Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 62 (2004)
Heft: 320

Artikel: Die mysteriöse Dunkle Energie im Universum
Autor: Erni, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-898304

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: 07.01.2026

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

Die mysteriöse Dunkle Energie im Universum

PETER ERNI

Es gibt viele interessante Phänomene auf kosmologischen Skalen, die wir erst zu verstehen beginnen. Auf den nächsten Seiten soll erläutert werden, wie die im Universum vorhandene Materie und Energie aufgrund von bestimmten Sternenexplosionen untersucht werden können. Dafür müssen wir sehr tief in den Raum blicken, uns also auf sehr grossen Skalen bewegen. Aus diesem Grund werden hier vorgängig die gebräuchlichsten Grössenordnungen sowie der Aufbau des Universums kurz erläutert.

Ausdehnungen und Strukturen des Universums

Viele Leser werden wissen, dass die Erde einen Umfang von ungefähr 40 000 km hat, dass der Mond knapp 400 000 km und die Sonne rund 150 000 000 km von uns entfernt sind. Schon an diesem einfachen Beispiel erkennt man, dass es sehr bald unpraktisch wird, wenn alle Entfernungen in Kilometern angegeben werden. Aus diesem Grund haben die Astronomen ganz unterschiedliche Längenmasse entwikkelt. So gibt es zum Beispiel die Astronomische Einheit (AE), die dem mittleren Abstand der Erde zur Sonne entspricht. Für grössere Skalen als unser Sonnensystem wird die Einheit Lichtjahr (LJ) verwendet. Ein Lichtjahr ist nicht eine Zeiteinheit, wie man vielleicht fälschlicherweise auf den ersten Blick glauben könnte, sondern ebenfalls ein Längenmass und entspricht der Distanz, die Licht in einem Jahr zurücklegt. Kennt man die Lichtgeschwindigkeit (rund 300 000 km pro Sekunde), so findet man, dass ein Lichtjahr (LJ) etwa 10 000 000 000 000 km entspricht.

Das Licht benötigt von der Sonne zwar nur gerade mal acht Minuten bis zur Erde und gut fünfeinhalb Stunden zu Pluto, aber bereits mehr als vier Jahre bis zu unserem nächsten Nachbarstern Alpha Centauri, der folglich mehr als vier Lichtjahre von uns entfernt ist. Unsere Sonne ist aber nur einer von vielen Milliarden Sternen in einer Spiralgalaxie, die wir *Galaxis* (nicht zu verwechseln mit *Galaxie*) oder *Milchstrasse* nennen. Ihr Durchmesser beträgt bereits rund 100 000 Lichtjahre. Der Abstand zu unserer Nachbargalaxie *Andromeda* beträgt sogar unglaubliche 2 000 000 Lichtjahre. Diese beiden Galaxien und noch einige weitere bilden die sogenannte *Lokale Gruppe*, welche mit weiteren Galaxien-Gruppen einen Galaxien-Haufen, den *Virgo-Haufen*, bilden. Geht man über den Virgo-Haufen hinaus, so stellt man fest, dass sich alle Galaxien von uns fort bewegen und zwar je schneller, je weiter sie entfernt sind. Obschon ihre Spektren rotverschoben sind, handelt es sich hier aber nicht, wie leider oft fälschlicherweise geschrieben wird, um den relativistischen Dopplereffekt, sondern um die Expansion des Raumes (entdeckt 1929 vom amerikanischen Astronomen EDWIN POWELL HUBBLE), der die Galaxien mit sich fortträgt. Dank diesen rotverschobenen Spektren der Galaxien haben wir mit der Rotverschiebung eine geeignete Längeneinheit gefunden, um selbst die grössten Distanzen im Universum sinnvoll zu beschreiben. Die Rotverschiebung z ist in der Regel eine sehr kleine Zahl und kann sehr leicht durch die Gleichung $cz = v$ berechnet werden, wobei c die Lichtgeschwindigkeit und v die Fluchtgeschwindigkeit der betrachteten Galaxie sind.

Wir wollen nun unser Augenmerk auf die Ausdehnung des Raumes richten. Damit diese aber überhaupt beobachtet werden kann, darf die Gravitation zwischen den einzelnen Galaxien nicht die dominierende Kraft, wie dies bei Galaxien-Haufen der Fall ist, sein. Betrachten wir also Galaxien jenseits der Lokalen Gruppe, so ist es möglich, die Ausdehnung des Raumes, man spricht vom *Hubble-Fluss*, direkt zu beobachten. Dies ist der Fall für Objekte mit einer Fluchtgeschwindigkeit von $v \geq$ 1200 km/s respektive einer Rotverschiebung von $z \geq 0.004$ (rechnen Sie kurz nach!). Wie es aber möglich ist, solch enorme Entfernungen möglichst genau zu messen, um danach auf Eigenschaften des Raumes (wie zum Beispiel die Existenz von *Dunkler Energie*) zu schliessen, soll nun im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Abb. 1: Supernova 1994D (unten links) am äusseren Rand der Scheibengalaxie NGC 4526, aufgenommen vom Hubble Weltraumteleskop (HST).

Entfernungsmessung mit Supernovae vom Typ Ia

Novae und Supernovae (SNe) sind wörtlich *neue* Sterne. In Tat und Wahrheit handelt es sich aber hierbei um sterbende Sterne. Novae und Supernovae können eine enorme Helligkeitszunahme erreichen, wobei eine Supernova so hell werden kann, dass sie für kurze Zeit sogar das Licht einer mittleren Galaxie (mit etwa 10 Milliarden Sternen) übertreffen kann (siehe Abb. 1). Leider sind Supernovae aber sehr selten. In unserer Galaxie rechnet man mit nur gerade etwa drei Ereignissen alle 100 Jahre. Es wird aber geschätzt, dass im beobachtbaren Universum pro Sekunde ein Stern als Supernova stirbt.

Supernovae werden in vier Klassen eingeteilt, die sich anhand des zeitlichen Helligkeitsverlaufs, der Spektraleigenschaften und dem Mechanismus unterscheiden: Typ Ia, Ib, Ic sowie Typ II.

Der Vorläufer (Progenitor) der SNe Ia ist ein enges Doppelsternsystem, bestehend aus einem *Weissen Zwerg* (ein ausgebrannter Sternrest, der keinen Wasserstoff mehr enthält und hauptsächlich aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht) und einem Begleitstern, wahrscheinlich einem *Roten Riesen* (ein

Abb. 3: Künstlerische Darstellung eines Weissen Zwerges, der von seinem Begleitstern Masse akretiert. (Bild: NASA/RST)

Stern, der in seinem Zentrum schon seinen ganzen Wasserstoff zu Helium durch Kernfusionen verwandelt hat). Der Weisse Zwerg akkretiert Masse von seinem Begleitstern, und es entsteht so ein CO-Kern, umhüllt von einer Heliumhülle. Wenn die Gesamtmasse die *Chandrasekhar-Grenze* von 1.44 Sonnenmassen übersteigt, zündet eine unter «normalen» Bedingungen (im Sterneninneren) nicht vorkommende Reaktion: Kohlenstoff und Wasserstoff fusionieren explosiv zu schwereren Elementen, hauptsächlich zu radioaktivem Nickel (^{56}Ni). Die freiwerdende Fusionsenergie (10^{51} ergs) wird in Wärme umgesetzt, das heisst, die Temperatur des Sternenkerns steigt noch weiter und damit auch der Druck. Dieser Vorgang beschleunigt die Sternenhülle nach aus-

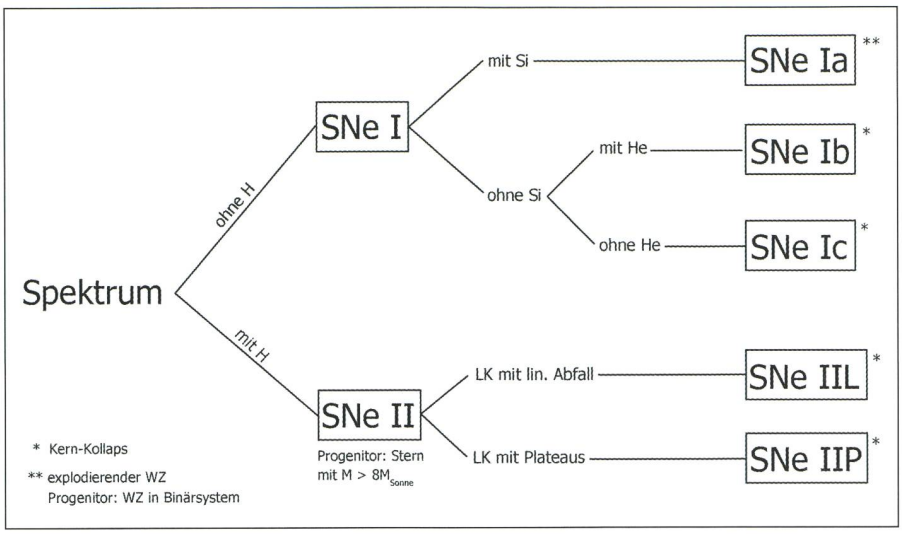


Abb. 2: Übersicht über die verschiedenen Typen von Supernovae (SNe).

sen. Die Wärmeenergie wird also in kinetische Energie umgewandelt. Diese zerreisst den Stern schliesslich vollständig: Es bleibt kein Überrest zurück. Aber in der weggeschleuderten Materie ist noch erhebliche Energie (10^{49} ergs) im radioaktiven Nickel gespeichert. Diese wird in einem ersten Schritt freigesetzt, wenn ^{56}Ni mit einer Halbwertszeit von acht Tagen zu radioaktivem Kobalt (^{56}Co) zerfällt und in einem zweiten Schritt, wenn letzterer mit einer Halbwertszeit von 111 Tagen zu stabilem Eisen (^{56}Fe) zerfällt. Dies lässt den Supernovaüberrest noch monatelang nachleuchten.

SNe vom Typ Ib und Ic haben weit entwickelte Vorläufersterne, die in ihrer Entwicklung bereits die wasserstoffreichen äusseren Schichten abgestossen haben. Die Vorläufersterne von SNe Ic haben zudem auch zum grössten Teil die heliumreichen Schichten verloren. Der Auslöser für SNe vom Typ Ib und Ic ist nicht zuströmende Materie eines Begleitsterns, sondern es sind energetische Instabilitäten im Zentrum des Vorläufersterns selbst: Wenn alle energiefreisetzenden Fusionsprozesse erschöpft sind, setzt innerhalb von wenigen Millisekunden ein Gravitationskollaps ein und der Stern stürzt in sich zusammen. Beim Aufprall der äusseren Schichten auf den Kern werden diese mit enormer Gewalt abgestossen. Diese Schockwelle erreicht Geschwindigkeiten von bis zu 10 000 km/s. Zurück bleibt ein sehr kompakter Überrest, ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch, je nach Masse des Vorläufersterns.

Vom Mechanismus her sehr ähnlich wie die SNe Ib und Ic sind die SNe II. Hier ist der Auslöser der Explosion ebenfalls eine Energiekrise im Sternenkern, allerdings sind die äusseren Hüllen bei der Explosion noch vorhanden. Dies deutet auf eine viel raschere Entwicklung des Vorläufersterns hin, es dürfte sich also um sehr massenreiche Sterne handeln.

Supernovae vom Typ Ia als Standardkerzen: Eine *Standardkerze* ist ein Objekt mit annähernd konstanter absoluter Helligkeit. Aufgrund der scheinbaren Helligkeit kann so auf die Entfernung der Standardkerze geschlossen werden. Supernovae vom Typ Ib, Ic und II sind keine guten Standardkerzen, da ihre Helligkeit von vielen Parametern abhängt, ganz im Gegensatz zu den SNe Ia. Die SNe Ia sind nicht nur die hellsten aller Supernovae (zehn Milliarden mal heller als unsere Sonne) und somit auch am weitesten sichtbar, sie haben auch praktisch identische Maximumhelligkeiten, da der Vorläuferstern und somit der Mechanismus immer der gleiche ist. Alle diese Eigenschaften machen die SNe Ia zu (fast) perfekten Standardkerzen. SNe Ia können also nicht nur für die Bestimmung der *Hubble-Konstante* H_0 ($H_0=cz/d$, wobei d für die Entfernung steht) herangezogen werden, sondern sind auch ein sehr sensibler Test für die Existenz und die Grösse der *kosmologischen Konstante* Λ (Lambda), mehr diesbezüglich folgt weiter unten (siehe auch *Riess et al., 1998b* und *Perlmutter et al., 1999*).

Beschränkung auf nahe SNe Ia: Es gibt mehrere gute Gründe, wieso man vorsichtig sein sollte, wenn nahe SNe Ia ($z \approx 0.1$) mit fernen SNe Ia ($z \approx 1$) verglichen werden. Der wohl wichtigste Vorbehalt liefern Computersimulationen von Supernova-Explosionen: Es zeigt sich, dass der Ablauf einer SNe Ia sehr heikel auf unterschiedliche Elementhäufigkeiten reagiert. Das Hauptproblem ist, dass frühe SNe Ia wahr-

Abb. 4: SNe Ia sind die besten Standardkerzen, die wir heute kennen.

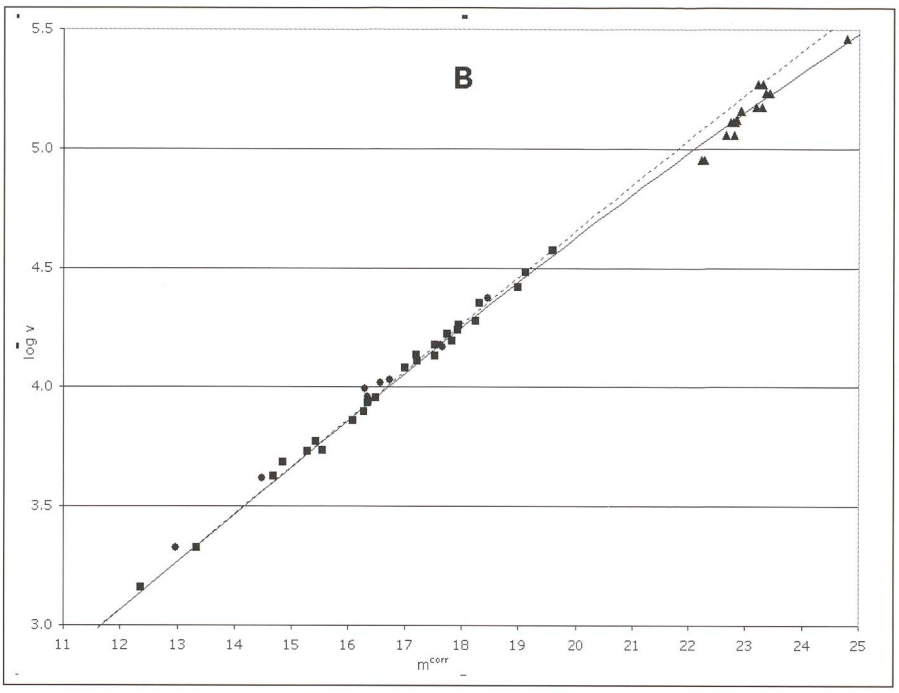


Abb. 5: Hubble-Diagramm von 26 SNe Ia mit $A_V < 0.^m2$ (Quadrate), 9 SNe Ia mit $A_V > 0.^m2$ (Kreise) sowie 20 fernen SNe Ia (Dreiecke).

scheinlich von kurzlebigen, massereichen Sternen stammen, die ihrerseits Weisse Zwerge mit einer anderen Struktur bilden. Geht man also davon aus, dass Progenitoren weit entfernter und somit jüngerer SNe Ia nicht die gleiche Zusammensetzung wie nahe SNe Ia aufweisen, so sind diese beiden Ereignisse nicht identisch. Dadurch würde natürlich die Qualität der SNe Ia als Standardkerzen beeinträchtigt. Es besteht somit die Gefahr, dass «Äpfel» mit «Birnen» verglichen werden.

Das Hubble-Diagramm

Gegenwärtig sind 26 nahe (bis $z < 0.1$ respektive $v < 30'000$ km/s) SNe Ia mit guten bis ausgezeichneten photometrischen Daten im *B*-, *V*- und *I*-Band (*B* = blau, *V* = visuell, *I* = infrarot) bekannt. Diese sind blau in ihrer Maximumhelligkeit (d.h. $(B\text{-}V) \leq 0.^m06$), korrigiert für galaktische Absorption $A_v < 0.^m2$ und Abfallrate Δ_{15} (für Details siehe *Parodi et al., 2000*). Zudem liegen alle 26 SNe Ia nicht näher als $v = 1200$ km/s, um Einflüsse der Lokalen Gruppe und somit Pekuliargeschwindigkeiten der Muttergalaxien auszuschliessen. Zeichnet man den Logarithmus der Fluchtgeschwindigkeit in Funktion der Helligkeiten auf, so erhalten wir das sogenannte *Hubble-Diagramm*:

Man stellt fest, dass alle Punkte fast auf einer Geraden liegen, aber eben nur fast! Die leicht gekrümmten Linien in Abb. 5 sind sogenannte *Hubble-Linien*, welche von den kosmologischen Parametern Ω_m und Ω_Λ abhängig sind. Es ist also möglich, dass aufgrund von SNe Ia auf die Hubble-Linie und daraus auf die Parameter Ω_m und Ω_Λ geschlossen werden kann. Weiter unten werden wir sehen, dass es leider nicht genügend Beobachtungsdaten von SNe Ia gibt, um schlüssige Aussagen machen zu können. Hier werden wir uns mit einem kleinen «Trick» behelfen, indem wir mit künstlichen, im Computer generierten Beobachtungsdaten arbeiten. Jetzt soll aber im nächsten Kapitel noch zuvor die Rede von den bereits erwähnten Parametern Ω_m und Ω_Λ sein.

Die Kosmologischen Parameter Ω_m und Ω_Λ

Anfang des vergangenen Jahrhunderts entwickelten FRIEDMANN und LEMAÎTRE kosmologische Modelle, die sich, je nach ihrer Krümmung, ganz unterschiedlich entwickeln (siehe Tabelle 1). Es gibt heute sehr überzeugende theoretische und beobachterische Argumente, die für ein flaches Universum sprechen, d.h. die einfachste Geometrie, die man sich vorstellen kann (Euklidische Geometrie). Somit leben wir in einem flachen (also nicht gekrümmten) und ewig expandierenden Universum (Siehe Tabelle 1). Einige Leser werden sich jetzt wohl denken, dass dies nicht sein kann: Wie soll denn ein Euklidischer Raum – also ein ganz normaler, dreidimensionaler Raum, so wie wir ihn aus dem Alltag kennen – unendlich gross sein? Hier darf nicht vergessen werden, dass wir den Raum immer nur im Zusammenhang mit der Zeit betrachten dürfen, man spricht vom *Raum-Zeit-Kontinuum* oder *Minkowski-Raum*. Da es sich hierbei um einen 4-dimensionalen Raum handelt (drei Raumdimensionen und eine Zeitdimension), entzieht sich dieser unserem Vorstellungsvermögen. Durch eine einfache Analogie können wir uns aber dennoch klar machen, dass ein flacher Raum durchaus unendlich gross (also ohne Grenzen) sein kann: Stellen Sie sich ein Lebewesen vor, welches nur die zwei Dimensionen *links*,

Tabelle 1: Die drei möglichen Fälle aus dem Friedmann-Lemaître-Modell, wobei $\Omega_0 = \Omega_{tot}$ (t=heute).

Bremsparameter	Krümmung	Dichte	Dichteparameter	Expansion	Raum
$0 \leq q_0 < 1/2$	$k = -1$	$\rho_0 < \rho_{crit}$	$\Omega_0 < 1$	linear falls $q_0=0$ und $k=-1$ hyperbolisch falls $0<q_0<1/2$ und $-1<k<0$	**offen** und unendlich
$q_0 = 1/2$	$k = 0$	$\rho_0 = \rho_{crit}$	$\Omega_0 = 1$	Parabolisch	**flach** und unendlich
$q_0 > 1/2$	$k = +1$	$\rho_0 > \rho_{crit}$	$\Omega_0 > 1$	Elliptisch	**geschlossen** und endlich

rechts und *geradeaus*, *rückwärts* kennt, *oben* und *unten* sind ihm dagegen völlig unbekannt. Setzt man dieses Lebewesen nun auf die Oberfläche einer Kugel, so würde es uns mitteilen, dass es sich in einem flachen «Raum» befindet, der keine Grenzen hat, also unendlich ist.

Nun aber wieder zurück zu unserem 4-dimensionalen Universum. Die Modelle von FRIEDMANN und LEMAÎTRE sind insofern richtig, dass sie sich den Urknall als eine Art Explosion vorstellen, welche alle Galaxien in den Raum schleudert (genauer müsste man sagen, dass es der Raum *selbst* ist, der sich ausdehnt). Die einzige bremsende Kraft dabei ist die Gravitation, die zwischen den einzelnen Galaxien wirkt und somit ein Abbremsen der Expansion zur Folge hat. So weit, so gut. Nun hat man aber, unter anderem auch durch die Beobachtung und Auswertung von SNe Ia, herausgefunden, dass die Expansion sich nicht verlangsamt, sondern sich im Gegenteil sogar beschleunigt!

Wie ist so etwas aber möglich? Hier kommt nun die Dunkle Energie ins Spiel. Sie ist eine Art von «negativer Gravitation» und wirkt somit abstossend auf Materie, was folglich eine Beschleunigung der Expansion zur Folge hat. Es soll hier aber nicht das Ziel sein, die Natur der Dunklen Energie zu ergründen (könnte ich dies, so wäre mir der Nobel-Preis sicher), sondern deren Beitrag zur Gesamtenergie des Universums. Bevor wir uns aber der Quantifizierung der Dunklen Energie zuwenden, wollen wir uns durch ein kurzes «Inventar» einen Überblick über die im Universum vorhandene Materie und Energie (Massen und Energien interessieren uns hier gleichermassen, da sie nach EINSTEINS Formel $E = mc^2$ äquivalent sind) und deren Beitrag zur Gesamtmasse verschaffen. Die Bestimmung des *Dichteparameters* Ω_{tot} (siehe auch Tabelle 1) kann in mehrere Teilschritte zerlegt werden:

- *Leuchtende, baryonische Materie* $\Omega_m^{bar,rad}$: Aufgrund von Beobachtungen (Zählungen) und der Tatsache, dass die Leuchtkraft der Sterne etwa proportional zur dritten Potenz der Masse ist, findet man für die mittlere Massendichte der leuchtenden Materie den ungefähren Wert von $\Omega_m^{bar,rad} = 0.005$, also etwa ein halbes Prozent des *kritischen* Dichteparameters $\Omega_{tot} = 1$ (entspricht dem Fall eines flachen Universums). Aufgrund von gewissen Unsicherheiten wäre es möglich, dass $\Omega_m^{bar,rad}$ doppelt so gross sein könnte. Es steht aber ohne Zweifel fest, dass die leuchtende Materie nur knapp ein Hundertstel der kritischen Dichte erreicht. Wir schreiben also $\Omega_m^{bar,rad} < 0.01$.
- *Baryonische Materie* Ω_m^{bar}: Theoretische, auf dem Urknall basierende Überlegungen erlauben es, die Natur der kosmischen Materie recht zuverlässig anzugeben: Es gibt nur einen geringen Anteil an normaler Materie, die aus Atomkernen und letzten Endes aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist, aus welcher also die Sonne, die Planeten und auch wir bestehen. Diese Art von Materie wird auch als *baryonische* Materie bezeichnet. Die mittlere Baryonendichte liegt zwischen 5% und 8%. Nehmen wir einen Wert von $H_0 = 65$ km s^{-1} Mpc^{-1} für die Hubble-Konstante an, so ist $\Omega_m^{bar} = \Omega_m^{bar,rad} + \Omega_m^{bar,dunkel} \approx 0.05$.
- *Nicht-baryonische Materie* Ω_m^{DM}: Die Natur der nicht-baryonischen, *Dunklen Materie*, man spricht von *Dark Matter* (DM), ist nach wie vor unbekannt. Der einzige auch experimentell nachgewiesene Vertreter dieser Spezies sind die *Neutrinos*, langlebige Elementarteilchen mit sehr geringer Masse, die nur äusserst schwach wechselwirken. Sie sind eine Form von sogenannter *Hot Dark Matter* (HDM). Wenn die Neutrinomassen einige Elektronenvolts betragen würden, so könnte die gesamte Dunkle Materie damit erklärt werden. Man weiss aber heute, dass die Neutrinos nur einen sehr bescheidenen Beitrag zur kosmischen Massendichte liefern, da man die Obergrenze für ihre Massen sehr genau kennt. Es muss somit weitere Dunkle Materie geben, die aus dunklen, massiven und schwach wechselwirkenden Teilchen besteht, die sich bisher jedem Nachweis entzogen haben.
- Neben der HDM wird auch nach sogenannter *Cold Dark Matter* (CDM), es sind dies nicht-relativistische Teilchen, gesucht. Ein wichtiger Kandidat ist das *Neutralino*, welches von einer supersymmetrischen (SUSY) Erweiterung des Standardmodells vorausgesagt wird.
- *Dunkle Energie* Ω_Λ: Theorie und Beobachtungen deuten stark darauf hin, dass unser Universum flach ist und somit der Dichteparameter $\Omega_{tot} = 1$ beträgt. Summiert man die oben aufgeführten Dichteparameter auf, so stellt man fest, dass W_{tot} nur gerade den Wert von ungefähr 0.3 erreicht. Die logische Schlussfolgerung ist, dass es einen zusätzlichen Dichteanteil geben muss. Aus diesem Grund führen wir an dieser Stelle die kosmologische Konstante Λ ein, der entsprechende Dichteparameter hat den Wert $\Omega_\Lambda \approx 0.7$.

Das oben Gesagte ist nochmals in Abb. 6 zusammengefasst. Für den nun folgenden Teil wollen wir uns mit der Frage beschäftigen, wie wahrscheinlich es ist, dass das Universum tatsächlich zu 30% aus Materie ($\Omega_m = 0.3$) und zu 70% aus Dunkler Energie ($\Omega_\Lambda = 0.7$) besteht. Wie machen wir das? Eigentlich ist dies nun gar nicht mehr so schwierig, da wir schon viel Vorarbeit geleistet haben: Mit SNe Ia natürlich. Der einzige Haken bei der Sache ist jedoch, dass die 26 nahen SNe Ia für schlüssige Aussagen nicht ausreichen. Wir benötigen also deutlich mehr Daten. Diese erhalten wir durch Computersimulationen. Wie dies genau gemacht wird und welche Schlüsse daraus auf den Raum und Expansion gezogen werden können, ist das Thema des nächsten Kapitels.

Wird unser Universum tatsächlich von Dunkler Energie dominiert?

In Abb. 5 entspricht die tieferliegende Hubble-Linie einem Universum mit den Parametern $\Omega_\Lambda = 0.7$ und $\Omega_m = 0.3$. Man wäre nun geneigt zu sagen, dass diese Linie den Messpunkten am besten entspricht. Hier müssen wir uns aber wieder an die oben gemachten Einwän-

Abb. 6: Ein Inventar der baryonischen und nicht-baryonischen Materie ergibt, dass Materie nur gerade 30% der im Universum vorhandenen Energie erklären kann. Die restliche Energie (Masse und Energie sind ja gemäss EINSTEIN äquivalent), die sogenannte Dunkle Energie (Dark Energy), wird durch die kosmologische Konstante Λ beschrieben, der entsprechende Dichteparameter hat den Wert $\Omega_\Lambda \approx 0.7$.

$$\Omega_{tot} = \underbrace{\underbrace{\Omega_m^{bar,\,rad} + \Omega_m^{bar,\,dunkel}}_{\Omega_m^{bar} = 0.05 \pm 20\%} + \Omega_m^{DM}}_{\Omega_m = 0.3 \pm 20\%} + \Omega_\Lambda = 1$$

de gegen die fernen SNe Ia erinnern. Beschränken wir uns nur auf die 26 nahen SNe Ia, ist die Stichprobe – statistisch gesprochen – viel zu klein, um signifikante Aussagen machen zu können (vergleiche auch Abb. 8). Es ist nun aber möglich, aufgrund der Eigenschaften der beobachteten SNe Ia, künstliche SNe Ia im Computer zu generieren (für Details siehe *Erni und Tamman, 2003*), welche in der Folge auch schlüssige Aussagen ermöglichen. Es soll hier aber noch darauf hingewiesen werden, dass es sich dabei um hypothetische SNe Ia handelt. Man kann also in der Folge zwar nicht den Wert der kosmologischen Parameter bestimmen, es ist aber möglich zu sagen, mit welcher Wahrscheinlichkeit bestimmte Parameter ausgeschlossen respektive favorisiert werden können, wenn in 10 bis 15 Jahren die hypothetischen SNe Ia durch Beobachtungsdaten ersetzt werden können.

Generieren von nahen, hypothetischen SNe Ia: Da die Aufbereitung der Messdaten, das Generieren und Streuen von hypothetischen SNe Ia zum Teil intensive numerische Prozesse sind, wurde für die weiter unten folgenden Ergebnisse die Programmiersprache *FORTRAN* verwendet. Um statistisch stabile Resultate zu erhalten, aber um auch der Wirklichkeit so gut als möglich zu entsprechen, mussten die einzelnen Schritte gleich mehrmals gerechnet werden (Mittelungen). Die hier vorgestellten Ergebnisse entsprechen einer Rechenzeit von etwa 30 Stunden auf einem gängigen Personal Computer.

Für das weitere Vorgehen wollen wir folgende zwei Hypothese aufstellen:

Das Universum ist flach und Λ-dominiert ($\Omega_\Lambda = 0.7$ und $\Omega_m = 0.3$). (H1)

Das Universum ist flach und enthält nur Materie ($\Omega_\Lambda = 0$ und $\Omega_m = 1$). (H2)

Unsere Fragestellung lautet somit:

Falls (H1) gilt, mit welcher Wahrscheinlichkeit kann (H2) ausgeschlossen werden?

In einem ersten Schritt wird eine Hubble-Line ($\Omega_\Lambda = 0.7$ und $\Omega_m = 0.3$) bestmöglich an die beobachteten Daten gefittet. Anschliessend werden, unter der Annahme von (H1), 200 hypothetische SNe Ia auf dieser Linie homogen im Raum verteilt und danach deren Helligkeit mit der *Monte-Carlo-Methode* gestreut, wobei wir annehmen, dass es sich bei der Streuung um eine *Gauss-Verteilung* handelt (so wie dies auch von den Beobachtungen nahegelegt wird). Fassen wir nun diese Punkte als 200 hypothetische Beobachtungen auf, so können wir mit einem bestmöglichen Fit einer Hubble-Linie ($\Omega_\Lambda = 0$ und $\Omega_m = 1$) testen, wie wahrscheinlich respektive unwahrscheinlich (H2) ist.

Mit nur zwei möglichen Weltmodellen: In einem ersten Schritt soll die Annahme gemacht werden, dass nur zwei Weltmodelle möglich sind: Entweder ist das Universum flach und Λ-dominiert (H1) oder flach und enthält nur Materie (H2). Somit genügt es, (H2) mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auszuschliessen, um (H1) mit der Gegenwahrscheinlichkeit zu favorisieren. Genau dies ist mit einem χ^2-*Test* möglich.

Für die hypothetisch beobachteten 200 SNe Ia mit $z \leq 0.16$ lautet die Nullhypothese (H2). Die Berechnungen zeigen, dass (H2) mittels dem χ^2-Test mit einer Sicherheitsgrenze von 10% verworfen werden kann, wobei aber auch dieser Wert noch mit einem Fehler behaftet ist (aufgrund der intrinsischen Streuung). Unter Berücksichtigung dieses Fehlers sowie der oben gemachten Annahmen erhält man als Endresultat die Aussage, dass (H1) mit 90% ± 6% Wahrscheinlichkeit richtig ist. Die statistische Wahrscheinlichkeit, dass das (H2) doch zutreffen sollte, liegt bei 10% ± 6%. Diese Zahlen basieren aus einer Mittelung von über 500 einzelnen Rechnungen.

Wird die maximal zulässige Entfernung verkürzt, so gewinnt mit $z \leq 0.15$ und 200 SNe Ia wiederum (H1), aber dieses Mal mit einer beachtlichen Unsicherheit, nämlich einer Sicherheitsgrenze von 22% ± 12%, eine zu schlechte Aussage. Lässt man hingegen Entfernungen bis $z = 0.2$ zu, so sinkt die Sicherheitsgrenze sogar unter 4% ± 2%. Zwar gewinnt das Resultat hier an Signifikanz, die *Rückblickzeit* (die Zeit, die das Licht benötigt hat, um uns zu erreichen) nimmt aber deutlich zu, und somit steigt die Gefahr, dass die SNe Ia zu unterschiedlich und somit nur beschränkt vergleichbar sind.

Rein rechnerisch ist es möglich, Resultate mit noch weniger SNe Ia zu erhalten. Dies ist aber nicht sehr sinnvoll, da die Standardabweichung bei kleiner werdender Stichprobengrösse immer stärker fluktuiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass die vorausgesetzte Standardabweichung bei nur wenigen SNe Ia in Wirklichkeit auch zutrifft, wird geringer, je kleiner die Anzahl der SNe Ia ist. Somit würde sich unser Modell zu stark von der Realität entfernen.

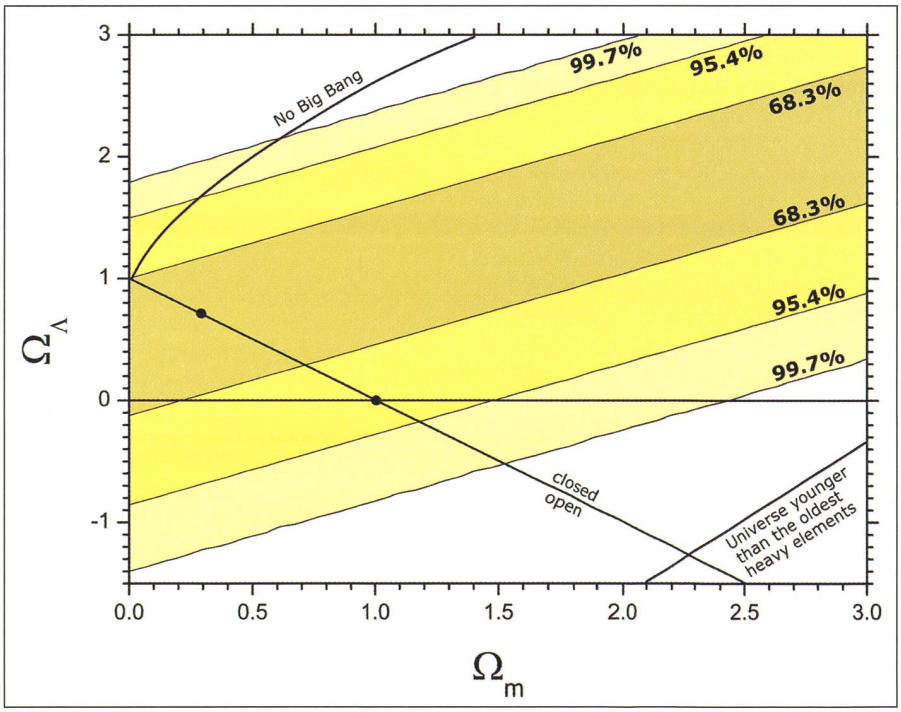
Verallgemeinerung: In einem zweiten Schritt gehen wir analog wie oben vor, verallgemeinern jedoch die Aussage. Zu diesem Zweck führen wir hier eine dritte Hypothese ein:

Die Dichteparameter des Universums sind Ω_Λ und Ω_m.

Es gilt $\Omega_\Lambda \in [-1.5, 3]$, $\Omega_m \in [0, 3]$ und $\Omega_\Lambda + \Omega_m = 1$. (H3)

Wir gehen nun wieder von der Annahme (H1) aus und versuchen anschliessend die Nullhypothese (H3) mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auszuschliessen, um so mit der Gegenwahrscheinlichkeit einen Wert für (H1) zu erhalten.

Abb. 7: Ausschliessungs-Diagramm (Confidence Level Plot) basierend auf 200 hypothetisch beobachteten SNe Ia bis zu einer Entfernung von z = 0.16.



Vergleicht man nun (H1) gegen (H3) mit immer anderen Dichteparametern, so erhalten wir Aussagen für alle möglichen Kombinationen der Dichteparameter, so wie in (H3) definiert. Die Resultate sind in Abb. 7 zusammengestellt:

Oben haben wir uns die Frage gestellt, wie gross die Wahrscheinlichkeit für (H2) unter Voraussetzung von (H1) ist. Dies können wir nun aus Abb. 7 herauslesen. Der entsprechende Punkt für (H2) mit $\Omega_\Lambda = 0.0$ und $\Omega_m = 1.0$ liegt im gelben Bereich, zwischen 68.3% und 95.4%, der genaue numerische Wert ist 90%. Es sind dies genau jene 90%, die wir bereits oben gefunden haben.

Mit Hilfe der Abb. 7 sind nun auch weitere Aussagen über andere Universen möglich. Nehmen wir an, es gelte (H1). Man will nun zum Beispiel wissen, wie wahrscheinlich es ist, mit 200 SNe Ia bis $z = 0.16$ die Möglichkeit auszuschliessen, dass das Universum in Wirklichkeit nicht doch so ist, wie es zum Beispiel durch die Dichteparameter $\Omega_\Lambda = 0$ und $\Omega_m = 2$ beschrieben wird. Sucht man den entsprechenden Punk in Abb. 7, so stellt man fest, dass diese Vermutung mit einer Wahrscheinlichkeit von über 95% (hellgelber Bereich) ausgeschlossen werden kann.

Es sei hier noch angemerkt, dass das Universum, welches (H1) entspricht, als Resultat die höchste Wahrscheinlichkeit hat, «realisiert» zu werden. Dies muss natürlich so sein, denn wir erinnern uns, dass wir beim Generieren der hypothetischen SNe Ia von einem Universum mit den Dichteparametern $\Omega_\Lambda = 0.7$ und $\Omega_m = 0.3$ ausgegangen waren. Gleiche Überlegungen gelten für die beobachteten 26 SNe Ia natürlich nicht, da hier keine Annahme bezüglich der Dichteparameter Ω_Λ und Ω_m gemacht werden.

Anwendung auf die Beobachtungsdaten: Ein Graph, analog zu Abb. 7, aber basierend auf den Beobachtungsdaten der 26 SNe Ia, kann prinzipiell eine Entscheidung zwischen (H1) und (H2) ermöglichen. Nur ist aber leider die Stichprobe (noch) zu klein, um so schlüssige Aussagen machen zu können. Wir stellen fest, dass die Punkte von (H1) und (H2) in Abb. 8 sehr nahe bei der gleichen Wahrscheinlichkeit liegen. Niemand würde es wohl wagen zu behaupten, dass aufgrund dieses Graphen die eine oder andere Hypothese zu bevorzugen wäre.

Diverse Berechnungen haben ergeben, dass mindestens 200 SNe Ia (mit der verlangten Güte) bis zu einer Entfernung von $z = 0.16$ benötigt werden, um signifikante und zuverlässige Aussagen über die kosmologischen Dichteparameter machen zu können. Diese Aussagen würden natürlich noch deutlicher ausfallen, wenn eine grössere Anzahl von SNe Ia verwendet würden. Da es sich bei SNe Ia aber um sehr seltene Ereignisse handelt, sind Berechnungen mit einer grösseren Anzahl von hypothetischen SNe Ia realitätsfremd. Auch hohe Rotverschiebungen würden zu besseren Resultaten führen, dies ist aber wiederum aufgrund der grösseren Rückblickzeit und dem somit wahrscheinlich unterschiedlichen Verhalten der SNe Ia nicht vorteilhaft.

Obwohl in Zukunft mit genaueren Messdaten gerechnet werden darf, so haben wir unserer Arbeit dennoch die Streuung der aktuellen Daten des B-Bandes mit einer Standardabweichung $\sigma_B = 0.117$ zugrunde gelegt und für unsere Analysen den etwas konservativen Wert von $\sigma_{hyp} = 0.120$ gewählt. Es wäre ja möglich, dass ein bestimmter Teil dieser Streuung von dem Prozess der SNe Ia selbst stammt (intrinsische Streuung). Zudem sollte auch nicht vergessen werden, dass auch σ_B selbst einer Streuung unterliegt. Weil der Umfang der «Stichprobe» nur gerade 26 Elemente enthält, ist es schwierig zu sagen, bis zu welchem Punkt die SNe Ia ideale Standardkerzen sind und die Streuung auf Beobachtungsfehler oder aber auf statistische Schwankungen zurückgeführt werden muss. Sollten zukünftige Beobachtungen tatsächlich mit etwas kleineren Standardabweichungen σ_{hyp} gemacht werden können, so würde dies deutlich bessere Resultate, d.h. niedrigere Sicherheitsgrenzen, zur Folge haben.

Schlussfolgerungen

Abb. 8 verdeutlicht, dass es mit den zur Zeit verfügbaren Beobachtungsdaten von SNe Ia nicht möglich ist, die Hypothese (H2), welche bis vor kurzem der gängigen Vorstellung der Kosmologen entsprach, schlüssig zu verwerfen. Je mehr hypothetische SNe Ia man aber hinzu zieht, umso kleiner werden die Sicherheitsgrenzen der χ^2–Berechnungen und umso genauer kann (H2) tatsächlich verworfen werden (siehe Abb. 7).

Die hier betrachteten 200 hypothetischen SNe Ia mit einer maximalen Rotverschiebung von $z = 0.16$ haben ihr heute auf der Erde empfangenes Licht vor 2,3 GJ ausgesandt (Rückblickzeit). Da die chemische Entwicklung unserer Milchstrasse in den letzten Milliarden Jahren sehr viel langsamer war als in ihrer Frühzeit, darf erwartet werden, dass diese SNe Ia denen in unserer Nachbarschaft chemisch viel näher stehen als SNe Ia bei $z \approx 1$, die ihr Licht schon vor 9 GJ (also zu einer Zeit, als das Universum gerade mal einen Drittel seines heutigen Alters hatte!) ausgesandt haben. Weil

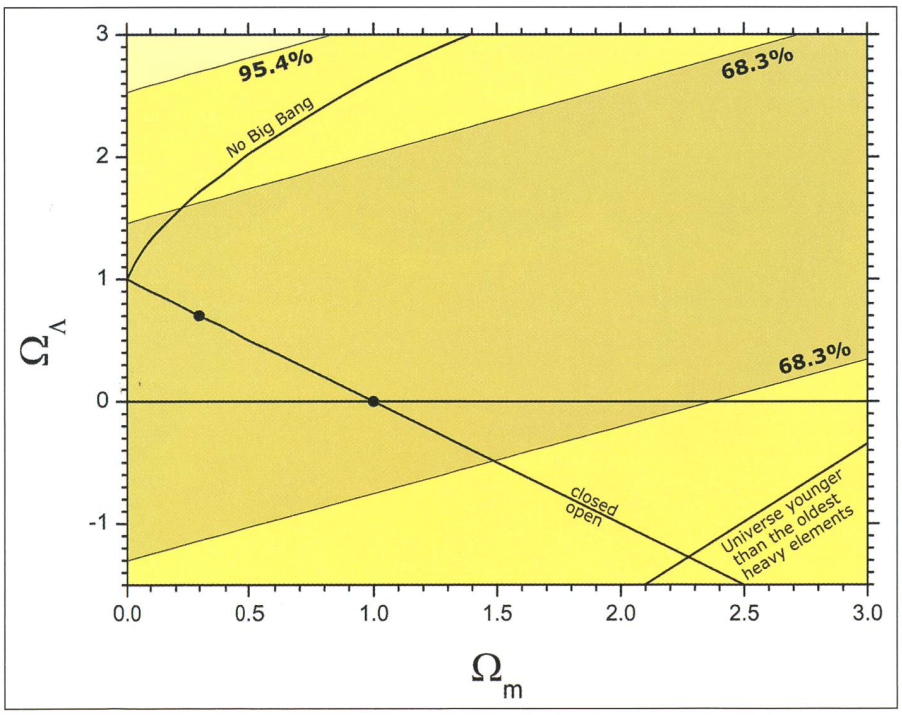


Abb. 8: Ausschliessungs-Diagramm (Confidence Level Plot) basierend auf 26 beobachteten SNe Ia: Natürlich können die beobachteten Daten genau der gleichen Prozedur wie die hypothetischen SNe Ia unterworfen werden. Man erhält somit eine Wahrscheinlichkeitsaussage über einen möglichen Ausschluss von (H2) gegen (H1), diese ist aber betreffend dieser zwei Modelle zu schwach, als dass man daraus ein Ergebnis ableiten könnte.

vor so langer Zeit noch sehr viel weniger schwere Elemente (das heisst schwerer als Helium) in unserer Milchstrasse vorhanden waren, ist es denkbar, dass die entsprechenden Progenitoren ärmer an schweren Elementen waren. Aufgrund dieser unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen würden sich ferne SNe Ia nicht gleich verhalten wie nahe, wir würden also «Äpfel» mit «Birnen» vergleichen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bereits aufgrund von 200 nahen SNe Ia ($z \leq 0.16$) mit grosser Sicherheit das flache und nur aus Materie bestehende Universum sowie auch weitere Weltmodelle ausgeschlossen werden können, vorausgesetzt, dass unser Universum tatsächlich einem Λ-dominierten Universum entspricht. Falls die wirklichen Werte von (H1) abweichen sollten, so ändert sich an der Vorgehensweise nichts. Man modifiziert ganz einfach die Nullhypothese und berechnet mit dem χ^2-Test die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten.

Ob die verwendeten Werte $\Omega_\Lambda = 0.7$ und $\Omega_m = 0.3$ für das hier betrachtete Λ-dominierte Universum tatsächlich die richtigen waren oder vielleicht nach oben oder unten korrigiert werden müssen, das wird die Zukunft weisen. Im Jahr 2012 wird der Satellit *GAIA* der *Europäischen Weltraumagentur ESA* in seine Umlaufbahn gebracht, von wo aus er während vier Jahren unter anderem über 1000 SNe Ia entdecken wird. Spätestens dann werden wir in der Lage sein, die Dichteparameter sehr genau mittels naher SNe Ia zu bestimmen.

Abschliessend wollen wir festhalten, dass aufgrund der sehr guten Eigenschaften der SNe Ia als Standardkerzen die berechtigte Hoffnung besteht, den Nachweis der kosmologischen Konstante Λ in den nächsten zehn bis 15 Jahren deutlich zu verbessern. Insbesondere kann die Gefahr, dass chemische Unterschiede zwischen nahen und sehr weit entfernten SNe Ia einen positiven Wert von Λ nur vortäuschen, praktisch ausgeschlossen werden. Ein Universum, welches durch die kosmologische Konstante Λ dominiert ist, wird sich immer schneller ausdehnen. Falls sich Λ nicht mit der Zeit ändert, wovon wir momentan ausgehen, so steuert das Universum unausweichlich auf den Kältetod zu und es käme somit nicht zu einem *Big Crunch*, wie dies von zyklischen Modellen vorausgesagt wird.

PETER ERNI
Astronomisches Institut
Universität Basel
Venusstrasse 7, CH-4102 Binningen

Entstehung einer Sonnen- oder Mondfinsternis nach indonesischer Mythologie:

HANS ULRICH FREI

Kalau Rau, ein Riese, wollte unsterblich werden. Um das zu erreichen, musste er vom Nektar der Unsterblichkeit trinken. Er schlich sich in den Götterhimmel, wurde aber vom Sonnengott und vom Mondgott verraten. Als er vom Unsterblichmachenden Nektar trinken wollte, schlug ihm Wischnu, ein Gott, mit dem Schwert den Kopf ab. Der Kopf fiel aber unglücklicherweise in den Topf mit dem Nektar und wurde dadurch unsterblich. Den Verrat rächend jagt er jetzt ständig dem Sonnengott und dem Mondgott nach. Hie und da erwischt er den einen oder den andern und frisst ihn auf. Da er aber nur noch aus dem Kopf besteht, kommt das Gefressene, die Sonne oder der Mond, nach kurzer Zeit beim Hals wieder hinaus.

HANS ULRICH FREI
Riedbrunnenstrasse 24
5012 Schönenwerd