

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,
- Gittereichtheorien,
- Flavour-Physik bei B-Mesonen,
- Physik bei TESLA,
- Neutrino-Physik und Kosmologie,
- Vereinheitlichte Theorien,
- Quantengravitation.

HERA Physik und QCD

„Small-x“ Physik und Saturationsmodelle

Ein umfassender Überblick über den gegenwärtigen Stand des Verständnisses der QCD im Bereich der „small-x“ Physik ist in [DESY 02-041] enthalten; dieser Bericht ist das Resultat eines Workshops in Lund, bei dem Theoretiker aus verschiedenen Ländern ihr Wissen zusammengetragen haben. Zur Beschreibung von HERA-Daten im Bereich des Übergangs von störungstheoretischer QCD zur nichtstörungstheoretischen starken Wechselwirkung hat sich das Saturationsmodell von Golec-Biernat und Wüsthoff als sehr erfolgreich erwiesen. In [DESY 02-037] wird eine Weiterentwicklung dieses Modells beschrieben, die zu einer wesentlichen Verbesserung in der Beschreibung der Daten führt, insbesondere im Bereich größerer Q^2 . Ein viel versprechender Versuch, die Idee der Saturation auch in Hadron-Hadron Streuprozessen zu testen, wurde durchgeführt [DESY 02-219]. Die bei HERA gewonnenen Erkenntnisse zum Verhalten der Gluondichte des

Protons bei kleinen x -Werten erlauben es auch, den Fluss atmosphärischer Neutrinos aus Charm-Zerfällen abzuschätzen [DESY 02-227].

NLO Rechnungen

Im Rahmen der störungstheoretischen QCD wird der Regge Limes durch das BFKL-Pomeron beschrieben. Die Gültigkeit dieser Vorhersage ist seit mehreren Jahren in verschiedenen Streuprozessen untersucht worden (Vorwärts-Jets bei HERA, Mueller-Navelet-Jets am Tevatron und $\gamma^*\gamma^*$ -Streuung bei LEP). Dabei hat sich die Notwendigkeit gezeigt, die theoretischen Vorhersagen auch in nächstführender Ordnung („next-to-leading order“ NLO) zu berechnen. Für den Integralkern des BFKL-Pomerons liegen die Resultate seit einigen Jahren vor, während sie für die Ankopplung des BFKL-Pomerons an das Photon oder an die Jets bisher nicht zur Verfügung gestanden haben. Für die Kopplung an die Jets sind die analytischen Rechnungen jetzt abgeschlossen worden [DESY 02-090]. Zur noch nicht abgeschlossenen Berechnung des NLO-Photon-Impakt-Faktors sind neue Teilresultate veröffentlicht worden [DESY 02-114].

Physik des Photons

Der Wert der starken Kopplungskonstanten α_s wurde erstmals aus den endgültigen Daten zur Photonstrukturfunktion bei PETRA, TRISTAN und LEP bestimmt. Der neue Wert

$$\alpha_s(m_Z) = 0.1198 \pm 0.0028(\text{exp})_{-0.0046}^{+0.0034}(\text{theor})$$

stimmt mit bisherigen Analysen gut überein und erreicht eine ähnlich hohe Genauigkeit [DESY 02-052].

In einer Übersichtsarbeit wurde das aktuelle theoretische Wissen über Photonen und die Produktion von

Jets, leichten und schweren Hadronen, Quarkonia und prompten Photonen in Photon-Photon- und Photon-Hadron-Kollisionen zusammengefasst und mit den aktuellsten Daten von TRISTAN, LEP und HERA verglichen [DESY 02-086]. Virtuelle und polarisierte Photonen sowie die Hadroproduktion von Photonen wurden dabei ebenfalls berücksichtigt.

Schwere Quarks

Die Zerfallsbreite des Top-Quarks ist im Rahmen des Standardmodells so groß, dass Hadronisierungseffekte vernachlässigt werden können und das Top-Quark als quasifreies Fermion behandelt werden kann. Insbesondere kann aus der Winkelverteilung der Zerfallsprodukte die Polarisation des Top-Quarks rekonstruiert werden. Für hadronische Zerfälle polarisierter Top-Quarks wurden die QCD Korrekturen zur Winkelverteilung verschiedener Zerfallsprodukte berechnet [DESY 02-055]. Ein Vergleich dieser Vorhersagen mit zu erwartenden Daten zur Top-Produktion an Hadron- und Lepton-Beschleunigern wird eine genaue Analyse der Wechselwirkungen des Top-Quarks ermöglichen.

Nichtrelativistische QCD

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz so genannter Farboktett-Prozesse in der Natur vorher, das heißt schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Der im Rahmen dieser Theorie vorhergesagte Wirkungsquerschnitt für die inklusive Charmonium-Erzeugung in tiefunelastischer νN -Streuung wurde mit CHORUS-Daten verglichen [DESY 02-009]. Ferner wurden Vorhersagen für die assoziierte Erzeugung von Charmonia und elektroschwachen Bosonen bei TESLA, THERA, Tevatron und LHC gemacht [DESY 02-101].

Die nichtrelativistische Schwellendynamik des Top-Antitop-Systems kann wegen der Instabilität des Top-Quarks weitgehend störungstheoretisch beschrieben werden. Dies geschieht zweckmäßigerweise mit Hilfe der Potential-NRQCD (pNRQCD), einer effektiven

Feldtheorie, welche aus der NRQCD durch Ausintegration der weichen Moden und Potential-Gluonen hervorgeht. Die pNRQCD wurde nun in der dritten Störungsordnung formuliert [DESY 02-012]. So konnten Energiespektrum und Erzeugungsrate des Top-Antitop-Systems in dieser Ordnung bis auf die bislang unbekannte Korrektur zum statischen Interquarkpotential berechnet werden [DESY 02-134].

Instantonen und Saturation

ep-Streuexperimente bei kleinem Bjorken- x machen erstmals ein Regime der QCD zugänglich, in dem die Eichkopplung α_s klein ist, die Partondichten aber so groß werden, dass die übliche Störungstheorie an ihre Grenzen stößt. Während einerseits tatsächlich ein starkes Anwachsen der Gluondichte im Bereich kleiner x bei HERA gefunden wurde, gab es andererseits viel Diskussion über die Natur des Mechanismus, der schließlich zur erwarteten „Saturation“ der Dichten führt. Ein neuerer viel diskutierter Vorschlag ist, das Saturationphänomen mit dem „Farbglas-Kondensat“ zu assoziieren, einem Vielteilchen-Quantenzustand mit hoher Besetzungszahl, der als starkes klassisches Feld angesehen werden kann.

Als konkrete mögliche Realisierung eines nicht-perturbativen, auf starken klassischen Gluonfeldern beruhenden QCD-Mechanismus wurde das explizit bekannte Instanton-Eichfeld ($\propto 1/g_s$) ausführlich untersucht. Mit Hilfe von Gitterergebnissen konnte in der Tat gezeigt werden, dass Saturation für die Streuung eines $q\bar{q}$ -Farbdipols am Proton in einem Instanton-Hintergrund erfolgt. Zwei unabhängige Strategien wurden betrachtet und führten zu konsistenten Ergebnissen: Einerseits wurde von den bereits bekannten Ergebnissen der Instanton-Störungstheorie ausgegangen [DESY 02-093, 094]; andererseits wurde die $(q\bar{q})p$ -Streuung im nicht-abelschen Eikonalformalismus in Form einer Wechselwirkung von Wilson-Loops im Instanton-Hintergrund analysiert [DESY 02-220]. In beiden Fällen bestimmt die auf dem Gitter gemessene, wohldefinierte mittlere Instantongröße $\langle\rho\rangle \approx 0.5$ fm die Saturationsskala. Im entsprechenden Dipolwirkungsquerschnitt erkennt man einen „Wettbewerb“ zwischen der $q\bar{q}$ -Dipolgröße r einerseits und der Größenskala

$\langle \rho \rangle$ des Hintergrund-Instantons andererseits. Es ergibt sich ein anschaulich geometrisches Bild [DESY 02-093, 094]: Nimmt die Dipolgröße r hadronische Dimensionen an, $r \geq \langle \rho \rangle$, so saturiert der Dipolwirkungsquerschnitt zu einem Wert proportional der dem Hintergrund-Instanton entsprechenden Fläche $\pi \langle \rho \rangle^2$. Für kleine Werte von r dominiert hingegen die Fläche πr^2 des $q\bar{q}$ -Dipols, das heißt man findet die erwartete „Farbtransparenz“ im Grenzwert verschwindender r wieder.

QCD am Hadron Collider

Die diffraktive Produktion von Higgs-Bosonen an Hadron-Collidern ist von besonderem Interesse, da der reduzierte Untergrund den Nachweis des Higgs-Bosons sehr erleichtern würde. Die entscheidende Frage ist daher, ob der Produktionswirkungsquerschnitt groß genug ist. Das „Soft Colour Interaction Model“, das sich bereits früher bei der diffraktiven Streuung bei HERA und am Tevatron als erfolgreich erwiesen hat, sagt voraus, dass die diffraktive Higgs-Produktion am Tevatron nur zu einigen wenigen Ereignissen führen kann, während die Ereignisrate am LHC wesentlich aussichtsreicher sein wird [hep-ph/0203267].

Wegen seiner deutlichen experimentellen Signatur ist, trotz seiner starken Unterdrückung, der Zerfallskanal $H \rightarrow \gamma\gamma$ von besonderem Interesse. Es wurde jedoch gezeigt, dass die Untergrundprozesse $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ und $gg \rightarrow \gamma\gamma$ mit prompten Photonen diesen Zerfall immer überdecken; daher müssen andere Zerfälle des Higgs betrachtet werden [hep-ph/0210408]. Andererseits kann der Nachweis solcher prompter Photonen in $gg \rightarrow \gamma\gamma$ einen grundlegenden Baustein der diffraktiven Higgs Produktion testen, nämlich die geschlossene Quark-Schleife.

Mit Hilfe des Lund String-Modells für die Hadronisierung lässt sich die Polarisation von Λ -Teilchen erklären. In einer neuen Untersuchung wurde dieser Mechanismus auf den Niederenergie-Prozess $p\bar{p} \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ angewandt, und mit Hilfe einer Verallgemeinerung des Diquark-Modells konnten Winkelverteilung, Polarisation und die Spin-Korrelation zwischen Λ und $\bar{\Lambda}$ erfolgreich beschrieben werden [hep-ph/0204022]. Zusammen mit früheren Resultaten zeigt dies, dass der Polarisationsmechanismus dieses Modells die Polari-

sation des Λ sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Energien richtig beschreibt; er ist eine natürliche Folge der Tatsache, dass das Aufbrechen eines Strings ein lokaler Effekt ist und nicht wesentlich abhängt von der Gesamtenergie und Länge des Strings.

Gittereichtheorie

Die Arbeiten im Bereich Gittereichtheorien konzentrierten sich auf die Themen Supersymmetrie auf dem Gitter, Entwicklung von Simulationsalgorithmen für dynamische Fermionen sowie die Simulation von Gitter-Fermionen mit exakter chiraler Symmetrie. Eine wichtige Anwendung war die Berechnung von Kopplungskonstanten der effektiven chiralen Lagrangedichte, der so genannten „Gasser-Leutwyler-Koeffizienten“, deren Werte die Bestimmung einiger fundamentaler Größen des Standardmodells ermöglichen.

Supersymmetrie auf dem Gitter

Bei der Gitter-Regularisierung supersymmetrischer Theorien wird die Supersymmetrie durch Gitter-Artefakte gebrochen. Es wird erwartet, dass die Supersymmetrie im Kontinuumslimes restauriert wird. Daraus folgt, dass die supersymmetrischen Ward-Takahashi-Identitäten (SWTI) bei genügend kleinen Gitterkonstanten in guter Näherung erfüllt werden müssen. Die DESY-Münster-Roma-Kollaboration hat die SWTIs in der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie untersucht [DESY 01-141]. Die Resultate zeigen, dass in den numerischen Simulationen die SWTIs erwartungsgemäß relativ gut erfüllt sind. Der allgemeine Fortschritt der letzten Jahre bei den numerischen Untersuchungen der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie wurde in einem Review-Artikel zusammengefasst [DESY 01-214].

Leichte dynamische Quarks

In einer ausführlichen numerischen Studie wurden die Simulationskosten für die QCD mit dynamischen

Quarks als Funktion der Quarkmasse untersucht, unter Verwendung des so genannten „Two-Step Multi-Boson Algorithmus“ (TSMB) [DESY 02-083]. Die Abhängigkeit des benötigten Aufwands als Funktion des Gitter-Volumens wurde auch in einigen Fällen bestimmt [DESY 02-146]. Diese Resultate sind für die Planung zukünftiger numerischer Simulationen nützlich. Kostenabschätzungen für die vielfach verwendeten HMC- und PHMC-Algorithmen sowie eine Reihe von fermionischen Formulierungen (improved staggered, Domain Wall, Overlap, Wilson) wurden ebenfalls diskutiert [hep-lat/0203021].

Eine wichtige Bedingung dafür, dass die systematischen Fehler in QCD-Simulationen kontrolliert werden können, ist, dass die dynamischen Quarkmassen klein genug für die Anwendung der chiralen Störungstheorie sein müssen. Es besteht der allgemeine Konsens, dass hierzu Daten bei wesentlich kleineren Quarkmassen nötig sind als bislang typischerweise simuliert worden sind. Die so genannten chiralen Logarithmen im Bereich leichter Quarkmassen verursachen starke Abweichungen vom naiven chiralen Verhalten vieler physikalischer Größen, deren Berücksichtigung für eine korrekte Extrapolation zu physikalischen Werten der Quarkmassen jedoch wesentlich ist [hep-lat/0209086]. Die numerischen Daten der qq+q-Kollaboration haben das typische qualitative Verhalten mit chiralen Logarithmen zum ersten Mal gezeigt [DESY 02-083, 146]. Die CPPACS- und die JLQCD-Kollaboration in Japan konnten dieses wichtige Ziel trotz eines wesentlich höheren Aufwands an Rechenzeit bislang noch nicht erreichen.

Die bisherigen Simulationen mit leichten Quarks wurden mit der Wilson-Wirkung durchgeführt. Die Möglichkeit der Anwendung des TSMB Algorithmus für verbesserte Wirkungen wurde ebenfalls untersucht [DESY 01-187, 02-044].

Quarkmassen

Der gegenwärtige Stand der Bestimmung der Quarkmassen aus Gittersimulationen wurde in Übersichtsartikeln und -vorträgen erörtert [DESY 02-030, 164]. Die Masse des strange-Quarks ist demnach die am genauesten bekannte Größe in der so genannten „quenched“ Approximation. Eine weitergehende signifikante Re-

duktion der systematischen Fehler erfordert die Quantifizierung der Effekte dynamischer Quarks.

Die Frage nach der Masse des up-Quarks kann durch Bestimmung der Gasser-Leutwyler-Koeffizienten beantwortet werden. Bisherige Untersuchungen, die mit Massen in der Nähe der strange-Quarkmasse durchgeführt wurden, weisen darauf hin, dass das up-Quark eine nicht-verschwindende Masse hat. Einen endgültigen Schluss kann man jedoch aus den vorliegenden Ergebnissen noch nicht ziehen. Weitere Untersuchungen bei kleineren Quarkmassen sind notwendig, um diese Frage schlüssig zu beantworten [DESY 02-164]. Die Beobachtung der chiralen Logarithmen in Simulationen mit dem TSMB-Algorithmus [DESY 02-083, 146] macht den Weg frei für die genaue numerische Bestimmung der Gasser-Leutwyler-Koeffizienten der chiralen Lagrangefunktion.

Chirale Fermionen im ϵ -Regime

Das so genannte ϵ -Regime der QCD wird für beliebig kleine Quarkmassen im endlichen Volumen realisiert und kann systematisch durch chirale Störungstheorie beschrieben werden. Insbesondere lassen sich analytische Ausdrücke für das Skalenverhalten von Größen wie dem Quark-Kondensat ableiten. Aus Gitterdaten können mit Hilfe dieser Ausdrücke die Gasser-Leutwyler-Koeffizienten im unendlichen Volumen bestimmt werden.

Eine methodologisch konsistente Beschreibung des ϵ -Regimes auf dem Gitter wird durch die Verwendung von Gitter-Fermionen mit exakter chiraler Symmetrie ermöglicht. Numerische Simulationen werden jedoch erschwert durch die Präsenz exakter Nullmoden und kleiner Eigenwerte des entsprechenden Dirac-Operators, gegen die die verwendeten, beliebig kleinen Quarkmassen keinen ausreichenden Schutz bieten. In einer Arbeit wurden einige Techniken vorgestellt, mit deren Hilfe sich das ϵ -Regime wesentlich effizienter simulieren lässt [DESY 02-212]. Insbesondere lässt sich ein Faktor 8 in der Berechnung von Quarkpropagatoren im ϵ -Regime gewinnen. Die Anwendung auf die Bestimmung von Eigenwertverteilungen und der Vergleich mit der „Random Matrix Theorie“ sowie die Berechnung von Matrixelementen des effektiven schwachen „Hamiltonians“ für Kaon-Zerfälle wird vorbereitet.

Nutzung von PC Clustern

Ein wichtiges Hilfsmittel für die Arbeit der Gittergruppe ist das im Januar 2002 in Hamburg installierte PC Cluster mit 32 Knoten (Abb. 56), welche im August 2003 mit je einem weiteren Prozessor aufgerüstet worden sind.

Ein erheblicher Teil der Arbeit bestand in der Erstellung von Programmbibliotheken zur effizienten Simulation von Ginsparg-Wilson Fermionen in der „quenched“ Approximation sowie von dynamischen Wilson-Fermionen mit dem TSMB-Algorithmus. Als essentiell erwies sich hierbei die Benutzung der SSE/SSE2 Register, die eine Vektorisierung von zentralen Routinen ermöglichen. Auf diese Weise konnte eine Beschleunigung des Codes um einen Faktor 4 („single precision“) bzw. einen Faktor 2 („double precision“) erreicht werden. Die erstellten Programmteile wurden teilweise im Rahmen der Arbeit der Evaluierungsgruppe des „Lattice Forums“ verwendet, um die Leistung verschiedener Rechnerplattformen zu vergleichen.

B-Physik

Dank der erfolgreichen Experimente BABAR und BELLE durchläuft die B-Meson Physik eine rasante Entwicklung. Diese Experimente haben vor allem neue und genauere Messungen der Materie-Antimaterie Asymmetrie (auch CP Asymmetrie genannt) in B Zerfällen und den seltenen B-Mesonen Zerfällen geliefert. Die Präzisionsmessungen auf diesem Gebiet erlauben es, ein quantitatives Bild der Flavourübergänge innerhalb des Standardmodells zu gewinnen, und sind gleichzeitig für die Suche nach neuer Physik jenseits des Standardmodells von enormer Wichtigkeit. Diese Aspekte der Flavourphysik sind auch Bestandteil der seit einigen Jahren laufenden und auch im Jahr 2002 fortgesetzten theoretischen Untersuchungen in der Gruppe Theorie und am II. Institut der theoretischen Physik der Universität Hamburg. Wesentliche Punkte dieser Untersuchungen, die im Jahr 2002 vorwiegend im Standardmodell und in supersymmetrischen Theorien durchgeführt wurden, sind in diesem Abschnitt zusammengefasst.



Abbildung 56: Das 32-Knoten PC Cluster bei DESY-Hamburg.

Die gemessene CP-Asymmetrie in den Zerfällen $B^0/B^{\bar{0}} \rightarrow J/\psi K_S, B^0/B^{\bar{0}} \rightarrow J/\psi K_L$, welche die erste Messung der CP Asymmetrie außerhalb der K-Mesonen darstellt, ermöglicht es, den inneren Winkel β im Unitaritätsdreieck zu bestimmen. Der aktuelle Mittelwert $\sin 2\beta = 0.734 \pm 0.054$ ist mit dessen indirekten Abschätzungen innerhalb des Standardmodells in sehr guter Übereinstimmung. Die Konsistenz der gemessenen CP Asymmetrien in B- und K-Mesonen mit dem Standardmodell führt zu dem Schluss, dass die CP Asymmetrie in Quarkübergängen durch die Phase in der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix dominiert ist [DESY 02-110]. Dennoch ist ein Beitrag der Physik jenseits des Standardmodells nicht ganz auszuschließen. Diese Möglichkeit wurde innerhalb der supersymmetrischen Modelle untersucht [DESY 02-085, 089]. Neben anderen Effekten sagen diese Modelle für die Zerfälle $B \rightarrow (X_d, \rho, \omega)\gamma$ Zerfallsraten und Asymmetrien vorher, die von denen des Standardmodells abweichen. Außerdem führen die supersymmetrischen Effekte zur indirekten Abschätzung der Winkel α und β im CKM-Unitaritätsdreieck, die von denen des Standardmodells abweichen können. Eine direkte Messung der Winkel α und β ist bis jetzt nicht gelungen, wird aber in der Zukunft von Experimenten an B-Fabriken sowie am Beschleuniger LHC (Large Hadron Collider) am CERN erwartet. Theoretische Vorschläge für die Bestimmung dieser Winkel mit Hilfe der Symmetrien im Flavour-

raum sowie mit Hilfe der Korrelationen in hadronischen Zerfällen $B \rightarrow \pi\pi$, $B \rightarrow K\pi$ und $B_s \rightarrow K^+K^-$ wurden unterbreitet [DESY 02-102, 040]. Ferner wurden die verschiedenen CP Asymmetrien innerhalb der B-Mesonen in Zusammenhang mit dem Zerfall $K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$ theoretisch untersucht [DESY-THESIS-2002-022].

Der seltene Zerfall $B \rightarrow X_s\gamma$ ist eine wichtige Quelle für die Untersuchung der Physik in so genannten elektromagnetischen Pinguin-Amplituden. Präzisionstheorie auf diesem Gebiet und die Messungen erlauben es, den Wert des CKM Matrixelements V_{ts} zu extrahieren. Der resultierende Wert $|V_{ts}| = (47 \pm 8) \times 10^{-3}$ ist mit dem genaueren Wert $|V_{ts}| = (41 \pm 2) \times 10^{-3}$, der sich mit Hilfe der CKM-Unitarität berechnen lässt, in Einklang. Die vorhandenen Messungen und die theoretisch erzielte Genauigkeit erlauben es, mögliche Abweichungen vom Standardmodell zu quantifizieren. Insbesondere die Zerfallsrate für $B \rightarrow X_s\gamma$ liefert nicht-triviale Schranken für die supersymmetrischen Modelle [DESY 01-217, 224]. Die exklusiven Zerfälle $B \rightarrow (K^*, K^{**})\gamma$ liefern wichtige Information über die Dynamik der Flavourübergänge; diese Zerfälle wurden theoretisch mit Hilfe der „Heavy Quark Effective Theory“ (HQET) und der Lichtkegel Summenregeln untersucht [DESY 02-047]. Die CKM-unterdrückten Zerfälle $B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma$ sind nicht nur für die Bestimmung des CKM Matrixelements $|V_{td}|$ sehr wichtig, sondern bieten sich auch als vielversprechende Prozesse für die Suche nach neuer Physik in $b \rightarrow d\gamma$ Übergängen an [DESY 02-089].

Inzwischen ist es den B-Fabrik Experimenten gelungen, auch die Zerfälle $B \rightarrow X_s\ell^+\ell^-$ und $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$, die durch die elektroschwachen Pinguin-Amplituden dominiert sind, zu messen. In einer vorangegangenen Arbeit, die sich für die Analyse der experimentellen Daten innerhalb des Standardmodells als sehr hilfreich erwiesen hat, wurden die Voraussagen für diese Zerfälle theoretisch verbessert [DESY 01-217]. Auch die Messungen auf diesem Gebiet sind mit dem Standardmodell in Einklang, jedoch lassen die experimentellen und verbleibenden theoretischen Unsicherheiten Spielraum für signifikante Abweichungen vom Standardmodell. Theoretische Analysen der vorhandenen Daten erlauben es, den relevanten Wilsonkoeffizienten in einer effektiven Theorie zu extrahieren. Durch

genauere Messungen des dileptonischen Massenspektrums sowie der Vorwärts-Rückwärts Asymmetrie in den Zerfällen $B \rightarrow (X_s, K^*)\ell^+\ell^-$ werden diese Koeffizienten festgelegt. Um die Abschätzungen im Rahmen des Standardmodells zu erhärten, sind Vorschläge unterbreitet worden, die es ermöglichen, mit Hilfe der HQET theoretische Unsicherheiten in den Zerfällen $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$ zu reduzieren [DESY 02-005, 143, DESY-THESIS-2002-040].

Physik bei TESLA

Supersymmetrie

Standard Teilchenphysik wird durch eine Energieskala von etwa 100 GeV charakterisiert. Jedoch vermutet man, dass die Wurzeln für alle physikalischen Phänomene, die experimentell beobachtet werden, im Bereich der Planck-Länge von $\lambda_{\text{PL}} = 10^{-33}$ cm liegen, äquivalent zu Energien nahe der Planck-Skala von $M_{\text{PL}} = 10^{19}$ GeV.

Die Supersymmetrie (SUSY) baut eine stabile Brücke zwischen diesen weit voneinander entfernten Energieskalen. Diese Symmetrie ist jedoch nicht exakt, und der Mechanismus, der sie bricht, wird ebenfalls an dieser hohen Skala in einem verborgenen Sektor vermutet, der mittels der Gravitationswechselwirkung an unsere Eigen-Welt gekoppelt ist.

Um die fundamentalen Strukturen von Theorien bei Skalen nahe der Planck-Skala zu studieren, stehen uns nur wenige Instrumente zur Verfügung. Proton-Zerfall, Neutrino-Physik und Kosmologie könnten Licht auf diese Region werfen. Ein reiches Ensemble von Informationen könnten uns aber auch die Parameter supersymmetrischer Theorien zur Verfügung stellen, wenn sie in gut kontrollierter Form von Labor-Energien zur Planck-Skala extrapoliert werden. Kopplungen und Massen müssen jedoch sehr präzise gemessen werden, um die ungeheure Distanz von 13 bis 16 Größenordnungen in der Energie theoretisch zu überbrücken. Die erforderlichen Präzisionsexperimente lassen sich an Lepton Collidern im sub-TeV (TESLA) und im multi-TeV Bereich (CLIC) ausführen, wohingegen Hadron Collider nur unvollständige a-posteriori Tests erlauben.

Higgs-Bosonen

Wenn geladene Higgs-Bosonen (H^\pm), die in supersymmetrischen Theorien vorhergesagt werden, wegen ihrer hohen Masse bei TESLA nicht paarweise erzeugt werden können, dann stellen die Reaktionen $e^+e^- \rightarrow t\bar{b}H^-, \bar{t}bH^+$ für große Werte des Parameters $\tan\beta$, dem Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der beiden Higgs-Felder, den führenden Erzeugungsmechanismus dar. Für den Wirkungsquerschnitt dieses Prozesses wurden die QCD- bzw. SUSY-QCD-Korrekturen berechnet, um so eine zuverlässige Vorhersage zu gewinnen [DESY 02-057].

SUSY-Teilchenphänomenologie

In supersymmetrischen Theorien wird das Spektrum der fundamentalen Teilchen gegenüber dem Standardmodell (mehr als) verdoppelt. Jedem Teilchen im Standardmodell wird ein supersymmetrischer Partner zugeordnet, unterschieden um eine halbe Einheit des Spins. Supersymmetrische Teilchen müssen höhere Massen besitzen, wechselwirken jedoch mit denselben Kopplungsstärken wie Standardteilchen.

Der steile Anstieg der Exzitationskurven an der Schwelle ermöglicht es, die Massen von paarweise erzeugten supersymmetrischen Leptonen in e^+e^- Collidern mit einer Genauigkeit von einigen Promille zu bestimmen [DESY 02-176, 182]. Die sorgfältige Berechnung von Effekten, die durch die kurze Lebensdauer und Strahlungskorrekturen verursacht werden, ist dabei unabdingbar.

Im Rahmen des Minimalen Supersymmetrischen Standardmodells (MSSM) werden Gluino-Paare in der Elektron-Positron-Vernichtung über virtuelle Quark-Squark-Schleifen erzeugt, wobei aufgrund der destruktiven Interferenz verschiedener Diagramme hauptsächlich die stark mischenden Squarks der dritten Generation beitragen. Durch eine sorgfältige Analyse dieser Diagramme konnte das Potential linearer Elektron-Positron-Beschleuniger, wie zum Beispiel TESLA, für die Gluino-Paarproduktion untersucht werden. Dabei wurde für realistische Strahlpolarisationsgrade und unter Berücksichtigung aktueller Massengrenzen der Parameterraum des MSSM auf sichtbare Wirkungsquerschnitte hin untersucht und die Genauigkeit einer

Gluino-Massenbestimmung abgeschätzt [DESY 02-119].

Eine fundamentale Vorhersage, die auch bei gebrochener Supersymmetrie gilt, ist die Gleichheit der Yukawa-artigen Kopplungen zwischen Gauginos, Sfermionen und Fermionen einerseits und den entsprechenden Eichkopplungen zwischen Sfermionen bzw. Fermionen und Eichbosonen andererseits. Diese Vorhersage kann im QCD-Sektor des MSSM getestet werden durch Betrachtung der Raten für die Prozesse $e^+e^- \rightarrow \text{Squark}+\text{Antiquark}+\text{Gluino}$ und $e^+e^- \rightarrow \text{Squark}+\text{Antisquark}+\text{Gluon}$. Diese Raten wurden in nächstführender Ordnung in der starken Kopplung berechnet, um eine ausreichende Genauigkeit der Vorhersage zu gewährleisten [DESY 02-097].

Die Wellenfunktionen supersymmetrischer Teilchen sind infolge von quantenmechanischen Mischungseffekten von sehr komplexer Natur, besonders im Sektor der supersymmetrischen Partner der neutralen Eichbosonen γ, Z und der Higgs-Bosonen. Nichtsdestoweniger gelingt es, an Lepton Collidern ein vollständiges und detail-genaues Bild der Eigenschaften dieser Teilchen zu gewinnen [DESY 02-020].

Neben der direkten Produktion supersymmetrischer Teilchen können diese auch als virtuelle Korrekturen die Eigenschaften bekannter Teilchen verändern. Die Schleifenbeiträge von Charginos und Neutralinos zur W-Paarzeugung in der Elektron-Positron-Vernichtung unter Berücksichtigung CP-verletzender Phasen wurden untersucht [DESY 02-205]. Es zeigte sich, dass die Gaugino-Korrekturen im MSSM für longitudinale W-Bosonen über einem Prozent liegen können, während die CP-verletzenden Asymmetrien mit maximal 0.1% klein bleiben. Analog wurde für polarisierte Top-Quarks der Einfluss von Squarks und Gluinos auf die differentielle Zerfallsverteilung untersucht [DESY 02-095].

Physik nahe der Planck-Skala

Basierend auf Hochpräzisionsmessungen lassen sich die Kopplungen und Massen mit feldtheoretischen Methoden zu Energieskalen in die Nähe der Planck-Skala fortsetzen, an der sich die fundamentalen Wechselwirkungen vereinheitlichen. In der Supergravitation entwickeln sich die Massen auf diesen Punkt hin zu ei-

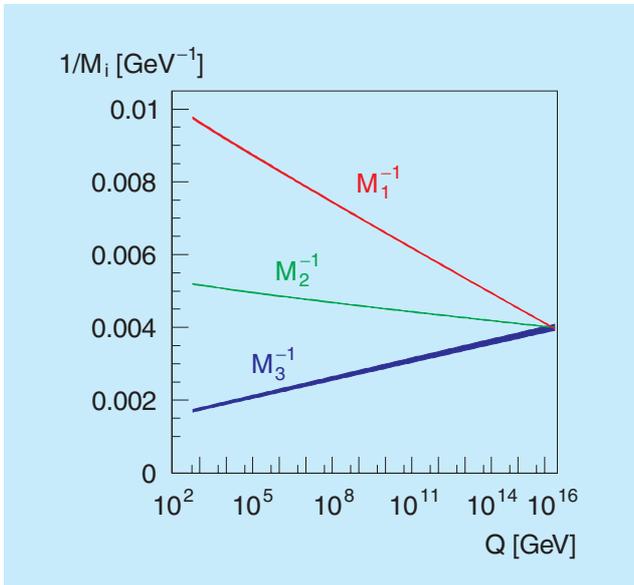


Abbildung 57: Evolution von Massenparametern in der Supergravitation von der elektroschwachen zur Vereinigungsskala.

nem universellen Wert [DESY 02-166, 175], wie es in Abbildung 57 vorhergesagt wird. Damit können Hochpräzisions-Instrumente wie TESLA und CLIC als Teleskope dienen, mit deren Hilfe die Struktur der Physik in Energieregionen nahe der Planck-Skala analysiert

Parameter	Ideal	Rekonstruiert
$m_{3/2}$	180	179.9 ± 0.4
$\langle S \rangle$	2	1.998 ± 0.006
$\langle T \rangle / m_{3/2}$	14	14.6 ± 0.2
$\sin \theta$	0.949	0.948 ± 0.001
g_s^2	0.5	0.501 ± 0.002
δ_{GS}	0	0.1 ± 0.4
n_L	-3	-2.94 ± 0.04
n_Q	0	0.02 ± 0.02
n_{H_1}	-1	-0.96 ± 0.06

Tabelle 3: Vergleich von rekonstruierten Werten mit den idealen fundamentalen Parametern in einer Superstring-induzierten effektiven Feldtheorie. Die Parameter kennzeichnen Massen, Werte von Feldern im Vakuum, Mischungen von Feldern und Kopplungen.

werden kann, wo die Teilchenphysik mit der Gravitation verbunden ist und die mikroskopischen Wurzeln der gesamten Physik liegen.

Das hohe Entdeckungspotential von e^+e^- Collidern im Bereich fundamentaler physikalischer Fragestellungen ist ebenfalls in der Analyse effektiver feldtheoretischer Parameter ersichtlich, wie sie aus Superstring-Theorien entwickelt werden. Ohne ins Detail zu gehen, zeigt der Vergleich von Idealwerten mit simulierten Messwerten von TESLA und CLIC in Tabelle 3, mit welcher hoher Präzision Superstring-induzierte Szenarien untersucht werden können.

Neutrino-Physik und Kosmologie

Die höchstenergetische kosmische Strahlung gibt möglicherweise einen Hinweis auf die Masse der niederenergetischsten Überbleibsel vom Urknall – der Neutrinos. Deren mittlere Dichte ist direkt proportional zur experimentell sehr gut bekannten mittleren Photondichte der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung und daher – theoretisch sehr verlässlich – zu 56 Neutrinos pro Kubikzentimeter und pro Neutrinospezies vorhergesagt. Ultrahochenergetische kosmische Neutrinos aus astrophysikalischen Quellen könnten sich bei den Resonanzenergien $E_{\nu_i}^{Res} = 4 \cdot 10^{21} \text{ eV (eV/m}_{\nu_i})$ mit den Urknallneutrinos vernichten und Z-Bosonen („Z-Bursts“) erzeugen, deren hadronische Zerfallsprodukte, insbesondere Protonen, möglicherweise den Hauptbestandteil der höchstenergetischen kosmischen Strahlung bilden.

Auf diese Weise könnte auch eines der größten Rätsel der kosmischen Strahlung gelöst werden. Dieses besteht in der Tatsache, dass eine signifikante Anzahl von kosmischen Strahlen mit Energien oberhalb von $4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ beobachtet wurde, obwohl das Spektrum einen starken Abfall zeigen sollte, da oberhalb dieser Energie Nukleonen einen sehr großen Energieverlust durch unelastische Wechselwirkungen mit den kosmischen Hintergrundphotonen erleiden. Das Energiespektrum der höchstenergetischen kosmischen Strahlen hängt stark von der Masse des schwersten Neutrinos ab, falls sie tatsächlich durch oben erwähnte Z-Bursts entstehen. Eine umfangreiche quantitative Untersuchung liefert einen Massenbereich von $0.08 \text{ eV} \leq m_{\nu_3} \leq 0.4 \text{ eV}$ für

das schwerste Neutrino [DESY 02-014, 145]. Dieser Massenbereich ist verträglich mit sonstigen experimentellen und kosmologischen Hinweisen über die Neutrinomassen. Die erforderlichen ultrahochenergetischen kosmischen Neutrinos sollten in naher Zukunft vom Neutrinoobservatorium AMANDA und vom Pierre Auger Luftschauerexperiment gesehen werden, sonst ist das Z-Burst-Szenario ausgeschlossen.

Massive Neutrinos können entweder Dirac- oder Majorana-Teilchen sein. Im letzteren Fall führen sie zu Prozessen, die die Leptonzahl verletzen, insbesondere dem neutrinolosen doppelten β -Zerfall. Schwere Majorana-Neutrinos sind auch die Basis für Modelle der Baryogenese durch die Erzeugung einer Lepton-Asymmetrie in der Frühphase des Universums. Eine detaillierte Untersuchung zeigte, dass dieser Mechanismus der Leptogenese die Summe der Quadrate der Neutrinomassen, die ein Maß für die gesamte Leptonzahl-Verletzung darstellt, stark einschränkt [DESY 02-058]. Zusammen mit der durch solare und atmosphärische Neutrinos gewonnenen Information über die Differenz der Quadrate von Neutrinomassen lässt sich daraus eine obere Schranke von 0.2 eV an alle Neutrinomassen ableiten [DESY 02-107], die restriktiver ist als andere in der Kosmologie und in Labor-Experimenten gewonnene Massenschranken. Einen allgemeinen Überblick über Neutrinophysik und Leptogenese geben die Vorlesungen [DESY 02-32].

Die Resultate der Experimente BOOMERanG und DASI geben zum ersten Mal Einblick in Details der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Rückschlüsse auf den Ursprung der Dichtefluktuationen zur Zeit der Entkopplung erlauben. Insbesondere die Skalenabhängigkeit des spektralen Index unterscheidet zwischen verschiedenen Modellen der Inflation. Eine Untersuchung der Hintergrundstrahlung zusammen mit Lyman- α und 2dF „Galaxy Redshift Survey“ Daten wurde für Modelle mit „laufender“ Inflation durchgeföhrt [DESY 02-136]. Im Fall niedriger Temperatur nach der Inflation, das heißt unterhalb von 10^6 GeV, könnte die dunkle Materie des Universums aus exotischen Teilchen, Axinos, den Superpartnern von Axionen, bestehen. Solche Teilchen haben sehr schwache Kopplungen an Materie und können in Squark-Zerfällen sowie in thermischen Quark-Squark-Streuprozessen erzeugt werden [DESY 02-80].

Vereinheitlichte Theorien

Im Zusammenhang mit der Evidenz für Neutrinomassen und -mischungen sind vereinheitlichte Theorien mit der Eichgruppe SO(10) von aktuellem Interesse. Die Brechung dieser Symmetrie auf die Standardmodell-Eichgruppe kann auf einfache Weise mit Hilfe einer „Orbifold-Kompaktifizierung“ realisiert werden, ausgehend von einer supersymmetrischen Theorie in sechs Raumzeit-Dimensionen. Ein solches Modell wurde in [DESY 02-046] weiter entwickelt, insbesondere im Hinblick auf die Struktur der Anomalien in vier und sechs Dimensionen [DESY 02-115].

Interessante phänomenologische Implikationen haben fünf-dimensionale Theorien, in denen die vierdimensionale Raumzeit-Metrik von der fünften Dimension abhängt. Dies führt zu neuen Strukturen für Neutrinomassen und -mischungen [DESY 02-045]. Der Mechanismus, der in diesen Modellen zur Hierarchie von Fermi- und Planck-Massenskalen führt, kann auch eine sehr kleine kosmologische Konstante erklären [DESY 02-098].

Ein zentrales Problem vereinheitlichter Theorien ist die Vereinigung der Eichkopplungen des Standardmodells. Während in vier Dimensionen die Kopplungen logarithmisch von der Massenskala abhängen, treten in fünf und mehr Dimensionen zusätzlich potenzartige Korrekturen auf. Es wurde gezeigt, dass diese Korrekturen unter bestimmten Bedingungen im Rahmen einer feldtheoretischen Rechnung bestimmt werden können [DESY 02-218].

Schwarze Löcher gehören zu den bemerkenswertesten, aber auch mysteriösesten Objekten in der Physik. Seit Stephen Hawking's Vorhersage der Quantenevaporation spielen sie eine wichtige Rolle in jedem Versuch, eine Theorie der Quantengravitation aufzustellen. Für reale, astrophysikalische Schwarze Löcher ist der Hawking-Effekt jedoch so klein, dass eine Beobachtung ausgeschlossen scheint. Für mikroskopische Schwarze Löcher wäre der Effekt hingegen beobachtbar. Deren Produktion würde jedoch nach den gängigen Vorstellungen Schwerpunktsenergien von der Größenordnung der Planck-Skala $M_{\text{pl}} = 10^{19}$ GeV erfordern. Im Kontext von Theorien jenseits des Standardmodells, welche $D - 4 \geq 1$ extra Raumzeit-Dimensionen und eine neue fundamentale Planck-Skala

$M_D \geq 1$ TeV postulieren, erwartet man die Produktion von mikroskopischen Schwarzen Löchern jedoch schon bei Schwerpunktsenergien oberhalb M_D [DESY 02-053, 197, 159]. Die Sensitivität der Neutrinoobservatorien AMANDA und RICE für den Nachweis von mikroskopischen Schwarzen Löchern, welche möglicherweise in der Streuung von ultrahochenergetischen Neutrinos an Nukleonen im antarktischen Eis produziert werden, wurde intensiv untersucht [DESY 02-001]. Es wurde gezeigt, dass AMANDA und RICE schon vor der Inbetriebnahme des LHC starke Einschränkungen an die Produktion Schwarzer Löcher liefern und im günstigsten Fall eine erste Evidenz finden können.

Quantengravitation

Eins der großen Probleme der Quantenfeldtheorie ist ihre Vereinbarkeit mit dem Lokalitätsprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die allgemein kovariante Formulierung der Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Raumzeiten, einschließlich der Renormierung, die in den letzten Jahren von unserer Arbeitsgruppe durchgeführt worden ist, ist im generischen Fall einer Raumzeit mit trivialer Symmetriegruppe nicht lokal in dem Sinne, dass globale Information über die Struktur der Raumzeit in die Konstruktion eingeht. Dies führt zu dem Problem, dass Renormierungsvorschriften an verschiedenen Raumzeitpunkten nicht miteinander verglichen werden können. In einer kürzlich fertig gestellten Arbeit wurde ein neues Paradigma für Quantenfeldtheorien auf Mannigfaltigkeiten vorgeschlagen: Quantenfeldtheorien werden danach simultan auf allen Raumzeiten einer geeigneten Klasse (zum Beispiel global hyperbolisch) erklärt, so dass zu jeder

Einbettung einer Raumzeit in eine andere ein Homomorphismus der zugehörigen Operatoralgebren gehört [DESY 02-063]. Mathematisch handelt es sich bei dieser Struktur um einen kovarianten Funktor zwischen der Kategorie der Raumzeiten und der der Operatoralgebren.

In einer weiteren Arbeit wurde die störungstheoretische Struktur der klassischen Feldtheorie untersucht und das klassische Analogon der Schwinger-Dyson-Gleichung identifiziert. Hieraus ergab sich eine Neuformulierung und Verallgemeinerung der Ward-Identitäten [DESY 02-211]. Andere Arbeiten beschäftigten sich mit dem Unruh-Effekt [math-ph/0203011], einer nichtrelativistischen Version des Spin-Statistik-Theorems [quant-ph/0208151], dem Infrarotproblem [hep-th/0208230, 0211046] und der Unschärfe von Zeitmessungen [quant-ph/0207048]. Eine Anwendung der Positivitätsaussagen über den Energie-Impuls-Tensor auf gekrümmten Raumzeiten auf Probleme der Quantenoptik wurde diskutiert [quant-ph/0203027].

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. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer konsequent an den Prinzipien der Quantenfeldtheorie ausgerichteten Definition der Theorie das Problem der Unitaritätsverletzung nicht auftritt [DESY 02-028].