

# Spektroskopie an Quarkonia

Von Kevin Michael Börgens

Seminar Schlüsselexperimente der  
Teilchenphysik 2009

# Gliederung

- 1.Theorie: Charmonium und die QCD
- 2.Erzeugung in Leptonenannihilation
- 3.E835 (p-pbar-Annihilation)
- 4.Ergebnisse und Weiterführendes

# Quarkonia

Gebundene Zustände von Quark-Antiquark

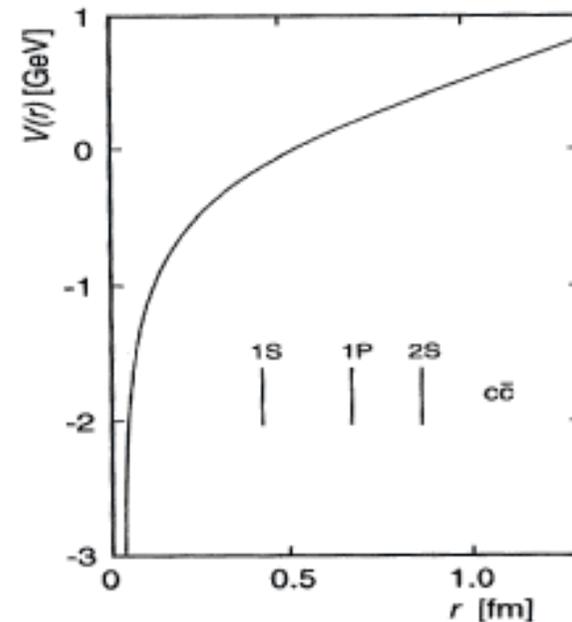
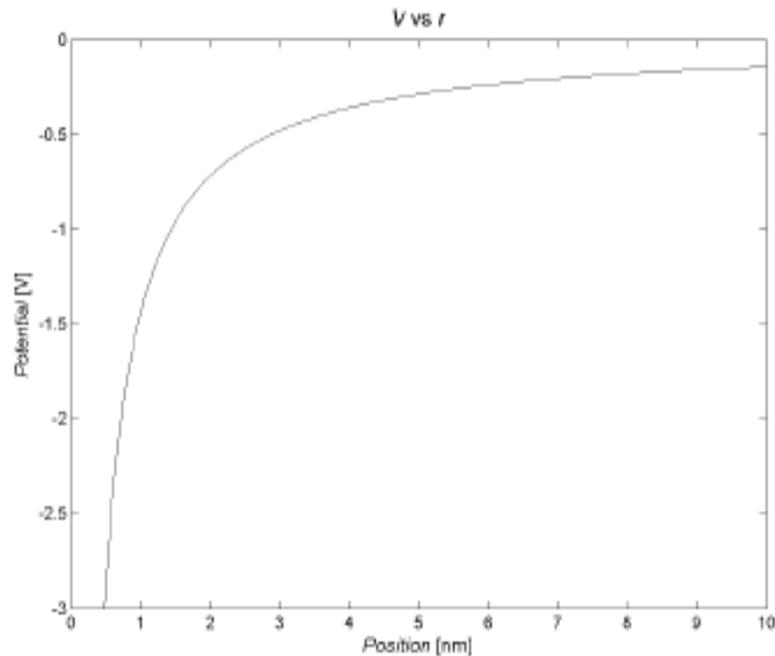
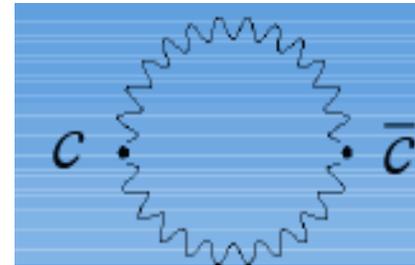
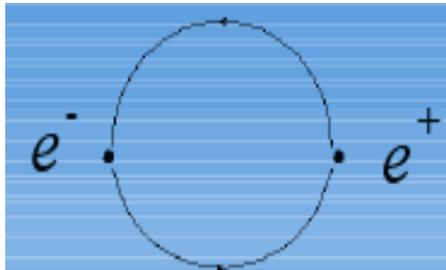
Spektroskopie

Charmonium, Bottonium

Lebensdauer Top-Quark zu kurz

# Charmonium und Positronium

Analogiebildung zum Positronium:

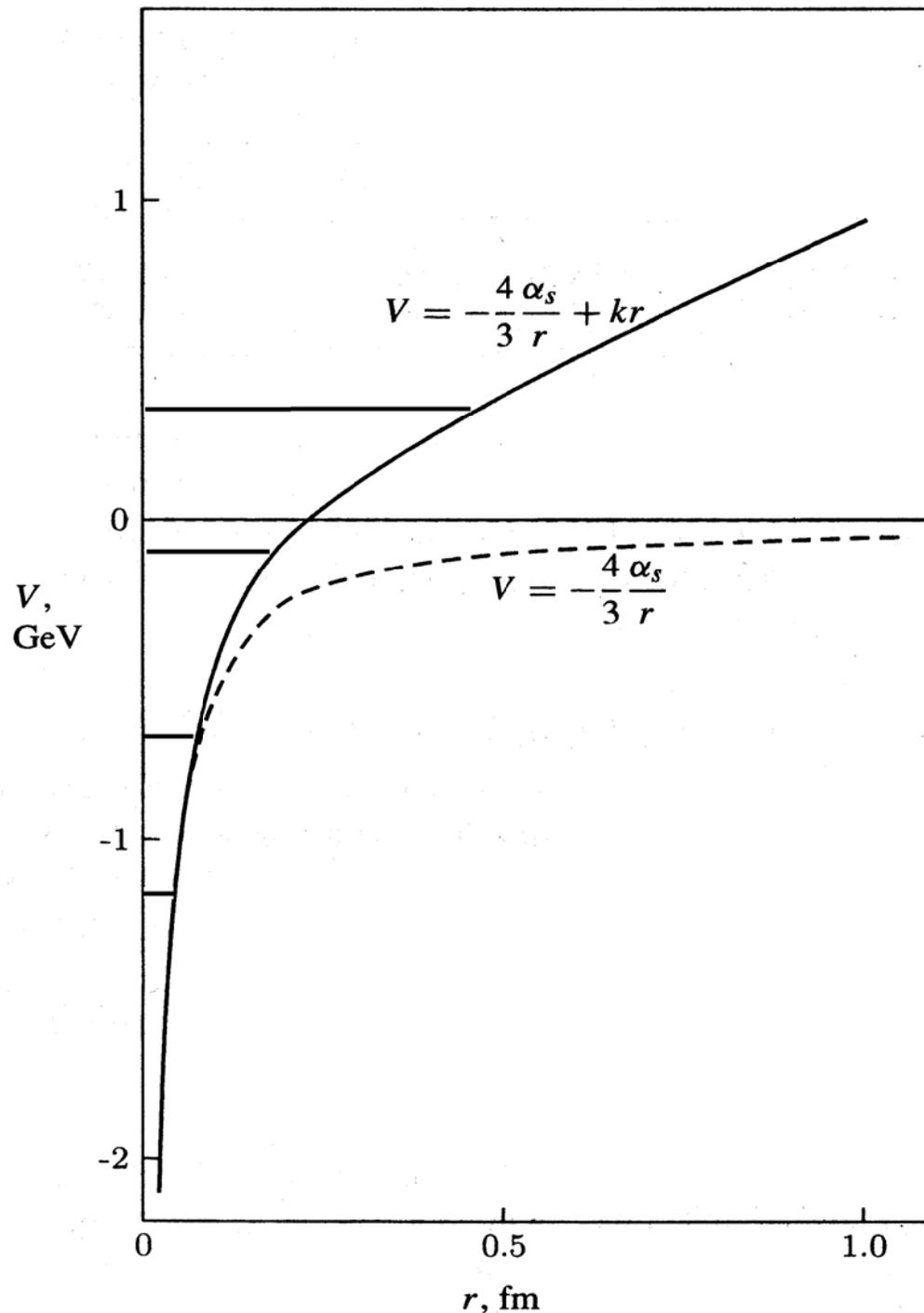


# QCD

$\alpha_s$  ist nicht konstant

Bei kleinen Abständen:  
1-Gluonen-Austausch  
störungstheoretisch  
berechenbar.

Für größere  $r$   
Gegenstand aktuelle  
Forschung  
(Gitter-QCD).



# Quantenzahlen des Charmonium

$n \ 2s+1 \ell_J \ J^{PC}$	$l = 0$ $c\bar{c}$
$1 \ 1S_0 \ 0^{-+}$	$\eta_c(1S)$
$1 \ 3S_1 \ 1^{--}$	$J/\psi(1S)$
$1 \ 1P_1 \ 1^{+-}$	$h_c(1P)$
$1 \ 3P_0 \ 0^{++}$	$\chi_{c0}(1P)$
$1 \ 3P_1 \ 1^{++}$	$\chi_{c1}(1P)$
$1 \ 3P_2 \ 2^{++}$	$\chi_{c2}(1P)$
$1 \ 3D_1 \ 1^{--}$	$\psi(3770)$
$2 \ 1S_0 \ 0^{-+}$	$\eta_c(2S)$
$2 \ 3S_1 \ 1^{--}$	$\psi(2S)$
$2 \ 3P_{0,1,2} \ 0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$	

$$P = (-)^{1+l}$$

$$C = (-)^{l+s}$$

Neue Nomenklatur:

$$n = N + 1$$

Statt

$$n = N + l + 1$$



# Zerfallskanäle

- Abregung durch Photoemission

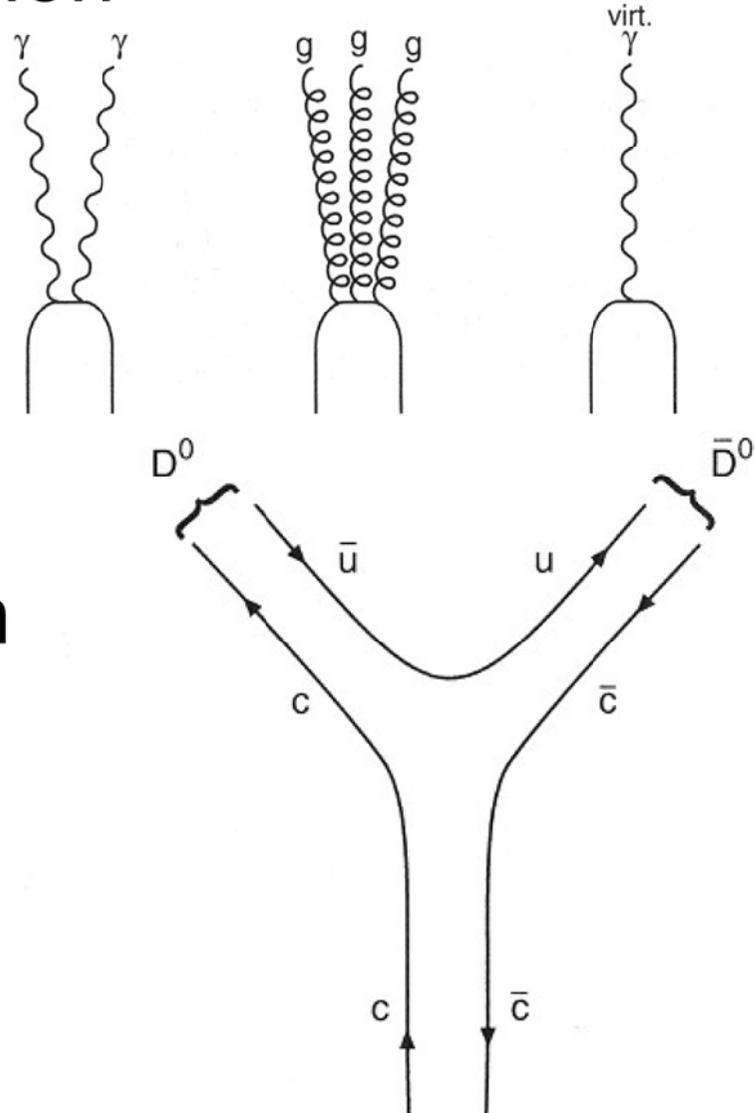
- Annihilation

$$\eta_c(1^1S_0) \rightarrow 2\gamma$$

$$J/\psi(1^3S_1) \rightarrow ggg \rightarrow \text{Hadronen}$$

$$J/\psi(1^3S_1) \rightarrow \text{virt. } \gamma \rightarrow \text{Hadronen}$$

$$J/\psi(1^3S_1) \rightarrow \text{virt. } \gamma \rightarrow \text{Leptonen}$$



- Anlagerung leichter Quanten

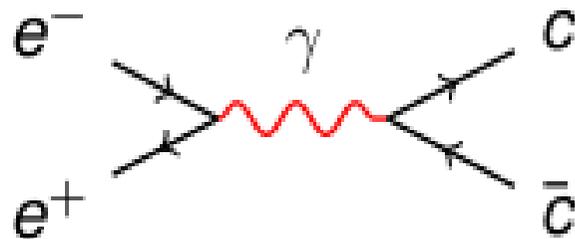
$$\psi(3770) \rightarrow D^0 + \bar{D}^0$$

- Schwacher Zerfall kann vernachlässigt werden

## 2. Teil

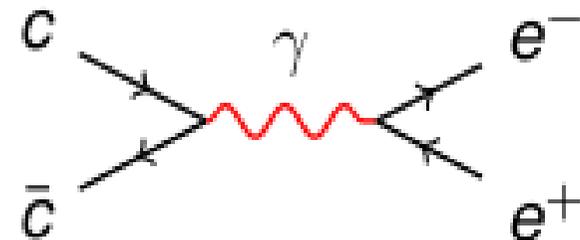
$J/\psi$

- ▶ erstes entdecktes Charmonium
- ▶ überraschend schmal  $\Gamma = 93,4\text{keV}$
- ▶ über elektromagnetischen Kanal entdeckt



am SLAC durch Richter in

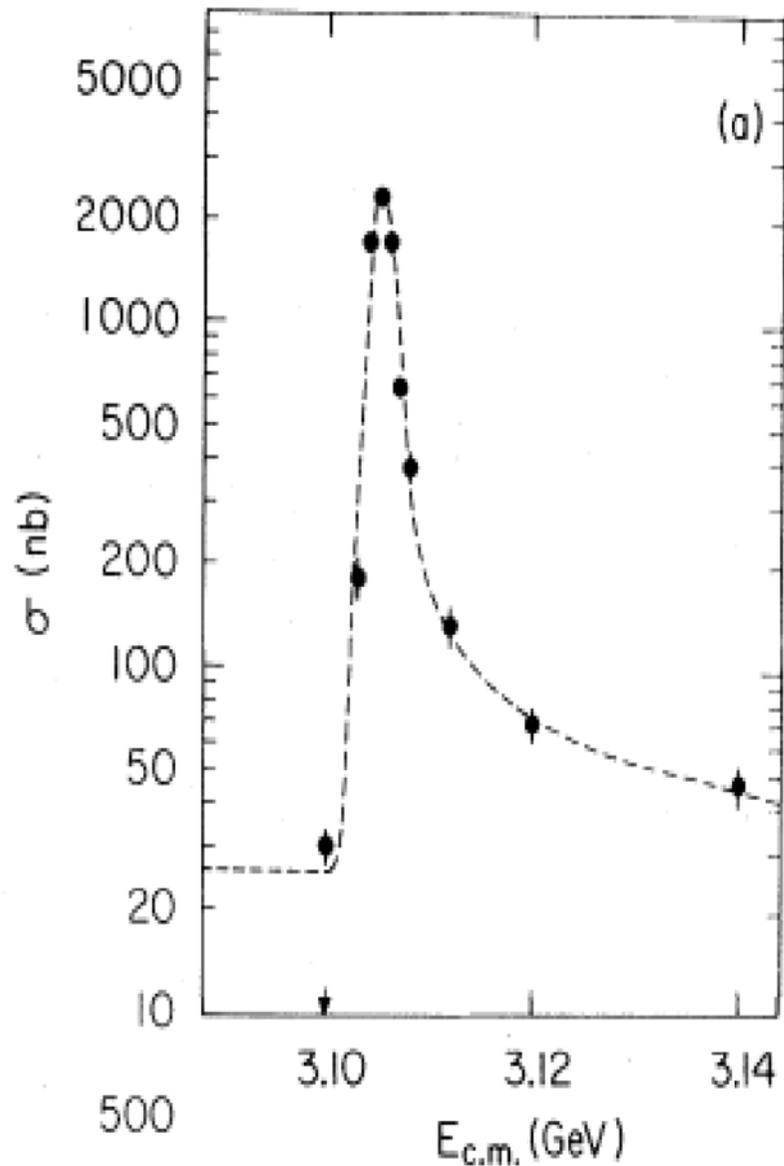
$$e^+ + e^- \rightarrow \text{Hadronen}$$



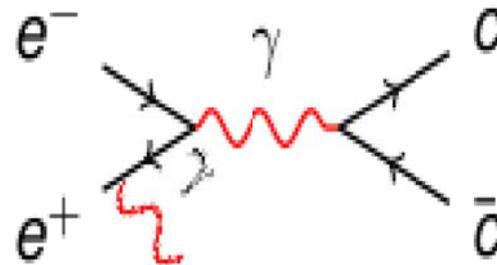
am BNL durch Ting

$$p + Be \rightarrow e^+ + e^- + x$$

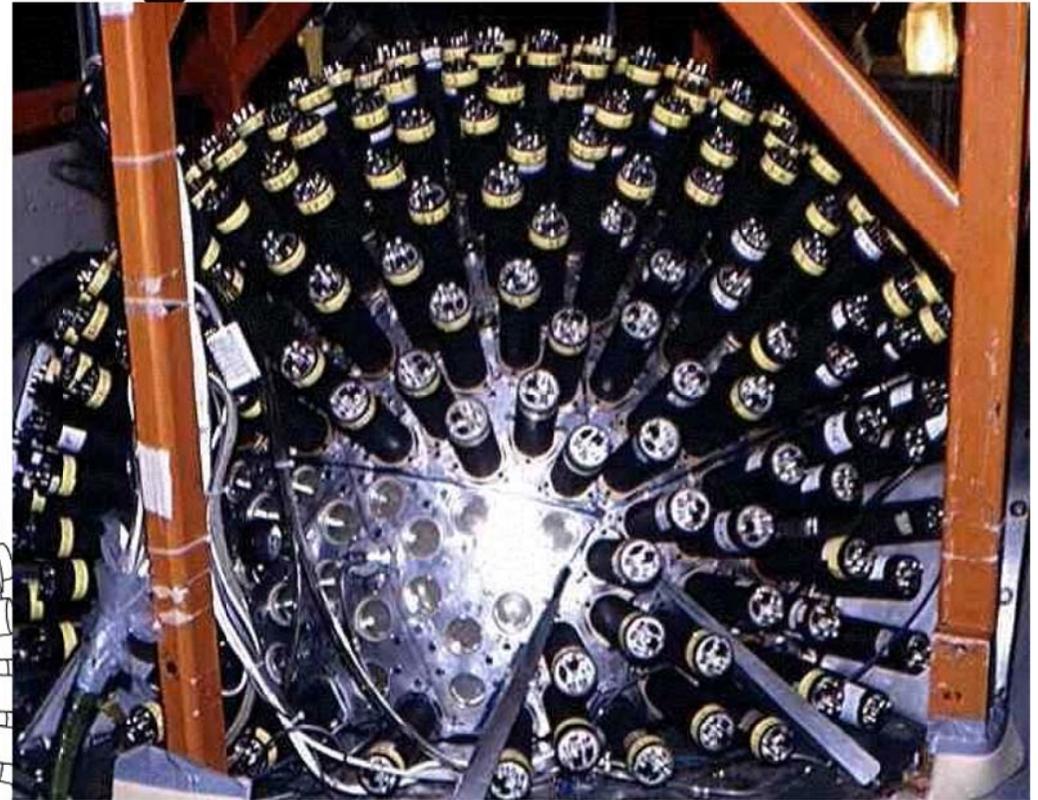
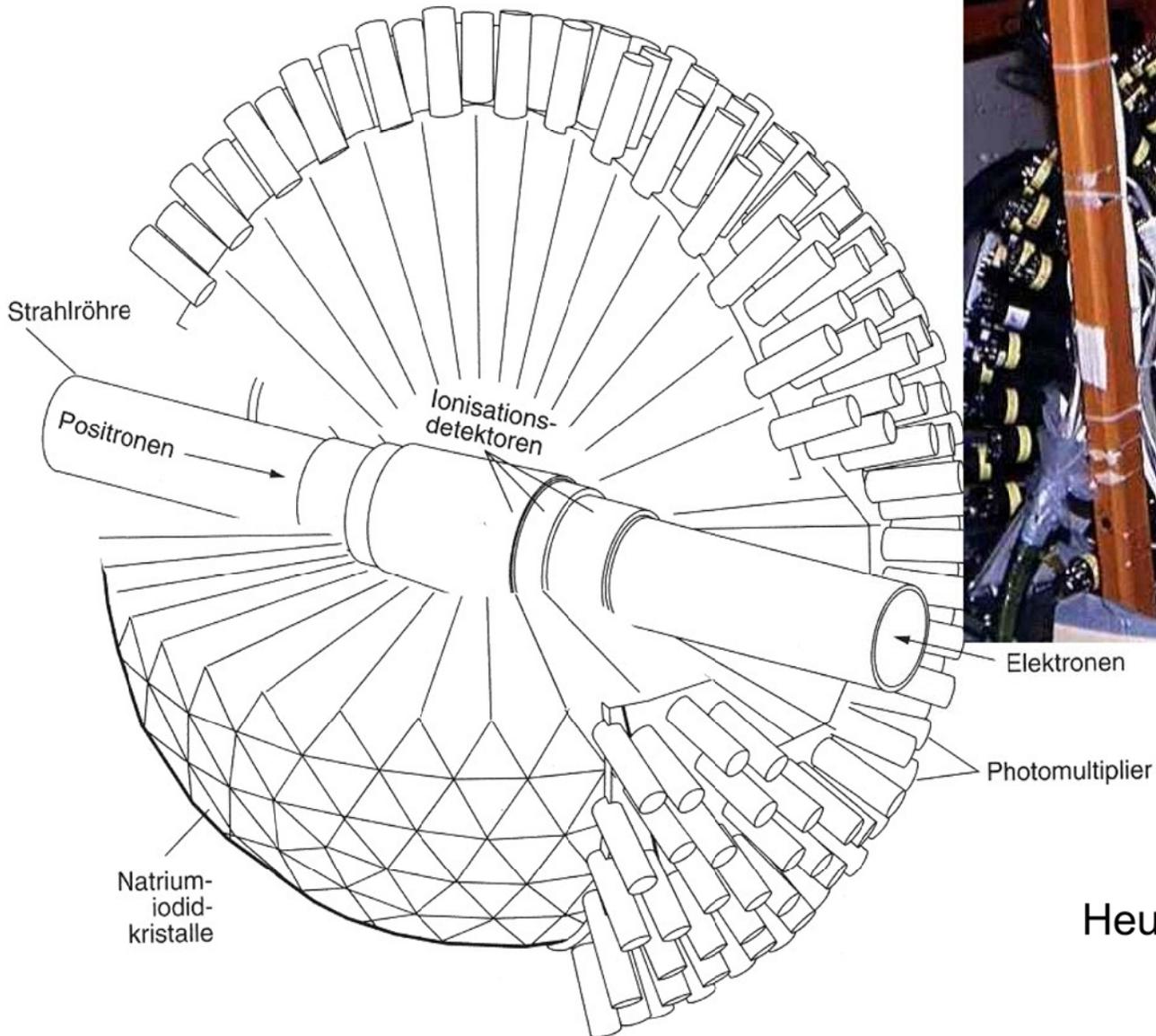
# SLAC



Die sichtbare Breite des Peaks kommt nicht aus der Energieunschärfe des Endzustands sondern aus der Energieunschärfe der Elektronen:



# Kristallkugel



Elektronen

Photomultiplier

Heute in Mainz

# Einige Daten zur Kristallkugel

Die 672 NaI Kristalle wiegen 6 Tonnen

Kann Photonen und geladene Teilchen über einen Raumwinkel von fast  $4\pi$  messen

Energieauflösung für Photonen:

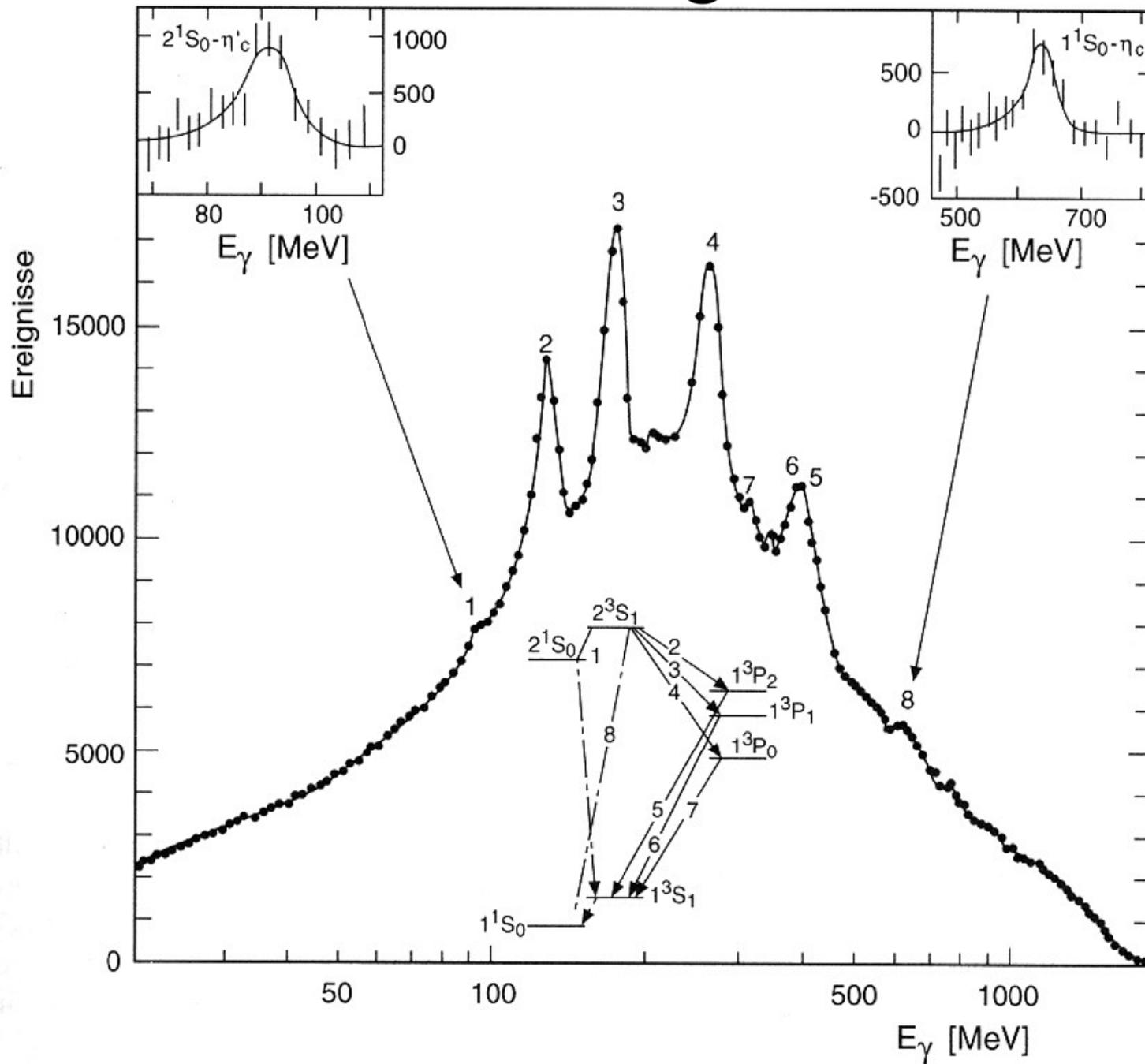
$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1.7\%}{\sqrt[4]{E}}$$

wobei E in GeV

Zum Beispiel für 100MeV: 3%

Winkelauflösung auf 1-2 Grad genau

# Ergebnisse



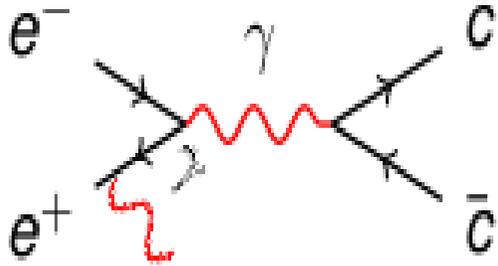
Beispiel:

$1^3P_0$ :  
 $(3416 \pm 1)$  MeV  
 $\Gamma(1^3P_0)$ :  
 $(9 \pm 2)$  MeV

Heute:

$1^3P_0$ :  
 $(3415,2 \pm 0,4)$  MeV  
 $\Gamma(1^3P_0)$ :  
 $(10,2 \pm 0,8)$  MeV

# Einschränkungen



Nur 1- Zustände erreichbar

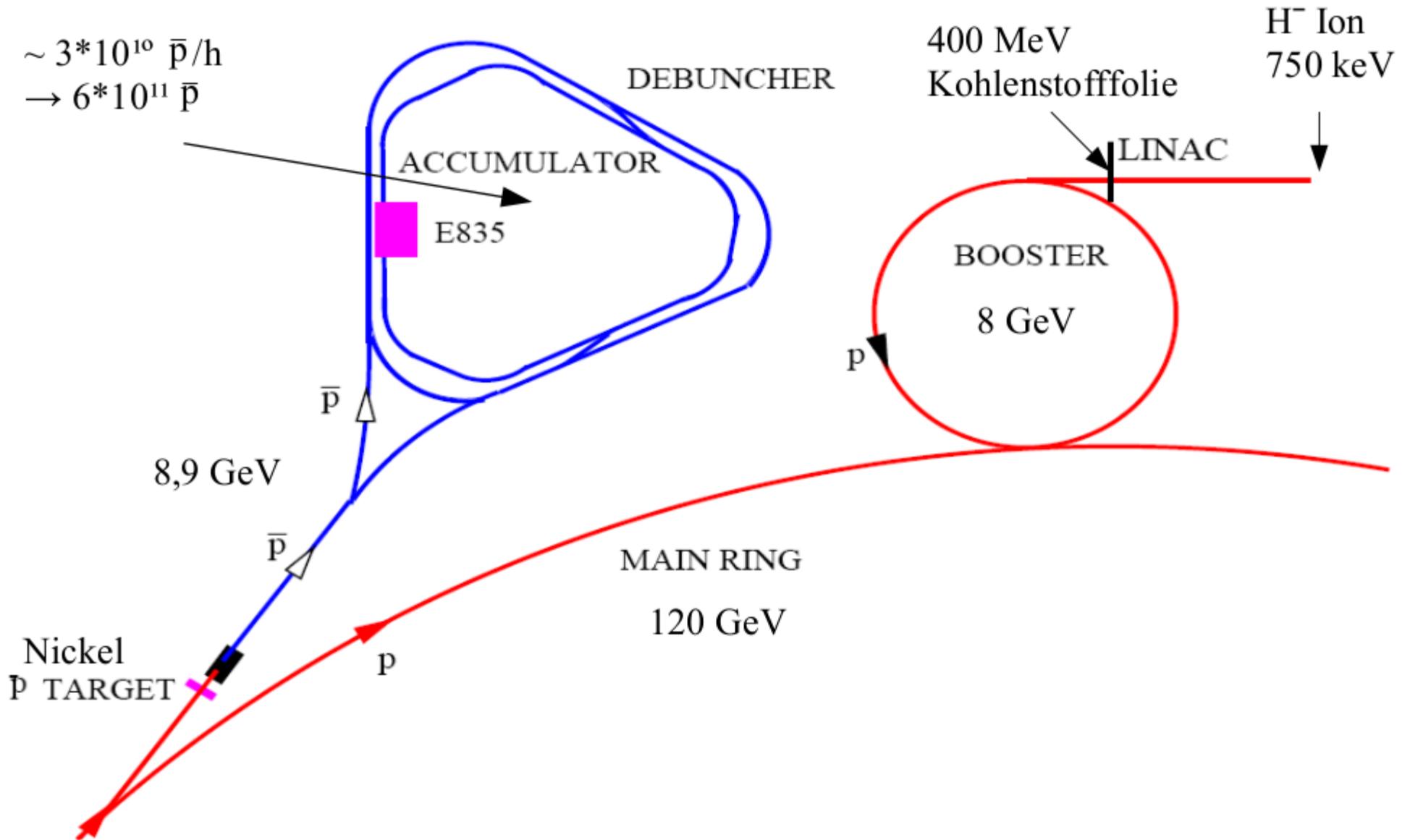
Strahlenergie nicht genau messbar

Notwendigkeit der Messung mit Szintillationszählern

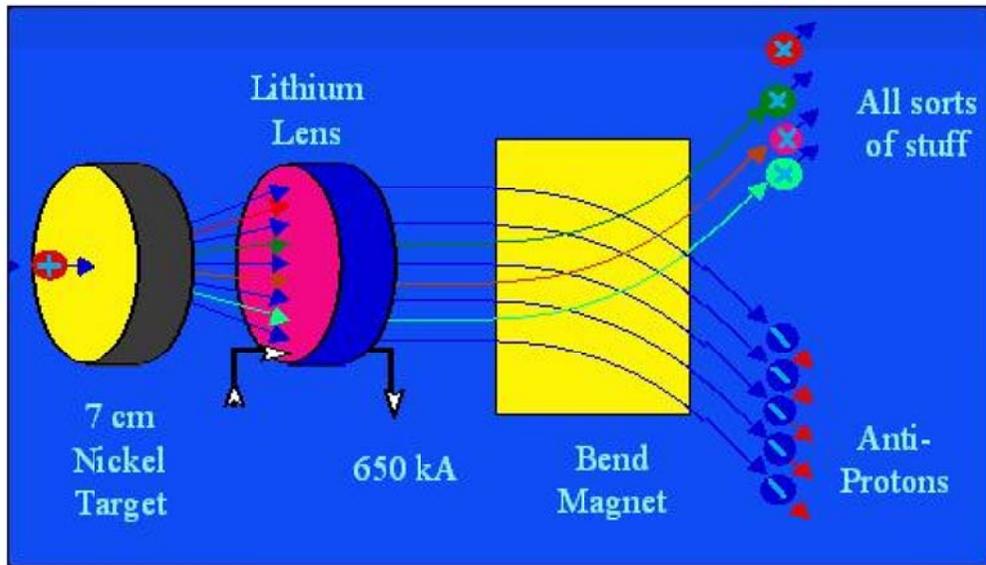
# 3. Teil: E835 am Fermilab



# Die Antiprotonenquelle



# Antiprotonen:



vom main injector werden p mit  
120GeV abgezweigt

Strahlquerschnitt  $0,12 \cdot$   
 $0,2\text{mm}^2$

$2 \cdot 10^{10}$  p pro bunch

80 bunches pro pulse

1 pulse alle 1,5s

in Nickeltarget

Hadronische Prozesse

Nickel wegen hoher

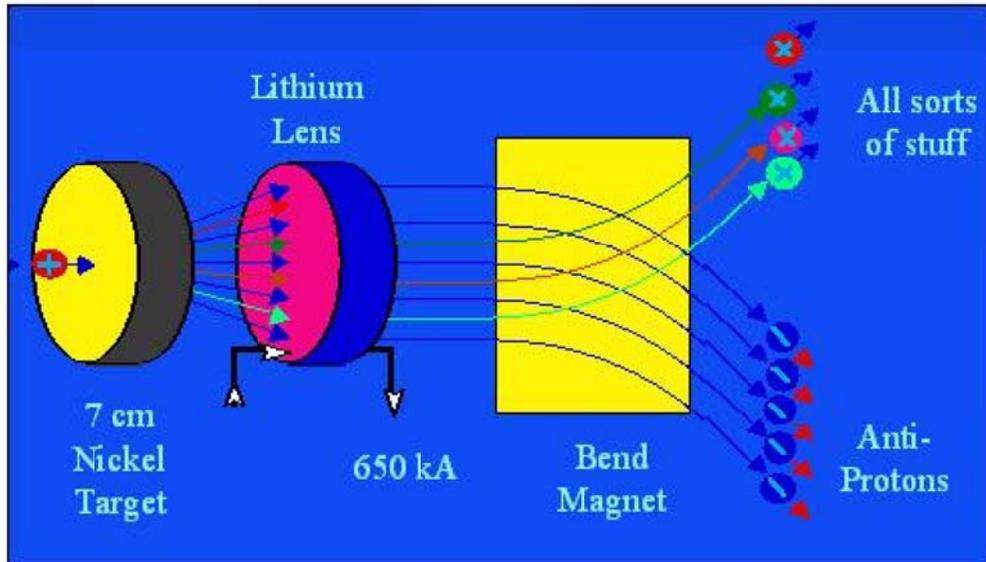
Schmelzwärme und

mechanischer Belastbarkeit

# Nickeltarget



# Antiprotonen



- kontinuierlicher Strahl erzeugt etwa ein pbar alle  $10^6$  Kollisionen

- Lithium-Linse (2cm Durchm., 10cm Dicke) fokussiert

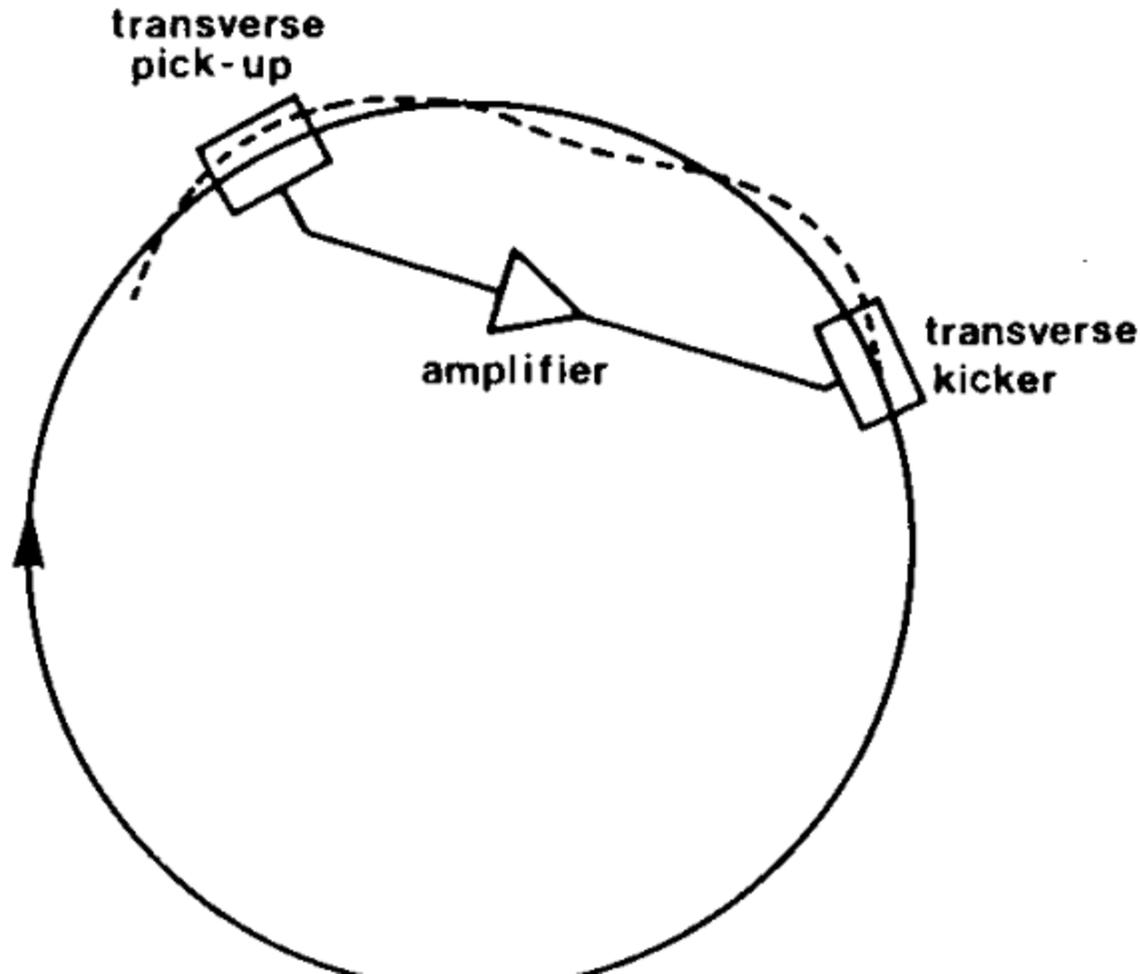
- Antiprotonen mit 8,9GeV werden über Massenspektrometer gefiltert

# Strahlkühlung

Erfunden von Simon van der Meer (Nobelpreis)

Passives System nach Satz von Liouville nicht möglich.

Mit aktivem System möglich:



# Strahl bremsen

Mit 3 kV Elektroden wird der Strahl um 20 MeV/s gebremst

Mit 38 Dipolmagneten und 90 Strahlpositionsmonitoren wird der Strahl auf eine Fläche mit  $r = 2.5\text{mm}$  gebündelt

Die Impulsunschärfe des Strahls steigt wieder auf  $\sim 0.2\%$  an

# Bestimmung der Strahlenergie

$$E_{\vec{p}} = \frac{m_p c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{f L_{orbit}}{c}\right)^2}}$$

Die Frequenzmessung ist viel genauer als die

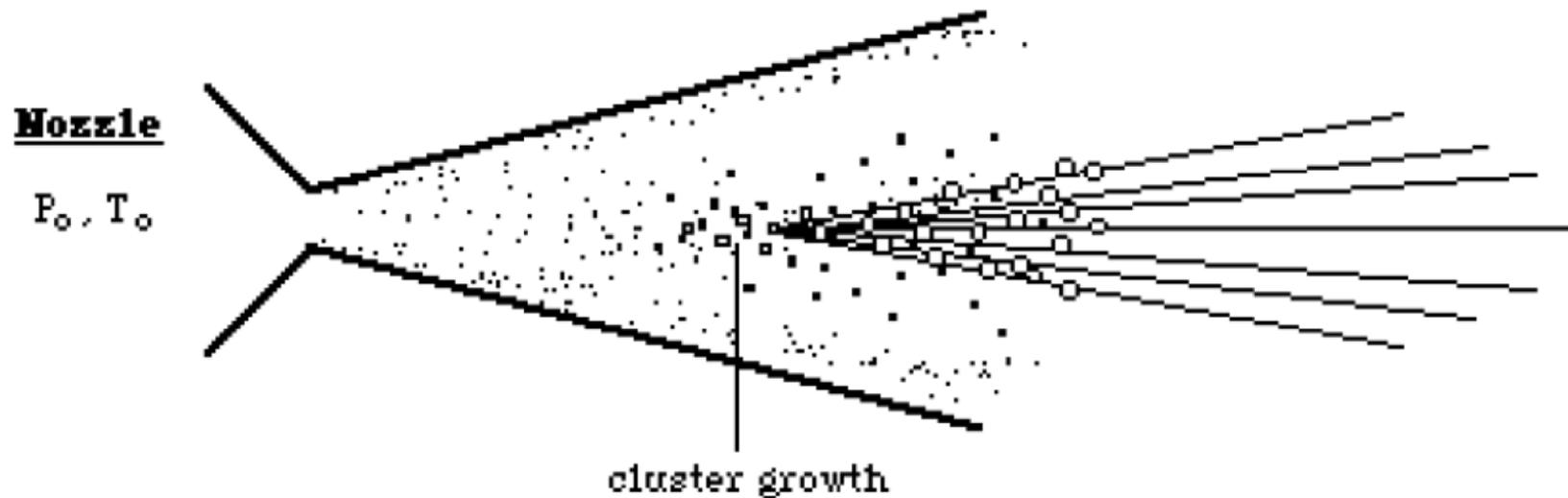
Längenmessung

Entwicklung nach  $L_0 + \Delta L$

Messung an Psi'

Genauigkeit 100-200keV

# Fixed-Target

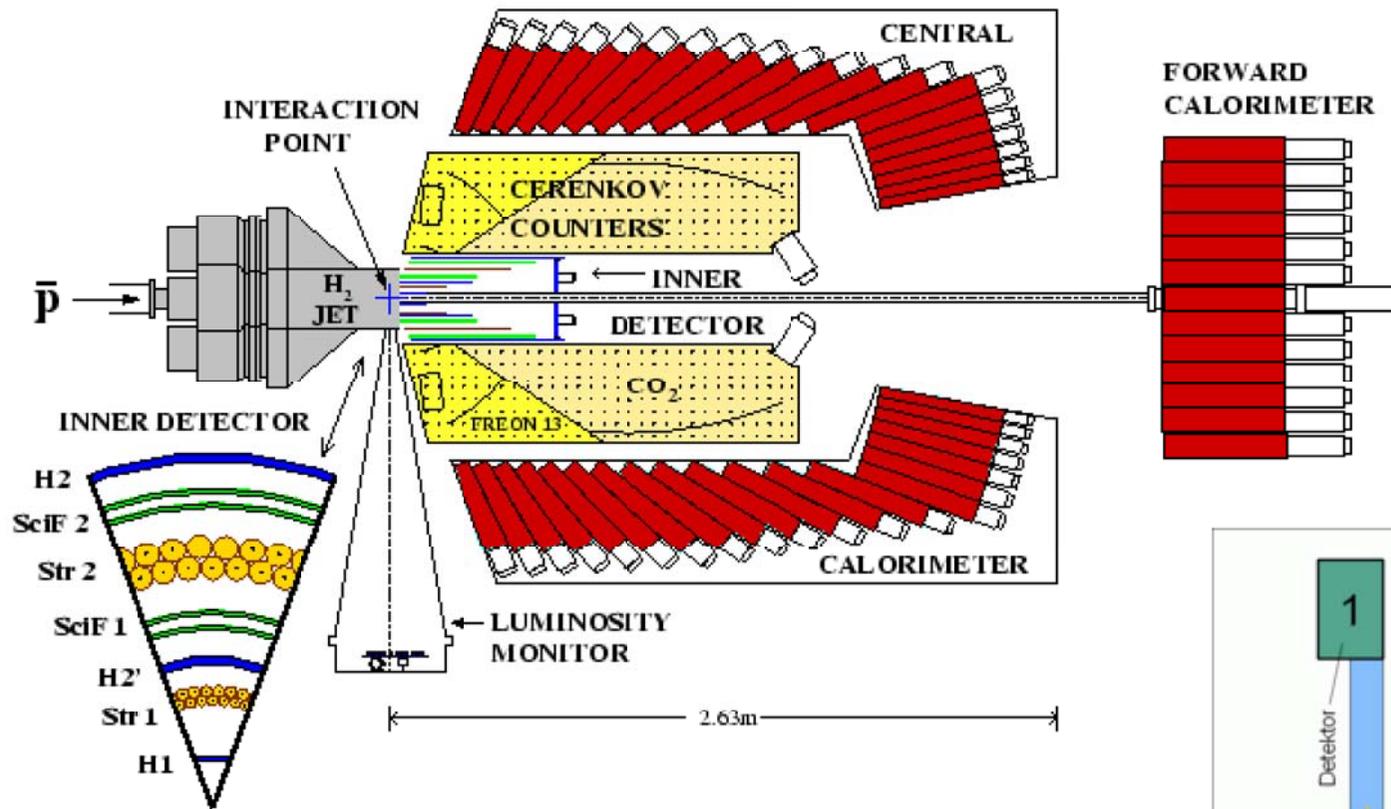


Mit einer Fluggeschwindigkeit von 3600 km/h wird Wasserstoff in den Strahlengang gesprüht  
Durch schnelle Expansion von  $T_0 \sim 20\text{K}$  und  $P_0 \sim 7\text{ bar}$  bilden sich aus dem übersättigtem Wasserstoffgas Cluster von  $10^7\text{--}10^8\text{ H}_2\text{-Molekülen}$   
Dies war ein wichtiges Upgrade für E835

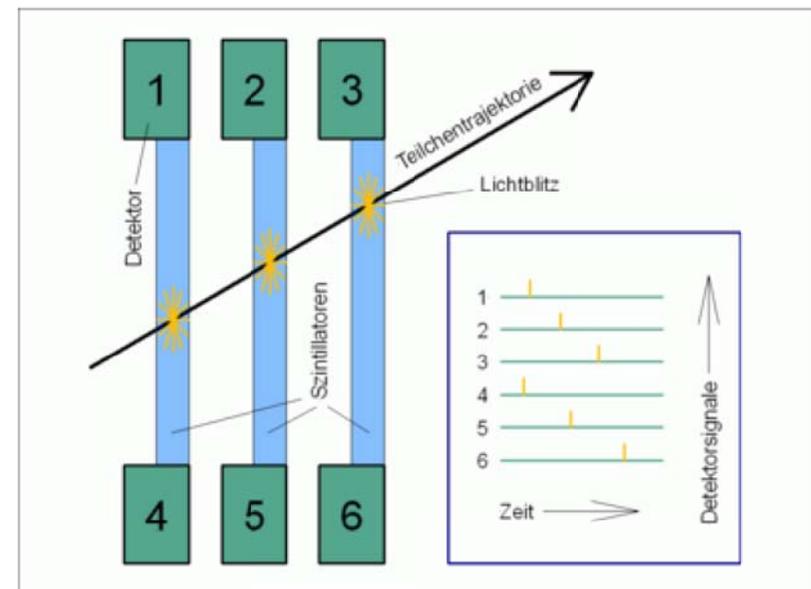


# Innerer Detektor

E835 EQUIPMENT LAYOUT (Y2K)



SciF scintillating fiber  
 H scintillator  
 hodoscope  
 (Plastik)  
 Str straw chambers



# Čerenkov Zähler & Kalorimeter

Čerenkov-Schwellen-Zähler

Und

Kalorimeter (Bleiglas) mit Energieauflösung

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{60 \text{ ‰}}{\sqrt[4]{E}} + 14 \text{ ‰}$$

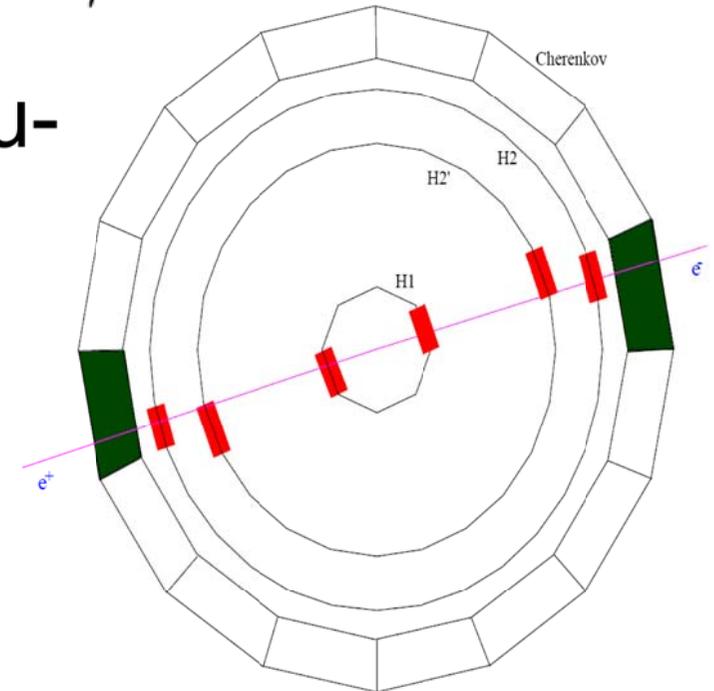
# Detektion

$$\frac{\sigma(\bar{p}p \rightarrow (c\bar{c})_R)}{\sigma(\bar{p}p \rightarrow X)} \stackrel{\text{Problem:}}{\leq} 10^{-5}$$

Deswegen werden nur folgende Kanäle

$$J/\psi + \gamma \rightarrow (e^+e^-) + \gamma \quad \text{betrachtet:}$$

Getriggert wird nur auf Nahezu-  
Backtoback-Ereignisse

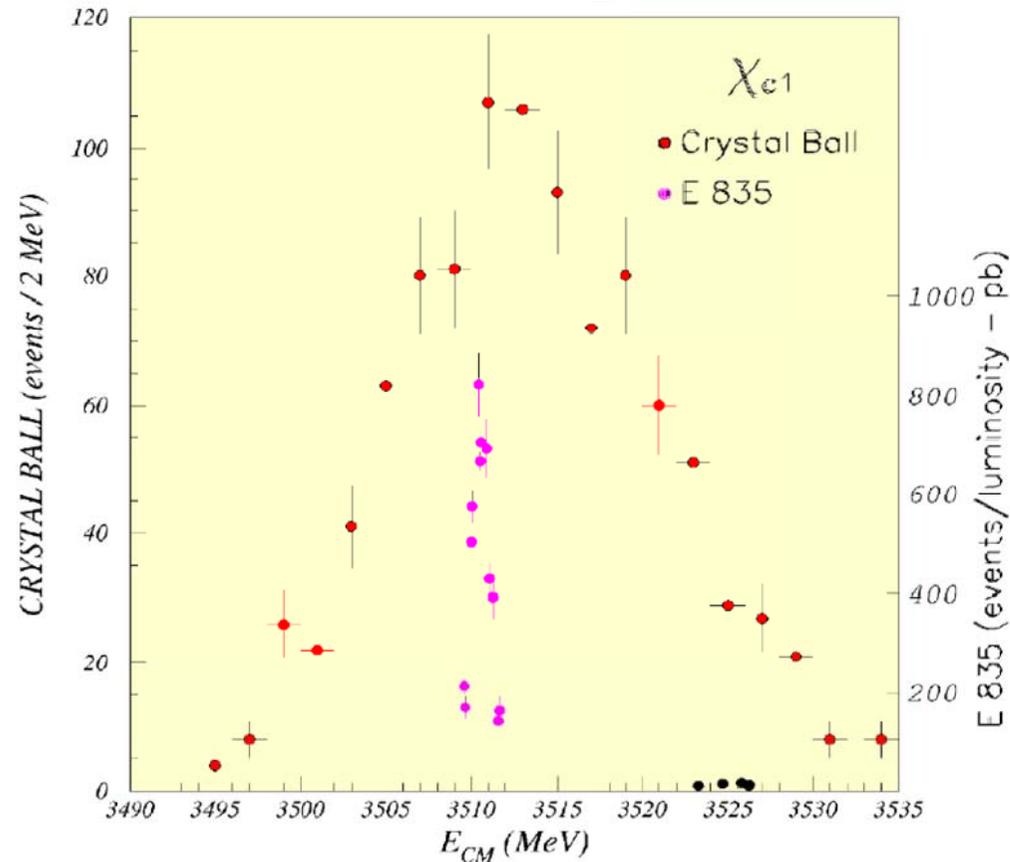


# Ergebnisse E835: $\chi_{c1}$

$$X_{c1} \quad (3510,6 \pm 0,1) \text{ MeV}$$

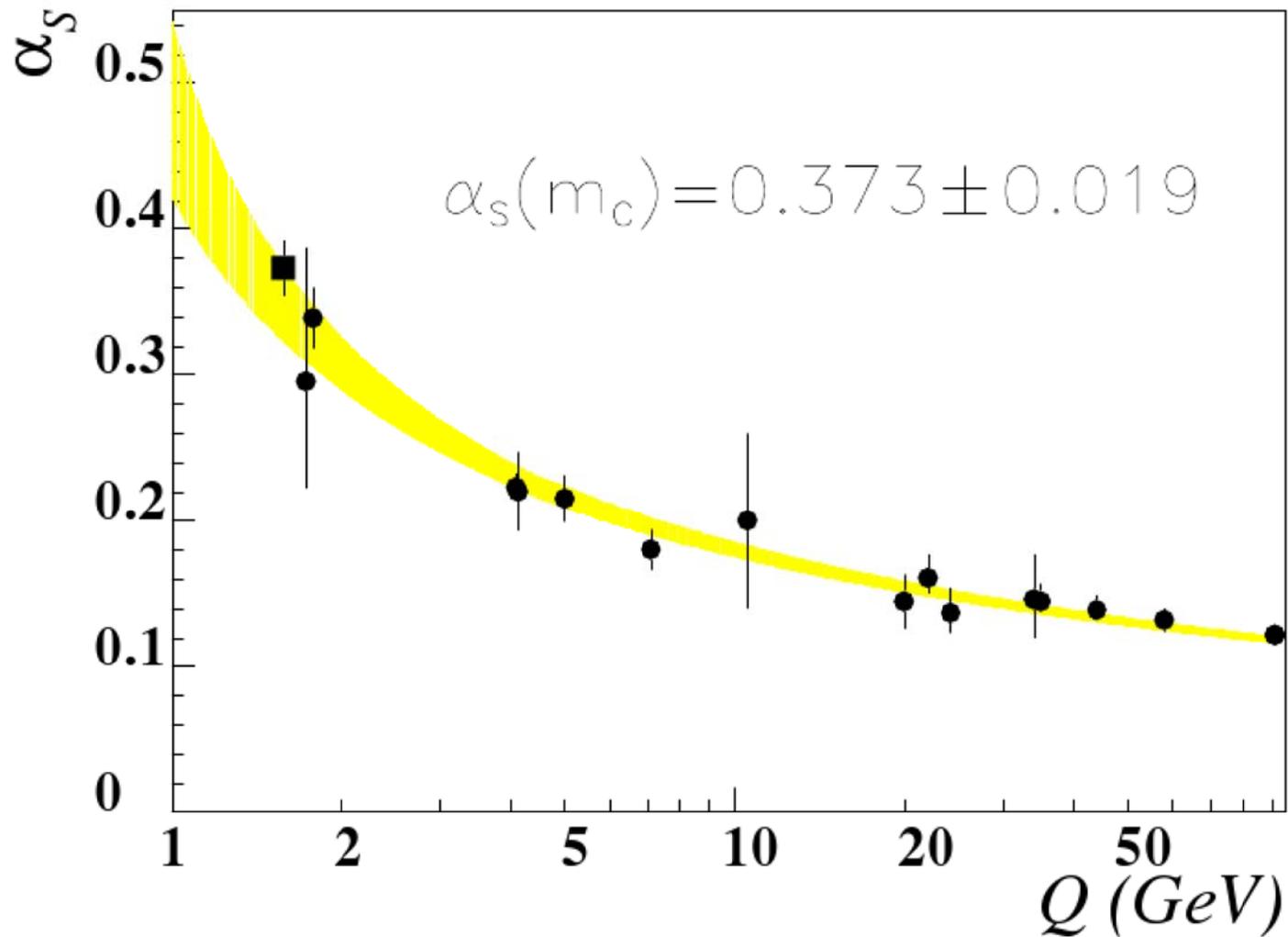
$$\Gamma(\chi_{c1}) \quad (0,88 \pm 0,11 \pm 0,08) \text{ MeV}$$

Zum Vergleich:

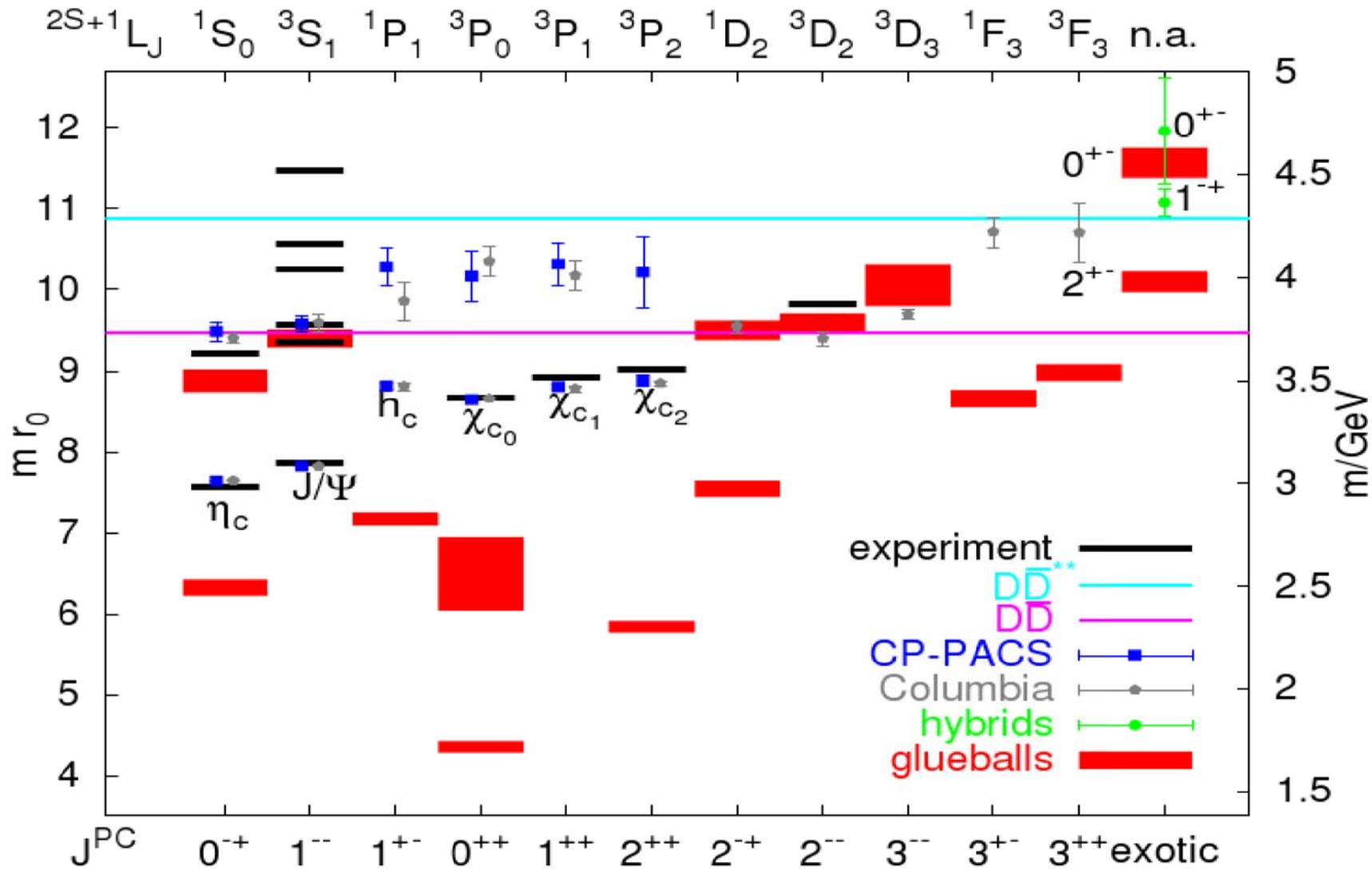


Durch Verbesserung der Messung der  
Eingangsennergie

# Werte für alpha



# Aktuelles Termschema



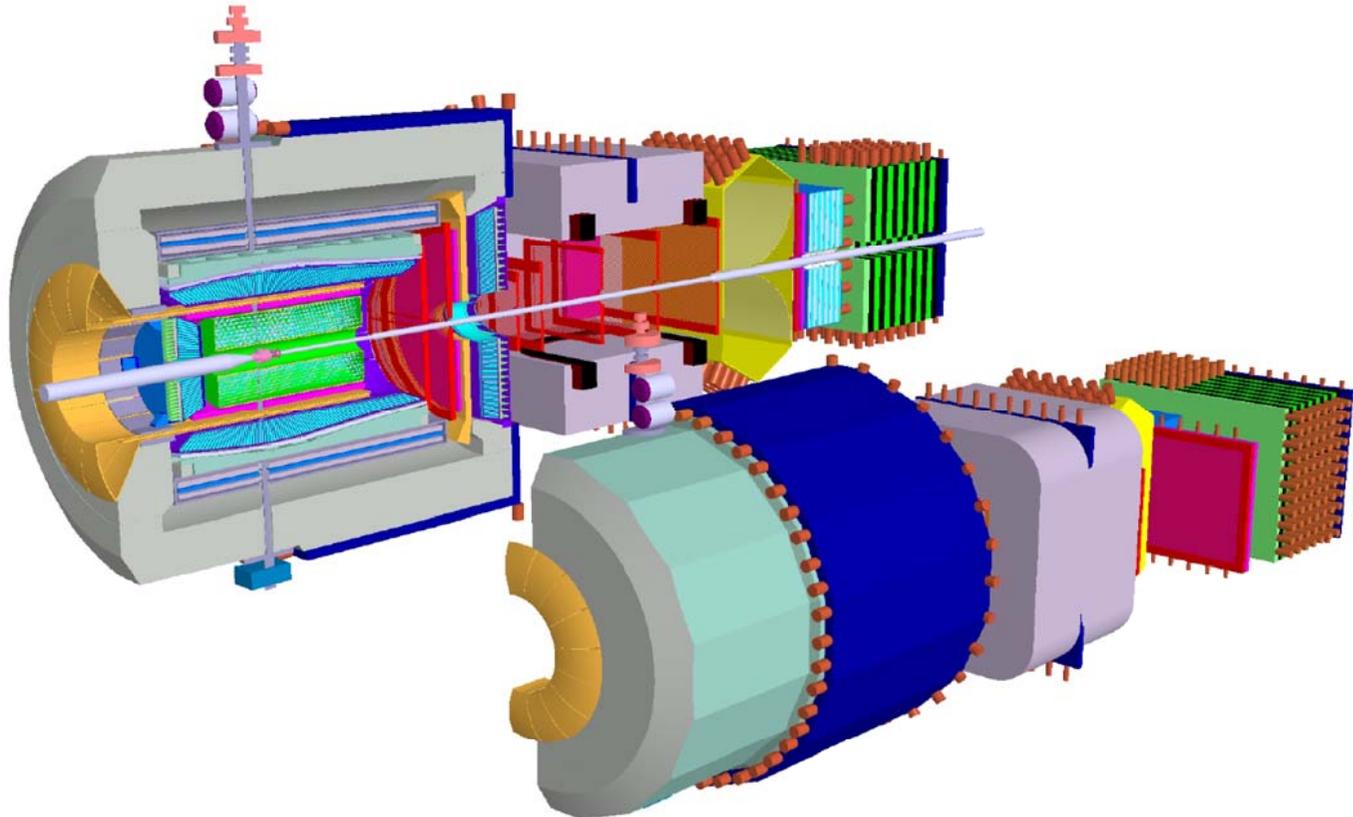
# 4. Teil: Ausblick

exotische Zustände

Zustände oberhalb  $D$   $D$ bar-threshold

Gegenstand der aktuellen Quarkonia-Forschung

Bsp.:  $P$ bar  $A$  Nihilations at  $D$  Armstadt



# Literatur

Bogdan Povh – Teilchen und Kerne

Simon van der Meer – Stochastic cooling and the accumulation of antiprotons

Keith Gollwitzer - The Fermilab Antiproton Source

A 519 (2004) 558–609 Experiment E835 at Fermilab

Brambilla et al. Quarkonium Working Group Heavy quarkonium physics

Paul Seyfert - Spektroskopie am Charmonium, Quarkonia

Stefan Müller-Klieser - Spektroskopie am Charmonium