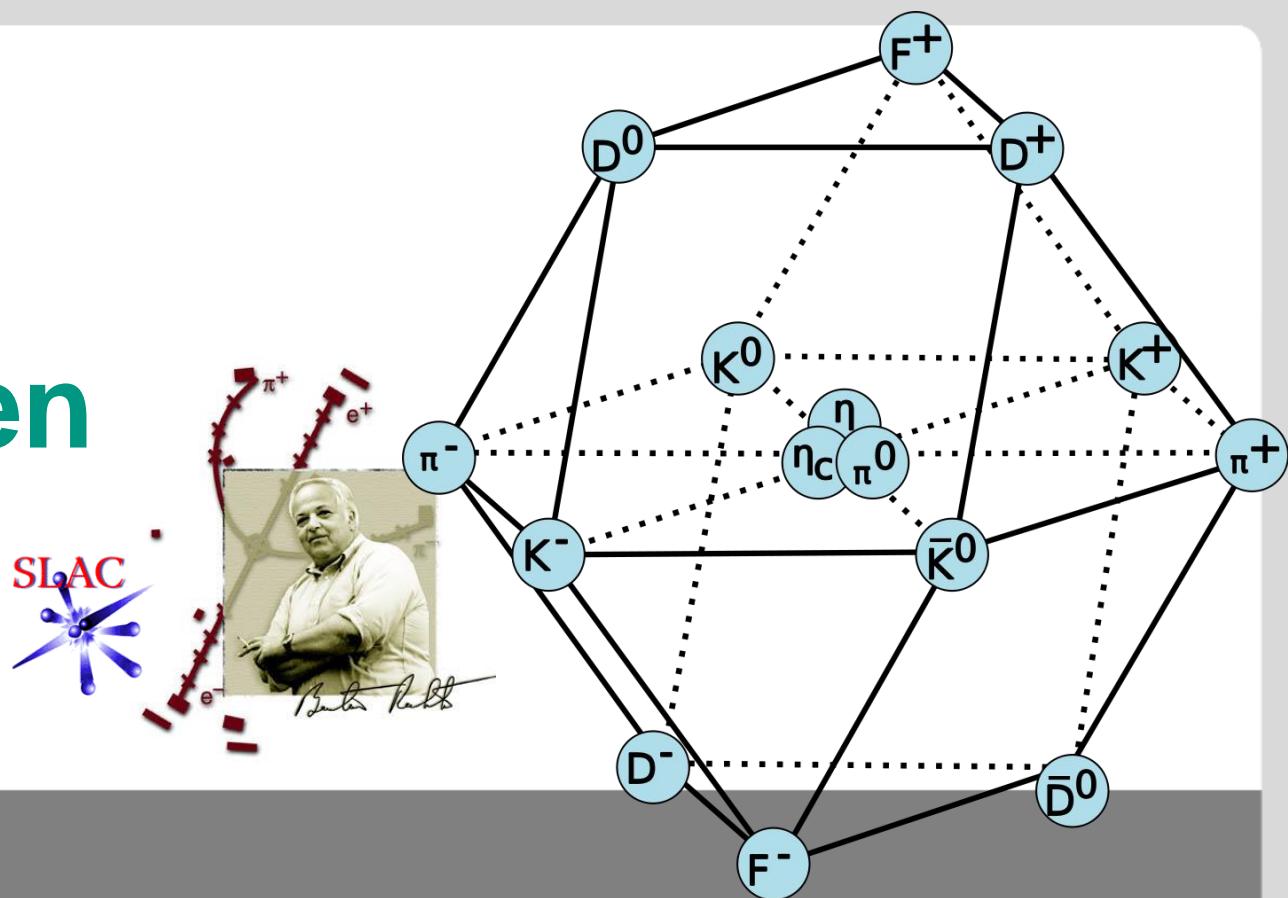


Kerne und Teilchen

Physik VI

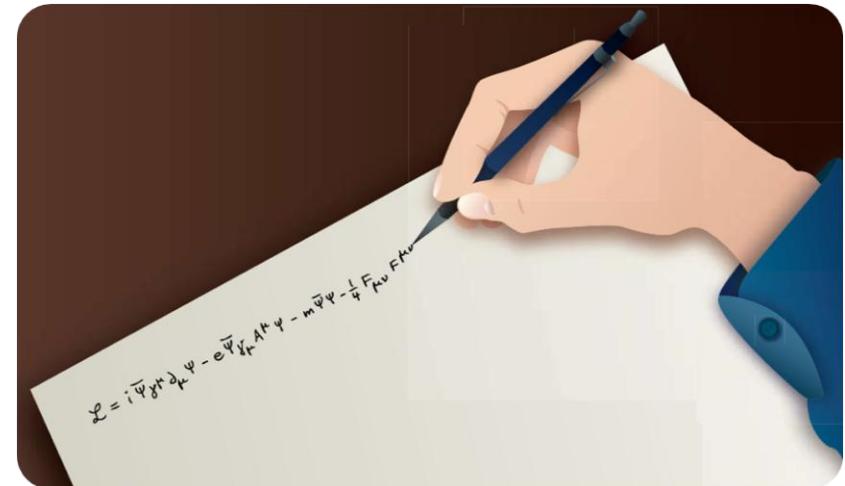
Vorlesung # 18 17.6.2010

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik



Quarkmodell der Hadronen

- SU(3) Symmetrie
- mesonische Multiplette
- baryonische Multiplette
- Novemberrevolution: das J/ Ψ
- Charmonium: Grundlagen
- Charmonium-Spektroskopie

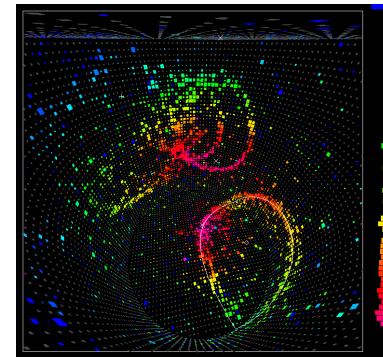
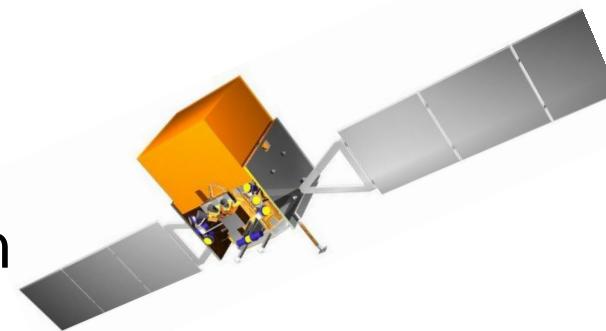


moderne Detektorsysteme



■ Szintillatoren:

- **anorganische Szintillatoren**: NaJ, CsJ, hohe Lichtausbeute, lange Abklingzeiten
- **organische Szintillatoren**: $(CH)_n$ mittlere Lichtausbeute, kurze Abklingzeiten, große Volumina

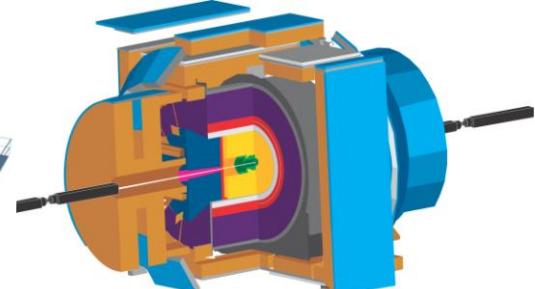
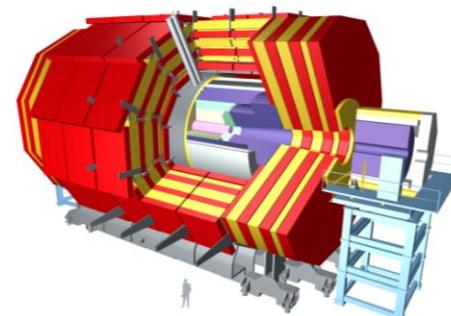


■ Cherenkov-Detektoren:

- Auswahl eines speziellen Radiators (**Aerogel**), Spiegelsysteme & PMTs

■ Detektoren für Hochenergiephysik (CMS, CDF):

- **zentraler Si-Tracker**: Spurrekonstruktion, Ereignistopologie
- **elektromagnetisches Kalorimeter**: Energie von e^- , e^+ , γ (Parameter: X_0)
- **hadronisches Kalorimeter**: Energie von π^\pm , ρ , n , p , ... (Parameter Λ)
- **Solenoid**: B-Feld zur Impulsbestimmung
- **Myonkammern**: Impuls von Myonen



Isospin & Hyperladung, Flavoursymmetrie



■ Isospin I:

Basis: Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte und nahezu identische Massen von (u,d)-Quarks

(u,d)-Quark-Isospin-Dublett mit Isospin $I_3 = +\frac{1}{2}$ (u), $-\frac{1}{2}$ (d)

Wechselwirkungen & Quantenzahl I:

stark: Erhaltung von I und I_3

elmag.: Erhaltung von I, Verletzung von I_3

schwach: Verletzung von I und I_3

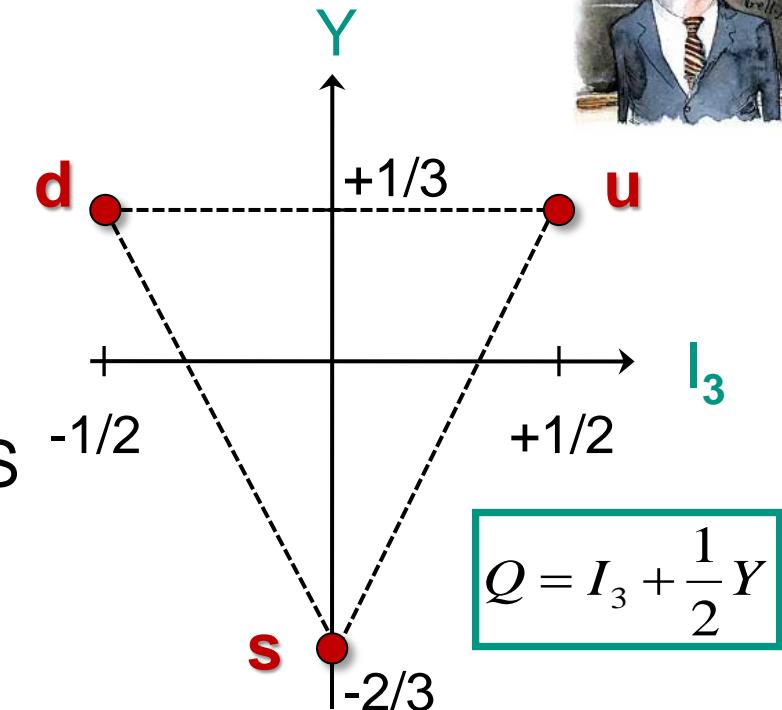
■ Flavoursymmetrien:

Basis: Erweiterung der Flavourbasis auf (u,d,s)

Hyperladung Y = Baryonenzahl B + Strangeness S

↳ **SU(3) – Flavoursymmetrie mit Multipletten**

mit Flavourzustand Charm: SU(4)



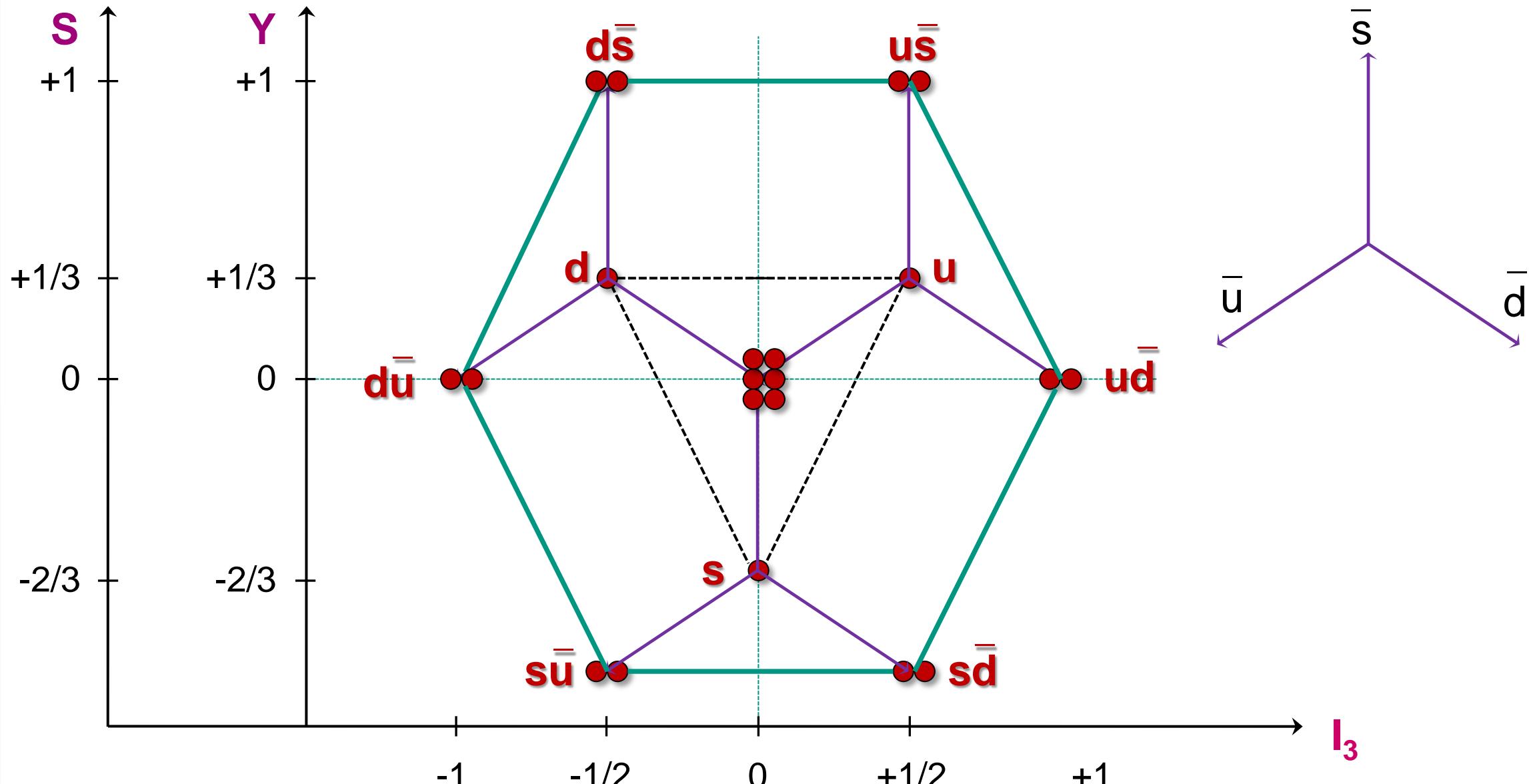
■ Strangeness S:

assoziierte Strangeness-Produktion $\rightarrow \Lambda K^0$

SU(3): fundamentale Darstellung und Zuordnung der Quarks

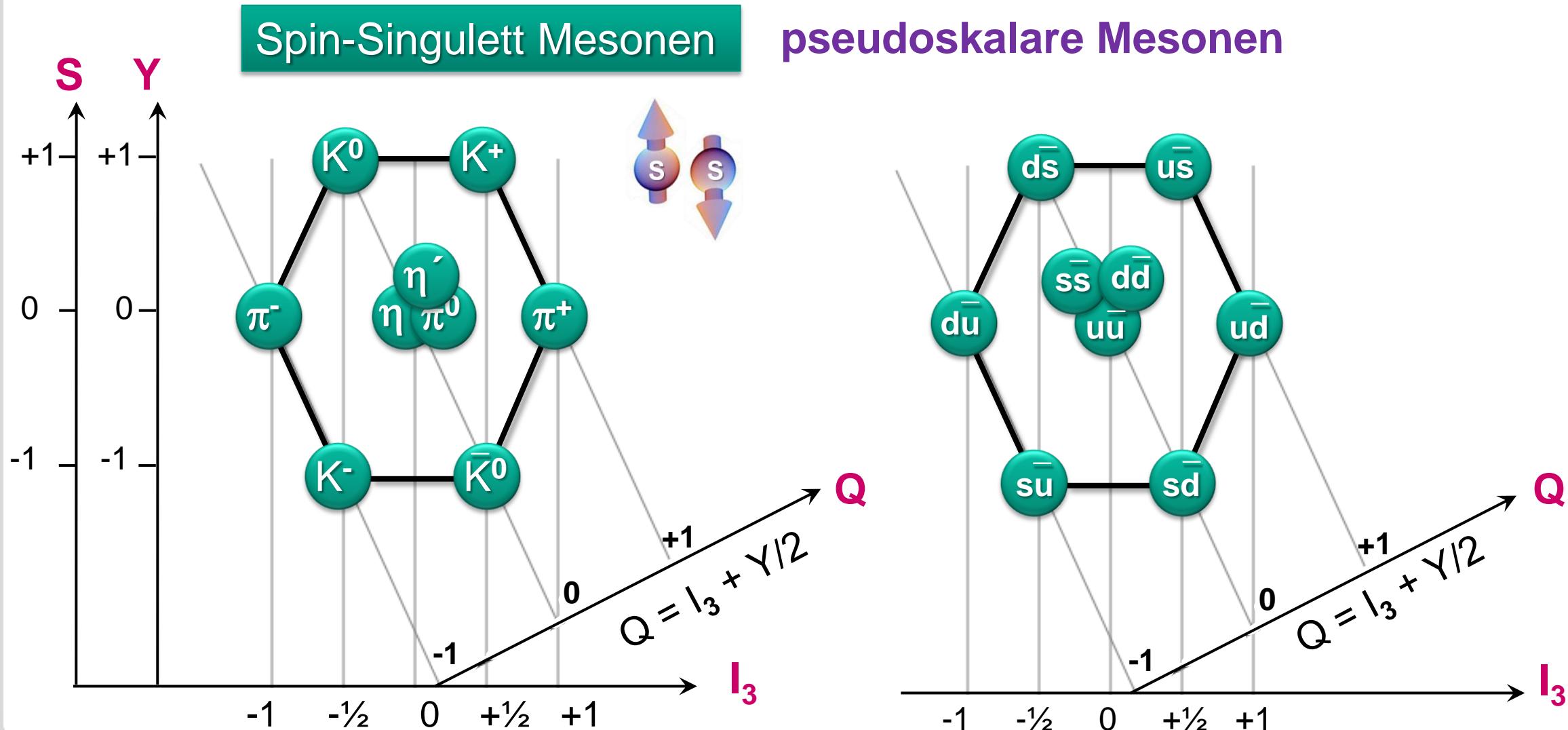
Mesonen – Multiplett

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



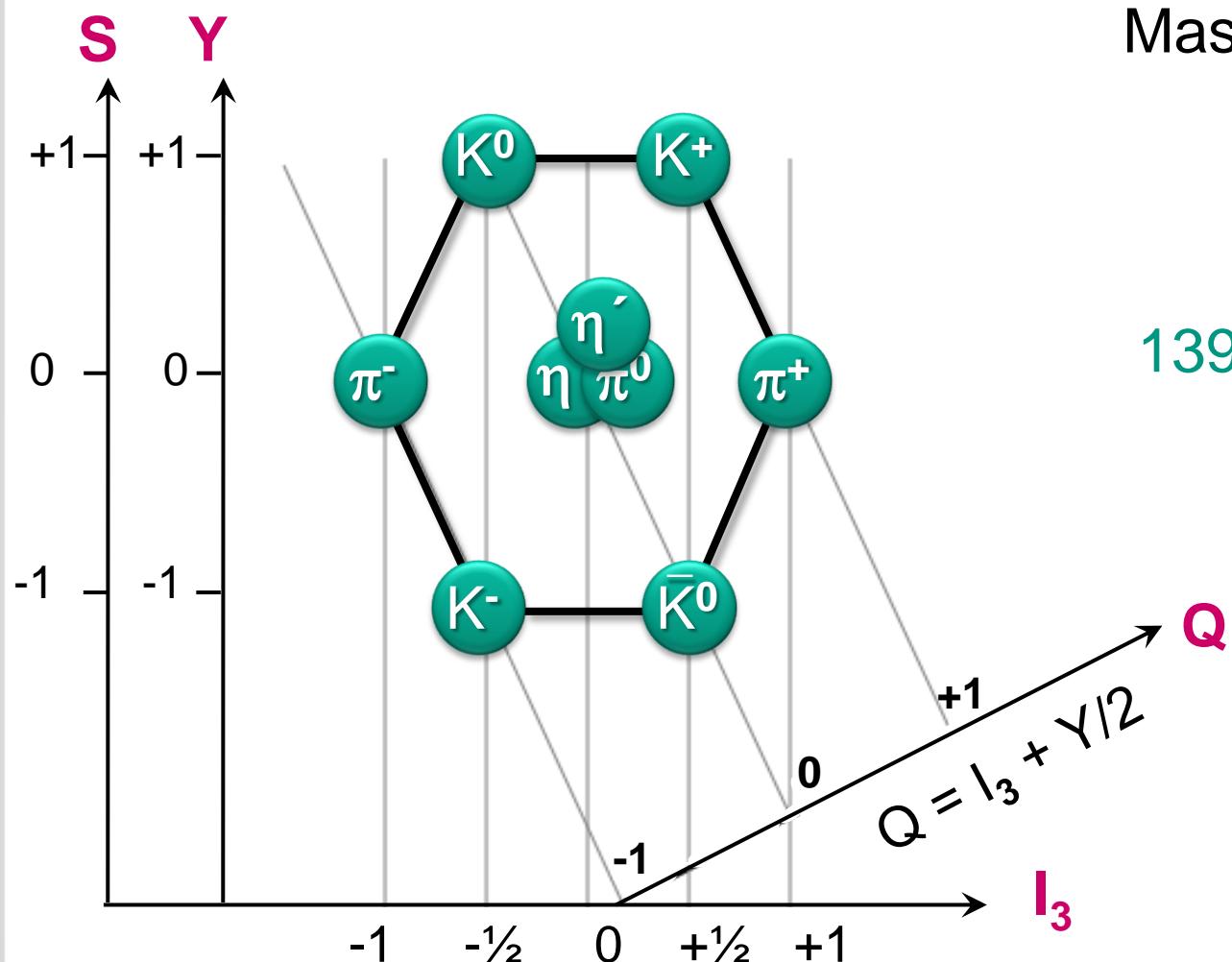
Mesonen – Nonetts

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



Mesonen – Nonetts

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



Massen pseudoskalarer Mesonen [MeV]

497.65 — 493.68
139.57
957.78
547.75 134.98
139.57

493.68 — 497.65

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

- es existieren 3 neutrale Mesonen mit $I_3 = 0$ und $S = 0$:
 - ein Flavour-symmetrischer Zustand η_1 als **SU(3) Singulett**
 - zwei Flavour-antisymmetrische Zustände η, π^0 als Teil des **SU(3)- Oktetts**

SU(3) Singulett

- η' Meson ist nahezu identisch mit dem SU(3) Singulett η_1 :

$$\eta' \approx \eta_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} |u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}\rangle$$

SU(3) Oktett

- η Meson ist nahezu identisch mit dem SU(3) Oktett-Mitglied η_8 :

$$\eta \approx \eta_8 = \frac{1}{\sqrt{6}} |u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}\rangle$$

- neutrales Pion π^0

$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} - u\bar{u}\rangle$$

$$3 \otimes \bar{3} = 8 + 1$$

■ Isomultiplets:

da Baryonen aus 3 Quarks aufgebaut werden, gibt es

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

- 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

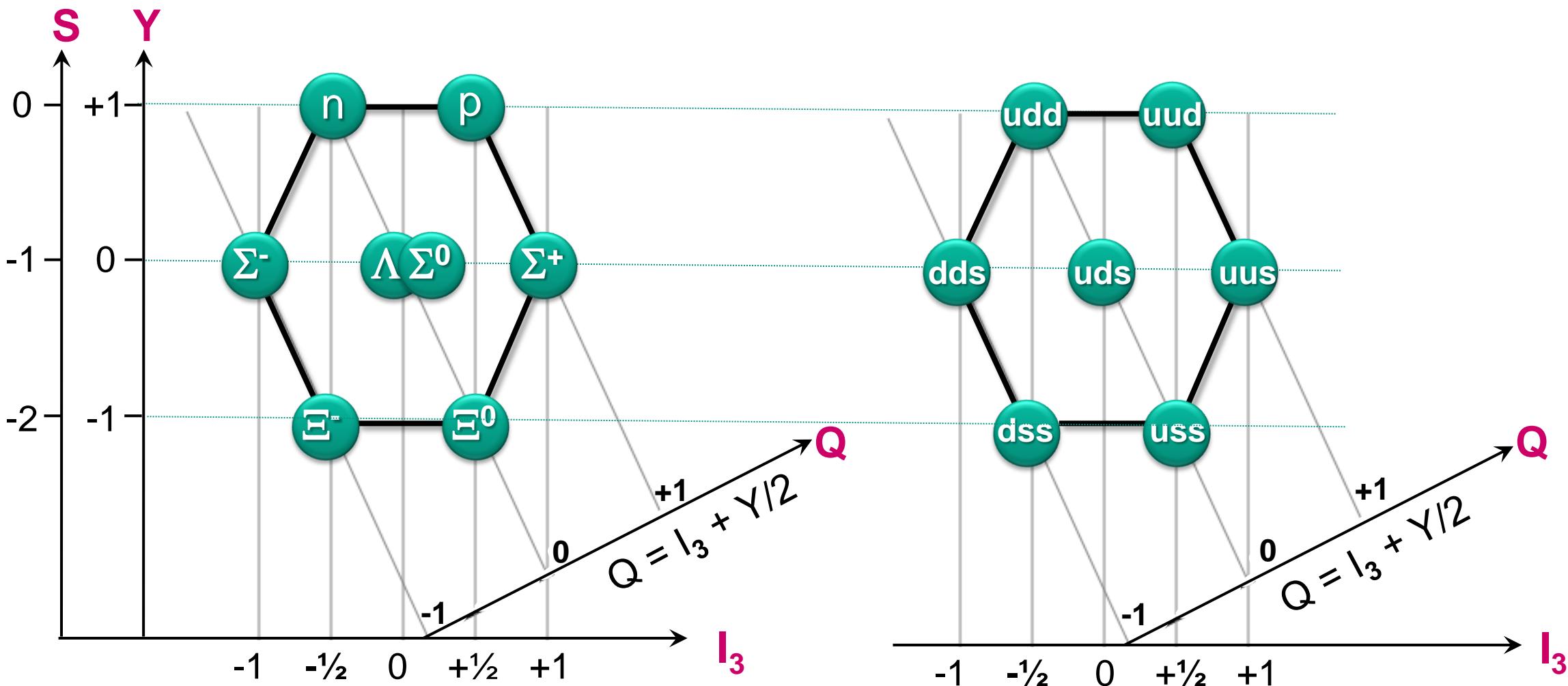
- Orts-, Spin-, Flavour-, Farb- Anteile der Wellenfunktion
- Beispiel **$J = 1/2$ Baryonen** ($\uparrow\uparrow\downarrow$)

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)

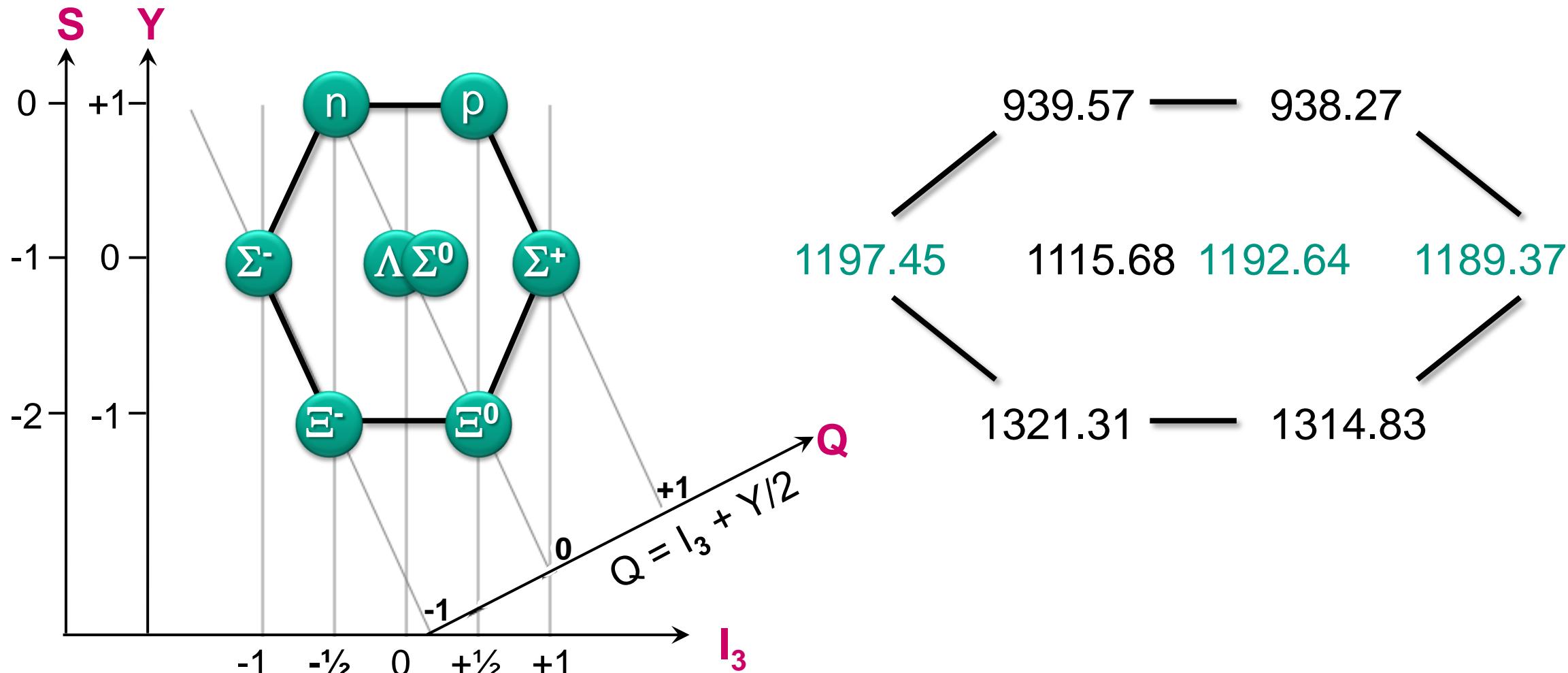
Baryonen – Oktetts

- **Isomultiplets**: 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 Doublets (Ξ , Σ), 1 Triplet (Σ)



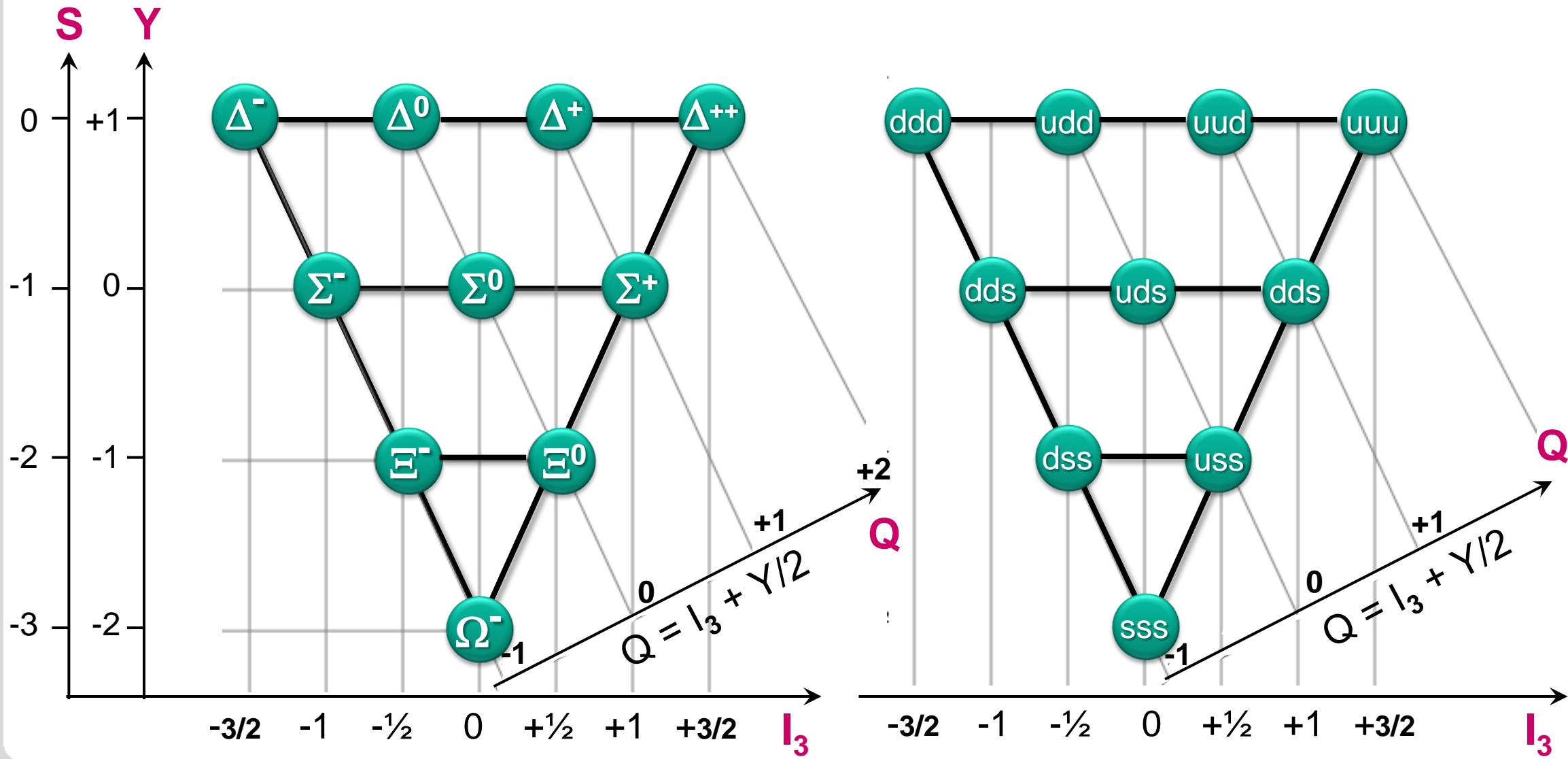
Baryonen – Oktetts

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



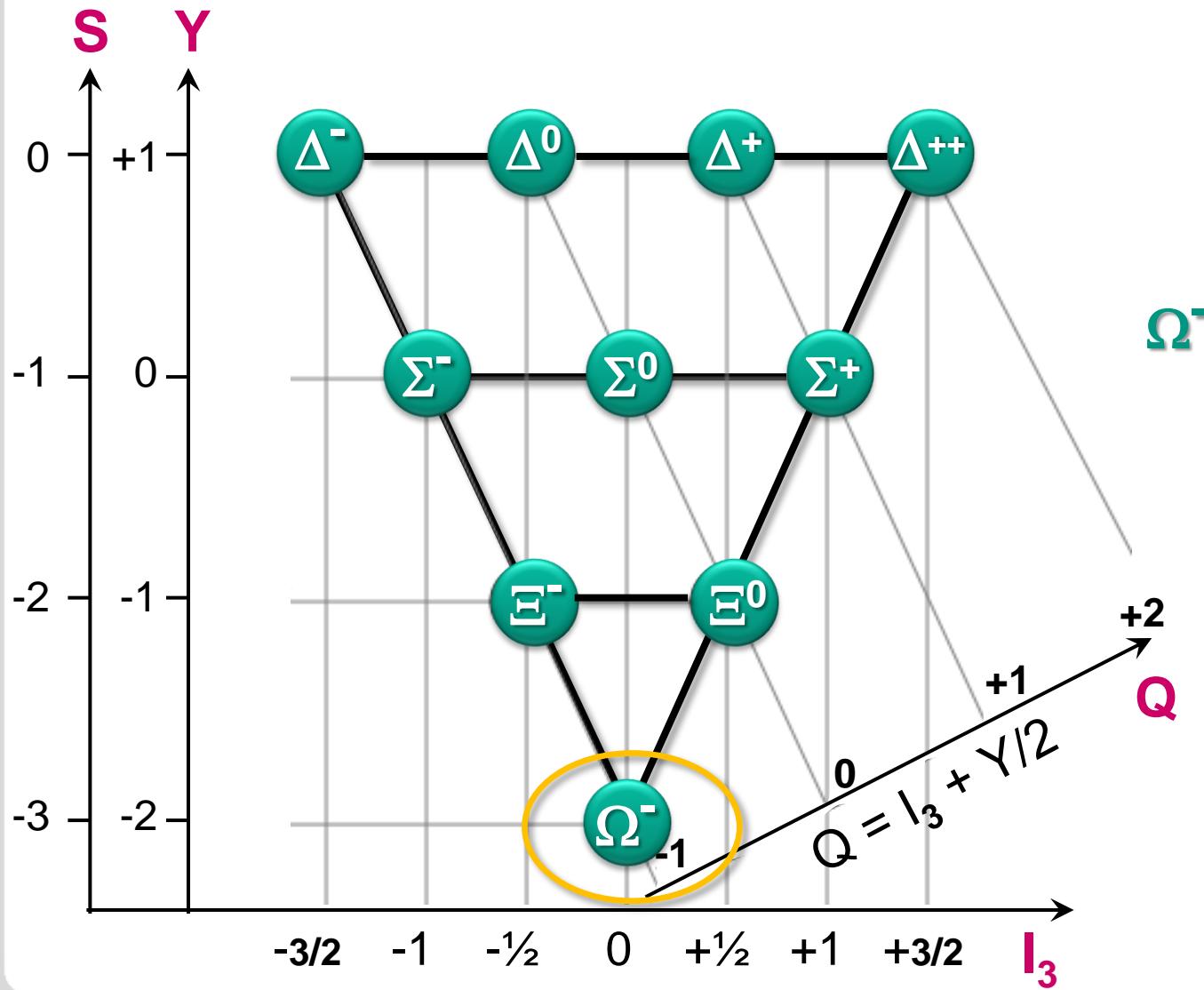
Baryonen – Dekuplett

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

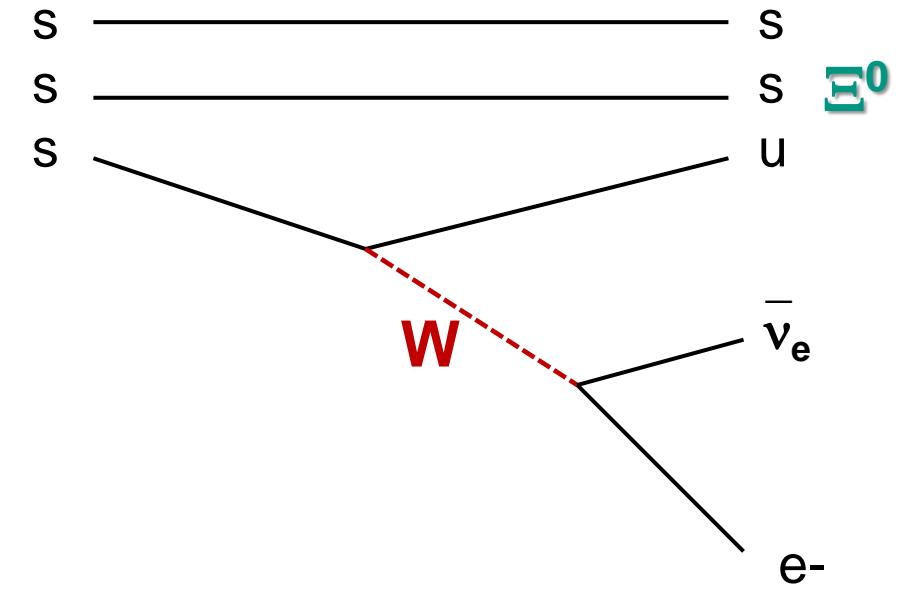


Baryonen – Dekuplett

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



- Zerfall des Ω^- -Hyperons:
3-fache strangeness



wesentliche frühe Stütze
des Quark-Modells von
M. Gell-Mann

7.2 schwere Quarks (Quarkonia)

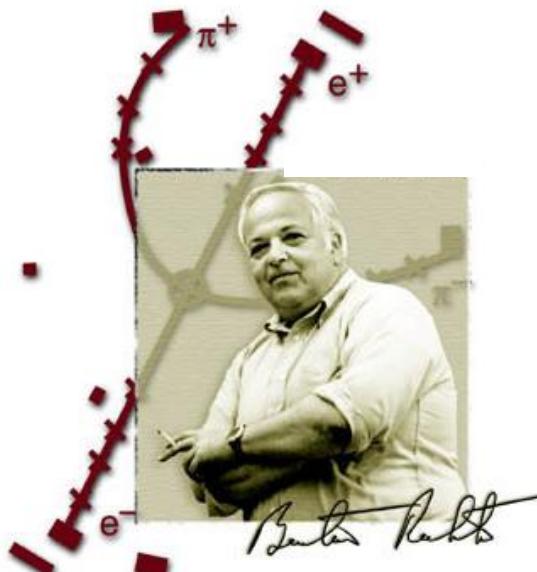
- die schweren Quarks **c**, **b** und **t** werden bei Prozessen der starken & elektromagnetischen Wechselwirkung stets in $q\bar{q}$ -Paaren erzeugt
- **Charm-Quark:**
 - theoretisch postuliert 1970 (S. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani)
 - experimenteller Nachweis 1974 (B. Richter, S. Ting)
 - $m(c) = (1.27 \pm 0.1) \text{ GeV}$, $q = +2/3$, $\tau(\text{c-Mesonen}) \sim 10^{-13} \text{ s}$
- **Bottom-Quark (beauty-Quark) :** Nobelpreis 2008
 - theoretisch postuliert 1973 (M. Kobayashi, T. Masakawa)
 - 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. Masakawa)
 - experimenteller Nachweis 1995 Tevatron (CDF, D0)
 - $m(t) = (173.1 \pm 1.3) \text{ GeV}$, $q = +2/3$, $\tau = 4.2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$



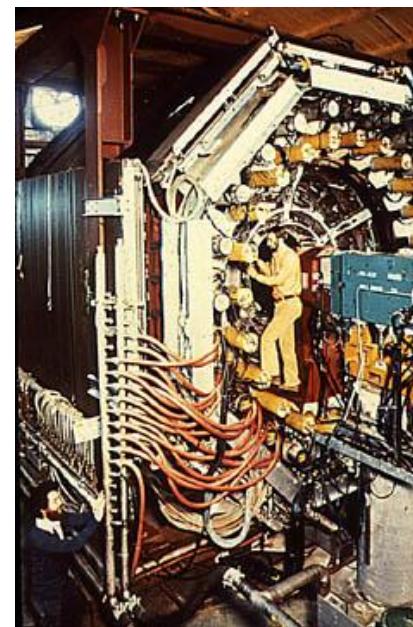
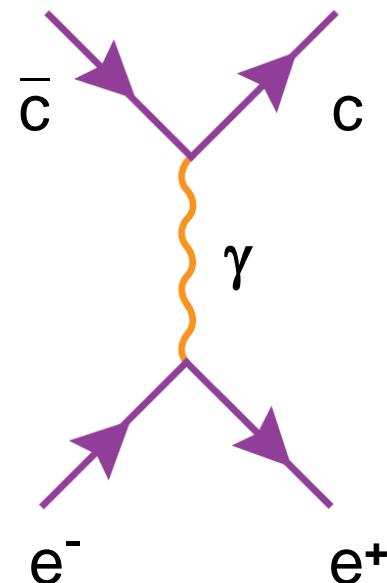
T. Masakawa M. Kobayashi

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



Burton Richter
*1931
Nobelpreis 1976



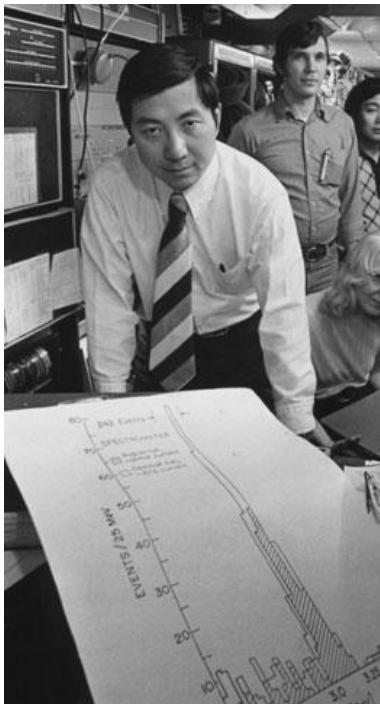
Mark I Detektor
am SPEAR



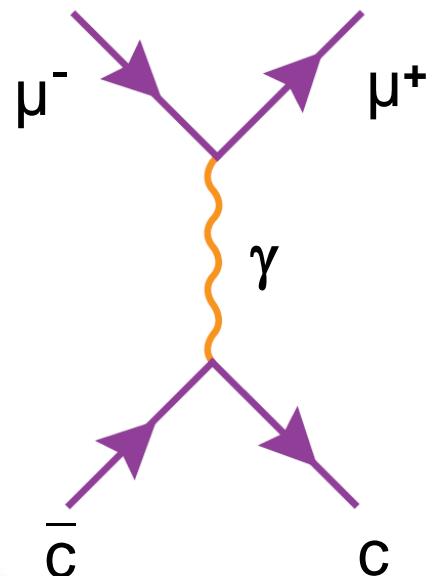
Stanford Positron Electron
Asymmetric Ring

Entdeckung des J

- **BNL-AGS:** hochenergetische 28 GeV Protonen treffen auf Be-Target
Beobachtung Wq.- Maximum bei $p + \text{Be} \rightarrow e^- + e^+ + X$
- Nachweis des J/ Ψ Zerfalls: $e^- e^+$ / $\mu^- \mu^+$ / $q \bar{q}$ Paare
Massenpeak bei $M = 3.1 \text{ GeV}$



Myonischer Zerfallskanal



Sam Ting **丁肇中**
*1936
Nobelpreis 1976

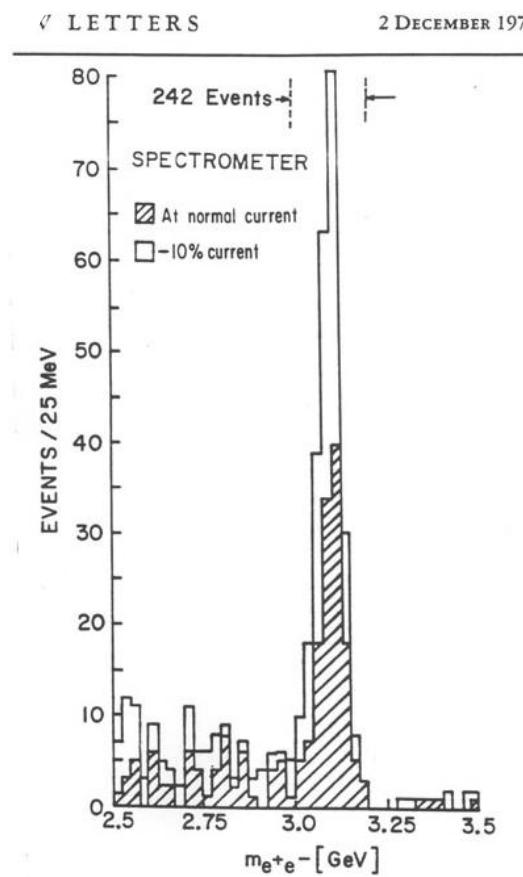


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J/Ψ . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

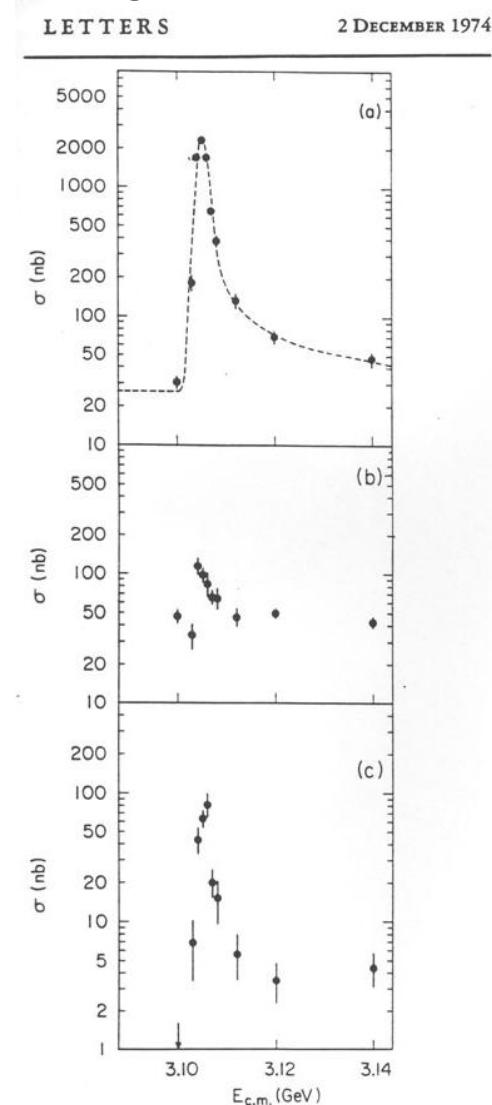
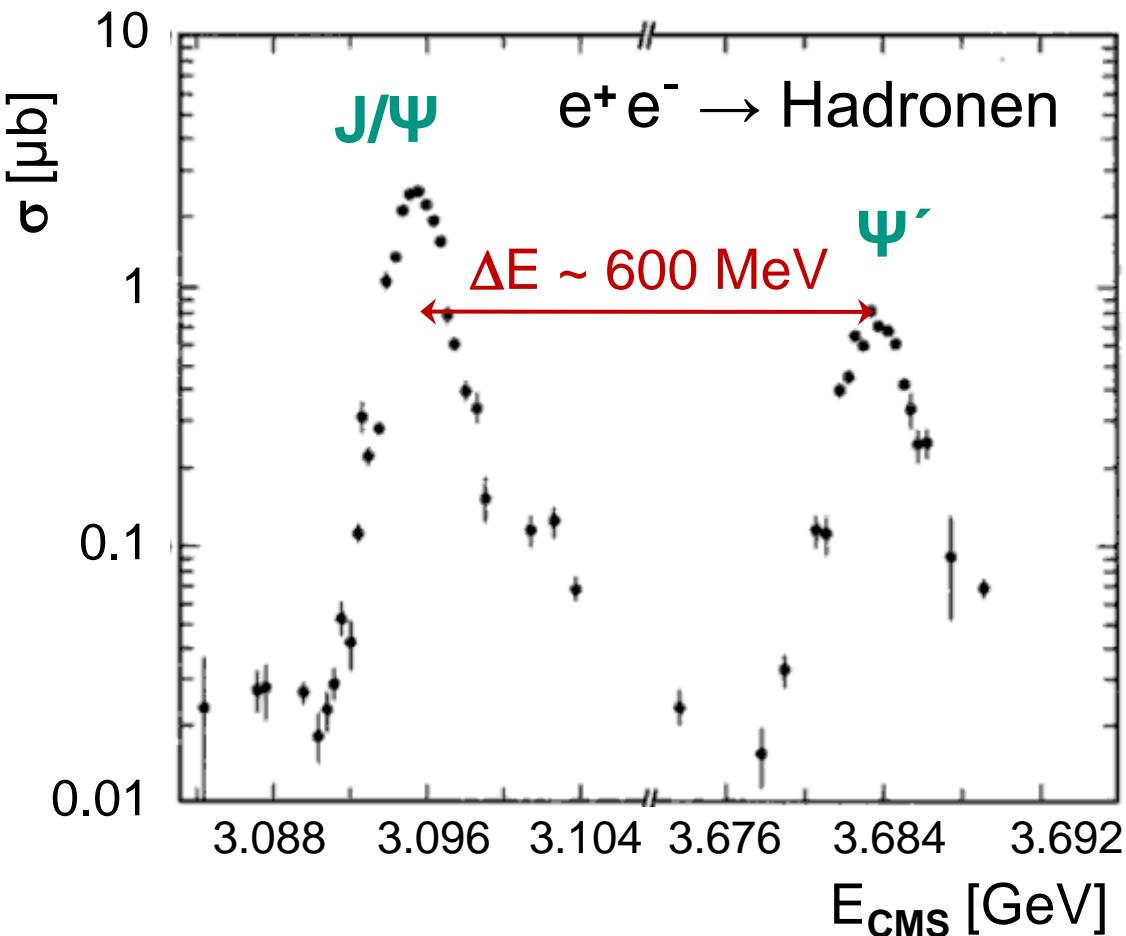


FIG. 1. Cross section versus energy for (a) multi-pion final states, (b) $e^- e^+$ final states, and (c) $\mu^- \mu^+$, π^- , and $K^- K^+$ final states. The curve in (a) is the expected shape of a δ -function resonance folded with the Gaussian energy spread of the beams and including

J/Ψ - Charmonium

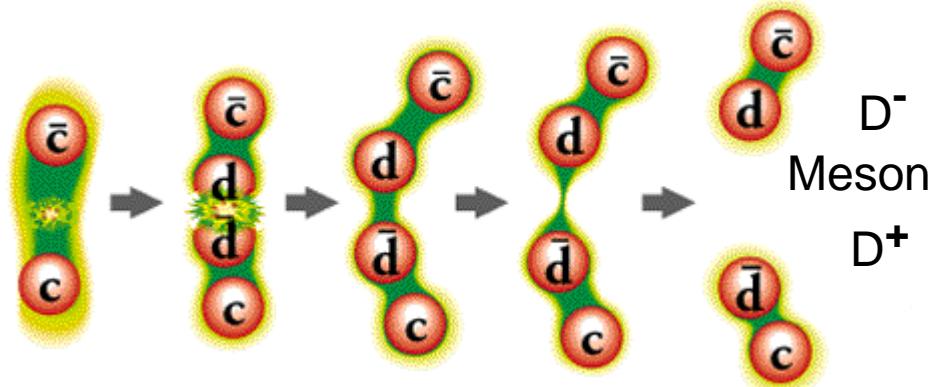
c \bar{c}

- **Novemberrevolution** (11.11.1974): Pressekonferenz B. Richter & S. Ting
- **Mesonresonanz J/Ψ** ist ein gebundenes $q\bar{q}$ System (Quarkonium)
Charm-Quark/Charm-Antiquark: **Charmonium**
 - bei Erzeugung durch virtuelle Photonen ($S=1$) muss $(c\bar{c})$ $S=1$ haben



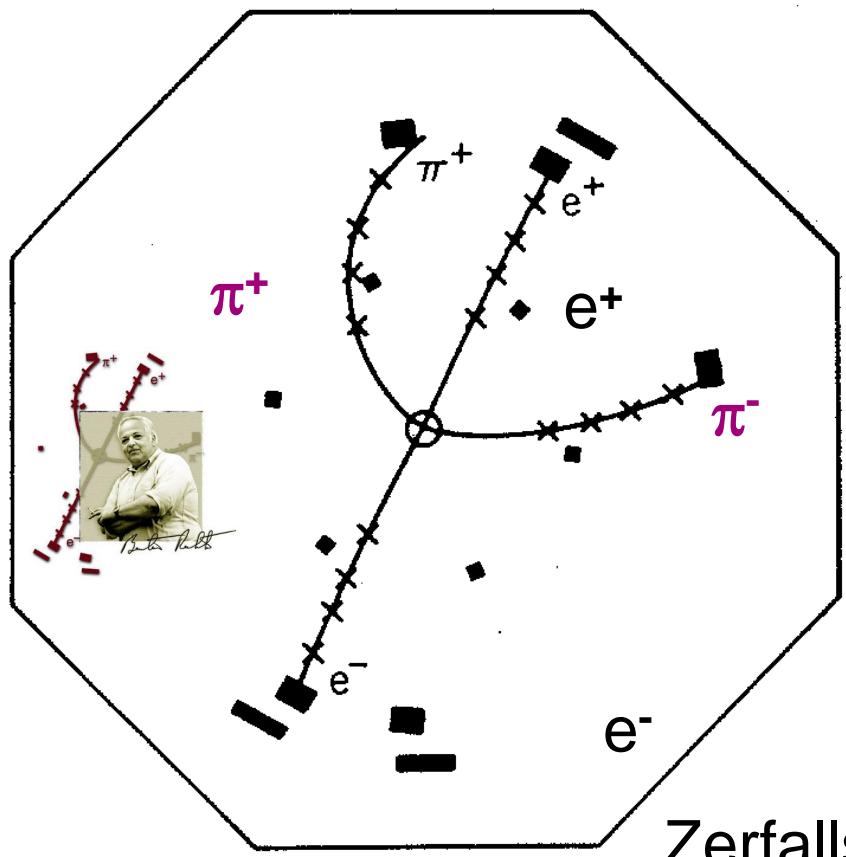
Eigenschaften von J/Ψ	
Masse [MeV]	3096.916 ± 0.011
Lebensdauer τ [s]	$7.2 \cdot 10^{-21}$
Zerfallsbreite Γ [keV]	93.2 ± 2.1

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



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

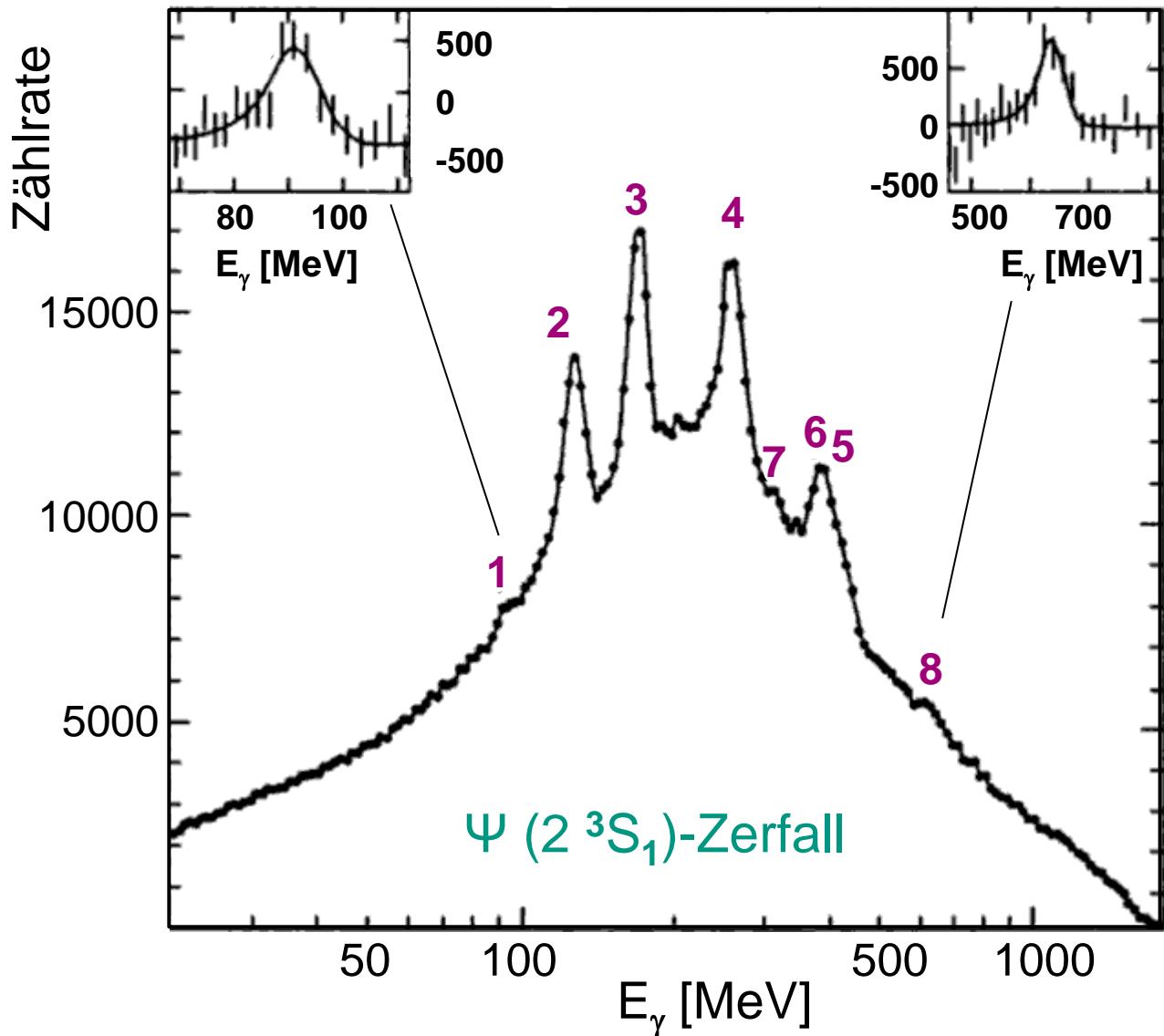
Resonanz	Masse [MeV]	Breite Γ [MeV]
J/ Ψ (1S)	3097	0.087
Ψ (2S)	3686	0.277
Ψ (3770)	3770	24
Ψ (4040)	4040	52
Ψ (4160)	4160	78

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

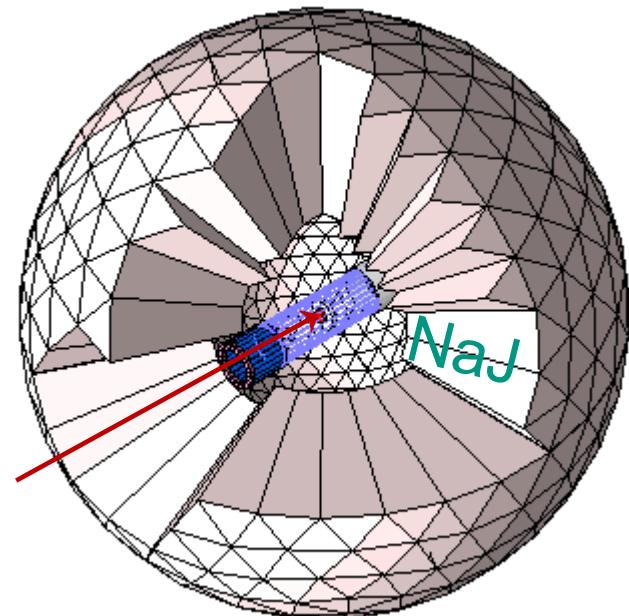
Zerfallssignatur eines Ψ' im MARK I Detektor

Charmonium-Spektroskopie

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

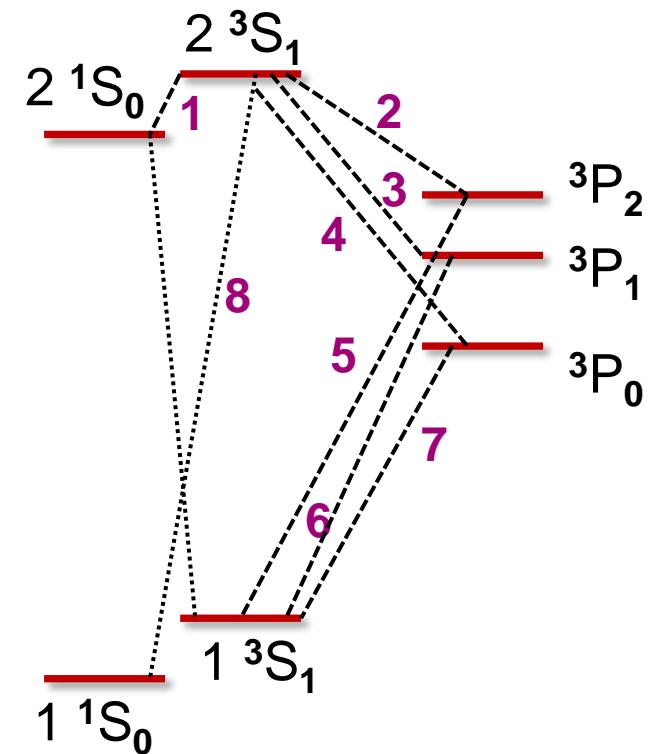
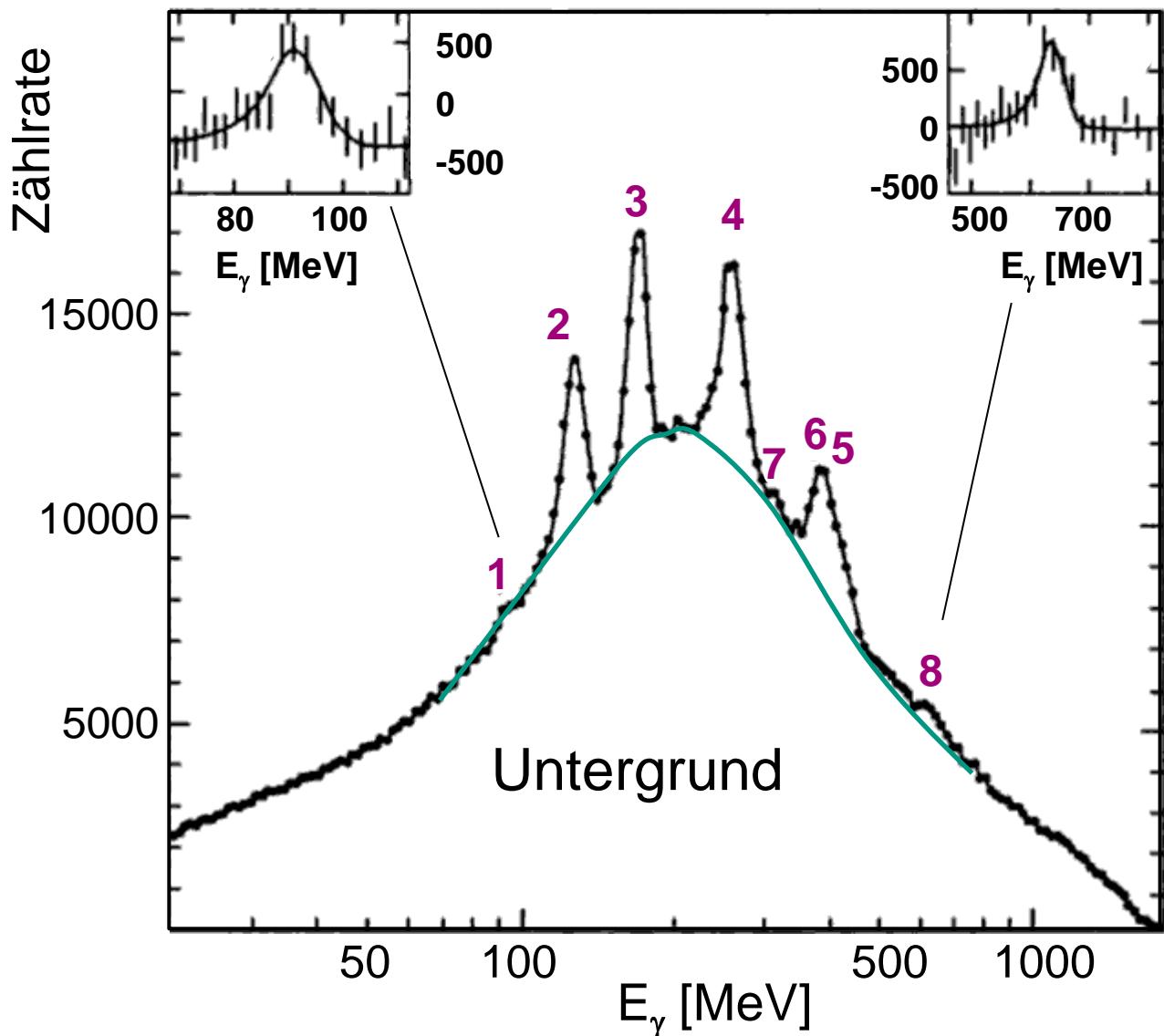


Crystal-Ball
Detektor
am
SPEAR
Ring



Charmonium-Spektroskopie

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



Notation Mesonspektroskopie:

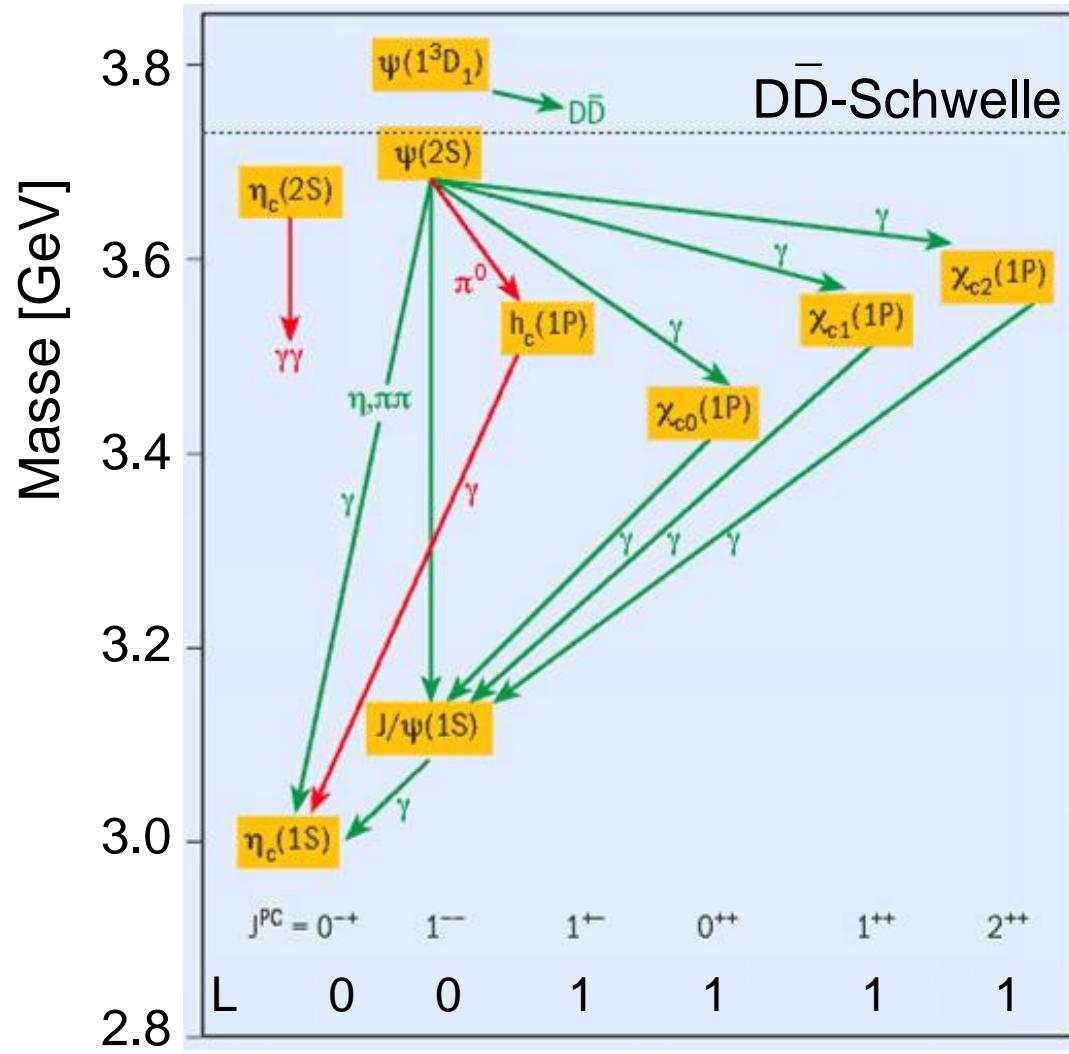
$$n^{2s+1} \ell_J$$

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

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 $e^- e^+$!)

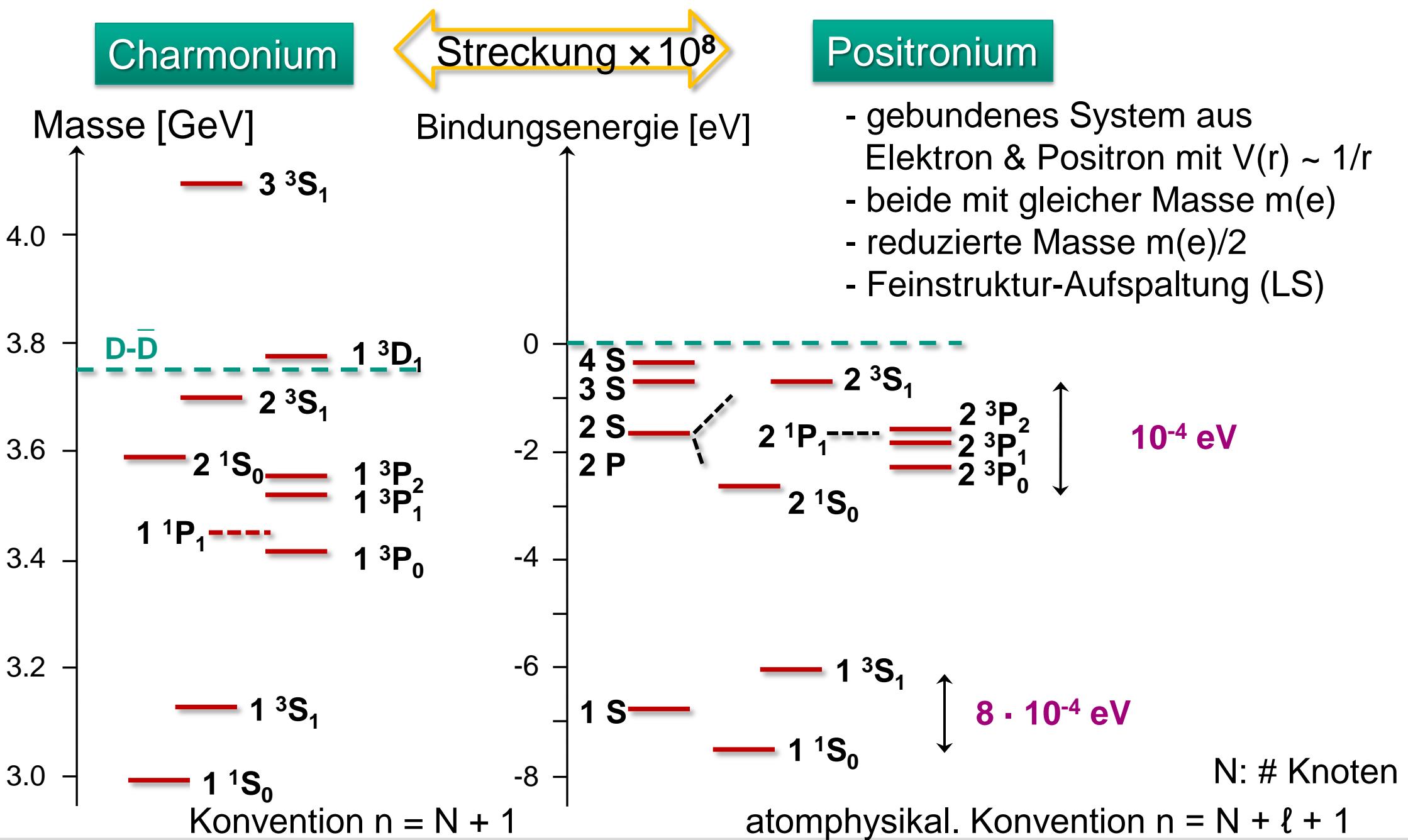


- **nichtrelativistische Bindungs-Zustände (cc):**
 - schwere c-Quark Masse
 - Relation Anregungsenergie $M(\Psi)$ zur Ruheenergie $M(J/\Psi)$

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

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

Termeschemata: Charmonium – Positronium



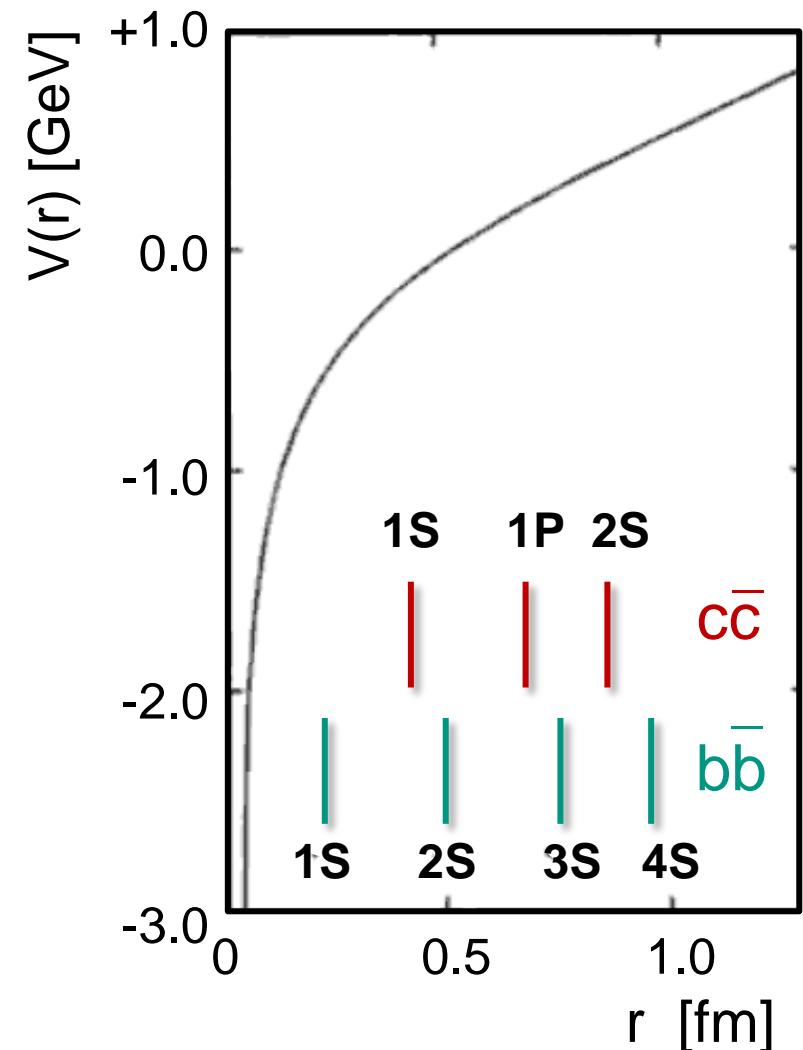
Charmonium & QCD Potenzial

■ 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

