
Gerrit Schellenberger
„X-ray analysis of a complete sample of galaxy clusters“
– Zusammenfassung –

Die Kosmologie als Teildisziplin der Astrophysik widmet sich der Erforschung des Universums als Ganzen. Essenzielle Fragen, die seit Anbeginn ebenfalls auch in der Philosophie eine große Rolle spielen und unser Weltbild bestimmt haben, sind vor allem, Wie hat sich das Universum in der Vergangenheit entwickelt - Wie wird es sich in der Zukunft verhalten? Welche Strukturen gibt es darin und wie sind diese entstanden? Gibt es neben der Materie wie wir sie kennen noch andere Bestandteile und welchen Einfluss haben sie?

In der modernen Astrophysik nähert man sich diesen Problemstellungen durch Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen (zum Beispiel von großräumigen Strukturen) und Vergleich mit Vorhersagen aus theoretischen Modellen gestützt durch aufwändige Simulationen. Die größten Strukturen im Universum wurden durch eine große Anzahl von Galaxien, ähnlich unserer Milchstraße, in einer kleinen Fläche am Himmel als Galaxienhaufen identifiziert. Diese Galaxienüberdichten können nur einen langen Zeitraum (~1000 Millionen Jahre) überdauern, wenn die Galaxien mittels Gravitation im Galaxienhaufen als ganzes gebunden sind. Da die Masse aller Galaxien in einem Haufen bei Weitem nicht ausreicht, um solche System zu stabilisieren, muss eine (bis dahin) unsichtbare Form von Materie innerhalb des Galaxienhaufens existieren. In den 1970er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde durch die ersten Röntgensatelliten eine solche Komponente gefunden: Ein heißes Gas (mehrere zehn Millionen Grad und deshalb aufgrund thermischer Emission sichtbar im Röntgenbereich) füllt den Raum zwischen den Galaxien des Haufens. Erste Abschätzungen der Gesamtmasse dieses Gases ergaben aber, dass dieses zwar wesentlich massereicher ist als sämtliche Galaxien des Haufens zusammen, jedoch aber auch bei Weitem nicht schwer genug um die benötigte Masse aus der Dynamik der Galaxien im Haufen zu erklären. Die weiterhin fehlende Komponente wurde als Dunkle Materie bezeichnet, eine Form von Materie von der man annimmt, dass sie ausschließlich über die Schwerkraft mit ihrer Umgebung wechselwirkt, und somit kein Licht zu uns sendet.

Röntgenbeobachtungen von Galaxienhaufen stellen somit eine ideale Möglichkeit dar, die schwerste, sichtbare Komponente, das heiße Haufengas, der größten Strukturen im Universum direkt zu beobachten und zu charakterisieren. Aus der spektralen Energieverteilung der Röntgenemission lassen sich wichtige Parameter wie die Dichte, die Temperatur und chemischen Zusammensetzung des Gases bestimmen. Mit aktuellen Observatorien, wie dem Chandra Röntgenteleskop, können diese Parameter sehr präzise und, aufgrund der außergewöhnlich hohen räumlich Auflösung von Chandra, auch mit weiter entfernten Haufen verglichen werden.

Im ersten Teil der vorliegenden Doktorarbeit (Kapitel 3) wird die **Zuverlässigkeit der Kalibration** der beiden aktuell wichtigsten Röntgenteleskope (Chandra und XMM-Newton) anhand von Gastemperaturmessungen von 64 sehr hellen Galaxienhaufen untersucht: Erhält man die gleichen Ergebnisse, wenn man den identischen Bereich eines Galaxienhaufens mit unterschiedlichen Instrumenten vermisst? Erstmals wurde hier mit einer überragenden statistischen Genauigkeit die systematischen Unterschiede der beiden Röntgensatelliten dargestellt: **Chandra misst systematisch höhere Temperaturen des Haufengases als XMM-Newton**, jedoch kann keine Aussage getroffen werden, welche Temperatur der Wahren entspricht. Diese Unterschiede nehmen mit steigender Temperatur zu und erreichen für die heißesten Objekte im Extremfall fast 30%. Solch hohe Unsicherheiten in der Kalibration waren unerwartet und haben direkte Auswirkungen auf eine Vielzahl von bisherigen Wissenschaftlichen Studien mit Röntgenteleskopen. Es werden verschiedene Möglichkeiten abseits einer fehlerhaften, photonenergieabhängigen Sensitivität diskutiert, welche ebenfalls ein solches Ergebnis hervorrufen könnten: Weder eine Zusammensetzung des Gases aus mehreren Temperaturkomponenten, noch die unterschiedliche räumliche Auflösung der Satelliten erklären die Beobachtungen, wohingegen eine künstliche Korrektur der energieabhängigen Sensitivität eines der beiden Satelliten vollständige

Übereinstimmung der Temperaturen ergibt. **Abschließend werden weitere Tests vorgestellt, welche die wahre Temperatur, und somit das best-kalibrierte Instrument ermitteln können.** Die fehlende statistische Signifikanz dieser Tests verhindert allerdings eine eindeutige Schlussfolgerung, jedoch könnte eine größere Stichprobe von Haufen weiterhelfen.

Der Hauptteil der Arbeit (Kapitel 4) widmet sich der kosmologischen Interpretation von Röntgenmessungen von Galaxienhaufen und welche Probleme daraus entstehen. Wiederum wird von einer Stichprobe von 64 Galaxienhaufen ausgegangen, welche durch frühere Arbeiten als statistisch vollständig ermittelt wurde. Nur vollständige Stichproben können mit kosmologischen Modellen verglichen werden. Diese Modelle gehen davon aus, dass Galaxienhaufen durch Dichtefluktuationen im frühen Universum, wo zunächst normale und Dunkle Materie vollkommen gleichverteilt sind, entstehen. Die größten Fluktuationen der Dunklen Materie widerstehen der kosmischen Expansion und kollabieren durch Gravitation, worauf die normale Materie in diesen Halos „gefangen“ ist und Strukturen, wie wir sie heute beobachten, formt. Theorie und Simulationen sagen nun für gegebene kosmologische Anfangsbedingungen die Anzahldichte dieser Halos und deren Masse voraus. Anfangsbedingungen sind zum Beispiel die Anteile von normaler, Dunkler Materie und der Anteil der Expansionskraft des Universums an der Gesamtenergie, aber auch die Amplitude der ursprünglichen Dichtefluktuationen.

Die Temperatur und die Dichteverteilung des heißen Röntgengases wird durch die Gesamtmasse (inklusive Dunkler Materie) des Haufens und Annahme von hydrostatischem Gleichgewicht bestimmt. Durch detaillierte Beobachtungen aller 64 Haufen dieser Stichprobe wurde **zum ersten mal durch individuelle Massenbestimmung (unter Einbeziehung jedes Temperaturprofils) eine vollständige Stichprobe von Galaxienhaufen zur Bestimmung kosmologischer Parameter verwendet.** Insgesamt wurden die Daten von 134 Chandra Beobachtungen aller 64 Galaxienhaufen untersucht und das Gasdichte- und Temperaturprofil bestimmt. Die dunkleren Randbereiche der Haufen konnten in vielen Fällen nicht direkt beobachtet werden, aber unter Zuhilfenahme verschiedener Extrapolationsmethoden konnten diese, für die Massenbestimmung wichtigen Bereiche, parametrisiert werden. Der Einfluss dieser Extrapolation auf die Kosmologie wird als einer von vielen systematischen Effekten diskutiert. Des Weiteren ergibt sich, dass die **weniger massereichen Haufen, sogenannte Galaxiengruppen, stark von der Vorhersage abweichen.** Statistische Schwankungen (z.B. eine Unterdichte von Haufen) im sehr nahen Universum können nicht gefunden werden. **Die Auswirkung von weiteren physikalischen Effekten und Modellen, wie zum Beispiel eine hohe Neutrinomasse, Einbeziehung von normaler Materie und astrophysikalischen Effekten (Galaxieentwicklung) in den kosmologischen Simulationen, wurde ebenfalls getestet. Schließlich wird demonstriert, dass die statistische Signifikanz der kosmologischen Resultate stark zunimmt, wenn eine Kombination mit der Vermessung des Haufengasanteils an der Gesamtmasse statt findet.** Ein Vergleich mit anderen, unabhängigen kosmologischen Methoden ohne Galaxienhaufen, wie zum Beispiel die Vermessung der Fluktuationen im kosmischen Mikrowellenhintergrund ergeben ähnliche Resultate. Jedoch bleiben Galaxienhaufen die beste Methode, um die Strukturformation im Universum zu ermitteln. **Mit dieser Analyse wurde gezeigt, welche Systematiken die kosmologischen Schlussfolgerungen beeinflussen, was für zukünftige Studien und Missionen (wie der 2018 startende, deutsch-russische eROSITA Satellit) von großer Wichtigkeit sein wird.**

Abschließend widmet sich Kapitel 5 der **genauen Untersuchung eines einzelnen Galaxienhaufens** in dessen Gravitationspotential gerade eine äußerst große Galaxie einfällt. **Mit nie zuvor gesehener Größe wird deutlich, wie das Gas innerhalb der Galaxie durch Reibung am Haufengas aufgeheizt und schließlich vollständig von der Galaxie abgestreift wird.** Kleinere und größere Verschmelzungsprozesse von Galaxienhaufen mit anderen Galaxien oder Haufen sind essentiell um die Strukturentwicklung im Universum zu erklären. Die statistische Häufigkeit von Verschmelzungen, wie jener Interaktion, schafft eine Grundlage um theoretische Modelle zu falsifizieren. Auch die Betrachtung der Unterschiede in Leuchtkraft, Dichte, Temperatur und chemischer Zusammensetzung zwischen relaxierten und verschmelzenden Haufen schafft Klarheit, welche Verzerrungen im kosmologischen Modell diese verursachen. Die Suche nach irregulären Galaxienhaufen ist somit ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Kosmologie.