



Bei der Kollision von Galaxienhaufen entstehen kosmische Schockwellen. Dieses Bild zeigt eine der beiden beobachteten Schockwellen im Galaxienhaufen Abell 3667. Sie ist etwa sechzig Mal so groß wie die Milchstraße.

# Die großen Fragen der Physik

**Der Exzellenzcluster Quantum Universe der Universität Hamburg beschäftigt sich mit Fragen rund um den Ursprung, die Geschichte und die Zusammensetzung des Universums.**

**Maike Pfalz**

**D**ie Entdeckung des Higgs-Bosons am Large Hadron Collider und der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen durch die beiden LIGO-Observatorien zählen zu den spektakulärsten Erfolgen der physikalischen Grundlagenforschung in den letzten Jahren und wurden mit den Physik-Nobelpreisen 2013 und 2017 gewürdigt. Beide Entdeckungen stützen grundlegende Konzepte der Physik: die Erzeugung der Masse von Elementarteilchen durch den Higgs-Mechanismus bzw. die Dynamik der Raumzeit. Allerdings zeigen astronomische und kosmologische Betrachtungen, dass unsere derzeitige Beschreibung der Natur unvollständig ist. Noch bleibt unklar, woraus Dunkle Materie besteht oder was der Ursprung der beschleunigten Expansion des Universums ist. Darüber hinaus gibt es für die Entwicklung des sehr frühen Universums bislang keine konsistente Beschreibung im Rahmen der etablierten Quanten- und Gravitationstheorien. Ein Verständnis von Masse und Gravitation an der Schnittstelle von Quantenphysik und Kosmologie zu gewinnen,

ist das zentrale Forschungsziel des Exzellenzclusters Quantum Universe der Universität Hamburg und des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY.

Um diese grundlegenden Fragen zu beantworten, arbeiten im Cluster mehr als 300 Personen aus der Mathematik, Teilchen-, Astro- und Mathematischen Physik zusammen. Die Forschungsarbeiten reichen von der Entwicklung mathematisch-theoretischer Modelle über das Studium der Physik des Higgs-Teilchens bis zu theoretischen und experimentellen Arbeiten zur Suche nach Dunkler Materie sowie zu Gravitationswellen als Fenster in das frühe Universum. Im Fokus steht die Beziehung zwischen der Quantenphysik, welche die kleinsten Objekte in der Natur beschreibt, und der Struktur und Entwicklung des Universums.

Hamburg hat eine lange Tradition in der Teilchenphysik. „Seit 60 Jahren gehören wir zur Weltklasse“, unterstreicht Clustersprecher Jan Louis, der sich als Physikprofessor der Universität Hamburg unter anderem mit der Stringtheorie beschäftigt. An der Schnittstelle zwischen Teilchen- und

Astrophysik sowie Kosmologie haben Hamburger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Rahmen des SFB „Particles, Strings and the Early Universe“ zwölf Jahre lang geforscht und damit das Fundament geschaffen für den Exzellenzcluster, der diese Felder zusammenführen, weiterentwickeln und mit weiteren Themengebieten verknüpfen möchte. „Um die Gravitation mit der Quantenfeldtheorie zu verbinden, müssen wir die Expertise aus all diesen Bereichen zusammennehmen und das Problem von den vielversprechendsten Seiten angehen“, ist der Teilchenphysiker Peter Schleper überzeugt, der zusammen mit Géraldine Servant das Co-Sprecherteam bildet.

## Vier Felder der Physik

Die Arbeiten des Clusters fokussieren sich auf vier Forschungsfelder (**Infokasten**): Im ersten Bereich geht es darum, den Higgs-Sektor sowie seine kosmologischen Implikationen zu untersuchen. Die Entdeckung des Higgs-Bosons am LHC war ein wichtiger Schritt zum Verständnis der elektroschwachen Symmetriebrechung und dessen Beziehung zur Masse der Elementarteilchen. In den letzten zehn Jahren haben größere Datensätze und genauere Analysen enorme Fortschritte ermöglicht. Mitglieder des Clusters sind führend an den Auswertungen sowie den theoretischen Interpretationen, vor allem im Hinblick auf kosmologische Auswirkungen, beteiligt.

„Bislang haben wir im Higgs-Bereich aber noch zu wenig Daten, die zudem in der Präzision limitiert sind“, erläutert Peter Schleper. So sei es bisher nicht gelungen, einige vorhergesagte Eigenschaften des Higgs-Bosons zu beobachten, etwa seine Wechselwirkung mit den leichten Generationen der Elementarteilchen oder auch die Higgs-Selbstkopplung. Neben der Suche nach diesen seltenen Phänomenen gehe es künftig darum, die bereits entdeckten Kopplungen mit höherer Präzision zu vermessen. Eine genauere Kenntnis über beispielsweise die Kopplung des Higgs-Bosons an das Top-Quark oder das Higgs-Potential seien wichtig, um die Phasenübergänge im frühen Universum zu verstehen. Mit Spannung werden auch die zukünftigen Ergebnisse von Suchen nach Hinweisen auf zusätzliche Higgs-Bosonen erwartet, da diese Szenarien erhebliche kosmologische Konsequenzen hätten.

Das zweite Forschungsfeld befasst sich mit der Dunklen Materie, deren Natur nach wie vor unklar ist. Die möglichen Bereiche ihrer Massen und Kopplungen umfassen viele Größenordnungen. Aufbauend auf experimentellem, beobachtungsbezogenem und theoretischem Fachwissen sucht der Cluster nach Teilchen der Dunklen Materie und untersucht deren mögliche Wechselwirkungen. Bestehende Experimente suchen seit vielen Jahren vor allem nach schweren Teilchen der Dunklen Materie, den Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs). In Hamburg konzentriert man sich auch auf die Suche nach Weakly Interacting Slim Particles (WISPs), zu denen auch die Axionen zählen.

„Unser Ziel besteht darin, eine neue Plattform von Experimenten aufzubauen, um nach axionartigen Teilchen zu suchen“, sagt Peter Schleper. Zu diesen Experimenten zählen unter anderem MADMAX (Magnetized Disc and



Claudia Höhne

Jan Louis (links), Géraldine Servant und Peter Schleper haben als Sprecherteam den Cluster bis Ende Juni 2022 geleitet.

Mirror Axion Experiment) und BRASS (Broadband Radiometric Axion Searches). Darüber hinaus geht es darum, die Verbindung zur Astrophysik herzustellen und aus kosmologischen Beobachtungen Rückschlüsse zu ziehen auf die Verteilung der Dunklen Materie in der Galaxis.

Im dritten Forschungsfeld stehen Gravitationswellen im Fokus, deren direkter Nachweis eine neue Ära der Astrophysik eingeläutet hat. „Gravitationswellen eröffnen einen völlig neuen Beobachtungskanal“, führt Géraldine Servant aus. Die Detektion von Gravitationswellen sowie nachfolgende Beobachtungen im elektromagnetischen Spektralbereich erlauben es zusammen mit theoretischen Studien ihrer Quellen, eine direkte Verbindung herzustellen zum Ursprung und der Verteilung von Masse im Universum sowie zur Theorie der Gravitation. Auf diese Weise möchten die Forschenden die Geschichte des Universums rekonstruieren, insbesondere das frühe Universum. Die bisherigen Signale stammen von der Kollision zweier Schwarzer Löcher bzw. Neutronensterne. Gravitationswellen, die in

## Exzellenzcluster „Quantum Universe“

### Beteiligte Institutionen:

Universität Hamburg, Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

### Sprecher:

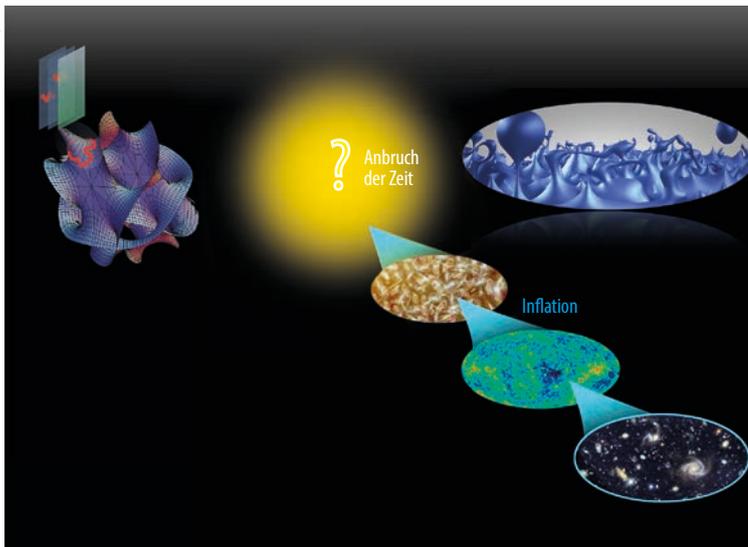
Prof. Dr. Jan Louis (Universität Hamburg)

### Co-Sprecher:

Prof. Dr. Peter Schleper (Universität Hamburg) und Prof. Dr. Géraldine Servant (DESY und Universität Hamburg)

### Forschungsfelder:

- **Higgs:** Untersuchung des Higgs-Sektors und seine kosmologischen Auswirkungen
- **Dunkle Materie:** Suche nach Wechselwirkungen von Teilchen der Dunklen Materie im Labor und im Kosmos
- **Gravitationswellen:** Entwicklung neuer Techniken für die Beobachtung von Gravitationswellen und deren Nutzung in Kosmologie und Astrophysik
- **Quantentheorien:** Fortschritte bei den entsprechenden Quantentheorien für Materie und Gravitation



Mit heutigen Methoden ist es nicht möglich, den Urknall zu beobachten. Eines der Ziele des Clusters besteht darin, sich dem Urknall immer weiter zu nähern.

frühen Phasen des Universums entstanden sind, erfordern sensitivere Detektoren. Gravitationswellen erlauben es, in den Kosmos hineinzuhorchen in eine Zeit, in der er noch nicht transparent für Licht war. Dies bringt die Forschenden näher an den Urknall heran. Essenziell hierfür war die Vorhersage für Signaturen von Gravitationswellen aus dem früheren Universum. „Im Cluster konnten wir berechnen, welchen Phasenübergang es im frühen Universum gegeben hat und wie die Gravitationswellen davon heute aussehen würden“, sagt Géraldine Servant.

Wichtig ist zudem die Entwicklung der Technologien für künftige Gravitationswellen-Detektoren. „Daran sind wir führend beteiligt, etwa im Bereich des gequetschten Lichts“, betont Jan Louis. Die Forschenden wollen neue experimentelle Techniken entwickeln und eine Plattform erarbeiten für große neue Gravitationswellenexperimente. Viele dieser Arbeiten sind auf sehr langen Zeitskalen angelegt und über kürzere Drittmittelprojekte nicht zu bearbeiten. „Diese Freiheit gibt uns nun der Cluster“, freut sich Peter Schleper.

Der vierte Forschungsbereich betrifft Quantentheorien für Materie und Gravitation und führt die anderen Bereiche zusammen. Denn die drei Hauptfragen des Clusters – der Quantenursprung der Masse, die Natur der Dunklen Materie und die Beziehung der Schwerkraft zur Quantenwelt – erfordern koordinierte Anstrengungen und konkrete Instrumente an der Schnittstelle zwischen Mathematik und Physik. „Die Antwort auf die große Frage nach dem Zusammenhang von Gravitation, Masse und Quantenphysik können wir nur in einem Konzert der Methoden aus den einzelnen Fachgebieten liefern“, unterstreicht Jan Louis.

Jedes der vier Forschungsfelder verspricht im nächsten Jahrzehnt wissenschaftliche Durchbrüche, die zu einem besseren Verständnis der Natur führen können. Neben den fachlichen Themen bearbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Hamburg auch Querschnittsthemen wie Data Science, das in allen Bereichen eine zunehmend wichtige Rolle spielt. Eine neue Professur stärkt diesen

Bereich gezielt und ist darauf fokussiert, Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens dazu einzusetzen, teilchenphysikalische Reaktionen nach neuen Signaturen zu untersuchen. „In diesem Bereich haben wir in den letzten Jahren einen substanziellen Fortschritt gesehen“, unterstreicht Peter Schleper.

## Nachwuchs und junge Talente fördern

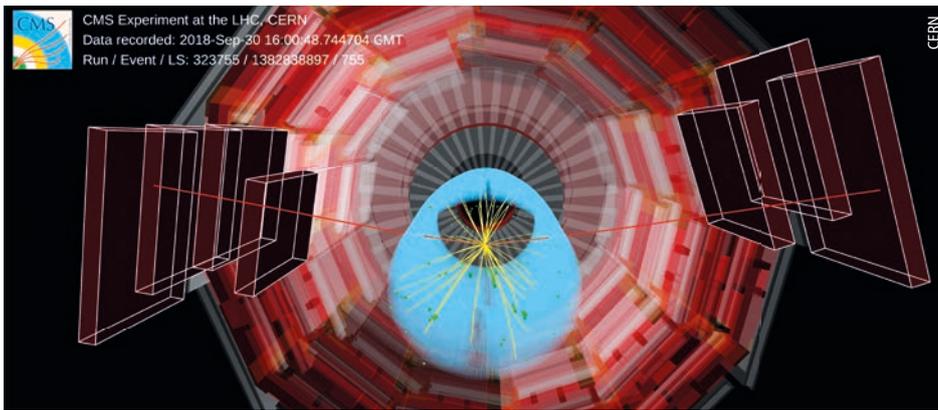
In der bisherigen Laufzeit des Clusters ist es neben fachlichen Fortschritten auch gelungen, neue Stellen einzurichten und Professuren zu besetzen, um bestimmte Gebiete auszubauen. „Beispielsweise haben wir den Bereich Gravitationswellen durch Neubesetzungen wesentlich gestärkt“, hebt Jan Louis hervor.

Beim Thema Gleichstellung achtet der Cluster nicht nur darauf, die Sichtbarkeit etablierter Wissenschaftlerinnen beispielsweise durch sog. Beate Naroska Guest Professorships sicherzustellen, sondern auch Nachwuchsförderung „bottom up“ zu betreiben: „Wir haben eine Reihe spannender Formate, etwa die Physik-Projekt-Tage, die sich an Mädchen im Alter von 13 bis 15 Jahren richten. Diese führen dann bei uns im Labor eigene Projekte durch“, erläutert Peter Schleper. Andere Formate, um den Nachwuchs für Physik zu begeistern, sind die Astrowerkstatt mit Kursen für Schülerinnen und Schüler zu astronomischen Themen, der Ferienkurs Forschung, der die Möglichkeit bietet, in Kleingruppen eigene Experimente selbstständig durchzuführen oder das Schülerlabor „physik.begreifen“.

Der Exzellenzcluster möchte die besten jungen Talente nach Hamburg holen und ihnen hervorragende Karriere-möglichkeiten eröffnen. Ein wichtiger Baustein hierfür ist die Quantum Universe Research School. Diese bietet eine strukturierte Karriereförderung für Promovierende, Postdocs und junge Gruppenleiterinnen und -leiter. Hauptaspekte sind neben einem kohärenten Betreuungs- und Mentorenprogramm die akademische Ausbildung sowie Soft-Skill-Kurse. „Wichtig war uns, dass wir eine gemeinsame Förderstruktur für alle Stufen der akademischen Karriere anbieten“, betont Jan Louis.

Auch in puncto Wissenschaftskommunikation ist der Cluster hervorragend aufgestellt. Ein Hamburger Erfolgsformat, das bereits seit 2015 läuft und aus der Arbeit des Sonderforschungsbereichs hervorgegangen ist, heißt „Wissen vom Fass“. An einem Abend treten in dutzenden Hamburger Kneipen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus verschiedenen Fachgebieten auf und erklären in 30 Minuten etwas über ihre Forschung. „Dabei agieren sie wie der Schauspieler auf der Bühne. Sie dürfen keine Folien mitbringen, sondern nur ein Requisit“, erklärt Jan Louis. „Das Format ist ein Riesenerfolg und geht weiter über den Cluster hinaus!“

Ein anderes Beispiel ist „Wir wollen's wissen“: Hierbei besuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Schulen und halten dort allgemeinverständliche Vorträge über ihre Forschung. Die Resonanz ist so groß, dass im Rahmen dieser Aktion rund hundert Vorträge in nur einer Woche stattfinden. Häufig kommen sogar andere Lehrkräfte zu den Vorträgen dazu, berichtet Jan Louis.



Die Hamburger Forschenden sind auch an den großen Kollaborationen CMS und ATLAS am LHC beteiligt. Dieses Event zeigt eine Proton-Proton-Kollision mit einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV im CMS-Detektor. Es handelt sich um ein Kandidaten-Ereignis für den Zerfall eines Higgs-Bosons in ein Paar Myonen (angedeutet durch die roten Linien).

## Die großen Fragen der Zukunft

Etwa die Hälfte der zunächst siebenjährigen Förderung als Exzellenzcluster ist inzwischen abgelaufen. Daher richten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihren Blick auf das Erreichen der ersten Etappenziele. Im experimentellen Bereich erwarten sie eine sehr starke Evidenz für die Kopplung des Higgs-Bosons an die zweite Generation von Fermionen und eine erste Evidenz der Higgs-Selbstwechselwirkung. In der Theorie geht es darum, die Modelle mit den experimentellen Daten zu vergleichen und damit Einschränkungen für Physik jenseits des Standardmodells vorzunehmen. Darüber hinaus liegt ein Schwerpunkt der Arbeiten darauf, eine neue Generation von Teilchendetektoren zu entwickeln, die Position und Energie auch zeitaufgelöst messen. Für die Axion-Experimente stehen wichtige Tests von Experiment-Prototypen an.

Im Bereich der Gravitationswellen sind das Einstein-Teleskop sowie das Weltraumobservatorium LISA wichtige Zukunftsprojekte. „Deren Zeitskala reicht weit über die Laufzeit des Clusters hinaus“, sagt Jan Louis. „Aber wir möchten bei den Projekten die deutsche Beteiligung sicher-

stellen und zum Bau dieser immer sensitiveren Geräte entscheidend beitragen.“

Bereits jetzt entwickeln die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterstützt von ihrem Scientific Advisory Board Projekte für eine zweite Förderperiode. Ob sich hierbei die Struktur des Clusters ändern wird, ob neue Themen hinzukommen und andere wegfallen, hängt natürlich auch von den wissenschaftlichen Ergebnissen der laufenden Förderphase ab. Unstrittig ist sicherlich, dass sich die derzeit behandelten großen Fragen nicht in der Laufzeit des Clusters beantworten lassen. „Sicher ist auch, dass fundamental neue Erkenntnisse in einem Bereich drastische Konsequenzen für die anderen Bereiche nach sich ziehen“, hebt Peter Schleper hervor. „Die Folgen betreffen nicht nur unseren Cluster, sondern die gesamte wissenschaftliche Community.“

## Die Exzellenzcluster

In loser Folge stellt das Physik Journal die Cluster der Exzellenzstrategie mit Schwerpunkt in der Physik bzw. starker Beteiligung von Physikerinnen und Physikern vor.

## Vakuumtechnik



Dichtheitsprüfanlage mit 3 automatisierten Prüfkammern,  
Helium-Prüfdruck: 30 bar, Prüfkammervolumina: 70 l,  
Konstante Taktzeit: 25 s, Messempfindlichkeit:  $2.0 \times 10^7$  mbar l/s

**PiNK**<sup>®</sup>

## Helium-Dichtheitsprüfanlagen

PiNK konstruiert und produziert Helium-Dichtheitsprüfanlagen als maßgeschneiderte Lösungen nach Kundenanforderung. Die Anlagen werden für Lecktests unterschiedlichster Systeme, Produkte oder Komponenten eingesetzt und sind je nach Anforderung für den teil- oder vollautomatisierten Betrieb ausgelegt.

- Helium-Leckraten bis  $10^{-9}$  mbar x l x sec<sup>-1</sup>, Prüfdruck bis 300 bar
- Teil- oder vollautomatisiert, mit Roboterbestückung/Materialflussanbindung
- Erweiterung auf Gasmischstation und Testgas-Rückgewinnungssystem möglich
- Speicherprogrammierbare Steuerung, Visualisierung und Datendokumentation
- Fernwartung, 24-h-Support