Schlussbericht
Zum Vorhaben 50 OR 2207

Messung von Schwapp-, Verschmelzungs- und Rückkopplungs-geschwindigkeiten in Galaxienhaufen

Andrea Merloni, Jeremy Sanders, Efrain Gatuzz und Konrad Dennerl

I. Kurze Darstellung zu:

1. Aufgabenstellung

Ein Aspekt der Physik von Galaxienhaufen, der am wenigsten verstanden wird, ist die Geschwindigkeitsstruktur des intracluster Mediums (ICM). Dieses heiße Plasma, das den Großteil der baryonischen Masse in einem Galaxienhaufen ausmacht, emittiert Röntgenstrahlen aufgrund seiner extrem hohen Temperatur. Die Messung der Geschwindigkeit des ICM ist entscheidend, um eine Vielzahl von schlecht verstandenen physikalischen Prozessen zu untersuchen, die die Bewegung innerhalb von Haufen antreiben. Zum Beispiel können Kollisionen zwischen Haufen und Subhaufen Turbulenzen oder großräumige Strömungen im ICM erzeugen, ebenso wie Schwingen des Gases innerhalb des Haufens. Ähnlich kann die Aktivität eines zentralen aktiven galaktischen Kerns (AGN), der häufig im Kern von Galaxienhaufen zu finden ist, ebenfalls Turbulenzen oder Strömungen im umgebenden ICM hervorrufen. Die primäre Methode zur direkten Messung der ICM-Geschwindigkeiten erfolgt über die Rotverschiebung von Fe-K-Schalen-Emissionslinien, was eine hohe spektrale Auflösung erfordert. Leider hat der vorzeitige Ausfall der Hitomi-Mission den Zugang zu solchen Möglichkeiten verzögert. Der bevorstehende Start von XRISM im Jahr 2022 wird schließlich einen hochauflösenden Röntgendetektor bereitstellen, der in der Lage ist, Galaxienhaufen im Detail zu beobachten. In der Zwischenzeit haben wir eine neue Technik entwickelt, die das EPIC-pn-Instrument des XMM-Newton-Röntgenteleskops nutzt, um Großbewegungen innerhalb von Galaxienhaufen zu messen. Indem wir die normalerweise unerwünschten Hintergrund-Emissionslinien in den Spektren nutzen, können wir die Kalibrierung der Energiskala des Instruments verfeinern. Diese Methode ermöglicht es uns, Gasströme im ICM mit einer Genauigkeit von besser als 150 km/s zu messen.

Wir haben tiefe Beobachtungen des Ophiuchus-Galaxienhaufens mit XMM-Newton durchgeführt, um unsere neue Technik anzuwenden. Die primären wissenschaftlichen Ziele des Projekts sind: (1) Untersuchen des Geschwindigkeitsfeldes in den Kaltfronten, die im Ophiuchus-Haufen identifiziert wurden und wahrscheinlich durch Schwingen verursacht werden, sowie der Vergleich mit Simulationen; (2) Messung der räumlichen Verteilung der Geschwindigkeiten in der innersten Zentralregion des Ophiuchus-Haufens, die mit einem Kühlkern assoziiert ist; (3) Nutzung der RGS-Gitterbeobachtungen von Ophiuchus, um die Geschwindigkeitsbreite auf kleinen Skalen nahe dem Kern einzuschränken und die Thermodynamik des Materials im Haufenkerne zu untersuchen; (4) Untersuchung des Geschwindigkeitsfeldes und der thermodynamischen Struktur in den Bereichen, die durch die Kaltfronten dynamisch gestört sind, mit Hinweisen auf Kelvin-Helmholtz- und Rayleigh-Taylor-Instabilitäten; (5) Suche nach Geschwindigkeitsstrukturen im Ophiuchus, die mit Schwingen in Verbindung stehen, und Vergleich mit Simulationen; (6) Untersuchung der Verteilung der Geschwindigkeiten um die große Kavität im Südosten des Haufens. Eine solche Kavität könnte ein sehr alter fossiler Überrest des stärksten AGN-Ausbruchs sein, der je in einem Galaxienhaufen beobachtet wurde; (7) Messung der Metallizitätsvariation sowie der Variation der Elementhäufigkeiten auf kleinen Skalen und Untersuchung, ob die beobachtete Metallizitätsverteilung mit der Diffusion durch die beobachteten Geschwindigkeiten übereinstimmt, um Modelle der Diffusion zu testen. Wir werden diese

Karten auch nutzen, um die Geschichte der Anreicherung zu studieren; (8) Vergleich der Geschwindigkeitsstruktur im ICM mit der Geschwindigkeitsverteilung der Galaxien.

Unsere Studie wird die Grundlage für das Verständnis mehrerer wichtiger physikalischer Prozesse in Galaxienhaufen schaffen. Durch die Messung der Geschwindigkeiten in verschmelzenden Systemen möchten wir Modelle des Gas-Schwingens (sloshing) einschränken, einem Prozess, der eine wesentliche Rolle in der Dynamik des intracluster Mediums (ICM) spielt. Es gibt erhebliche theoretische Unsicherheiten darüber, wie die durch Feedback-Mechanismen freigesetzte Energie im ICM dissipiert wird, was entscheidend für die Verhinderung einer schnellen Abkühlung ist. Darüber hinaus können wir durch die Analyse von Geschwindigkeiten, die mit Verschmelzungen oder Schwingen in Verbindung stehen, wertvolle Einschränkungen für Modelle der Entstehung großräumiger Strukturen liefern.

2. Voraussetzungen

Zusätzlich zum Erwerb der XMM-Newton-Beobachtungen erforderte dieses Projekt wesentliche Aktualisierungen des Korrekturverfahrens, das in unseren früheren Analysen verwendet wurde. Unsere Methode basiert auf dem gesamten Archiv der XMM-Newton-Beobachtungen, um langfristige Veränderungen in der Leistung des EPIC-pn Detektors zu berücksichtigen. Zum Beispiel nimmt die Größe der Energieverschiebungen in den Hintergrund-Emissionslinien mit der Zeit zu und variiert in verschiedenen Regionen des Detektors. Da die Daten, die in unserem früheren Verfahren verwendet wurden, Jahre vor den in diesem Projekt analysierten Beobachtungen aufgenommen wurden, haben wir neuere Datensätze in den Korrekturprozess integriert. Darüber hinaus haben wir auf die neueste Version der XMM-Newton-Analyse-Software umgestellt, um von aktualisierten Werkzeugen und Algorithmen zu profitieren und die zuvor verwendete ältere Version zu ersetzen. Dieses Update erforderte einen erheblichen Aufwand, einschließlich der Neuverarbeitung einer großen Anzahl von XMM-Newton-Beobachtungen und dem erneuten Ausführen der Analyse-Skripte, um Konsistenz und Genauigkeit sicherzustellen.

3. Planung und Ablauf der Vorhabens

Die XMM-Newton-Beobachtungen wurden speziell so geplant, dass sie Regionen des Ophiuchus-Haufens anvisieren, in denen das intracluster Medium innerhalb des Potenzialtopfs des Haufens schwingt. Eine wesentliche Einschränkung der Energiemodifikationsmethode ist, dass sie nur in den äußeren Teilen des Detektors effektiv funktioniert. Um dies zu beheben, wurden die Beobachtungen mit Überlappungen geplant, um das "Loch" im Zentrum jedes Sichtfeldes auszugleichen. Die Analyse umfasst die folgenden wichtigen Aufgaben:

1.- Das Korrekturmodell neu erstellen.

2.- Das aktualisierte Energiemodifikationsmodell validieren.

3.- Datenreduktion, -bereinigung und -bewertung durchführen.

4.- Geschwindigkeits- und thermodynamische Eigenschaften in Abhängigkeit vom Radius analysieren.

5.- Geschwindigkeits- und thermodynamische Karten erstellen.

6.- Mit Simulationen vergleichen.

7.- Radiale Profile der Metallizität messen und Anreicherungsprozesse untersuchen.

4. Wissenschaftlich technischer Stand, an den angeknüpfte wurde

Dr. Sanders entwickelte die Technik, die in diesem Projekt verwendet wurde, und wandte sie auf Archivbeobachtungen des XMM-Newton-Teleskops von den Perseus- und Coma-Galaxienhaufen an (Sanders et al. 2020). Diese Archivdaten untersuchen nicht die Regionen um das zentrale supermassive Schwarze Loch im Perseus-Haufen, da die Beobachtungen nicht für diese Art von Analyse konzipiert wurden. Darüber hinaus ergänzen die Ergebnisse dieses Projekts die Erkenntnisse aus Perseus und Coma, da jeder Galaxienhaufen einzigartig ist und Stichproben von Objekten erforderlich sind, um populationweite Ergebnisse zu finden.
Das Hitomi-Teleskop lieferte bahnbrechende Messungen der Geschwindigkeitsstruktur im Kern des Perseus-Galaxienhaufens. Leider ging der Satellit verloren, bevor weitere Messungen an anderen Galaxienhaufen durchgeführt werden konnten. Dr. Sanders fand jedoch zuvor eine Übereinstimmung zwischen den Hitomi-Messungen und denen, die mit der in diesem Projekt verwendeten Energiemodifikationsmethode erhalten wurden (Sanders et al. 2020).
Unsere Erfahrung in der Analyse des Virgo- und Centaurus-Haufens hat es uns ermöglicht, Anpassungsverfahren und Modelle zu entwickeln. Zum Beispiel konstruierten wir in Gatuzz et al. (2021b) ein Modell, um eine lognormale Temperaturverteilung (genauer gesagt lognormal) zu beschreiben, um die mögliche Präsenz eines Plasma mit mehreren Temperaturen zu berücksichtigen. Das Ausgabespektrum wird durch die Summierung mehrerer APEC-Komponenten mit log-normalen relativen Normalisierungen erzeugt, wobei angenommen wird, dass sie denselben Rotverschiebungswert und die gleiche Metallizität aufweisen. In diesem Sinne profitiert die Analyse des Ophiuchus direkt von unserer früheren Arbeit.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Galaxienhaufen-Gruppe der High Energy Group am MPE arbeitet eng mit anderen Gruppen in der Untersuchung von Galaxienhaufen zusammen. Einige wichtige Mitarbeiter, die an diesem Projekt mitgewirkt haben, sind unten aufgelistet. Die Beiträge zu spezifischen Aspekten der einzelnen Publikationen sind in der Publikationsliste zu finden.

Konrad Dennerl (Co-I XMM), MPE, München, Deutschland
Ang Liu (Co-I XMM), MPE, München, Deutschland
Andrew Fabian (Co-I XMM), Institute of Astronomy, University of Cambridge, Großbritannien
Ciro Pinto (Co-I XMM), INAF - IASF Palermo, Italien
Helen Russell (Co-I XMM), Nottingham University, Großbritannien
Takayuki Tamura (Co-I XMM), ISAS, JAXA, Kanagawa, Japan
Stephen Walker (Co-I XMM), University of Alabama, USA
John ZuHone (Co-I XMM), Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA
Rajesh Mohapatra (Co-I XMM), University of Princeton, Princeton, USA

Darüber hinaus hat das Kalibrierungsteam des XMM-Newton-Teleskops Interesse an den in diesem Projekt verwendeten Techniken gezeigt. Sie führen Gespräche mit dem Team und integrieren Aspekte der Kalibrierungstechnik in die Standard-Datenverarbeitung von XMM-Newton.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der geplanten Ziele

Das Forschungsprojekt (Projektleiter Dr. Andrea Merloni) wurde von Dr. Efrain Gatuzz am MPE durchgeführt. Das Projekt war erfolgreich und führte zu fünf Publikationen.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Dr. Efrain Gatuzz wurde für den Zeitraum vom 01.09.2022 bis zum 31.08.2024 im Rahmen des Stipendiums als befristeter Mitarbeiter (Postdoc) gefördert.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Folgenden beschreiben wir die durchgeführten Arbeiten gemäß dem Arbeitsplan.

1) Das Korrekturmodell neu erstellen

Dr. Gatuzz aktualisierte das Analyseverfahren, um die neueste Version der XMM-Newton wissenschaftlichen Analyse-Software zu nutzen. Er erstellte eine Liste neuer Beobachtungen, die in das Korrekturmodell integriert werden sollten, und führte den Modellierungsprozess erfolgreich erneut durch. Dieser Aufwand führte zu einer aktualisierten Korrektursoftware und einem verbesserten Modell, das die neuesten Korrekturdaten beinhaltete. Das überarbeitete Modell wurde anschließend mit dem XMM-Newton-Kalibrierungsteam geteilt.

2) Das aktualisierte Energiemodifikationsmodell validieren

Dr. Gatuzz verfeinerte das Energiemodifikationsmodell, indem er alle verfügbaren Daten einbezog und die Virgo- und Centaurus-Haufen erneut analysierte. Ein Vergleich der neu erhaltenen Geschwindigkeiten mit zuvor berichteten Werten zeigte eine gute Übereinstimmung und bestätigte die Robustheit sowohl des aktualisierten Korrekturverfahrens als auch der ursprünglichen Ergebnisse.

3) Datenreduktion, -bereinigung und -bewertung durchführen

Dr. Gatuzz verarbeitete die XMM-Newton EPIC-pn-Daten, indem er störende Flares identifizierte und herausfilterte. Er führte auch eine Quellenfindung durch, um punktuelle, störende Quellen im Datensatz zu lokalisieren und zu maskieren, bevor er das Korrekturverfahren anwendete. In der Zwischenzeit kümmerte sich Dr. Sanders um die Reduktion der XMM-Newton Reflection Grating Spectrometer-Daten und entfernte störende Flares, um die Datenqualität sicherzustellen.

4) Geschwindigkeits- und thermodynamische Eigenschaften in Abhängigkeit vom Radius analysieren

Verschiedene Methoden zur Auswahl von Regionen für die Erstellung radialer Profile wurden von Dr. Gatuzz untersucht. Er extrahierte Spektren aus diesen Regionen und passte sie an, um Profile der Geschwindigkeitsstruktur im Ophiuchus-Haufen zu erhalten. Wir untersuchten die Geschwindigkeitsverteilung, indem wir nicht überlappende, kreisförmige Regionen erstellten. Unsere Ergebnisse stimmen mit einer großen Änderung der Geschwindigkeiten von blauverschobenem zu rotverschobenem Gas überein, das sich bei $\sim$250 kpc befindet. Wir analysierten die Geschwindigkeitsverteilung entlang der W- und E-Richtungen, indem wir nicht überlappende, kreisförmige Regionen erstellten. Wir stellten fest, dass die für beide Richtungen erhaltenen Geschwindigkeiten für Entfernungen von $\sim$250 kpc tendenziell entgegengesetzt sind.

5) Geschwindigkeits- und thermodynamische Karten erstellen

Die Erstellung von Geschwindigkeits- und Thermodynamik-Karten wurde von Dr. Gatuzz geleitet, der eine auf Ellipsen basierende Methode entwickelte, die bereits in den früheren Analysen der Perseus-, Coma-, Virgo- und Centaurus-Haufen verwendet wurde. Er erstellte 2D-projizierte Karten für die Verteilung von Geschwindigkeit, Temperatur, Metallizität, Dichte, Entropie und Druck für den Ophiuchus-Haufen. Wir fanden eine große rotverschobene–blauverschobene Grenzfläche, die sich ~150 kpc in Richtung E vom Clusterkern befindet. Unsere Modellierung von Regionen entlang der Oberflächenhelligkeit deutet darauf hin, dass diese Grenzfläche durch Diskontinuitäten mit einem Geschwindigkeitsunterschied von v~2500 km/s verfolgt wird. Eine solche Struktur in den Geschwindigkeiten wurde jedoch entlang einer ähnlichen Oberflächenhelligkeitsdiskontinuität, die in Richtung W vom Clusterkern liegt, nicht gefunden. Die Grenzfläche zeigt Hinweise auf einen Mangel an Metallmischung. Wir haben genaue Geschwindigkeitsmessungen mit Unsicherheiten bis zu v~170 km/s erhalten. Wir fanden große Geschwindigkeitsunterschiede zwischen einigen Regionen nahe dem Clusterkern, mit Abweichungen von der Systematik >5σ.

6) Mit Simulationen vergleichen

Mit der Zusammenarbeit von Dr. ZuHone und Dr. Mohapatra verglich Dr. Gatuzz die in Ophiuchus beobachtete Geschwindigkeitsstruktur mit projizierten Geschwindigkeitskarten, die aus Simulationen von Haufen stammen, die mit Magnetohydrodynamik simuliert wurden. Die realen Ergebnisse beinhalten die Effekte von Schlingern und Rückkopplung, während der simulierte Datensatz nur das Schlingern berücksichtigt. Der simulierte Haufen zeigt hohe Geschwindigkeitsfelder für verschmelzende Systeme.

7) Radiale Profile der Metallizität messen und Anreicherungsprozesse untersuchen.

Dr. Gatuzz leitete die Studie der Radialprofile für Si, S, Ar, Ca und Fe. Da das System stark absorbiert ist, haben wir nur obere Grenzwerte für O, Ne, Mg und Ni erhalten. Die Radialverteilungen von S, Si und Fe zeigen ein abnehmendes Verhalten in Abhängigkeit vom Abstand. Gleichzeitig haben wir keine signifikanten Änderungen in den Anreicherungsprofilen für die anderen Elemente mit einer statistischen Signifikanz >2σ gefunden. Wir berechneten die X/Fe-Anreicherungsverhältnisse für Si, S, Ar und Ca. Wir modellierten diese Profile mit einer linearen Kombination von SNcc und SNIa. Wir fanden, dass das am besten passende Modell einem verzögerten Detonations-3D-Modell für SNIa und einer anfänglichen Metallizität von Z=0.01 für SNcc entspricht. Während dieses Modell die erhaltenen Si/Fe- und S/Fe-Profile grob reproduziert, werden die Ar/Fe- und Ca/Fe-Profile nicht gut reproduziert. Wir fanden eine flache Radialverteilung des SNIa-Verhältnisses über die gesamte Clusteranreicherung von 10–30 Prozent für alle Radien. Das Fehlen leichter α-Elemente in den Anreicherungen könnte jedoch zu einer Überschätzung des SNcc-Beitrags führen.

4. Vorraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplannes

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen erneut, dass unsere Technik zur Messung von Geschwindigkeiten in Galaxienhaufen gut funktioniert. Wir haben weitere lange Beobachtungen von XMM-Newton erhalten (PI Gatuzz), um die Galaxienhaufen A3266 und A2029 zu beobachten. Die Ziele dieses Projekts sind es, nach Geschwindigkeiten im intracluster Medium zu suchen, um Rückkopplung und Schlingern innerhalb der Systeme zu untersuchen. Die Daten werden analysiert, um Profile der Geschwindigkeitsstruktur und Karten zu erstellen.

5. Darstellung des Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keine ähnlichen Ergebnisse im Bereich der direkten Messung von Geschwindigkeiten wurden an anderer Stelle erzielt. Die in dieser Studie verwendete Korrekturmethode bleibt derzeit einzigartig, obwohl ähnliche Korrekturtechniken möglicherweise in Zukunft in der Standard-XMM-Newton-Software eingesetzt werden könnten.

6. Erfolgte oder Geplante Veröffentlichung der Ergebnisse nach Nr.6

Die Hauptresultate der Ophiuchus-Haufenanalyse wurden in Gatuzz et al. (2023a,c,e) veröffentlicht. Auch die Analyse der Anreicherungsprofile für Virgo und Centaurus wurde veröffentlicht (Gatuzz et al. 2023b,d).

III.

1. Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen – (z.B. Förderprogramm, ggf. unter Angabe des Schwerpunktes) – soweit möglich ist

Die Ergebnisse der Studie liefern wichtige Informationen über die Natur des Gas-Schlingerns in Galaxienhaufen. Bisher wurden in diesem Forschungsbereich nur sehr wenige direkte Messungen vorgenommen. Darüber hinaus liefert diese Studie direkte Messungen der Gasgeschwindigkeit, die mit Schlingern und Verschmelzungen von Galaxienhaufen in Verbindung stehen. Ebenso wurden zuvor nur sehr wenige direkte Messungen in diesem Bereich durchgeführt. Zusätzlich haben wir direkte Einschränkungen für das Turbulenzniveau im intracluster Medium vorgenommen.

2. Darstellung des wiss. Techn. Ergebnisses des Vorhabens, Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in Abschnitt II bereits geschildert.

3. Fortschreibung des Verwetungsplanes

Die Ergebnisse dienen der Grundlagenforschung. Ein Folgeprojekt, das diese Analyse auf die bewilligten Daten des Ophiuchus-Galaxienhaufens ausweitet, wurde zur Begutachtung eingereicht.

4. Arbeiten, die zu keener Lösung geführt haben

Alle vorgeschlagenen Ziele wurden erreicht.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Es bestehen keine Möglichkeiten.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Der Ausgabenplanung und der Zeitlan wurden eingehalten.

Publikationen:

Arbeiten basierend auf Daten deren Analyse direkt durch das Vorhaben unterstützt wird:

Referierte Veröffentlichungen:

Gatuzz, E. et al. 2023a , MNRAS, 522, 2325G
Gatuzz, E. et al. 2023b , MNRAS, 520, 4793G
Gatuzz, E. et al. 2023c , MNRAS, 524, 2945G
Gatuzz, E. et al. 2023d , MNRAS, 525, 6394G
Gatuzz, E. et al. 2023e , MNRAS, 526, 396G