

ASTROPHYSIK

Aktiv beteiligt

Bei der Entstehung von Galaxien spielt die kosmische Strahlung nicht nur eine passive Beobachterrolle, sondern greift direkt in das Geschehen ein.

Christoph Pfrommer

Victor Hess entdeckte vor über hundert Jahren die kosmische Strahlung. Deren Studium ermöglichte seitdem viele bahnbrechende Entdeckungen, von denen einige mit Nobelpreisen ausgezeichnet wurden. Beispielsweise ist schon seit Mitte der 1970er-Jahre bekannt, dass die kosmische Strahlung galaktische Winde antreiben kann. Aber erst 2012 konnten dreidimensionale Simulationen von entstehenden Galaxien dies belegen [2]. Seitdem hat sich ein aktives Forschungsfeld herausgebildet, das die Plasma-Astrophysik¹⁾ mit der kosmologischen Strukturentstehung verknüpft, um die Galaxienentstehung

zu verstehen und damit Probleme des Standardmodells der Kosmologie auf der Größenskala von Galaxien zu lösen.

In den letzten zwei Jahrzehnten etablierte sich mithilfe von Präzisionsmessungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds und von Supernovae des Typs Ia sowie mit Himmelsdurchmusterungen von Galaxien und Galaxienhaufen das Standardmodell der Kosmologie. Das daraus resultierende Paradigma – die Λ CDM-Kosmologie, d. h. kalte Dunkle Materie mit einer kosmologischen Konstanten Λ – beschreibt unser Universum sehr gut auf kosmologischen Skalen, die größer als 100 Millionen Lichtjahre sind. Die aktuelle Kontroverse um die Hubble-Konstante könnte eine leichte Modifikation des Standardmodells erzwingen, was aber in der kosmologischen Strukturentstehung eine untergeordnete Rolle spielen sollte. Das kosmologische

1) Die Plasma-Astrophysik erforscht die Wechselwirkung geladener Teilchen mit elektromagnetischen Wellen in astrophysikalischen Objekten und Medien, insbesondere Plasma-Instabilitäten sowie die Entstehung und Ausbreitung kosmischer Strahlung. Deren Wechselwirkung mit Materie, Strahlungs- und Magnetfeldern erzeugt nicht-thermische Strahlung. Ihr Nachweis ist Gegenstand der Hochenergie-Astrophysik und ermöglicht Rückschlüsse auf die Physik astrophysikalischer Objekte.

◀ Im interstellaren Medium sind die dichten Molekülwolken, in denen Sterne entstehen (hellblau), über ein Netz diffuser Filamente aus atomarem Gas (violett) verbunden.

Standardmodell enthält eine Reihe ungelöster Fragen. So postuliert es die Existenz von (i) Dunkler Materie, die nicht-baryonischen Ursprungs ist und hauptsächlich gravitativ mit der uns bekannten Materie wechselwirkt, und (ii) Dunkler Energie beziehungsweise der kosmologischen Konstanten. Das Modell ist zudem (iii) auf Skalen von Galaxien und Galaxienhaufen nicht vorhersagekräftig, da hier komplexe baryonische Physik eine wichtige Rolle spielt. Einfache Modelle der Galaxienentstehung gelangen an ihre Grenzen und können nicht alle Beobachtungsdaten erklären.

Dieser Artikel beschreibt Prozesse, die Energie und Impuls der baryonischen Materie umwandeln und damit die kosmologische Strukturentstehung beeinflussen. Die Herausforderung besteht darin, dass diese Prozesse auf völlig unterschiedlichen (räumlichen und zeitlichen) Skalen nahezu zeitgleich verlaufen und sich gegenseitig nichtlinear beeinflussen. Während auf Skalen von Millionen von Lichtjahren die Gravitation zur Bildung von Materieansammlungen und schließlich zu Galaxien führt, entstehen in den dichtesten Regionen Sterne, Magnetfelder und kosmische Strahlung auf mikroskopischen Plasma-Skalen, die wiederum die Akkretion von Gas auf Galaxien und somit ihre Evolution beeinflussen. Die Physik dieser Plasma-Prozesse umfasst Skalen von Kilometern bis zur Entfernung von Erde und Sonne. Um dieses nichtlineare Zusammenspiel der verschiedenen Prozesse zu verstehen, wenden wir uns zunächst der Galaxienentstehung zu, um danach die Beschleunigung und den Transport kosmischer Strahlung zu beschreiben. Beide Aspekte zusammen beantworten die Kernfrage dieses Artikels, wie kosmische Strahlung die Entstehung von Galaxien und die Entwicklung von Galaxienhaufen beeinflussen kann.

Kosmologische Struktur- und Galaxienentstehung

Im kosmologischen Standardmodell hat die baryonische Materie eine 5,4-Mal kleinere Massendichte als die kalte Dunkle Materie. Aus Beobachtungen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes lässt sich auf Dichtefluktuationen im primordialen Universum schließen. Unter der Gravitation kollabieren die dichten Regionen, was zur Bildung quasi-sphärischer Halos aus Dunkler Materie führt. Das Gas in diesen Halos kann so viel Energie abstrahlen, dass es der gravitativen Anziehungskraft des Halo-Potentials nicht mehr standhalten kann. Dadurch wird das Gas dichter, kollabiert und kühlt mittels Strahlung weiter ab. Schließlich bildet sich eine turbulente, schwach rotierende dichte Gasverteilung im Halo-Zentrum. Sobald die Dichte des kalten Gases groß genug ist, setzt Kernfusion von Wasserstoff ein, und es bilden sich die ersten Sterne.

In diesem sehr dichten, frühen Universum akkretiert weiterhin viel Gas auf die rotierende Verteilung, sodass sich zahlreiche Sterne bilden und daraus die ersten Zwerggala-

xien entstehen. Wenn das einfallende Gas kontinuierlich auf dichteres Halo-Gas trifft, bilden sich Stoßwellen und Turbulenz, die das kalte, einströmende Gas aufheizen und sehr kleine Magnetfelder durch einen kleinskaligen, fluktuierenden Dynamo exponentiell verstärken. Aufgrund der gegenseitigen gravitativen Anziehung verschmelzen nahegelegene Halos zu immer größeren Objekten, sodass sich aus Zwerggalaxien zunächst Spiral- und elliptische Galaxien bilden können – und zum Schluss dieser hierarchischen Strukturentstehung Galaxienhaufen.

Als Kühlzeit gilt die Zeit, in der das Gas weit genug abkühlt, damit es kollabiert und Sternentstehung ermöglicht. Da die typischen Kühlzeitskalen von Tausenden von Jahren viel kleiner sind als das Alter des Universums von 13,8 Milliarden Jahren, sollte heute das gesamte Halo-Gas in Sterne umgewandelt sein. Diese naive Erwartung widerspricht jedoch den Beobachtungen. Der Vergleich von Halo-Massen mit den dazugehörigen stellaren Galaxienmassen zeigt, dass Milchstraßen-ähnliche Galaxien mit 10^{12} Sonnenmassen Baryonen am effizientesten in Sterne umwandeln (**Abb. 1**) [3]. Allerdings beträgt die Effizienz nur 20 Prozent und nimmt zu niedrigeren und höheren Halo-Massen hin stark ab: Zwerggalaxien haben weniger als ein Prozent des verfügbaren Gasreservoirs in Sterne umgewandelt.

Derzeit erklären Ausflüsse von Galaxien diese Ineffizienz der Sternentstehung am besten. Die Sternentstehung selbst oder supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren großer Galaxien treiben solche Ausflüsse an. Diese transportieren das Gas weit weg von den Gebieten, in denen Sterne entstehen, und/oder heizen das Gas so stark auf, dass es viel länger braucht, um abzukühlen und auf hohe Dichten zu kollabieren. Im heutigen Universum sind die meisten Baryonen daher gasförmig und zum Teil in und um die Galaxien gravitativ gebunden. Moderne kosmologische Simulationen arbeiten mit phänomenologischen Modellen für galaktische Winde und Ausflüsse von supermassereichen Schwarzen Löchern. Sie kalibrieren ihre Stärke, um die beobachtete Leuchtkraft-Verteilung der Galaxien zu reproduzieren. So erklären die Simulationen viele beobachtete Eigenschaften, wie Galaxiengrößen, -farben und die räumliche Galaxienverteilung [4].

Die große Herausforderung besteht nun darin, die Physik zu erforschen, die diesen Feedbackmodellen zugrundeliegt, und zu überprüfen, ob es einen noch zu identifizierenden physikalischen Prozess für die angenommene Modellierung gibt. Sollte sich keiner finden, könnte das ein Hinweis auf neue Physik sein oder Modifikationen der Theorie der kalten Dunklen Materie nötig machen, beispielsweise mit selbstwechselwirkender Dunkler Materie. Die Beobachtungen galaktischer Winde bieten eine elegante Lösung für die ineffiziente Sternentstehung in kleinen Galaxien. Während die Winde das Gas von der dichten Scheibe zum Außenbereich des galaktischen Halos transportieren, expandiert es adiabatisch, wird durch Stoßwellen geheizt und verlängert seine Kühlzeit so sehr, dass es für lange Zeit keine Sterne formen kann.

Die dafür notwendige Energie setzen Sterne frei, die sich im späten Stadium ihrer Entwicklung befinden. Zum einen emittieren massereiche, helle Sterne ultraviolette Strahlung,

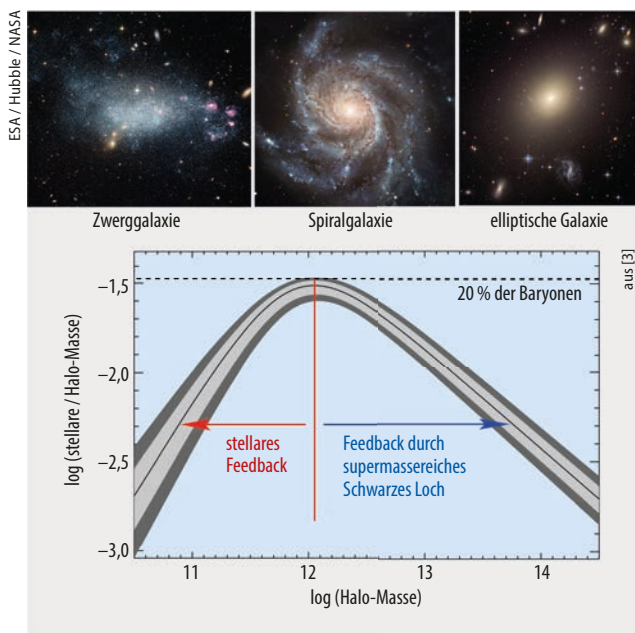


Abb. 1 Das Verhältnis der stellaren Masse einer Galaxie zur Halo-Masse hängt nicht-linear von der Halo-Masse ab, vorausgesetzt die stellare Masse steigt monoton mit der Halo-Masse an. Eine mögliche Ursache stellen Feedback-Prozesse von Sternen und akkretierenden supermassereichen Schwarzen Löchern dar, welche die Sternentstehung in Galaxien maßgeblich beeinflussen.

die von den umliegenden Staubwolken absorbiert und isotrop im Infrarot wieder emittiert wird. Aufgrund der Impulserhaltung kommt es dabei zu einem radialen Ausfluss von den Sternen. Zum anderen kann ein massereicher Stern keine Energie mehr durch Fusion gewinnen, sobald sein Kern aus den Elementen um Eisen besteht. Dann kollabiert der Kern aufgrund der Gravitation, bis er die Dichte von Atomkernen erreicht. Der plötzliche Stopp des Kollaps führt zu einer expandierenden Stoßwelle, die als Supernova-Explosion die Hülle des Sterns ins interstellare Medium auswirft und seine freiwerdende Bindungsenergie als thermische Energie dissipiert. Dieser Vorgang kann

geladene Elementarteilchen auf relativistische Energien beschleunigen und sie zu kosmischer Strahlung machen.

Supernovae und ultraviolette Strahlung regulieren durch Energie- und Impulsübertrag das interstellare Medium durch galaktische Fontänen. Beiden Prozessen gelingt es aber nicht, galaktische Winde auf die beobachteten Ausflussgeschwindigkeiten zu beschleunigen. Einerseits wird die thermische Energie durch Strahlungsprozesse schnell reduziert, andererseits ionisiert die Wechselwirkung zwischen ultravioletter Strahlung und Materie das umliegende Gas. Dieses wird optisch dünn, sodass die nachfolgende Strahlung entweichen kann, ohne viel zu streuen und somit wenig Feedback zu liefern. Im Gegensatz dazu hat die kosmische Strahlung eine dynamisch relevante Energiedichte, die mit dem interstellaren Medium wechselwirkt.

Ursprung und Transport kosmischer Strahlung

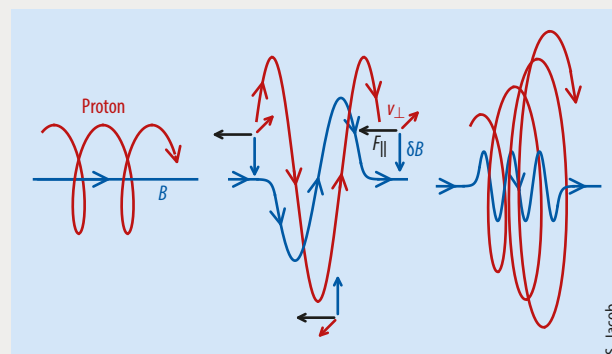
Kosmische Strahlung entsteht also an Stoßwellen von Supernova-Überresten, die das umliegende interstellare Medium radial expandieren lassen. Da die mittlere freie Weglänge in der heißen Phase des interstellaren Mediums größer ist als der Supernova-Überrest, kann die Stoßwelle das interstellare Medium nicht durch den Impulsübertrag bei Teilchenstößen in Bewegung versetzen. Vielmehr streuen die Teilchen an elektromagnetischen Fluktuationen im umgebenden Plasma, und es kommt zu einer kollisionsfreien Stoßwelle. Essenziell für die Beschleunigung der kosmischen Strahlung ist die Verstärkung von Alfvén-Wellen durch hochenergetische Protonen [5]. Dabei wirken die Wellen als Zwischenmedium, das Energie aufnimmt und an dem niederenergetische Protonen, die mit den Wellen in Resonanz sind, effektiv streuen können (**Infokasten**). Diese Streuprozesse isotropisieren die Teilchen in den Bezugssystemen vor und nach der Stoßfront, sodass sie rückstoßfrei²⁾ den Impuls des magnetischen Plasmas aufnehmen, um die Stoßfront erneut zu überqueren. In jedem Zyklus wird ein Teil der beschleunigten Teilchen mit dem Plasma weit hinter die Stoßfront advektiert, sodass diese am weiteren

Alfvén-Wellen und die Streuung kosmischer Strahlung

Niederfrequente Alfvén-Wellen sind transversale elektromagnetische Wellen, deren rücktreibende Kraft durch die magnetische Spannungskraft gegeben ist. In astrophysikalischen Plasmen propagieren diese magneto-hydrodynamischen Eigenmoden vorzugsweise entlang des Magnetfeldes mit der Alfvén-Geschwindigkeit $v_a = B / \sqrt{4\pi\rho}$ (in Gaußschen Einheiten), wobei B die Magnetfeldstärke und ρ die Massendichte des Plasmas sind.

Kreist ein Proton der kosmischen Strahlung (**Abb.**, rot) um eine Magnetfeldlinie mit dem Gyroradius (links, blau), kann es mit einer Alfvén-Welle wechselwirken (Mitte, blau), deren Wellenlänge dem Gyroradius entspricht. Die resultierenden Lorentz-Kräfte wirken der parallelen Geschwindigkeitskomponente des Protons entgegen und bremsen es ab. Da im Bezugssystem der Welle keine elektrischen Felder existieren, bleibt die Energie des Protons erhalten: Seine senkrechte Geschwindigkeitskomponente nimmt zu, sodass sich der Neigungswinkel zwischen Impuls- und Magnetfeldvektor vergrößert. Diese Streuung (rechts) isotropisiert die kosmische Strahlung

im Bezugssystem der Welle, sodass sie im Mittel mit der Alfvén-Geschwindigkeit propagiert. Diese ist im interstellaren Medium etwa 10^4 -mal kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, mit der sich relativistische Teilchen der kosmischen Strahlung annähernd bewegen.



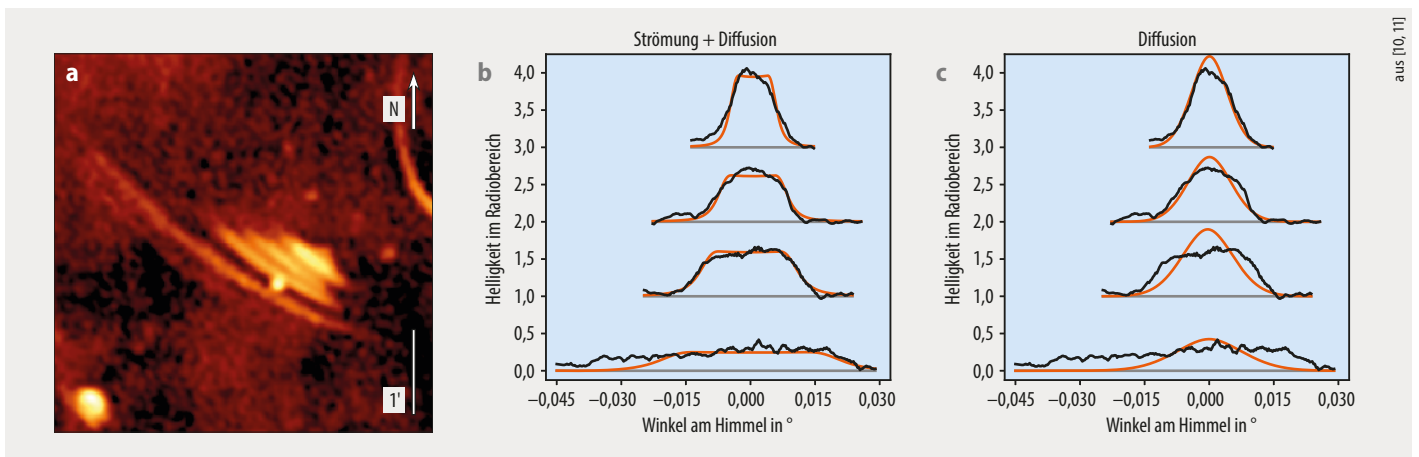


Abb. 2 Im galaktischen Zentrum hat MeerKAT eine Radioharfe beobachtet (a). Die Helligkeitsprofile (schwarz) entlang der Harfensaiten lassen sich mit Modellrechnungen (orange) von Strömen (b) und Diffusion (c) vergleichen. Hatten die Teilchen viel Zeit, um sich auszubreiten (untere Profile), treten deutliche Unterschiede auf und das Strömungsmodell wird bevorzugt.

Beschleunigungsprozess nicht mehr partizipieren. Wiederholte Reflexionen auf beiden Seiten der Stoßwelle generieren die relativistischen Teilchen der kosmischen Strahlung: Solange der Gyroradius kleiner als der Radius der Stoßfront ist, produziert diese skaleninvariante Beschleunigung ein (nicht-thermisches) Potenzgesetz in der Impulsverteilung der kosmischen Strahlung.

Wenn kosmische Strahlung ins umgebende interstellare Medium propagiert, hängt der mikrophysikalische Transport von der Streufrequenz ab. Eine kleine, aber nicht zu vernachlässigende Streurate impliziert einen diffusiven Transport entlang des Magnetfelds. Zusätzlich zur Diffusion können Teilchen der kosmischen Strahlung mit einer mittleren Geschwindigkeit driften. Geschieht dies schneller als die lokale Alfvén-Geschwindigkeit, so regen die Teilchen gyroresonante Alfvén-Wellen durch die Strömungsinstabilität an [6]. Diese Wellen streuen die kosmischen Strahlungsteilchen vermehrt (**Infokasten**), was die Instabilität weiter verstärkt. Die sich selbst verstärkende Rückkopplungsschleife stoppt, sobald die kosmische Strahlung im Mittel mit der Geschwindigkeit der Alfvén-Wellen strömt. Die Dämpfung der Wellen überträgt Energie und Impuls der kosmischen Strahlung auf das thermische Hintergrundplasma: Die kosmische Strahlung übt durch Streuung an Alfvén-Wellen einen Druck auf das Plasma aus. Schwache Dämpfung führt zu einer starken Kopplung, sodass die kosmische Strahlung mit den Alfvén-Wellen strömt. Starke Dämpfung reduziert die Wellenamplituden, die zum Streuen der Teilchen nötig sind, und die kosmische Strahlung diffundiert vorzugsweise. Aktuelle plasmaphysikalische Simulationen bestätigen dieses selbstbegrenzende Bild des Transports der kosmischen Strahlung [7].

Hydrodynamik der kosmischen Strahlung

Die Ausdehnung der Milchstraße und der Gyroradius eines Protons mit einer Energie im GeV-Bereich unterscheiden sich um mehr als zehn Größenordnungen. Daher lassen sich nicht alle Teilchen und ihre Wechselwirkungen mit elektromagnetischen Feldern simulieren. Es bedarf einer

effektiven Fluidtheorie der kosmischen Strahlung, die diese mit wenigen Größen wie Energie- und Anzahldichte charakterisiert [8]. Diese Theorie ermöglicht es, in dreidimensionalen Galaxiensimulationen die Energiedichte der kosmischen Strahlung mit dem magnetisierten Plasma zu transportieren und deren Strömung und Diffusion entlang der Magnetfelder zu berechnen. Dabei gehen neben der Energie- und Impulsdichte der kosmischen Strahlung auch die Alfvén-Wellenenergien entlang der beiden Propagationsrichtungen des Magnetfelds ein. Der Fluss der kosmischen Strahlung verstärkt die Wellenenergien und diverse Dämpfungsprozesse schwächen sie ab, was die Streurate der kosmischen Strahlung und somit den lokalen Diffusionskoeffizienten festlegt [9].

Beim Validieren dieser theoretischen Überlegungen helfen Beobachtungen im Zentrum unserer Milchstraße. Das MeerKAT-Teleskop, ein Vorläufer des Square Kilometre Array, entdeckte jüngst radioemittierende Strukturen mit fast parallelen Filamenten [10], die scheinbar nach ihrer Länge sortiert sind. Ihre Morphologie ähnelt einer Harfe, deren „Saiten“ Radio-Synchrotronstrahlung emittieren (**Abb. 2**). Diese Strukturen entstehen, wenn massereiche Sterne oder Pulsare geordnete Magnetfelder des interstellaren Mediums durchqueren und dabei entlang ihrer Bahn Elektronen der kosmischen Strahlung in die Magnetfelder entladen. Die Teilchen breiten sich entlang der Magnetfeldlinien meist quer zur Sternbahn aus, wodurch die Felder im Radiobereich aufleuchten. Die Saitenlängen der Harfe entsprechen der zeitlichen Abfolge der Entladung. Falls die Ausbreitung auf Diffusion beruhte, müssten die Radioprofile eine abgerundete Glockenform besitzen. Ihre flache Form ist nur durch das Strömen der kosmischen Strahlung zu erklären: Die relativistischen Elektronen regen die Magnetfelder der Saiten zum resonanten Schwingen an und verstärken die Eigenschwingungen in Form von Alfvén-Wellen. Diese bremsen die Teilchen durch die be-

2) Der Rückstoß des ins umgebende Plasma eingefrorenen Magnetfelds ist wegen der großen Trägheit des Plasmas vernachlässigbar.

schriebenen Streuprozesse ab und lassen sich durch eine strömende Flüssigkeit beschreiben [11]. Dies validiert die Vorhersagen der Theorie des selbstbegrenzenden hydrodynamischen Transports der kosmischen Strahlung durch Strömen und Diffusion und löst die bisherige Diffusionsannahme ab.

Feedback der kosmischen Strahlung in Galaxien

Auf makroskopischen Skalen befinden sich kosmische Strahlung, Magnetfelder und Turbulenz in der Scheibe der Milchstraße näherungsweise im Druckgleichgewicht, der sogenannten Äquipartition. Hier spielt die kosmische Strahlung eine wichtige Rolle in der Energiebilanz des interstellaren Mediums. Die selbstregulierte Rückkopplung der kosmischen Strahlung kann die beobachtete Äquipartition erklären. Ist der Druck der kosmischen Strahlung und des Magnetfelds in der Mittelebene der Scheibe größer als derjenige des thermischen Plasmas, so überwiegt der Auftrieb in der Scheibe und öffnet das Magnetfeld in den Halo. Entlang der offenen Feldlinien kann die kosmische Strahlung in den Halo propagieren und einen dominierenden Druckgradienten aufbauen. Die Druckkraft der kosmischen Strahlung beschleunigt das interstellare Medium, sodass ein galaktischer Wind entsteht (Abb. 3) [12], was stationäre eindimensionale Lösungen [13], hochaufgelöste Simulationen des interstellaren Mediums [14] und der kosmologischen Galaxienbildung zeigen [15]. Der galaktische Wind transportiert das Gas aus den Sternentstehungs-

gebieten in den Halo und heizt es dabei auf. So braucht es mehrere Milliarden Jahre, um wieder abzukühlen und auf hohe Dichten zu kollabieren. Das Feedback der kosmischen Strahlung reguliert die Sternentstehungsrate und verändert die Struktur galaktischer Scheiben. Ist der Druck der kosmischen Strahlung dagegen geringer als derjenige des thermischen Plasmas, strahlt das Plasma überschüssige Energie ab, um sich der Äquipartition anzunähern.

Kosmische Strahlung löst nicht allein die Probleme der Galaxienentstehung. Die kalte, teilweise neutrale Phase des interstellaren Mediums dämpft die durch kosmische Strahlung angeregten Alfvén-Wellen stark. Das schwächt die Kopplung der kosmischen Strahlung an das Plasma und damit die Möglichkeit eines effektiven Impulsübertrags. Aber in dieser dichten Phase sind der mechanische Energieübertrag von Supernovae und Strahlungsfeedback besonders effektiv. Wenn diese Prozesse das Gas des interstellaren Mediums in galaktischen Fontänen aus der Scheibe heben, kann die kosmische Strahlung es beim Aufsteigen konstant im Halo weiterbeschleunigen, und das Gas wird dem zirkumgalaktischen Medium zugerechnet. Dieses mehrphasige Medium – das Galaxien außerhalb ihrer Scheiben, aber noch innerhalb ihrer Gravitationswirkung umgibt – ist ein großes Reservoir, das durch kosmische Akkretion und galaktische Winde angereichert wird. Aus ihm entstehen Sterne, nachdem das Gas kondensiert und auf das interstellare Medium in der galaktischen Scheibe abgerechnet hat. Das zirkumgalaktische Medium reguliert somit die galaktische Gasversorgung und Sternentstehung.

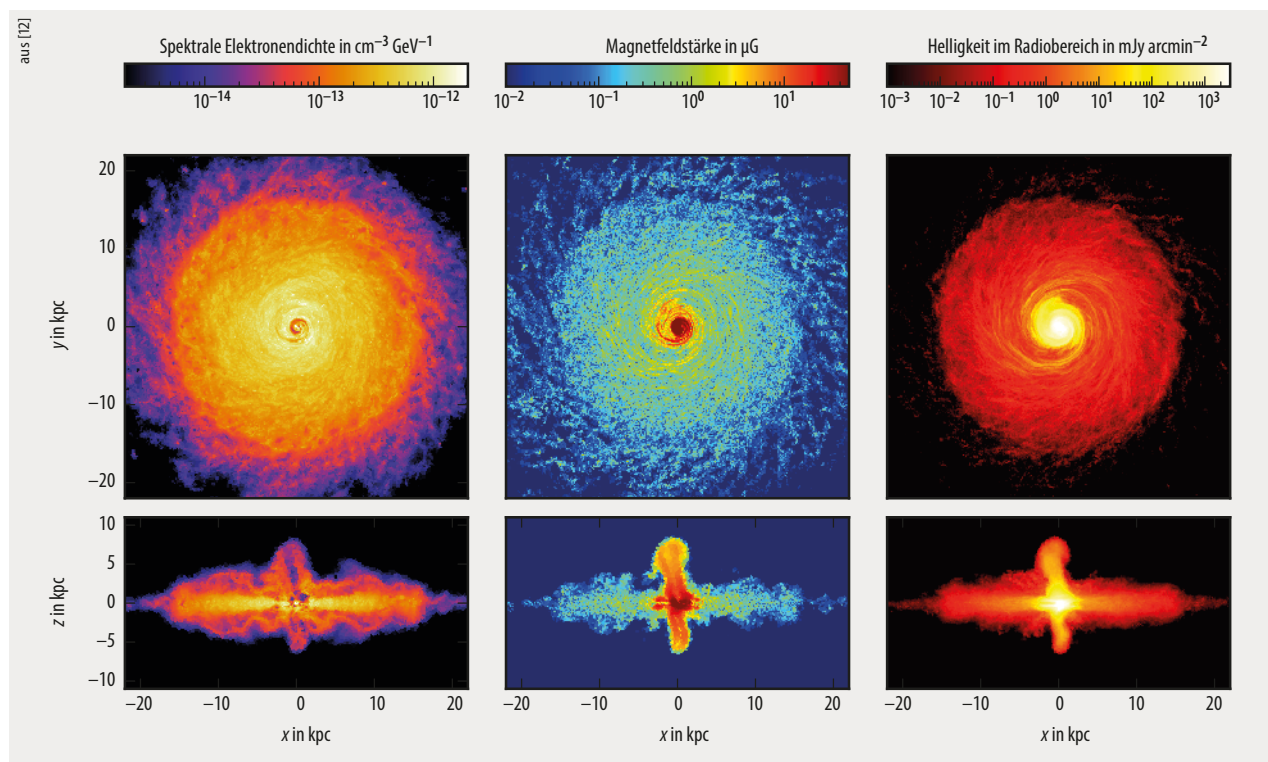


Abb. 3 In einer Milchstraßen-ähnlichen Scheibengalaxie beschleunigen Supernova-Überreste die kosmische Strahlung, die danach im interstellaren Medium entlang von Magnetfeldlinien diffundiert. Simulationen ergeben für den Querschnitt der Scheibe (oben) und den vertikalen Schnitt (unten) die spektrale Elektronendichte der kosmischen Strahlung bei 10 GeV im stationären Zustand (links), die Magnetfeldstärke (Mitte) und die Radio-Synchrotron-Helligkeit. Protonen, die aus der Galaxie entweichen, treiben die galaktischen Winde an und zeigen sich als magnetisierte, radioemittierende Blasen über und unter der Galaxienscheibe.

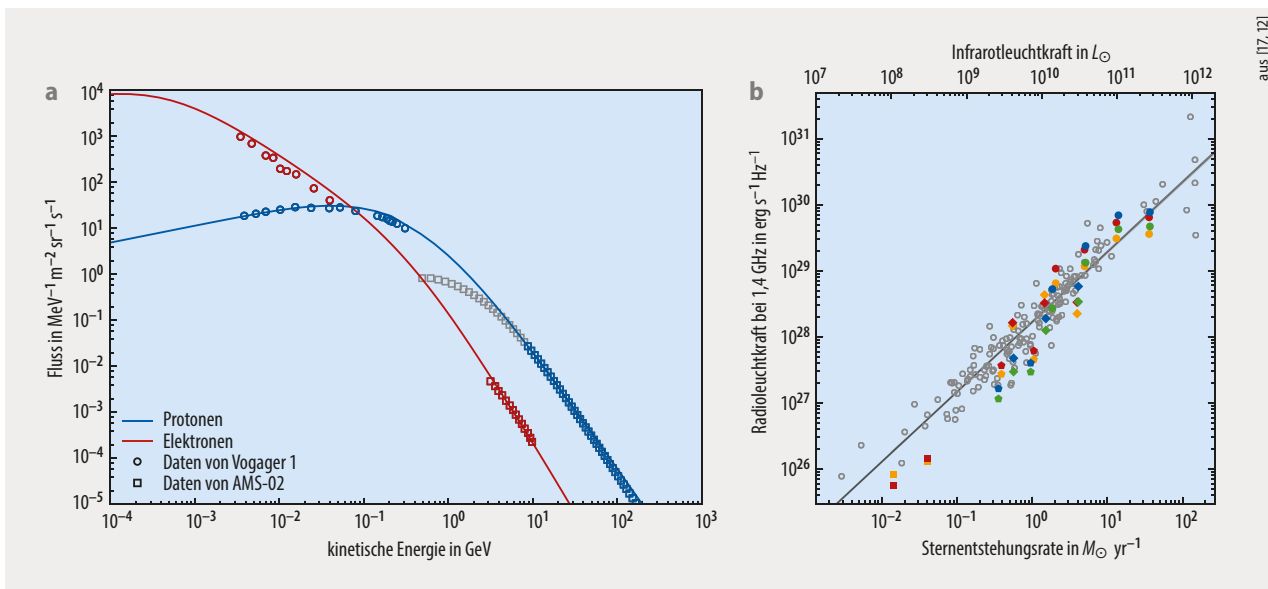


Abb. 4 Stationäre Energiespektren der kosmischen Strahlung in einer dreidimensionalen Galaxiensimulation stimmen gut mit den Messdaten überein (a, blau und rot), die der Sonnenwind nicht moduliert (grau). Die beobachtete Radioleuchtkraft sternbildender Galaxien (b, grau) korreliert mit der Sternentstehungsrate und Infrarot-Leuchtkraft ähnlich wie Simulationen (farbige Symbole). Der Mittelwert der Beobachtungen (Linie) lässt sich analytisch ableiten.

Kosmologische Simulationen zeigen, dass sich kleine Unterschiede in den mikrophysikalischen Transporteigenschaften der kosmischen Strahlung signifikant auf die Rückkopplungsstärke, die Thermodynamik und die Beobachtungsgrößen des zirkumgalaktischen Mediums auswirken [15]. Denn die Transportgeschwindigkeit beeinflusst die Druckverteilung der kosmischen Strahlung und damit deren resultierende Kräfte. Dies motiviert weitere hydrodynamische Studien, die den Transport der kosmischen Strahlung besser beschreiben. Hierfür lassen sich effektive Transportkoeffizienten aus kinetischen Plasmasimulati-

onen ableiten, die dann in kosmologischen Galaxiensimulationen Anwendung finden.

Die Galaxiensimulationen mit kosmischer Strahlung lassen sich mit Beobachtungsdaten verifizieren, insbesondere mit den Elektronen- und Protonen-Spektren der kosmischen Strahlung. Die Voyager-1-Mission, die sich mittlerweile außerhalb der Heliopause im interstellaren Medium befindet, und AMS-02 [16] an Bord der ISS haben diese beobachtet (**Abb. 4**) [17]. Insbesondere kalibrieren Korrelationen der Infrarot-Emission mit der Radio- und Gammastrahlung von Galaxien die Feed-

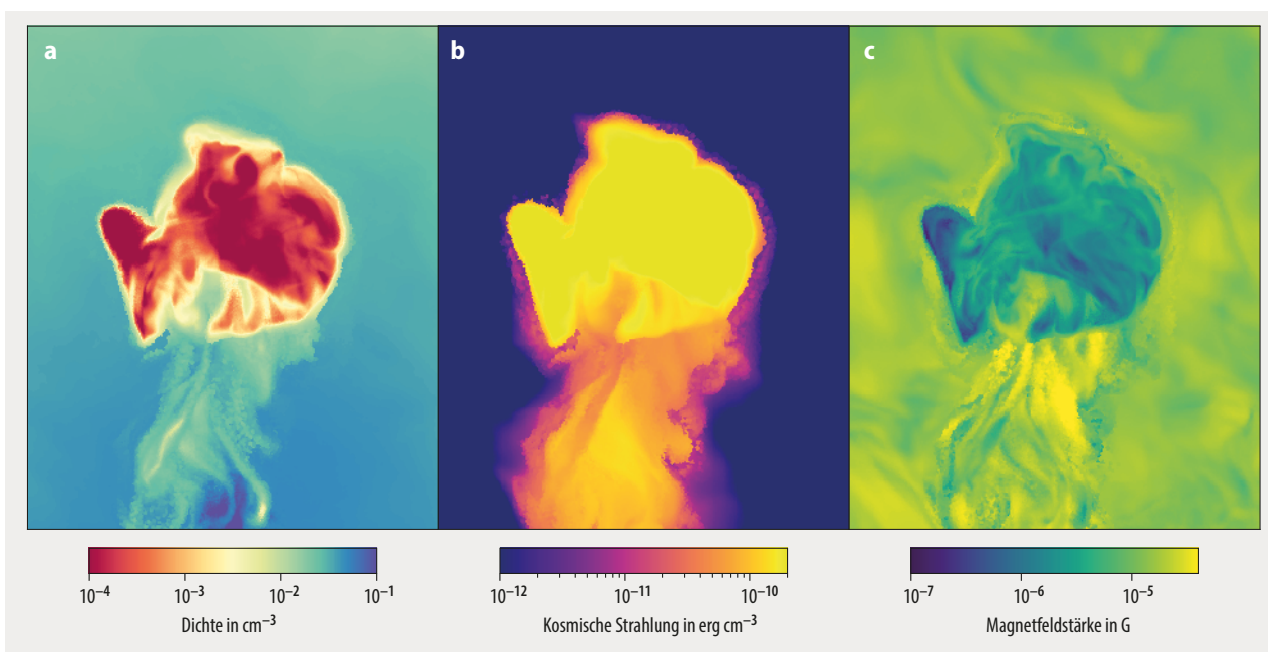


Abb. 5 Ein Jet hat in einem turbulentem Galaxienhaufen eine aufsteigende unterdichtete Plasmablase erzeugt. Simulationen zeigen den Effekt für die Dichte (a), die Energiedichte der kosmischen Strahlung (b) und die magnetische Feldstärke (c).

backeffizienz der kosmischen Strahlung, wenn der energetische Anteil nicht-thermischer Strahlung gemessen wird [12]: Die energiereiche ultraviolette Strahlung junger, massereicher Sterne in den dichtesten Regionen der Galaxien wird von umliegenden Staubwolken absorbiert und als Infrarot-Strahlung emittiert. Wenn die Sterne als Supernovae explodieren, produzieren sie die Protonen und primären Elektronen der kosmischen Strahlung. Die Protonen wechselwirken hadronisch mit Atomkernen des interstellaren Mediums. Dabei entstehen kurzlebige Pionen, die in Gammastrahlung, Neutrinos und sekundäre Elektronen zerfallen. Die sekundären und primären Elektronen emittieren Synchrotronstrahlung im Radiobereich in galaktischen Magnetfeldern. Erste Gleichgewichtsspektren der kosmischen Strahlung in simulierten Galaxien erzeugen Radio- und Gammastrahlungsspektren, die sowohl gut mit Beobachtungen übereinstimmen als auch beobachtete Korrelationen mit der Infrarot-Strahlung reproduzieren (Abb. 4). Als entscheidender Prüfstein der Modelle gelten sensitivere Gammastrahlungsdaten des zukünftigen Cherenkov Telescope Arrays.

Jets aus Schwarzen Löchern in Galaxienhaufen

In den Zentren kühler Galaxienhaufen sind weniger junge Sterne zu beobachten, als ein ungehindertes Kühlen erwarten lässt. Das erklären in einem vielversprechenden Szenario relativistische Jets, die von zentralen supermassiven Schwarzen Löchern erzeugt werden und Blasen bilden, die Radio-Synchrotronstrahlung emittieren. Deren Energie reicht mehr als aus, um das kühlende Gas zu heizen und ein selbstreguliertes Gleichgewicht einzustellen. Aber die Physik dahinter ist unverständlich.

Simulationen von Jets helfen hierbei. Unterdichtete Blasen mit kosmischer Strahlung steigen auf und wechselwirken mit dem magnetisierten, turbulenten Gas im Haufen (Abb. 5) [18]. Während das Gas um die Blase strömt, bleiben die Magnetfeldlinien an der Grenzfläche hängen. Dabei umhüllen und stabilisieren sie diese gegen hydrodynamische Instabilitäten, die sie ansonsten zerstören würden. Die konvergente Strömung hinter der Blase komprimiert das Magnetfeld und bildet stark magnetisierte Filamente. Unmittelbar nachdem der Jet die Blase formte, entweicht kosmische Strahlung entlang der magnetischen Filamente in Richtung des Haufenzentrums. Die Strömungsinstabilität der kosmischen Strahlung regt Alfvén-Wellen an, die mittels Dämpfung das thermische Gas im Haufen mit einer Rate heizen, welche die Abkühlung genau ausgleicht. Beobachtungen deuten darauf hin, dass ein selbstregulierender Feedback-Prozess das kühlende Gas und die nukleare Aktivität eng koppelt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die kosmische Strahlung spielt eine entscheidende Rolle, wenn Galaxien entstehen und sich Galaxienhaufen entwickeln, indem sie Energie und Impuls auf das thermische Plasma überträgt. In Galaxien kann kosmische Strahlung galaktische Winde treiben und so die Sternentstehung un-

terdrücken und das zirkumgalaktische Medium beeinflussen. In Galaxienhaufen kann sie aus relativistischen Jets das umgebende kühlende Plasma durch die Anregung von Alfvén-Wellen und anschließende Dämpfung heizen und ebenfalls die Sternentstehung unterdrücken.

Um die Frage zu beantworten, in welchen Galaxien und zu welchen kosmologischen Zeiten die kosmische Strahlung einen entscheidenden Beitrag liefert, gilt es, im nächsten Schritt die energieabhängige Propagation der kosmischen Strahlung zu berücksichtigen. Dazu gehört es, die Impulsspektren von Elektronen und Protonen in der kosmischen Strahlung zu simulieren: Das fügt dem komplexen Problem zwei weitere Dimensionen hinzu. Auch der Mehrphasencharakter des interstellaren Mediums ist in kosmologischen Simulationen der Galaxienbildung zu berücksichtigen: Das erfordert eine verbesserte numerische Auflösung in Raum und Zeit. Dieses Forschungsprogramm ebnet den Weg, um mit computergestützter Astrophysik die Galaxienentstehung besser zu verstehen, weil sie die kinetischen Plasma- und makrophysikalischen kosmologischen Skalen überbrücken.

Literatur

- [1] P. Girichidis et al., MNRAS **479**, 3042 (2018)
- [2] M. Uhlir et al., MNRAS **423**, 2374 (2012)
- [3] B. P. Moster et al., ApJ **710**, 903 (2010)
- [4] V. Springel et al., MNRAS **475**, 676 (2018)
- [5] A. R. Bell, MNRAS **353**, 550 (2004)
- [6] R. Kulsrud und W. P. Pearce, ApJ **156**, 445 (1969)
- [7] M. Shalaby et al., ApJ **908**, 206 (2021)
- [8] E. G. Zweibel, PoP **20**, 55501 (2013)
- [9] T. Thomas und C. Pfrommer, MNRAS **485**, 2977 (2019)
- [10] I. Heywood et al., Nature **573**, 235 (2019)
- [11] T. Thomas et al., ApJL **890**, L18 (2020)
- [12] C. Pfrommer et al., subm., arXiv:22105.12132
- [13] D. Breitschwerdt et al., A&A **245**, 79 (1991)
- [14] P. Girichidis et al., MNRAS **479**, 3042 (2018)
- [15] T. Buck et al., MNRAS **497**, 1712 (2020)
- [16] M. Pohl, Physik Journal, November 2021, S. 32
- [17] M. Werhahn et al., MNRAS **505**, 3273 (2021)
- [18] K. Ehlert et al., MNRAS **481**, 287 (2018)

Der Autor



Christoph Pfrommer studierte Physik an der FSU Jena und in Harvard, arbeitete am Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) und promovierte 2005 an der LMU München über kosmische Strahlung in Galaxienhaufen. Danach forschte er am Canadian Institute for Theoretical Astrophysics in Toronto. 2016 gründete er eine unabhängige Junior-Forschungsgruppe

mit einem ERC Consolidator Grant am Heidelberger Institut für Theoretische Studien. Seit 2017 leitet er die Abteilung „Kosmologie und Hochenergie-Astrophysik“ am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam, ist Professor für Computergestützte Kosmologie an der U Potsdam und wird ab 2022 mit seinem ERC Advanced Grant die Rätsel des Kosmos erforschen.

Prof. Dr. Christoph Pfrommer, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam