

Rätselhafte Antimaterie

Was ist Antimaterie?

Entdeckung, Experimente, Anwendungen

Materie-Antimaterie-Symmetrie im Labor,

aber Asymmetrie im Universum

Entdeckung der Asymmetrie im Labor

Erklärung, Probleme, Planung neuer Experimente

BABAR und dessen erste Ergebnisse

1. Was ist Antimaterie?

Zunächst eine Spekulation von Paul A. M. Dirac 1928:

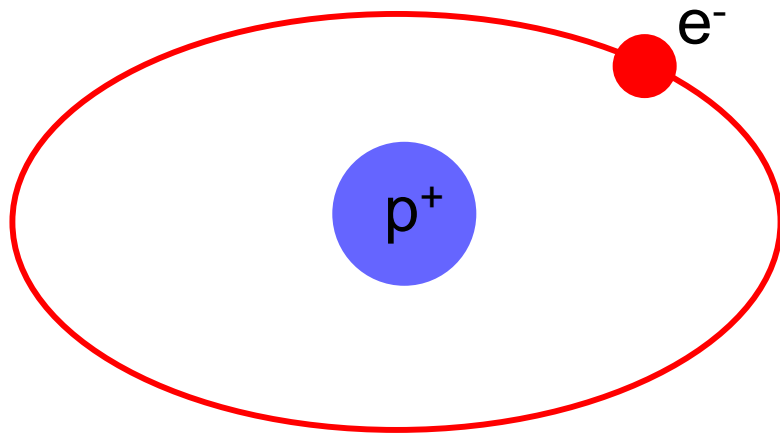
Alle elektrisch geladenen Bausteine der Materie
(damals nur das positiv geladene schwere Proton p , p^+
und das negativ geladene leichte Elektron e^-)
haben einen gleich schweren, aber
entgegengesetzt geladenen Baustein als Partner:

e^+ (Positron) ist Antiteilchen des Teilchens e^-

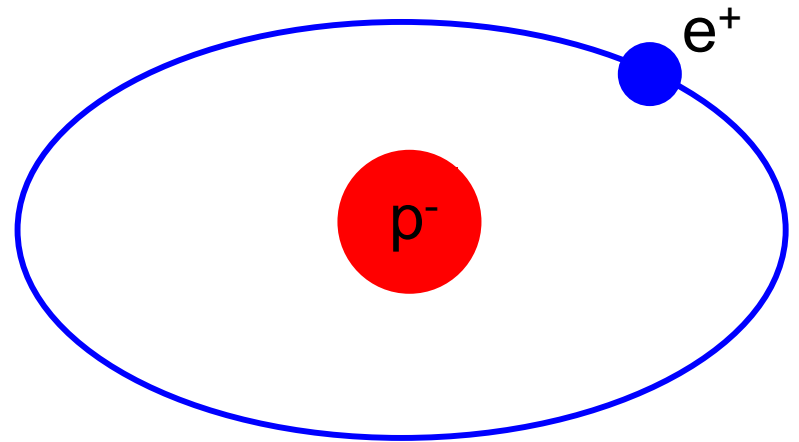
p^- (Antiproton) ist Antiteilchen des Teilchens p^+

Für die Quanten des Lichts gilt das nicht,

Antiteilchen des Teilchens γ (Photon) ist das γ selbst.



Materie



Antimaterie

Wie kam Dirac auf diese verrückte Idee?

Dirac vollzog 1928 als erster eine Vereinigung von Quantentheorie

(Planck 1900, de Broglie 1924, Heisenberg 1925, Schrödinger 1925)

und spezieller Relativitätstheorie

(Einstein 1905)

$$E^2 = (m \cdot c^2)^2$$

~~$$E = m \cdot c^2$$~~

$$E = + m \cdot c^2$$

und

$$E = - m \cdot c^2$$

Quantisierung dieser Formel, die „Dirac-Gleichung“
(Beschreibung von schnell bewegten Teilchen durch
Wellenpakete) muss negative Energie ernst nehmen.

Positive Energie = Materie, negative Energie = Antimaterie.

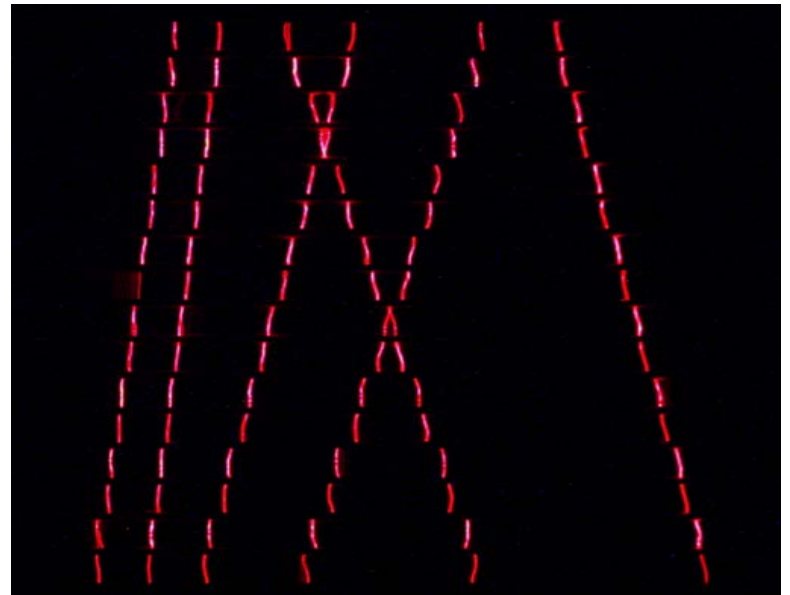
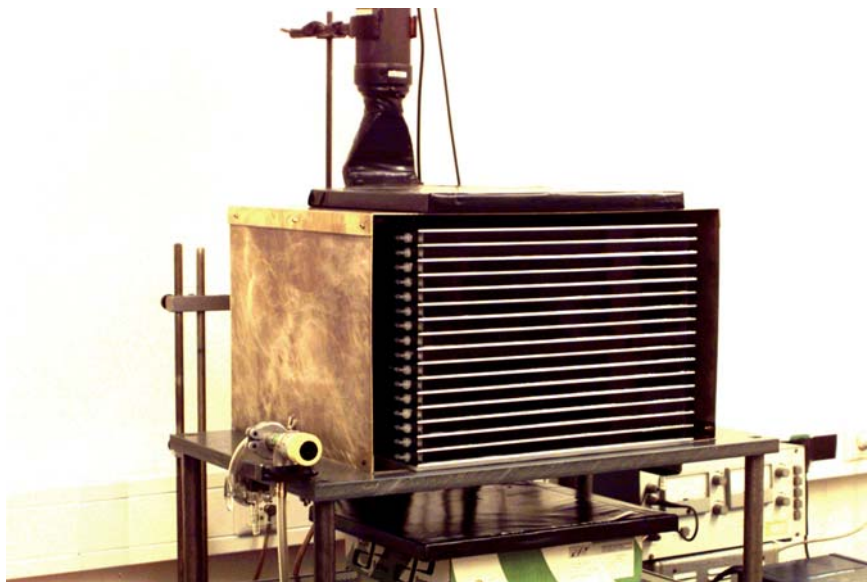
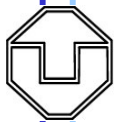
Diracs Theorie hatte nach 1928 gewaltige Erfolge in der Atomphysik, besonders im **Magnetismus** des Elektrons und auch der Atome.

Sie hatte nur ein Problem: Wo bleibt das Positron?

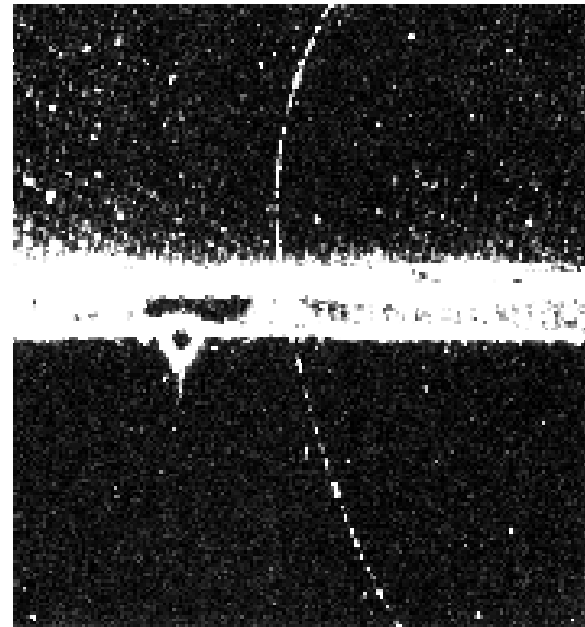
2. Die Entdeckung des Positrons

gelingt 1932 Carl Anderson durch Beobachtung der Kosmischen Strahlung (Höhenstrahlung).

Dazu habe ich Ihnen diese Funkenkammer mitgebracht, (gebaut im Elektroniklabor des Instituts für Kern- und Teilchenphysik der TUD) Sie zeigt ca. 2 hochenergetische Teilchen pro Sekunde, die aus der oberen Atmosphäre auf die Erdoberfläche gelangen und dort in der Kammer Funken in Helium-Neon zwischen hochspannungs-geladenen Platten erzeugen.



Kosmische Strahlung war die erste Quelle (1910-1950) zur Beobachtung von Elementarteilchen und deren Reaktionen. Links ein „Ereignis“ in Photoemulsion, jedes produzierte Teilchen ist als Spur sichtbar. Im Magnetfeld werden die Spuren gekrümmt und verraten die elektrische Ladung der Teilchen. In seiner Nebelkammer sieht Anderson 1932 die positiv geladene Spur eines Teilchens mit $m(e^-)$, das **Positron e^+** :





Paul Adrien Maurice Dirac
(1902 – 1984)
Nobelpreis 1933

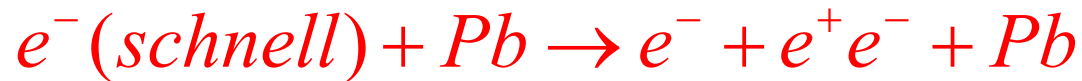


Carl D. Anderson
(1905 – 1991)
Nobelpreis 1936

Positronen e^+ sind stabil. Leben im Vakuum unendlich lange. In Materie vernichten sie sich mit Elektronen in Lichtquanten:





Heute Aufbewahrung von e^+ in Speicherringen für Tage. Technische Herstellung:



3. Weitere Entdeckungen der Teilchenphysik

1937 findet Anderson in seiner Nebelkammer Teilchen der Masse $\approx 200 m(e)$, heute μ -Leptonen genannt, **Teilchen μ^- und Antiteilchen μ^+ .**

Beide leben nur ≈ 2 Mikrosekunden, machen aber etwa 90% der Spuren hier in meiner Funkenkammer.



1940-95 vervollständigt sich unser heutiges Bild von der Struktur der Materie. Bausteine sind **Leptonen und Quarks**. Sie kommen in drei **Familien** vor, jede hat 2 Leptonen und 2 Quarks. Zu jeder gehört eine **Antifamilie** gleicher Struktur.

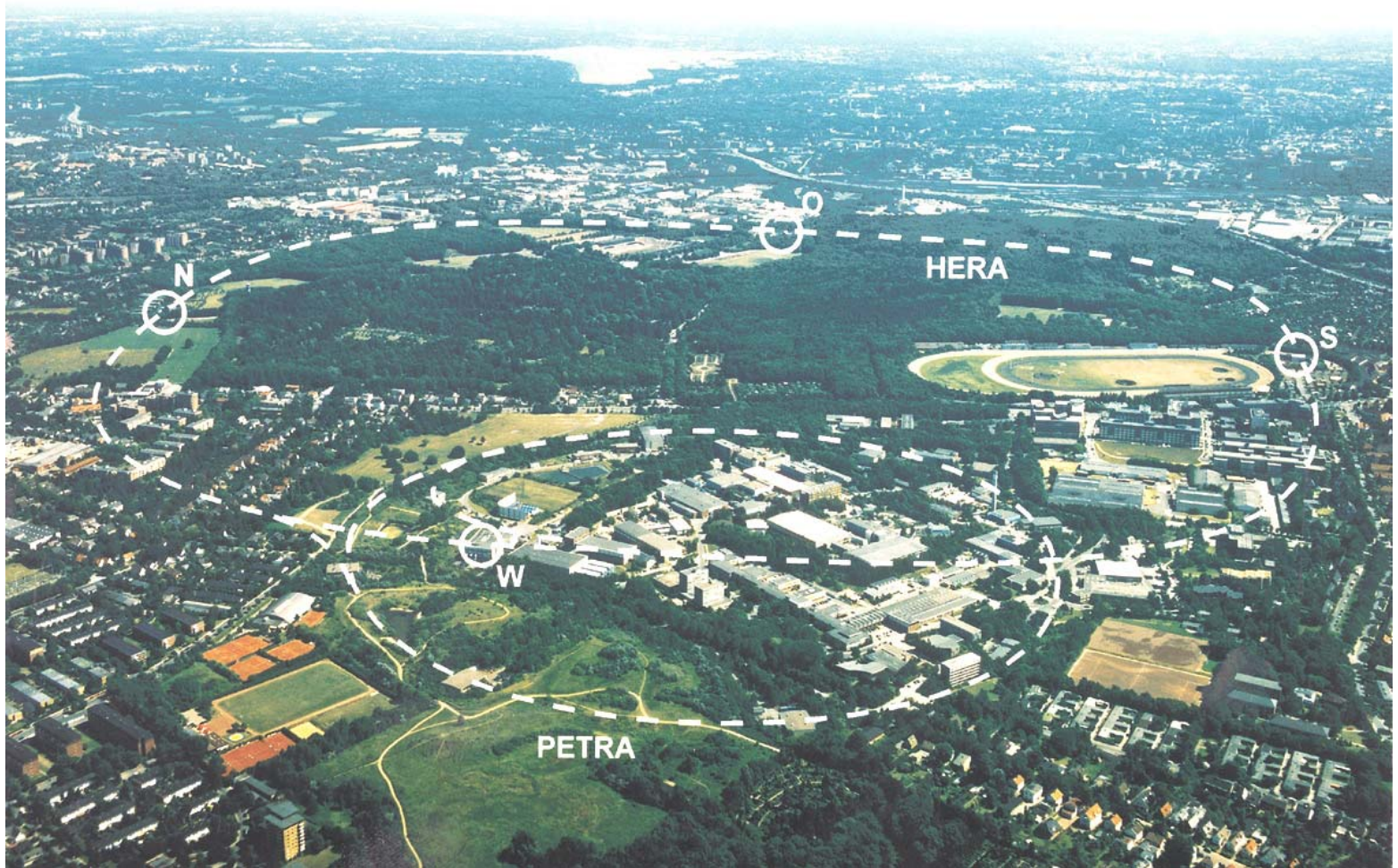
Bis 1950 dominieren Entdeckungen in der Höhenstrahlung, danach die an Teilchenbeschleunigern.

Große Bedeutung in der Entdeckungsgeschichte hat die e^+e^- -Vernichtung. Produktion von Teilchen und Antiteilchen im Mini-Urknall:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow X \quad (\text{alle Teilchen, die die Natur hat})$$

Speicherringe für e^+e^- -Experimente in Frascati (I), Orsay (F), Nowosibirsk (RUS), Stanford und Cornell (USA), Hamburg (D), Genf (CH), Tsukuba (J), Beijing (CHI).

DESY Hamburg:



Periodensystem der 48 elementaren „Fermionen“

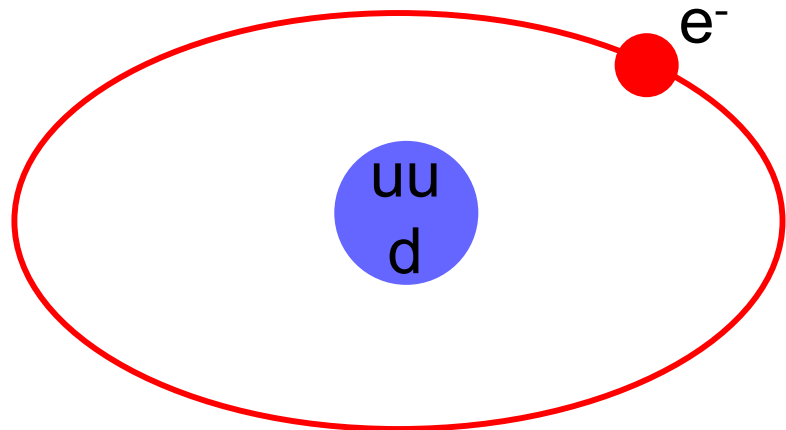
(rot = irdische Materie, blau = ebenfalls stabil, schwarz = instabil,
Farbladungen i=rot,blau,grün, k=antirot,antiblau,antigrün. $N=6 \cdot (2+2 \cdot 3)=48$

Spin 1/2	Ladung							Ladung	Spin 1/2
Leptonen	0	ν_e	ν_μ	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_e$	0	Anti-leptonen
	-1	e^-	μ^-	τ^-	τ^+	μ^+	e^+	+1	
Quarks	+2/3	u_i	c_i	t_i	\bar{t}_k	\bar{c}_k	\bar{u}_k	-2/3	Anti-quarks
	-1/3	d_i	s_i	b_i	\bar{b}_k	\bar{s}_k	\bar{d}_k	+1/3	
		1.	2.	3.	3.	2.	1.		
		Familie			Antifamilie				

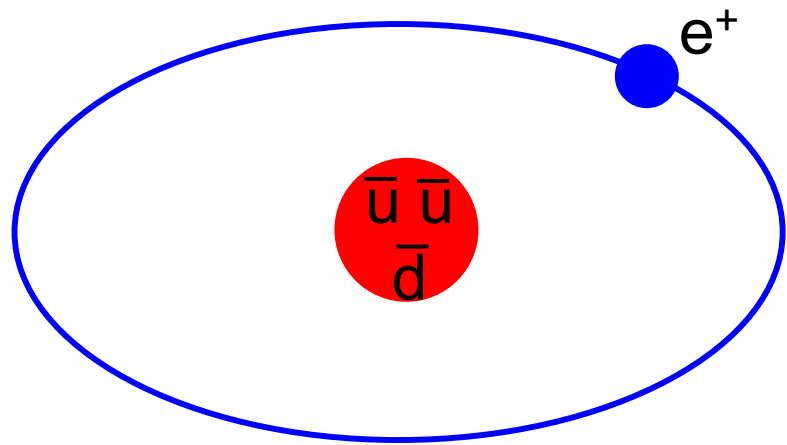
Die 13 elementaren „Bosonen“

Spin 1	γ	8 g_{ik}	$W^+ W^- Z^0$	N=12
Spin 0		H^0		N=1

Photon γ vermittelt die elektrische, Gluonen g_{ik} die starke, und W und Z die schwache Kraft.



Materie



Antimaterie

Jede der beiden für sich allein ist stabil; gleiche Naturgesetze.

Aber wehe,
sie
begegnen
sich:

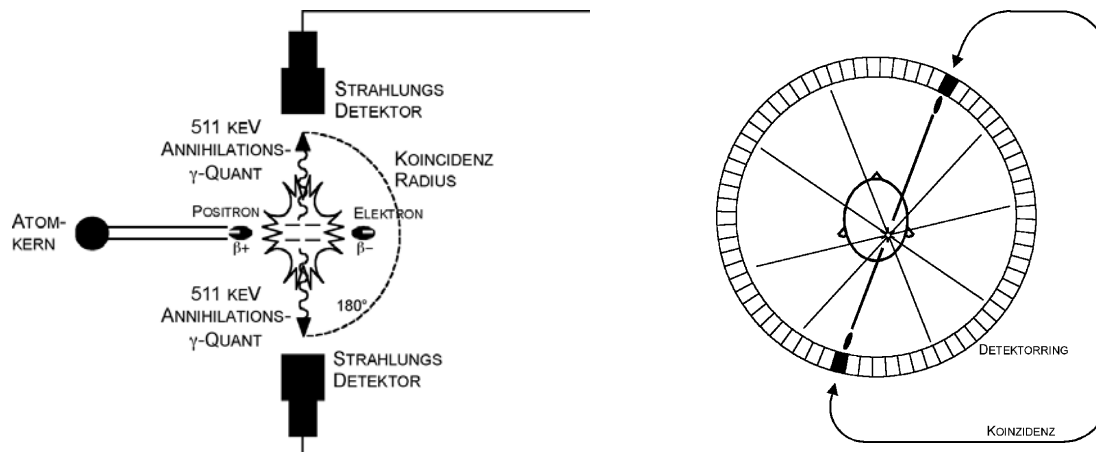
$$\begin{aligned}
 & e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma, \\
 & (uud) + (\bar{u}\bar{u}\bar{d}) \rightarrow (u\bar{u}) + (u\bar{d}) + (d\bar{u}) \\
 & \rightarrow 2\gamma + \mu^+ \nu_\mu + \mu^- \bar{\nu}_\mu \\
 & \rightarrow 2\gamma + e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e \nu_\mu + e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \\
 & \rightarrow 4\gamma + 2\nu_\mu + 2\bar{\nu}_\mu + \nu_e + \bar{\nu}_e.
 \end{aligned}$$

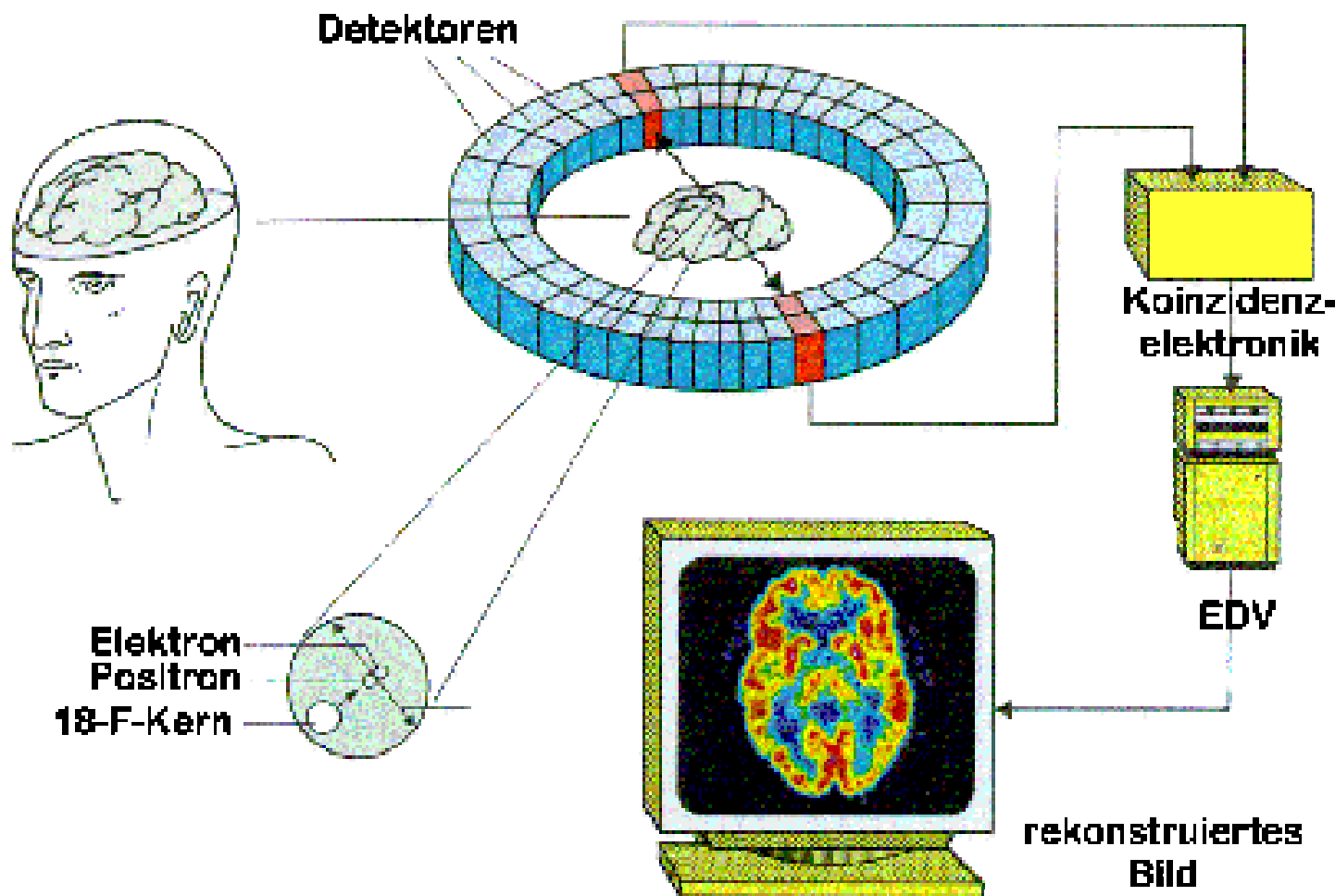
Nach der
Vernichtung
bleiben nur
Licht und
Neutrinos.

4. Anwendungen mit Antimaterie

Materialforschung verwendet Elementarmagneten von μ^+ -Leptonen, um Magnetfelder in Festkörpern zu messen.

Medizin verwendet **Positronen-Emissions-Tomographie**: e^+ -emittierende Radionuklide (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F) werden am Zyklotron erzeugt, dann zur Diagnose injiziert oder eingeatmet. Zerfall, wo sie im Körper angereichert werden. e^+ kommen nur 1 mm weit, vernichten sich mit e^- in 2 γ . Diese werden im PET-Scanner nachgewiesen, aus den Treffern wird das Bild tomographisch rekonstruiert.





Bewegung des Patienten
durch den PET-Scanner:
Mehrschichten-Tomographie.

5. Symmetrien im Periodensystem der Elementarteilchen

Noch mal alle Fermionen, d. h. die Bausteine mit Spin $\frac{1}{2}$:

L	B	Q	Teilchen			Antiteilchen			Q	B	L
1	0	0	ν_e	ν_μ	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_e$	0	0	-1
1	0	-1	e^-	μ^-	τ^-	τ^+	μ^+	e^+	+1	0	-1
0	1/3	+2/3	u_i	c_i	t_i	\bar{t}_k	\bar{c}_k	\bar{u}_k	-2/3	-1/3	0
0	1/3	-1/3	d_i	s_i	b_i	\bar{b}_k	\bar{s}_k	\bar{d}_k	+1/3	-1/3	0

Teilchen und dazugehörige Antiteilchen haben gleiche Masse, gleichen Spin und gleiche Lebensdauer.

Ladung Q, Leptonenzahl L und Baryonenzahl B sind entgegengesetzt gleich.

In allen Labor-Reaktionen sind Q, L und B „erhalten“.

Quarks existieren nicht frei, sind durch starke Kraft in Zuständen mit $B = 0, +1$ oder -1 gebunden.

Zusammengesetzte Quarkzustände heißen

Mesonen, ($B = 0$), z. B. $u\bar{d} = \pi^+$, $u\bar{s} = K^+$, $d\bar{b} = B^0$, oder

Baryonen, ($B = +1$), z. B. $uud = p$, $udd = n$, oder

Antibaryonen, ($B = -1$), z. B. $\bar{u}\bar{u}\bar{d} = \bar{p}$, $\bar{u}\bar{d}\bar{d} = \bar{n}$.

π^+ -Meson wurde 1947 entdeckt, p 1911, \bar{p} 1955;

≈ 1970 auch Antiatomkerne, $\bar{D} = \bar{p}\bar{n}$, ${}^3\bar{\text{He}} = \bar{p}\bar{p}\bar{n}$, ${}^4\bar{\text{He}} = \bar{p}\bar{p}\bar{n}\bar{n}$;

1996 am CERN in Genf Anti-Wasserstoffatome $\bar{\text{H}} = \bar{p}e^+$.

Alle Antiteilchen, elementar oder zusammengesetzt, verhalten sich genau so wie die entsprechenden Teilchen, nur Q , B und L sind umgekehrt.

In jedem Mini-Urknall entstehen gleich viele Teilchen wie Antiteilchen, $\Sigma Q = \Sigma B = \Sigma L = 0$.

Auch Zerfälle sind genau gleich häufig, K^+ -Meson zerfällt mit gleicher Rate in $\pi^+\pi^0$ wie K^- in $\pi^-\pi^0$.

Scheinbar perfekte Symmetrie, „CP-Symmetrie“. Aber:

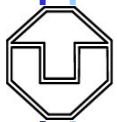
6. Asymmetrie im Universum

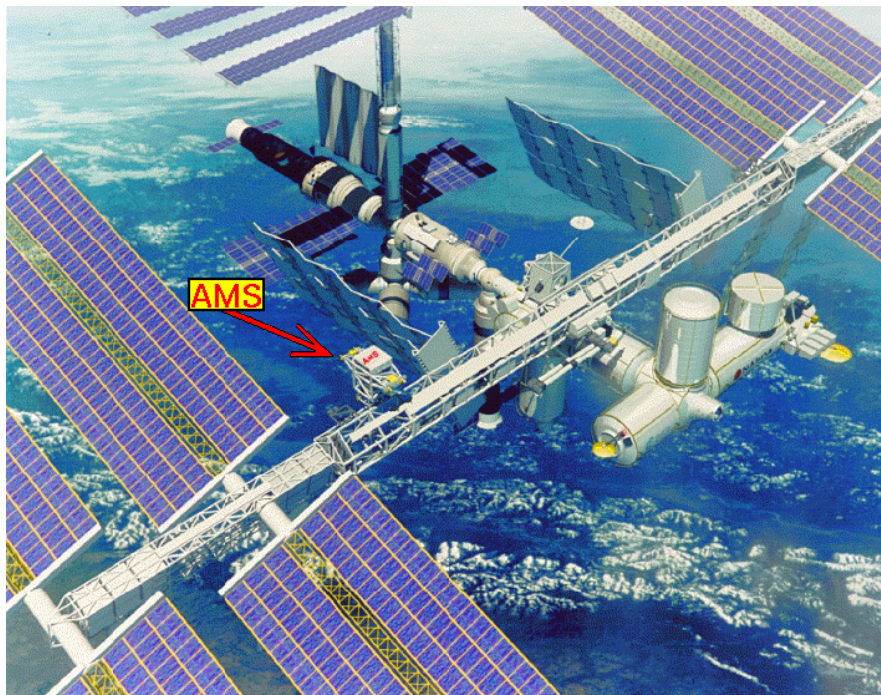
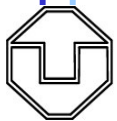
Materie-Antimaterie-Symmetrie ist im Universum von heute nicht vorhanden, ist **verletzt**. Astronomie kennt keinen Hinweis auf Existenz größerer Mengen von Antimaterie.

Mond-Landung 1969 ok. Verschwinden des Polar Lander auf dem **Mars** erzeugte keine e^+e^- -Vernichtungsstrahlung. Auch keine solche Strahlung aus unserer **Galaxie**.

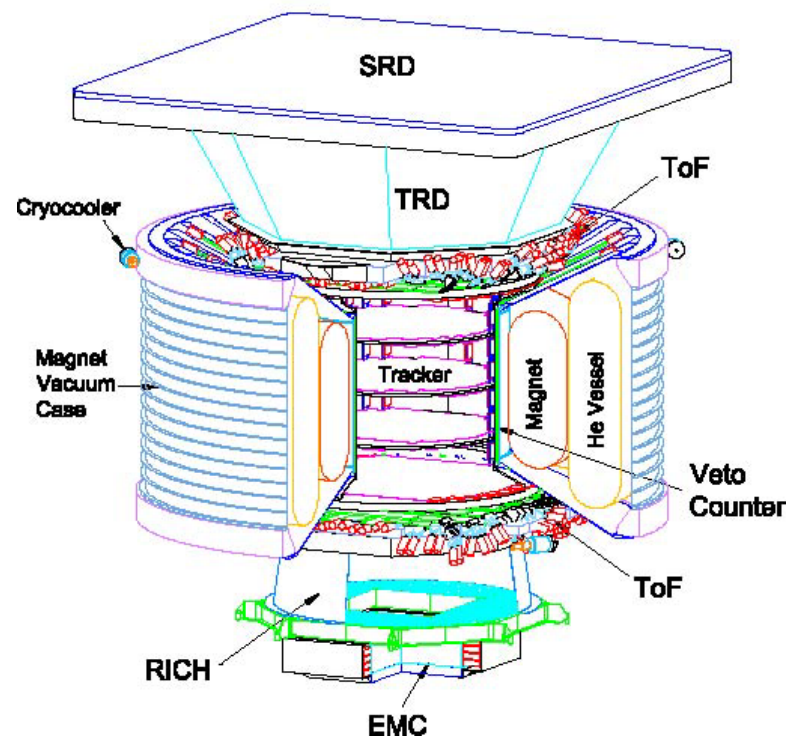
Kein \bar{D} , ${}^3\bar{\text{He}}$, ${}^4\bar{\text{He}}$ im Experiment AMS 1999. Keine Vernichtungsstrahlung an Grenzen zwischen Galaxien und Antigalaxien. Einzige bekannte Antimaterie ist die in Reaktionen kosmischer Strahlung oder an Beschleunigern. Winzige Mengen, und immer nur kurzzeitig.

Kosmologie hat aber starke Hinweise darauf, dass unser Universum in einem Urknall entstanden ist, in heißem und dichten Anfangszustand mit $Q = L = B = 0$. **Widerspruch?**





AMS 02



Zahlreiche Hinweise auf den Urknall:

- **Fluchtbewegung** der Galaxien (Hubble 1929)
- Alter der **Sterne**
- Häufigkeit der chemischen **Elemente**
- Kosmische Mikrowellen-**Hintergrundstrahlung**

Letztere wurde von Penzias und Wilson 1964 entdeckt, sie ist elektrischer Natur wie Licht- und Wärmestrahlung, füllt das gesamte Universum aus, hat Temperatur 2,7 K. Ihr Ursprung ist die Materie-Antimaterie-Vernichtung 10^{-10} sec nach dem Urknall.

Damals: $N(q) : N(\bar{q}) : N(\gamma) = (1+10^{-9}) : 1 : 1$

Heute: $N(q) : N(\bar{q}) : N(\gamma) = 10^{-9} : 0 : 1$

7. Sakharovs Bedingungen

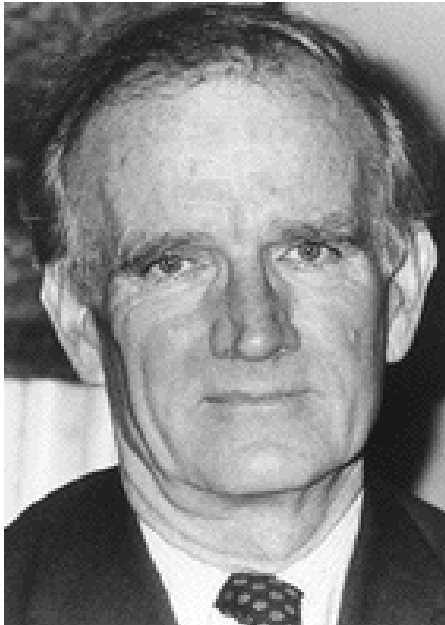
Um 1965 begann enge Zusammenarbeit zwischen Kosmologie und Teilchenphysik. Widerspruch zwischen symmetrischem Urknall und asymmetrischem Universum löst sich nur, Sakharov 1967, mit drei Bedingungen:

- es gibt eine **B-verletzende** Wechselwirkung,
- es gibt eine **CP-verletzende** Wechselwirkung,
- beide sind in der Geschichte des Universums zu einer Zeit **ohne thermisches Gleichgewicht** wirksam.

- (1) Baryonenzahl-(B-)verletzung, z. B. $p \rightarrow \pi^0 e^+$, nie beobachtet.
- (2) CP-Verletzung heißt Teilchen-Antiteilchen-Asymmetrie in Reaktionen, z. B. $\mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \neq \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e$
- (3) Thermisches Ungleichgewicht heißt z. B. so schnelle Abkühlung des Universums, dass Reaktionen in einer Richtung stärker ablaufen als später in der anderen.

- (3) ist erfüllt. Universum expandiert und kühlt sich ab.
- (1) B-Verletzung nicht im Labor gesehen, aber im **Standardmodell** der Teilchenphysik enthalten.
- (2) CP-Verletzung wurde 1964 überraschend von Christenson, Cronin, Fitch und Turlay in Brookhaven gefunden.

8. Entdeckung der CP-Asymmetrie im Labor



Val J.
Fitch
*1923

James W.
Cronin
*1931

Nobelpreis 1980



Entdeckung im Zerfall neutraler K-Mesonen

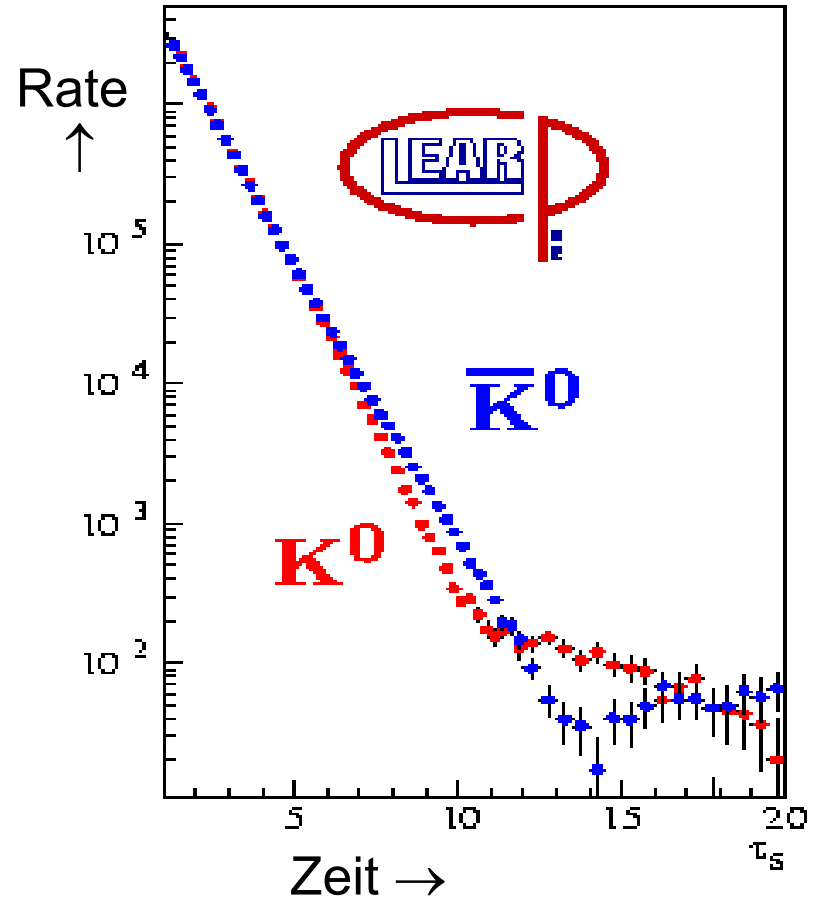
$$K^0 = d \bar{s}, \quad \bar{K}^0 = \bar{d} s$$

$$m \approx 1000 \cdot m(e), \quad \tau \approx 10^{-10} \text{ sec.}$$

Beide zerfallen durch
schwache Wechsel-
wirkung, beide in $\pi^+\pi^-$

$$K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-, \quad \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$$

Aber Zerfallsgesetze
sind verschieden,
hier ein Bild von 1995:



Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie,
CP-Verletzung.

Zerfälle $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ beweisen, dass Natur eine CP-verletzende Ww. besitzt und damit Sakharovs zweite Bedingung erfüllt. Bis 2001 **nur** in K^0 -Zerfällen gesehen.

8. Erklärung im Standardmodell

Die Erweiterungen der Dirac-Gleichung (Weyl 1929, Glashow 1961, Gell-Mann 1964, Higgs 1964, Weinberg/Salam 1968, Fritsch 1973, Kobayashi/Maskawa 1973) **führen zum erfolgreichen Standardmodell der Elementarteilchenphysik.**

Es erklärt **im Prinzip** alle Eigenschaften und Wechselwirkungen elementarer und zusammengesetzter Teilchen.

Es ist so „**gebastelt**“, dass es gerade alle bekannten Teilchen und Ww. enthält. Braucht **18 willkürliche Parameter.**

Für viele Effekte ist es viel zu kompliziert, um konkrete Vorhersagen auszurechnen.

Trotz dieser Nachteile gewaltige Erfolge. Insbesondere: **CP-Verletzung ist im Standardmodell enthalten**, ohne jede Zusatzannahme. Gleicher Mechanismus, der die Massen der Quarks erzeugt (Higgs 1964), schafft auch CP-Verletzung. Aber:

Kosmologie hat Problem damit. Higgs-CP-Verletzung ist etwa 10^{10} zu klein, um beobachtete CP-Asymmetrie des Universums zu erklären. Beobachtet ist

$$n(q) : n(\gamma) = 10^{-9} : 1$$

Standardmodell schafft bestenfalls

$$n(q) : n(\gamma) = 10^{-19} : 1$$

Erklärung ist falsch, oder damals gab es mehr Teilchen oder eine zusätzliche Quelle von CP-Verletzung.

Starke Motivation für Suche nach weiterer CP-Verletzung im Labor. Suche nach CP-Effekten außerhalb des K^0 .

9. Aktuelle Experimente, z. B. „BABAR“

Suchen muss man dort, wo man suchen kann. Und:
Erst mal alle Vorhersagen des Standardmodells absuchen.

Seit etwa 1985 bekannt: **Zerfälle von B-Mesonen** müssten große CP-Asymmetrie zeigen. Wichtige Voraussetzung wurde 1987 im DESY (Hamburg) entdeckt, sog. $B^0\bar{B}^0$ -Oszillationen. Problem: $m(B) = 10 m(K)$ und deshalb nur sehr kleine Produktionsrate an Beschleunigern.

CP-Experimente mit B-Mesonen brauchen neue Beschleuniger oder Speicherringe: „**B-Mesonen-Fabriken**“.

Planung seit 1986. Jetzt, **2001**, 37 Jahre nach Entdeckung der CP-Verletzung in K-Mesonen-Zerfällen, gelang erstmalig der Nachweis in einem zweiten System, in B-Mesonen-Zerfällen durch die Experimente **BABAR** und **BELLE**.


$$B^0 = \bar{b}d \quad \rightarrow \quad \bar{c}c\bar{s}d = J/\psi K^0$$

$$\bar{B}^0 = b\bar{d} \quad \rightarrow \quad c\bar{c}s\bar{d} = J/\psi \bar{K}^0$$

Bei CP-Symmetrie muss für beide Zerfälle das gleiche Zerfallsgesetz gelten.



Suche nach Unterschieden in den beiden sehr ähnlichen Experimenten BABAR und BELLE.

In diesem Vortrag nur BABAR, deutsche Beteiligung aus den Universitäten **Bochum, Dresden und Rostock.**



bmb+f - Förderschwerpunkt

BABAR

Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung

Insgesamt arbeiten seit 1993 etwa 500 Physiker an BABAR, aus USA, CDN, I, F, GB, D, N, RUS, China.

Experiment steht am e⁺e⁻-Speicherring PEP-II im SLAC-Labor der Stanford-Universität in Palo Alto, Kalifornien:



China [1/6]

Inst. of High Energy Physics, Beijing

Deutschland [3/21]

U Rostock

Ruhr U Bochum

Technische U Dresden

Frankreich [5/50]

LAPP, Annecy

LAL Orsay

LPNHE des Universités Paris 6/7

Ecole Polytechnique

CEA, DAPNIA, CE-Saclay

Großbritannien [10/80]

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

Italien [12/89]

INFN Bari

INFN Ferrara

INFN Frascati

INFN Genova

INFN Milano

INFN Napoli

INFN Padova

INFN Pavia

INFN Pisa

INFN Roma

INFN Torino

INFN Trieste

Kanada [4/16]

U of British Columbia

McGill U

U de Montréal

U of Victoria

Norwegen [1/3]

U of Bergen

Russland [1/13]

Budker Inst., Novosibirsk

USA [35/276]

Caltech, Pasadena

UC, Irvine

UC, Los Angeles

UC, San Diego

UC, Santa Barbara

UC, Santa Cruz

U of Cincinnati

U of Colorado

Colorado State

Florida A&M

U of Iowa

Iowa State U

LBLN

LLNL

U of Louisville

U of Maryland

U of Massachusetts

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

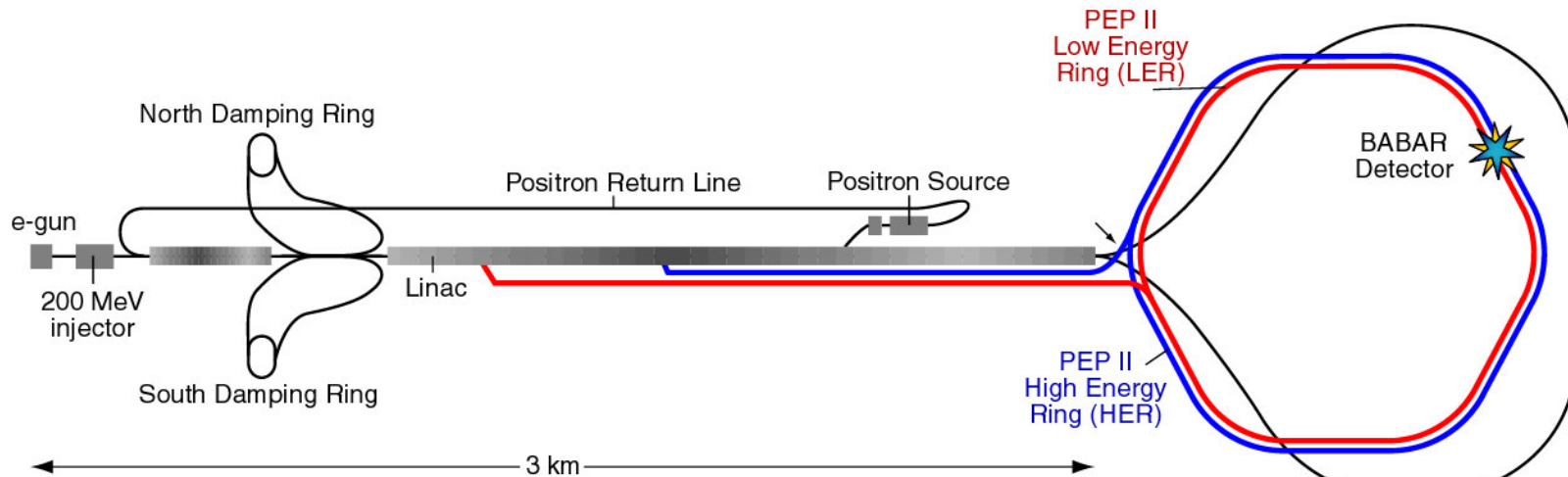
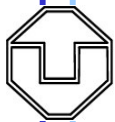
U of Wisconsin

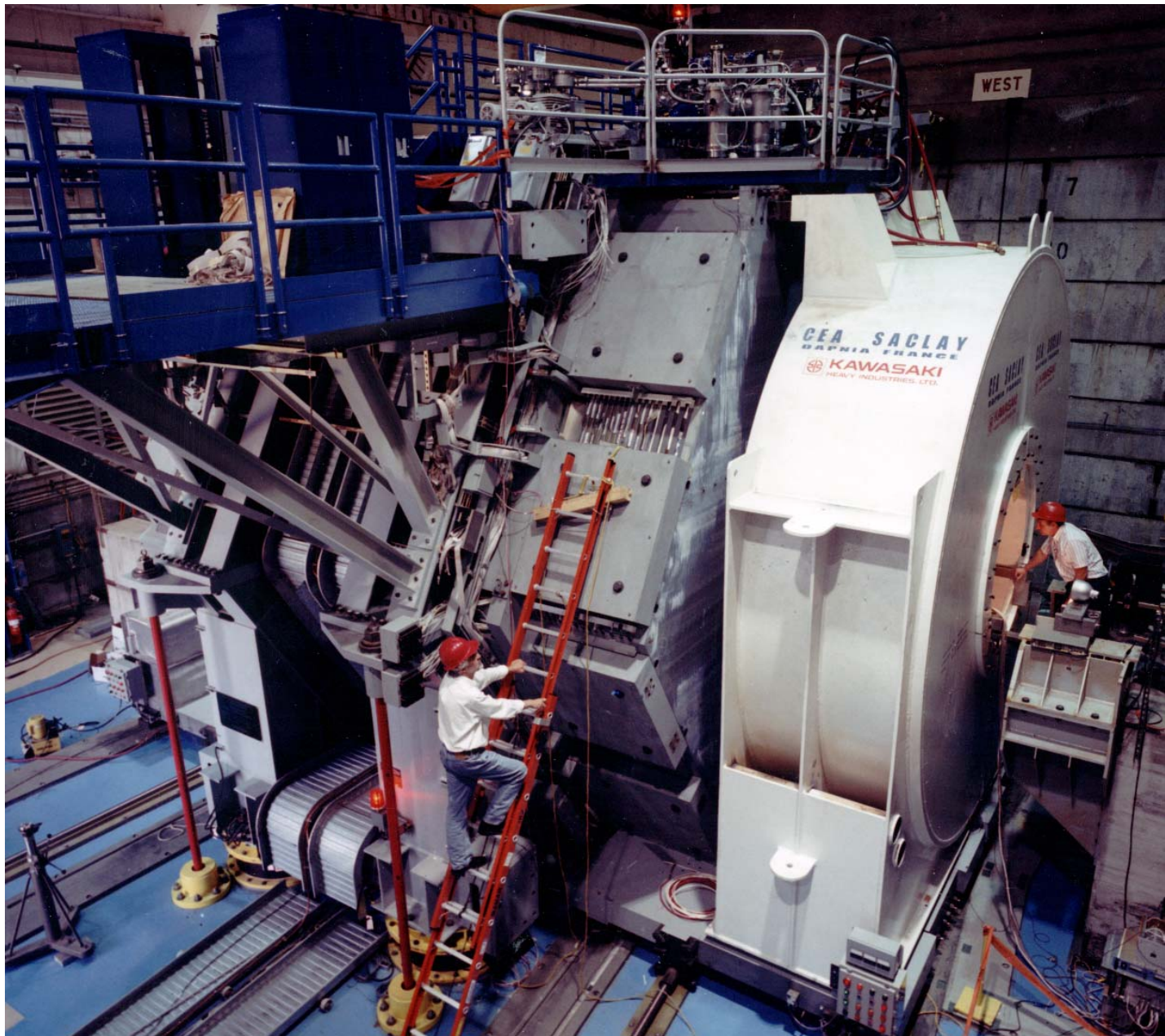
Yale U

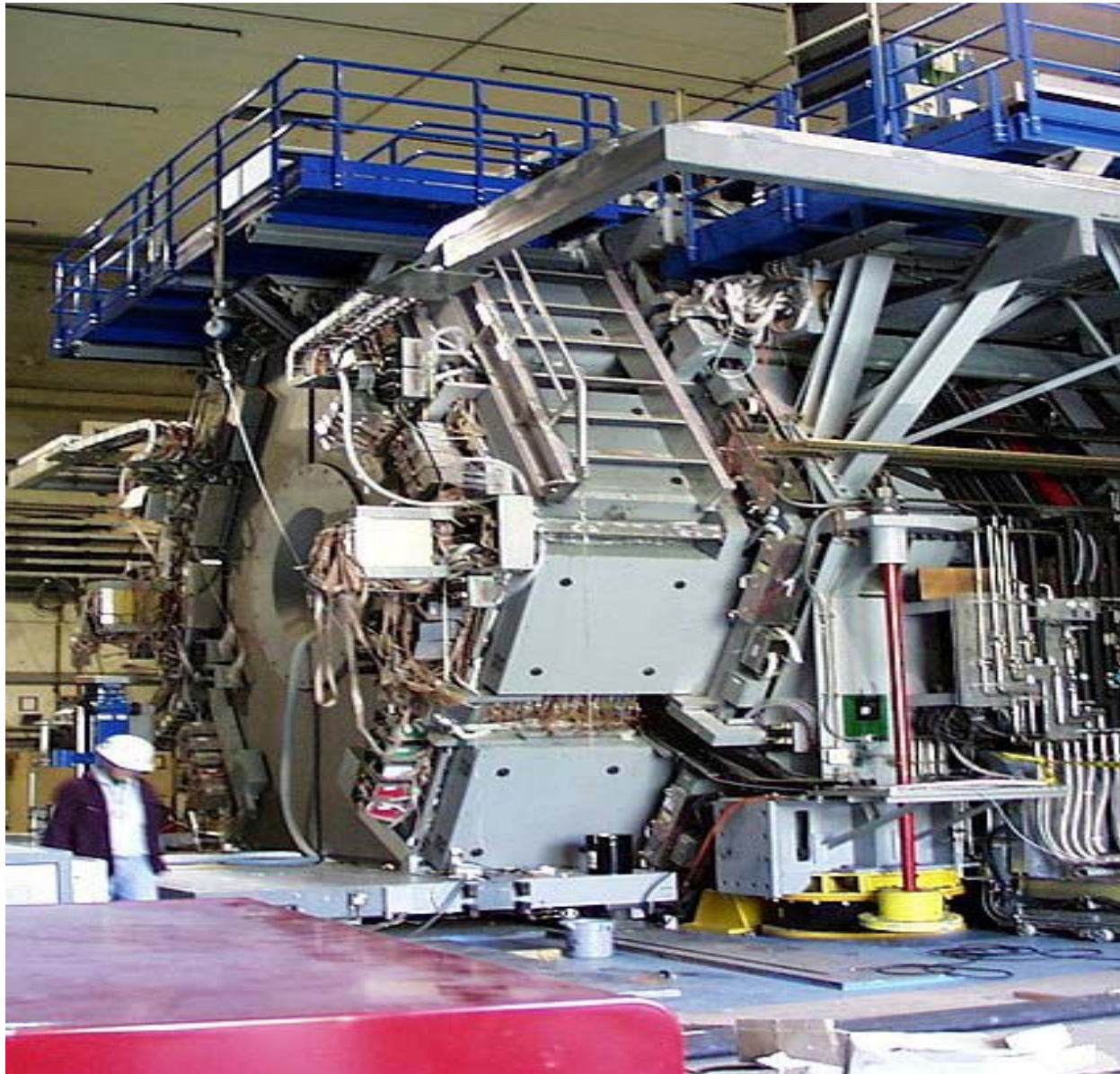


Speicherring PEP-II am SLAC:

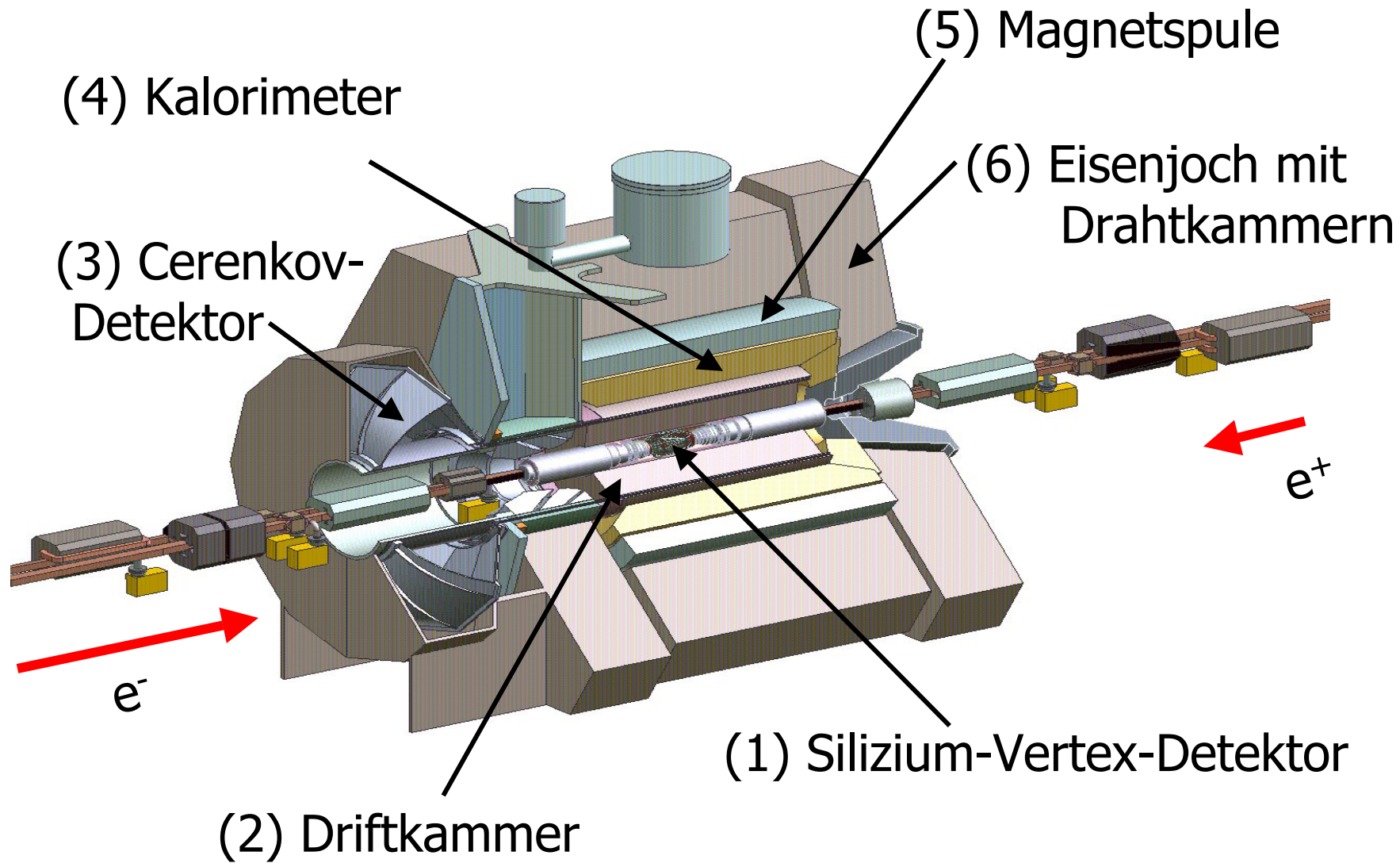








Der BABAR-Detektor:



Dresdner Beiträge zum Kalorimeter

10 % der 6580
CsI(Tl)-Kristalle

Alle Photodioden

Optimierung der
Lichtausbeute

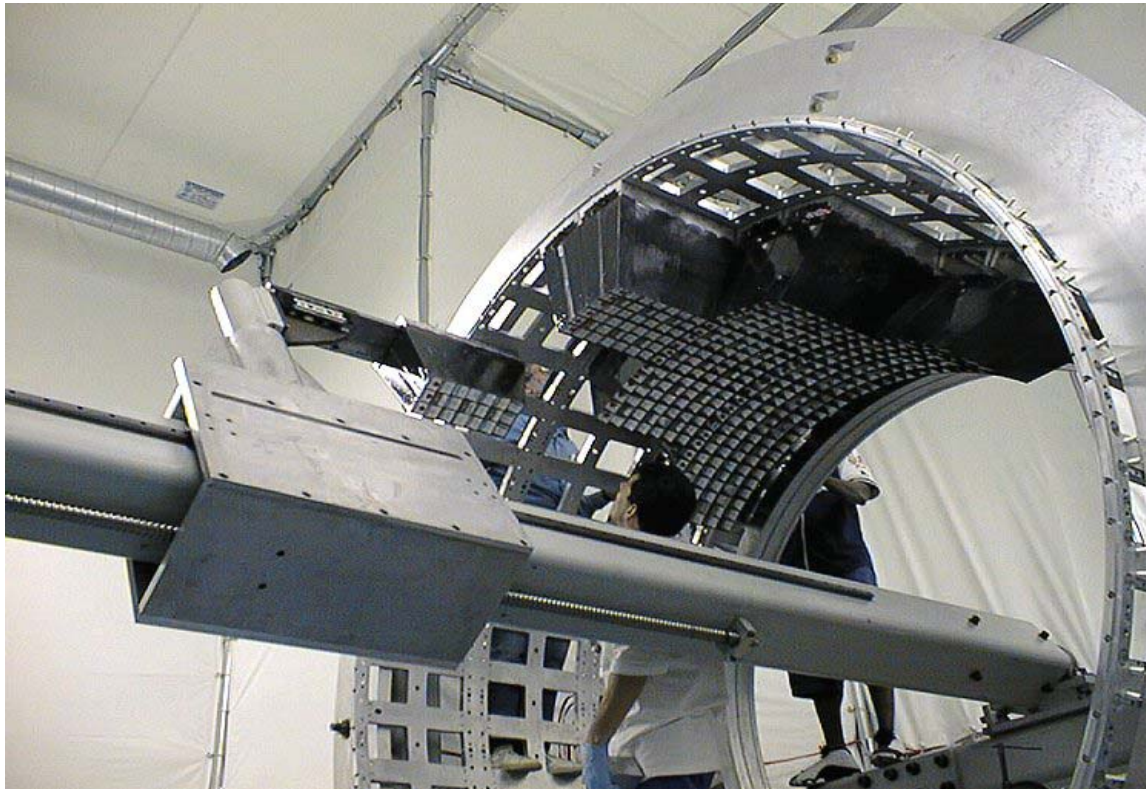
Mechanik der
Auslese-Elektronik

Lichtpulsersystem
zur Monitorierung

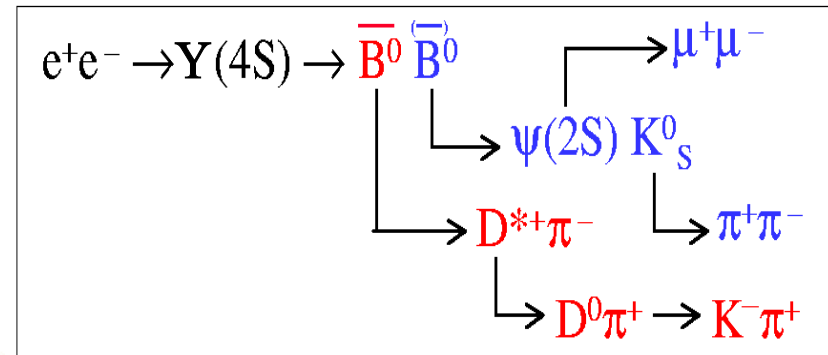
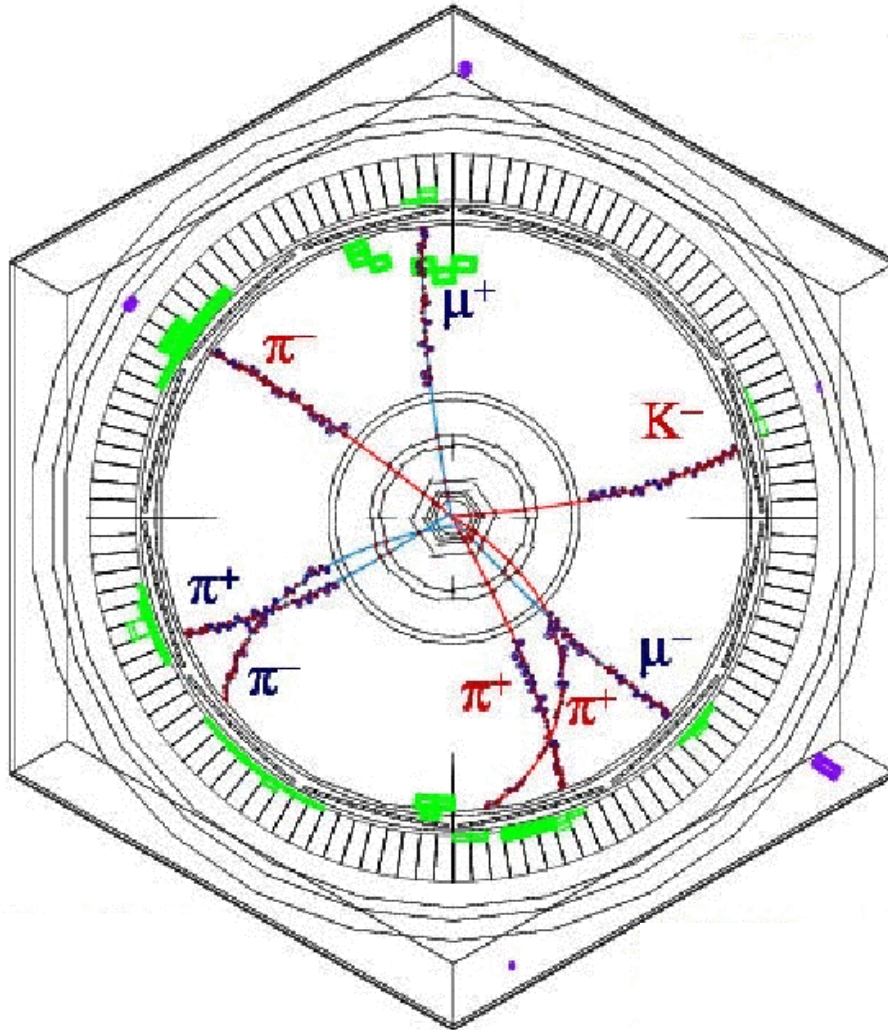
Bhabha-Eichung

π^0 -Eichung

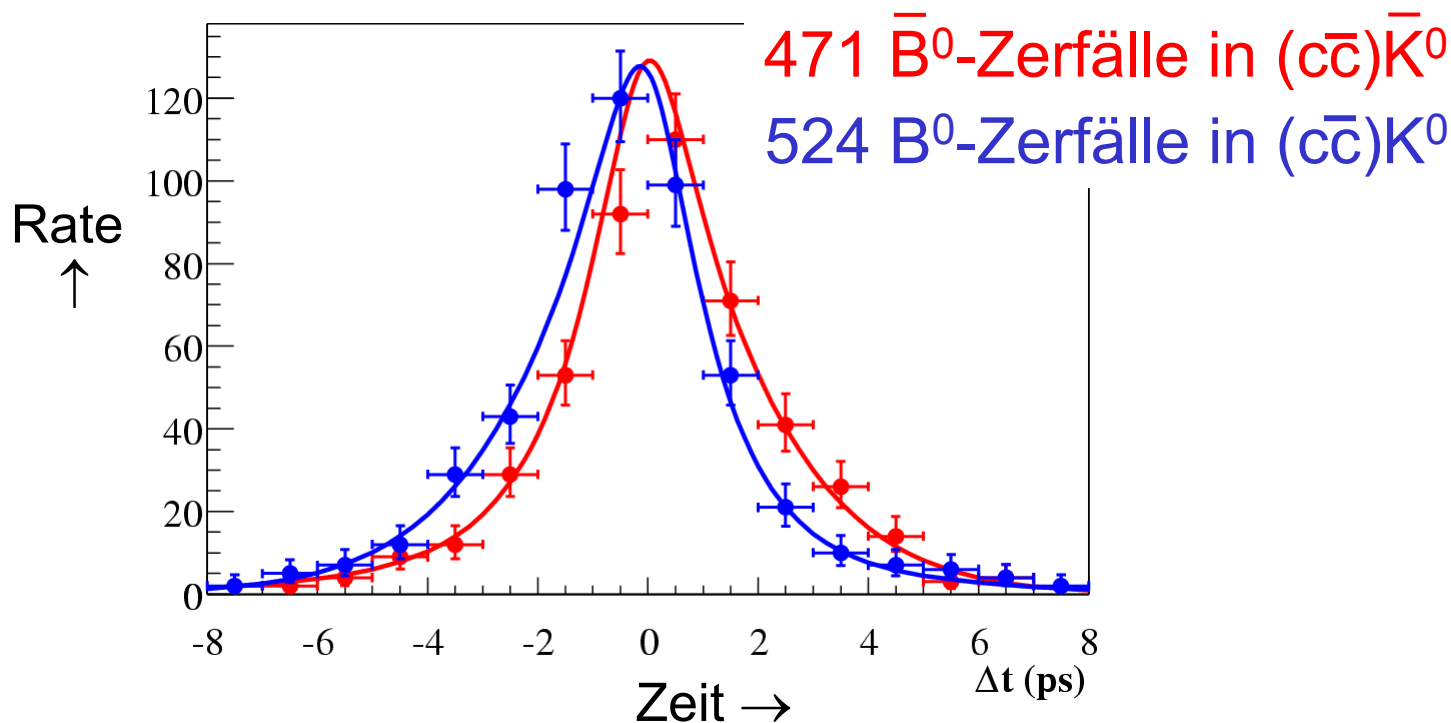
e-Identifizierung



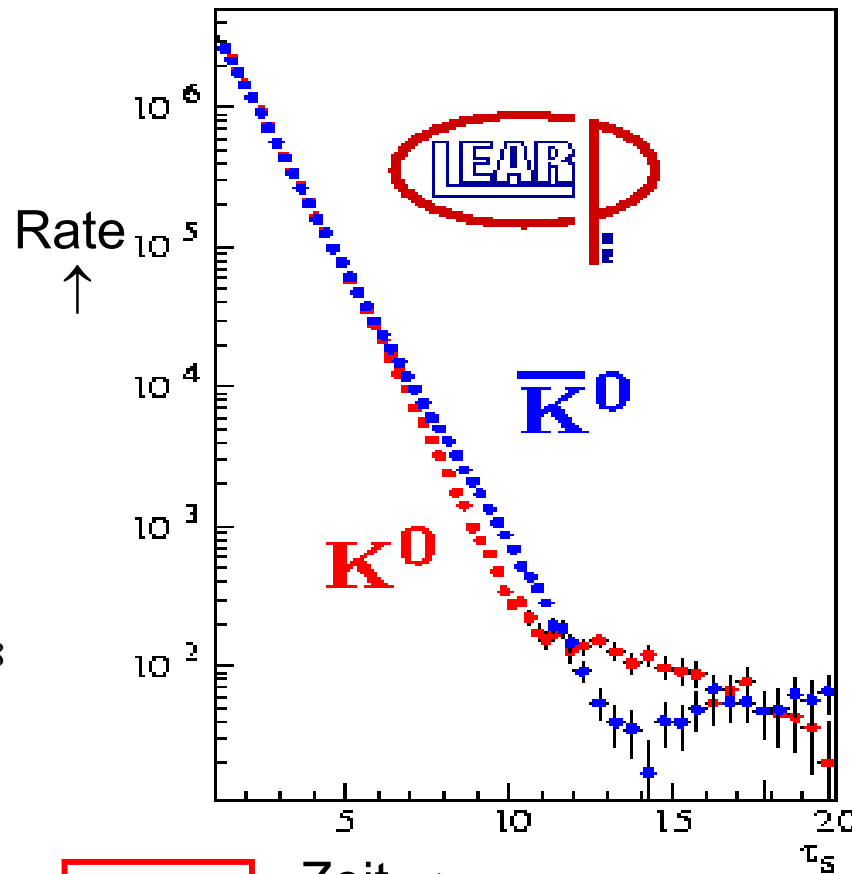
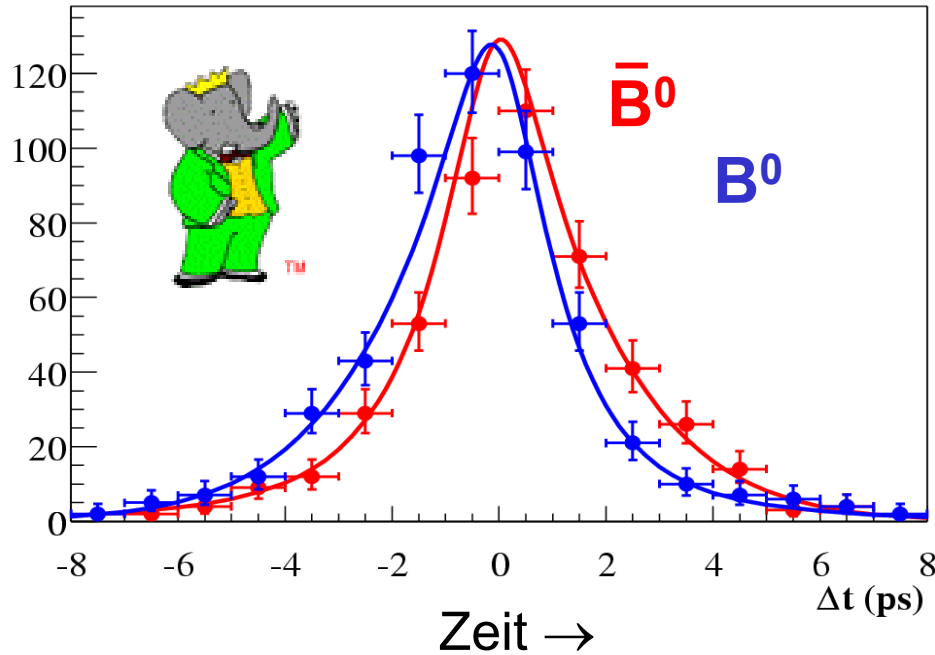
Produktion, Aufnahme und Rekonstruktion von Ereignissen in BABAR, hier ein Beispiel-Ereignis:



Von Oktober 1999 bis November 2001 hat PEP-II etwa 120 Millionen B-Mesonen erzeugt. BABAR hat (fast) alle davon registriert, rekonstruiert und ausgewertet. Darunter befanden sich 995 Zerfälle $B^0, \bar{B}^0 \rightarrow c\bar{c}K$ \Rightarrow



Zeit zwischen Produktion und Zerfall wird als Flugstrecke mit Silizium-Streifen-Detektoren gemessen.



Maß für die beobachtete Asymmetrie:

2001

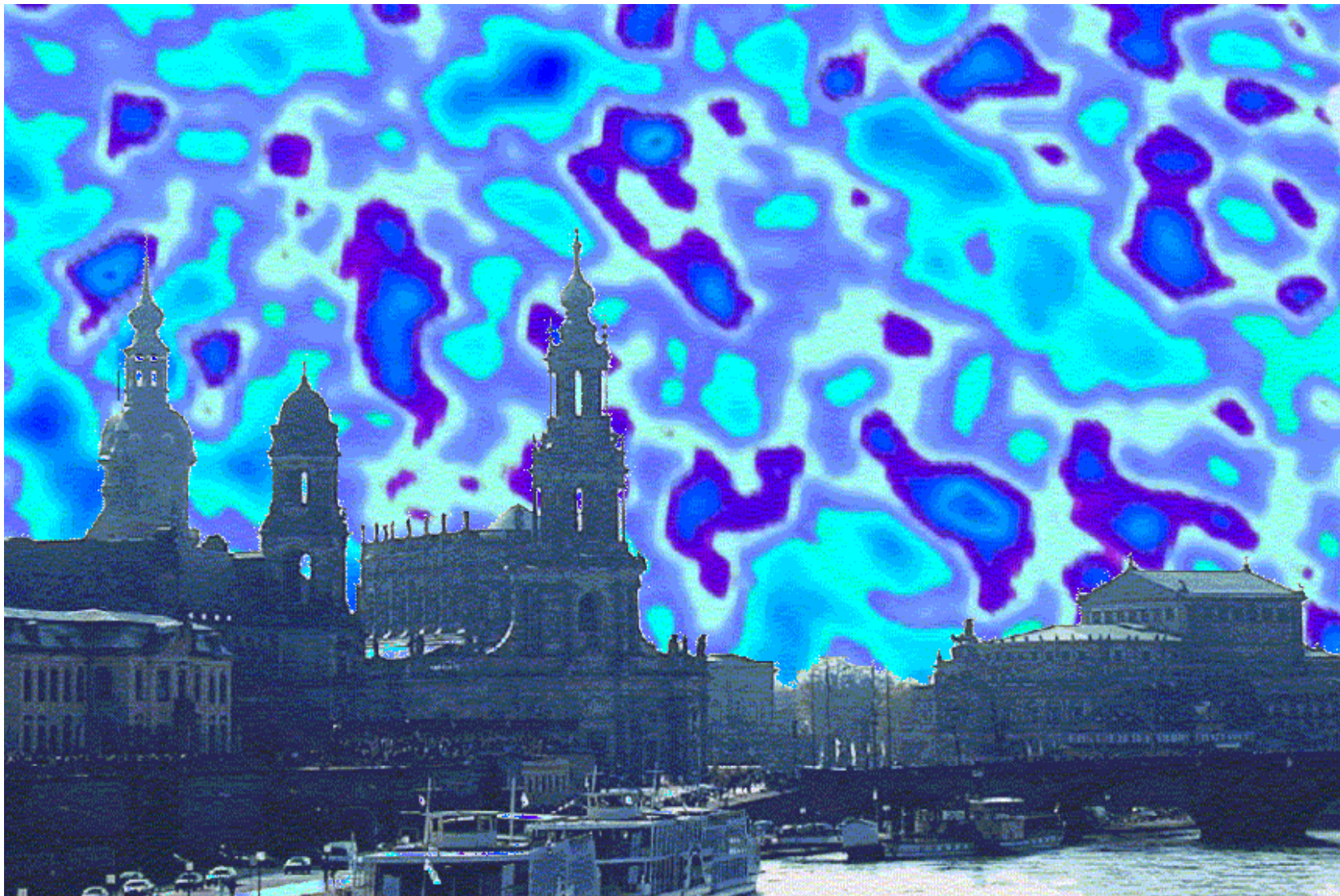
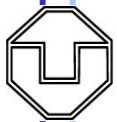
$$\sin(2\beta) = 0.75 \pm 0.09$$

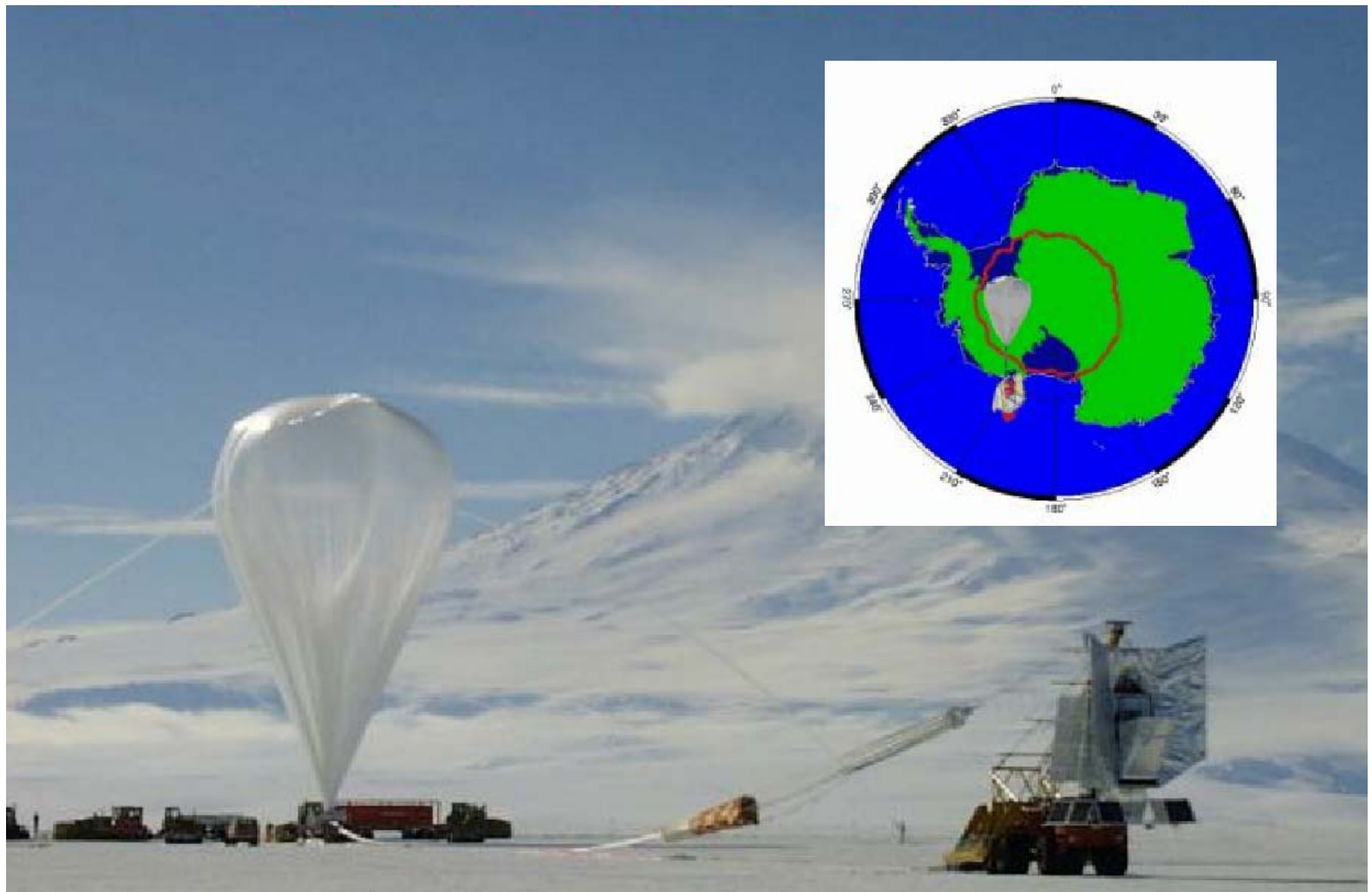
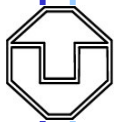
1964

Zeit →

$$\epsilon = 0,0022$$

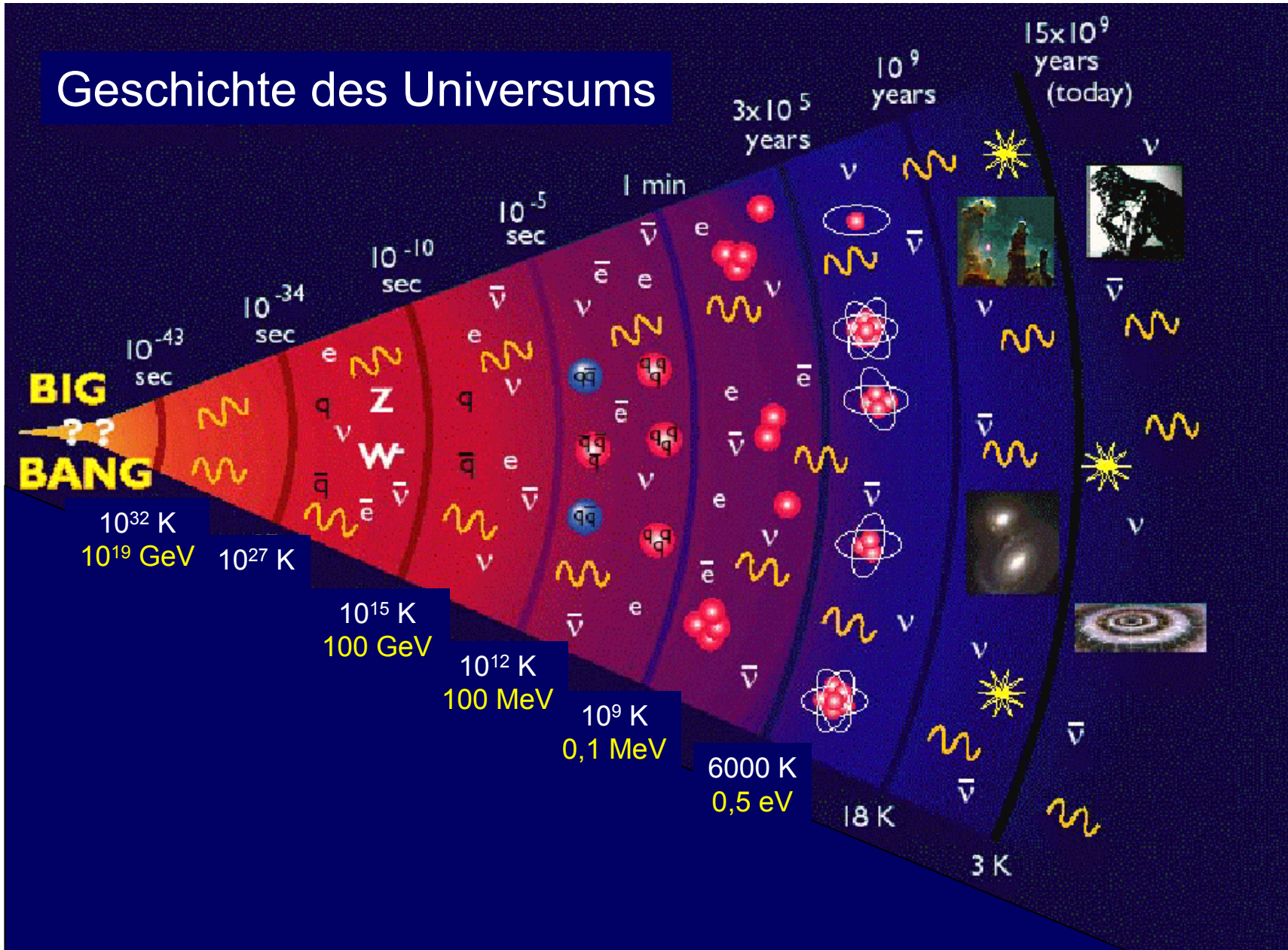
Beide Asymmetrien haben gemeinsame Erklärung im Standardmodell der Teilchenphysik: CP-Asymmetrie der Higgs-Wechselwirkung. Keine „Neue Physik“. Problem!





Ergebnis dieses Experimentes „Boomerang“ stützt in sehr deutlicher Weise das heutige Standardbild der Kosmologie von der Geschichte unseres Universums.

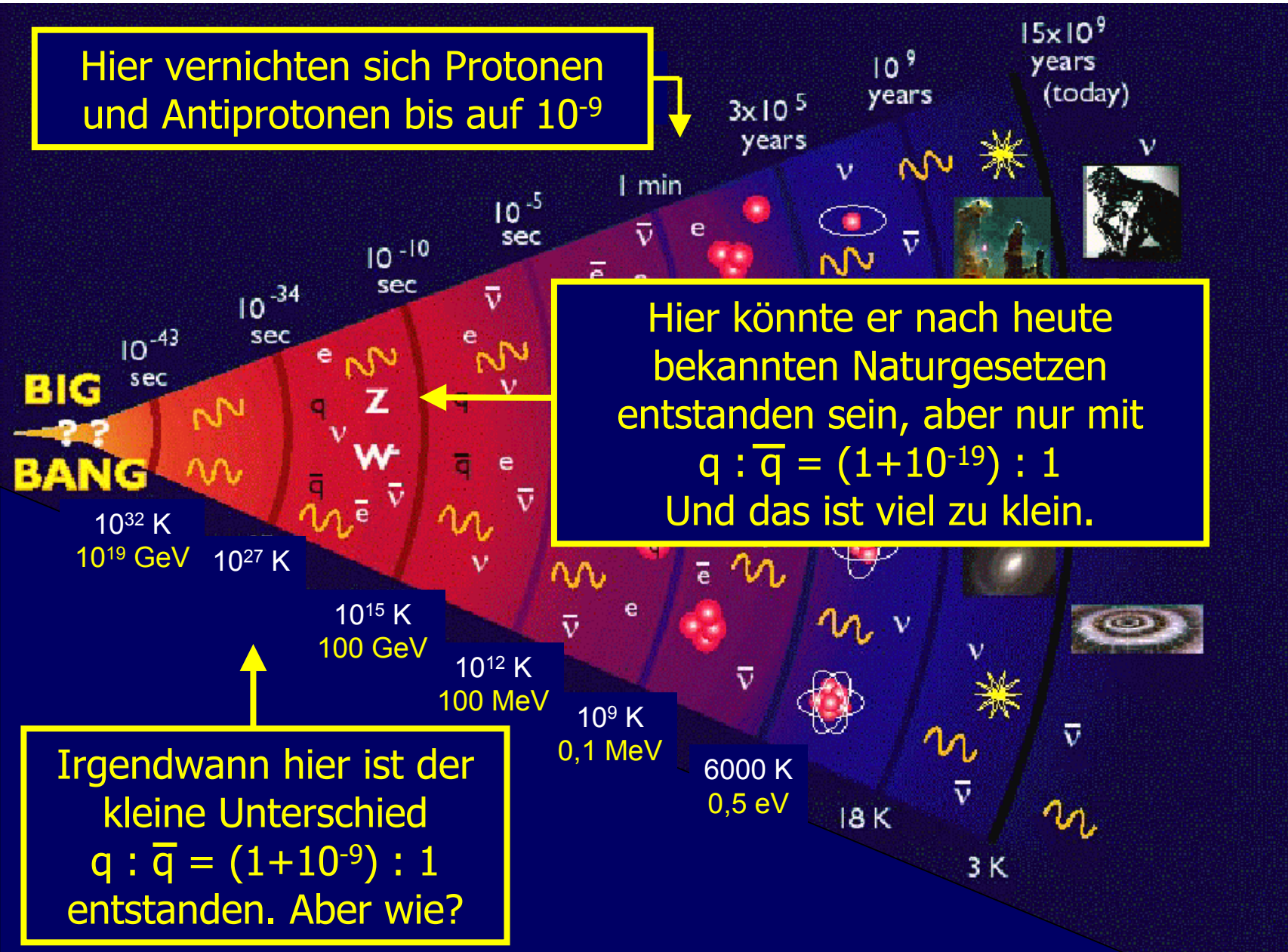
Geschichte des Universums



Hier vernichteten sich Protonen und Antiprotonen bis auf 10^{-9}

Hier könnte er nach heute bekannten Naturgesetzen entstanden sein, aber nur mit $q : \bar{q} = (1+10^{-19}) : 1$
Und das ist viel zu klein.

Irgendwann hier ist der kleine Unterschied $q : \bar{q} = (1+10^{-9}) : 1$ entstanden. Aber wie?



10. Konklusion und Ausblick:

Die 1964 entdeckte Asymmetrie in den Zerfällen $K^0, \bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi$ und die 2001 entdeckte in $B^0, \bar{B}^0 \rightarrow (c\bar{c})K$ haben eine gemeinsame Erklärung: Beide Zerfälle werden durch Schwache Wechselwirkung hervorgerufen, und diese besitzt wegen der Higgs-Wechselwirkung keine CP-Symmetrie.

Diese „verständene“ CP-Verletzung kann nicht die Ursache für die Materie-Antimaterie-Asymmetrie des Universums sein, dafür ist sie viel zu schwach.

Es muss in der Natur eine weitere, uns Physikern noch unbekannt, CP-verletzende Kraft geben.

Diese könnte sich in noch präziseren Messungen der CP-Verletzung in Zerfällen von B-Mesonen zeigen. BABAR und BELLE laufen jetzt 2 Jahre, haben noch ≈ 15 Jahre vor sich.