

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 40 (1982)
Heft: 191

Artikel: Anfang und Ende : Evolution des Weltalls
Autor: Stenflo, J.O.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-899333>

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: 23.02.2026

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

Anfang und Ende: Evolution des Weltalls

J. O. STENFLO

Das Universum hat mit einem Urknall angefangen. Durch Fusionsprozesse im Innern der Sterne werden die chemischen Elemente aufgebaut. Später werden diese Elemente (wie bei uns) für biologisches Leben verwendet. Aber was geschieht, wenn alle Sterne verbrannt sind?

Wir haben alle die Schönheit des Sternenhimmels erlebt. Die Existenz der Sterne betrachten wir als selbstverständlich. Aber was ist denn eigentlich ein Stern? Könnte ein Wissenschaftler auf einem immer wolkenbedeckten Planeten die Existenz der Sterne voraussagen? Im Prinzip ja. Er würde sich fragen, ob ein von der Gravitation eingeschlossener Fusionsreaktor möglich ist, und wie er aussehen würde. In einem Fusionsreaktor reagieren Wasserstoffkerne (d.h. Protonen) bei Temperaturen von mehreren Millionen Grad miteinander. (Es handelt sich dabei um dieselben thermonuklearen Reaktionen, die, allerdings explosiv, in einer Wasserstoffbombe vorkommen. Dabei wird Helium gebildet und Energie freigesetzt. Man versucht heute solche Fusionsreaktoren zu bauen, wobei Magnetfelder oder Trägheitskräfte das heisse Plasma zusammenhalten sollen. Wenn dies gelingt, werden die Energieprobleme der Menschheit endgültig gelöst sein.)

Zuerst würde unser Wissenschaftler auf dem wolkenbedeckten Planeten bemerken, dass die Gravitation enorm schwach ist. Das Verhältnis N der elektrischen und Gravitations-Kräfte, die zwischen dem Proton und dem Elektron in einem Wasserstoffatom wirken, ist etwa 10^{39} .

Wegen der Schwäche der Gravitation braucht man daher sehr viel Masse, um das heisse Fusionsplasma erfolgreich einzuschliessen. Aus der Grösse des Verhältnisses N folgt, dass sowohl die Ausdehnung als auch die Zeitkonstante des Fusionsreaktors sehr gross sein muss. Man kann damit die Grösse und Lebensdauer der Sterne voraussagen.

Auch unser Planet ist sozusagen wolkenbedeckt. Vor der Raumfahrt konnte man den Himmel nur in einem kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums beobachten, im «optischen Fenster» und «Radiofenster». Mit Teleskopen ausserhalb der Erdatmosphäre sehen wir neue Himmel im Infrarot, im Ultraviolett, im Röntgen- und Gamma-Bereich. Wir sehen Himmel mit neuen Sternen, die für uns fremde und exotische Zustände der Materie zeigen. Ein Teil dieser Zustände wurde schon seit langem vorausgesagt, z. B. die Existenz von Neutronensternen und schwarzen Löchern. Aber der Zugang zu direkten Beobachtungen dieser Zustände ermöglicht eine Prüfung und Erweiterung der Physik.

Wenn die Zahl N 10^{30} statt 10^{39} wäre, also die Gravitation verhältnismässig stärker, aber trotzdem sehr schwach, dann hätten die Sterne etwa 10^{14} mal kleinere Massen, und ihre Lebensdauer wäre ungefähr ein Jahr. Damit wäre die Evolution des Lebens nicht denkbar. Unsere Existenz ist nur wegen der enormen Schwäche der Gravitation möglich. Aber auch ohne Gravitation würde es nicht gehen. Die Zahl 10^{39} ist für uns recht gut abgestimmt.

Abbildung 1 gibt einen Überblick unserer kosmischen Geschichte mit einer linearen Zeitskala. Die verwendete Zeitein-

heit von 200 Millionen Erdjahren, die wir «kosmisches Jahr» nennen, entspricht ungefähr der Umlaufzeit der Sonne um das Zentrum unseres Milchstrassensystems. Im folgenden werden wir diese Geschichte etwas näher behandeln.

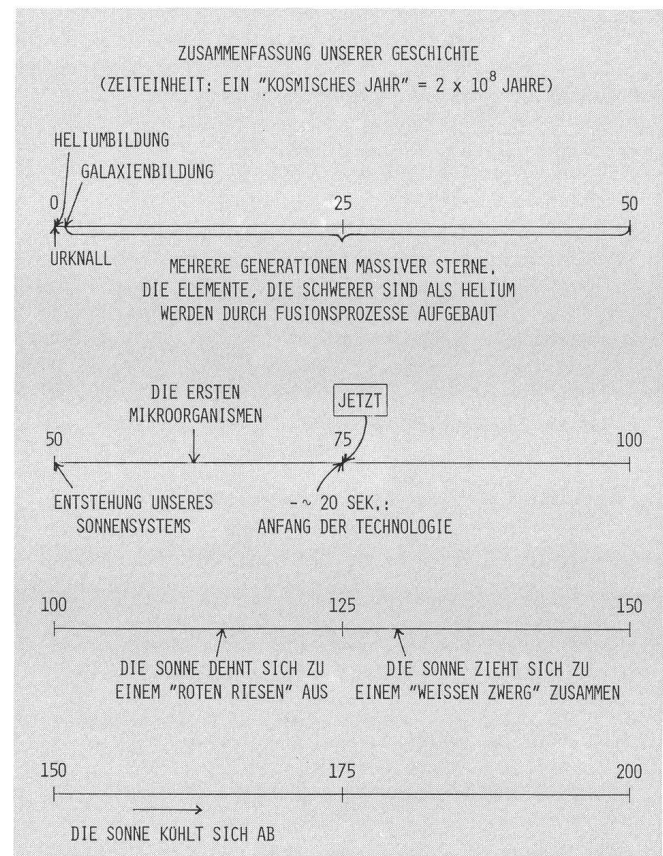


Abb. 1: Unsere kosmische Geschichte mit linearem Zeitmaßstab.

Die Sterne werden durch Gravitationsinstabilität in Gas- und Staubwolken geboren: wenn die Schwerkraft in einem Wolkenteil Druck- und andere Kräfte überwiegt, zieht sich dieser Teil zusammen. Dabei wird potentielle Energie in Wärme umgewandelt, der Protostern wird heisser; er dreht sich auch immer schneller, weil der Drehimpuls des sich zusammenziehenden Materials erhalten bleibt. Wahrscheinlich entstehen in diesem Zusammenhang auch Planetensysteme, nämlich als Kondensationen in der sich schnell drehenden Scheibe von Material, das sich in der Äquatorebene des Protosterns anhäuft.

Durch die Freigabe der potentiellen Energie steigt die Temperatur, bis thermonukleare Fusionsprozesse gezündet werden. Durch diese Energiequelle wird der Strahlungsverlust, der bis anhin eine stetige Kontraktion zur Folge hatte, ersetzt, und damit stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Gravitation

und Gasdruck ein. Es folgt eine stabile Phase im Leben des Sterns; Energie wird durch Umwandlung von Wasserstoff in Helium freigelassen. Eine solche stabile Phase (in welcher die Sonne sich glücklicherweise noch recht lange befinden wird) ist notwendig für die Evolution des biologischen Lebens auf einem Planeten.

Wenn der Wasserstoff im Zentrum verbrannt ist, zieht sich der zurückgebliebene Heliumkern des Sterns zusammen und Wasserstoff fängt an, in einer Schale um den Heliumkern zu brennen. Der dadurch entstehende zusätzliche Gasdruck bläst die äussere Hülle auf und der Stern dehnt sich zu einem sogenannten «roten Riesen» aus.

Im Zentrum eines roten Riesen kann die Temperatur so hoch steigen, dass auch Fusion von schwereren Elementen einsetzt. In der Sonne wird dabei (zu einem späteren Zeitpunkt) Kohlenstoff und Sauerstoff entstehen, aber keine schwereren Elemente. Um schwerere Elemente zu erzeugen, benötigt man höhere Zentraltemperaturen, die aber nur in Sternen mit grösseren Massen vorhanden sind. In Sternen, deren Masse mehrere Sonnenmassen umfasst, können Elemente bis zu Eisen aufgebaut werden. Ein massiver Stern kann dann in einer explosiven Phase – einer Supernovaexplosion – zerrissen werden, wobei die im Sterninneren entstandenen Elemente in den interstellaren Raum hinausgeschleudert werden. Aus dieser interstellaren Materie werden neue Sterne geboren, von denen ein Teil wieder explodiert, etc. Die weiteren Generationen von Sternen entstehen also aus interstellarer Materie mit stets grösserer Häufigkeit von schweren Elementen.

Im Urknall konnten Elemente schwerer als He, Li und Be gar nicht entstehen. Alle anderen, schwereren Elemente mussten durch Fusion in roten Riesen und Supernovae gebildet werden. Die Sonne gehört nicht zu den ersten Generationen von Sternen in unserem Milchstrassensystem, sie ist durch schwere Elemente «verschmutzt». Ein Resultat dieser «Verschmutzung» ist das biologische Leben. Der Kohlenstoff in unseren Zellen wurde in roten Riesen gebacken. Das Eisen in unserem Blut hat Supernovaexplosionen erlebt. Jedes Atom in unserem Körper hat eine grandiose kosmische Geschichte. Wir sind Kinder der Sterne.

Später, wenn die nuklearen Energiequellen verbraucht sind, wird sich die Sonne zu einem weissen Zwerg entwickeln. Danach wird die gespeicherte Wärmeenergie abgestrahlt, die Sonne wird kühler und entwickelt sich zu einem «schwarzen Zwerg» von kalter, degenerierter Materie.

Wenn ein massiver Stern auch nach verschiedenen Masseverlustprozessen eine Restmasse hat, die grösser als einige Sonnenmassen ist, scheint es kein stabiles Endstadium zu geben. In diesem Fall kann kein Druck der Gravitationskraft entgegenstehen, der Stern zieht sich ungehindert zusammen, die Raumzeit schliesst sich um das Objekt, der Stern verschwindet in sein eigenes schwarzes Loch. Obwohl schwarze Löcher keine Eigenstrahlung aussenden, können wir im Prinzip solche Löcher beobachten, wenn sie Teil eines Doppelsystems sind. Ein Beispiel ist das Objekt Cygnus X-1, dessen eine Komponente ein blauer Riesenstern und die andere Komponente wahrscheinlich ein schwarzes Loch ist. Materie fliesst dabei vom Riesenstern zum schwarzen Loch und bildet dort eine Sammelscheibe um das sich schnell drehende schwarze Loch. Diese Scheibe strahlt starke Röntgenstrahlung aus, die mit Satellitenteleskopen beobachtet werden kann.

Die möglichen Endstadien der Sternentwicklung sind also schwarze Zwergsterne, Neutronensterne und schwarze Lö-

cher. (Ein Mittelding sind die Neutronensterne, die als Pulsare beobachtet werden können, und bei denen die Schwerkraft zu einer Verwandlung von Protonen und Elektronen in Neutronen geführt hat.)

Die Evolution des Universums wird in der allgemeinen Relativitätstheorie hauptsächlich durch zwei Klassen von Lösungen, offene oder geschlossene (unendliche oder endliche), beschrieben.

Im Universum, das mit einem Urknall, Big Bang (BB), angefangen hat, kann die Gravitation die Ausdehnung umkehren, wenn die mittlere Massendichte gross genug ist. Wir verschwinden dann in einem Big Crunch (BC).

Die empirisch bestimmte mittlere Massendichte des Universums beträgt ungefähr 0.1-mal die kritische Dichte, die man braucht, um das Universum zu schliessen. Die Messdaten deuten also darauf hin, dass das Universum offen und unendlich ist. Wir sind aber dem kritischen Wert so nahe, dass das Weltall auch gerade noch geschlossen sein könnte, wenn man gewisse Annahmen über die Masse von Neutrinos macht. Es ist aber bemerkenswert, dass die mittlere Massendichte so nahe beim Grenzwert eines euklidischen, asymptotisch offenen Universums liegt. Eigentlich ist diese Tatsache aber auch eine logische (wenn auch nicht kausale!) Folge unserer Existenz. Wenn das Universum zu stark geschlossen wäre, würde vor dem Big Crunch für die Evolution der Sterne und des biologischen Lebens zu wenig Zeit zur Verfügung stehen. Wenn andererseits das Universum zu stark offen wäre, würde sich der Raum so schnell ausdehnen, dass sich Galaxien und Sterne gar nicht bilden könnten. Unsere Existenz ergibt also eine Randbedingung für die Krümmung des Raumes sowie für das Alter des Weltalls. Dies ist in Abbildung 2 illustriert.

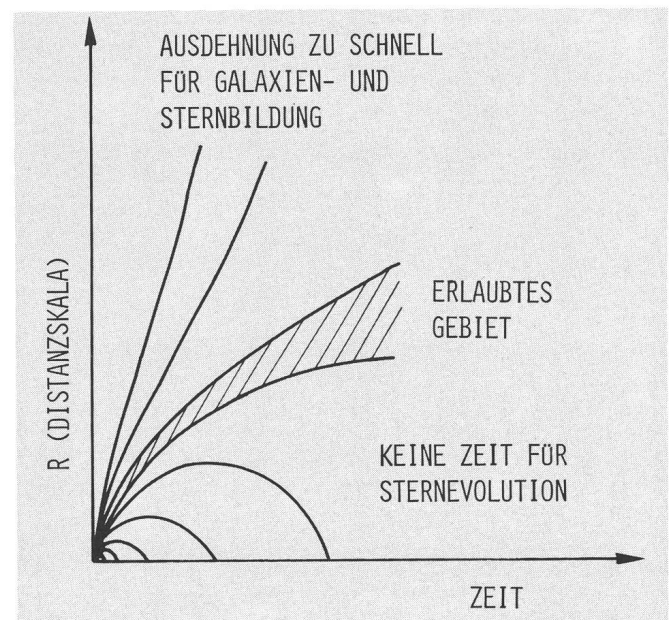


Abb. 2: Ausdehnung des Weltalls bei offenen und geschlossenen kosmologischen Modellen. Die Distanzskala kann durch den Skalenfaktor R beschrieben werden. Man kann sie als Abstand zwischen zwei beliebigen Raumpunkten (oder Massenpunkten) verstehen. Nur das schraffierte Gebiet ist mit unserer Existenz vereinbar.

Die moderne Teilchenphysik erlaubt uns einen Einblick in die extremen physikalischen Verhältnisse während der ersten

Sekunde des Urknalls. Diese fremden Zustände der Materie beschreibt man am besten mit einem logarithmischen Zeitmaßstab. Der logarithmische Maßstab eignet sich auch dazu, die sehr entfernte Zukunft zu beschreiben. Abbildung 3 schildert ein mögliches Szenario für ein gerade noch offenes Universum bis in die ferne Zukunft, in der alle Sterne verbrannt sind.

Die jetzige Physik erlaubt uns auch, die Vorgänge bei sehr frühen Zeiten im Urknall zu beschreiben, sie liefert auch eine mögliche Erklärung der heutigen Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie. Bei der sogenannten «Planck-Zeit» ist die Gravitationskraft des extrem dichten Universums so stark, dass Quantenfluktuationen der Raumzeit dominieren. Frühere Zeiten (falls unser Zeitbegriff dort überhaupt einen Sinn hat) können wir noch nicht beschreiben, da eine Quantentheorie der Gravitation erst noch entwickelt werden muss.

Gemäss neuen Vorstellungen ist die Materie instabil. Die vermutete Lebensdauer der Protonen ist etwa 10^{31} Jahre (Zum Vergleich: das jetzige Alter unseres Universums ist etwa 10^{10} Jahre). Nach dem Zerfall bleiben elektromagnetische Strahlung, Neutrinos, sowie Elektronen und Positronen übrig. Auch die schwarzen Löcher, wenn sie existieren, werden vermutlich zerfallen oder – besser ausgedrückt – langsam verdunsten. Dieser Prozess, dessen Theorie von HAWKING und BEKENSTEIN hergeleitet worden ist, kann als ein quantenmechanischer Tunneffekt durch den Horizont des schwarzen Lochs beschrieben werden. Ein Loch mit einer Sonnenmasse verdunstet in etwa 10^{64} Jahren, eines mit der Masse eines Supergalaxienhaufens in etwa 10^{108} Jahren.

Bei späten Zeiten, wenn die kinetischen Energien der Teilchen klein genug geworden sind, können die Elektronen und Positronen einander einfangen. Dabei entsteht Positronium in extrem hohen Quantenzuständen. Die Elektronen und Positronen werden sich langsam – quasi in Spiralbahnen – aufeinander zu bewegen. Beim Zusammentreffen annihilieren sie, d.h. sie vernichten einander, und übrig bleibt nur Strahlung.

Man könnte meinen, dass in diesem unfassbar kalten und verdünnten Zustand des zukünftigen Universums eigentlich fast nichts geschieht. Die physikalische kosmische Zeit, das Mass der Anzahl physikalischer Prozesse, verhält sich aber

eher logarithmisch, und auf dem logarithmischen Zeitmaßstab geschieht eigentlich viel, auch wenn es sich um einen unglaublich fremden Zustand handelt, von dem wir fast nichts wissen!

Dieses Gesamtbild schildert nur ein mögliches Szenario der Evolution. Es ist bemerkenswert, wie kurz die Ära der Sterne dabei erscheint (schraffiert in Abb. 3).

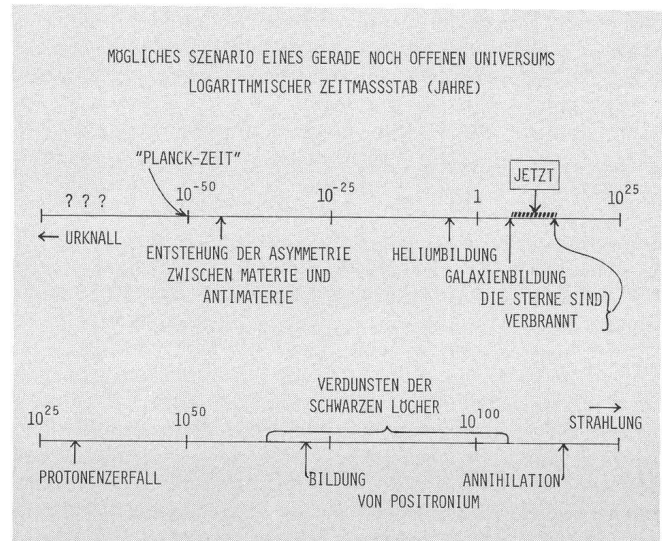


Abb. 3: Mögliche Evolution eines marginal, d.h. gerade noch offenen Universums, in logarithmischem Zeitmaßstab. Man beachte, wie kurz die Ära der Sterne (schraffiert) in dieser Darstellung erscheint.

Wir sind von den Sternen geboren. Unsere Atome, die in den Sternen entstanden waren, werden mit den Sternen aussterben. Beim Erlebnis der Schönheit des Sternenhimmels ahnen wir vielleicht diese Zusammengehörigkeit, dieses Mysterium des Weltalls.

Kurzfassung des Höggerberg-Vortrages vom 23. Februar 1982 von Prof. J. O. Stenflo, Institut für Astronomie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Das Observatório do Capricórnio in Campinas, Brasilien

A. TARNUTZER

Schon seit einiger Zeit stand ich in brieflichem Kontakt mit Herrn NELSON TRAVNIK, technischem Leiter des Observatório do Capricórnio in Campinas, das Abonnent unseres ORION ist. Er plante damals Europa zu bereisen und auch uns einen Besuch abzustatten, doch widrige Umstände vereitelten seinen Plan. So benutzte ich die Gelegenheit einer Ferienreise, meinerseits die Sternwarte zu besuchen und persönliche Kontakte aufzunehmen.

Wie so oft ist die Entstehung auch dieser Sternwarte der Initiative einer einzelnen Person zu verdanken, nämlich Herrn JEAN NICOLINI. Er gründete am 15. Oktober 1948 in

São Paulo mit einem kleinen Refraktor eine Sternwarte, die er Observatório do Capricórnio nannte, da sie ziemlich genau auf dem Wendekreis des Steinbocks lag. Der Zufall wollte es, dass ich selber zu jener Zeit in São Paulo wohnte, ohne von der Existenz dieser Sternwarte zu wissen! Leider wuchs die Stadt im Laufe der Zeit so enorm – sie zählt heute über 12 Millionen Einwohner – und damit verstärkte sich auch die Luftverschmutzung, dass kaum mehr nützliche Beobachtungen angestellt werden konnten. Anfangs der siebziger Jahre begann die Suche nach einem besseren Ort – und nach einem Geldgeber.