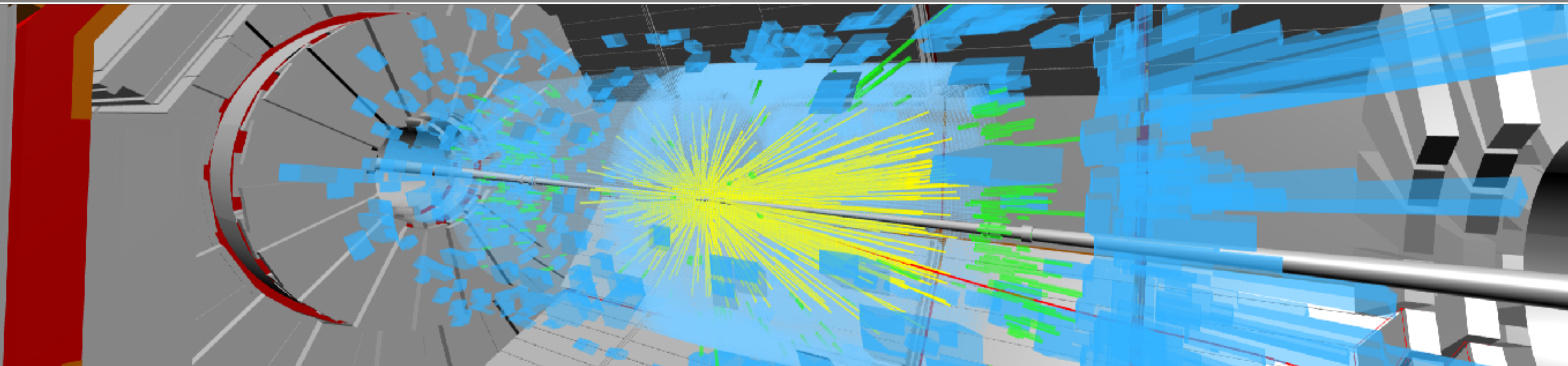


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 11. Vorlesung (Teil 1)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Kurze Wiederholung

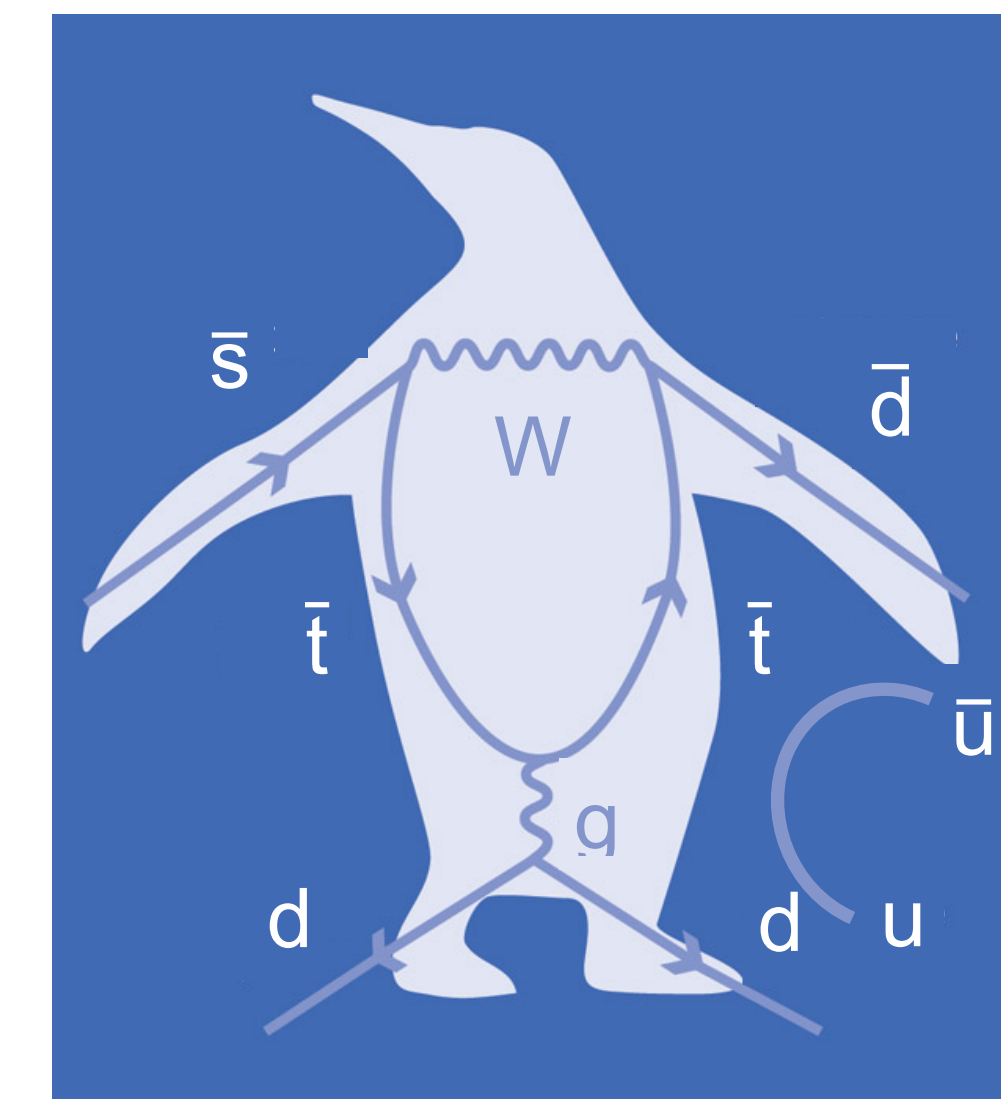
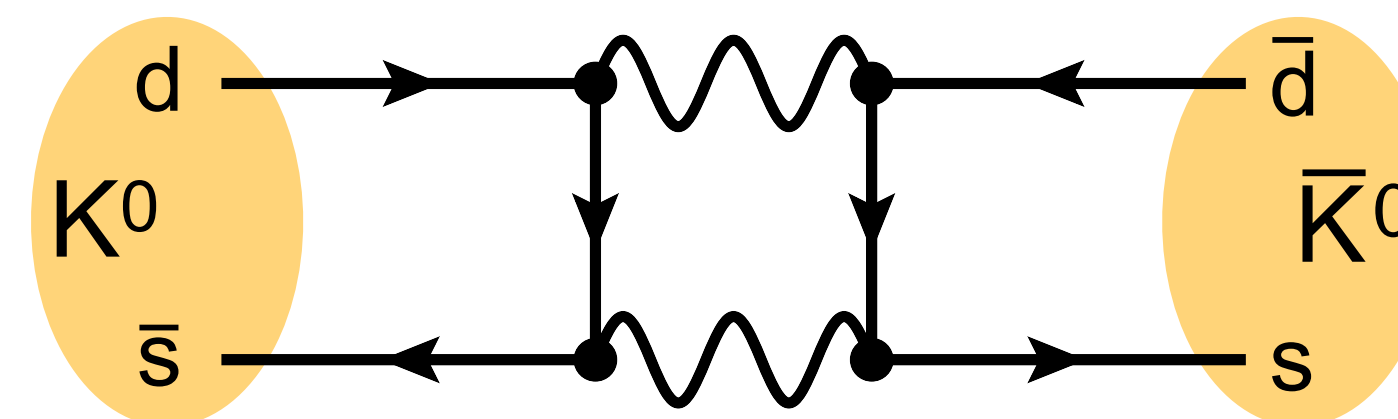
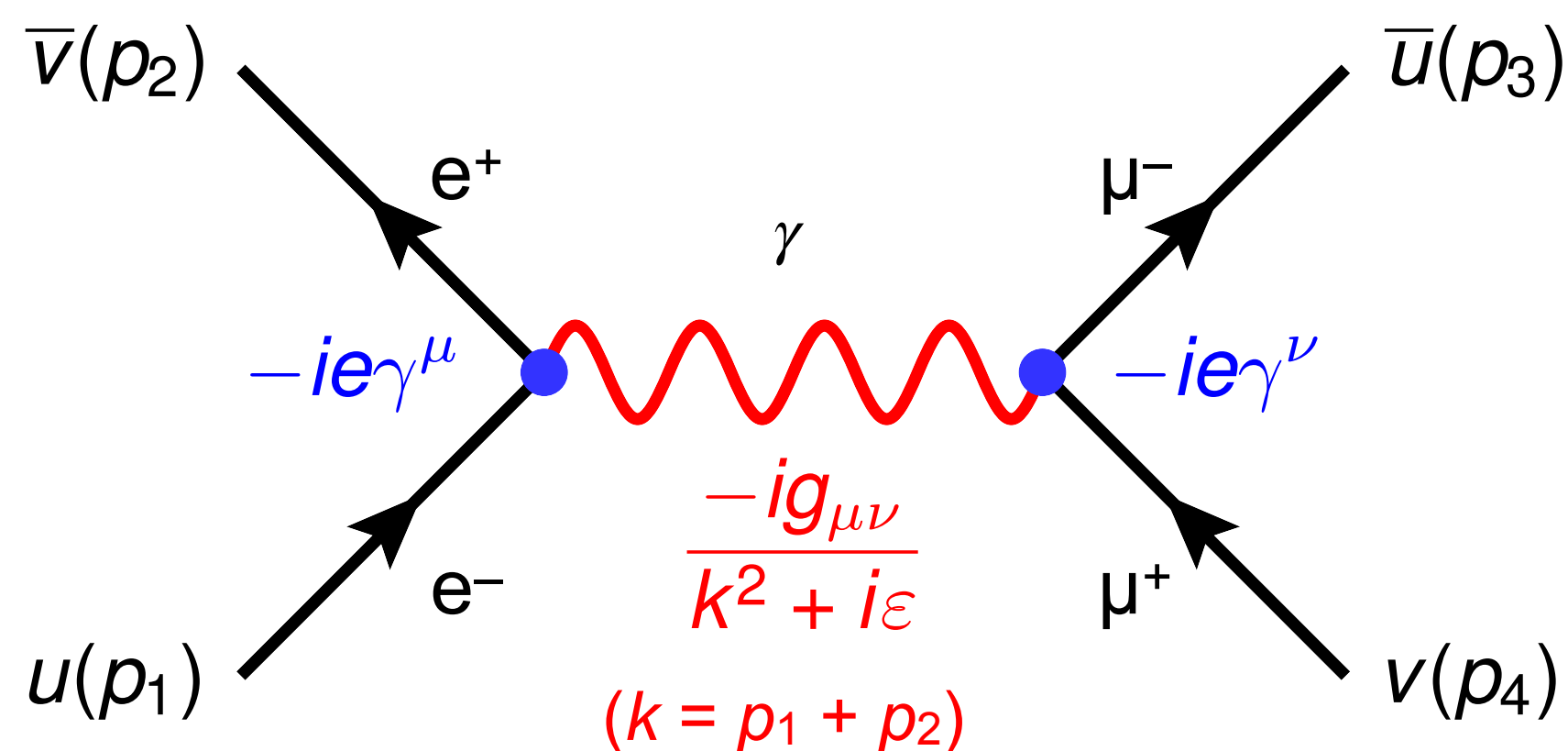
- Theta-Tau-Rätsel: Zwei unterschiedliche Teilchen (θ^+ , τ^+), dieselbe Masse?
- Vorschlag: Test der **Paritätsverletzung** in schwacher Wechselwirkung (Lee, Yang, 1956)
- Wu-Experiment (1957):
 - **Vorzugsrichtung** des Elektronenimpulses relativ zum Kernspin im Betazerfall von $^{60}\text{Co} \rightarrow$ **Paritätsverletzung**
 - Experimentell: Ausrichtung des Kernspins durch adiabatische Entmagnetisierung
- Goldhaber-Experiment (1958):
 - Messung der **Neutrinohelizität** bei Elektroneneinfang von $^{152\text{m}}\text{Eu} \rightarrow$ C und P **maximal** verletzt
 - Experimentell: Kernresonanzfluoreszenz

Kurze Wiederholung

- System neutraler Kaonen:
 - Mischung von K^0 und $\bar{K}^0$ durch schwache Wechselwirkung
→ K^0 - $\bar{K}^0$ Oszillationen
 - Physikalische Teilchen: K^0_L („K-long“), K^0_S („K-short“) → CP-Eigenzustände?
- Cronin-Fitch-Experiment (1964):
 - K^0_L -Strahl (BNL) → Nachweis von $K^0_L \rightarrow \pi\pi$ mit Doppelarmspektrometer
 - Ca. 0.2% der K^0_L (erwarteter CP-Eigenwert -1) zerfallen in $\pi\pi$ (CP = $+1$)
→ **CP-Verletzung in der Mischung** von K^0 und $\bar{K}^0$
(= indirekte CP-Verletzung, 10^{-3} -Effekt)
 - Spätere Experimente: System neutraler Kaonen zeigt auch **CP-Verletzung im Zerfall** (= direkte CP-Verletzung, 10^{-6} -Effekt)

Einschub: Feynman-Diagramme

- Bisher: Feynman-Diagramme für einfachste Prozesse (in **führender Ordnung** Störungstheorie)
- 10. Vorlesung: neue Klassen von Feynman-Diagrammen
 - **Boxdiagramme** und **Pinguindiagramme** (benannt nach geometrischer Form der Diagramme)
 - Diagramme **höherer Ordnung** mit internen **Schleifen** (engl.: loops), auf Niveau der **fundamentalen** Teilchen



Kapitel 6

QCD: Quarks, Gluonen und Hadronen

Überblick

■ Geschichte der Quarks:

- 1950er Jahre: neue **seltsame Teilchen** → „Teilchenzoo“
- 1960er Jahre: **Quarkmodell** → Quarks als mathematisches **Hilfsmittel**
- 1970er Jahre: **Partonmodell**, Entdeckung der **Charm-** und **Bottom-Quarks** → Quarks als physikalische **Realität**



<http://www.particlezoo.net>

■ QCD als Theorie der starken Wechselwirkung:

- **3 Farbladungen** (und Antifarbe) als physikalische Freiheitsgrade
- Bindungszustände schwerer Quarks → **QCD-Potenzial**
- **QCD-Kraft**: stark bei großen Abständen, schwach bei kleinen Abständen
- Erweiterung des Partonmodells auf QCD-Effekte

Kapitel 6.1

Quarkmodell der Hadronen

Isospinsymmetrie

- Erinnerung: **Isospinsymmetrie** zwischen Proton und Neutron
 - Ähnliche Massen von p und n $\rightarrow$ Anordnung als (starkes) **Isospin-Duplett**

$$\text{Nukleon} = \begin{pmatrix} |p\rangle \\ |n\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle \\ |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle \end{pmatrix}$$

- Mathematischer Formalismus analog zu Spin: **SU(2)-Symmetrie**
- Erweiterung des Isospinkonzepts aufs **Quarks** (zunächst nur u, d):
 - Ähnliche (effektive) Massen von u und d $\rightarrow$ Anordnung als Isospin-Duplett

$$|q\rangle = \begin{pmatrix} |u\rangle \\ |d\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle \\ |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle \end{pmatrix}$$

- Erweiterung des Isospinkonzepts aufs **Quarks** (Fortsetzung):
 - Unter starker Wechselwirkung: beliebig mit unitärer Transformation (Matrix U) „gedrehte“ Zustände im Isospinraum **ununterscheidbar**

$$|q'\rangle = \begin{pmatrix} |u'\rangle \\ |d'\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |u\rangle \\ |d\rangle \end{pmatrix} = U |q\rangle$$

- Analoge Konstruktion für Antiquarks mit **derselben** unitären Transformation

$$|\bar{q}\rangle = \begin{pmatrix} -|\bar{d}\rangle \\ |\bar{u}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle \\ |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle \end{pmatrix} \rightarrow |\bar{q}'\rangle = U |\bar{q}\rangle$$

- Leichte Mesonen: gebundene Zustände aus Quarks und Antiquarks
 - Mögliche Kombinationen der Isospins: Triplett und Singulett
 - **Triplett** mit Isospin $T = 1 \rightarrow$ identifiziert mit **Pionen**

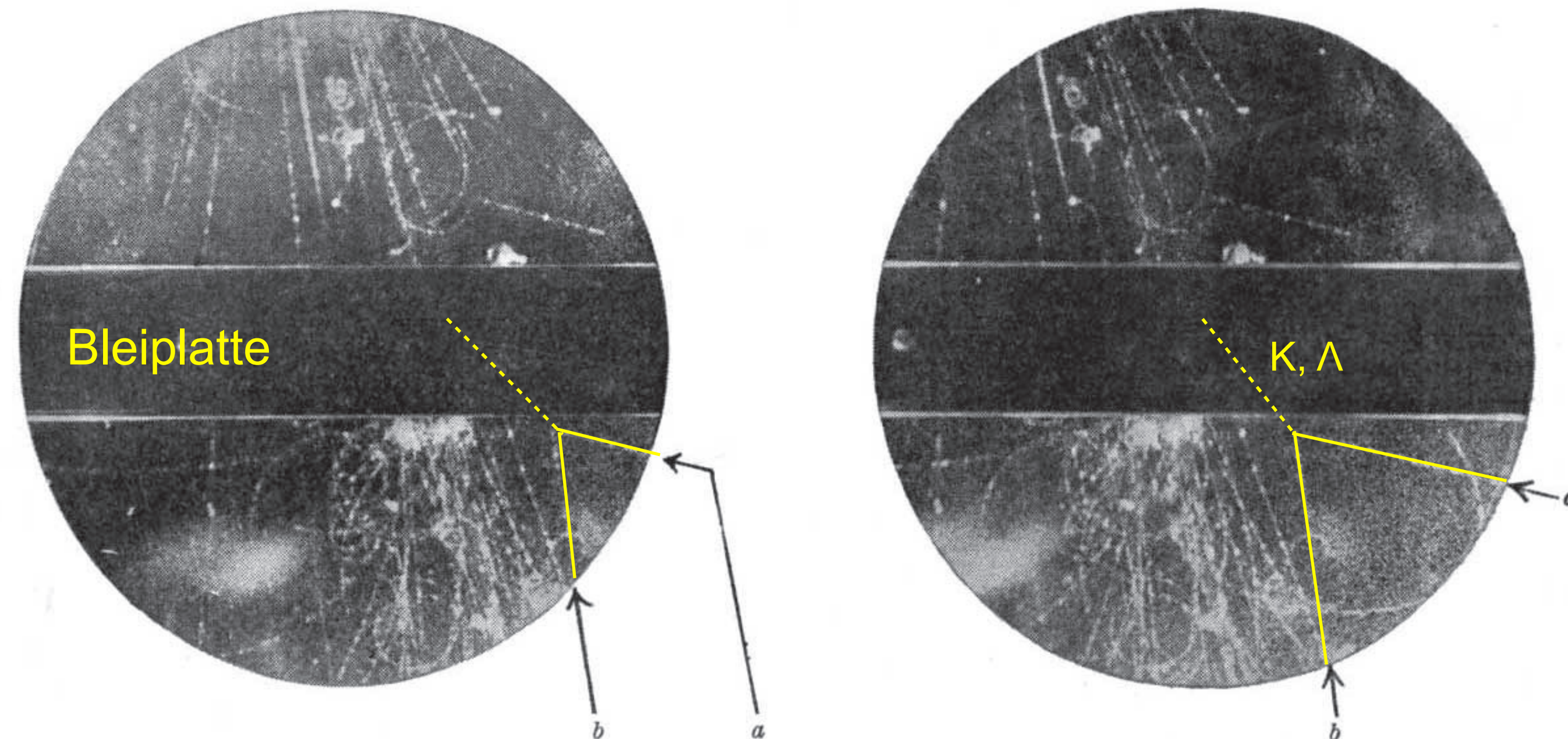
$$|\pi\rangle = \begin{pmatrix} -|u\bar{d}\rangle \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle) \\ |\bar{u}d\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T=1, T_3=+1\rangle \\ |T=1, T_3=0\rangle \\ |T=1, T_3=-1\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -|\pi^+\rangle \\ |\pi^0\rangle \\ |\pi^-\rangle \end{pmatrix}$$

- **Singulett** mit Isospin $T = 0$: keine Entsprechung in der Natur ($\rightarrow$ später)

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle)$$

Entdeckung der Strangeness

- 1940er Jahre: **neue Teilchen** in kosmischer Strahlung
 - Signatur: V^0 („neutraler Vertex“) $\rightarrow$ heute: $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$
 - Rochester, Butler (1947): **stereoskopische Nebelkammeraufnahmen**
 - Wechselwirkung mit Bleiplatte $\rightarrow$ Erzeugung in **starker Wechselwirkung**
 - **Lange Lebensdauer** $\rightarrow$ Zerfallslänge $O(\text{cm}) \rightarrow$ „**seltsame**“ Teilchen



G.D. Rochester, C.C. Butler,
Nature 160 (1947) 855

Entdeckung der Strangeness

- Flavorquantenzahl **Strangeness S** (Nakano, Nishijima 1953; Gell-Mann 1956)
 - **Erhalten** in **starker** und **elektromagnetischer** Wechselwirkung
→ Erzeugung in Prozessen mit $\Delta S = 0$ (heute: $s\bar{s}$ -Paarerzeugung)
 - **Verletzt** in **schwacher** Wechselwirkung → Zerfall mit $\Delta S = \pm 1$ in Teilchen ohne Strangeness, z. B. $K \rightarrow \pi\pi$ (heute: Übergang $s \rightarrow u$)
 - Lange Lebensdauer durch **kleine Übergangswahrscheinlichkeit** für Prozesse mit $\Delta S = \pm 1$ in schwacher Wechselwirkung (heute: erklärt durch Quarkmischung)

- **Gell-Mann–Nishijima-Formel:** (zunächst) empirischer Zusammenhang zwischen ladungsartigen Quantenzahlen

$$Q = T_3 + \frac{B + S}{2} = T_3 + \frac{Y_S}{2}$$

- Heute: erklärt durch **Quarkinhalt** der Hadronen

mit Q Ladung, T_3 starker Isospin,
 B Baryonenzahl, S Strangeness
 $Y_S = B + S$ starke **Hyperladung**

Der „Eightfold Way“

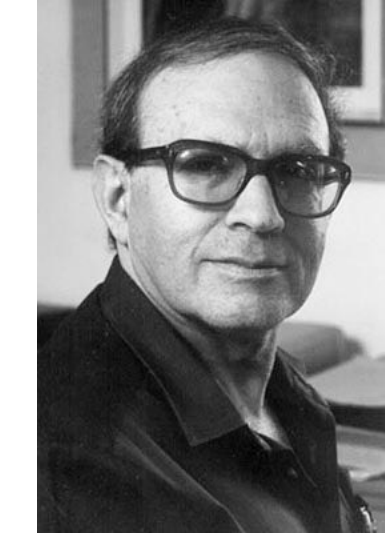
- Ab 1950er Jahre: viele Hadronen entdeckt („Teilchenzoo“)
- Ordnungsprinzip: **Symmetrie** (Gell-Mann; Ne'eman, ab 1961)
 - Isospin + Strangeness: Erweiterung der SU(2)-Symmetrie zur SU(3)
 - Beispiel: pseudoskalare Mesonen (π , K) als **Oktett** (Gruppentheorie: **adjungierte 8-Darstellung** der SU(3)-Gruppe)
 - Name aus Buddhismus: „Edler Achtfacher Pfad“

M. Gell-Mann

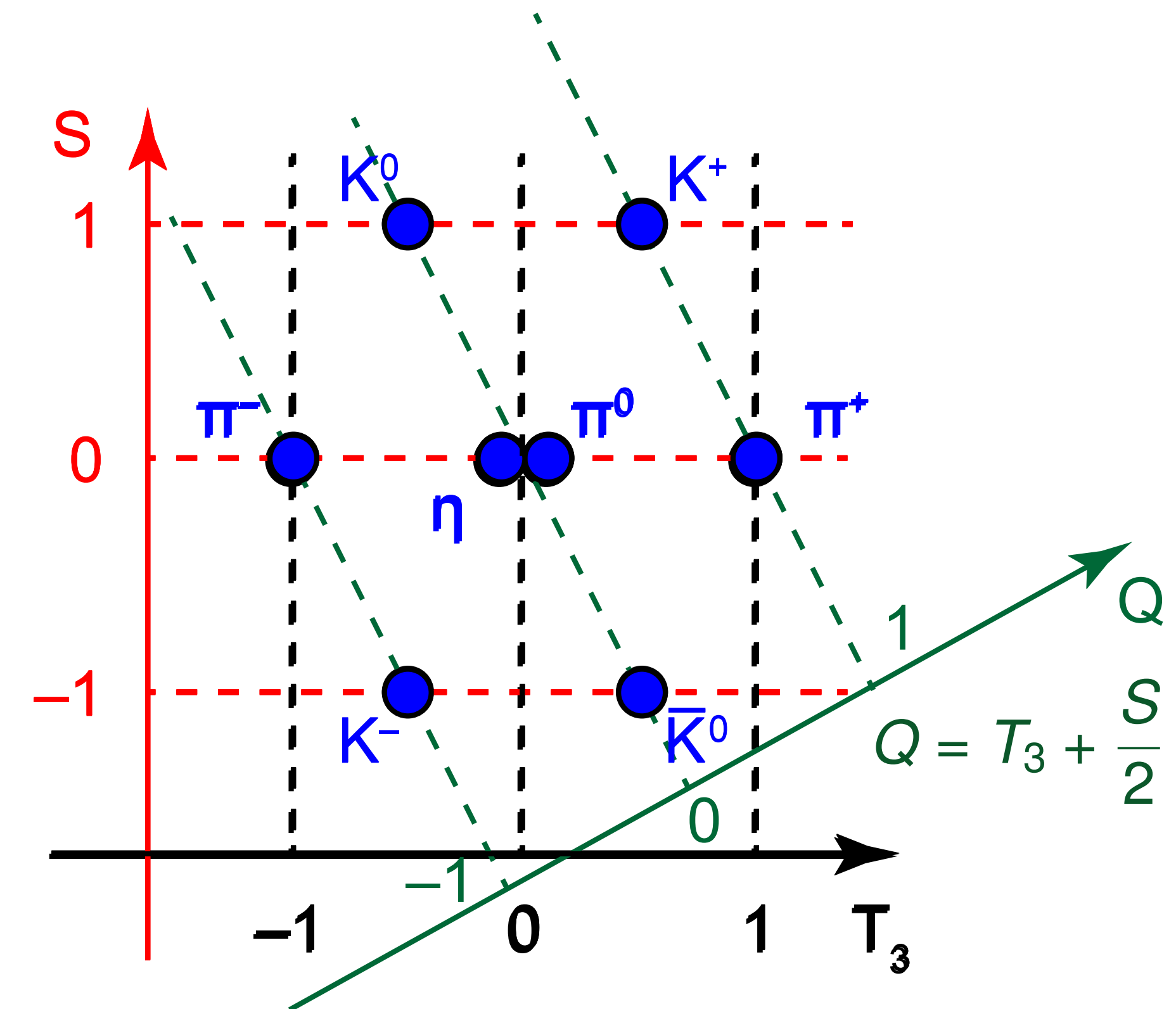


NobelPrize.org

Y. Ne'eman



knesset.gov.il



Quarks

Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.
But O, Wreneagle Almighty, wouldn't un be a sky of a lark
To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
And he hunting round for uns speckled trousers around by Palmerstown Park?
Hohohoho, moult Mark!
You're the rummest old rooster ever flopped out of a Noah's ark
And you think you're cock of the wark.
Fowls, up! Tristy's the spry young spark
That'll tread her and wed her and bed her and red her
Without ever winking the tail of a feather
And that's how that chap's going to make his money and mark!

aus James Joyce, Finnegans Wake, 1939

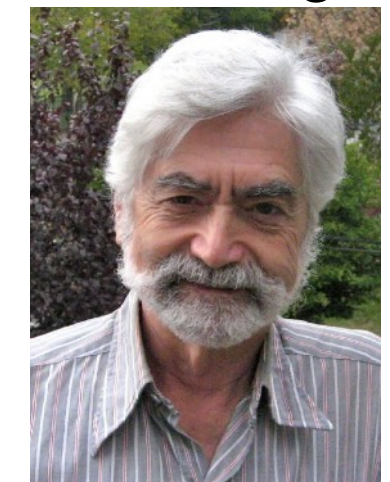
Das Quarkmodell

M. Gell-Mann

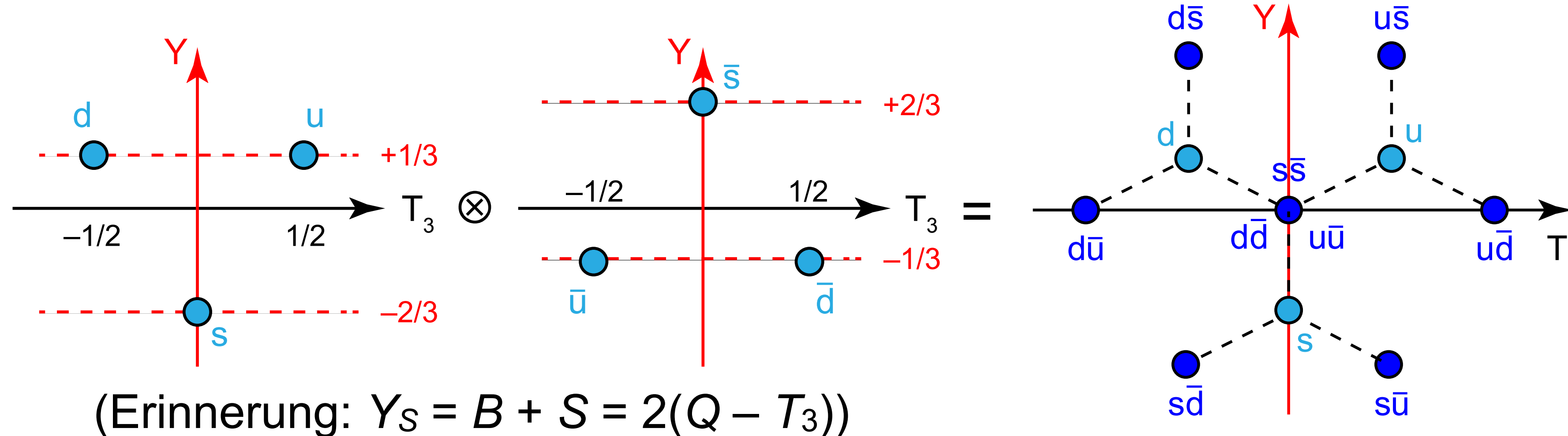


hep.caltech.edu

G. Zweig



ep-news.web.cern.ch



- **Quarks** = Erweiterung des Symmetrieprinzips für Hadronen (Gell-Mann 1964, unabhängig davon: Zweig 1964 → „Aces”)
 - Hadronen verhalten sich so, als ob sie aus **drei Quarks** (u, d, s) und deren **Antiquarks** aufgebaut sind (noch **keine** physikalische Realität)
 - Quarks/Antiquarks: fundamentale Darstellungen **3** und **$\bar{3}$** der SU(3)-Gruppe
 - Mesonen: **$3 \otimes \bar{3}$** , Baryonen: **$3 \otimes 3 \otimes 3$**

Mesonen-Multipletts

■ Pseudoskalare Mesonen ($J^P = 0^-$):

■ Spin-Singulett (1S_0): alle Spins $\downarrow\uparrow$

■ Gruppentheorie: $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 \rightarrow$ Oktett + Singulett

■ Zustände mit $T_3 = 0$ und $S = 0$:

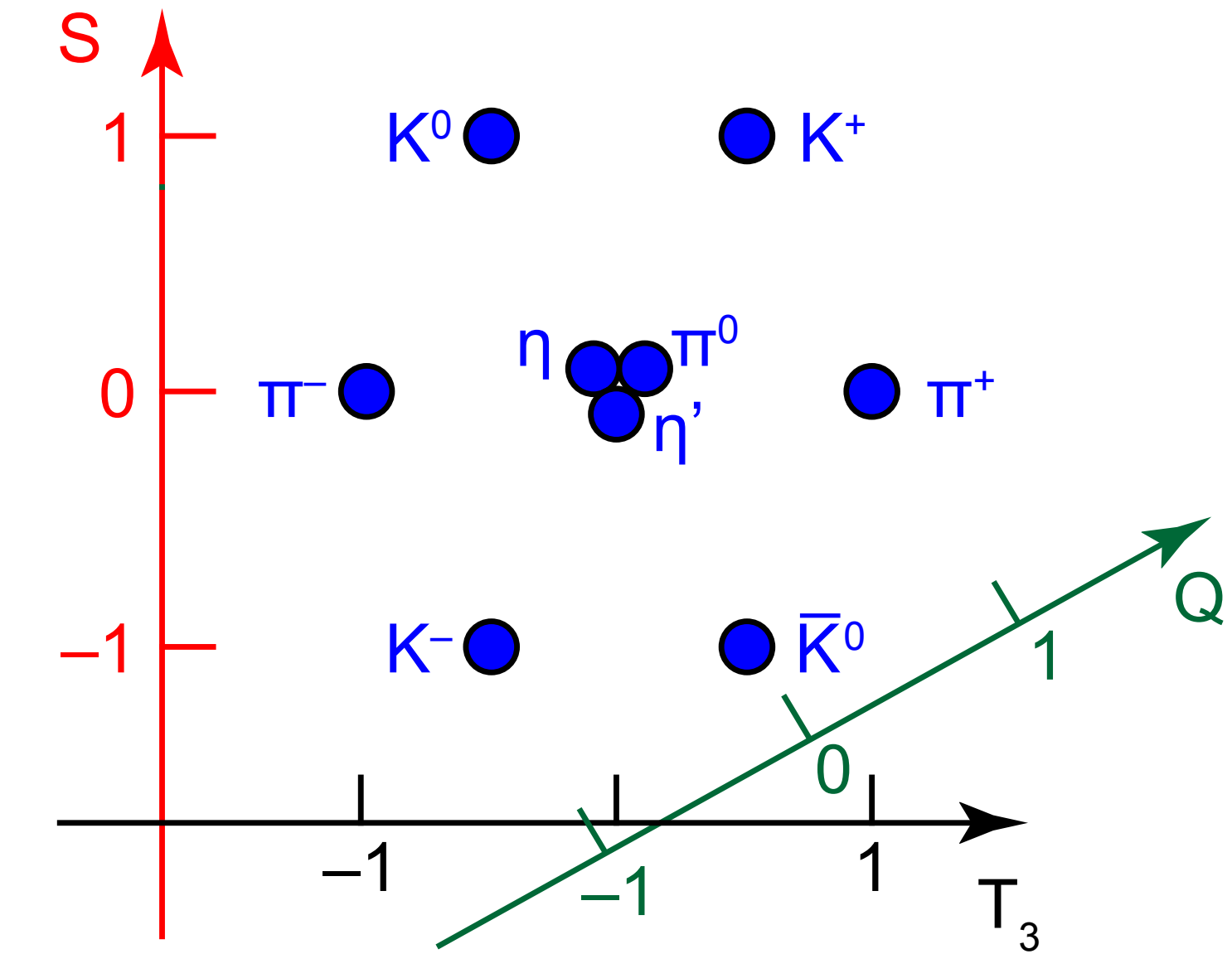
■ Neutrales Pion: $|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle)$

■ SU(3)-Oktett: $|\eta_8\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}}(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle - 2|s\bar{s}\rangle)$

■ SU(3)-Singulett: $|\eta_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle + |s\bar{s}\rangle)$

■ Singulett und Oktett haben dieselben Quantenzahlen
 $\rightarrow$ physikalische Teilchen = **Mischzustände**

$$\begin{pmatrix} |\eta\rangle \\ |\eta'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\eta_8\rangle \\ |\eta_1\rangle \end{pmatrix}$$



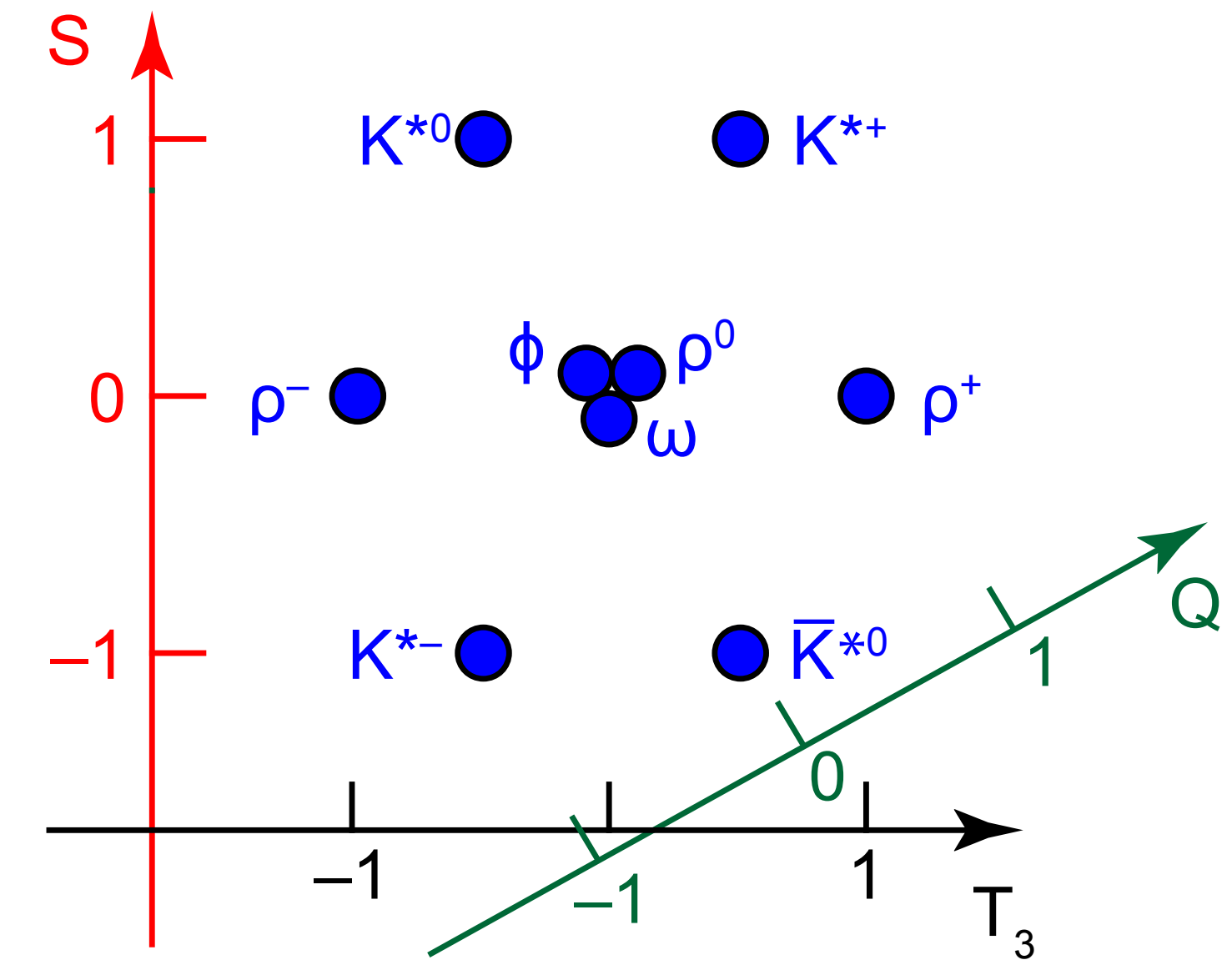
experimentell: **kleine**
Mischung, $\theta \approx -15^\circ$

Mesonen-Multipletts

- **Vektormesonen ($J^P = 1^-$):**
 - Spin-Triplett (3S_1): Spins $\uparrow\uparrow$
 - Flavor-Oktett und Flavor-Singulett analog zu pseudoskalaren Mesonen
- Zustände mit $T_3 = 0$ und $S = 0$:
 - Neutrales ρ -Meson: $|\rho^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle)$
 - Mischzustände: $\tan \theta = 1/\sqrt{2}$ („ideale Mischung“)
 - Zustände mit u/d und Zustände mit s **entkoppeln**

$$|\phi\rangle = -|s\bar{s}\rangle$$

$$|\omega\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle)$$

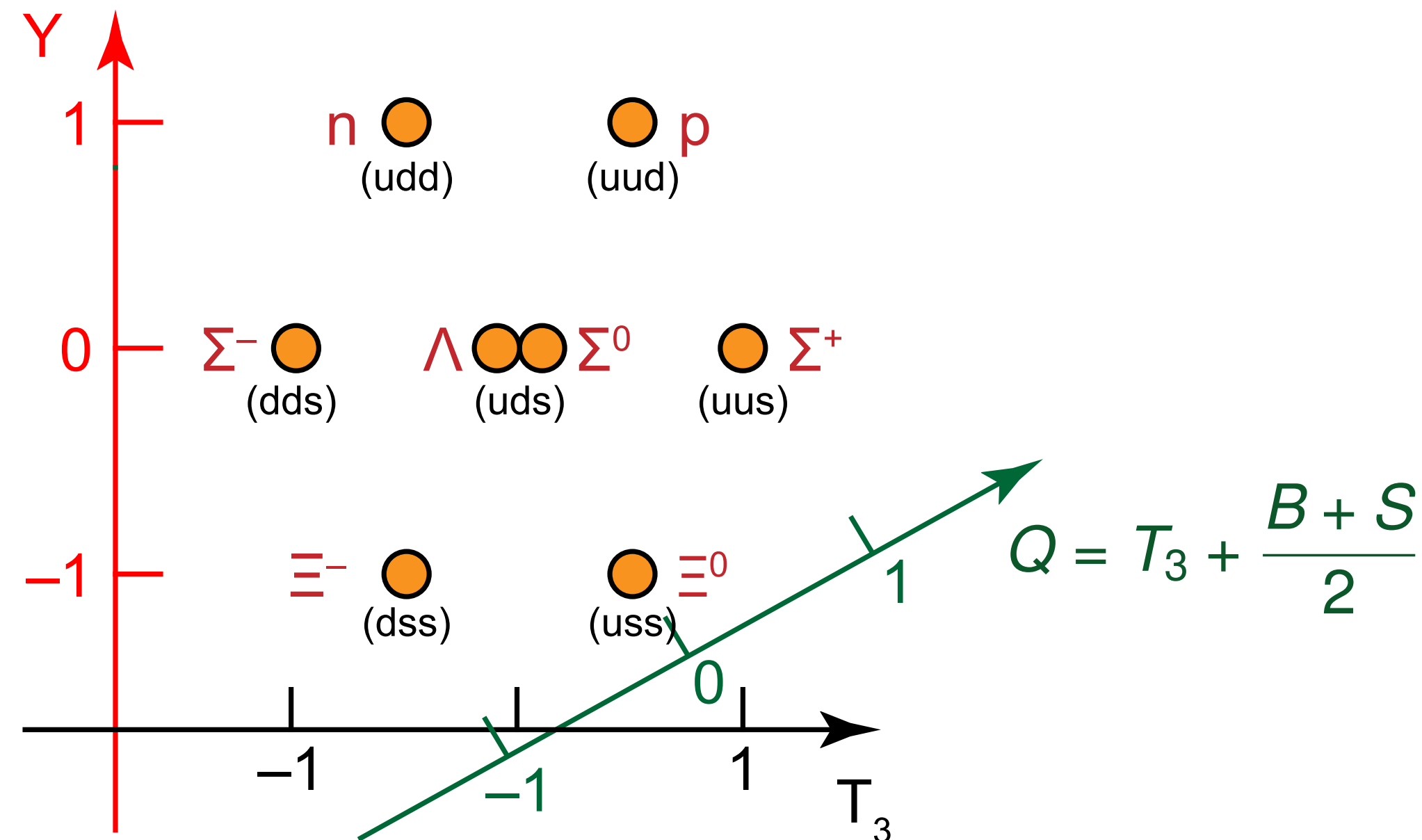


Baryonen-Multipletts

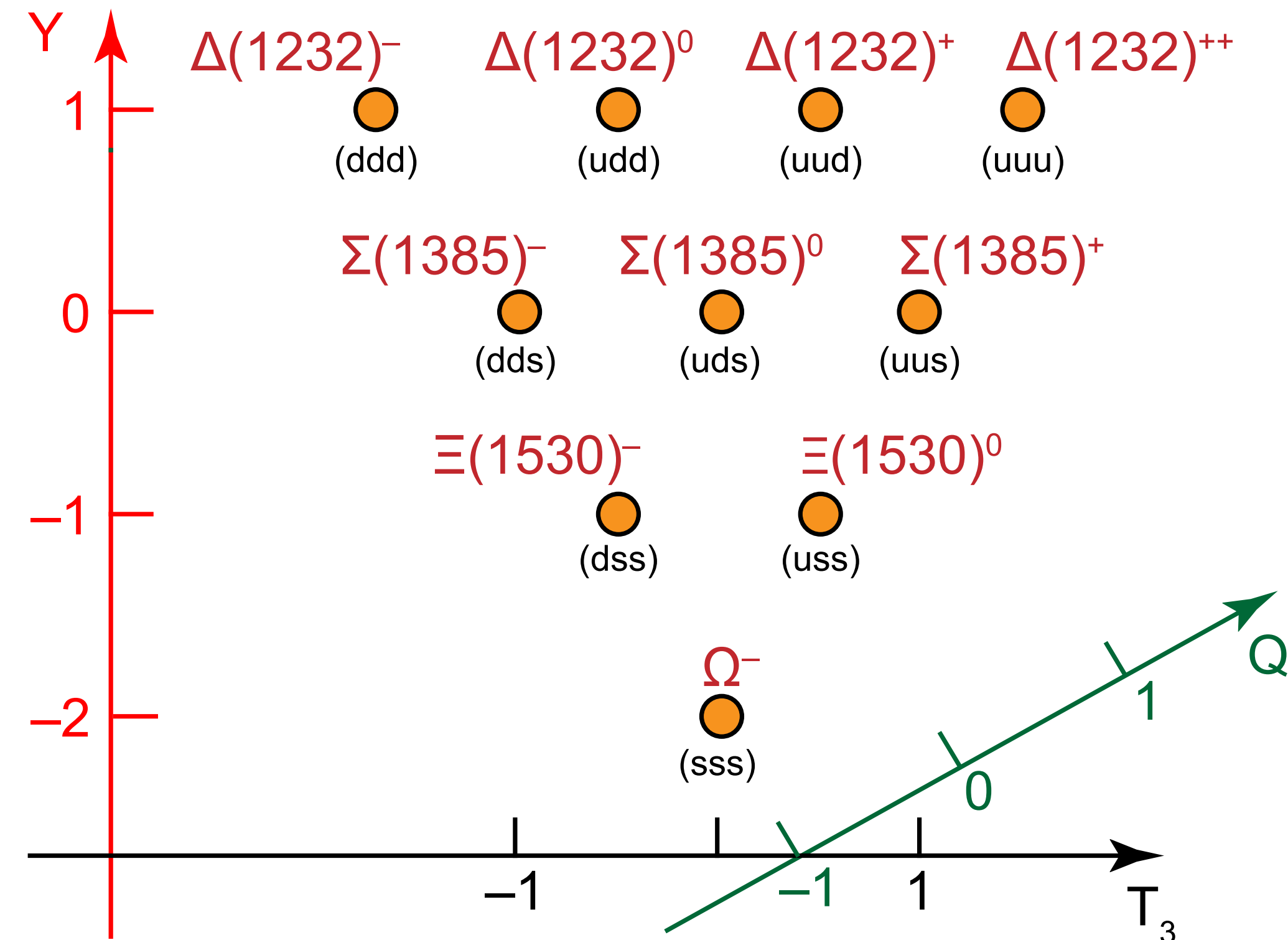
- Gruppentheorie: Konstruktion von Multipletts aus Fundamentaldarstellung für drei Quarks: $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$
- Pauli-Prinzip: Gesamtwellenfunktion von Baryonen (= Fermionen) **antisymmetrisch** unter Austausch zweier Quarks
 - Ortsanteil: betrachte nur Bahndrehimpuls $\ell = 0 \rightarrow$ immer **symmetrisch**
 - Heute bekannt: Farbanteil $\rightarrow$ immer **antisymmetrisch**
 - Spinanteil: abhängig von Kombination der drei Spins, $J = 3/2 (\uparrow\uparrow\uparrow)$ immer **symmetrisch**, $J = 1/2 (\uparrow\uparrow\downarrow)$ **gemischt** symmetrisch/antisymmetrisch
 - Flavor-Dekuplett (**10**) symmetrisch $\rightarrow$ kann mit $J = 3/2$ kombiniert werden
 - Flavor-Oktetts (**8**) gemischt $\rightarrow$ können mit $J = 1/2$ kombiniert werden

Baryonen-Multipletts

Baryonen-Oktett ($J = 1/2$)



Baryonen-Dekuplett ($J = 3/2$)



- Wichtige **Vorhersage** des Quarkmodells: neuer Zustand $|\Omega\rangle = |sss\rangle$, $m_\Omega \sim 1680 \text{ MeV}/c^2$ (ca. $150 \text{ MeV}/c^2$ mehr als m_Ξ) → **Entdeckung 1964**

Aufgabe 20

- Welche der folgenden Aussagen zum Quarkmodell sind korrekt?
 - A. Die starke Wechselwirkung erhält Flavorquantenzahlen, die schwache Wechselwirkung erlaubt Flavoränderungen.
 - B. Die geladenen Pionen bilden ein Isospin-Duplett.
 - C. Vektormesonen sind gebundene Quark-Antiquark-Zustände mit Spin 0 und negativer Parität.
 - D. Die Hyperladung ist die Summe aus Baryonenzahl und Flavorquantenzahl(en).
 - E. Im Quarkmodell sind Baryonen mit symmetrischer Spin- und symmetrischer Flavorwellenfunktion möglich.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:
https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

Flavorsymmetrie und Quarkmassen

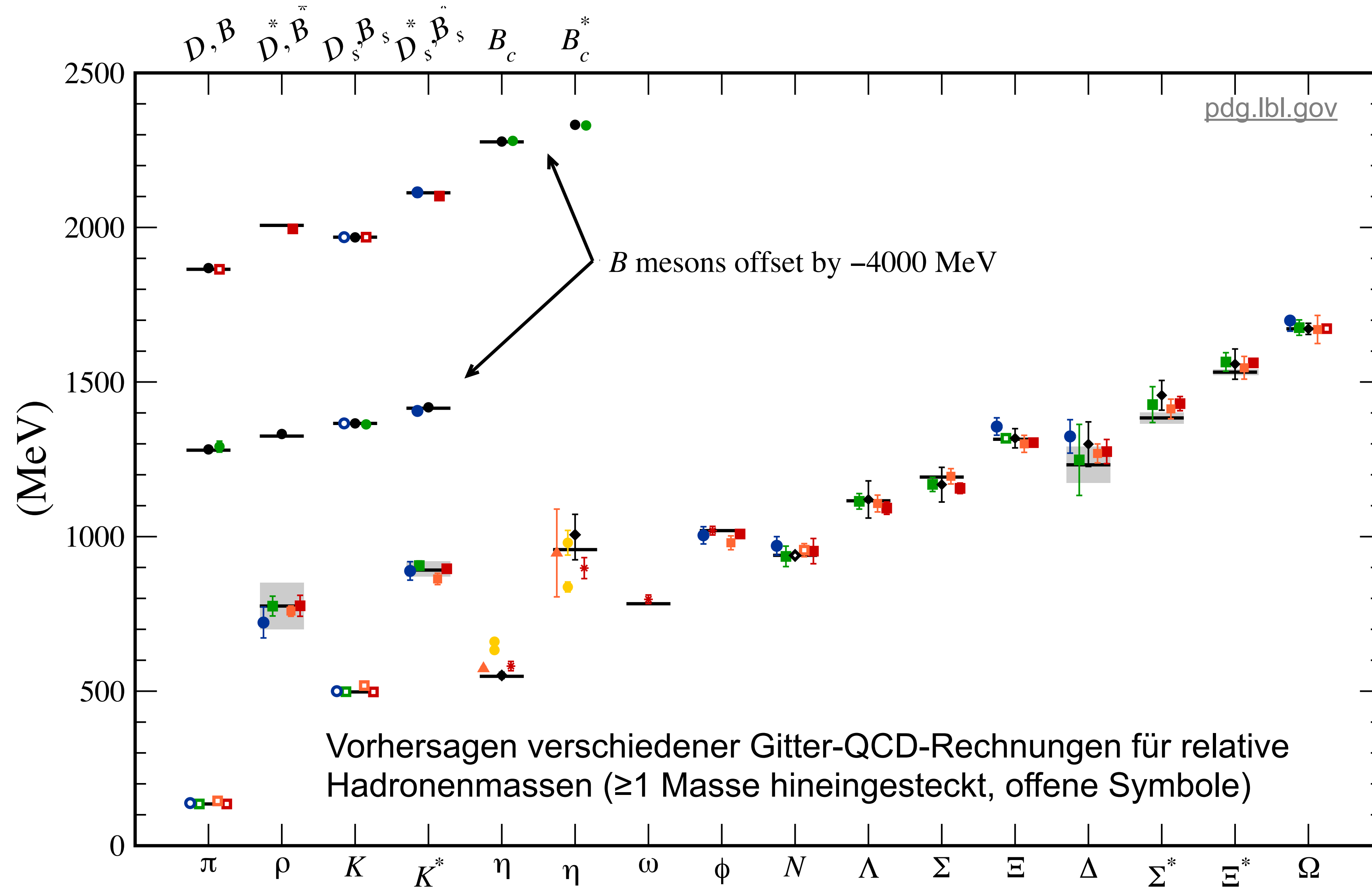
- Flavorsymmetrie: keine exakte Symmetrie in der Natur
 - Explizite **Brechung** durch **unterschiedliche Massen** der Quarks
 - Beispiel Flavor-SU(3): Brechung durch deutliche größere (effektive) Masse des **s-Quarks** im Vergleich zu u- und d-Quark
- Definition: **Quarkmassen**
 - Freie Fermionen: Masse = **Polmasse** (grob: Masse in Dirac-Gleichung, Lagrange-Dichte, Feynman-Diagrammen, ...)
 - Aber: Quarks nur im Limit sehr hoher Energien quasi-frei (vgl. Partonmodell) → Masse „nackter“ Quarks: **Stromquarkmasse** (engl.: current quark mass)
 - QCD-Störungstheorie: Quarkmassen abhängig von Energieskala μ → „**laufende**“ **Quarkmassen** $m = m(\mu)$

Flavorsymmetrie und Quarkmassen

PDG 2018	u	d	s	c	b	t
Masse (MeV/c ²)	$2.16^{+0.49}_{-0.26}$	$4.67^{+0.48}_{-0.17}$	93^{+11}_{-5}	1270 ± 20	4180^{+30}_{-20}	172.900 ± 400
	MS-bar-Masse: $m^{\overline{\text{MS}}}(\mu = 2 \text{ GeV})$			$m^{\overline{\text{MS}}}(m_c)$	$m^{\overline{\text{MS}}}(m_b)$	~Polmasse

- Massen der Hadronen aus leichten Quarks (u, d, s): viel größer als Stromquarkmassen
 - Nukleonen: $m_N \approx 940 \text{ MeV}/c^2 \approx 100 (2m_u + m_d) \rightarrow$ **Konstituentenquarkmasse** = effektive Masse von u, d: $m_{u,p} \approx m_{d,p} \approx 300 \text{ MeV}/c^2$
 - Vergleich von $m_\pi \approx 140 \text{ MeV}/c^2$ und $m_K \approx 500 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow m_{s,K} \approx 360 \text{ MeV}/c^2$
 - Physikalischer Grund: Großteil der Masse stammt aus **Bindungsenergie** der QCD-Wechselwirkung (Gluonen und Seequarks)
 - Schwere Quarks (c, b, t): Stromquarkmasse dominant

Hadronenmassen aus Gitter-QCD



Kurze Zusammenfassung

- **Teilchenzoo:** Entdeckung vieler Hadronen seit späten 1940er Jahren, insbesondere „seltsame“ Teilchen
- Ordnungsprinzip: **Flavorsymmetrie**
 - Startpunkt: **Isospinsymmetrie** $SU(2)$ zwischen Nukleonen
 - Neue Quantenzahl **Strangeness** → Erweiterung auf Flavor- $SU(3)$
- Weitergehende Erklärung: **Quarkmodell**
 - Hadronen verhalten sich so, als ob sie aus drei Konstituenten u , d , s (und deren Antiquarks) aufgebaut sind (noch keine physikalische Realität)
 - Teilchenzoo = $SU(3)$ -Multipletts für Mesonen und Baryonen
 - Erfolg: Vorhersage des Ω^- = Baryon aus drei Strange-Quarks

Kurze Zusammenfassung

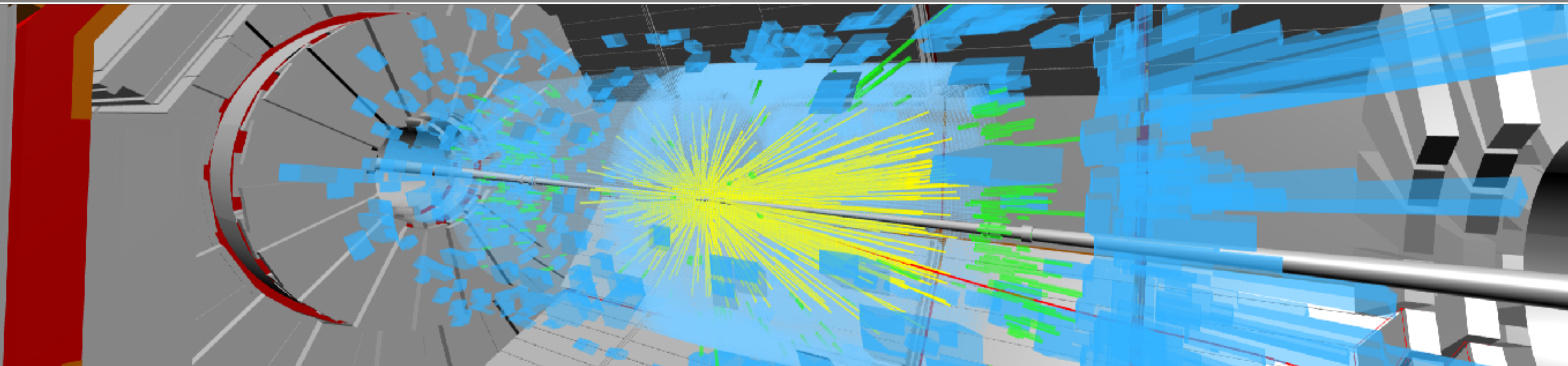
- Flavorsymmetrie nicht exakt in der Natur: **Brechung** durch unterschiedliche **Quarkmassen**
 - Massen der Quarks in zugrunde liegender Theorie: **Stromquarkmassen**
= Massen als frei angenommener „nackter“ Quarks
 - Masse der Hadronen: **Konstituentenquarkmassen**
→ effektive Masse unter Berücksichtigung der QCD-Bindungsenergie

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 11. Vorlesung (Teil 2)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Auflösung Aufgabe 20

- Welche der folgenden Aussagen zum Quarkmodell sind korrekt?
- A. Die starke Wechselwirkung erhält Flavorquantenzahlen, die schwache Wechselwirkung erlaubt Flavoränderungen.
 - B. Die geladenen Pionen bilden ein Isospin-Duplett.
 - C. Vektormesonen sind gebundene Quark-Antiquark-Zustände mit Spin 0 und negativer Parität.
 - D. Die Hyperladung ist die Summe aus Baryonenzahl und Flavorquantenzahl(en).
 - E. Im Quarkmodell sind Baryonen mit symmetrischer Spin- und symmetrischer Flavorwellenfunktion möglich.

Kurze Zusammenfassung

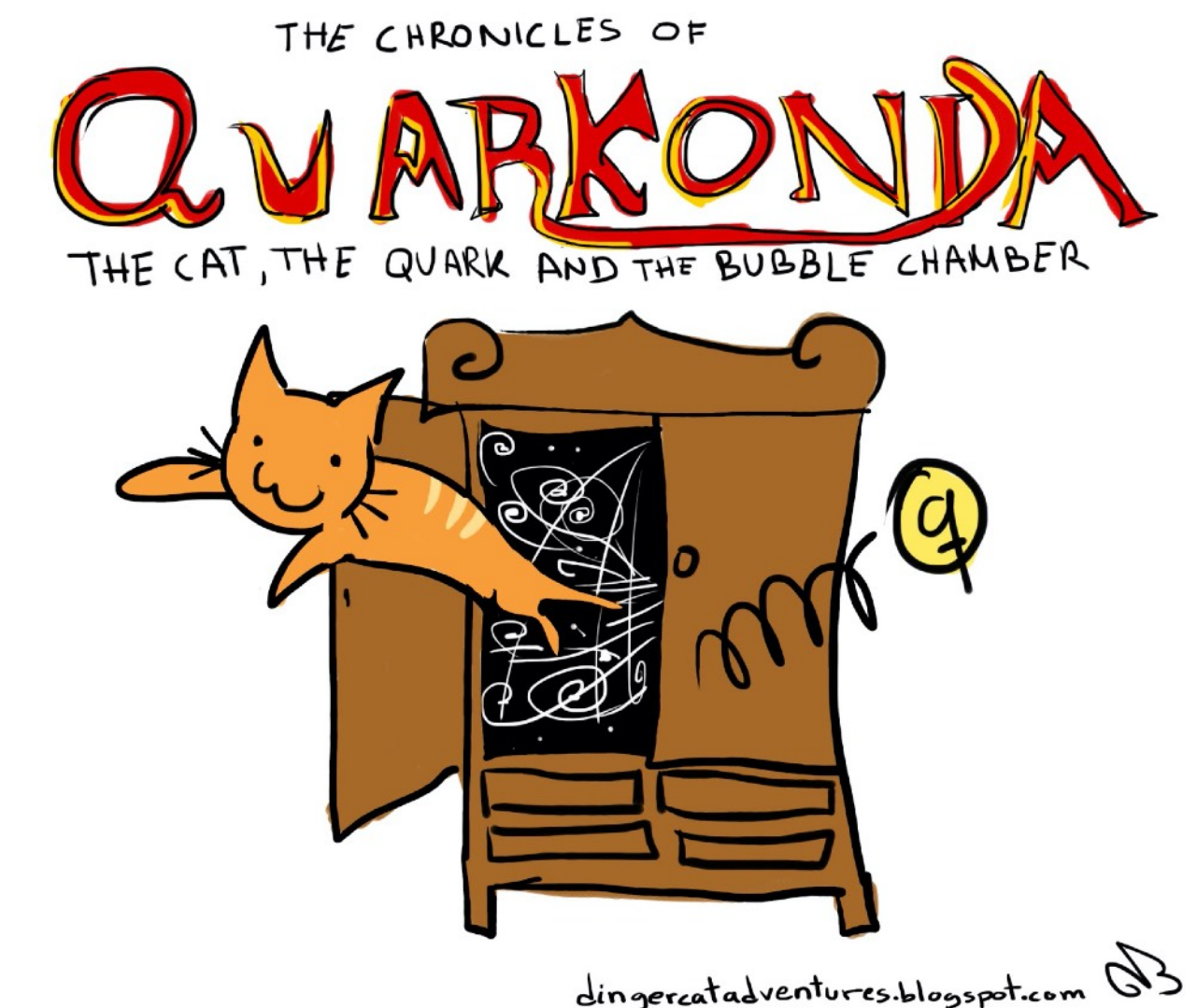
- **Teilchenzoo:** Entdeckung vieler Hadronen seit späten 1940er Jahren, insbesondere „seltsame“ Teilchen
- Ordnungsprinzip: **Flavorsymmetrie**
 - Startpunkt: **Isospinsymmetrie** $SU(2)$ zwischen Nukleonen
 - Neue Quantenzahl **Strangeness** → Erweiterung auf Flavor- $SU(3)$
- Weitergehende Erklärung: **Quarkmodell**
 - Hadronen verhalten sich so, als ob sie aus drei Konstituenten u , d , s (und deren Antiquarks) aufgebaut sind (noch keine physikalische Realität)
 - Teilchenzoo = $SU(3)$ -Multipletts für Mesonen und Baryonen
- Quarkmassen: **Stromquarkmassen** (Massen „nackter“ Quarks) und **Konstituentenquarkmassen** (effektive Massen in Hadronen)

Kapitel 6.2

Quarkonium

Überblick: Quarkonium

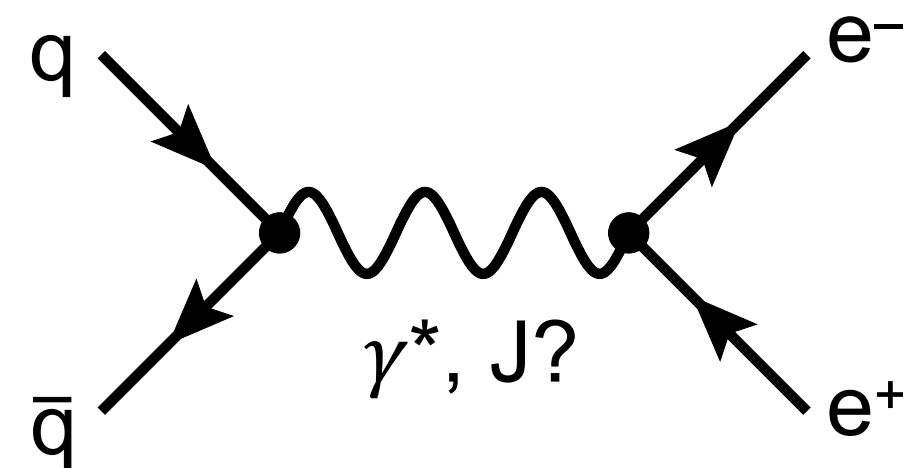
- Schwere Quarks: Charm, Bottom, Top
 - **Paarweise** Erzeugung in starker oder elektromagnetischer Wechselwirkung
→ Flavorquantenzahlen Charm C , Beauty B' , Truth T erhalten
 - Mesonen mit Charm- oder Bottom-Quarks: **lange Lebensdauer**
 $O(10^{-13}$ bis 10^{-12} s) → Zerfälle in schwacher Wechselwirkung
 - Ausnahme Top-Quark: **extrem kurze Lebensdauer** (ca. $5 \cdot 10^{-25}$ s)
→ **keine** gebundenen Zustände
- Gebundenes $q\bar{q}$ -System: **Quarkonium**
 - **Charmonium** ($c\bar{c}$) und **Bottomonium** ($b\bar{b}$)
 - QCD-Analogon von Positronium, „Atom“ der starken Wechselwirkung
 - Ein Quark bewegt sich im Potenzial des anderen
→ Rückschlüsse auf **QCD-Potenzial** (→ später)



dingercatadventures.blogspot.com
dingercatadventures.blogspot.de

Entdeckung des J

- Proton-Synchrotron AGS (BNL):
 - 28-GeV-Protonen auf Be-Target: „Breitbandstrahl“ von Partonen
 - **MIT-Experiment 598** (S. Ting et al.): magnetisches Doppelarmspektrometer mit MWPC, Cherenkovzähler, Bleiglas-ECAL
 - $p + \text{Be} \rightarrow e^+ + e^- + X$:



Rekonstruktion der **invarianten Masse** des e^+e^- -Paars $\rightarrow$ **Resonanzen?**

S. C. C. Ting (丁肇中)



[NobelPrize.org](https://www.nobelprize.org)

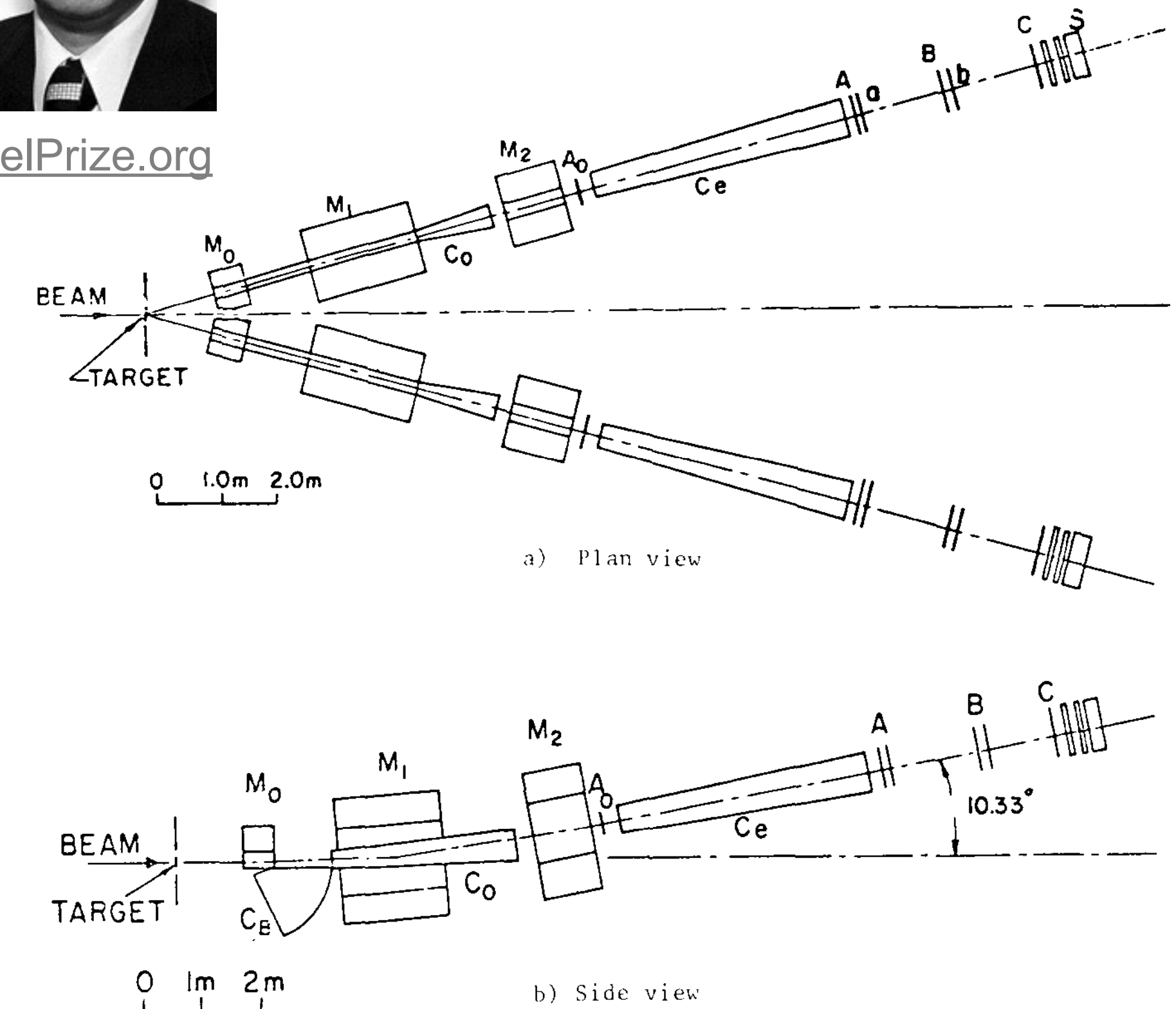


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental set-up for the double-arm spectrometer used in our discovery of the J particle. M_0 , M_1 , and M_2 are dipole magnets; A_0 , A, B, and C are 8000-wire proportional chambers; a and b are each 8×8 hodoscopes; S designates three banks of lead-glass and shower counters; C_B , C_0 , and C_e are gas Čerenkov counters.

[NobelPrize.org](https://www.nobelprize.org)

Entdeckung des ψ

- e^+e^- -Collider SPEAR (SLAC):

- Schwerpunktsenergie durchstimmbar:

$$\sqrt{s} = 2,6 \text{ GeV} - 4,8 \text{ GeV}$$

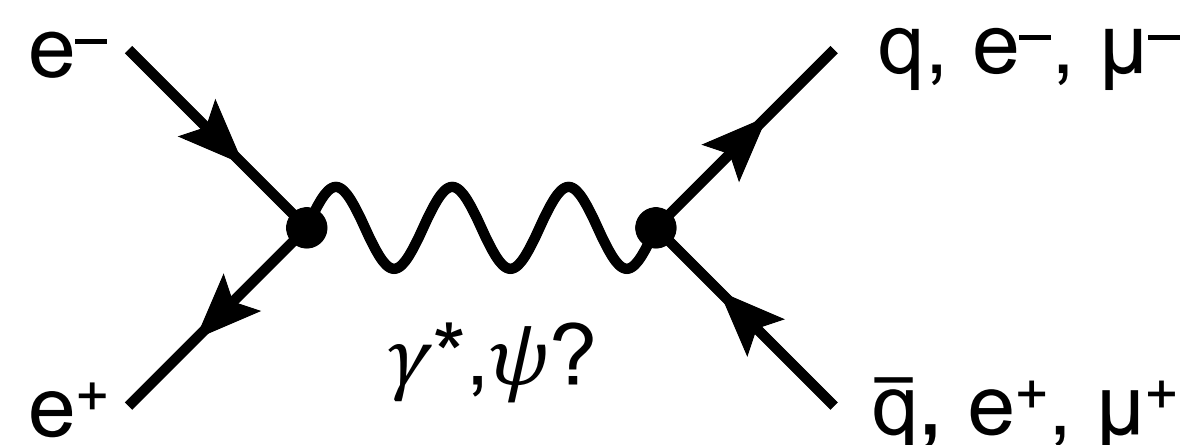
→ hohe Energieauflösung

- **MARK I** (B. Richter et al.):

Funkenkammern, Blei-Szintillator-ECAL und Szintillationszähler in Solenoidmagnet, Myonsystem aus Funkenkammern

- Suche nach **Resonanzen** in

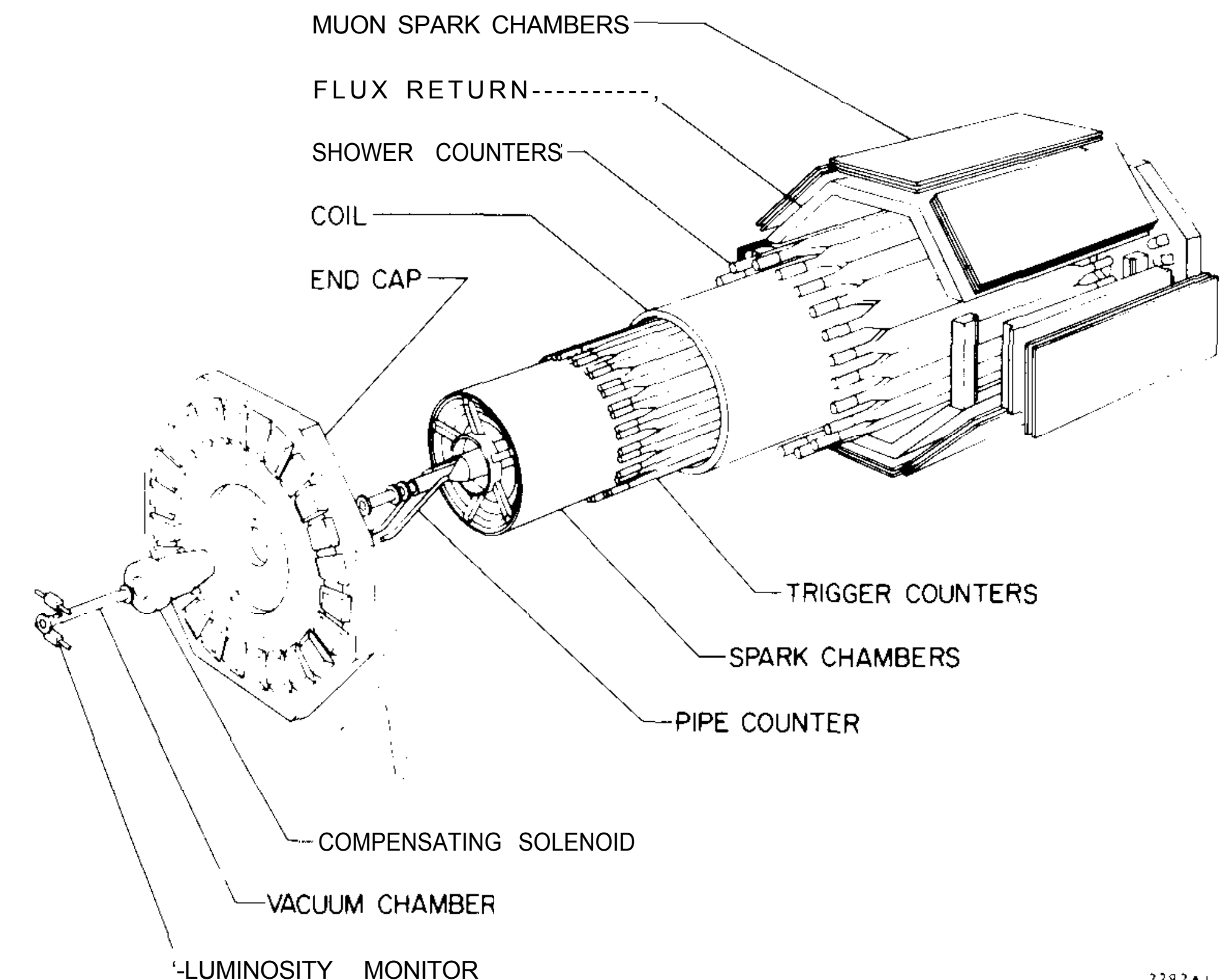
$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{Hadronen}, \mu^+\mu^-, e^+e^-$$



B. Richter



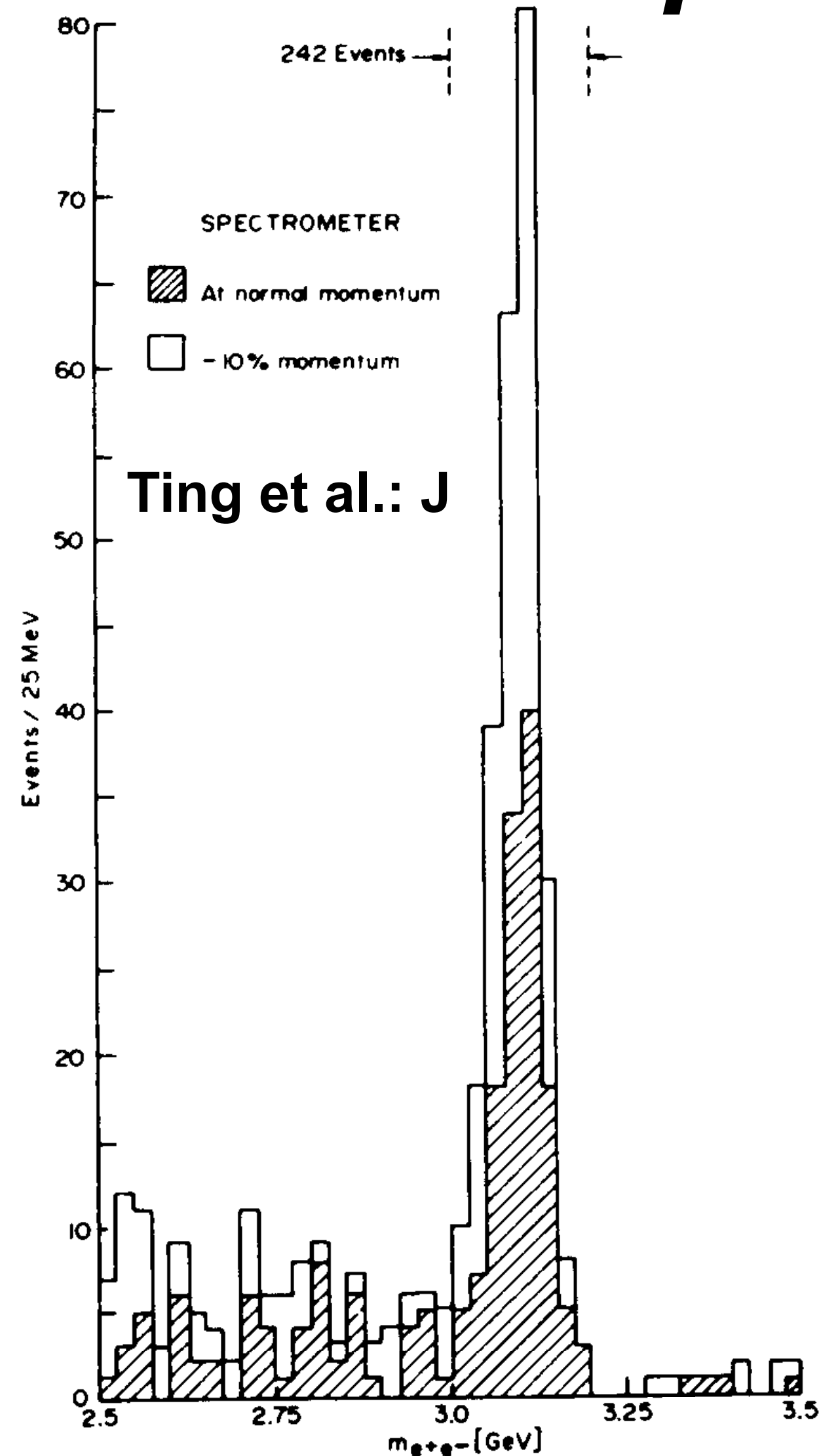
NobelPrize.org



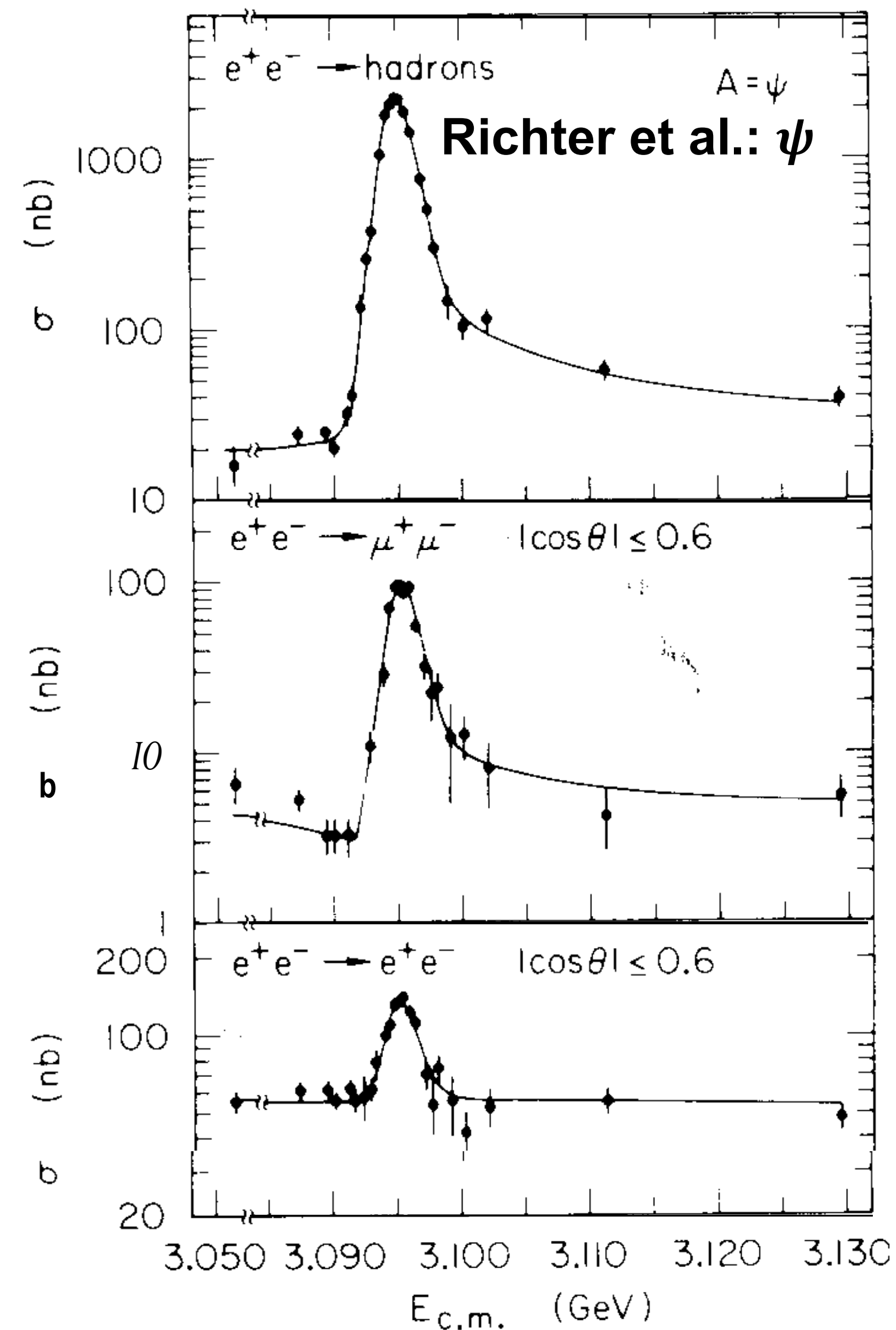
2. An exploded view of the SLAC-LBL magnetic detector.

NobelPrize.org

Signatur des J/ψ



[NobelPrize.org](https://www.nobelprize.org)

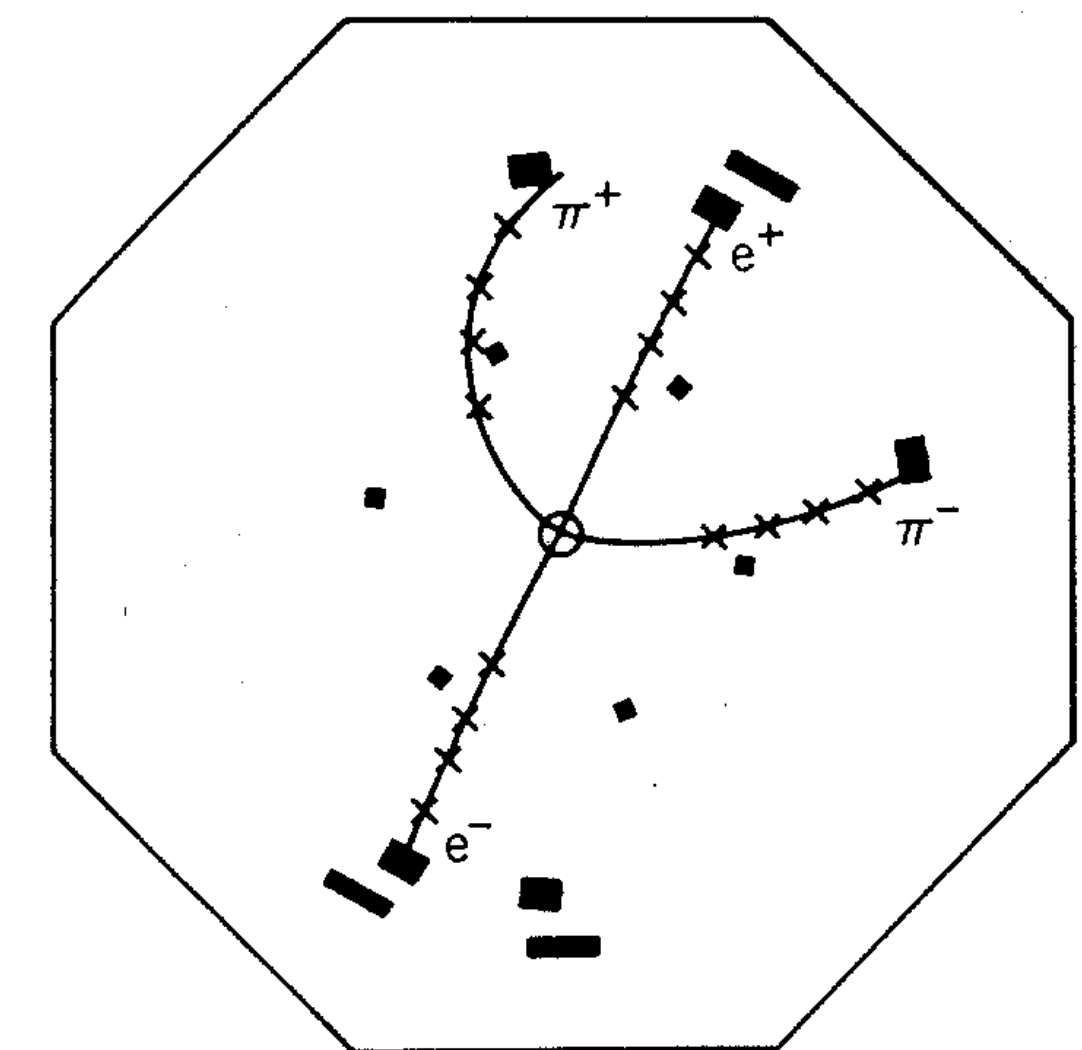


[NobelPrize.org](https://www.nobelprize.org)

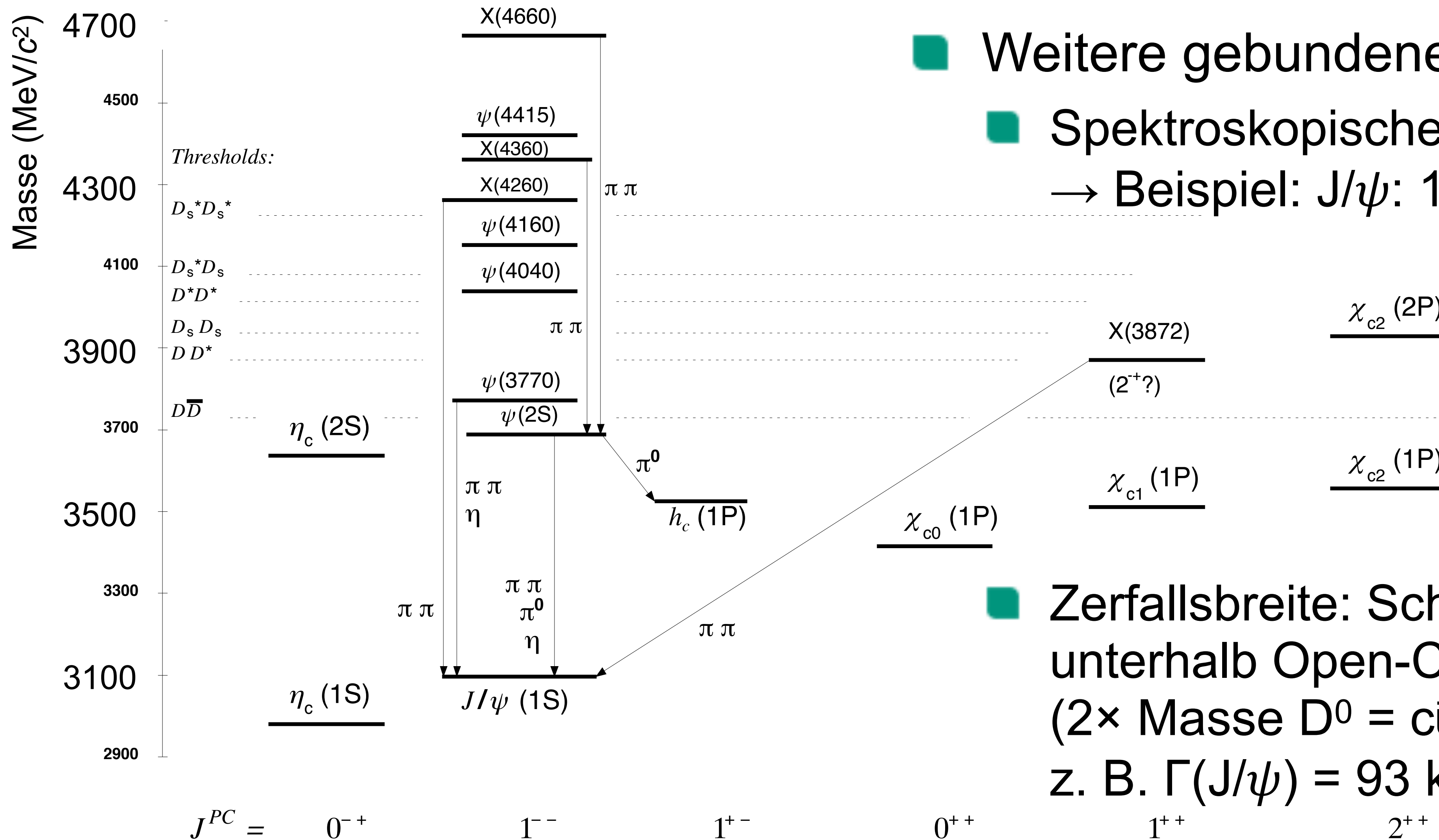
Novemberrevolution

- **Quarkmodell** (Gell-Mann; Zweig 1964)
→ **viertes Quark** postuliert (Glashow, Iliopoulos, Maiani = GIM 1970)
- **November 1974:**
 - Gemeinsame Ankündigung der Entdeckung eines **neues Teilchens J** (BNL) bzw. ψ (SLAC) → heute: **Doppelname J/ ψ**
 - Zwei Wochen später: Entdeckung einer **weiteren Resonanz ψ'** am SLAC, heute $\psi(2S)$
 - Theoretische Interpretation: **gebundener $c\bar{c}$ -Zustand**
(Appelquist, Politzer, [PRL 34, 43](#); de Rújula, Glashow, [PRL 34, 46](#))
- „Novemberrevolution“: historisch wichtigster Schritt zur Etablierung von **Quarks als physikalische Realität**

$$\psi(2S) \rightarrow e^+ e^- \pi^+ \pi^-$$



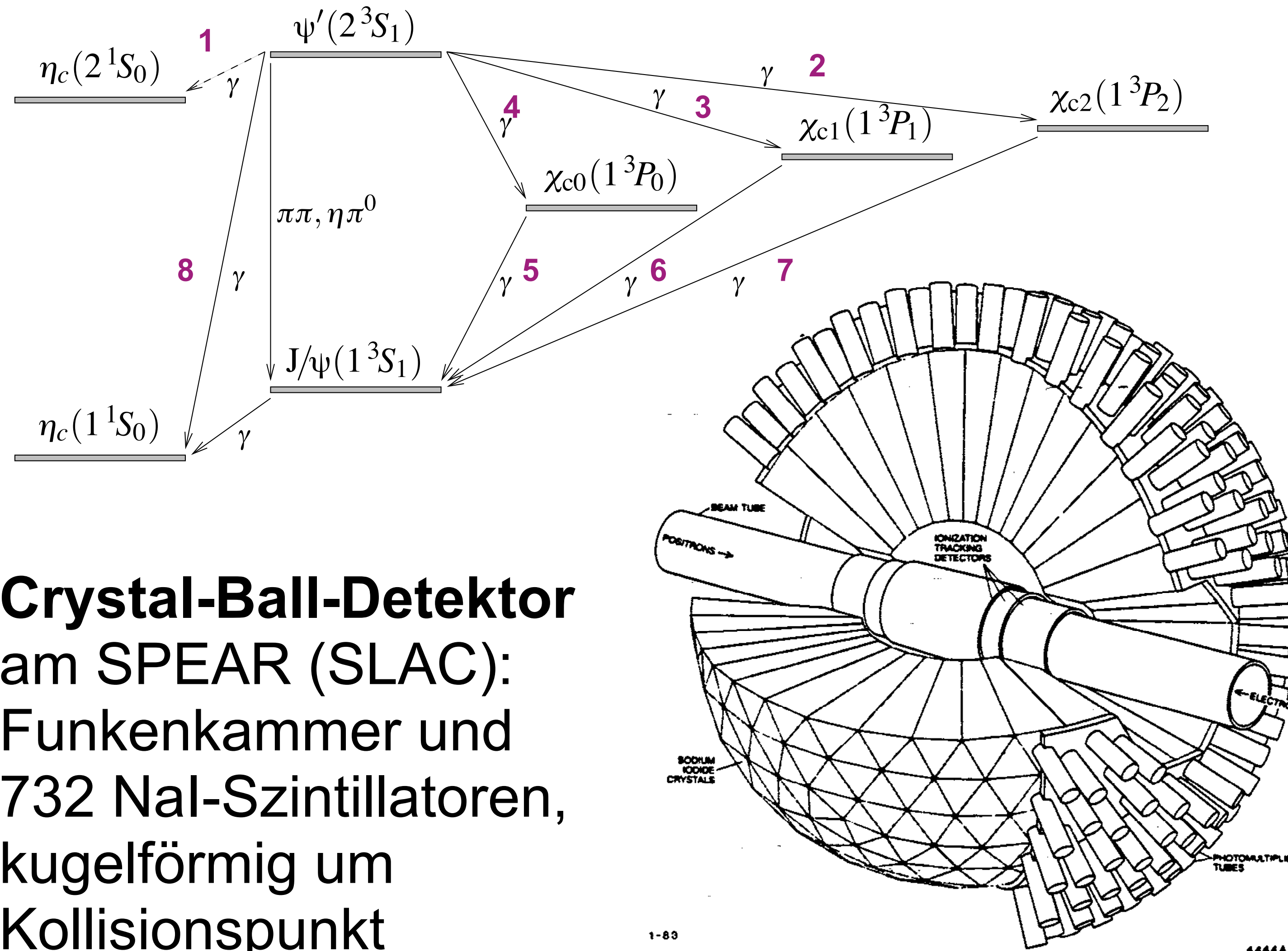
Charmonium-Termschema



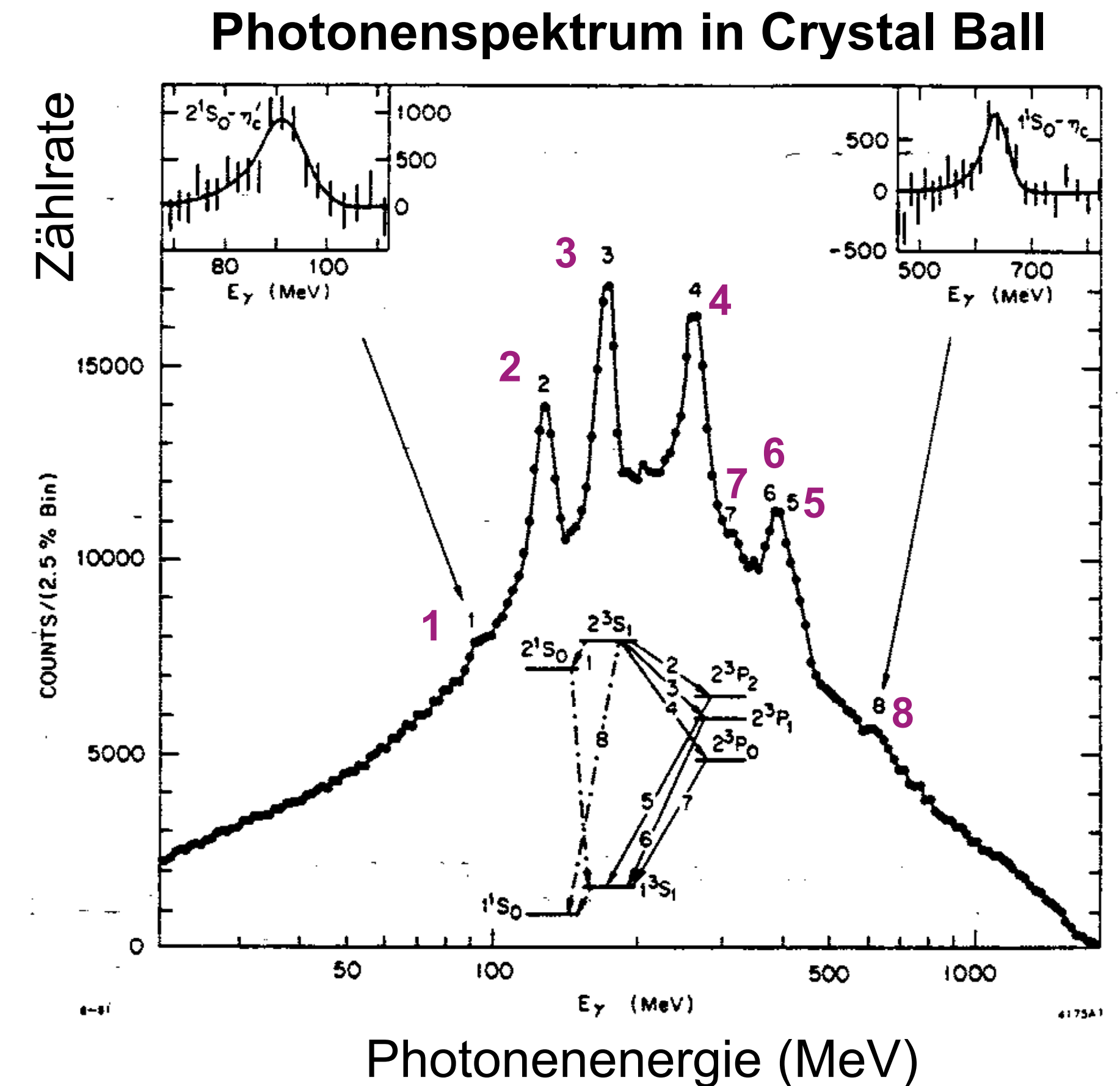
- Weitere gebundene $c\bar{c}$ -Zustände
- Spektroskopische Notation: $n^{2s+1}\ell_J$
→ Beispiel: J/ψ : 1^3S_1

- Zerfallsbreite: Schmale Resonanzen unterhalb Open-Charmschwelle ($2 \times \text{Masse } D^0 = c\bar{u}$),
z. B. $\Gamma(J/\psi) = 93 \text{ keV}/c^2$

Charmonium-Spektroskopie



Crystal-Ball-Detektor
am SPEAR (SLAC):
Funkenkammer und
732 NaI-Szintillatoren,
kugelförmig um
Kollisionspunkt



Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 33 (1983) 143

Aufgabe 21

- Welche der folgenden Aussagen zu Quarkonia sind korrekt?
 - A. Das J/ψ ist eine Mischung aus zwei Zuständen mit denselben Quantenzahlen, daher der Doppelname.
 - B. Die im MIT-Experiment 598 gemessene Breite der J/ψ -Resonanz ist durch Effekte der Detektorauflösung dominiert.
 - C. Am AGS konnte die Energie des Protonenstrahls eingestellt werden, so dass die Schwerpunktsenergie für $q\bar{q} \rightarrow e^+e^-$ präzise bekannt war.
 - D. Die J/ψ -Resonanz besitzt dieselben Quantenzahlen wie das Photon.
 - E. Die Bindungsenergie von Quark und Antiquark im J/ψ kommt hauptsächlich durch die Coulombanziehung dieser Teilchen zustande.

- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:
https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

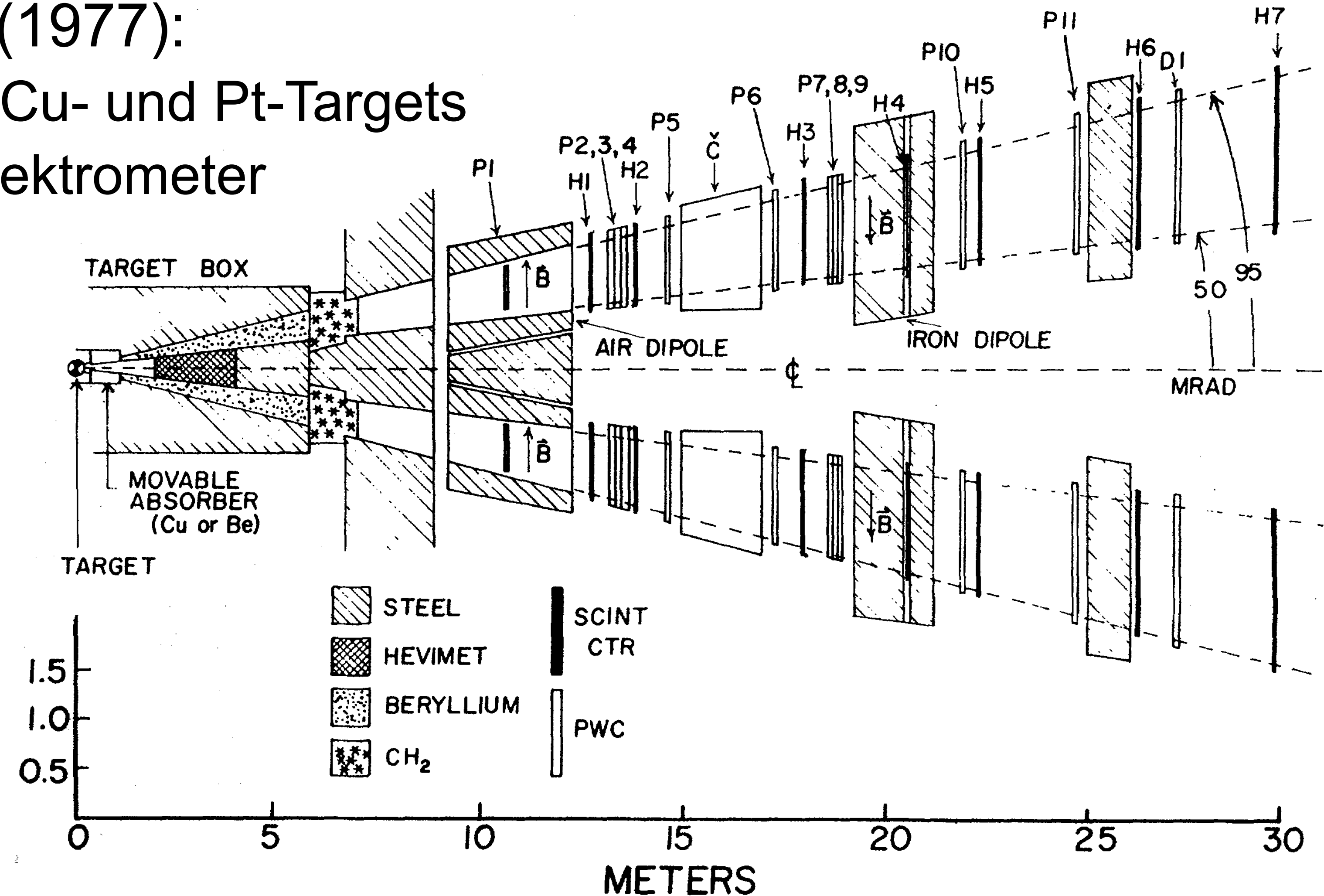
Entdeckung des Upsilon

- Fermilab Proton Center (1977):
 - 400-GeV-Protonen auf Cu- und Pt-Targets
 - Detektor: Doppelarmspektrometer (Lederman et al.)

L. M. Lederman



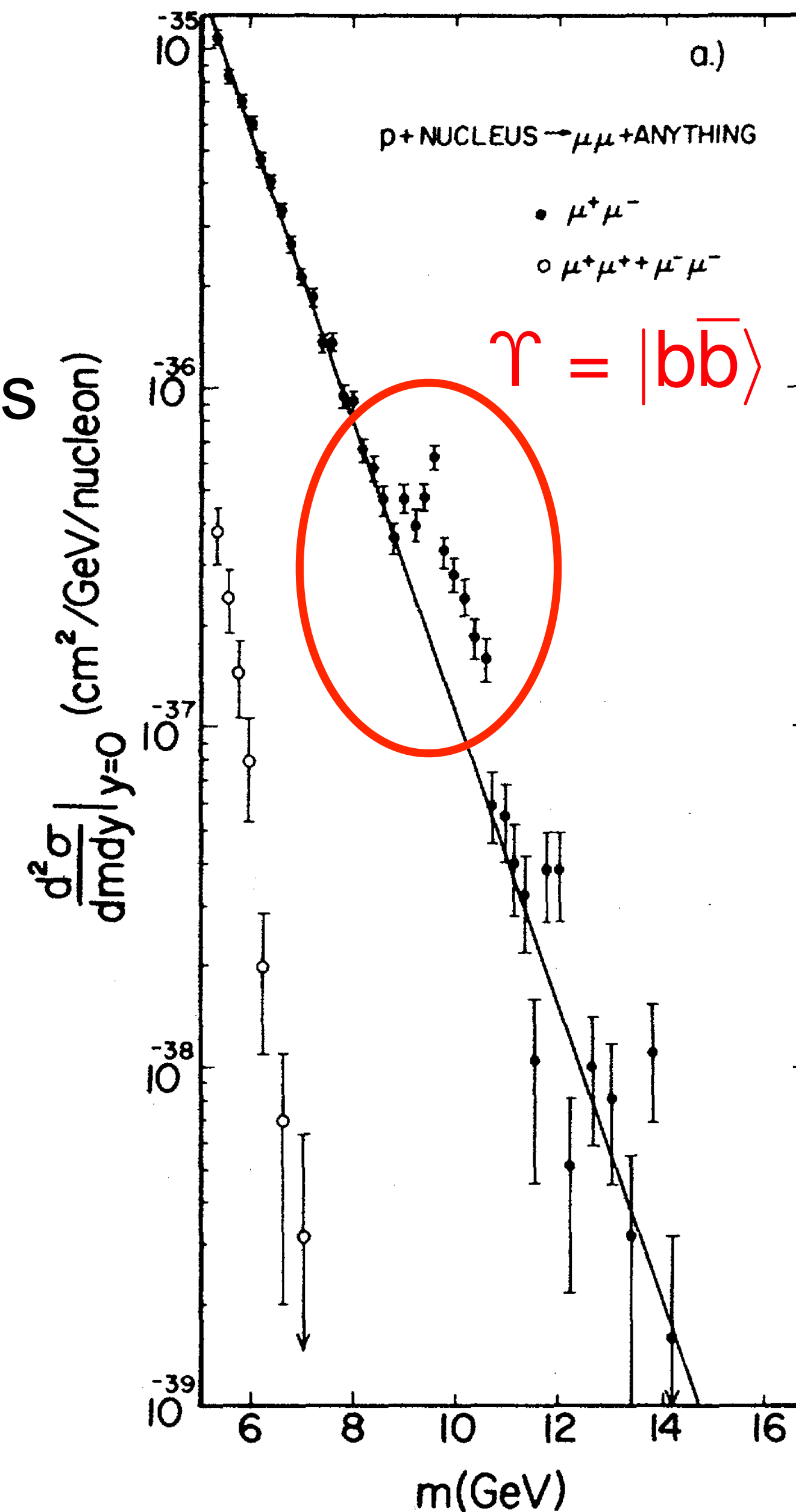
FNAL



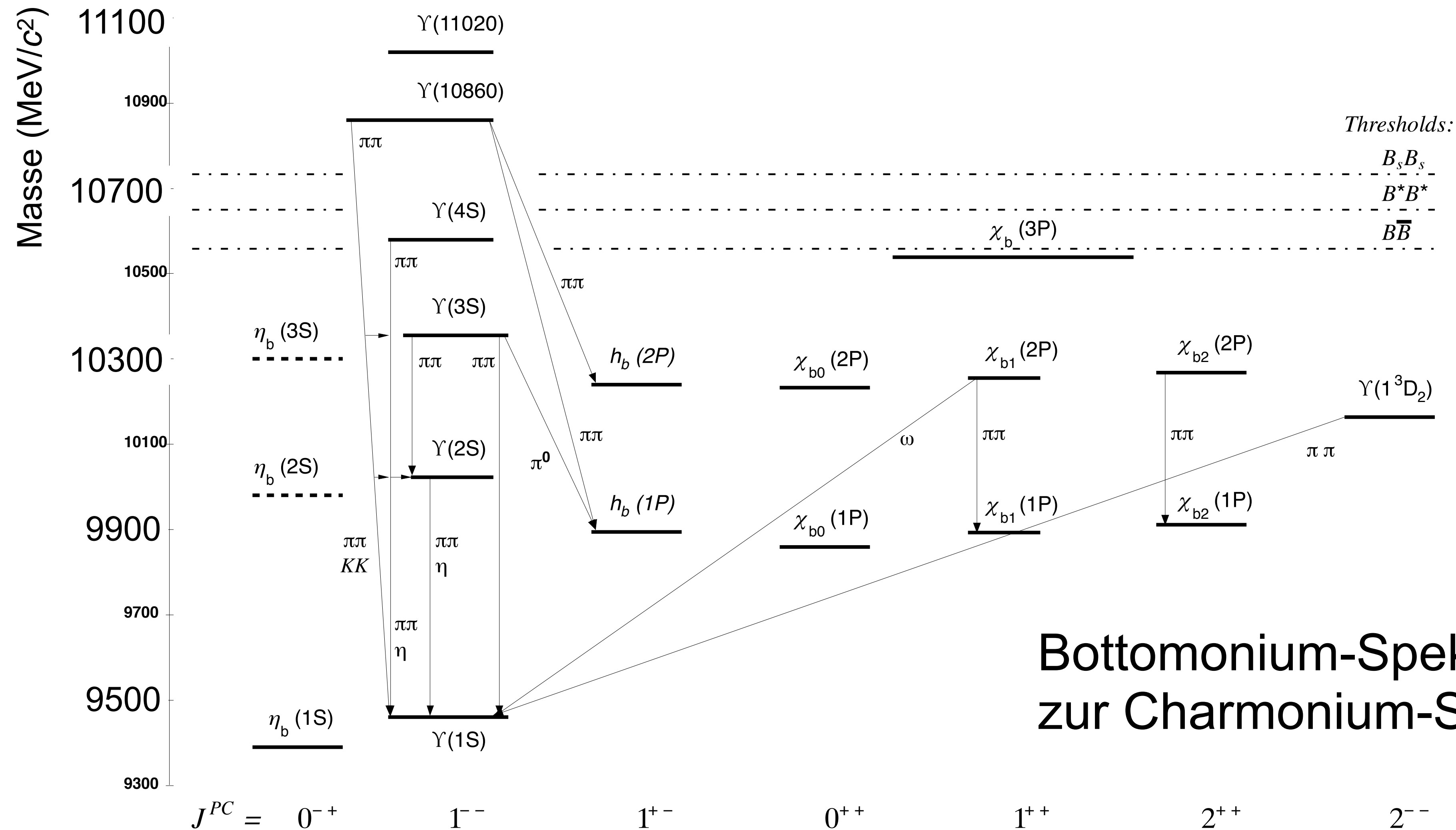
Phys. Rev. Lett. 39 (1977) 252

Entdeckung des Upsilon

- Fermilab Proton Center (1977):
 - 400-GeV-Protonen auf Cu- und Pt-Targets
 - Detektor: Doppelarmspektrometer (Lederman et al.)
 - Signatur: **Resonanz** in invarianter Masse von $\mu^+\mu^-$



Bottomonium-Termschema



Bottomonium-Spektroskopie analog zur Charmonium-Spektroskopie

and for the first time as a narrow Υ annihilations.^{3,4} We now re-
sults from a scan of the center-of-mass energy $10.46 \text{ GeV} < W < 10.64 \text{ GeV}$ at
SLAC. The data were gathered with the large magnetic spectrometer.
A cylindrical proportional wire drift chamber forms the track detector, surrounded by an aluminum solenoid. Outside the solenoid are
containing planar drift chambers, time-of-flight counters, and electromagnetic
calorimeters. Surrounding the detector is an iron hadron filter with muon
detectors for muon detection. The trigger system required three charged tracks
in coincidence with two time-of-flight measurements in separate octants.
Hadronic events were selected by requiring at least three charged tracks forming a vertex within $\pm 8 \text{ cm}$ of the interaction region and within $\pm 2.5^\circ$ of the beam axis, and a total charged track energy of $\geq 3 \text{ GeV}$. A subtraction, typical of hadronic collisions, by use of the observed background was made for events not coming from Υ annihilations.

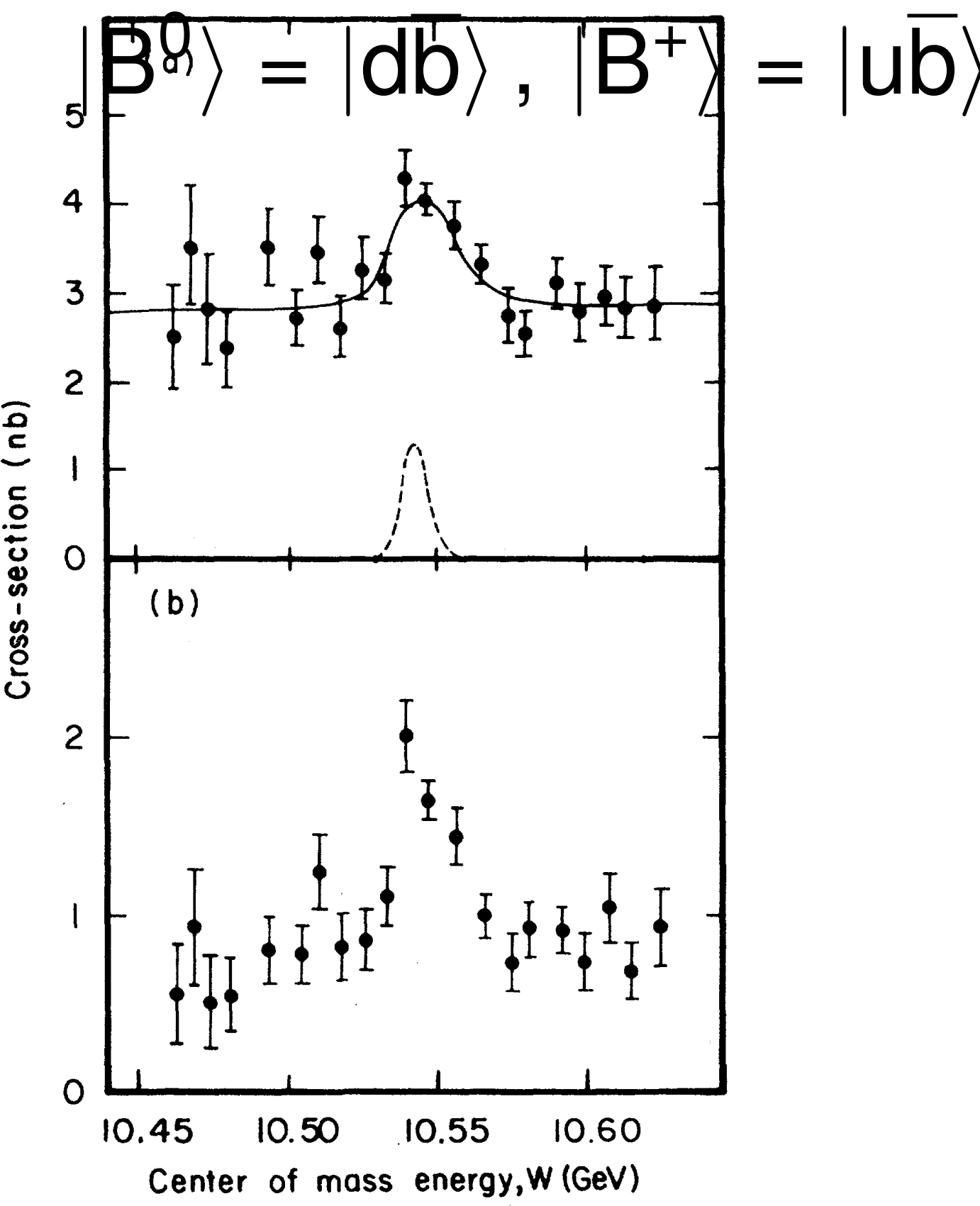
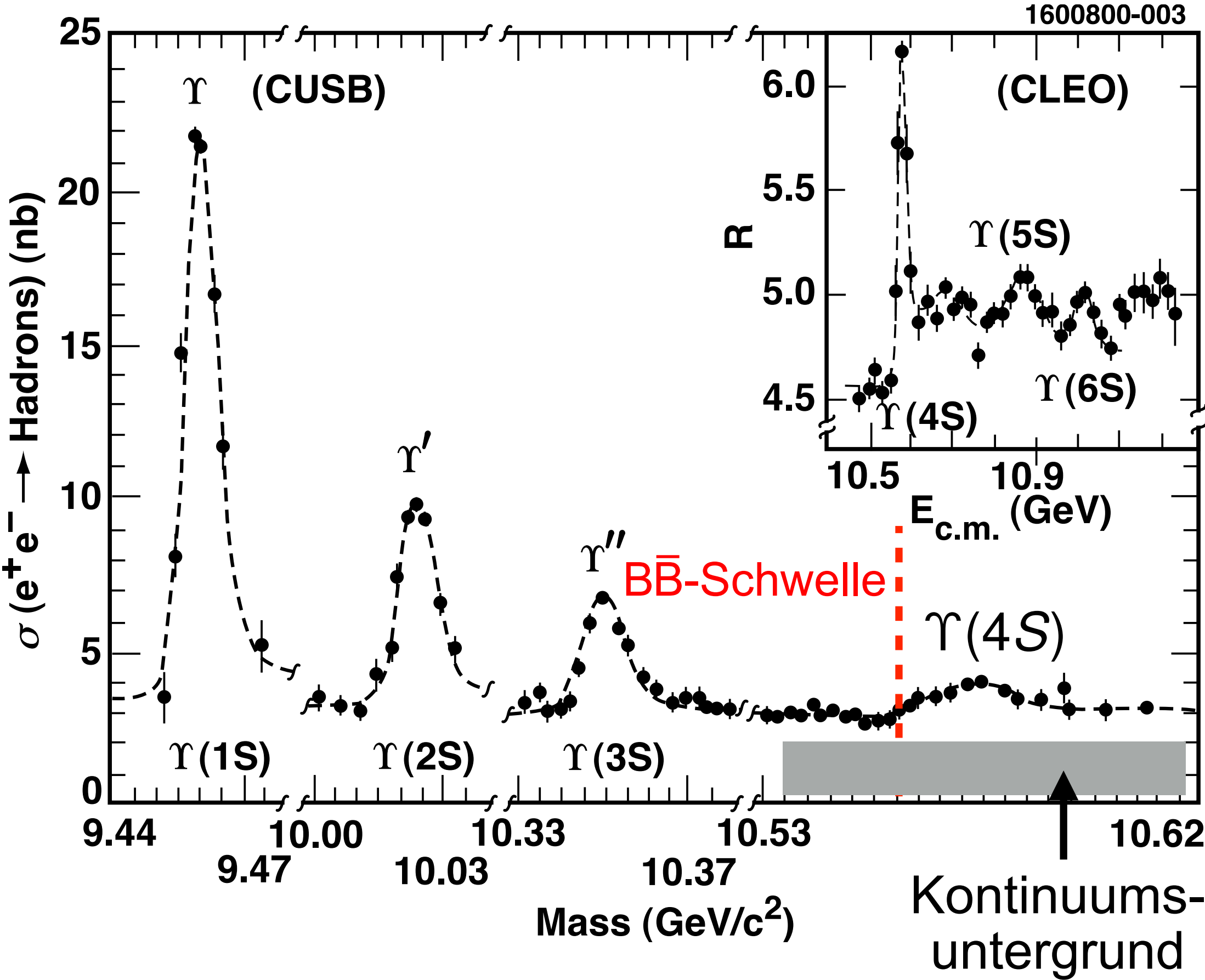


FIG. 1. Hadronic cross sections corrected for acceptance, as a function of center-of-mass energy, W . There is an additional overall systematic error of $\pm 15\%$, arising mainly from the uncertainty in the detector acceptance. (a) Total hadronic cross section

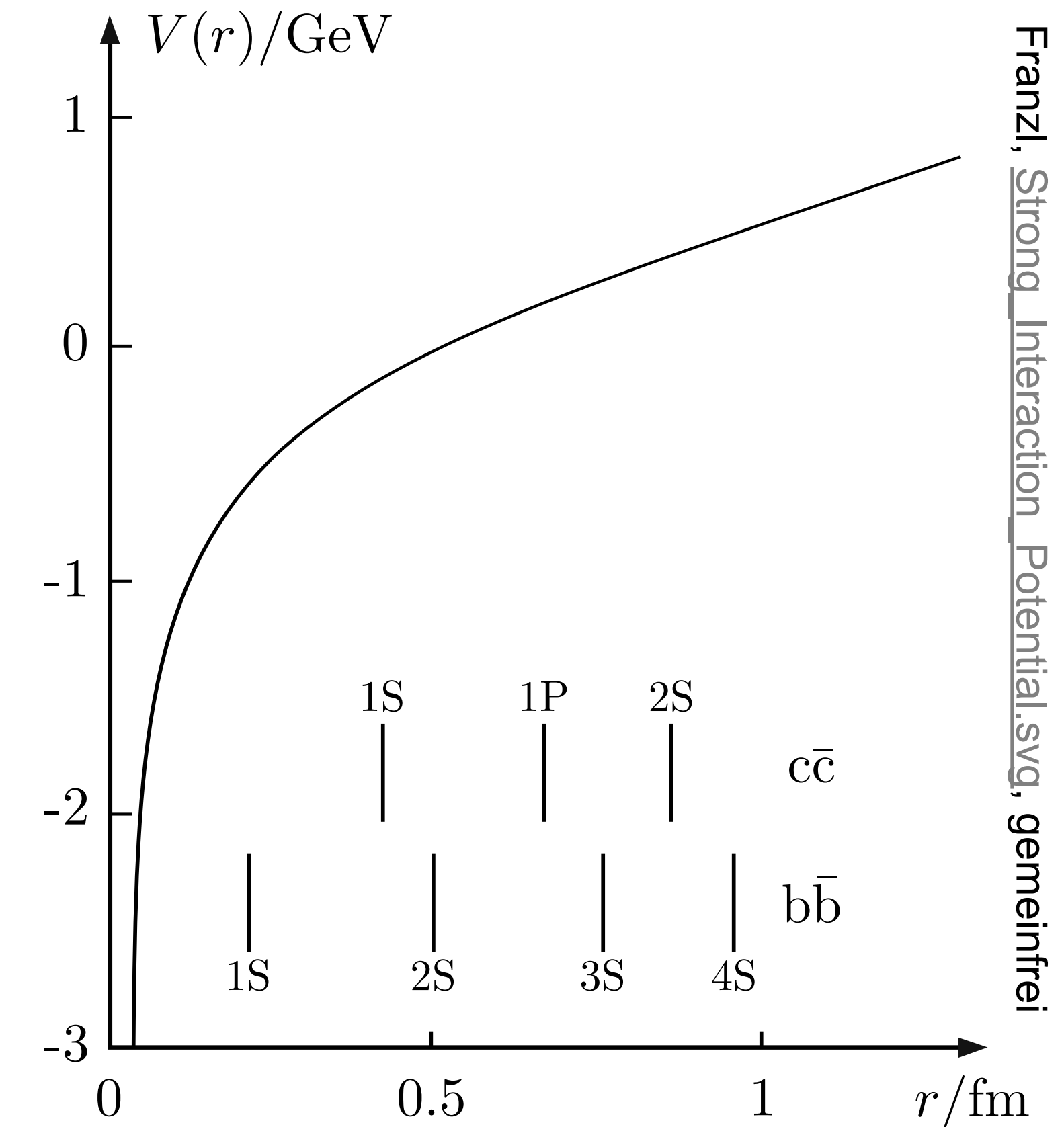
1 gezielter Erzeugung von
 $B \rightarrow B\bar{B}$ und Nachweis



Statisches QCD-Potenzial

- Gebundene $c\bar{c}$ - und $b\bar{b}$ -Zustände:
 - $n = 1, 2$: Ähnlichkeit mit Positronium, $E_n \sim 1/n^2$
 - Bessere Übereinstimmung bei $b\bar{b}$, da nicht-relativistische Näherung für relative Geschwindigkeit besser erfüllt (Virialtheorem)
- Ansatz: **Cornell-Potenzial**

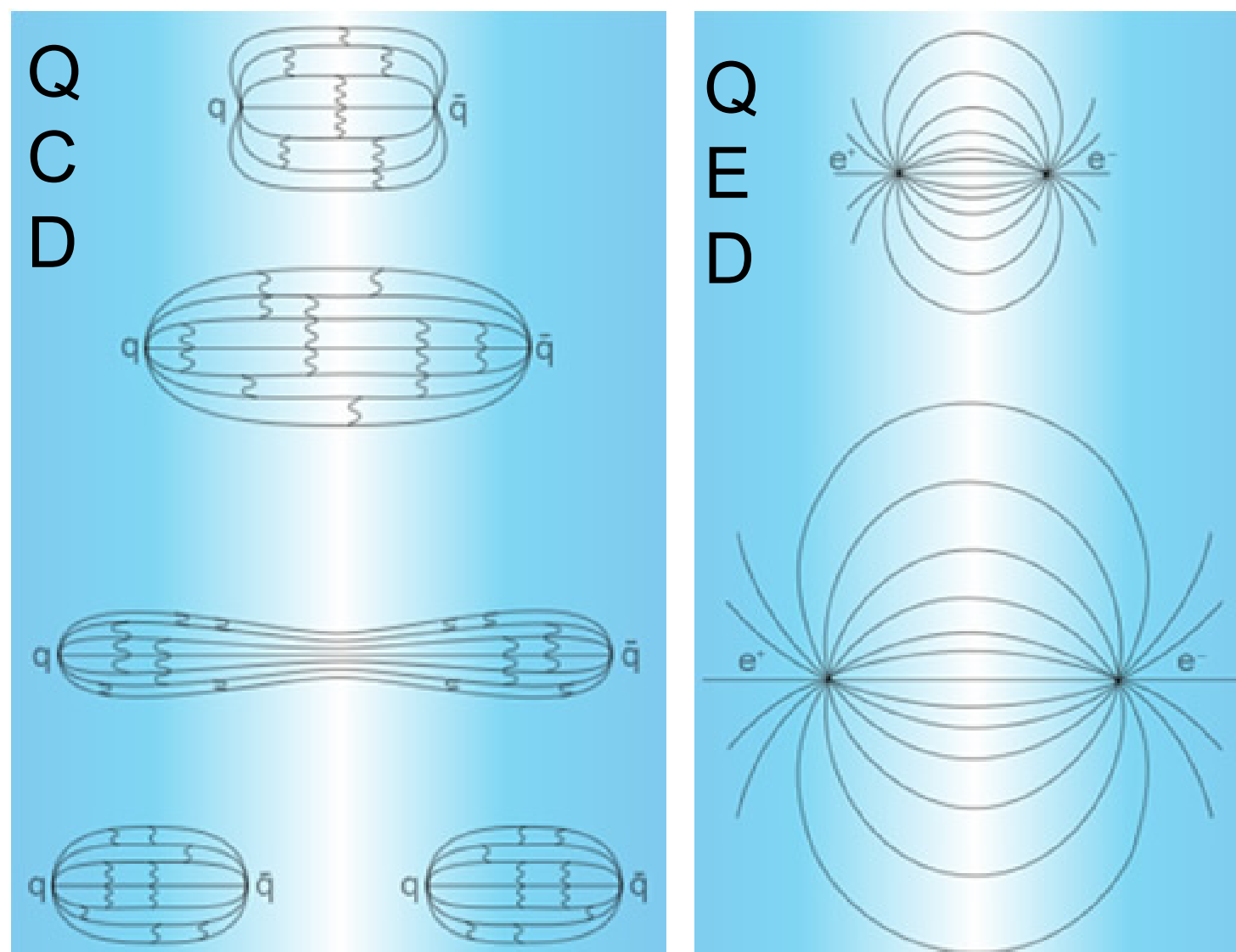
$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(1/r^2) \hbar c}{r} + kr$$
 - Kurze Abstände: Einzelgluonaustausch → **coulombartige** Wechselwirkung
 - Große Abstände: QCD-Confinement → **lineares** Potenzial
 - Heute: Potenzial aus Berechnungen der Gitter-QCD



Statisches QCD-Potenzial

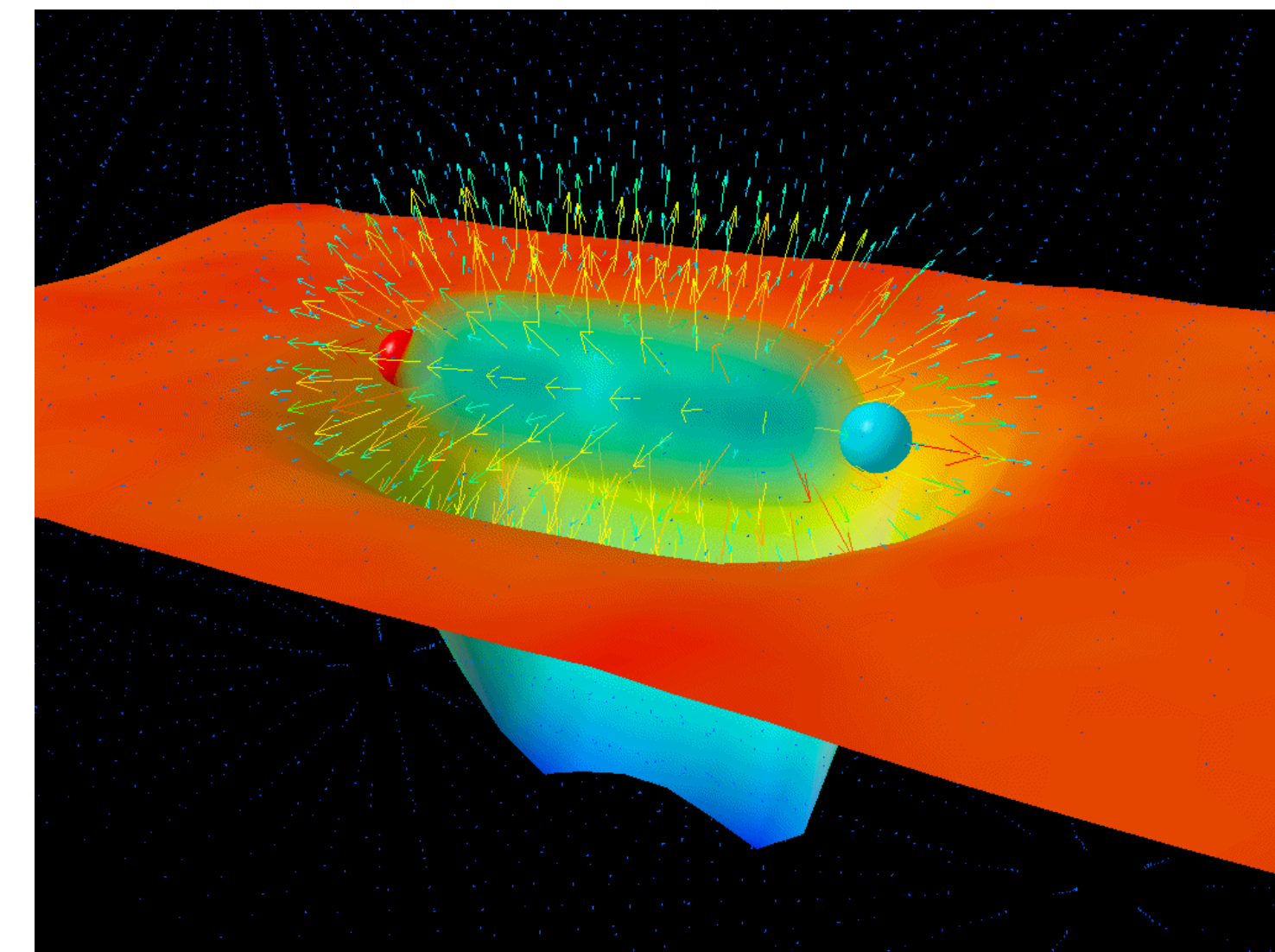
- Lineares Potenzial für große $q\bar{q}$ -Abstände ($r \gtrsim 0.5$ fm):
 - Farbgeladene Gluonen $\rightarrow$ gespannter **Farbstring** mit $k \approx 1$ GeV/fm
 - Trennung farbgeladener Teilchen: Ausbildung von **Flussschläuchen** $\rightarrow$ für $r \gtrsim 1$ fm: Bildung **neuer $q\bar{q}$ -Paare** energetisch günstiger

Feldlinien: QCD vs. QED



Bildquelle unbekannt

Gitter-QCD: $q\bar{q}$ -Flussschlauch



physics.adelaide.edu.au

Kurze Zusammenfassung

- **Quarkonium:** gebundener $q\bar{q}$ -Zustand
 - Historische Bedeutung: Etablierung der Quarks als **physikalische Realität**
 - 1974: Entdeckung des J/ψ an BNL und SLAC und theoretische Interpretation als gebundener $c\bar{c}$ -Zustand
 - 1977: Entdeckung des Υ am Fermilab $\rightarrow$ gebundener $b\bar{b}$ -Zustand
- **Anwendungen:**
 - **Spektroskopie:** Vielzahl von Übergängen zwischen Quarkonia unterschiedlicher Quantenzahlen
 - **B-Fabriken:** gezielte $B\bar{B}$ -Produktion über $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
 - Statisches **QCD-Potenzial** zwischen $q\bar{q}$ aus Termschema