

Die Zukunft des Universums **- eine Spekulation -** Günther Hasinger, MPE Garching

Nachdem wir den roten Faden, der uns durch die GDNÄ-Tagung Kosmos – Erde – Leben führte, nach der Beschäftigung mit dem Urknall, der Entstehung und Entwicklung der Galaxien, der Sterne, der Planeten, insbesondere unserer Erde und schließlich des Lebens nun fast vollständig abgewickelt haben, bleibt uns der Ausblick in die Zukunft. Die Beschäftigung mit der Zukunft gehört notwendigerweise zu den riskantesten Beschäftigungen jeder Wissenschaft und ihre Vorhersage ist oft spekulativ. Für die Beschäftigung mit der Zukunft des Universums gilt dies in ganz besonderem Maße, deshalb habe ich diesen Beitrag als „eine Spekulation“ bezeichnet. Dennoch, aus den schon sehr genau ausgeführten Modellen der Sternentwicklung lassen sich relativ präzise Aussagen über die Zukunft unseres Sonnensystems, so wie der Sterne und Galaxien insgesamt gewinnen. Die Geometrie des Universums und die wichtigsten kosmologischen Parameter konnten in den letzten Jahren erstaunlich gut bestimmt werden, so dass man auch Aussagen über den wahrscheinlichen Verlauf der kosmischen Expansion wagen kann. Des Weiteren deuten sich aus Erweiterungen des Standardmodells der Elementarteilchen, sowie den Bemühungen zur Vereinigung der allgemeinen Relativitätstheorie mit der Quantentheorie Aussagen über das Schicksal der Materie und der Schwarzen Löcher auf extrem langen kosmischen Zeiträumen an. Da viele Vorhersagen in diesem kurzen Artikel nur sehr knapp angerissen werden können, verweise ich auf zwei Bücher, die sich ausführlicher mit der Zukunft des Universums befassen: „Die fünf Zeitalter des Universums“ von Adams und Laughlin¹, sowie „Die Zukunft des Universums: Zufall, Chaos, Gott?“ von Arnold Benz².

Die Zukunft des Sonnensystems

Die Sonne ist vor etwa 4.6 Milliarden Jahren aus einem Ur-Nebel interstellarer Materie entstanden, die ihrerseits schon durch mehrere frühere Generationen von Sternen mit schwereren Elementen als den im Urknall entstandenen Wasserstoff und Heliumatomen angereichert wurde. Nachdem im Sonneninneren der Fusionsofen der Sonne gezündet hat, wird stetig durch die Kernverschmelzung von Wasserstoff zu Helium und schwereren Elementen Energie erzeugt und damit der Wasserstoff verbraucht. Die chemischen Elemente des Periodensystems bis hinauf zum Eisenatom werden auf diese Weise im Bauch von Sternen „gebacken“³. Während der etwa zehn Milliarden Jahre anhaltenden Phase des Wasserstoffbrennens hält der durch die Hitze im Inneren entstehende Druck dem durch die Schwerkraft der Sternmasse erzeugten Druck die Waage – der Stern ist stabil. Langsam verändert sich aber die chemische Zusammensetzung der Sonne. Der mit der nuklearen „Asche“ des Wasserstoffbrennens angereicherte Kern wird langsam dichter und heißer, wodurch die Energieproduktion der Kernfusion ansteigt. Der Strahlungsdruck wird größer, wodurch sich die Oberfläche der Sonne ausdehnt und ihre Leuchtkraft zunimmt. Die Abstrahlung der Sonne hat seit ihrer Entstehung bereits merklich zugenommen und wird sich bis zum Ende ihres Lebens noch einmal verdoppeln.

Die Zunahme der Sonneneinstrahlung bewirkt auf der Erde merkliche Effekte und wird letztendlich die Möglichkeit für das Leben auf unserem Planeten zunichte machen. In aller Munde ist die Gefahr eines durch die globale Erwärmung verursachten

Treibhauseffekts auf der Erde. Die Temperatur der Erde ist in den letzten einhundert Jahren um etwa 0.6 Grad angestiegen. Die Experten streiten sich noch, welcher Anteil davon durch die Sonne verursacht und welcher Anteil durch menschlichen Einfluss „hausgemacht“ ist. Das System Erde hat eine erstaunliche und in den letzten Jahrmillionen sehr erfolgreiche Fähigkeit, Temperaturschwankungen über komplexe Regelvorgänge der Atmosphäre, Biosphäre, der Ozeane und Gesteinsmassen auszugleichen. Bei der durch die chemische Entwicklung im Sonneninneren verursachten, ständigen Erhöhung der Einstrahlung wird jedoch irgendwann in der Zukunft kein Halten mehr sein und der Treibhauseffekt auf der Erde instabil werden. Gleichzeitig werden sich die Bedingungen für mögliches Leben auf dem Mars jedoch verbessern. Nach detaillierten Geoklima-Modellen⁴ soll in etwa 500 Millionen Jahren die Temperatur auf der Erde so heiß, dass alles Wasser zu kochen beginnt, die Meere verdampfen und der Planet sterilisiert wird. (Bereits geraume Zeit vorher würde es sich für das Leben auf der Erde anraten, eine Arche auszurüsten und einen anderen Planeten zu besiedeln – vielleicht den Mars?).

In etwa 6 Milliarden Jahren, wenn die Sonne etwa 1/10 ihres Wasserstoffvorrats (und damit fast den gesamten Wasserstoff im Kern) verbraucht hat, beschleunigen sich die Kernverschmelzungsprozesse in ihrem Inneren und die Fusions-Asche wird zu schwereren Elementen verbrannt. Gleichzeitig schrumpft der Kern weiter und erhöht die Leuchtkraft der Sonne. Sie dehnt sich dann zu einem roten Riesenstern aus, der aufgrund seiner Größe wesentlich leuchtkräftiger, aber gleichzeitig wesentlich kühler ist, als unsere heutige Sonne. Da dieser Stern einen starken Sternwind aussendet, verliert er an Masse und seine Anziehungskraft verringert sich. Die Planeten wandern dabei weiter nach außen, die Erde zum Beispiel ungefähr auf die jetzige Marsbahn. Die Sonne hat bis dahin die inneren Planeten, Merkur und Venus verdampft und ihre Scheibe nimmt, von der Erde aus betrachtet, einen guten Teil des Firmaments ein. Die Temperatur auf der Erde steigt auf etwa 1200 Grad Celsius. Spätestens zu diesem Zeitpunkt wird auch der Mars nicht mehr bewohnbar sein. Am Ende ihrer Entwicklung wird die Sonne ihre verbleibende Wasserstoffhülle in einen sogenannten planetarischen Nebel abstoßen – diese Sternhüllen gehören zu den schönsten und farbenprächtigsten Objekten in unserer Milchstraße. Der schwere Kern der Sonne zieht sich zu einem Weißen Zwerg zusammen, einem Objekt mit ungefähr dem Durchmesser der Erde und der Masse der Rest-Sonne, das fast vollständig aus sogenannter „entarteter Materie“ besteht, die nur durch den Quantendruck der Elektronen stabilisiert wird – eine Folge des Pauli-Prinzips.

Der ursprünglich bläulich-weiß strahlende Weiße Zwerg beinhaltet so viel Wärmeenergie, dass er noch viele Milliarden Jahre weiter strahlt und sich dabei immer weiter abkühlt. Die meisten Sterne im Universum enden wie unsere Sonne als Weiße Zwerge. Sterne jedoch, die sehr viel schwerer sind als die Sonne, beenden ihr Leben in einer Supernova-Explosion und hinterlassen noch kompaktere Reste: Neutronensterne und Schwarze Löcher.

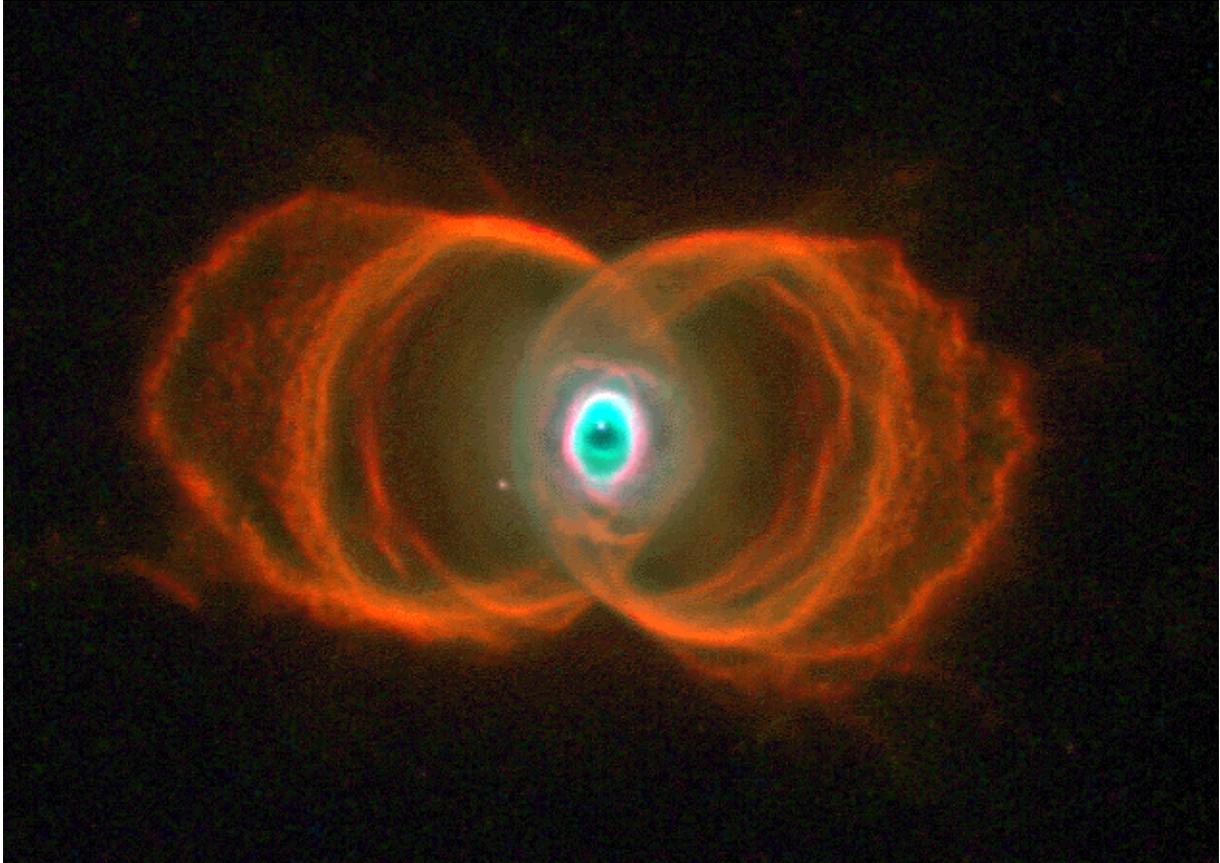


Abbildung 1: Der „Hantel-Nebel“, ein planetarischer Nebel, aufgenommen mit dem Hubble Space Telescope (NASA) – ein Modell für die Zukunft unserer Sonne.

Das Schicksal der Galaxien

Unsere Milchstraße besteht aus etwa 200 Milliarden Sternen, aus der interstellaren Materie, aus der ständig neue Sterne entstehen und wieder vergehen, sowie der „Dunklen Materie“, die durch ihre Gravitationskraft das schnell rotierende Sternensystem zusammenhält. Durch die Entstehung immer neuer Generationen von Sternen, die in ihren „Bäuchen“ Wasserstoff zu schwereren Elementen fusionieren, die sie zum Teil durch Sternwinde und Supernova-Explosionen wieder an das interstellare Medium abgeben, zum Teil in kompakten Resten, wie Weiße Zwerge, Neutronensterne und stellare Schwarze Löcher ablagern, wird der Wasserstoff in den Galaxien mit der Zeit verbraucht.

Unsere Milchstraße ist Teil einer hierarchischen Struktur aus kleinen Galaxiengruppen, größeren Galaxienhaufen, Superhaufen, sowie einer Schaum-artigen Struktur aus Filamenten und Blasen, auf deren Oberfläche sich die Materie im Zuge der Entstehung der großräumigen kosmischen Struktur angesammelt hat. Bewegt durch die Anziehungskraft der Dunklen Materie verschmelzen die Galaxien im Zuge der kosmologischen Entwicklung lokal zu immer größeren Einheiten⁵, während sich das Universum insgesamt immer weiter ausdehnt. Die dominante Galaxie der „Lokalen Gruppe“ ist der Andromeda-Nebel, auf den sich die Milchstraße mit etwa 300 km/s zu bewegt. In etwa 2 Milliarden Jahren werden sich die Milchstraße und der Andromeda-Nebel sehr nahe kommen und möglicherweise miteinander verschmelzen.

Eine derartige „Galaxien-Hochzeit“ ist für die Sterne der beiden Galaxien keine Gefahr, sie verspüren keine dramatischen Veränderungen und ihre Planetensysteme bleiben intakt. Wir können uns jedoch vorstellen, wie phantastisch und interessant der Himmel in einem verschmelzenden Galaxiensystem aussehen würde. Wenn wir lange genug warten, werden sämtliche Galaxien in der lokalen Gruppe mit denen des nächsten großen Galaxienhaufens im Sternbild Virgo zu einer einzigen, riesigen Metagalaxie verschmolzen sein.

Das Aussehen und die Lebenserwartung von Sternen hängt im wesentlichen von ihrer Masse ab. Während ein Stern von der Masse unserer Sonne, wie oben beschrieben etwa 10 Milliarden Jahre lang mit einer Temperatur von etwa 6000 Grad (also etwa gelb-grüner Farbe) strahlt, verbraucht ein Stern mit 10 Sonnenmassen seinen Wasserstoff etwa 1000 mal schneller und leuchtet extrem hell mit einem Emissionsmaximum im ultravioletten Spektralbereich. Umgekehrt lebt ein Stern mit nur 1/10 der Sonnenmasse etwa 100 mal länger als die Sonne und strahlt sein Licht im roten Wellenlängenbereich ab. Die langlebigsten unter den Sternen sind die sogenannten „Braunen Zwerge“, die mit etwa 8% der Sonnenmasse nicht mehr genug Druck in ihrem Innern aufbauen können, um die Kernfusion des Wasserstoffs zu zünden. Objekte mit noch weniger Masse werden zu großen Planeten. Gasriesen-Planeten wie z.B. Jupiter haben es nicht ganz zum Stern geschafft.

Wenn in den Galaxien langsam die interstellare Materie ausgeht und keine neuen Sterne gebildet werden können, bleiben mit der Zeit neben den Weißen Zwergen, Neutronensternen und Schwarzen Löchern nur noch die roten, sehr alten Sterne übrig. Große elliptische Galaxien oder die Zentralbereiche von Spiralgalaxien sind bereits in diesem Zustand. In etwa 10^{13} Jahren werden die ältesten, heute bekannten Sterne ausgebrannt sein und in etwa 10^{14} Jahren wird die normale Bildung von Sternen zu Ende sein und das Universum wieder dunkel werden.

Die Expansion des Universums

Seit Edwin Hubble wissen wir, dass das Universum expandiert. In den letzten Jahren wurde die Hubble-Konstante H_0 , der fundamentale kosmologische Parameter, der die Geschwindigkeit der Expansion angibt, immer genauer vermessen. Der heute von den meisten Kosmologen akzeptierte Wert liegt bei ca. 70 km/s/Mpc. Wie die Expansion des Universums weitergeht, hängt von der mittleren Massendichte Ω_m des Universums ab. Wäre diese Dichte höher als die kritische Dichte $\Omega_m=1$, die dem winzigen Wert von ungefähr sechs Wasserstoffatomen pro Kubikmeter entspricht, würde sich die Expansion des Universums weit in der Zukunft so weit verlangsamen, dass die Bewegung der Galaxien gestoppt wird und sich umkehrt. Das Universum würde in einem Kollaps, einem sogenannten „Big Crunch“ enden. Ein derartiges Universum wird als „geschlossen“ bezeichnet und wäre in gewisser Weise einem Schwarzen Loch ähnlich.

Die gesammelte Masse sämtlicher leuchtender Sterne im Universum entspricht jedoch nur weniger als 1% der kritischen Dichte und zusammen mit der mittleren Dichte in galaktischen und intergalaktischen Gaswolken macht die „gewöhnliche“ (sogenannten baryonische) Materie weniger als 5% der kritischen Dichte aus. Wie in dem Artikel „Das Schicksal des Universums“ in diesem Band beschrieben, lässt sich aus der Beobachtung von Galaxienhaufen und der Dynamik von Galaxien ableiten,

dass die gewöhnliche Materie nur einen kleinen Bruchteil zur gesamten Masse im Universum beiträgt, welche durch die sogenannte „Dunkle Materie“ dominiert wird – eine bisher rätselhafte Materieform, die aus massebehafteten, sich relativ langsam bewegenden und nur schwach wechselwirkenden, bisher unentdeckten Teilchen bestehen muss. Immer genauere Messungen haben aber in den letzten Jahren gezeigt, dass auch die Dunkle Materie nicht ausreicht, um das Universum zu schließen. Die mittlere Materiedichte liegt nach den jüngsten Röntgen-Messungen an Galaxienhaufen⁶ bei $\Omega_m \approx 0.3$, wodurch eine Umkehrung der Expansion in einen Kollaps ausgeschlossen erscheint. Das Universum scheint demnach „offen“ zu sein.

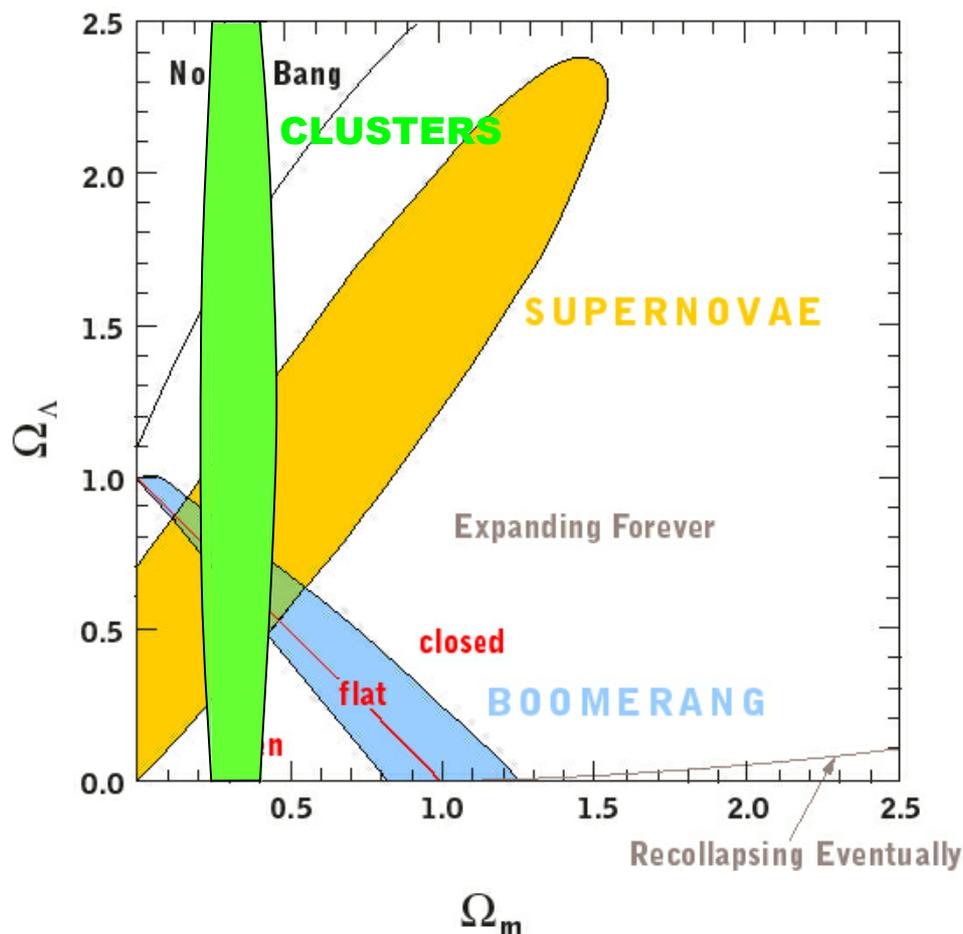


Abbildung 2: Aus verschiedenen Messungen abgeleitete kosmologische Parameter: Ω_m (kosmische Materiedichte) und Ω_Λ (kosmische Energiedichte bzw. kosmologische Konstante)⁷. Grün gibt den aus Röntgen-Messungen von Galaxienhaufen erlaubten Bereich. Orange ist der aus den Messungen entfernter Supernovae abgeleitete Bereich und blau der aus den Ballonmessungen der Mikrowellenhintergrundstrahlung eingegrenzte Bereich. Die drei völlig unabhängigen Methoden stimmen mit Werten $\Omega_m \approx 0.3$, $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ überein. Noch wesentlich genauere Messungen hat inzwischen der NASA-Satellit WMAP erbracht⁸.

Eine große Überraschung war aber der im Jahre 1998 durch zwei vollkommen unabhängige Methoden abgeleitete Befund, dass sich nicht nur die Ausdehnung des Universums in alle Ewigkeit fortsetzen wird, sondern dass diese Expansion sich immer noch beschleunigt. Als Einstein 1916 die Allgemeine Relativitätstheorie entwickelte, realisierte er, dass seine Gleichungen kein stabiles Universum vorhersagten, sondern eines, das sich entweder ausdehnen oder kollabieren musste. Da zu diesem Zeitpunkt die Fluchtbewegung der Galaxien noch nicht bekannt war, führte er in

seine Gleichungen ein zusätzliches, stabilisierendes Glied ein, die sogenannte „kosmologische Konstante“ Λ , die er nach Hubble's Entdeckung der Galaxienfluchtbewegung als die „größte Eselei“ seines Lebens bezeichnet hat. Die neuesten Messungen aus den Fluktuationen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung und aus der Helligkeit entfernter Supernova-Explosionen (siehe Abbildung 2) lassen jedoch darauf schließen, dass Einstein unvermutet doch Recht behalten hat und dass die der kosmologischen Konstanten äquivalente Energie Ω_Λ signifikant größer als Null ist. Diese bisher vollkommen unverstandene „Dunkle Energie“ hat, in gleichen Einheiten angegeben wie die Materiedichte Ω_m , ungefähr den Wert 0.7, dominiert also die Gesamtenergie im heutigen Universum.

Aus der detaillierten Vermessung der quasi-periodischen Fluktuationen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung mit den Ballon-Experimenten BOOMERANG⁹ und MAXIMA und jüngst mit dem NASA-Satelliten WMAP ergibt sich erstaunlicherweise, dass die Gesamtenergie im Universum, also die Summe aus der Materiedichte Ω_m und der „Dunklen Energie“ Ω_Λ sehr nahe bei dem Wert 1 liegt, dass die Geometrie des Universums demnach weder „offen“ noch „geschlossen“, sondern nahezu „flach“ ist (siehe Abbildung 2). Die einfachste Interpretation der heute bekannten kosmologischen Parameter ergibt damit ein Universum, das in einem Urknall begann und sich in alle Ewigkeit exponentiell ausdehnen wird (Abbildung 3). Die Geschichte ist jedoch noch nicht zu Ende. Aus den Bemühungen zur Vereinheitlichung von Quantentheorie und Relativitätstheorie, z.B. der „Quantengravitation“ oder der „String-Theorie“¹⁰, erhofft man sich eine geschlossene Beschreibung der Kosmologie. Eine „kosmologische Konstante“, also z.B. eine Ruheenergie des Vakuums in der jetzt bestimmten Höhe, ist mit den derzeitigen Ansätzen nicht erklärbar, eher aber eine „Dunkle Energie“, die sich im Lauf der Zeit ändert. Welche Konsequenzen sich daraus für die weitere Expansion des Universums ergeben ist noch nicht absehbar. In jüngster Zeit sind deshalb auch „oszillierende“ Weltmodelle wieder in Mode gekommen.

Die sehr ferne Zukunft

In etwa 10^{14} Jahren, wenn die letzten Sterne aus Resten interstellarer Gaswolken kollabieren, wird die normale Sternentstehung zu Ende gehen. Danach bleiben nur noch die ausgebrannten Reste von Sternen übrig, also Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher, sowie die Himmelskörper, die ihre unverbrauchte Materie erhalten konnten: Braune Zwerge und Planeten. Der größte Teil der Sternmasse liegt nun in Form von entarteter Materie in den Weißen Zwergen, die sich mit der Zeit immer weiter abkühlen.

Die Braunen Zwerge haben ihren unverbrauchten Wasserstoff über sehr lange Zeiten behalten. Sehr selten kann es vorkommen, dass zwei Braune Zwerge miteinander kollidieren und damit einen größeren, Roten Zwergstern bilden, der genügend Masse hat, um den Fusionsofen in seinem Inneren zu zünden. Diese wenigen normalen Sterne werden dann die einzigen Lichtquellen im Universum sein.

Falls die Dunkle Materie aus schwach wechselwirkenden, massebehafteten Teilchen besteht, können diese Teilchen langsam durch die Gravitationskraft der Weißen Zwerge eingefangen werden und sich im Sterninneren durch schwache Wechselwirkungsprozesse mit der Zeit gegenseitig vernichten. Durch die dadurch freiwerdende Energie würde der Abkühlungsprozess der Weißen Zwerge gestoppt, die sich da-

durch über sehr lange Zeiträume in der Nähe der Temperatur des flüssigen Stickstoffs aufhalten können (siehe Abbildung 3). Einer Idee von Freeman Dyson¹¹ folgend, spekulieren Adams und Laughlin¹, dass aufgrund der extrem langen, zur Verfügung stehenden Zeit und der sehr großen Energievorräte in der Atmosphäre solcher Weißer Zwerge eine neue biologische Evolution, möglicherweise sogar mit der Entwicklung von Komplexität und Intelligenz stattfinden könnte.

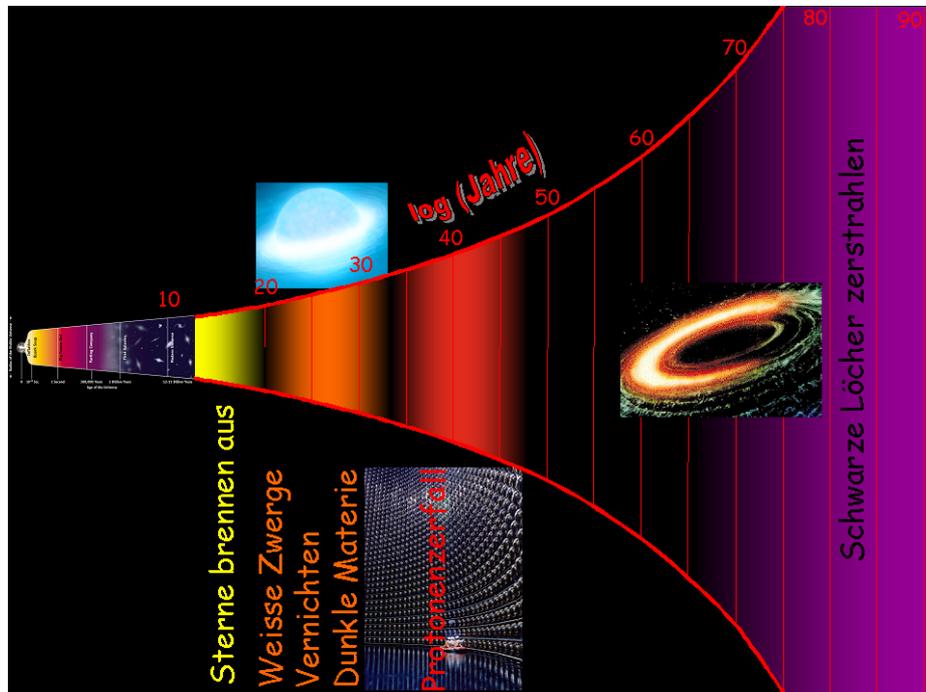


Abbildung 3: Überblick der möglichen weiteren Entwicklung eines Universums mit exponentiell beschleunigter Ausdehnung. Die vertikalen roten Striche geben die Zehnerpotenz der Zeit in Jahren seit dem Urknall an (unser heutiges Universum liegt bei ca. 10^{10} Jahren). Die wichtigsten weiteren Phasen des Universums sind in verschiedenen Farben angedeutet: nach etwa 10^{15} Jahren werden die letzten Sterne ausgebrannt sein. Danach dominieren die kühlenden Weißen Zwerge das Universum, in deren Inneren etwa um die Zeit von 10^{25} Jahren die Dunkle Materie langsam vernichtet wird. Nach vielen weiteren Äonen (hier z.B. 10^{37-39} Jahren), werden erwartungsgemäß die Protonen zerfallen und damit die baryonische Materie vernichtet. Danach bleiben für sehr lange Zeit nur noch die Schwarzen Löcher übrig; auch sie werden im Zeitraum 10^{70-100} Jahren zerstrahlen.

Entsprechend den sogenannten „Großen Vereinheitlichten Theorien“ der Teilchenphysik (GUT) lebt auch die normale Materie nicht unendlich lange: die Protonen sollten demnach zerfallen. Kurz nach dem Urknall müssten sämtliche Teilchen-, Antiteilchen- und Energiesorten im thermischen Gleichgewicht vorhanden gewesen sein und sich ständig ineinander umgewandelt haben. Damit müssten genau gleich viele Protonen wie Antiprotonen vorhanden gewesen sein. Bei der Abkühlung des ursprünglichen Feuerballs haben sich praktisch alle Protonen und Antiprotonen wieder gegenseitig vernichtet. Über eine bisher noch nicht verstandene Symmetriebrechung muss aber für jeweils etwa 1 Milliarde solcher Vernichtungsprozesse ein Proton übriggeblieben sein, diese Protonen stellen die heutige, normale baryonische Materie dar. Aufgrund dieser Symmetriebrechung müsste die Lebensdauer der übrig gebliebenen Protonen sehr lang, aber endlich sein. Abschätzungen dieser Lebensdauer aufgrund der einfachsten GUT-Theorien beliefen sich auf ca. 10^{30} Jahre. In riesigen unterirdischen Wassertank-Detektoren, zum Beispiel dem ja-

panischen Super-Kamiokande-Detektor¹², wurde Jahre lang nach Spuren zerfallender Protonen gesucht, bisher jedoch ohne Erfolg. Die experimentell bestimmte Lebensdauer der Protonen ist demnach größer als 10^{33} Jahre. Kompliziertere GUT-Theorien sagen längere Lebensdauern voraus, aber in Ermangelung genauerer Messungen kann bisher nur spekuliert werden. Adams und Laughlin nehmen einen Wert von 10^{37} Jahren für die Lebensdauer des Protons an.

Wenn die Protonen zerfallen, „schmelzen“ sämtliche stellare Reste, also Weiße und Braune Zwerge, Neutronensterne und Planeten dahin, nicht jedoch die Schwarzen Löcher, innerhalb deren Ereignishorizont sämtliche Materie- und Energieformen durch ihre gigantische Schwerkraft festgehalten werden. Schwarze Löcher sind im heutigen Universum mit Massen von wenigen Sonnenmassen (sogenannte „stellare“ Schwarze Löcher), sowie im Zentrum von Galaxien mit Massen von mehreren Millionen bis Milliarden Sonnenmassen (sogenannte „massereiche Schwarze Löcher“) bekannt. Seit Hawking wissen wir jedoch, dass durch Quanteneffekte in der Nähe des Ereignishorizonts auch Schwarze Löcher Energie abstrahlen, sogenannte Hawking-Strahlung, und zwar um so heller, je kleiner sie sind. Stellare Schwarze Löcher zerstrahlen demnach in etwa 10^{67} Jahren. Schwarze Löcher mit Millionen Sonnenmassen, wie das derzeit im Zentrum unserer eigenen Galaxie liegende, leben etwa 10^{83} Jahre und solche von der Masse unserer ganzen Galaxie etwa 10^{98} Jahre.

Nach grob 10^{100} Jahren sind also sämtliche Strukturen aus unserem Universum verschwunden, das dann ein „Tohuwabohu“ vor allem aus Vakuumenergie, Strahlung und leichten Teilchen, wie Neutrinos, Elektronen, Positronen etc. ist. Falls die Expansion bis zu diesem Zeitpunkt wirklich exponentiell verläuft ist, ist die mittlere Dichte, die heute etwa bei einem Proton/ m^3 liegt, auf etwa 1 Positron im 10^{194} -fachen Volumen des heutigen Universums abgefallen. Die Wellenlänge der Hintergrundstrahlung, die heute bei etwa 1 Millimeter liegt, beträgt dann ungefähr 10^{41} Lichtjahre – eine wahrhaft unvorstellbare Zukunft.

¹ Die fünf Zeitalter des Universums. Eine Physik der Ewigkeit. Fred Adams and Greg Laughlin, Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart – München (2000), ISBN 3-421-05345-6

² Die Zukunft des Universums: Zufall, Chaos, Gott? / Arnold Benz. – Düsseldorf: Patmos-Verlag (1998), ISBN 3-491-72376-0

³ Die Elemente schwerer als Eisen entstehen erst in Supernova-Explosionen – dem gewaltsamen Tod der massereichsten Sterne

⁴ Determination of habitable zones in extrasolar planetary systems: Where are Gaia's sisters? / Franck, S., von Bloh, W., Bounama, Ch., Steffen, M., Schönberner, D., Schellnhuber, H.-J., Journal of Geophysical Research 105, S. 1651 (2001)

⁵ siehe den Artikel „Das Schicksal des Universums“ in diesem Band.

⁶ The REFLEX galaxy cluster survey. VII. Ω_m and σ_8 from cluster abundance and large-scale clustering / P. Schuecker, H. Böhringer; C.A. Collins, L. Guzzo, Astron. & Astrophys. 398, 867 (2003)

⁷ Nach dem Diagramm von de Bernardis et al. (2000), astro-ph/0011469

⁸ Die neuesten Messungen des NASA-Satelliten „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe“ (WMAP), die nach der Tagung aber vor der Einreichung des Manuskripts veröffentlicht wurden, ergeben eine bisher unerreichte Genauigkeit für die kosmologischen Parameter: Hubble-Konstante $H_0=71$ km/s/Mpc, Baryonen-Dichte $\Omega_b=0.04$, Materie-Dichte $\Omega_m=0.27$, Dunkle Energie $\Omega_\Lambda=0.75$ (Spergel et al., 2003, astro-ph/0302209)

⁹ A flat Universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation / P. de Bernardis et al. (2000), Nature 404, S. 955

¹⁰ siehe z.B. Das Universum in der Nussschale / Steven Hawking, Hoffmann und Campe Verlag (2001), ISBN 3-455-09345-0

¹¹ Time without end: Physics and Biology in an open Universe / Dyson F.J., (1979), Rev. mod. Phys. 51, S. 447

¹² <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/>