**: der wichtigste Schritt auf dem Weg hin zur Erkenntnis, dass die Quarktheorie eine physikalische Realität widerspiegelt
 - **11. 11. 1974**: die Teams um **Burton Richter (SLAC)** & **Sam Ting (BNL)** verkünden gemeinsam die Entdeckung des Charm-Quarks
 - die enge **Charmonium-Resonanz** bei $M = 3,1 \text{ GeV}$ wird unter dem Doppelnamen **J/ψ** bekannt



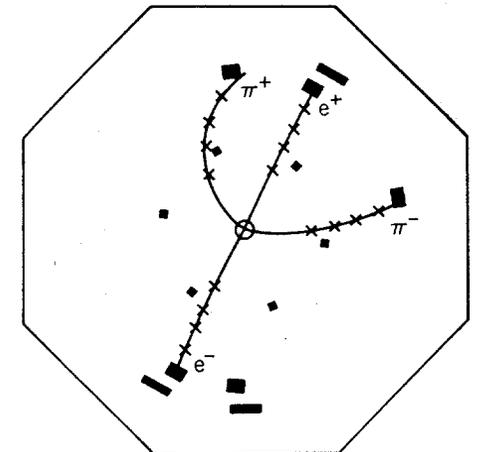
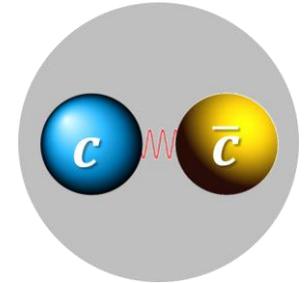
Burt Richter



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 Γ** \Rightarrow **Breit – Wigner Resonanz***
- erzeugt aus virtuellem Photon: $Spin = 1, P = -1$

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

$$J^{PC} = 1^{--}$$

} starke Ww.
erhält die
charm – Flavour !!

Angeregte Charmonium–Zustände

■ Psi–Resonanzen bei höherer Schwerpunktsenergie bei *SPEAR*

- kurz nach der J/Ψ Entdeckung: Beobachtung von **weiteren Resonanzen**

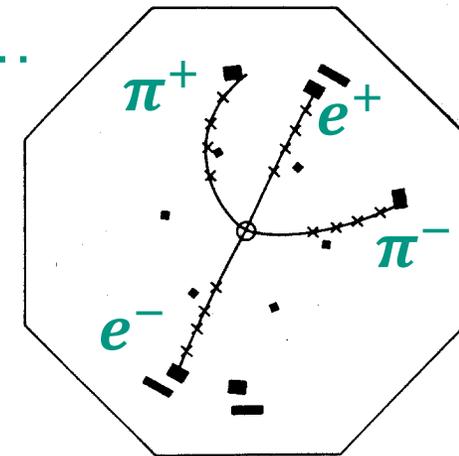
Beispiel: $\Psi(2S) \rightarrow J/\Psi (\rightarrow e^+ + e^-) + \pi^+ + \pi^-$

- **Anregungen** des *Spin* – 1 Systems von **Charmonium**

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

Teilchen 'schreibt'
seinen Namen...

Zerfallssignatur
eines $\Psi' = \Psi(2S)$
im *MARK I* Detektor



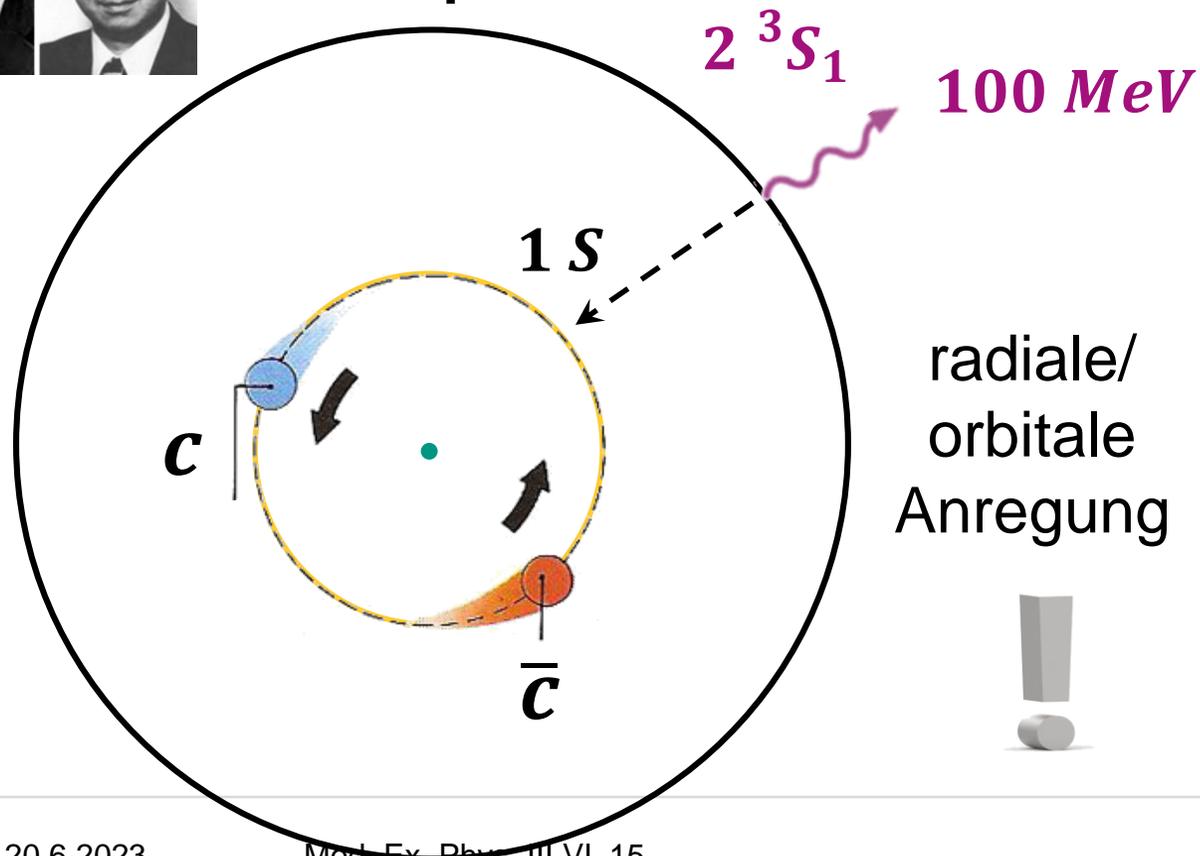
Charmonium und Positronium

- gebundene Zustände von **starker** & **elektromagnetischer Wechselwirkung**

Charmonium

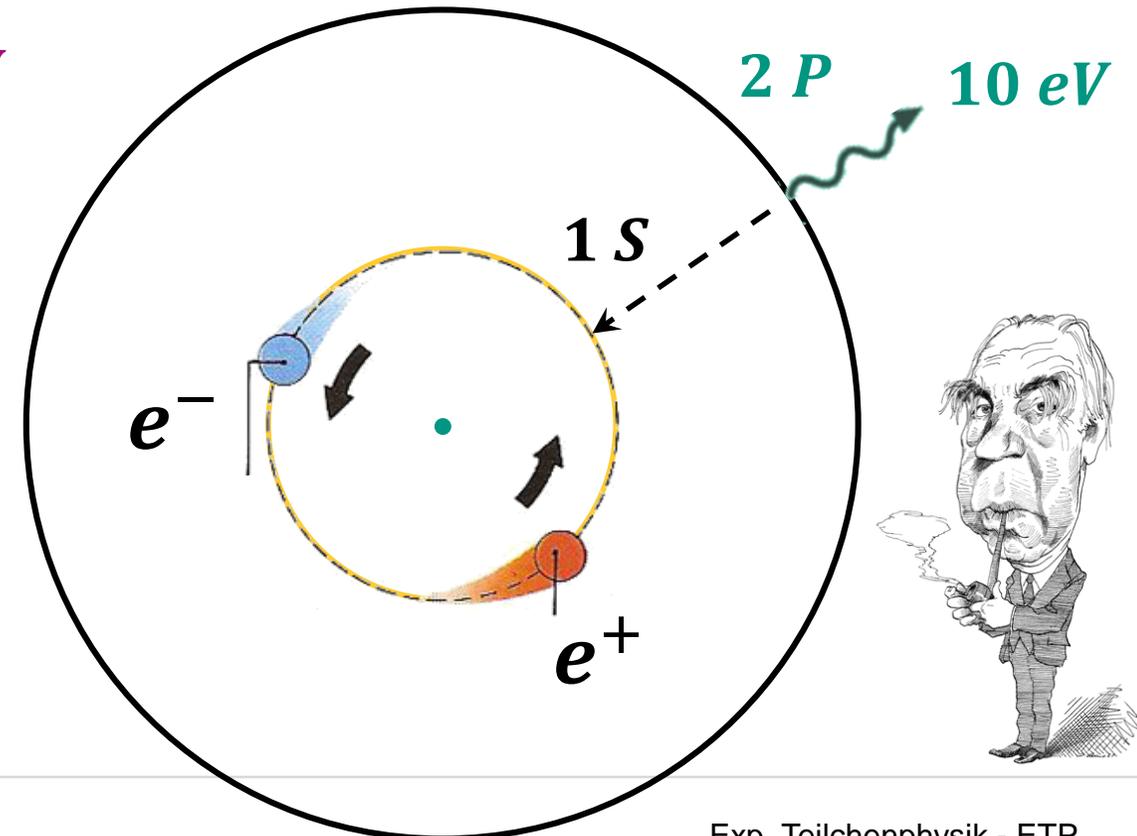


?



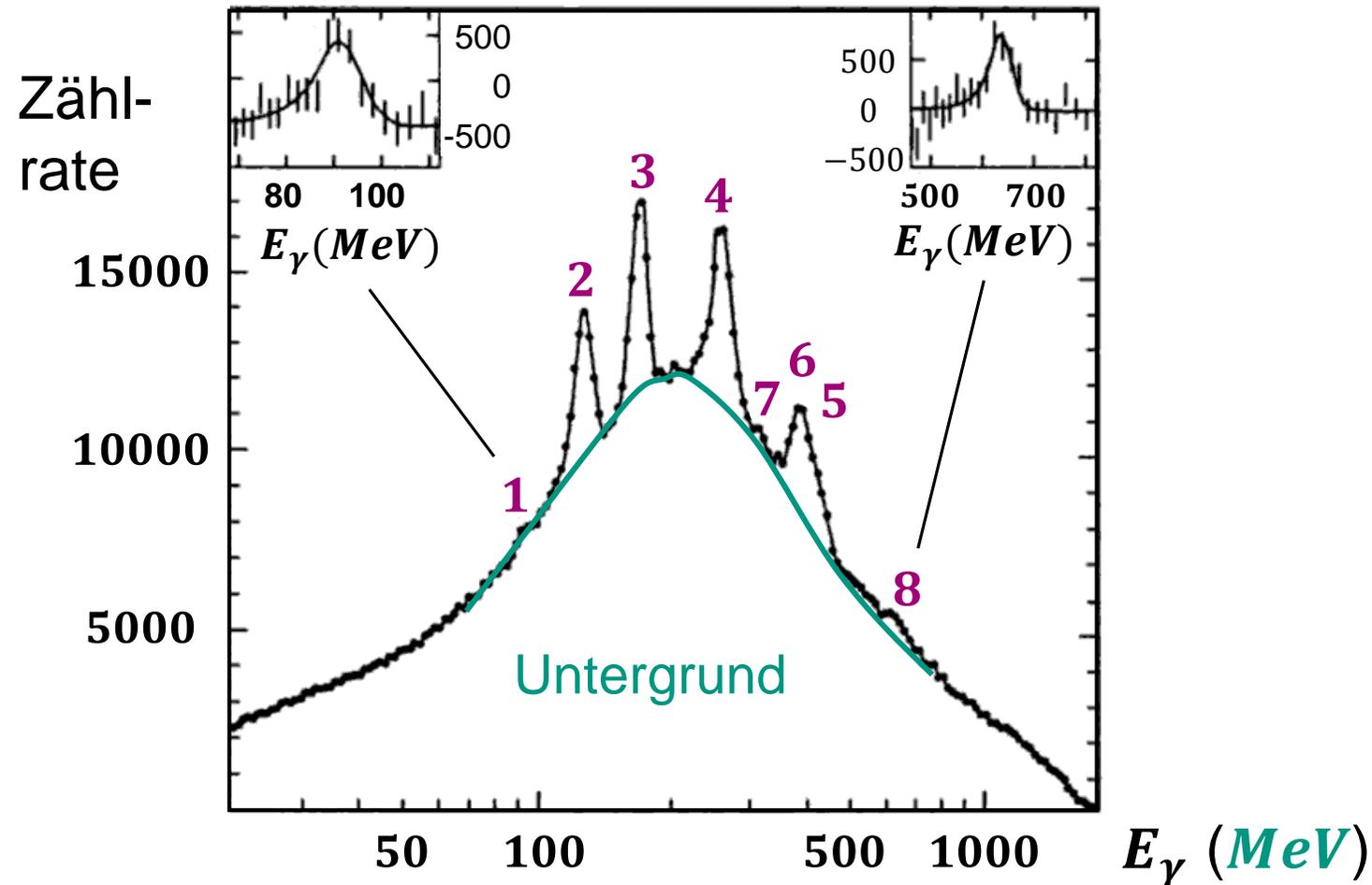
Positronium

Coulomb-Potenzial



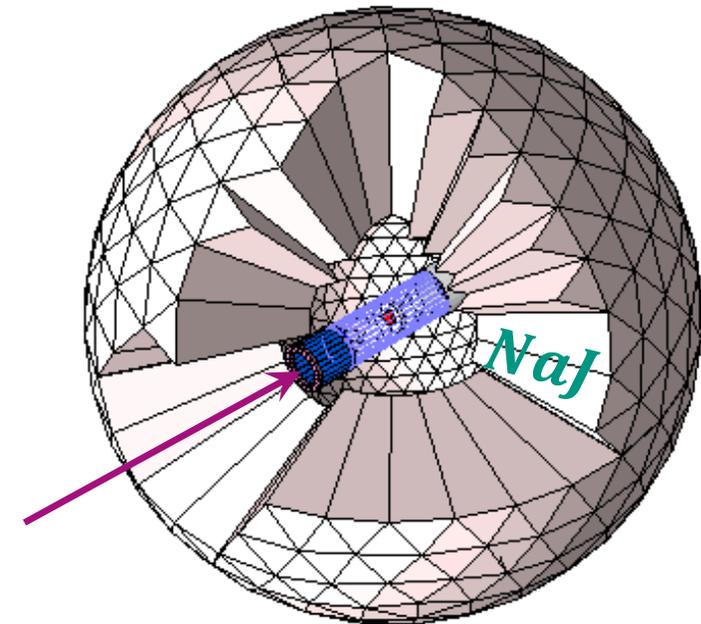
Zerfall angeregter Charmonium-Resonanzen

- 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)

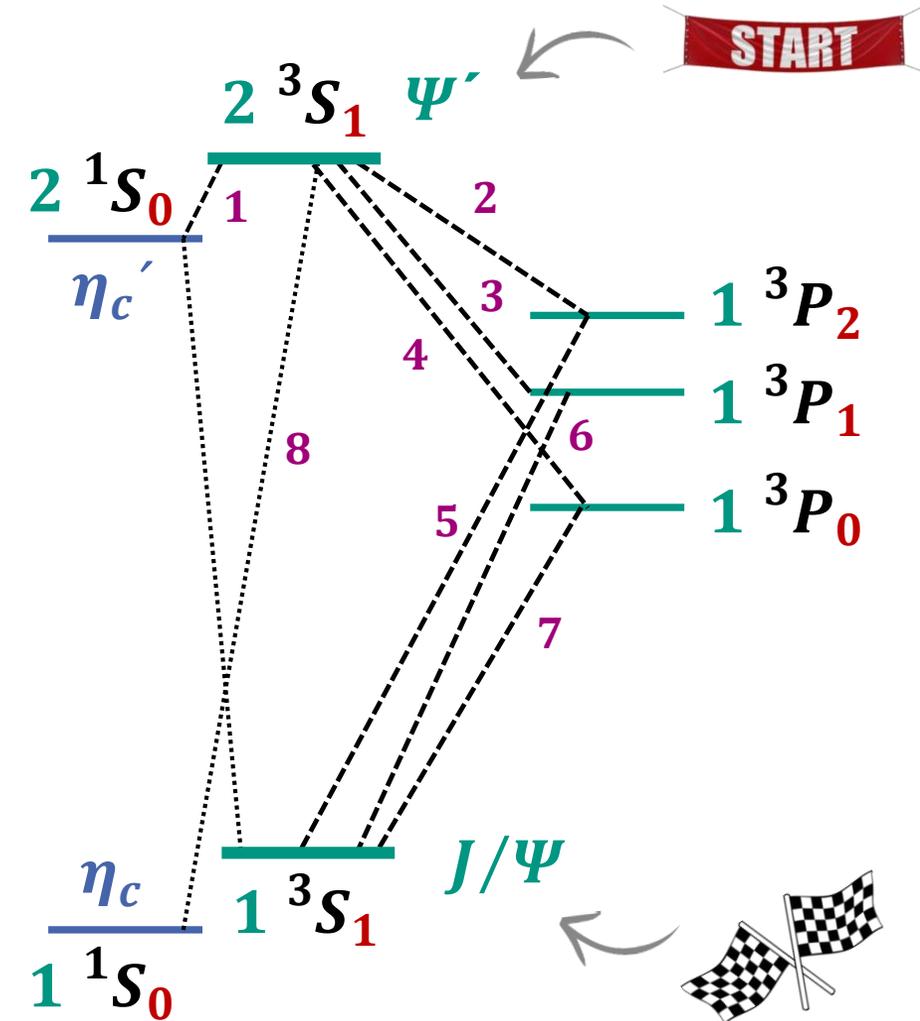
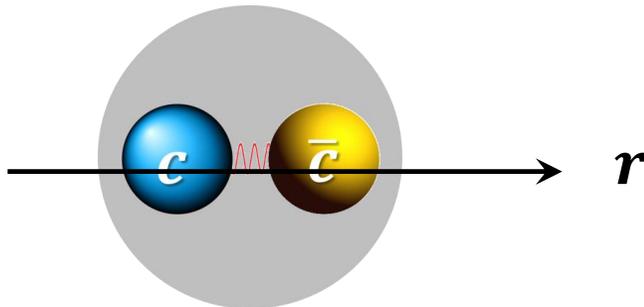
Notation der **Meson-Spektroskopie***:

$$n^{2s+1}\ell_J$$

$$\vec{J} = \vec{S} + \vec{\ell}$$

n : **radiale** Anregung (Hauptquantenzahl)

ℓ : **orbitale** Anregung (Bahndrehimpuls)

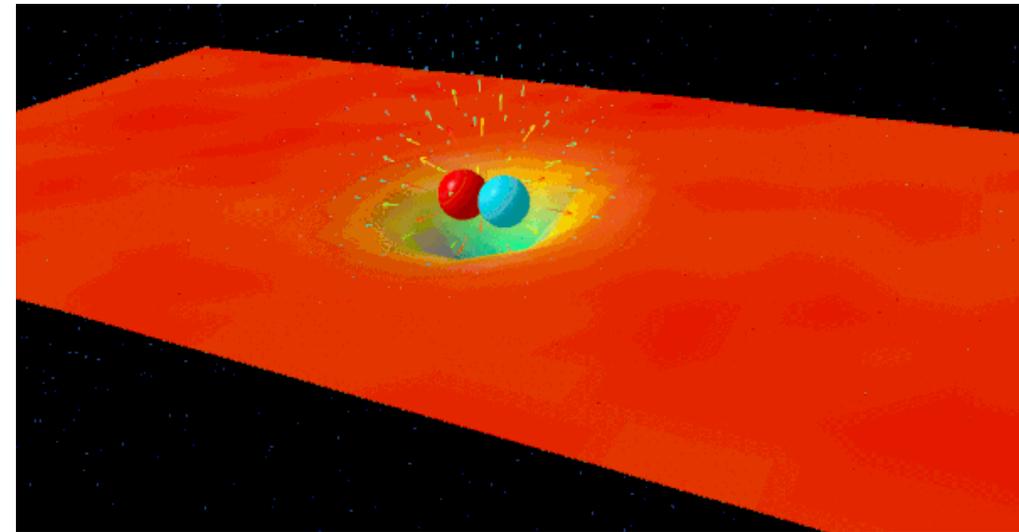
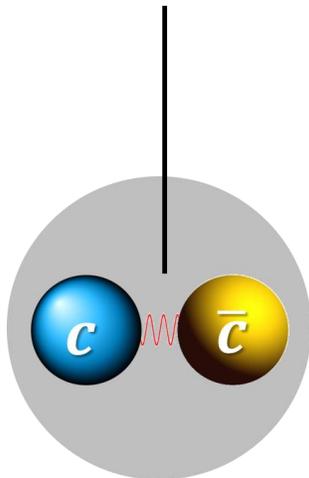


Anregung von Charmonium

■ Rekonstruktion des Quark–Quark Potentials

- Hauptquantenzahl n : radiale Anregungen von Charmonium

wie ändert sich das
Quark–Quark Potenzial?

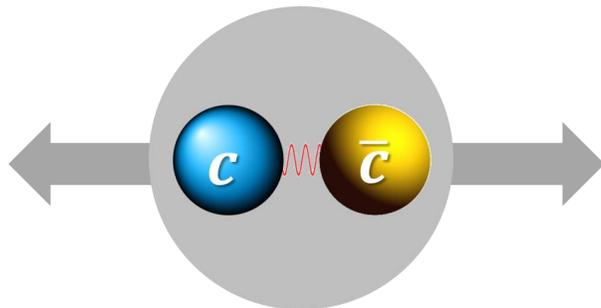


Farbkraft zwischen einem
System aus zwei Quarks

Quark-Quark Potenzial

■ Rekonstruktion des Quark–Quark–Potenzials* aus Charmonium–Spektroskopie

- Vergleich mit $1/r$ Potenzial von Positronium
- *QCD* – Potenzial bei $n = 1, 2$ (d.h. bei kleinem r) ist Coulomb–artig
- große Abstände r : linear anwachsendes Quark–Quark Potenzial



starke Kopplung

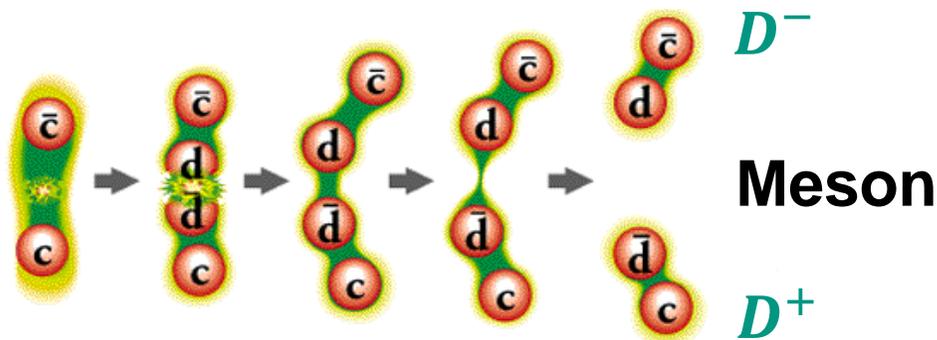
$$V(r) = -\frac{4}{3} \cdot \alpha_s(r) \cdot \hbar c \cdot \frac{1}{r} + \kappa \cdot r$$

Konstante

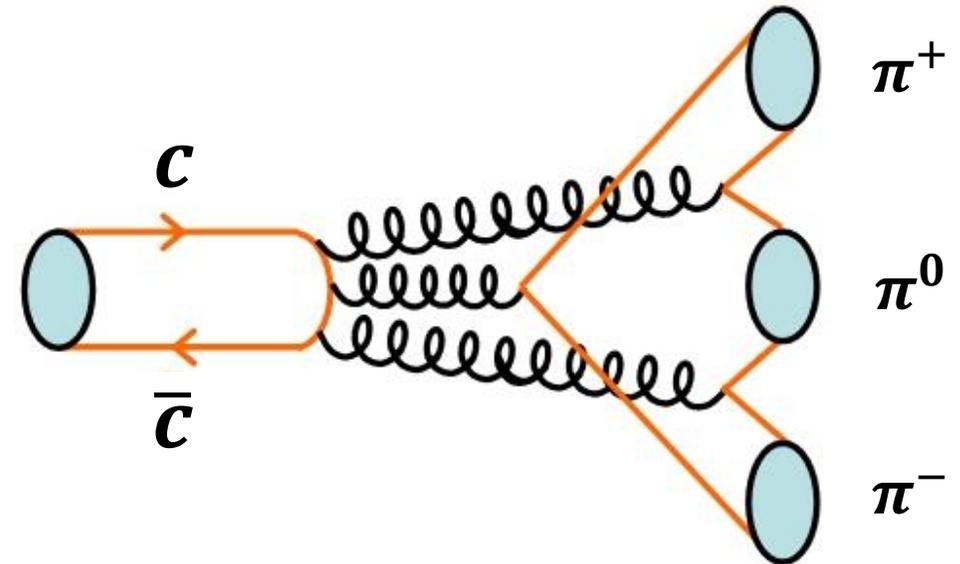
Hadronische Charmonium–Zerfälle

■ Hoch angeregte Zustände: hadronische Zerfallskanäle

- ab 3,7 GeV: **hadronische Zerfälle** von Charmonium möglich



J/ψ



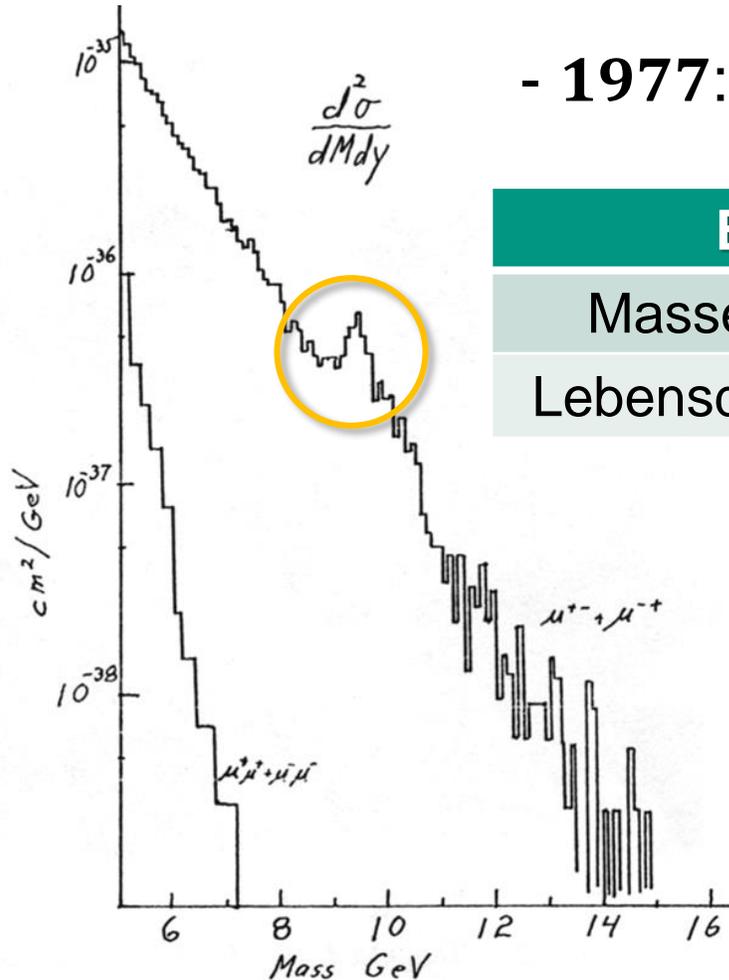
D – Mesonen mit 'offenen' charm-Quarks*

Abstrahlung von **Gluonen**
(Träger starke Kraft)*

Bottomonium – das Upsilon Υ

■ Entdeckung eines Peaks bei $\sqrt{s} = 9,5 \text{ GeV}$: neuer Zustand **Bottomonium $b\bar{b}$**

- 1977: Nachweis im Fermilab-Experiment *E 288* bei $E_p = 400 \text{ GeV}$



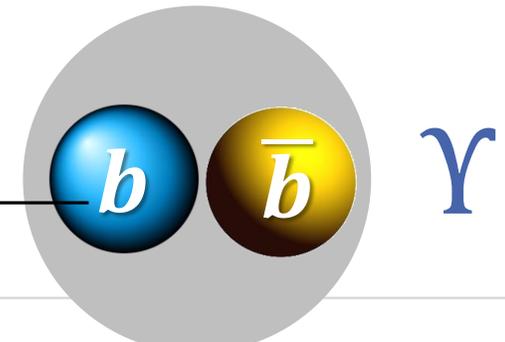
Eigenschaften von Υ		Resonanz	M (MeV)	Breite Γ (MeV)
Masse (MeV)	$9460,30 \pm 0,26$	$\Upsilon (1 S)$	9460	0,053
Lebensdauer τ (s)	$1,21 \cdot 10^{-20}$	$\Upsilon (2 S)$	10023	0,043
		$\Upsilon (3 S)$	10355	0,026
		$\Upsilon (4 S)$	10580	20
		$\Upsilon (10860)$	10865	110



Leon Lederman*

Originalpublikation:
Auftragung der invarianten Masse

4,2
GeV

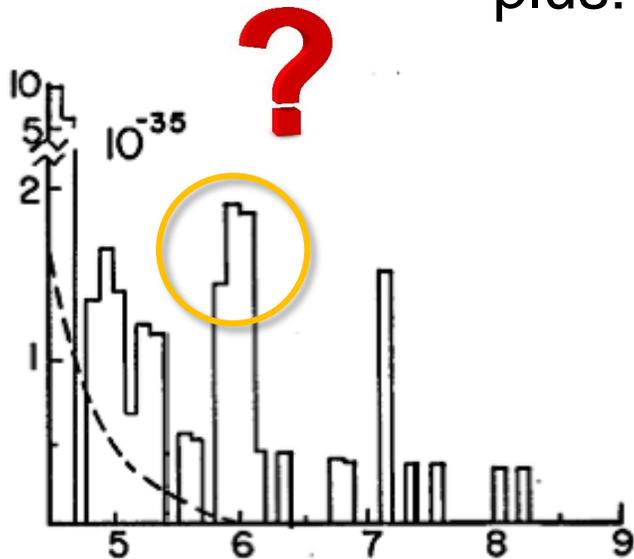


Bottomonium – das ‘Oops-Leon’

■ 1976: ‘Entdeckung’ eines Peaks bei $\sqrt{s} = 6 \text{ GeV}$

$P \sim 1 : 50$ für zufällige Fluktuation

- statistische Fluktuation im Fermilab–Experiment *E 288*
- für eine Entdeckung eines Effekts/Teilchens wird heute* ein **Signal mit einer Signifikanz von $> 5 \sigma$** gefordert
- plus: Ausschluss von ‘bias’ bei der Datenanalyse (‘**unblinding**’)



OOPS!
Leon
Lederman

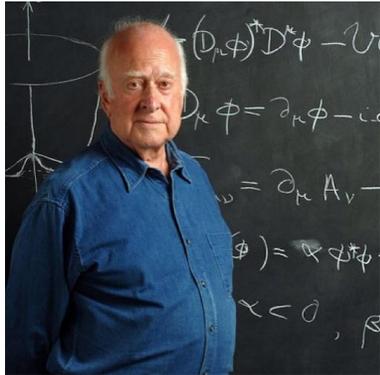
Originalpublikation:
Auftragung der invarianten Masse



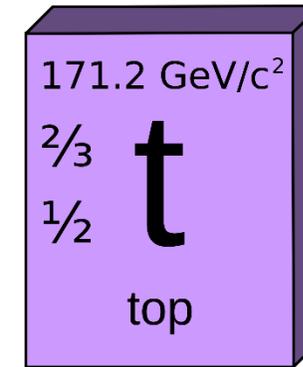
das Top–Quark: Eigenschaften

■ Top t : das schwerste bisher bekannte Elementarteilchen

- große Masse durch starke **Yukawa-Kopplung** an das **Higgs-Feld***

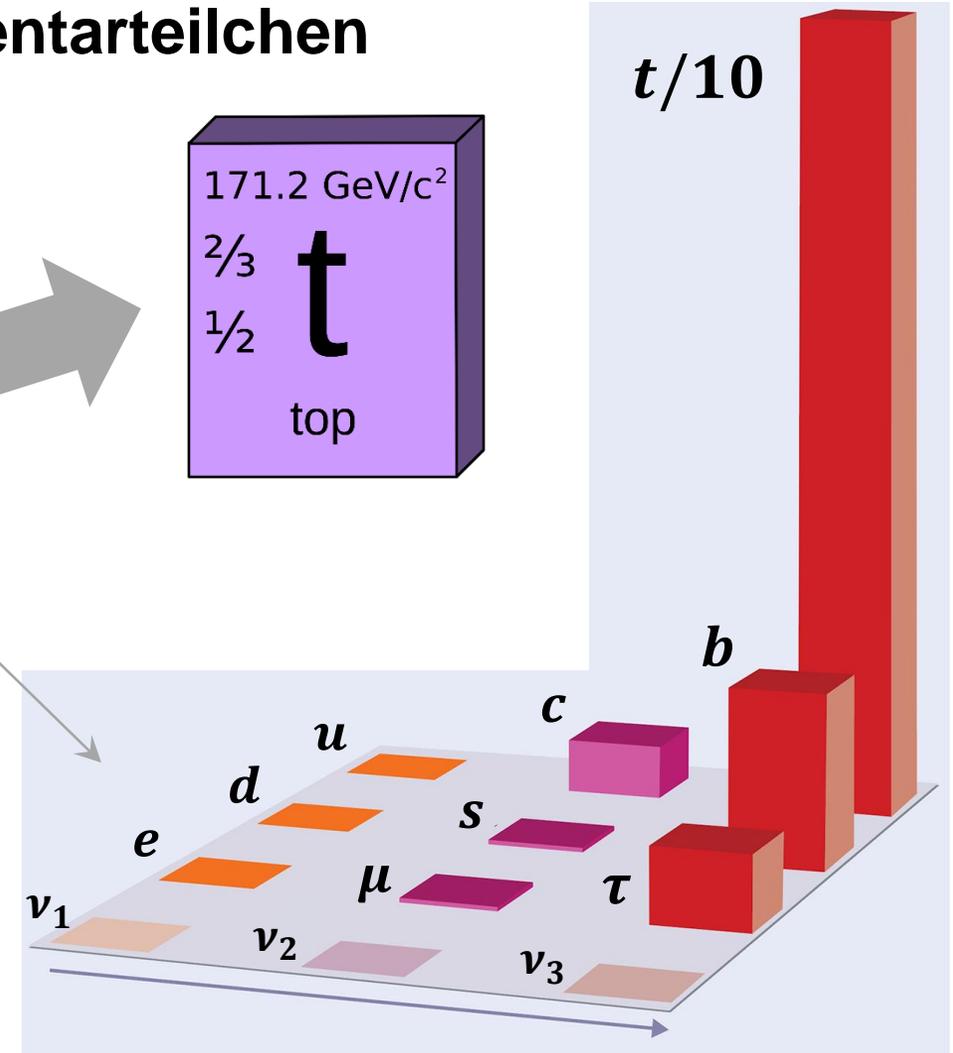


THE
HIGGS
BOSON



Eigenschaften des top – Quarks	
Masse (GeV)	$172,76 \pm 0,3$

*Higgs-Mechanismus später in Kap. 7.2

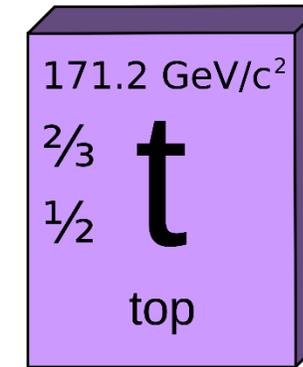


Q: symmetry magazinr, wikipedia, j cham

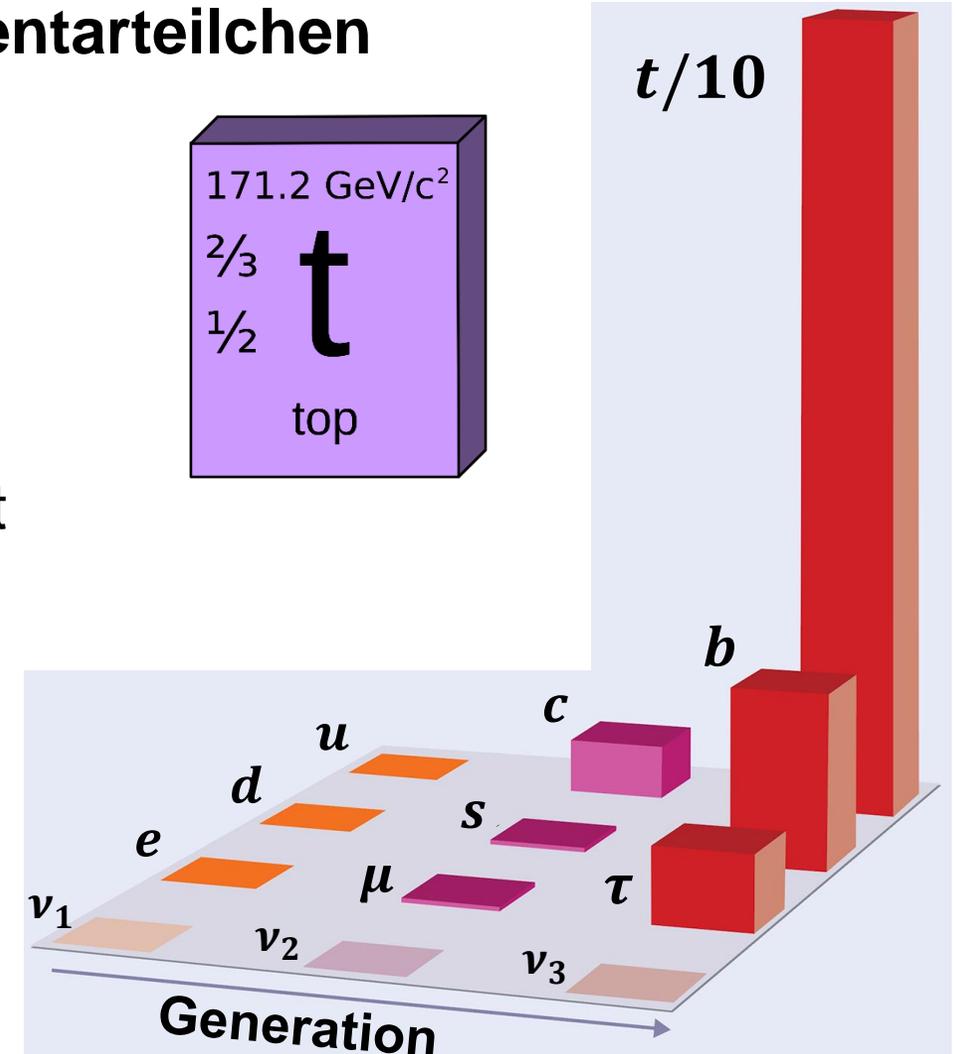
das Top–Quark: Eigenschaften

■ Top t : das schwerste bisher bekannte Elementarteilchen

- extrem kurze Zerfallszeit τ : zerfällt über die **schwache Wechselwirkung**
- Top t zerfällt, bevor es über die **starke Wechselwirkung** mit **Glukonen interagiert** (würde $\delta t \sim 10^{-23} s$ erfordern), daher existiert kein 'Topomonium'–Zustand



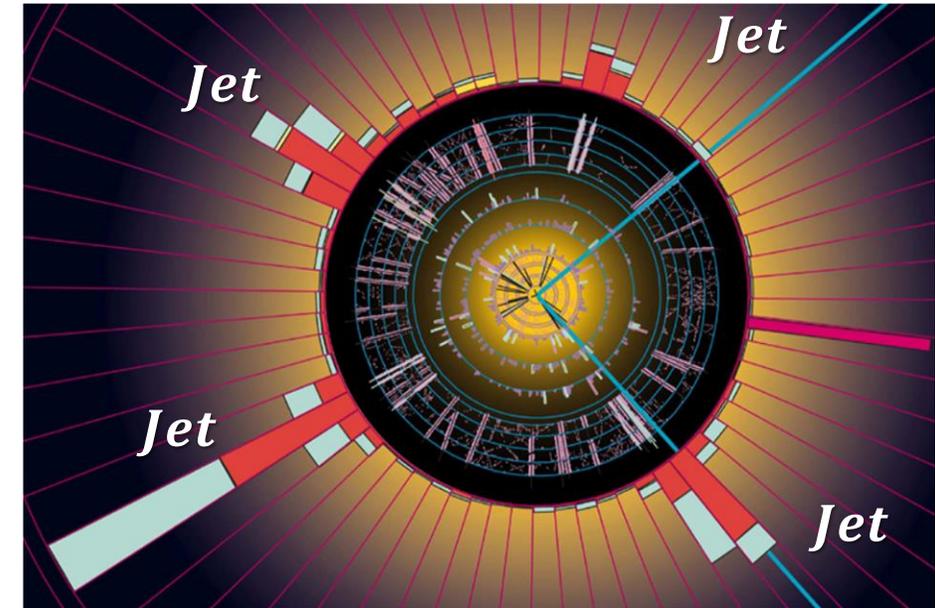
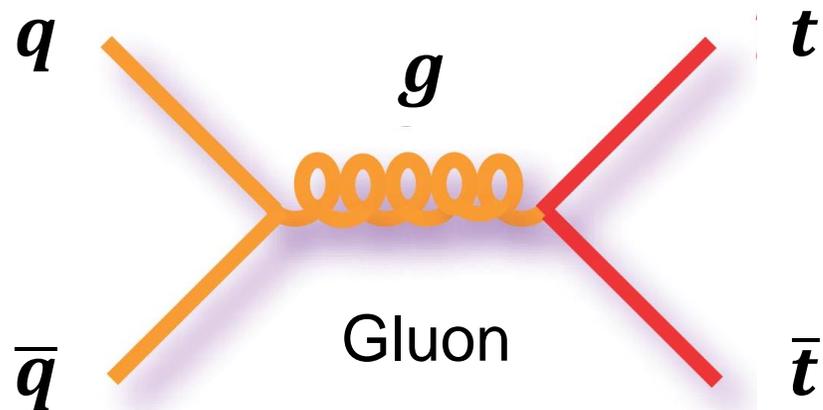
Eigenschaften des top – Quarks	
Masse (GeV)	$172,76 \pm 0,3$
Lebensdauer τ (s)	$5 \cdot 10^{-25}$
Zerfall (schwache Ww.)	$t \rightarrow b$



Top–Quark: erster Nachweis über Paarproduktion

■ Erster Nachweis am **Fermilab** (Tevatron) über Top–Anti-Top Paare (1995)

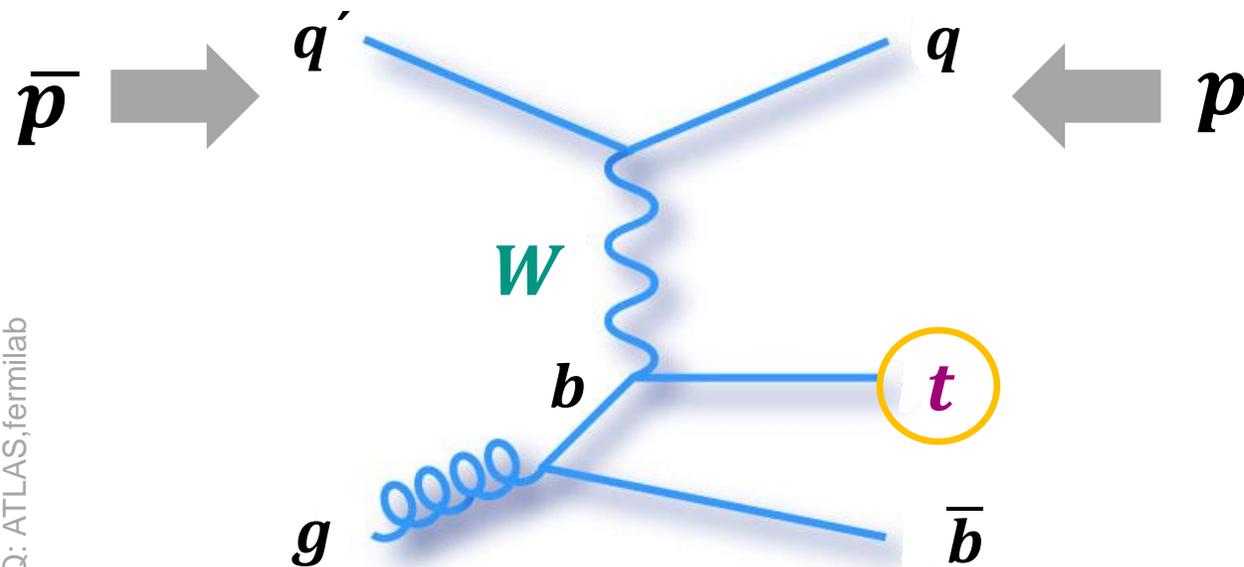
- die beiden Experimente *CDF** und *DØ* beobachten **Top–Antitop-Paare** über hadronische Erzeugung ($\rightarrow 4 \text{ Jets}$)



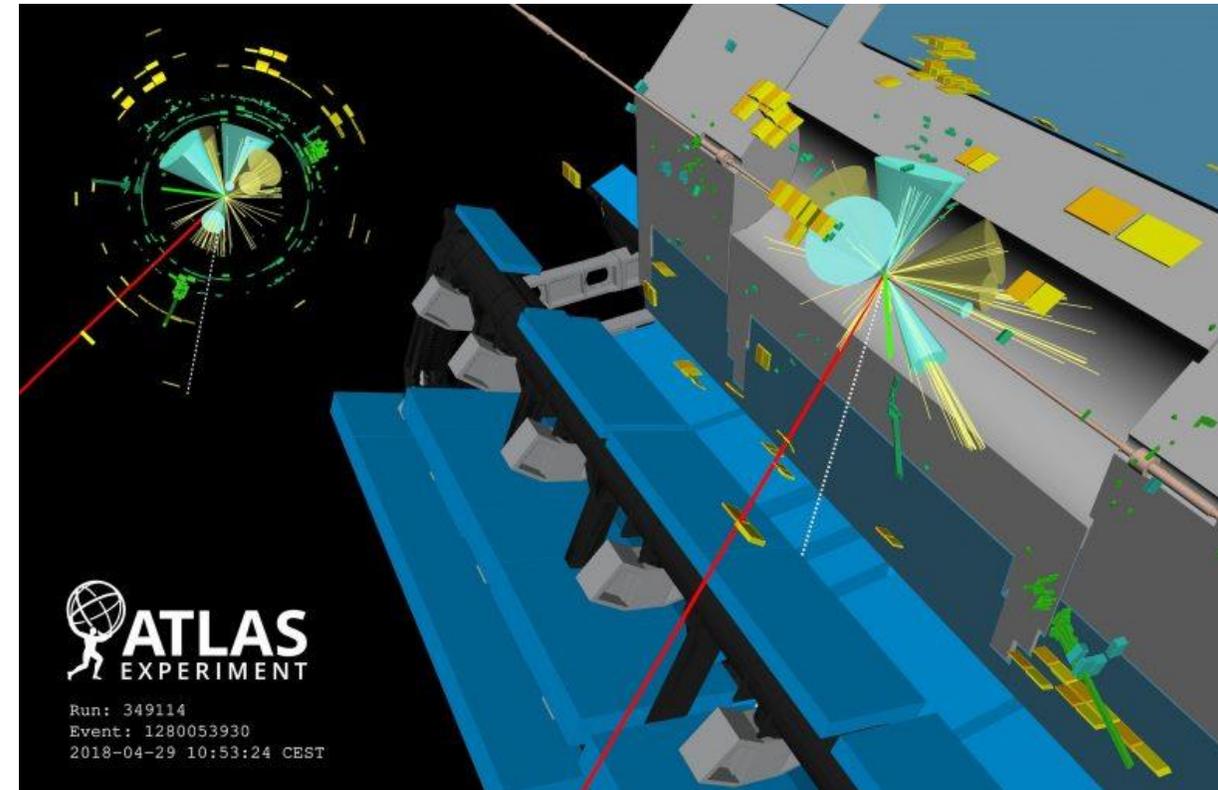
Top–Quark: moderne Untersuchungen

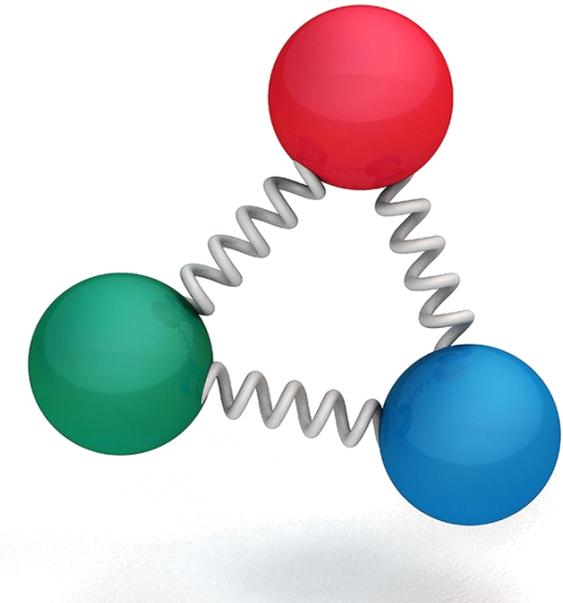
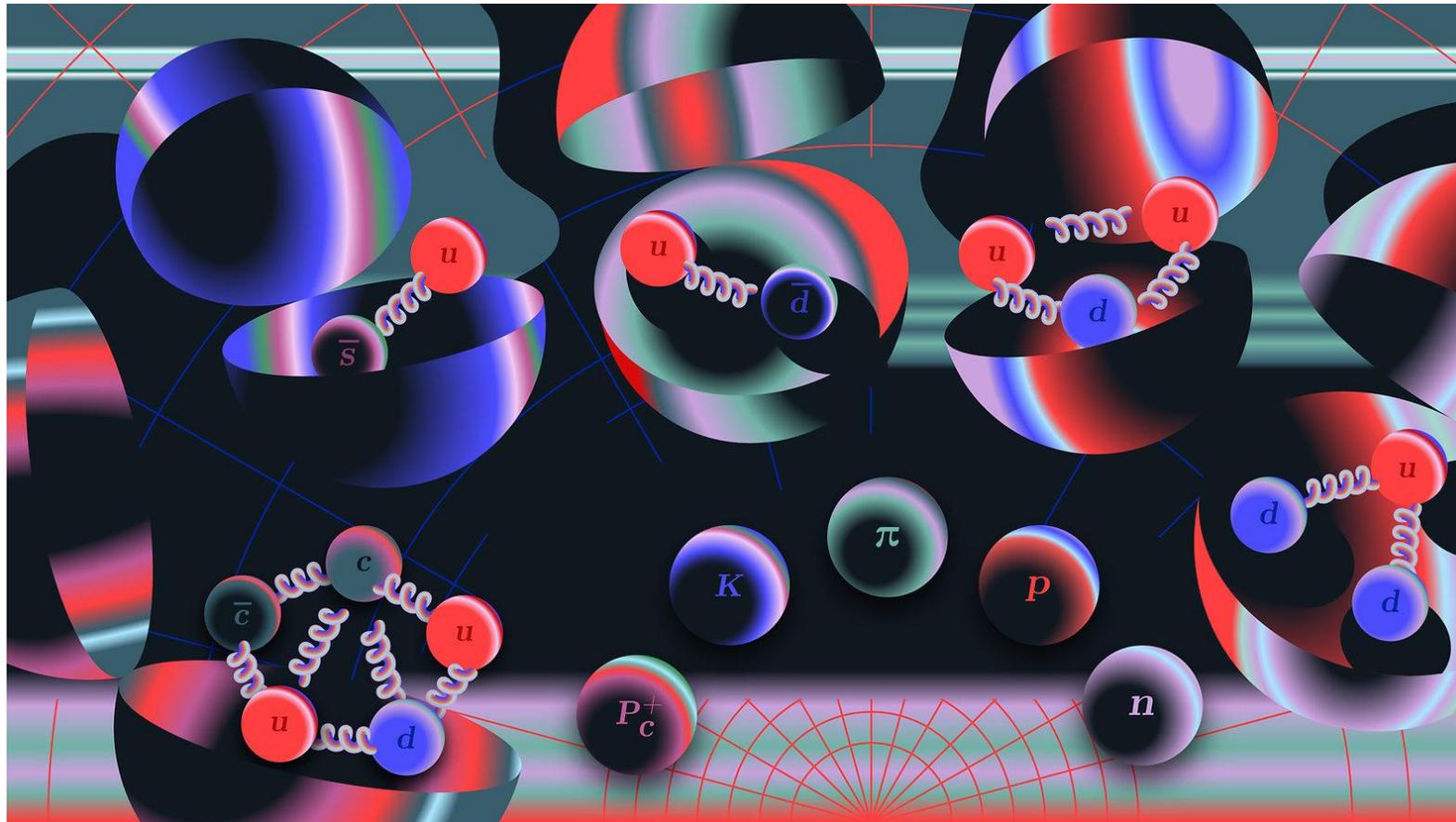
- Erster Nachweis am **Fermilab** (Tevatron), weitere Analysen von CDF^* & $DØ$, sowie heutige Analysen am **CERN** (*ATLAS*)

- Erzeugung einzelner Top–Quarks
in $p - \bar{p}$ über die **schwache Ww.**



Ereignis mit **4** Top–Quarks (2020)





KAPITEL 6.3: FARBWECHSELWIRKUNGEN IN DER *QCD*

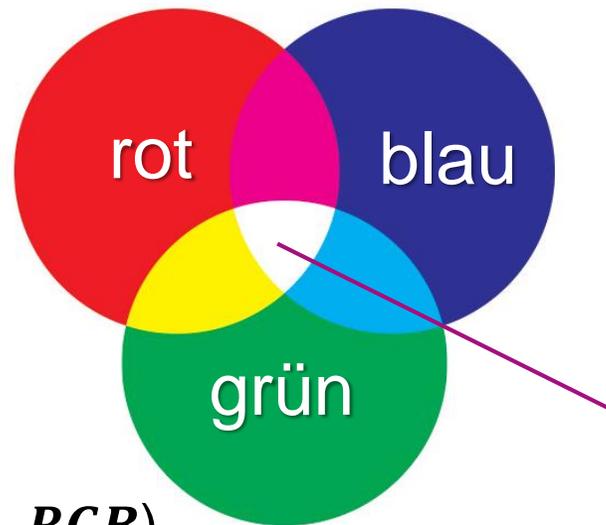
Farbe als Freiheitsgrad in der QCD

■ Symmetrie mit drei Farbladungen von Quarks & Antiquarks

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

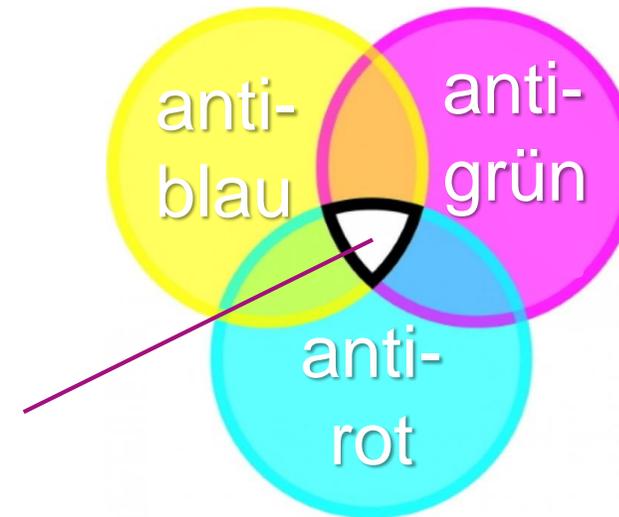
- Antiquarks mit Ladungen: \bar{r} (anti-rot), \bar{g} (anti-grün), \bar{b} (anti-blau)

Baryon



(additiv, RGB)

farb-
neutral



**Anti-
Baryon**

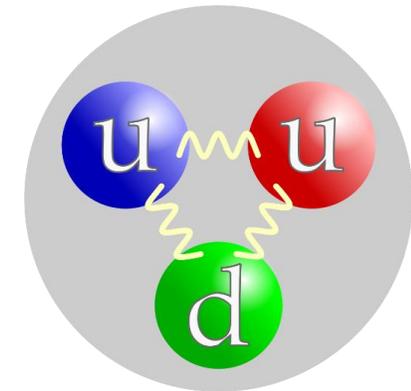
Farbe als Freiheitsgrad in der QCD

■ Symmetrie mit drei Farbladungen von Quarks & Antiquarks

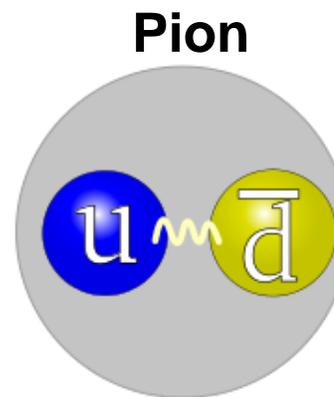
- Quark–Farbladungen: r, g, b
- Antiquarks mit Ladungen: $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$

■ Farbneutralität von Hadronen

- Gruppentheorie: $SU(3)_c$
- Baryonen: qqq ist immer farbneutral
- Mesonen: $q\bar{q}$ ist immer farbneutral

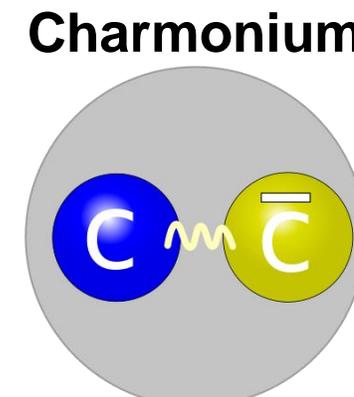


Proton



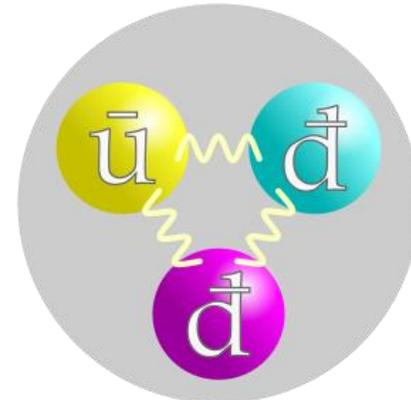
Pion

blau & anti-blau



Charmonium

blau & anti-blau



Anti-Neutron

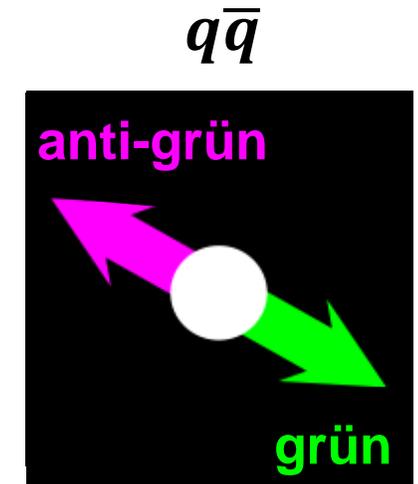
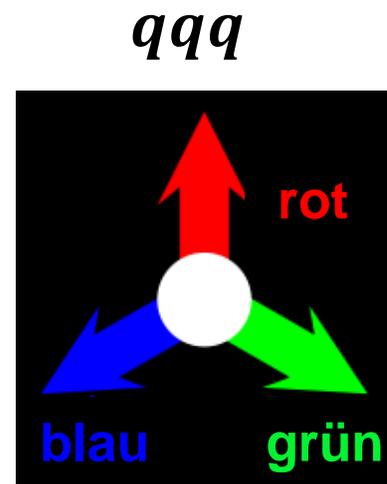
Farbe als Freiheitsgrad in der QCD

■ Symmetrie mit drei Farbladungen von Quarks & Antiquarks

- Quark–Farbladungen: r, g, b
- Antiquarks mit Ladungen: $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$

■ Farbneutralität von Hadronen

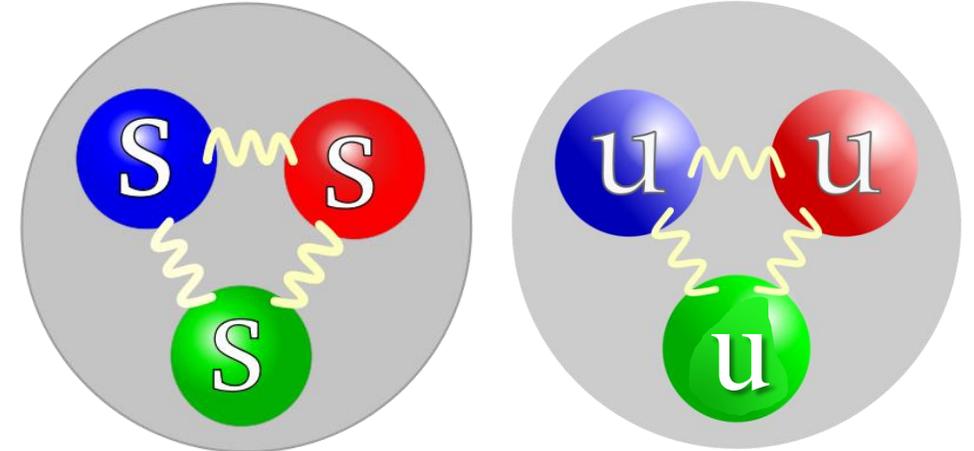
- Gruppentheorie: $SU(3)_c$
- Baryonen: qqq ist immer farbneutral
- Mesonen: $q\bar{q}$ ist immer farbneutral



Recap: Farbe & verallgemeinertes Pauli-Prinzip

■ Baryon–Resonanz–Zustände mit $J = 3/2$ (Δ^{++} , Δ^- , Ω^-)

- ohne die Existenz des **Farb-Freiheitsgrades** verletzen die drei Resonanzen Ω^- (sss), Δ^{++} (uuu) und Δ^- (ddd) das verallgemeinerte Pauli-Prinzip



■ Baryonen als Farb-Singulett-Zustände

- verallgemeinertes Pauli-Prinzip

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



Pauli ↑ ↓

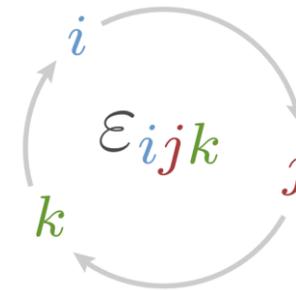
Farbe & verallgemeinertes Pauli-Prinzip

■ Baryon-Resonanz-Zustände & der QCD – Freiheitsgrad Farbe

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

Flavour
Spin
Orbital- ℓ

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

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

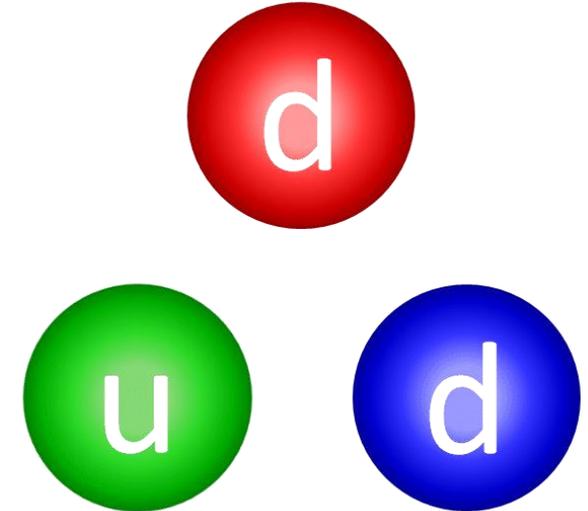
antisymmetrisch

Farb
freiheitsgrade

Freiheitsgrad Farbe: allgemeine Eigenschaften

■ Beschreibung der Farbladung in der *QCD*

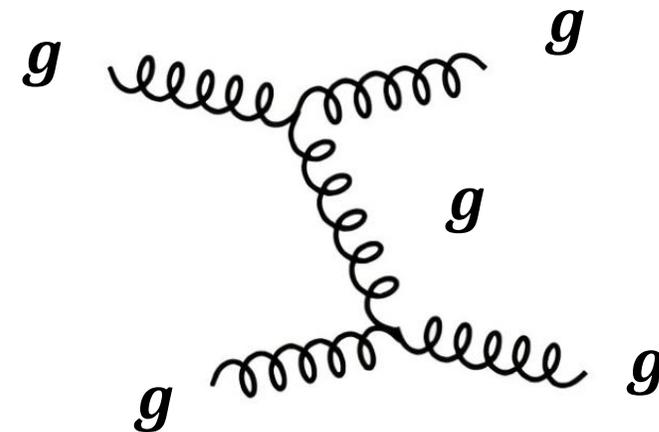
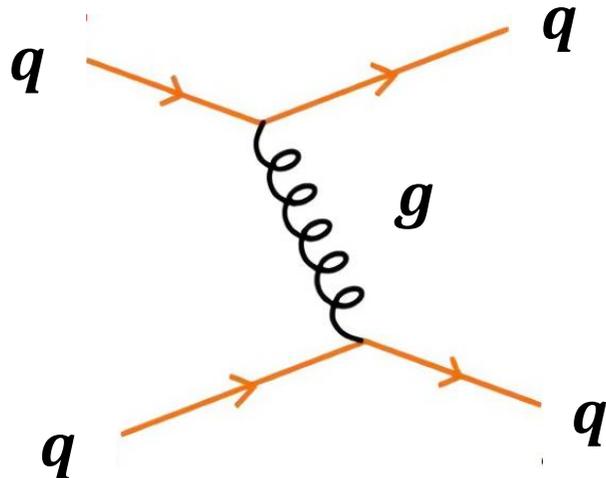
- Teilchen mit Farbladung unterliegen der *QCD* und damit der **starken Wechselwirkung**
- Farbladung ist in allen *QCD* Prozessen erhalten
- Farbladung der Quarks/Antiquarks führt zu **gebundenen Zuständen**
- gebundene Quarks ändern ständig ihre Farbe durch **Gluon–Austausch–Prozesse**



Eigenschaften von Gluonen

■ fundamental: Gluonen als Austauscheteilchen der starken (Farb-)Kraft

- Gluonen vermitteln starke Wechselwirkung zwischen Quarks
- jedes Gluon g = **masseloses Spin 1 – Boson**

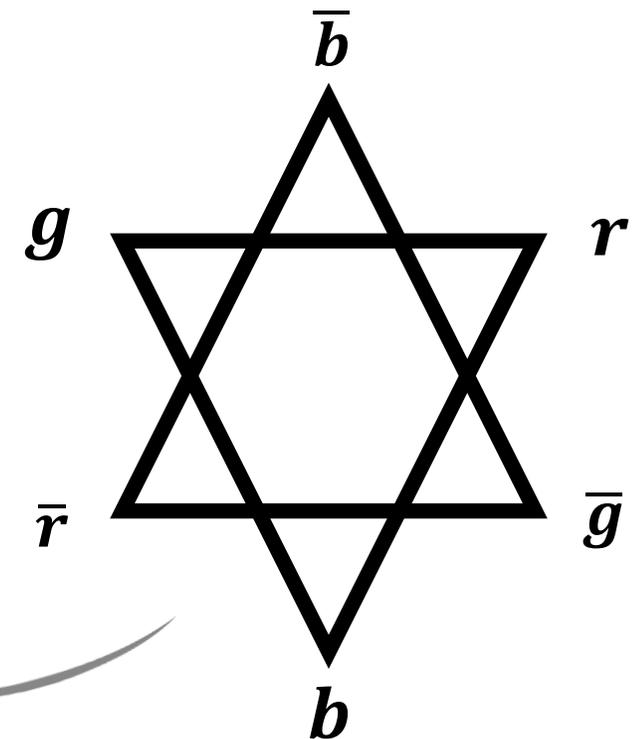
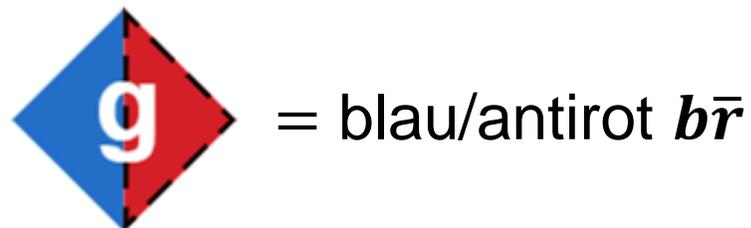
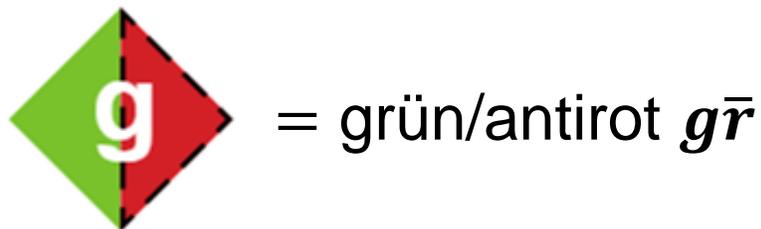


Gluon-Selbstwechselwirkung

Eigenschaften von Gluonen

■ fundamental: Gluonen sind selbst geladen & tragen Farbe & Anti-Farbe

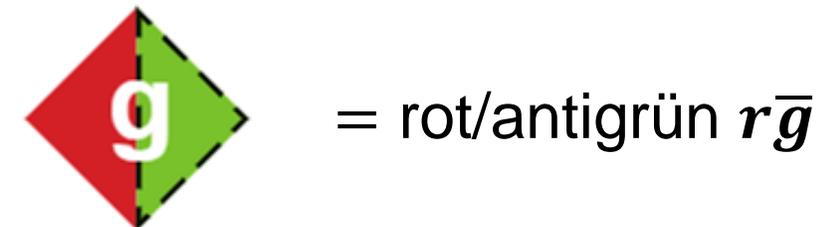
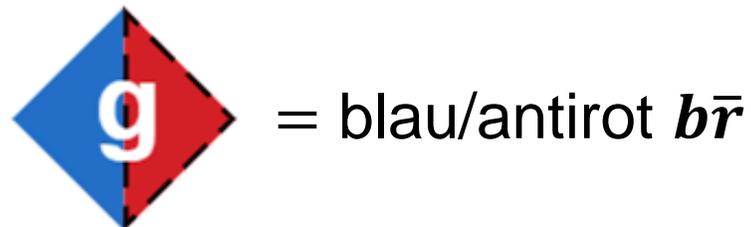
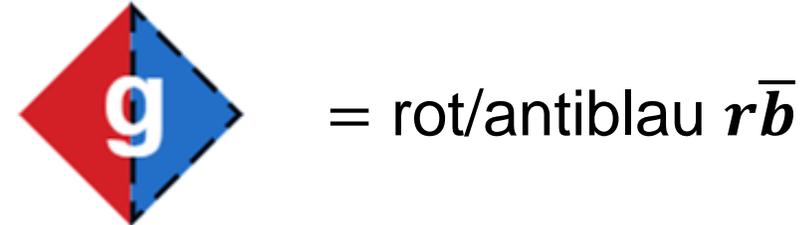
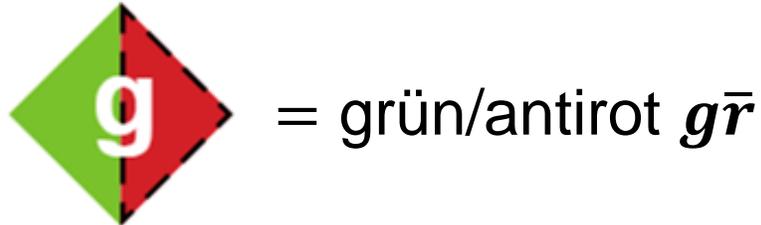
- es existieren 8 **Gluon-Zustände**, die **linear unabhängig** sind
- jedes Gluon trägt eine **Farbe** (r, g, b)
+ **Anti-Farbe** ($\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$)



Eigenschaften von Gluonen

■ fundamental: Gluonen sind selbst geladen & tragen Farbe & Anti-Farbe

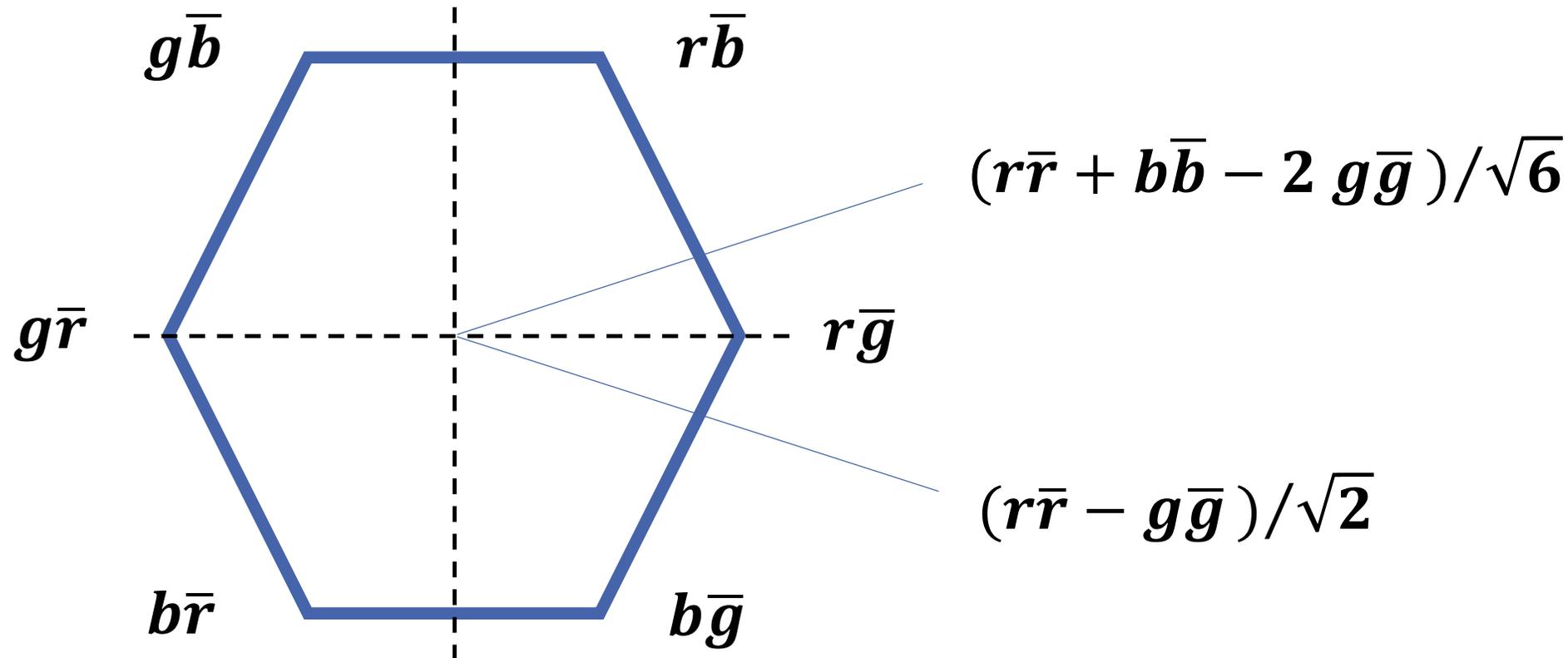
- es existieren 8 **Gluon-Zustände**, die **linear unabhängig** sind
- jedes Gluon trägt eine **Farbe** (r, g, b)
+ **Anti-Farbe** ($\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$)



Eigenschaften von Gluonen: Farb-Oktett

- fundamental: Gluonen beschrieben durch Symmetrie von 3 (Anti-) Farben

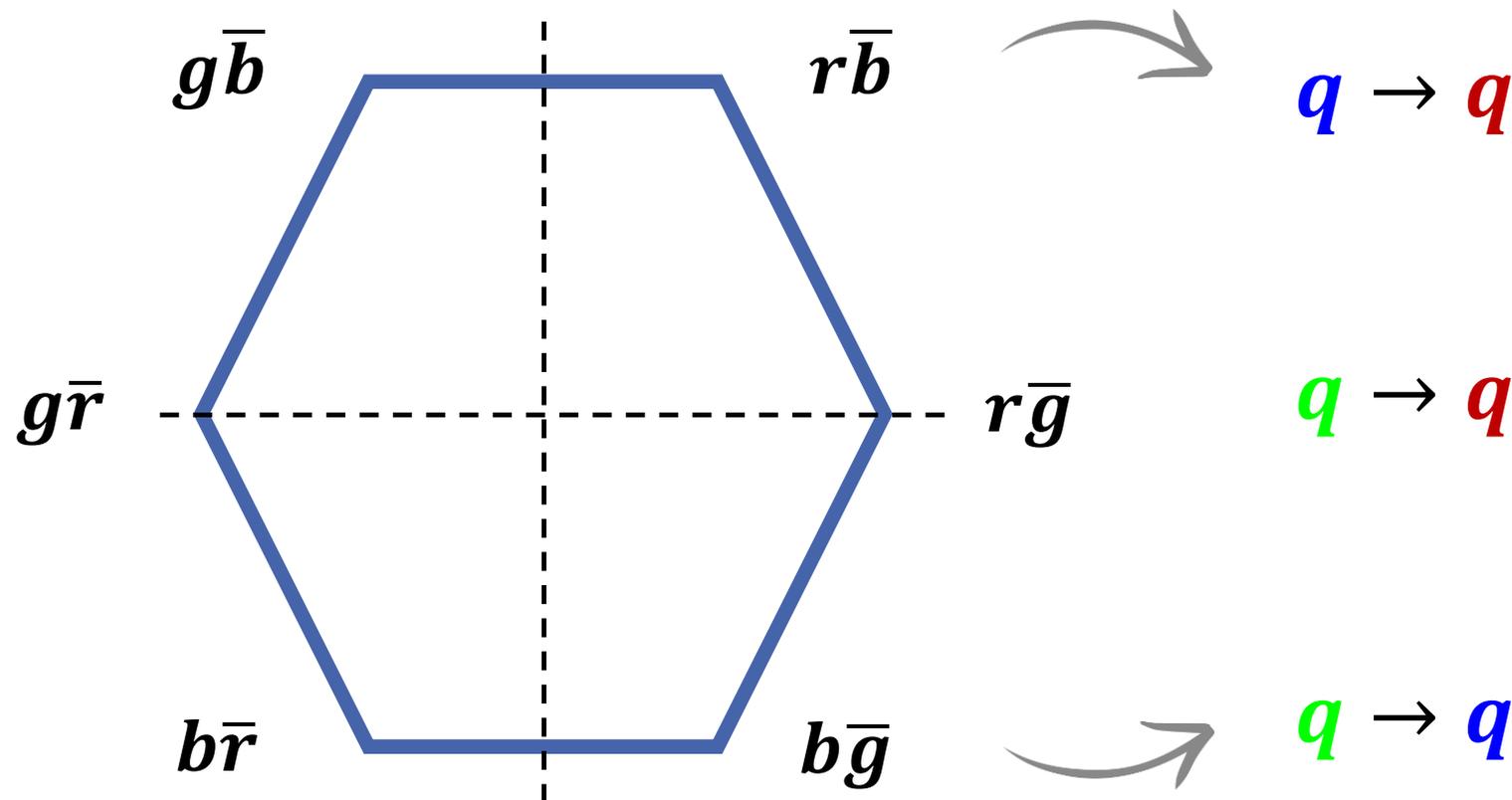
- Symmetriegruppe $SU(3)_c$ definiert **Gluon-Zustände** (s. $SU(3)_{flavour}$)



Eigenschaften von Gluonen: Farb-Oktett

- fundamental: Gluonen beschrieben durch Symmetrie von 3 (Anti-) Farben

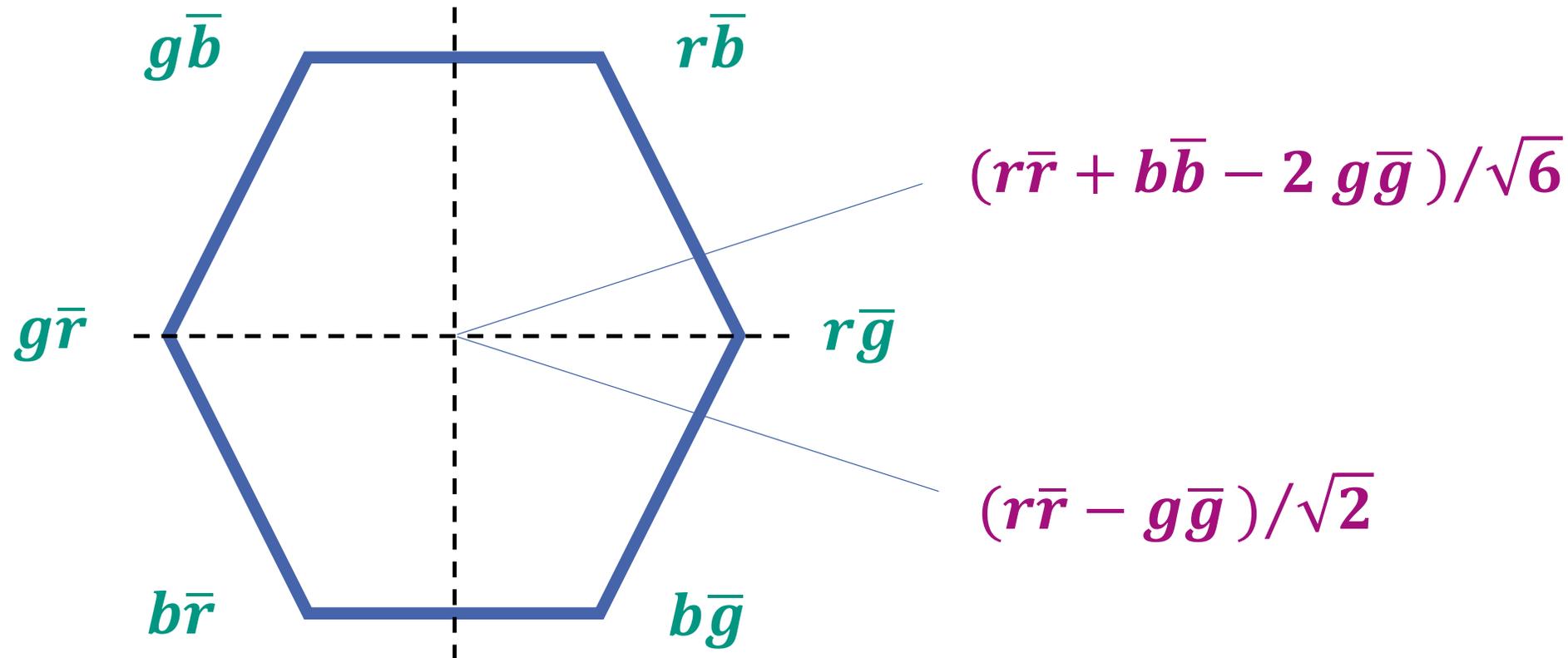
- 6 'farbändernde' & 2 'farbneutrale' Gluonen (keine Änderung der Farbe des q)



Eigenschaften von Gluonen: Farb-Oktett

■ fundamental: Gluonen beschrieben durch Symmetrie von 3 (Anti-) Farben

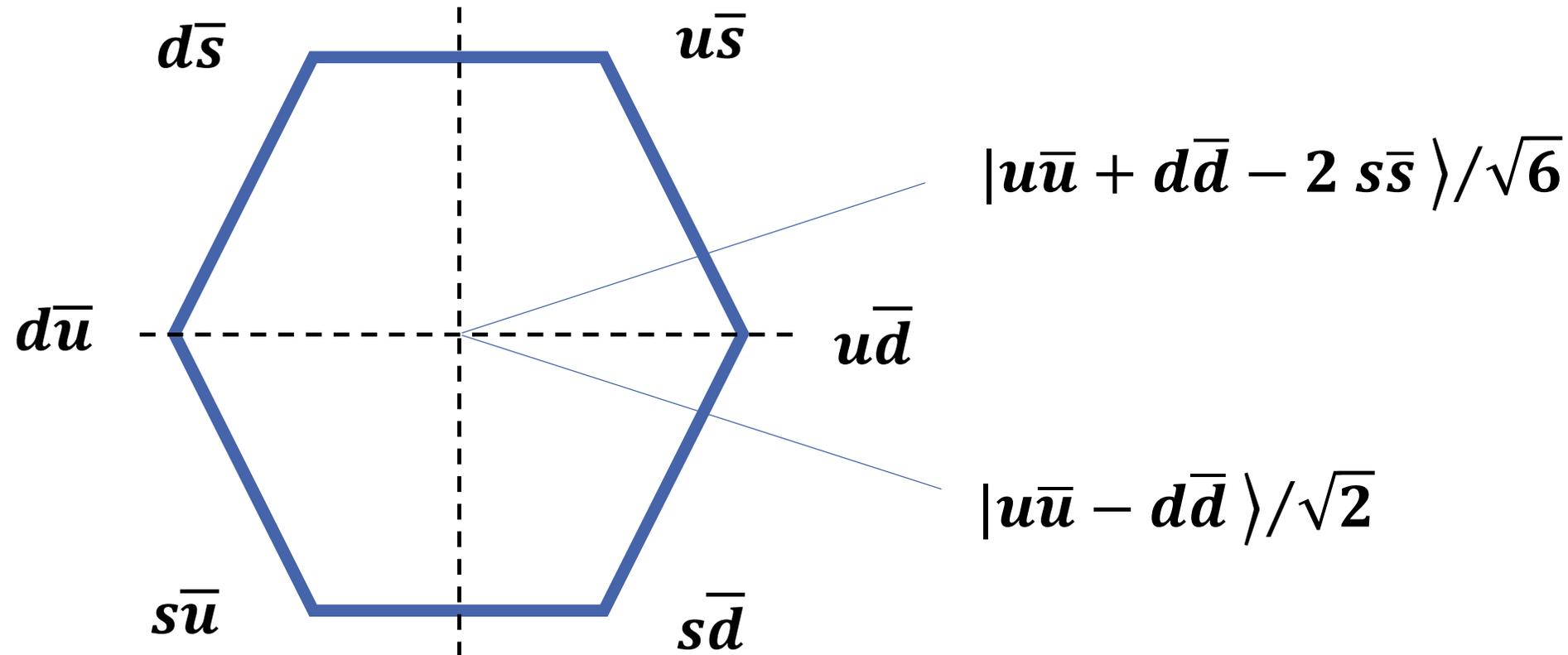
- 6 'farbändernde' & 2 'farbneutrale' Gluonen (keine Änderung der Farbe des q)



Recap: pseudoskalare Mesonen $q\bar{q}$

■ fundamental: Mesonen–Oktett & – Singulett via $SU(3)_{flavour}$

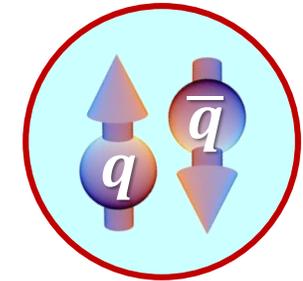
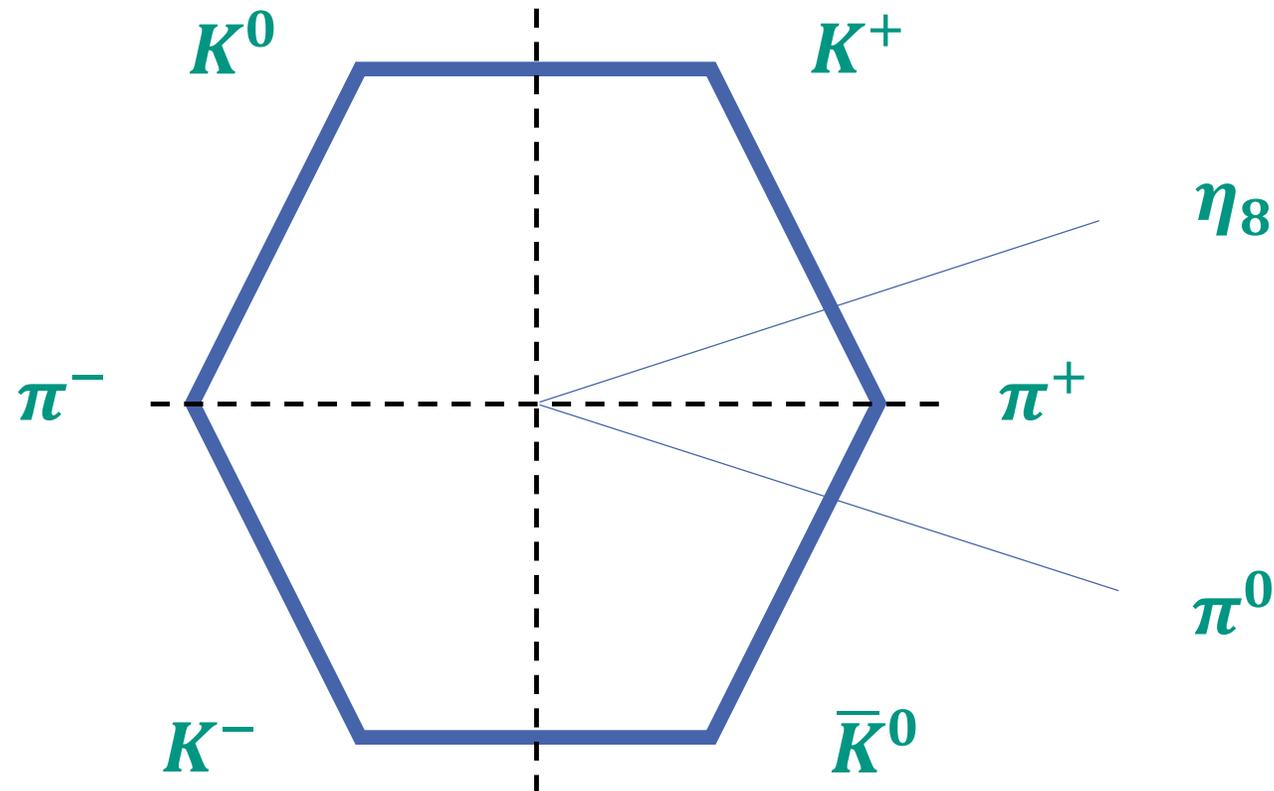
- 6 'geladene' Mesonen & 2 'neutrale' Mesonen



Recap: pseudoskalare Mesonen $q\bar{q}$

■ fundamental: Mesonen–Oktett & – Singulett via $SU(3)_{flavour}$

- ‘geladene’ Mesonen & ‘neutrale’ Mesonen



$$B = 0$$

Mesonen:
gebundene
 $q\bar{q}$ – Zustände

Verständnisfrage zur $SU(3)$ von Herrn Pauli

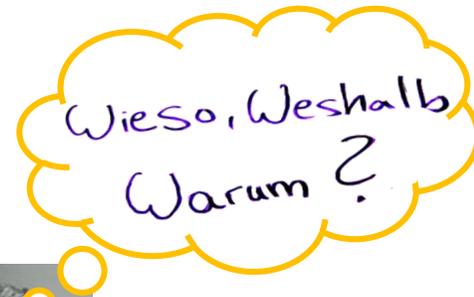
■ Wieso gibt es ein Mesonen–Nonett & aber nur ein Gluonen–Oktett

- wir haben in beiden Fällen eine $SU(3)$ Symmetrie:

a) $SU(3)_{flavour}$ mit u, d, s – Quarkflavours: 9 Zustände

b) $SU(3)_{colour}$ mit r, b, g – Farbladungen: 8 Zustände

- weil...

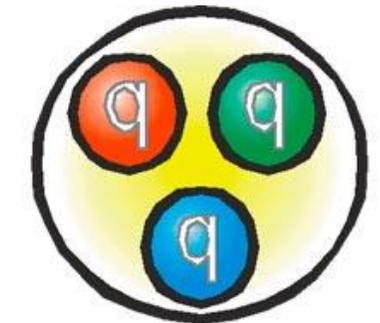


Pauli

Farbe und QCD : bekannte Bindungszustände

■ Basics: die elementaren Regeln der Quantenchromodynamik QCD

- gleiche Farbladungen stoßen sich ab
- Farbe & Antifarbe ziehen sich an
Meson als $q\bar{q}$ – Bindungszustand
- **antisymmetrische Zustände** im Farbraum ziehen sich an, **Baryon** (qqq)



Baryon

■ weitere exotische Bindungszustände?

- Suche nach **exotischen Zuständen**

Exotische Bindungszustände?

■ Tetraquarks: Suche nach $qq\bar{q}\bar{q}$ – gebundenen Systemen

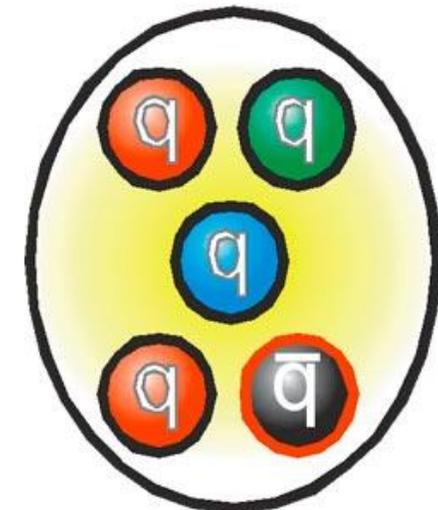
- Zustand aus 2 Quarks & 2 Antiquarks
- oft: leichtes Quark–Antiquark-Paar & schweres Quark–Antiquark Paar ($c\bar{c} b\bar{b}$)
- Existenz von QCD erlaubt, viele aktuelle Resultate, die auf mögliche Existenz hinweisen



Tetra-
quark

■ Pentaquarks: Suche nach $qqq\bar{q}\bar{q}$ – Systemen

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

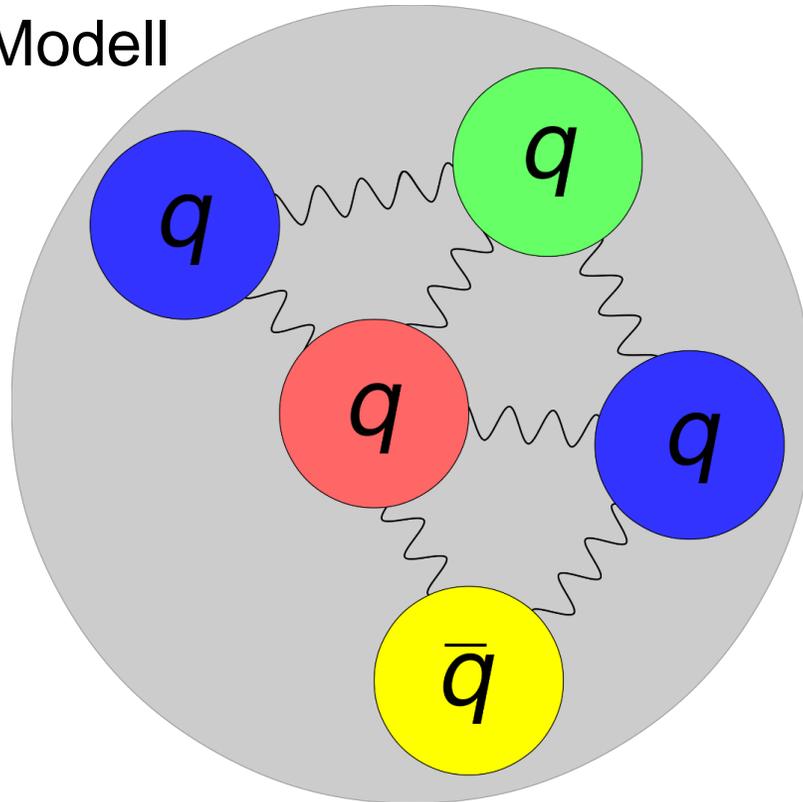


Penta-
quark

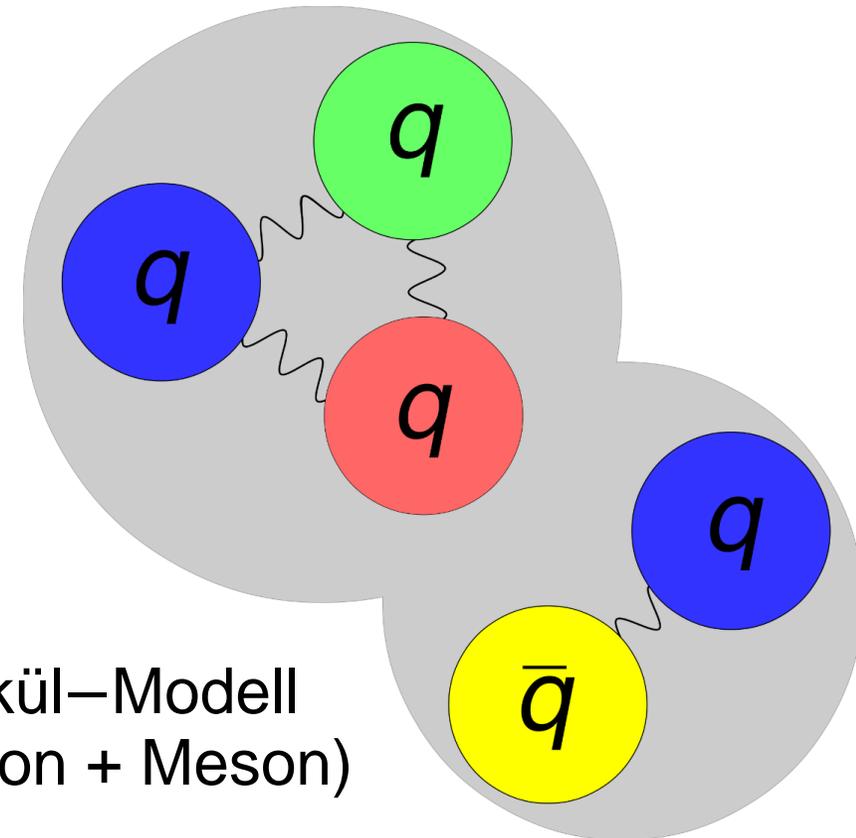
Exotische Bindungszustände?

■ Pentaquarks: Modellierung von $qqq\bar{q}\bar{q}$ – gebundenen Systemen

Bag-Modell

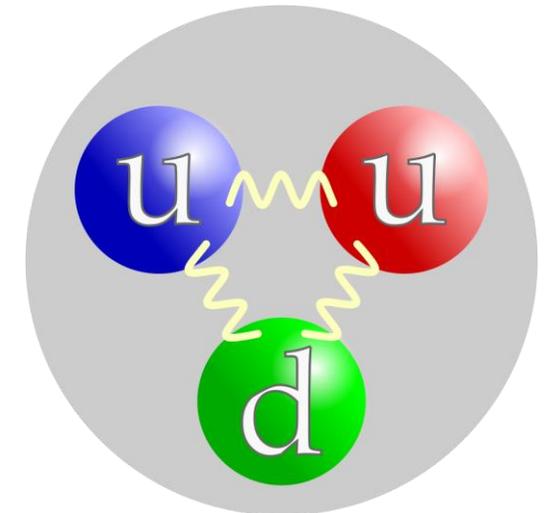
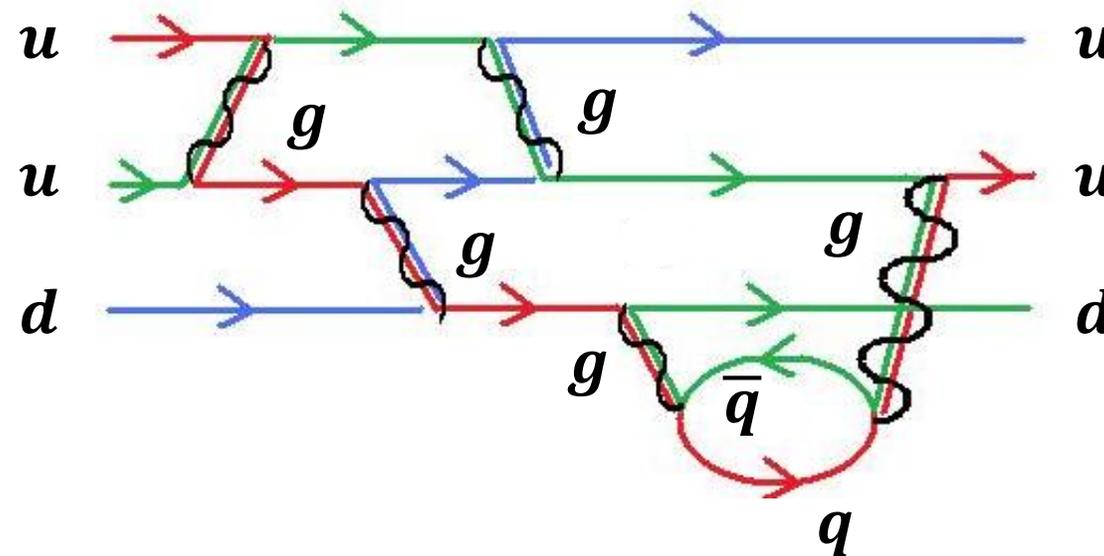
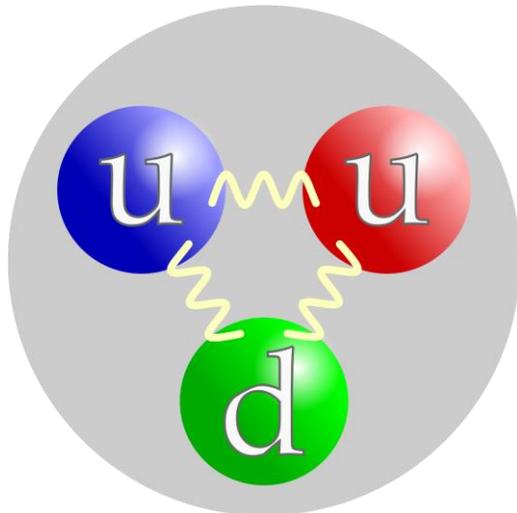


Molekül-Modell
(Baryon + Meson)



Farbladung in der QCD – Gruppe $SU(3)_C$

■ Gluonwechselwirkung: Valenzquarks & Seequarks



Gluonwechselwirkungen
zwischen **Valenzquarks**

Seequarks $q\bar{q}$

Glukonen mit Selbstwechselwirkung

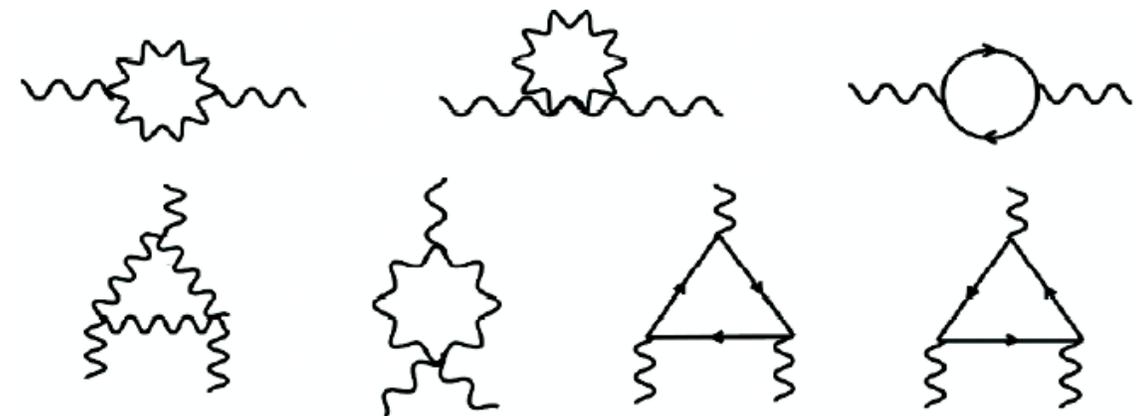
■ Photonen in der Quantenelektrodynamik *QED*: ungeladen

- **Photon γ** trägt als *QED* – Eichboson selbst keine elektrische Ladung & unterliegt als neutrales Teilchen **keiner Selbstwechselwirkung**

■ Glukonen in der Quantenchromodynamik *QCD*: geladen

- **Glukon g** trägt als *QCD* – Eichboson eine Farbladung & kann daher nicht nur mit Quarks sondern auch **mit anderen Glukonen in Wechselwirkung** treten

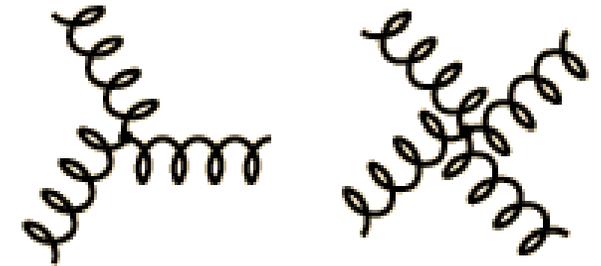
- **Selbstwechselwirkung** von Glukonen führt zum Auftreten von komplexeren *QCD* – **Vertexgraphen**



Glukonen mit Selbstwechselwirkung: Glueballs?

■ Existieren gebundene 'Glueball'-Zustände nur aus Glukonen?

- Hypothetische Glueballs: **gebundener Zustand nur aus 2 oder 3 Glukonen**
($B = 0$, $Q = 0$, keine Farbe, aber Masse!)



■ Erwartete Glueball-Eigenschaften

- Massenskala $M = 1 \dots 1,7 \text{ GeV}$
- 'Doppel-Glueball' gg mit $J = 0$
- 'Tripel-Glueball' ggg mit $J = 1$
- Signatur via Zerfall in Pionen (bisher nur mögliche Kandidaten)

