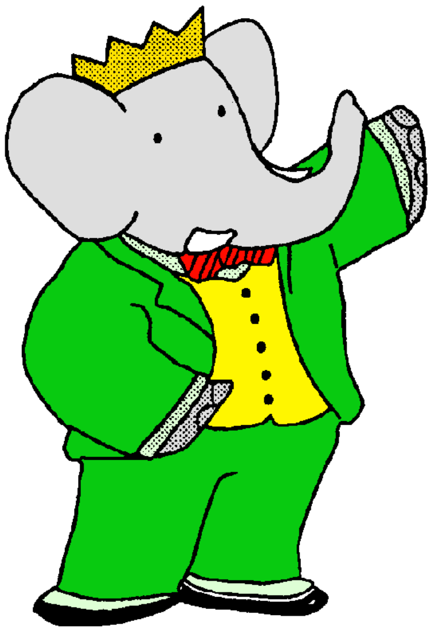
Oversigt

Måling af $\sin(2\beta)$ i den gyldne kanal ved .



- Introduktion til CP-brud.
- B-fysik og mixing.
- $J/\psi K_S^0$-henfald og $\sin(2\beta)$.
- PEP-II-acceleratoren og BaBar-detektoren.
- Interessante event-typer.
- Fit af CP-asymmetri.
- Mixing- og $\sin(2\beta)$-resultater.
- Fremtidsudsigter.

Indledning

CP-brud: STOF $\neq$ ANTISTOF

1964: CP-brud opdaget i K_L^0-henfald (Christenson, Cronin, Fitch og Turlay).

1967: Sakharov fremsætter CP-brud som én af tre betingelser for stof i Universet!

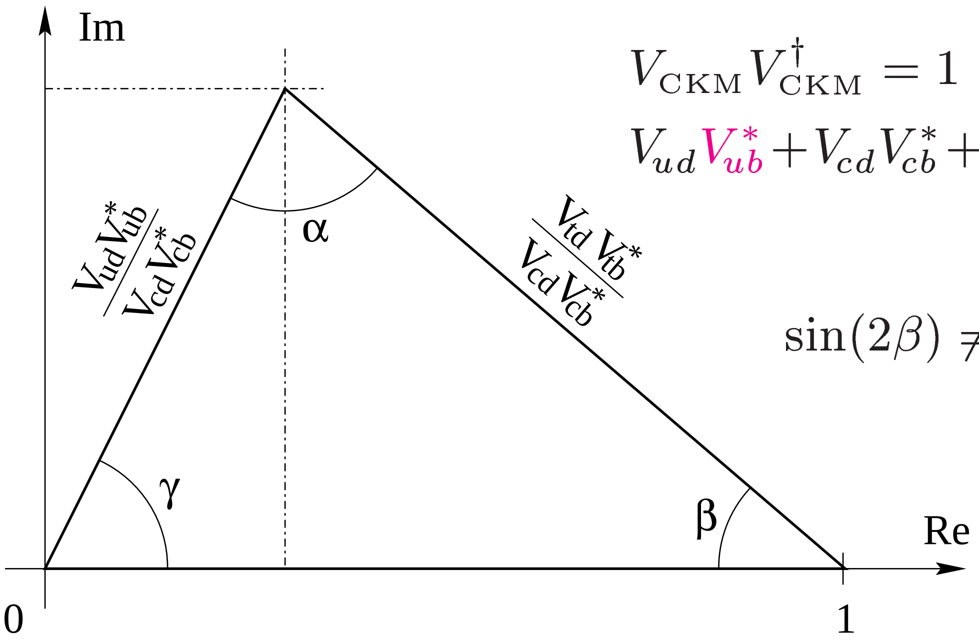
STOF + ANTISTOF $\longrightarrow$ stråling

> The new truth reached by the discovery has recently also been incorporated as an important ingredient in cosmological speculations. The aim has been to try to understand how a universe, originally very hot and symmetric, could avoid that matter and antimatter almost immediately annihilated each other. In other words, efforts have been made to describe how the-matter we are made of was once created in a Big Bang and how it could survive the birth pains.
>
> [Nobel-komiteen om opdagelse af CP-brud, 1980]

CKM-matricen og den Unitære Trekant

1973: Kobayashi og Maskawa giver mulig forklaring på CP-brud.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V_{\mathrm{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$



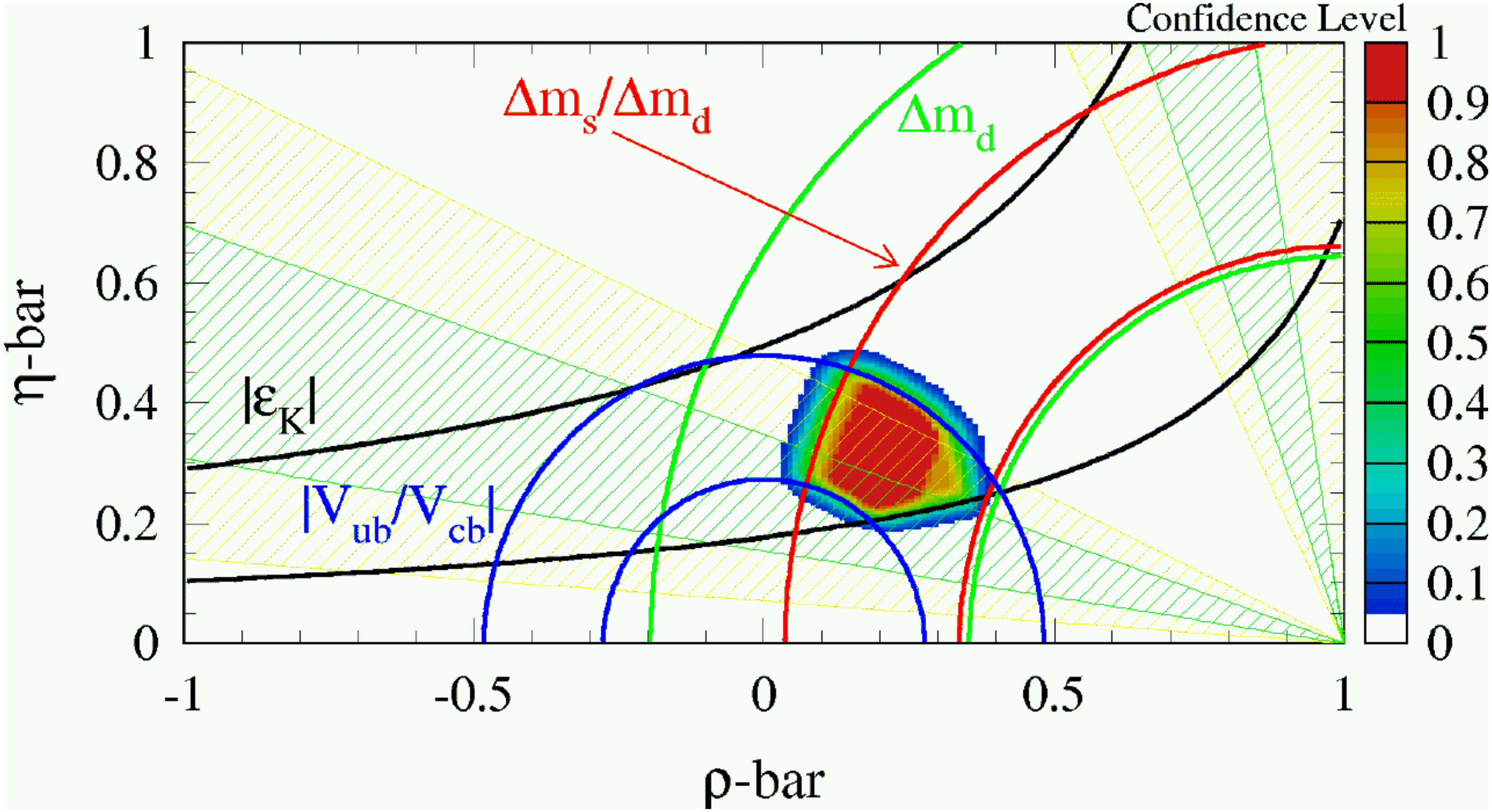
$$V_{\mathrm{CKM}} V_{\mathrm{CKM}}^{\dagger} = 1 \implies$$
$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

$$\sin(2\beta) \neq 0 \implies CP\text{-brud}$$

Arealet af den Unitære Trekant måler størrelsen af CP-bruddet.

Nuværende viden om den Unitære Trekant

Udfra målinger af den Unitære Trekants sider kan dens form estimeres:

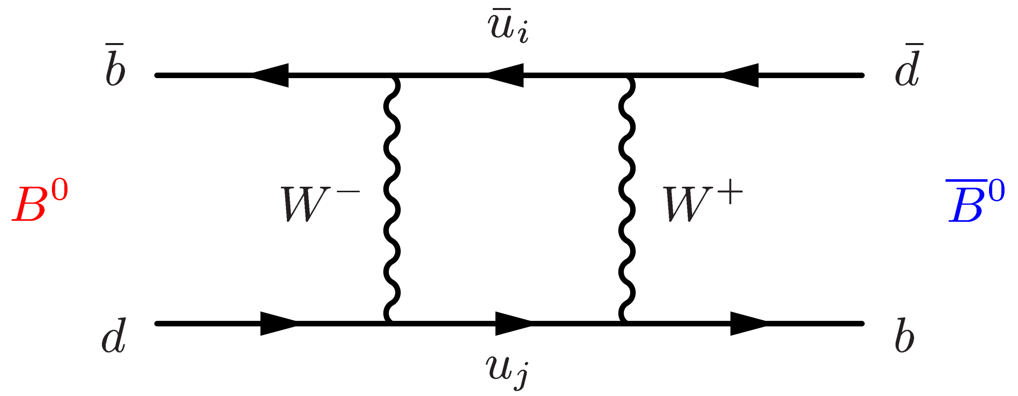


b-kvarker og B-mesoner

The B-meson is the hydrogen atom of QCD.
[Common saying, though first used by Kurt Gottfried (about charmonium!)]

Kvarker eksisterer ikke frit — bundet i mesoner ($q\bar{q}$) og baryoner (qqq).
1977: b-kvarken opdaget. Meson med b-kvark i kaldes B-meson.

Specielt interessant er $B^0 = \bar{b}d$ og $\overline{B}^0 = b\bar{d}$ mesonerne, der oscillerer:



Fordele ved B-mesoner (frem for K-mesoner)

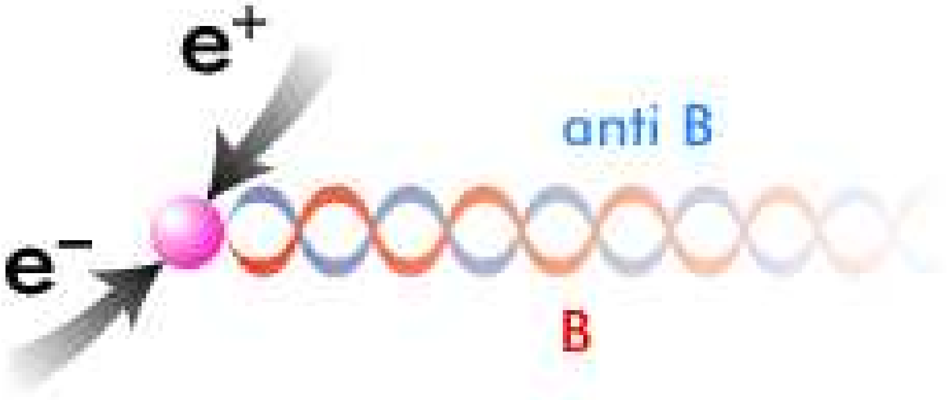
- Mange typer henfald.
- Større CP-brud.
- Direkte relation til teori.

Υ(4S)-resonancen og B-fabrikker

B-mesoner kan produceres i acceleratorer ved følgende reaktion:

$$e^- e^+ \;\rightarrow\; \Upsilon(4S) \;\rightarrow\; B^0\overline{B}^0$$

De to B-mesoner oscillerer *men i fase*, således at der, indtil den ene henfalder, er præcis én B^0 og én $\overline{B}^0$ meson.



Efter at den ene henfalder, fortsætter den anden med at oscillere. Dermed kan en event være *umixed* ($B^0\overline{B}^0$) eller *mixed* ($B^0B^0/\overline{B}^0\overline{B}^0$).

CP-brud, $\mathrm{B^0}/\,\overline{\mathrm{B}}^0 \to \mathrm{J}/\psi \mathrm{K_S^0}$ og $\sin(2\beta)$

CP-brud kan manifestere sig på tre måder:

$$\left.\begin{array}{l} \bullet\ \text{Direkte: } \Gamma(X \to f) \neq \Gamma(\overline{X} \to \overline{f}) \\ \bullet\ \text{Indirekte: } \Gamma(X^0 \to \overline{X}^0) \neq \Gamma(\overline{X}^0 \to X^0) \end{array}\right\}\ \text{Lille og 'beskidt' effekt}$$

- Ved inteferens: $\Gamma(X^0 \to f_{CP}) \neq \Gamma(\overline{X}^0 \to f_{CP})$ } Stor og 'ren' effekt

En speciel fordelagtig sluttilstand, f_{CP}, er "den gyldne kanal" $J/\psi K_S^0$:

$$|\mathcal{M}(B^0\overline{B}^0 \to J/\psi K_S^0\, f_{tag})|^2 \quad \simeq \quad \frac{1}{4\tau} e^{-|t|/\tau}[1 \pm \underbrace{\sin(2\beta)\sin(\Delta m_d t)}_{asymmetri}]$$

Ved at måle denne asymmetri kan man altså bestemme sin(2β).

Ingredienser i sin(2β) målingen

- Rekonstruktion af $J/\psi(\ell^+\ell^-)K^0_S(\pi^+\pi^-)$ events
  - God detektion af leptoner og pioner.
- Bestemmelse af den anden B-mesons type (tagging)
  - God tracking.
  - God partikelidentifikation.
- Bestemmelse af tiden mellem de to B-henfald
  - Asymetrisk accelerator, således at $\Upsilon(4S)$ produceres med boost.
  - Præcis vertex-bestemmelse.
- Flest mulig events
  - Høj luminositet.
  - Dækkende detektor.

BaBar-kollaborationen

The *BABAR* Collaboration

9 Countries
73 Institutions
516 Physicists

USA [36/253]
California Institute of Technology
UC, Irvine
UC, Los Angeles
UC, San Diego
UC, Santa Barbara
UC, Santa Cruz
U of Cincinnati
U of Colorado
Colorado State
Elon College
Florida A&M
U of Iowa
Iowa State U
LBNL
LLNL
U of Louisville
U of Maryland
U of Massachusetts, Amherst
MIT
U of Mississippi
Mount Holyoke College
Northern Kentucky U
U of Notre Dame
ORNL/Y-12
U of Oregon
U of Pennsylvania
Prairie View A&M
Princeton
SLAC
U of South Carolina
Stanford U
U of Tennessee
U of Texas at Dallas
Vanderbilt
U of Wisconsin
Yale

Canada [4/15]
U of British Columbia
McGill U
U de Montréal
U of Victoria

China [1/5]
Inst. of High Energy Physics, Beijing

France [5/51]
LAPP, Annecy
LAL Orsay
LPNHE des Universités Paris 6/7
Ecole Polytechnique
CEA, DAPNIA, CE-Saclay

Germany [3/23]
U Rostock
Ruhr U Bochum
Technische U Dresden

Italy [12/89]
INFN, Bari
INFN, Ferrara
Lab. Nazionali di Frascati dell' INFN
INFN, Genova
INFN, Milano
INFN, Napoli
INFN, Padova
INFN, Pavia
INF, Pisa
INFNN, Roma and U "La Sapienza"
INFN, Torino
INFN, Trieste

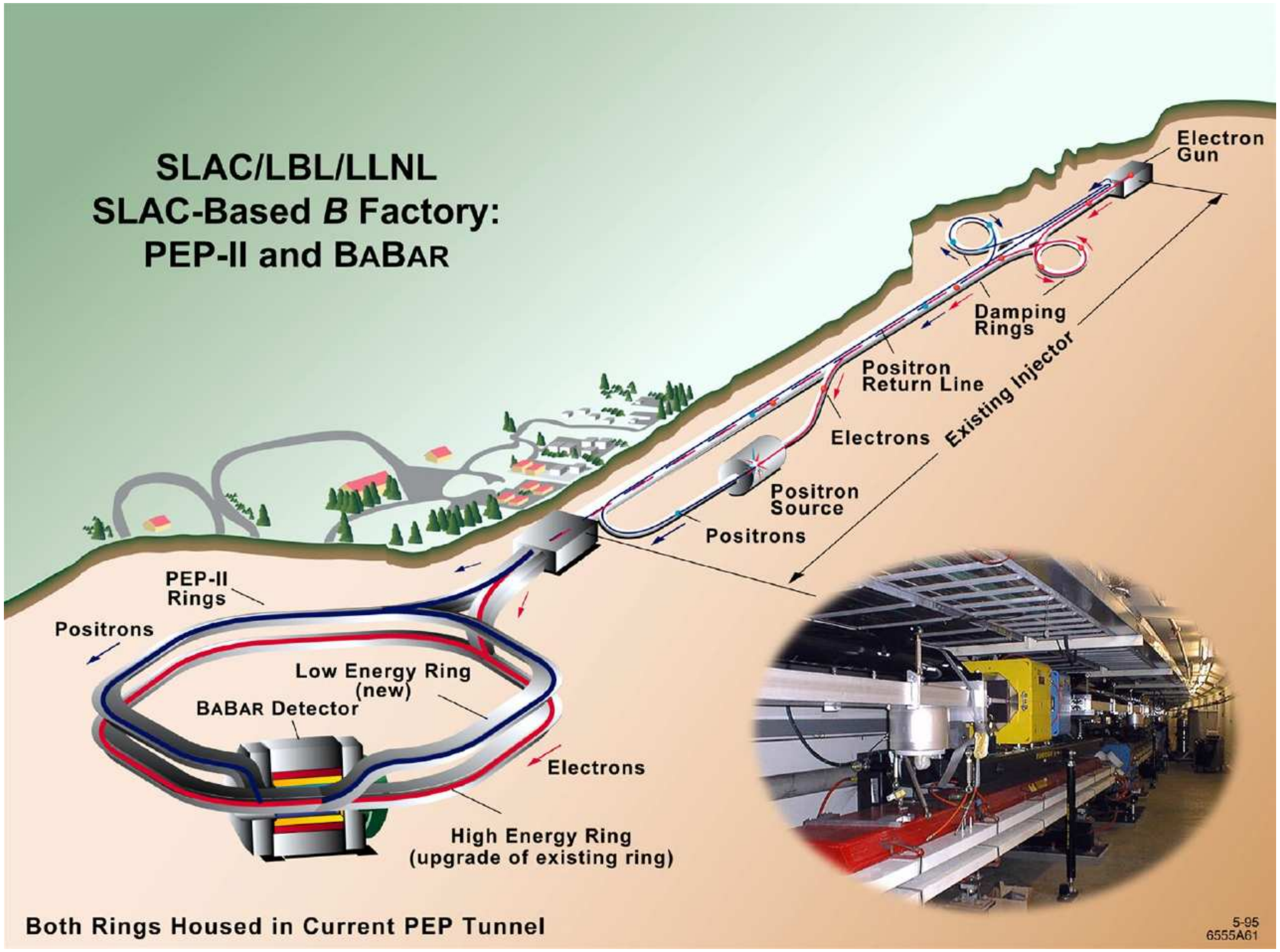
Norway [1/2]
U of Bergen

Russia [1/7]
Budker Institute, Novosibirsk

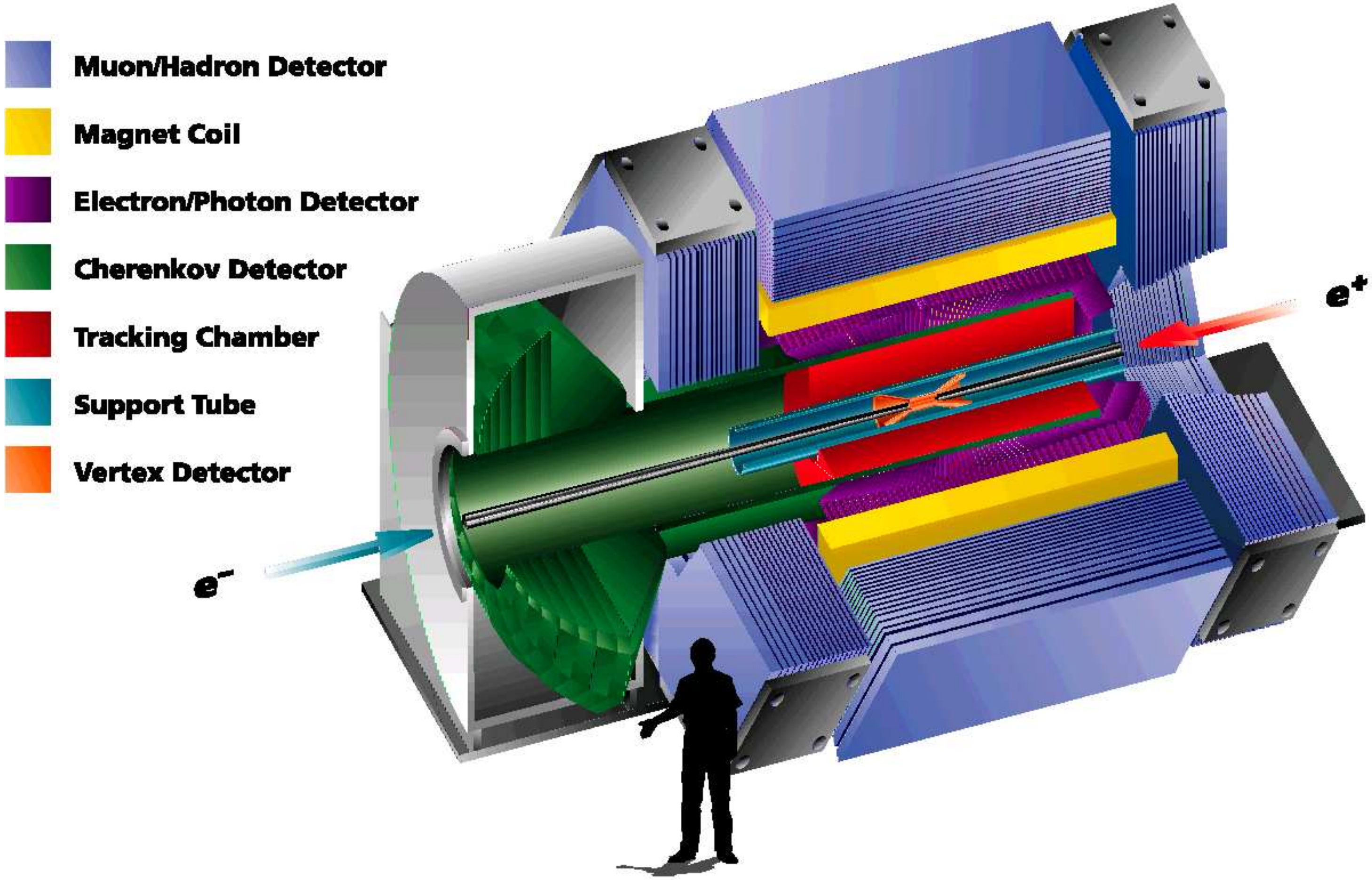
United Kingdom [10/71]
U of Birmingham
U of Bristol
Brunel University
U of Edinburgh
U of Liverpool
Imperial College
Queen Mary & Westfield College
Royal Holloway, University of London
U of Manchester
Rutherford Appleton Laboratory

Stanford Linear Accelerator Center

PEP-II-acceleratoren



BaBar-detektoren



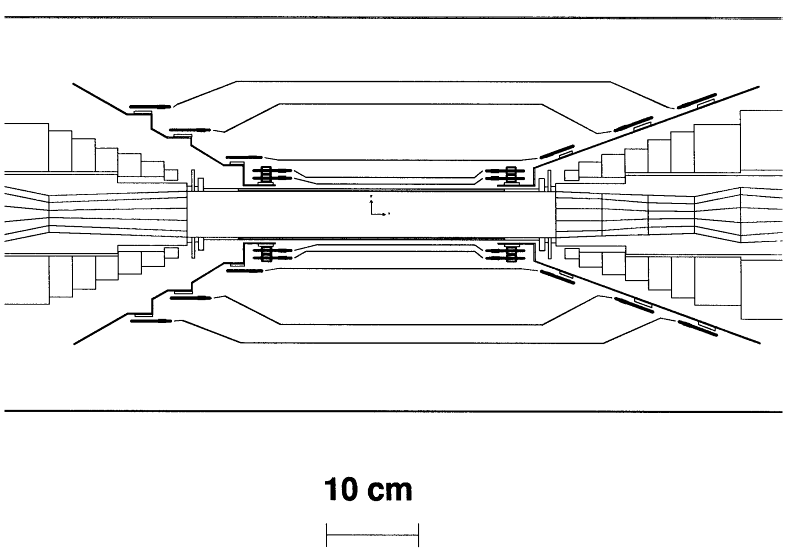
There are three roads to ruin; women, gambling and technicians. The most pleasant is with women, the quickest is with gambling, but the surest is with technicians.

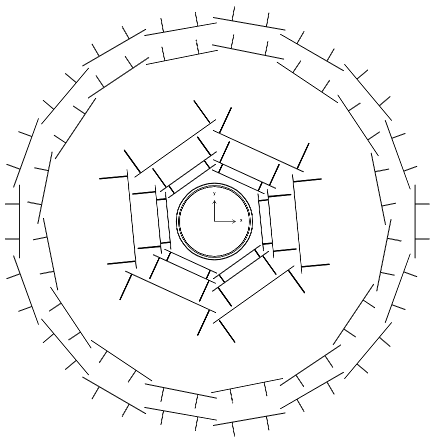
[Georges Pompidou, 1911-1974]

Silicon Vertex Tracker (SVT)

Formål: Bestemmelse af partiklers vertex.

Layout: Fem lag instrumenteret silicium med 150.000 kanaler.





Effektivitet: 98 % pr. hit

Præcision: $< 50\,\mu$m (vinkelafhængig)

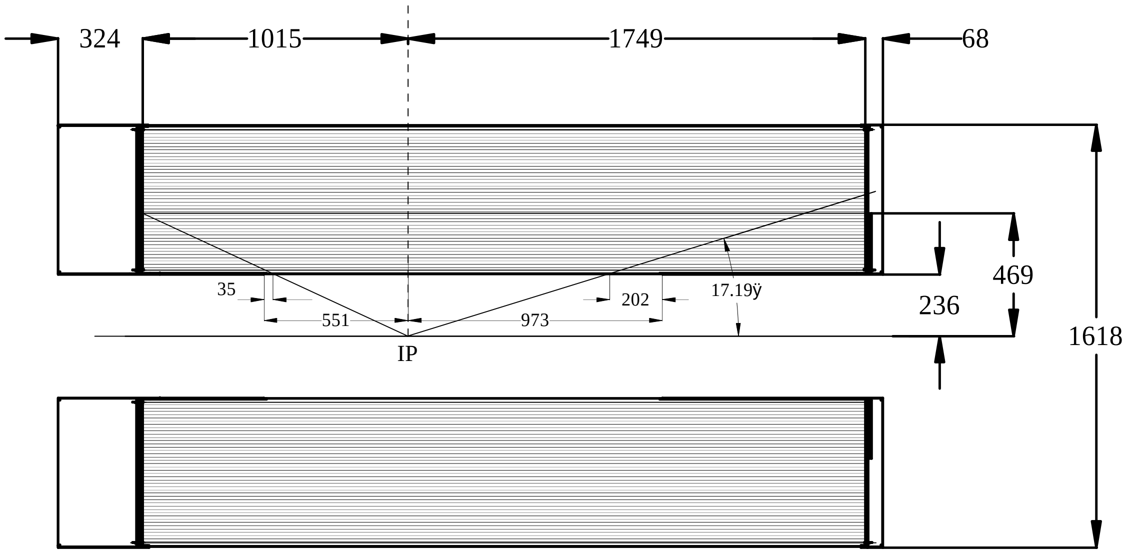
i overensstemmelse med design.

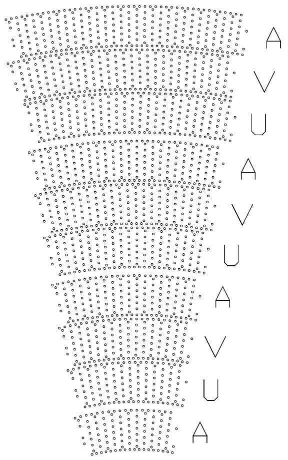
Vertexdetektoren har fungeret upåklageligt.

Drift Chamber (DCH)

Formål: Bestemmelse af ladede partiklers bane og dermed impuls.
Måling af dE/dx til partikelinformation.

Layout: 40 lag tråde resulterende i 7000 driftceller. Driftgas: He.



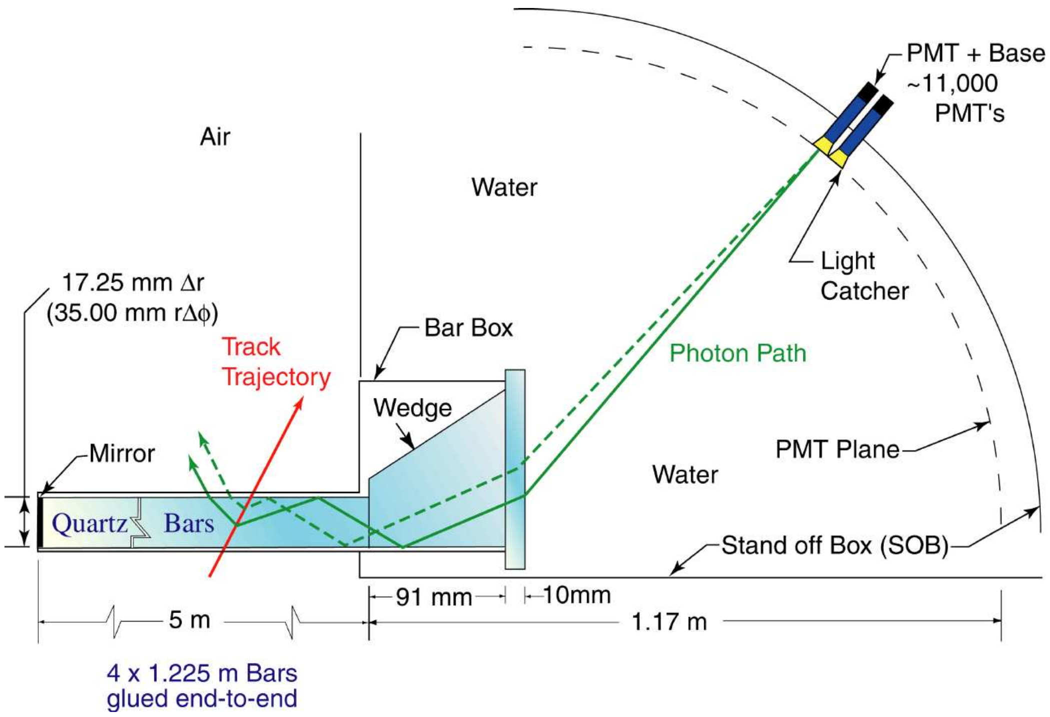


Rumlig præcision: 125 μm (Design: 140 μm)

Præcision i dE/dx: 7 % (Design værdi)

Princippet i Čerenkov-detektor

Når ladede partikler bevæger sig hurtigere end lysets hastighed *i et medium*, udsendes lys. Vinklen afhænger af hastigheden.

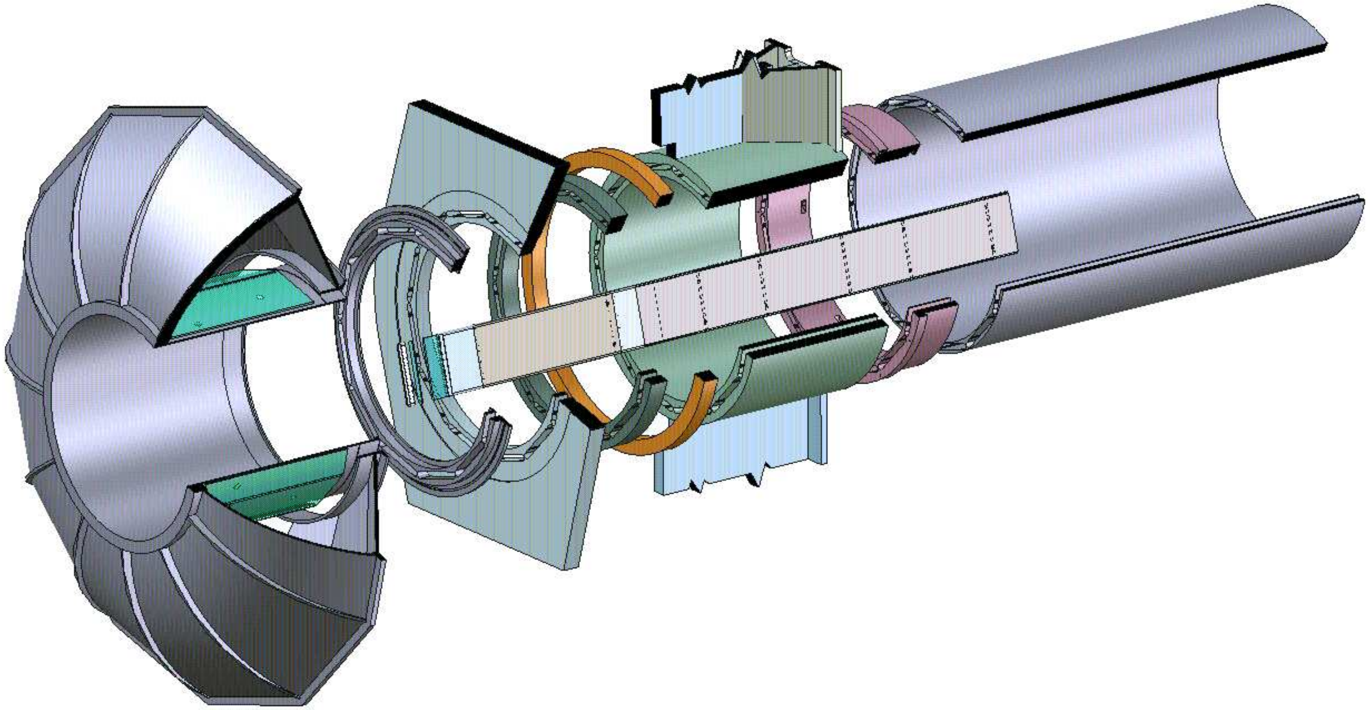


$$\text{Vinkel af Čerenkov-lys} \longrightarrow \text{hastighed} \xrightarrow{\text{Impuls}} \text{masse} \longrightarrow \text{type.}$$

Detector of Internally Reflected Čerenkov light (DIRC)

Formål: Måling af Čerenkov-lysets vinkel til bestemmelse af partiklers type.

Layout: Kvartsbarer med 10.000 lysdetektorer (PMT) i enden.



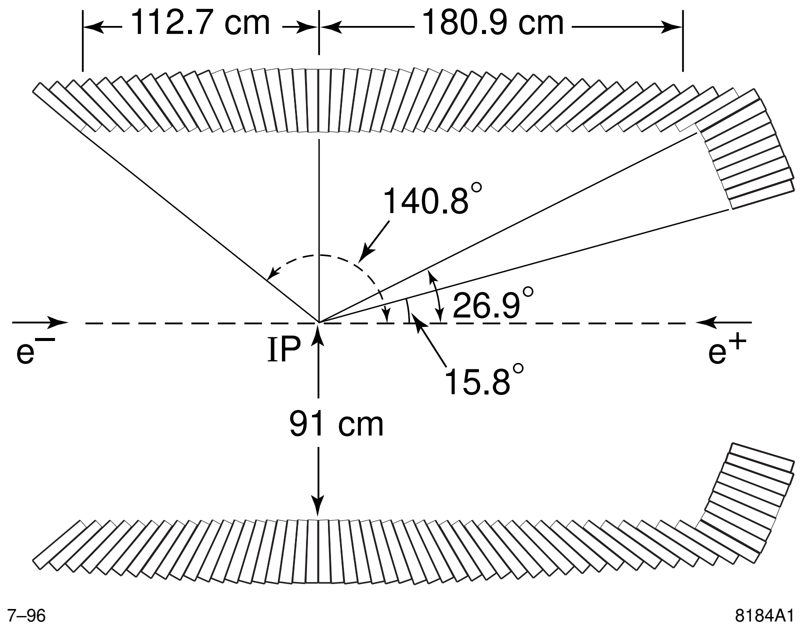
Angulære opløsning: 2.55 mrad (giver 3σ π/K separation op til 3 GeV)

Tidsopløsningen: 1.7 ns (afviser forkerte fotonløsninger og baggrund)

ElectroMagnetic Calorimeter (EMC)

Formål: Energibestemmelse af partikler der vekselvirker elektromagnetisk.

Layout: 6580 CsI-dopede 30 cm lange krystaller.



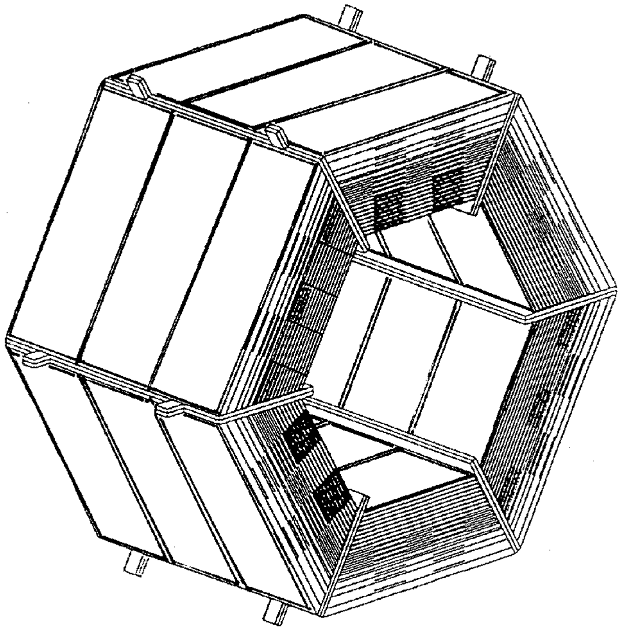
Opløsningsevnen i energi og position er i overensstemmelse med forventninger:

$$\sigma_E/E(\mathrm{GeV}) = \frac{2.55\ \%}{\sqrt[4]{E(\mathrm{GeV})}} \oplus 1.51\ \% \qquad \sigma_{\theta,\phi} = \frac{3.7\ \mathrm{mrad}}{\sqrt[2]{E(\mathrm{GeV})}} \oplus 0.31\ \mathrm{mrad}$$

Instrumented Flux Return (IFR)

Formål: Detektion og energibestemmelse af neutrale hadroner og myoner.

Layout: $\sim$ 20 lag af skiftevis jern (2-10 cm) og detektor (RPC).



Effektivitet: 75-80 % (problemer med højspændingen og manglende tykkelse)

$\Longrightarrow$ rekonstruktion af K_L^0 besværliggjort $\Longrightarrow$ $J/\psi K_L^0$ kanal mindre god

PEP-II og BaBar status

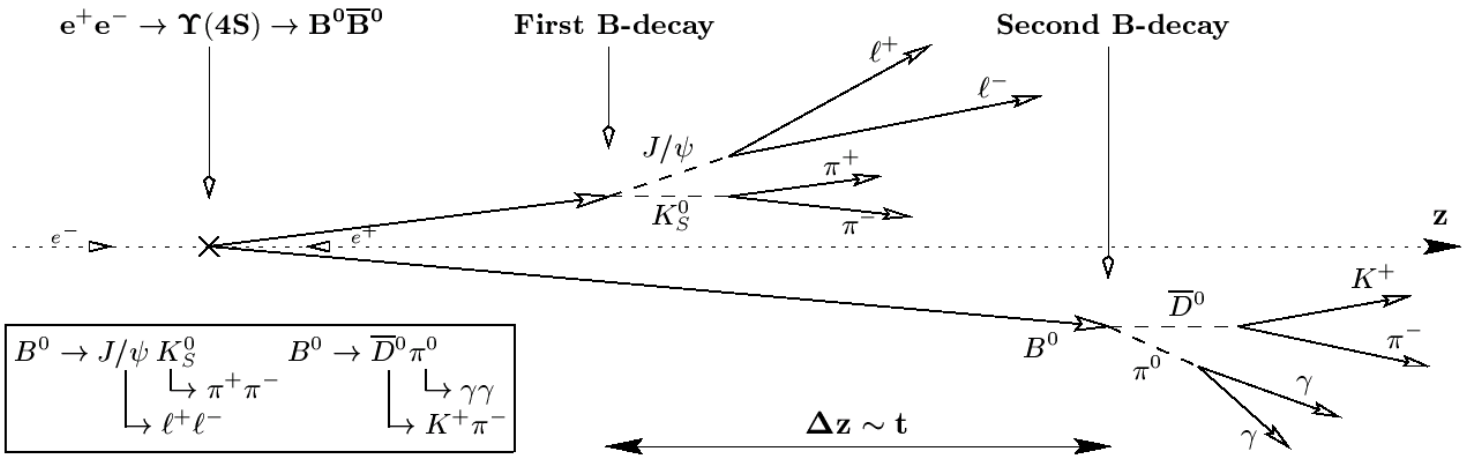
There is still more in this machine. [Uli Wienands, PEP-II Run Coordinator]

- PEP-II-acceleratoren
  - Verdensrekord i luminositet på 3.1×10^{33} cm^{2}s^{-1}.
  - Udsigt til yderligere forøgelser.
  - Integreret luminositet 25 fb^{-1} (23.000.000 $B\overline{B}$).
- BaBar-detektoren
  - Alle dele af detektoren fungerer, flere over forventning.
  - God vertex, impuls og energibestemmelse samt partikel-ID.
  - Effektivitet over 95 %.
  - Lav baggrund og lav bestrålingsskade.

Oversigt over sin(2β)-analysen

It is a capital mistake to theorize before one has data. [Sir Arthur Conan Doyle, 1859-1930]

$$f_{\pm}(t) \;=\; \frac{1}{4\tau}\, e^{-|t|/\tau}[1 \pm \sin(2\beta)\sin(\Delta m_d t)].$$



Taggingen af den anden B-meson er dog ikke perfekt. Forkert tag andel: w_{tag}

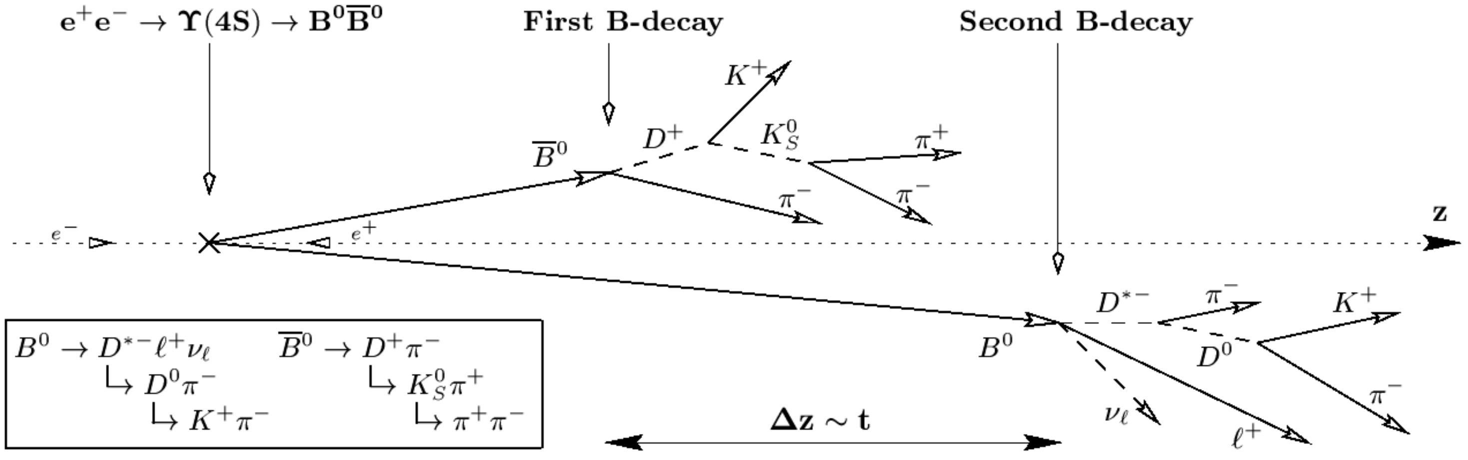
$$F_{\pm}(t) \;\equiv\; (1-w_{\text{tag}})f_{\pm}(t) + w_{\text{tag}} f_{\mp}(t) \;=\; \frac{1}{4\tau}\, e^{-|t|/\tau}[1 \pm D\sin(2\beta)\sin(\Delta m_d t)],$$

$$D \equiv 1 - 2w_{\text{tag}}$$

Oversigt over tagging- og mixing-analysen – TagMix

Måling af D (evnen til at *tagge*, dvs. bestemme typen af B-meson):

- Rekonstruer henfald, der er specifikke for typen af B-meson.
- Brug tagging-algoritmen på den anden B-meson.
- Sammenlign resultatet med forventning.



Fordelingen er + for *umixede* ($B^0\overline{B}^0$) events og − for *mixede* (B^0B^0 / $\overline{B}^0\overline{B}^0$) events:

$$H_\pm(t) \equiv \frac{1}{4\tau} e^{-|t|/\tau}[1 \pm D\cos(\Delta m_d t)],$$

Hermed måles både tagging-evnen D og mixing-raten Δm_d (deraf navnet TagMix).

Interessante events

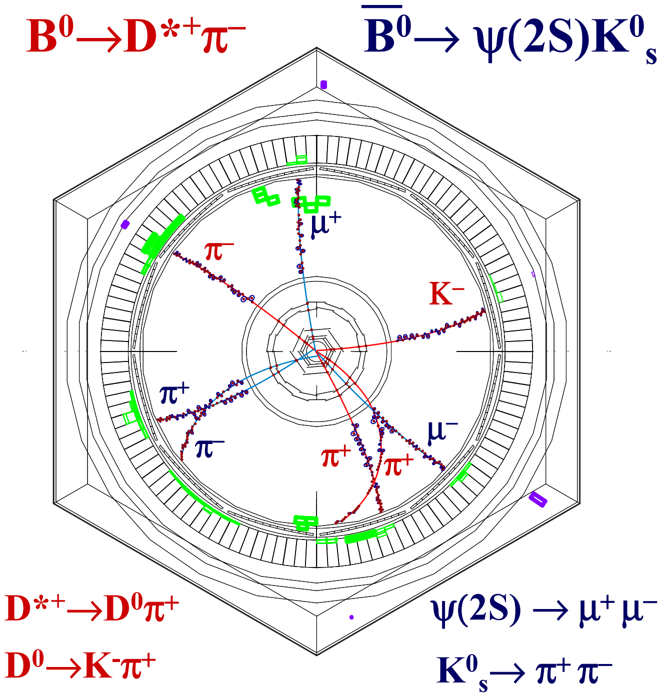
- CP events
  - **"Gyldne henfald":** $J/\psi(\ell^+\ell^-)K^0_S(\pi^+\pi^-,\pi^0\pi^0)$,
    $\psi(2S)(\ell^+\ell^-, J/\psi\,\pi^+\pi^-)K^0_S(\pi^+\pi^-)$.
  - **"Sølv-henfald":** $\xi_{c1}(J/\psi\,\gamma)K^0_S(\pi^+\pi^-)$,
    $J/\psi(\ell^+\ell^-)K^{0*}(K^0\pi^0)^\dagger$.
  - **"Bronze-henfald":** $J/\psi(\ell^+\ell^-)K^0_L$.

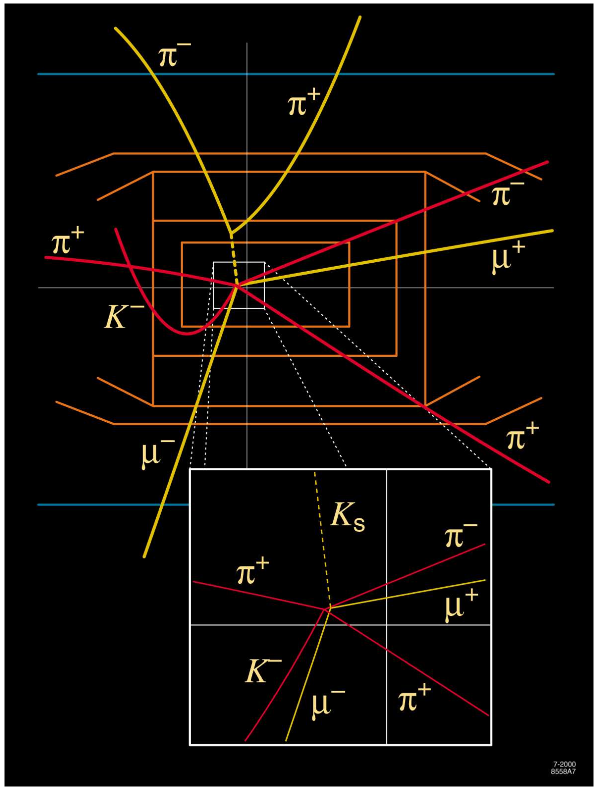
- Tagging events
  - Fuldt rekonstruerede hadroniske events ($D^{(*)}\,\pi/\rho/a_1$)
  - Semileptoniske events ($D^*\ell\nu_\ell$)

† Angulær analyse krævet, da begge partikler har spin. Foruden er $CP_{\text{effektiv}} = 0.68$.

Perfekt Event

Fuldt rekonstrueret event med henfaldene $B^0 \to D^{*+}\pi^-$ og $\overline{B}^0 \to \psi(2S)K_S^0$.





En sådan event forekommer omkring 1:10.000.000 gange.

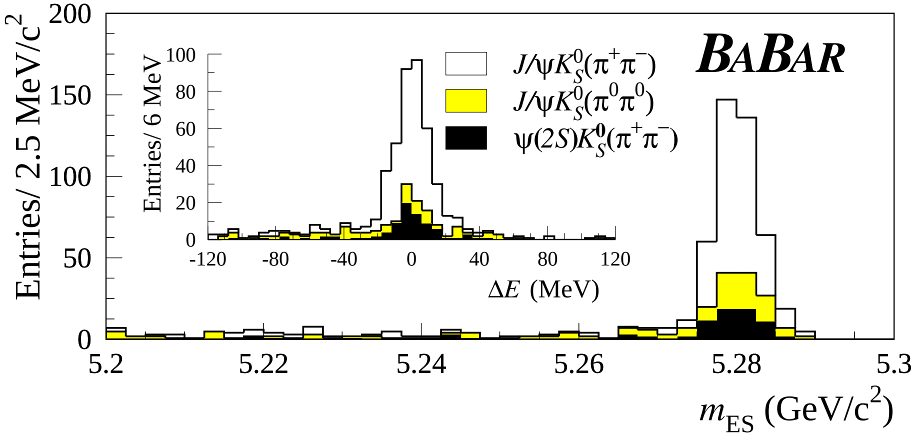
CP-events i $(\Delta\mathrm{E}, \mathrm{m_{ES}})$-planet

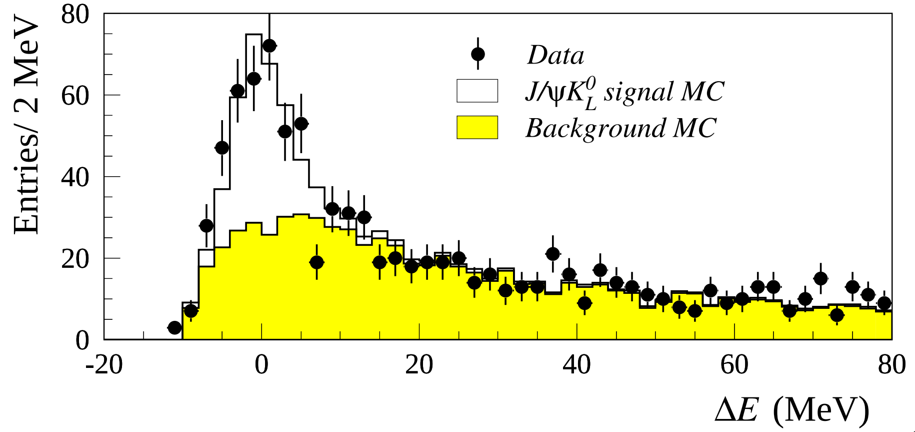
$$\Delta E \equiv E_B - E_{\mathrm{beam}} \qquad m_{\mathrm{ES}} \equiv \sqrt{(E^{\mathrm{CM}}_{\mathrm{beam}})^2 - (\mathbf{p}^{\mathrm{CM}}_B)^2}$$

Skitse af rekonstruktion:

- Rekonstruer J/ψ $(\ell^+\ell^-)$.
- Rekonstruer K^0_S $(\pi\pi)$ og find K^0_L.
- Kombiner til B-kandidater.
- Udvælg kandidater i $(\Delta E, m_{\mathrm{ES}})$.

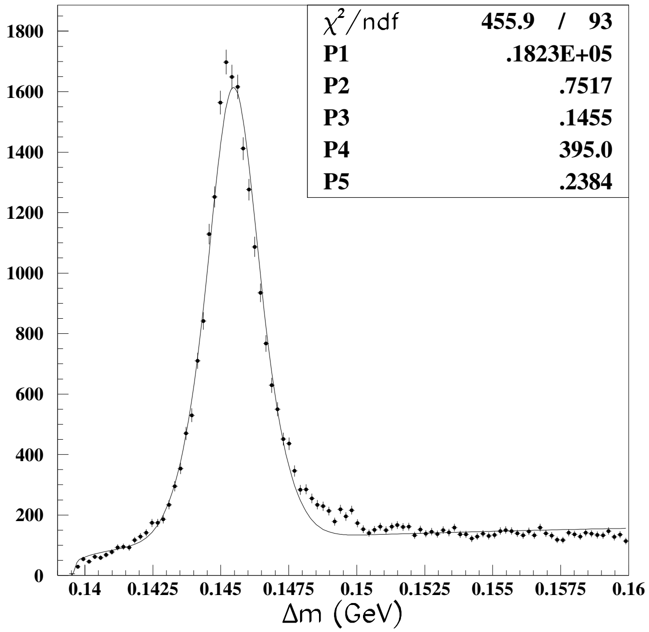
Kanal	N_{tag}	Renhed
$J/\psi K^0_S(\pi^+\pi^-)$	188	98 ± 1 %
$J/\psi K^0_S(\pi^0\pi^0)$	41	85 ± 6 %
$\psi(2S) K^0_S$	44	97 ± 3 %
$J/\psi K^0_L$	256	39 ± 6 %





Rekonstruktion af hadroniske events

Hadronisk rekonstruktion: Kombiner passende spor til D og deraf D^*-kandidater.
Baggrund: Kombinatorisk (partikler tilfældigt sammensat til D^*-kandidater).
Forskellen i D^* og D-kandidaternes rekonstuerede masse, $m_{D^*} - m_D$, er vist i figuren.



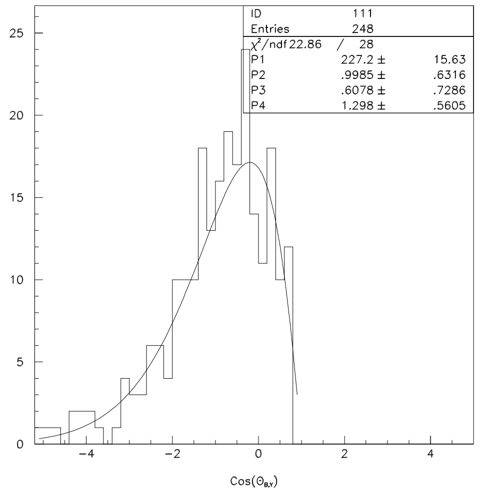
Henfaldskanal	# kandidater	S/(S+B) [%]
$B^0 \to D^{*-}\pi^+$	622 ± 27	90
$B^0 \to D^{*-}\rho^+$	419 ± 25	84
$B^0 \to D^{*-}a_1^+$	239 ± 19	79
$B^0 \to D^-\pi^+$	630 ± 26	90
$B^0 \to D^-\rho^+$	315 ± 20	84
$B^0 \to D^-a_1^+$	225 ± 20	74
Total (Juli 2000)	2383 ± 57	85
Total (Februar 2001)	4637 ± 84	$\sim$85

Fordel: Baggrund kan bestemmes præcist da øvrige baggrunde er ubetydelig pga. B-rekonstruktion.

Rekonstruktion af semileptoniske events – $B^{\pm}$ baggrund

$D^*\ell\nu_\ell$ baggrunde: kombinatorisk, forkert-lepton og $B^{\pm} \rightarrow D^*\pi^{\pm}\ell\nu_\ell$-henfald.

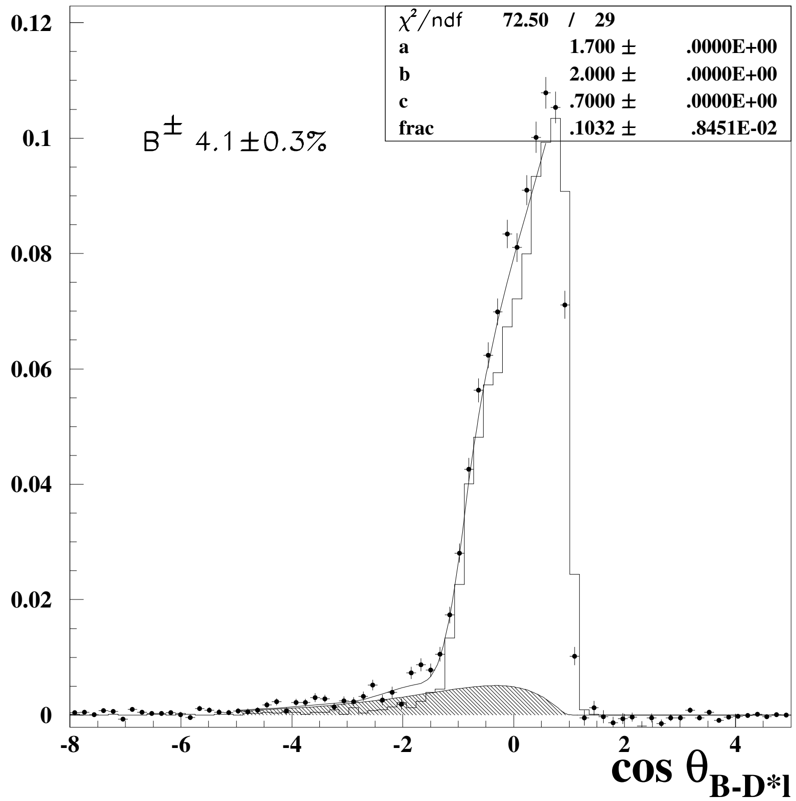
$$0 = p_\nu^2 = (p_B - p_{(D^*\ell)})^2 \quad \Rightarrow \quad \cos\theta_{B,(D^*\ell)} = \frac{m_B^2 + m_{(D^*\ell)}^2 - 2E_B E_{(D^*\ell)}}{2|\mathbf{p}_B||\mathbf{p}_{(D^*\ell)}|}$$



$$f_{\text{Troels}}(x) = N \, \frac{c \; b^{\frac{a+1}{c}}}{\Gamma(\frac{a+1}{c})} \, (1-x)^a \; e^{-b(1-x)^c}$$

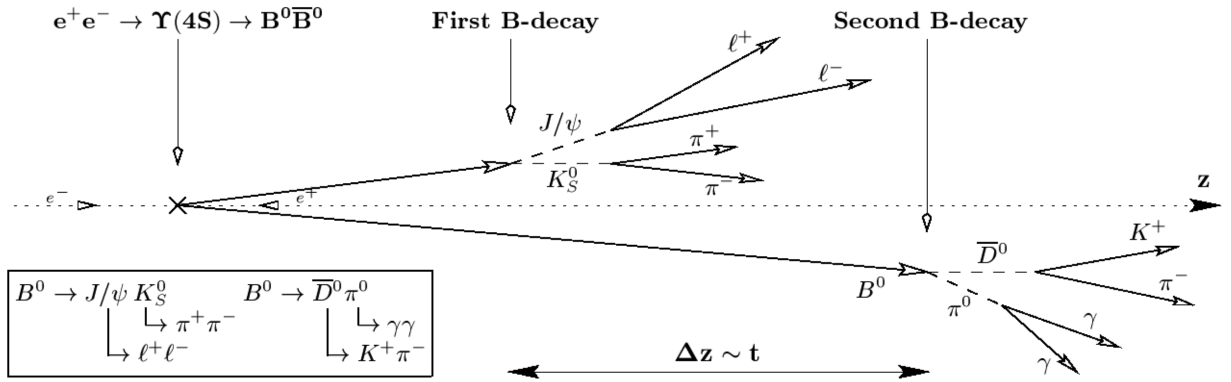
Juli 2000: 7517 ± 104 med 72 % renhed

Dec. 2000: 22396 ± 149 med 77 % renhed



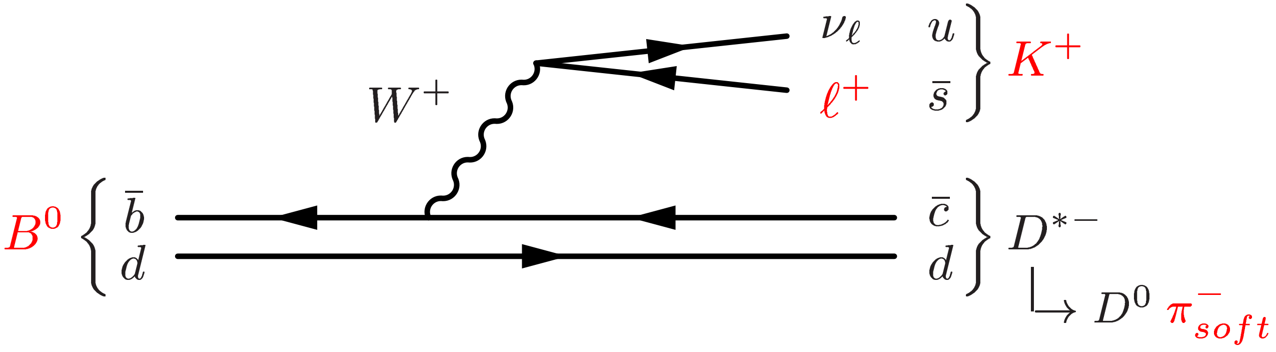
Bestemmelse af B-type – tagging

Krav efter rekonstruktion af CP-henfaldet (fx. $J/\psi K_S^0$):
Bestem ud fra de resterende partikler den anden B-mesons type (B^0 eller $\overline{B}^0$).



Tagging-kategorier:

- Lepton
- Kaon
- Netværk 1
- Netværk 2



Bestemmelse af tidsopløsningen

Bestemmelse af tidsopløsning: Fit B-mesonens levetid (kendt funktion).

Funktion i $\boldsymbol{\tau_{B^0}}$-fit:

$$\mathcal{T} \equiv e^{-|t|/\tau} \otimes \mathcal{R}$$

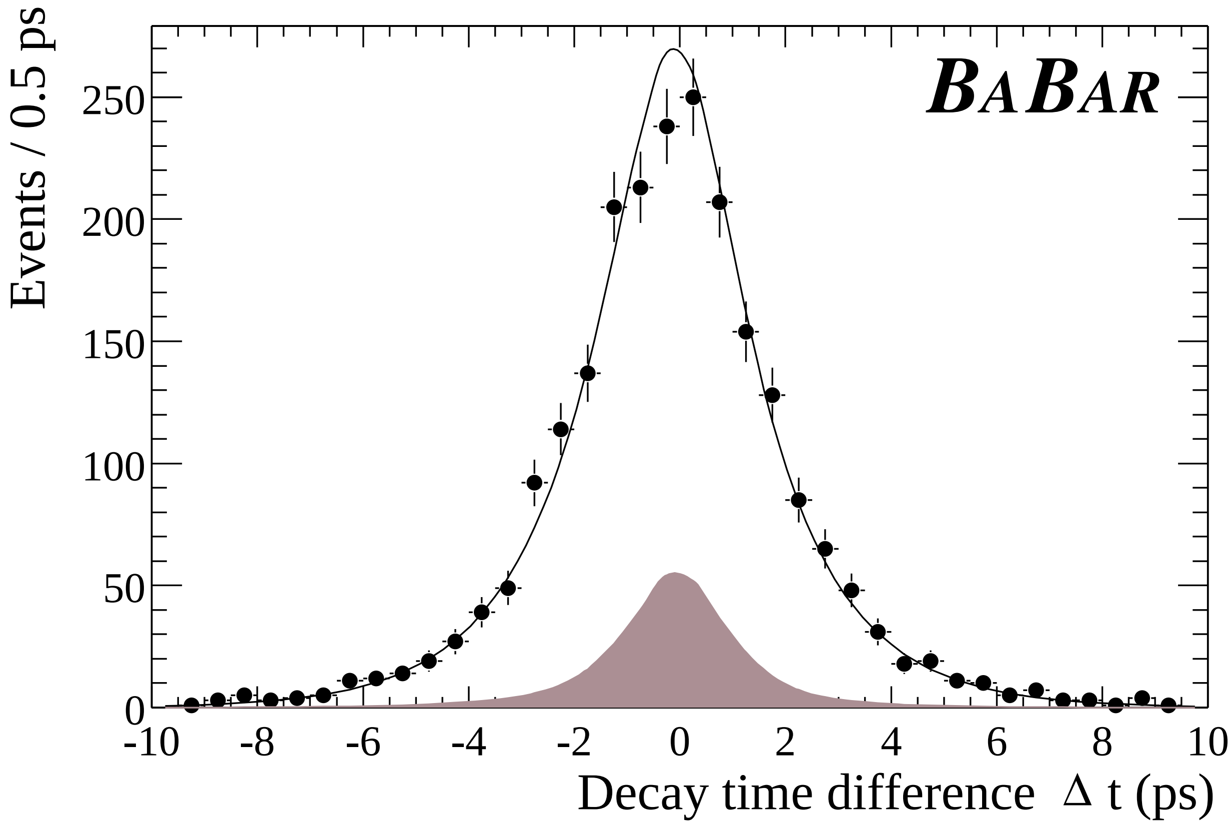
Opløsningsevne: $\mathcal{R}$

TagMix og sin(2β) fit:

$$\mathcal{F}_{\pm} \equiv F_{\pm} \otimes \mathcal{R}$$

$$\mathcal{H}_{\pm} \equiv H_{\pm} \otimes \mathcal{R}$$

Check: τ_{B^0} konsistent med verdensgennemsnit.



$\boxed{\tau_{B^0} = 1.506 \pm 0.052 \text{ (stat.)} \pm 0.029 \text{ (syst.) ps (Juli 2000)}}$

Verdensgennemsnit: τ_{B^0} =1.548±0.032 ps

Blind analyse

Blind analyse: Resultat ikke synligt før analysen er færdiggjort og fastfrosset. Synliggørelse 14 dage før offentliggørelse.

$$\sin(2\beta) \; =$$

X.XX $\pm\, 0.37\,(\text{stat.}) \pm 0.09\,(\text{syst.})$

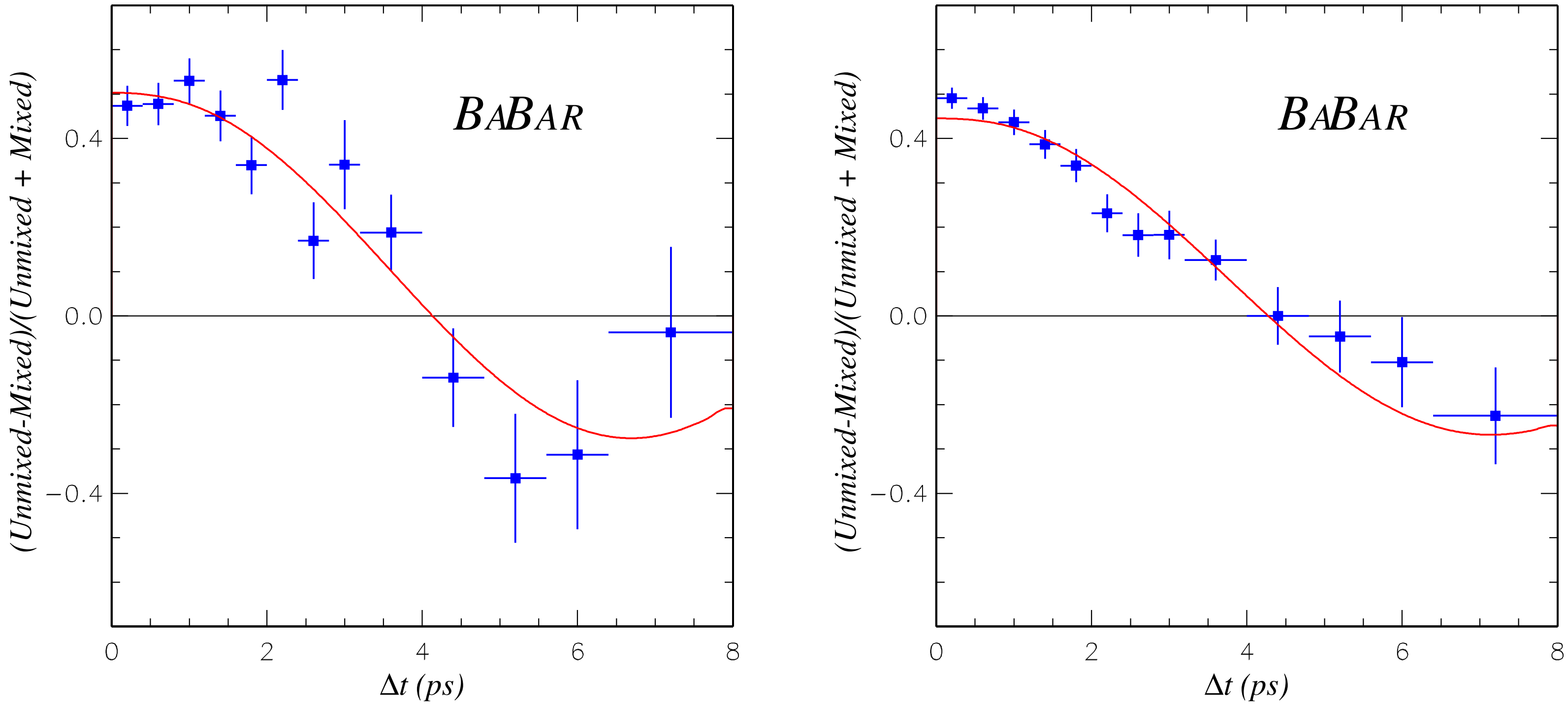
$$\Delta m_d \; =$$

X.XXX $\pm\, 0.017\,(\text{stat.}) \pm 0.022\,(\text{syst.})$

Dermed undgås subjektiv indflydelse.

TagMix resultat

$$a(t) \equiv \frac{N_{\text{umixede}} - N_{\text{mixede}}}{N_{\text{umixede}} + N_{\text{mixede}}} = \frac{\mathcal{H}_+ - \mathcal{H}_-}{\mathcal{H}_+ + \mathcal{H}_-} = D \cos \Delta m_d t \otimes \mathcal{R}$$



$$\boxed{\Delta m_d = 0.512 \pm 0.017\,(\text{stat.}) \pm 0.022\,(\text{syst.})\ \text{ps}^{-1} \quad (\text{Juli 2000})}$$

Verdensgennemsnit: Δm_d=0.472±0.017 ps^{-1}

$\sin(2\beta)$-resultat

Resultatet for $\sin(2\beta)$ er blevet præsenteret i juli 2000 og februar 2001.

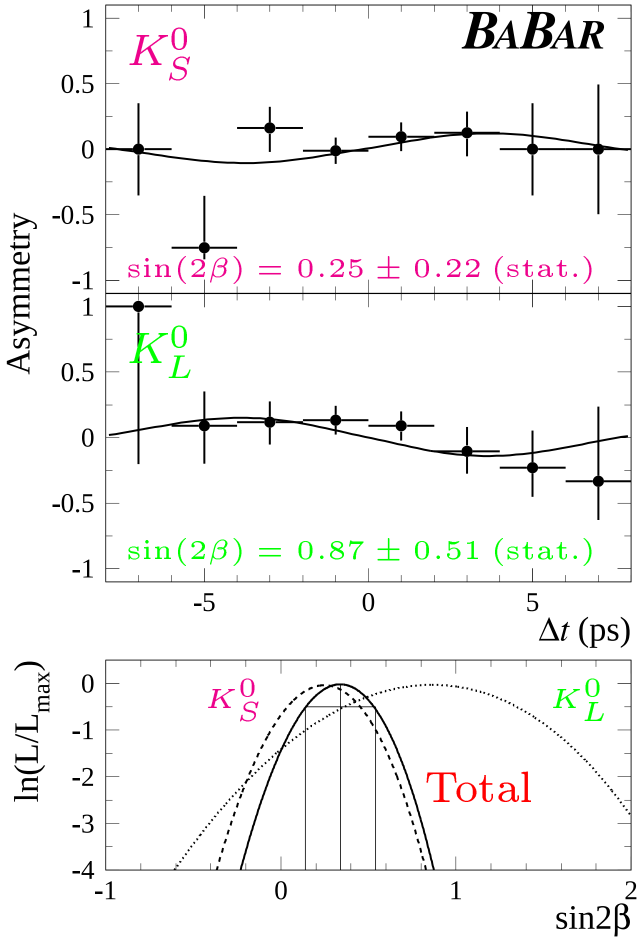
Det *indledende* resultat (Osaka) var:

$$\sin(2\beta)_{\text{likelihood}} = 0.12 \pm 0.37\,(\text{stat.}) \pm 0.09\,(\text{syst.})$$

$$\sin(2\beta)_{\text{OneBin}} = -0.11 \pm 0.41\,(\text{stat.}) \pm 0.08\,(\text{syst.})$$

Det offentliggjorte resultat er:
(Physical Review Letter)

$$\sin(2\beta) = 0.34 \pm 0.20\,(\text{stat.}) \pm 0.05\,(\text{syst.})$$



Check af resultat

There are sadistic scientists who hasten to hunt down error instead of establishing the truth.

[Marie Curie, 1867-1934]

Resultatet er blevet krydschecket på mange måder.

- Opdeling af CP-begivenhederne efter henfaldskanal, tagging kategori, B-type og henfaldstidspunkt. Ingen underopdelinger viste inkonsistens.
- Sandsynligheden for at få en mindre likelihood var 60 %.
- Henfald, som ikke skulle vise nogen asymmetri blev fittet ækvivalent:

Type events	N_{events}	Renhed (%)	Asymmetri
B_{flavor}	4637	86 ± 1	0.03 ± 0.05
$B^{\pm}$	5165	90 ± 1	0.02 ± 0.05

Den systematiske fejl på 0.05 er domineret af usikkerhed i tidsopløsningen.

Andre sin(2β)-resultater

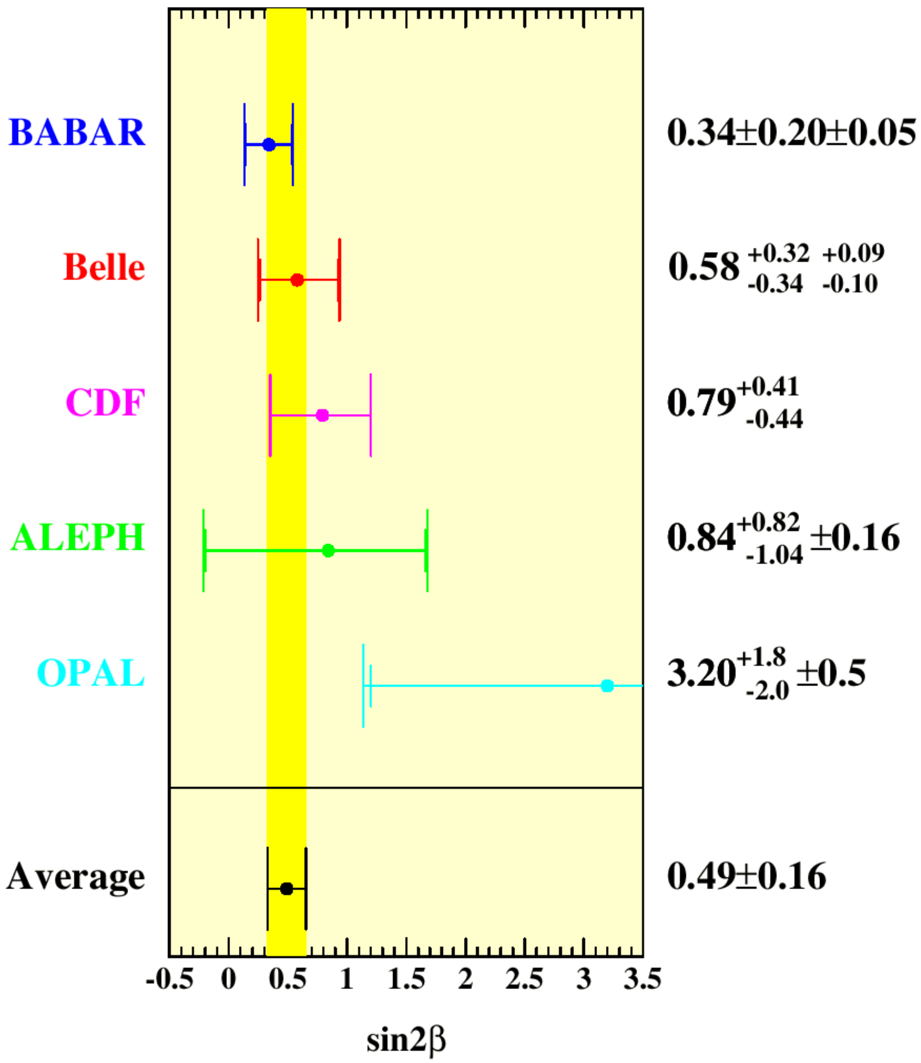
Andre sin(2β)-målinger af:

- Belle ($e^+e^- \to \Upsilon(4S)$).
- CDF (p^+p^-, 2 TeV).
- ALEPH, OPAL ($e^+e^- \to Z^0$).

Gennemsnit konsisten med *både*

- CP-invarians
- Global fit af CKM-matricen ($\sin(2\beta) = 0.7 \pm 0.1$)

Men B-fabrikkerne vil snart gøre en ende på dette.



Fremtidsudsigter

- BaBars forventninger: At fordoble datamængden frem til august 2001.
  - Inklusion af "sølv" CP-henfald, $J/\psi K^{*0}(K^0\pi^0)$ og $\chi_{c1}K^0_S$ i analysen.
  - Test af CP-invarians og overensstemmelsen med CKM-matricen.

- Med de planlagte opgraderinger skulle PEP-II være i stand til at give BaBar-experimentet en integreret luminositet over $500\,\mathrm{fb}^{-1}$ i 2005.
  - Mulighed for at måle α og γ og dermed checke konsistensen af Standard-Modellens beskrivelse af CP-brud.

Dermed har vi taget endnu et skridt i vores evige søgen efter verdens og vores oprindelse!