

# Exotische Hadronen

## - ihre Eigenschaften und wie man sie findet -

---

- Einleitung
- Quark-Modell der Hadronen
- Exotische Zustände
- Erzeugung von Hadronen
- Bestimmung der Eigenschaften von Hadronen
- Experimente/Datenauswertung in der Hadronenspektroskopie
- Überblick über exotische Zustände
- Zukunftsperspektiven: HESR/PANDA an der GSI Darmstadt
- Zusammenfassung

# Einleitung (1)

---

## Leptonen

$(e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$

(Nur schwache und e.-m. WW)

—

## Hadronen

$(p, n, \pi, K, \dots, f_2(1270, \dots))$

(zusätzlich: Starke WW (QCD))

Baryonen (B=1)

Mesonen (B=0)

Massenbereich: 140 MeV( $\pi$ ) - 10 GeV (Y)

( $^{208}\text{Pb}$ -Kern  $\approx$  200 GeV)

# Einleitung (2)

## Lebensdauer (Zerfälle)

Proton (938) :  $\tau = \infty ?$

Neutron (940) :  $\tau = 885\text{s}$

$\pi^+$  (140) :  $\tau = 2.6 \times 10^{-8}\text{s}$

$K^+$  (494) :  $\tau = 1.2 \times 10^{-8}\text{s}$

$D^+$  (1869) :  $\tau = 1.05 \times 10^{-12}\text{s}$

$B^+$  (5279) :  $\tau = 1.67 \times 10^{-12}\text{s}$

$\pi^0$  (135) :  $\tau = 8.4 \times 10^{-17}\text{s}$

(Schwacher Zerfall)

(")

(")

(")

(")

(e.-m. Zerfall)

Grundzustände / Teilchen

$f_2(1270)$  :  $\tau = 3.5 \times 10^{-24}\text{s} / \Gamma = 185\text{MeV}$  (Starker Zerfall)

M

M

Angeregte Zustände / Resonanzen

Leichte Hadronen : Wenige Zerfallsmoden ( $\pi^+$ )

Schwere Hadronen :  $> 100$  Zerfallsmoden ( $D^+$ )

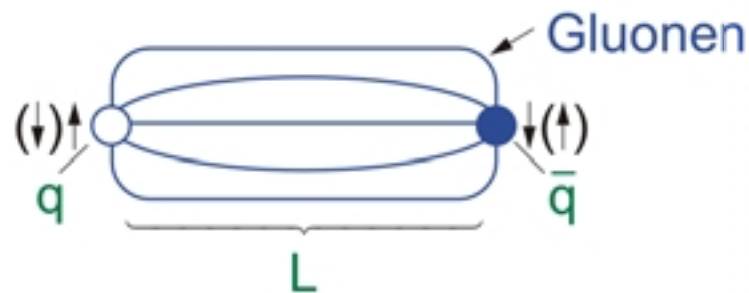
# Quark-Modell der Hadronen (1)

## Quark-Sorten:

$q = u(\approx 4 \text{ MeV}), d(\approx 8 \text{ MeV}), s(\approx 100 \text{ MeV}), c(\approx 1500 \text{ MeV}), b(\approx 4000 \text{ MeV}), t(178000 \text{ MeV})$

Quarks mit Flavour (Strangeness, Charm, Beauty,...)

## Mesonen : $q\bar{q}$



Grundzustände:

$$\uparrow\downarrow (S=0); L=0; n_r=0$$

$$J = L \oplus S; \text{ Räumliche Parität } P = (-1)^{L+1}; \text{ Ladungsparität } C = (-1)^{L+S}$$

$$\text{z.B.: } \pi^+ = u\bar{d} (\uparrow\downarrow); J^{PC} = 0^{- (+)}$$

$$D^+ = c\bar{d} (\uparrow\downarrow); J^P = 0^-$$

# Quark-Modell der Hadronen (2)

## Mesonen : $q\bar{q}$

Angeregte Zustände (Resonanzen):

$\uparrow\uparrow$  ( $S=1$ ) und/oder  $L=1, 2, \dots$  und/oder  $n_r=1, 2, \dots$

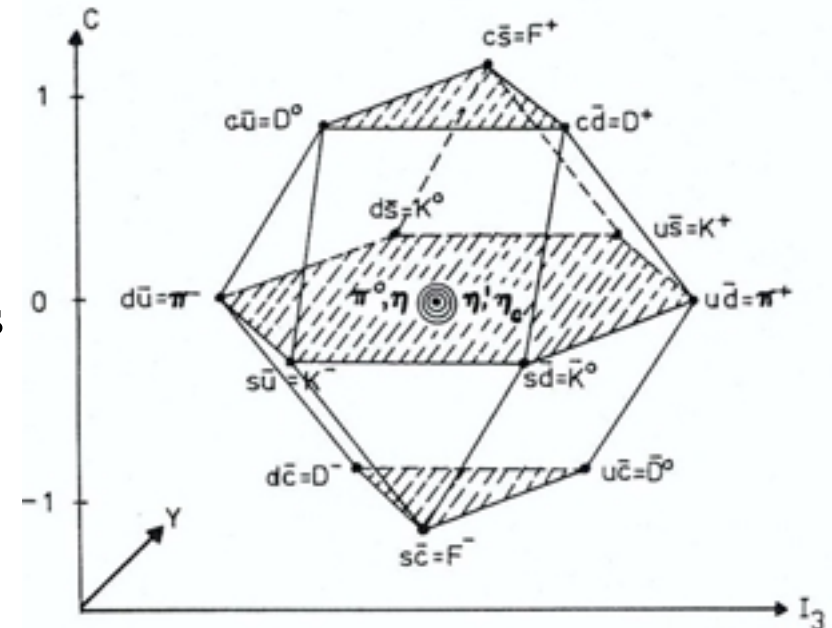
z.B.:  $\rho^+ = u\bar{d}$  ( $\uparrow\uparrow$ ) und  $L=0$ ;  $J^{PC} = 1^{--}$

$K_0^* = d\bar{s}$  ( $\uparrow\uparrow$ ) und  $L=1$ ;  $J^P = 0^+$

Zugrunde liegende Symmetrie:

SU (2) (Isospin) / SU (3) / SU (4)

↳ Einordnung der Zustände in Multipletts

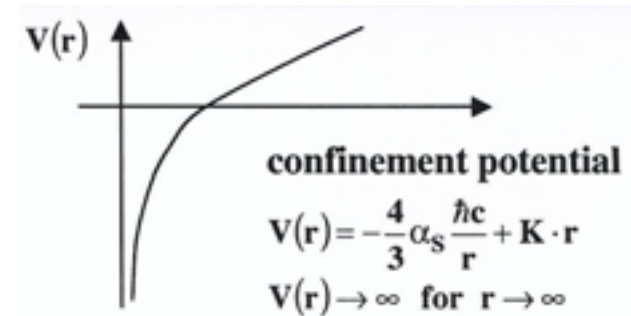
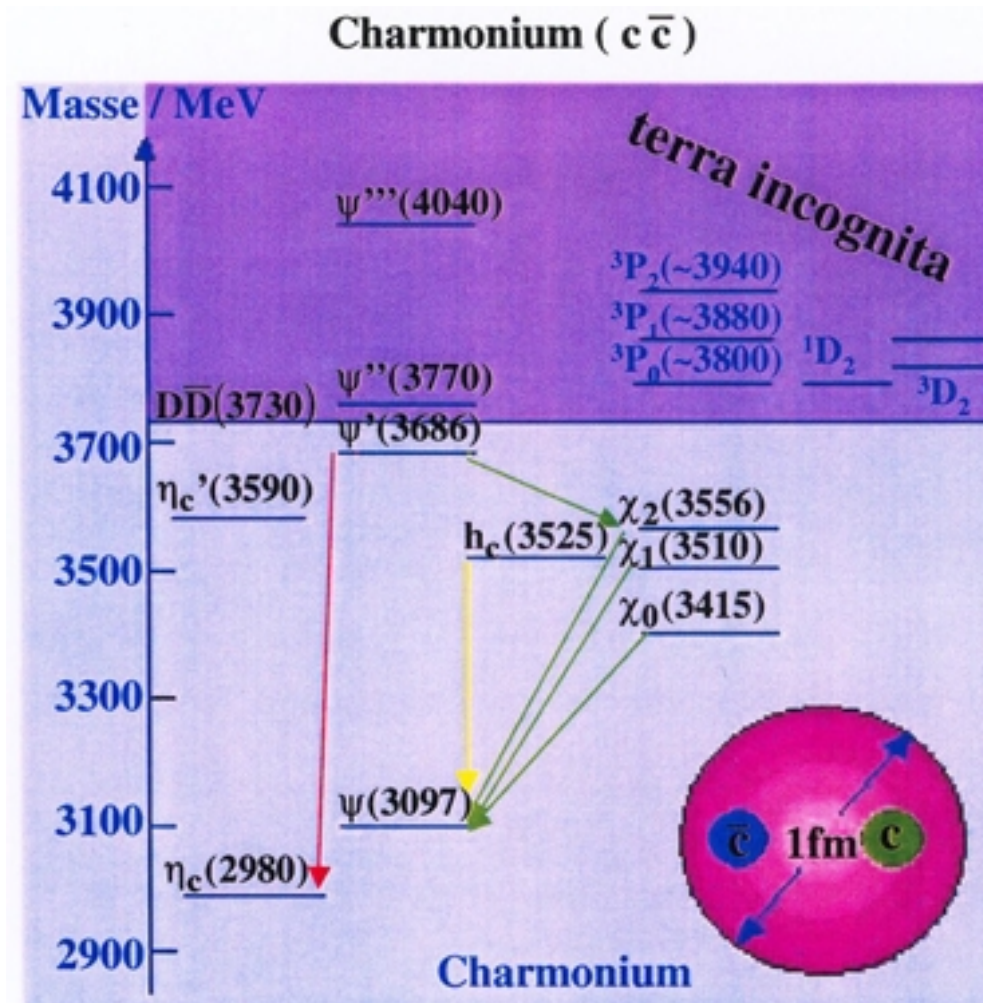


# Quark-Modell der Hadronen (3)

## Mesonen : $q\bar{q}$

Besondere Rolle:

Zustände mit verborgenem Flavour ( $c\bar{c}$ ,  $b\bar{b}$ )



# Quark-Modell der Hadronen (4)

## Baryonen : qqq

$$S = S_1 \oplus S_2 \oplus S_3 = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$$

$$L = L_1 \oplus L_2 = 0, 1, 2, \dots$$

$$J = L \oplus S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$$

$$P = (-1)^{L_1} \cdot (-1)^{L_2}$$

Grundzustände:

$$\uparrow\downarrow\uparrow (S = \frac{1}{2}); L_1 = L_2 = L = 0; n_r = 0$$

z.B.:  $p = uud (\uparrow\uparrow\downarrow); J^P = \frac{1}{2}^+$

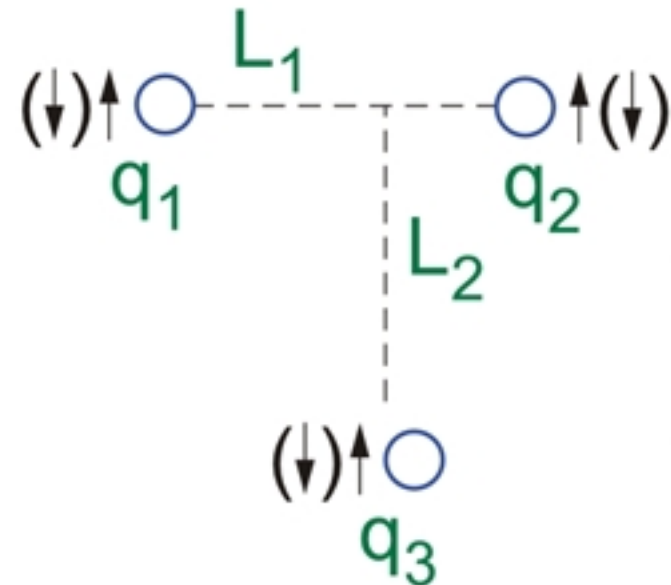
$\Lambda = uds (\uparrow\uparrow\downarrow); J^P = \frac{1}{2}^+$

$\Lambda_b = udb (\uparrow\uparrow\downarrow); J^P = \frac{1}{2}^+$  (Noch nicht gefunden)

Angeregte Zustände (Resonanzen):

$$\uparrow\uparrow\uparrow (S = \frac{3}{2}) \text{ und/oder } L_1, L_2 = 1, 2, \dots, n_r > 0$$

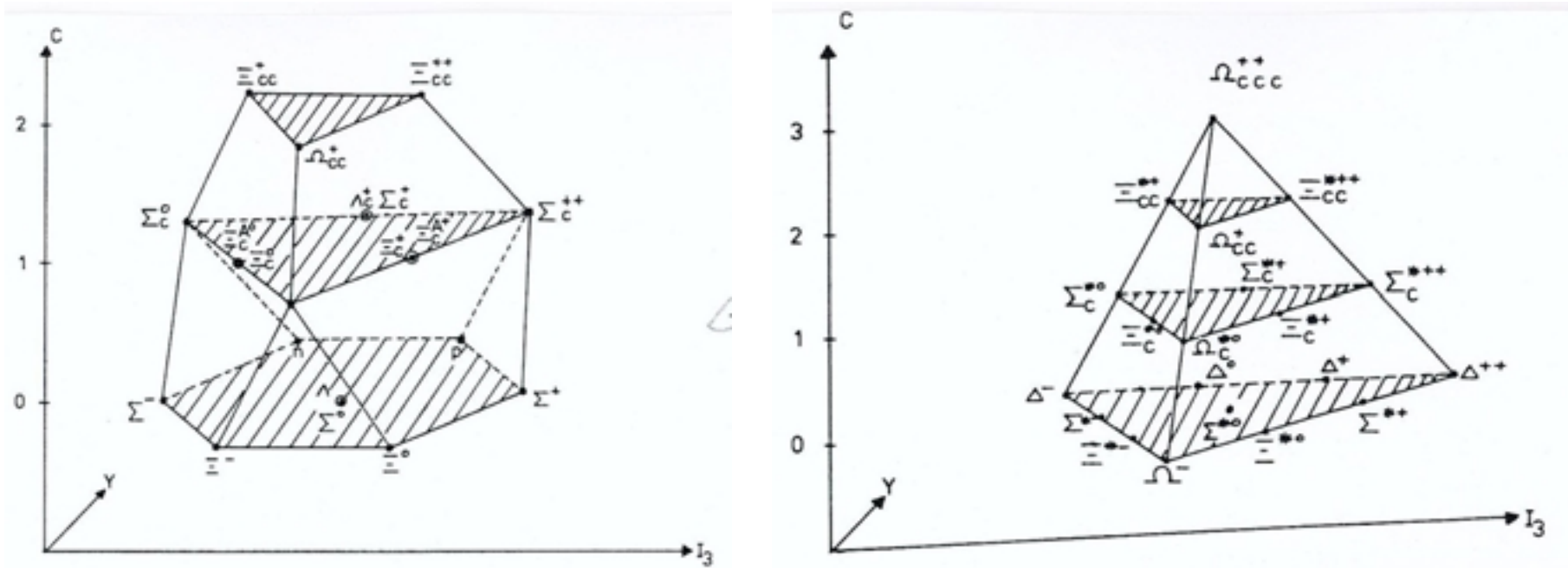
z.B.:  $\Delta^{++} = uuu (\uparrow\uparrow\uparrow); J^P = \frac{3}{2}^+$



# Quark-Modell der Hadronen (5)

## Baryonen : qqq

SU (3) / SU (4) - Symmetrie → Baryonen-Multipletts



## Aussage des Quark-Modells (und der SU (N)-Symmetrie)

Erklärung der beobachteten Multipletts

Berechnung der Häufigkeit von Zerfallkanälen

Verhältnisse von magnetischen Momenten von Teilchen

Verhältnisse von Massen von Teilchen (Problem: Absolute Masse, Dynamischer Effekt !)



# Exotische Zustände

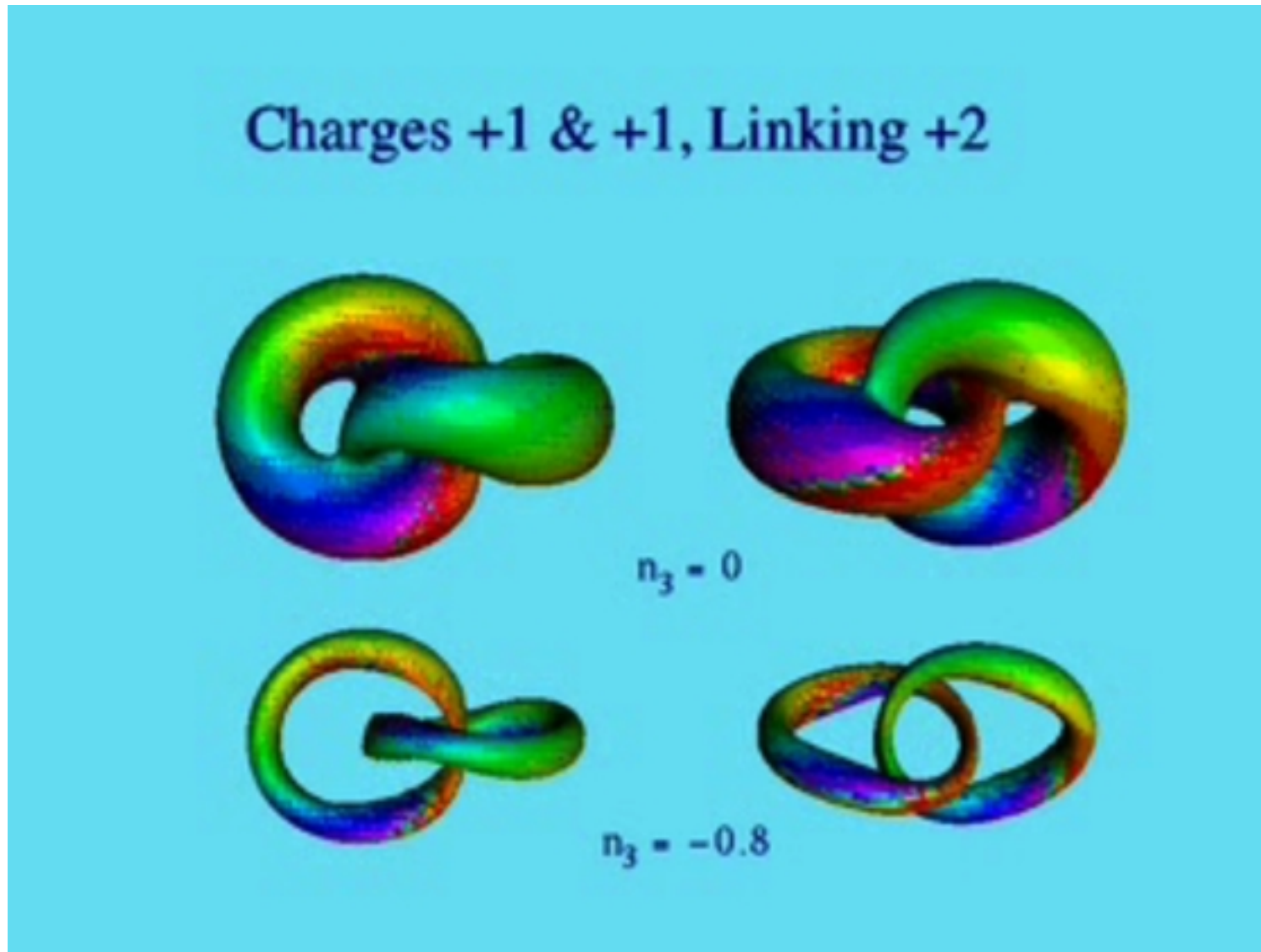
	Mesonen	Baryonen
1. Art	z.B.: $I /  S  /  C  /  B  > 1$	z.B.: $I > 3/2, S > 0, C < 0, B > 0$
2. Art	$J^{PC} = 0^{+-}, 0^{-+}, 1^{+-}, 2^{+-}, \dots$ (Exot. Q.-Z.)	—
3. Art	Überschuss in Multipletts; Massen, Gesamt- (Partial-) breiten in Widerspruch zu Quark-Modell	

## Mit QCD verträgliche Konfigurationen

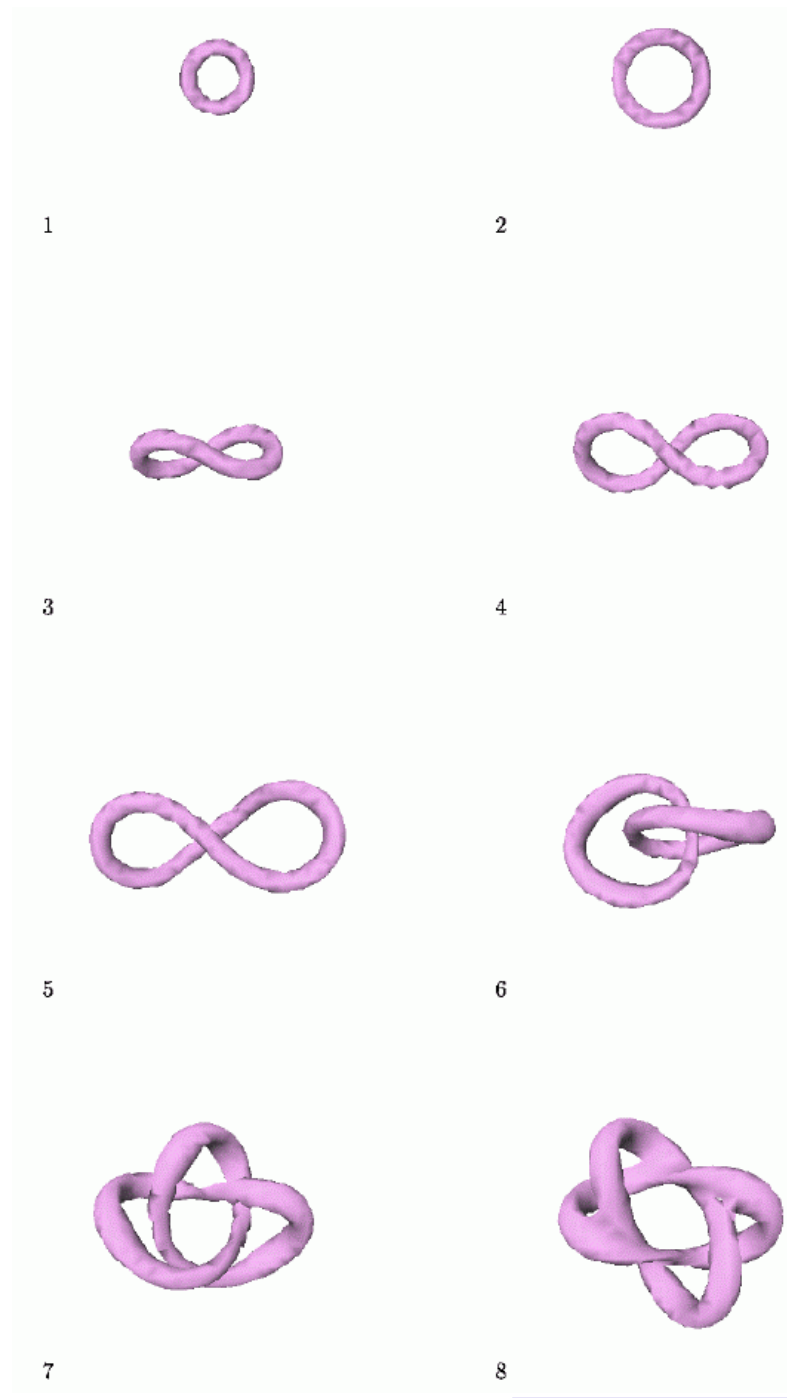
$(gg), (ggg)$	Glue-Balls		Zustände vom Soliton-Typ
$(\bar{q}qg)$	Hybride		
$(qq) (\bar{q}\bar{q})$	Diquonium		Penta Quark Zustände
$(q\bar{q}) (q\bar{q})$	Mesonium		
$(qqq) (\bar{q}\bar{q}\bar{q})$	Baryonium		
		Quark-Moleküle	
$(qq) (qq\bar{q})$			Dibaryonen
$(qqq) (qqq)$			

Oft charakteristisch für exotische Zustände : Lange Lebensdauer ( $\Gamma$  klein)

# Are glueballs configurations of colored flux with knots?

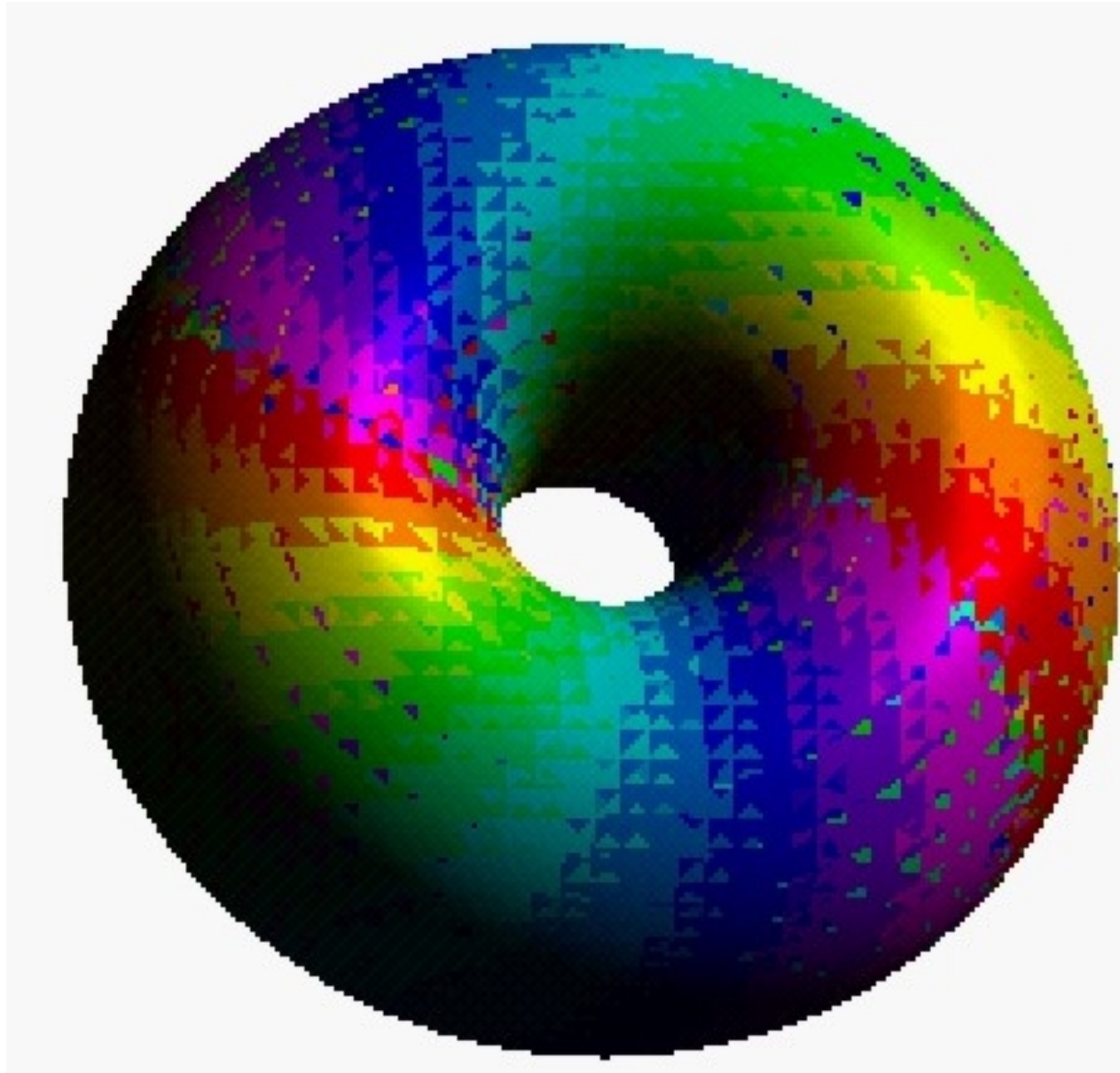


L. Faddeev, A. Niemi, U. Wiedner; hep-ph/0308240



# A twisted glueball

---



# Erzeugung von Hadronen

---

## Elektromagnetische Proben

Niedere Energien :  $\gamma(2 \text{ GeV}) p \rightarrow \Theta^+ \quad K_s^0$  (ELSA/Bonn)

$$\hookrightarrow nK^+ \hookrightarrow \pi^+ \pi^-$$

Hohe Energien :  $e^-(9 \text{ GeV}) e^+(3.1 \text{ GeV}) \rightarrow D_{sJ}^*(2317) + X$  (BaBar/Stanford)

$$\hookrightarrow D_s \pi^0$$

$$\hookrightarrow \phi \pi$$

$$\hookrightarrow K^+ K^-$$

Gesamtprozess berechenbar, kleine Wirkungsquerschnitte

## Hadronische Proben

Niedere Energien :  $\bar{p}(200 \text{ MeV}) p \rightarrow G + \pi^0$  (LEAR/CERN)

$$\hookrightarrow \pi^0 \pi^0$$

Hohe Energien :  $\pi^-(500 \text{ GeV}) p \rightarrow D^\pm + X$  (E791/Fermilab)

$$\hookrightarrow K^- \pi^+ \pi^\pm$$

Große Wirkungsquerschnitte  $\rightarrow$  Hohe Sensitivität auf seltene Zustände

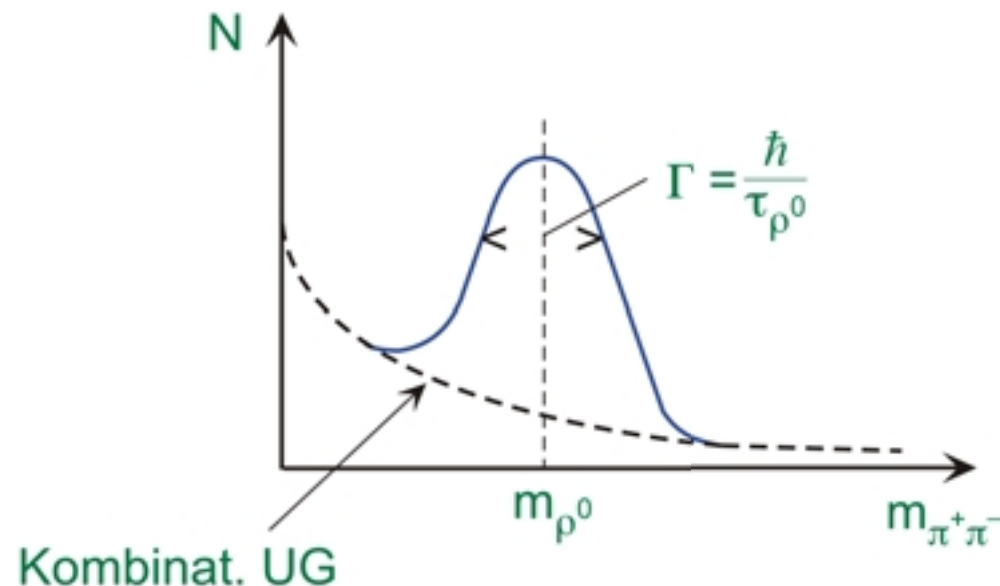
# Bestimmung der Eigenschaften von Hadronen (1)

**Masse/Lebensdauer:** Langlebige Teilchen (Protonen, Pionen, ... ):  
Ablenkung und Laufzeiten in kombinierten elektr./magn. Feldern

Kurzlebige Teilchen/Resonanzen ( $f_2(1270)$ ,  $\Delta^{++}$ , ... ):  
Invariantes Massenspektrum der Zerfallsprodukte

Beispiele:  $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  (2 Teilchen Zerfall)

$$m_{\pi^+\pi^-} = \left\{ \left( E_{\pi^+} + E_{\pi^-} \right)^2 - \left( \vec{P}_{\pi^+} + \vec{P}_{\pi^-} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{Invariante 2-Teilchen-Masse})$$

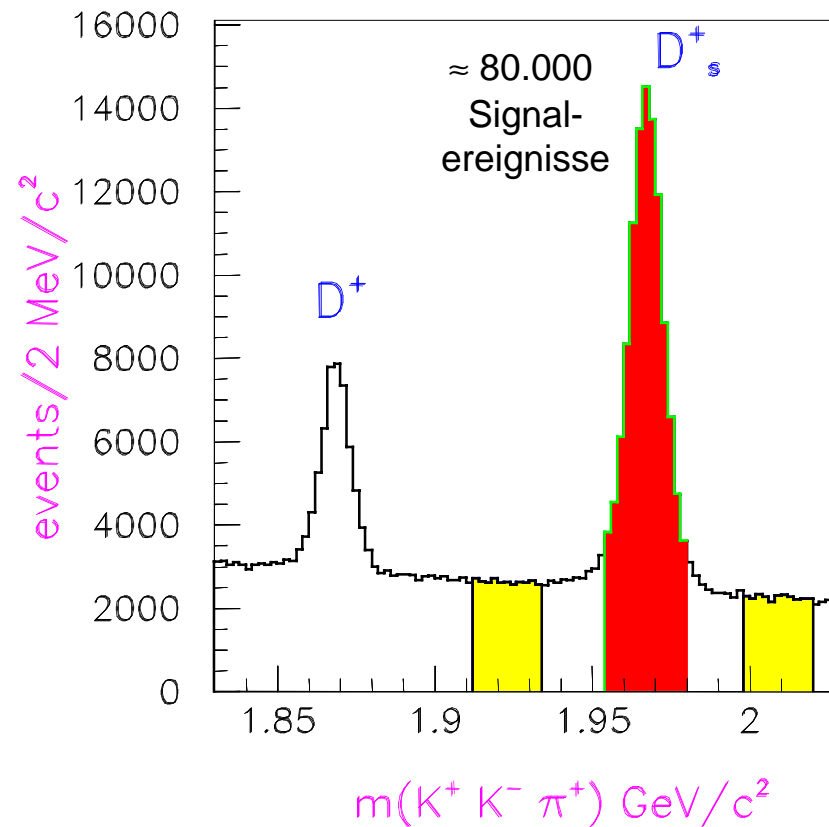


## Bestimmung der Eigenschaften von Hadronen (2)

$D \rightarrow K\bar{K}\pi$  (3-Teilchen)

$$m_{K\bar{K}\pi} = \left\{ (E_K + E_{\bar{K}} + E_{\pi})^2 - (\vec{p}_K + \vec{p}_{\bar{K}} + \vec{p}_{\pi})^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{Invariante 3-Teilchen-Masse})$$

Beispiel:  $D^+$ ,  $D_S^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$



# Bestimmung der Eigenschaften von Hadronen (3)

## Spin<sup>Parität</sup> ( $J^P$ ):

Langlebige Teilchen (Proton, Neutron,  $\Lambda$ , Antiproton, ...):

Ablenkung im inhomogenen B-Feld, Rotation im homogenen B-Feld, Exot. Atome

## Resonanzen:

Winkelverteilung der Zerfallsteilchen

Beispiel:  $D^0 \rightarrow \rho^0 \pi^0$  ( $0^{-+} \rightarrow 1^{-+} + 0^{+}$ )

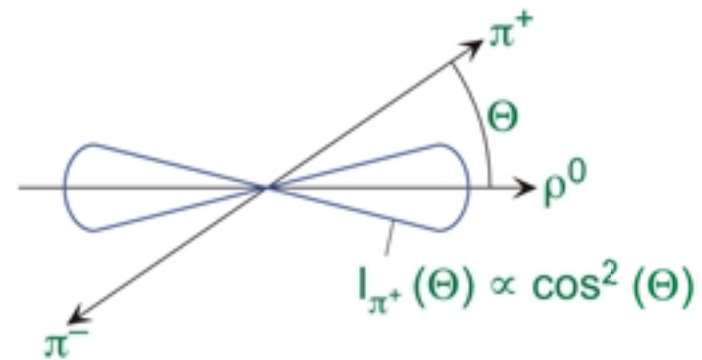
$\hookrightarrow \pi^+ \pi^-$

$\pi^0(\rho^0)$  werden isotrop emittiert

Aber: Vorzugsrichtung von  $\pi^+$  ( $\pi^-$ ) relativ zur  $\rho^0$ -Richtung

Grund:  $\rho^0$  ist polarisiert

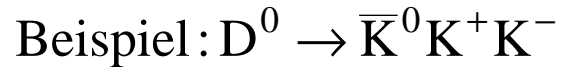
$I_{\pi^+}(\Theta) \propto \cos^2(\Theta)$ , Charakteristisch für  $J=1$  Zwischenzustand ( $\rho^0$ )





# Bestimmung der Eigenschaften von Hadronen (4)

Spezielle Darstellung für 3-Teilchen-Zustände : Dalitz Plot



Interferenz zwischen

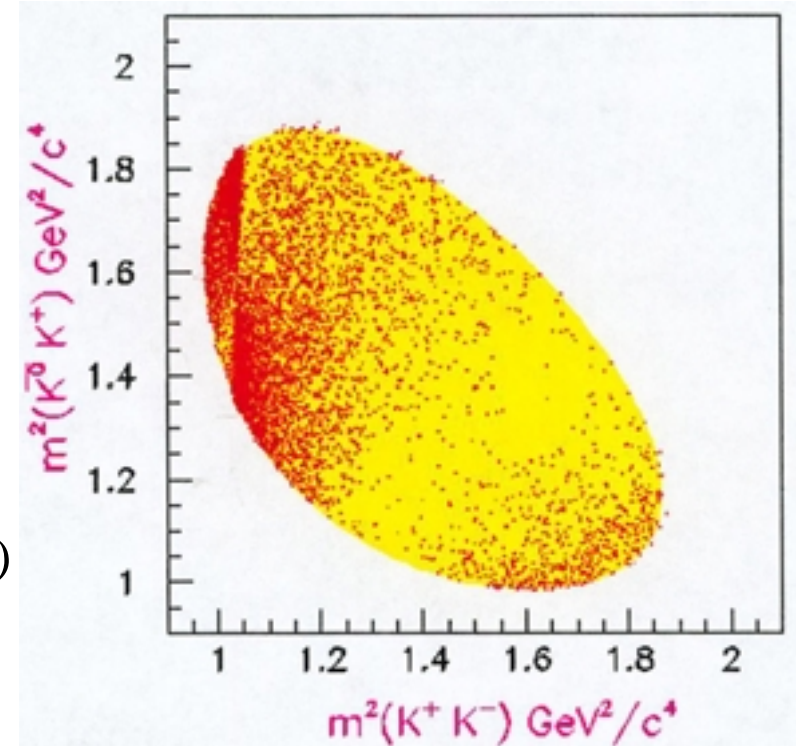
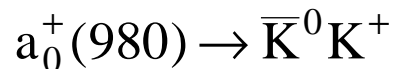
$$\phi \rightarrow K^+ K^- : A_\phi$$

und (skalarem) Untergrund :  $A_S$

$$|A|^2 = |A_S + A_\phi|^2 = |A_S + \cos \vartheta \cdot \sin \varphi e^{i\varphi}|^2$$

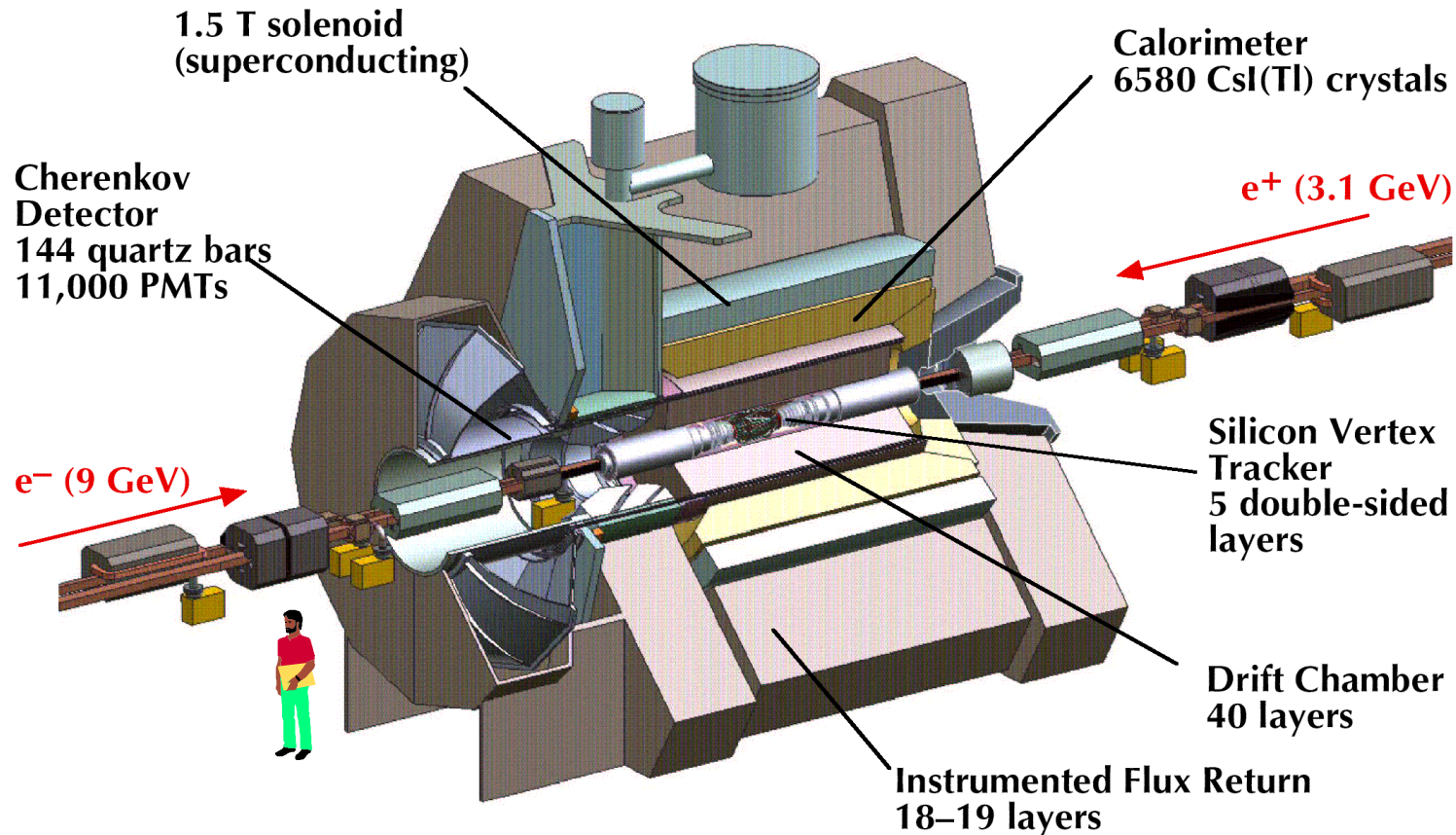
$$\varphi(M_{K^+ K^-}) = \text{Streuphase}; 90^\circ \text{ bei } m_{K^+ K^-} = 1020 \text{ MeV}(\phi)$$

Zusätzlich :



# Experimente/Datenauswertung in der Hadron-Spektroskopie (1)

## Beispiel: BaBar-Detektor / SLAC/Stanford



On-line-Computer - Farm: Rekonstruktion

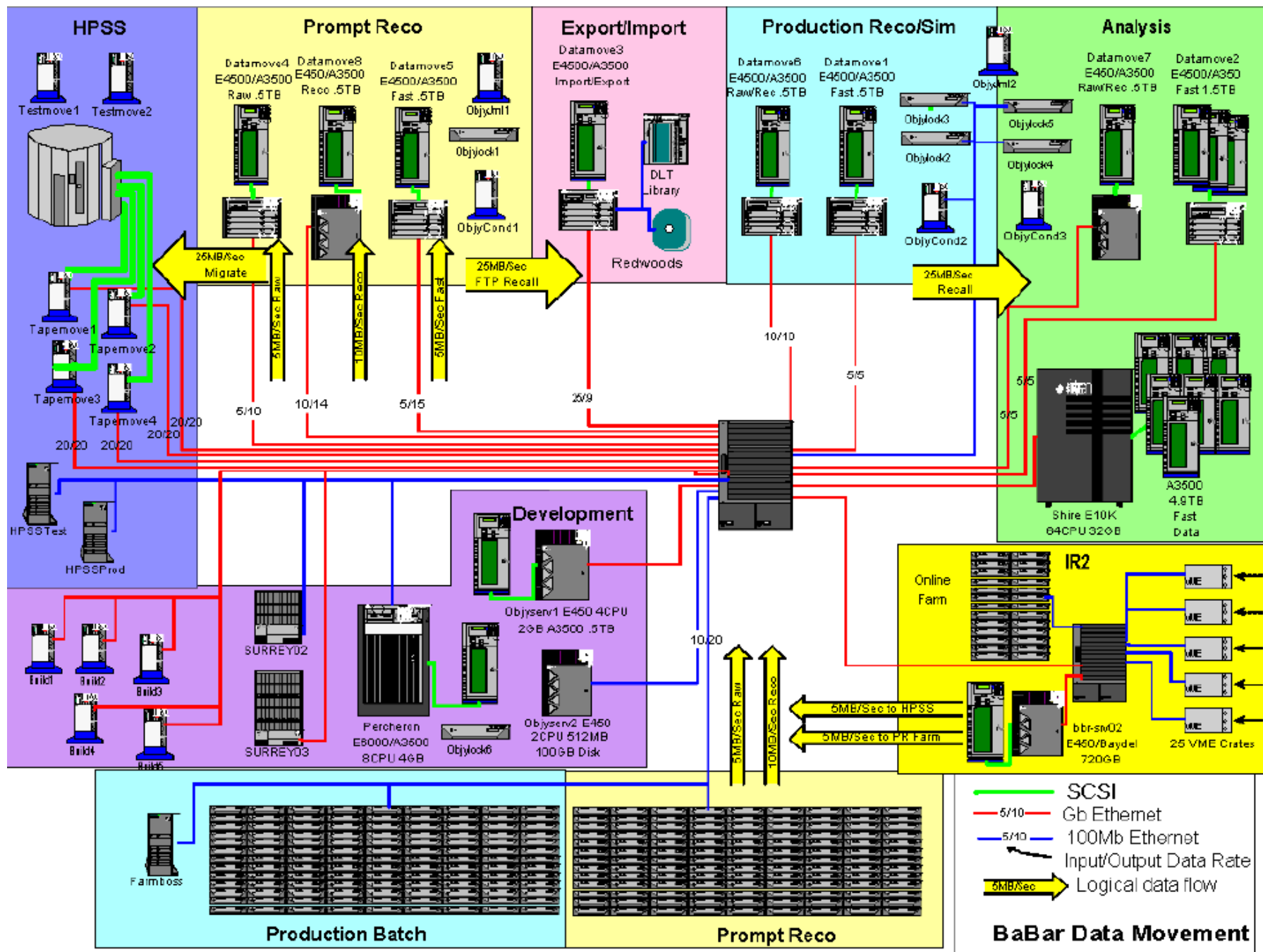
$10^6$ -Kanäle



Impulse, Energien, Richtungen,  
Massen der Teilchen, Sekundärvertizes



Im Mittel 20 Vierervektoren pro Ereignis





BaBar WIRED - World-Wide Web Interactive Remote Event Display (version ip\_15mar00)

File Options Desktop Controls Window

ers/rfaccini/display\_febR8.4.1c, Event 1 -- Parallel

ers/rfaccini/display\_febR8.4.1c, Event 1 -- Parallel

ers/rfaccini/display\_febR8.4.1c, Event 1 -- Parallel

ers/rfaccini/display\_febR8.4.1c, Event 1 -- FishEye

Event Visibility

- Event /users/rfaccini
- Kalman-TrkRec
- Svt-Digi
- Svt-SpacePoint
- Svt-TrkHitOnTrk
- Svt-TrkRecoTrk
- Dch-TrkHitOnTrk
- Dch-TrkRecoTrk
- Emc-Cluster
- lfr-Single
- lfr-Charged
- lfr-Neutral
- lfr-BarrelDigi
- lfr-InnerDigi
- lfr-EndCapDigi
- babar
- SVT
- DC
- DIRC
- CAL
- MAGNET
- IFR
- IFR-simple
- Barrel
- EndCap-Ba
- EndCap-Fo

Start Cmd... shire... X-Wi... Micro... S:\g\... April... Inbox... BaB... Cmd... BaB... 1:04 PM

The screenshot displays the BaBar WIRED software interface. At the top, the title bar reads "BaBar WIRED - World-Wide Web Interactive Remote Event Display (version ip\_15mar00)". Below the title bar is a menu bar with "File", "Options", "Desktop", "Controls", and "Window". A toolbar with various icons is located below the menu bar. The main area is divided into four panels, each showing a different view of an event: "Parallel" (top-left), "Parallel" (top-right), "Parallel" (bottom-left), and "FishEye" (bottom-right). The "Event Visibility" panel on the right contains a tree view of event components with checkboxes for visibility. The bottom of the screen shows a Windows taskbar with the Start button, several open applications (Cmd, shire, X-Wi, Micro, S:\g\, April, Inbox, BaB, Cmd, BaB), and the system clock showing 1:04 PM.

# Experimente/Datenauswertung in der Hadron-Spektroskopie (2)

Analyse der Daten ( $10^9$  hadronische Ereignisse ; 1 Peta Byte)

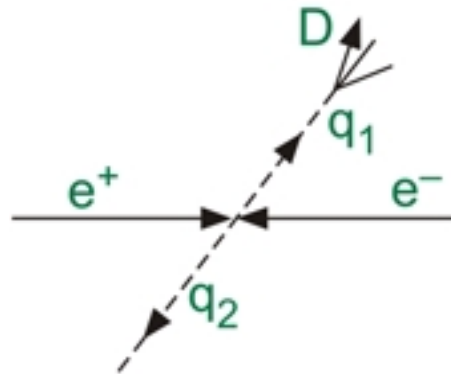
Beispiel:  $e^+ (3.1 \text{ GeV}) e^- (9 \text{ GeV}) \rightarrow D_s^\pm + X$

$\hookrightarrow \phi\pi^\pm$

$\hookrightarrow K^+K^-$

Schnitte:

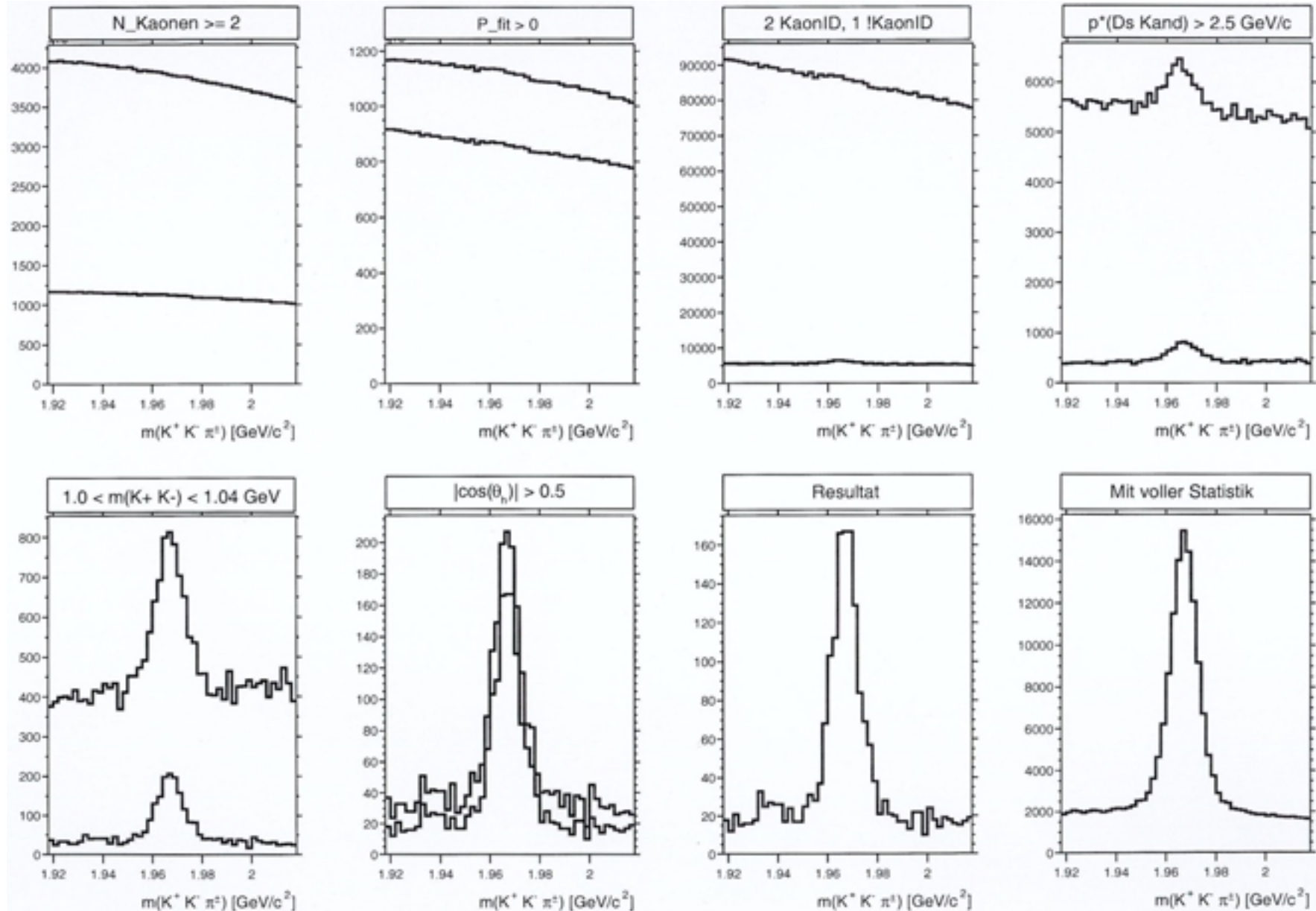
- Mindestens zwei geladene Kaonen im Ereignis
- Drei unterschiedliche geladene Spuren ( $Q=\pm 1$ ) mit gemeinsamem Vertex
- 2 Spuren sollen Kaonen verschiedener Ladungen sein, 3. Spur kein Kaon
- $(\bar{K}K\pi)$ -System soll im  $e^+e^-$ -CMS einen Impuls  $> 2.5 \text{ GeV}/c$  haben  
(Assortieren von jet-artigen (nicht  $\bar{B}B$ ) Ereignissen:



- $K^+, K^-$  müssen aus  $\phi$ -Zerfall stammen
- $|\cos \theta_{K^+(K^-)}| > 0.5$  (Helizitäts-Schnitt;  $J = 1$ -System ( $\phi$ ) emittiert ( $K^+(K^-)$ ) vornehmlich in/gegen Flugrichtung)

Optimierung aller Schnittparameter durch neuronales Netz bzw. evolutionären Algorithmus

# Experimente/Datenauswertung in der Hadron-Spektroskopie (3)





# Kandidaten für exotische Zustände (1)

**$f_0(1500)$**  (Bester Kandidat für den Glueball-Grundzustand)

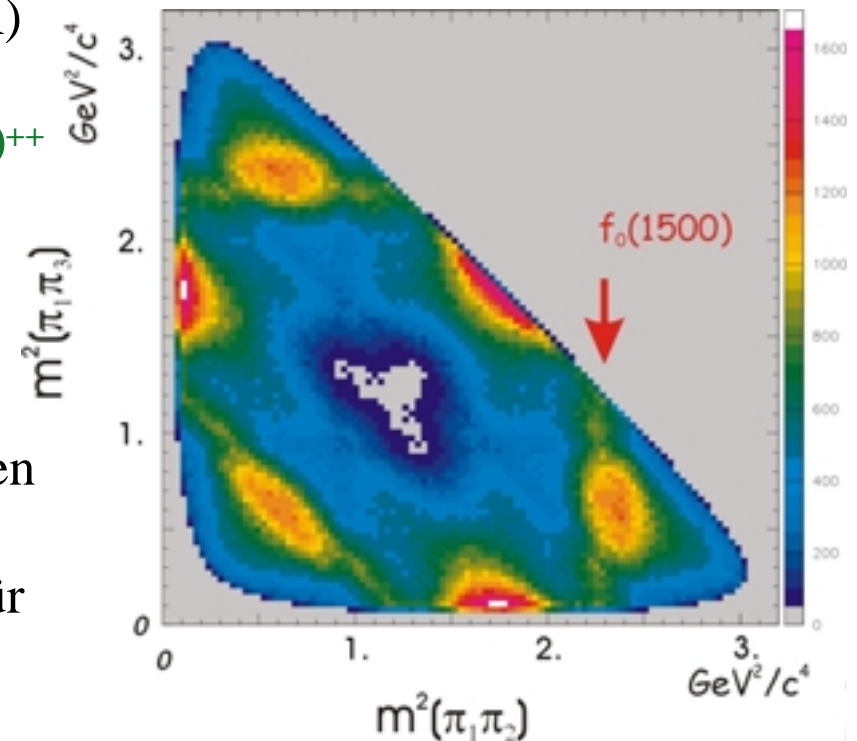
Erzeugung :  $p\bar{p} \rightarrow f_0(1500)\pi^0$  (Crystal Barrel/LEAR)

Zerfälle :  $f_0(1500) \rightarrow 2\pi, 4\pi, \eta\eta, \eta\eta', K\bar{K}$

**$M = (1505 \pm 9) \text{ MeV}$  ;  $\Gamma = (111 \pm 12) \text{ MeV}$  ;  $J^{PC} = 0^{++}$**

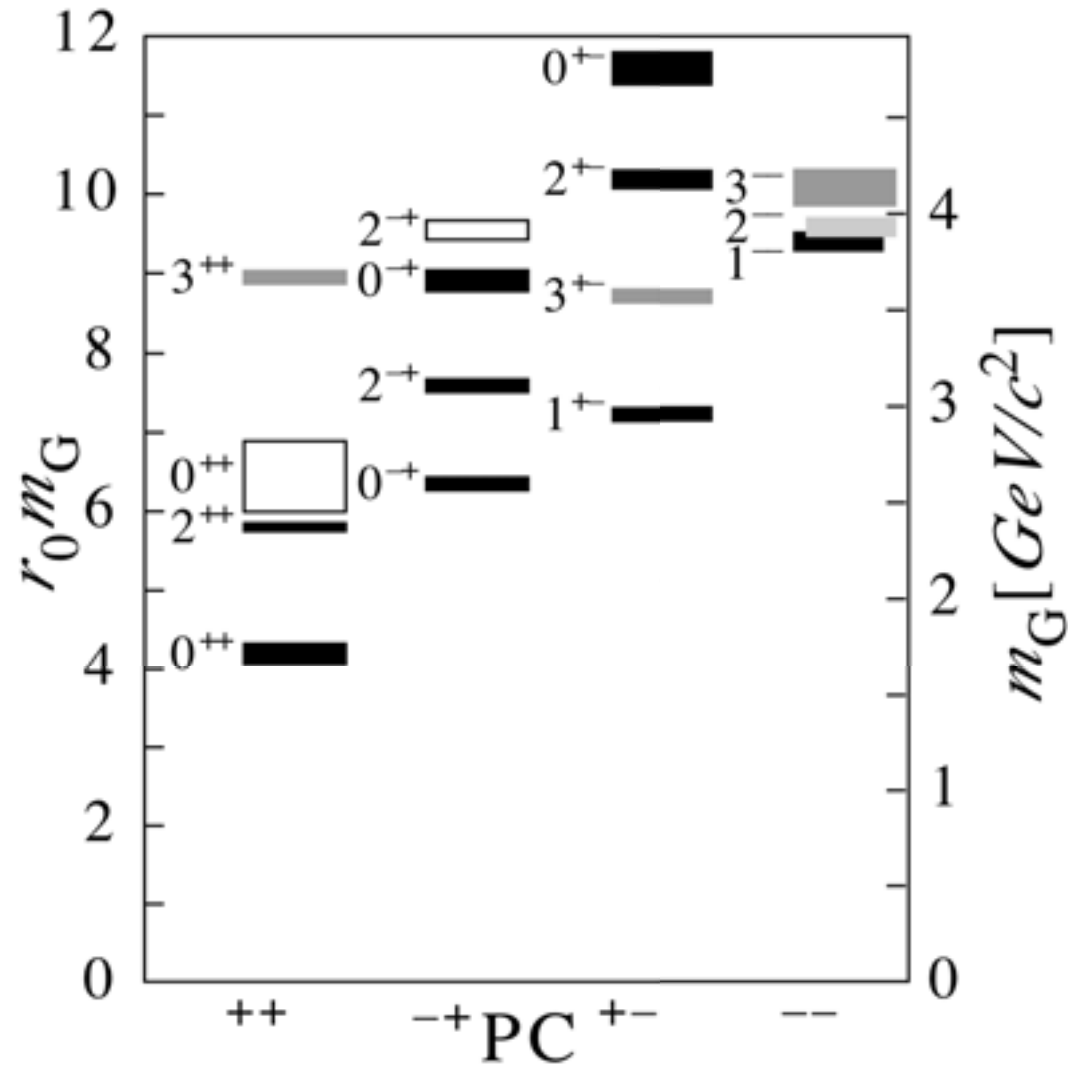
Exotisch?

- Überzählig in  $0^{++}$ -Nonett
- Relativ schmal
- Zerfällt in Teilchen, die u, d und s-Quarks enthalten
- Masse und Quantenzahlen in guter  
Übereinstimmung mit Lattice QCD-Vorhersage für  
**Glueball-Grundzustand**



## Kandidaten für exotische Zustände (2)

Suche nach schwereren Glue-Balls





# Kandidaten für exotische Zustände (3)

$\pi_1(1400)$  /  $\pi_1(1600)$  (Mesonenartige Zustände mit exotischen Quantenzahlen)

Erzeugung/Zerfälle :

$\pi^- p \rightarrow \pi_1(1400) p$  (E835/BNL) und  $\bar{p} n \rightarrow \pi_1(1400) \pi^0$  (Crystal Barrel/LEAR)

$\hookrightarrow \eta \pi^-$

$\hookrightarrow \eta \pi^-$

$\pi^- p \rightarrow \pi_1(1600) p$  (E835 BNL) und  $\bar{p} p \rightarrow \pi_1(1600) \pi^+$  (Crystal Barrel/LEAR)

$\hookrightarrow \pi^- \eta$

$\hookrightarrow \pi^- \eta$

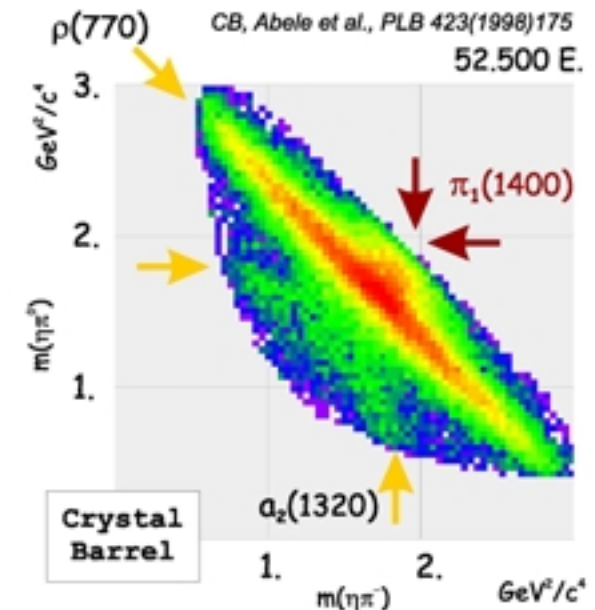
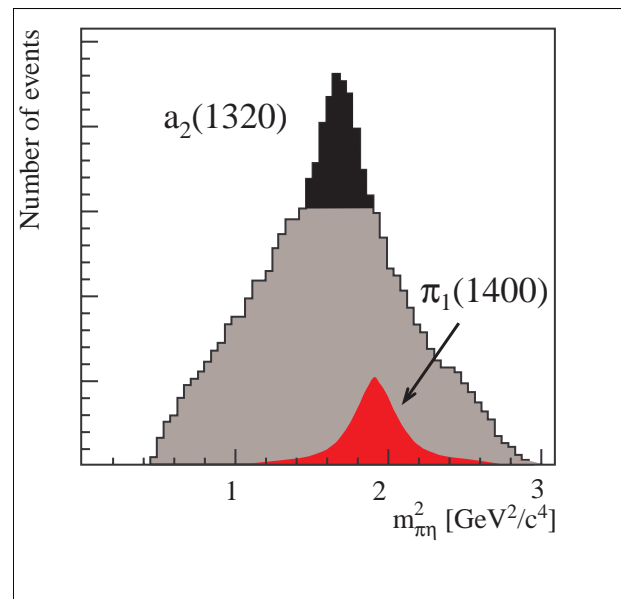
$M \approx 1400, 1600 \text{ MeV}$  ;  $\Gamma \approx 300 \text{ MeV}$  ;  $J^{PC} = \mathbf{1}^{-+}$  (Exotische Q.-Z., Nicht vereinbar mit Quark-Modell)

Exotisch?

Exotische  $J^{PC}$ -Kombination

Hybride?

Mehr-Quark-Zustände?



# Kandidaten für exotische Zustände (4)

## $D_{sJ}^*(2317) / D_{sJ}(2458)$

(Zustände mit Charm und Strangeness  
Sehr schmal/Unerklärte Massen)

Erzeugung:

$$e^+e^- \rightarrow D_{sJ}^*(2317) + X \quad (\text{BaBar, Cleo, Belle})$$

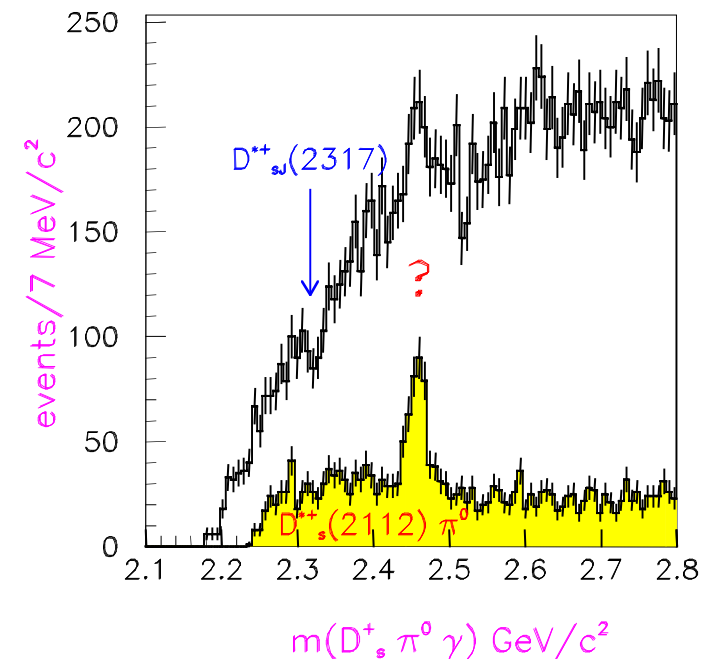
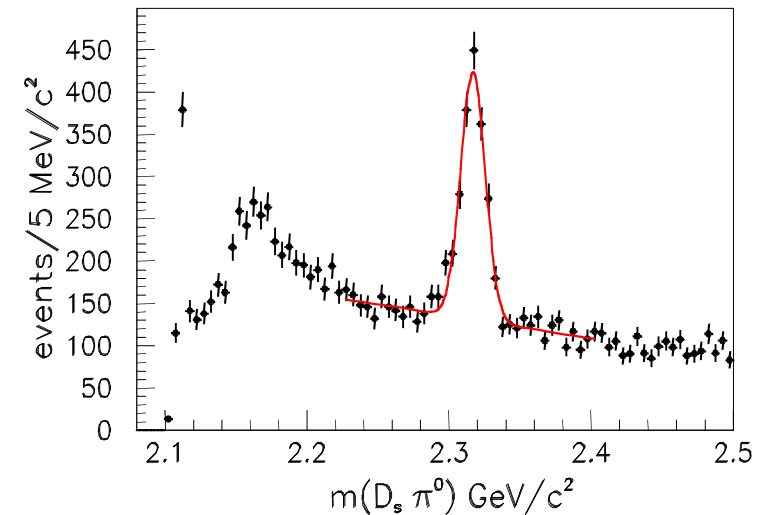
$$\quad \quad \quad \hookrightarrow D_s \pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow D_{sJ}(2458) + X \quad (\text{BaBar, Cleo, Belle})$$

$$\quad \quad \quad \hookrightarrow D_s^* \pi^0$$

$$M = (2316.8 \pm 0.4) \text{ MeV} ; \Gamma < 10 \text{ MeV} ; J^P \stackrel{?}{=} 0^+$$

$$M = (2458 \pm 1) \text{ MeV} ; \Gamma < 10 \text{ MeV} ; J^P \stackrel{?}{=} 1^+$$

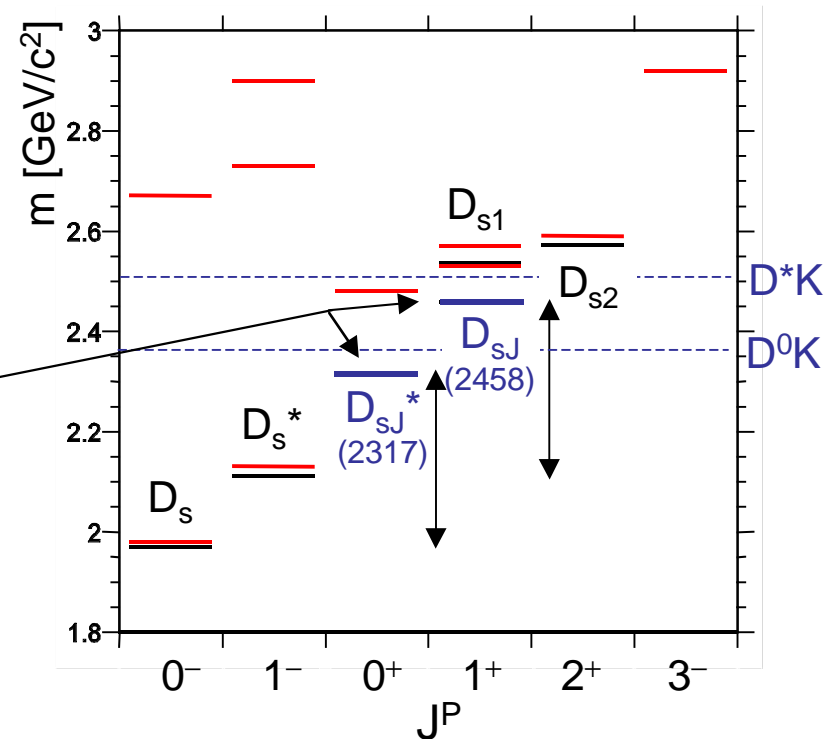


# Kandidaten für exotische Zustände (5)

Exotisch?

- Zustände sehr schmal, obwohl sie nicht die Grundzustände sind
- Massen passen nicht zu Quark-Modell-Vorhersagen

Fehlende Zustände mit  $J^P = 0^+/1^+$   
im  $c\bar{s}$ -Termschema?



Chirale Partner der Grundzustände (Nicht enthalten im Quark-Modell)?

Mehr-Quark-Zustände?

Suche nach weiteren Zuständen im Gange

# Kandidaten für exotische Zustände (6)

$c\bar{c}(3870)$  (Aussergewöhnlich schmaler Zustand mit verborgenem Charm)

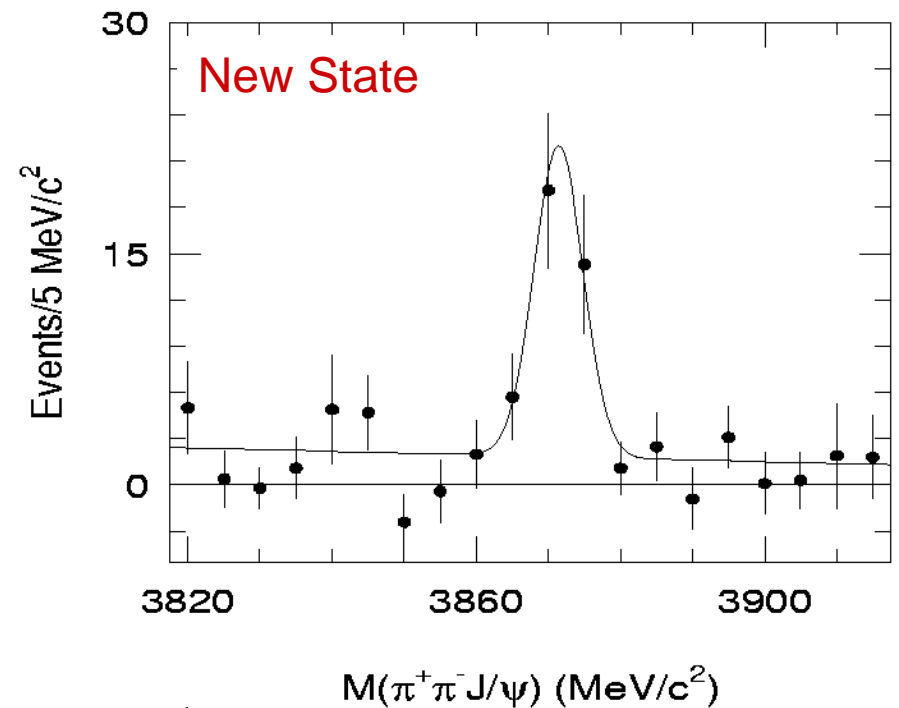
Erzeugung:

$$e^+e^- \rightarrow B^+B^- \text{ (Belle)}$$

$$\hookrightarrow K^+ + c\bar{c}(3870)$$

$$\hookrightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$$

$$M = 3871.8 \pm 0.7 \text{ MeV} ; \Gamma < 3.5 \text{ MeV}$$



Exotisch?

- Zustand aussergewöhnlich schmal
- Eigenschaften nicht kompatibel mit  $c\bar{c}(1^3D_2)$ -Zustand

$\overline{D^0D^{*0}}$ -Molekül?

Suche nach weiteren schmalen Zuständen im Gange

# Kandidaten für exotische Zustände (7)

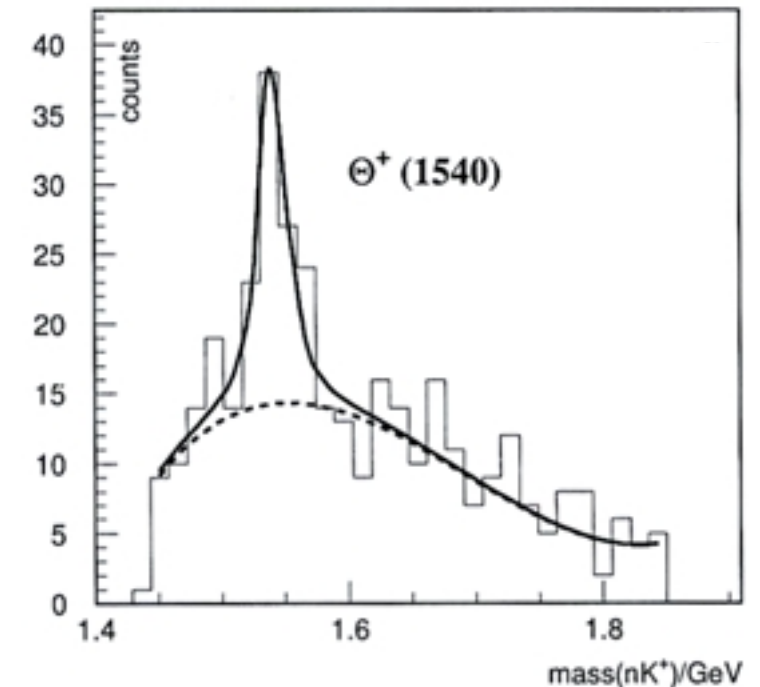
$\Theta^+$  (1540) (Schmaler Baryonenzustand mit Strangeness +1)

Erzeugung:

$\gamma p \rightarrow \Theta^+(1540) + K_s^0$  (SPring 8, ITEP, Jlab, ELSA)

$\hookrightarrow nK^+$

$M = (1540 \pm 4 \text{ MeV}) ; \Gamma < 25 \text{ MeV} ; I \stackrel{?}{=} 0$



Exotisch?

- Baryon mit Strangeness +1
- Kleine Breite

Mitglied eines Anti-Dekupletts (Soliton-Modell für Baryonen (Polyakov, Goeke, ...))?

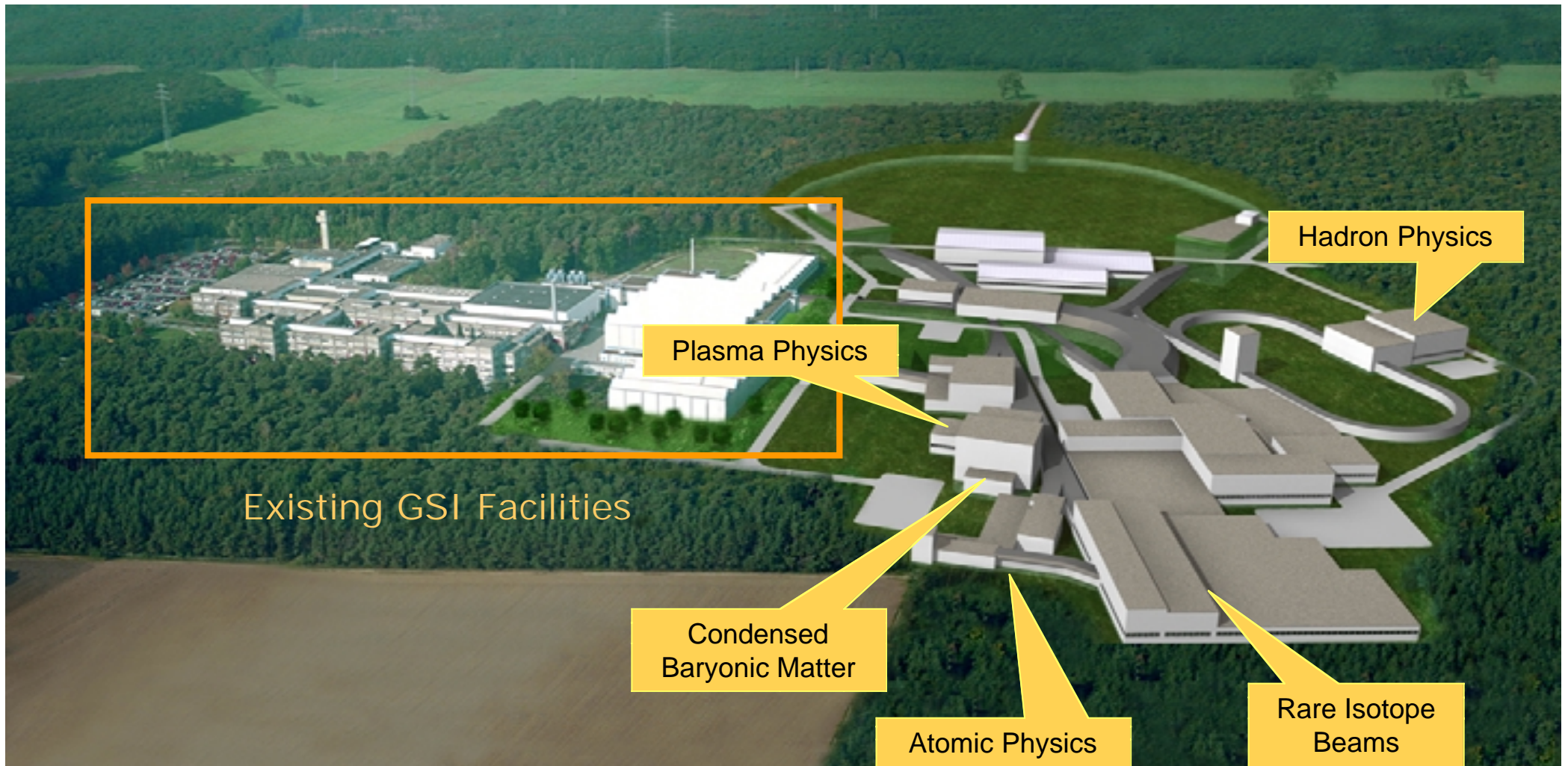
Mehr (Penta)-Quark-Zustand ( $uudd\bar{s}$ )?

Chiraler Zustand?

# Das Hadron-Projekt an der GSI (1)

Hadronen-Experimente mit Antiprotonen-Strahlen hoher Energie (15 GeV)

↳ Produktion von Zuständen mit Charm





## Das Hadron-Projekt an der GSI (2)

---

Antiproton-Speicherring (HESR) Teil des GSI Ausbau-Programms (→ 2010)

Bochum in vorderster Front beteiligt: Ausarbeitung der Experiment-Vorschläge,

Bau des e.-m. Kalorimeters für den Detektor (PANDA)

Meriten der Experimente mit Antiprotonen

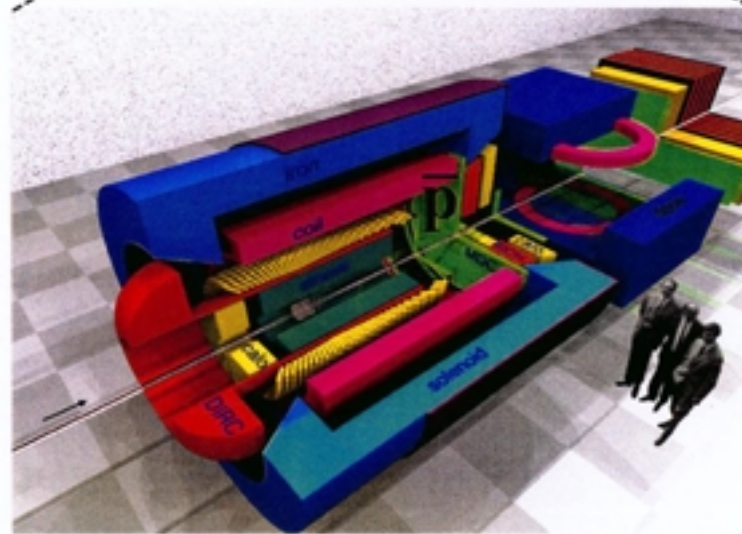
- Hadronen-Spektroskopie
- Hohe Wirkungsquerschnitte → Gute Chance, seltene Teilchen zu finden
- $\bar{p}p$ -Annihilation ist gluon-reicher Prozess → Gute Chance, Teilchen mit gluonischen Freiheitsgraden (Glueballs, Hybride) zu finden.
- $\bar{p}$ -Strahlen können mit sehr kleiner Energiedispersion erzeugt werden → Scan-Experimente an schmalen Resonanzen

Viele andere Experimente möglich (Hyperkerne, Eigenschaften von Hadronen innerhalb von Kernmaterie, CP-Verletzung, ...)

# High Energy Storage Ring and Detector Concept

$$L = 2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} ; p_{\bar{p}} = 1.5 - 15 \text{ GeV}/c$$

Detector



Septum Magnet

Kicker

Electron cooler

Injection

0 20 m



# Zusammenfassung

---

- In letzter Zeit viele neue und überraschende Ergebnisse.
- Im Mesonen- und Baryonen-Bereich existieren Zustände, die nicht durch die bisherigen Modellrechnungen erklärt werden können.
- Die theoretischen Vorstellungen über die Struktur von Hadronen müssen revidiert werden (→ Vortrag Goeke).
- Deutschland spielt weltweit eine wichtige Rolle in der experimentellen und theoretischen Hadronenphysik.  
Das neue Projekt an der GSI (HESR/PANDA) wird dem Gebiet weiteren Aufschwung verleihen.