

# Metallanreicherungsprozesse im Galaxienhaufengas: Galaktische Winde, Starbursts und Galaxieninteraktion

Wolfgang Kapferer

Institut für Astro- und Teilchenphysik  
Universität Innsbruck  
Technikerstrasse 25  
A-6020 Innsbruck  
wolfgang.e.kapferer@uibk.ac.at

**Abstract:** Die größten, gravitativ gebundenen, Strukturen im Universum stellen Galaxienhaufen dar. Seit ihrer Entdeckung in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts, konnten Astrophysiker viele verschiedene Komponenten dieser kosmologischen Komplexe untersuchen. Zu den faszinierendsten Komponenten zählt das Haufengas, ein vollkommen ionisiertes Gas (Plasma), welches sich in den Bereichen zwischen den Galaxien eines Haufens befindet. Die extremen Eigenschaften dieses Plasmas, welches einige zehn bis hundert Millionen Kelvin heiß und extrem dünn (im Schnitt  $10^{-27}$  gm/cm<sup>3</sup>) ist, sind im Röntgenbereich des elektromagnetischen Spektrums für die Beobachtung zugänglich. Um die beobachteten Eigenschaften physikalisch deuten zu können, sind Simulationsrechnungen unumgänglich. Da das Haufengas von vielen Faktoren - Materieverteilung, Gasdynamik, chemische Zusammensetzung - beeinflusst wird, sind zahlreiche Simulationsverfahren für physikalische Systeme anzuwenden. Neben Vielteilchen Berechnungen mit etlichen Millionen Partikeln, ist auch ein exaktes numerisches Verfahren für das Gas wichtig. Durch diese Simulationen ist die Entwicklung großräumiger Strukturen im Universum beschreib- und die Gestzte der Physik auf astronomischen Skalen testbar.

## 1 Einleitung

Als Ende der fünfziger Jahre der amerikanische Astronom George Abell einige tausend große Galaxienhaufen katalogisierte, erkannte er eine bemerkenswerte Tendenz zur Klumpung: der erste zur Entdeckung der großräumigen Strukturen im Kosmos und deren Erforschung. 1970 eröffnete dann der Röntgensatelliten Uhuru mit der erstmaligen Vermessung von 339 Röntgenquellen einen völlig neuen Blick auf unser Universum. Erste systematische Durchmusterungen des Himmels ergaben, dass Galaxienhaufen, welche Anhäufungen von hunderten bis tausenden Galaxien darstellen, die stärksten Röntgenquellen im Universum sind. Dass gerade Galaxienhaufen die stärksten Röntgenquellen sind, scheint auf den ersten Blick nichts Unerwartetes zu sein. Die Erklärung ist vermeintlich simpel: Galaxienhaufen beinhalten Galaxien, diese wiederum enthalten Röntgenquellen, wie Supernovaüberreste oder Akkretionsscheiben -gewaltige diskusförmige Gasscheiben- um Schwarze Löcher. Aber wie ein Blick auf Abbildung 1 schnell eröffnet, kann dies nicht

alleine die Verteilung der beobachteten Strahlung erklären: das Röntgenlicht, das Galaxienhaufen aussenden, ist über den gesamten Haufen diffus verteilt und nicht nur in den einzelnen Galaxien lokalisiert.

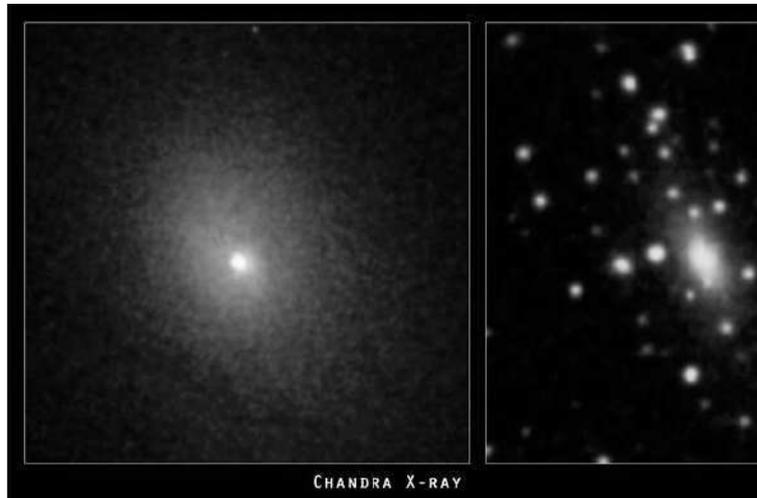


Abbildung 1: Galaxienhaufen Abell 2029 - links: im hochenergetischen Röntgenbereich des Spektrums beobachtet - rechts: eine optische Aufnahme, man erkennt die einzelnen Galaxien. Quelle: Chandra X-ray Teleskop Webportal.

Durch spektroskopische Untersuchungen dieses Lichtes konnte man die physikalischen Eigenschaften des Gases enthüllen. Das Gas zwischen den Galaxien ist heißes Plasma mit extrem niedriger Dichte - etwa ein Teilchen pro 1000 Kubikzentimeter. Moderne Röntgensatelliten wie XMM Newton oder Chandra - siehe Abbildung 2 - ermöglichen uns tiefe Einblicke in die Natur jenes Mediums zwischen den Galaxien. So war es möglich die Menge des Gases, welches auch als sogenanntes „intracluster Medium“, kurz ICM, bezeichnet wird, zu bestimmen. Das ICM hat etwa fünfmal mehr Masse, als die Galaxien selbst.

Untersucht man die Zusammensetzung des ICM so fällt auf, dass man Elemente entdeckt, die nur in den Fusionskammern der Sterne entstanden sein können. Eines dieser Elemente ist Eisen, welches man vielfach ionisiert im Röntgenlicht aller Galaxienhaufen nachweisen konnte [Ta04]. Diese Beobachtung eröffnet uns einen Einblick in die Entstehung und Entwicklung des ICM. Der überwiegende Hauptteil des ICM besteht hauptsächlich aus ionisiertem Wasserstoff, gefolgt von ionisiertem Helium und sehr geringen Anteilen von schwereren Elementen, wie Eisen. Wasserstoff und Helium entstehen nach den heutigen Modellen kurz nach dem Urknall und sind die Grundbausteine der Sterne. Schwerere Elemente, wie etwa Eisen, werden in den Sternen erzeugt. Das Eisen, welches wir zwischen den Galaxien beobachten, muss also irgendeinen Weg aus den Galaxien - der Heimat fast aller Sterne - finden.



Abbildung 2: Röntgensatelliten der europäischen Weltraumbehörde ESA - XMM Newton und der amerikanischen Weltraumbehörde NASA - Chandra.

## 2 Metallanreicherungsprozesse

Man vermutet dass es im großen drei Prozesse gibt, die mit Eisen angereichertes Gas aus den Galaxien befördern können. Zum einen Ram Pressure Stripping (Staudruck Abstreifung) [GG72], welches den Verlust von Gas aus den Galaxien durch den Druck des umliegenden Gases erklärt. Hierbei spielt die Gasverteilung in der Galaxie, der Druck des ICM und die Relativgeschwindigkeit der Galaxie zum ICM eine besondere Rolle. Das Gas in den Galaxien besteht aus Wasserstoff-, Kohlenstoffmonoxid Wolken und natürlich komplexeren Molekülwolken. Je schneller eine Galaxie durch das ICM eines Galaxienhaufens sich bewegt und je höher die Dichte des ICM ist, desto mehr Gas kann von der Galaxie abgestreift werden. Da Spiralgalaxien sehr viel Gas beinhalten, im Gegensatz zu elliptischen Galaxien, ist Ram Pressure Stripping sehr effektiv bei großen Spiralgalaxien, welche sich durch den Zentralbereich von Galaxienhaufen bewegen [Do05].

Ein anderes Modell, wie eisenangereichertes Gas in das ICM gelangen kann, sind die galaktischen Winde: Durch Supernova Explosionen - Sternexplosionen am Ende der Sternentwicklung massereicher Sterne - wird das Gas in einer Galaxie derart beschleunigt, dass es bis in den Bereich zwischen den Galaxien vordringen kann - eine Art galaktischer Kamin - Abbildung 3.

Als weiterer möglicher Mechanismus seien noch Sterne zwischen den Galaxien erwähnt. Neuste Untersuchungen der Galaxienhaufen im optischen Spektralbereich enthüllten ein diffuses Sternenlicht, welches von intergalaktischen Sternen herrührt [Mi05]. Den Ursprung dieser Sterne, außerhalb von Galaxien, stellen Galaxienkollisionen dar. Mit Hilfe von kombinierten Vielteilchen/Hydrodynamik Simulationen konnte man zeigen, dass bei Kollisionen von Galaxien viele Millionen Sterne auf die Fluchtgeschwindigkeit des Systems beschleunigt werden können. Dadurch ist der Raum zwischen den Galaxien durchaus



Abbildung 3: Diese Aufnahme der Galaxie M 82 mit dem Subaru Teleskop zeigt in roter Farbe dargestellt riesige Massen ionisierten Gases, welche die Galaxie in das umgebende intergalaktische Medium abgibt. Quelle: <http://subarutelescope.org/Pressrelease/2000/03/index.html>

nicht leer, sondern mit einer sehr dünnen Population von Sternen erfüllt [Ka05]. Neben der Beschleunigung einiger Sterne, werden auch etliche neue Sterne dabei erzeugt. Da dabei auch einige massereiche Sterne entstehen, kommt es zu einer erhöhten Supernova Explosionsrate und damit zu starken Galaktischen Winden, so genannte Starbursts. In Abbildung 4 sieht man eine solche Interaktion (Beobachtung als Vergleich).

Welcher Prozess wie viel Materie aus den Galaxien in das ICM transportiert und wie sich dieses Gemisch im Laufe einiger Jahr Milliarden entwickelt, ist das Thema der Doktorarbeit des Autors. Da Beobachtungen nur eine Momentaufnahme in der Entwicklung der Galaxienhaufen liefern, verwendet man Modellrechnungen um die Evolution dieser Strukturen zu studieren, wobei die Beobachtung immer als Referenz dient.

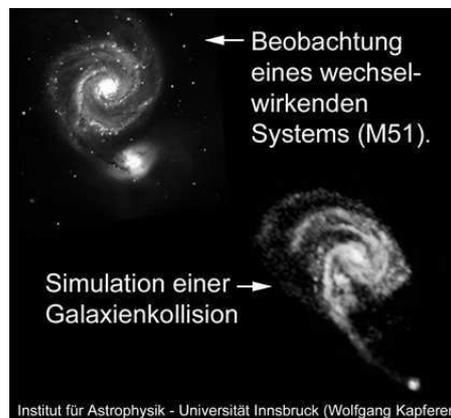


Abbildung 4: Simulation einer Galaxienkollision. Blau - Gas; Gelb - Sterne. Als Vergleich dient eine Beobachtung einer Galaxienkollision.

### 3 Methoden

Die Methoden um Galaxienhaufen zu simulieren sind im Wesentlichen Vielteilchen Algorithmen. Es wurde eine spezielle Implementierung, ein Tree-PM Code [BH86], verwendet. Vorteil dieser Methode ist es die gravitativen Kräfte, welche jedes Teilchen als Summe der anderen Teilchen wahrnimmt, in sehr effizienter Weise zu erhalten. Der Fehler der dabei gemacht wird, ist für die Fragestellungen vernachlässigbar. Das Resultat der Vielteilchen Berechnungen stellen gravitative Potentiale dar, welche die dunkle Komponente eines Galaxienhaufens darstellt. Dabei bedient man sich der Fourier Transformation der Dichte. Das Gas des Galaxienhaufens wird dann mittels eines Gitter Hydrodynamik Algorithmus beschrieben. Es handelt sich im Wesentlichen um gekoppelte Differentialgleichungen, den Euler Gleichungen, die die Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie in jeden Raumpunkt als Funktion der Ränder ermittelt. Um die den Energieverlust durch Röntgenabstrahlung zu berücksichtigen, nützt man spezielle Kühlkurven für Plasmen mit gewisser Temperatur und chemischer Zusammensetzung [CW84].

Neben diesen selbstkonsistenten Methoden braucht man zusätzliche Beschreibungen für SubGrid Physik. Also Methoden, um Prozesse zu modellieren, welche unter der Auflösung der Rechnung sind. Dies ist nötig, da man Raumbereiche von 20 Megaparsec (1 Megaparsec [Mpc] entspricht  $3.08 \times 10^{22}$  Meter) modellieren muss. Dabei ist die Dynamik der Grössenskala enorm. Eine Sternentstehungsregion, welche einen galaktischen Wind verursacht hat Größen von einigen hundert Parsec.

Galaxien werden mit einer semi-numerischen Methoden [Va99] in den Simulationen behandelt. Dabei werden virialisierten Halostrukturen Dunkler Materie Eigenschaften von Galaxien zugewiesen und die Entwicklung Ihrer Eigenschaften dann mittels Budgetgleichungen einfacher Gasphysik verfolgt.

Die Anreicherungsprozesse, wie Ram Pressure Stripping, galaktische Winde oder kollisionsbedingte Starbursts, werden durch externe Berechnungen zu jedem Zeitpunkt ermittelt.

Als Eingabe dienen dabei Eigenschaften der Galaxien und deren Umgebung, wie Gastemperatur oder Gasdruck. Als Ergebnis erhält man die Verlustrate jeder Galaxie zu jedem Zeitpunkt, welche man der hydrodynamischen Simulation übergibt. Das Mischen des angereicherten Gases erfolgt dann selbstkonsistent in der Hydrodynamik. Das Ergebnis sind drei dimensionale Daten des Haufengases, welche die Eigenschaften Temperatur, Dichte, Geschwindigkeiten und chemische Zusammensetzung repräsentieren. Durch entsprechende Algorithmen erhält man Beobachtungskarten eines simulierten Galaxienhaufens, analog wie bei Röntgenbeobachtungen. Dadurch kann man das Modell immer wieder mit der Realität vergleichen und anpassen.

## 4 Resultate

In Abbildung 5 ist die Temperatur und Eisenverteilung zu einem Simulationszeitschritt dargestellt. Man erkennt das diffuse Haufengas, welches hier bis zu 100 Millionen Kelvin heiß ist und Bereiche mit höherem Eisenanteil im Haufengas, hier durch rosafarbene Isoflächen dargestellt. Als Anreicherungsprozess agieren in dieser Simulation galaktische Winde. Deutlich kann man sehen, wie Galaxien auf Ihrem Weg durch den Galaxienhaufen angereichertes Gas verlieren und wie sich dieses Gas mit dem Haufengas mischt. Durch dies Arbeiten konnte gezeigt werden, dass diese Spuren im Haufengas bis zu einigen Millionen Jahren überleben können, ehe sie sich mit Ihrer Umgebung mischen. Dieses neue Ergebnis konnte man auch in Beobachtungen nachweisen, obwohl hier die sehr niedrige Sensitivität der Teleskope sehr erschwerend wirkt.

Um den direkten Vergleich zu ermöglichen, errechnet man aus den dreidimensionalen Daten Röntgengewichtete Karten. In Abbildung 6 sieht man einige Beispiele dazu. Rechts unten befindet sich die Röntgengewichtete Karte mit der Auflösung einer Simulation, die anderen Karten zeigen diese Simulation virtuell beobachtet durch das Röntgen Teleskop der NASA (Chandra), daneben das sensitivere europäische Instrument XMM-Newton und dann als Vergleich ein zukünftiges Instrument der ESA - XEUS, welches in den nächsten beiden Jahrzehnten entwickelt werden soll. Solche Karten dienen Astrophysikern nicht nur zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung des Haufengases. Mit Hilfe von diesen Karten konnte man auch zeigen, dass das Haufengas uns verraten kann, in welchem Entwicklungsstadium ein Galaxienhaufen sich befindet. Ob jener alt und relaxiert oder noch im Prozess der Entstehung und damit einhergehenden Strukturverschmelzung ist [Ka06].

Antworten auf diese Fragen stellen auch einen Test unserer Kosmologie dar, der Wissenschaft von der Strukturbildung unseres Universums als Ganzes.

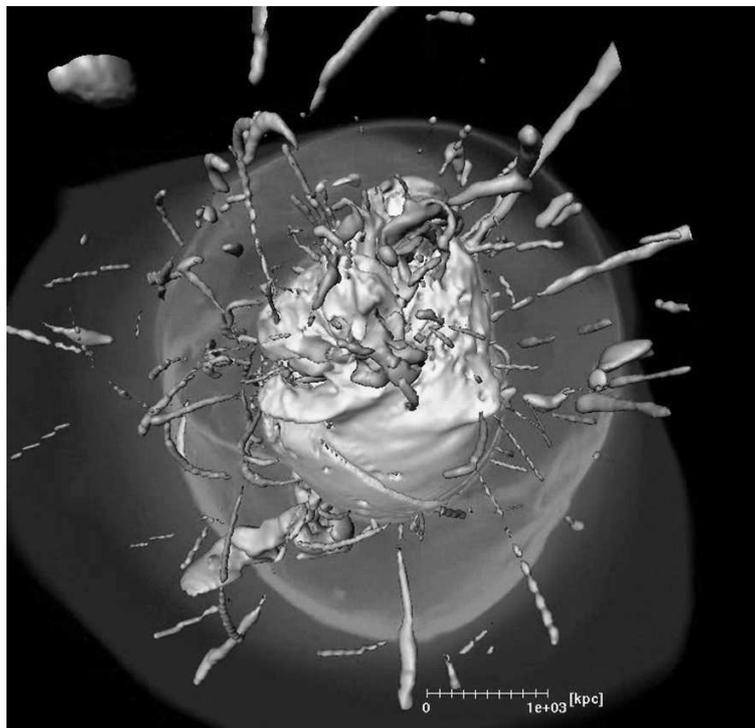


Abbildung 5: Verteilung der Temperatur und des Eisens des Gases in einem simulierten Galaxienhaufen. Das Bild stellt ein Volumen von 5 Mpc Kantenlänge dar. Die Temperaturen sind im Bereich einiger Millionen Kelvin. Die Eisenverteilung ist mittels Isoflächen dargestellt. Als Anreicherungsprozess agierten Galaktische Winde und Starbursts.

## Literatur

- [BH86] Barnes, J., & Hut, P. 1986, A Hierarchical  $O(N \log N)$  Force-Calculation Algorithm, *Nature*, 324, 446
- [CW84] Colella, P., & Woodward, P. R. 1984, The Piece-wise Parabolic Method for Gas-Dynamical Simulations, *Journal for Computational Physics*, 54, 174
- [Do05] Domainko, W., Mair, M., Kapferer, W., van Kampen, E., Kronberger, T., Schindler, S., Kimeswenger, S., Ruffert, M., Mangete, O. E., 2005, Enrichment of the ICM of galaxy clusters due to ram-pressure stripping, *astroph/0507605*, *Astronomy and Astrophysics*
- [GG72] Gunn, J. E., Gott, J. R. III, On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution, 1972, *ApJ* 176, 1
- [Ka05] Kapferer, W., Knapp, A., Schindler, S., Kimeswenger, S., & van Kampen, E. 2005, Star formation rates and kinematics of modelled interactions galaxies, *Astronomy and Astrophysics*, 438, 87
- [Ka06] Kapferer, W., et al. 2006, Simulations of galactic winds and starbursts in galaxy clusters, *Astronomy and Astrophysics*, 447, 827

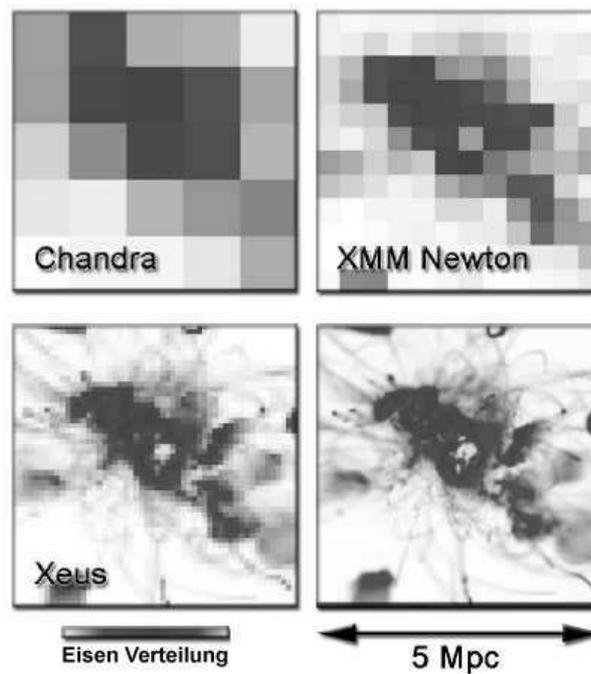


Abbildung 6: Rechts unten: Röntgengewichtete Karte mit der Auflösung einer Simulation links oben virtuell beobachtet durch das Röntgen Teleskop der NASA (Chandra); recht oben: das sensitive-re europäische Instrument XMM-Newton links unten: Vergleich mit dem, noch nicht fliegenden, Röntgenteleskop der ESA - XEUS.

- [Mi05] Mihos, J. C., Harding, P., Feldmeier, J., & Morrison, H. 2005, *Astrophysical Journal*, 631, L41
- [Ta04] Tamura, T., Kaastra, J. S., den Herder, J. W. A., Bleeker, J. A. M., Peterson, J. R., 2004, *Elemental abundances in the intracluster medium as observed with XMM-Newton*, *Astronomy and Astrophysics*, 420, 135
- [Va99] van Kampen, E., Jimenez, R., & Peacock, J. A. 1999, *Overmerging and mass-to-light ratios in phenomenological galaxy formation models*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 310, 43

Dr. MMag. Wolfgang Kapferer, geboren am 20.12.1973 in Innsbruck Tirol (Österreich) studierte von 1994 - 2002 Physik und Astronomie an der Leopold Franzens Universität Innsbruck, Österreich. Gleich im Anschluss daran begann er mit dem Doktorad der Naturwissenschaften an der Leopold Franzens Universität Innsbruck, welches er 2005 abschloss. Zu seinen Forschungsfeldern gehören Simulationen von Galaxienhaufen, Galaxieninteraktionen und Visualisierungen naturwissenschaftlicher Daten.