

Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen und CP-Verletzung in B-Meson-Systemen

Michael Feindt

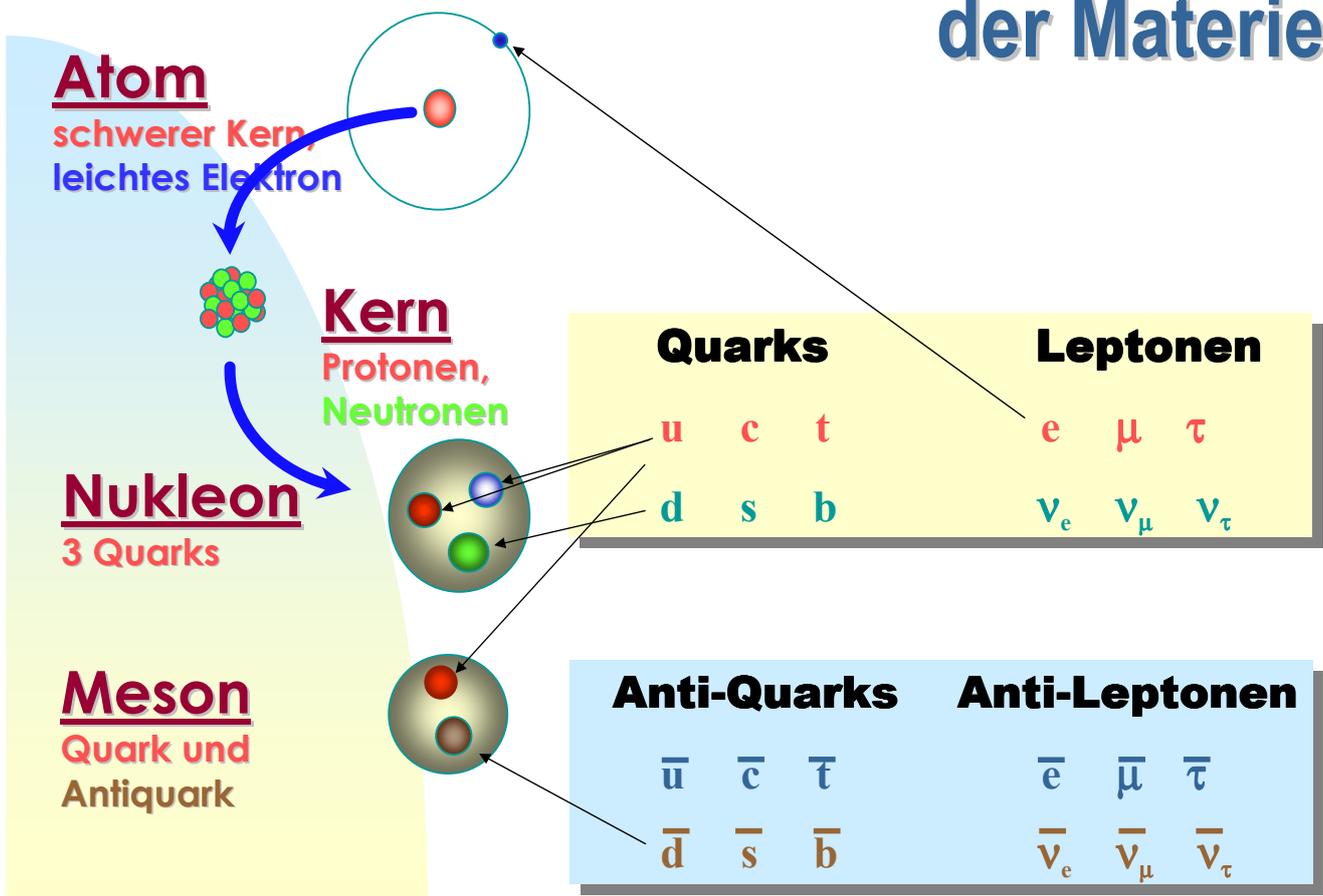
Antrittsvorlesung

Universität Karlsruhe

17. Juni 1998

<http://wwwinfo.cern.ch/~feindt>

Elementare Bausteine der Materie



Quark-Massen

up,down:

Bestandteile der stabilen Materie (p,n)

strange (seltsam):

K-Mesonen, Λ -Baryonen

charm (charmant):

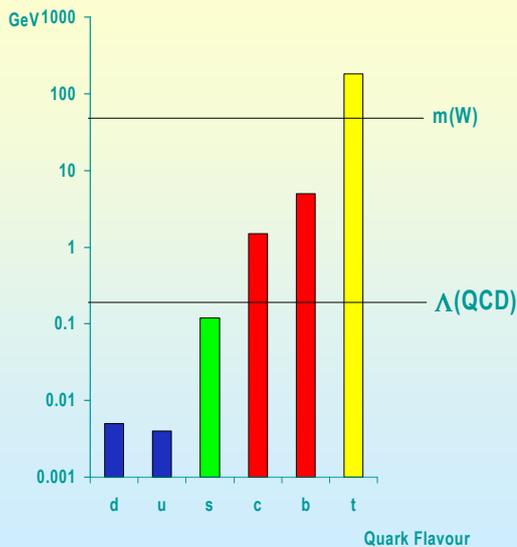
J/ ψ (1974), D-Mesonen

beauty (schön):

Y(1977), B-Mesonen

top (spitze):

(1995 CDF), keine gebundenen Zustände



Verletzend oder verletzt?

Schönheit:

Mesonen, die ein \bar{b} -Quark enthalten.

1. Teil:

Verletzte Schönheit:

Teilchen - Antiteilchen- Oszillationen:
Aus schönen B⁰-Mesonen können anti-schöne Anti-B⁰-Mesonen werden und umgekehrt.

(Das b-Quark hat Schönheit -1)



2. Teil:

Verletzende Schönheit:

B-Mesonen können eine wichtige Symmetrie, die sogenannte CP-Symmetrie, verletzen.

Mesonen sind gebundene Zustände aus Quark und Antiquark. Die Grundzustände (pseudoskalare Mesonen) sind:

	d	u	s	c	b
\bar{d}	π^0, η	π^+	\bar{K}^0	D^+	\bar{B}^0
\bar{u}	π^-	π^0, η	K^-	D^0	B^+
\bar{s}	K^0	K^+	η, η'	D_s	\bar{B}_s
\bar{c}	D^-	\bar{D}^0	\bar{D}_s	η_c	B_c^+
\bar{b}	B^0	B^-	B_s	B_c^-	η_b

Ladungskonjugation C vertauscht Teilchen und Antiteilchen

total neutrale Mesonen sind Eigenzustände vom Operator C

$C(\eta_c) = \eta_c$
Eigenzustand

	d	u	s	c	b
\bar{d}	π^0, η	π^+	\bar{K}^0	D^+	\bar{B}^0
\bar{u}	π^-	π^0, η	K^-	D^0	B^+
\bar{s}	K^0	K^+	η, η'	D_s	\bar{B}_s
\bar{c}	D^-	\bar{D}^0	\bar{D}_s	η_c	B_c^+
\bar{b}	B^0	B^-	B_s	B_c^-	η_b

$C(\pi^-) = \pi^+$:
kein Eigenzustand von C

Erhaltung der elektrischen Ladung verbietet Übergänge von + nach -

	d	u	s	c	b
\bar{d}	π^0, η	π^+	\bar{K}^0	D^+	\bar{B}^0
\bar{u}	π^-	π^0, η	K^-	D^0	B^+
\bar{s}	K^0	K^+	η, η'	D_s	\bar{B}_s
\bar{c}	D^-	\bar{D}^0	\bar{D}_s	η_c	B_c^+
\bar{b}	B^0	B^-	B_s	B_c^-	η_b

$C(B^0) = \bar{B}^0$: kein Eigenzustand von C

	d	u	s	c	b
\bar{d}	π^0, η	π^+	\bar{K}^0	D^+	\bar{B}^0
\bar{u}	π^-	π^0, η	K^-	D^0	B^+
\bar{s}	K^0	K^+	η, η'	D_s	\bar{B}_s
\bar{c}	D^-	\bar{D}^0	\bar{D}_s	η_c	B_c^+
\bar{b}	B^0	B^-	B_s	B_c^-	η_b

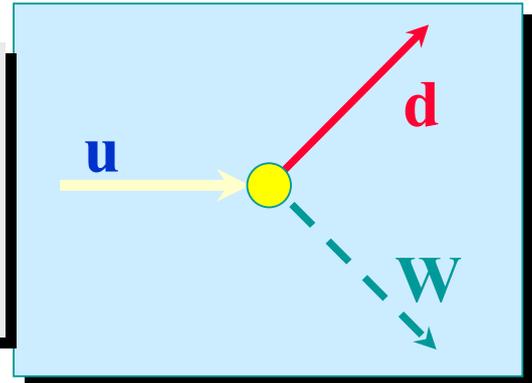
Erhaltung der ladungsartigen Quantenzahlen S, C und B kann jedoch durch schwache Wechselwirkung verletzt werden. Kopplung zwischen Teilchen und Antiteilchen möglich

$B^0 \rightarrow \bar{B}^0$ erlaubt

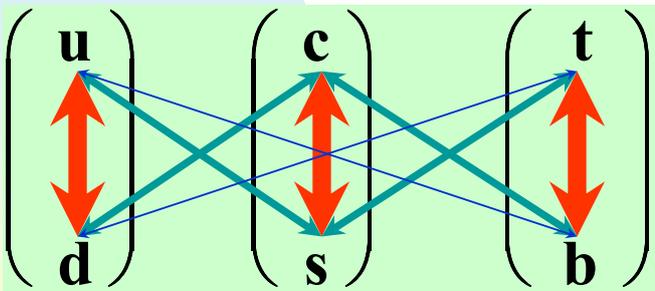
Quarks bilden 3 Familien mit je 2 Zuständen:
 schwacher Isospin $I_z = +1/2, -1/2$
 elektrische Ladung: $+2/3, -1/3$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{d} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathbf{c} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$$

Übergänge zwischen
 $I_z = +1/2$ und $-1/2$
 durch Emission oder
 Absorption von W-Bosonen



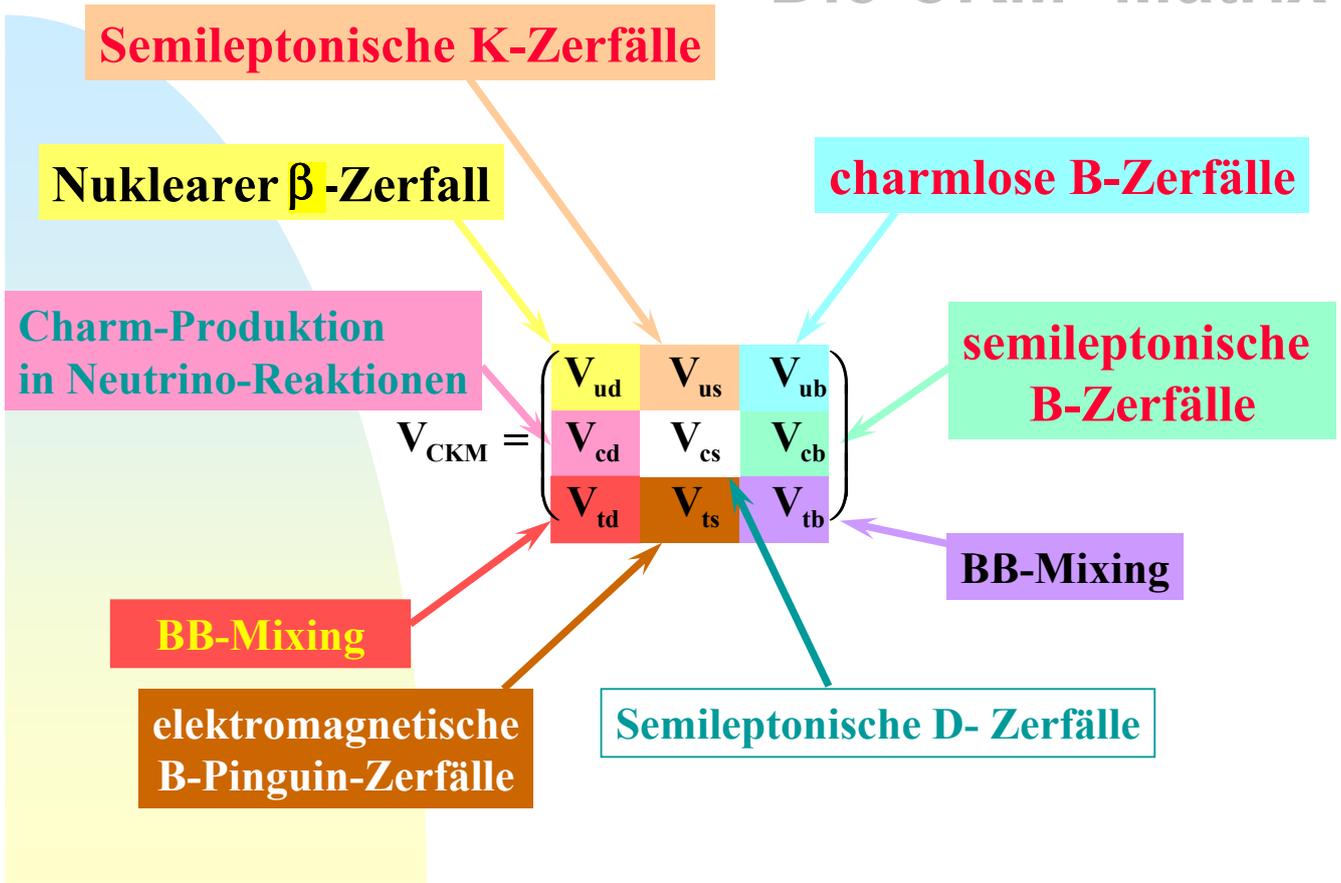
W-Emission hauptsächlich innerhalb einer
 Familie, aber auch Sprünge über eine oder
 zwei Familiengrenzen erlaubt:



parametrisiert durch
 Cabibbo-Kobayashi-
 Maskawa-Matrix

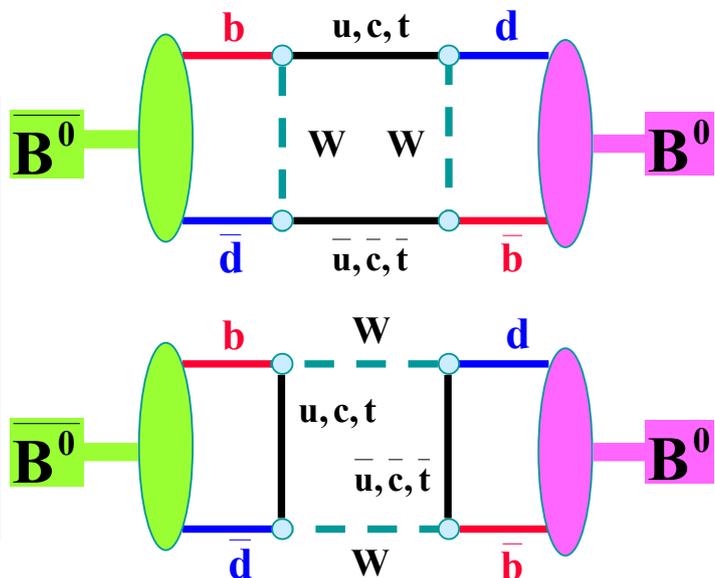
$$\mathcal{A} = \bar{q}_{+1/2} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) V_{\text{CMK}} q_{-1/2}$$

Die CKM- Matrix

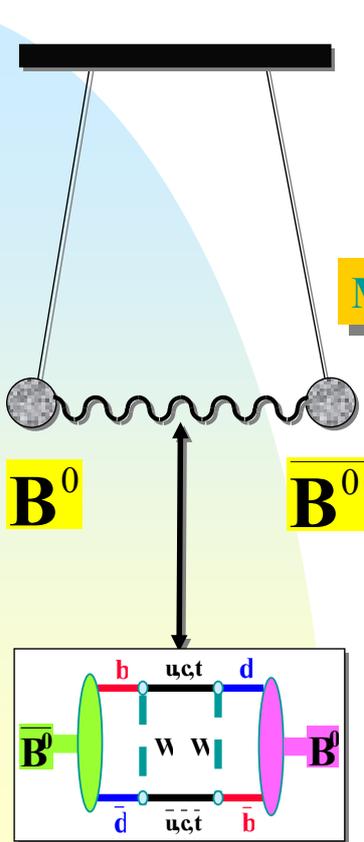


Schwache Wechselwirkung 2. Ordnung erlaubt Kopplung zwischen neutralen Teilchen und Antiteilchen (Box-Diagramme).

Für massenentartete Familien verschwindet die kohärente Summe (GIM-Mechanismus). Wegen hoher Masse des top-Quarks bleibt jedoch endlicher Beitrag.



Analogie: Gekoppelte Schwingungen



Wellenfunktion

$$\psi \propto \exp(imt) \exp(-\Gamma/2t)$$

Masse = Schwingungsfrequenz

Breite = exponentieller Abfall (Zerfälle)

Durch Kopplung kann Schwingungsenergie
von einem Pendel zum anderen übergehen:
=> zeitabhängige Schwebung

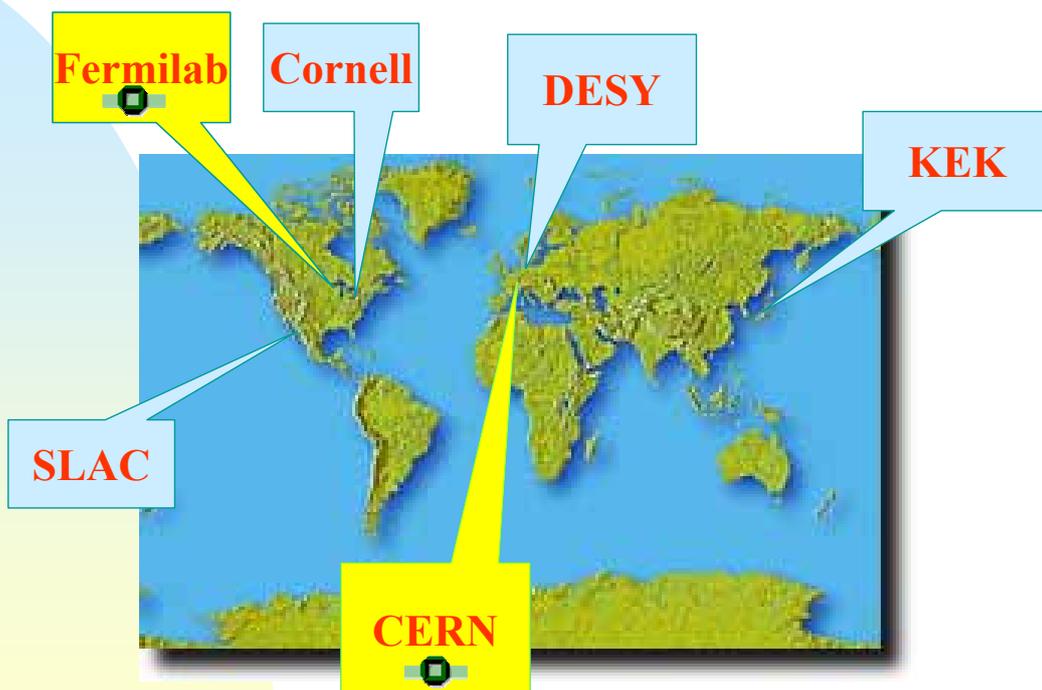
$$B_+ = B^0 + \bar{B}^0 \text{ und } B_- = B^0 - \bar{B}^0$$

sind stationäre Zustände.
 $\Delta m \propto$ Schwebungsfrequenz

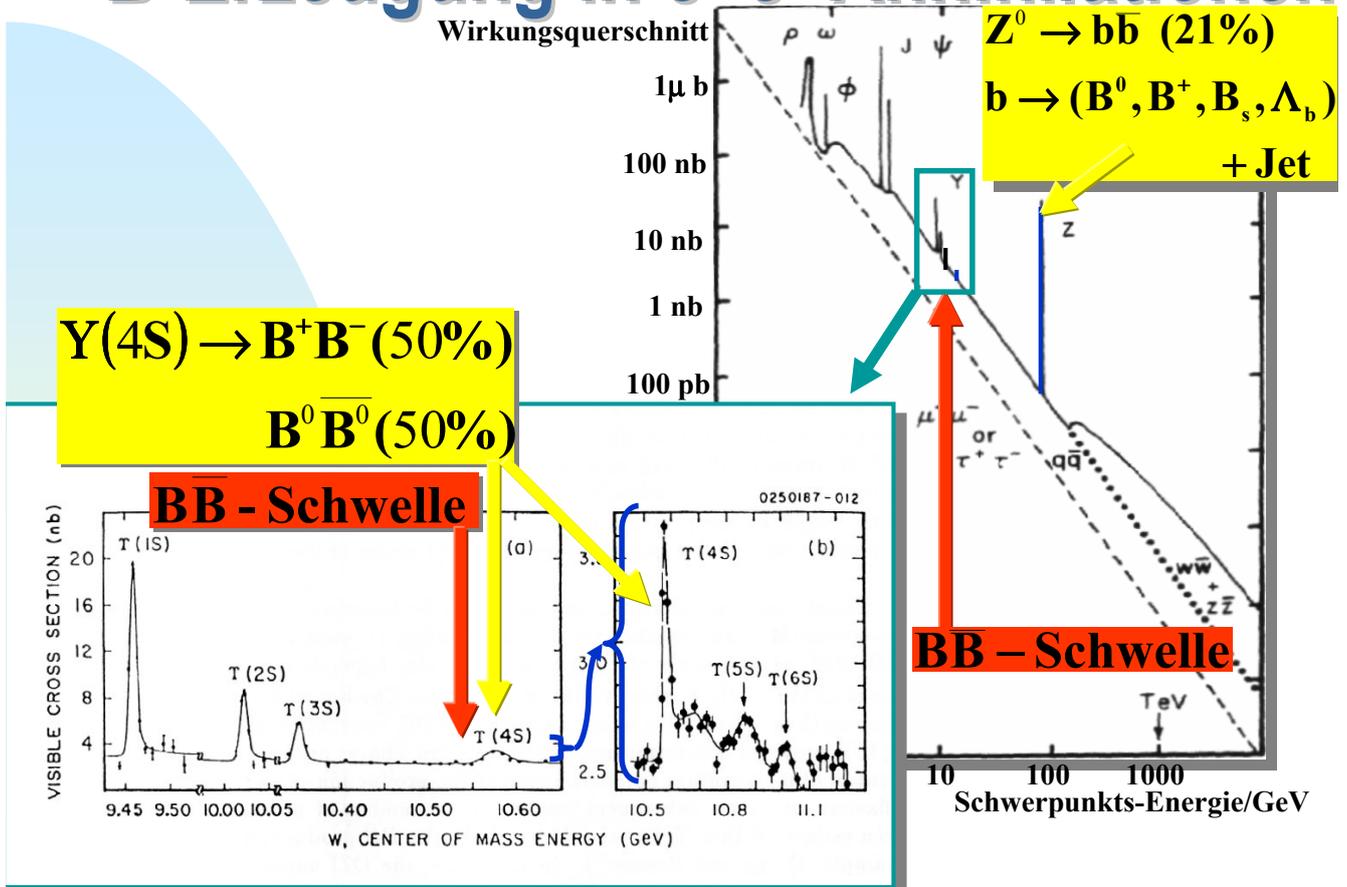
Simulation ==>



B-Physik Experimente -- weltweit



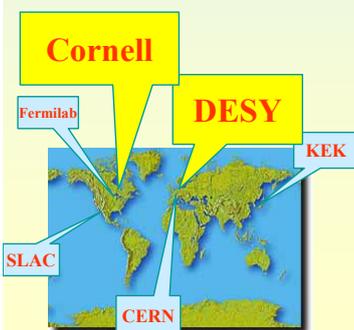
B-Erzeugung in e+e- Annihilationen



Symmetrische Y(4S) e+e- Collider



- ARGUS (DESY) und CLEO (Cornell):
- Datennahme seit 1979
- CLEO wird weiterhin modernisiert und bekommt höhere Luminosität
- sehr viele detaillierte Untersuchungen von B-Mesonen



- 2 B-Mesonen, fast in Ruhe
- Zerfallsteilchen beider Bs nicht unterscheidbar
- keine Messung der Zerfallszeit möglich

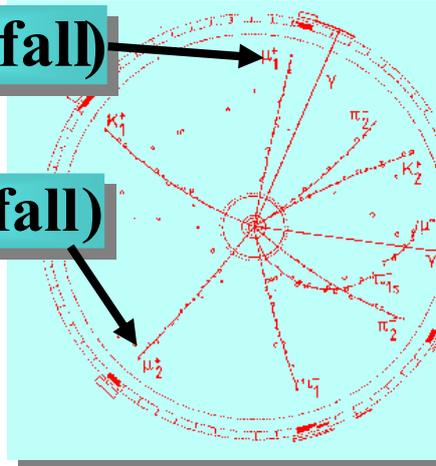
Erste Evidenz für B-B Mischung

ARGUS 1987:

■ Schubert

μ^+ (aus B^0 – Zerfall)

μ^+ (aus B^0 – Zerfall)



Y(4S)-
Zerfälle mit 2 gleich
geladenen Leptonen

17% aller B^0
zerfallen als \overline{B}^0
(und umgekehrt)



Erster Hinweis auf
ein schweres top-Quark

Z0 e+e- Collider



- e+e- Kollisionen bei hohen Energien (Z-Resonanz, 91 GeV)
- LEP am CERN: 27km
- 4 große Detektoren: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL
- SLD am Linearcollider SLC
- sehr viele detaillierte Untersuchungen von B-Hadronen, komplementär zu Y(4S)



- 2 B-Hadronen mit $P \sim 30$ GeV in b-Jets
- separierbare Sekundärvertices
- Lebensdauer und Zeitabhängigkeit der Teilchen-Antiteilchen-Oszillation meßbar

Das Forschungslabor CERN bei Genf



CERN und LEP von oben



CERN-Daten: gegründet 1957

ca. 3000 Angestellte (davon 4 Nobelpreisträger) und 6000 Gäste (incl. Nobelpreisträger) aus 500 Instituten der ganzen Welt

Jahresbudget ca. 1.000.000.000 CHF

Stromverbrauch ca. 1.000.000 MWh/ Jahr (40% vom Kanton Genf)

LEP-Tunnel und Maschine 1.300.000.000 CHF (über 10 Jahre)

LEP- Bauzeit 7 Jahre

Operation voraussichtlich 12 Jahre (1989 - 2000)

4 LEP-Experimente 480.000.000 CHF

Zukunftsprojekt LHC im LEP Tunnel, Betrieb ab ca. 2005

Zugang zum DELPHI Experiment



100 Meter tiefer: DELPHI



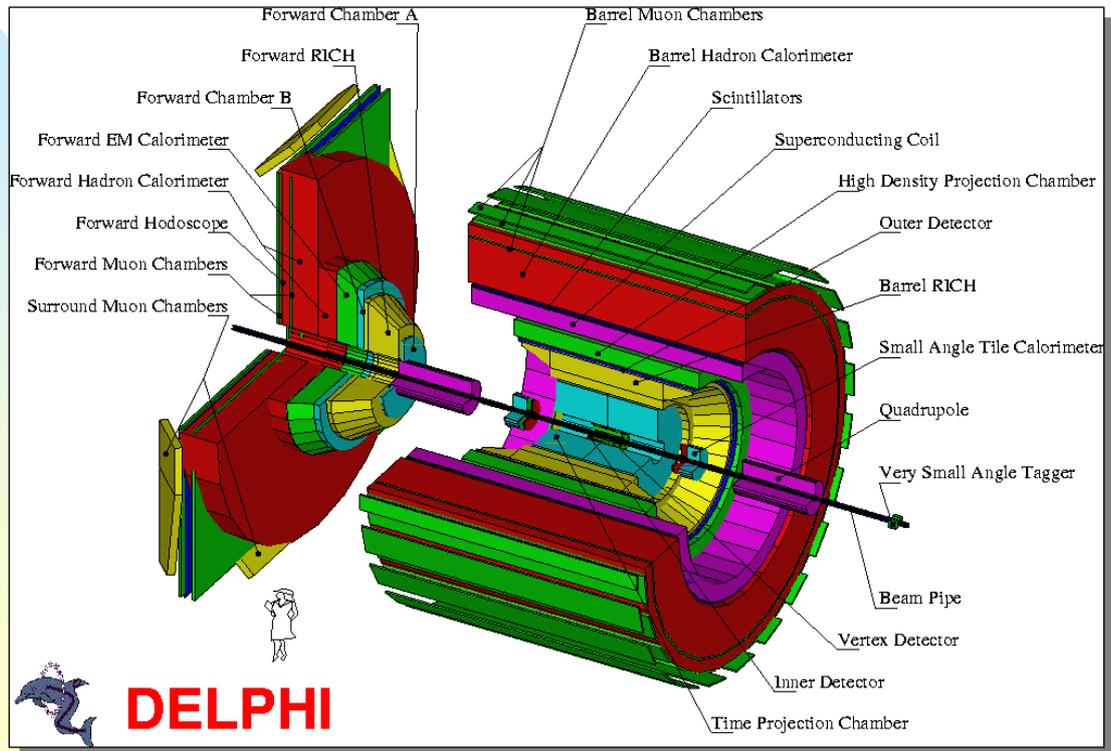
Blick in den Tunnel: 27 km Magnete und Kavitäten





de Boer, M.F.,
Fries, H.Müller

Die Komponenten des DELPHI-Detektors



DELPHI-Daten:

ca. 550 beteiligte Physiker

**größter supraleitender Magnet der Welt: Durchmesser 6.2m,
7.4 m lang, Magnetfeld $B=1.2$ T, Strom $I=5000$ A**

Detektordurchmesser 10 m

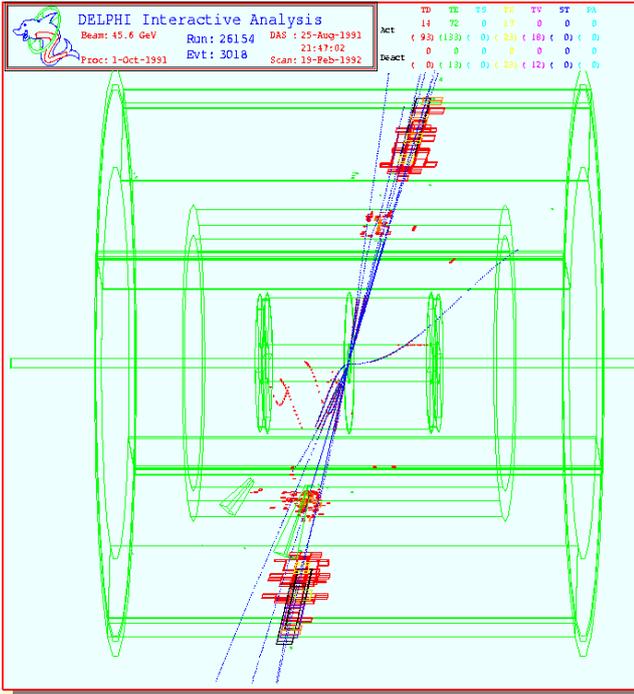
Gewicht 3200 t (ca. 50% des Eiffelturms)

totale Kabellänge: 1100 km

**Auflösung des Vertexdetektors: $7 \mu\text{m}$ ($< 1/1.000.000$ der
Detektorabmessungen)**

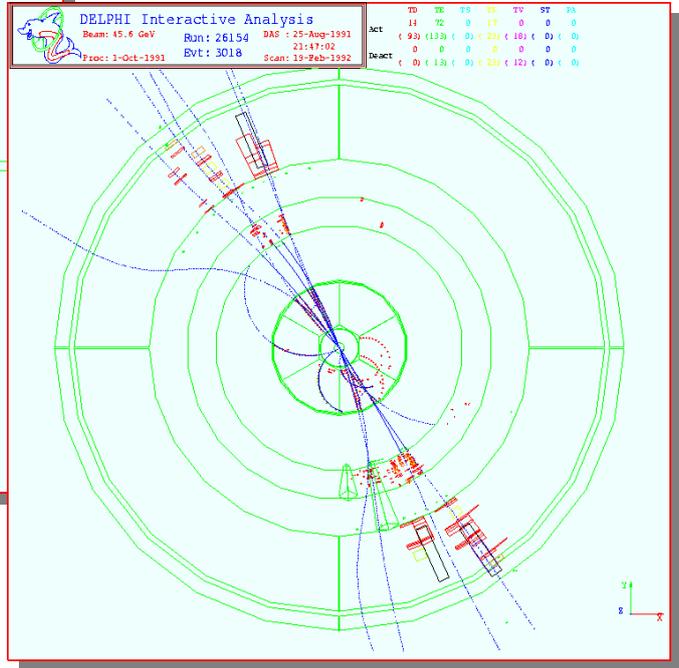
191 Veröffentlichungen (Stand Juni 1998)

2-Jet-Ereignis in DELPHI



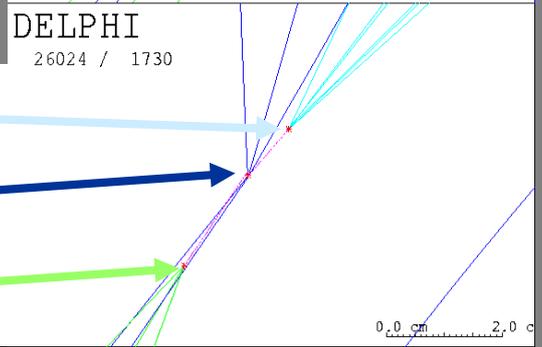
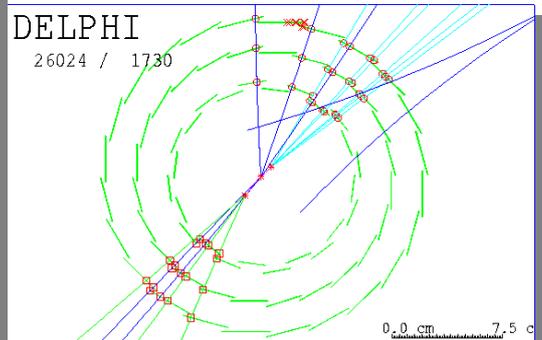
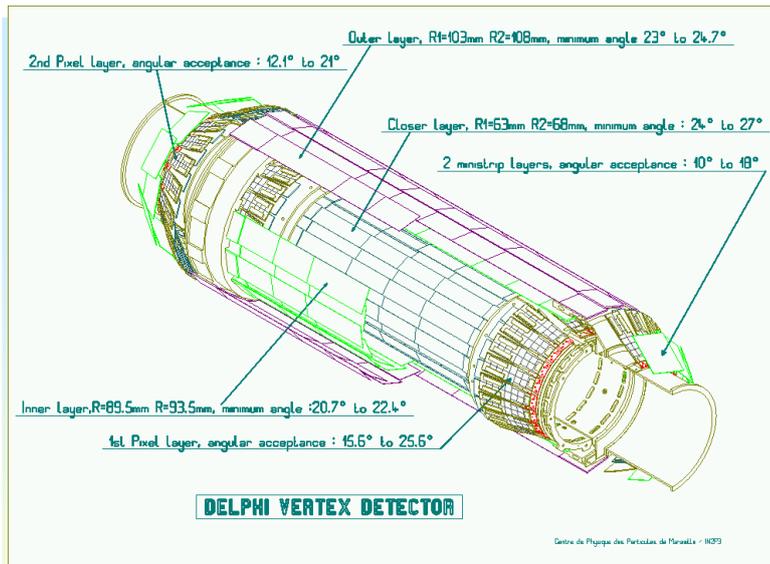
Quarks sind nicht frei beobachtbar.

Beobachtet werden von ihnen erzeugte Teilchenbündel (Jets)



Der DELPHI- Silizium-Vertexdetektor

$$\sigma \approx 7\mu\text{m}$$



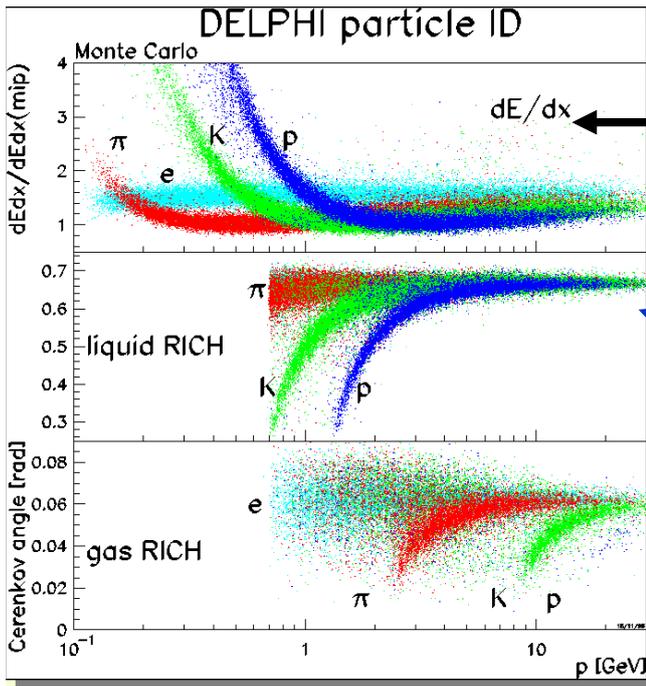
Lebensdauer von b-Hadronen (ca. 1.5 ps) führt zu beobachtbarer Zerfallslänge

B-Zerfalls-Vertex

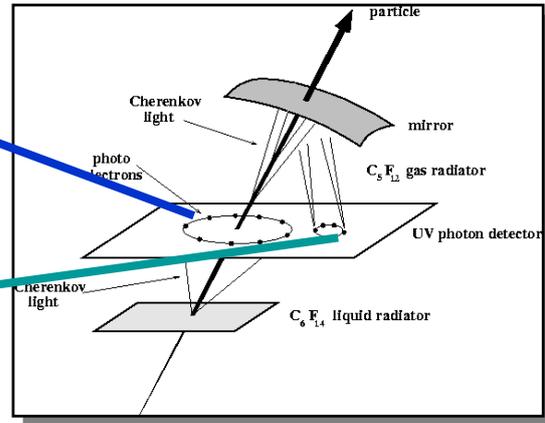
Haupt-Vertex

B-Zerfalls-Vertex

Teilchenidentifikation in DELPHI



Spezifischer Energieverlust in der Zeit-Projektions-Kammer



Ring-imaging Cerenkov-Counter: Photonenabstrahlung bei Überlichtgeschwindigkeit im Medium

Benötige

- B-Meson-Anreicherung
- Klassifizierung
- osziiert - nicht osziiert
- Zerfallslängenmessung
- Energiemessung

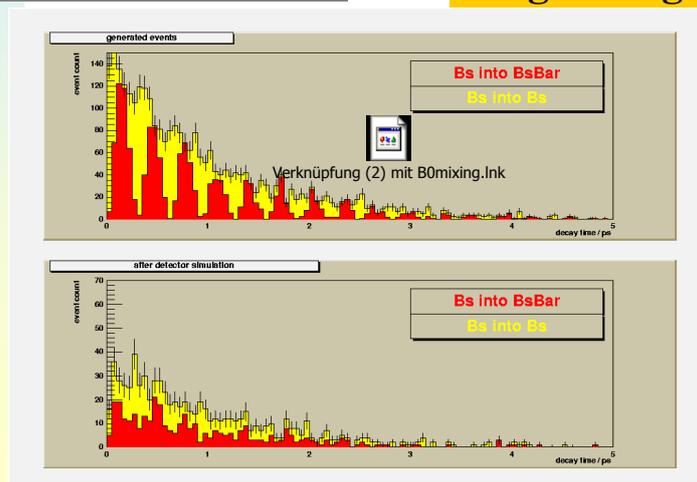
Lebensdauer

oszillationsanalysen

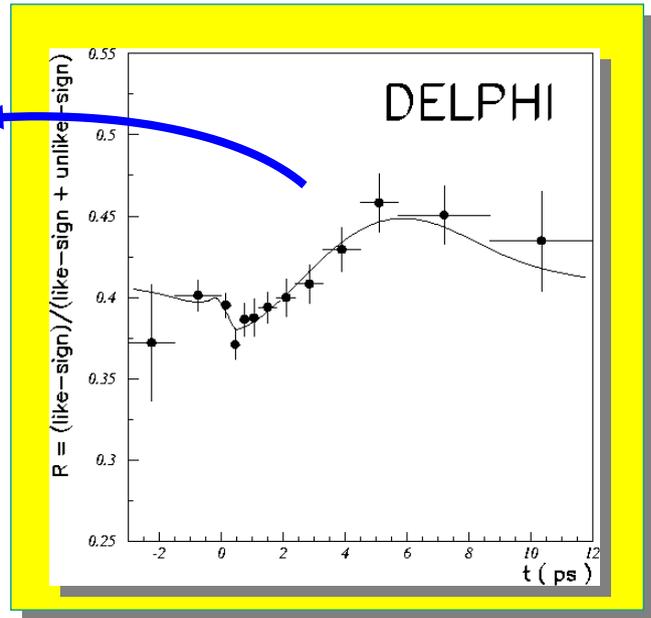
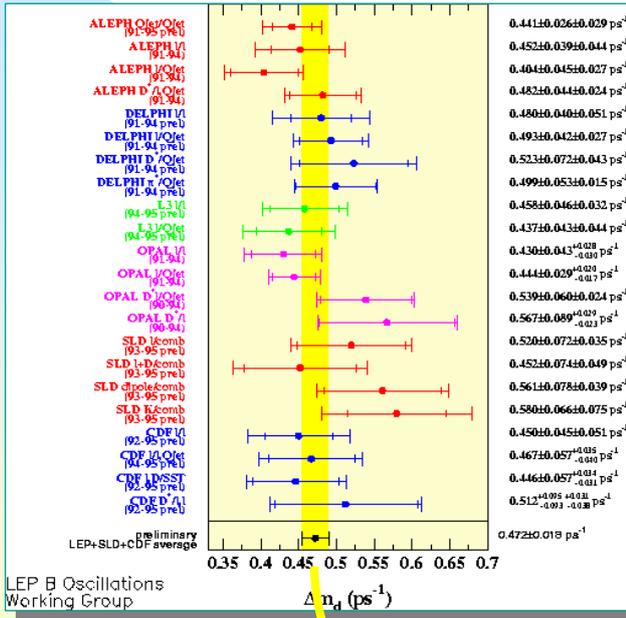
Möglichst hohe Reinheit

Möglichst große Effizienz

Möglichst gute Auflösung

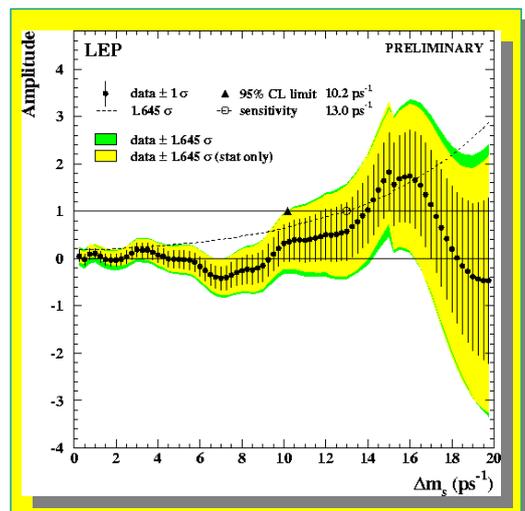
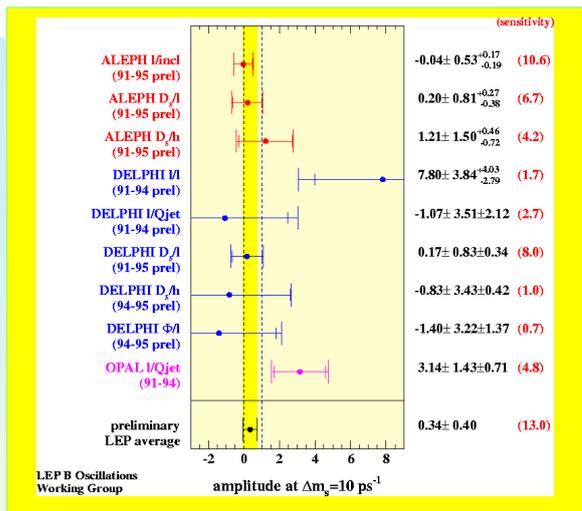


B0-Oszillations-Resultate



$$\Delta m_d = 0.472 \pm 0.018 \text{ ps}^{-1}$$

Bs-Oszillations-Resultate

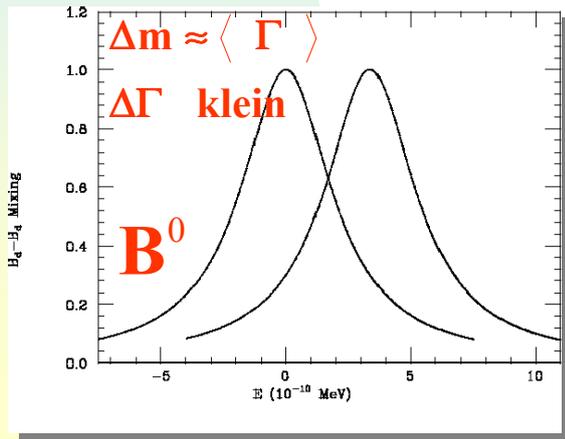
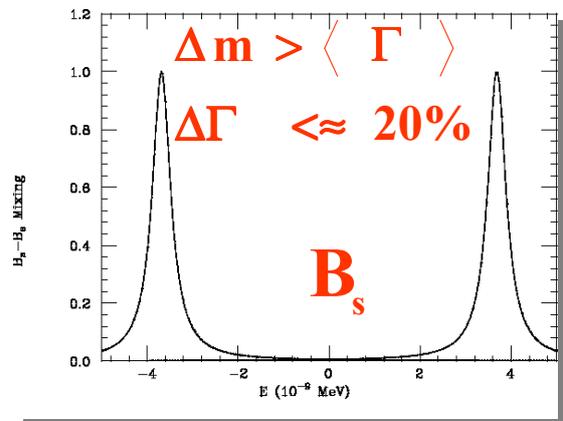
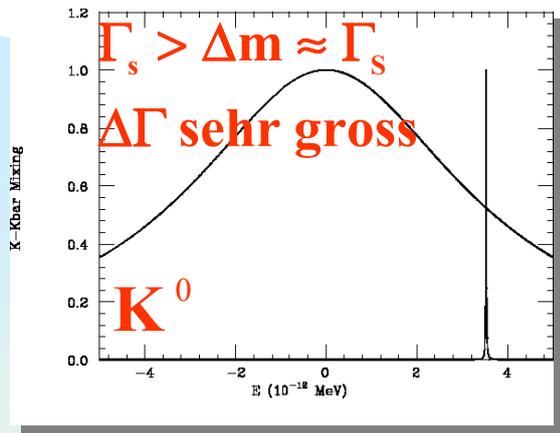


**Daten konsistent mit sehr schneller Oszillation.
Frequenz bisher nicht auflösbar. Resultat:
Untere Grenze für Massendifferenz:**

$$\Delta m_s > 10.2 \text{ ps}^{-1} \text{ bei } 95\% \text{ c.l.}$$

K- und B-Mischung im Energie-Raum

Breit-Wigner-Resonanzkurven



$D^0 - \bar{D}^0$ - Mischung:
 Δm sehr klein. Kurven
ununterscheidbar

FEHLER

**ES IST EIN IRREPARABLER
FEHLER AUFGETRETEN.
CODE 033-XX-983/3**334240@.
RUFEN SIE DIE HOTLINE UNTER
001-353-9348546-23345 AN.**

#####

#####-##-####/#**#####.

###-###-#####-##### #.

DISKRETE SYMMETRIEN

C: Ladungskonjugation	Teilchen >> Antiteilchen	$C\psi = \eta\psi$, $\eta=1, -1$
P: Parität	rechts >> links	$P\psi = \eta\psi$, $\eta=1, -1$
T: Zeitumkehr	vorwärts >> rückwärts	$T\psi = \eta\psi$, $\eta=1, -1$

CPT-Theorem: in allen Feldtheorien gilt:

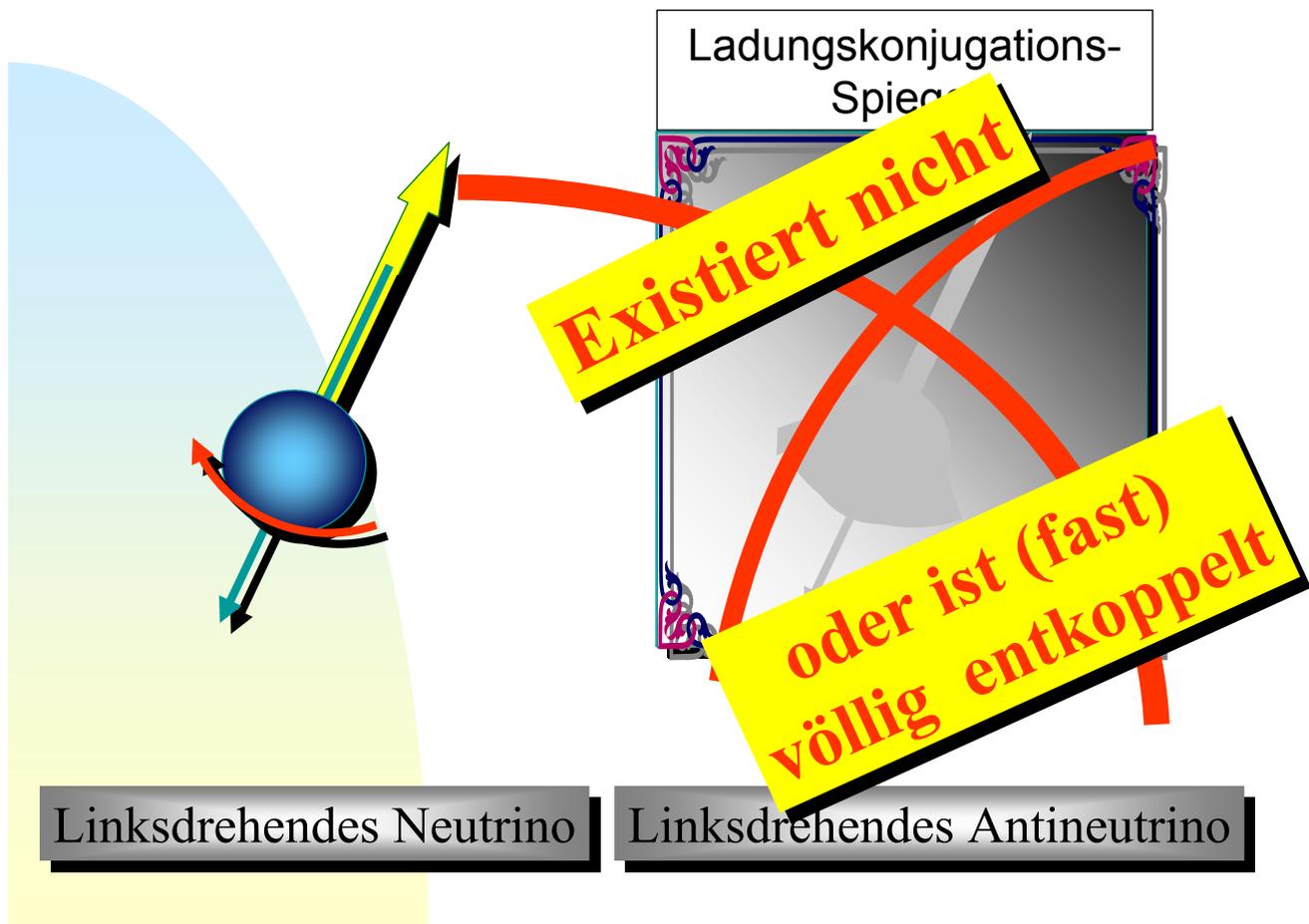
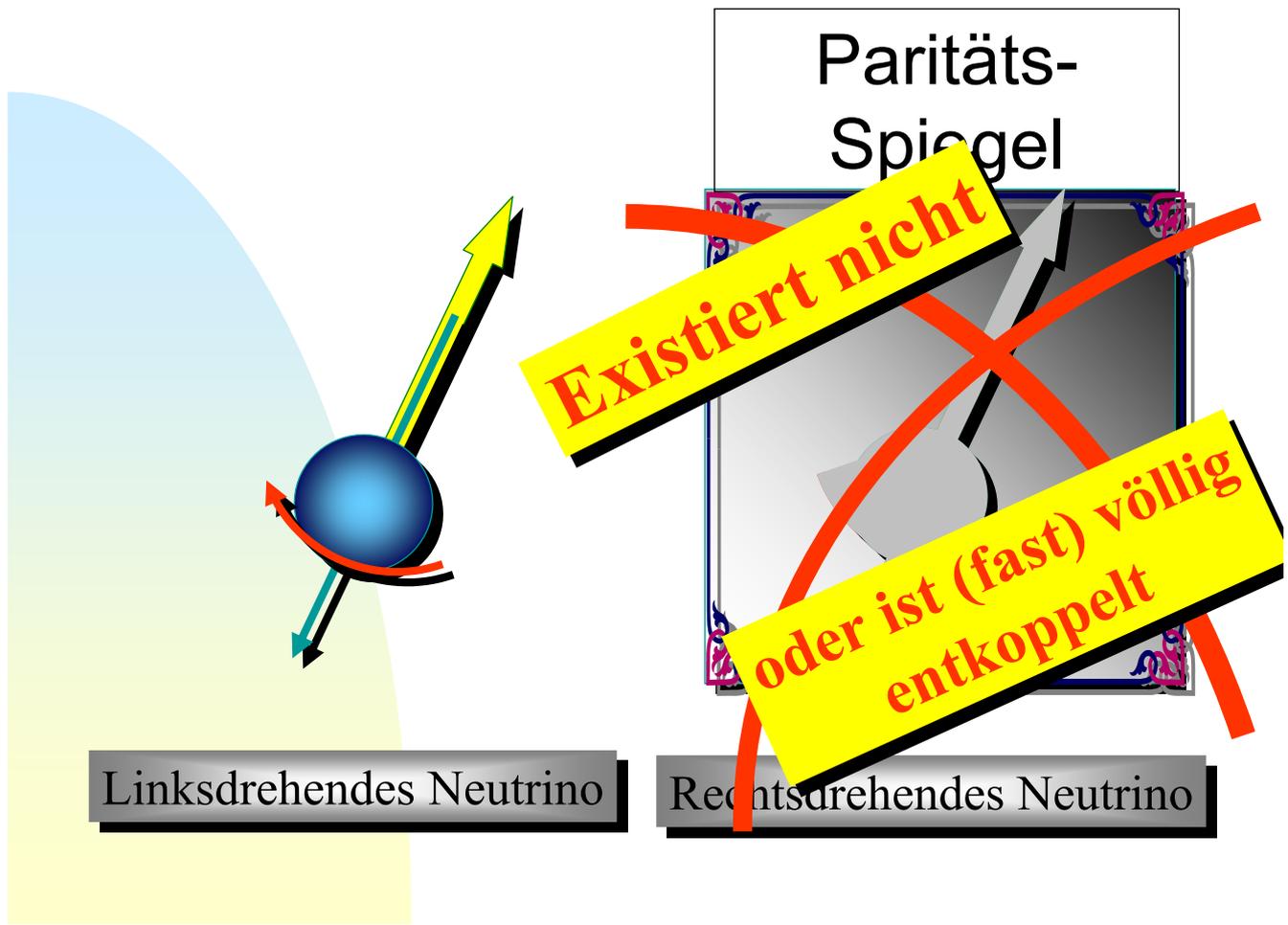
$|\psi^*\psi|$ (Teilchen im Rechtssystem mit normaler Zeitrichtung) =
 $|\psi^*\psi|$ (Antiteilchen im Linkssystem mit umgekehrter Zeitrichtung)

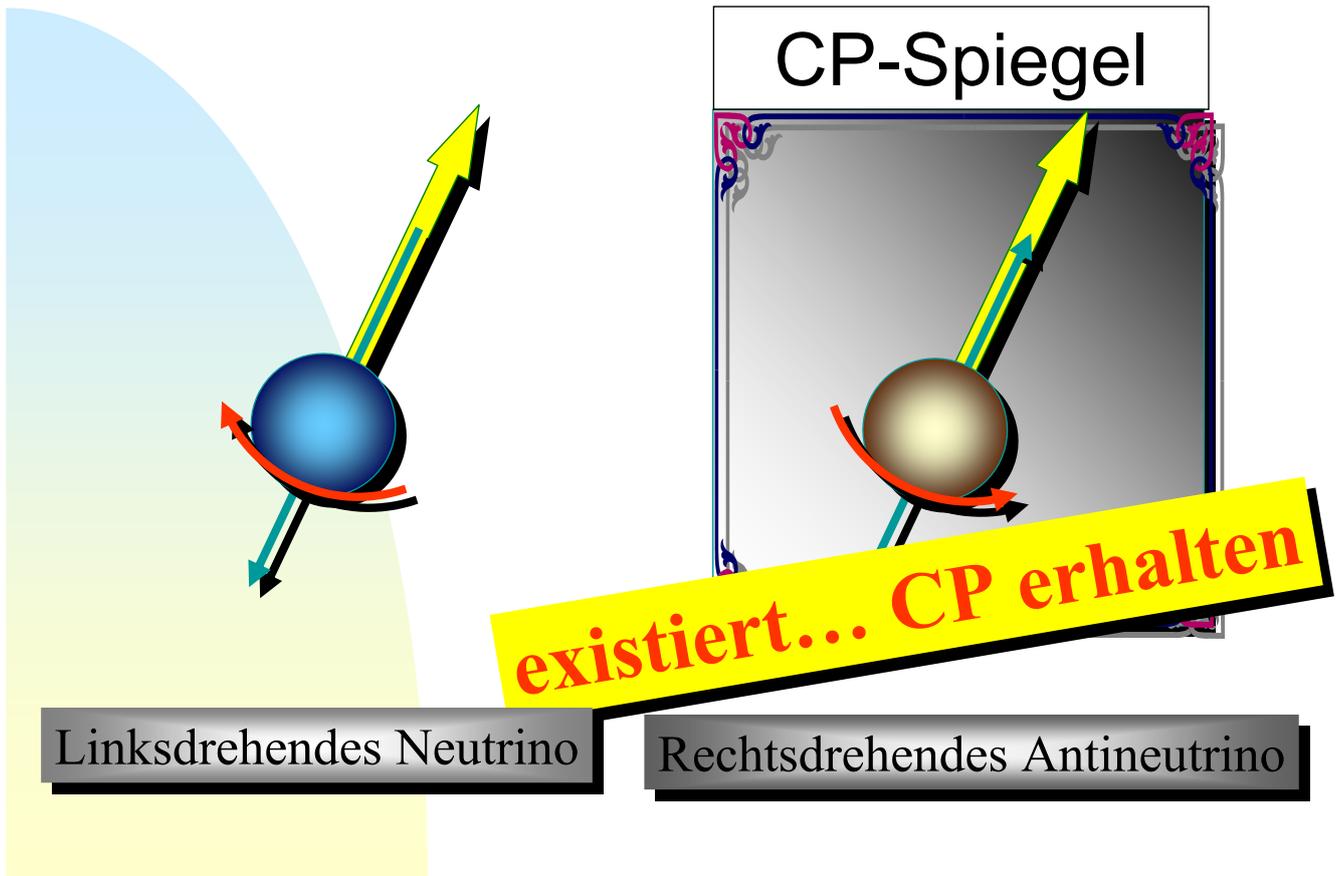
Schwache Wechselwirkung (Experiment von Wu et al. 1957):

Paritätsverletzung : $P\psi^*\psi$ (Rechtssystem) $\neq \psi^*\psi$ (Linkssystem)
außerdem : $C\psi^*\psi$ (Teilchen) $\neq \psi^*\psi$ (Antiteilchen)

aber CP ist erhalten:

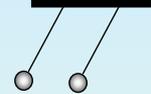
$|\psi^*\psi|$ (Teilchen im Rechtssystem) =
 $|\psi^*\psi|$ (Antiteilchen im Linkssystem)





CP im K^0 -System

CP +



Erwarte :

$$K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0) \rightarrow 2\pi$$

CP +

CP -



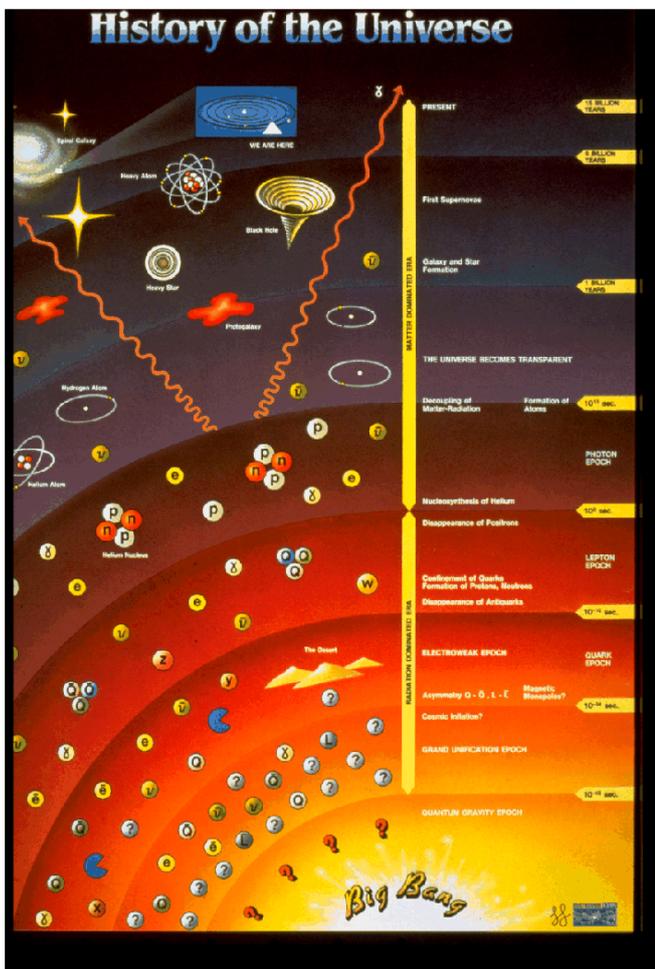
$$K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0) \rightarrow 3\pi$$

CP -

Christensen et al 1964:

K_L^0 kann auch in 2π zerfallen

**Im K^0 -System ist CP nicht exakt erhalten!
Es gibt eine kleine CP-Verletzung
(0.3% Effekt)**



CP-Verletzung und die Entwicklung des Universums

CP-Verletzung **notwendig** (aber nicht hinreichend) für die Entwicklung des heutigen Universums
(nur Materie, keine Antimaterie)
 aus einem ursprünglich symmetrischen Zustand.
Standardmodell-Mechanismus ausreichend?

3 Arten von CP-Verletzung:

indirekt -- direkt -- Mixing-induziert

Masseneigenzustände sind nicht exakt CP-Eigenzustände:

$$K_S^0 \propto (1 + \epsilon)K^0 + (1 - \epsilon)\overline{K}^0$$

$$\epsilon = 2.3 \cdot 10^{-3}$$

3 Arten von CP-Verletzung:

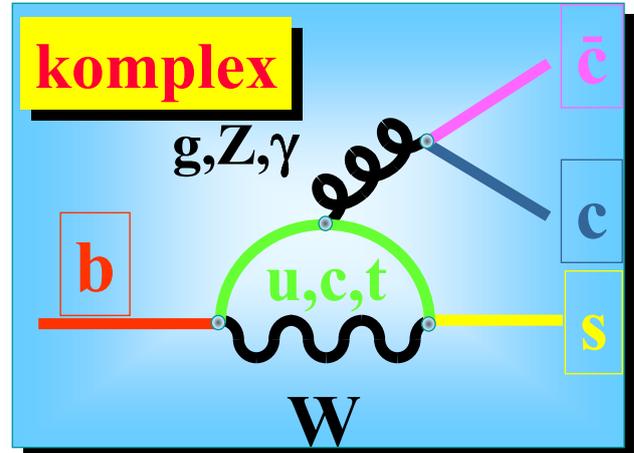
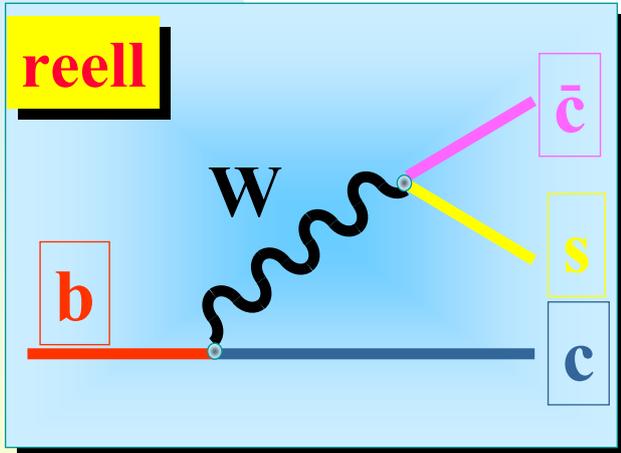
indirekt -- **direkt** -- Mixing-induziert
 CP-Verletzung direkt in der Zerfallsamplitude:
 z.B. durch Interferenz von



Baum-Graph

und

Pinguin-Graph.



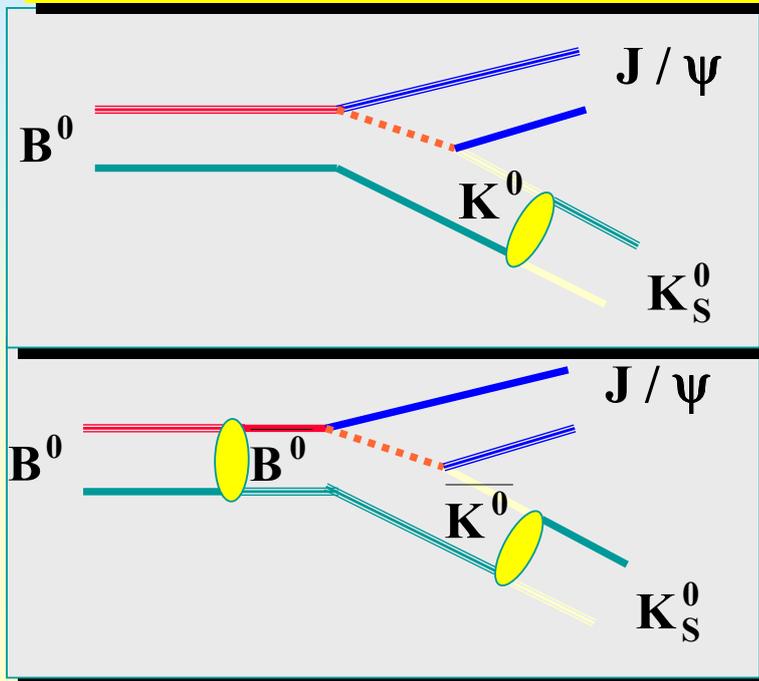
Keine Zeitabhängigkeit, kann auch im B+ Zerfall auftreten

Bisher keine klare experimentelle Evidenz, auch nicht im K-System
 Zukunft: NA48 (CERN) **Blümer**, KLOE (Frascati) **Kluge**

3 Arten von CP-Verletzung:

indirekt -- direkt -- **Mixing-induziert**

CP-Verletzung durch Interferenz von gemischten und ungemischten B-Zerfällen in denselben Endzustand :



reell

Phase vom B-Mixing

CP-Verletzung im Standardmodell: Phase in der CKM-Matrix

Im Standardmodell mit 3 Familien muss V unitär sein.
Unitäre 3x3 Matrix wird durch drei reelle
Parameter und eine Phase definiert.
(Wolfenstein-Parametrisierung)

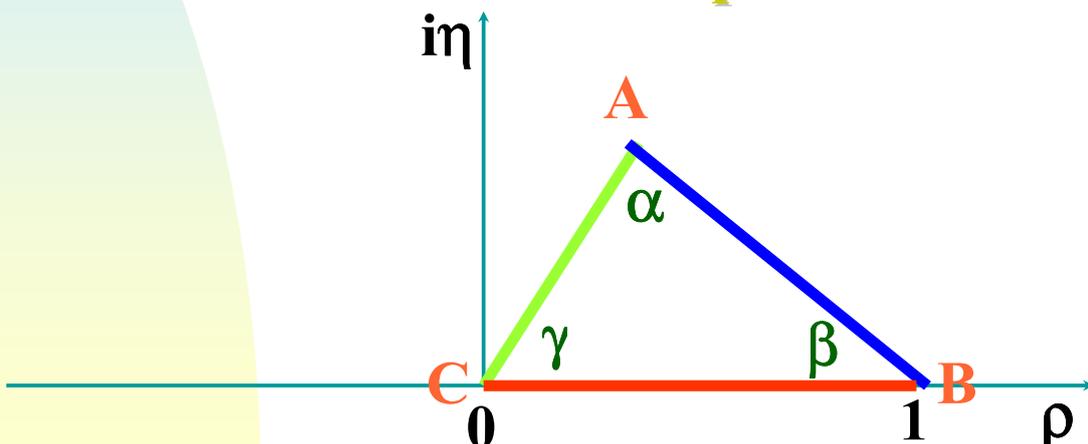
$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

Unitarität von V_{CKM} : $V (V^*)^T = 1$

$$\Rightarrow V_{ud}^* V_{ub} + V_{cd}^* V_{cb} + V_{td}^* V_{tb} = 0$$

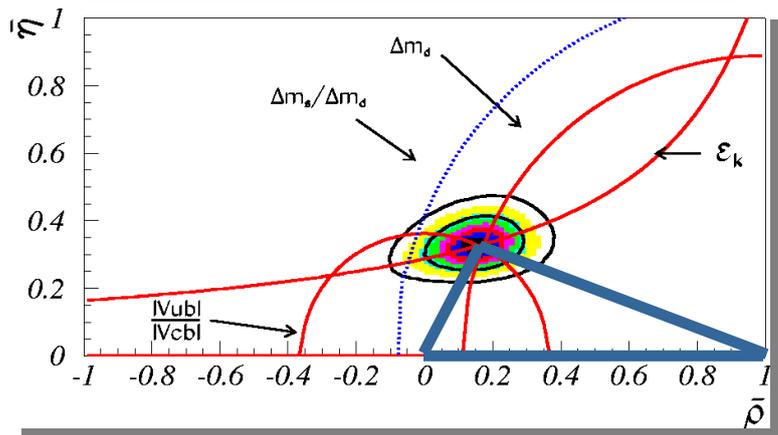
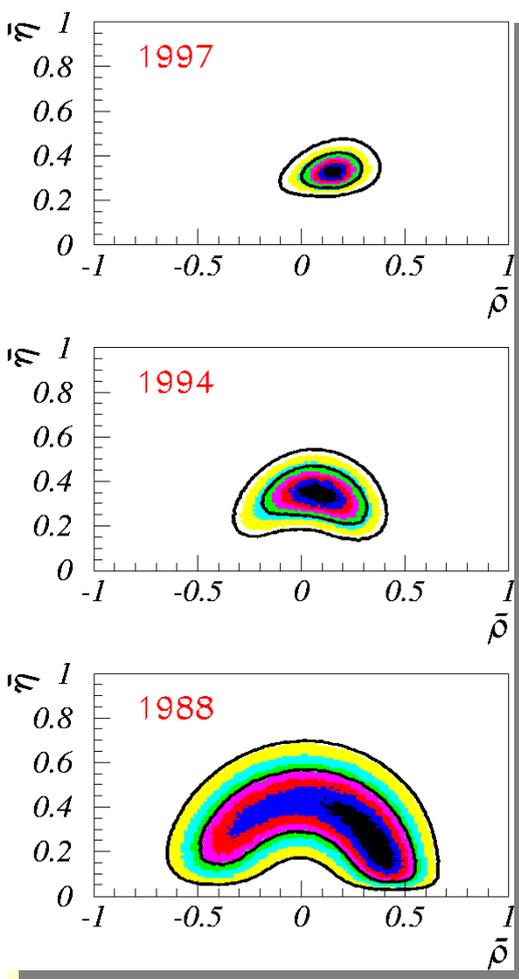
$$\Rightarrow (\rho + i\eta) + 1 + (1 - (\rho + i\eta)) = 0$$

geometrisch: Dreieck in komplexer Ebene:



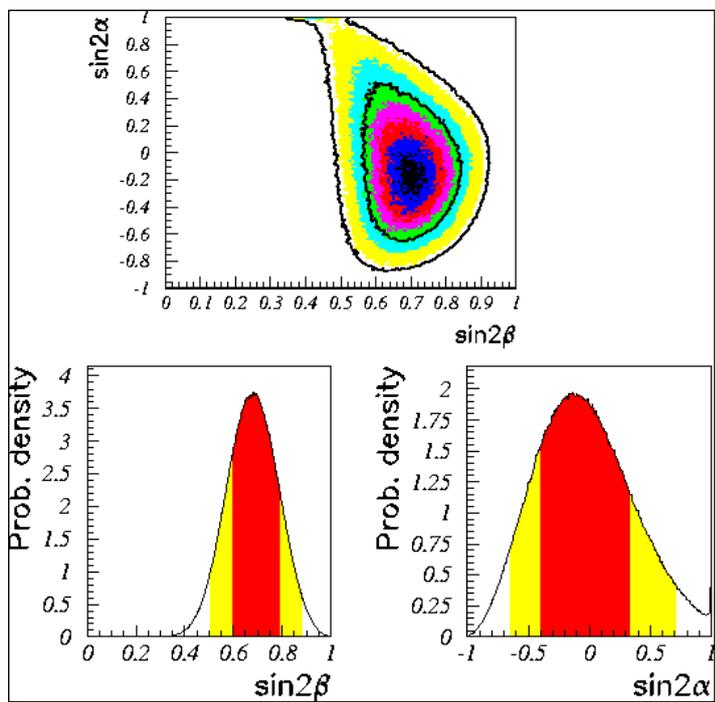
Das Unitaritätsdreieck heute

Messung der Seiten aus
B-Oszillationen,
b-->u- Zerfällen und
CP-Zerletzung im K-System



Die Winkel alpha und beta heute

Annahme:
Standardmodell
ist korrekt



CP-Verletzungs-Experimente erlauben die Messung der Winkel des Unitaritätsdreiecks.

Beispiele:

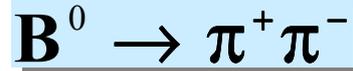
$$\sin 2\beta$$

aus



$$\sin 2\alpha$$

aus

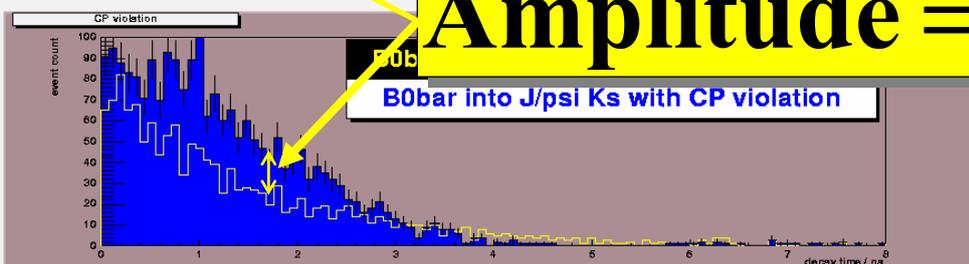
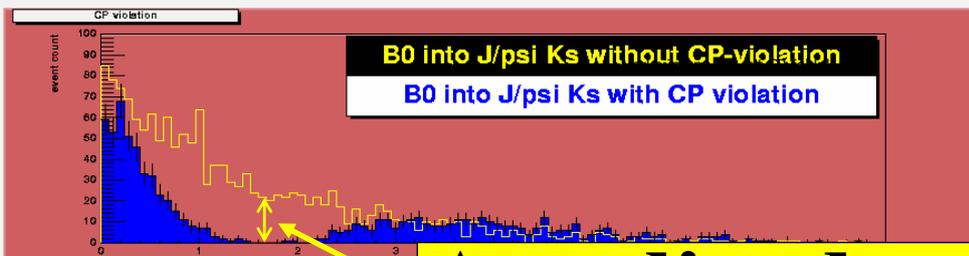
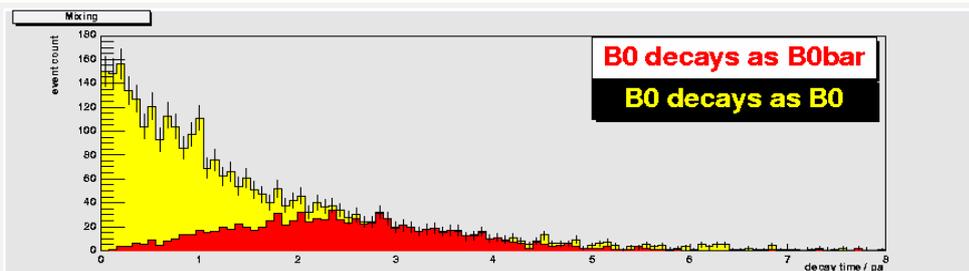


plus viele weitere Reaktionen...

Ziel:

Überbestimmen des Unitaritätsdreiecks durch Messung der Seiten und Winkel erlaubt stringenten Test des Standardmodells und vielleicht Evidenz für neue Physik

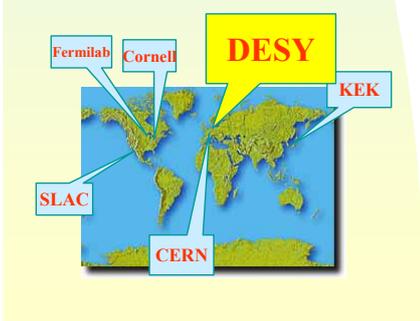
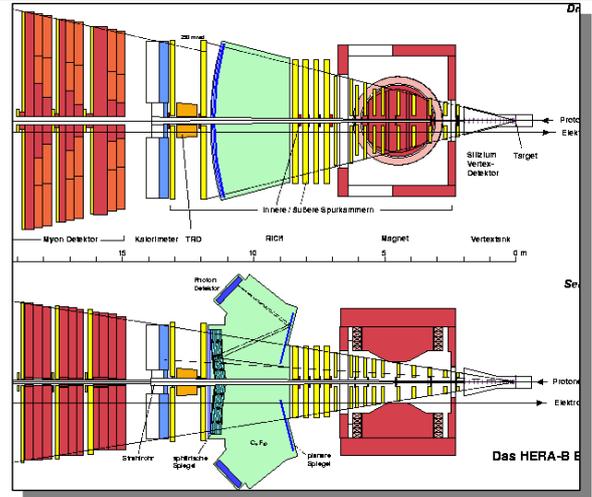
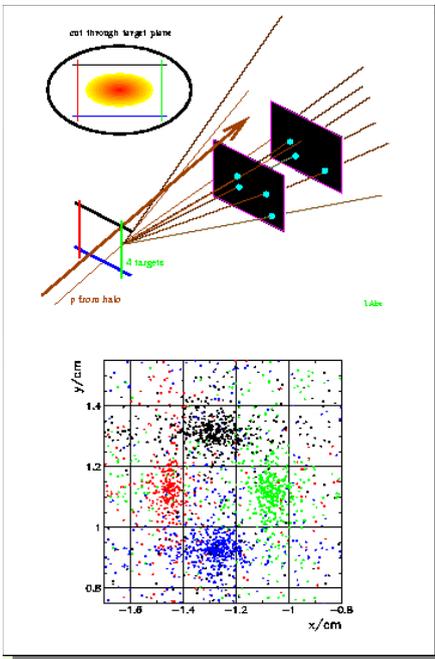
Winkelmessung im Unitaritätsdreieck



Amplitude = $\sin 2\beta$

HERA-b (DESY, Hamburg)

Fixed-Target-Experiment
4 Drähte im Halo des HERA-Protonenstrahls



Asymmetrische Y(4S)- Maschinen (SLAC und KEK)

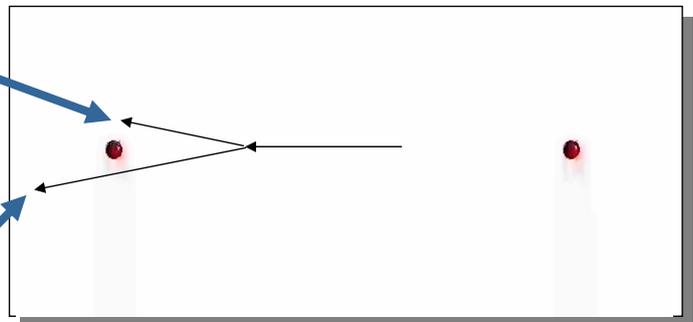
Energie des Positronenstrahls höher als die des Elektronenstrahls

==> Lorentz-Boost des Y(4S) und der Zerfalls-B-Mesonen

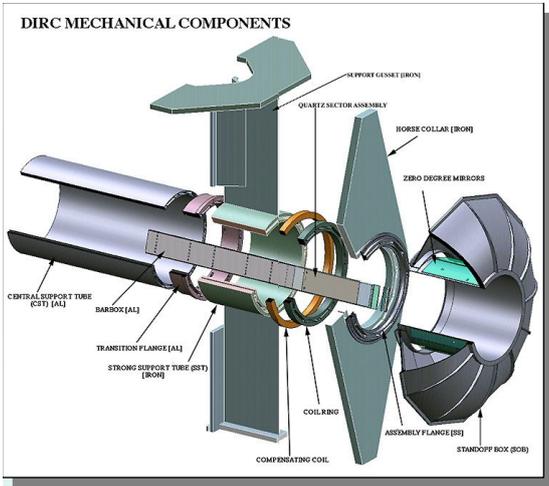
Start der Zeitmessung

- Y(4S) Zerfall kohärent.
- Zeitnullpunkt wird durch Zerfall des tag-B-Mesons definiert

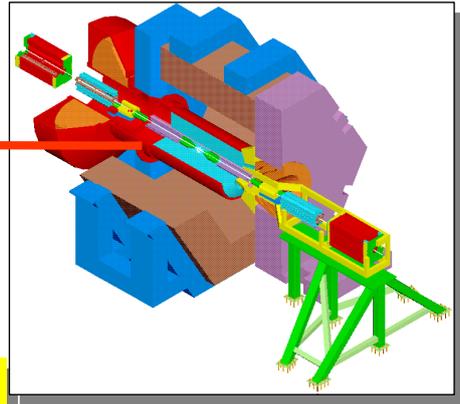
Ende der Zeitmessung



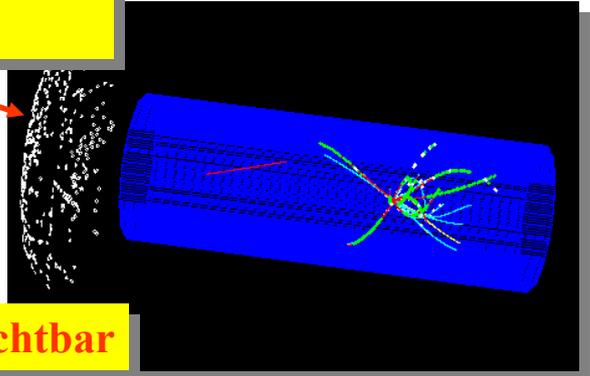
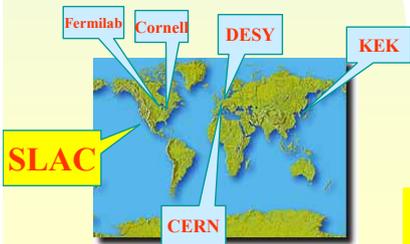
==> Rekonstruktion von Zerfallsvertices
und damit Messung von Zerfallszeiten
möglich



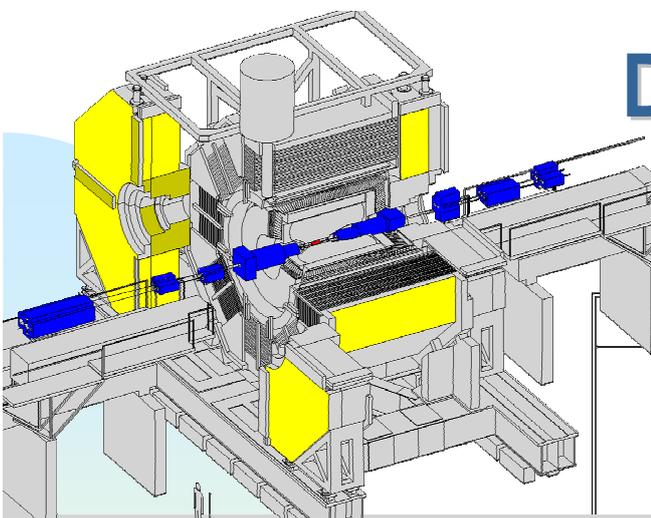
Der BABAR Detektor



DIRC: dünner Quartz-Cerenkov-Detektor, Photonen werden durch Totalreflexion aus dem Detektor geleitet.

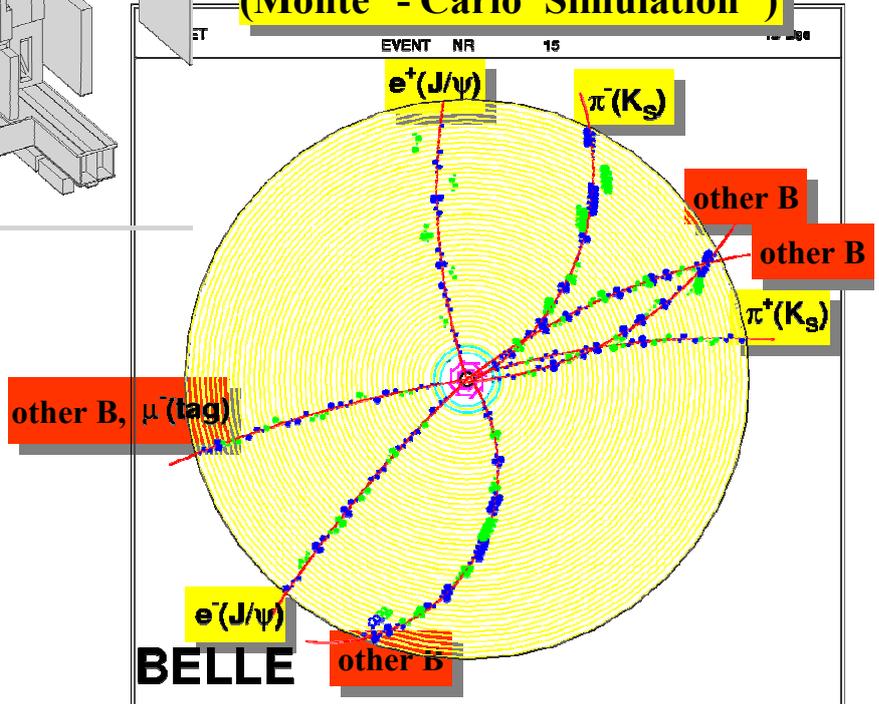
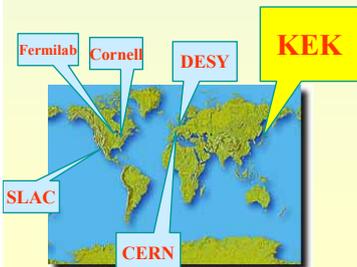


Lorentz-boost sichtbar



Der BELLE-Detektor

$B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ - Ereignis, mit Lepton - Markierung (Monte - Carlo Simulation)



Der pp̄-Collider Tevatron II

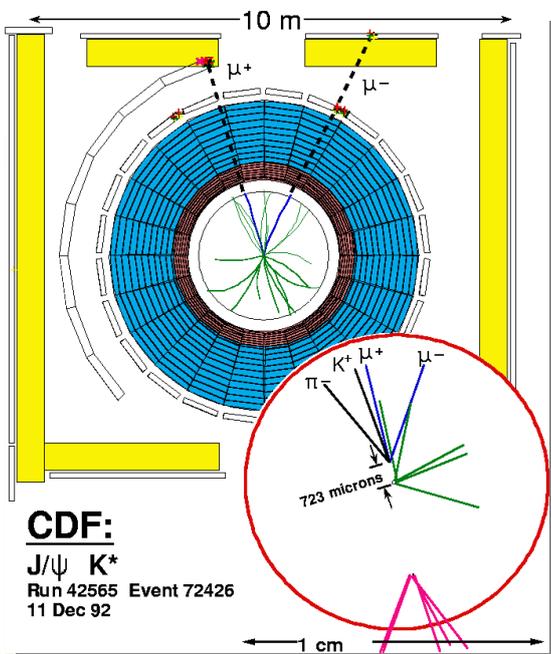
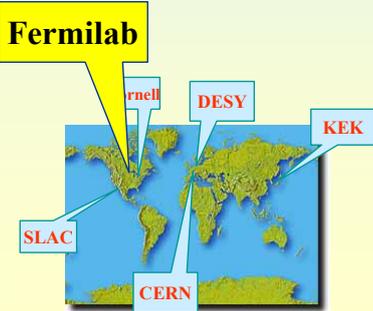
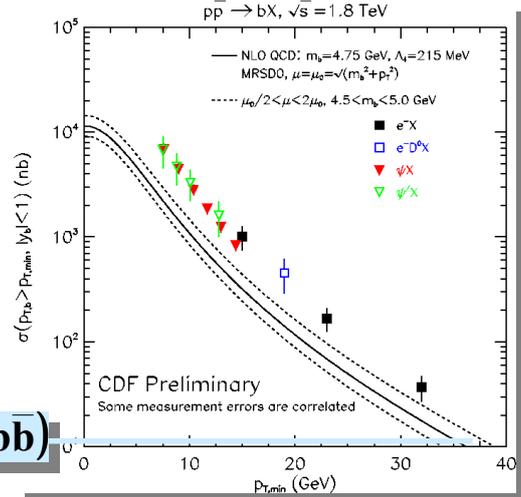
Relativ kleiner bb-Anteil

Zusätzlicher Untergrund von Proton-Fragmentation

Riesiger Wirkungsquerschnitt (Starke Wechselwirkung)

Trigger auf J/psi K0 und pi+pi- möglich

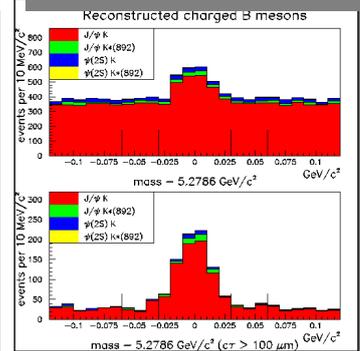
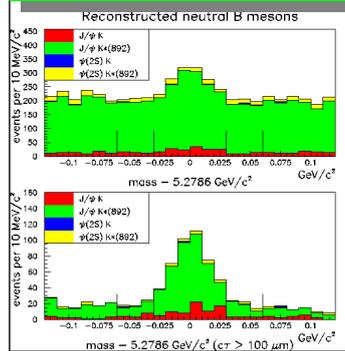
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow b\bar{b})$$



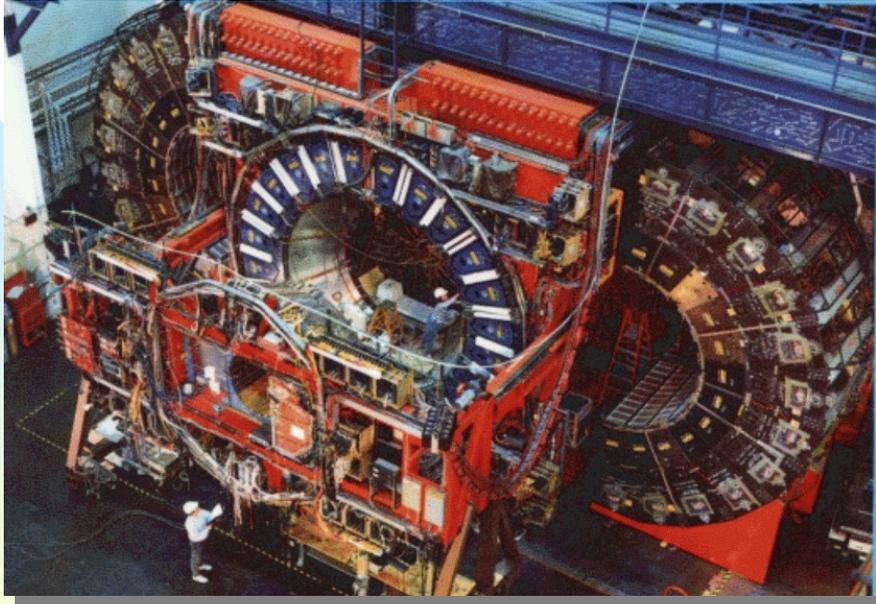
Das CDF- Experiment

Th. Müller, M.F.

- läuft seit 1987
- hat das top-Quark entdeckt (1995)
- besitzt schon weltgrößte Sammlung an interessanten B-Zerfällen
- Beschleuniger und Detektor werden z.Z. vollständig modernisiert



Das CDF- Experiment



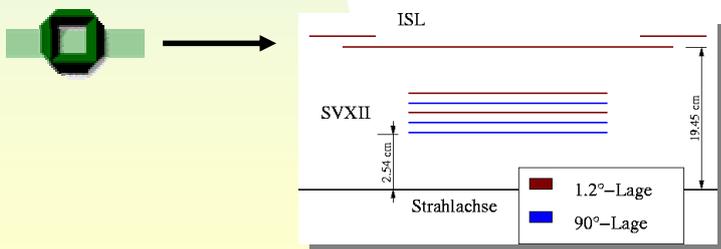
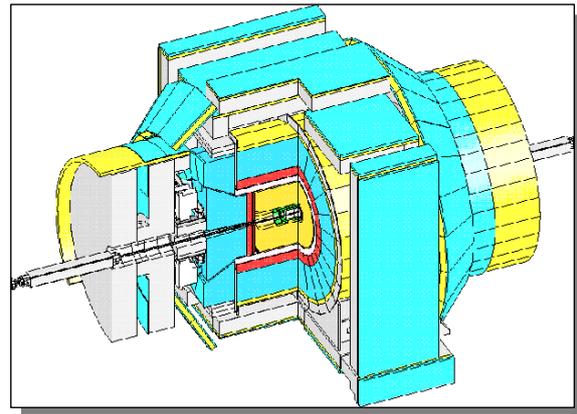
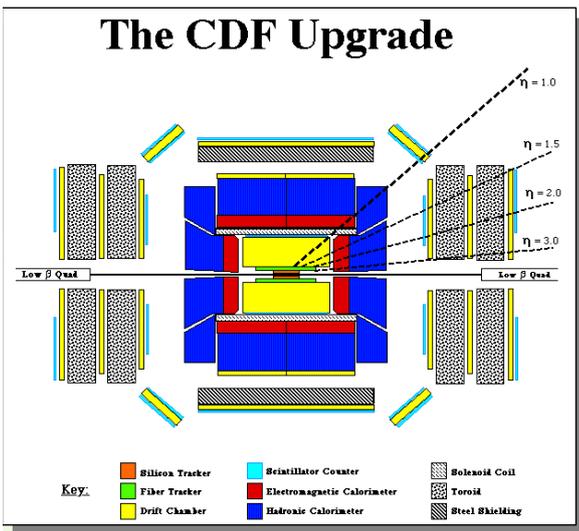
Teilchenpaket-Kollisionen alle 400, später 100ns

2-5 Wechselwirkungen pro Kollision

$$L \approx 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

16 – 40 pb⁻¹ / Woche

Das CDF- Experiment



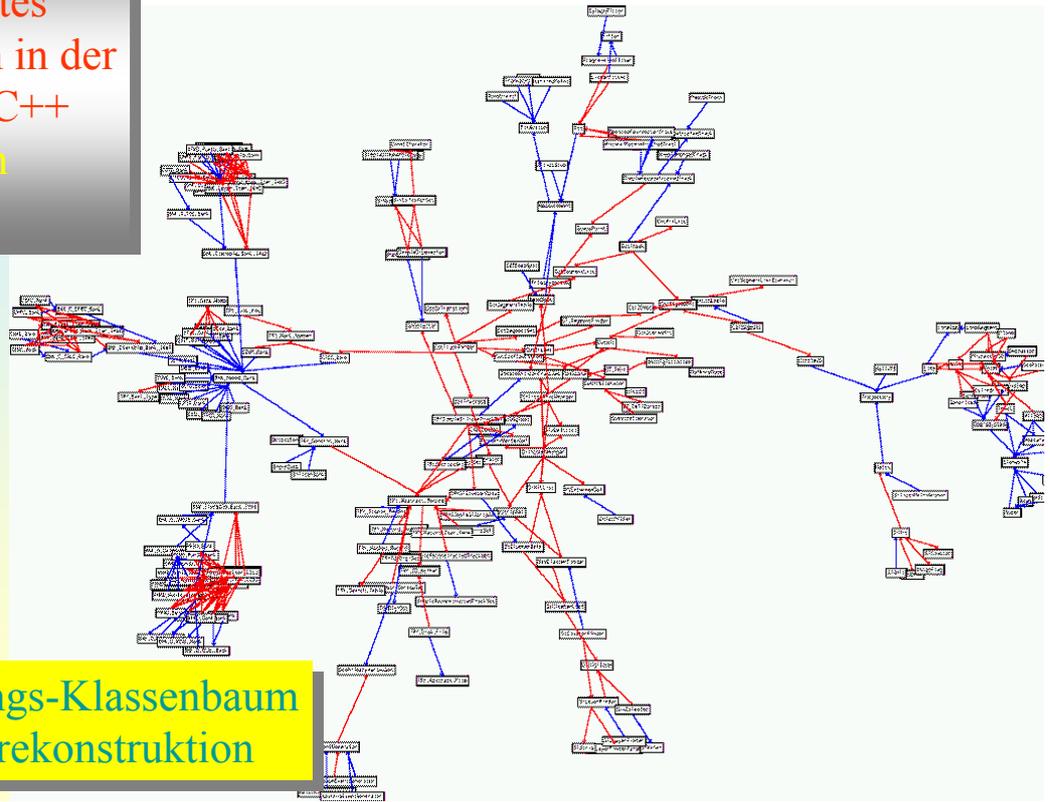
6-7 lagiger doppelseitig
ausgelesener Silizium-
Vertexdetektor,
bis 2.5 cm
an die Strahlachse

Ausseelektronik Faktor 20 schneller



Spurrekonstruktion im CDF II-Vertexdetektor

Softwareprojekt:
Objektorientiertes
Programmieren in der
Fremdsprache C++
(nach 15 Jahren
mit Fortran)

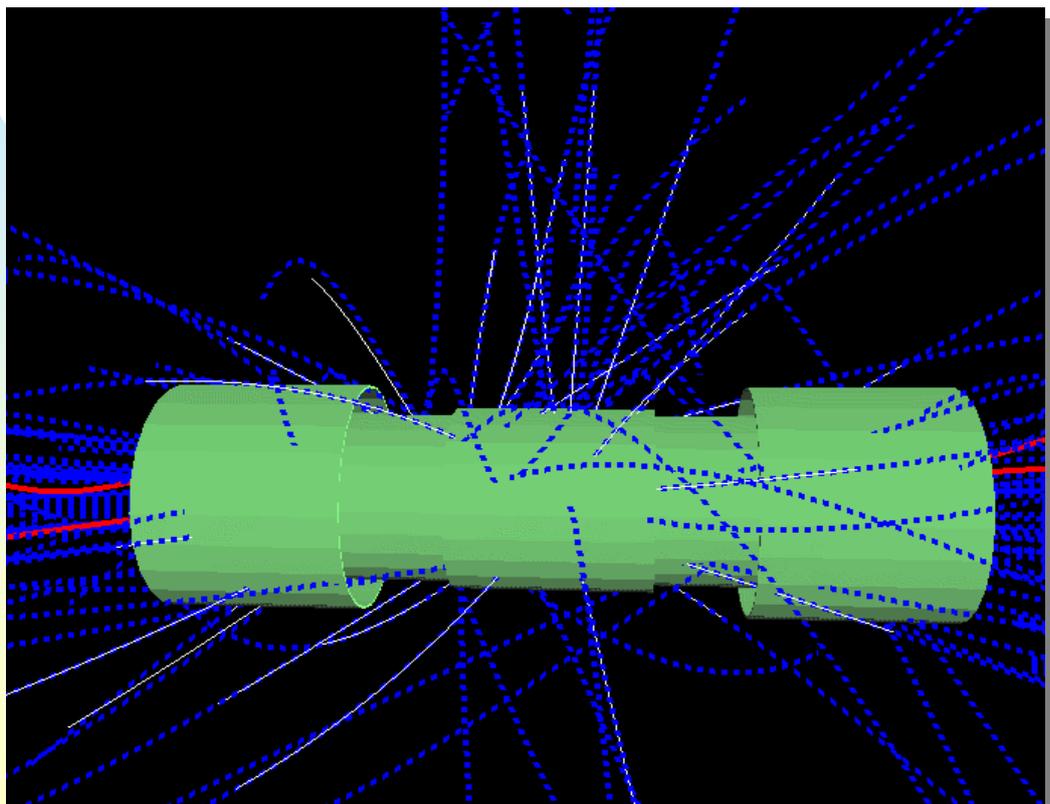


C++ Vererbungs-Klassenbaum
für CDF-Spurrekonstruktion



Ein b-Ereignis in $p\bar{p}$ -Kollisionen (CDF II-Vertexdetektor)

Visualisierung



Zusammenfassung und Ausblick

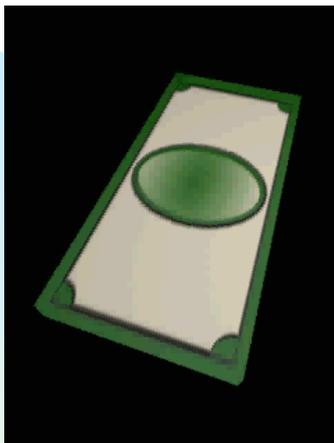
LEP (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL), SLD und CDF: Messung der B0 und Bs- **Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen** schränken das Unitaritätsdreieck der CKM-Matrix ein.

Spannendes, weltweites Rennen um die Entdeckung der **CP=Verletzung** im B-System: BaBar, Belle, CDF, CLEO, D0, HERAb. 1999-2001 erste Evidenz erwartet.

Gibt es wirklich **direkte** CP-Verletzung?

Ist die CKM-Matrix **unitär**? Oder gibt es doch **mehr als 3 Familien**?

Ist das Standard-Modell in der Lage, eine konsistente Beschreibung zu liefern? Oder werden die Experimente Hinweise auf **neue Physik** jenseits des heutigen Standardmodells bringen? Als Interferenzeffekt kann CP-Verletzung auch sehr **kleine Abweichungen** vom Standardmodell aufspüren. **Es wird spannend...**



Schicksal von physikalischer Grundlagenforschung?

Zum Vortrag von Erwin Mirkes:
Physik >>>> Finanzwesen



Vielen Dank für die Hilfe beim Vorbereiten des
Vortrags und/oder die Organisation des bald folgenden Buffets:

unseren HiWis

Christian Ceelen, Tobias Dussa, Michael Klein,
Marcus Voelp

unseren Diplomanden

Thomas Zoltan Albrecht, Thomas Allmendinger,
Hans-Jacob Grimm, Markus Moch,
Kurt Rinnert, Patrick Schemitz, Cornelius Fritz Vollmer

unseren Doktoranden

Armin Köngeter und Ulrich Schwickerath

unseren Postdocs

Dirk Neuberger, Christian Weiser

unserer Sekretärin

Waltraut Weißmann

meiner Frau

Gerda