

Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung # 17

7. Grundlagen der Elementarteilchen-Physik

7.1 Der Teilchenzoo

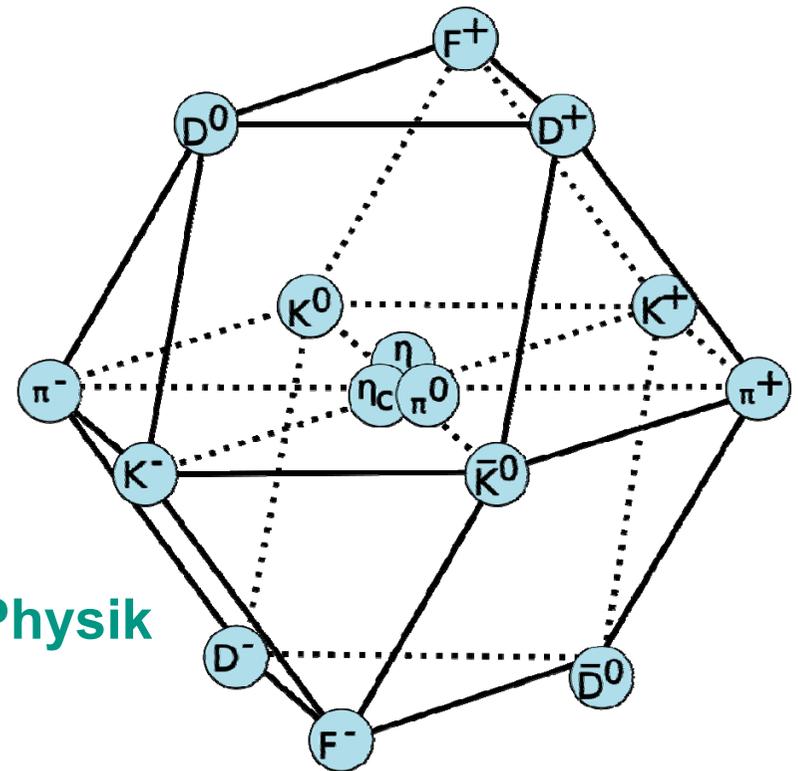
7.2 Hadronen und Leptonen

7.3 Wechselwirkungen im Standardmodell

- starke Wechselwirkung
- elektromagnetische und schwache Wechselwirkung

→ 7.4 Das Quarkmodell

- relevante Symmetrien
- Mesonen
- Baryonen
- Schwere Quarks und gebundene Zustände



Existenz von exotischen Hadronen?

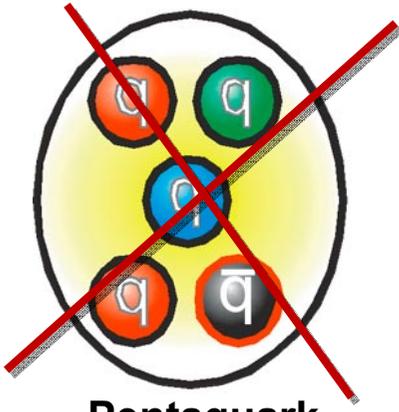
- Zahlreiche Suchen nach **exotischen Baryon- & Mesonzuständen**



normales Baryon



normales Meson



~~Pentaquark~~



Tetraquark

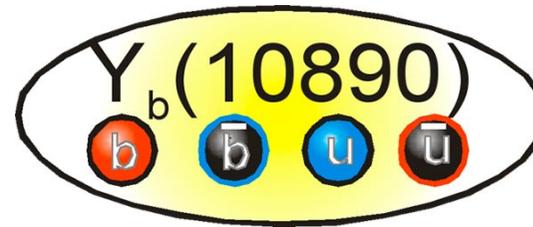
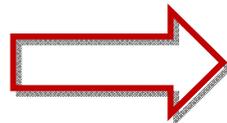


Glueball



Hybridmeson

- Quantenchromodynamik (QCD) erlaubt die Existenz z.B. von Tetraquarks: Resultate der BELLE, BES Experimente in Japan und China können als möglicher Hinweis für ein Tetraquarks gedeutet werden:



2010

$$e^+e^- \rightarrow Y(10890) \rightarrow Y(1S, 2S) \pi^+ \pi^-$$



2013

$$e^+e^- \rightarrow Z(3900) + \gamma \rightarrow J/\Psi \pi^+ \pi^- + \gamma$$

7.4 Das Quarkmodell

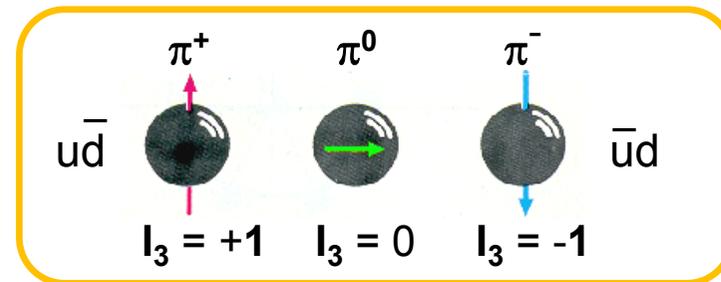
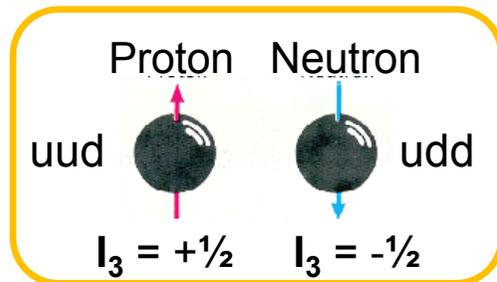
a) Relevante Symmetrien

■ Mesonen und Baryonen:

Für die Einordnung von Hadronen sind Symmetrien wichtig:

Ladung Q : Ladungserhaltung, Symmetrietransformation $\Psi' = \Psi \cdot e^{i\alpha \cdot Q}$
 α = reeller Phasenfaktor, unitäre Transformation U(1)-Gruppe
 exakt erhaltene globale Symmetrie

Isospin I : eingeführt von Heisenberg (1932) – Spiegelkerne, $m(p) \approx m(n)$
 starke Wechselwirkung ist ladungsunabhängig $\hookrightarrow [H, I] = 0$
 - Nukleon (p,n) Isospin-Dublett, Pion (π^+ , π^0 , π^-) Isospin-Triplett
 erstes Beispiel einer **Flavoursymmetrie der Quarks**
 (u,d)-Quark-Isospin-Dublett mit Isospin $I_3 = +1/2$ (u), $-1/2$ (d)



Isospin-Symmetrie

- Alle anderen Quarks (s,c,b,t) sind Isospin-Singulets.

Mit den Quark-Dubletts (u,d) und (\bar{u},\bar{d}) erhält man:

- Mesonen ($q\bar{q}$):
 - Singulets mit $I = 0$ (ω)
 - Tripletts mit $I = 1$ (π, ρ)
- Baryonen (qqq):
 - Dubletts mit $I = 1/2$ (p,n)
 - Quadrupletts mit $I = 3/2$ ($\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$)

■ Isospininvarianz & -verletzung:

- starke Wechselwirkung:

invariant unter **Rotationen im Isospinraum**, Erhaltung von I und I_3

- elektromagnetische WW. : Erhaltung von I, Verletzung von I_3
- schwache Wechselwirkung : Verletzung von I und I_3

Strangeness – historischer Rückblick

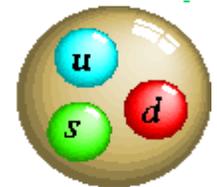
- **Seltene Teilchen:** K^0 (neutrales Kaon), Λ (Lambda-Hyperon)
unterschiedliche Erzeugungs-/Zerfalls-Reaktionen:



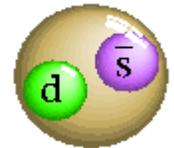
starke Wechsel-
Wirkung: $\sigma \sim 1\text{mb}$
paarweise Erzeugung



schwache Wechsel-
Wirkung: $\tau \sim 100\text{ps}$
einzelner Zerfall von K^0, Λ



Lambda



Kaon

Strangeness-Erhaltung $\Delta S = 0$

Strangeness-Verletzung $|\Delta S| = 1$

Einführung der additiven Quantenzahl: **Strangeness S**

Definition: $S(K^0) = +1$ $S(\Lambda) = -1$
 \bar{s} -Quark = +1 s-Quark = -1

Wechselwirkungen: stark/elektromagnetisch: $\Delta S = 0$, schwach: $\Delta S = 0, \pm 1$

Flavour-Symmetrie

- Mit weiteren schweren Quarkflavours s,c,... ergibt sich eine **Erweiterung der Isospinsymmetrie** auf eine **Flavoursymmetrie**

SU(3)-Gruppe:

(u,d,s) Quarks mit additiven Quantenzahlen

- **Isospin I_3**

- **Hyperladung Y** ($Y = B + S$):

↳ Baryonenoktett

↳ Baryonendekuplett

↳ Mesonenoktette ($J = 0, 1$)

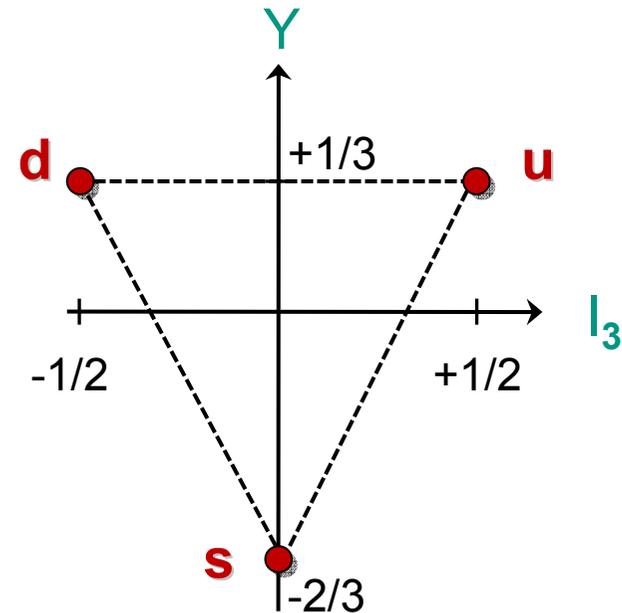
SU(4)-Gruppe:

(u,d,s,c) Quarks mit

- Isospin I_3

- Hyperladung Y , Charm C

↳ hadronische 20-pletts & 16-pletts



SU(3): fundamentale Darstellung
und Zuordnung der Quarks

Gell-Mann Nishijima Formel

- **Gell-Mann / Nishijima Formel** für Hadronen & für Quarks beschreibt Relation zwischen Ladung Q , Baryonenzahl B und Strangeness S :

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S)$$

B = Baryonenzahl

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}Y$$

Y = Hyperladung = $B+S$

- Verallgemeinerung der Formel für alle 6 Quarkflavours

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S + C + B' + T)$$

$$S = -(n_s - n_{\bar{s}}) \quad C = +(n_c - n_{\bar{c}})$$

$$B' = -(n_b - n_{\bar{b}}) \quad T = +(n_t - n_{\bar{t}})$$

S : strangeness C : charm B' : bottom T : top



Nobelpreis
1969

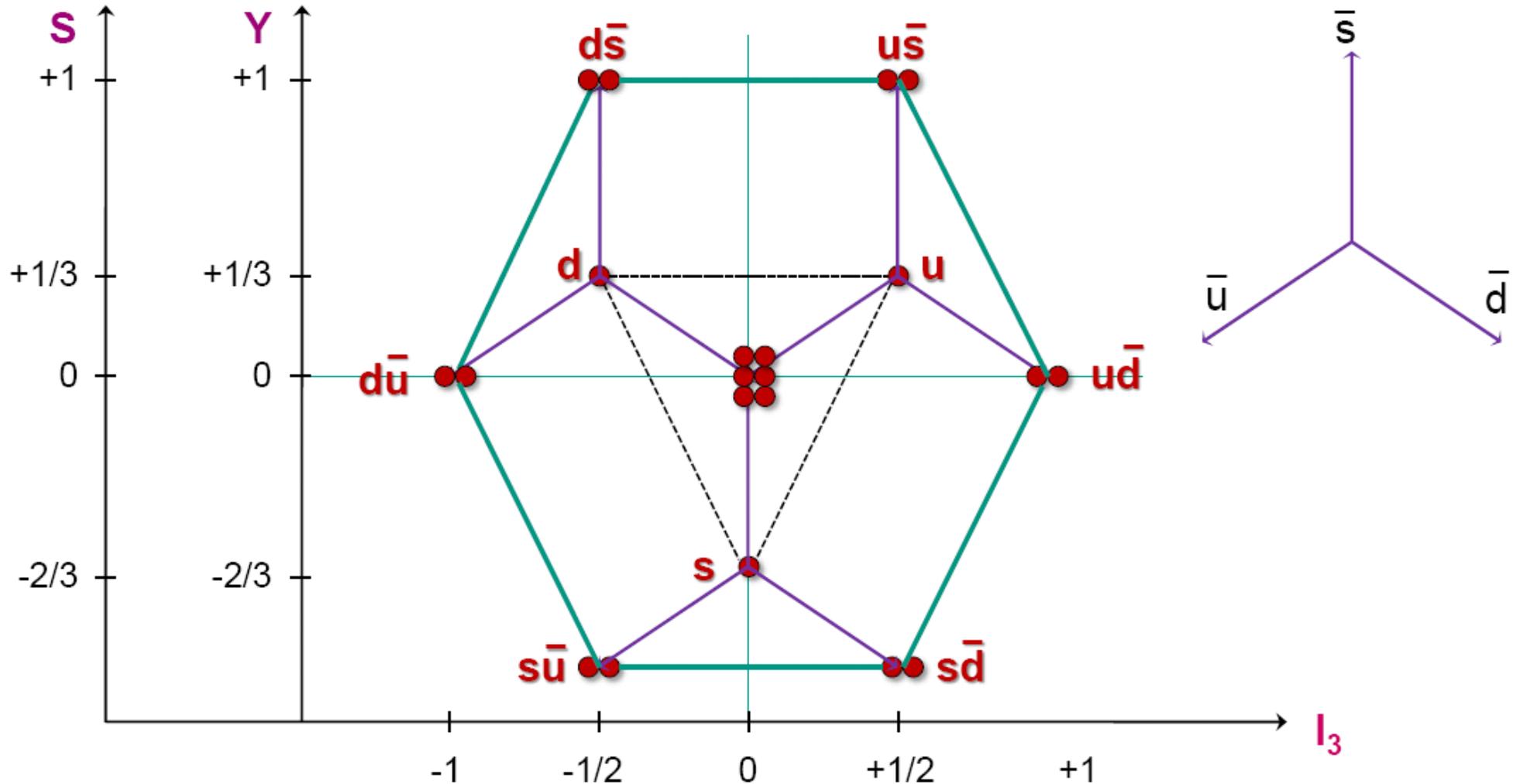
Murray Gell-Mann
(*1929)



Kazuhiko Nishijima
(1926-2009)

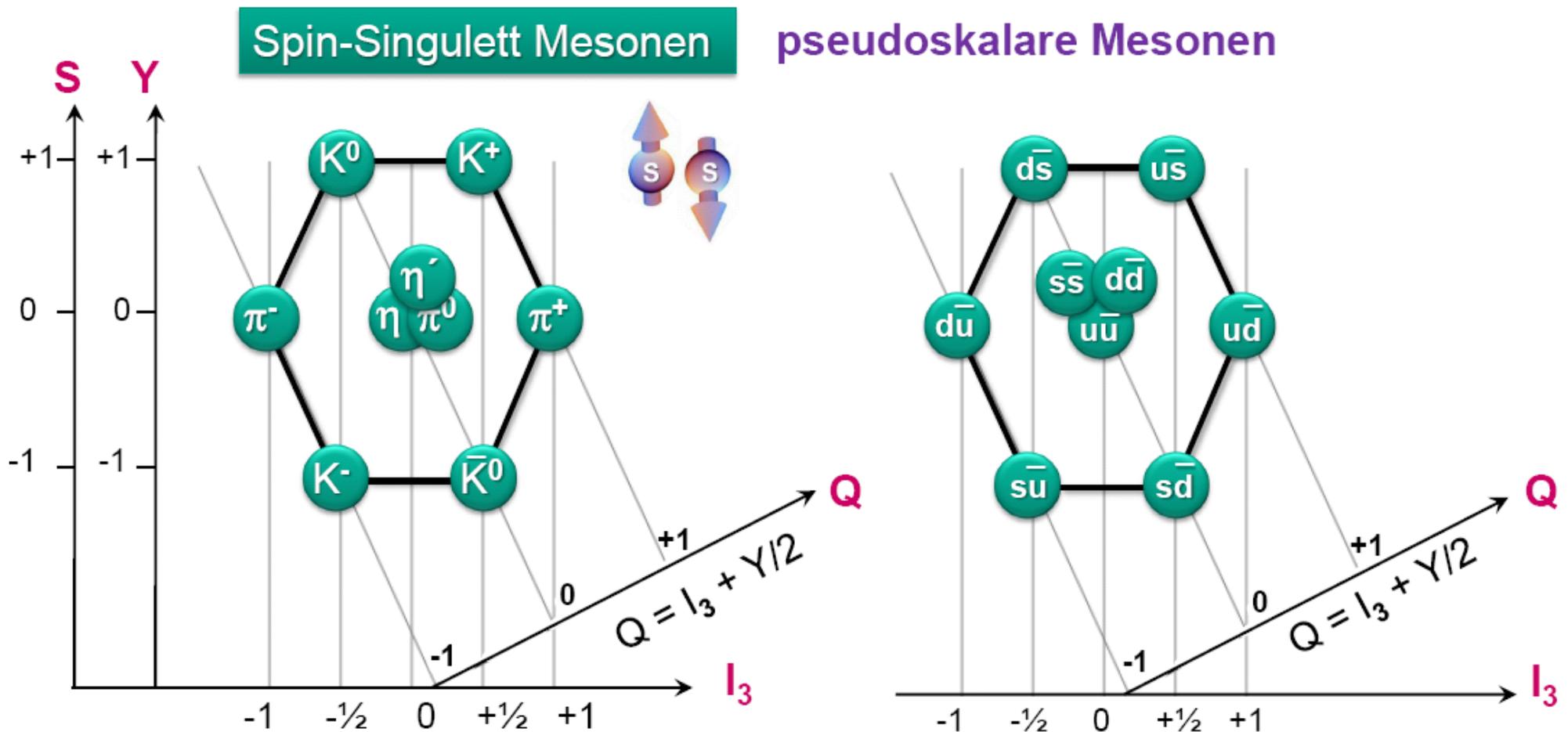
b) Mesonen – Multiplette

- Mesonen: mit Isospin (I_3) und Hyperladung (Y): Gruppierung in ein **Nonett**

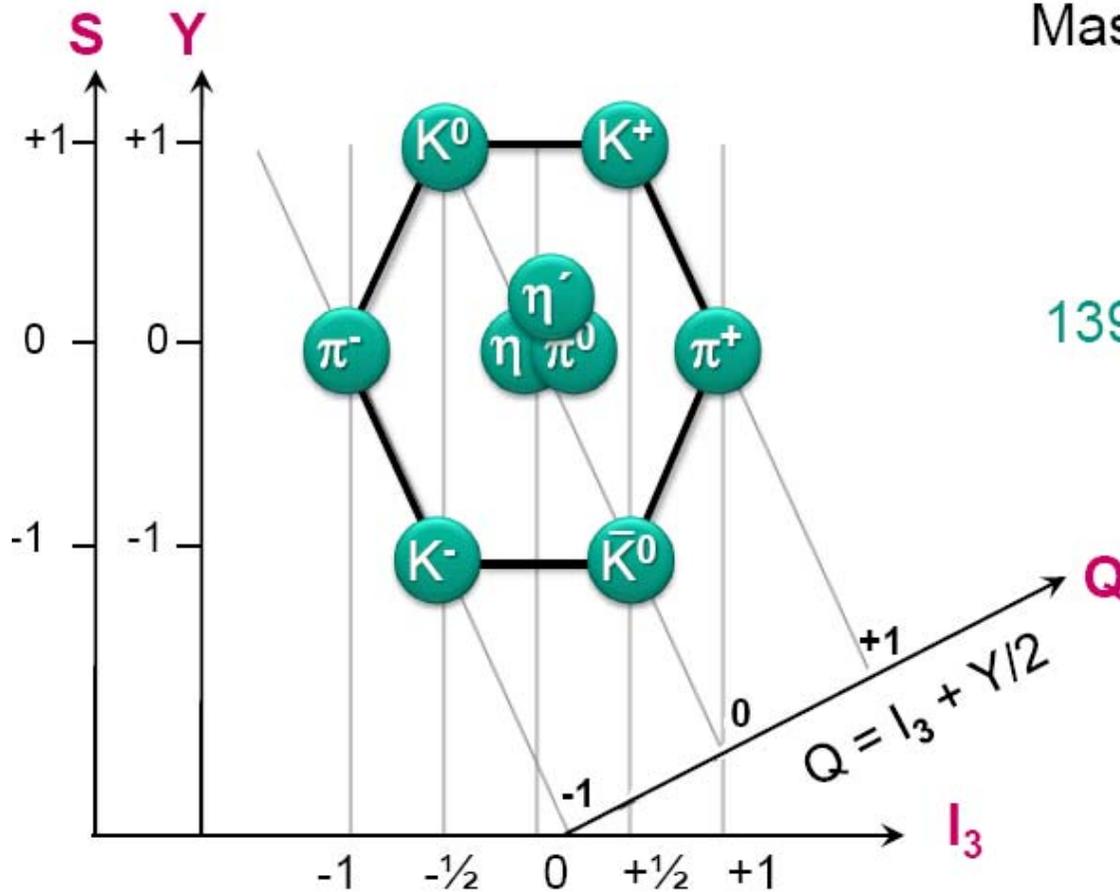


Mesonen – Nonett

- **Mesonen-Nonett** mit $J^P = \frac{1}{2}^+$ in der SU(3) Darstellung, **Isomultipletts**:
 2 Singulett (η, η'), 2 Dubletts (K^0, K^+) & (K^-, \bar{K}^0), 1 Triplet (π^+, π^0, π^-)



- Die SU(3)-Flavoursymmetrie der Mesonen wird durch die unterschiedlichen Quarkmassen ($u \sim 2 \text{ MeV}$, $d \sim 4.8 \text{ MeV}$, $s \sim 92 \text{ MeV}$) gebrochen:
stark unterschiedliche Massen der pseudoskalaren Mesonen



Massen pseudoskalarer Mesonen [MeV]



SU(3) ist nur für masselose Quarks eine gültige Symmetrie

c) Baryonen – Multiplette

■ Isomultipletts:

da Baryonen aus 3 Quarks aufgebaut werden, gibt es

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

- ein **Baryonen-Dekuplett** ($J = 3/2$) $\uparrow\uparrow\uparrow$

- zwei **Baryonen-Oktette**

1 Oktett symmetrisch / 1 Oktett antisymmetrisch unter Austausch von qq

- ein **Baryonen-Singulett**

Pauli-Prinzip:

Gesamtwellenfunktion des Baryons muss **antisymmetrisch** sein

- Orts-, Spin-, Flavour-, Farb- Anteile der Wellenfunktion

- Beispiel $J = 1/2$ **Baryonen** ($\uparrow\uparrow\downarrow$)

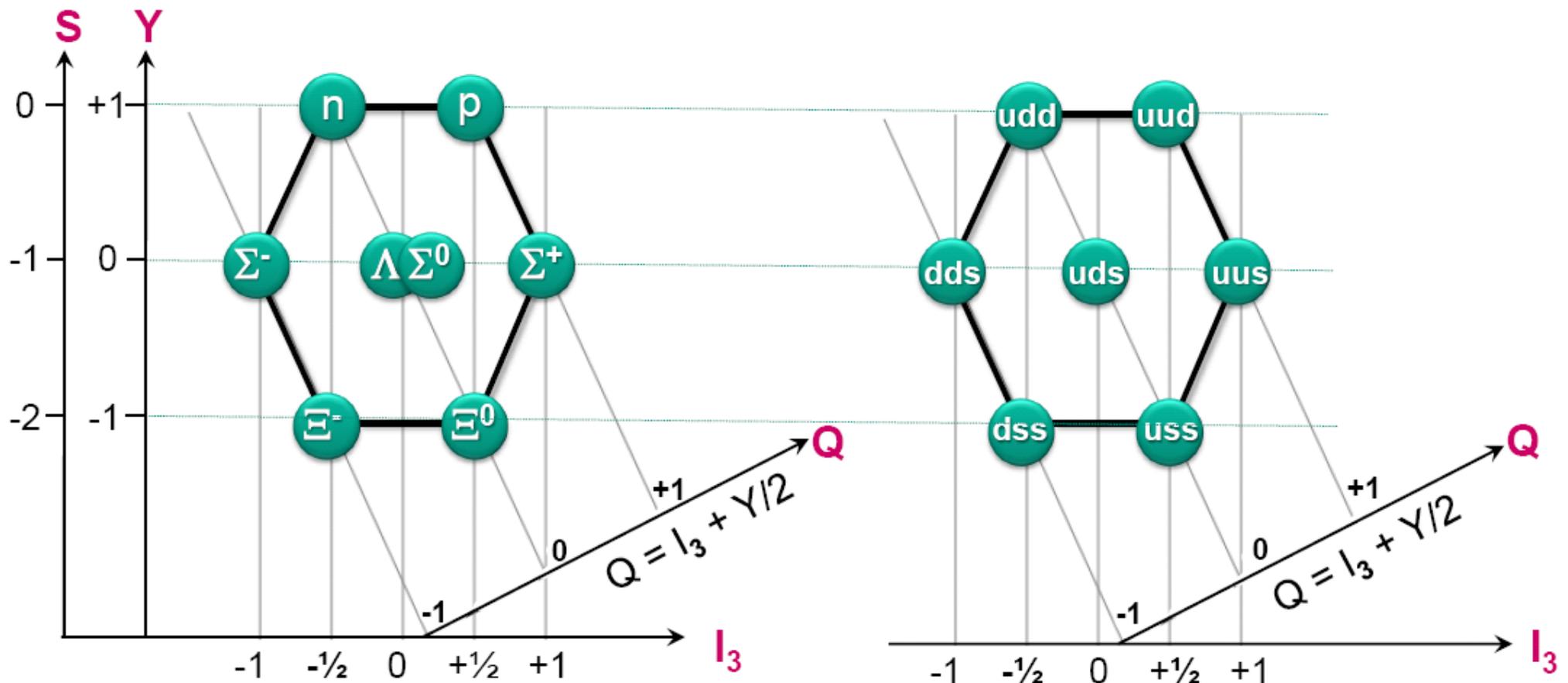
gemischte Spin-Symmetrie (keine reine symmetrische/antisymmetrische Wf.)

↳ die Flavoursymmetrie (u,d,s) muss ebenfalls gemischt sein

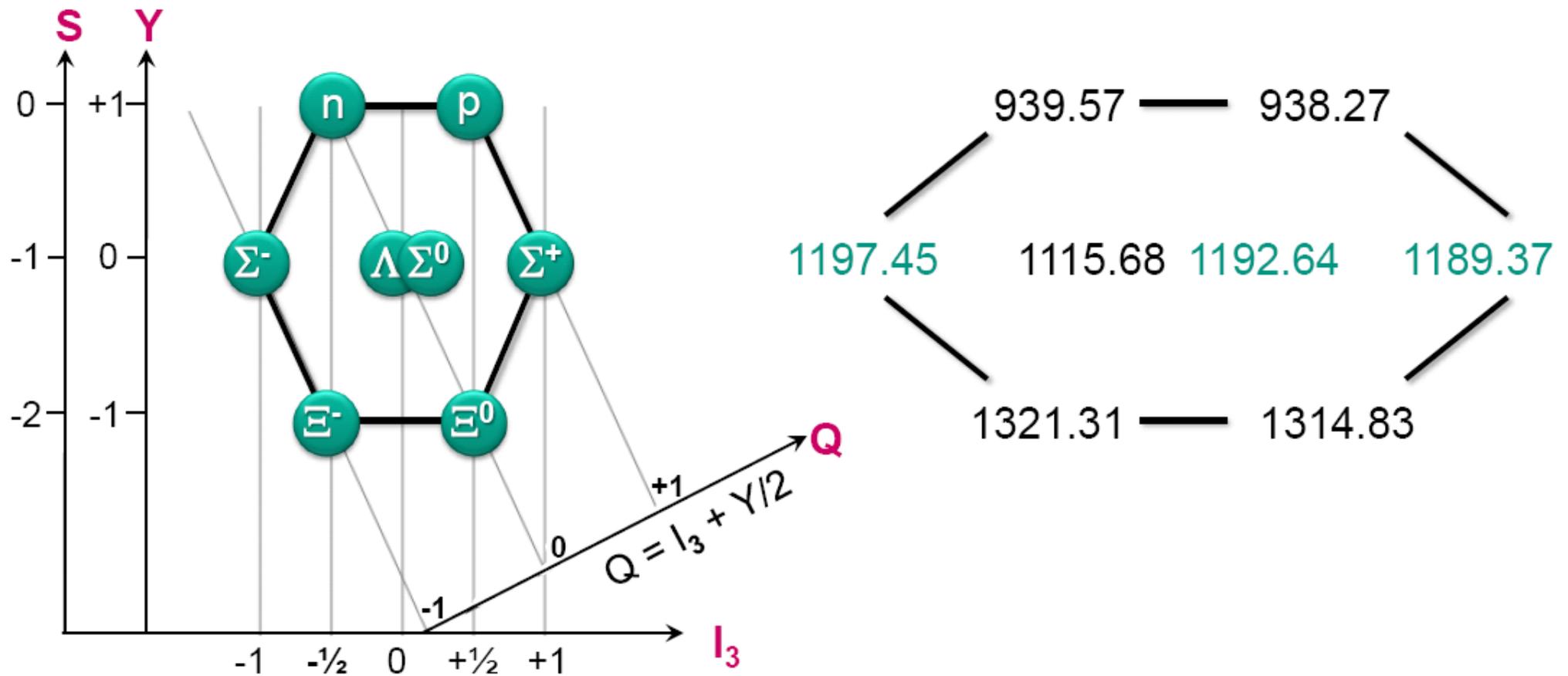
↳ keine flavour-symmetrischen $J = 1/2$ Zustände (uuu), (ddd), (sss)

Baryonen – Oktett

- **Isomultipletts:** Baryonenoktett mit $J^P = \frac{1}{2}^+$ in der SU(3) Darstellung mit den Quantenzahlen Isospin I_3 und Hyperladung Y (bzw. Strangeness $S = Y - B$)
- 8-fold way** (M. Gell-Mann): 1 Singulett (Λ), 2 Dubletts (N, Ξ), 1 Triplet (Σ)

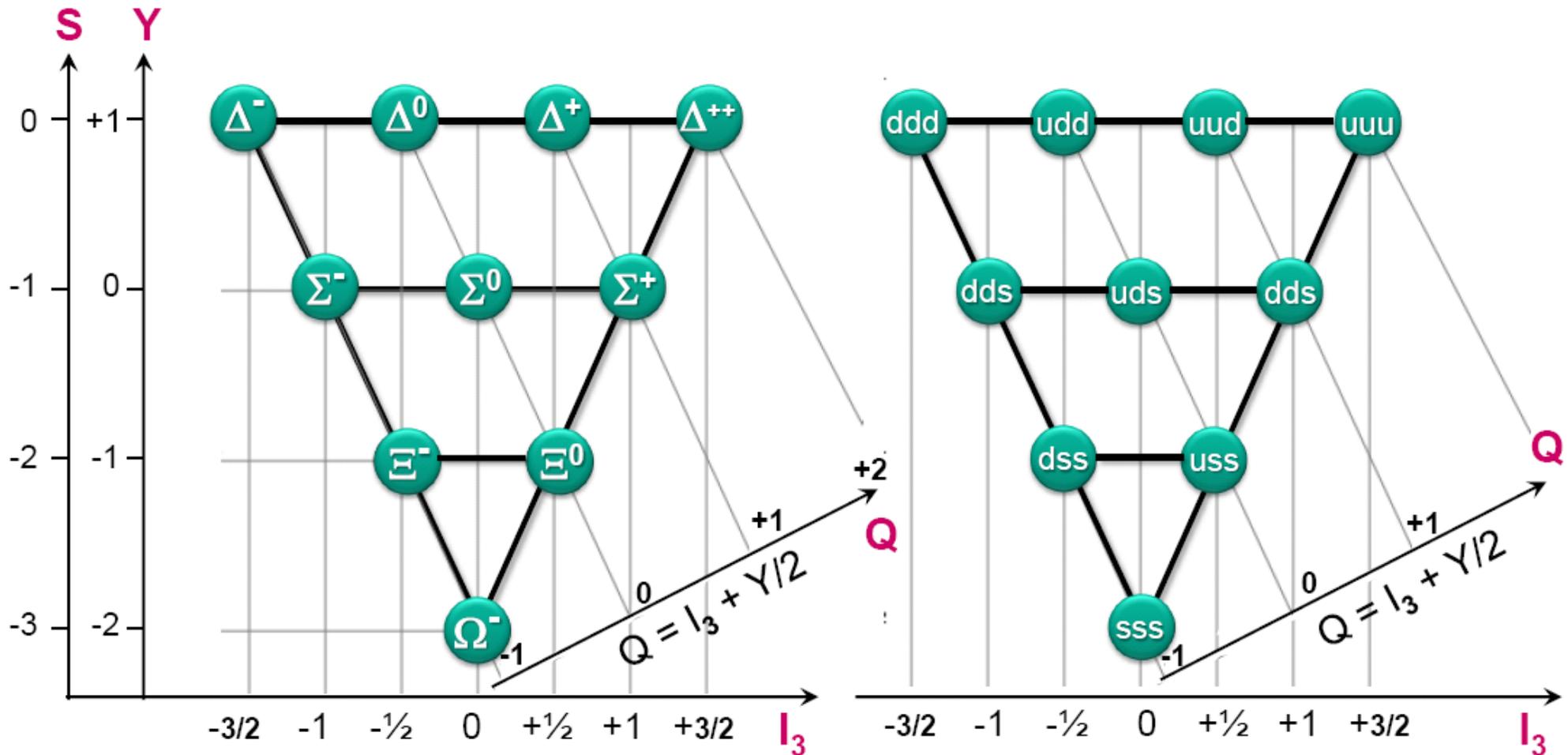


- **Isomultipletts:** Baryonenoktett mit $J^P = 1/2^+$ in der SU(3)
 die SU(3)-Flavoursymmetrie der Baryonen wird durch die unterschiedlichen Quarkmassen ($u \sim 2 \text{ MeV}$, $d \sim 4.8 \text{ MeV}$, $s \sim 92 \text{ MeV}$) gebrochen



Baryonen – Dekuplett

- **Isomultipletts:** Baryonendekuplett mit $J^P = \frac{3}{2}^+$ in der SU(3) Darstellung
 1 Singulett (Ω^-), 1 Dubletts (Ξ), 1 Tripletts (Σ), 1 Quadruplett (Δ)



d) Schwere Quarks (Quarkonia)



- Die schweren Quarks **c**, **b** und **t** werden bei Prozessen der starken & elektromagnetischen Wechselwirkung stets in $q\bar{q}$ -Paaren erzeugt

- **Charm-Quark:**

- theoretisch postuliert 1970 (S. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani)
- experimenteller Nachweis 1974 (B. Richter, S. Ting)

$$m(c) = 1.27 \pm 0.1 \text{ GeV}, q = +2/3, \tau(\text{c-Mesonen}) \sim 10^{-13} \text{ s}$$

- **Bottom-Quark** (beauty-Quark) :

Nobelpreis 2008

- theoretisch postuliert 1973 (M. Kobayashi, T. Maskawa)
- experimenteller Nachweis 1977 (L. Lederman)

$$m(b) = 4.2 + 0.17 - 0.7 \text{ GeV}, q = -1/3, \tau(\text{b-Mesonen}) \sim 10^{-12} \text{ s}$$



- **Top-Quark:**

theoretisch postuliert 1973 (M. Kobayashi, T. Maskawa)

- experimenteller Nachweis 1995 Tevatron (CDF, D0)

$$m(t) = 173.1 \pm 1.3 \text{ GeV}, q = +2/3, \tau = 4.2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$$



T. Maskawa M. Kobayashi

Entdeckung des Ψ

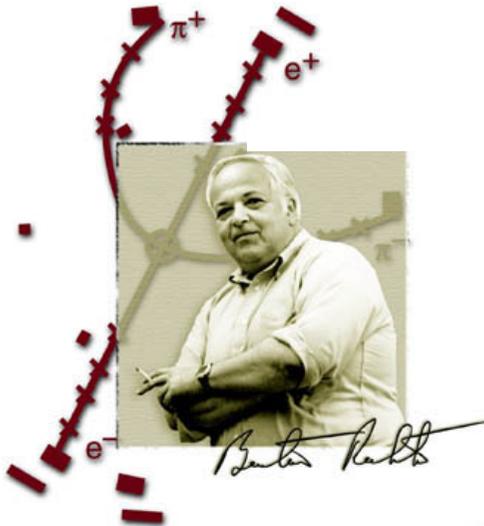
- Entdeckung einer langlebigen, schmalen Mesonenresonanz (**$c\bar{c}$ -Paar**)

11/1974: erster Nachweis des J/Ψ ($M = 3.1 \text{ GeV}$) am

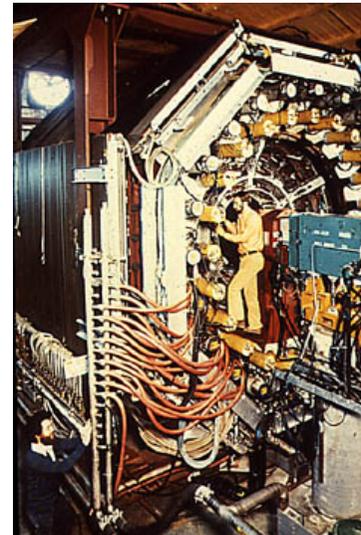
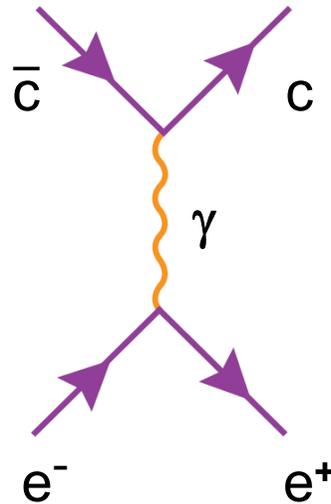
- **SLAC**: SPEAR $e^+ - e^-$ Speicherring ($E = 1.3 - 2.4 \text{ GeV}$)

MARK I-Detektor: drahtbasierte Funkenkammer in Elektromagnet

- Erzeugung eines gebundenen ($c\bar{c}$)-Systems über ein virtuelles Photon



Burton Richter
*1931
Nobelpreis 1976



Mark I Detektor
am SPEAR



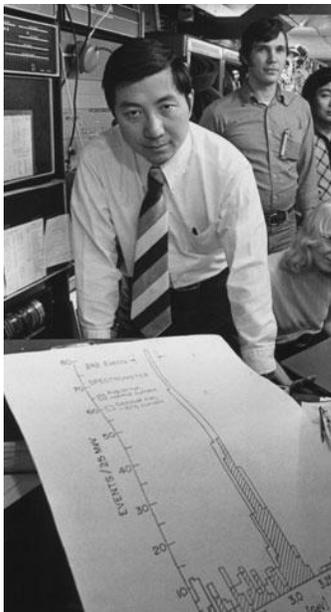
Stanford Positron Electron
Asymmetric Ring

Entdeckung des J

- **BNL-AGS**: hochenergetische 28 GeV Protonen treffen auf Be-Target
Beobachtung Wq.- Maximum bei $p + Be \rightarrow e^- + e^+ + X$

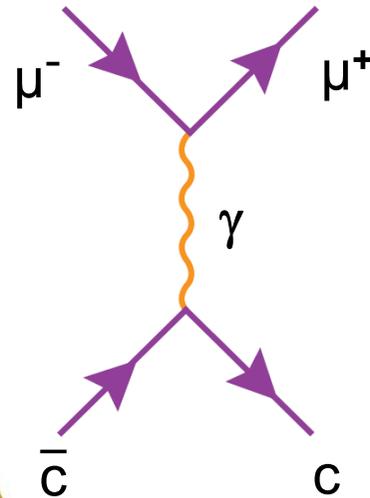
Nachweis des J/ Ψ Zerfalls: $e^- e^+ / \mu^- \mu^+ / q \bar{q}$ Paare

Massenpeak bei $M = 3.1$ GeV



Sam Ting
*1936
Nobelpreis 1976

Myonischer Zerfallskanal



LETTERS 2 DECEMBER 1974

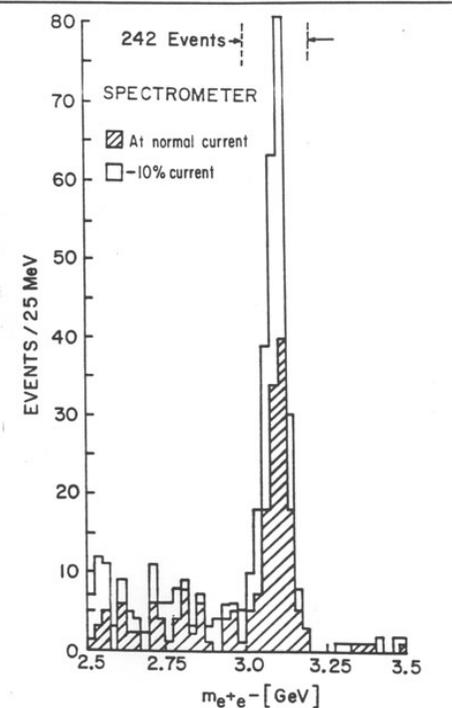


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

LETTERS 2 DECEMBER 1974

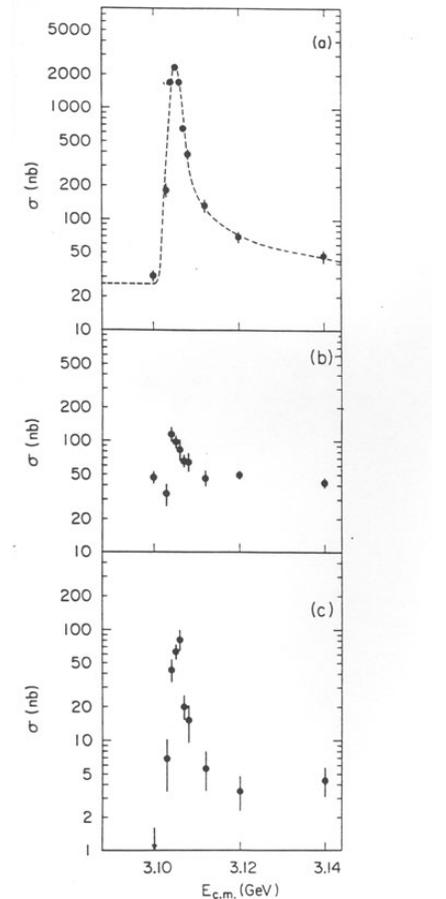
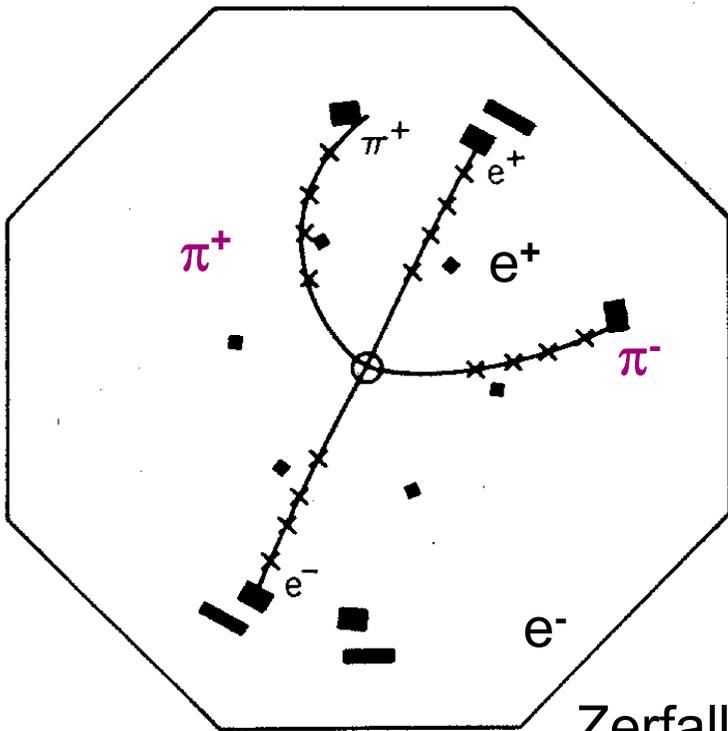


FIG. 1. Cross section versus energy for (a) multi-iron final states, (b) e^+e^- final states, and (c) $\mu^+\mu^-$, π^- , and K^+K^- final states. The curve in (a) is the expected shape of a δ -function resonance folded with the gaussian energy spread of the beams and including

Charmonium: Zerfallskaskaden

- kurz nach J/Ψ-Entdeckung: viele weitere Resonanzen bei höheren Energien
Beispiel: $\Psi(2S) \rightarrow J/\Psi (\rightarrow e^+ + e^-) + \pi^+ + \pi^-$
- J/Ψ-Zustand hat lange Lebensdauer & geringe Breite: Erklärung durch Verletzung der OZI Regel (Okubo-Zweig-Iizuka): Feynman-Diagramme mit nicht durchlaufenden Quarklinien sind unterdrückt



Massen & Breiten von S = 1 Resonanzen

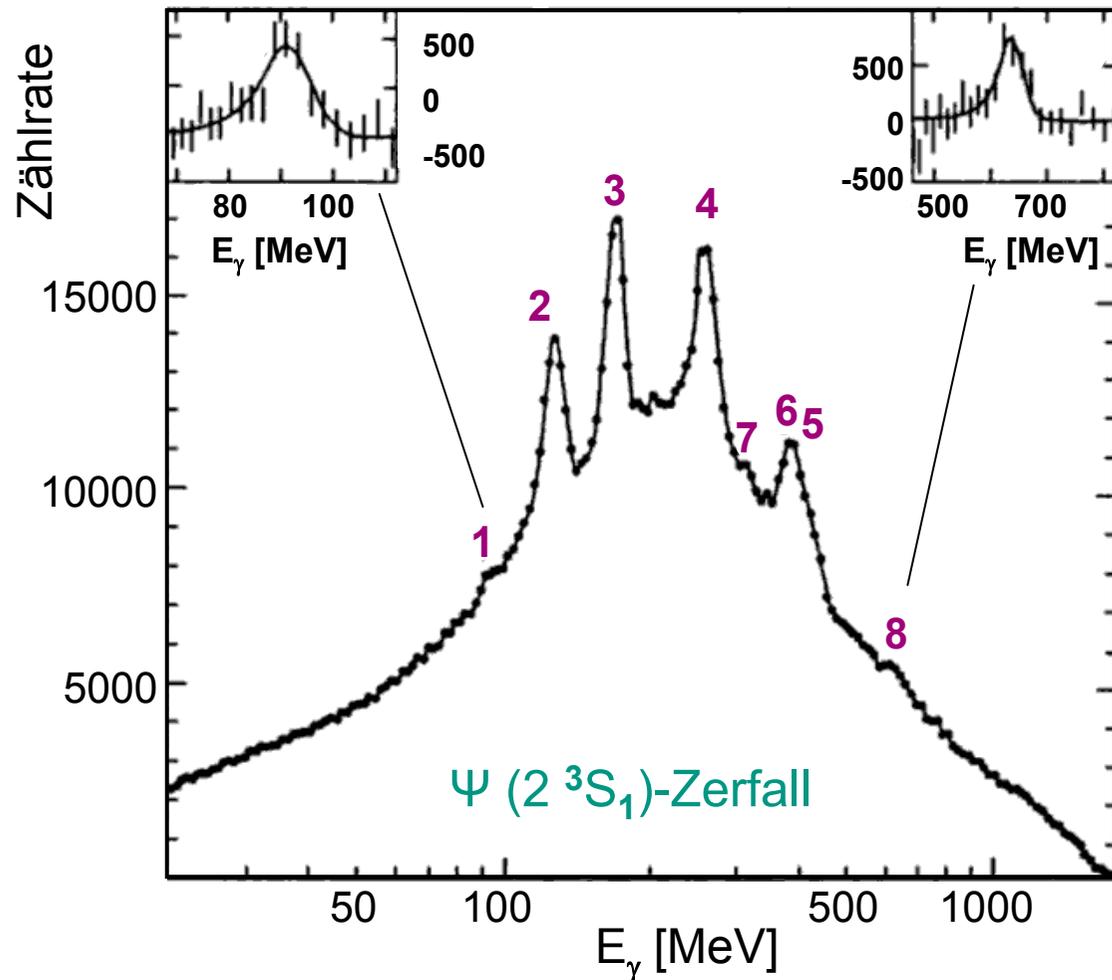
Resonanz	Masse [MeV]	Breite Γ [MeV]
J/Ψ (1S)	3097	0.087
Ψ (2S)	3686	0.277
Ψ (3770)	3770	24
Ψ (4040)	4040	52
Ψ (4160)	4160	78

radiale Anregungen n des S=1 ($c\bar{c}$)-Systems

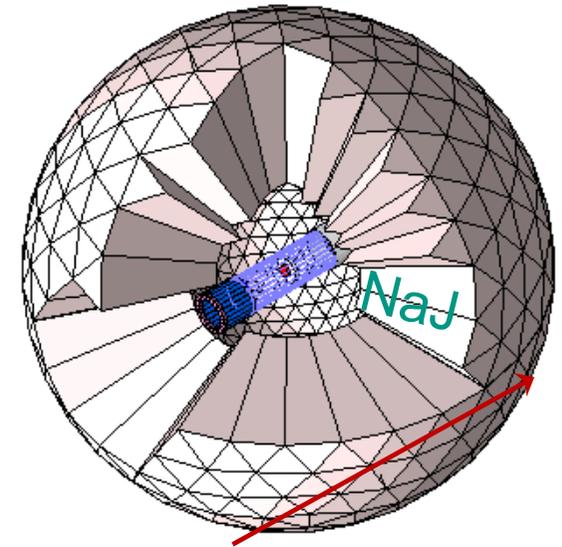
Zerfallssignatur eines Ψ' im MARK I Detektor

Charmonium-Spektroskopie

- **Charmonium-Termschema** : Messung des inklusiven Gammaspektrums von Ψ' Zerfällen (möglich da hadronische Zerfälle OZI- unterdrückt)

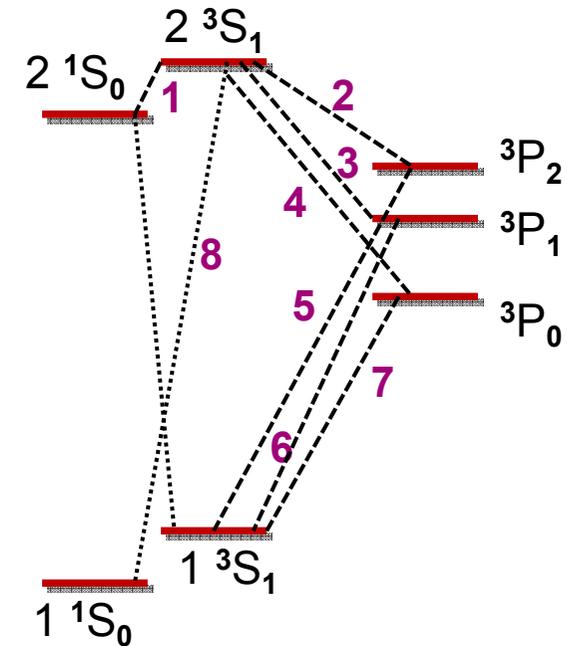
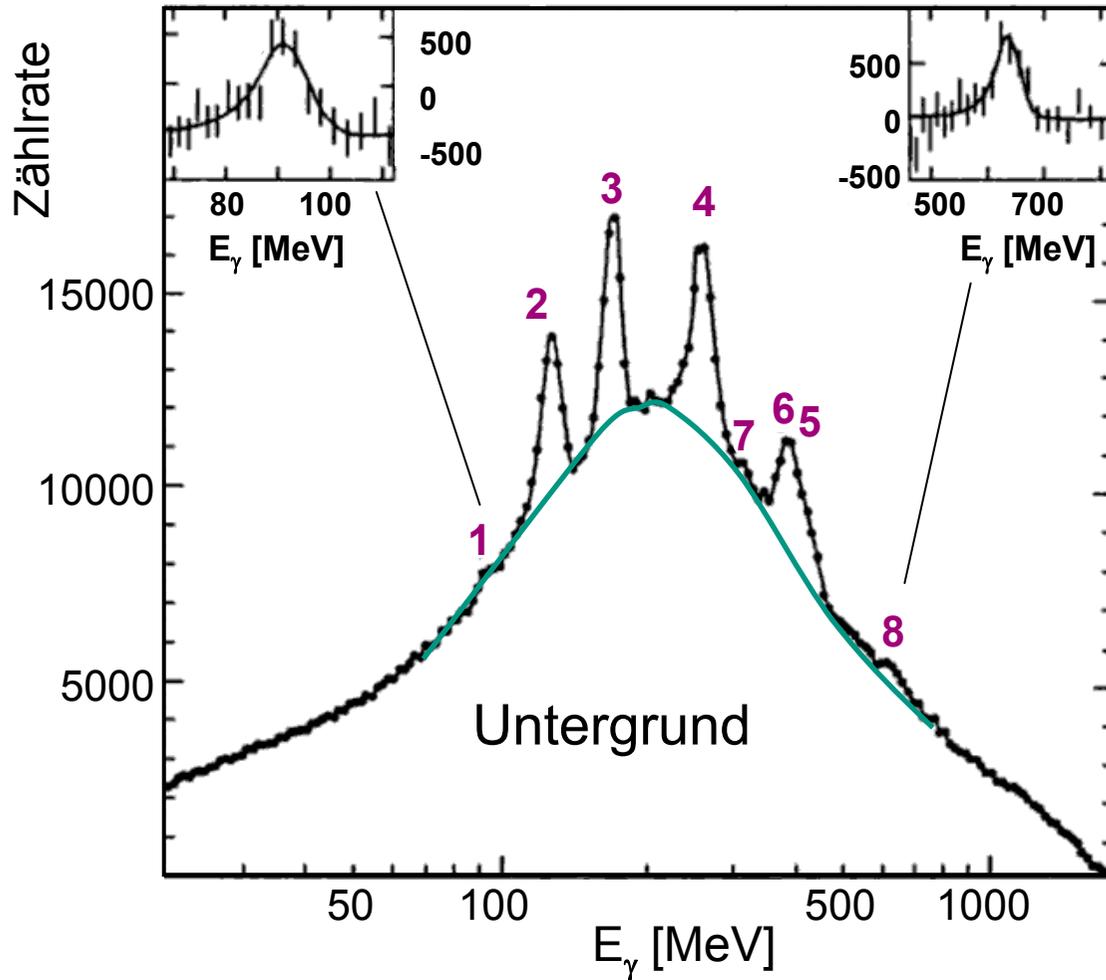


Crystal-Ball
Detektor
am
SPEAR
Ring



Charmonium-Spektroskopie

- **Charmonium-Termschema** : Rekonstruktion über das Photonenspektrum (γ -Kaskade) beim Zerfall des Ψ (2^3S_1)



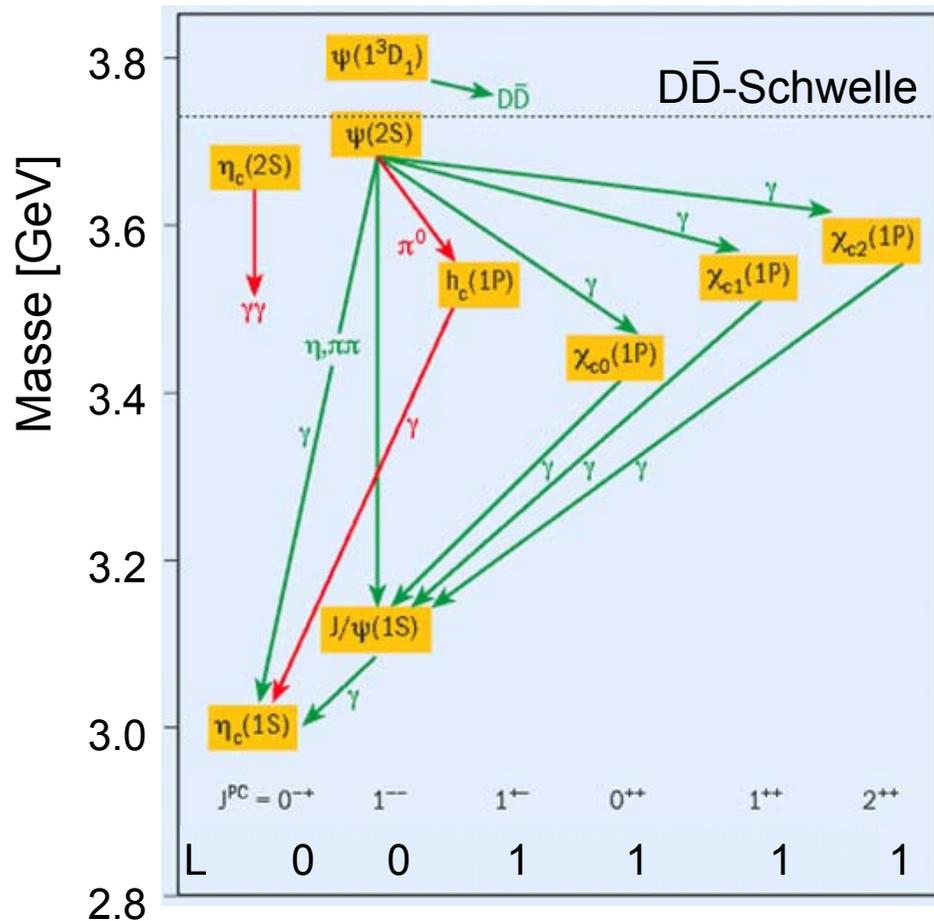
Notation Mesonspektroskopie:

$$n^{2s+1} \ell_J \quad \vec{J} = \vec{s} + \vec{\ell}$$

- n : radiale Anregung
- ℓ : orbitale Anregung

Charmonium-Spektrum

- **Charmonium-Termschema** : Rekonstruktion über das γ -Spektrum und weitere hadronische Zerfälle (Bsp: $\eta_c(1S)$ mit 0^{-+} nicht durch $e^- e^+$!)



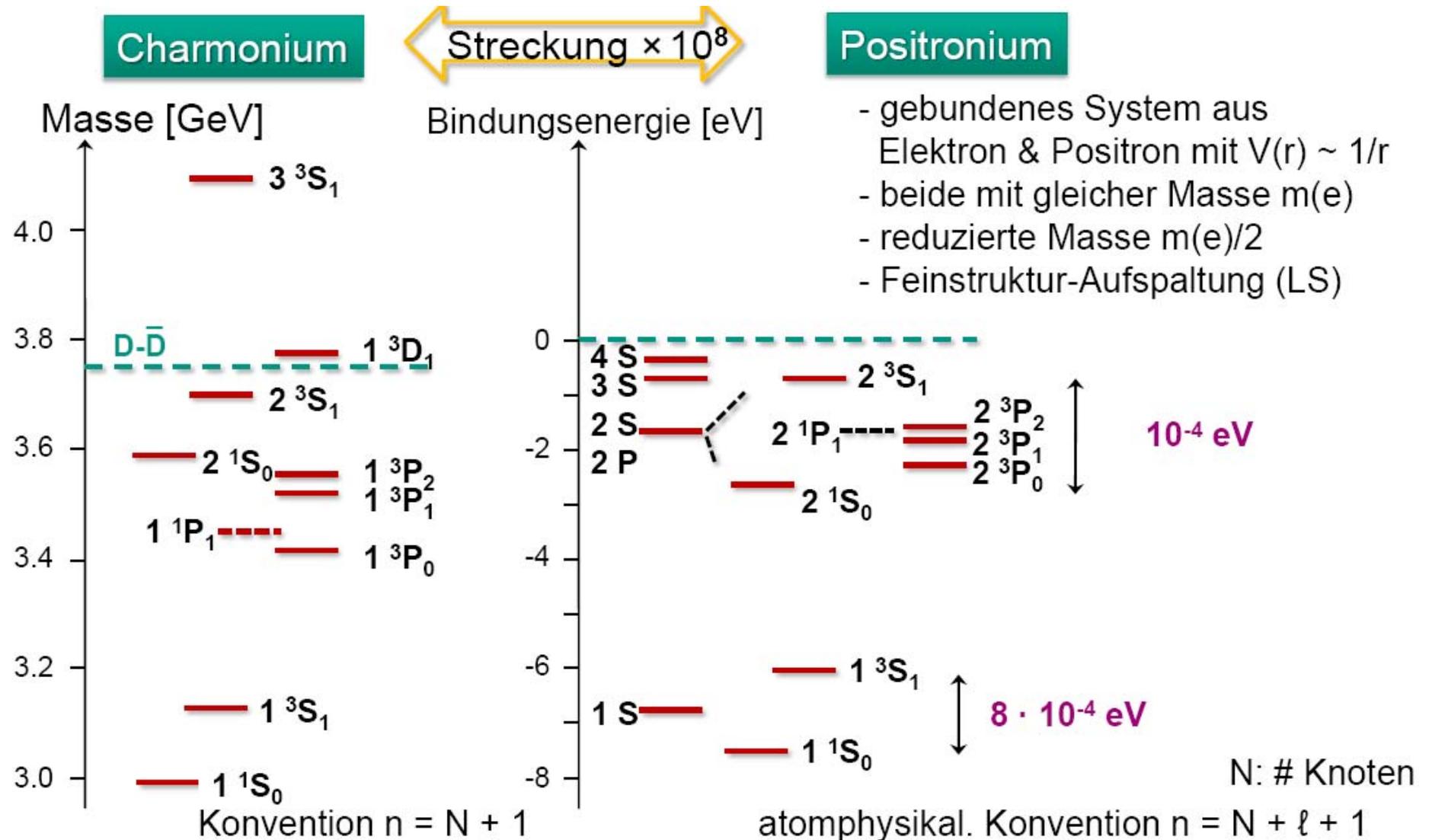
- **nichtrelativistische Bindungs-Zustände (cc):**

- schwere c-Quark Masse
- Relation Anregungsenergie $M(\Psi)$ zur Ruheenergie $M(J/\Psi)$

$$\frac{M(\Psi') - M(J/\Psi)}{M(J/\Psi)} \approx 0.19$$

- Bindungspotenzial aus QCD:
 - kleine Abstände: asymptotische Freiheit
 - große Abstände: Störungstheorie versagt

Termschemata: Charmonium – Positronium



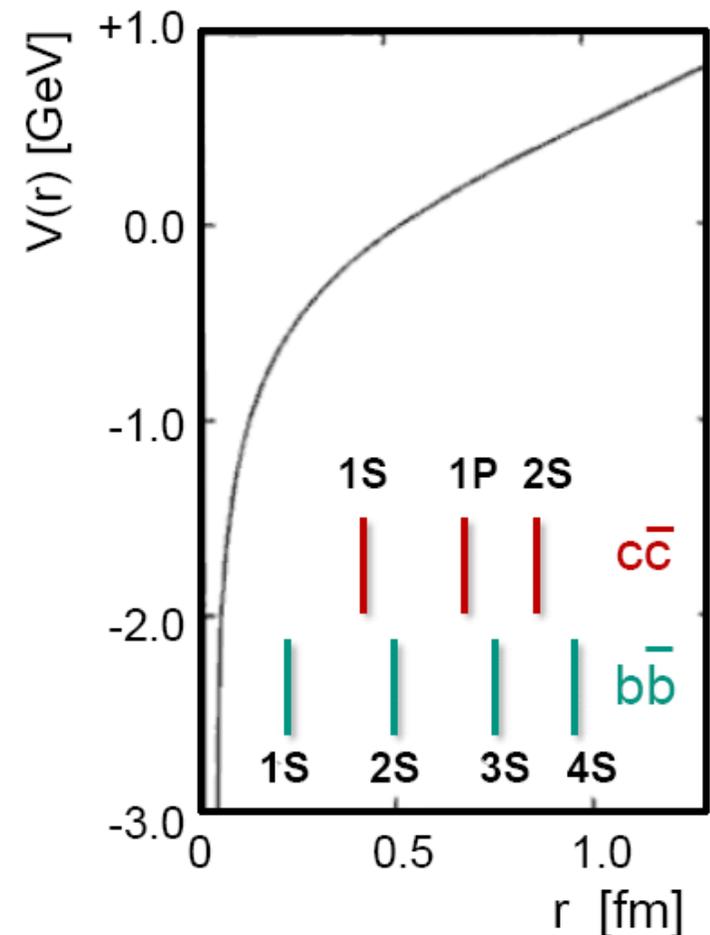
Charmonium & QCD Potenzial

■ Charmonium-Positronium Termschema :

- Zustände mit $n = 1$ und $n = 2$ zeigen große Ähnlichkeit
 - höher liegende (cc) Zustände stimmen nicht mehr gut mit dem $1/n^2$ Verhalten bei Positronium überein
 - QCD Potenzial bei kleinen Abständen ($n = 1,2$) sollte Coulomb-artig sein
 - bei (cc) ist aber die Entartung der 2^3S und 1^3P Zustände aufgehoben
- ↳ + linear anwachsendes Potenzial

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

kleines r : asymptotische Freiheit
großes r : Confinement

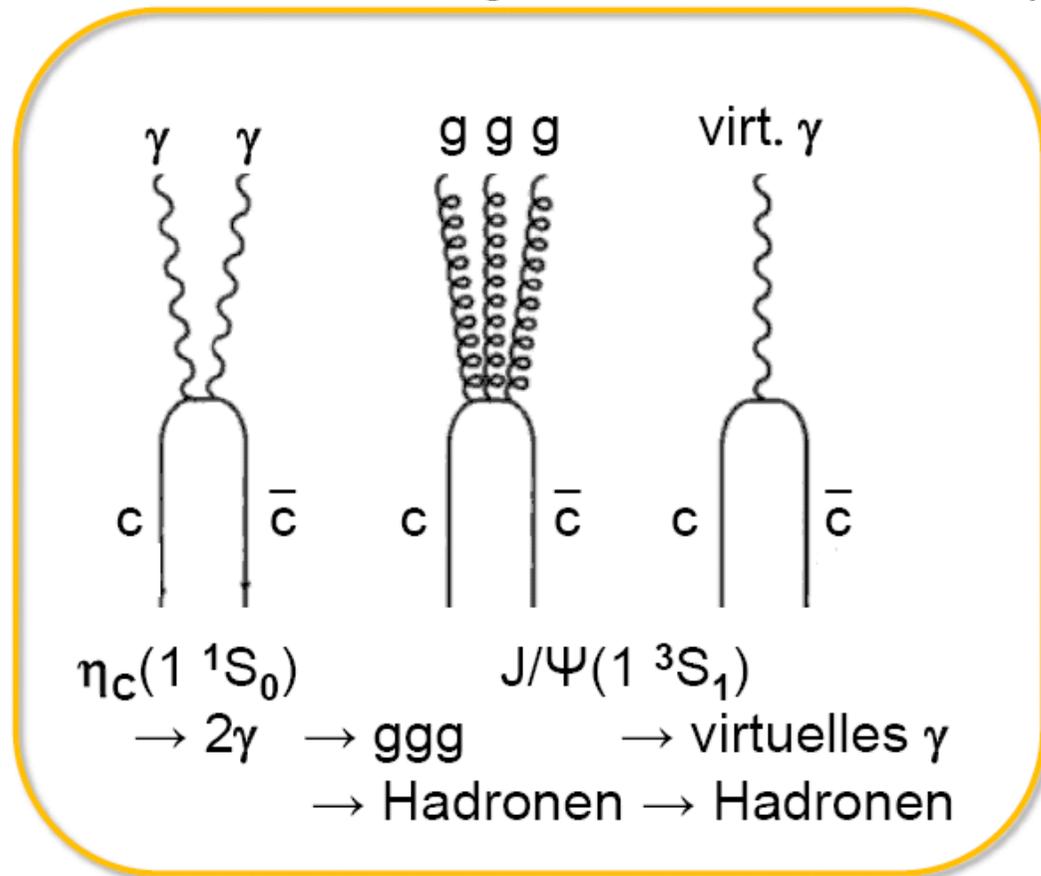
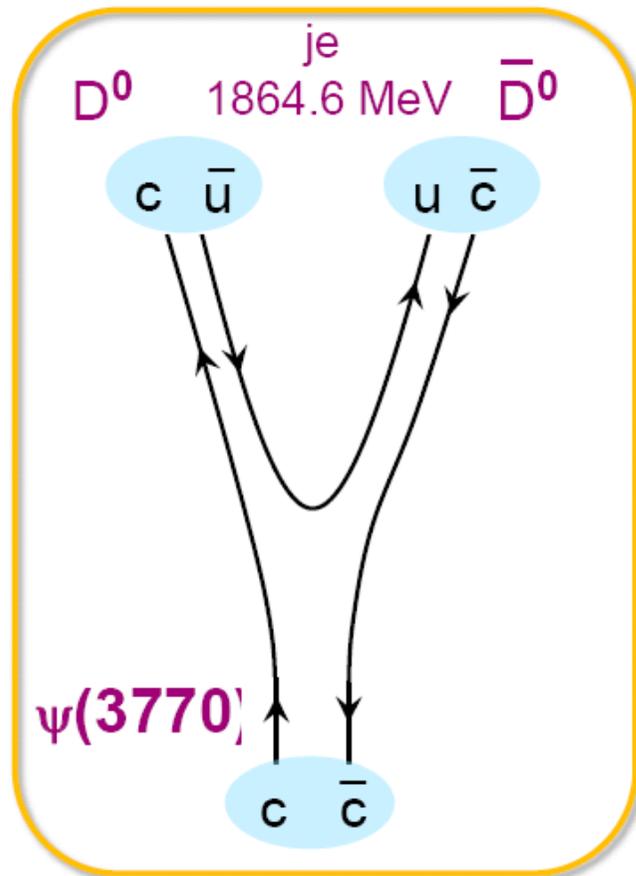


Charmonium -Zerfälle

■ Charmonium-Zerfälle : starke/elektromagnet. Wechselwirkung

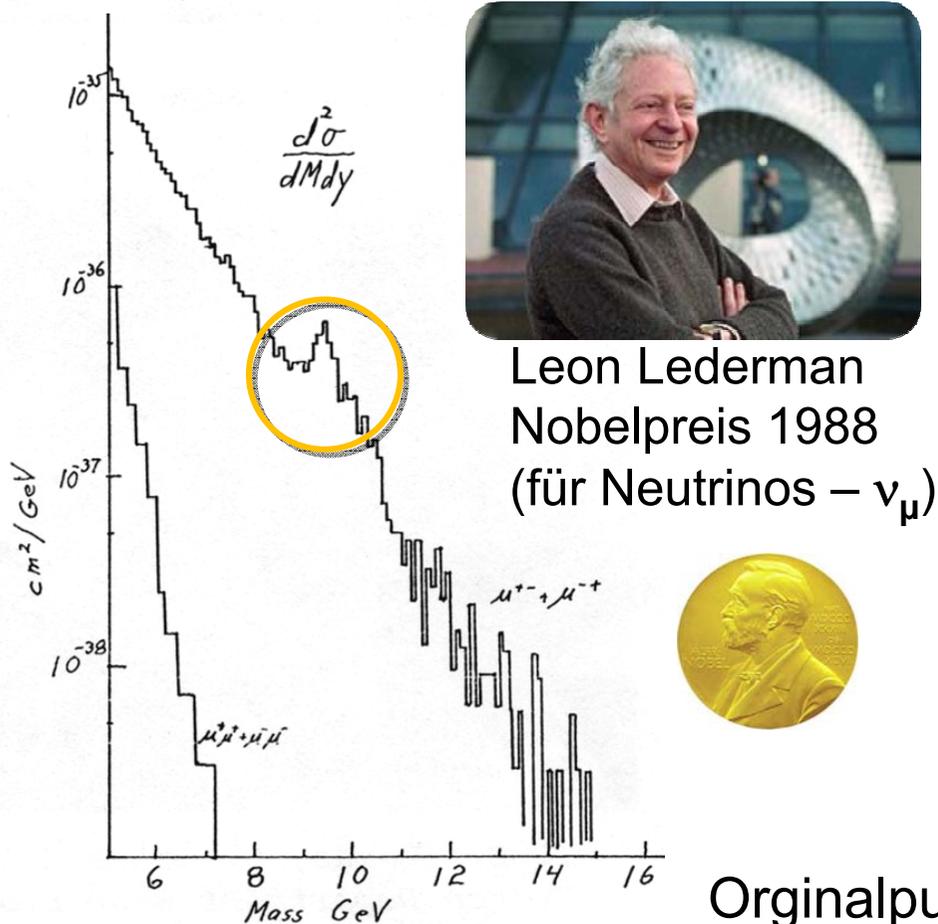
Anlagerung leichter $q\bar{q}$ Paare & Bildung von D-Mesonen mit offenem Charm

Annihilation von $c\bar{c}$ zu reellen oder virtuellen Photonen oder Gluonen, J/ψ zerfällt zu 70% über starke Ww. 30% über elektromagnet. Ww. in Hadronen/Leptonen



Bottom Quarks - das Upsilon

- **Entdeckung des Upsilon 1977:** gebundener Zustand eines Bottom-Quarks & eines Bottom-Antiquarks im Fermilab-Experiment E288 bei $E_p = 400 \text{ GeV}$



Upsilon-Meson & Anregungen

Eigenschaften von Υ

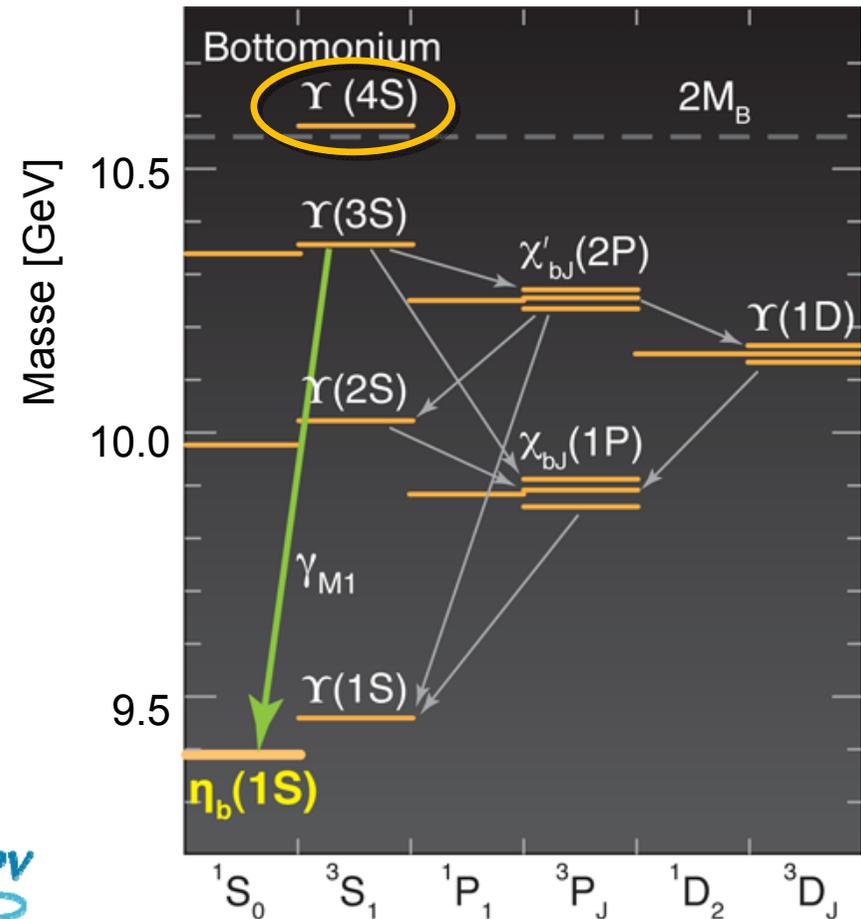
Masse [MeV]	9460.30 ± 0.26
Lebensdauer τ [s]	$1.21 \cdot 10^{-20}$

Resonanz	Masse [MeV]	Breite Γ [MeV]
$\Upsilon(1S)$	9460	0.053
$\Upsilon(2S)$	10023	0.043
$\Upsilon(3S)$	10355	0.026
$\Upsilon(4S)$	10580	20
$\Upsilon(10860)$	10865	110

Originalpublikation: Invariante Masse

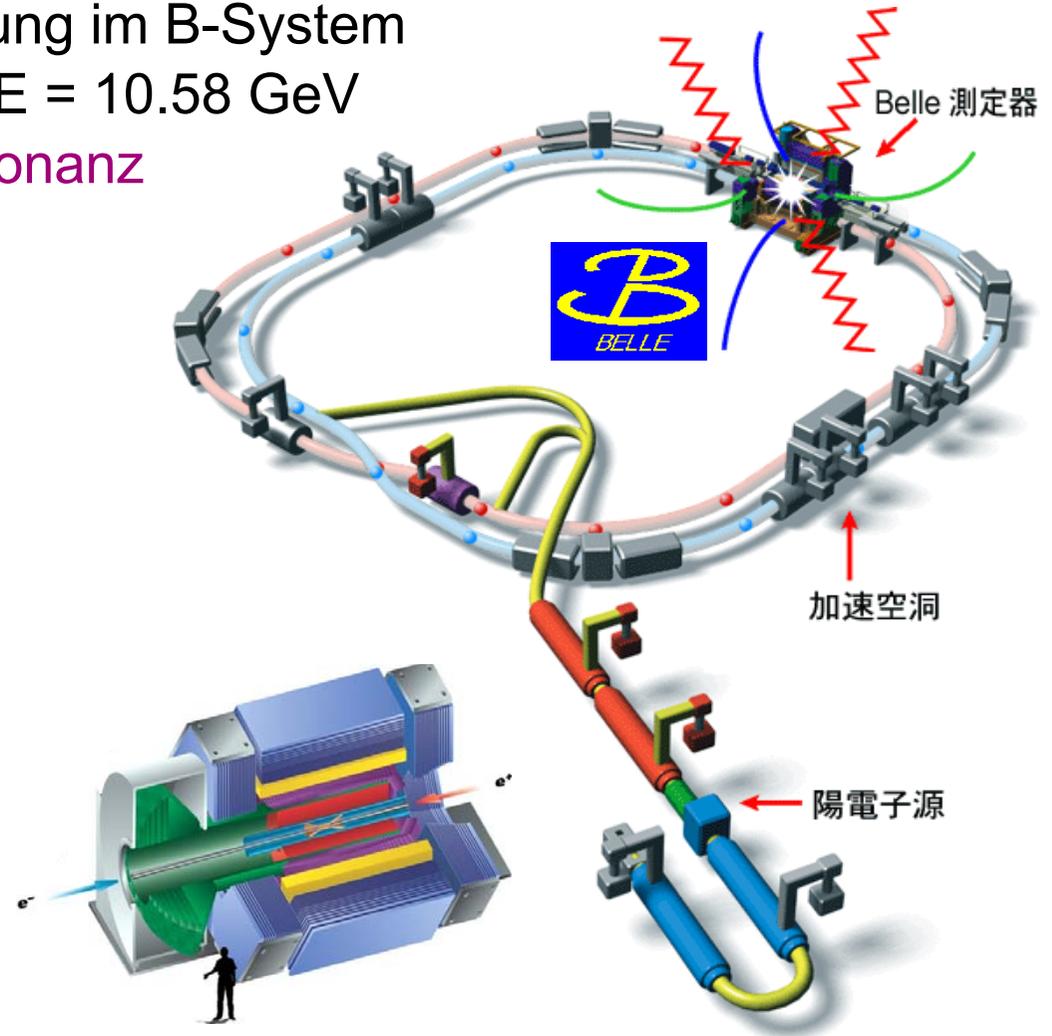
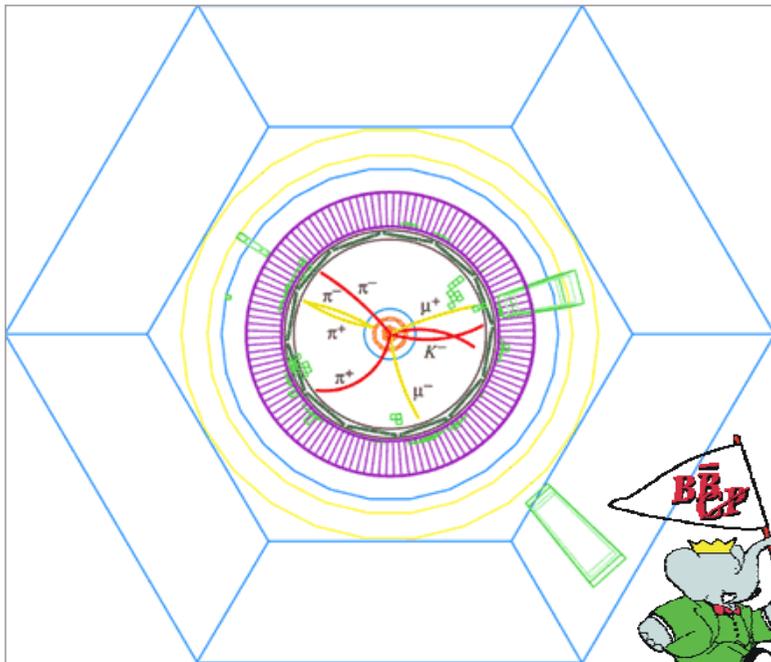
Bottomonium

- **Bottomonium-Spektroskopie** ($b\bar{b}$ -System) erfolgt in sehr enger Analogie zur Charmonium-Spektroskopie ($c\bar{c}$ -System)
 - die **kinematische Schwelle** für den Zerfall in $B\bar{B}$ -Mesonen liegt zwischen der $\Upsilon(3S)$ und $\Upsilon(4S)$ Resonanz, da $M(B\bar{B}\text{-System}) = 10558 \text{ MeV}$
 - **4S-Resonanz** kann daher an einem $e^- e^+$ Beschleuniger benutzt werden, um **Mesonen mit b-Quarks** zu erzeugen
- B-Fabrik (B-factory)**
- **USA:** SLAC - PEP-Speicherring (Positron-Electron-Project)
 - **Japan:** KEKB



B-Fabriken: B-Physik

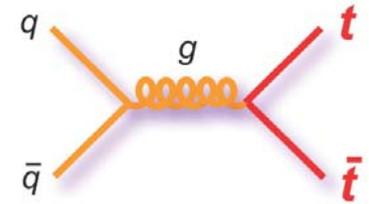
- Aktuell: sehr intensive Untersuchungen zur b-Quark-Physik (B-Fabriken), speziell zur Analyse der CP-Verletzung im B-System
 - CMS-Energie des e^+e^- Strahls bei $E = 10.58 \text{ GeV}$
d.h. bei der Energie der $\Upsilon(4S)$ Resonanz
 $4S \rightarrow B^+ B^-$, $4S \rightarrow B^0 \bar{B}^0$
(Belle, BaBar)



Top Quarks

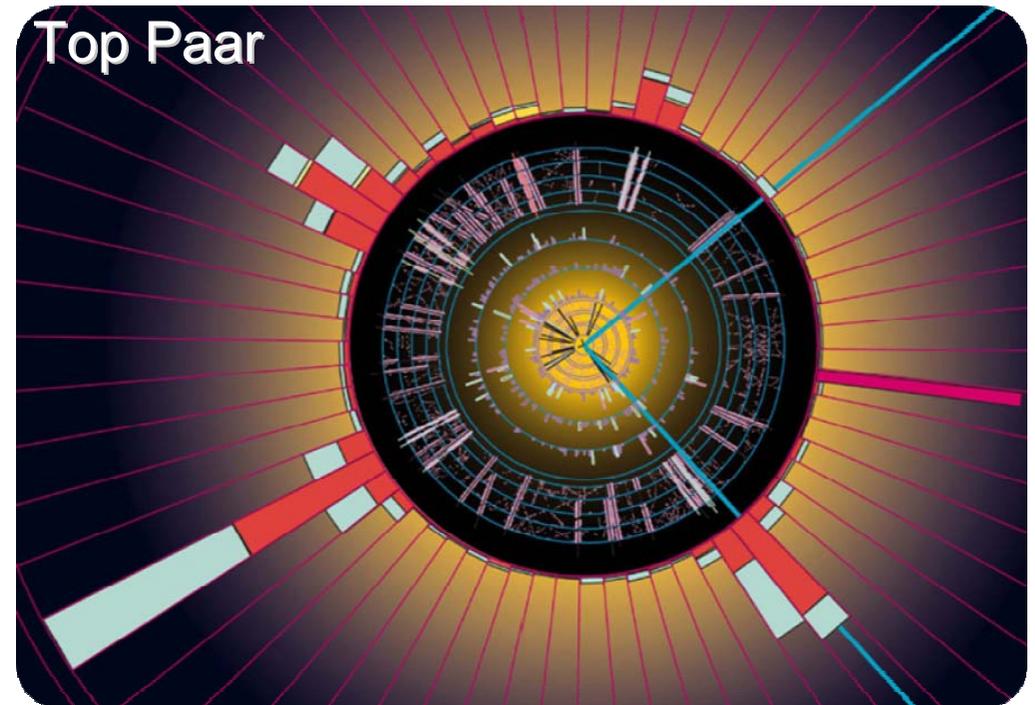
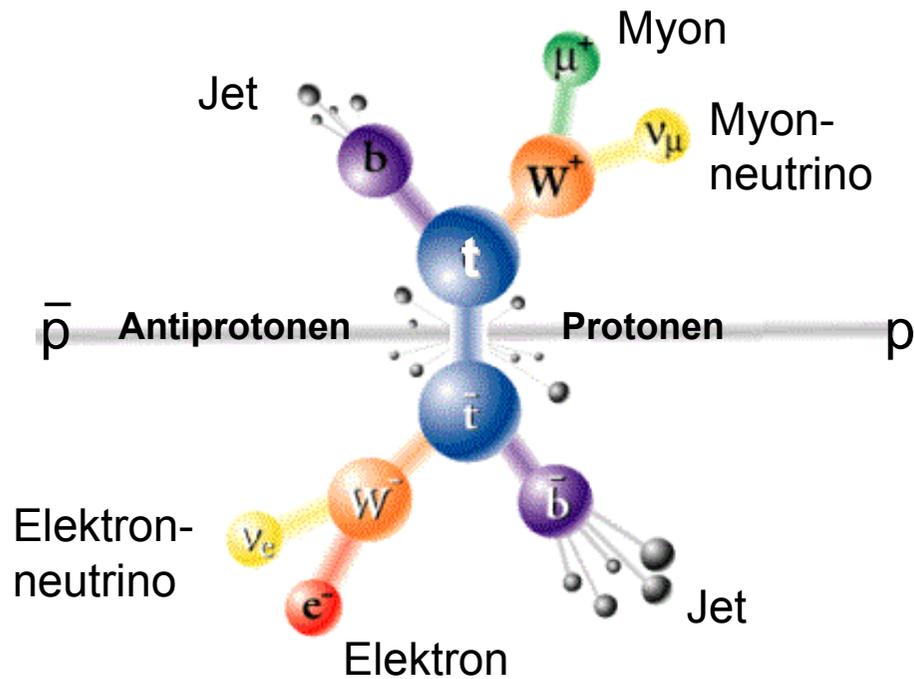
■ Top-Quark-Physik

Top/Anti-Top Paare ($t\bar{t}$): erste Beobachtung am Tevatron (1994) in den beiden Experimenten CDF, DØ über hadronische Erzeugung



Eigenschaften des top-Quarks

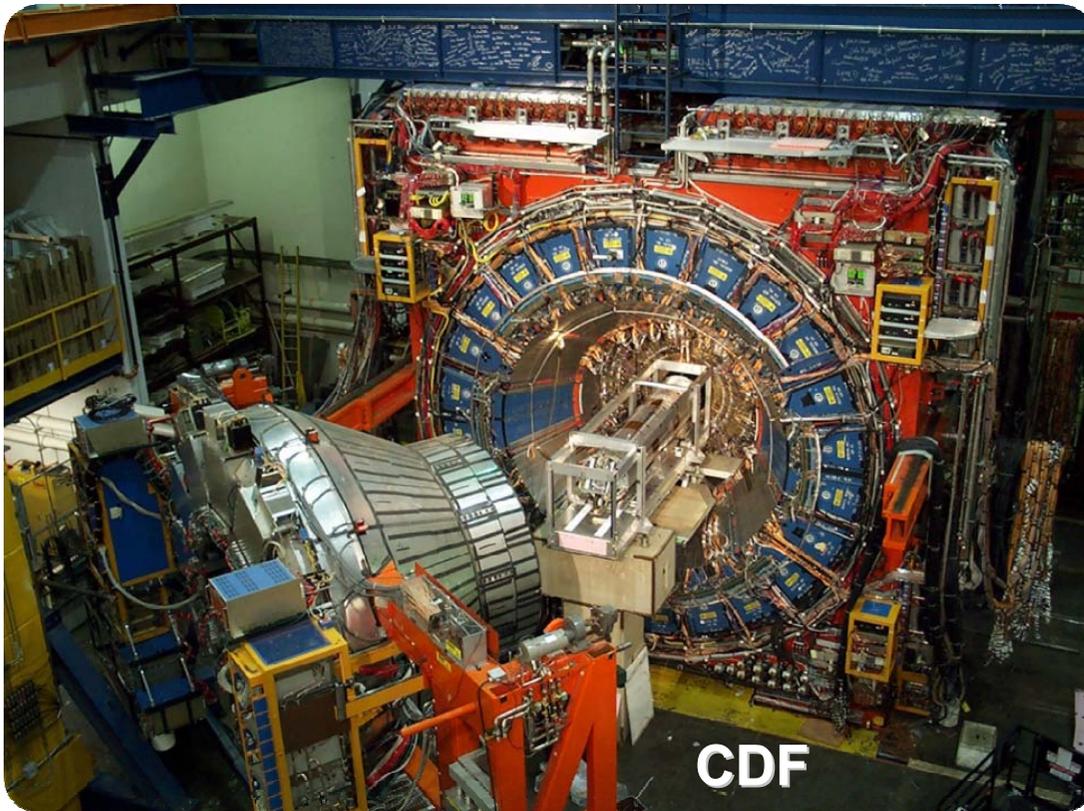
Masse [GeV]	173.1 ± 1.3
Lebensdauer τ [s]	$4.2 \cdot 10^{-25}$
Zerfall (schwache Ww.)	$t \rightarrow b + W^+$



Top Quarks

■ Top-Quark

die extrem kurze top-Lebensdauer ($\tau \sim 10^{-25}$ s) ermöglicht keine Bildung hadronischer Bindungszustände (Toponium), da die Hadronisation eines einzelnen Quarks erst nach $\tau_{\text{hadr}} \sim 10^{-23}$ s einsetzt



■ Einzelne Top-Quark (2009)

Erzeugung einzelner Tops über schwache Wechselwirkung

