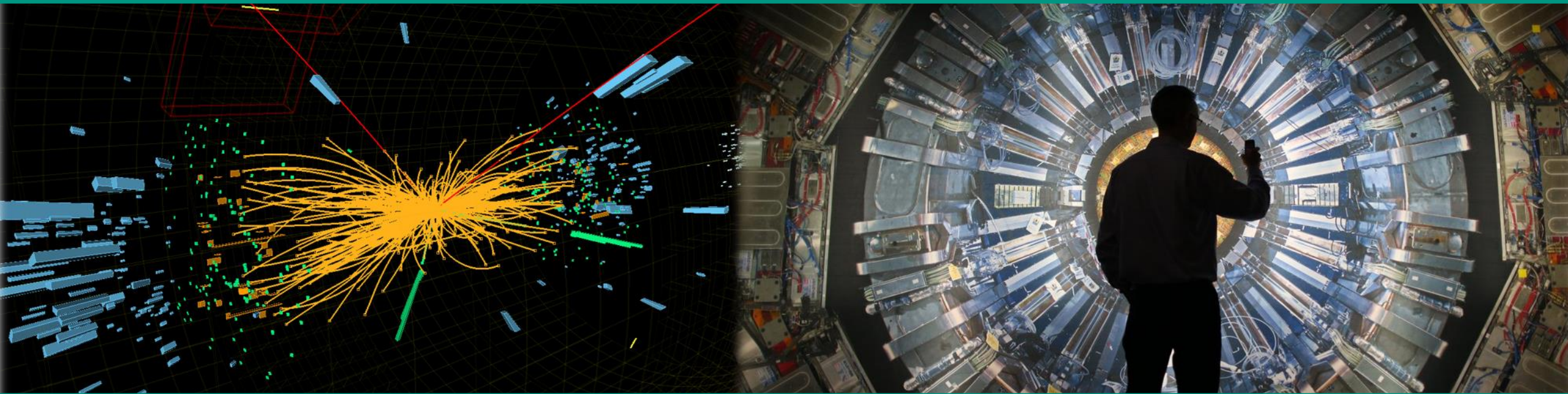


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 14

15.6.2023



Recap: CP – Verletzung & $SUSY$

■ Verletzung von CP im System der neutralen Kaonen

- CP – Verletzung auf Level $\varepsilon = 0,2 \%$ bei seltenem Zerfall $K_L \rightarrow 2\pi$
- indirekte CP – Verletzung über Mischung $K^0 \Leftrightarrow \bar{K}^0$, direkt: $\varepsilon = 10^{-6}$
- CP – Verletzung mit größerer Amplitude im System $B^0 \Leftrightarrow \bar{B}^0$

■ Grundlagen der Supersymmetrie ($SUSY$)

- Erweiterung der SM – Teilchen um Superpartner (Bosonen $\leftrightarrow$ Fermionen)
- $SUSY$ – $WIMP$: Kandidat für ‘Kalte Dunkle Materie’

■ Isospin-Symmetrie der u, d Quarks (erste Flavour – Symmetrie)

- starker Isospin I : Multiplette entsprechend Quark-Substruktur $q\bar{q}$ qqq

Aktuell: P – Verletzung & unser Universum

■ P – verletzende Prozesse im frühen Universum & heutige Galaxien-Struktur



ASTRONOMY AND SPACE | RESEARCH UPDATE

Symmetry breaking in 'galactic tetrahedrons' linked to parity violation

13 Jun 2023

AKTUELL

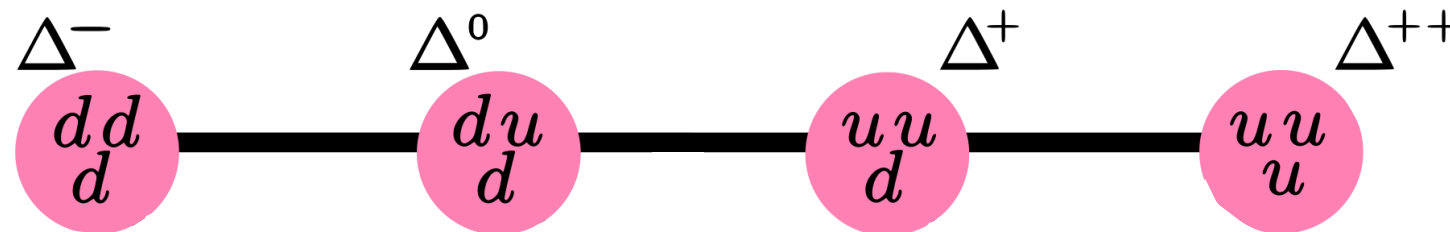


Parity violation: image of galaxies taken by the James Webb Space Telescope. Astronomers have found evidence that parity violation in the early universe affects the distribution of galaxies today. (Courtesy: NASA/ESA/CSA/JWST)

Isospin – Symmetrie: Multiplette

■ Multiplett-Struktur bei Mesonen und Baryonen mit u, d Quarks

- 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 $I = 3/2$ ($\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$)
- } $2I + 1$
Zustände



Q: wikicommons

Isospin – Symmetrie und Wechselwirkungen

■ Vertauschungsrelationen: Operatoren, **Eigenwerte**

$$[I_1, I_2] = i \cdot I_3 \quad \vec{I}^2 [I, I_3] = I \cdot (I + 1) [I, I_3]$$

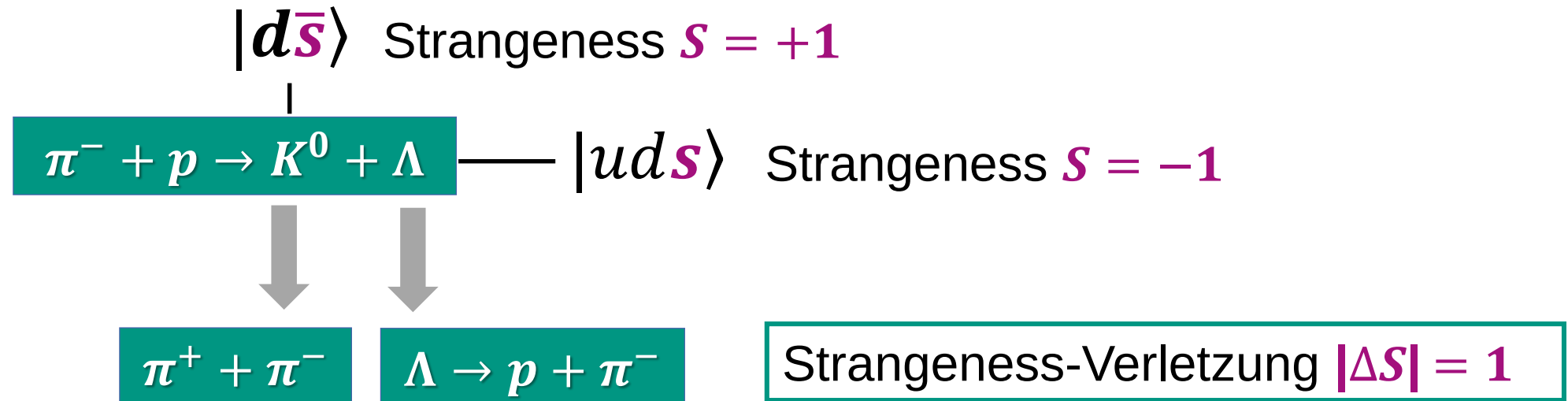
■ starker Isospin und Wechselwirkungen

- **starke** Wechselwirkung:
invariant unter **Rotationen im Isospinraum**: **Erhaltung** von **I** und **I_3**
- **elektromagnetische** Wechselwirkung
Erhaltung von **I** , **Verletzung** von **I_3** (**Ladung**)
- **schwache** Wechselwirkung : **Verletzung** von **I** und **I_3**

Recap: Strangeness S

■ Erzeugung von Baryonen & Mesonen mit Strangeness

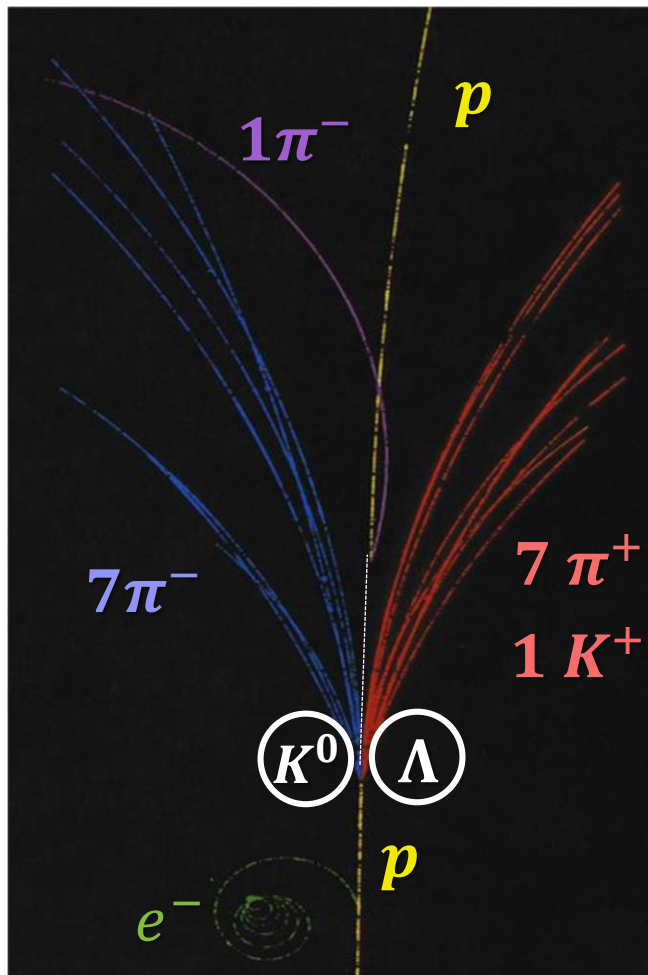
- *starke Wechselwirkung* ist **Strangeness** - erhaltend



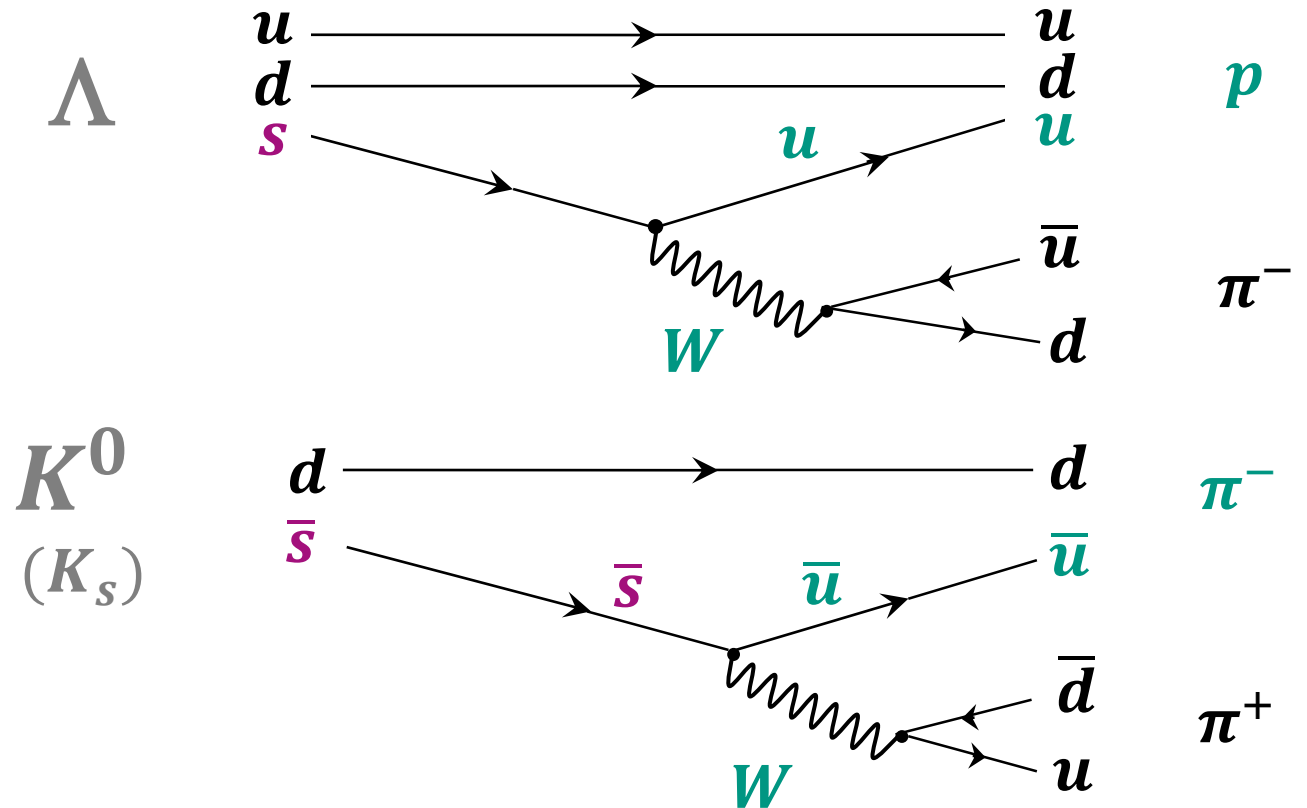
- *schwache Wechselwirkung*: $\tau \approx 100 \text{ ps}$ bei Zerfall von K^0 , Λ

Strangeness S : 'langsamer' Zerfall $s \rightarrow u \quad \bar{s} \rightarrow \bar{u}$

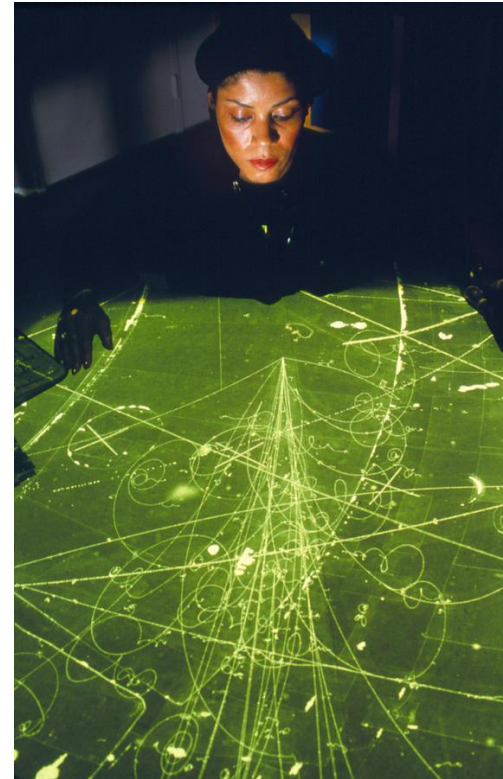
■ assoziierte Strangeness-Produktion & Zerfall von Λ und K^0



'lange'
Lebens-
dauern
 $\tau > 10^{-10} \text{ s}$



Aufnahme: 80 – *inch* Blasenkammer am *BNL**



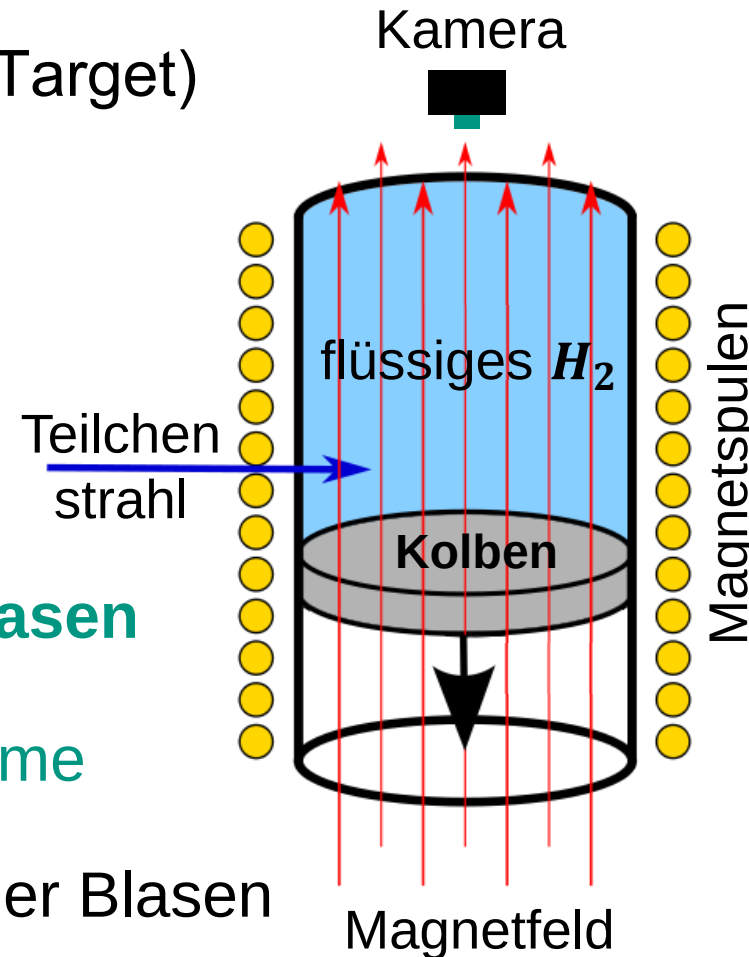
EINSCHUB: BLASEN- KAMMER & TEILCHEN- SPUREN



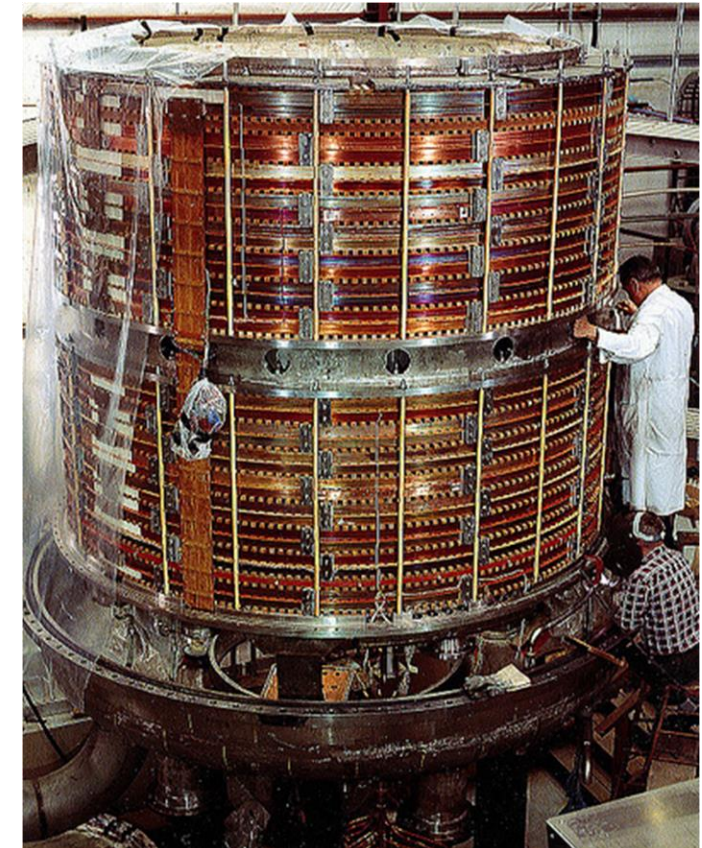
Strangeness S : Beobachtung in Blasenkammer

■ Blasenkammer: das Arbeitspferd der Teilchenphysik in 1960/70 – ern

- gefüllt mit flüssigem H_2 , D_2 (Target)
- vor Teilcheninjektion: starke **Druckverminderung**, T ist oberhalb des Siedepunkts
- ionisierende Teilchen-spuren als **Keime für Gasblasen**
- nach **10 ms**: **Blitzlichtaufnahme**
- **Druckerhöhung**: Auflösen der Blasen



Blasenkammer am **BNL**

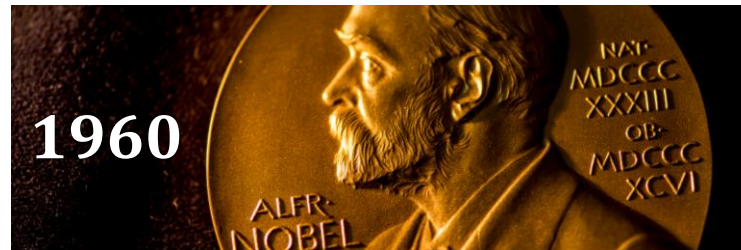


Q: wikipedia, BNL

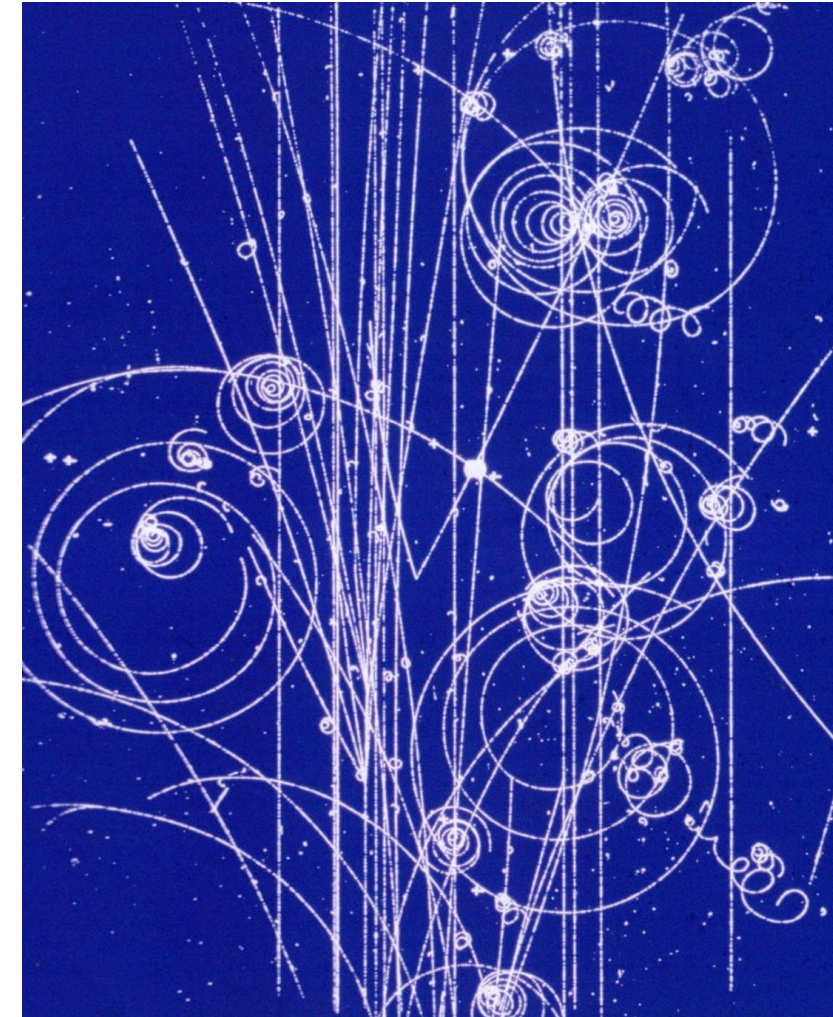
Strangeness S : Beobachtung in Blasenkammer

■ Blasenkammer: Erfinder und Nachweisprinzip

- Kammer mit H_2 oder D_2 dient gleichzeitig als **Target** & als **Nachweismedium** ('fully active')
- *D. Glaser*: frühe Prototypexperimente mit Bier
(Bier-Bläschen aber **nicht** die Inspiration!)



*"for the invention of the
bubble chamber"*



Donald Glaser 1926 – 2013

Q: nobelprize, ledroit, CERN

Einführung Hyperladung Y für Symmetrie $SU(3)$

- (zunächst) empirische Relation zwischen Ladung Q , Baryonenzahl B und Strangeness S (für Hadronen)

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

B = Baryonenzahl
 S = Strangeness

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

Y = Hyperladung = $B + S$

- heute erklärt durch Quarkinhalt u, d, s der Hadronen

- erweitert auf alle Flavour-Zustände von Quarks

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

Baryonenzahl

Bottom-
Flavourquantenzahl

Gell-Mann Nishijima Formel: Grundlage $SU(3)$

- Hyperladung Y wichtig für **Flavour-Symmetrien** mit den 3 Quarks u, d, s :
Multiplette in der $SU(3)$ Symmetriegruppe mit Parametern I_3 und Y

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

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

$$Y = \text{Hyperladung} = B + S$$

- erhalten in starker Wechselwirkung
- verletzt in der schwachen Wechselwirkung



Murray
Gell-Mann



Kazuhiko
Nishijima

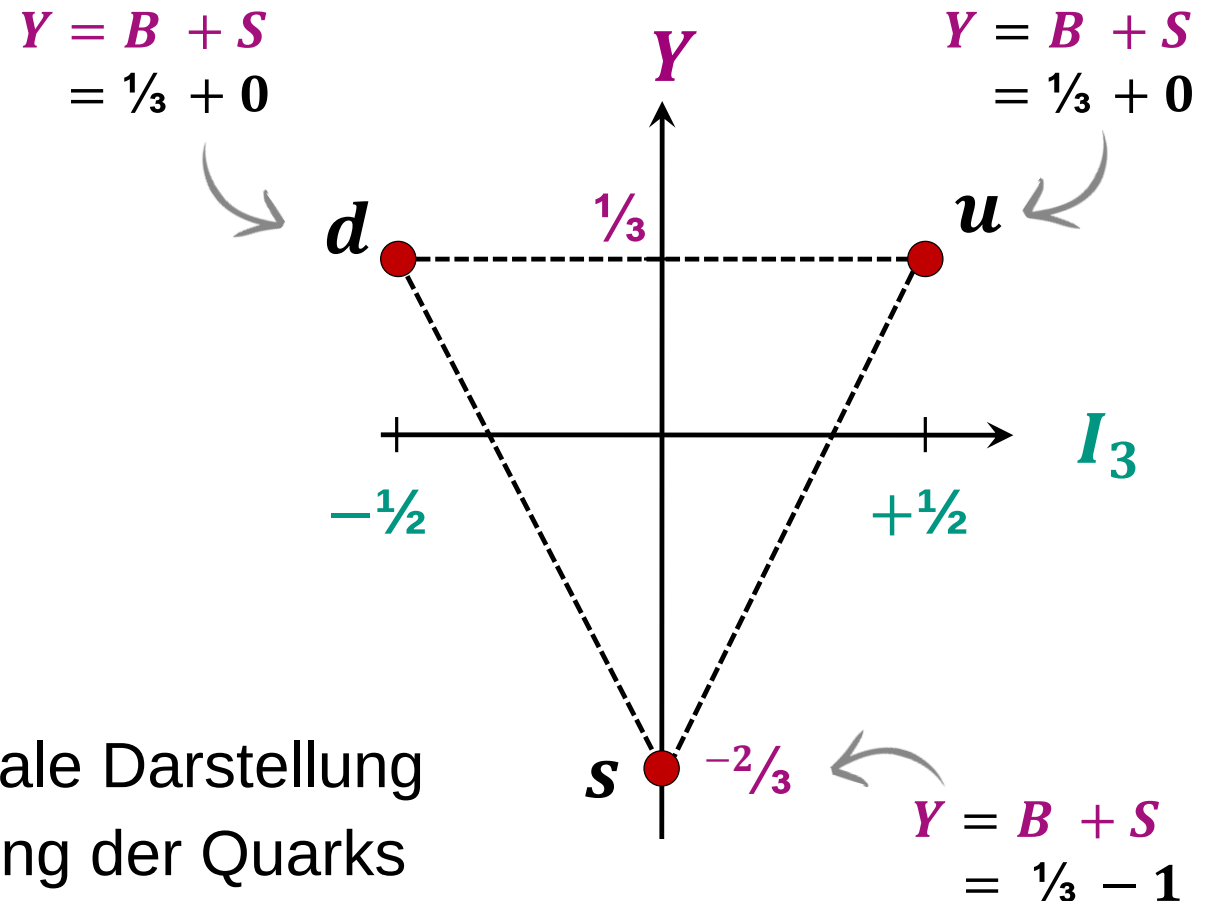
Flavour-Symmetrie $SU(3)$ für 3 Quarks u, d, s

■ Erweiterung der Isospinsymmetrie auf eine Flavour-Symmetrie

- $SU(3)$ – Gruppe:
(u, d, s) Quarks mit additiven
Quantenzahlen
- Isospin I_3
- Hyperladung Y ($= B + S$):

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

$SU(3)$: fundamentale Darstellung
& Zuordnung der Quarks



■ Erweiterung der Isospinsymmetrie auf eine **Flavour-Symmetrie**

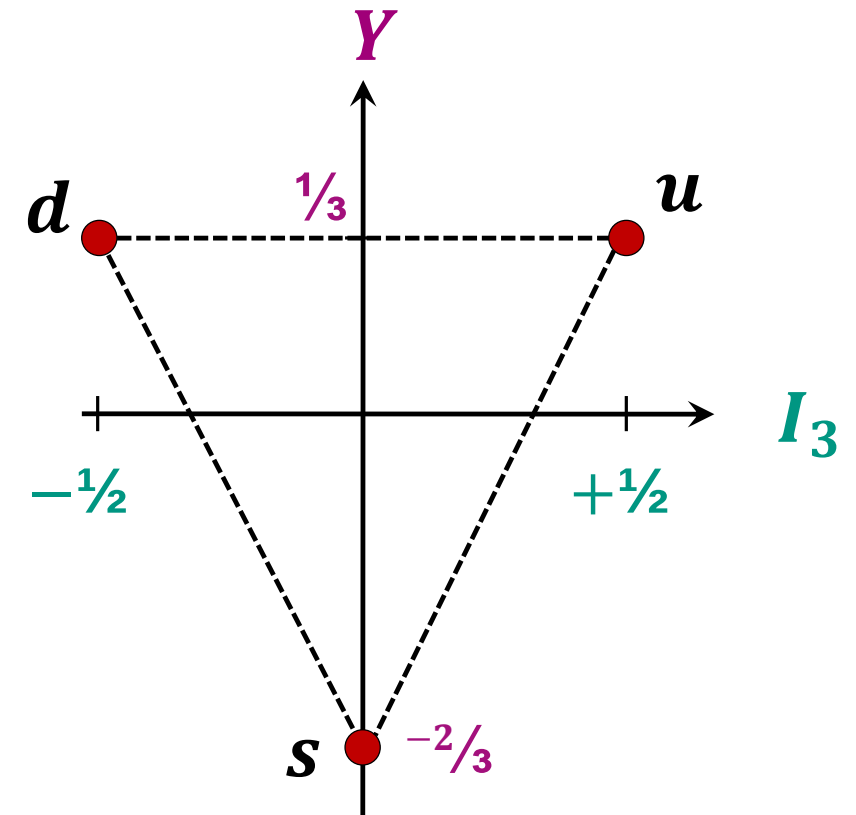
- **$SU(3)$ – Gruppe:**

↖ **Nonett** (9 Zustände) aus
gruppentheoretischen Überlegungen

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

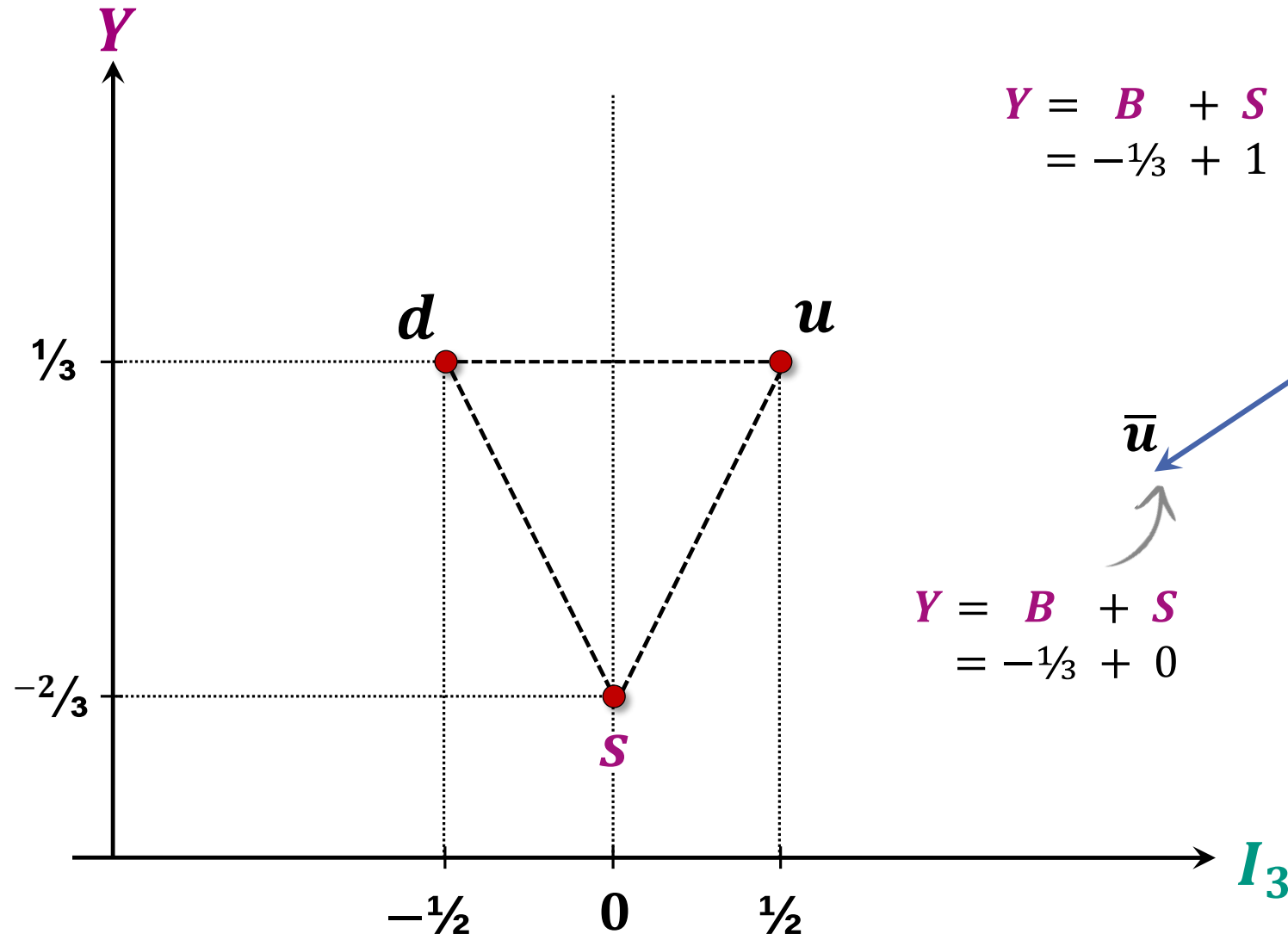
↓
 $SU(3)$ Singulett

↓
 $SU(3)$ Oktett
8 Zustände



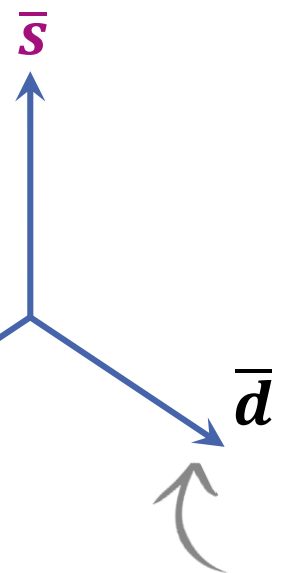
Mesonen: Flavour – Oktett & – Singulett

- Mesonen
mit Isospin (I_3)
und Hyper-
ladung (Y):



$$Y = B + S$$

$$= -1/3 + 1$$



$$Y = B + S$$

$$= -1/3 + 0$$

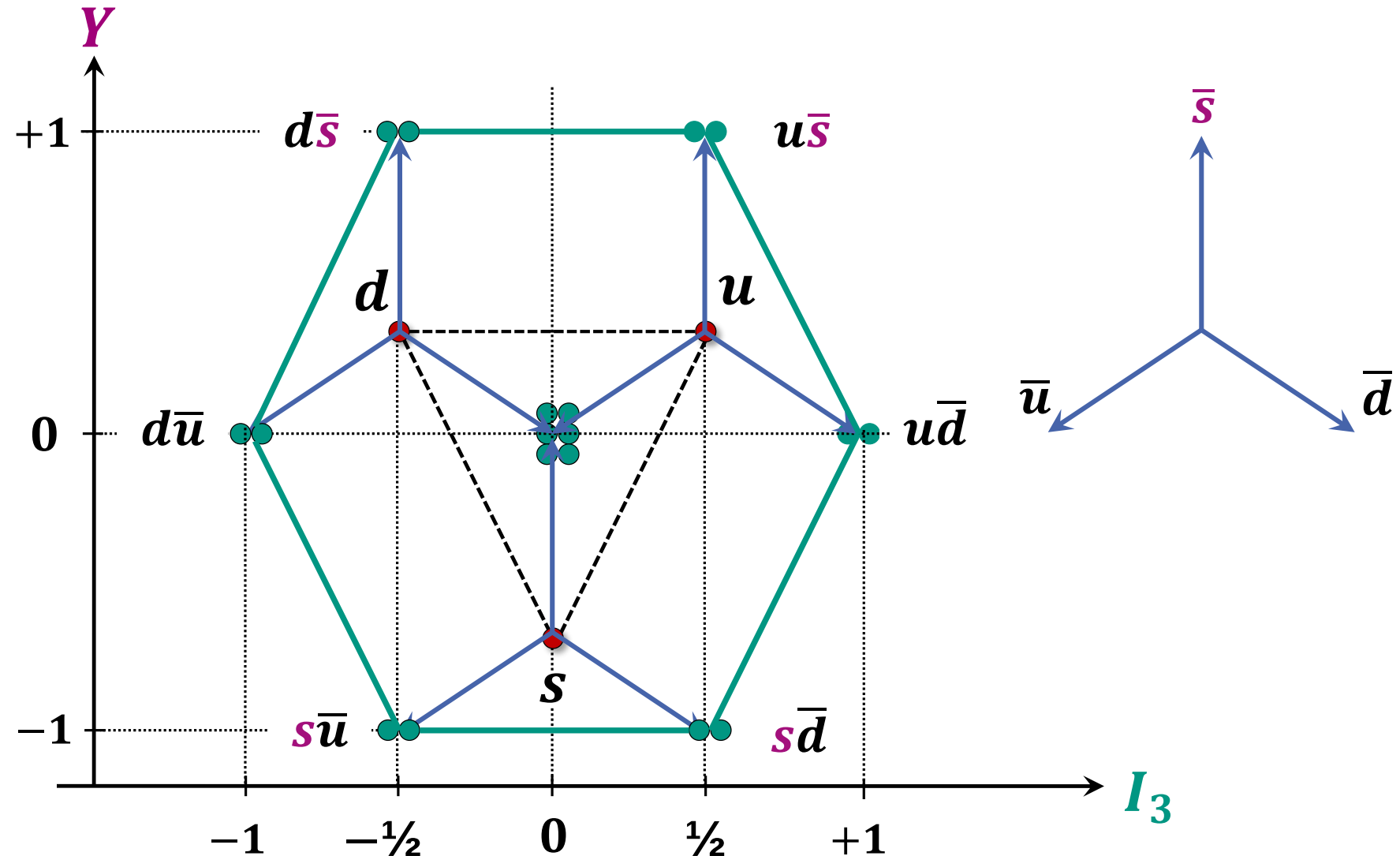
$$Y = B + S$$

$$= -1/3 + 0$$

Mesonen: Flavour – Oktett & – Singulett

- Mesonen
mit Isospin (I_3)
und Hyper-
ladung (Y):

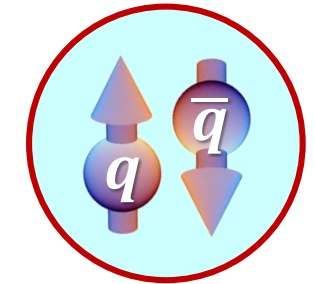
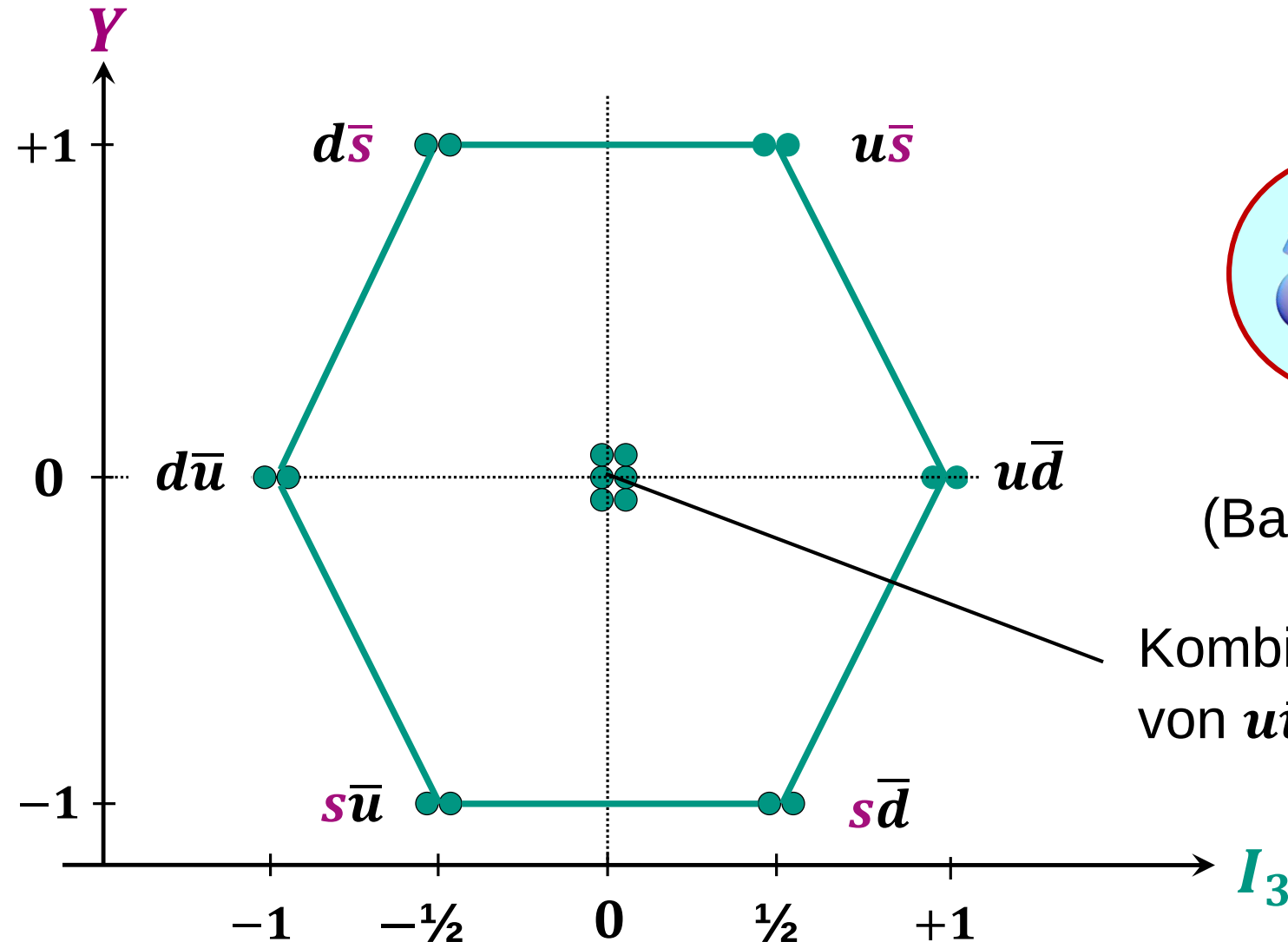
Quark/Antiquark
Zustände



Mesonen: Flavour – Oktett & – Singulett

- Mesonen
mit Isospin (I_3)
und Hyper-
ladung (Y):

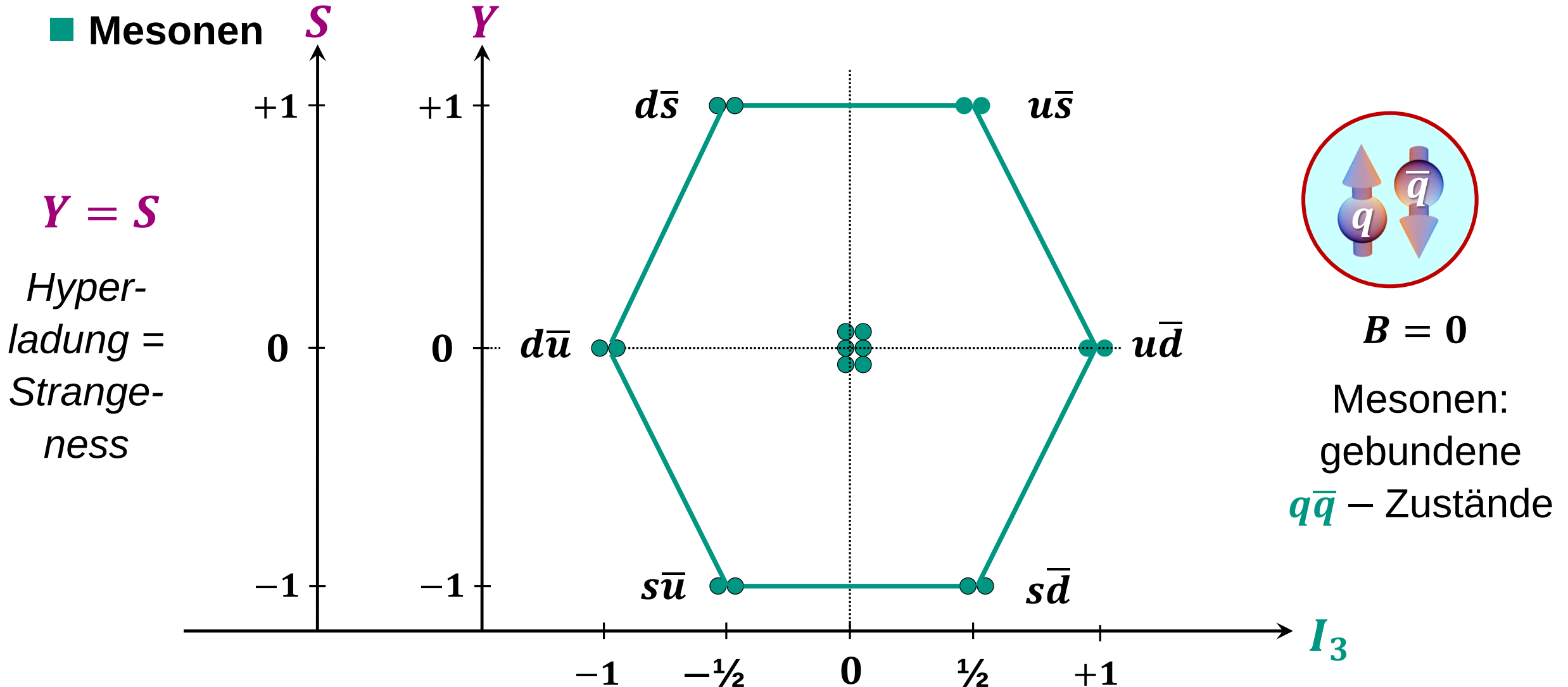
Quark/Antiquark
Zustände



$B = 0$
(Baryonenzahl)

Kombinationen
von $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$

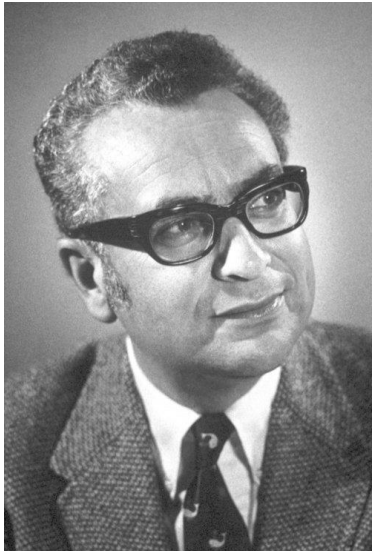
Mesonen: Flavour – Oktett & – Singulett



Theorie als 'the Eightfold Way'

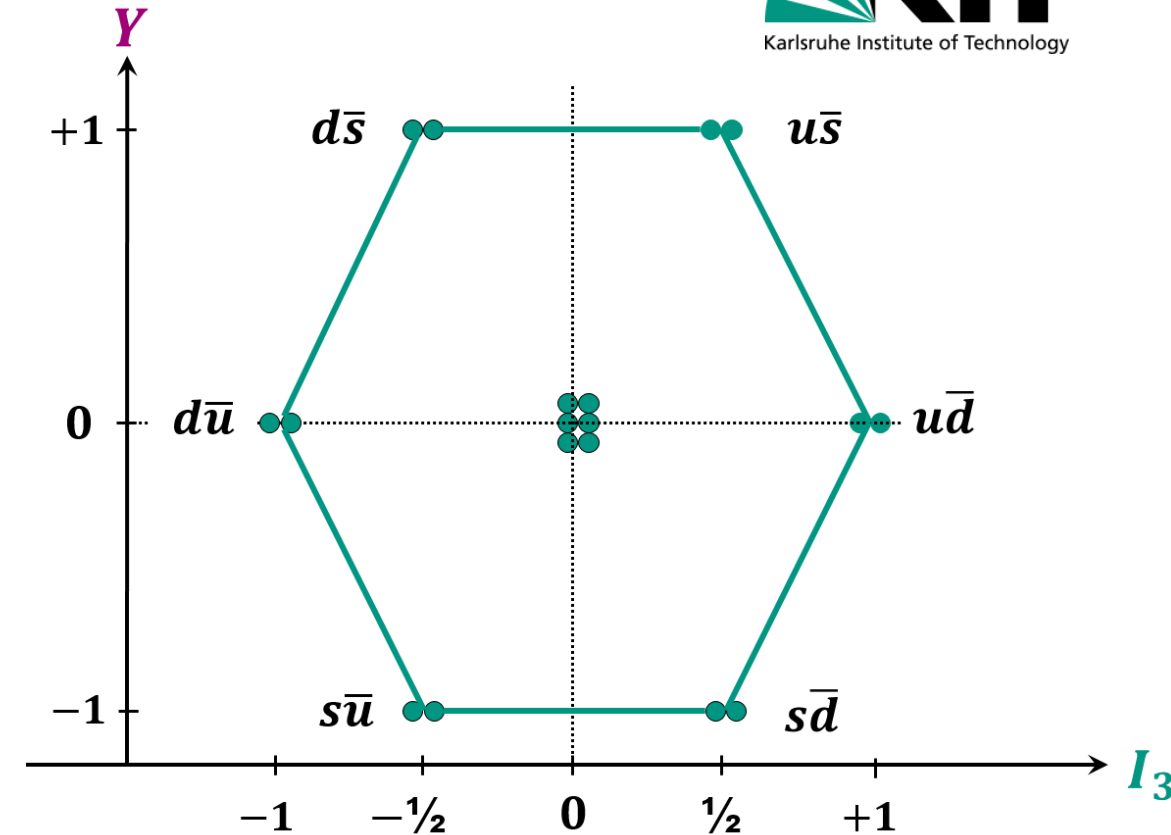
■ Ordnungsprinzip: $SU(3)$ – Symmetrie

- M. Gell-Mann & Y. Ne'eman, ab 1961
- $SU(3)$ – Symmetrie mit einem **Mesonen-Oktett** aus (damals noch hypothetischen) u , d , s Quarks



*"for his contributions and discoveries concerning the **classification of elementary particles** and their interactions."*

Murray Gell-Mann



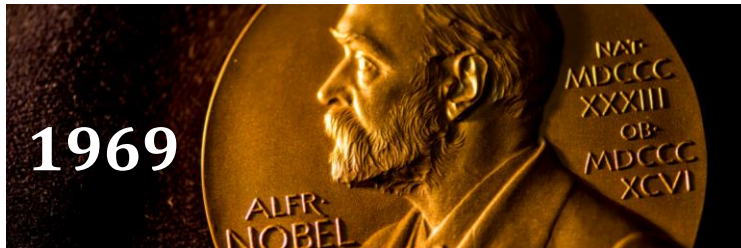
→ Hexagone

Q: nobelprize, wiki commons

Theorie als 'the Eightfold Way' **

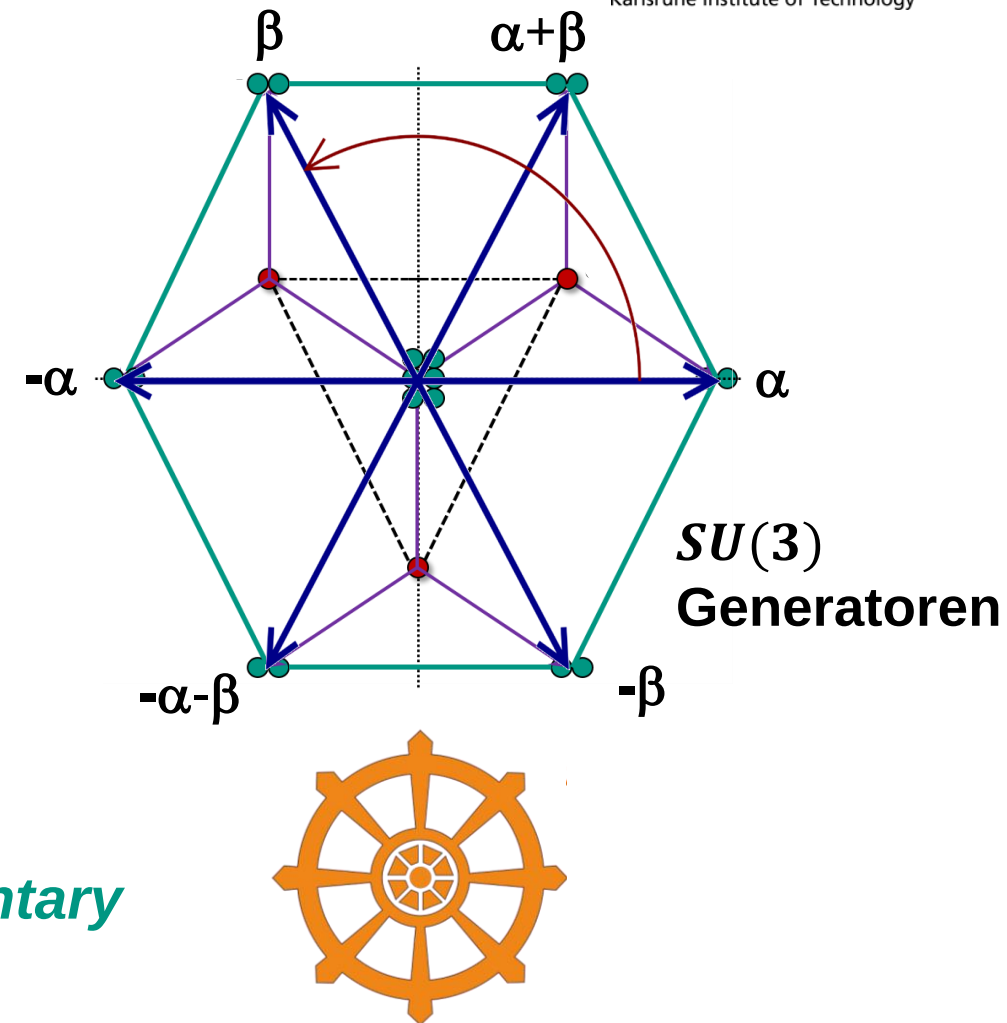
■ Ordnungsprinzip: $SU(3)$ – Symmetrie

- M. Gell-Mann & Y. Ne'eman, ab 1961
- $SU(3)$ – Symmetrie mit einem **Mesonen-Oktett** aus (damals noch hypothetischen) u , d , s Quarks *



*"for his contributions and discoveries concerning the **classification of elementary particles** and their interactions."*

Murray Gell-Mann

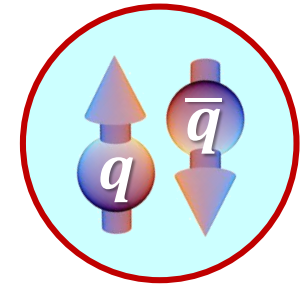
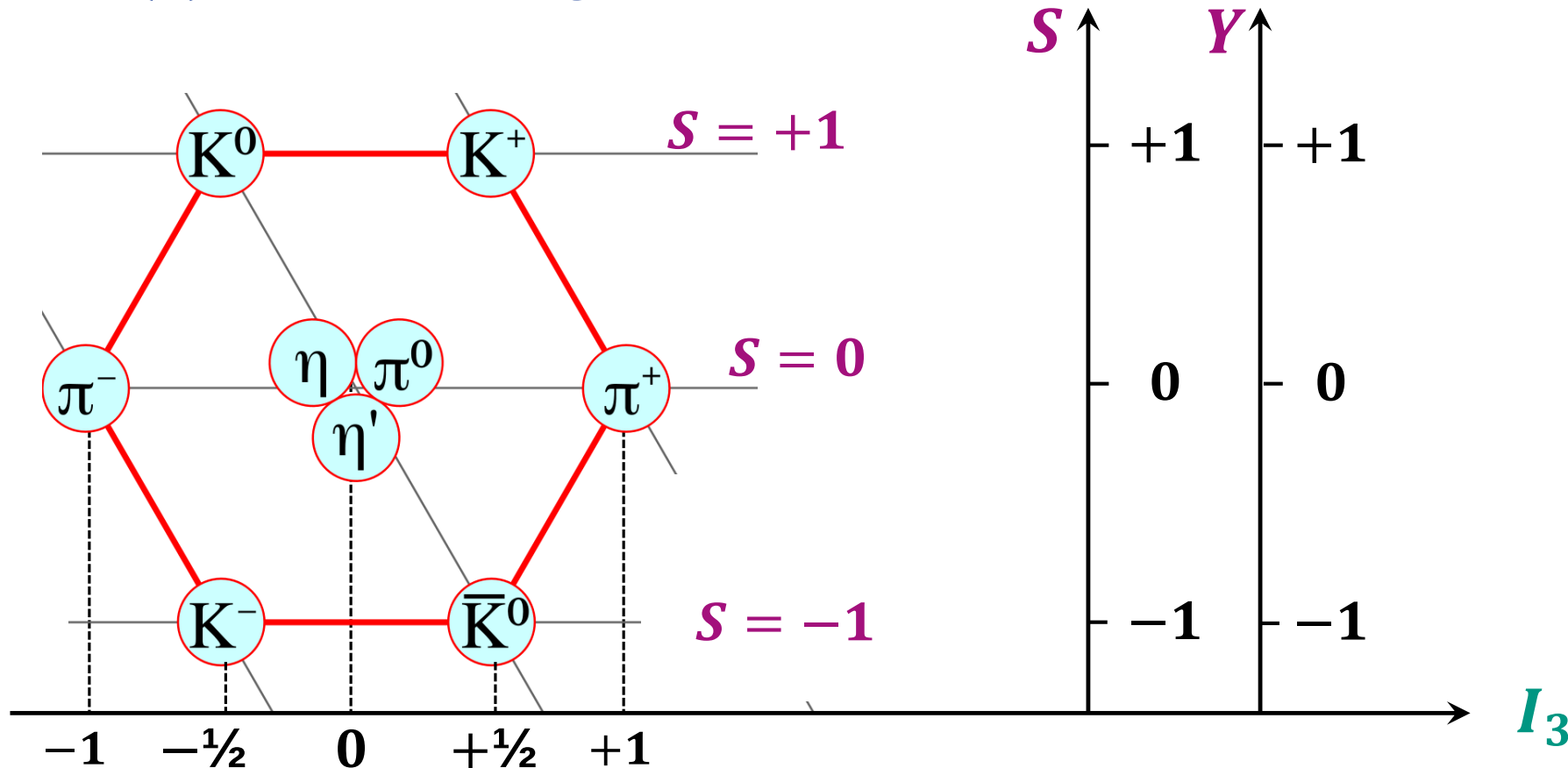


**Noble Eightfold Path (Buddhismus)

Nonett der pseudoskalaren Mesonen mit $S = 0$

■ Isomultipllett der pseudoskalaren Mesonen

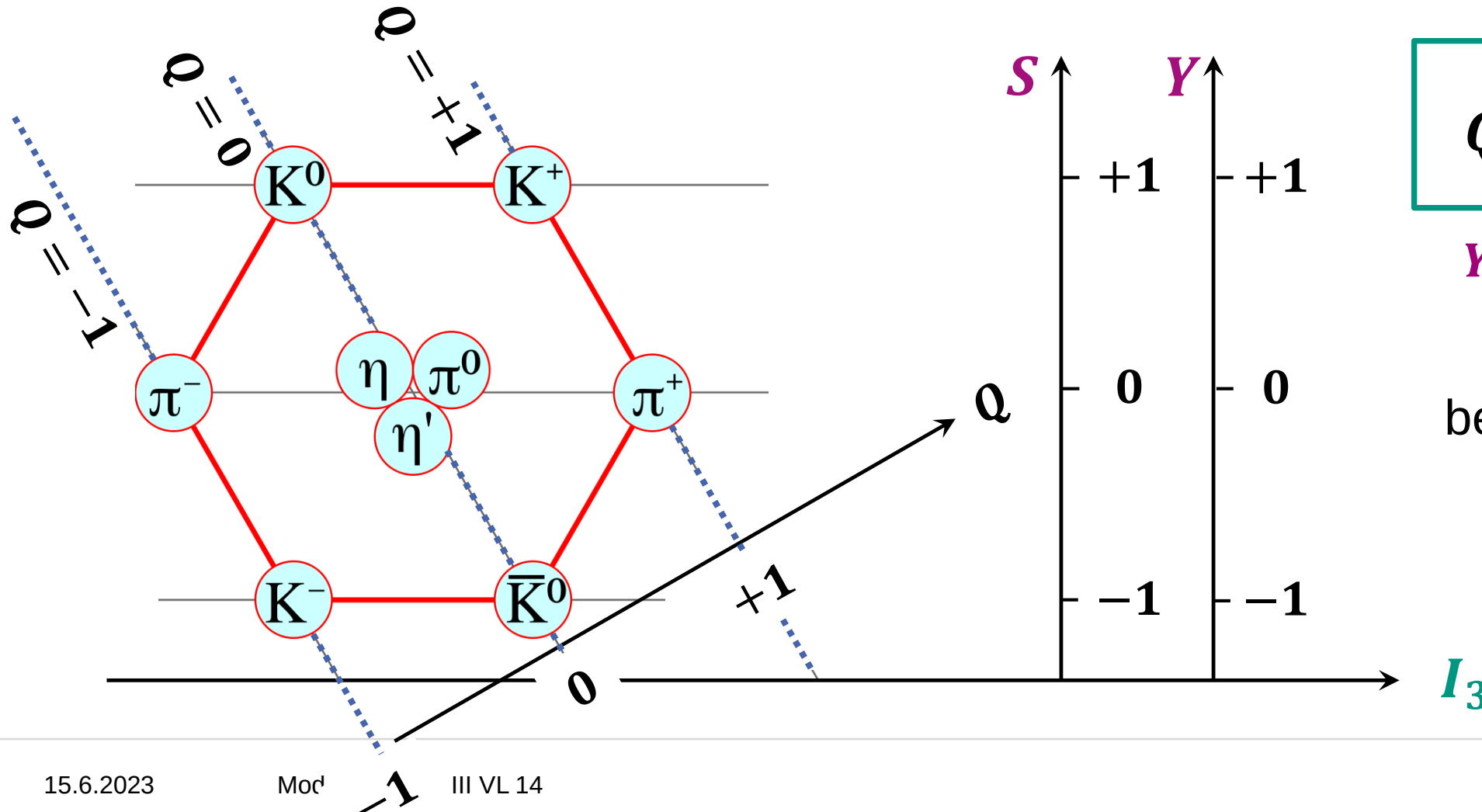
- $SU(3)$: Oktett & Singulett



$S = 0$
(Spin)

Nonett der pseudoskalaren Mesonen mit $S = 0$

■ Isomultipllett der pseudoskalaren Mesonen



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

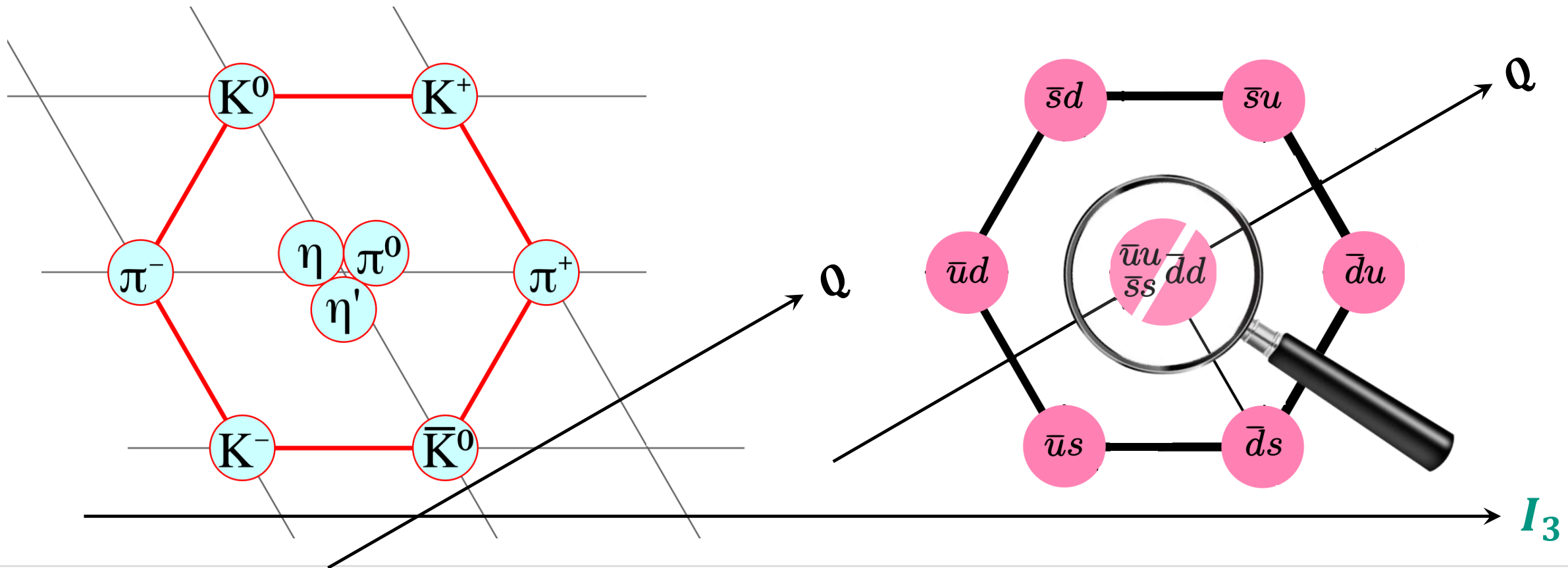
Y = Hyperladung
= $B + S$

bei Mesonen ($q\bar{q}$)
 $B = 0$, daher
 $Y = S$

Quarkinhalt der pseudoskalaren Mesonen

■ $SU(3)$ – Flavour-Symmetrie der drei Quarks *up*, *down*, *strange*

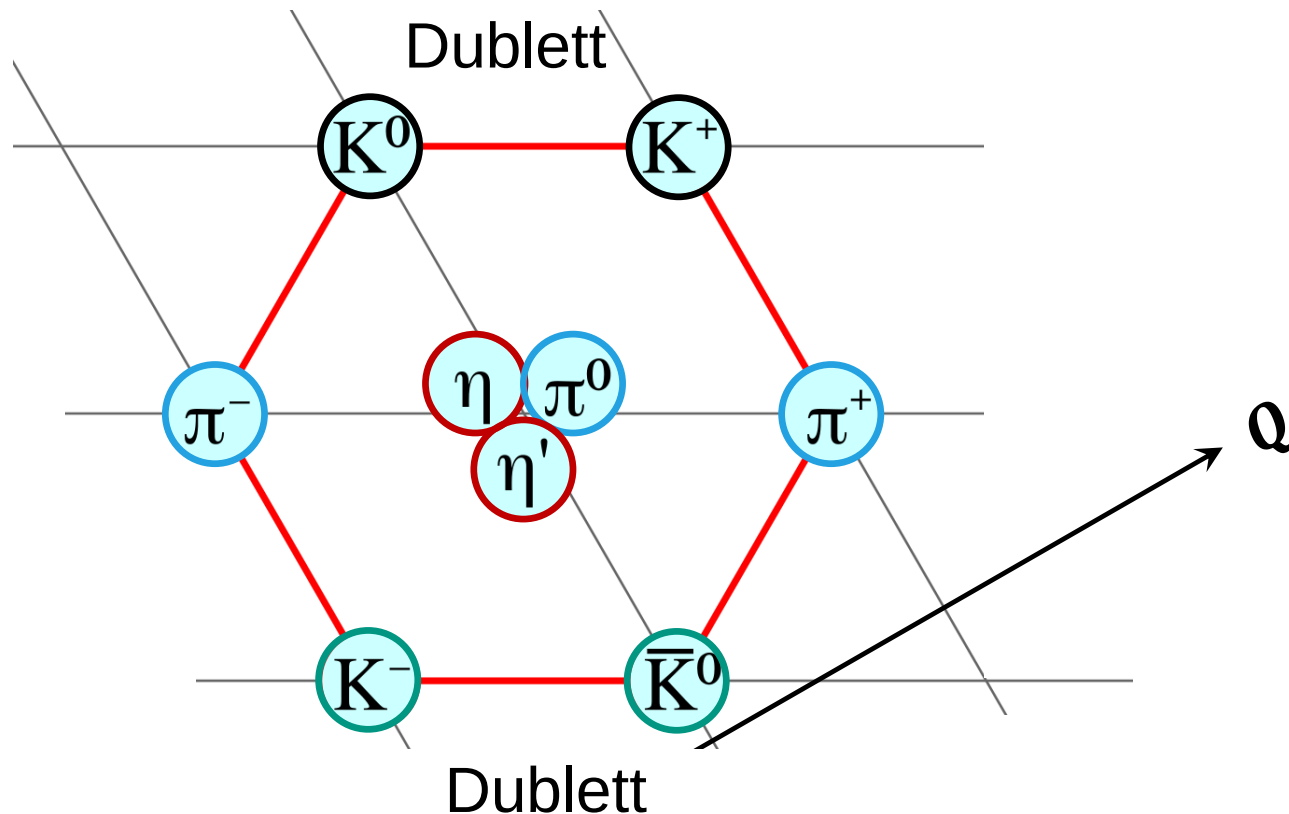
- im 'Zentrum' bei $S = 0$, $I_3 = 0$ & $Q = 0$: interessante Quark-Konfiguration



$SU(3)$ – Symmetrie von pseudoskalaren Mesonen

■ $SU(3)$ – Flavour-Symmetrie der drei Quarks *up, down, strange*

- Aufteilung in ein **Oktett** und **Singulett** bezüglich $SU(3)$



■ $SU(3)$ – Flavour–Oktett

1 Singulett (η)

2 Dubletts (K^0, K^+) & ($K^-, \bar{K}^0$)

1 Triplett (π^+, π^0, π^-)

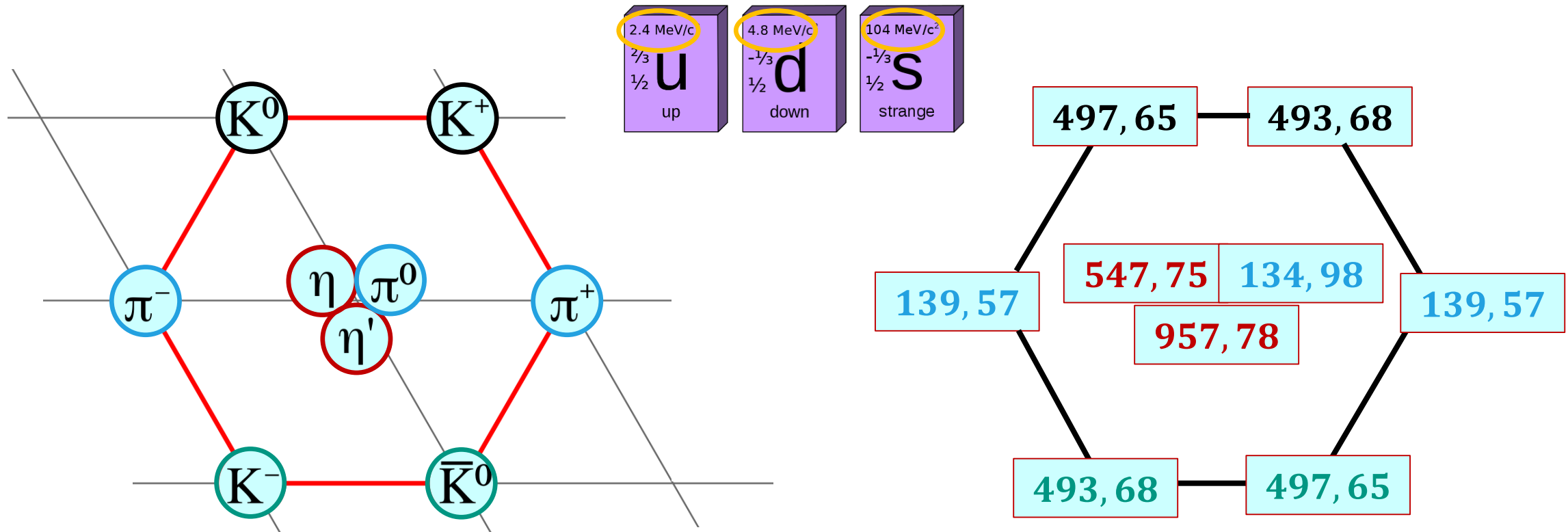
■ $SU(3)$ – Flavour–Singulett

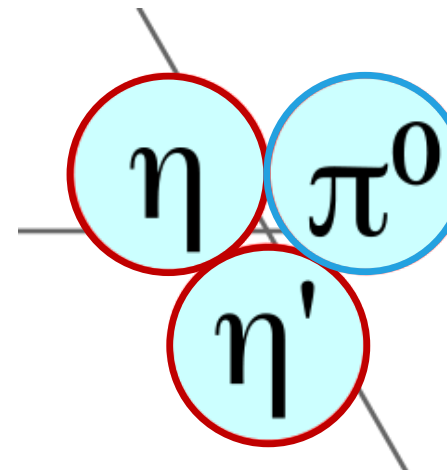
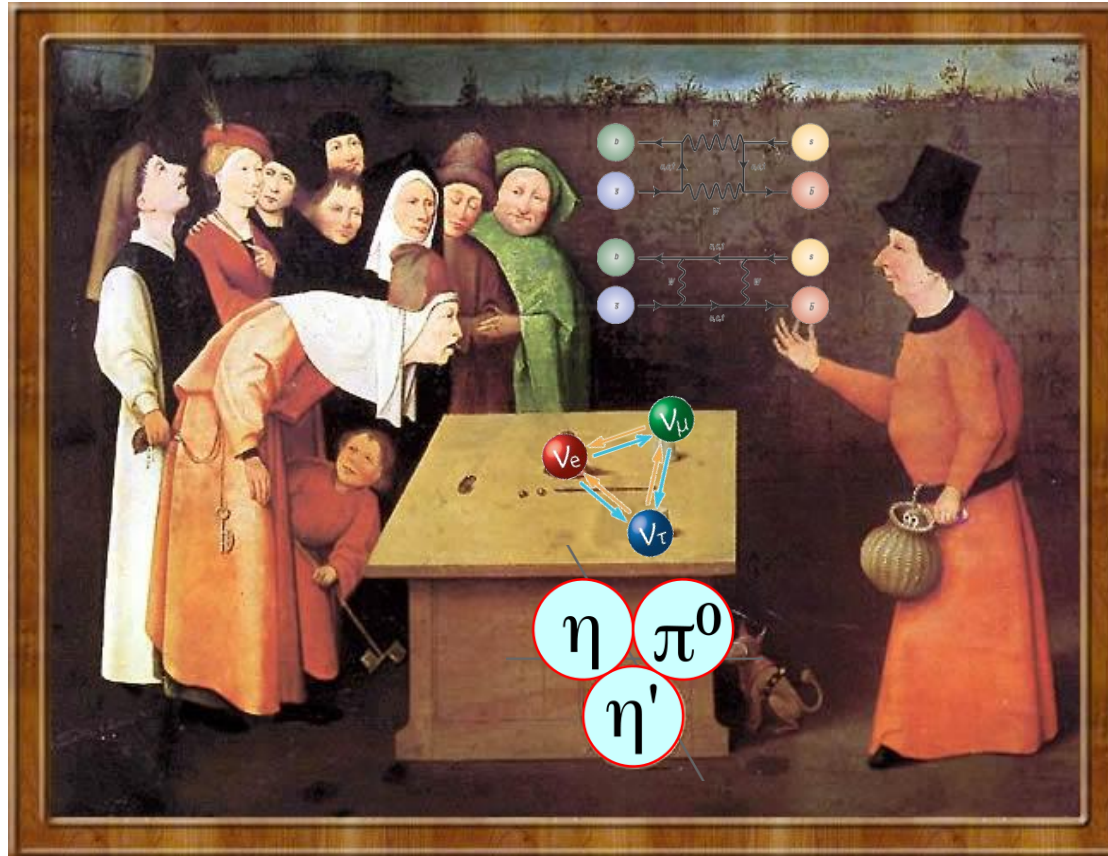
1 Singulett (η')

$SU(3)$ – Symmetrie gebrochen via Quark-Massen

■ $SU(3)$ – Flavour-Symmetrie durch die Massen der Quarks u, d, s gebrochen

⇒ unterschiedliche Massen der 9 pseudoskalaren Mesonen (in MeV)





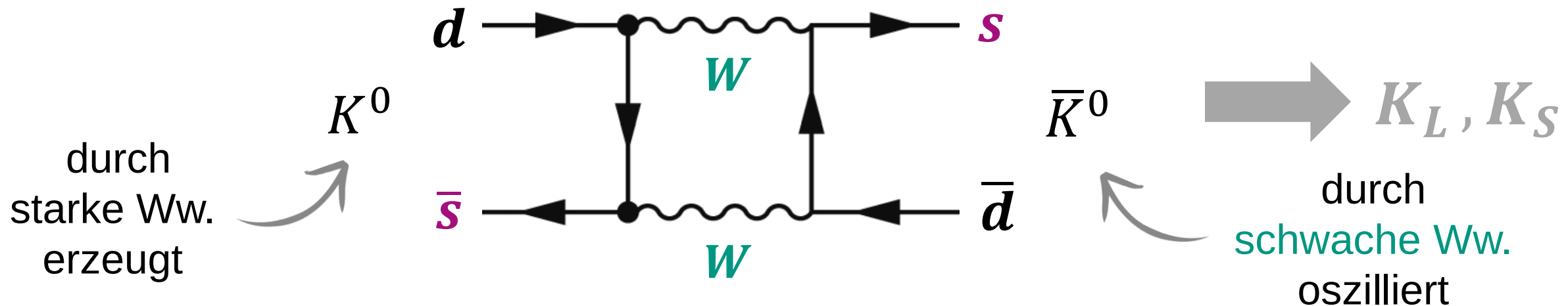
EINSCHUB: MISCHUNG VON TEILCHEN

Mischungseffekte Beispiel 1: neutrale Kaonen

■ Mischung: ein grundlegendes Phänomen von Teilchen mit identischen Quantenzahlen

- neutrale Kaonen: $K^0 \Leftrightarrow \bar{K}^0$: Mischung durch schwache Wechselwirkung (Boxdiagramm) mit **Strangeness**–Oszillationen $\Delta S = 2$

Eigenzustände starke Wechselwirkung $\neq$ Eigenzustände schwache Ww.



Mischungseffekte Beispiel 2: ν – Oszillationen

- Mischung: ein grundlegendes Phänomen von Teilchen mit identischen Quantenzahlen

- **Neutrino-Oszillationen:** Übergänge $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$
Flavourmischung durch **Propagation** von Masseneigenzuständen

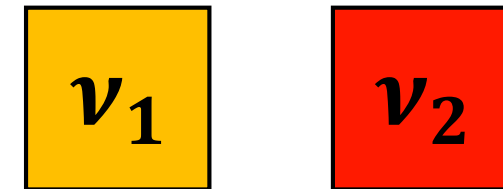
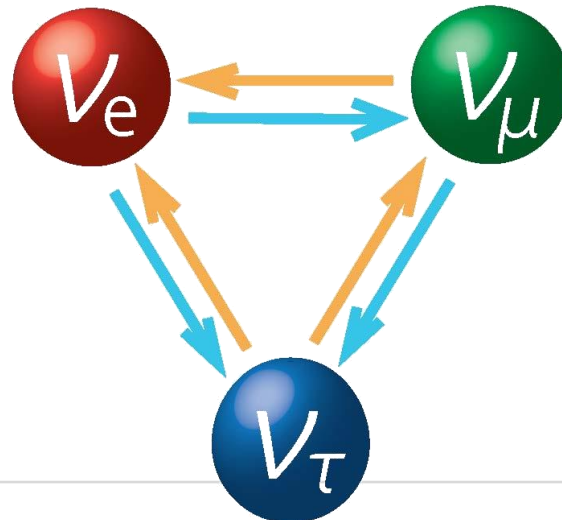
schwache Wechselwirkung

$\neq$

Masseneigenzustände



Erzeugung &
Reaktion

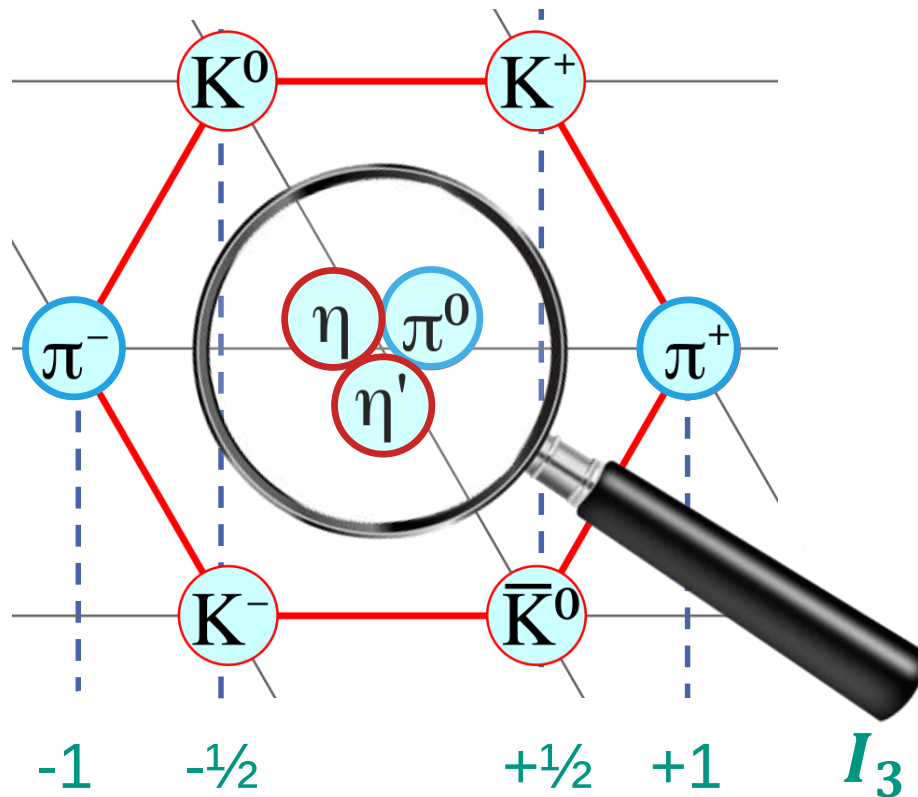


propagieren
im Raum

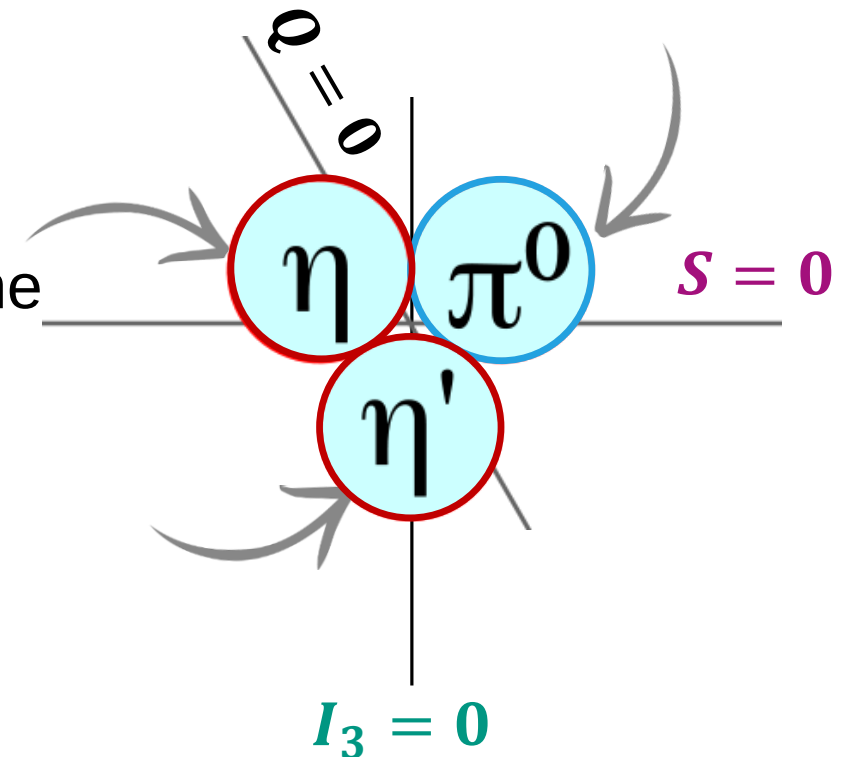
Mischungseffekte Beispiel 3: η – Mesonen

- physikalische Mesonen η und η' sind $SU(3)$ – Zustands – Mischungen!

neutrales Pion π^0 ist Teil des π – Triplets:
es mischt daher nicht mit den **Eta-Mesonen**!

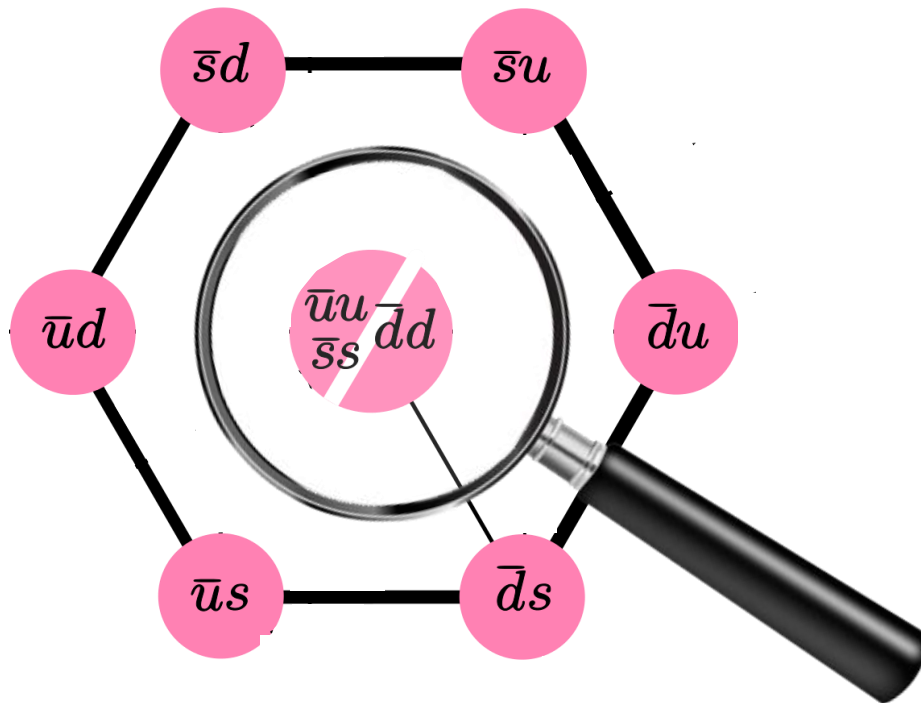


physikalische
Zustände
(Wechsel-
Wirkung)

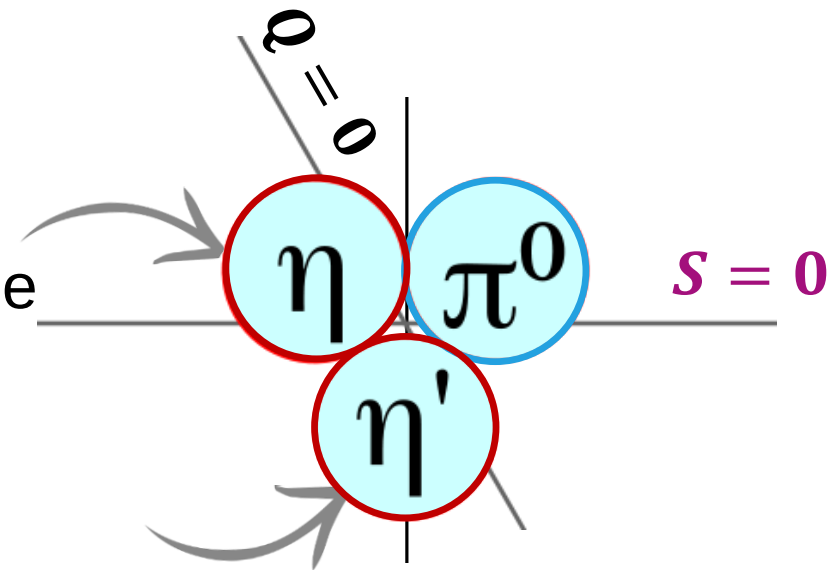


Neutrale Eta-Mesonen: Quarkinhalt u, d, s

- physikalische Mesonen η und η' sind $SU(3)$ – Zustands – Mischungen, da sie Wechselwirkungszuständen entsprechen



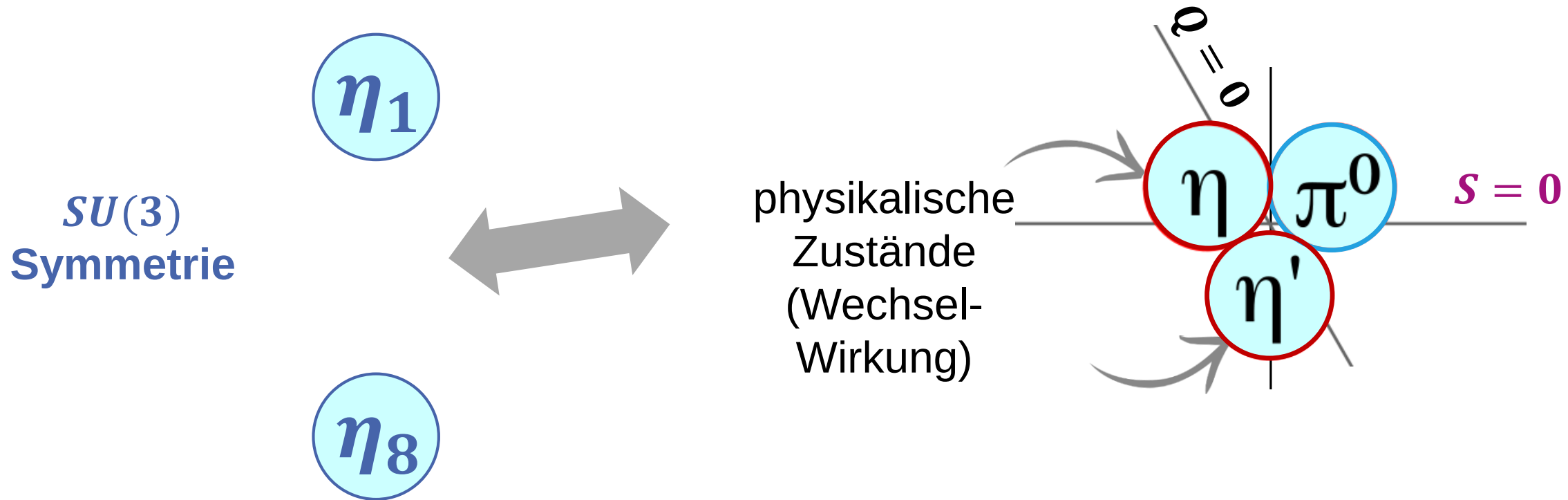
physikalische
Zustände
(Wechsel-
Wirkung)



wichtig: spezifische Kombination von u, d, s Quarks/Anti-Quarks

Eta-Mesonen: $SU(3)$ & physikalische Zustände

- physikalische Mesonen η und η' sind nicht identisch mit den $SU(3)$ Zuständen η_1 als $SU(3)$ Singulett und η_8 als Teil des $SU(3)$ Oktetts



Eta-Mesonen: Darstellung in $SU(3)$

■ neutrale Mesonen in der $SU(3)$ Symmetrie

η_1 – Meson: flavour-symmetrischer Zustand & $SU(3)$ Singulett

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

$SU(3)$
Symmetrie

η_8 – Meson: flavour-antisymmetrischer Zustand &
Teil des $SU(3)$ Oktetts

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

neutrale Mesonen als physikalische Zustände

■ neutrale Mesonen η' und η als physikalische Zustände

η_1 und η_8 mischen aufgrund der **elektroschwachen Wechselwirkung** zu den **physikalischen Mesonen η' und η**

- **η' Meson**: definierte Masse $m = 958,8 \text{ MeV}$ und $\tau = 3,2 \cdot 10^{-21} \text{ s}$

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

- kleine Mischung, η' überwiegend η_1
Mischungswinkel $11,5^\circ$

- **η Meson**: definierte Masse $m = 547,9 \text{ MeV}$ und $\tau = 5,0 \cdot 10^{-19} \text{ s}$

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

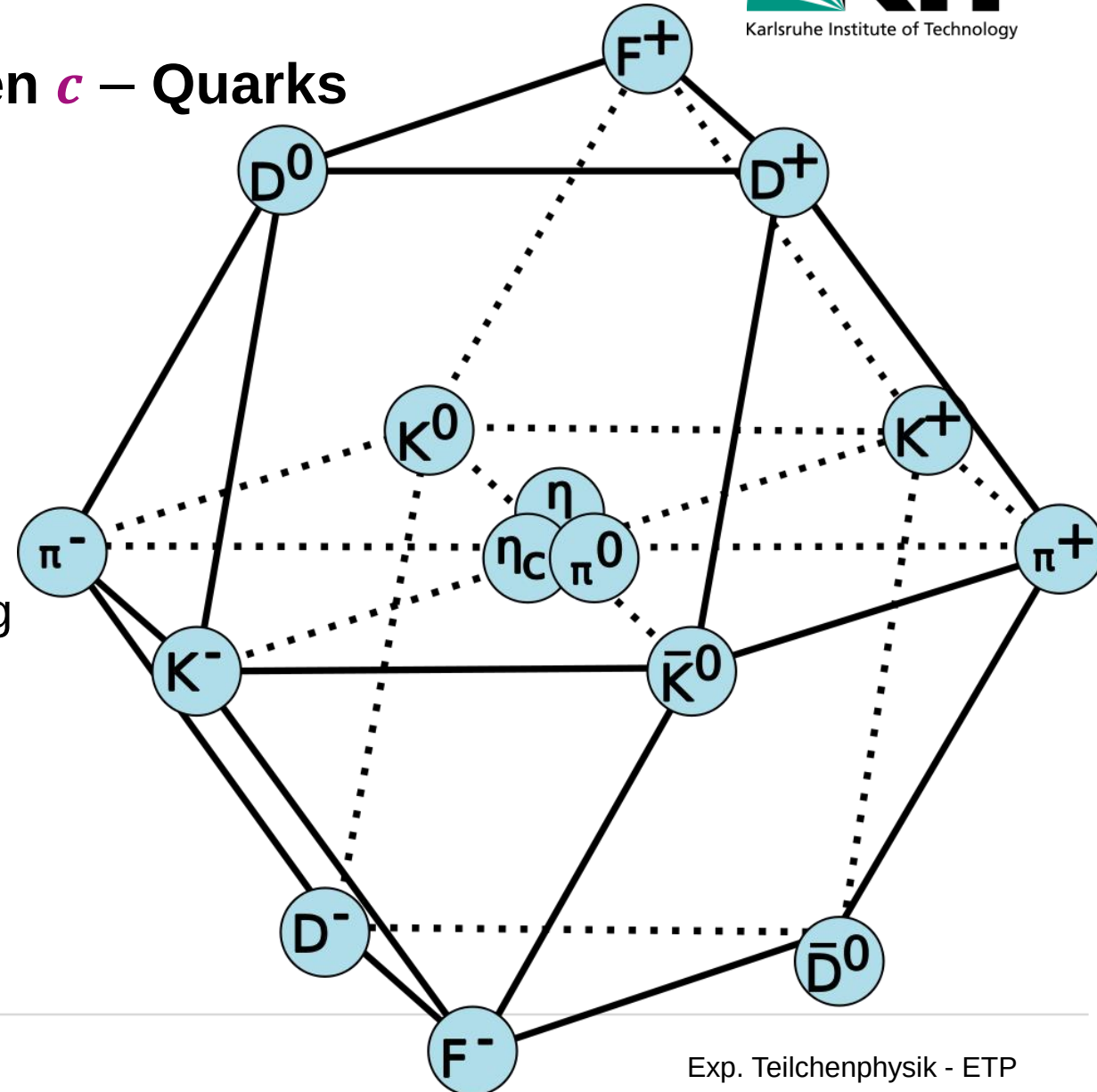
- kleine Mischung, η überwiegend η_8

Multiplette unter Einbeziehung von c – Quarks

■ ‘Vorgriff’: Einbeziehung des schweren c – Quarks

- Erweiterung der $SU(3)$ – Flavour-Symmetrie von u, d, s Quarks auf eine $SU(4)$ – Symmetrie von u, d, s, c Quarks
- neue Mesonen mit Charm („*charmed mesons*“), alle $\ell = 0$ Mesonen nachgewiesen ...

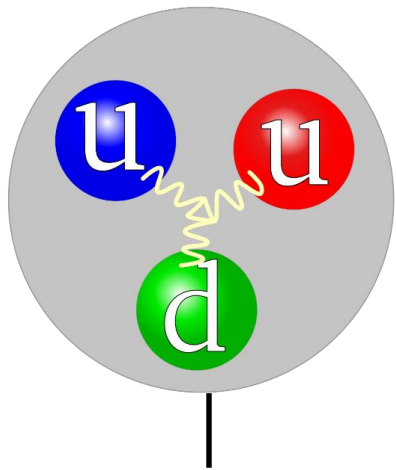
3 – D
Darstellung



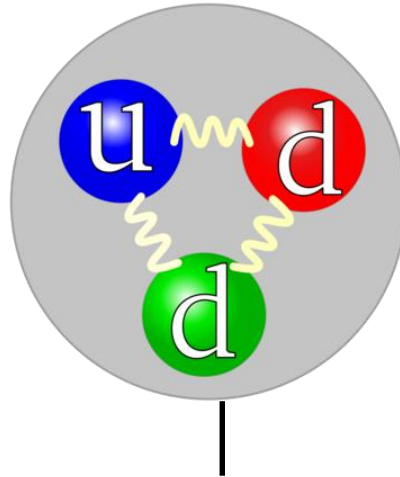
Baryonen: qqq Zustände mit u, d, s Quarks

■ $SU(3)$ – Symmetrie für Baryonen

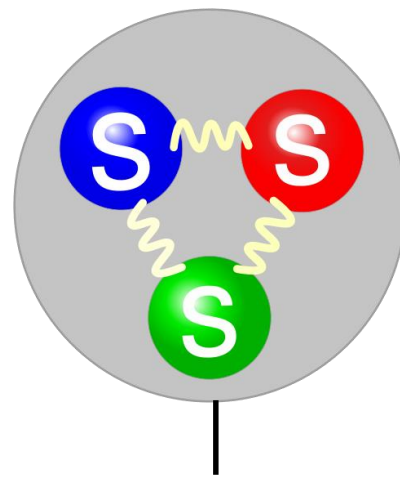
- **Baryonen** = gebundene qqq Zustände mit $SU(3)$ – Flavoursymmetrie



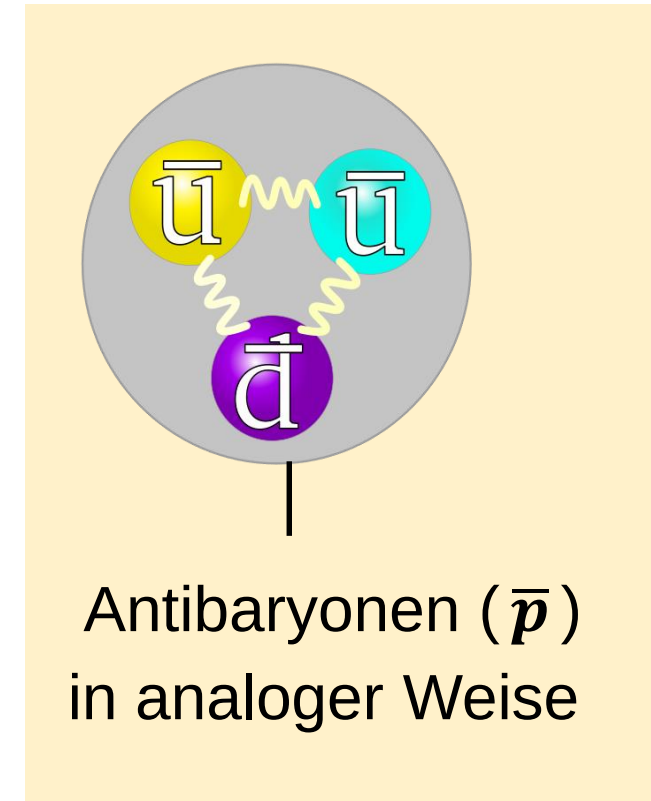
Proton p



Neutron n



Ω^- Baryon



Antibaryonen ($\bar{p}$)
in analoger Weise

- **Baryonen** = gebundene qqq Zustände mit $SU(3)$ – Flavoursymmetrie

Diagram illustrating the addition of angular momentum for the $2p^3$ configuration:

- Dekuplett** ($J = 3/2$) with three up arrows ($\uparrow\uparrow\uparrow$)
- Singulett**
- 2 Oktette**

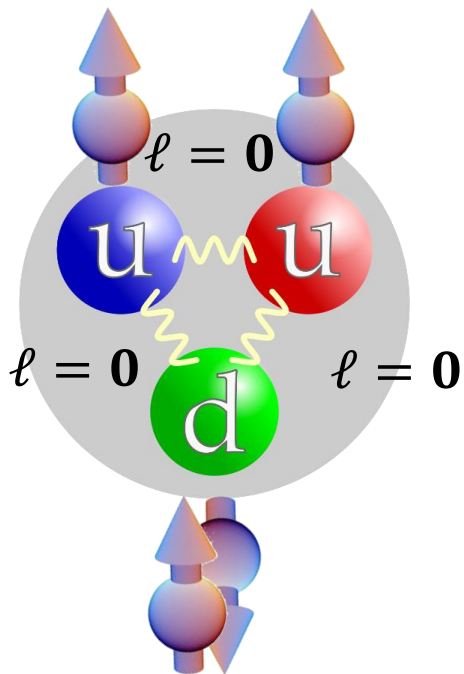
- 
- A black and white portrait of Paul Dirac, a middle-aged man with receding hair, wearing a suit and tie. Below the portrait, the word "Paul" is written in a large, bold, sans-serif font. The letter 'u' is red and has a red arrow pointing upwards from its right side. The letter 'i' is red and has a red arrow pointing downwards from its top.

Baryonen – Oktett mit u, d, s Quarks

■ $SU(3)$ – Symmetrie für Baryonen

- verallgemeinertes Pauli-Prinzip:

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

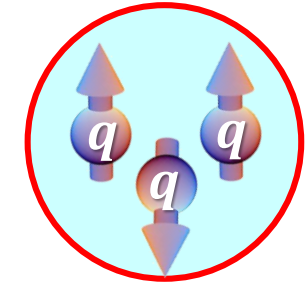
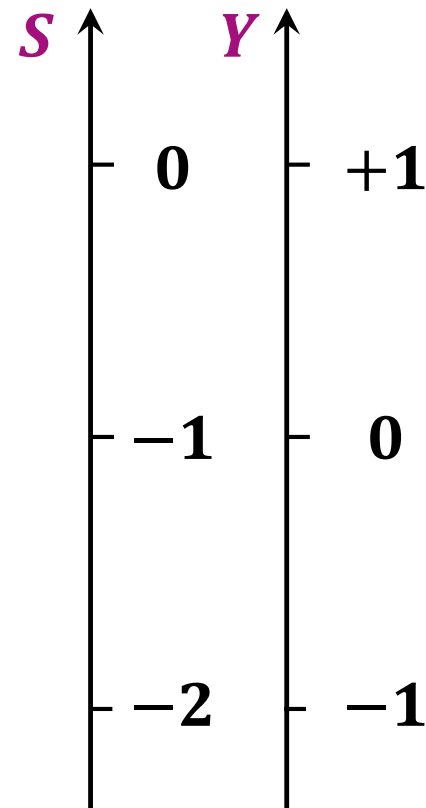
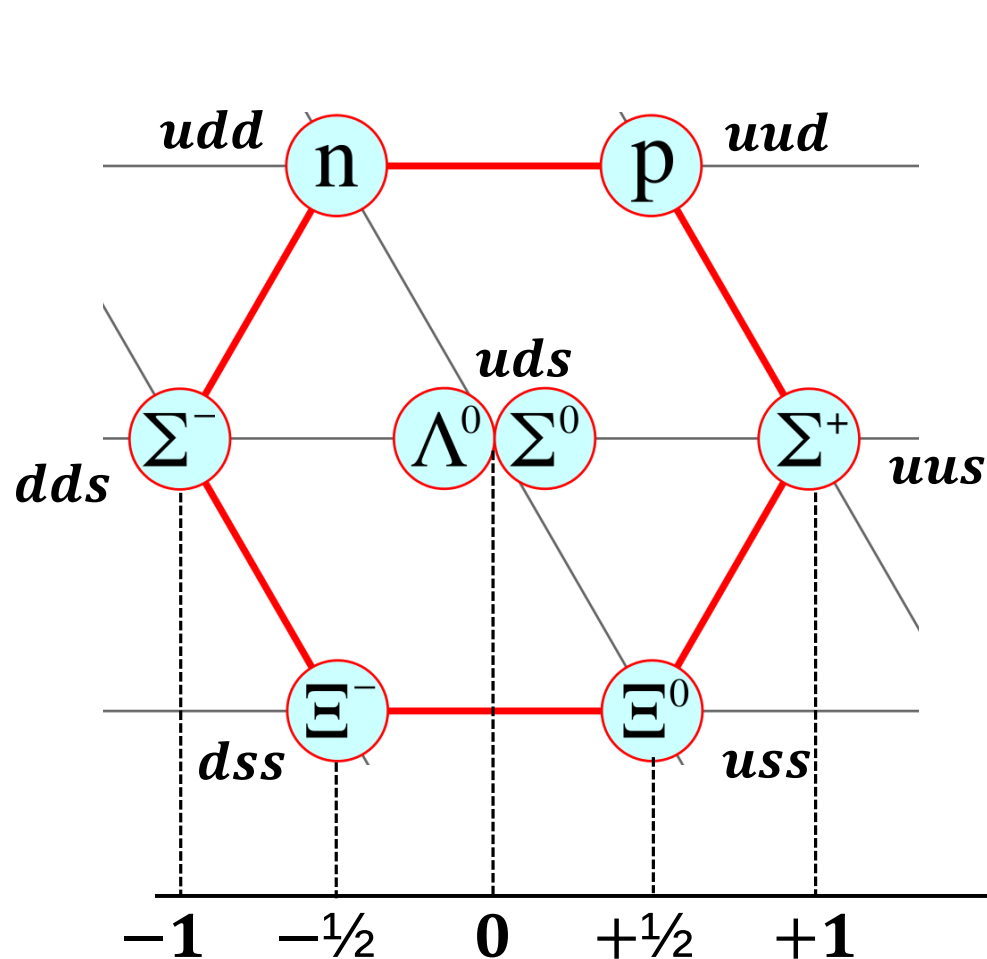


Anteile der Wellenfunktion

- **Ortsanteil:** immer symmetrisch, da $(-1^\ell) = +1$ bei rel. $\ell = 0$
- **Spinanteil:** abhängig von Kombination der Spins
 - für $J = 3/2$ mit $(\uparrow\uparrow\uparrow)$ immer symmetrisch
 - für $J = 1/2$ mit $(\downarrow\uparrow\uparrow)$ gemischt symmetrisch/ antisymmetrisch
- **Farbanteil:** heute bekannt: **immer antisymmetrisch***

Baryonen-Oktett: qqq – Zustände mit $S = \frac{1}{2}$

■ Baryonen-Repräsentation in $SU(3)$ und Quarks u, d, s



Spin $S = \frac{1}{2}$

$SU(3)$ Darstellung mit den Quantenzahlen

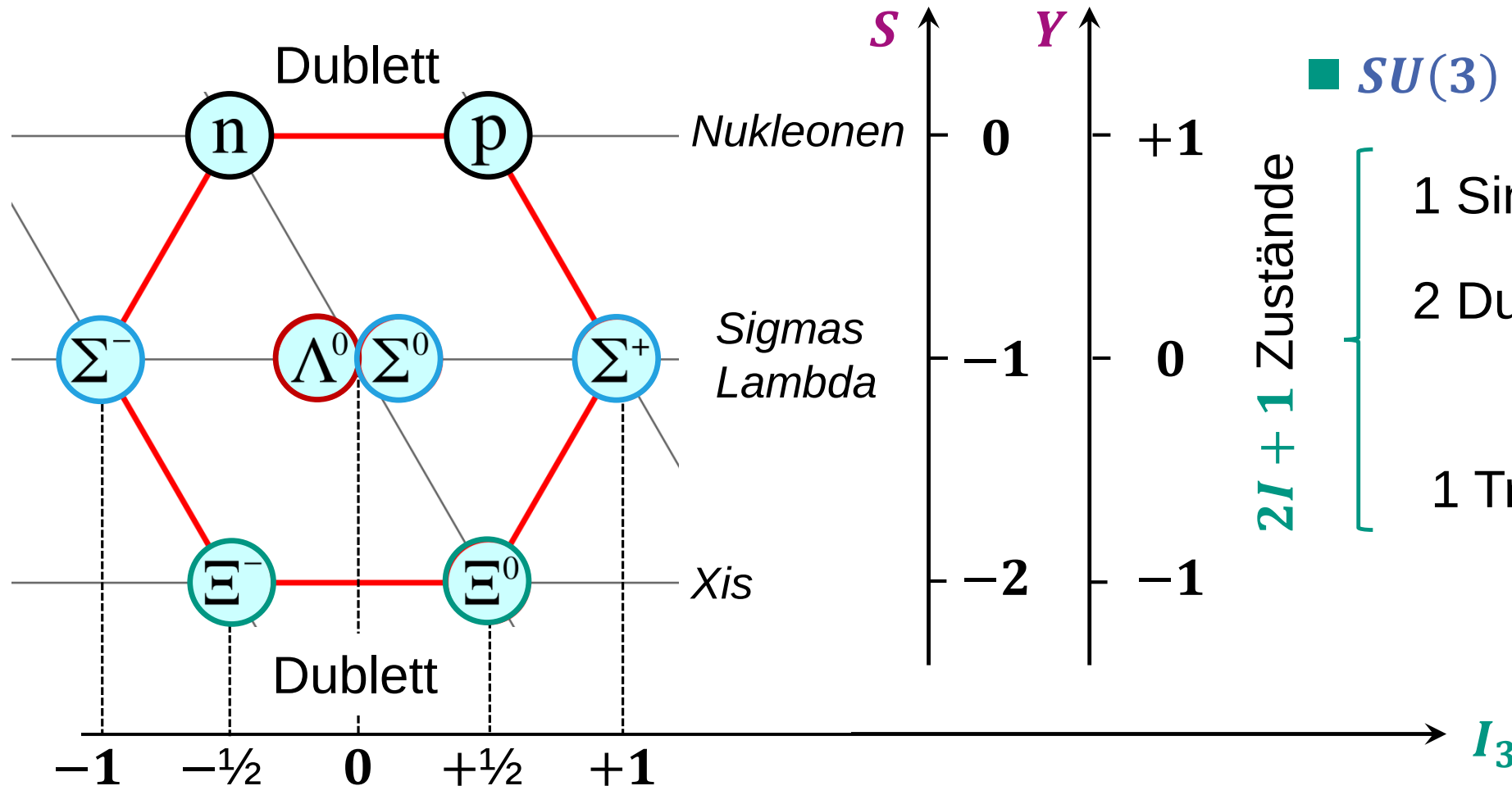
Isospin I_3

Hyperladung Y

Strangeness $S = Y - B$
 $= Y - 1$

Baryonen-Oktett: der achtfache Weg

■ Baryonen-Repräsentation in $SU(3)$ und Quarks u, d, s



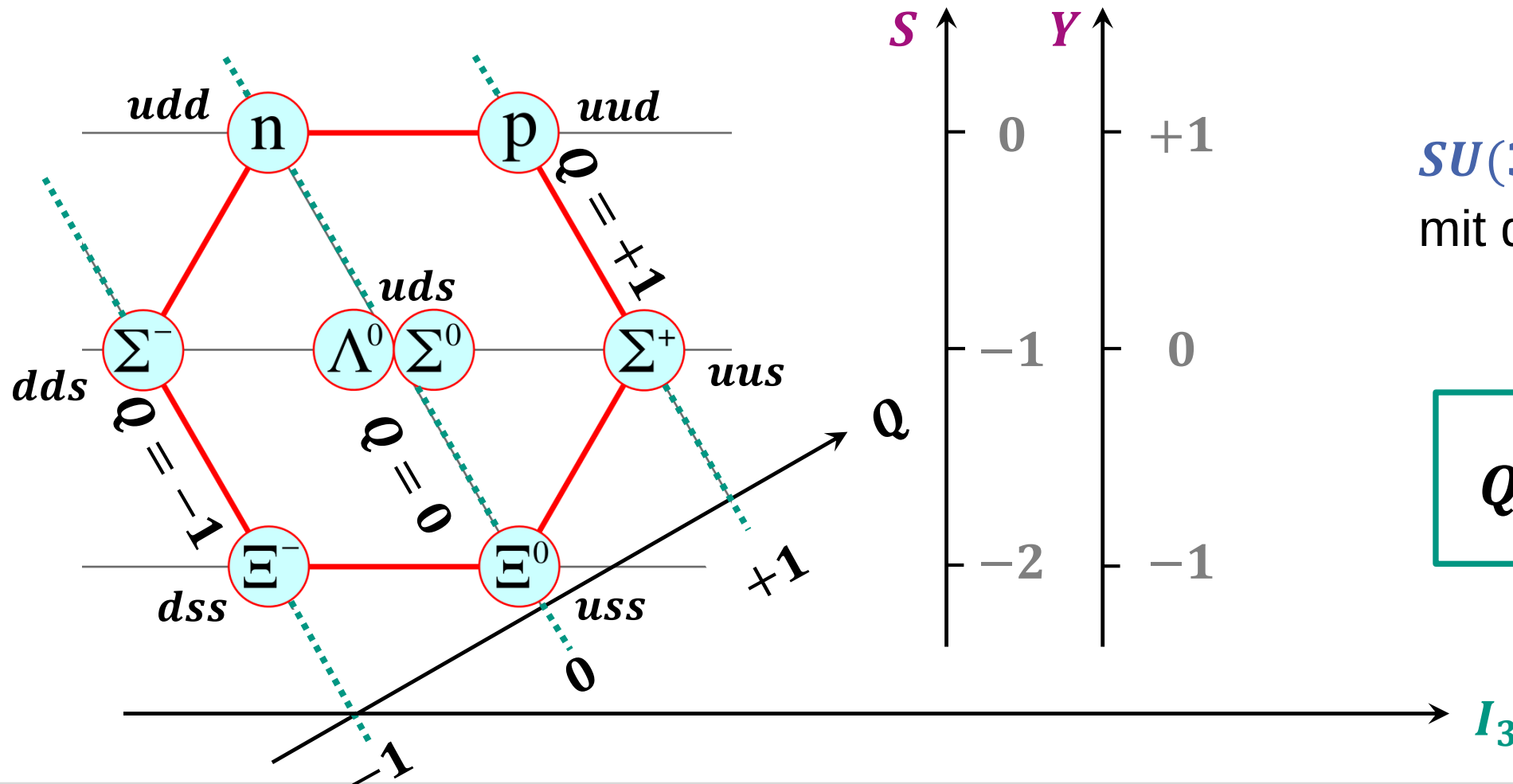
■ $SU(3)$ – Flavour-Oktett

$2I + 1$ Zustände

- 1 Singulett (Λ^0)
- 2 Dubletts (n, p) & (Ξ^-, Ξ^0)
- 1 Triplett ($\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$)

Baryonen-Oktett: der achtfache Weg

■ Baryonen-Repräsentation in $SU(3)$ und Quarks u, d, s

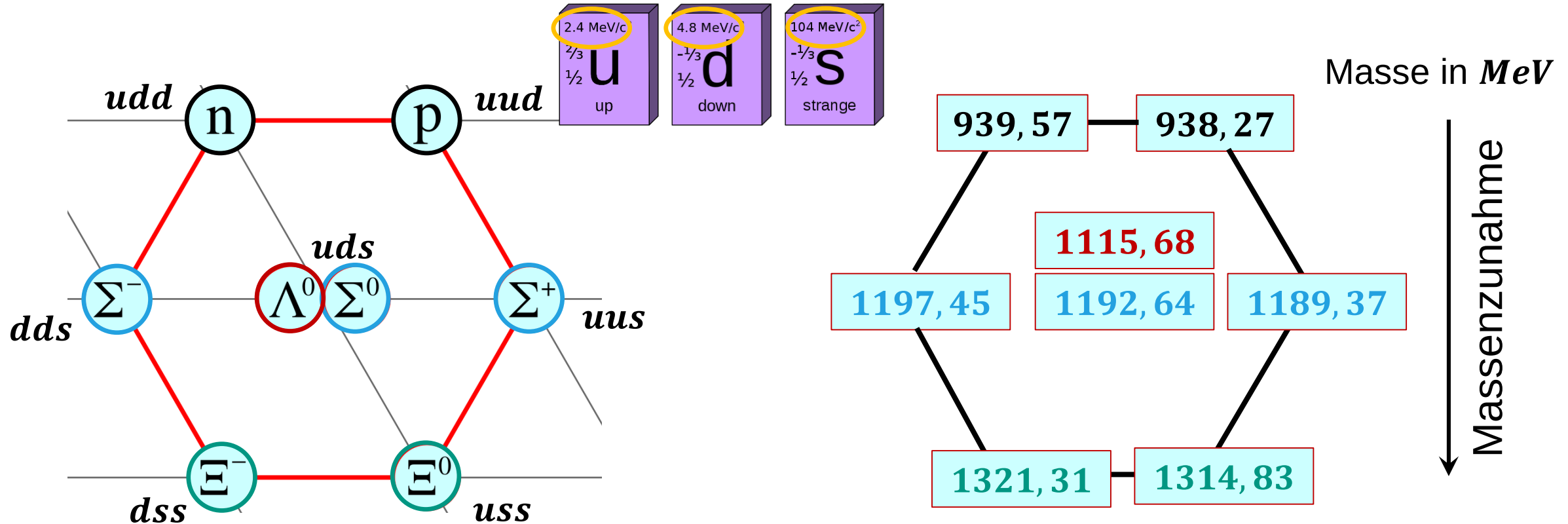


$SU(3)$ Darstellung
mit der Quantenzahl
Ladung Q

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

Baryonen-Oktett: Brechung der $SU(3)$ Symmetrie

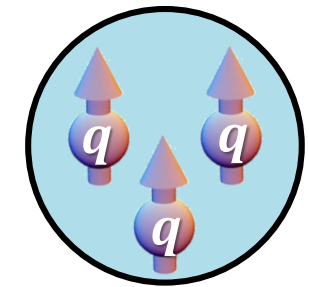
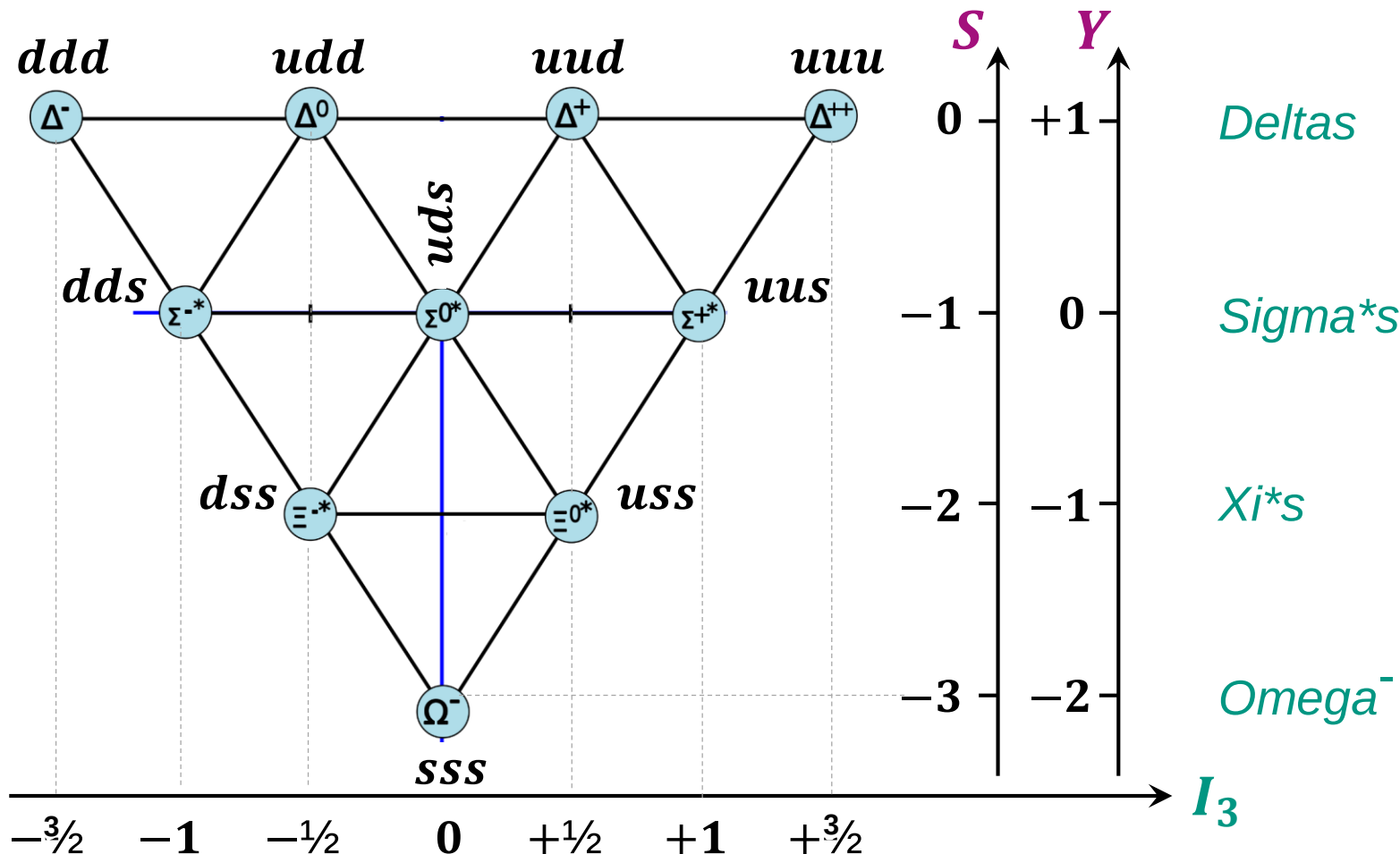
■ $SU(3)$ – Symmetriebrechung durch Massen der Quarks u, d, s



- Brechung von $SU(3)$ durch die deutliche größere Masse des s - Quarks

Baryonen-Dekuplett in $SU(3)$

■ Darstellung des Spin = 3/2 Baryonen-Dekupletts (qqq)



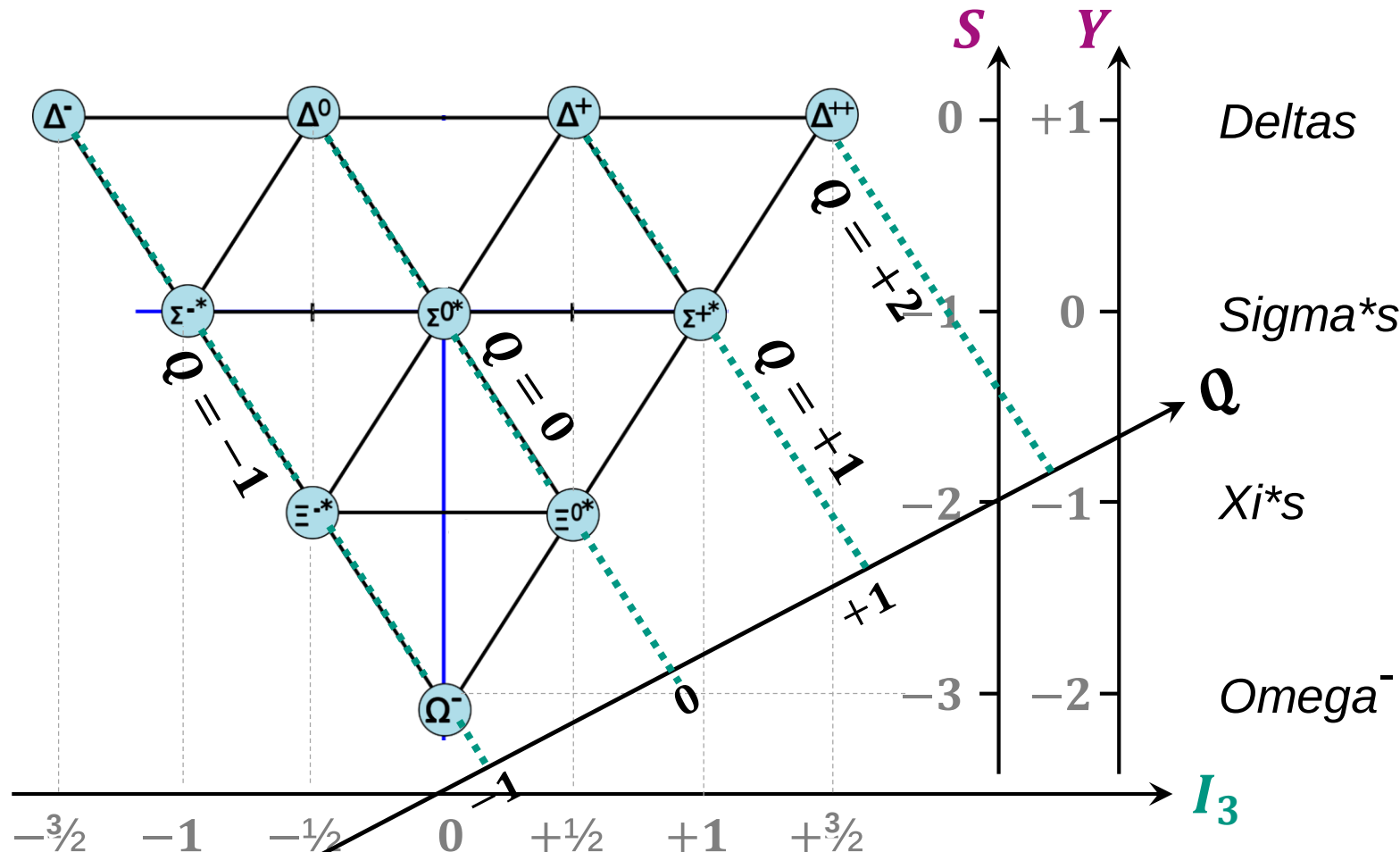
Spin = 3/2

- 1 Quadruplett (Δ)
- 1 Triplet (Σ^*)
- 1 Dublett (Ξ^*)
- 1 Singulett (Ω^-)

Q: wikicommons

Baryonen-Dekuplett in $SU(3)$

■ Darstellung des Spin = 3/2 Baryonen-Dekupletts: Projektion auf Ladung Q



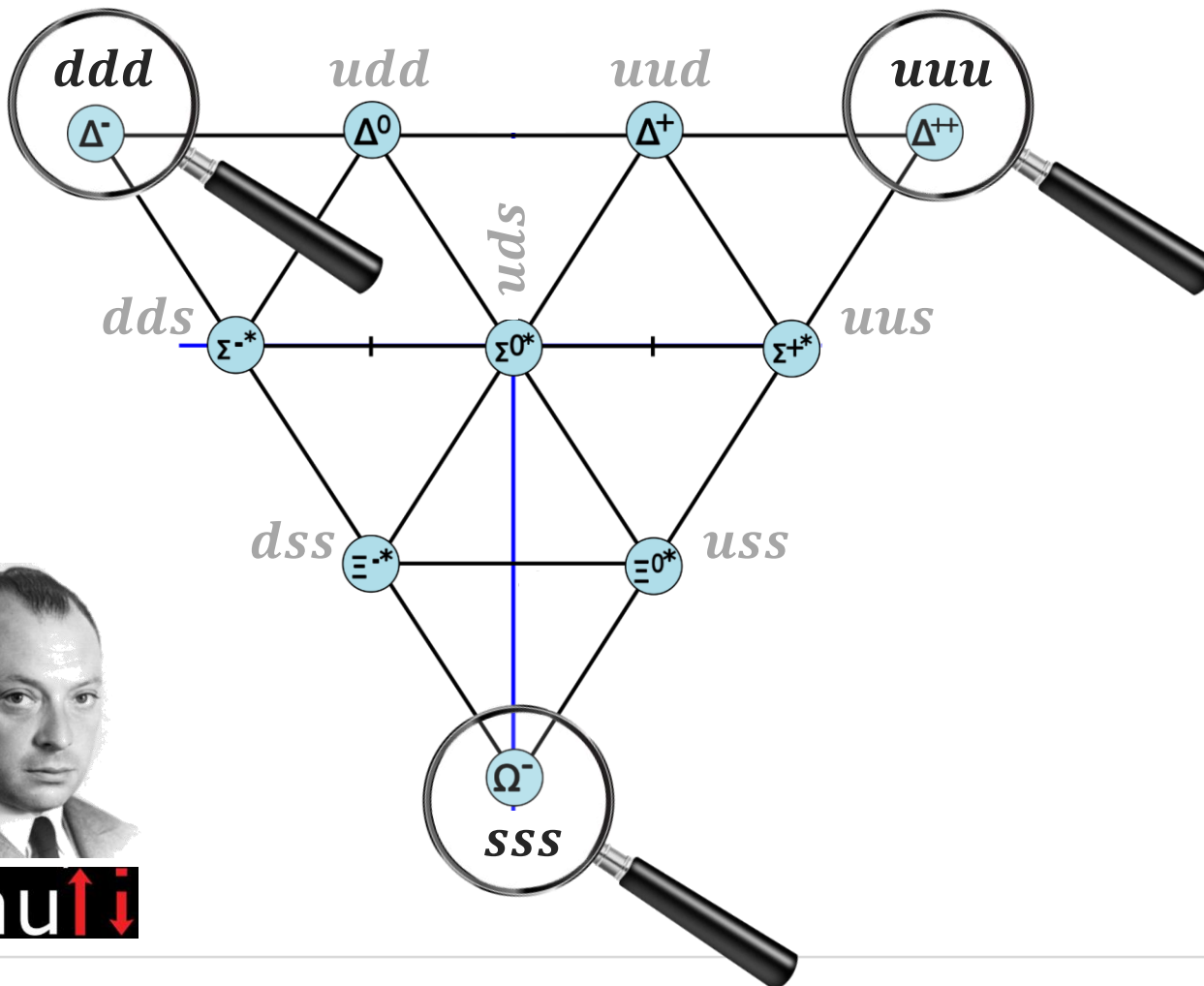
$SU(3)$ Darstellung
mit der Quantenzahl
Ladung Q

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

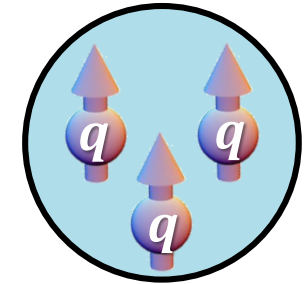
Q: wikicommons

Baryonen-Dekuplett in $SU(3)$

■ Darstellung des Spin = 3/2 Baryonen-Dekupletts (qqq): die drei 'Eckpunkte'



Spin = 3/2



- symmetrische Orts-Wellenfunktion
- symmetrische Spin-Wellenfunktion
- symmetrische Flavour-Wellenfunktion

Δ^- : ddd Δ^{++} : uuu Ω^- : sss

- antisymmetrische ? -Wellenfunktion

KONZEPT DER FARBLADUNG*

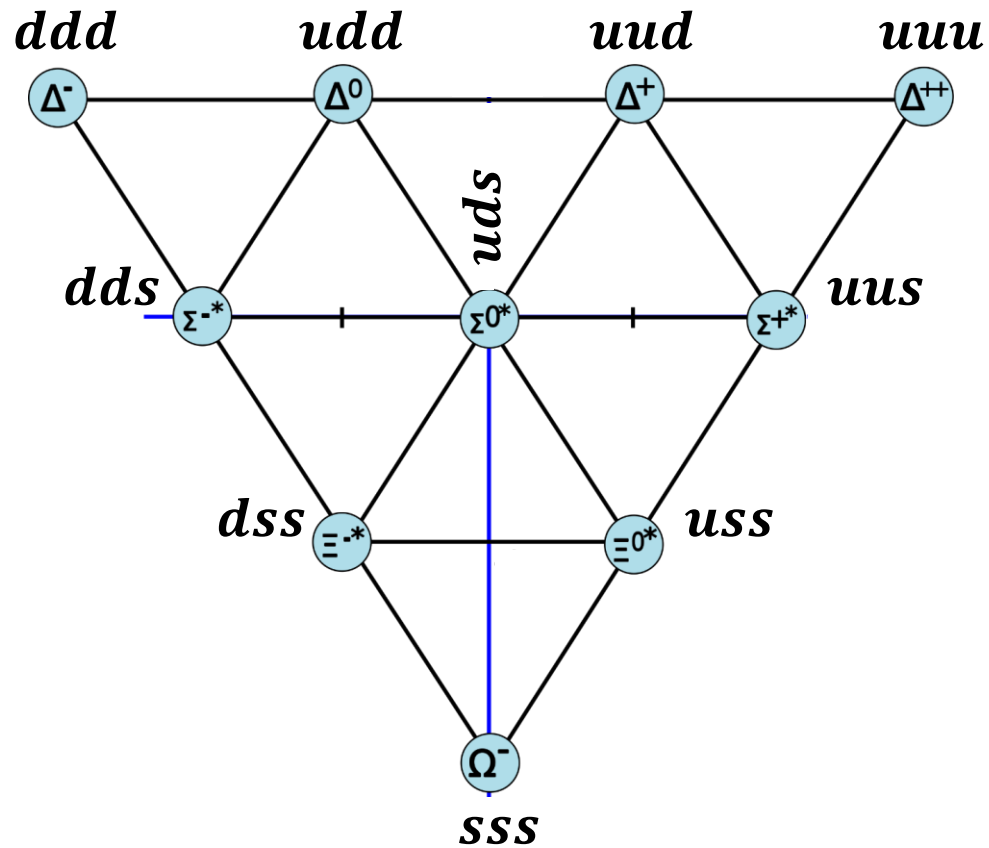
Q: wikicommons



Pau↑↓

Baryonen-Dekuplett – Massenzunahme

■ Brechung der $SU(3)$ – Symmetrie durch Quarkmassen



Δ : 1232

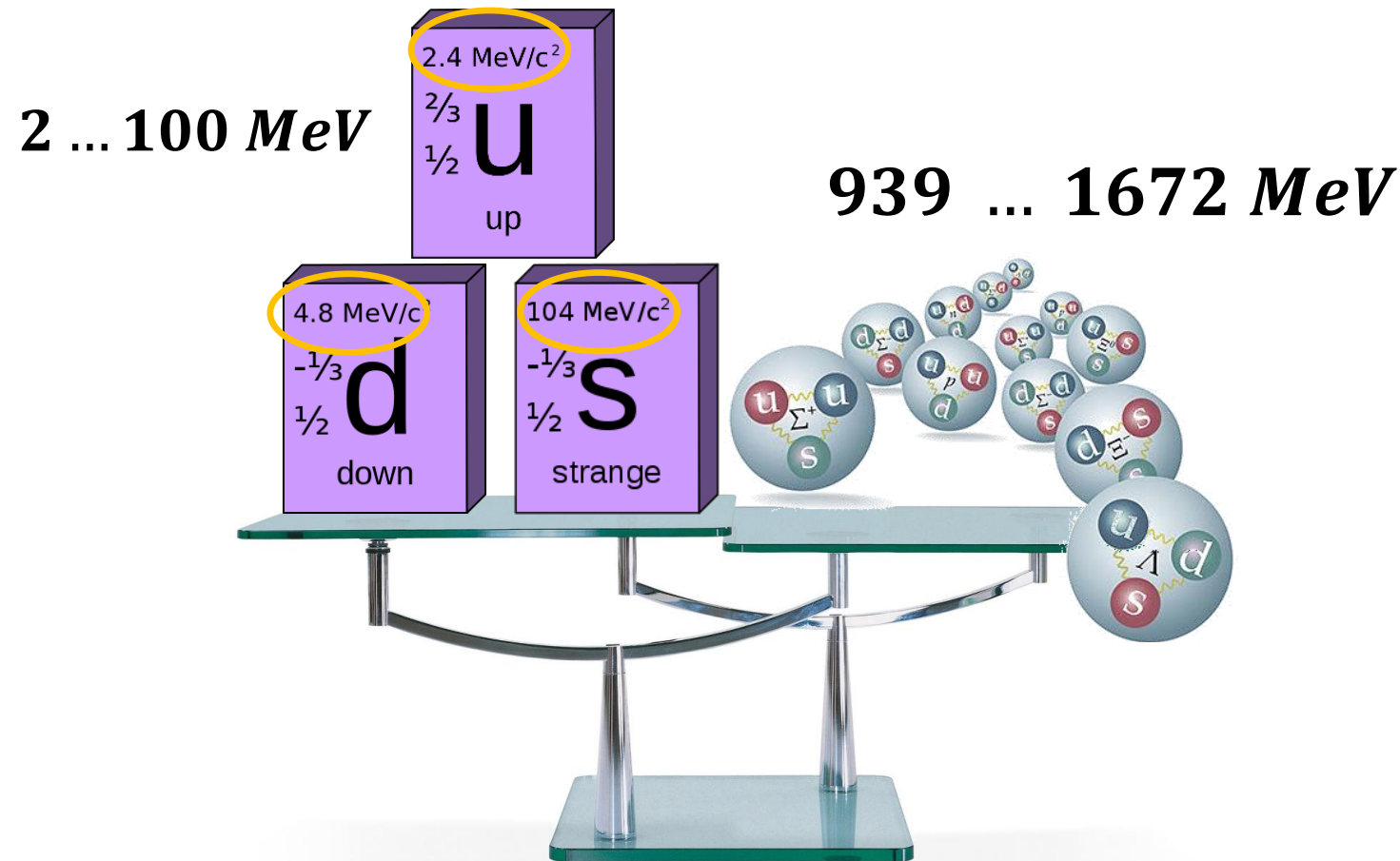
Σ^* : ~ 1380

Ξ^* : ~ 1530

Ω^- : 1672,45

Masse in *MeV*

↓
Massenzunahme



EINSCHUB: HADRON- UND QUARK-MASSEN

Moderne Ex-Phys. III : Teilchen & Hadronen

■ Evaluation: *QR* – Code und Link

[evasys Onlineumfrage - Moderne Experimentalphysik III
\(Physik VI, Teilchen und Hadronen\) \(kit.edu\)](#)



VL

[evasys Onlineumfrage - Übungen zu Moderne
Experimentalphysik III \(kit.edu\)](#)



Ü