

Theoretische Physik

Sprecher: F. Schrempp

Das wissenschaftliche Programm der DESY-Theoriegruppe und des II. Instituts für Theoretische Physik hatte folgende Schwerpunkte:

- HERA-Physik und QCD;
- Gittereichtheorie;
- B-Physik;
- Collider-Physik;
- Neutrino-Physik und Kosmologie;
- Vereinheitlichte Theorien;
- Stringtheorie;
- Mathematische Physik.

HERA-Physik und QCD

Small-x Physik

Die Messungen der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung bei HERA haben intensive Untersuchungen der Physik kleiner Bjorken-x angeregt. Im letzten Jahr sind vor allem zwei Forschungsrichtungen verfolgt worden: ein genaueres Verständnis der BFKL-Dynamik sowie theoretische und numerische Untersuchungen von nichtlinearen Korrekturen zu den Evolutionsgleichungen der QCD (BFKL bzw. DGLAP).

Zum konsistenten Test der BFKL-Dynamik in der nächstführenden Ordnung (NLO) fehlen zur Zeit noch die NLO-Korrekturen zu den Impaktfaktoren, welche die Ankopplung der BFKL-Green-Funktion an äußere Teilchen beschreiben (die NLO-Korrekturen zur Green-Funktion sind seit einigen Jahren bekannt). Für den Photon-Impaktfaktor, der sowohl in der tiefinelastischen Streuung bei HERA als auch an einem e^+e^- -Linear Collider eine zentrale Rolle spielt, wurden die

analytischen Rechnungen soweit zu Ende geführt, dass nun numerische Rechnungen in Angriff genommen werden können. Erste numerische Resultate zu den reellen Korrekturen sind in [DESY 04-116] veröffentlicht. Für praktische Anwendungen ist die Entwicklung von effektiven numerischen Integrationsprogrammen von hoher Bedeutung. Erste Resultate mit einem solchen Computer-Algorithmus wurden in [hep-ph/0408008] vorgestellt. Zu den möglichen praktischen Anwendungen zählen auch Prozesse an Hadron Collidern, z. B. die W-Produktion [hep-ph/0409206, hep-ph/0409337]. Im Hinblick auf einen möglichen Zusammenhang der BFKL-Dynamik mit Stringtheorien ist die Erweiterung von der QCD auf supersymmetrische Eichtheorien von Interesse. In [DESY 04-085] wird die Erweiterung der BFKL-Green-Funktion auf $N = 4$ supersymmetrische Theorien beschrieben.

Die Balitsky-Kovchegov- (BK) Gleichung liefert einen attraktiven theoretischen Rahmen für die Untersuchung nichtlinearer Effekte bei hohen Gluondichten, die zum Phänomen der Saturation führen. Diese Gleichung wird vorwiegend im Farbdipol-Bild hergeleitet und diskutiert; der Vorteil dieser Beschreibungsweise liegt vor allem in seiner physikalischen Anschaulichkeit. Zum Verständnis physikalischer Endzustände und zur Berechnung von Wirkungsquerschnitten ist es notwendig, diese Gleichung auch im Impulsraum zu analysieren: in [DESY 04-067] wird eine Herleitung der Gleichung im Impulsraum beschrieben. Hierbei spielen die Symmetrieeigenschaften der BFKL-Näherung eine zentrale Rolle. Der Impulsraum-Zugang erlaubt es auch, Korrekturen zum Integralkern der BK-Gleichung zu berechnen. Von besonderem Interesse ist der Zusammenhang der BK-Gleichung mit diffraktiven Endzuständen. In [DESY 04-252] wurde gezeigt, dass die BK-Gleichung nur einen Teil des elastischen diffraktiven Endzustands enthält. Bisher stützen sich die Untersuchungen von Lösungen der nichtlinearen BK-Gleichung vor allem auf numerische Untersuchungen

gen; insbesondere wurde auf diese Weise die Existenz von Soliton-Lösungen gezeigt. Als erster Schritt auf dem Wege zu analytischen Lösungen wurde in [DESY 04-104] die BK-Gleichung in $2 + 1$ Dimensionen untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass die Gleichung zur Klasse der Painlevé-Gleichungen gehört. Eine numerische Abschätzung höherer Korrekturen zur BK-Gleichung wird in [DESY 04-153] durch die Einführung eines Rapidity-Vetos berechnet.

Die Beschreibung der HERA-Daten für Elektron-Proton-Streuung bei kleiner Photonvirtualität Q^2 führt im Standardformalismus der tiefinelastischen Streuung zu Problemen. Insbesondere liefern Fits an die Daten eine unphysikalische, negative Gluondichte bei kleinen Q^2 . Ausgehend von der Überlegung, dass Photonen mit kleinem Q^2 einzelne Partonen im Proton nicht auflösen können, wurde in [hep-ph/0402248] eine phänomenologische Beschreibung im Rahmen der verallgemeinerten Vektormeson-Dominanz vorgeschlagen. Mit nur wenigen Parametern wurde gute Übereinstimmung mit den gemessenen Strukturfunktionen bei kleinem Q^2 erreicht. Eine Kombination dieses Zugangs mit dem Formalismus der Partondichten erlaubt eine gute Beschreibung der Daten im gesamten Bereich von Q^2 und Bjorken- x .

Instantonen und Saturation

Als klassische, nichtperturbative und explizit bekannte Fluktuationen des Gluon-Feldes $\propto 1/\sqrt{\alpha_s}$ stellen *Instantonen* einen interessanten alternativen Zugang zum Saturationphänomen dar. Im kinematischen Bereich der Saturation ist die mögliche Relevanz solcher nichtperturbativen Feldkonfigurationen der QCD wohlmotiviert. Ihre Untersuchung wurde daher intensiv weiterverfolgt [hep-ph/0401137, DESY 04-124]. Wichtigstes Ergebnis dieses Zugangs ist, dass Instantonen als klassische Hintergrundfelder tatsächlich Anlass zur Gluonsaturation geben. Als charakteristische Saturationsskala ergibt sich die von Gittersimulationen bekannte mittlere Instantongröße $\langle \rho \rangle \approx 0.5 \text{ fm}$. Besonders interessant erscheint schließlich die Identifikation des „Farbglas-Kondensats“ mit dem QCD-Sphaleron [DESY 04-124], einem wohlbekannten, kohärenten Multi-Gluon-Zustand auf dem Gipfel der Potentialbarriere, die im Instantonbild benachbarte, topologisch nicht äquivalente Vakua trennt.

Diffraktion

Ein neuer Zugang zur Dynamik der diffraktiven tiefinelastischen Streuung wurde in [hep-ph/0409119] vorgestellt. Die Vielfachstreuung des vom Photon ausgelösten Quarks im Proton wird im Grenzfall großer Q^2 durch Wilson-Linien beschrieben, welche in der feldtheoretischen Definition der Partondichten auftreten. Durch diese Vielfachstreuung wird eine effektive Neutralisation von Farbladungen ermöglicht, die ein (für diffraktive Prozesse charakteristisches) intaktes schnelles Proton im Endzustand erlaubt. Diese Überlegungen liefern eine theoretische Motivation für das phänomenologische Modell der „Soft Color Interactions“, welches auch eine Rekombination der Farbladungen sowohl diffraktive als auch nichtdiffraktive Endzustände gut beschreibt.

Für diffraktive Prozesse in der tiefinelastischen Streuung existieren Faktorisierungstheoreme, die deren Beschreibung mit Hilfe von „diffraktiven Partondichten“ erlauben. Die theoretische Analyse sagt eine Brechung dieser Faktorisierung in der Photoproduktion vorher. Die Stärke dieser Brechung ist auch mit Blick auf Anwendungen in Proton-Proton-Stößen am LHC von Bedeutung. In [DESY 04-011] wurde die diffraktive Photoproduktion von hadronischen Di-Jets zur nächstführenden Ordnung in α_s berechnet. Ein Vergleich mit vorläufigen Daten der H1-Kollaboration zeigt eine deutliche Brechung der Faktorisierung um etwa einen Faktor 3 im Wirkungsquerschnitt. In [hep-ph/0410105] wurde diese Analyse auf den Fall endlicher kleiner Q^2 ausgeweitet.

Verallgemeinerte Partondichten

Verallgemeinerte Partondichten beschreiben grundlegende Aspekte der Struktur des Protons auf der Ebene von Quarks und Gluonen. Die Messung dieser Größen in exklusiven Streuprozessen wird aktiv von den HERA-Experimenten verfolgt. Der Buchbeitrag [Burkert und Diehl, 2004] gibt eine Übersicht über die relevanten theoretischen und experimentellen Ergebnisse. Summenregeln verknüpfen verallgemeinerte Partondichten mit den elektromagnetischen Formfaktoren, die in elastischer Lepton-Nukleon-Streuung sehr gut gemessen sind. In [DESY 04-146] wurde eine Parametrisierung der verallgemeinerten Dichten entwickelt und

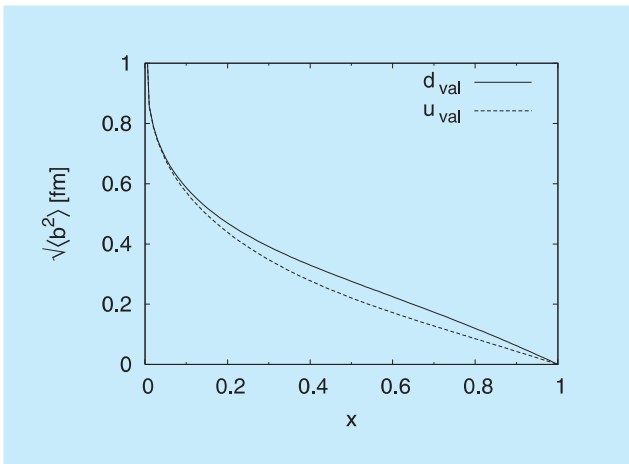


Abbildung 51: Mittlerer Radius $\sqrt{\langle b^2 \rangle}$ der transversalen räumlichen Verteilung eines Valenzquarks in Abhängigkeit vom Impulsbruchteil x des Quarks im schnell bewegten Proton.

an die experimentell gemessenen Formfaktoren angepasst. Ergebnisse dieser Studie stimmen qualitativ mit ersten Berechnungen in der Gittertheorie überein. Insbesondere wird die räumliche Verteilung von Valenzquarks in der Ebene senkrecht zum Impuls eines schnell bewegten Protons mit zunehmendem Impuls des Quarks (Abb. 51) deutlich kompakter. Weiterhin wurde der Beitrag des Bahndrehimpulses von Valenzquarks zum Gesamtspin des Protons abgeschätzt: die Beiträge von u - und d -Quarks sind für sich genommen groß, kompensieren sich jedoch weitgehend in ihrer Summe.

Fragmentation

In der QCD wird die inklusive Erzeugung von Hadronen mit Hilfe von Fragmentierungsfunktionen beschrieben. Das Faktorisierungstheorem der QCD sagt für diese Objekte zwei wichtige Eigenschaften vorher, die experimentell überprüft werden können, nämlich Universalität und wohldefiniertes Skalenverhalten. Im Bereich kleiner Impulsüberträge z vom Mutterparton an das Hadron überwiegt die Fragmentierung des Gluons, und die Skalenabhängigkeit weicht in charakteristischer Weise von der wohlbekannten DGLAP-Evolution ab. Dort findet die modifizierte Näherung durch führende Logarith-

men (MLLA) Anwendung. Im Rahmen dieses Formalismus wurden die Gluon-Fragmentierungsfunktion für leichte Hadronen (π^\pm , K^\pm und p/\bar{p}) und der asymptotische Skalenparameter Λ_{QCD} durch einen globalen Fit an Daten der e^+e^- -Annihilation bei kleinen z -Werten und verschiedenen Energien bestimmt. Hierbei wurde eine vorzügliche Beschreibung der Daten über den wohlbekannten Gaußschen Höcker (*hump-backed plateau*) hinweg erzielt [DESY 04-039]. Ferner wurde gezeigt, dass die höheren Momente der MLLA-Evolution als unvollständige Terme höherer Ordnung betrachtet werden müssen, und dass die Beschreibung der Daten verbessert wird, wenn diese Terme weggelassen werden [DESY 04-142].

Die inklusive Produktion leichter Hadronen in der tiefinelastischen Lepton-Nukleon-Streuung wurde zur nächstführenden Ordnung (NLO) in der starken Kopplungskonstanten α_s unter Verwendung der Fragmentierungsfunktionen aus [DESY 00-086] behandelt [DESY 04-224]. Die gefundenen NLO-Korrekturen sind in gewissen Phasenraumbereichen, insbesondere bei kleinen Werten von Bjorken- x , von beträchtlicher Größe und führen zu einer guten Übereinstimmung mit den von der H1- bzw. ZEUS-Kollaboration bei HERA gemessenen Verteilungen der Wirkungsquerschnitte für neutrale Pionen und geladene Hadronen.

Die inklusive Photoproduktion von D^* -Mesonen zusammen mit hadronischen Jets wurde in der Näherung masseloser Quarks unter Verwendung der Fragmentierungsfunktionen aus [DESY 97-241] zu NLO berechnet [DESY 04-181]. Die gute Übereinstimmung mit jüngsten ZEUS-Daten stellt einen wertvollen Test für die Universalität der Fragmentierungsfunktionen dar. Weiterhin konnte die Gegenwart sogenannter intrinsischer Charm-Quarks im aufgelösten Photon nachgewiesen werden.

Die inklusive Hadroproduktion schwerer Hadronen (D , B) im Übergangsbereich zwischen kleinen ($p_T \lesssim m_h$) und großen ($p_T \gg m_h$) Transversalimpulsen wurde in NLO im Rahmen eines theoretischen Formalismus behandelt, der einerseits Massenkorrekturen vollständig berücksichtigt und andererseits die Universalität und Skalenverletzung der Fragmentierungsfunktionen gewährleistet. Theoretische Vorhersagen für die inklusive D^* -Erzeugung in Proton-Antiproton-Stößen am Tevatron stimmen innerhalb der Fehler mit Daten der CDF-Kollaboration überein [DESY 04-172]. Vor-

läufige Daten zur inklusiven D^* -Photoproduktion bei ZEUS werden ebenfalls in diesem Formalismus relativ gut beschrieben [DESY 04-196].

Nichtrelativistische QCD

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz sogenannter Farboktettprozesse vorher, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Da die Überprüfung dieser Theorie in niederster Ordnung durch beträchtliche Skalenunsicherheiten erschwert wird, ist ihre Behandlung in nächstführender Ordnung in α_s bzw. der Relativgeschwindigkeit v der gebundenen Quarks nötig. Als ein erster Schritt in diese Richtung wurde die Erzeugung von prompten J/ψ -Mesonen zusammen mit hadronischen Jets [DESY 04-080] bzw. prompten Photonen [DESY 04-149] durch direkte Photoproduktion in Zwei-Photon-Stößen an einem e^+e^- -Collider betrachtet. Dabei wurden signifikante NLO-Korrekturfaktoren gefunden. Diese Untersuchungen sind auch in konzeptioneller Hinsicht lehrreich, da verschiedene Typen von Singularitäten zusammenwirken und die Mischung der beitragenden NRQCD-Operatoren unter Renormierung berücksichtigt werden muss.

Das Potential zwischen einem statischen Quark und seinem Antiquark wurde in der Zweischleifenordnung für den Fall berechnet, dass sich das gebundene System im Farboktettzustand befindet. Während das Ergebnis zu einer Schleife mit demjenigen für den Farbsingulettzustand übereinstimmt, tritt in der Zweischleifenordnung erstmals eine Abweichung auf. Dieses Ergebnis wird in der NRQCD zur Behandlung ultraweicher Gluonen in höheren Ordnungen der Störungstheorie benötigt. Ferner wird es für die Untersuchung der Gluino-Antigluino-Paarerzeugung in der Schwellenregion gebraucht und bestimmt die Eigenschaften von „Glueballinos“, den supersymmetrischen Partnern der Gluebälle [DESY 04-232].

QCD und elektroschwache Physik

Theorien zur Vereinheitlichung der fundamentalen Wechselwirkungen (GUT) sagen vorher, dass gewisse

Klassen laufender Kopplungen sich an der GUT-Energieskala treffen. Um diese laufenden Kopplungen an der elektroschwachen Energieskala durch die experimentell ermittelten Werte der Kopplungen und Massen auszudrücken, werden sogenannte Schwellenrelationen benötigt. Für die laufenden Yukawakopplungen der ersten fünf Quark-Flavors wurden diese Schwellenrelationen in der dominanten Zweischleifenordnung $\mathcal{O}(\alpha_{em}\alpha_s)$ berechnet [DESY 04-108].

Die NuTeV-Kollaboration hat den elektroschwachen Mischungsparameter $\sin^2 \theta_W$ in der Streuung von Neutrinos oder Antineutrinos am Nukleon bestimmt. Das Ergebnis ist als Hinweis auf neue Physik jenseits des Standardmodells interpretiert worden. Die Extraktion von $\sin^2 \theta_W$ hängt jedoch von einer möglichen Asymmetrie in der Verteilung von s -Quarks und Antiquarks im Nukleon ab, welche in einem phänomenologisch erfolgreichen Modell für Partonverteilungen abgeschätzt wurde. Das Ergebnis dieser Abschätzung reduziert die Abweichung des NuTeV-Resultats vom Standardmodell auf etwa zwei Standardabweichungen, so dass die Messung keinen signifikanten Nachweis für neue Physik liefert [hep-ph/0407364].

Gittereichtheorie

Die Aktivitäten im Bereich Gittereichtheorie konzentrierten sich einerseits auf Simulationen der QCD mit dynamischen Quarks, andererseits auf Rechnungen mit exakter chiraler Symmetrie, die wegen des hohen numerischen Aufwands bislang noch in der *quenched* Approximation durchgeführt werden müssen.

Ziel dieser Rechnungen ist die Bestimmung von effektiven Kopplungskonstanten („Gasser-Leutwyler-Konstanten“) der chiralen Störungstheorie aus Simulationsdaten. Langfristig erhofft man sich dadurch Aufschluss über phänomenologische Fragen wie die Möglichkeit eines masselosen Up-Quarks oder der Erklärung der $\Delta I = 1/2$ -Regel.

Gitter-QCD mit leichten Quarks

Die $qq + q$ -Kollaboration hat die numerischen Simulationen der QCD mit zwei leichten, dynamischen Quarks

fortgesetzt. Mit Hilfe der Untersuchung der Quarkmassenabhängigkeit der Pion-Masse und der Pion-Zerfallskonstanten wurden die ersten Abschätzungen bestimmter Kombinationen von Gasser-Leutwyler-Koeffizienten veröffentlicht [DESY 04-046, 04-158].

Um die Extrapolation zum Kontinuumslimit zu erleichtern, wurden die numerischen Simulationen mit leichten Quarks – in einer erweiterten Kollaboration mit der NIC-Forschungsgruppe am DESY in Zeuthen – in der sogenannten „Twisted-Mass-Formulierung“ der QCD fortgesetzt [DESY 04-098, DESY 04-162, DESY 04-188]. Dabei wurde in erster Linie die Phasenstruktur um die Singularität bei verschwindender Quarkmasse untersucht. Es wurde gezeigt, dass bei verschwindender Quarkmasse ein Phasenübergang erster Ordnung existiert, dessen Stärke von der Wahl der Eichwirkung abhängt.

QCD im ϵ -Regime

Als ϵ -Regime der QCD bezeichnet man den kinematischen Bereich, der durch ein endliches Volumen bei beliebig kleinen Quarkmassen definiert ist. Die chirale Störungstheorie lässt sich auch auf diese Situation

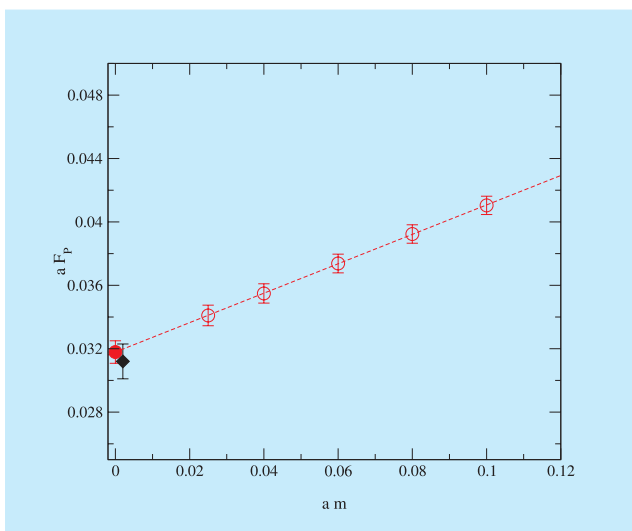


Abbildung 52: Berechnung der Pion-Zerfallskonstanten im ϵ -Regime (schwarze Raute), sowie durch chirale Extrapolation der Daten im p -Regime (rote Punkte und Linie).

anwenden, wobei die chirale Entwicklung durch dieselben Gasser-Leutwyler-Koeffizienten parametrisiert wird wie die Theorie im physikalisch großen Volumen (p -Regime). Durch Vergleich mit Gitterdaten der QCD im ϵ -Regime können diese Koeffizienten mit *finite-size scaling* Verfahren bestimmt werden.

In einer ersten Rechnung [DESY 04-009] konnte die Parametrisierung beider kinematischer Bereiche durch einen konsistenten Satz von effektiven Kopplungskonstanten explizit verifiziert werden. Hierzu wurde die Pion-Zerfallskonstante in zwei voneinander unabhängigen Simulationen im ϵ - und p -Regime bestimmt (Abb. 52). Eine technische Schwierigkeit der Simulation im ϵ -Regime bestand in der extremen statistischen Fluktuation der relevanten Korrelationsfunktionen. Unsere Gruppe hat eine Methode entwickelt, die die Beiträge der niedrigen Eigenmoden des Gitter-Dirac-Operators zu Korrelationsfunktionen exakt berücksichtigt. Durch dieses sogenannte *low-mode averaging* konnte das statistische Signal entscheidend verbessert werden.

$K \rightarrow \pi\pi$ und die $\Delta I = 1/2$ Regel

In einer weiteren Publikation [DESY 04-081] wurde eine Strategie vorgestellt, die es ermöglichen soll, die Ursachen der bekannten $\Delta I = 1/2$ -Regel im Zerfall $K \rightarrow \pi\pi$ zu untersuchen. Im Zentrum des Interesses steht die Frage nach der Rolle des Charm-Quarks, und ob seine relativ große Masse den Zerfall in den $\pi\pi$ -Endzustand mit Isospin 0 begünstigt. Insbesondere versucht man die Effekte des Charm-Quarks von den übrigen QCD-Effekten zu isolieren. Dies soll durch den Vergleich der Resultate für den Fall eines unphysikalisch leichten Charm-Quarks ($m_c = m_u$) mit der physikalischen Situation erreicht werden. Die Zerfallsamplituden für $K \rightarrow \pi\pi$ lassen sich durch effektive Kopplungskonstanten der chiralen Störungstheorie ausdrücken, und das Ziel der Gitterrechnung ist die Bestimmung dieser Kopplungsparameter, analog zum Fall der Pion-Zerfallskonstante. Ein zentraler Bestandteil unserer Strategie ist die Verwendung des ϵ -Regimes: durch das veränderte chirale Zählschema wird ein Vergleich von Gitterdaten mit den Ausdrücken der chiralen Störungstheorie zur nächstführenden Ordnung ermöglicht. Im p -Regime ist das entsprechende *matching* zu dieser Ordnung i. a. nicht durchführbar. Die Verwendung

von Gitter-Fermionen mit exakter Symmetrie ist ein weiterer großer Vorteil bei der Berechnung der nötigen Operatormatrixelemente, da keine Mischung mit Operatoren verschiedener Chiralität auftritt, und die schwierige nichtperturbative Subtraktion von Operatoren niedriger Dimensionen völlig vermieden werden kann.

Die Simulationen im ϵ -Regime sind allerdings technisch sehr aufwendig und kostspielig. Insbesondere sind die statistischen Fluktuationen in den betrachteten 3-Punkt-Korrelationsfunktionen so groß, dass *low-mode averaging* nur mit einer hohen Zahl berechneter Eigenmoden eine befriedigende Wirkung zeigt [DESY 04-171]. Konkrete Resultate werden in nächster Zeit erwartet.

B-Physik

Theoretische Untersuchungen der Physik schwerer Quarks sind ein wesentlicher Bestandteil der seit einigen Jahren in der DESY-Theoriegruppe und am II. Institut für Theoretische Physik durchgeführten Arbeiten. Die B-Fabriken am KEK (Japan) und PEP (USA) sowie die Experimente CDF und D0 am Fermilab (USA) liefern die wichtigsten experimentellen Ergebnisse, die für die Präzisionsphysik der B-Mesonen von zentraler Bedeutung sind. Mit besonderer Aufmerksamkeit wurden die Daten für die seltenen B-Zerfälle und die CP-Asymmetrie in B-Meson-Übergängen verfolgt.

Der Zerfall $B \rightarrow X_s \gamma$ spielt als Präzisionstest der Flavorübergänge im Standardmodell und in supersymmetrischen Theorien eine wichtige Rolle. Um die Abschätzungen im Standardmodell zu untermauern, ist die Next-to-next-to-leading-Ordnung (NLL) der QCD-Strahlungskorrekturen für die Zerfallsrate $\Gamma(B \rightarrow X_s \gamma)$ erforderlich. Ein wesentlicher Teil dieser Strahlungskorrekturen (3-loop-Matching) wurde berechnet [DESY 04-001]. Der Zerfall $B \rightarrow X_d \gamma$ liefert wichtige Information über das Element V_{td} der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM). Der inklusive Zerfall ist aber bis jetzt wegen des Kontinuum-Hintergrunds experimentell nicht zugänglich. Die exklusiven Zerfälle $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$ stellen eine Alternative dar und sind in NL-Ordnung theoretisch berechnet worden [DESY 04-065]. Die Übergänge $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$

sind zwar noch nicht gemessen worden, aber die vorhandenen oberen Schranken sind für die CKM-Phänomenologie schon interessant und liefern komplementäre Information über das CKM-Unitaritätsdreieck.

Die Experimente BABAR und BELLE haben Messungen der zeitabhängigen CP-Asymmetrie in den Zerfällen $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ und $\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ sowie die erste statistisch signifikante Messung der sogenannten direkten CP-Verletzung in den Zerfällen $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ und $\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+$ veröffentlicht. Diese Messungen liefern wichtige Hinweise auf die Winkel des Unitaritätsdreiecks sowie auf mögliche Physik jenseits des Standardmodells und sind für die Entschlüsselung der Flavordynamik der B-Mesonen sehr hilfreich. Sie wurden, zusammen mit anderen Messungen der CP-Asymmetrien und der CKM-Matrix, phänomenologisch untersucht [DESY 04-036]. Die erlaubten Werte (berechnet mit 68% C.L.), $81^\circ \leq \alpha \leq 103^\circ$, $21.9^\circ \leq \beta \leq 25.5^\circ$ und $54^\circ \leq \gamma \leq 75^\circ$, sind mit deren indirekten Abschätzungen innerhalb des Standardmodells in sehr guter Übereinstimmung.

Weitherhin wurden die Eigenschaften des Systems schwerer Quarks $\bar{b}c$ theoretisch untersucht. Die Hyperfeinaufspaltung im System $\bar{b}c$ in der NL-Ordnung wurde mit Hilfe der nichtrelativistischen Renormierungsgruppe berechnet. Das Ergebnis $M(B_c^*) - M(B_c) = 65 \pm 24(\text{th})_{-16}^{+19}(\delta\alpha_s)$ MeV [DESY 04-042] ist experimentell noch nicht überprüft worden. Der Wirkungsquerschnitt $\sigma(p\bar{p} \rightarrow B_c^* X)$ wurde mit Hilfe der sogenannten k_\perp -Faktorisierungsmethode berechnet und ist in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Messungen am Tevatron [DESY 04-220]. Eine Zusammenfassung der theoretischen Aspekte der Physik schwerer Quarks in zahlreichen Zerfällen von B-Mesonen wurde zusammen mit den experimentellen Ergebnissen veröffentlicht und führt zum Schluss, dass das Standardmodell alle Flavorübergänge gut beschreibt [DESY 04-236].

Collider-Physik

Der Protonen Collider LHC und der e^+e^- -Linear Collider ILC sind die entscheidenden experimentellen Instrumente, um in naher Zukunft die grundlegenden Aspekte der Physik bei hohen Energien im TeV-Bereich

verstehen zu können. Sie werden es erlauben, ein klares Bild der Massenerzeugung im Higgs-Mechanismus des Standardmodells oder der in jüngster Zeit entwickelten Alternativen, wie etwa Little-Higgs-Modellen, zu entwerfen.

Von physikalisch großer Attraktivität ist die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells, die stabile Verbindungen bis zur Planck-Skala aufzubauen gestattet, wo die Teilchenphysik mit der Gravitation vereinheitlicht wird. Um in diesen Bereich vordringen zu können, müssen Extrapolationen ausgeführt werden, welche ein genaues physikalisches Bild an der elektroschwachen Skala erfordern. Auf diese Weise lassen sich die fundamentale supersymmetrische Theorie und ihr Brechungsmechanismus rekonstruieren. Supergravitationstheorien sind, neben anders gearteten, kosmologisch motivierten Alternativen, hervorragende Kandidaten, die zu einem vereinheitlichten Bild führen. Ihre Eigenschaften können in Experimenten an den zukünftigen TeV-Collidern eindeutig und präzise erfasst werden.

Higgs-Physik

Higgs-Physik am LHC und ILC

Die Suche nach dem Higgs-Boson H , dem fehlenden Glied im Standardmodell der Elementarteilchen, stützt sich am LHC im Massenbereich unterhalb von etwa 140 GeV vor allem auf das photonische Zerfallssignal, so dass eine möglichst genaue theoretische Vorhersage des entsprechenden Verzweigungsverhältnisses benötigt wird. Der Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$ vollzieht sich in niederster Ordnung der Störungsrechnung durch Feynman-Diagramme, in denen ein virtuelles W -Boson oder Top-Quark zirkuliert. Die führenden Korrekturen der starken Wechselwirkung (in $\mathcal{O}(\alpha_s)$) wurden vor mehr als einem Jahrzehnt von einer DESY-Gruppe berechnet. Kürzlich wurden die führenden elektroschwachen Korrekturen (in $\mathcal{O}(G_F m_t^2)$), die durch die große Top-Yukawakopplung hervorgerufen werden, mit Hilfe der Methode der asymptotischen Entwicklung ausgewertet. Kurioserweise stellt sich heraus, dass diese beiden Korrekturen sich näherungsweise gegenseitig aufheben [DESY 04-040].

Die Reaktion $pp \rightarrow t\bar{t} + \text{jet}$ am LHC ist ein wichtiger Untergrund für die Suche nach dem Higgs-Boson im

Massenbereich $m_H < 200$ GeV. Der wichtige Signalprozess ist hier die Vektorboson-Fusion mit anschließendem Zerfall $H \rightarrow WW$. Der Wirkungsquerschnitt für $t\bar{t} + \text{jet}$ -Produktion muss besser als auf 10% genau bekannt sein, um die theoretische Unsicherheit in der Bestimmung von $\sigma_H = \sigma_{\text{VBF}} \times B(H \rightarrow WW)$ zu beherrschen. Dies wird durch die Berechnung der QCD-Korrekturen erreicht; erste Ergebnisse dieses aufwendigen Projekts sind in [DESY 04-111] dargestellt.

Weiterhin werden die Experimente am LHC einen ersten Zugang zu den Kopplungen des Higgs-Bosons an die elektroschwachen Eichbosonen und Fermionen des Standardmodells bieten. Unter Zuhilfenahme von Modellannahmen können in einer globalen Analyse von Produktionskanälen und Zerfallsmoden für einige der Higgskopplungen Genauigkeiten im Bereich von 10% erreicht werden [DESY 04-089].

Als Folge der hohen Masse sollten mögliche Abweichungen vom Higgsmechanismus des Standardmodells bevorzugt im Top-Quark-Sektor beobachtet werden. Die Produktion von Top-Quark-Paaren ist daher auch ein interessanter Signalprozess für Präzisionsstudien. Im Rahmen der perturbativen QCD können genaue Vorhersagen über die Verteilungen der Zerfallsprodukte des Top-Quarks gemacht werden. Eine vollständige Beschreibung von hadronischer Top-Quark-Paarproduktion und -Zerfall bis zur Ordnung α_s^3 der QCD unter Berücksichtigung des Top-Quark-Spins wurde in [DESY 04-026] gegeben. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann die Produktions- und Zerfallsdynamik von Top-Quarks präzise getestet werden.

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD sagt die Existenz sogenannter Farboktettprozesse voraus, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Im Rahmen dieser Theorie wurden Vorhersagen für die assoziierte Hadroproduktion von Bottomonia ($\eta_b(nS)$, $\Upsilon(nS)$, $h_b(nP)$ und $\chi_{bJ}(nP)$) mit den neutralen Higgs-Bosonen h^0 , H^0 und A^0 des minimalen supersymmetrischen Standardmodells bereitgestellt. Dieser Erzeugungskanal, der hier erstmals untersucht wurde, liefert für kleine Massenwerte und große Werte des Parameters $\tan\beta$, der das Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der beiden Higgsdubletts misst, signifikante Wirkungsquerschnitte. Beispielsweise werden für die Signale

$\Upsilon(1S) + h^0/A^0 \rightarrow l^+l^- + b\bar{b}$ mit $m_{h^0/A^0} = 100$ GeV und $\tan\beta = 50$ am LHC etwa 3000 Ereignisse pro Jahr erwartet [DESY 04-23].

Little-Higgs-Modelle

Die Higgs-Masse im Standardmodell kann durch das Postulat einer erweiterten Symmetriestruktur erklärt werden, die mit neuen Vektorbosonen, Quarks und Skalaren im TeV-Bereich einhergeht und das Higgs-Boson als Goldstone-Boson erscheinen lässt. Viele der so konstruierten „Little-Higgs-Modelle“ sagen eine zusätzliche $U(1)'$ -Symmetrie voraus, die durch ein Z' -Vektorboson vermittelt wird.

Bei einer alternativen Realisierung der $U(1)'$ -Symmetrie würde statt des Z' ein leichtes Pseudo-Axion η im Spektrum erscheinen. An ein solches Teilchen bestehen gegenwärtig nur wenig Einschränkungen. Eine Entdeckung an zukünftigen Collidern ist aber möglich: Abhängig von den Details des Modells ist ein η -Boson am LHC über Gluon-Fusion und Zerfall in ein Photon-paar oder auch als Zerfallsprodukt der neuen schweren Quarks nachzuweisen. Am ILC kann es im e^+e^- -Modus über Abstrahlung von Top-Quarks beobachtbar sein. Im $\gamma\gamma$ -Modus würde es wiederum als Resonanz im $b\bar{b}$ -Endzustand erscheinen [DESY 04-137].

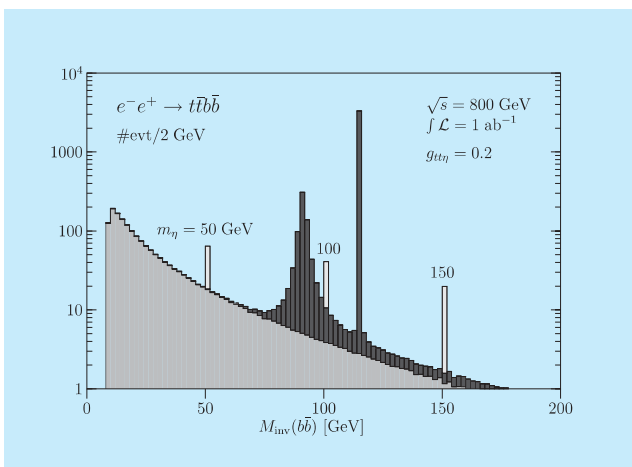


Abbildung 53: Mögliche Signale eines Pseudo-Axions η an einem e^+e^- -Linear Collider über dem elektroschwachen und dem QCD-Untergrund.

Supersymmetrie

Die Wurzeln des Standardmodells liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit im Bereich der Planck-Skala, an der die Gravitation sich mit der Teilchenphysik verbindet. Eine stabile Brücke zwischen der elektroschwachen Skala von 100 GeV und der Planck-Skala von 10^{19} GeV wird von der Supersymmetrie hergestellt. Daher müssen Methoden ausgearbeitet werden, die es erlauben, Physik-Szenarien an der Planck-Skala mittels experimenteller Resultate bei niedrigen Energien zu studieren.

Aufgrund der weitreichenden Extrapolationen muss das physikalische Bild an der elektroschwachen Skala sehr akkurat bestimmt werden. Dazu bedarf es der Verknüpfung von experimentellen Observablen mit den Wechselwirkungsparametern der Theorie. Diese Aufgabe ist systematisch für mehrere Sektoren der Supersymmetrie gelöst worden.

SUSY-Higgs-Physik

Ein wichtiger Parameter im Higgs-Sektor supersymmetrischer Theorien ist der Mischungswinkel $\tan\beta$. Wenn $\tan\beta$ den Wert von 10 überschreitet, ist es sehr schwer, diesen Parameter zu messen. Als eine überraschend gute Methode [DESY 04-077] hat sich die Messung der $\tau\tau$ -Formation von Higgs-Bosonen herausgestellt, die quadratisch mit $\tan\beta$ ansteigt. Die τ -Strahlen lassen sich durch Splitting von hochenergetischen Photonen in Collidern in großer Zahl gewinnen, so dass Genauigkeiten im Prozentbereich für große $\tan\beta$ erreicht werden können.

In CP-nichtinvarianten supersymmetrischen Theorien treten im Grenzfall hoher Massen große Mischungseffekte zwischen den schweren Higgs-Bosonen auf. Die Mischungen führen zu charakteristischen Verschiebungen der Higgs-Massen und ihrer Lebensdauern. Um diese Effekte theoretisch zu beherrschen, ist ein komplexer Mischungsformalismus in [DESY 04-055] entwickelt worden, der die resultierenden experimentellen Phänomene elegant beschreibt. Als besonders interessantes Anwendungsgebiet hat sich die Formation von Higgs-Bosonen in hochenergetischen Photon-Collidern erwiesen, bei der CP-verletzende Mischungen zu großen Asymmetrien bei Verwendung polarisierter Strahlen und in Top-Quark-Endzuständen führen.

Supersymmetrische Teilchen

Unter den supersymmetrischen Materieteilchen sind die skalaren Leptonen von besonderer Bedeutung, da ihre Eigenschaften wesentlich besser bestimmt werden können als die Eigenschaften von Squarks. Jedoch ist die Analyse von Sneutrinos wegen des Zerfalls in Endzustände, die bevorzugt unsichtbare Teilchen umfassen, schwierig. Nichtsdestoweniger konnte in [DESY 04-133] gezeigt werden, dass ein zufriedenstellendes Bild dieser Teilchen im Linear Collider aus Zerfallscharakteristiken und Produktionsraten erschlossen werden kann.

Wenn die Supersymmetrie nicht in einem minimalistischen Szenario realisiert ist, so wird eine Vielfalt von neuen Teilchen vorhergesagt, unter anderem im Sektor der Neutralinos, der Superpartner von elektroschwachen Eichbosonen und Higgs-Bosonen. Entsprechend komplex wird die theoretische Analyse. Jedoch gelingt es, in Bereichen schwacher Kopplung zwischen den supersymmetrischen Standardteilchen und den zusätzlichen neuen Teilchen analytische Approximationsverfahren zu entwickeln [DESY 04-088], mit denen solche Szenarien transparent dargestellt werden können.

SUSY-Parameteranalysen an der Planck-Skala

Kohärente Analysen supersymmetrischer Teilchen am Proton Collider LHC und am Linear Collider ILC sind notwendig, um ein umfassendes und genaues Bild des gesamten Ensembles der supersymmetrischen Teilchen zu entwerfen [DESY 04-206]. Sobald dies gelungen ist, können Extrapolationen der relevanten supersymmetrischen Parameter zur Großen-Vereinigungs-Skala und zur Planck-Skala ausgeführt werden [DESY 04-044]. Sie erlauben die Rekonstruktion der fundamentalen supersymmetrischen Theorie und ihres mikroskopischen Brechungsmechanismus. In Abbildung 54 wird dargestellt, mit welcher hoher Präzision die Massenparameter im supersymmetrischen Eichsektor bis zum Erreichen universeller Werte in minimaler Supergravitation extrapoliert werden können.

Gravitino in Supergravitationsmodellen

Ein natürlicher Kandidat für den Hauptbestandteil der kalten dunklen Materie ist in Supergravitationstheorien das Gravitino, der Superpartner des Gravitons. Im

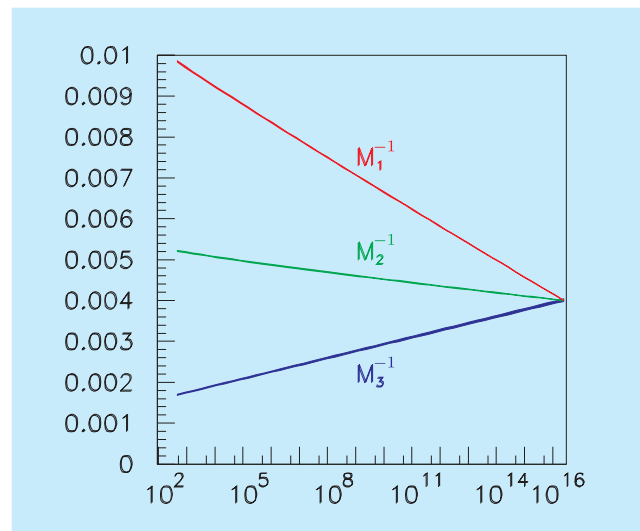


Abbildung 54: Evolution von inversen Massenparametern (in GeV^{-1}) mit der Energieskala (in GeV) bis zum Skalenbereich, in dem universelle Werte in minimaler Supergravitation vorausgesagt werden. Die Breite der Linien entspricht der erwarteten Unsicherheit aus kohärenten LHC- und ILC-Analysen.

Gegensatz zum Standardkandidaten der Supersymmetrie, dem leichtesten Neutralino, hat das Gravitino nur die extrem schwache Gravitationswechselwirkung mit anderen Teilchen. Im Hinblick auf einen möglichen experimentellen Nachweis erscheint deshalb zunächst das Neutralino bevorzugt. Aufgrund des Erfolgs der Leptogenese, dem gegenwärtig führenden Modell zur Erklärung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie, besteht seit einigen Jahren jedoch auch starkes Interesse an Modellen, in denen das Gravitino das leichteste Super-Teilchen ist. Das nächst leichteste Super-Teilchen ist dann in vielen Modellen ein quasistabiles skalares τ -Lepton, ein Superpartner des τ -Leptons. Dies führt zu sehr interessanten Möglichkeiten, das Gravitino in Experimenten am LHC und ILC zu entdecken und seine Masse, eventuell auch seinen Spin, zu messen [DESY 04-010]. Dies würde die Supergravitation als Eichtheorie bestätigen.

Split-SUSY

Es widerspricht nicht einer Vereinigung der bekannten Wechselwirkungen bei hohen Energien, wenn die zusätzlichen skalaren Teilchen in supersymmetrischen

Modellen eine Masse $m_s \gg 1$ TeV besitzen. Ein solches Spektrum, „Split-SUSY“, würde einerseits alle Schwierigkeiten mit Flavor- und CP-verletzenden Effekten beseitigen, andererseits die Voraussage dunkler Materie und des schwachen Mischungswinkels $\sin^2 \theta_w$ erhalten. Die Supersymmetrie könnte dann allerdings nicht die Hierarchie der elektroschwachen Skala stabilisieren.

Aus phänomenologischer Sicht zeichnet sich dieses Szenario durch metastabile Gluinos und moderat leichte Charginos und Neutralinos aus. Wie in [DESY 04-136] gezeigt wurde, ist die Beobachtung der Gluinos in Form von farbneutralen gebundenen Zuständen (R-Hadronen) bis zu einer Masse von 1.2–1.7 TeV am LHC möglich. Für einen Nachweis der zugrundeliegenden Supersymmetrie ist es zusätzlich erforderlich, die Mischungsmatrizen der Charginos und Neutralinos zu vermessen. Während LHC-Daten dafür nur wenig Information liefern, würde die Messung der Produktionswirkungsquerschnitte am ILC nicht nur den Rückschluss auf Supersymmetrie erlauben, sondern mit ihrer Präzision die anomalen Quantenkorrekturen durch schwere Skalarteilchen identifizieren und damit das Modell selbst etablieren.

Neutrino-Physik und Kosmologie

In den kommenden zehn Jahren gehen immer größer werdende Detektoren für kosmische Strahlung (Pierre Auger Observatory, IceCube, ANITA, EUSO, SaSA) in Betrieb, welche den Nachweis extrem energetischer kosmischer Neutrinos via Neutrino-Nukleonstreuung ermöglichen. Gemäß verschiedener realistischer Flussvorhersagen dieser Neutrinos bestehen sehr gute Chancen, dass die genannten Kollaborationen in einem Jahrzehnt über Aufzeichnungen sehr vieler entsprechender Ereignisse im Energiebereich oberhalb von 10^8 GeV, entsprechend einer Schwerpunktsenergie oberhalb von 14 TeV, verfügen werden. Diese Messungen könnten Informationen über die Teilchenphysik bei Skalen jenseits der Reichweite von HERA, Tevatron und LHC liefern [DESY 04-014, 031, 180, 192]. Des Weiteren eröffnen sie die Möglichkeit, den kosmischen Hintergrund von Urknallneutrinos anhand von Absorptionsmerkmalen in den Neutrino-Energiespektren nachzuweisen [DESY 03-219, 04-180]. Ein direkter Nachweis der Urknallneutrinos in einem erdgebundenen Detektor ist jedoch mit dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht

möglich, selbst wenn man die gravitative Erhöhung ihrer lokalen Dichte auf Grund der nichtverschwindenden Neutrinomasse berücksichtigt [DESY 04-147, 242].

Das Axino ist ein interessanter Kandidat für die dunkle Materie im Universum. Es trägt weder elektrische noch Farbladung, wechselwirkt nur sehr schwach und könnte das leichteste supersymmetrische Teilchen sein, welches bei Annahme von R-Paritätserhaltung stabil ist. In supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells, in denen das CP-Problem der starken Wechselwirkung durch den Peccei-Quinn-Mechanismus gelöst wird, tritt das Axino als fermionischer supersymmetrischer Partner des Axions auf. In [DESY 04-082] wurde die thermische Produktionsrate von Axinos im Rahmen der supersymmetrischen QCD berechnet. Durch Verwendung der „hard thermal loop resummation“-Methode erhält man ein endliches eichinvariantes Resultat, welches die Debye-Abschirmung im heißen Plasma aus Quarks, Gluonen, Squarks und Gluinos berücksichtigt. Daraus kann der Beitrag von thermisch erzeugten Axinos zur dunklen Materie als Funktion der Temperatur nach der Inflation berechnet werden. Es zeigt sich, dass Axinos den dominanten Anteil der dunklen Materie bilden können, wenn z. B. ihre Masse um 100 keV liegt und die Temperatur nach der Inflation etwa 10^6 GeV war.

Der Mechanismus der „Leptogenese“ führt die kosmologische Materie-Antimaterie-Asymmetrie des Universums auf Wechselwirkungen schwerer Majorana-Neutrinos in der thermischen Phase des frühen Universums zurück. Dies führt zu Vorhersagen für die Massen der leichten Neutrinos sowie ihrer schweren „Seesaw“-Partner, die in einer detaillierten Untersuchung analytisch berechnet wurden [DESY 03-100]. Die für die Leptogenese benötigte hohe Temperatur im frühen Universum schränkt in supersymmetrischen Theorien das Massenspektrum der Super-Teilchen und die Natur des leichtesten Super-Teilchens (LSP) stark ein [DESY 04-093].

In höherdimensionalen supersymmetrischen Theorien werden Eichkopplungen dynamisch durch skalare Felder bestimmt. Damit verändern sich diese unter extremen Bedingungen, insbesondere bei hohen Temperaturen. Dieser Effekt beeinflusst die Stabilität der kompakten zusätzlichen Raumdimensionen und führt damit zu einer Maximaltemperatur im frühen Universum [DESY 04-062, 216].

Vereinheitlichte Theorien

Die aufgrund experimenteller Daten naheliegende Vereinigung der Standardmodell-Eichkopplungen im Rahmen minimaler supersymmetrischer Erweiterungen ist eine der Hauptstützen der Niederenergie-Supersymmetrie und deren Einbettung in die heterotische Stringtheorie. Die Attraktivität eines solchen Szenarios für Physik jenseits des Standardmodells wird nicht zuletzt auch dadurch getragen, dass die so gefundene Vereinigungs- oder GUT-Skala (vgl. „Grand Unified Theory“) in der Nähe der heterotischen String-Skala liegt. Allerdings ist die Übereinstimmung mit der String-Skala nicht perfekt, was von vielen Theoretikern als ernstes Problem des obigen heterotischen String-GUT-Szenarios gesehen wird. Eine mögliche Lösung dieses Problems im Rahmen sogenannter Orbifold-GUTs wurde in [DESY 04-214] vorgeschlagen. Die Orbifold-GUTs, deren Entwicklung in den letzten Jahren wesentlich von der DESY-Theorie-Gruppe mitgetragen wurde, versuchen die Brechung der vereinigten Symmetrie im Rahmen höherdimensionaler Eichtheorien zu beschreiben. Im oben angesprochenen Zugang wird gezeigt, dass String-Kompaktifizierungen in stark asymmetrischen Orbifold-Geometrien auf natürliche Weise eine Trennung von String- und GUT-Skala und ein Auftreten höherdimensionaler Eichtheorien im Zwischenbereich erklären können, ohne dass es zu einer Einbuße der Präzision der Eichvereinigung kommt. Die Arbeit benutzt den geometrischen Mechanismus nichtlokaler diskreter Wilsonlinien und beinhaltet auch eine quantitative Analyse des perturbativen Regimes der zugrundeliegenden heterotischen Stringtheorie.

Orbifold-GUT-Modelle machen spezifische Vorhersagen für den Protonzerfall, die signifikant von den Vorhersagen konventioneller vereinheitlichter Theorien abweichen. Die Analyse eines von der DESY-Gruppe vorgeschlagenen SO(10)-Modells in sechs Raum-Zeit-Dimensionen ergab eine starke Unterdrückung des Zerfalls $p \rightarrow \mu^+ K^0$. Die berechnete Lebensdauer $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \simeq 1 \times 10^{35}$ Jahre liegt im Bereich der Sensitivität des geplanten Hyper-Kamiokande-Detektors [DESY 03-202, DESY 04-121]. In einer Orbifoldkompaktifizierung des heterotischen String, die das supersymmetrische Standardmodell als Niederenergielimes enthält, ergaben sich Orbifold-GUT-Modelle als Zwischenstufe [DESY 04-237]. Verschiedene theoretische

und phänomenologische Aspekte dieser interessanten Modelle werden gegenwärtig weiter untersucht.

Die oben erwähnte Eichvereinigung in String-Modellen sowie auch in rein feldtheoretischen höherdimensionalen Konstruktionen kann durch das Auftreten potenzartiger Korrekturen stark beeinflusst werden. Dieser auch als Power-Law-Running bekannte Effekt wurde, nach anfänglicher Euphorie, als nicht quantitativ kontrollierbar eingestuft. Wie nun eine detaillierte Analyse in [DESY 04-109] gezeigt hat, gibt es jedoch eine große Klasse von Modellen, in denen die Power-Law-Korrekturen aufgrund der hohen Symmetrie der fünfdimensionalen Super-Eichtheorie exakt rechenbar werden. Es wurde insbesondere ein Modell identifiziert, in dem dieser Effekt exakt mit dem gewöhnlichen 1-Loop-Laufen der Kopplungen des supersymmetrischen Standardmodells übereinstimmt. Weitere Anwendungen, insbesondere die Frage nach dem Zusammenhang mit String-Threshold-Korrekturen, sind in Arbeit.

Stringtheorie

Die Arbeitsgruppe „Stringtheorie und supersymmetrische Quantenfeldtheorien“ am II. Institut für Theoretische Physik arbeitete im Berichtszeitraum an verschiedenen Aspekten der Stringtheorie. In [Nucl. Phys. B699 (2004) 387], [Nucl. Phys. B705 (2004) 167] und [hep-th/0412277] wird die effektive Niederenergiwirkung für Calabi-Yau-Orientifold-Kompaktifizierungen mit D-Branes und Hintergrundflüssen mit Hilfe einer Kaluza-Klein-Reduktion berechnet, und es werden die teilchenphysikalischen Eigenschaften untersucht. Dabei treten insbesondere massive Tensor-Multipletts auf, die von einem supersymmetrischen Standpunkt aus in [JHEP 0411 (2004) 028], [Phys. Lett. B602 (2004) 130], [Nucl. Phys. B682 (2004) 243] und [hep-th/0410149] untersucht wurden. Diese Arbeiten legen eine interessante geometrische Verallgemeinerung der Mirrorsymmetrie von Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten in Anwesenheit von Hintergrundflüssen nahe [DESY 04-211], [DESY 04-234]. Aspekte von spontaner $N = 2 \rightarrow N = 1$ Supersymmetriebrechung in diesen Wirkungen wurde in [Class. Quant. Grav. 21 (2004) 4607] behandelt. Die Struktur der zugrundeliegenden Niederenergiwirkung einer geeichten Supergravitation mit Tensor-Multipletts wurde durch einen universellen Zugang in [Phys. Lett. B583 (2004) 338] und

[DESY 04-245] für $N = 8$ Theorien auf ein konzeptionell befriedigendes Fundament gestellt.

Die Eigenschaften von D-Branes auf gekrümmten Mannigfaltigkeiten sind aus mathematischer Sicht außerordentlich interessant und zur Zeit ein aktives Forschungsfeld. In den Arbeiten [DESY 04-054] und [DESY 04-063] werden gewristete K-Gruppen berechnet, die relevant für Eigenschaften von D-Brane-Ladungen in der Stringtheorie sind.

Die AdS/CFT-Korrespondenz führt zu interessanten Beziehungen zwischen Supergravitationstheorien und stark gekoppelten (supersymmetrischen) Eichtheorien. Diese Korrespondenz ist zwar eine Vermutung, kann aber an vielen, oft äußerst nichttrivialen Relationen überprüft werden [JHEP 0407 (2004) 058], [Phys. Rev. D70 (2004) 026005] und [DESY 04-229]. Dabei haben sich auch überraschende Zusammenhänge mit integralen Modellen ergeben [DESY 04-250].

Kosmologische Aspekte der Stringtheorie oder allgemeiner einer Quantengravitation sind durch die neuen experimentellen Beobachtungen besonders interessant. In diesem Zusammenhang wurden in [gr-qc/0411076] Gravitationstheorien, deren Lösungen einer oberen und unteren Beschränkung auf die Schnittkrümmung der Raumzeit genügen, untersucht. Für statisch sphärisch symmetrische Lösungen zeigt sich, dass Theorien mit einem Kepler-Bereich keine schwarzen Löcher produzieren.

Mathematische Physik

Eine störungstheoretische Konstruktion der Algebren von Observablen der Quantenfeldtheorie wurde auf der

Grundlage älterer Arbeiten von Steimann und Epstein-Glaser durchgeführt [hep-th/0403213]. Dabei konnte gezeigt werden, dass in einem Off-Shell-Formalismus die zeitgeordneten sowie die retardierten Produkte von Feldern so definiert werden können, dass sie mit Ableitungen vertauschen (*Action Ward Identity*). Dies ermöglicht eine lokale Definition der Renormierungsgruppe nach Stückelberg und Petermann, wie sie für die kovariante Formulierung der Quantenfeldtheorien auf gekrümmten Raumzeiten erforderlich ist. Darüber hinaus wurde eine hintergrundunabhängige Formulierung der perturbativen Quantengravitation vorgeschlagen [hep-th/0403007].

Die Versuche, Quantenfeldtheorien auch auf nichtkommutative Räume auszudehnen, führte zur Einführung sogenannter quasiplanarer Wickprodukte, die aus den (divergenten) Produkten durch Subtraktion lokaler Gegenterme entstehen [Phys. Rev. D71 (2005) 025022]. Der Verzicht auf nichtlokale Gegenterme hat allerdings starke Auswirkungen auf das Infrarotverhalten der Theorie. Diese stellen möglicherweise einen sensitiven Test für nichtkommutative Feldtheorien dar. Eine durch die Nichtkommutativität bewirkte Modifikation der Dispersionsrelation für elektromagnetische Wellen wurde mit Hilfe der Methode der kovarianten Koordinaten gefunden [Phys. Rev. D70 (2004) 107704].

Eine neue Idee, konforme Feldtheorien in höherdimensionalen Räumen einzuführen, wurde auf der Basis gruppentheoretischer Überlegungen entwickelt [hep-th/0410277].

Weiter wurden neue Aspekte des Spin-Statistik-Zusammenhangs diskutiert, und es wurde gezeigt, wie dieser Zusammenhang aus Eigenschaften der Theorie unter Spiegelungen hergeleitet werden kann [hep-th/0412060].

