

Theoretische Physik

Sprecher: F. Schrempp

Das wissenschaftliche Programm der DESY Theorie-Gruppe 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,
- Quantengravitation.

HERA Physik und QCD

Small-x Physik und Saturation

Aus theoretischer Sicht besteht eine der wichtigsten Aufgaben von HERA und anderen Teilchenbeschleunigern darin, verschiedene Aspekte der starken Wechselwirkung quantitativ zu erforschen. Ein bedeutender Zweig der Quantenchromodynamik (QCD) befasst sich mit dem Verständnis der Physik im kinematischen Bereich sehr kleiner Bjorken- x , deren experimentelle Untersuchung bei HERA begonnenen und inzwischen an anderen Plätzen aufgenommen worden ist. Ein Überblick über den gegenwärtigen Stand von Phänomenologie und Theorie der small- x Physik wurde von der Small- x Collaboration in [DESY 03-220] präsentiert. Dies ist der zweite Übersichts-Artikel der internationalen Small- x Collaboration, die sich in regelmäßigen Abständen trifft (bisher immer in Lund, Schweden) und dabei den jeweils aktuellen Stand der Kenntnisse aufarbeitet.

Eines der wichtigsten experimentellen Ergebnisse von HERA ist der starke Anstieg der Gluondichte bei kleinem x . Aufgrund der Unitarität erwartet man schließlich eine Dämpfung dieses Anstiegs und entsprechend einen Sättigungszustand der Gluonen („Saturation“). In einem aussichtsreichen Zugang wird dieses Sättigungsphänomen mit einem Vielteilchen-Quantenzustand hoher Besetzungszahl, dem „Farbglass-Kondensat“ assoziiert, welches entsprechend als starkes klassisches Feld proportional zu $1/\sqrt{\alpha_s}$ angesehen werden kann. In diesem neuartigen Bereich hoher Gluonzahl bei hinreichend kleiner Eichkopplung α_s hat man große Klassen von störungstheoretischen Beiträgen aufzusummieren; bei sehr kleinen x - und Q^2 -Werten ist jedoch ein Zusammenbrechen der üblichen Störungstheorie zu erwarten, der den Übergang zur starken Wechselwirkung einleitet.

Im Rahmen der Störungstheorie steht zur Zeit eine nichtlineare Erweiterung der QCD-Evolutionsgleichungen im Mittelpunkt des Interesses: die Balitsky-Kovchegov (BK) Gleichung. Diese Gleichung liefert einen vielversprechenden theoretischen Rahmen für die Beschreibung des Sättigungsphänomens. Bisher ist diese Gleichung nur in einer vereinfachten Form analysiert worden; in [DESY 03-075] wurde erstmals eine numerische Untersuchung der vollen Gleichung durchgeführt, insbesondere der Abhängigkeit der Dipoldichte vom Impaktparameter b .

Phänomenologische Modelle, die auf genäherten Lösungen der BK-Gleichung basieren, wurden für verschiedene Streuprozesse formuliert und untersucht: J/ψ Produktion in Photo- und Elektroproduktion [DESY 03-011] und tiefunelastische Streuung an Kernen [DESY 03-050, 089, 116].

Eine wichtige Anwendung der small- x Physik und der Saturation ist die Wechselwirkung von hochenergetischen Neutrinos mit Protonen und Kernen in der Atmosphäre. Eine möglichst genaue Kenntnis dieser Wechselwirkung ist für astrophysikalische Untersuchungen

sehr wichtig. Der Wirkungsquerschnitt wird näherungsweise durch den tiefunelastischen νp Wirkungsquerschnitt bei sehr kleinen x beschrieben. In [DESY 03-171] werden die Vorhersagen verschiedener Partondichten in einem Saturationsmodell miteinander verglichen.

Für die Untersuchung der Saturation im Rahmen der QCD hat sich das Farb-Dipolbild als besonders geeignet erwiesen, das bisher nur für totale Wirkungsquerschnitte diskutiert worden ist. In [DESY 03-010] wurde dieses Bild auf Streuamplituden mit nicht-verschwindenden Impulsüberträgen verallgemeinert. Diese Erweiterung wird benötigt, um z. B. in der tiefunelastischen Diffraktion die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes vom Impaktparameter zu untersuchen. Es wird erwartet, dass Saturation in der Diffraktion besonders empfindliche experimentelle Tests erlaubt.

Instantonen und Saturation

In einem komplementären theoretischen Zugang zur Saturation wurden nicht-perturbative, klassische Feldkonfigurationen der QCD untersucht. Als explizit bekannte Fluktuationen des Gluon-Feldes proportional zu $1/\sqrt{\alpha_s}$ stellen „Instantonen“ einen besonders interessanten, konsistenten Zugang zum Saturationsphänomen dar und wurden intensiv weiterverfolgt [hep-ph/0301177, DESY 03-217]. Wie aus Gittersimulationen bekannt ist, tritt in diesem Rahmen eine charakteristische neue Skala auf, die mittlere Instantongröße, $\langle \rho \rangle \approx 0.5$ fm, welche mit der Saturationsskala identifiziert werden konnte: Bei der Streuung eines $q\bar{q}$ -Farbdipols der Größe r am Nukleon tritt für $x \rightarrow 0$ Saturation ein, wenn der geometrische Wirkungsquerschnitt πr^2 (entsprechend der Dipolfläche) die Fläche $\pi \langle \rho \rangle^2$ des Hintergrund-Instantons übersteigt [hep-ph/0301177].

Ein wichtiges Ergebnis [DESY 03-217] im Instanton-Zugang ist die Identifikation des Farbglass Kondensats mit dem QCD-Sphaleron, einem wohlbekanntem, kohärenten Multi-Gluon Zustand auf dem Gipfel der Potenzialbarriere, die benachbarte, topologisch nicht äquivalente Vakua trennt. Diese Identifizierung gelingt im Rahmen der „Valley“-Näherung mit Hilfe von Gitterdaten der UKQCD-Kollaboration. In Übereinstimmung mit neuen Simulationen zur elektroschwachen $B + L$ -Verletzung wurde erstmals mittels QCD-Gitterdaten

die Gültigkeit der Valley-Näherung vom Tunnelbereich ($E \approx 0$) bis zum Sphaleron ($E \approx m_{\text{sph}} \approx 1/\alpha_s \langle \rho \rangle$) gezeigt [DESY 03-217].

Leading-log Summation

Tiefunelastische Streuung bei kleinen x wird weitgehend von Gluonen dominiert; der Austausch von Fermion-Antifermion Paaren stellt jedoch eine wichtige Korrektur zum Gluonaustausch dar, die im kinematischen Bereich nicht zu kleiner x keinesfalls vernachlässigt werden kann. Der Streuprozess zweier virtueller Photonen stellt einen attraktiven Rahmen dar, in dem die Vorhersagen der QCD für den Hochenergielimes zuverlässig getestet werden können. Für diesen Prozess wurde in [DESY 03-105] der Einfluss von Fermion-Antifermion Austausch untersucht: bei LEP Energien sind diese Beiträge noch sehr wichtig, während sie bei einem zukünftigen Linear Collider (TESLA) eine geringere Rolle spielen werden. Das Hochenergieverhalten der doppelten Energie-Logarithmen, wie sie für Fermionenaustausch in der QCD charakteristisch sind, ist darüber hinaus auch von allgemeinerem theoretischen Interesse.

Im Rahmen der BFKL-Näherung der QCD wird die Existenz eines Odderon vorhergesagt, eines aus drei „reggeisierten“ Gluonen bestehenden Zustandes im Austauschkanal. Die diffraktive Produktion des η_c Teilchens in der tiefunelastischen Streuung stellt einen vielversprechenden Kandidaten zum Nachweis dieses Odderons in der störungstheoretischen QCD dar. In [DESY 03-048] wird der Wirkungsquerschnitt dieses Streuprozesses abgeschätzt.

Zu den fundamentalen Eigenschaften der BFKL-Amplituden in der QCD gehören die „Bootstrap Relationen“. Dies sind nichtlineare Beziehungen zwischen verschiedenen elastischen Streuamplituden und Vielteilchen-Produktionsamplituden, deren Gültigkeit für die s -Kanal Unitarität notwendig ist. Die Tatsache, dass die in der BFKL-Näherung berechneten Streuamplituden diese Relationen erfüllen, kann auch als Nachweis ihrer inneren Konsistenz angesehen werden. In der führenden Ordnung sind diese Relationen seit langem bekannt und bewiesen. Ihre Verifikation in der nächstführenden Ordnung (NLO Näherung) hingegen ist erst vor einigen Jahren unternommen worden, und ihre Aus-

dehnung auf inelastische Produktionsprozesse war bisher nicht bekannt. In [DESY 03-083] sind Bootstrap-Bedingungen für NLO Produktionsamplituden formuliert worden, und es wurden Konsistenzbedingungen für Produktionsvertices hergeleitet.

Next-to-Leading-Order Rechnungen

Die Berechnung des Photon Impaktfaktors in der NLO Näherung ist aus mehreren Gründen von hohem Interesse. Zum einen gibt es starke Hinweise darauf, dass im bei HERA untersuchten kinematischen Bereich kleiner x an Stelle der kollinearen Faktorisierung die k_T -Faktorisierung in der QCD verwendet werden muss. In diesem Zusammenhang wird die NLO Näherung des Photon Impaktfaktors benötigt. Sie ist außerdem notwendig für den experimentellen Nachweis des BFKL Pomerons im $\gamma^*\gamma^*$ Streuprozess oder in der Produktion von so genannten Forward-Jets in der tiefunelastischen ep-Streuung. An dieser anspruchsvollen Rechnung wird seit mehreren Jahren gearbeitet. Die jüngste Veröffentlichung im Rahmen dieses Programmes ist die Doktorarbeit [DESY-THESIS 2003-036], in der erstmals numerische Resultate der reellen Korrekturen berechnet werden.

Ebenfalls von grundlegender Wichtigkeit für die Gluon Strukturfunktion bei kleinen x ist die Kenntnis der BFKL Green Funktion in der NLO Näherung. In [DESY 03-060] wird eine verbesserte Version der bisherigen Green Funktion vorgeschlagen, die in voller Übereinstimmung mit der Renormierungsgruppe ist und die numerische Genauigkeit erheblich verbessert.

In [DESY 03-027] wurden Momente der differentiellen Energie- und Winkelverteilung für inklusive Produktion von B-Mesonen, $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}X$, in Ordnung α_s^2 berechnet. Es wurde gezeigt, dass sich in geeigneten Verhältnissen solcher Momente nicht-perturbative Korrekturen sowie große Logarithmen der Form $\ln(E_{CM}/m_b)$ kürzen. Die theoretischen Vorhersagen stimmen sehr gut mit neueren Daten des SLD Experiments überein und erlauben eine Bestimmung von α_s .

Nichtrelativistische QCD

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz so genannter

Farboktett-Prozesse in der Natur voraus, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Im Rahmen dieser Theorie wurden Vorhersagen bereitgestellt für die inklusive Erzeugung prompter J/ψ -Mesonen in tiefunelastischer Neutrino-Nukleonstreuung über den geladenen Strom [DESY 03-107], sowie in polarisierten Hadron-Hadron-, Photon-Hadron- bzw. Photon-Photon-Stößen [DESY 03-168], die mit Messungen von CHORUS, bei RHIC-Spin, im SLAC-Experiment E161 bzw. bei TESLA verglichen werden können. Eine neue Messung der unpolarisierten Hadroproduktion bei RHIC stimmt mit der NRQCD deutlich besser überein als mit dem Farbsingulettmodell. Es wurde gezeigt, dass die Winkelverteilungen der χ_{c1} - und χ_{c2} -Mesonen am Tevatron wichtige Informationen über Farboktettprozesse enthalten und wie diese erschlossen werden können [DESY 03-96]. Für die assoziierte Erzeugung eines Υ -Mesons mit einem h^0 - bzw. A^0 -Higgs Boson des minimalen supersymmetrischen Standardmodells wurden in gewissen, experimentell erlaubten Parameterbereichen Signalraten vorhergesagt, die am LHC sichtbar sein sollten [DESY 04-023].

Die nichtrelativistische Schwellendynamik des Bottom-Antibottom-Systems kann weitgehend störungstheoretisch beschrieben werden. Dies geschieht zweckmäßigerweise mit Hilfe der Potenzial-NRQCD, einer effektiven Feldtheorie, welche aus der NRQCD durch Ausintegration der weichen Moden und Potenzial-Gluonen hervorgeht. Die Vorhersagen dieser Theorie können mit Hilfe eines Systems nichtrelativistischer Renormierungsgruppengleichungen wesentlich verbessert werden. Unter Verwendung dieser Methode wurden die nächstführenden logarithmischen Korrekturen zur Hyperfeinaufspaltung von schwerem Quarkonium aufsummiert. So konnte eine zuverlässige Vorhersage gewonnen werden für die Masse des η_b -Mesons [DESY 03-172], für das kürzlich ein Signalergebnis bei CLEO gesehen wurde.

Produktion von Charm-Mesonen

Theoretische Untersuchungen zur D^* Erzeugung in $\gamma\gamma$ und γp Reaktionen im so genannten massiven variablen Flavourzahl-Schema (massive VFNS) wurden im Jahre

2003 fortgesetzt. In diesem Schema wird die von Null verschiedene Charmquark-Masse voll berücksichtigt, und zwar in der Form, dass für große p_T die Theorie mit masselosem Charm reproduziert wird. Dieses Vorgehen erlaubt es einerseits, Terme proportional zu $\ln(p_T^2/m_c^2)$ in Form von D^* Fragmentationsfunktionen, die universell sind, aufzusummieren und andererseits, Beiträge proportional m_c^2/p_T^2 voll zu berücksichtigen. Dieser Ansatz wurde zum ersten Mal für den direkten Anteil des Prozesses $\gamma\gamma \rightarrow D^*X$ im Jahre 2001 ausgearbeitet [DESY 01-134]. In [DESY 03-014] wird der einfach aufgelöste Anteil für diese Reaktion behandelt und ein Vergleich mit LEP2 Daten durchgeführt. Hierbei wurden der direkte, einfach aufgelöste und der zweifach aufgelöste Anteil, der noch durch die $m_c = 0$ Theorie approximiert wird, addiert. In [hep-ph/0311062] wurde das massive VFNS Schema auf die Photoproduktion von D^* Mesonen bei HERA angewandt und mit neuesten ZEUS-Daten verglichen. Es ergab sich weitgehend gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Daten. Ferner wurden damit ältere Rechnungen mit masselosen Charmquarks bestätigt.

Verallgemeinerte Partondichten

Ein Großteil unserer Kenntnisse über die Quark-Gluon Substruktur des Protons stammt aus der Messung von Partondichten, z. B. in der tiefunelastischen Streuung. Wichtige Aspekte der Struktur sind jedoch auf diese Weise nicht zugänglich. Insbesondere geben Partondichten Aufschluss über den Impuls von Quarks oder Gluonen entlang der Bewegungsrichtung eines schnell bewegten Protons, nicht jedoch über die Struktur senkrecht zu dieser Richtung. Solche Information kann jedoch in geeigneten exklusiven Streuprozessen mit einem Proton im Endzustand erhalten werden und wird durch so genannte „verallgemeinerte Partondichten“ beschrieben. Durch geeignete Observablen kann insbesondere die räumliche Verteilung von Quarks und Gluonen in der Transversalebene untersucht werden, sowie der Beitrag des Bahndrehimpulses von Quarks und Gluonen zum Gesamtspin des Nukleons. Man erwartet, dass solche Information wertvolle Hinweise auf die QCD-Dynamik im Bereich starker Kopplung liefern wird. Die relevanten Prozesse wie exklusive Produktion von Mesonen oder Photonen werden insbesondere in den Experimenten HERMES, H1 und ZEUS gemessen. In einem Übersichtsartikel [DESY-THESIS

2003-018] wurde versucht, das bestehende Wissen in diesem seit etwa 1996 sehr aktiven Feld zusammenzutragen und dabei wesentliche physikalische Fragen und offene Probleme herauszuarbeiten.

In gleicher Weise können auch Übergangsprozesse vom Proton zu einem anderen Hadron beschrieben werden. Dies bietet die Möglichkeit, die Struktur von Resonanzen zu studieren, die aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer nicht als Strahl oder Target in Streuexperimenten in Frage kommen. In [DESY 03-200] wurde vorgeschlagen, auf diese Weise die Struktur des erst kürzlich entdeckten Pentaquark-Baryons Θ^+ bei kleinen Abständen zu untersuchen. Die dafür nötigen Messungen könnten bereits bei HERMES möglich sein.

Gittereichtheorie

Die Aktivitäten im Bereich Gittereichtheorie konzentrierten sich auf 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. Weitere Aktivitäten im Bereich Gittereichtheorie umfassen die Bestimmung und globale Analyse von Zerfallskonstanten von D- und B-Mesonen, die von zentraler Bedeutung für die Flavour-Physik sind.

Simulationen mit leichten Quarks

Eine wichtige Bedingung bei der Bestimmung der Gasser-Leutwyler-Konstanten ist, dass die dynamischen Quarkmassen klein genug sein müssen, um den Gültigkeitsbereich der bekannten Formeln der chiralen Störungstheorie zu erreichen. Die Simulationen müssen unter Berücksichtigung der dynamischen Effekte der Quark-Felder (das heißt „unquenched“) durchgeführt werden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Rechenleistung und die Effektivität der Algorithmen. Für die Rechnungen wurden die Rechneranlagen des NIC in Zeuthen und Jülich und das PC-Cluster bei DESY Hamburg eingesetzt.

Die qq+q-Kollaboration hat in den letzten Jahren einen geeigneten Algorithmus für kleine Quarkmassen entwickelt. Die ersten Resultate, die mit diesem so genannten TSMB-Algorithmus erreicht wurden, zeigen das typische qualitative Verhalten, das in der chiralen Störungstheorie erwartet wird [DESY 03-003, 019, 072, 148]. Die Abschätzungen für die Gasser-Leutwyler-Konstanten, die das Verhalten der Pion-Masse und der Pion-Zerfallskonstante als Funktion der kleinen Quarkmassen beschreiben, sind im phänomenologisch erwarteten Bereich. Die Extrapolation zum Kontinuumslimit konnte bis jetzt noch nicht durchgeführt werden, wird aber in der nahen Zukunft mit den bereits bekannten Methoden erreichbar sein.

Gitter-QCD im ϵ -Regime

Eine weitere Methode zur Bestimmung der effektiven Kopplungskonstanten der chiralen Störungstheorie ist die Untersuchung des so genannten ϵ -Regimes der QCD. Hierbei wird die Theorie in einem endlichen Volumen für beliebig kleine Quarkmassen formuliert. Wie von Leutwyler und Smilga gezeigt, spielt in dieser Situation die Topologie der Eichfelder eine besondere Rolle. Die numerische Berechnung von Korrelationsfunktionen im ϵ -Regime in verschiedenen topologischen Sektoren ermöglicht die Bestimmung der effektiven Kopplungskonstanten durch den Vergleich mit den analytischen Ausdrücken. Die Verwendung von Gitter-Fermionen mit exakter chiraler Symmetrie ist hierbei von besonderem Vorteil, da die analytischen Ausdrücke ohne Einschränkung in der Gitterregularisierung gelten.

Im chiralen Limes divergiert die Korrelationsfunktion der pseudoskalaren Dichte. Ihr Residuum ist jedoch durch die Nullmoden des Dirac-Operators vollständig bestimmt und kann in chiraler Störungstheorie berechnet werden. Die entsprechenden Ausdrücke werden durch die Pion-Zerfallskonstante parametrisiert. Die durch Nullmoden gesättigte Korrelationsfunktion konnte erstmals durch numerische Simulation für verschiedene Gitterabstände und Volumina in der „quenched“ Näherung der QCD bestimmt werden [DESY 03-195]. Trotz mehrerer, bislang noch nicht kontrollierter systematischer Effekte, ist das Resultat für die Pion-Zerfallskonstante im chiralen Limes mit dem phänomenologisch erwarteten Wert verträglich.

QCD und Random Matrix Theory

In einem weiteren Projekt unter Verwendung von Ginsparg-Wilson-Fermionen wurde die Verteilung der Eigenwerte des Dirac-Operators untersucht. Dies ist von besonderem Interesse für das Verständnis der spontanen chiralen Symmetriebrechung. Die Bildung eines chiralen Kondensats wird hierbei über die so genannte Banks-Casher-Beziehung durch die Akkumulation kleiner Eigenwerte des Dirac-Operators erklärt. Quantitative Voraussagen für die Verteilung der Eigenwerte werden insbesondere durch die Random Matrix Theory gemacht. Mit bisher nicht gekannter Präzision konnte die Verteilung der Eigenwerte nun aus Simulationen der „quenched“ QCD für eine Reihe von Gitterkonstanten und Volumina berechnet werden [DESY 03-135]. Hierbei ergab sich, dass Random Matrix Theory eine gute Beschreibung der Eigenwertverteilung liefert, sofern das physikalische Raumzeit-Volumen größer als 5 fm^4 ist.

Ferner lässt sich aus den Gitterdaten ein Wert für das chirale Kondensat bestimmen, der im erwarteten phänomenologischen Bereich liegt. Die verblüffend genaue quantitative Übereinstimmung der Eigenwertverteilungen der QCD mit denen der Random Matrix Theory ist in Abbildung 55 gezeigt.

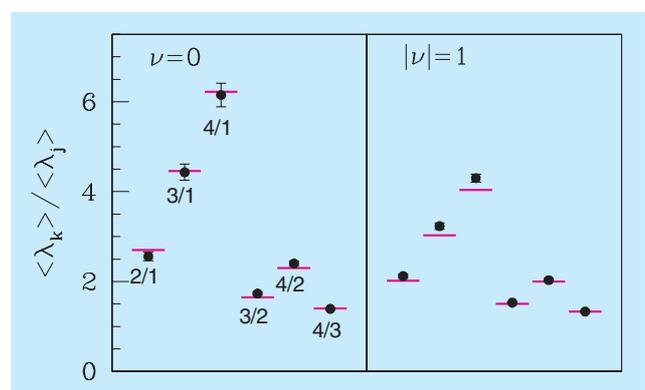


Abbildung 55: Verhältnisse der Erwartungswerte der Eigenwerte des Dirac-Operators in verschiedenen topologischen Sektoren. Die Voraussagen der Random Matrix Theory sind als horizontale Striche gekennzeichnet.

Gitterresultate in der B-Physik

Die Werte der B-Meson-Zerfallskonstanten sowie des B-Parameters der B^0 - \bar{B}^0 -Mischung werden für die Analyse der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix und die Bestimmung ihrer CP-verletzenden Phase benötigt. Gittersimulationen der QCD sind seit einiger Zeit die wichtigste Quelle dieser Information. Aufgrund der immer noch großen systematischen Fehler dieser Größen stellt sich die Frage einer unifizierenden Analyse von Gitter-Resultaten verschiedener Kollaborationen im Stile der Particle Data Group. Der Versuch einer gemeinsamen Analyse wurde bei der EPS03-Konferenz in Aachen vorgestellt [DESY 03-174].

Gitterdaten sind auch von großer Bedeutung für semi-leptonische Zerfälle im charm-Sektor. Wie in einem Summary Talk beim CKM-Workshop in Durham ausgeführt wurde [DESY 03-173], ist eine Berechnung der entsprechenden Formfaktoren für künftige Experimente an „High-Luminosity Charm Factories“ wie CESR-c von großem Interesse.

PC-Cluster bei DESY

Im Rahmen des LatFor-Proposals wurden verschiedene Rechnerplattformen verglichen und ihre Eignung für künftige Großprojekte der Gittereichtheorie bewertet [DESY 03-145]. Hierbei gelten mittlerweile auch PC-Cluster als geeignete und flexible Systeme, die komplementär zu Eigenentwicklungen wie apeNEXT für Simulationen eingesetzt werden können. Beispielsweise wurde das oben beschriebene Projekt zur Bestimmung der Eigenwertverteilungen des Dirac-Operators auf dem relativ kleinen Cluster mit 64 Prozessoren bei DESY Hamburg durchgeführt. Die Erfahrungen mit PC-Clustern bei DESY wurden in einem Konferenzbeitrag vorgestellt [DESY 03-073].

B-Physik

Präzisionsphysik von Übergängen mit schweren Quarks ist ein wesentlicher Bestandteil der seit einigen Jahren laufenden und auch im Jahr 2003 fortgesetzten Untersuchungen in der Theorie-Gruppe und am II. Institut für theoretische Physik der Universität Ham-

burg. Vor allem die Experimente BABAR und BELLE haben dafür neue und genauere Messungen der Materie-Antimaterie Asymmetrie in B Zerfällen und den seltenen B-Mesonen Zerfällen geliefert. Die Zerfälle $B \rightarrow X_s(\gamma, \ell^+\ell^-)$ und $B \rightarrow X_d(\gamma, \ell^+\ell^-)$ sind wichtige Quellen für die Untersuchung der Physik in den so genannten elektroschwachen Pinguin-Amplituden [DESY 03-046]. Es besteht ein großes Interesse an der Berechnung der QCD-Strahlungskorrekturen für die Zerfallsrate $\Gamma(B \rightarrow X_s\gamma)$ zur Ordnung des next-to-next-to-leading logarithm (NNLL). Ein Anfang in diese Richtung wurde durch die Berechnung der Beiträge von fermionischen Loops gemacht [DESY 03-013]. Auch wesentliche Teile der NNLL Matrixelemente für die Operatoren des Übergangs $B \rightarrow X_s\gamma$ wurden gerechnet. Die nichtleptonischen Zerfälle der B-Mesonen sowie der gebundenen $b\bar{b}$ Zustände, besonders des $\Upsilon(1S)$, spielen eine wichtige Rolle, um die QCD Dynamik in Systemen mit schweren Quarks zu entschlüsseln. In diesem Zusammenhang hat die theoretische Untersuchung der inklusiven Zerfälle $B \rightarrow \eta'X$ und $\Upsilon(1S) \rightarrow \eta'X$ eine quantitative Abschätzung der QCD-Pinguin-Amplituden im Standardmodell ermöglicht [hep-ph/0304278, hep-ph/0307092].

Die gemessene CP Asymmetrie in den Zerfällen $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$, $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_L$ liefert eine genaue Messung des inneren Winkels β im Unitaritätsdreieck: $\sin 2\beta = 0.736 \pm 0.049$. Die Experimente BABAR und BELLE haben im Jahr 2003 die ersten Messungen der zeitabhängigen CP Asymmetrie in den Zerfällen $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ und $\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ veröffentlicht. Die aktuellen Messungen liefern wichtige Hinweise auf den Winkel α des Unitaritätsdreiecks. Sie wurden zusammen mit anderen Messungen der CP Asymmetrien und der CKM Matrix phänomenologisch untersucht. Diese Analyse liefert einen Mittelwert von $\alpha = 105^\circ \pm 12^\circ$ [hep-ph/0312303]. Die Messungen der Winkel α und β sind mit deren indirekten Abschätzungen innerhalb des Standardmodells in sehr guter Übereinstimmung. Das führt zum Schluss, dass die CP Asymmetrie in Quarkübergängen durch die Phase in der CKM Matrix dominiert ist.

Collider-Physik

Um die offene Frage der elektroschwachen Symmetriebrechung im Standardmodell schlüssig zu beant-

worten, sind Experimente bei sehr hohen Energien erforderlich. Selbiges gilt auch für die Lösung von Problemen, die von der Einbettung des Standardmodells in eine übergeordnete Theorie ausgehen, in der die Gravitationswechselwirkung in die Teilchenphysik eingebaut wird. Eine Vielzahl theoretischer Untersuchungen zur Higgs-Physik und möglichen Alternativen sowie zur Supersymmetrie ist durchgeführt worden, in denen das Potenzial des im Bau befindlichen Protonencolliders LHC sowie der im Design-Stadium befindlichen e^+e^- -Linearcollider für diese Komplexe studiert wurde.

Higgs-Physik

Das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung erklärt die intrinsischen Massen der Quarks, Leptonen und Eichbosonen durch ihre Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld, dem im einfachsten Fall das Higgs-Boson als neues skalares Teilchen zugeordnet wird. Für die Untersuchung der Higgs-Produktionsprozesse am LHC ist eine genaue Kenntnis der Untergrundprozesse wichtig. Hier stellt die Implementierung der nächstführenden Korrekturen zu $W + 2\text{Jet}$ -Endzuständen in Monte Carlo-Programmen [DESY 03-036] einen wesentlichen Fortschritt dar.

In vielen Modellen ist die Struktur des Higgs-Sektors wesentlich komplizierter als im minimalen Standardmodell, im Extremfall ist selbst ein Kontinuum von Higgs-Zuständen denkbar. Die Frage, ob überhaupt Higgs-Zustände existieren, lässt sich am LHC jedoch unabhängig von der Struktur unzweifelhaft entscheiden [DESY 03-102].

Für eine detaillierte Analyse des Higgs-Potenzials, das im Standardmodell die elektroschwache Symmetriebrechung beschreibt, ist die Bestimmung der Higgs-Selbstkopplung von wesentlicher Bedeutung. Diese Messung ist am LHC nur für große Higgsmassen möglich. Falls hingegen die Masse des Higgs Bosons im durch die LEP-Daten bevorzugten Bereich liegt, ist diese Observable an einem e^+e^- -Collider zugänglich. Die Präzision dieser Messung ist auch durch einen Hadroncollider wesentlich höherer Energie (VLHC) nicht zu übertreffen [DESY 03-035, 103].

Ohne eine Erweiterung des Teilchenspektrums über das minimale Standardmodell hinaus ist das Higgs-Potenzial nicht stabil gegenüber Quantenkorrekturen.

Man erwartet daher Abweichungen in den Higgs-Wechselwirkungen, die durch die Existenz zusätzlicher Freiheitsgrade im TeV-Bereich hervorgerufen werden. In einem modellunabhängigen Zugang lassen sich diese durch einen festen Satz neuer Parameter beschreiben, die in Higgs-Prozessen an einem e^+e^- -Collider gemessen werden [hep-ph/0301097]. Die erwartete Genauigkeit für die verschiedenen Parameter liegt im Bereich von 1–10 %.

Little-Higgs-Modelle

Eine mögliche Alternative zur Supersymmetrie stellen die „Little-Higgs“-Modelle dar, die die Skala der elektroschwachen Symmetriebrechung durch Partnerteilchen gleicher Statistik stabilisieren. Ein minimales Modell dieser Art enthält beispielsweise schwere Kopien der elektroschwachen Eichbosonen (W_H^\pm , Z_H und B_H), schwere Skalarfelder als Partner des Higgs Bosons und schwere Fermionen, die dem Top-Quark zugeordnet sind. In [DESY 03-167] wurde die Frage detailliert untersucht, wieweit sich diese Teilchen an Lepton-Collidern in Präzisionsmessungen indirekt bemerkbar machen.

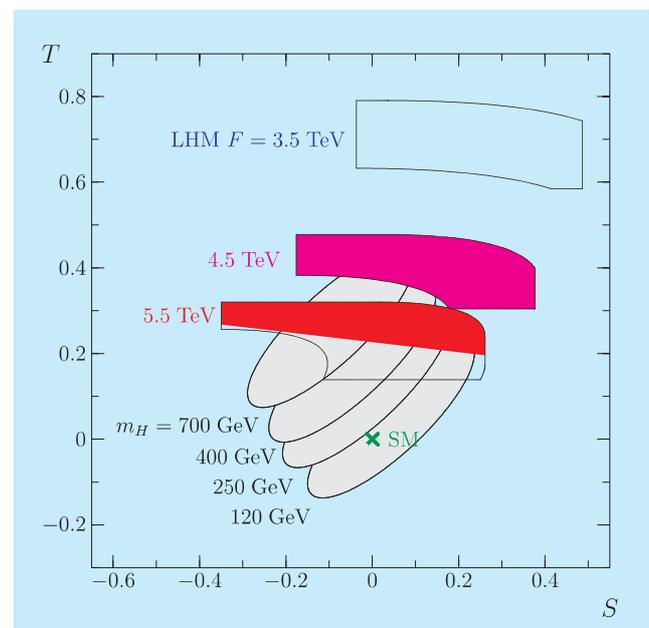


Abbildung 56: Erlaubte (S, T) -Parameterbereiche des minimalen Little-Higgs-Modells (schraffiert) im Vergleich mit LEP-Daten (Ellipsen), dargestellt für verschiedene Higgs-Massen M_H .

Die existierenden Daten lassen bereits Rückschlüsse auf den erlaubten Parameterbereich zu. Abbildung 56 zeigt den Einfluss der schweren Eichbosonen und Skalare auf die Parameter S und T, die bei LEP1 gemessen wurden. Im minimalen Little-Higgs-Modell ist demnach eine Überschneidung des erlaubten Parameterbereichs mit den Daten nur zu erreichen, wenn die charakteristische Skala F des Modells oberhalb von 4 TeV angesiedelt ist. Varianten des Modells erlauben allerdings eine wesentlich niedrigere Massenskala.

An einem zukünftigen e^+e^- -Linearcollider wird ein erweiterter Satz von Observablen der Messung zugänglich, so dass die Analyse prinzipiell eine Rekonstruktion aller Sektoren des Modells zulässt. Die zu erwartenden Effekte sind im Prozentbereich und erfordern deshalb für eine ausreichende Statistik eine hohe Luminosität, wie sie für das TESLA-Design avisiert ist.

Dynamische Symmetriebrechung

Modelle mit dynamischer Brechung der elektroschwachen Symmetrie kommen ohne ein physikalisches Higgs Boson aus und sagen Vektorboson-Streuamplituden vorher, die im TeV-Bereich die Unitaritätsschranke saturieren und womöglich ein ausgeprägtes Resonanzverhalten aufweisen.

Derartige Szenarien wurden exemplarisch in [DESY 03-002] studiert. Weil das Top-Quark mit seiner großen Masse in diesen Modellen eine wichtige Rolle spielt, sind insbesondere Resonanzen in den Streuprozessen $WW/ZZ \rightarrow t\bar{t}$ oberhalb von 1 TeV von Interesse. Allerdings zeigt die numerische Analyse, dass am LHC eine hinreichende Reduktion des Untergrunds, der durch QCD-Abstrahlung in Top-Paarproduktion dominiert ist, auch durch kinematische Schnitte nicht möglich wird, so dass eine Beobachtung derartiger Signale an Hadron-Collidern ausgeschlossen ist. Allein mit einem Lepton-Collider ausreichend hoher Schwerpunktsenergie wären die Effekte nachzuweisen.

Supersymmetrie

Im Rahmen von supersymmetrischen Theorien spielt die hohe Präzision eine herausragende Rolle, mit der Experimente an einem e^+e^- -Linear Collider dieses

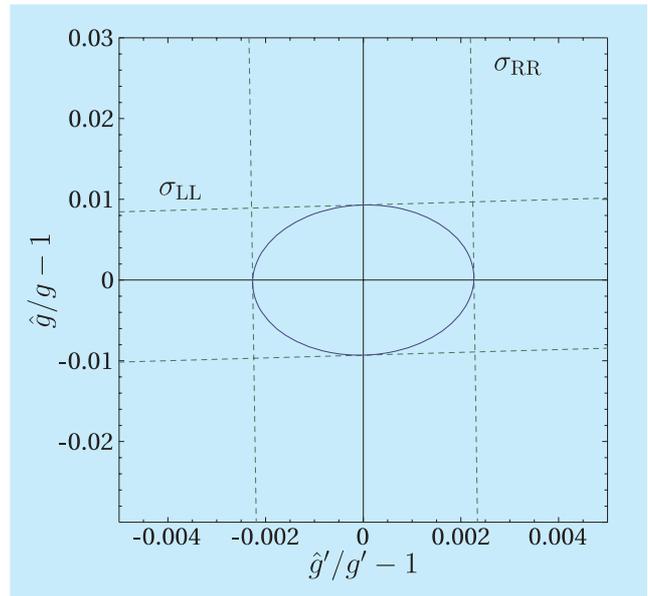


Abbildung 57: Erwartete Präzision der vergleichenden Messung von zwei Yukawa-Kopplungen (\hat{g}, \hat{g}') mit ihren korrespondierenden Eichkopplungen (g, g').

neue physikalische Terrain kartographieren können. Besonders wichtig ist dabei die Untersuchung der skalaren Leptonen, also der supersymmetrischen Partner von Elektronen, Myonen und Tauonen und ihrer Neutrinos. Die theoretische Basis wurde bereitgestellt, um ihre Eigenschaften, Massen und Kopplungen, sehr präzise bestimmen zu können.

Abbildung 57 zeigt einen Vergleich von Eichkopplungen und Yukawa-Kopplungen dieser Teilchen, die von der Supersymmetrie als identisch vorausgesagt werden [DESY 03-111] – ein fundamentaler Test der zugrunde liegenden Symmetrie, die Fermionen mit Bosonen vereinheitlicht. Die Messung von Polarisationsphänomenen an einer solchen Maschine erlaubt es, auch andere Basisparameter wie den Mischungswinkel $\text{tg } \beta$ im Higgs-System zu bestimmen [DESY 03-030]. Diese Schritte sind notwendig, um ein so klares Bild der supersymmetrischen Welt zu erstellen, dass sichere Extrapolationen zur Planck-Skala ausgeführt werden können, an der die Gravitation mit den drei Standardwechselwirkungen der Teilchenphysik ultimativ vereinigt werden kann.

Fast alle Untersuchungen zur Supersymmetrie basieren in ihren Details auf der minimalen Formulierung der su-

persymmetrischen Theorie. Superstringtheorien auf der anderen Seite legen die Existenz umfassenderer Komplexe nahe. Einen ersten Schritt in diese Richtung weist die Erweiterung des minimalen Modells mittels isoskalärer Higgs Bosonen. Solche Freiheitsgrade lassen zwar die physikalischen Grundzüge des Higgs-Sektors unberührt, führen jedoch zu faszinierenden Effekten im Spektrum der Higgs Teilchen, ihren Zerfalls- und Produktions-Eigenschaften [DESY 03-066].

Gluinopaare lassen sich an Linearbeschleunigern nur in Photon-Photon-Kollisionen erzeugen, da sich in der Elektron-Positron-Vernichtung die Quark- und Squark-Schleifenbeiträge weitgehend aufheben. Durch Energieabstimmung der Produktionsschwelle kann die Gluino-Masse bei Photon-Collidern bis auf wenige GeV genau bestimmt werden [hep-ph/0303032].

Es sei schließlich angemerkt, dass die Supersymmetrie auch Einfluss auf Reaktionsamplituden von Teilchen des Standardmodells *sui generis* nimmt. Virtuelle supersymmetrische Teilchen verändern Reaktionsraten und Polarisationszustände [DESY 03-004] gegenüber dem Standardmodell.

Neutrino-physik und Kosmologie

Wechselwirkungen schwerer Majorana-Neutrinos in der thermischen Phase des frühen Universums können die Ursache für die heute beobachtete Materie im Universum sein. Dieser Mechanismus der „Leptogenese“ führt zu Vorhersagen für die Massen der leichten Neutrinos sowie ihrer schweren „Seesaw“-Partner. Im einfachsten Fall der Leptogenese, in dem die Wechselwirkungen des leichtesten Seesaw-Partners dominieren, erhält man die obere Schranke an alle Neutrinomassen $m_{\nu_i} < 0.1 \text{ eV}$ – eine Vorhersage, die in den kommenden Jahren durch Laborexperimente und kosmologische Beobachtungen überprüft werden wird [DESY 03-001].

Die Analyse der solaren und atmosphärischen Neutrinos weist auf Neutrino-Massen hin, die sehr viel kleiner sind als die Massen anderer Leptonen und Quarks. Diese kleinen Neutrino-Massen sind in vielen Modellen durch Physik bei hohen Energieskalen bestimmt. Die Vorhersagen dieser Modelle werden durch Quantenkorrekturen modifiziert. Letztere wurden in [DESY 03-065] für den Fall des Seesaw-Neutrino-Massenoperators syste-

matisch analysiert. Interessanterweise liegt die Größe der Korrekturen häufig im Bereich der Sensitivitäten zukünftiger Experimente. Die genaue Kenntnis der Korrekturen liefert somit wesentliche Aufschlüsse über die Physik bei hohen Energieskalen.

In höherdimensionalen supersymmetrischen Theorien werden Eichkopplungen in der Regel dynamisch durch skalare Felder bestimmt. Damit verändern sich die Kopplungen unter extremen Bedingungen, insbesondere bei hohen Temperaturen im frühen Universum. Dieser Effekt beeinflusst entscheidend die Häufigkeit von Gravitinos. Sollten sie die leichtesten Superpartikeln sein, so kann ihre Existenz die beobachtete dunkle Materie erklären für Gluino-massen im Bereich 0.5 – 2.0 TeV [DESY 03-078].

Die Existenz komplexer Skalarfelder ist eine unvermeidliche Eigenschaft supersymmetrischer Theorien. Im frühen Universum führen diese Felder häufig zu Entropiefuktuationen, die durch die präzisen Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung stark eingeschränkt sind. In [DESY 03-097] wurde das „Curvaton-Szenario“ für Moduli-Felder, Affleck-Dine-Felder und die Skalarfelder rechtshändiger Neutrinos untersucht und der erlaubte Parameterbereich für die jeweiligen Modelle ausgearbeitet.

Kosmische Neutrinos mit Energien oberhalb von 10^8 GeV könnten Informationen über die Teilchenphysik bei Skalen jenseits der Reichweite von LHC oder eines linearen e^+e^- Beschleunigers liefern. Eine untere Schranke an den bei diesen Energien zu erwartenden Neutrinofluss konnte in [DESY 03-114] gewonnen werden. Demnach sollte es mit in Aufbau befindlichen Neutrino-Teleskopen, wie z. B. IceCube, möglich sein, zum ersten Mal die kosmogenen Neutrinos, die bei unelastischen Stößen von kosmischen Protonen mit Photonen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung entstehen, zu beobachten. Diese Neutrinos könnten auch eine wichtige Rolle in Luftschauerexperimenten spielen: falls nämlich die Neutrino-Nukleonstreuung oberhalb von 10^{10} GeV stark wird – etwa durch elektroschwache Instantoneffekte innerhalb [DESY 03-008, 076] oder durch TeV-Gravitationseffekte außerhalb des Standardmodells – dann könnten die rätselhaften beobachteten kosmischen Strahlen der höchsten Energien oberhalb von 10^{11} GeV in der Tat Neutrinos statt Protonen sein [DESY 03-022, 163].

Vereinheitlichte Theorien

Theorien, die elektroschwache und starke Wechselwirkung aus einer vereinheitlichten Eichtheorie ableiten, gehören zu den am besten motivierten Erweiterungen des Standardmodells. Im Zusammenhang mit der Evidenz für Neutrinomassen und -mischungen ist speziell die Eichgruppe $SO(10)$ von aktuellem Interesse. Die Brechung dieser Symmetrie auf die Standardmodell-Gruppe kann, ausgehend von einer supersymmetrischen Theorie in sechs Raum-Zeit-Dimensionen, auf einfache Weise mit Hilfe einer „Orbifold-Kompaktifizierung“ realisiert werden. In Weiterentwicklung früherer Arbeiten wurde in [DESY 03-045] ein realistisches sechsdimensionales $SO(10)$ -Modell konstruiert, das die detaillierte Struktur der Quark- und Lepton-Massenmatrizen aus der Mischung von Bulk- und Brane-Feldern erklärt. In Modellen, die auf noch größeren Symmetriegruppen, wie E_7 oder E_8 , beruhen, besteht sogar die Möglichkeit, den Teilchengehalt des Standardmodells und das Auftreten von drei Fermion-Generationen aus der höherdimensionalen supersymmetrischen Eichtheorie zu erklären [DESY 03-069] (Abb. 58). Des Weiteren kann die für Orbifold-Modelle charakteristische Symmetriebrechung an Singularitäten in bestimmten Fällen auf die Topologie sehr einfacher „glatter“ Räume zurückgeführt werden [DESY 03-158].

Interessante phänomenologische Implikationen haben fünfdimensionale Theorien, in denen die vierdimensionale Metrik von der fünften Dimension abhängt.

Insbesondere kann die Lokalisierung der Fermionen in der fünften Dimension zu neuartigen Vorhersagen für die Verletzung der Flavour-Quantenzahlen [DESY 03-037] und für die Realisierung des Seesaw-Mechanismus zur Erzeugung von Neutrino-Massen [DESY 03-110] führen.

Die meisten vereinheitlichten Theorien sind supersymmetrisch und haben somit das für die Supersymmetrie charakteristische Problem, die Größe des so genannten μ -Terms im Higgs-Potenzial zu erklären. In [DESY 03-018] wurde ein Lösungsvorschlag vorgestellt, der auf nichtanormalen diskreten R -Symmetrien basiert und im Rahmen von vereinigten $SU(5)$ -Modellen implementiert werden kann. Neben der korrekten Größe des μ -Terms wird dabei ein leichtes Gravitino vorhergesagt.

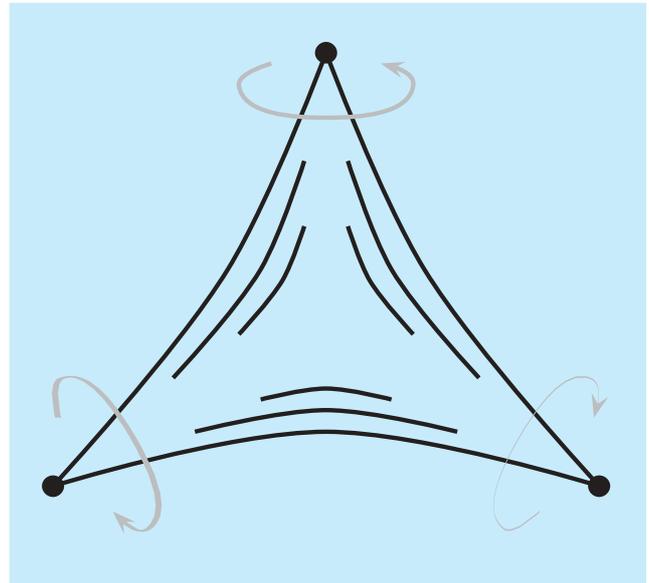


Abbildung 58: Eine mögliche Orbifold-Geometrie zur Brechung der Eichgruppe E_8 durch Wilson-Linien an 3 konischen Singularitäten.

Eine vieldiskutierte Alternative zur Vereinigung der Eichkopplungen bei einer hohen Energieskala stellen stringtheoretische D-Brane-Konstruktionen mit niedriger String-Skala dar. In [DESY 03-203] wurde untersucht, wie es in solchen Modellen zu realistischen Flavour-Strukturen kommen kann und welche untere Schranken an die String-Skala sich in diesem Zusammenhang ergeben.

Da das Standardmodell Fermionen und Bosonen enthält, sind vereinigte Theorien auf der fundamentalsten Ebene anscheinend immer auf eine mit der Poincaré-Gruppe verträgliche Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen, also auf die Supersymmetrie, angewiesen. Eine radikale Alternative wäre dadurch vorstellbar, dass die Welt bei höchsten Energieskalen rein fermionisch ist und Bosonen durch Kondensate beschrieben werden. Ein möglicher Schritt in diese Richtung wurde in [DESY 03-090] mit der rein fermionischen Formulierung einer höherdimensionalen Gravitationstheorie gegangen.

Es gibt starke theoretische Argumente, die für die Existenz von sehr leichten und sehr schwach wechselwirkenden skalaren oder pseudoskalaren Teilchen jenseits

des Standardmodells sprechen. Ein prominentes Beispiel ist das Axion, welches im Rahmen einer natürlichen Lösung des starken CP-Problems als Pseudo-Nambu-Goldstone-Boson einer spontan gebrochenen Symmetrie auftritt, die sich in vereinheitlichte Theorien einbetten lässt. In [DESY 03-057] wurde aufgezeigt, dass sich nach der Außerbetriebnahme von HERA eine einzigartige Chance für die Suche nach solchen Teilchen eröffnet: man könnte die supraleitenden HERA-Dipolmagnete in Laserexperimenten wiederverwenden, welche nach Photonregeneration oder Polarisierungseffekten in starken Magnetfeldern suchen. Dabei könnte eine Sensitivität erreicht werden, welche andere reine Laborexperimente um mehr als drei Größenordnungen übertrifft und selbst astrophysikalische Grenzen in den Schatten stellt.

Stringtheorie

Seit dem 1.1.2003 arbeitet eine neu installierte Gruppe mit Arbeitsgebiet „Stringtheorie und supersymmetrische Quantenfeldtheorien“ am II. Theoretischen Institut der Universität Hamburg. Dabei standen im Berichtszeitraum teilchenphysikalische Aspekte im Vordergrund. Die Berechnung der effektiven Wirkung als Niederenergie-Limes der Stringtheorie ist in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse. Diese effektive Wirkung beinhaltet Skalarfelder mit flachem Potenzial (Moduli), und physikalische Größen wie Massen, Eichkopplungen und Yukawa-Kopplungen hängen von den Vakuumwartungswerten dieser Skalarfelder ab. Generisch ist diese effektive Wirkung singulär, wenn zusätzliche Felder leicht (oder masselos) werden. Es konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Hinzunahme der leichten Felder immer eine nicht-singuläre Wirkung konstruiert werden kann.

Die Berechnung der effektiven Wirkung stand auch im Mittelpunkt der Arbeit [hep-th/0312232]. Hier wurde eine Klasse von Stringmodellen untersucht, in denen die Materiefelder (also das Standardmodell) auf einer D3-Brane lokalisiert sind. Die zehndimensionale Raumzeit der Stringtheorie wurde auf einer sechsdimensionalen Calabi-Yau Mannigfaltigkeit kompaktifiziert und die Kopplungen der Materiefelder an die Moduli der Calabi-Yau Mannigfaltigkeit berechnet. Durch das Anschalten von Hintergrundflüssen kann Supersymmetrie

spontan gebrochen werden. Dadurch war es möglich, die weichen Brechungsterme der Supersymmetrie zu berechnen. Diese Brechungsterme sind von teilchenphysikalischem Interesse, da sie z. B. die Massen der gesuchten supersymmetrischen Teilchen bestimmen.

Supersymmetrische Feldtheorien werden auch unabhängig von der Stringtheorie als mögliche Erweiterungen des Standardmodells betrachtet. Sie beinhalten generisch ein stabiles, schwach wechselwirkendes Teilchen, das als aussichtsreicher Kandidat für dunkle Materie diskutiert wird. Je nach Beschaffenheit dieser WIMPs sind bereits geplante Experimente für deren Nachweis sensitiv [DESY 03-024].

Stark gekoppelte supersymmetrische Feldtheorien werden auch als einfache QCD-artige Modelle untersucht. Wegen der vereinfachten Quanteneigenschaften supersymmetrischer Theorien lassen sich störungstheoretische Aspekte besser kontrollieren. Motiviert durch stringtheoretische Überlegungen hat es auf diesem Gebiet wesentliche Fortschritte gegeben. Es wurde ein Vergleich dieser analytischen Vorhersagen mit den bestehenden numerischen Simulationen auf dem Gitter durchgeführt. Überraschenderweise ergaben sich deutliche Diskrepanzen im Spektrum der Gluebälle, die nicht komplett ausgeräumt werden konnten. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig und wichtig.

Einen Zusammenhang zwischen (supersymmetrischer) QCD und Stringtheorie wird auch im Rahmen der AdS/CFT-Korrespondenz vermutet. Dabei wird nahegelegt, dass im Limes starker Kopplung Quantenfeldtheorien durch Supergravitationstheorien in fünf Raumzeit Dimensionen beschrieben werden. Auf diesem aktiven Arbeitsgebiet hat es im vergangenen Jahr interessante Entwicklungen gegeben, und eine kontrollierte Störungstheorie für eine bestimmte Klasse von Operatoren konnte vorgeschlagen werden. Aspekte der dualen Supergravitationstheorien wurden in [DESY 03-186] erarbeitet.

Quantengravitation

Die allgemein kovariante lokale Formulierung der Quantenfeldtheorie, die in den letzten Jahren in unserer Arbeitsgruppe entwickelt worden ist [DESY 02-

063], wurde auf das äußere Feld-Problem in der Quantenelektrodynamik [DESY-THESIS 04-002] und auf die thermodynamischen Eigenschaften von Zuständen in Robertson-Walker-Raumzeiten angewandt. Erstmals gestattet die neue Methode eine lokale Festlegung der Renormierungsbedingungen und ermöglicht dadurch den Vergleich physikalischer Eigenschaften in verschiedenen Raumzeiten. Im Prinzip erlaubt sie auch eine hintergrundunabhängige Quantisierung der Gravitation, wobei allerdings das Problem der Nichtrenormierbarkeit nicht gelöst wird.

Neben diesen Untersuchungen, bei denen eine kontinuierliche Raumzeit vorausgesetzt wird, wurden die Arbeiten an einer Ausdehnung der Konzepte der Quantenfeldtheorie auf eine nichtkommutative Raumzeit fortgesetzt. Diese Arbeiten sind motiviert durch die Vermutung, dass die Nichtkommutativität der Raumzeitkoordinaten eine approximative Beschreibung von

Quanteneffekten der Gravitation gestattet. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Fragen des geeigneten Lokalitätsbegriffs, der Eichinvarianz, der Renormierbarkeit und der Unitarität [DESY-THESIS-04-004]. Ausgehend von der Überlegung, dass in einer nichtkommutativen Raumzeit Punkte nicht zusammenfallen können, wurde eine ultraviolett-endliche Version einer Quantenfeldtheorie vorgestellt [DESY 03-006].

Ein anderer Ansatz beruht auf der Möglichkeit, auf diskretisierten Raumzeiten nichtkommutative Differentialkalküle einzuführen. Es konnte gezeigt werden, dass Gravitation als eine verallgemeinerte Eichtheorie in einem solchen Rahmen behandelt werden kann, wobei man die Palatini-Wirkung zugrunde legt. Dieser Ansatz, in dem die Forderung der Unitarität der Paralleltransporter aufgegeben wird, wirft ein interessantes neues Licht auf das Auftreten der Higgsfelder [hep-ph/0305331, hep-lat/0305026].