

H1 preliminary

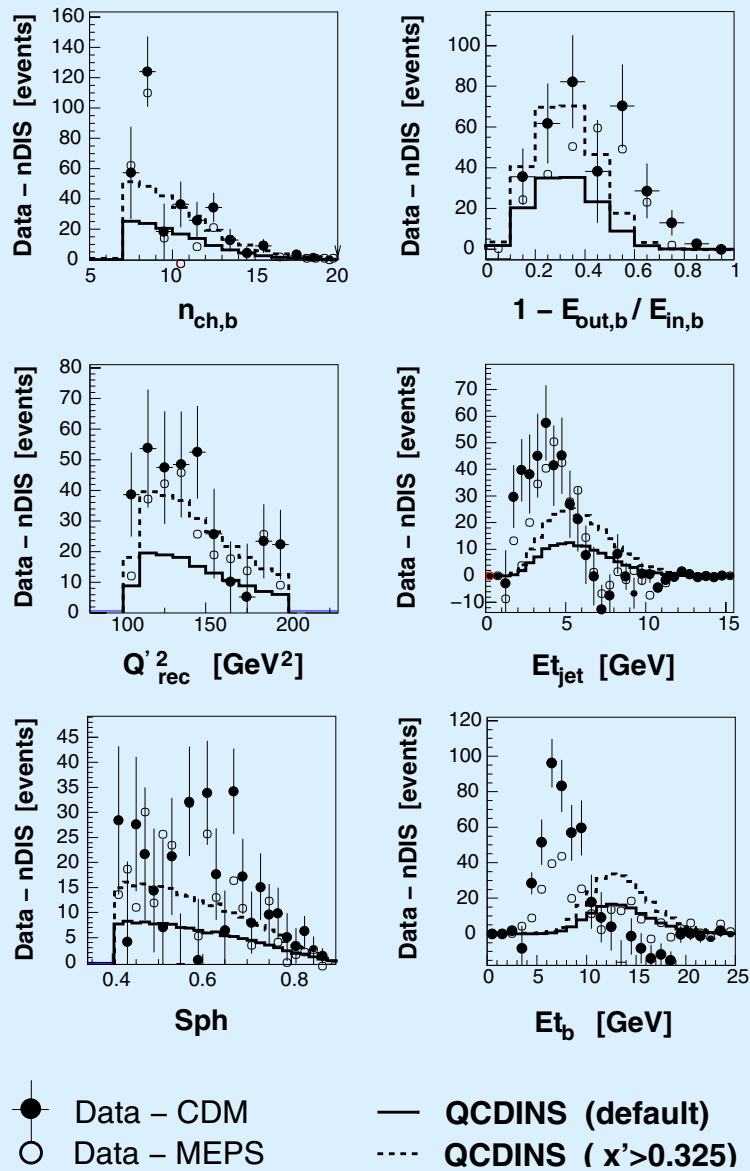


Abbildung 63: Beobachteter und theoretisch vorausgesagter Überschuss von Ereignissen mit „Instanton-Charakteristik“.

Theoretische Physik

Sprecher: P. M. Zerwas

Die DESY Theorie-Gruppe und das II. Institut für Theoretische Physik haben sich auf folgende Schwerpunkte konzentriert:

- **Quantenchromodynamik in Analysen bei HERA and anderen Beschleunigern, sowie im starken Wechselwirkungsbereich auf dem Gitter;**
- **Flavour-Physik bei B-Mesonen;**
- **Zusammenhang von Neutrino-Physik mit Kosmologie;**
- **Higgs-Mechanismus und Supersymmetrie am e^+e^- Linear-Collider TESLA.**

Supersymmetrische Elemente wurden darüber hinaus in der Kosmologie untersucht und Fragen der Supersymmetrie-Brechung auf dem Gitter analysiert.

Problemstellungen verbunden mit der Gravitation wurden im Rahmen von Quantenfeldtheorien in gekrümmter kontinuierlicher und nicht-kommutativer Raum-Zeit behandelt.

In enger Zusammenarbeit mit experimentellen Gruppen wurden die physikalischen Grundlagen für den im Design-Stadium befindlichen e^+e^- Linear-Collider TESLA erarbeitet und im Technical Design Report zusammenfassend dargestellt.

Quantenchromodynamik

Instanton-induzierte Prozesse

Als nicht-störungstheoretische Fluktuationen der Gluon-Felder, mit einer typischen Ausdehnung von etwa 0.5 fm, stellen Instantonen einen grundlegenden Aspekt der QCD dar. Vor etwa 25 Jahren wurden sie von Belavin et al. theoretisch gefunden und von 't Hooft erstmalig untersucht. Trotz überzeugender theoreti-

scher Hinweise auf ihre Existenz steht ein direkter experimenteller Nachweis bis heute aus.

Vor einigen Jahren wurde jedoch in der Theoriegruppe realisiert [DESY 00-89], dass die tiefunelastische Streuung bei HERA eine einzigartige Möglichkeit bietet, harte, durch QCD-Instantonen induzierte Tunnelprozesse zu entdecken, die mit einer Verletzung der Quark-„Händigkeit“ einhergehen und daher in der störungstheoretischen QCD verboten sind. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass die Rate im messbaren Bereich sowie die charakteristische Endzustands-Signatur theoretisch vorhergesagt werden konnten [DESY 99-180, 00-089].

Sehr interessante, aber noch nicht schlüssige (vorläufige) Ergebnisse einer ersten, auf die Instanton-Suche spezialisierten H1-Analyse tiefunelastischer Daten wurden kürzlich auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Die Suchstrategie folgte weitgehend einem mit Experimentalphysikern gemeinsam entwickelten Verfahren [DESY 99-067].

In einem Bereich eines geeigneten Satzes von Messgrößen, in dem gemäß Monte Carlo-Information das Trennvermögen zwischen üblichen tiefunelastischen Prozessen (n DIS = CDM, MEPS) und Instanton-Ereignissen (QCDINS) optimal ist, wurde tatsächlich ein statistisch signifikanter Überschuss gefunden (Abb. 63). Allerdings gestatten die Unsicherheiten der Modellierung dieses wenig erforschten Phasenraumreiches noch keine weitergehenden Aussagen.

Insgesamt ergab sich eine überraschend gute Übereinstimmung der beobachteten Überschüsse in vier der sechs betrachteten charakteristischen Verteilungen mit den Monte Carlo Vorhersagen (QCDINS [DESY 99-180]) für Instanton-Ereignisse (Abb. 63).

Die verbleibenden Diskrepanzen in der Transversalenergie des „current“-Jets ($E_{t_{jet}}$) und des Instanton-

„Feuerballs“ (E_{fb}) verringern sich stark [DESY 00-172], wenn auch in den Daten die theoretisch benötigten Selektionsschnitte angebracht werden. Dementsprechend sollten die Instanton-Effekte im Vergleich zur Referenz-Voraussage (durchgezogene Linie) gemäß den gepunkteten Linien in Abbildung 63 verlaufen.

Diffraktion

Zur Untersuchung der bei HERA beobachteten diffraktiven Endzustände in der tiefunelastischen Elektron-Proton Streuung hat sich, im Ruhesystem des Protons, das Konzept der Photonwellenfunktion als sehr nützlich erwiesen: in führender Ordnung wurden erstmals die Quarkmassen in der Nicht-Vorwärtsrichtung berücksichtigt [DESY 99-164], und erste nichtführende Korrekturen wurden in [DESY 00-132] berechnet. Die Quark-Antiquark-Gluon-Komponente der Wellenfunktion wurde berechnet und auf die diffraktive Charm-Produktion angewandt [hep-ph/0010300]. Das Modell „weicher Farbwechselwirkungen“ wurde weiterentwickelt und verglichen mit HERA Daten sowie Daten von Proton-Antiproton Kollisionen am Tevatron (USA). Eine QCD-Analyse von diffraktiven Strukturfunktionen aus H1 und ZEUS Daten wurde in [hep-ph/0010015] durchgeführt. In [DESY 00-154] wurde der Versuch unternommen, eine allgemeinere Standortbestimmung der Diffraktion bei HERA durchzuführen.

Die Arbeiten [hep-ph/0010300], [hep-ph/0010015] und [DESY 00-154] wurden in Zusammenarbeit von Theoretikern und Mitgliedern der H1 und ZEUS Kollaborationen durchgeführt. In der experimentellen Analyse [DESY 00-174] wurden H1 Daten für diffraktive Jet-Produktion mit theoretischen Vorhersagen verglichen (Abb. 64).

Zur Diffraktion bei LEP wurde eine neue Rechnung zur $\gamma^*\gamma^*$ Streuung durchgeführt, bei der erstmalig Quarkmassen berücksichtigt werden [DESY 00-055]. Erste Resultate zu NLO-Korrekturen der Photon-Pomeron Kopplung finden sich in [DESY 00-132].

Strukturfunktionen

In [DESY 00-117] wurde eine theoretische Untersuchung der QCD Faktorisierung bei kleinen x -Werten durchgeführt. Der Versuch einer numerischen Ab-

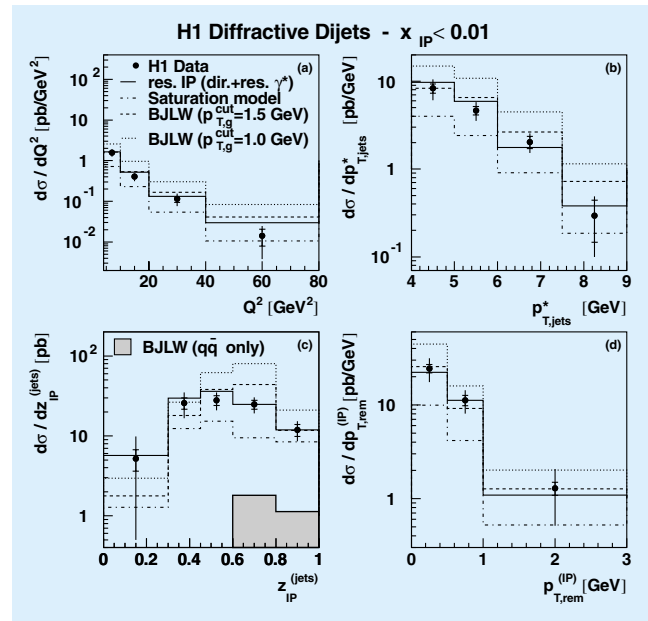


Abbildung 64: Vergleich von Daten zur diffraktiven Jet-Produktion mit theoretischen Vorhersagen.

schätzung von „Higher Twist“ Beiträgen in den bei HERA vermessenen tiefunelastischen Strukturfunktionen bei kleinen x und niedrigen Q^2 -Werten wurde in [DESY 00-038] beschrieben. Ein geometrisches Skalierungsverhalten der Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ wurde in [DESY 00-103] beobachtet.

Fragmentationsfunktionen

Aus Präzisionsdaten der inklusiven Hadronen-Erzeugung in der e^+e^- -Vernichtung bei PEP und LEP1 wurden im Rahmen des Parton-Modells der Quantenchromodynamik (QCD) zu nächstführender Ordnung Fragmentationsfunktionen für geladene Pionen und Kaonen sowie (Anti)Protonen extrahiert. Gleichzeitig wurde ein verbesserter Wert für die starke Kopplungskonstante ermittelt, der mit dem derzeitigen Weltmittelwert gut verträglich ist, nämlich

$$\alpha_s^{(5)}(M_Z) = 0.1170 \pm 0.0073 .$$

e^+e^- -Daten von DORIS, PETRA und LEP2 bzw. $p\bar{p}$ -, γp -, und $\gamma\gamma$ -Daten von Sp \bar{p} S, Tevatron, HERA und

LEP2 stimmen gut mit den entsprechenden, aus diesen Fragmentationsfunktionen gewonnenen Vorhersagen überein, im Einklang mit der erwarteten Skalenverletzung bzw. Universalität [DESY 00-053, 086, 092, 158].

Schwere Quarks

QCD Korrekturen wurden berechnet für mehrere Prozesse mit schweren Quarks, die Präzisionsstudien der elektroschwachen Wechselwirkung erlauben, wie die Produktion von bottom-Quarks in der e^+e^- Anihilation und von top-Quarks an Hadron-Collidern [DESY 00-120, 121].

Ebenfalls in der QCD Störungstheorie untersucht wurde die Kopplung des η' -Mesons an Gluonen, die für die Beschreibung verschiedener Zerfälle der B-Mesonen nötig ist [DESY 00-093].

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz sogenannter Farboktettprozesse in der Natur vorher, das heißt schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind.

Ein aufschlussreicher Test dieser Hypothese ergab sich aus dem Vergleich des am Tevatron gemessenen Polarisationsgrades prompt erzeugter J/ψ -Mesonen mit der NRQCD-Vorhersage, wobei zwar gute Übereinstimmung bei kleinen Transversalimpulsen p_T , aber eine gewisse Diskrepanz bei den höchsten p_T -Werten gefunden wurde [DESY 99-175, 00-067, 092, 107].

Im Rahmen der NRQCD wurden die führenden doppelt-logarithmischen Korrekturen der Form $\alpha_s^3 \ln^2(1/\alpha_s)$ zur Wellenfunktion eines schweren Quark-Antiquark-Bindungszustandes am Ursprung berechnet, welche die Erzeugungs- und Zerfallsraten schwerer Quarkonia bestimmt.

Im Falle der top-Quark-Paarzeugung bei TESLA führen diese Korrekturen zu einer Absenkung des Wirkungsquerschnitts im Schwellenbereich um etwa 10% [DESY 99-173, 00-173].

Der Zusammenhang zwischen den \overline{MS} - und On-Shell-Definitionen der Quark-Masse wurde zu drei Quantenschleifen in der QCD berechnet. Die Kenntnis dieser

Korrektur wird die theoretische Unsicherheit, mit der die Masse des top-Quarks bei TESLA bestimmt werden kann, erheblich verringern [DESY 99-147, 00-034].

B-Mesonen

Das Studium der CP-Verletzung im System der B-Mesonen erlaubt eine strenge Überprüfung der Beschreibung der CP-Verletzung durch das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung.

Eine Schlüsselrolle kommt hierbei dem Unitaritätsdreieck der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix zu, welches aus der Unitarität dieser Matrix folgt. Die Winkel α , β und γ dieses Dreiecks sind für die Präzisionsmessung der Quarkflavour-Übergänge sowie der CP-Asymmetrien in B-Meson-Zerfällen von zentraler Bedeutung. Gibt es neue Physik, so erwartet man eine Verschiebung der Spitze des Dreiecks oder sogar neue topologische Konfigurationen. Das theoretische Profil des Unitaritätsdreiecks wurde innerhalb des Standard-Modells und supersymmetrischer Theorien unter Berücksichtigung von QCD-Korrekturen im Hinblick auf die zu erwartenden experimentellen Resultate sowohl der B-Fabriken am SLAC und KEK als auch der Experimente am Fermilab untersucht [DESY 00-026].

Für diese Studien ist die Massendifferenz ΔM_s der B_s -Mesonen ein sehr wichtiger Parameter, der, wie neue experimentelle Ergebnisse zeigen, bei 18 ps^{-1} liegen könnte und dann zu einer starken Einschränkung des Unitaritätsdreiecks führen würde [DESY 00-182]. Da CP-verletzende Effekte in B_s -Zerfällen im Standardmodell vernachlässigbar klein sind, ist die Sensitivität der entsprechenden Observablen auf neue Physik sehr groß [DESY 99-191, 00-171].

Ein besonders interessanter B_s -Zerfall ist $B_s \rightarrow J/\psi\phi$, der zum Beispiel in einem links-rechts-symmetrischen Modell mit spontaner CP-Verletzung CP-Asymmetrien bis $\mathcal{O}(40\%)$ zeigen kann [DESY 99-191]. Ein herausragendes Element der reichhaltigen Phänomenologie der B-Physik [DESY 00-087, 170] ist die Bestimmung des Winkels γ des Unitaritätsdreiecks, für die Zerfälle des Typs $B \rightarrow \pi K$ besonders vielversprechend sind [DESY 00-014, 051, 122].

Für B-Experimente an Hadron-Maschinen erscheint auch eine Bestimmung von γ aus Dreiecksrelationen zwischen $B_c^\pm \rightarrow D_s^\pm D$ Zerfällen interessant [DESY 00-052]. Durch den Einfluss neuer Physik können sich Diskrepanzen zwischen den entsprechenden Werten für γ ergeben. Für die Phänomenologie der CKM-Matrix und die Suche nach Physik jenseits des Standard-Modells sind auch „seltene“ photonische und leptonische B-Zerfälle von großer Bedeutung [DESY 00-186]; wichtige Beispiele sind die Übergänge $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$ und $B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma$. Isospin- und CP-verletzende Effekte in Zerfällen des Typs $B \rightarrow \rho\gamma$ könnten Anzeichen für Supersymmetrie liefern [DESY 00-088].

Interessante Studien der CP-Verletzung in B-Zerfällen würden sich auch bei GIGA-Z eröffnen, einer Fabrik für 10^9 Z^0 -Bosonen durch einen linearen e^+e^- -Collider mit polarisierten Strahlen. An solch einer Maschine könnte man die Produktion und den Zerfall von b-Baryonen erforschen, nach $b \rightarrow q\bar{\nu}$ Übergängen suchen und umfangreiche Studien inklusiver semileptonischer B_s -Zerfälle durchführen [DESY 00-183].

Neutrino-Physik und Kosmologie

Die vom SuperKamiokande-Experiment beobachtete Anomalie der atmosphärischen Elektron- und Myon-Neutrino-Flüsse kann interpretiert werden als Konsequenz von Oszillationen zwischen Myon- und Tau-Neutrinos. Der entsprechende Mischungswinkel ist groß und die zugehörige Tau-Neutrino-Masse ist klein, sie beträgt nur etwa 0.03 eV. Majorana-Neutrinomassen unterhalb von 0.1 eV wurden erwartet in Modellen für die Entstehung der kosmologischen Baryon-Asymmetrie, die auf dem Zerfall schwerer Majorana-Neutrinos beruhen (Leptogenese) [DESY 99-187].

Die Entstehung der Baryon-Asymmetrie ist ein Nichtgleichgewichtsprozess, der unter Verwendung von Boltzmann-Gleichungen berechnet wird. Erste Fortschritte wurden auch für eine vollständig quantenmechanische Beschreibung erzielt, die eine Berechnung von Korrekturen zu den Boltzmann-Gleichungen erlaubt [DESY 00-056]. Aufgrund der hohen Temperatur im frühen Universum, bei der die Baryon-Asymmetrie erzeugt wurde, führen Leptogenese-Modelle zu Einschränkungen an das Massenspektrum supersymmetrischer Teilchen. Eine besondere Rolle spielt dabei das

Gravitino, das den Hauptanteil der im Universum vorhandenen dunklen Materie ausmachen könnte [DESY 00-167].

Die Resultate der Boomerang- und Maxima-Experimente geben zum ersten Mal Einblick in Details der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Rückschlüsse auf den Ursprung der Dichtefluktuationen zur Zeit der Photon-Entkopplung erlauben. Die Größe des spektralen Index der Hintergrundstrahlung unterscheidet zwischen verschiedenen Modellen der Inflation. Modelle mit „laufender“ Inflaton-Masse sagen dabei eine testbare Abweichung vom skaleninvarianten Grenzfall voraus [DESY 00-029, 119]. In supersymmetrischen Theorien wird die inflationäre Phase maßgeblich von der Art der Supersymmetriebrechung beeinflusst. Von Bedeutung ist dabei auch die Forderung nach einer extrem kleinen kosmologischen Konstanten im Grundzustand in Übereinstimmung mit den experimentellen Schranken [DESY 00-082]. Der Grund für das Fehlen eines Vakuumbeitrags zur Energiedichte oberhalb der kritischen Dichte könnte die Existenz eines fast masselosen Feldes extrem kleiner Masse sein (Quintessence) [DESY 00-63].

Higgs-Mechanismus

Die Lösung der Frage, ob die Massen der fundamentalen Teilchen, Leptonen, Quarks und elektroschwache Eichbosonen, durch den Higgs-Mechanismus erzeugt werden, ist eine der wichtigsten Aufgabenstellungen in der Physik. An den in Kürze verfügbaren Hadron-Collidern Tevatron und LHC kann das Higgs-Boson entdeckt werden, wohingegen das grundlegende Verständnis des mikroskopischen Mechanismus der Massenerzeugung [DESY T-00-01] Hoch-Präzisionsanalysen an einem e^+e^- Linear-Collider wie TESLA erfordert [DESY 99-178].

Mit den in diesem Komplex aufgeworfenen physikalischen Fragestellungen hat sich ein Teil der Theoriegruppen befasst.

Mit Hilfe der Analyse des Myon-Zerfalls konnten die Abschätzungen der Higgs-Masse aus Präzisionsmessungen auf eine solide theoretische Grundlage gestellt werden [DESY 00-101]. Es wurde durch die Berechnung von Zwei-Schleifen Beiträgen im fermionischen

Bereich gezeigt, dass eine konsistente Vorhersage der Higgs-Masse im Bereich von 100 bis 200 GeV erzielt werden kann – eine essentielle Aussage für die Festlegung der Energie eines e^+e^- Linear-Colliders der ersten Phase. Falls eine solche Anlage mit hoher Luminosität bei Energien im Bereich der Z-Masse betrieben wird, können die Phänomene der elektroschwachen Symmetriebrechung auf Quanten-Niveau mit hoher Präzision untersucht werden [DESY 00-050].

Die Einbettung des Standard-Modells in eine supersymmetrische Theorie führt zu einer komplexen Erweiterung des Higgs-Sektors. In der minimalen supersymmetrischen Theorie werden drei neutrale und zwei geladene Higgs-Bosonen vorhergesagt. Das leichteste neutrale Teilchen besitzt eine obere Massenschranke von 140 GeV, das heißt in einem idealen Bereich für die Untersuchung bei TESLA. Diese Schranke ist in einer abschließenden Untersuchung theoretisch etabliert worden [DESY 99-183, 197]. Automatisierte analytische Rechenprogramme [DESY 00-020] haben dabei wertvolle Hilfe für die technische Bearbeitung der Zwei-Schleifen Korrekturen geleistet.

Die Massen der geladenen Higgs-Bosonen liegen in vielen Modellen im Bereich von mehreren hundert GeV, und es bedarf hochenergetischer Collider, um diese Teilchen zu erzeugen. Während die Berechnung von Produktionsraten an einem e^+e^- Collider [DESY 99-178] einfach ist, ist der theoretische Apparat für die Lösung dieser Aufgabe am Hadron-Collider LHC kompliziert. Geladene Higgs-Paare und Mischpaare von Higgs- und Eich-Bosonen sind in einer Reihe von Kanälen untersucht worden [DESY 00-110]. Für nicht zu schwere Higgs-Teilchen bieten sie erste Produktionsmöglichkeiten im Vorfeld der Lepton-Collider.

Die experimentelle Bestimmung der Eigenschaften von Higgs-Teilchen gibt Aufschluss über die Grundzüge des Higgs-Mechanismus. Für diese physikalischen Fragestellungen sind die theoretischen Grundlagen geschaffen worden durch Zerfallsanalysen von Higgs-Teilchen im Standard-Modell [DESY 00-079] sowie in supersymmetrischen Modellen [DESY 00-028]. Verallgemeinerte Kopplungen lassen sich durch Produktionsraten und Winkelverteilungen einschränken [DESY 99-190]. Die Abstrahlung der Higgs-Bosonen von Quarks [DESY 99-177], paarweise erzeugt in e^+e^- Kollisionen, bietet eine weitere Möglichkeit, die Fundamentalparameter des Higgs-Sektors zu bestimmen.

Supersymmetrie

Die Existenz eines leichten Higgs-Bosons, verbunden mit der großen Vereinigung der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Kräfte bei sehr hohen Energien, zieht nahezu zwangsläufig die Supersymmetrisierung des Standard-Modells nach sich.

In einer solchen Theorie werden den Teilchen des Standard-Modells Partner zugeordnet, die sich um eine halbzahlige Spin-Einheit unterscheiden. Diese Kohabitation von Fermionen und Bosonen stabilisiert die Extrapolation von der elektroschwachen Niederenergie-Skala zur hochenergetischen Vereinigungsskala in der Nähe der Planck-Skala, an der die Teilchenphysik mit der Gravitation verbunden wird.

Die Extrapolation und die Rekonstruktion der fundamentalen Theorie bei hohen Energien kann nach Auswertung der Experimente im Supersymmetrie-Sektor an einer Hoch-Präzisionsmaschine wie TESLA erfolgreich bewältigt werden [DESY 99-181].

Ein besonders interessantes supersymmetrisches Ensemble sind Charginos und Neutralinos. Dies sind die Partner der elektroschwachen geladenen und neutralen Eich- und Higgs-Bosonen, sie tragen halbzahligen Spin. Da sie eine in sich abgeschlossene physikalische Einheit bilden und komplexe Strukturen aufweisen, sind sie intensiv untersucht worden. Aus Wirkungsquerschnitten und Winkelverteilungen können die Massen- und die Mischungs-Parameter der Charginos vollständig rekonstruiert werden [DESY 99-198, 00-001]. Das analoge Programm für Neutralinos ist komplizierter, da diese Teilchen Mischzustände aus vier unterschiedlichen Komponenten sind. Es erzwingt die Nutzung von Polarisierungseffekten, mit deren Hilfe die Struktur der Teilchen bei TESLA aufgelöst werden kann [DESY 00-001, 003, 098]. Der Majorana-Charakter der Neutralinos erfordert dabei spezielle Aufmerksamkeit [DESY 00-100].

Gittereichtheorien

In der Gitterformulierung der Quantenfeldtheorie können die nicht-störungstheoretischen Phänomene im Standard-Modell, die starke Wechselwirkungen bein-

halten, berechnet werden. Die theoretischen und numerischen Untersuchungen konzentrieren sich in erster Linie auf verschiedene Fragen in der Quantenchromodynamik. Aber auch andere Quanten-Eichfeldtheorien, wie zum Beispiel die supersymmetrische Yang-Mills-Theorie, liefern wichtige Erkenntnisse für das Verständnis der Struktur des Standard-Modells.

Im Rahmen der Gittereichtheorie besteht die Möglichkeit, verschiedene physikalische Parameter wie zum Beispiel das Hadron-Spektrum, die Formfaktoren und die elektroschwachen Matrixelemente oder die Eigenschaften der Materie bei Phasenübergängen zu berechnen. Dazu werden leistungsfähige Computer benötigt, die die Parallelverarbeitung auf vielen Prozessoren ermöglichen. Die numerischen Algorithmen müssen für eine effiziente Parallelverarbeitung entsprechend angepasst werden. Für diese Arbeit steht seit Mitte 2000 ein dediziertes PC-Cluster aus acht Pentium-III Prozessoren bei DESY-Hamburg zur Verfügung. Mehrere größere Parallelrechner für die Gittereichtheorie sind bei DESY-Zeuthen im Einsatz.

Eigenschaften der Materie bei hohen Quark-Dichten

In der Quantenchromodynamik wird erwartet, dass sich bei sehr hohen Baryon- (oder Quark-) Dichten die charakteristischen Freiheitsgrade wesentlich ändern. Sie werden nicht mehr „hadronisch“, wie die zusammengesetzten Protonen und Neutronen, sondern „partonisch“ wie die elementaren Quarks und Gluonen. Diese Änderung kann zu einem Phasenübergang führen, wobei im Grundzustand der Materie eine Kondensation von Diquark-Paaren stattfindet. Das kann zu interessanten Phänomenen wie Supraleitung oder Superfluidität führen, die erwartungsgemäß in Neutronensternen zu beobachten sind.

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts hat die DESY-Swansea-Kollaboration eine Modelluntersuchung mit Quarks in der adjungierten Darstellung der $SU(2)$ -Farbgruppe durchgeführt [DESY 00-083, 155, 175]. Dabei wurde der multi-bosonische Algorithmus im Zwei-Schritt Verfahren eingesetzt [DESY 99-170], der auch die Effekte der Änderung des Vorzeichens der Fermion-Determinante richtig berücksichtigt. Die

Existenz des erwarteten Phasenübergangs wurde bestätigt und die ersten Resultate für die Zustandsgleichung und für die Änderung der effektiven Pion-Masse erreicht.

Supersymmetrie-Brechung in der Yang-Mills-Theorie

Supersymmetrie ist ein notwendiger Bestandteil der modernen Theorien der Quantengravitation und ist ein wesentliches Element in den meisten Erweiterungen des Standard-Modells. Die Brechung der Supersymmetrie im heute experimentell erreichbaren Energiebereich ist eine zentrale theoretische Frage. Zahlreiche Modelle für die Supersymmetrie-Brechung basieren auf den nicht-störungstheoretischen Eigenschaften der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie. Diese Theorie beschreibt die Wechselwirkung des Eichfelds mit einem masselosen Majorana-Fermionfeld in der adjungierten Darstellung (das Gaugino).

In der Gitter-Regularisierung wird die Supersymmetrie bei nichtverschwindender Gitterkonstante durch Gitterartefakte gebrochen. Eine konsistente Beschreibung setzt die Wiederherstellung der Supersymmetrie im Kontinuumslimit voraus, wobei die Möglichkeit der dynamischen Symmetriebrechung, zum Beispiel durch die Kondensation des Gauginofelds, bestehen bleibt.

Die Supersymmetrie kann in den numerischen Simulationen mit der Überprüfung der entsprechenden Ward-Takahashi-(WT-)Identitäten verdeutlicht werden. Die DESY-Münster-Roma-Kollaboration hat die WT-Identitäten auf dem Gitter numerisch untersucht [DESY 00-156, 159]. Die ersten Resultate zeigen, dass die Supersymmetrie im Rahmen der numerischen Genauigkeit – wie erwartet – erfüllt ist. Die aus den WT-Identitäten berechneten Werte der Gaugino-Masse können zur Definition des supersymmetrischen Limes bei verschwindender Gaugino-Masse benutzt werden.

Gravitation

Einer der Schwerpunkte der Arbeitsgruppe „Quantenfeldtheorie und Mathematische Physik“ war die Untersuchung von Quantenfeldtheorien in gekrümmter Raumzeit [DESY 99-032]. Zu diesem Zweck wurde

eine störungstheoretische Konstruktion der Algebren lokaler Observablen durchgeführt. Es zeigte sich, dass diese Konstruktion auch im klassischen Limes sinnvoll bleibt, und dass die Loop-Entwicklung der Störungstheorie eine Familie lokaler Observablenalgebren liefert, die zwischen der Poisson-Algebra der klassischen Feldtheorie und der nichtkommutativen $*$ -Algebra der Quantenfeldtheorie interpoliert [DESY 00-013]. Weiter wurde eine neuartige Ward-Identität („Master-Ward-Identität“) studiert, die nicht nur die bekannten Ward-Identitäten impliziert, sondern auch die algebraischen Eigenschaften der wechselwirkenden Felder kontrolliert.

Hierdurch kann die Becchi-Rouet-Stora Symmetrie auf der Ebene der Quantenfelder als gradierte Derivation mit Quadrat 0 verstanden werden [DESY-T-1999-032]. (Für einen anderen Zugang zu Eichtheorien siehe [DESY 99-144].) In diesem Zusammenhang wurden auch der Energie-Impuls-Tensor [DESY 00-176] und die Operator-Produkt-Entwicklung [DESY 00-177] im Rahmen der kausalen Störungstheorie untersucht.

Ein anderes Projekt war der Rolle der Renormierungsgruppe gewidmet. Ausgehend von einer unveröffentlichten Arbeit von Popineau und Stora wurde gezeigt, wie die endlichen Renormierungen in der kausalen Störungstheorie systematisch behandelt werden können [DESY 99-168]. Der Zusammenhang mit der Hopf-Algebra-Struktur der Renormierung, die von Kreimer entdeckt worden ist und für großes Aufsehen unter Mathematikern gesorgt hat, wurde aufgezeigt [hep-th/0012057].

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 und der Renormierbarkeit.