

# Theoretische Physik

**Gruppenleiter:** F. Schrempf (bis 29.2.2008); V. Schomerus (seit 1.3.2008) (Hamburg), T. Riemann (Zeuthen)

**Die Forschungsfelder der Theorie-Gruppe in Hamburg und Zeuthen, in enger Vernetzung mit den Instituten für theoretische Physik der Universität Hamburg und der Humboldt-Universität zu Berlin, behandeln die wesentlichen Themen der modernen Teilchenphysik.**

**Durch die Hamburger Aktivitäten wird ein breites Spektrum abgedeckt: von der Phänomenologie im Rahmen des Standardmodells und seiner möglichen Erweiterungen über die Teilchen-Kosmologie bis zur Stringtheorie und der mathematischen Physik.**

**In Zeuthen liegen die Schwerpunkte bei Präzisionsuntersuchungen für die Beschleuniger HERA, LHC und ILC sowie in der Gittertheorie, einschließlich der Entwicklung von Parallelrechnern. Letzteres profitiert von der engen Zusammenarbeit im John von Neumann-Institut am Forschungszentrum Jülich.**

## Aktivitäten in Hamburg

### HERA-Physik und QCD

#### QCD bei hohen Energien

Die Erforschung der Protonstruktur ist ein Hauptgegenstand der Messungen bei HERA. Daten legen nahe, dass die Impulsverteilungen von Gluonen und leichten Quarks bei kleinen Impulsbruchteilen  $x$  im Einklang

mit dem verallgemeinerten *double logarithmic scaling* ein modifiziertes besselartiges Verhalten zeigen. Unter dieser Annahme läßt sich in nächstführender Ordnung (NLO) der Störungstheorie eine kompakte Näherungsformel für das Verhältnis  $F_L^{c,b}/F_2^{c,b}$  der Strukturfunktionen für die inklusive Produktion von Charm- bzw. Bottom-Quarks herleiten, welche die Extraktion von  $F_2^{c,b}$  aus den HERA-Daten wesentlich erleichtert [DESY 08-002]. Dieses Verhältnis zeichnet sich auch durch seine perturbative und parametrische Stabilität aus [DESY 08-081].

Der bei HERA gemessene Wirkungsquerschnitt für die inklusive Erzeugung von  $D^*$ -Mesonen liegt signifikant über der in kollinearer Näherung berechneten NLO-Vorhersage. Dieses Problem wird durch den Übergang zur *Quasi-Multi-Regge-Kinematik* im Zusammenspiel mit der Quark-Reggeisierungshypothese bereits in führender Ordnung beseitigt, wobei unintegrierte (transversalimpulsabhängige) Partonverteilungen für Gluonen und Charm-Quarks eingeführt werden [DESY 08-194].

Unter den Korrekturen zu den QCD-Evolutionsgleichungen (DGLAP, BFKL) sind Multiparton-Wechselwirkungen von besonderer Relevanz. Da ihr experimenteller Nachweis im Rahmen von totalen Wirkungsquerschnitten schwierig ist, ist es wichtig, weniger inklusive Observablen zu untersuchen, z. B. Korrelationen in Multijet-Endzuständen. Die Berechnung von Wirkungsquerschnitten in Gegenwart von Multiparton-Wechselwirkungen ist sehr aufwendig. Bisherige Rechnungen wurden im Rahmen des QCD Dipolmodells bzw. im Hintergrund klassischer starker Farbfelder durchgeführt. In [DESY 08-016] wurde für die tief-

inelastische Elektron-Nukleon-Streuung der ein-Jet inklusive Wirkungsquerschnitt in Impulsraumvariablen berechnet. Dabei wurden Abweichungen von früheren Resultaten im Ortsraum gefunden, deren Klärung Gegenstand gegenwärtiger Diskussionen ist.

Die exklusive diffraktive Produktion von  $J/\psi$  und  $\Upsilon$  Mesonen am Tevatron und LHC bietet einen guten Zugang zur Gluonverteilung bei kleinen  $x$  und kann darüber hinaus zur Kalibration von theoretischen Rechnungen für andere exklusive Endzustände dienen. Im dominanten Reaktionsmechanismus wird von einem der Strahlteilchen (Proton oder Antiproton) ein quasi-reelles Photon abgestrahlt, das mit dem zweiten Strahlteilchen kollidiert. In [arXiv:0805.2113] wurden der hadronische Teil der Reaktion in einem Dipolmodell beschrieben und dessen Parameter an HERA Daten angepasst. Durch kinematische Extrapolation wurden damit Vorhersagen für LHC und das Tevatron gewonnen. Im gleichen Formalismus wurde auch die Produktion eines  $Z$  Bosons an diesen Collidern berechnet, für deren Untersuchung bei HERA die vorhandene Kollisionsenergie nicht ausreichend groß war.

## Produktion von Hadronen

Im Rahmen der QCD wird die inklusive Hadronenerzeugung durch Fragmentationsfunktionen beschrieben. Diese enthalten langreichweitige Effekte der starken Wechselwirkung und werden – ähnlich wie Partonverteilungen – aus dem Vergleich von Theorie und experimentellen Daten extrahiert. Die Bestimmung von Fragmentationsfunktionen für  $\pi^+$ ,  $K^+$ ,  $p$ ,  $K_S$ ,  $\Lambda$  und deren Antiteilchen konnte wesentlich verbessert werden. Einerseits wurden erstmals Daten von Hadron-Collidern einbezogen, nämlich von RHIC und vom Tevatron. Andererseits wurden Hadronmasseneffekte konsistent berücksichtigt und führende Logarithmen bei großen  $x$  in den Koeffizientenfunktionen und den Evolutionsgleichungen aufsummiert [DESY 08-058].

Das transversale Impulsspektrum und die azimutale Winkelverteilung produzierter Hadronen enthalten detaillierte Information über den zugrundeliegenden Reaktionsmechanismus. Der Übergang von kleinen

zu großen Transversalimpulsen entspricht dabei dem Übergang von langreichweitiger zu kurzreichweitiger Dynamik und damit von einer nicht-störungstheoretischen zu einer störungstheoretischen Beschreibung. In [DESY 08-023] wurde der Zusammenhang dieser Beschreibungen systematisch untersucht und die Möglichkeit ihrer Kombination im Bereich intermediärer Transversalimpulse diskutiert.

## Strahlungskorrekturen

Die starke Kopplungskonstante  $\alpha_s$  wird üblicherweise im Renormierungsschema der modifizierten minimalen Subtraktion ( $\overline{\text{MS}}$ ) definiert. Da die  $\beta$ -Funktion in diesem Schema massenunabhängig ist, werden effektive Quantenfeldtheorien mit unterschiedlicher Zahl von Quark Flavours eingeführt, die an den Quarkschwellen durch störungstheoretisch zu berechnende Anpassungsbedingungen zusammengefügt werden. Diese Prozedur wird im Impulssubtraktionsschema (MOM) vermieden, wobei die  $\beta$ -Funktion jedoch eine komplizierte Abhängigkeit von den verschiedenen Quarkmassen erhält. Der Zusammenhang dieser beiden Definitionen von  $\alpha_s$  wurde erstmals zu drei Quantenschleifen untersucht [DESY 08-184].

Die Produktion von Gluino- und von Squark-Antisquark Paaren ist ein vielversprechender Kanal für die Suche nach Supersymmetrie am LHC. Der integrierte Wirkungsquerschnitt könnte insbesondere zur Massenbestimmung der neuen Teilchen dienen, was allerdings eine präzise theoretische Beschreibung voraussetzt. Es ist bekannt, dass in der supersymmetrischen QCD große NLO Korrekturen für diese Prozesse auftreten. Verantwortlich dafür sind die Effekte weicher Gluonen, die zu großen Logarithmen führen, wenn der partonische Streuprozess in der Nähe der kinematischen Schwelle für die Produktion der schweren Teilchen stattfindet. In [DESY 08-096] wurden die entsprechenden führenden und nächstführenden Logarithmen (NLL) aufsummiert. Die Schwellenlogarithmen vergrößern den Wirkungsquerschnitt für Gluino-Paar Produktion um ca. 10 % bei Gluionmassen um 1 TeV, und die Resummation liefert

eine deutlich verringerte theoretische Unsicherheit im Vergleich mit der bisherigen NLO Rechnung.

## Instantonprozesse

Instantonen stellen einen grundlegenden nicht-perturbativen Aspekt der QCD dar. Eine besondere Herausforderung ist hierbei das Verständnis der Instanton-Größenverteilung  $d(\rho)$ . Während im Bereich kleiner Instantonen eine parameterfreie Übereinstimmung von Gitterergebnissen mit der Instanton-Störungstheorie gefunden wurde, findet man für größere Instantonen schnell eine dramatische Diskrepanz. In der Instanton-Störungstheorie wächst das Gewicht größerer Instantonen unbegrenzt an, während die Gitterdaten einen scharfen Peak bei  $\rho = \langle \rho \rangle \approx 0.6 \text{ fm}$  aufweisen, gefolgt von einer starken Unterdrückung großer Instantonen jenseits des Peaks.

Vor diesem Hintergrund wurde eine residuelle konforme Raum-Zeit Inversionssymmetrie ausführlich untersucht [DESY 08-17]. Diese wird nahegelegt sowohl durch die empirische Symmetrie der Gitterdaten für  $d(\rho)$  unter einer Inversion  $\rho \rightarrow \langle \rho \rangle^2 / \rho$  der Instantongröße, als auch durch die bekannte Gültigkeit dieser Symmetrie im klassischen Instanton-Sektor. Der Instanton-Calculus wurde zunächst auf die vierdimensionale Oberfläche einer fünfdimensionalen Kugel projiziert. Diese Projektion auf eine kompakte, gekrümmte Geometrie vermeidet Divergenzen und dient zur Einführung der mittleren Instantongröße  $\langle \rho \rangle$  aus den Gitterdaten als neue Längenskala. Dabei wird  $\langle \rho \rangle$  mit dem Radius  $b$  der fünfdimensionalen Kugel identifiziert und spielt die Rolle des konformen Inversionsradius. Für  $b = \langle \rho \rangle$  konnte eine fast perfekte  $\rho \rightarrow \langle \rho \rangle^2 / \rho$  Inversionssymmetrie der Größenverteilung gezeigt werden, in guter qualitativer Übereinstimmung mit den Gitterdaten. Für  $\rho/b \rightarrow 0$  erhält man die bekannten Ergebnisse der Instanton-Störungstheorie für die flache vierdimensionale Raumzeit zurück. Es wurde gezeigt, dass eine (schwach gebrochene) konforme Inversionssymmetrie auch attraktive Konsequenzen für die QCD jenseits von Instantonen hat. Als weiterer erfolgreicher Symmetrietest wurden überraschende Implikationen

für eine weitere Instanton-dominierte Gitterobservable vorgestellt [DESY 08-17].

## QCD und Stringtheorie

Die Hypothese einer Dualität zwischen der  $N = 4$  supersymmetrischen Quantenfeldtheorie und einer  $\text{AdS}_5$  Stringtheorie ist Gegenstand zahlreicher aktueller Untersuchungen. In [DESY 08-044] wurden Korrelationsfunktionen von sog. R-currents eingeführt, die sowohl in der Quantenfeldtheorie als auch in der Stringtheorie definiert sind. In einem ersten Schritt wurde der Hochenergie-Grenzwert auf der feldtheoretischen Seite analysiert. Am dualen Analogon auf der String-Seite wird zurzeit gearbeitet.

Basierend auf dieser Dualitätshypothese ist von Bern, Dixon und Smirnow eine Vermutung formuliert worden, nach der die  $n$ -Gluon Streuamplitude in der  $N = 4$  supersymmetrischen Feldtheorie in der planaren Näherung zu allen Ordnungen der Kopplung eine besonders einfache (exponentielle) Form hat, und es wurde eine explizite Formel angegeben. In [DESY 08-015] und [DESY 08-073] wurde dieser Vorschlag mit aus der QCD bekannten Resultaten verglichen. Dabei wurden Diskrepanzen gefunden, aus denen sich erste Anhaltspunkte für eine Korrektur dieser Formel ergeben könnten.

## Gittereichtheorie

Die numerische Lösung der starken Wechselwirkung im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) hat in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte gemacht. Die Kombination von verbesserten Gitter-Wirkungen mit der Weiterentwicklung von numerischen Algorithmen und mit neuen Computern im mehreren hundert TeraFlops- bis PetaFlops-Bereich macht es möglich, die Ziele zu erreichen, die zum Teil schon vor dreißig Jahren formuliert wurden. Das heißt, es ist jetzt möglich, die Effekte der dynamischen Quarks in der Nähe der physikalischen Quarkmassen zu berücksichti-

gen, und dabei auch die Fehler von Gitterartifakten und vom endlichen Volumen zu kontrollieren.

In einer großen europäischen Kollaboration (*European Twisted Mass Collaboration: ETMC*) mit mehr als 40 Teilnehmern aus 9 Ländern wurden numerische QCD-Simulationen begonnen, die außer den u-, d- und s-Quarks auch dynamische c-Quarks berücksichtigen. Dabei wird die sog. *Twisted-Mass-Formulierung* verwendet, die eine verbesserte chirale Symmetrie bei nicht-verschwindender Gitterkonstante aufweist und damit eine leichtere Extrapolation zum Kontinuumslimit ermöglicht. In einem ersten Schritt wurden verschiedene verbesserte Gitter-Wirkungen ausprobiert und nach der Auswahl der Wirkung die Simulationsparameter festgelegt [DESY 08-137].

In einer Kollaboration mit dem Institut für Theoretische Physik der Universität Münster wurde QCD mit einem Quark-Flavour ( $N_f = 1$ ) und die Supersymmetrische Yang-Mills (SYM) Theorie untersucht. Das Spektrum der Hadronen hat in diesen beiden Theorien gewisse Ähnlichkeiten miteinander [DESY 08-143,08-144]. Die Struktur der Singularitäten bei verschwindender Fermionmasse und die daraus folgenden Phasenübergänge stellen interessante Fragen für die numerischen Simulationen. In unseren Arbeiten haben wir verbesserte Wilson-Wirkungen verwendet. Das ermöglicht die Bestimmung des Hadron-Spektrums in wesentlich grösseren Gitter-Volumina als in unseren früheren Arbeiten und in den Berechnungen anderer Gruppen mit der Domainwall-Wirkung.

## B-Physik

Die Physiker Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa wurden 2008 mit dem Physik Nobelpreis geehrt. Kobayashi und Maskawa erhielten den Preis für die Entdeckung des Mechanismus zur Brechung der CP Symmetrie in der elektroschwachen Wechselwirkung, welcher die Existenz von mindestens drei Quarkfamilien, nämlich den Quark-Doublets (u,d), (c,s) und (t,b), vorhersagt. Der KM-Mechanismus für CP-Verletzung erfordert die Einführung einer  $(3 \times 3)$ -

Quarkmischungsmatrix, die als Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix bekannt ist. In den vergangenen Jahren standen Arbeiten zur CP-Verletzung in Zerfällen von B-Mesonen im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses [Physik J. 7N12:22-25,2008]. Außerdem haben die Experimente BELLE am KEK und BABAR am SLAC, sowie Experimente am Fermilab ein reiches Forschungsprogramm absolviert, das unter anderem Präzisionsmessungen der CKM Matrixelemente  $V_{ub}$ ,  $V_{cb}$ ,  $V_{td}$ , und  $V_{ts}$  ermöglicht hat. Die LHC-Experimente (ATLAS, CMS und LHC-B) werden ein genaues Bild der Physik von  $B_s$ -Mesonen und b-Baryonen liefern, sowie das Matrixelement  $V_{tb}$  und andere Eigenschaften des t-Quarks quantitativ untersuchen.

Flavourphysik, vor allem B-Physik, ist auch ein fester Bestandteil der theoretischen Arbeiten in der Theoriegruppe, die sich in der Auswertung der experimentellen Ergebnisse bewährt haben. Grundlage dieser Untersuchungen sind effektive Theorien, die eine störungstheoretische Formulierung der starken Wechselwirkung (QCD) zulassen. Eine dieser Theorien ist die sogenannte *Heavy Quark Effective Theorie (HQET)*, die es erlaubt, für die B-Zerfälle, eine systematische  $1/m_b$ -Entwicklung der QCD-Lagrangedichte und der Übergangmatrixelemente durchzuführen. Im Berichtszeitraum wurden die next-to-next-to-leading order (NNLO) störungstheoretische Effekte für den Zerfall  $B \rightarrow X_u \ell \nu_\ell$  berechnet [DESY 08-145, arXiv:0810.0987, arXiv:0810.2921]. Diese Arbeiten erlauben es, theoretische Unsicherheiten in der Bestimmung des Matrixelements  $V_{ub}$  erheblich zu reduzieren und eine Präzisionsmessung durchzuführen.

Die auf effektiven Theorien basierten Methoden wurden auch dazu benutzt, eine präzise Theorie der Pinguin-induzierten Übergänge zu erzielen, die einerseits die Quantenstruktur des Standardmodells (SM) festlegen und andererseits für die Suche nach der Physik jenseits des Standardmodells (BSM) von größtem theoretischen Interesse sind. In diesem Zusammenhang wurden die Zerfälle  $B \rightarrow K^* \gamma$  und  $B_s \rightarrow \phi \gamma$  in  $O(\alpha_s^2)$  im SM berechnet [arXiv:0806.4846], wobei die Ergebnisse mit den experimentellen Messungen gut verträglich sind. Diese Methoden wurden auch für die Untersuchung der Zerfälle  $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$  in NNLO erweitert. Hier-

bei liefern die sog. Annihilations-Amplituden wichtige Beiträge, die früher nur in der führenden Ordnung (LO) bekannt waren. Effektive Theorien haben es erlaubt, die Faktorisierung der Annihilations-Amplituden (in lang- und kurzzeitigen Teilen) in NLO durchzuführen. Diese Arbeit wird es ermöglichen, vor allem die CP- und Isospin-verletzenden Asymmetrien in den Zerfällen  $B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma$  genauer zu quantifizieren.

Wie schon berichtet, wurden theoretische Abschätzungen für die Zerfälle  $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$  in NNLO in der Gruppe Theorie unternommen und wurden über die Jahre verbessert [DESY 99-146, hep-ph/9910221, DESY 01-217, hep-ph/0112300, DESY 06-002, hep-ph/0601034]. Diese theoretische Vorhersagen wurden im Jahre 2008 nun erstmals durch die Experimente BABAR und BELLE geprüft. Hier spielen die Verteilungen in der dileptonischen invarianten Masse  $d\text{BF}(q^2)/dq^2$  sowie in der sog. Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie  $A_{\text{FB}}(q^2)$  eine wichtige Rolle. Ein Vergleich der BELLE Messungen für die letztere Verteilung mit den obengenannten theoretischen Arbeiten (SM und eine Variante von Supersymmetrie) ist in Abb. 82 zu sehen. Das LHC-B Experiment wird  $A_{\text{FB}}(q^2)$  viel genauer unter die Lupe nehmen und könnte wichtige Beweise für die BSM-Physik liefern.

Die Erzeugung von B-Hadronen in der  $e^+e^-$ -Annihilation auf der Z-Boson-Resonanz bei LEP und SLC ermöglichte eine Präzisionsmessung der  $Zb\bar{b}$ -Kopplung, welche effektiv durch den elektroschwachen Mischungswinkel  $\theta_{\text{eff}}^{b\bar{b}}$  charakterisiert wird. Diese Messung kann mit einem zukünftigen  $e^+e^-$ -Linearbeschleuniger, welcher für gewisse Zeit auf der Z-Boson-Resonanz betrieben wird (GigaZ), noch deutlich verbessert werden. Die Klasse von elektroschwachen Quantenkorrekturen mit zwei Schleifen, die eine geschlossene Fermionschleife enthalten, wurden erstmals berechnet. Hierzu wurden drei verschiedene Methoden unabhängig angewandt und miteinander verglichen: die asymptotische Entwicklung, der seminumerische Bernstein-Tkachov-Algorithmus und ein auf Dispersionsrelationen basierendes Verfahren. Für eine Higgsmasse nahe der unteren Schranke,  $M_{\text{H}} \approx 115$  GeV, ist die Korrektur relativ groß,  $\mathcal{O}(10^{-4})$  [DESY 08-037].

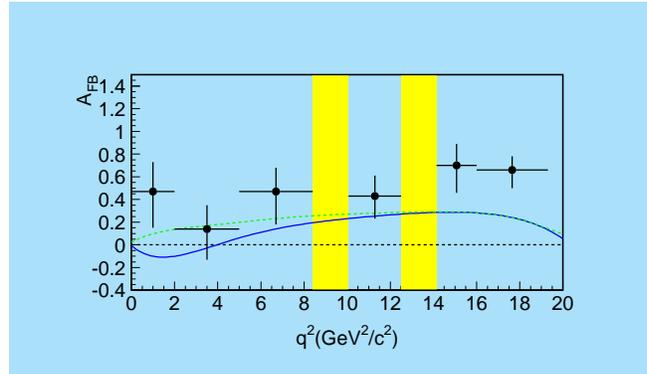


Abbildung 82: Die von BELLE gemessene Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie  $A_{\text{FB}}$  als Funktion von  $q^2$  (Punkte mit Fehlerbalken) und deren Vergleich mit der Vorhersage des Standardmodells (durchgezogene Linie) bzw. mit einer supersymmetrischen Erweiterung (gestrichelt).

## Collider Physik

Verteilungen durch super-QCD-Strahlungskorrekturen beeinflusst, die theoretisch berechnet worden sind, um die maximale experimentelle Auflösung der Spektren zu gewährleisten [DESY 09-030].

Die Yukawa-Kopplung von Gluinos an Squarks und Quarks in der super-QCD kann an  $e^+e^-$ -Linearcollidern in Quark-Squark-Gluino-Endzuständen gemessen werden. Der Vergleich mit Standard-QCD-Prozessen erlaubt es, die Identität von Yukawa- und Eich-Kopplungen zu prüfen, eine der fundamentalen Vorhersagen der Supersymmetrie [DESY 08-076].

Gluinos sind selbst-konjugierte Majorana-Teilchen in der minimalen  $N = 1$ -Supersymmetrie. Diese Eigenschaft erlaubt mannigfache Reaktionen, die in der Dirac-Darstellung der Gluinos verboten wären. Ein klassisches Paradigma ist die Produktion von Squark-Squark-Paaren in Quark-Quark Kollisionen am LHC, die durch Gluino-Austausch vermittelt wird. Für Majorana-Theorien, im Gegensatz zu Dirac-Theorien, wird damit eine hohe Anzahl gleichnamig geladener Lepton-Paare vorhergesagt, deren Beobachtung al-

so den Majorana-Charakter der Gluinos signalisiert [DESY 08–113].

Dirac-Gluinos können in der erweiterten  $N = 2$ -Supersymmetrie auftreten. Sie werden begleitet von skalaren Farb-Oktett-Teilchen, die sowohl einzeln als Resonanz-Formation wie paarweise mit hohen Raten in Gluon-Gluon-Kollisionen erzeugt werden können. Die Paarproduktion führt zu hohen Jet-Multiplizitäten und einem hohem Defizit im Transversalimpuls. Diese Signaturen, wie auch die Resonanz-Formation, weichen in spektakulärer Weise von der minimalen Supersymmetrie ab [DESY 08–188].

## Teilchenphysik und Kosmologie

### Inflation und Moduli-Stabilisierung in der Stringtheorie

Das Problem von Moduli-Stabilisierung in einem de Sitter Vacuum und die Realisierung von Inflation in der Stringtheorie sind sehr stark miteinander verknüpft. In der Tat, in beiden Fällen hat man eine positive Vakuumenergie und das Potential muß entweder ein lokales Minimum oder eine sehr flache Region ausweisen. Dieses Problem wurde im Berichtszeitraum in den  $N=1$  4D Supergravitationmodellen untersucht, die in orientifold oder heterotischen Kompaktifizierungen realisiert werden können. Es wurde gezeigt, dass eine notwendige Bedingung für die Existenz von de Sitter Vakua, nämlich die Positivität der Massenmatrix in der Goldstino-Feldrichtung, eine Schranke für die sektionale Kählerkrümmung bedingt, die nur vom Kählerpotential abhängt. Für den Spezialfall eines no-scale Kählerpotentials wurden Modelle mit zwei Feldern studiert, wobei einige gefunden wurden, die obige Bedingung entsprechen erfüllen [DESY 08-038]. Es wurde in diesem Rahmen ein lokales Superpotential konstruiert, das ein de Sitter metastabiles Minimum hat [DESY 08-198]. Eine sehr ähnliche Analyse ist auch für die inflationäre Phase möglich und erlaubt eine Reformulierung des Eta-Problems in eine noch stärkere Bedingung für die sektionale Krümmung [DESY 08-59].

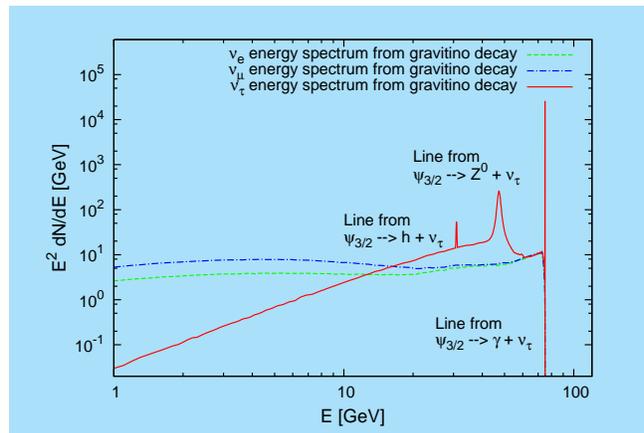


Abbildung 83: Neutrinospektren vom Gravitinozerfall, für eine Gravitinomasse von 150 GeV und eine Lebensdauer von  $10^{26}$  s. Die drei Linien resultieren aus den drei Zweikörperzerfällen des Gravitino in ein Tauneutrino und ein leichtes Higgsboson, in ein Tauneutrino und ein Z-Boson, bzw. in ein Tauneutrino und ein Photon. Das kontinuierliche Spektrum folgt aus der Fragmentation von Z-Bosonen, W-Bosonen und Taus.

### Gravitino als Dunkle Materie

In Falle des Gravitinos als Dunkle Materie Kandidat mit erhaltener R-Parität kann das nächst-leichteste supersymmetrische Teilchen auch ein geladenes Skalar teilchen sein. Dann ist die Frage, wie groß die Dichte von einem solchen Teilchen nach der Entkopplung ist und ob die Nukleosynthese in Gefahr ist, wenn es zerfällt. Im Berichtszeitraum wurde daher die Dichte von einem elektromagnetisch- oder farbgeladenen Skalar neu gerechnet, inklusive dem Sommerfeld Faktor [DESY 08-035]. Für Szenarien mit R-Parität Brechung wurde hingegen das Signal aus dem Gravitino Zerfall in Neutrinos berechnet [DESY-08-122] und mit dem atmosphärischen Neutrino-Hintergrund und den experimentellen Sensitivitäten aktueller und zukünftiger Neutrinodetektoren verglichen (siehe Abb. 83).

### Kosmische Strahlung

Ursprung und Ausbreitung hochenergetischer geladener kosmischer Strahlung sowie neutraler Sekundärteilchen wie hochenergetische gamma-Strahlung und Neu-

trinos bilden einen wichtigen Aspekt der Theorie in Hamburg. Hierzu wird CRPropa, ein unter der Adresse <http://apcauger.in2p3.fr/CRPropa/index.php> öffentlich verfügbarer numerischer Code, weiterentwickelt. Insbesondere wurde 2008 Release dieses Codes steht kurz bevor. Dies soll einen wichtigen Beitrag zum Pierre Auger Experiment liefern, das Hinweise von Kernen in der hochenergetischen kosmischen Strahlung gefunden hat und an dem ein Teil der Gruppe als assoziierte Mitglieder beteiligt sind [arXiv:0806.4302].

Ferner wurden neue Einschränkungen an mögliche Verletzungen der Lorentz-Symmetrie aus der chemischen Zusammensetzung höchstenergetischer kosmischer Strahlung abgeleitet [arXiv:0807.1210]. Diese Schranken sind wegen der extremen Lorentz-Faktoren oft wesentlich stärker als frühere Schranken, die auf Laborexperimenten basieren.

Ein weiteres wichtiges Thema besteht in der indirekten Detektion von dunkler Materie. Die Annihilation von dunkler Materie in Form von noch nicht entdeckten schwerer Teilchen, deren Existenz aber von vielen Erweiterungen des Standard-Modells der Elementarteilchenphysik vorausgesagt werden, können zu interessanten und detektierbaren Signaturen in den Flüssen hochenergetischer geladener kosmischer Strahlung, elektromagnetische Strahlung und Neutrinos führen. Insbesondere produzieren dabei erzeugte Elektronen und Positronen in kosmischen Magnetfeldern auch Synchrotronstrahlung, deren Leistungsspektrum auf kleinen Winkelskalen im Hinblick ihrer Unterscheidbarkeit von astrophysikalischen Quellen untersucht wurde [arXiv:0807.3429].

Supernovae des Typs II bilden eine wichtige Quelle von Neutrinos, insbesondere für zukünftigen Detektoren der Megatonnen-Skala. Wegen der hohen Dichte von Materie und Neutrinos in diesen Quellen oszillieren Neutrinos verschiedener Flavours in komplexer, nichtlinearer Weise. Hierzu wurde insbesondere die Dekohärenz solcher Oszillationen näher untersucht [arXiv:0807.0659].

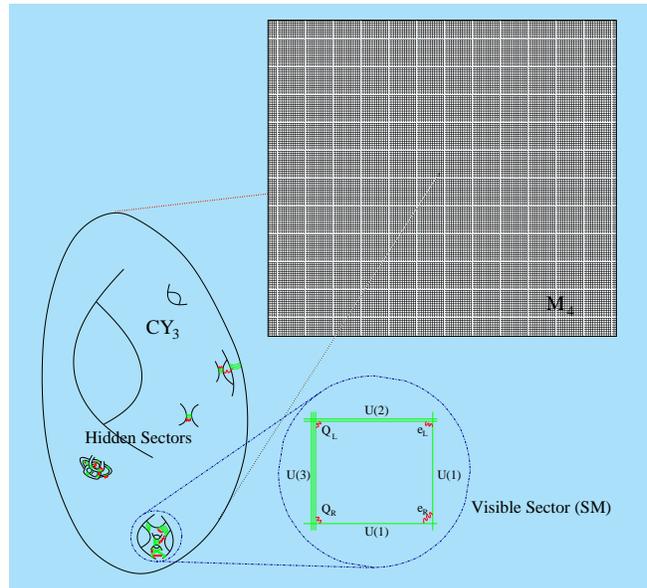


Abbildung 84: In Kompaktifizierungen von Typ-II Stringtheorien wird das Standardmodell (SM) durch D-Branen realisiert, welche sich in den extra Dimensionen überschneiden. Im allgemeinen gibt es auch versteckte Sektoren, welche in den extra Dimensionen vom sichtbaren Sektor separiert sind [DESY 08-149].

## Vereinheitlichte Theorien

### Axionen und andere Leichtgewichte

Vereinheitlichte Erweiterungen des Standardmodells sagen oft neue Symmetrien und Teilchen voraus, welche elegante Lösungen unserer theoretischen Bedenken (*Natürlichkeit, Hierarchie von Energieskalen, ...*) sowie Kandidaten für den *dunklen Sektor* liefern. Interessanterweise gibt es in diesen Erweiterungen oft viel mehr Teilchen als ursprünglich gefordert. Darüber hinaus könnten diese neuen Teilchen auch sehr leicht sein, sofern sie nur sehr schwach, über Strahlungskorrekturen, welche schwere Vermittlerteilchen involvieren, mit den Teilchen des Standardmodells wechselwirken, d.h. einem *versteckten Sektor* angehören. Solche Sektoren ergeben sich in natürlicher Weise in Einbettungen des Standardmodells in die Stringtheorie (siehe Abbildung 84). Die Suche nach Effekten von leichten, versteckten Teilchen, wie z. B. Axionen, versteckten

Photonen, und minigeladenen Teilchen, in astrophysikalischen und kosmologischen Umgebungen [DESY 08-045,08-130,08-128,08-154,08-183], sowie im Labor [DESY 08-046,08-069,08-105], wie etwa beim ALPS Experiment am DESY, liefert eine zum LHC komplementäre Weise, etwas über eine eventuelle Vereinheitlichung der fundamentalen Kräfte zu erfahren [DESY 08-061,08-149]. So hängt etwa die Stärke der Mischung von sichtbaren und versteckten Photonen in Stringkompaktifizierungen von der Geometrie der extra Dimensionen, insbesondere vom Volumen und damit vom Wert der Stringskaala, sowie von der Raumverzerrung ab [DESY 08-026].

## Majorana Neutrino-Physik

Die Natur der Neutrinos (Majorana versus Dirac) ist bisher experimentell nicht geklärt. Es gibt aber theoretische, insbesondere auf Vereinheitlichten Theorien basierende Überlegungen, die Neutrinos als Majorana-Teilchen zu betrachten, da die winzig kleinen Neutrinomassen, die aller Wahrscheinlichkeit nach im Milli-elektron-Volt (meV) Bereich liegen, auf einen anderen Mechanismus für die Erzeugung ihrer Masse hinweisen (Seesaw-Mechanismus) als demjenigen, der für die üblichen Fermionenmassen verantwortlich ist (Higgs-Mechanismus). Der experimentelle Nachweis des sog. neutrinolosen Doppelbetazerfalls ( $0\nu 2\beta$ ) eines Nukleons,  $N_i(A, Z) \rightarrow N_f(A, Z + 2) + e^- + e^-$ , wird hier eine entscheidende Rolle spielen. In Modellen der Physik jenseits des Standardmodells (BSM) könnten aber winzige nichtrenormierbare Terme vorhanden sein, die die Leptonzahl verletzen und als Folge davon auch den  $0\nu 2\beta$ -Zerfall bewirken. Beispiele der BSM-Physik sind R-Paritäts-verletzende SUSY Prozesse, Leptoquarks und doppelgeladene Higgs-Teilchen  $H^{++}$  und  $H^{--}$ . Daher müssen Messungen unternommen werden, die es ermöglichen, die unterschiedlichen Mechanismen des  $0\nu 2\beta$ -Zerfalls zu unterscheiden. In diesem Zusammenhang wurde die Winkelverteilung  $d\Gamma/d\cos\theta \propto (1 - K \cos\theta)$ , wobei  $\theta$  der Winkel zwischen den Elektronen im Ruhesystem des zerfallenden Nukleus ist, ausgearbeitet. Die Abschätzung von  $K$  ist weitgehend unabhängig von den kernphysikalischen,

und damit schwer zu quantifizierenden Aspekten des Zerfalls, hängt aber stark von den unterliegenden Mechanismen ab (Majorana-Neutrino versus BSM Effekte). Die Werte des Winkelkorrelators  $K$  wurden für fünf verschiedenen relevante Kerne, ( $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{130}\text{Te}$  und  $^{136}\text{Xe}$ ), berechnet [arXiv:0801.2512 und arXiv:0706.4165]. Diese Winkelkorrelators werden in einigen der geplanten Experimente, z. B. NEMO3, gemessen werden, falls die Lebensdauer des ( $0\nu 2\beta$ -Zerfall messbar ist.

## Stringtheorie

Im Vordergrund der stringtheoretischen Forschung am DESY stand im vergangenen Jahr wieder die sogenannte AdS/CFT Dualität. Dabei handelt es sich um eine hochinteressante Beziehung zwischen gewöhnlichen Eichtheorien auf der einen, und Stringtheorien auf der anderen Seite. Um mit Hilfe der AdS/CFT Dualität Einsichten in eichtheoretische Größen bei endlicher Eichkopplung zu erhalten, müssen ganz neuartige Stringtheorien konstruiert werden. Eine zentrale Herausforderung ist die Quantisierung von Strings in dem 10-dimensionalen Hintergrund  $\text{AdS}_5 \times S^5$ . Dieser setzt sich zusammen aus einer 5-dimensionalen Sphäre  $S^5$  und dem Anti-de-Sitter Raum  $\text{AdS}_5$ , einem nicht-kompakten Raum mit konstanter negativer Krümmung. Über die AdS/CFT Korrespondenz ist die Stringtheorie in  $\text{AdS}_5 \times S^5$  verknüpft mit einer speziellen supersymmetrischen Eichtheorie, der  $N = 4$  super Yang-Mills Theorie.

Im Berichtszeitraum waren Mitarbeitern der DESY Theorie maßgeblich an den Entwicklungen dieses Gebietes beteiligt. Ein zentraler Ansatzpunkt war dabei unter anderem die Untersuchung von Modellen, die die Bewegung von Strings auf Sphären und deren supersymmetrischen Verallgemeinerungen beschreiben. Als exemplarisch für eine zukünftige Behandlung der Stringtheorie auf  $\text{AdS}_5 \times S^5$  gilt insbesondere die Analyse in [DESY-08-193]. In dieser Arbeit wurden nichtlineare Integralgleichungen zur Berechnung des Energiespektrums des nichtlinearen Sigma-Modells zur Gruppe  $O(4)$  hergeleitet. Solche Integralgleichungen

dienen als Ausgangspunkt für eine außerordentlich effiziente numerische Bestimmung des Energiespektrums. Frühere Ergebnisse anderer Gruppen konnten mit den neu entwickelten Techniken reproduziert und dann auf beliebige Zustände des Modells erweitert werden.

Ganz andere Techniken kamen bei der Untersuchung von supersymmetrischen Varianten der  $O(N)$  Modelle zum Einsatz [DESY-08-123]. In diesem Falle gelang es, gewisse Spektren vollständig analytisch zu bestimmen. Bei der Analyse der resultierenden Spektren wurde dann eine erstaunliche Beobachtung gemacht: Es stellte sich heraus, dass die supersymmetrischen  $O(N)$  Modelle bei sehr starker Kopplung eine duale Beschreibung als schwach gekoppelte Feldtheorie zulassen. Beziehungen dieser Art sind in der Theorie 2-dimensionaler Quantensysteme grundsätzlich nicht neu und haben weitreichende Konsequenzen. Auch in einem anderen Fall gelang Mitarbeitern der DESY Theoriegruppe im vergangenen Jahr der Beweis einer solchen Dualität [DESY-08-062]. Hier allerdings kam die Beziehung nicht unvermutet: Die so genannte FZZ-dualität zwischen dem 2-dimensionalen Euklidischen schwarzen Loch und der so genannten Sine-Liouville Theorie war vor über zehn Jahren als Vermutung formuliert worden, hatte sich aber einer vollständigen Herleitung seither widersetzt. Im Zusammenhang mit der AdS/CFT Korrespondenz könnten derartige Dualitäten den Zugang zur störungstheoretischen Eichtheorie auf eine völlig neue Grundlage stellen.

Ein Teil der in den beiden letzten Absätzen beschriebenen Entwicklungen wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 676 so weit vorangetrieben, dass sich bereits wichtige Anwendungen auf die  $N=4$  super Yang-Mills Theorie ergaben. In [DESY-09-018] gelang es in eindrucksvoller Weise, die anomalen Dimensionen von Operatoren der super Yang-Mills Theorie bis in beliebig hohe Ordnung zu berechnen. Damit ist ein entscheidender Durchbruch zur Anwendung stringtheoretischer Techniken auf die Eichtheorie gelungen.

Sehr zentralen Anteil an den Entwicklungen der Arbeitsgruppe hatte auch das durch die EU finanzierte Marie-Curie Exzellenz-Team von Jörg Teschner. Ende 2007 wurde das Team durch die Postdoktoranden

G. Niccoli und D. Ridout vervollständigt. Auch dieser Teil der String-Theorie Arbeitsgruppe befasst sich mit der Lösung von integrablen Modellen, die neben ihrer Anwendung auf Stringhintergründe auch für die Theorie der kondensierten Materie relevant sind (z. B. [arXiv:0803.3305 [hep-th]], [arXiv:0810.2920 [hep-th]]). Dabei stehen skaleninvariante Sigma-Modelle im Vordergrund. Obwohl in den vergangenen Jahrzehnten bereits leistungsstarke Techniken zur Lösung solcher Modelle entwickelt wurden, stellen die aktuellen Anwendungen gänzlich neue Herausforderungen. Tatsächlich besitzen viele der relevanten Modelle nicht genug Symmetrien, um sie mit den klassischen Methoden der konformen Feldtheorie lösen zu können. Ein wesentlicher neuer Aspekt des Programms ist es daher, die Methodik der integrablen Modelle auf die konformen Feldtheorien anwendbar zu machen. Das ist hochgradig nichttrivial, da sich mithilfe der traditionellen Methoden wie z. B. dem Bethe-Ansatz die konforme Invarianz nur sehr schwer nachweisen und ausnutzen lässt. Ein wichtiger erster Schritt in dem Programm zur Lösung der Sigma-Modelle ist daher die Entwicklung von effizienten Techniken, welche Integrabilität und wesentliche Aspekte der konformen Invarianz in einem einheitlichen Rahmen zu beschreiben und auszunutzen erlauben. In diesem Kontext stehen insbesondere die Arbeiten [arXiv:0811.3688 [hep-th], arXiv:0902.4825 [hep-th]].

Gerade für die Beschreibung nicht-kompakter Stringhintergründe, wie z. B.  $AdS_5$ , ist ein allgemeineres Verständnis nichtrationaler konformer Feldtheorien unabdingbar. In der Arbeit [arXiv:0803.0919] wird zu diesem Zwecke ein allgemeiner Formalismus zur Ausnutzung der chiralen Faktorisierung der konformen Feldtheorien für die Konstruktion von Korrelationsfunktionen entwickelt. Dieser Formalismus verallgemeinert und vereinheitlicht verschiedene Formalismen für rationale konforme Feldtheorien welche u. a. von Friedan und Shenker sowie Moore und Seiberg eingeführt worden sind. Ein zentrales Ergebnis dieser Arbeit ist die Identifizierung hinreichender Kriterien für die Existenz eines Skalarproduktes auf dem Raum der chiralen *Bausteine* der Korrelationsfunktionen, welches für die Theorie eine fundamentale Rolle spielt.

Neben der Untersuchung nichtrationaler konformer Feldtheorie spielten auch die Untersuchung nicht-unitärer Modelle eine zentrale Rolle. Die in derartigen Theorien generisch auftretenden logarithmischen Singularitäten erschweren die Konstruktion signifikant. Von der Lösung der für dieses Arbeitsfeld typischen Probleme [arXiv:0808.3530 [hep-th], arXiv:0808.3530 [hep-th]] erwartet man kurzfristig wichtige Anwendungen auf Probleme der statistischen Physik, wie z. B. auf die 2-dimensionale Perkolation. Auch Anwendungen auf die AdS/CFT Korrespondenz zeichnen sich ab und motivierten eine Serie weiterer Veröffentlichungen [DESY-08-062, arXiv:0809.0468 [hep-th], DESY-08-195].

Sehr erfolgreich waren Mitarbeiter der Theoriegruppe im vergangenen Jahr auch bei der Klassifikation und Konstruktion neuer Stringhintergründe, die den dreidimensionalen  $\text{AdS}_3$  enthalten [DESY-08-104, DESY-08-104]. Dazu wurden verschiedene neue Methoden entwickelt, um Lösungen der Feldgleichungen der 10- und 11-dimensionalen Supergravitation zu konstruieren. Anwendungen, z. B. auf die Beschreibung nichtrelativistischer Quantensysteme [DESY-09-006], wurden ebenso verfolgt wie methodische Aspekte.

Nicht unerwähnt bleiben sollen schliesslich auch die Beiträge der Arbeitsgruppe *Stringtheorie* am II. Theoretischen Institut der Universität Hamburg. Diese arbeitete im Berichtszeitraum an Fragen der Supersymmetrie und Supergravitation, an verallgemeinerten Stringkompaktifizierungen sowie an Fragen der Stringkosmologie. Konkret wurden Kompaktifizierungen auf Mannigfaltigkeiten mit  $\text{SU}(3)$  und  $\text{SU}(2)$  Struktur untersucht [ZMP-HH/08-2], [JHEP 0805:023, 2008, arXiv:0801.1160 [hep-th]], [ZMP-HH/08-8], [JHEP 0812:052, 2008, arXiv:0810.4699 [hep-th]]. Die Stabilität von de Sitter Grundzuständen in supersymmetrischen Feldtheorien stellt sich als eine nicht-triviale Einschränkung sowohl in  $N=1$  Theorien [DESY 08-038], wie auch in  $N=2$  Theorien [ZMP-HH/08-16] heraus. Dadurch werden auch inflationäre Modelle insbesondere in Stringtheorien eingeschränkt [DESY 08-059].

## Mathematische Physik

In der Mathematischen Physik gab es im Berichtszeitraum die folgenden Entwicklungen:

Auf Mannigfaltigkeiten mit Flächenmaß wurde das Sonnensystem durch fast-metrische Geometrien modelliert [arXiv:0804.4067]. Es wurde gezeigt, dass die flächenmetrische Materiekopplung im Gegensatz zur metrischen die Konsistenz der  $\omega \rightarrow 0$  Brans–Dicke Gravitation mit der Physik des Sonnensystems impliziert.

Für eine bestimmte Klasse unendlich-dimensionaler Mannigfaltigkeiten wurde gezeigt, wie sich eine endlich-dimensionale Raumzeit als Grenzfall erhalten lässt [arXiv:0809.3111]. Es soll die Idee untersucht werden, ob sich klassische Feldtheorien auf der verfeinerten Geometrie in Quantentheorien auf der klassischen Geometrie übersetzen lassen.

Die Stabilität von Lösungen dynamischer Systeme wurde in geometrischer Formulierung betrachtet [arXiv:0810.5060]. Eine neue Definition von lokaler Stabilität wurde angegeben, die sich für dynamische Systeme zweiter Ordnung auf bekannte Theorie reduziert. Es wurde gezeigt, dass Lagrange-Systeme genügend geometrische Information tragen, um intrinsische Stabilitätskriterien zu definieren.

Die Rolle der Renormierungsgruppe in der perturbativen algebraischen Quantenfeldtheorie wurde analysiert, insbesondere im Hinblick auf Theorien über gekrümmten Raumzeiten. Hierbei wurde insbesondere der Zusammenhang zwischen der Wilsonschen Renormierungsgruppe und der Renormierungsgruppe nach Stückelberg und Petermann untersucht [arXiv:0901.2038].

Es wurde gezeigt, dass das Zeitschichtaxiom von perturbativ definierten Quantenfeldtheorien auf global hyperbolischen Raumzeiten erfüllt ist [arXiv:0802.1642].

Skalare Felder auf Robertson-Walker-Raumzeiten wurden untersucht. Dabei wurde eine neue Methode gefunden, vakuümähnliche Zustände und approximative thermische Gleichgewichtszustände zu konstruieren [DESY 08-006]. Weiter wurde die Freiheit bei der Wahl des Energie-Impuls-Tensors ausgenutzt, um eine

wohl definierte semiklassische Friedmann-Gleichung zu erhalten, und es wurde gezeigt, dass man die beobachtete Raumzeit mit dem gemessenen Wert der dunklen Energie durch dieses Modell beschreiben kann [DESY 08-199].

Die Rolle der Zeit als Observable in Quantentheorien wurde näher untersucht. Insbesondere das Konzept der relationalen Observablen in der Gravitationstheorie und eine intrinsische Zeitobservable in der Quantenkosmologie wurden studiert, mit dem Ergebnis, dass zum Beispiel der Zeitpunkt des Urknalls eine wohldefinierte Quantenobservable wird [DESY-THESIS-2008-045].

Das Konzept der lokal kovarianten Feldtheorie wurde auf konform invariante Quantenfeldtheorien erweitert. Dabei ergab sich, dass die ableitungsfreien Wickpolynome des skalaren Feldes konform kovariant definiert werden können, nicht aber Terme mit Ableitungen, bei denen die konforme Kovarianz durch Anomalien gebrochen ist [DESY 08-070].

## Internationale Zusammenarbeit und Drittmittelprojekte

In Kooperation mit europäischen Universitäten war die Hamburger Theoriegruppe an einem virtuellen Institut der Helmholtz Gesellschaft sowie an einer Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe beteiligt,

- VH-VI-106: *Particle Cosmology (VIPAC)*, Virtuelles Institut
- VH-NG-006: *Particle Physics and Cosmology*, Nachwuchsgruppe

Die Hamburger DESY Theorie ist maßgeblich an einem großen DFG-Sonderforschungsbereich (SFB 676), der Universität Hamburg über *Teilchen, Strings und frühes Universum: Struktur von Materie und Raum-Zeit* beteiligt. Sechs theoretische Projekte werden gemeinsam von Mitgliedern des Hamburger II. Instituts für Theoretische Physik und der Hamburger DESY Theorie geleitet. Vier theoretische Projekte betreffen ausschließlich das II. Institut für Theoretische Physik. In weiteren

SFB 676 Projekten geht es um eine Zusammenarbeit von Theoretikern mit Mitgliedern der experimentellen Institute.

DESY nimmt weiterhin am großen High Energy Physics Latinamerican-European Network (HELEN) zwischen der Europäischen Union und Latein Amerika teil. Hauptziel ist die Förderung der Ausbildung und des akademischen Austauschs von Hochenergiephysikern aus den 36 Mitgliedsinstitutionen. Die Koordination von HELEN bei DESY sowie eine Mitgliedschaft im HELEN Executive Board liegt bei der DESY Theorie in Hamburg.

Außerdem sind die folgenden Drittmittelprojekte zu nennen:

1. Stipendium (MEXT-CT-2006-042695) der EU-Kommission zum Aufbau eines Marie-Curie-Exzellenzteams *Non-linear Sigma Models in String Theory*
2. Marie Curie Excellence Chair für Theoretische Physik, Prof. Dr. Lev Lipatov
3. Helmholtz-Allianz (HA 101) *Physik an der Teraskala*
4. BMBF-Projektförderung (05 HT6GUA): *Theoretische Interpretation von Hochenergieexperimenten mit HERA, LEP und Tevatron sowie Vorhersagen für LHC und TESLA*,
5. DAAD-Programm *PROCOPE* mit École Polytechnique, Palaiseau, Frankreich,
6. Graduiertenkolleg der DFG (GRK 602): *Zukünftige Entwicklungen in der Teilchenphysik*,
7. Stipendium der Alexander von Humboldt Stiftung, Dr. C. Dappiaggi,

sowie zwei Forschungspreise und eine Reihe von DFG-Sachbeihilfen am II. Institut für Theoretische Physik. Die Hamburger Theoriegruppen sind ferner in mehrere Netzwerke der Europäischen Gemeinschaft eingebunden. Eine Reihe von Gastwissenschaftlern wurden durch verschiedene Drittmittel und Stipendien unterstützt. Deren Forschungsaufenthalte bei der Hamburger DESY-Theorie trugen maßgeblich zur stimu-

lierenden Forschungsatmosphäre in der Theoriegruppe bei.

## Organisation von Konferenzen

- ENTApP *European Network of Theoretical Astroparticle Physics*, March 2008, DESY Hamburg
- Workshop on *Brainstorming and Calculation-shop: Physics Case for a Low Energy Frontier*, June 2008, DESY Hamburg
- 22nd Workshop on *Foundations and Constructive Aspects of QFT*, June 2008, Hamburg
- 4th Patras Workshop on *Axions, WIMPs and WISPs*, June 2008, DESY, Hamburg
- Workshop on *Holonomy Groups and Applications in String Theory*, July 2008, Hamburg
- DESY Theorie workshop on *Dark matter at the crossroads*, October 2008, DESY Hamburg
- Workshop on *Applied 2d Sigma Models*, November 2008, DESY Hamburg.

## Aktivitäten in Zeuthen

### Perturbative Quantenfeldtheorie und Physik an Beschleunigern

In der störungstheoretischen Quantenfeldtheorie standen Untersuchungen für Streuprozesse bei HERA, an  $e^+e^-$ -Collidern und am Large Hadron Collider (LHC) im Vordergrund, insbesondere die Berechnung von Quantenkorrekturen auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung (QCD) und der Quantenelektrodynamik (QED).

Am LHC-Beschleuniger des CERN werden einige Produktionsprozesse mit schweren Teilchen sehr genau gemessen werden, so dass Einschleifenkorrekturen dazu

berechnet werden müssen. Das erfordert die systematische Behandlung von Fünfpunkt- und Sechspunkt-Funktionen mit Tensorstrukturen. In einem konsequent algebraischen Zugang wurden Tensoren bis Rang 5 für die Sechspunkt-Funktionen und bis Rang 4 für die Fünfpunkt-Funktionen berechnet. Der Zugang vermeidet das Auftreten von inversen Potenzen der führenden Gramdeterminante. Ein Softwarepaket (hexagon) in Mathematica ist als Public Domain Software veröffentlicht, und für ein Fortran-Paket wird dies vorbereitet [arXiv:0812.2134, arXiv:0807.2984]. Das infrarote Divergenzverhalten von Fünfpunkt-Funktionen wurde mit der Mellin-Barnes-Integraldarstellung von Einschleifenamplituden untersucht [arXiv:0801.4228].

In der tiefinelastischen Streuung wurden die QCD Korrekturen zur Strukturfunktion  $F_3$  für Streuprozesse mit geladenen Strömen in dritter Ordnung berechnet [arXiv:0812.4168]. Die Effekte von schweren Quarks (Charm, Bottom) in den tiefinelastischen Daten von HERA und in der Bestimmung von Partonverteilungen wurde unter Berücksichtigung der QCD Korrekturen höherer Ordnung studiert [arXiv:0811.1412]. Außerdem wurde über Fortschritte bei der Berechnung der Evolution polarisierter Partonverteilungen zu drei Schleifen in QCD berichtet [arXiv:0807.1238]. Untersuchungen der Skalenevolution von Fragmentationsfunktionen zu NNLO in QCD wurden fortgeführt [arXiv:0807.0321] und Fragmentation im Vakuum und in einem hadronischen Medium studiert [arXiv:0804.2021].

Die Erwartungen am LHC an Vorhersagen der störungstheoretischen QCD wurden zusammengefasst [arXiv:0803.0457]. Theoretische Vorhersagen für die hadronische Produktion von Top-Quarkpaaren am LHC wurden deutlich verbessert, unter anderem durch Resummation [arXiv:0803.0494, arXiv:0804.1476, arXiv:0807.2794] und die Eigenschaften des Produktionsprozesses an der Schwelle wurden analysiert [arXiv:0812.0919]. Aktivitäten zu theoretischen Vorhersagen für Vielteilchen-Produktion zu NLO, beispielsweise am LHC, beinhalten die Automatisierung der Dipolsubtraktion zur Regularisierung von Infrarotdivergenzen [arXiv:0807.3701]. 2-Schleifen QED Korrekturen wurden für den Prozess  $e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma$

berechnet [arXiv:0812.1588]. Weitere Arbeiten betreffen die Extraktion von Beiträgen höheren Twists aus tiefinelastischen Streudaten [arXiv:0802.0408; arXiv:0807.0248] im Bereich großer Bjorken  $x$ . Für eine verlässliche Bestimmung müssen die Beiträge in NN-LO im führenden Twist berücksichtigt werden. Es wurden Korrekturen endlichen Impulsübertrages und von Targetmassen zu tiefinelastischen diffraktiven Prozessen [arXiv:0812.1899] berechnet.

Physikalische Hauptziele für die Kooperation zwischen Experiment und Theorie bei der weiteren Auswertung der tiefinelastischen Daten von HERA wurden in arXiv:0809.0549 formuliert. Einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildete die Berechnung der Korrekturen von Effekten schwerer Quarks in der tiefinelastischen Streuung. Die Kenntnis dieser Beiträge ist für die genaue Bestimmung der starken Kopplungskonstanten und der Parton-Verteilungsfunktionen aus den tiefinelastischen Streudaten bei HERA von Bedeutung. Die Berechnung der Korrekturen von 2. Ordnung in der starken Kopplungskonstanten für hinreichend große Virtualitäten, einschließlich von Renormierungseffekten, wurden abgeschlossen [arXiv:0803.0273, 0806.0451]. Für feste Mellin-Momente wurden erste Korrekturen 3. Ordnung berechnet [arXiv:0806.4613, 0812.2427]. Es wurden die strukturellen Relationen zwischen harmonischen Summen bis Gewicht  $w=6$  ermittelt [arXiv:0807.0700]. Diese Beziehungen erlauben die weitere Vereinfachung von Darstellung 1-skaliger Größen in quantenfeldtheoretischen Berechnungen bis zum 3-Schleifen Niveau.

## Nichtperturbative Quantenfeldtheorien

Die überwiegende Zahl der Eigenschaften der Hadronen ist perturbativen Methoden nicht zugänglich. Hierzu zählen neben dem Spektrum auch insbesondere Übergangsmatrixelemente und Formfaktoren, wie sie in der theoretischen Behandlung von elektromagnetischen Wechselwirkungen und schwachen Zerfällen von Hadronen auftreten. Insbesondere für die mögli-

che Entdeckung neuer Physik in B-Meson Zerfällen und Oszillationen sind diese Größen entscheidend. Die NIC-Gruppe in Zeuthen befasst sich daher mit der Weiterentwicklung und Anwendung von Gittereichtheorien, die einen numerischen, nichtperturbativen Zugang für diese Probleme darstellen.

Sowohl Energieniveau als auch Matrixelemente werden aus dem Verhalten von Korrelationsfunktionen bei großen (euklidischen) Abständen bestimmt. Ein besonders geeignetes Verfahren hierfür ist das sogenannte verallgemeinerte Eigenwertproblem. Es konnten nun erstmals sehr günstige Konvergenzeigenschaften dieser Methode bewiesen werden [arXiv:0808.1017].

Der Beweis zeigt auch auf, wie man das Verfahren am besten anwendet, um die numerische Präzision zu optimieren.

Eine wichtige Fehlerquelle der Gittereichtheorie sind Diskretisierungsfehler, d. h. Abweichungen vom Kontinuumsverhalten aufgrund der endlichen Auflösung der Raumzeit. Ihr theoretisches Verständnis wurde weiterentwickelt [arXiv:0807.1120] und ihre Größe wurde in einer Standarddiskretisierung numerisch untersucht [arXiv:0804.3383]. Solche systematischen Fehler können auch durch die sogenannte perturbative Verbesserung reduziert werden. Zu diesem Zweck wurden perturbative Rechnungen in der Gitterregularisierung durchgeführt [arXiv:0812.0503, arXiv:0808.1791].

Schwere Quarks, insbesondere das b-Quark lassen sich nicht direkt numerisch behandeln, sondern bedürfen einer Beschreibung durch effektive Theorien. Die nicht-perturbative *Heavy Quark Effective Theory* (HQET) wurde in der Vergangenheit in Zusammenarbeit mit der Universität Münster entwickelt. Ihre Anwendbarkeit wurde erneut genau geprüft [arXiv:0810.3166].

Charm Quarks lassen sich hingegen, wenn auch mit besonderem Aufwand, auf direkte Art simulieren. Hierzu wurden erste Rechnungen begonnen [arXiv:0810.0214], insbesondere auch im Hinblick auf leptonische Zerfälle der  $D_s$  Mesonen: zurzeit bestehen Unterschiede zwischen den experimentellen Messungen und ersten Rechnungen in der Gittereichtheorie. Die bei DESY

angesiedelten Rechnungen sollen die systematischen Unsicherheiten deutlich reduzieren.

Eine Serie von Arbeiten und Vorträgen befasste sich mit der Untersuchung von Quark- und Gluon-Korrelationsfunktionen in einer festen Eichung [arXiv:0812.3261, 0809.3741, 0809.2777, 0806.3124, 0804.2371, 0803.1798]. Ziel dieser Rechnungen ist es, die Qualität der verschiedenen Approximationen zu bestimmen, die in Kontinuumsfunktionalmethoden angewendet werden. Beispiele für solche Approximationen sind Trunkierungen der Schwinger-Dyson Gleichungen.

Als eine alternative Formulierung der Gitter-QCD, um Diskretisierungseffekte zu verringern, werden in der Zeuthener Gruppe sogenannte Twisted Mass Fermionen genutzt. Hier reicht die Feineinstellung eines einzigen Parameters aus, um die Diskretisierungsfehler physikalischer Größen von einer linearen Abhängigkeit im Gitterabstand zu einer quadratischen zu reduzieren.

Im Rahmen einer Europäisch angelegten Kollaboration, der *European Twisted Mass Collaboration* (ETMC), wird dieser Zugang zur Simulation der Gitter-QCD genutzt. Im letzten Jahr konnten so Simulationen bei vier Werten des Gitterabstandes mit jeweils 4-5 Quarkmassen und verschiedenen Volumina durchgeführt werden. [arXiv:0810.3807] Dies erlaubt eine Abschätzung der systematischen Effekte zur Erreichung des Kontinuum, des chiralen und des thermodynamischen Limes.

Eine grundlegende Untersuchung in Gitterrechnungen ist die Bestimmung des Baryonspektrums aus der reinen QCD heraus. Hier wurde für den Fall, dass zwei massenentartete Quarks betrachtet werden, gezeigt, dass das experimentell beobachtete Baryonspektrum tatsächlich aus den Simulationen folgt. Ein entscheidender nächster Schritt wird die Berechnung des Einflusses des Strange Quarks auf die Ergebnisse sein [arXiv:0803.3190].

Auf den erzeugten Rohdaten der Simulationen, den Konfigurationen, konnte eine Reihe von physikalischen Größen berechnet werden. Eine besonders interessante Größe ist die  $\eta$ -Mesonmasse. Dieses Meson erhält seine Masse zu einem großen Teil aus topologischen Effekten und es konnte in den Gitterrechnungen demonstriert

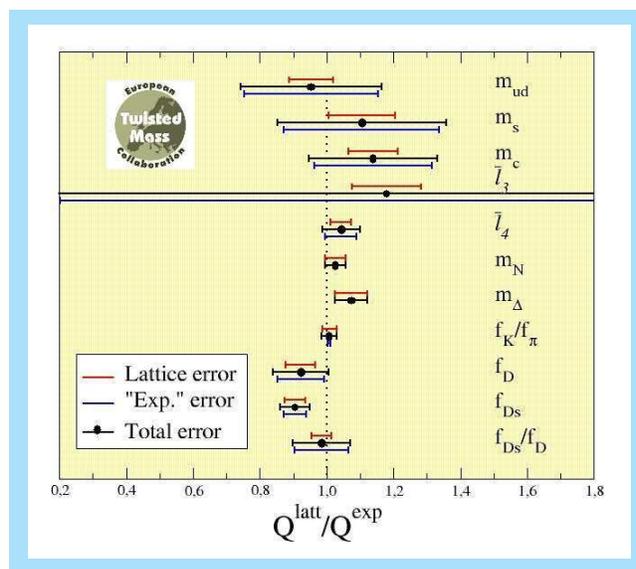


Abbildung 85: Ein Vergleich verschiedener physikalischer Größen aus dem particle data book ( $Q^{\text{exp}}$ ) und den nicht-perturbativen Gitterrechnungen von ETMC ( $Q^{\text{latt}}$ ). Die Gitterrechnung beinhaltet zwei Seequarks.

werden, dass dieser topologische Mechanismus zur Erzeugung der  $\eta$ -Mesonmasse tatsächlich stattfindet [arXiv:0804.3871].

Weitere Arbeiten beinhalten die Untersuchung von Diskretisierungseffekten [arXiv:0802.3637], Simulationen im sogenannten Epsilon-Regime der chiralen Störungstheorie [arXiv:0810.0300] und den Eigenschaften von Twisted Mass Fermionen bei nicht verschwindender Temperatur [arXiv:0809.5228]. Als weitergehender Schritt wurden Simulationen mit twisted mass Fermionen begonnen, die neben dem Up und Down Quark auch das Strange und Charm Quark mit einschließen und damit die Simulationen nahe an die physikalisch realistische Situation bringen.

Große Beachtung fand eine Berechnung der Massen verschiedener Hadronen in einer anderen Diskretisierung der Gittereichtheorie [Science 322:1224-1227]. Es handelt sich um eine der bisher größten Simulationen in der Gittereichtheorie, die Up, Down und Strange Seequarks beinhaltet. Sie wurde von einer Kollaboration unter Beteiligung der NIC-Gruppe auf dem BlueGene/P

Rechner des NIC durchgeführt. Nachdem die Parameter der Theorie durch Vorgabe von drei experimentell bestimmten Hadronmassen fixiert werden, liefert die Berechnung neun Massen in guter Übereinstimmung mit dem Experiment, mit Genauigkeiten zwischen 2 % und 10 %.

Die Gruppe beschäftigt sich weiterhin mit Modellen außerhalb der QCD. So konnte in einem chiral invarianten Higgs-Yukawa-Modell mithilfe nicht-perturbativer Gitterrechnungen untere und obere Schranken an die Higgs-Boson-Masse angegeben werden. Als Ergebnis stellt sich heraus, dass das maximal erlaubte Massenintervall für das Higgs-Boson 80 GeV-700 GeV beträgt. Dieses Ergebnis ist von Relevanz für den LHC, an dem die Higgs-Boson-Physik eine hervorragende Rolle spielt.

Die Gruppe leistete auch erhebliche Beiträge zur Entwicklung des QPACE Rechners. Die Knoten dieses Rechners basieren auf einer erweiterten Version des Cell Prozessors (der z. B. in der Playstation 3 verwendet wird) und werden durch ein speziell entwickeltes Kommunikationsnetzwerk engmaschig verbunden. Während ein einzelner Knoten bereits eine Spitzenleistung von 200 GFlops hat, können Tausende solcher Knoten durch eine ausgeklügelte Mechanik und ein leistungsfähiges Kühlsystem zu einer einzigen Maschine zusammengeschaltet werden. Diese Rechnerarchitektur verspricht sehr gute Energie- und Kosteneffizienz für QCD Rechnungen [arXiv:0810.1559].

## Konferenzen

Die Theoriegruppe war an der Organisation mehrerer Konferenzen und Schulen beteiligt:

- LATTICE PRACTICES 2008, 8.-10. Oktober 2008, Zeuthen
- Loops and Legs 2008, 9th Workshop on Elementary Particle Theory, 20-25 April 2008, Sondershausen, Germany
- CERN/DESY workshop on *HERA and the LHC*, May 2008, CERN, Geneva

- *PDF-School*, Helmholtz-Allianz, November 2008, DESY, Zeuthen

## Internationale Zusammenarbeit, Drittmittel-Projekte, Lehrtätigkeit

Im Berichtszeitraum wurde im DFG-Sonderforschungsbereich/Transregio SFB/TR-09 *Computergestützte Theoretische Teilchenphysik* in Kooperation mit Gruppen der RWTH Aachen, der HU Berlin und der Uni(TH) Karlsruhe erfolgreich mitgearbeitet. Antragsteller sind hier J. Blümlein, K. Jansen, S. Moch, R. Sommer und T. Riemann.

Der Bereich Theorie ist Mittragsteller bei zwei TMR-Netzwerken zur Nachwuchsausbildung der Europäischen Union: Tools and Precision Calculations for Physics Discoveries at Colliders (MRTN-CT-2006-035505) und Entering the high-precision era of flavour physics through the alliance of lattice simulations, effective field theories and experiment (MRTN-CT-2006-035482).

Wir sind an zwei Einzelprojekten der DFG als Leiter beteiligt: Higgsmodelle auf dem Gitter (mit der HU Berlin) und QCD mit chiral rotiertem Massenterm (mit der Universität Münster). Im Berichtszeitraum wurde S. Moch im Rahmen der Helmholtz-Hochschulnachwuchsgruppe VH-NG-105 Computer algebra and higher orders in particle theory von der Helmholtz-Gemeinschaft gefördert.

An der Universität Potsdam wurden die Vorlesungen Quantenfeldtheorie und Standardmodell der Elementarteilchen-Theorie gehalten. An der Humboldt-Universität Berlin wurden Vorlesungen über Physik an Hadron-Beschleunigern und Physik am LHC sowie Einführung in die Gittertheorie gehalten. Ferner wurden Spezielle Kapitel der Quantenfeldtheorie an der Universität Dortmund gelesen. Mitglieder der Gruppe betreuten mehrere Diplom- und Doktorarbeiten.