

# Das Physikprogramm des Elektron-Positron-Speicherrings DAΦNE und des Detektors KLOE in Frascati

W. Kluge, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

## Einleitung

Im Mai 1999 wurde der in den letzten 5 Jahren in den Nationallaboratorien von Frascati bei Rom (Laboratori Nazionali di Frascati LNF) gebaute Beschleuniger DAΦNE [1] eingeweiht. Dieser erlaubt es, Elektronen und ihre Anti-Teilchen (Positronen) in ringförmigen Umlaufbahnen zu speichern und aufeinander zu lenken (Abb. 1). Zugleich wurde ein Großdetektor namens KLOE

[2] in Betrieb genommen (Abb. 2). Mit diesem Detektor wurden in den letzten 2 Jahren erste Daten genommen [4]. Die Energie der Elektronen und Positronen wird so eingestellt, dass ein eigenartiges, sehr kurzlebiges Teilchen mit der Bezeichnung  $\phi(1020)$  angeregt wird. Die so erzeugten Teilchen werden auch als Resonanzen bezeichnet, weil sie wie bei der Anregung von schwingungsfähigen Systemen in Mechanik oder Elektrodynamik als

Eigenschwingungen eines resonierenden Systems beobachtet werden. Die  $\phi$ -Resonanz besteht überwiegend aus einem Paar eines seltsamen (engl. strange) Quarks und seines Anti-Teilchens, eines antistrange Quarks. Quarks und Anti-Quarks sind neben Leptonen und Anti-Leptonen die elementaren Bausteine der Materie. Quarks kommen in verschiedenen Spielarten vor, die sich durch verschiedene Massen und Bindungsstärken bezüglich der schwachen Wechselwirkung unterscheiden. In der Natur werden 4 verschiedene Wechselwirkungen beobachtet: die starke oder nukleare, die elektromagnetische, die schwache und die Gravitation. Die schwache ist u. a. für den Zerfall der Atomkerne und vieler Elementarteilchen verantwortlich. Elektronen, die wegen ihrer elektrischen Ladung auch Nichtphysikern weithin bekannt sind, sind Vertreter der Klasse der Leptonen. „Quantenzahlen“ wie die „Seltsamkeit“ (engl. strangeness), die nur bestimmte („diskrete“) Werte annehmen können, erlauben es, Ordnung und System in die große Vielfalt der Teilchen bzw. Resonanzen zu bringen. Die eingeklammerte Zahl 1020 gibt die Masse  $m$  dieses  $\phi$ -Mesons in Einheiten  $\text{MeV}/c^2$  an ( $1 \text{ Mega-Elektronenvolt} = 10^6 \text{ eV}$ , nach Einstein ist  $m = E / c^2$ , wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist). Man muss Elektronen und Positronen von je  $510 \text{ MeV}$  mit entgegengesetzter Richtung aufeinander treffen lassen, um diese Mesonen resonanzartig in großer Zahl erzeugen zu können. Genau dies geschieht bei DAΦNE. Bei DAΦNE geht es also nicht um Rekorde in

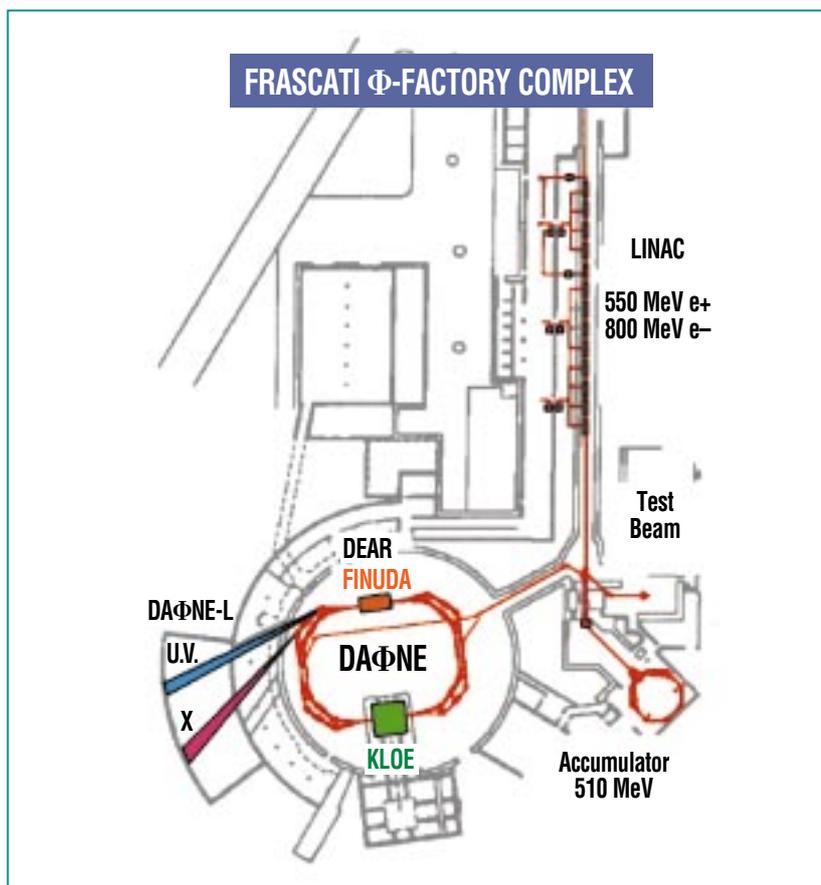
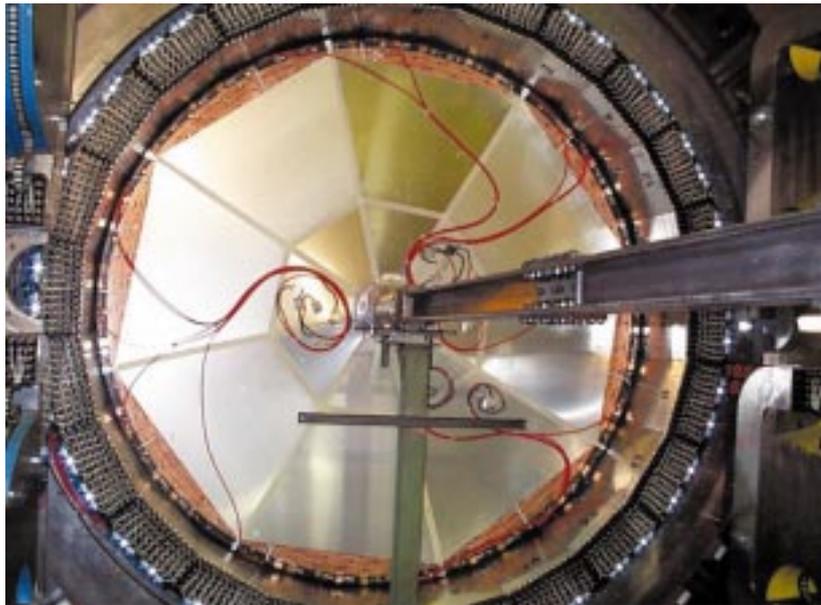


Abb. 1: Der Beschleuniger DAΦNE. Elektronen und Positronen werden in einem Linearbeschleuniger (LINAC) auf die gewünschten Energien gebracht und dann in einem Akkumulator gespeichert. DAΦNE besteht aus zwei Ringen, in denen getrennt Elektronen und Positronen gegenläufig umlaufen, um an zwei Orten, an denen die Nachweisgeräte KLOE und FINUDA stehen, aufeinander zu treffen.



**Abb. 2:** Der Detektor KLOE. Im Zentrum ist das kreisrunde Strahlrohr zu erkennen. Der innere Zylinder (heller Farbton) zeigt die Driftkammer von etwa 4 m Durchmesser. Mit einer Länge von 3.5 m ist sie die weltgrößte ihrer Art. Um diese herum befindet sich das Kalorimeter zum Nachweis von Photonen (24 dunkle Trapeze).



**Abb. 3:** Die zylindrische Driftkammer von KLOE. Im noch geöffneten Zustand der Kammer erkennt man charakteristische Lichtreflexionen an den etwa 50000 Drähten, die zwischen dem Boden und dem Deckel des liegenden Zylinders gespannt wurden, um die Bahnen geladener Teilchen elektronisch verfolgen zu können.

der Erreichung immer höherer Beschleunigerenergien, sondern um angestrebte Rekorde in der Erzeugung hoher Strahlintensitäten der Elektronen und Positronen und damit hoher Stoßraten. Hohe Stoßraten bedeuten hohe Empfindlichkeit bezüglich immer kleinerer nachzuweisender Effekte. Wegen der hohen angestrebten Intensitäten spricht man auch gerne von einer „ $\Phi$ -Fabrik“ und drückt das durch den großen griechischen Buchstaben  $\Phi$  in der Bezeichnung der Beschleunigeranlage DA $\Phi$ NE aus.

Der Detektor KLOE erlaubt den Nachweis geladener Teilchen im Impulsbereich von etwa 50 bis 250 MeV/c und den von Photonen (Lichtquanten) oberhalb einer Energieschwelle von 20 MeV. Der zylindersymmetrische Aufbau befindet sich in einem Magnetfeld von 0.6 T (1 T = 1 Tesla = 10 kGauß) dar. Der Impuls geladener Teilchen wird mit einer Vieldrahtkammer (einer sogenannten Driftkammer von 3.5 m Länge und 2 m Radius, s. Abb. 3) bestimmt, die mit einem Gasgemisch aus Helium und Isobutan gefüllt wird und in der etwa 50000 Drähte zur Erzeugung elektrischer Felder und zum Nachweis der Teilchen gespannt sind. Energie und Flugzeit von Photonen werden in einem massiven Detektor aus Bleilagern mit eingebetteten szintillierenden (d.h. lichterzeugenden) Fasern gemessen. Die hochenergetischen Photonen wechselwirken vor allem mit dem Blei in einer Weise, dass Elektron-Positron-Paare entstehen, die ihre Energie durch Abbremsen verlieren und dabei in den Szintillationsfasern sichtbares

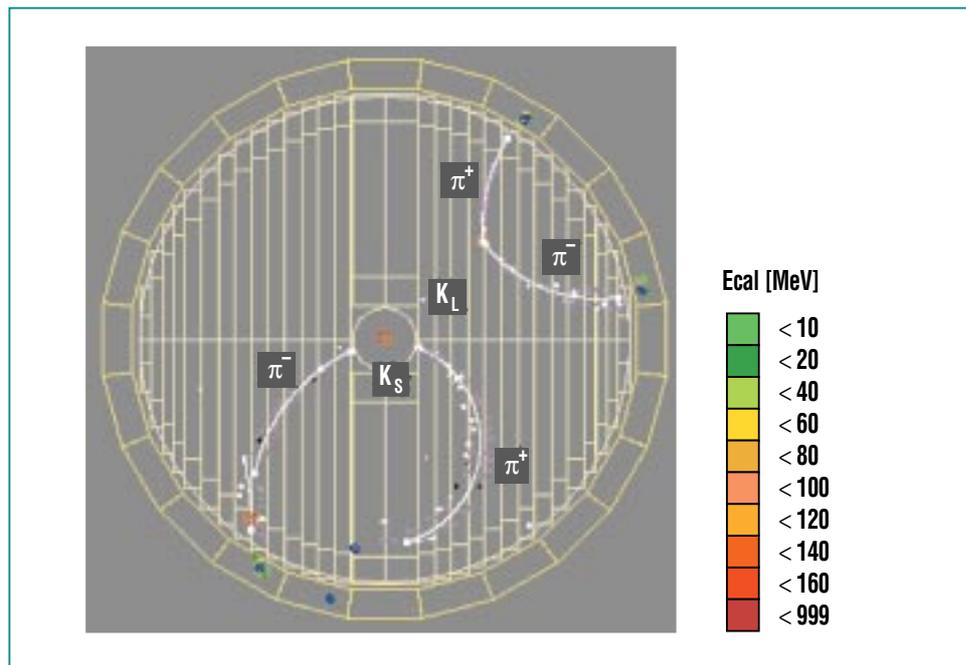
und UV Licht erzeugen. Dieses Licht wird mit Photovervielfachern registriert. Eines der ersten Ereignisse, die mit KLOE aufgenommen wurden, zeigt Abb. 4.

Die bei der vorgesehenen Strahlintensität später einmal anfallenden Datenraten von etwa 50 Mbytes/sec (d. h., dass 1 kommerzielle PC Festplatte in etwa 500 sec gefüllt wäre) oder etwa 500 Tbytes/Jahr (1 Terabyte sind  $10^{12}$  Bytes) warfen anfänglich komplexe Fragen der Datennahme, des Datentransfers, der Datenspeicherung und der Datenanalyse auf, die allerdings mit der inzwischen erheblich fortgeschrittenen Computer-Technologie gelöst werden können.

Aus der Fülle der Untersuchungen mit DAΦNE-KLOE werden in diesem Beitrag diejenigen beschrieben, an denen Karlsruher Physiker besonders interessiert sind. Sie betreffen Messungen zur Gültigkeit bzw. Verletzung von Symmetrien in der Natur und Beiträge zu dem weiten Feld der Präzisionstests des Standardmodells der Teilchenphysik.

### Symmetrien in der Natur [5, 6]

Symmetrien spielen eine fundamentale Rolle in der Naturbeschreibung, weil sie nach einem Theorem der deutschen Physikerin und Mathematikerin Emmy Noether auf Erhaltungsgrößen führen. So ist etwa die Erhaltung von Energie und Impuls eine Konsequenz der Homogenität von Raum und Zeit. Es soll demzufolge keine Rolle spielen, wo und wann sich ein physikalischer



**Abb. 4:** Eines der ersten Ereignisse, das mit KLOE aufgenommen wurde. Es zeigt 4 Spuren geladener Teilchen (Pionen, mit dem griech. Buchstaben  $\pi$  bezeichnet), die aus folgender Ereigniskette stammen:



**Elektronen und Positronen regen ein  $\phi(1020)$ -Meson an, das unsichtbar bleibt und in ein kurzlebiges ( $K_S$ ) und ein langlebiges ( $K_L$ ) neutrales Kaon zerfällt. Das kurzlebige Kaon zerfällt praktisch im Zentrum dieses Bildes in zwei geladene Pionen, während das langlebige (neutrale) Kaon zunächst unsichtbar bleibt, um dann aber im rechten oberen Quadranten ebenfalls in zwei geladene Pionen zu zerfallen. Dieser Zerfall verletzt die  $CP$  Invarianz (s. Text).**

Prozess abspielt. Die Isotropie des Raumes (d. h. die Unabhängigkeit eines Prozesses von der Richtung) bedingt dagegen die Erhaltung des Drehimpulses. Symmetrieeigenschaften der quantenmechanischen Wellenfunktion haben die Erhaltung der elektrischen Ladung zur Folge. Neben diesen Symmetrien mit kontinuierlichen Variablen gibt es diskrete Symmetrien, die das Verhalten natürlicher Abläufe bei deren Spiegelung, bei Umkehrung des Ladungsvorzeichens

(„Ladungskonjugation“) und bei Umkehr der Zeitrichtung betreffen.

$\phi$ -Mesonen zerfallen nahezu ausschließlich in Paare von geladenen und ungeladenen (neutralen) K-Mesonen: in  $K^+$  und  $K^-$  Paare oder  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  Paare. Die hochgestellten Symbole +, – und 0 geben die Ladung der Teilchen an (positiv, negativ, ungeladen = neutral), während der Querstrich über dem  $K^0$  anzeigt, dass das Anti-Teilchen des  $K^0$  gemeint ist.

$K^0$  tragen die Quantenzahl Strangeness  $S = 1$ ,  $\bar{K}^0$  dagegen  $S = -1$ . Die große Zerfallswahrscheinlichkeit lässt darauf schließen, dass  $\phi$ -Mesonen Paare von strange und antistrange Quarks enthalten. So enthält etwa das  $K^0$  ein antistrange Quark und sein Anti-Teilchen  $\bar{K}^0$  ein strange Quark. Kaonen gaben in der Geschichte der Teilchenphysik immer wieder Anlass zu geradezu revolutionierenden Einsichten. Der Zerfall der geladenen Kaonen in 2 und 3 Pionen regte T. D. Lee und C. N. Yang im Jahre 1956 (Nobelpreis für Physik 1957) zu der Vermutung an, dass das Spiegelbild mancher physikalischen Prozesse nicht existieren könnte, links und rechts demzufolge keine Konvention darstellen, sondern unterscheidbar wären. Diese Vermutung wurde umgehend glänzend experimentell bestätigt. Damit war die Verletzung der Spiegelungssymmetrie in der schwachen Wechselwirkung nachgewiesen. In der Sprache der Mathematik wird der Vorgang der Spiegelung durch einen Operator  $P$  beschrieben. Zugleich wurde klar, dass auch die Operation Ladungskonjugation  $C$ , die Teilchen in Anti-Teilchen überführt und umgekehrt, in der schwachen Wechselwirkung verletzt ist. Diese Tatsache lässt sich am besten mit Eigenschaften der Neutrinos (das sind Teilchen mit ausschließlich schwacher Wechselwirkung) beschreiben. Impuls (Bewegungsrichtung) und Eigendrehimpuls (Spin) der Neutrinos sind offenbar entgegengesetzt gerichtet und zeichnen damit einen Schraubensinn aus. Man spricht in diesem Falle auch von einer Linksschraube oder von „links-

händigen“ Teilchen, weil sich das Verhalten mit der linken Hand veranschaulichen lässt. Ihre Anti-Teilchen hingegen, die Anti-Neutrinos, werden nur als Rechtsschraube oder „rechtshändige“ Teilchen in der Natur beobachtet. Linkshändige Anti-Neutrinos und rechtshändige Neutrinos scheinen nicht zu existieren. Nach dem Sturz der Spiegelungsinvarianz wurde angenommen, dass wenigstens die kombinierte Operation  $CP$  d. h. die nacheinander ausgeführten Operationen Spiegelung und Ladungskonjugation, eine Symmetrieeigenschaft der schwachen Wechselwirkung seien, da dadurch linkshändige Neutrinos in rechtshändige Anti-Neutrinos übergeführt werden, die beide in der Natur realisiert sind. Wieder waren die Kaonen, diesmal die neutralen, gut für eine Überraschung, als J. W. Cronin und V. L. Fitch im Jahre 1964 (Nobelpreis für Physik 1980) zeigen konnten, dass auch die  $CP$ -Invarianz verletzt ist. Erst heute, mehr als 35 Jahre nach der Entdeckung der Verletzung der  $CP$ -Invarianz, sieht es so aus, als seien Forscher am Fermilab in Batavia bei Chicago und am SLAC in Stanford / Kalifornien einem weiteren Beispiel einer  $CP$ -Verletzung auf der Spur. Im Zerfall der schweren B-Mesonen werden große  $CP$ -verletzende Effekte erwartet, wofür an neuen Beschleunigern bzw. mit neuen Detektoren in Stanford, Tsukuba/Japan, am DESY, CERN und am Fermilaboratorium in Batavia/Chicago Untersuchungen aufgenommen wurden bzw. in den nächsten Jahren begonnen werden.

Die neutralen Kaonen  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  sind ein besonders schönes Beispiel für das Walten der Gesetzmäßigkeiten der Quantenphysik. Sie können sich ineinander umwandeln, die Kaonen in Anti-Kaonen und umgekehrt, weil die schwache Wechselwirkung die Erhaltung der Quantenzahl strangeness nicht respektiert. Sie existieren in zwei Varianten, zwischen denen Oszillationen stattfinden. Ein klassisches Analogon stellen zwei identische Pendel mit einer Federkopplung dar. Lenkt man eines der Pendel aus, so überträgt es nach und nach seine Energie auf den Nachbarn, bis es selbst zur Ruhe kommt und jener schließlich mit der ursprünglichen Auslenkung des ersten Pendels schwingt. Der Prozess würde sich ohne Dämpfung zeitlich unbegrenzt wiederholen, so wie die neutralen Kaonen unbegrenzt zwischen den beiden Zuständen hin und hin schwingen würden, wenn sie nicht zwischenzeitlich zerfielen, wofür die schwache Wechselwirkung verantwortlich ist. Die schwache Wechselwirkung erlaubt insbesondere, dass sich die Kaonen  $K^0$  und Anti-Kaonen  $\bar{K}^0$  zu neuen Teilchen  $K_L$  und  $K_S$  zusammenfinden, die mit verschiedenen mittleren Lebensdauern zerfallen. Die Indizes L und S stehen für lang- und kurzlebig (S steht für engl. short). Langlebig heißt hier etwa 50 Nanosekunden ( $1 \text{ ns}$  ist  $10^{-9} \text{ s}$ , eine milliardstel Sekunde) und kurzlebig bedeutet  $0.1 \text{ ns}$ . Der erhebliche Unterschied in den Zerfallszeiten (ein Faktor von mehr als 500) erlaubt es, Zerfälle der langlebigen Kaonen isoliert zu untersuchen, weil die kurzlebigen Kaonen rasch durch Zerfall „aussterben“. Erhal-

tung der  $CP$ -Symmetrie würde bedeuten, dass die langlebigen neutralen Kaonen  $K_L$  ausschließlich in 3 und die kurzlebigen  $K_S$  in 2 Pionen zerfallen sollten. Cronin und Fitch fanden völlig unerwartet, dass auch die langlebigen Kaonen in 2 Pionen zerfallen. Damit war die Verletzung der  $CP$ -Symmetrie nachgewiesen. Eine Erklärung für diese Erscheinung ist, dass dem Zustand der langlebigen Kaonen eine Komponente der kurzlebigen Kaonen mit einem relativ kleinen Faktor  $\varepsilon$  von etwa  $10^{-3}$  beigemischt ist. Die Mischung von lang- und kurzlebigen Kaonen mit verschiedenen Werten für  $CP$  führt dazu, dass die Wahrscheinlichkeit für die Oszillation von  $K^0$  in  $\bar{K}^0$  verschieden ist von der von  $\bar{K}^0$  in  $K^0$ . Chemiker würden sagen, dass die Wahrscheinlichkeit der Hinreaktion verschieden von der der Rückreaktion ist. Das ist aber eine Verletzung der Invarianz der Bewegungsrichtung bzw. der Invarianz gegenüber Zeitumkehr  $\mathcal{T}$  im Bereich elementarer Wechselwirkungen. Es scheint so etwas wie eine ausgezeichnete Richtung der Zeit zu geben, einen „Zeitpfeil“. Ohne in weitere Details zu gehen, soll noch bemerkt werden, dass im Falle der  $CP$ -Verletzung nicht nur eine absolute Unterscheidung von links und rechts möglich ist durch die Verletzung der Spiegelungssymmetrie, sondern auch eine absolute Unterscheidung des Vorzeichens der elektrischen Ladung, die unabhängig ist von jeder Konvention. Damit ließe sich einem außerirdischen Beobachter mitteilen, welche Art von Ladung wir als positiv oder negativ bezeichnen.

Die Gültigkeit der Invarianz der dreifachen Operation  $CPT$  sollte nun aber nach allem, was den Physikern „heilig“ ist, eine unumstößliche Basis der Naturbeschreibung sein. Sie beruht auf der Gültigkeit der Einsteinschen speziellen Relativitätstheorie (Lorentz-Invarianz), der Gültigkeit der Kausalität (die Ursache muss immer der Wirkung vorangehen) und auf punktförmigen Wechselwirkungen. Verletzung der  $CP$ -Invarianz ist dann gleichbedeutend mit Verletzung der Zeitumkehr-Invarianz  $\mathcal{T}$ , wenn nicht unsere Prinzipien, auf denen dieses „ $CPT$ -Theorem“ beruht, fragwürdig werden sollen. Dennoch stehen neuartige Tests der  $CPT$ -Invarianz auf der Tagesordnung von DAΦNE-KLOE, da sich durchaus Szenarien denken lassen, in denen Lorentz-Invarianz und die Gültigkeit lokaler Feldtheorien in Frage zu stellen sind.

Auch die Frage nach dem bisher völlig unbekanntem Ursprung der  $CP$ -Verletzung ist von Bedeutung. Ist die Verletzung der  $CP$ -Invarianz etwa ausschließlich in der Struktur der schwachen Wechselwirkung begründet? Eine erste Antwort kann gegeben werden, wenn der Nachweis gelingt, dass langlebige Kaonen auch „direkt“ in 2 Pionen zerfallen können, wobei letztere einen entgegengesetzten  $CP$ -Wert haben wie langlebige Kaonen. In diesem Falle würde keine Beimischung von kurzlebigen Kaonen zu den langlebigen benötigt. Diese „direkte“  $CP$ -Verletzung wird durch einen weiteren außerordentlich kleinen Parameter  $\varepsilon'$  beschrieben, der höchstens etwa 1/1000 des

schon kleinen Wertes von  $\varepsilon$  betragen sollte.

Messungen zum Nachweis einer „direkten“  $CP$ -Verletzung waren zunächst widersprüchlich. 1993 wurde von einer Gruppe am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf (in einem Experiment mit der Bezeichnung NA31) für den Realteil  $\Re$  der komplexen Größe  $\varepsilon' / \varepsilon$  ein Wert von  $(2.3 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$  gemessen, während in einem Konkurrenzexperiment des Fermilabs (Experiment E731) der wesentlich niedrigere Wert  $\Re \varepsilon' / \varepsilon = (0.74 \pm 0.60) 10^{-3}$  gefunden wurde. Im Jahre 1999 hat die Gruppe am Fermilab mit einer verbesserten Anordnung unter dem neuen Namen KTeV und verbesserter statistischer Signifikanz einen Wert von  $\Re \varepsilon' / \varepsilon = (2.8 \pm 0.41) 10^{-3}$  bekanntgegeben, der im wesentlichen das frühere Ergebnis der CERN-Gruppe bestätigt. Inzwischen hat auch das ebenfalls verbesserte Nachfolgeexperiment NA48 am CERN neue Messungen veröffentlicht, die den nunmehr kleineren Wert  $\Re \varepsilon' / \varepsilon = (1.22 \pm 0.49) 10^{-3}$  ergaben. Dieses gewisse Auf und Ab der Messwerte zeugt von der außerordentlichen Schwierigkeit dieser Messungen, so dass eine unabhängige Messung mit ganz anderen systematischen Fehlern dringend erforderlich ist. DAΦNE-KLOE kann genau diese Aufgabe erfüllen und damit zur Klärung der wichtigen Frage beitragen, ob die  $CP$ -Verletzung im System der neutralen Kaonen im Rahmen der bekannten schwachen Wechselwirkung und damit des Stan-

dardmodells der Teilchenphysik beschrieben werden kann.

Die Frage nach dem Ursprung der  $CP$ -Verletzung hat nicht nur wegen der grundsätzlichen Bedeutung von Symmetrien bzw. deren Verletzung und ihres Zusammenhangs mit Erhaltungsgrößen großes Interesse auf sich gezogen, sondern auch deshalb, weil es gute Gründe für die Annahme gibt, dass die Asymmetrie der Verteilung von Materie und Antimaterie in kosmischen Dimensionen und damit unser aller Existenz durch die Verletzung der  $CP$ -Invarianz kurz nach dem Urknall mitverursacht worden ist, worauf der russische Physiker und Menschenrechtler Andrej Sacharow in einer berühmten Arbeit aus dem Jahre 1967 hingewiesen hat. Leider sind noch viele Fragen offen. Insbesondere scheint die bisher im System der neutralen Kaonen und damit im Rahmen des Standardmodells beobachtete Verletzung der  $CP$ -Invarianz nicht auszureichen, um die Dominanz der Materie im Kosmos zu erklären.

### Produktion von Hadronen in der Vernichtung von Elektronen und Positronen [7]

Wenn Elektronen und Positronen (die Teilchen und Anti-Teilchen darstellen) aufeinander treffen, vernichten sie sich (annihilieren), indem ein Photon entsteht, das allgemein mit dem griechischen Buchstaben  $\gamma$  bezeichnet wird. Dieses Photon seinerseits kann wieder Teilchen und Anti-Teilchen erzeugen, z. B. Quarks  $q$  und Anti-Quarks  $\bar{q}$ :  $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q}$ .

Aus den Quarks und Anti-Quarks entstehen in einem weiteren Schritt 2, 3 oder mehr sogenannte Hadronen, z. B. die schon erwähnten Kaonen zusammen mit Anti-Kaonen oder 2, 3 oder mehr Pionen. Als Hadronen bezeichnet man zwei Klassen von Teilchen: Mesonen und Baryonen. Mesonen setzen sich aus Paaren von Quarks und Anti-Quarks zusammen, während Baryonen aus 3 Quarks bestehen. Die Struktur der Hadronen ist tatsächlich komplizierter, da auch Gluonen (die Vermittler der starken Wechselwirkung) und die permanente Erzeugung und Vernichtung weiterer Paare von Quarks und Anti-Quarks eine Rolle spielen. Der Prozess der Hadronisierung der Photonen hat große Bedeutung in der Teilchenphysik, da er überall dort auftritt, wo Photonen mit Quarks wechselwirken. Um diesen Prozess analysieren zu können, muss man jedoch die Wahrscheinlichkeit für den Prozess  $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q}$  im gesamten Energiebereich von null bis unendlich kennen. Solche Daten können unterhalb von einigen GeV nur experimentell gewonnen werden, da die dafür zuständige Quantentheorie bei diesen relativ niedrigen Energien keine Aussagen macht.

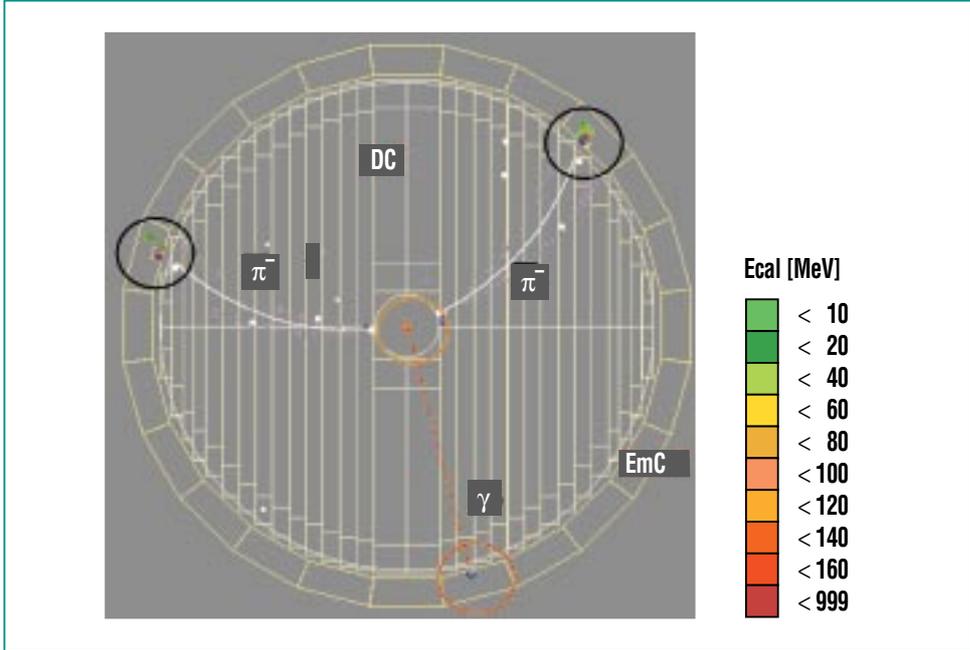
Zwei besonders aktuelle Fragen in diesem Zusammenhang betreffen das magnetische Moment des Myons (eines Leptons, das in der Natur als schwerer Verwandter des Elektrons auftritt) und die Feinstrukturkonstante  $\alpha$ , die im eigentlichen Sinne keine Konstante ist, sondern von der Energie des ablaufenden Prozesses abhängig ist. Bei verschwinden-

der Energie ist die Feinstrukturkonstante jedoch eine der grundlegenden Naturkonstanten, die z. B. die Stärke bestimmt, mit der Elektronen in Atomen an den Kern gebunden sind, wohingegen das magnetische Moment eines Teilchens die Stärke des von solchen „atomaren“ Magneten erzeugten Magnetfelds bestimmt. Messung und theoretische Berechnung des magnetischen Moments des Myons im Rahmen der Quantentheorie wichen bisher weniger als um  $10^{-8}$  voneinander ab. Diese Übereinstimmung stellte einen der ganz großen Erfolge der Theorie dar.

Um darüberhinaus immer genauere Tests der Quantentheorie zu ermöglichen, ist im Nationallaboratorium von Brookhaven/USA eine neuerliche Messung des magnetischen Moments des Myons im Gange. Die angestrebte Genauigkeit dieser Messungen von einigen  $10^{-10}$  soll Beiträge der schwachen Wechselwirkung zum magnetischen Moment des Myons nachweisen und gegebenenfalls auch Beiträge, die über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausführen. Ein erst Anfang Februar 2001 weltweit verbreitetes und großes Aufsehen erregendes Zwischenresultat dieser Messung zeigt erstmalig eine Abweichung vom bisher in unzähligen Untersuchungen unwidersprochen gebliebenen Standardmodell der Teilchenphysik [8]. Für eine endgültige Bestätigung dieser Abweichung sind die Auswertungen weiterer Daten und eine neuerliche Datennahme sowie eine genauere Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Prozesses  $\gamma \rightarrow q\bar{q}$  in einem

Energiebereich, der gerade mit DAΦNE-KLOE zugänglich ist, dringend erforderlich.

Weil Quarks und Anti-Quarks als freie Teilchen nicht beobachtet werden können, muss der Prozess  $\gamma \rightarrow q \bar{q}$  aus Daten der Hadronisierung gewonnen werden, etwa aus der Reaktion  $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q \bar{q} \rightarrow \pi^+\pi^-$ , d. h. der Vernichtung von Elektronen und Positronen in 2 Pionen. Ein Ereignis dieser Art, das mit KLOE aufgenommen wurde, zeigt Abb. 5. Diese Daten spielen nicht nur für das magnetische Moment des Myons eine Rolle, sondern auch für die Bestimmung der Feinstrukturkonstanten bei viel höheren Energien. Obwohl, wie gesagt, die Feinstrukturkonstante bei verschwindenden Wechselwirkungsenergien außerordentlich genau bekannt ist, konnte ihr Wert bei höheren Energien bisher nur mit einem Fehler im Promille-Bereich bestimmt werden. Damit ist sie gegenwärtig einer der wesentlich begrenzenden Faktoren

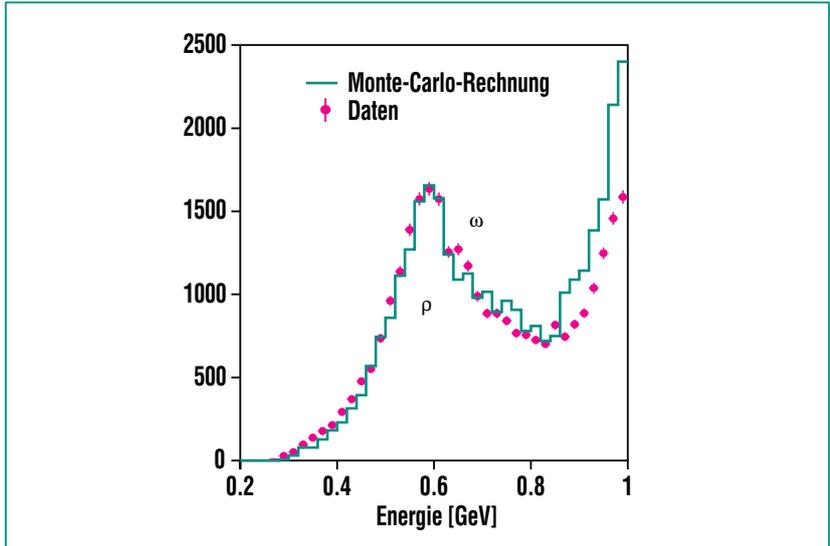


**Abb. 5:** Beispiel für die Erzeugung von Hadronen. In diesem Falle werden zwei geladene Pionen erzeugt (mit dem griechischen Buchstaben  $\pi$  bezeichnet) nach Vernichtung von Elektronen und Positronen unter Emission eines Photons im Anfangszustand (mit dem griechischen Buchstaben  $\gamma$  bezeichnet).

für weitergehende Präzisionstests des Standardmodells.

Üblicherweise wird die Energieabhängigkeit der Wahrscheinlichkeit für Teilchenreaktionen

durch Änderung der Beschleunigerenergie gemessen. DAΦNE wird jedoch für absehbare Zeit auf der  $\phi$ -Resonanz betrieben werden. Aus diesem Grunde wurde der Vorschlag ausgearbeitet,



**Abb. 6:** Energiespektrum der zwei Pionen im Endzustand nach Emission eines Photons im Anfangszustand:

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma^* + \gamma \rightarrow \rho(\omega) + \gamma \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \gamma$$

(s. Text). Die peakartige Struktur rührt vor allem von der Anregung eines  $\rho$ -Mesons genannten Teilchens her, das in 2 geladene Pionen zerfällt. Die Übereinstimmung mit einer Monte-Carlo-Simulation ist im Bereich des  $\rho$ -Mesons sehr gut. Die Abweichungen bei den höchsten gezeigten Energien beruhen auf Ineffektivitäten der Messung, bedingt durch die Absicht, Ereignisse der kosmischen Strahlung auszusondern. Auf diese Ineffektivitäten wurde in diesem Bilde noch nicht korrigiert.

die Emission von Photonen durch das Elektron oder Positron im Anfangszustand zur Messung der Energieabhängigkeit des dominanten Endzustandes von zwei Pionen auszunutzen:

$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma^* \rightarrow \gamma\pi^+\pi^- [9].$$

Diese Abstrahlung von Photonen reduziert die Energie der sich vernichtenden Elektronen und Positronen und damit der 2 Pionen im Endzustand von der Energie der  $\phi(1020)$ -Resonanz bis hinab zur Energieschwelle für die Erzeugung der Pionen. Ein vorläufiges Ergebnis zeigt Abb. 6. Im Energiespektrum der zwei Pionen ist deutlich eine breite Verteilung zu erkennen, die bestimmten be-

kannten Teilchen, den Resonanzen  $\rho$  und  $\omega$ , zuzuordnen sind. Wie erste Untersuchungen ergaben, erscheint eine Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung von Hadronen mit der zu fordernden Genauigkeit in etwa 1 Jahr Messzeit erreichbar.

### Zusammenfassung

Die Inbetriebnahme von DAΦNE-KLOE lässt uns hoffen, wichtige offene Fragen der Teilchenphysik aufgreifen zu können, wobei Untersuchungen von Symmetrieverletzungen und Tests des Standardmodells im Vordergrund stehen. Dabei sind es nicht höhere Energien der benutzten Teilchen-

strahlen, die zu neuen Ergebnissen führen sollen, sondern Präzisionsmessungen mit besserer Statistik und geringeren systematischen Fehlern. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Intensität der aufeinander treffenden Elektronen und Positronen so schnell wie möglich die vorgesehenen Werte erreicht, die etwa einen Faktor 100 größer sein werden als die der gegenwärtig existierenden Beschleunigeranlage in Nowosibirsk / Russland.

### Literatur

- [1] <http://www.lnf.infn.it/>
- [2] <http://www.lnf.infn.it/kloe/Welcome.html>
- [3] <http://www.physik.uni-karlsruhe.de/~gcataldi/kloegroup.html>
- [4] A. Denig  
Proceedings of the Conference on "Hadron Structure 2000", Stará Lesná, Slovak Republic, October 2-8, 2000, im Druck
- [5] *The Second DAΦNE Physics Handbook*  
edited by L. Maiani, Giulia Pancheri, N. Paver, Laboratori Nazionali di Frascati 1995
- [6] W. Kluge  
<http://www.physik.uni-karlsruhe.de/~gcataldi/phys.html>
- [7] W. Kluge  
*Proceedings of the 3rd Moscow School of Physics, XXVIIIth ITEP Winter School of Physics, Moscow February 22 - March 1, 2000, im Druck*
- [8] *Brookhaven National Laboratory, g-2 Experiment*  
<http://phyppro1.phy.bnl.gov/g2muon/index.shtml>
- [9] S. Binner, J. H. Kühn, K. Melnikov,  
*Phys. Lett. B 459 (1999) 279*  
G. Cataldi, A. Denig, W. Kluge, G. Venanzoni  
*KLOE Memo 195, August 1999*  
G. Cataldi, A. Denig, W. Kluge, S. Müller, G. Venanzoni  
*Workshop on "Physics and Detectors for DAΦNE", Frascati, November 16-19, 1999*  
*Frascati Physics Series XVI(2000), p. 569*