

Theoretische Physik

Sprecher: W. Buchmüller

Theoretische Untersuchungen zur Teilchenphysik haben sich auf folgende Schwerpunkte konzentriert: Quantenchromodynamik, Flavor-Physik der schweren Quarks und Neutrinos, Higgs-Mechanismus und Supersymmetrie. Darüber hinaus wurden Probleme der Gittereichtheorien gelöst. Ferner sind mathematisch-physikalische Fragestellungen der Gravitation und Stringtheorien verfolgt worden. Diese Aufgabenstellungen wurden von der DESY Theorie-Gruppe sowie dem II. Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg behandelt.

Quantenchromodynamik (QCD)

Die HERA Experimente zur tiefunelastischen Elektron-Proton-Streuung werfen eine große Zahl von komplexen theoretischen Problemstellungen in der QCD auf. Zu ihnen gehören Instanton-Effekte, diffraktive Streuprozesse und die exklusive Teilchenproduktion, deren Untersuchungen im vergangenen Jahr systematisch fortentwickelt wurden. Ferner konnte die quantitative Beschreibung der Paarerzeugung von top-Quarks an der Schwelle in e^+e^- -Kollisionen wesentlich verbessert werden.

Instanton-Effekte

Instantonen stellen einen grundlegenden Aspekt der QCD dar. Als nicht-störungstheoretische Fluktuationen der Eichfelder, mit typischer Ausdehnung von etwa 0.5 fm, spielen sie eine wichtige Rolle im Übergangsbereich zwischen der partonischen und der hadronischen Beschreibung der starken Wechselwirkung. Trotz der zahlreichen theoretischen Hinweise auf die Bedeutung von Instantonen für ein Verständnis der Hadron-Phänomenologie war bisher deren direkter experimen-

teller Nachweis nicht möglich. Es stellt sich jedoch heraus, dass sich eine Manifestation von Instantonen bei kleinen Abständen für die experimentelle Suche ausnutzen lässt: Instantonen induzieren partonische Vielteilchenprozesse, die im Rahmen der üblichen QCD-Störungstheorie verboten sind. Für die Entdeckung solcher Prozesse bietet sich in der tiefunelastischen Streuung bei HERA eine einzigartige Möglichkeit. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass in diesem kinematischen Bereich sowohl die Rate als auch eine charakteristische Ereignis-Signatur theoretisch vorhergesagt werden kann [DESY 99-136]. Die Rate liegt im messbaren Bereich. Die wichtigsten Signaturen sind ein „Feuerball“-artiger Endzustand mit einer sehr hohen Zahl von Teilchen, einschließlich K-Mesonen und Λ -Hyperonen, sowie einer hohen Transversalenergie.

Die systematische Untersuchung des Entdeckungspotentials für solche Ereignisse bei HERA wurde sowohl in theoretischer als auch in phänomenologischer Richtung intensiv fortgeführt [DESY 98-200, 201, 99-062, 067, 136, 180]. Wichtige quantitative Information über den Gültigkeitsbereich der theoretischen Voraussetzungen konnte aus einer neuen Gitter-Simulation gewonnen werden [DESY 98-201]. Zusammen mit Experimentalphysikern wurden Suchstrategien entwickelt und Modellabhängigkeiten der Hadronisierung des Endzustands untersucht [DESY 99-067]. Eine erheblich verbesserte Version des Simulationsprogramms QCDINS für Instanton-Ereignisse wurde erstellt und ausführlich dokumentiert [DESY 99-180].

Diffraktive Streuung und exklusive Prozesse

Die tiefunelastische Elektron-Proton-Streuung bei HERA ermöglicht die Untersuchung der Struktur des

Protons bei kleinen Werten des Bjorkenschen Skalenparameters x , das heißt unterhalb von 10^{-2} . Die HERA-Experimente haben gefunden, dass in diesem kinematischen Bereich die Parton-Dichten stark anwachsen. Damit kann eine Reihe interessanter nicht-perturbativer Phänomene der QCD im Detail studiert werden. Hierzu gehören diffraktive Streuprozesse, bei denen das Proton fast unbehelligt im Strahlrohr verschwindet. Die gemessenen Strukturfunktionen können quantitativ beschrieben werden durch Streuung an Quarks und Gluonen im Proton, deren Dichten durch diffraktive Parton-Verteilungen gegeben sind, in Übereinstimmung mit einem Faktorisierungstheorem der QCD. Das physikalische Bild im Ruhesystem des Protons ist die Streuung von Farb-Dipolen an den Farbfeldern im Proton. Damit ist ein vergleichbares Verständnis diffraktiver und inklusiver Streuprozesse erreicht [DESY 99-076, 080]. Ein qualitatives Verständnis diffraktiver Prozesse, und allgemein hadronischer Endzustände, ist möglich durch Berücksichtigung „weicher Farbwechselwirkungen“ in Monte Carlo-Programmen zur Berechnung von Streuprozessen [DESY 99-009, DESY-PROC-1999-02]. Von Bedeutung für die QCD sind neben den Strukturfunktionen auch exklusive Prozesse. Von besonderem Interesse ist der virtuelle Compton-Prozess, der durch verallgemeinerte Parton-Verteilungen beschrieben wird, die den Impulsübertrag an das gestreute Proton berücksichtigen [DESY 98-172, 99-025]. Dieser Prozess liefert ebenfalls wichtige Information über die Spinstruktur des Protons [DESY 98-198]. Auch die Upsilon-Photoproduktion bei HERA ist abhängig von den verallgemeinerten Parton-Verteilungen [DESY 98-156].

top-Quark

Die Paarerzeugung von top-Quarks in der Nähe der Schwelle in e^+e^- -Kollisionen, welche für eine präzise Bestimmung der Masse der top-Quarks von großer Bedeutung ist, wurde unter Berücksichtigung der QCD-Korrekturen theoretisch weiter analysiert. In diesem Zusammenhang wurde eine neue Definition der top-Quark Masse vorgeschlagen, die es erlaubt, eine verbesserte Konvergenz der Störungstheorie zu erzielen. Mit dieser Methode wurde eine theoretische Genauigkeit von 200 MeV für die top-Quark Masse abgeschätzt [DESY 99-047]. Der Beitrag des Axialvektor-Stroms zum Wirkungsquerschnitt für die Paarerzeugung von top-Quarks

wurde berechnet [DESY 99-031]. Mit Hilfe dieses Effektes lässt sich die Lebensdauer des top-Quarks präzise messen.

Flavor-Physik

Bedeutende experimentelle Programme zum Nachweis der CP-Verletzung im B-Sektor sowie die Beobachtung von Neutrino-Oszillationen haben theoretischen Analysen von Quark-Mischungen und Untersuchungen von Strukturen des Neutrino-Sektors starke neue Impulse gegeben, die die theoretische Flavor-Physik im letzten Jahr wesentlich gefördert haben. Von hohem physikalischem Interesse ist auch die Verbindung der Neutrino-Physik mit der Kosmologie.

B-Mesonen

Die Messung der CP-Asymmetrien in B-Meson Zerfällen steht im Mittelpunkt des HERA-B Experiments bei DESY sowie der vor kurzem angelaufenen Experimente bei SLAC (USA) und KEK (Japan) (sogenannten B-Mesonfabriken) und bei Fermilab (USA). Die Unitarität des Standard-Modells führt zu strikten Konsistenzbedingungen für die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrixelemente, welche als Dreiecke im Quarkflavor-Parameter Raum dargestellt werden können. Die Winkel des Unitaritätsdreiecks, α, β, γ , sind für die Präzisionsmessung der Quarkflavor-Übergänge sowie der CP-Asymmetrien in B-Meson Zerfällen von zentraler Bedeutung. Gibt es neue Physik jenseits des Standard-Modells, so erwartet man eine Verschiebung der Spitze des Dreiecks oder sogar neue topologische Konfigurationen. Das theoretische Profil des wichtigsten Unitaritätsdreiecks wurde innerhalb des Standard-Modells und in supersymmetrischen Theorien mit Berücksichtigung der QCD-Korrekturen untersucht [DESY 99-042, 083]. Die supersymmetrischen Effekte könnten sich durch genaue Messungen der Winkel α und γ bemerkbar machen. Auf der Suche nach neuer Physik sind auch die seltenen Zerfälle des bottom-Quarks, $b \rightarrow sy$ und $b \rightarrow sl^+l^-$, potentiell von großer Bedeutung. Ein Anfang in dieser Richtung ist durch die Experimente CLEO, ALEPH und CDF gemacht worden. Die exklusiven seltenen B-Zerfälle sind experimentell leichter zugänglich, sind

aber mit theoretischen Unsicherheiten behaftet. Es wurden theoretisch verbesserte Berechnungen der Formfaktoren für die Zerfälle $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$ ausgearbeitet. Mit Hilfe dieser Formfaktoren wurden das Dilepton-Massenspektrum in diesen Zerfällen und die Vorwärts-Rückwärts-(FB-)Asymmetrie in $B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-$ berechnet. Als besonders interessant hat sich die Bestimmung der Nullstelle der FB-Asymmetrie erwiesen, die weitgehend von Formfaktoren unabhängig ist, und daher für einen Präzisionstest des Standard-Modells in Flavorübergängen sehr gut geeignet ist. Eine Verschiebung der Nullstelle der Asymmetrie weg vom Standard-Modellwert würde einen Hinweis auf neue Physik liefern. Das Massenspektrum und die FB-Asymmetrie sowie die Nullstelle wurden im Standard-Modell und in supersymmetrischen Theorien untersucht [DESY 99-146].

Neutrino-Physik und Kosmologie

Die Neutrino-Physik steht aufgrund der Resultate des SuperKamiokande-Experiments gegenwärtig auch im Zentrum des theoretischen Interesses. Hierzu gehören die Phänomenologie der atmosphärischen Neutrino-Oszillationen und das Verständnis der Neutrino-Massenmatrix [DESY 98-164]. Theoretisch favorisiert wird eine große Mischung zwischen Myon- und Tau-Neutrino. Im Rahmen vereinheitlichter Theorien stellt sich damit die Frage nach dem Zusammenhang mit Flavor-verändernden hadronischen Prozessen [DESY 99-169]. Im Rahmen supersymmetrischer Theorien wird eine relativ große Wahrscheinlichkeit für den radiativen Zerfall eines Myons in ein Elektron vorhergesagt (größer als 10^{-14}), was in den nächsten Jahren experimentell überprüft werden kann [DESY 99-021].

Die kosmologische Baryon-Asymmetrie kann quantitativ erklärt werden durch den Zerfall schwerer Majorana-Neutrinos im frühen Universum. Die beobachtete Asymmetrie ergibt sich aus Eigenschaften der Neutrino-Massenmatrix. Die gegenwärtigen experimentellen Hinweise aus dem SuperKamiokande Experiment stimmen sehr gut mit dieser Hypothese überein [DESY 99-044]. In supersymmetrischen Theorien ergeben sich wichtige Einschränkungen an die Temperatur, bei der die Baryon-Asymmetrie erzeugt wird, durch die ebenfalls stattfindende Erzeugung von Gravitinos [DESY 98-186].

Higgs-Mechanismus und Supersymmetrie

Der Higgs-Mechanismus zur Erzeugung von Teilchenmassen und die supersymmetrische Erweiterung des Standard-Modells bilden zentrale Problembereiche der Hochenergiephysik, die mit Hilfe der nächsten Generation von Protonen- und e^+e^- -Linearcollidern gelöst werden können.

In supersymmetrischen Theorien ist der Higgs-Sektor wesentlich komplexer als im Standard-Modell. In der minimalen supersymmetrischen Theorie wird ein Quintett von neutralen und geladenen Higgs-Teilchen vorhergesagt. Für die Masse des leichtesten neutralen Teilchens ist eine obere Schranke von 140 GeV abgeleitet worden. Die Bestimmung dieser Masse aus den Fundamentalparametern der Theorie ist bis zur Zwei-Schleifen Ordnung analytisch ausgeführt worden [DESY 98-194, 99-012, 120]. Dies erlaubt Hochpräzisionstests des Mechanismus für die elektroschwache Symmetriebrechung im GigaZ Mode von TESLA, in welchem der Collider mit sehr hoher Luminosität auf der Z-Resonanz läuft [DESY 99-117]. Ein kompliziertes Problem ist die Suche nach geladenen Higgs-Teilchen an Hadron-Beschleunigern, falls sie in Zerfällen von top-Quarks wegen zu hoher Masse nicht erzeugt werden können. Die Wirkungsquerschnitte für die Produktion einzelner sowie von Paaren dieser Teilchen und die assoziierte Produktion von Higgs- und W-Bosonen am LHC sind zu diesem Zwecke berechnet worden [DESY 99-132, 112, 121].

Ein ähnliches Bild bietet die Analyse von neutralen Higgs-Paaren. Die Suche nach solchen Ereignissen wird am LHC sehr schwierig sein für Parameterbereiche außerhalb der Higgs-Kaskadenzerfälle [DESY 99-033]. Hingegen können große Parameterbereiche an einem e^+e^- -Collider hoher Luminosität überdeckt werden, so dass trilineare Selbstkopplungen der neutralen Higgs-Teilchen in supersymmetrischen Theorien experimentell studiert werden können [DESY 99-001, 171]. Damit kann eine solche Anlage wesentliche Elemente zur Rekonstruktion des Selbstwechselwirkungs-Potentials der Felder bereitstellen, auf dem der Higgs-Mechanismus gründet.

Falls, trotz starker indirekter Hinweise, der Higgs-Mechanismus nicht in der Natur realisiert ist, müssen

die schwachen W-Bosonen bei Energien von etwa 1 TeV stark wechselwirken. Die Streuamplituden können in diesem Bereich theoretisch vorhergesagt werden. Diese Vorhersagen, die auf der spontanen Brechung von chiralen Symmetrien in neuen stark-wechselwirkenden Sektoren basieren, können an TeV e^+e^- -Linearcollidern präzise getestet werden [DESY 99-111].

Supersymmetrie

Charginos, die supersymmetrischen Partner von W-Bosonen und geladenen Higgs-Bosonen, können in Proton-Collidern [DESY 99-055, 046] und e^+e^- -Collidern [DESY 98-136, 175] paarweise erzeugt werden. Die Ausnutzung polarisierter Elektron/Positron-Strahlen erlaubt die vollständige Rekonstruktion der Fundamentalparameter des Chargino-Sektors: Massenparameter, Mischungswinkel und Kopplungen. Dies sind wesentliche Elemente für die experimentelle Untersuchung der Supersymmetriebrechung, deren Mechanismus bisher noch nicht theoretisch geklärt werden konnte.

Gittereichtheorien

Die Formulierung von Feldtheorien auf dem Gitter bietet Zugang zur Lösung vieler physikalischer Probleme in nicht-störungstheoretischen Bereichen. Ein zentraler Bereich ist dabei die Struktur von abelschen und nicht-abelschen Eichfeldtheorien, insbesondere die chiralen Symmetrien, deren Verständnis zur Beschreibung der Hadronen in der QCD essentiell ist. Eine Fülle weiterer Problemstellungen öffnet sich, wenn Aspekte möglicher Theorien jenseits des Standard-Modells analysiert werden.

Chirale Gittereichtheorien

Chirale Eichtheorien gelten zu Recht als relativ schwieriger Fall unter den phänomenologisch relevanten Feldtheorien. Schon in der Störungstheorie führen chirale Anomalien zu einer Verletzung der Eichinvarianz, es sei

denn, man hätte ein sogenanntes anomaliefreies Multiplett von Weyl-Fermionen gewählt. Bis vor kurzem galt es als ausgemacht, dass sich solche Theorien nicht regularisieren lassen, ohne die Eichsymmetrie zu brechen. Ihre mathematische Konsistenz konnte deswegen nur zu allen Ordnungen der Störungstheorie bewiesen werden. Darüber hinaus weiß man, dass in manchen Fällen außerhalb dieses Rahmens mit zusätzlichen Komplikationen, den „globalen Anomalien“, zu rechnen ist. Eine überraschende Entdeckung im letzten Jahr war, dass sich die chirale Symmetrie in der Gittereichtheorie erhalten lässt, ohne andere fundamentale Prinzipien aufgeben zu müssen. Die weitere Entwicklung führte dann zu einer Formulierung von chiralen Eichtheorien auf dem Gitter mit exakter Eichinvarianz. Für alle abelschen Eichgruppen hat man eine komplette Konstruktion [DESY 98-180] und damit den Beweis, dass sich diese Theorien außerhalb der Störungstheorie konsistent formulieren lassen. Die Formulierung lässt sich ohne weiteres auf nicht-abelsche Eichtheorien verallgemeinern, aber die Frage der exakten Kürzung der lokalen Anomalie auf dem Gitter ist in diesem Fall zur Zeit noch nicht vollständig geklärt. Immerhin konnte die Frage auf ein Problem der lokalen Kohomologie von klassischen Gittereichfeldern zurückgeführt werden, und es scheint sehr wahrscheinlich, dass dieses gelöst werden kann [DESY 99-040, CERN-TH/99-290]. Die oben erwähnten globalen Anomalien können im Prinzip in allen chiralen Eichtheorien auftreten. Ein besonders einfacher und oft studierter Fall sind die Theorien mit Eichgruppe $SU(2)$ und beliebigen Multiplikts von linkshändigen Fermionen. Die Kürzung der lokalen Anomalie ist in diesen Theorien automatisch, auch auf dem Gitter, weil die Darstellungen der $SU(2)$ alle reell oder pseudo-reell sind. Die Gitterformulierung erlaubt dann eine Diskussion der globalen Anomalien in einem mathematisch wohldefinierten Rahmen. Es stellt sich dabei heraus, dass die früher auf der Basis von semi-klassischen Argumenten hergeleiteten Anomalien auch auf dem Gitter vorhanden sind [DESY 99-137].

Supersymmetrie auf dem Gitter

Die nicht-störungstheoretischen Eigenschaften supersymmetrischer Quanten-Eichfeldtheorien sind für das Verständnis der Supersymmetrie-Brechung von entscheidender Bedeutung. Der Grundstein solcher Theo-

rien ist die supersymmetrische Yang-Mills-(SYM-) Theorie. In einer Kollaboration mit dem Institut für Theoretische Physik I der Universität Münster wurden die SYM-Theorien für die Eichgruppen $SU(2)$ und $SU(3)$ untersucht [DESY 99-135, 138]. Für die numerische Simulation am John von Neumann-Institut für Computing (NIC) in Jülich wurde der multi-bosonische Algorithmus im zwei-Schritt Verfahren eingesetzt. Dieser Algorithmus arbeitet sehr effektiv auch bei sehr kleinen Fermion-Massen (in diesem Fall Gaugino-Massen). In der SYM-Theorie mit Eichgruppe $SU(2)$ wurde zuerst die spontane Brechung der diskreten chiralen Symmetrie untersucht [DESY 98-165]. Die Existenz zweier Grundzustände bei Gaugino-Masse gleich null wurde bestätigt. Das Confinement von elementaren Farbladungen wurde beobachtet und die Stringspannung bestimmt. Das Massenspektrum der leichtesten gebundenen Zustände wurde analysiert [DESY 99-029]. Die erwartete Struktur der supersymmetrischen Multipletts wurde nicht gefunden. Das lässt die Frage einer Anomalie in der Supersymmetrie offen.

Fermion-Algorithmen

Für die numerische Simulation fermionischer Quantenfeldtheorien wurde ein neuer Algorithmus entwickelt [DESY 99-036, 127, 170]. Es handelt sich dabei um den multi-bosonischen Algorithmus im zwei-Schritt-Verfahren, in dem der Einfluss der Fermionen auf die Bosonen mit Hilfe zusätzlicher Bosonfelder beschrieben wird. Im ersten Schritt wird die Determinante, die die fermionischen Effekte zusammenfasst, nur in einer relativ groben Näherung dargestellt. Im zweiten „Korrekturschritt“ wird die Abweichung stochastisch korrigiert. Außer für die supersymmetrische Yang-Mills-Theorie, wo der Algorithmus zuerst eingesetzt wurde, wurde in der GRAL-Kollaboration mit der Universität Wuppertal auch für die QCD ein Simulationsprogramm entwickelt. In Zusammenarbeit mit Gruppen an der Universität Swansea und der Universität Glasgow wurde der Algorithmus in QCD mit $SU(2)$ -Farbe und Quarks in der adjungierten Darstellung bei nicht-verschwindender Quark-Dichte verwendet. In diesem Fall ist die Überlegenheit des neuen Algorithmus gegenüber herkömmlichen Fermion-Algorithmen besonders

deutlich, weil auch die Änderung des Vorzeichens der Fermion-Determinante richtig wiedergegeben wird.

Gravitation und Stringtheorien

Von zentraler physikalischer Bedeutung ist die Verbindung der Gravitation mit der Teilchenphysik. Neben methodischen Untersuchungen zu Quantenfeldtheorien in gekrümmten Räumen steht die Frage einer string-theoretischen Lösung im Mittelpunkt intensiver Untersuchungen.

In der Arbeitsgruppe „Mathematische Physik und Quantenfeldtheorie“ wurde die Renormierung von Quantenfeldtheorien in äußeren Gravitationsfeldern untersucht [DESY 99-032]. Mit Methoden der mikrolokalen Analysis konnte gezeigt werden, dass die Ultraviolettprobleme in der Störungstheorie wie im Minkowski-Raum behandelt werden können. Wesentlich war die Weiterentwicklung [DESY 99-168] einer auf Bogoliubov, Epstein und Glaser zurückgehenden Version der Renormierung, die es gestattet, das Infrarotproblem in der störungstheoretischen Konstruktion der Observablen-Algebren vollständig zu vermeiden. Die Ausdehnung dieser Methode auf nichtabelsche Eichtheorien war ein Schwerpunkt der Aktivitäten [DESY THESIS-1999-032].

Einen weiteren Arbeitsschwerpunkt bildete die Stringtheorie und insbesondere die darin auftretenden solitonischen Objekte. Diese sogenannten D-Branen und deren dynamische Eigenschaften spielen eine zentrale Rolle für das Verständnis nichtstörungstheoretischer Aspekte von Stringtheorien. Durch Vergleiche mit neuen Konstruktionen der Quantisierungstheorie konnte gezeigt werden, dass die Dynamik von D-Branen im Rahmen der Nichtkommutativen Geometrie analysiert werden sollte [DESY 99-013, 039]. Die entwickelten Methoden erlaubten dabei zum ersten Mal auch exakte Aussagen über entsprechende Eigenschaften von D-Branen in gekrümmten Hintergründen [DESY 99-104]. Erweiterungen und Anwendungen auf die Analyse von D-Branen in Calabi-Yau Kompaktifizierungen sind in Vorbereitung.