Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 78 (2020)
Heft: 5

Artikel: Was die Welt zusammenhält
Autor: Geiger, Hansjürg
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1007102

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 18.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Das Standardmodell der Kosmologie erklärt uns das Universum – oder fehlt da noch etwas?

Was die Welt zusammenhält

Das Standardmodell der Kosmologie erzählt scheinbar ein stimmiges Bild der Geburt und der Entwicklung des Weltalls. Leider aber passen einige Beobachtungen nicht in diese Biographie. Haben wir etwas übersehen?

Die Geschichte ist absolut grandios. Und sie klingt einleuchtend: Nach einem phänomenal heissen Start aus einem unendlich kleinen «Ort» dehnte sich das Universum rasend schnell aus und kühlte sich rasant ab. Dabei kondensierten aus der Energie des Urknalls in Sekundenbruchteilen zuerst die Bausteine der heutigen Teilchen und später die Teilchen selbst, ähnlich wie aus feuchtwarmer Luft beim Abkühlen Regentropfen entstehen, die zu Hagelkörnern gefrieren können. Das ging am Anfang ziemlich rassig. Schon etwa drei Minuten nach dem Urknall war das Babyuniversum «kalt» genug für die Bildung der Kerne der einfachsten Atomsorten, Wasserstoff, Helium und etwas Lithium. Von da an ging es gemächlicher voran. Etwa 400'000 Jahre später war die Temperatur und damit die Energie der Teilchen so weit gesunken, dass sich die Elektronen und die Atomkerne zu stabilen Atomen verbinden konnten. Mit der fortwährenden Abkühlung wurde das einst glühende Universum nun dunkel, die Atome schwebten zufallsverteilt im Raum. In kosmischen Dimensionen begannen wenig später diese Gase sich zu träge wabernden Wolken zusammenzuziehen, die unter dem Einfluss der Gravitation zunächst sehr langsam lokal immer dichter wurden und schliesslich, nach etwa 180 Millionen

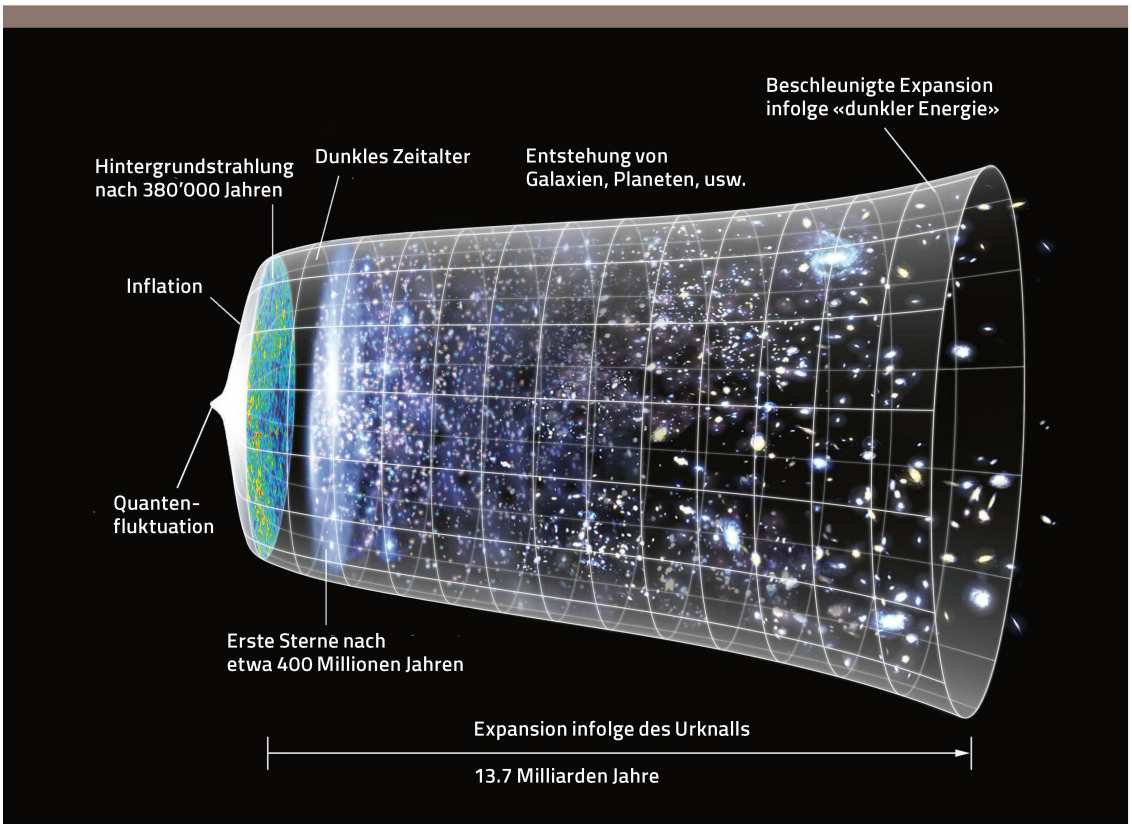

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Entwicklung des Universums.

Grafik: NASA/WMAP Science Team

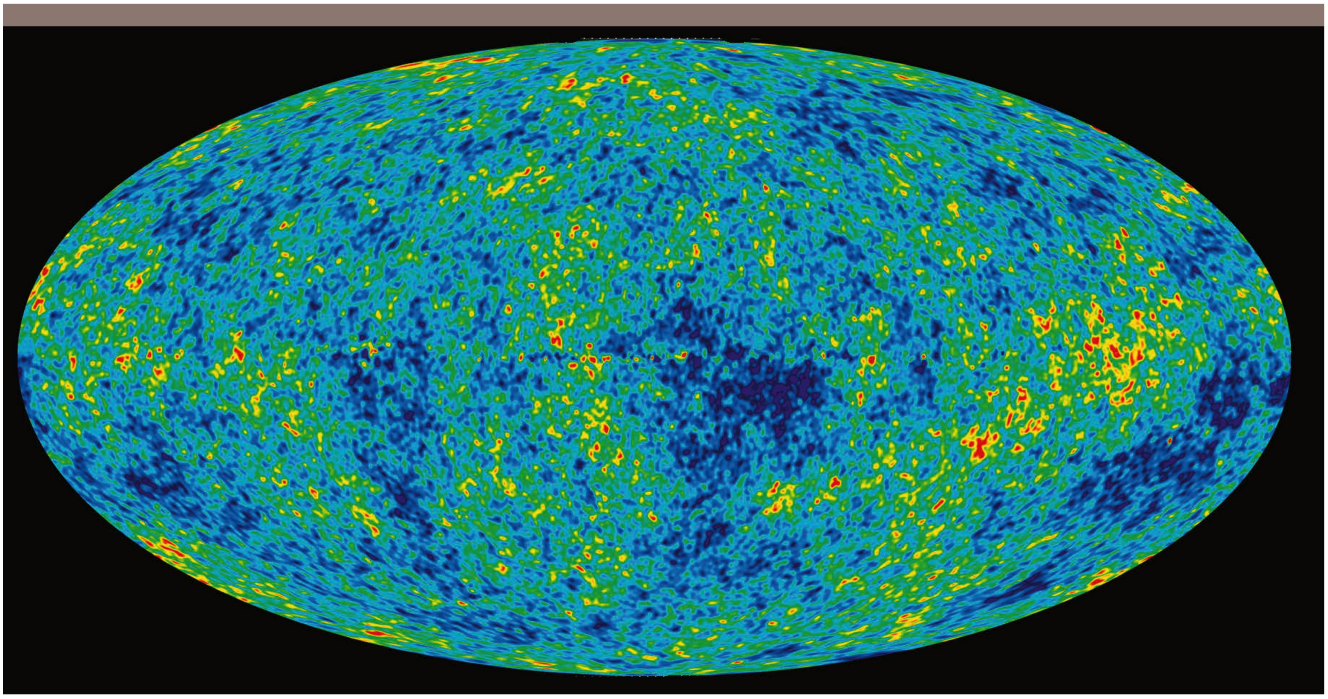

Abbildung 2: Farbige Darstellung der geringen Temperaturunterschiede in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Das Bild zeigt das Universum zu einer Zeit, als es knapp 400'000 Jahre alt war.

Bild: NASA/WMAP Science Team

Jahren, zu den ersten Sternen zusammenfielen. Grössere Gruppen von Sternen formten wohl schon bald die ersten Galaxien.

Es waren Riesen, diese ersten Gestirne, weitaus grösser als die heutigen Sterne. In ihrem Innern stieg der Druck rasch derart gewaltig an, dass die leichten Elemente des jungen Kosmos durch Kernfusion zu schwereren Atomsorten verschmelzen konnten. Lange ging dies nicht gut. Das «Brennmaterial» der ersten Sterne, Wasserstoff und Helium, war rasch verbraucht, die Giganten wurden instabil und explodierten in Supernova-Explosionen. Die dabei freigesetzte Energie reichte aus, um noch schwerere Atomsorten zu bilden, die bei den Explosionen zusammen mit dem Material aus den sterbenden Sternen ins All geschleudert wurden und sich mit den Gaswolken vermischten. Nun konnte das Spiel von vorne beginnen, die Gaswolken kollabierten zu neuen Sternen, die wiederum Kernreaktionen durchführten, explodierten und ihre «Asche» ins All schleuderten. Bis zum heutigen Tag, in immer neuen Generationen von Sternen und den sie begleitenden Planeten und Monden.

Mit dem Resultat, dass heute im Orion-Arm der Milchstrasse auf einem Planeten mittleren Alters, der sich um einen Stern der dritten Generation bewegt, einige relativ begnadete Vertreter einer zweibeinigen Art von Lebewesen versuchen, die Details dieser Geschichte zu verstehen. Und dabei merken, dass an der schönen Story, die sie im Laufe des letzten Jahrhunderts mühsam entwickelt hatten, so einiges nicht ganz aufgeht.

DIE RÄTSEL DES KOSMOS

Es beginnt gleich ganz am Anfang. Winzigste Sekundenbruchteile nach dem Big Bang war das Universum noch aberwitzig klein. Trotzdem sollte es nach der Quantentheorie in ihm zu unvorstellbar kleinen Schwankungen in der Energieverteilung gekommen sein. Was damals völlig unbedeutend gewesen sein mag, müsste sich mit der Ausdehnung des Weltalls zu unübersehbaren Grossstrukturen aufgebläht haben. Deshalb sollten wir heute in der Verteilung der Materie im Weltall lokal enorme Unterschiede finden. Davon aber ist nichts zu sehen. Im ganz grossen, im kosmischen Massstab sind die Galaxien bemerkenswert gleichförmig verteilt.

Diese Gleichförmigkeit des Universums lässt sich durch eine weitere Beobachtung wunderschön belegen. Von der Hitze des Big Bangs ist nämlich bis heute noch etwas übriggeblieben und kann mit einem ins Weltall gehaltenen, empfindlichen Thermometer genau vermessen werden. Das ist technisch nicht ganz ohne und daher nicht billig, ist aber von der NASA und der ESA mit den Weltraumobservatorien WMAP und Planck erfolgreich

versucht worden. Und siehe da, wohin die Teleskope auch gerichtet wurden, zeigten sich kaum Unterschiede in der Strahlung. Von überall her umhüllt die gleiche frostige Temperatur von etwa 2.7 Kelvin den erdnahen Raum, mit Schwankungen in der Grössenordnung von gerade mal $5 \cdot 10^{-5}$!

Wie sollte dies erklärt werden? Die Kosmologen fanden einen möglichen Ausweg aus dem Dilemma. Sie stellen sich vor, das Universum habe einen unfassbar kurzen Moment nach seiner Geburt eine extremst kurze Phase durchlaufen, in welchem es sich mit weit mehr als der Lichtgeschwindigkeit ausdehnte. Dies ist durchaus möglich, weil die Spezielle Relativitätstheorie «nur» die Geschwindigkeit der Bewegungen im Raum mit der Lichtgeschwindigkeit begrenzt, nicht aber die Ausdehnung des Raumes selbst. Die Wissenschaftler nehmen an, dass sich das Universum während etwa einer tausendstel Sekunde um einen Faktor zwischen 10^{30} und 10^{50} ausdehnte. War das All vor dieser als Inflation bezeichneten Phase etwa von der Grösse eines Protons, wuchs es auf beachtliche 10 cm an und mit ihm auch die nur auf der Quantenebene beobachtbaren Unterschiede in der Energieverteilung. Das hat zur Folge, dass wir heute nur einen winzigen Teil des gesamten Universums überblicken und in diesem Ausschnitt die wirklich grossen Strukturen einfach nicht erkennen können. Sie sind viel grösser geworden als unser Ausschnitt des Weltalls. Macht dies Kopfschmerzen? Den Wissenschaftlern durchaus, vor allem, weil sie schlicht keine Erklärung für die Inflationsphase haben.

Das ist aber nur eine der unerklärten Seltsamkeiten. Schon in den 1930er Jahren machte der Schweizer Astronom *Fritz Zwicky* eine seltsame Beobachtung. Bei der Untersuchung von Galaxien im Coma-Haufen ergaben seine Messwerte viel zu hohe Geschwindigkeiten. Bei dem Tempo, welches die Sternsysteme vorlegten, hätte die Schwerkraft den Haufen nicht zusammenhalten können. Wer damals noch an Messungenauigkeiten geglaubt haben sollte, sah sich getäuscht. Auch die modernsten Werte zeigen das gleiche Bild, das auch für die Sterne innerhalb einer Galaxie gilt. Auch sie bewegen sich unerklärlich schnell. Was sollten die Kosmologen tun? Wenn sie die Daten nicht wegdiskutieren konnten, so musste eine Erklärung gefunden werden. Die Wissenschaftler erfanden die Dunkle Materie, irgendwelches unsichtbares Zeugs, das die Galaxien füllt und ihnen die nötige Masse gibt, um die Sterne an sich zu binden und die Galaxienhaufen beisammen zu halten.

T.S. Eliot, Little Gidding, 1942
«Wir lassen niemals vom Entdecken, und am Ende allen Entdeckens, sind wir zurück am Anfang, und werden diesen Ort zum ersten Mal erkennen.»

Abbildung 3: Galaxien im Coma-Haufen. Die Objekte mit einem «Strahlenkreuz» sind Vordergrundsterne aus unserer Milchstrasse. Alle anderen auch noch so kleinen Flecken sind Galaxien. Die Masse des Haufens ist so gross, dass das Bild einiger Galaxien wie durch eine Linse verzogen ist (Bogenlinien).

Grafik: NASA/ESA/Hubble/STScI

Mit der Dunklen Materie meinen die Fachleute nicht einfach schlecht beleuchtete Gase oder Staub in der Form, wie wir ihnen im Alltag begegnen, sondern etwas Neues, das sich unserer Beobachtung entzieht, das wir nicht sehen können, das aber in rauen Mengen vorhanden ist. Aktuelle Messungen gehen davon aus, dass die Dunkle Materie etwa 27% des Energiehaushalts des Universums ausmachen müsste, die «gewöhnliche» Materie dagegen nur knapp 5%. Das Peinliche an der Sache ist, auch die Dunkle Materie ist eine reine Hypothese und niemand weiss, was sich dahinter verbergen könnte.

Nicht genug damit, stolperten die Astronomen über eine weitere Absonderlichkeit. Als sie nämlich in den letzten 30 Jahren die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Universums genauer vermassen, entdeckten sie, dass sich das Weltall immer schneller ausdehnt. Das war nicht nur unerwartet, es widerspricht natürlich allen gängigen Vorstellungen. Vernünftigerweise müsste man annehmen, die Gravitation bremse die Ausdehnung. Aber genau das Gegenteil ist der Fall. Wiederum musste ein Ausweg aus einem Dilemma gefunden werden, dieses Mal in Form von Dunkler Energie, einer angenommenen Kraft, die der Gravitation entgegenwirkt. Und auch hier handelt es sich nicht um Peanuts. Die Dunkle Energie dürfte etwa 68% des Energiehaushalts des Weltalls ausmachen. Was aber verbirgt sich hinter dieser Dunkle Energie? Erraten! Wir wissen es nicht!

EIN CHAMÄLEON DER KRÄFTE

Es gibt durchaus Hypothesen, Ideen, von denen die Eine oder Andere oder auch eine Kombination von mehreren Denkansätzen die wirklich wahre Wirklichkeit tatsächlich abbilden könnte, die bis jetzt aber allesamt nicht wirklich befriedigen. Speziell, weil sie sich allesamt nur sehr schwer in einem Experiment an der Natur überprüfen lassen. Bis dies gelingt, dürfte es erstens noch sehr lange dauern und zweitens müssten die Wissenschaftler bis dahin auch offen sein für weitere, neue Denkansätze. Wir müssen die Offenheit haben, nicht einfach die Lücken im bisherigen Modell irgendwie zu stopfen, sondern in Betracht ziehen, bisher auch etwas Grundlegendes im Verständnis des Weltalls verpasst zu haben. Dabei kann es auch ans Eingemachte gehen, an die Basis, an die fundamentalen Kräfte, an das Machtzentrum des Universums.

Was ist damit gemeint? Wenn ich mit meinen Fingern auf die Computertastatur tippe, so drückt dies

Abbildung 4: NGC 1566, eine wunderschöne Spiralgalaxie im südlichen Sternbild Schwertfisch. Auch in ihr bewegen sich die Sterne schneller, als es die Masse der Galaxie zuliesse.

Grafik: NASA/ESA/Hubble/STSci

Tasten nach unten. Das geht nur, wenn ein direkter Kontakt zwischen Finger und Taste entsteht. Die Kraft, die ich ausübe, ist deshalb eine Kontaktkraft. Kräfte können aber auch ohne offensichtlichen Kontakt wirken. Dies klingt ein wenig nach Spuk, gehört aber beispielsweise in Form von Mobiltelefonie, den Magneten in der Kühlschranktüre oder der Wurfbahn eines Steines zu unserem Alltag. Für die Physiker sind dies die fundamentalen Kräfte oder besser Wechselwirkungen. Wir kennen heute vier solche Kräfte: Die elektromagnetische Kraft, die beispielsweise Magnetismus, Elektrizität und Licht erklärt; die Schwache Wechselwirkung, die beim radioaktiven Zerfall oder der Kernfusion aktiv ist; die Starke Wechselwirkung, welche die Atomkerne zusammenhält und die Gravitation, die dafür sorgt, dass wir schön hübsch auf dem Boden bleiben. Sie können als Felder beschrieben werden, die den leeren Raum füllen. Für drei dieser vier Kräfte kennen wir Teilchen, welche die Wirkung der Kraft übertragen, wie beispielsweise das Photon für die elektromagnetische Kraft. Einzig für die Gravitation fehlt uns ein Überträger. Dies ist alles recht gut bekannt und anerkannt. Aber reicht das, um die Welt zu erklären? Zweifel sind angebracht, nicht nur wegen den oben beschriebenen Seltsamkeiten, sondern auch, weil ja die vier bekannten Kräfte nur die Welt der «normalen» atomaren Stoffe beschreiben und die machen offenbar gerade mal knappe 5% der Materie und der Energie im All aus.

Einige Experten vermuten deshalb, entweder sei unser Verständnis der Gravitation lückenhaft oder es gäbe noch mindestens eine fünfte fundamentale Kraft. Eine der vielen Ideen bezieht sich auf die Eigenschaften der Gravitation. Was wenn die Gravitation nicht konstant wäre, sondern sich wie ein Chamäleon der Umgebung anpasste? Dies erklärte einiges. So liesse sich in ein solches Modell auch ein Überträgerteilchen einfügen, welches die Wirkung der Gravitation überträgt. Dieses Teilchen dürfte recht seltsame Eigenschaften zeigen. In massereichen Gegenden, wie hier auf der Erde, wäre es relativ schwer, seine Reichweite dagegen gering und es wäre für uns praktisch unsichtbar. Im leeren Raum dagegen wäre es sehr leicht und hätte eine enorme Reichweite, genug, um den aufblähenden Effekt der Dunklen Energie zu erklären. Erste, äusserst rechenintensive Simulationen zeigen, dass eine Welt mit einem derartigen Teilchen durchaus funktionieren könnte. Interessanterweise wäre in einem solchen Weltmodell die mysteriöse Dunkle Energie überflüssig.

Aber auch die Dunkle Materie könnte durch eine heute noch nicht nachgewiesene Kraft erklärt werden.

Abbildung 5: Hubble Aufnahme von NGC 3603, einer Region in unserer Milchstrasse, in welcher sich aus Gas- und Staubwolken eine grosse Zahl junger Sterne gebildet hat. Die Sterne im zentralen Haufen haben mit ihrer Strahlung ein enormes Loch in die Gaswolken gebrannt.

Grafik: NASA/ESA/Hubble/STSci

Abbildung 6: Künstlerische Darstellung der Geburt eines Sterns aus einer Gas- und Staubwolke. Aus der Staubwolke können sich auch Planeten bilden. Heftige Strahlungsausbrüche sind typisch für die Frühphase eines Sterns.

Bild: NASA

Dazu würden die Ergebnisse einer ungarischen Gruppe von Wissenschaftlern passen, die ein leichtes, sehr kurzlebiges und sich langsam bewegendes, neutrales Teilchen beobachtet haben will. Dieses Teilchen würde nur sehr schwach mit der der Materie interagieren, fast genau wie die vermutete Dunkle Materie mit dem Rest des Universums. Allerdings sind die Messdaten noch sehr umstritten und konnten bisher durch keine unabhängige Beobachtung gestützt werden.

Vieles ist also offen und das macht die aktuelle Situation so spannend. Man fühlt sich etwas an den Beginn des 20. Jahrhunderts erinnert, als immer klarer wurde, dass das Newton'sche Weltbild nicht der Weisheit letzter Schluss sein konnte. Die Revolution des Weltbildes folgte prompt mit den Theorien von Albert Einstein. Das Standardmodell des Weltalls hat sich für viele Beobachtungen glanzvoll bewährt, es hat aber seine Schwächen und versagt als Erklärung für einige wichtige Beobachtungen. Die Alternativen stehen jedoch noch auf ziemlich wackeligen Beinen und sind experimentell alles andere als abgesichert. Ob bald eine neue wissenschaftliche Revolution unser Weltbild erweitert, steht buchstäblich in den Sternen. <