

Universität Regensburg
Seminar: Astroteilchenphysik (WS08/09)

Symmetriebrechung Landscape

Ein Vortrag von: Alexei Iankilevitch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Problemstellung
2. Vier Grundkräfte und die Suche nach der Weltformel
 - 2.1. Zeitverlauf nach dem Urknall
 - 2.2. Symmetriebrechung
 - 2.3. Vereinheitlichte Theorien
 - 2.4. Stringtheorie
3. Warum ist die Welt so, wie sie ist?
 - 3.1. Zufälle
 - 3.2. Kosmologische Konstante.
4. Anthropisches Prinzip
5. Landscape
 - 5.1. Konzept
 - 5.2. Multiverse
 - 5.3. Kritik

1. Einleitung, Problemstellung

Im Rahmen dieses Seminars haben wir viele physikalische und kosmologische Prozesse und Gesetze kennengelernt – vom Big-Bang über die Expansion des Universums, Bildung von Materie und ersten kosmischen Objekten bis hin zur Erzeugung von chemischen Elementen in den Sternen. All diese Gesetze wurden entweder aus experimentellen Messungen bestimmt, oder mithilfe von theoretischen Überlegungen über die Beschaffenheit unserer Welt hergeleitet. Neue Messmethoden und dadurch möglich gewordene Entdeckungen sowie mutige, revolutionäre Ideen und Theorien des 20. Jahrhunderts haben auch in der Kosmologie zu einem Durchbruch geführt. Mittlerweile kann man physikalische Prozesse bis zum Zeitpunkt von circa 15 Sekunden nach dem Urknall relativ gut zurückverfolgen. Heutzutage versucht man beispielsweise zu erklären, wie die Materie und die vier grundlegenden Wechselwirkungen (Gravitation, Elektromagnetismus, starke und schwache Wechselwirkung) aus dem hochsymmetrischen Zustand kurz nach dem Urknall entstanden sind.

Man kann sich natürlich fragen: Sind die Naturgesetze im gesamten Universum überhaupt gleich? Sie könnten sich je nach Ort im Raum oder gar mit der Zeit ändern. Mittlerweile gibt es starke Hinweise, die dafür sprechen, dass die Gesetze im beobachteten Universum dieselben sind (z.B. Spektralanalyse des Lichts von entfernten Sternen). Aber was ist mit den weiter entfernten Teilen des Universums – könnten dort andere Gesetze, Konstanten und Teilchen existieren? Außerdem hat man sich immer die Frage gestellt: Warum sind die Gesetze gerade so, wie sie sind? Warum haben die in diesen Gesetzen vorkommende Konstanten gerade den ganz bestimmten Wert? Immer wieder konnte man diese Fragen mit neuen Erkenntnissen aus der Physik beantworten, so hat man zum Beispiel immer feinere Materiebausteine entdeckt, ihre Eigenschaften haben das physikalische Verhalten von größeren Objekten plausibel erklärt (historisch: Moleküle, Atome, Nukleonen, Quarks, ...).

Die Beschreibung eines Systems durch seine Einzelteile, genannt Reduktionismus, funktioniert jedoch nicht immer – eine Reihe von Gesetzen konnte anscheinend nicht mehr in noch „kleinere“ Probleme aufgeteilt werden. Viele Konstanten wurden mit sehr hoher Genauigkeit bestimmt, jedoch hat man für ihre Größe keine andere Erklärung, außer dass es „so funktioniert“. Man hat gehofft (und hofft immer noch), dass früher oder später ein simples und mathematisch elegant formuliertes Prinzip entdeckt wird, das diese Gesetze und die Werte der Naturkonstanten erklärt – dass es also einen eindeutigen physikalischen Grund gibt, warum unsere Welt so ist, wie sie ist. Bisher ist ein solches Prinzip noch utopisch. Die große Hoffnung von vielen Physikern, die Stringtheorie, liefert auch nicht die gewünschten eindeutigen Ergebnisse. Für einige Phänomene gibt es bislang keine Erklärung außer „wäre es anders, so gäbe es kein Leben“. Für Einige scheint es so zu sein, als wären die Gesetze der Physik wenigstens zum Teil mit Absicht so gewählt, um unsere Existenz zu erlauben. Diese Idee, genannt das Anthropische Prinzip ist jedoch sehr umstritten.

In meinem Vortrag möchte ich zum einen etwas über die Symmetriebrechungen und Entstehung von Grundkräften erzählen, zum anderen auf die „Problematik der Unerklärbarkeit“ etwas genauer eingehen und einen neuen, interessanten Ansatz zum Weltverständnis vorstellen, der von einigen Physikern heutzutage als eine vielversprechende Lösung zu dieser Problematik angesehen wird.

2. Vier Grundkräfte und die Suche nach der Weltformel

2.1 Zeitverlauf nach dem Urknall

Schauen wir uns nochmal die Entwicklung des Universums unmittelbar nach dem Urknall an, wie sie durch das Urknallmodell beschrieben wird. Ihr Zeitverlauf wird üblicherweise in mehrere „Epochen“ unterteilt, nach grundlegenden (hypothetischen!) Änderungen in den physikalischen Eigenschaften des Universums.

Die *Planck-Epoche* ist die erste Zeitperiode in der Geschichte des Universums, zwischen dem Urknall (0s) und der Planckzeit (10^{-43} s). Eine Extrapolation der Expansion des Universums zurück in der Zeit mit Hilfe der allgemeinen Relativitätstheorie ergibt eine Singularität – die Krümmung der Raumzeit wird unendlich, Dichte und Temperatur nehmen extreme Werte an. Die Planck-Epoche ist für unsere Wissenschaft unzugänglich, die Planckzeit ist dabei die Grenze. Man glaubt, dass während dieser kurzen Zeit die Gravitation genauso stark war wie die anderen fundamentalen Kräfte – es ist also möglich, dass zu dieser Zeit alle Kräfte vereint waren. Man sucht schon lange nach einer Theorie, die die Quantentheorie und die allgemeine Relativitätstheorie vereinigen soll und eine solche Urkraft beschreiben könnte. Zum Ende der Planck-Epoche hat sich die Gravitation von den restlichen Kräften bereits abgespalten.

Es folgt die *große vereinheitlichte Epoche*, die Temperatur ist auf 10^{27} K abgesunken. Während dieser Periode sind die restlichen drei Fundamentalkräfte – Elektromagnetismus, starke und schwache Wechselwirkungen – in einer einzigen Kraft vereinigt, genannt elektronukleare oder elektrostärke Kraft. Diese Epoche endet circa 10^{-36} Sekunden nach dem Urknall, dabei spaltet sich die starke Wechselwirkung ab. Gleichzeitig liegt die Temperatur bereits unterhalb eines bestimmten kritischen Wertes und es können keine weiteren X- und Y-Bosonen erzeugt werden, wobei die übrig gebliebenen Bosonen zerfallen. Man glaubt also, dass während dieser Zeit die GUT-Baryogenese stattgefunden hat. Außerdem soll ein Phasenübergang die folgende Inflation verursacht haben.

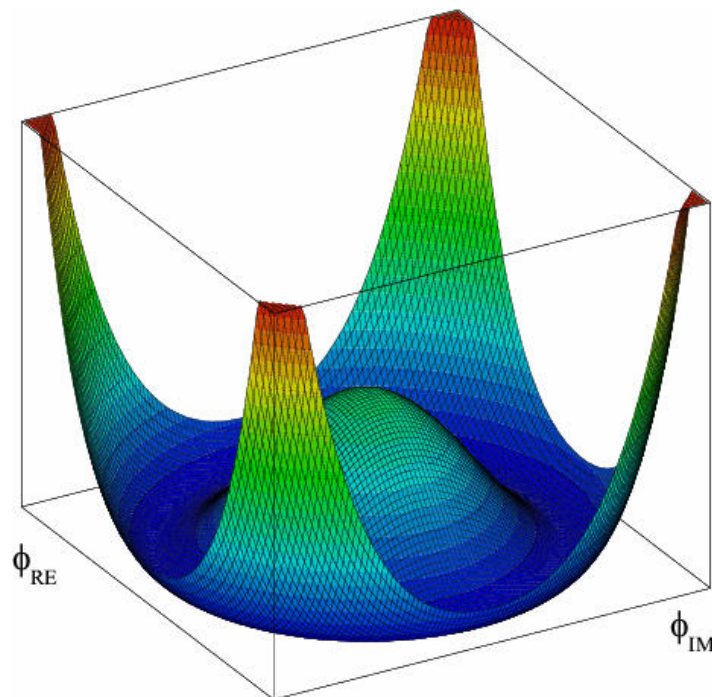
Die *inflationäre Epoche*, während der sich das Universum auf ca. das 10^{26} -fache vergrößert hat, endete zwischen 10^{-33} und 10^{-32} Sekunden nach dem Urknall. Sie wird oft als Teil der *elektroschwachen Epoche* angesehen. Zum Ende dieser, circa 10^{-12} Sekunden nach dem Urknall, spaltet sich auch die elektroschwache Wechselwirkung in Elektromagnetismus und schwache Wechselwirkung auf. Die Physik der elektroschwachen Epoche nach der Inflation ist weniger spekulativ und besser verstanden, als in den Perioden davor. Anhand der elektroschwachen Vereinigung, die mit circa 100 GeV (10^{15} K) im für uns experimentell zugänglichen Bereich (10^3 GeV) liegt und ein Teil des Standardmodells ist, kann man erklären, wie es zur Aufspaltung von Kräften kommt. Man bezeichnet diesen Prozess als *spontane Symmetriebrechung*, dabei geht das Vakuum in einen neuen Grundzustand über, der weniger Symmetrien aufweist.

2.2 Symmetriebrechung

Im Standardmodell ist die Symmetriebrechung ein Teil des Higgs-Mechanismus, der eine Erklärung für die beobachteten Massen der Wechselwirkungsteilchen bietet: Diese sogenannten Eichbosonen sind wegen Eichinvarianz zunächst masselos. In der elektroschwachen Theorie treten bei ausreichend hoher Temperatur (wenn elektroschwache Symmetrie noch ungebrochen ist) vier masselose Bosonen auf: ein B^0 -Boson und drei W-Bosonen W^0 , W^1 und W^2 . Man führt das sogenannte Higgs-Feld ein, welches mit allen

anderen Feldern und mit sich selbst wechselwirkt. Beim Abkühlen auf eine kritische Temperatur (bzw. Energie) verlässt das Higgs-Feld spontan das Energiemaximum und gleitet in eine zufällige Richtung im Higgs-Potential $V = -\mu\phi^+\phi + \lambda(\phi^+\phi)^2$. Nachdem die Symmetrie gebrochen ist, erhalten die Eichbosonen dadurch ihre Masse – man erhält vier neue, bekannte Bosonen: das masselose nicht geladene Photon als Austauscheteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung und zwei schwere geladene W^\pm -Bosonen und ein schweres ungeladenes Z^0 -Boson als Vermittler der schwachen Wechselwirkung.

Man kann das Higgs-Potential im Fall von einer reellen und einer komplexen Komponente relativ leicht veranschaulichen, es ist ein rotationssymmetrisches w-förmiges elliptisches Paraboloid vierter Ordnung – oft spricht man auch von Mexikanerhut-Potentialen. Seine wichtigste Eigenschaft: Es hat einen Kreis solcher Minima, die nicht bei Null liegen. Diese Minima bilden einen Zustand niedrigster Energie für das Feld, er wird als „Vakuum-Zustand“ bezeichnet. Es gibt für das Higgs-Feld also viele äquivalente Grundzustände mit gleicher Energie, man spricht von einem entarteten Grundzustand. Fällt das System in einen speziellen Grundzustand, so ist die Symmetrie offensichtlich gebrochen.

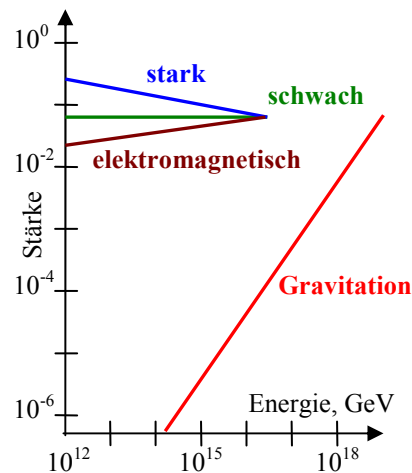


2.3 Vereinheitlichte Theorien

Die Vereinheitlichung der Quantenelektrodynamik und der schwachen Wechselwirkung in der elektroschwachen Theorie wurde 1967 von Sheldon Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg theoretisch beschrieben. Ein experimenteller Nachweis gelang erst indirekt 1973 durch die Entdeckung von neutralen Strömen (NC) von Z^0 -Bosonen und 1983 direkt durch den Nachweis der W^\pm - und Z^0 -Eichbosonen am Super Proton Synchrotron. Das Higgs-Teilchen bleibt bis heute jedoch unentdeckt, man erwartet, dass der Large Hadron Collider (LHC) den Higgs-Mechanismus entweder bestätigen oder widerlegen wird.

Möchte man weiterhin die elektroschwache Wechselwirkung und die Quantenchromodynamik vereinigen, die einzeln durch das Standardmodell beschrieben

werden, so liegt die dazu (hypothetisch) benötigte Energie mit über 10^{14} - 10^{15} GeV (eine Billiarde GeV) im für uns definitiv unzugänglichen Bereich. Es gibt jedoch einige Theorien, die man *große vereinheitlichte Theorien* oder *grand unified theories* (GUT) nennt, an denen heutzutage gearbeitet wird und welche drei von vier Grundkräften vereinigen sollen. Im Prinzip sucht man eine „symmetrischere“ Theorie, die die Symmetriegruppen $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ des Standardmodells enthält und die sich ähnlich der elektroschwachen Wechselwirkung nach einer Symmetriebrechung aufspalten ließe (e.g. $SO(10)$ ist ein Kandidat). Einen Hinweis auf mögliche Vereinigung liefert die Extrapolation der Kopplungskonstanten zu hohen Energien (insbesondere in der supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells).



Grundsätzlich vorhersagen die meisten GUT-Modelle die Existenz von topologischen Defekten, die während der Phasenübergänge entstanden sind. Diese Übergänge finden meist zwischen Phasen mit unterschiedlicher Symmetrie statt, typischerweise findet man auf der heißeren Seite des Übergangs die symmetrischere Phase und auf der kühleren die mit weniger Symmetrien (da die thermalen Fluktuationen bei höherer Temperatur dem System Zugang zu mehr Energiezuständen erlauben). In unserem kosmologischen Fall hat die Abkühlung des Universums nach dem Urknall eine Reihe von Phasenübergängen ausgelöst, bei denen Symmetrien verloren gegangen sind, daher auch die Bezeichnung „Symmetriebrechung“. Die Bereiche der gebrochenen Symmetrie breiteten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, topologische Defekte sind an den Berührungstellen verschiedener Bereiche zustande gekommen, die Materie an diesen Stellen ist in der ursprünglichen symmetrischen Phase. Die bekanntesten und einfachsten Arten von topologischen Defekten sind:

- *Monopole*, punktförmige Defekte, die bei Brechung von sphärischer Symmetrie entstehen; man sagt voraus, dass sie magnetische Ladung tragen;
- *Kosmische Strings*, eindimensionale Defekte, die nach Brechung axialer oder zylindrischer Symmetrie entstehen;
- *Domain Walls*, zweidimensionale Membranen, die bei Brechung diskreter Symmetrie entstehen und Wälle einer Art Schaum darstellen, der das Universum in einzelne Zellen unterteilt;
- *Textures*, entstehen bei Brechung von komplexeren Symmetriegruppen;

Bislang wurde keiner der vorhergesagten topologischen Defekte tatsächlich beobachtet, außerdem sind einige der Defekttypen mit derzeitigen Beobachtungen nicht vereinbar, z.B. Domain Walls und Monopole: Man kann praktisch ausschließen, dass sie innerhalb des beobachteten Universums existieren (auf Domain Walls kommen wir später nochmal zurück). Andererseits werden die kosmischen Strings zum Kandidaten für eine Art „Gravitationskeim“

vorgeschlagen, auf dem alle Strukturen des Kosmos kondensiert sind. Im Jahr 2007 wurde ein kalter Fleck in der kosmischen Hintergrundstrahlung als ein möglicher Hinweis auf eine Textur interpretiert. Auch wurden die von den GUTs beschriebenen Proton-Zerfälle, die ein starkes Argument für die GUTs wären, noch nicht bestätigt. Bis heute gibt es noch keinen festen Beweis dafür, dass man die Natur durch eine GUT beschreiben kann. Zudem wurde das Higgs-Teilchen experimentell noch nicht nachgewiesen, die elektroschwache Vereinigung ist also formal noch gar nicht erfolgt.

Zur vollständigen Beschreibung aller Vorgänge in der Natur müsste man auch die vierte Kraft – die Gravitation – mit der elektrostarken Theorie in einer „Weltformel“, auch „Theorie von Allem“ (TOE, Theory of Everything) oder „Quantengravitation“ genannt, vereinigen. Man erwartet, dass alle vier Wechselwirkungen ab etwa 10^{19} GeV vergleichbar stark sind und sich zu einer einzigen universellen Wechselwirkung reduzieren lassen. Das größte Problem bei der Aufstellung einer TOE besteht darin, dass sich die anerkannten und gut verstandenen Quantentheorie und Allgemeine Relativitätstheorie sehr schwer kombinieren lassen – die letztere lässt sich bei Anwendung quantenmechanischer Rechenmethoden nicht mehr renormieren und verliert jegliche Vorhersagekraft. Man glaubt, dass dieses grundlegende Problem mit der prinzipiell unterschiedlichen Beschreibung von Raum und Zeit auf mikroskopischer Skala durch die beiden Theorien zusammenhängt: dynamischer Kontinuum der ART versus Quantelung der Raumzeit. Mittlerweile gibt es vier bekannte Kandidaten für die Quantengravitation.

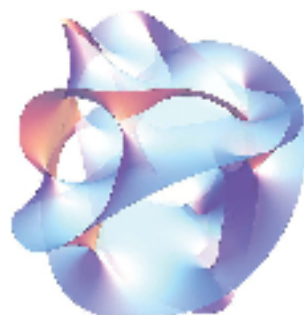
Die *kanonische Quantengravitation* basiert auf einer direkten Quantisierung der Raumzeitgeometrie, diese wird im Gegensatz zur ART nicht als vorgegeben angenommen, sondern unterliegt auch den Quantenfluktuationen. Sie führt auf die hochabstrakte Wheeler-DeWitt-Gleichung, die das gesamte Universum durch eine einzige Wellenfunktion beschreibt. Danach müsste sich jedoch auch die klassische, makroskopische Welt quantenmechanisch verhalten, was den Beobachtungen widerspricht. Es gibt Erklärungsversuche durch die „Vielwelten-Interpretationen“, wonach sich das Universum nach jeder Vermessung eines quantenmechanischen Objekts in verschiedene Kopien aufspaltet und man in jeder Kopie ein eigenes klassisches Ergebnis bekommt. Die ursprüngliche Version der Theorie, die Quantengeometrodynamik, wurde durch die *Schleifenquantengravitation* (loop quantum gravity) abgelöst, die eine diskrete Struktur der Raumzeit auf Plank-Skala, eine Art „Raumzeit-Schaum“ (Spin-Schaum) vorhersagt. Das primäre Ziel der Theorie besteht jedoch nicht in der Vereinigung der Grundkräfte.

Die anderen beiden Theorien verwenden das Prinzip der *Supersymmetrie* (SUSY), das jedem Fermion einen symmetrischen bosonischen Partner zuordnet und umgekehrt. So existieren laut SUSY Squarks, Selektrens, Sneutrinos sowie Photinos, Gravitinos und Gluinos als supersymmetrische Partner bekannter Teilchen. Diese Annahme löst das Problem der Renormierbarkeit, da sich die Beiträge der SUSY-Partner automatisch aufheben, und vereinfacht viele Rechnungen, nur hat man die zusätzlichen Teilchen noch nicht beobachten können. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass bosonische Elektronen (Selektrens) katastrophal für die Chemie wären. Existiert die SUSY tatsächlich in der realen Welt, so muss sie bei sehr hohen Energien liegen und heute so gebrochen sein, dass wir nur noch die Hälfte der Teilchenarten sehen. Einen Versuch, die allgemeine Relativitätstheorie mit der Supersymmetrie zu vereinigen stellt die 1976 konstruierte *Supergravitation* (SUGRA) dar. Bis heute ist ihre Endlichkeit noch ungeklärt, jedoch sagt sie u.a. die richtige Zahl von Fermionenarten voraus. Die vierte und die wohl bekannteste Theorie ist die *Superstringtheorie*. Sie gehört zusammen mit der Schleifenquantengravitation zu den am weitesten entwickelten Modellen und somit zu den heutigen Favoriten für eine TOE.

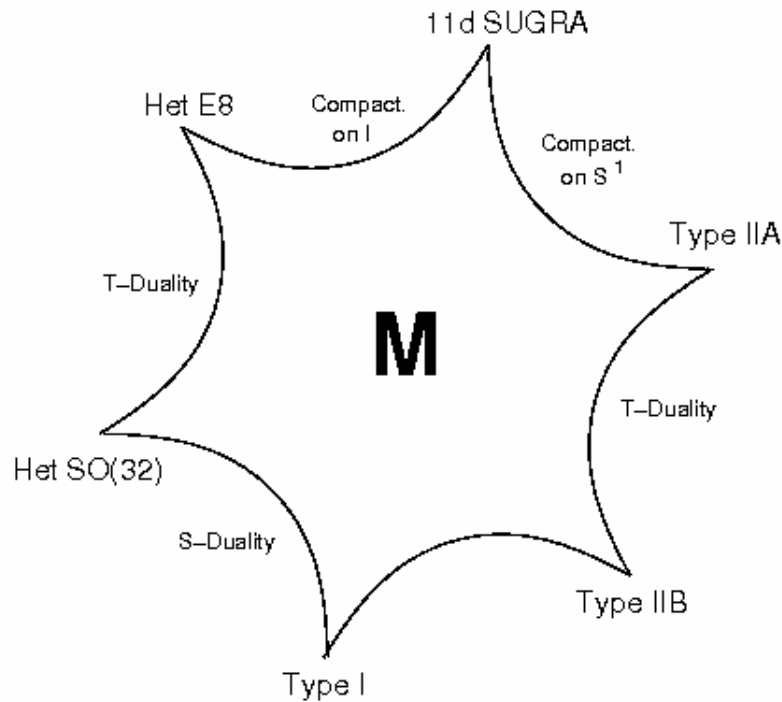
2.4 Stringtheorie

Der Ursprung der Stringtheorie findet sich 1968 in einer Formel von Gabriele Veneziano, die er im Rahmen der Streumatrixtheorie entwickelt hat („Veneziano-Amplitude“). Die Idee bestand darin, eine Art Black-Box-Matrix zu finden, die aus einem Input von Elementarteilchen ein Ergebnis ihres Zusammenstoßes als Output produzieren würde, ohne dass man den genauen Ablauf der Wechselwirkungsprozesse kennt (im Prinzip eine Wahrscheinlichkeitstabelle). Im Jahr 1970 haben Yoichiro Nambu, Holger Bech Nilsen und Leonard Susskind unabhängig voneinander eine Interpretation in Form von eindimensionalen „Saiten“ entdeckt – den Strings – wobei sowohl offene als auch geschlossene Saiten zulässig sind. Einerseits konnte bereits die erste Version der Stringtheorie nicht nur die bekannten Eichbosonen, sondern auch Gravitons voraussagen, andererseits existierten in ihr beispielsweise keine Fermionen und es waren ganze 25 Raumdimensionen notwendig. Die Einführung der Supersymmetrie hat viele der Probleme gelöst, die neue Superstringtheorie besaß nur noch 9 Raumdimensionen und konnte auch die Fermionen, also die normale Materie, beschreiben. Im Laufe der folgenden Jahre wurde die Superstringtheorie mehrmals modifiziert, um weitere Widersprüche zu beheben; in den 80er Jahren haben sich fünf wichtige Kandidaten auskristallisiert: eine (ursprüngliche) Theorie mit offenen und geschlossenen Strings (Typ I) und vier Theorien mit nur geschlossenen Strings: die Typen IIA, IIB sowie zwei sogenannte heterotische Stringtheorien (E- und O-heterotische). Die E-heterotische, die auf der $E_8 \times E_8$ -Symmetriegruppe beruht, beschreibt dabei unsere Welt am genauesten.

Wie lassen sich denn die 9 theoretischen Raumdimensionen der Superstringtheorie mit unserer scheinbar dreidimensionalen Welt vereinigen? Es gibt mindestens zwei prinzipiell unterschiedliche Möglichkeiten: Entweder sind die restlichen 6 Dimensionen für uns unzugänglich, weil unsere Welt komplett in drei liegt, oder sie sind so klein, dass wir sie nicht sehen. Die einfachste Variante einer solchen Kompaktifizierung kann man sich durch einen unendlich langen Zylinder mit Radius in der Größenordnung der Plank-Länge veranschaulichen: Die Oberfläche des Zylinders bildet einen zweidimensionalen Raum, wobei aus großer Entfernung nur eine Linie zu sehen ist, also ein eindimensionaler Raum. Bei sechs kompakten Dimensionen wird es sehr kompliziert, außerdem unterliegt die Geometrie dieses Raumgebildes einer Reihe von Einschränkungen, sonst würden die restlichen 3+1 Dimensionen unserer Welt widersprechen. Eine der günstigsten Formen der Geometrie stellen die sogenannten Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten dar, die zu dieser Zeit bereits relativ gut in der Mathematik untersucht waren. Zunächst hat man gehofft, weitere, stärkere einschränkende Prinzipien zu finden, die auf exakt eine Lösung führen würden, jedoch entdeckte man in den 80er Jahren, dass es nicht der Fall ist. Somit ist in der Superstringtheorie eine sehr große Anzahl unterschiedlicher Vakua möglich, heute schätzt man sie auf 10^{500} . Wichtig ist, dass man durch unterschiedliche Positionierung, Windung und Schwingungszustände der Strings in den kompakten Dimensionen grundlegende Teilcheneigenschaften, u.a. die Ladung, erklären kann.



In den 90er Jahren hat man erkannt, dass die verschiedenen Typen der Stringtheorien nur Approximationen einer viel komplizierteren Theorie sind: der M-Theorie („Zweite Superstringrevolution“). Überdies wurde auch die elfdimensionale Supergravitation, die gar keine Strings enthält, als ein Grenzfall der M-Theorie identifiziert. Insbesondere im Zusammenhang mit der Möglichkeit unendlicher (nicht-kompakter) zusätzlicher Dimensionen spricht man von „n-Branen“, n-dimensionalen Unterräumen des neundimensionalen Raumes, an die sich die offenen Strings anheften können. So könnte unsere dreidimensionale Welt eine 3-Brane sein, an die die Materie (aus offenen Strings) gebunden ist – aber beispielweise bewegen sich die Gravitonen (als geschlossene Strings) in allen Raumdimensionen, was die Schwäche der Gravitation erklären würde.



3. Warum ist die Welt so, wie sie ist?

Nun, diese Frage sorgt für große Debatten und eine Aufspaltung in den Reihen von Physikern und Kosmologen. Es geht dabei nicht nur darum, wie das Universum aus dem Urknall entstanden ist, sondern vielmehr um die Gesetze der Physik (oder allgemeiner, Gesetze der Natur): Warum haben sie die uns bekannte Form? Und insbesondere – wie kommt es dazu, dass diese Gesetze so unglaublich fein justiert sind, dass intelligentes Leben möglich ist?

Die eine Gruppe glaubt, dass die Welt „absichtlich“ und wohlwollend so kreiert wurde, etwa von einer intelligenten Kraft („Demiurg“). Dabei geht es nicht um Religion und biblische Interpretationen, es scheint einfach zu unwahrscheinlich, dass eine für die Menschen so gut geeignete Welt rein zufällig entstanden sein könnte. Die andere Gruppe betrachtet das Universum und dessen Eigenschaften als Folge bestimmter (eindeutiger) Gesetze der Physik, Mathematik und Statistik. Jedoch wurden solche grundlegenden Gesetze bislang noch nicht entdeckt.

Es geht also hauptsächlich um die Frage, ob alle Gesetze der Natur durch mathematische Verhältnisse bestimmt werden und zufällig das Leben ermöglichen, oder, umgekehrt, der Voraussetzung unterliegen, dass intelligentes Leben möglich sein muss.

Ich möchte diese Problematik genauer erklären, indem ich die relevanten Erscheinungen aus anderen Vorträgen zusammenfasse.

3.1 Zufälle

Fangen wir bei den einfachsten Sachen an: Die Gesetze der Physik beinhalten eine Reihe von Elementarteilchen (Elektronen, Quarks, Photonen, ...) mit speziellen Eigenschaften wie Masse und Ladung. Alles ist aus diesen Teilchen aufgebaut. Es ist jedoch unklar, wie diese Liste zustande gekommen ist und wodurch die Werte der Eigenschaften bestimmt sind. Man könnte sich genauso gut andere Listen und andere Werte vorstellen. Entfernt man jedoch eine dieser Teilchenarten aus der Liste oder verändert ihre Eigenschaften auch nur minimal, so bricht die komplette Chemie zusammen: Atome können nicht mehr existieren. Einen katastrophalen Effekt hätte auch die Existenz bosonischer Elektronen.

Auch auf kosmologischer Skala kann man solche „Zufälle“ entdecken. Die Existenz von Galaxien, Sternen und Planeten hängt hauptsächlich von der Gravitationskraft ab. Man könnte sich durchaus eine andere Stärke der Gravitation vorstellen. Wäre sie aber beispielsweise etwas stärker, so würde sich das Universum zu schnell entwickeln, so dass die Evolution von intelligentem Leben unmöglich wäre. Die Gravitation ist sogar unerklärbar schwach im Vergleich zu den anderen Wechselwirkungen.

Damit sich Sterne und andere kosmische Objekte bilden können, muss das frühe Universum etwas „klumpig“ gewesen sein. Wäre diese „Klumpigkeit“ (oder Inhomogenität) etwas kleiner oder etwas größer, so gäbe es u.a. keine Planeten, auf denen sich das Leben entwickeln könnte. Man kann sich durchaus entweder eine perfekt homogene Verteilung der Materie im Universum vorstellen, oder eine Welt, die nur aus Schwarzen Löchern besteht.

Schließlich spielt auch die chemische Zusammensetzung des Universums eine entscheidende Rolle für das intelligente Leben. Nach dem Urknall gab es nur Wasserstoff und Helium – Kohlenstoff, Sauerstoff und weitere für uns wichtige Elemente wurden erst später in

nuklearen Prozessen im Inneren von Sternen gebildet. Die entsprechende Reaktionskette ist sehr empfindlich gegenüber kleinsten Änderungen in Gesetzen der Elektrizität und Atomphysik.

Außerdem müssen all diese chemischen Stoffe aus dem Inneren der Sterne entkommen, damit Planeten und das Leben existieren können. Die dafür zuständigen Supernova-Explosionen sind auch sehr komplexe Phänomene. Auch hier spielen u.a. die Gravitation und die Inhomogenität eine entscheidende Rolle: Liegt die Masse des Sterns außerhalb eines relativ engen Bereichs, so sind die gebildeten Elemente anschließend entweder im Inneren von einem weißen Zwerg oder von einem Schwarzen Loch eingeschlossen – und damit praktisch verloren. Auch dass die Elemente so effektiv durch eine Schockwelle aus Neutrinos vom kollabierenden Stern weggetragen werden, ist keineswegs trivial.

Wie wir sehen, gibt es in der Geschichte unseres Universums und in der Entwicklung von intelligentem Leben zu viele „Zufälle“. Man kann diese Aufzählung beliebig fortsetzen – eine Änderung von fast jeder grundlegenden physikalischen Konstante könnte unsere Existenz gefährden. Die meisten dieser „Fine-Tunings“ sind zwar nicht so präzise, dass man sie nicht als echte Zufälle betrachten könnte, jedoch existiert eine weitere wichtige Feinabstimmung, die zu genau ist, zu unwahrscheinlich – die kosmologische Konstante.

3.2 Kosmologische Konstante

Die kosmologische Konstante wurde von Einstein 1917 in seiner Schrift „Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity“ eingeführt. Damals wusste man noch nicht, dass das Universum expandiert, man dachte, dass alle Galaxien stationär im Raum sind. In Einsteins Theorie ist der Raum geschlossen und beschränkt – eine 3-Sphäre – jedoch flexibel und dehnbar. Die Gravitationskraft wirkt anziehend zwischen allen Objekten im Universum, ist proportional zum Produkt der Massen von jeweils zwei Objekten und zum Inversen des Abstandquadrats. Nun, wenn keine andere Kraft der Gravitation entgegenwirkt, so sollten sich alle Galaxien beschleunigen, ineinander stürzen und das Universum würde kollabieren. Jedoch hat man eine solche Bewegung von Galaxien nicht beobachtet. Einstein hat deshalb seinen Gleichungen einen weiteren Term hinzugefügt – eine abstoßende Kraft, die mit dem Abstand stärker wird. Ihre Stärke ist durch die kosmologische Konstante λ gegeben, dabei ist die Kraft für positives λ abstoßend. Durch geschickte Wahl der Konstante könnte man also ein Gleichgewicht erreichen, jedoch wäre es offensichtlich instabil. Kurze Zeit später hat Hubble die Expansion des Universums entdeckt – ein Equilibrium und somit auch der kosmologische Term war unnötig geworden: man könnte einfach $\lambda=0$ setzen. Einige wichtige spätere Entdeckungen zeigen jedoch, dass die kosmologische Konstante doch nicht Null sein könnte – unter anderem die Vakuumenergie. Hier ein kurzer Rückblick auf ihre Geschichte.

Das von Max Planck im Jahr 1911 gefundene Strahlungsgesetz beinhaltet eine von der Temperatur unabhängige Größe $\frac{1}{2}h\nu$, es legte eine Nullpunktsenergie des elektromagnetischen Feldes im Vakuum nahe. Zu ähnlichen Ergebnissen sind 1913 auch Einstein und Otto Stern gekommen. Im Jahr 1916 schlug Walter Nernst vor, dass das gesamte Universum von Nullpunktsenergie erfüllt sei, wobei die Nullpunktsfluktuationen um den Wert $\frac{1}{2}h\nu$ liegen. Schließlich formulierte Werner Heisenberg 1927 seine Unschärferelation und schuf damit eine quantenmechanische Grundlage für die Vakuumenergie: Selbst im Grundzustand (beim absoluten Temperaturnullpunkt) ermöglicht die Unschärferelation die

Bildung von sogenannten „virtuellen Teilchen“ und Feldern (Teilchen-Antiteilchen-Paare, die nur kurz bestehen und kurz darauf wieder annihilieren, z.B. Elektron und Positron oder zwei Photonen). Georges Lemaître fand 1934 eine Übereinstimmung der Vakuumenergie mit der kosmologischen Konstante – heute wird die kosmologische Konstante als zeitlich konstante Energiedichte des Vakuums.

An sich stellt dieser Zusammenhang ein großes Problem dar: Die kosmologische Konstante muss sehr klein sein, da keine Störungen der Bahnen von kosmischen Objekten beobachtet werden. Wäre der Wert der kosmologischen Konstante (und somit der Vakuumenergie) groß, so wäre die Gravitationskraft des Vakuums aufgrund Einstein's Äquivalenz von Masse und Energie viel größer als die Gravitationskraft der gesamten Materie des Universums. Interessant und wichtig ist jedoch, dass eine positive Vakuumenergie zu einer abstoßenden Gravitationskraft führt – einer Art Anti-Gravitation – und kann somit von Einstein's kosmologischem Term nicht unterschieden werden.

Man versucht nun die Vakuumenergie zu berechnen bzw. abzuschätzen. Der naheliegende Ansatz: Im Meer der Nullpunktsfluktuationen im Vakuum werden alle möglichen Arten von (virtuellen) Elementarteilchen erzeugt – Elektronen, Positronen, Photonen, Quarks, Neutrinos, Gravitons etc. – jede Teilchenart liefert ihren Energiebeitrag. Leider ergibt eine Berechnung im Rahmen der Quantenfeldtheorie eine unendliche Summe der Teilchenenergien. Man versucht, dies zu vermeiden, indem man die sehr hochenergetischen Teilchen weglässt, die bei einer Kollision ein Schwarzes Loch bilden. Das ist natürlich ein sehr fraglicher Konsensus. Die Summe der Teilchenenergien ist dann nicht mehr unendlich, aber immer noch viel zu groß: allein aufgrund von Photonen sind es 10^{116} J/cm³, eine dadurch erzeugte abstoßende Kraft würde nicht nur Galaxien, sondern auch Neutronen und Protonen auseinander reißen. Obwohl Fermionen einen negativen Energiebeitrag beisteuern, wird der Wert der Vakuumenergie nicht mal annähernd Null. Susskind illustriert die Problematik folgendermaßen: Setzt man 1 Unit = 10^{116} J/cm³, so trägt jede Teilchenart circa ein Unit zur Gesamtenergie bei, entweder positiv oder negativ. Zählt man alle Energiebeiträge zusammen, so müssten sich in der Summe die ersten 119 Dezimalstellen aufheben, damit der Wert den astronomischen Daten nicht widerspricht! Es erscheint wirklich absurd und unmöglich, dass es ein Zufall sein kann. Für Physiker wäre es viel „komfortabler“, wenn die kosmologische Konstante exakt Null wäre – dann könnte man eine mathematischen Begründung dahinter vermuten.

Umgekehrt kann man sich fragen, ob eine etwas größere als 10^{-120} Units kosmologische Konstante die Existenz vom Leben verhindern könnte. Jedoch wäre die Abstoßung trotzdem zu schwach, weder auf atomarer, noch auf molekularer, noch auf Sonnensystemskala würde sich irgendwas merkbar ändern – eine kleine kosmologische Konstante scheint das Leben nicht beeinflussen zu können. Dennoch hat man eine Zeitperiode in der Geschichte des Universums gefunden, in der die Größe der Konstante eine entscheidende Rolle gespielt haben muss: zu der Zeit nach dem Urknall, wenn die Galaxien angefangen haben sich zu formen. Dabei waren Wasserstoff und Helium fast perfekt homogen verteilt – und so würde es auch für immer bleiben, gäbe es nicht doch kleine Dichte- und Druckinhomogenitäten (ca. 10^{-5} des Werts). Gerade diese haben unter dem Einfluss der Gravitationskraft zur Entstehung von Galaxien geführt. Da jedoch die Inhomogenitäten ursprünglich so klein gewesen sind, würde sogar eine minimale Repulsion den Prozess der Clusterbildung umkehren. Steven Weinberg hat ausgerechnet, dass ein nur zwei Größenordnungen größerer Wert der kosmologischen Konstante die Entstehung von Galaxien, Sternen und Planeten verhindern würde.

Es bleibt noch eine Möglichkeit: eine negative kosmologische Konstante. Dabei beschreibt der kosmologische Term eine anziehende Kraft, eine Art zweite Gravitation, die jedoch mit dem Abstand stärker wird. Auch in diesem Fall ist leicht zu erkennen, dass ein betragsmäßig zu großer (negativer) Wert der Konstante für das Leben katastrophal wäre – er würde die Hubble-Expansion umkehren (oder gar nicht zulassen), das Universum würde ziemlich schnell kollabieren und das eventuell entstandene Leben hätte nicht genug Zeit, um sich zu entwickeln. Die negative Grenze für die kosmologische Konstante gleicht betragsmäßig in etwa der positiven. Es wurde bislang jedoch auch kein Grund gefunden, warum die Konstante exakt Null sein sollte. Gegen diesen Fall sprechen auch einige Abschätzungen, wonach nur eine kleine kosmologische Konstante, die rund 70 Prozent der Energie im Universum darstellen sollte, zum einen genug zur Massendichte des Universums beitragen würde, s.d. der Raum flach sein könnte ($k \geq 0$), zum anderen den Widerspruch zwischen dem aus der Hubble-Expansion errechneten Alter des Universum und dem von ältesten Sternen begeben würde.

Man hat sehr lange Zeit nach einer Antwort gesucht – wieso sollten sich denn so viele Dezimalstellen aufheben, warum ist der Wert der kosmologischen Konstante so klein und doch nicht Null? Unter anderem hat man große Hoffnungen in die Stringtheorie gelegt, die einer der Kandidaten für die Vereinheitlichte Theorie oder „Theory of Everything“ ist. In supersymmetrischen Theorien, in denen alle Teilchen in Boson-Fermion-Paaren vorkommen, ist die Vakuumenergie und somit auch die kosmologische Konstante sehr wohl Null, aber diese Theorien beschreiben anscheinend nicht unsere Welt. Nach der langen, fast schon verzweifelten Suche nach einer Erklärung hat Steven Weinberg 1987 einen in der Physik unvorstellbaren Vorschlag gemacht: Eventuell hat der Wert der kosmologischen Konstante nichts mit speziellen mathematischen Eigenschaften der Stringtheorie oder irgendeiner anderen Theorie zu tun – vielleicht ist der Wert allein aus dem Grund so klein, weil unsere Existenz sonst unmöglich wäre? Diese Art der Logik und Argumentation wird das Anthropische Prinzip genannt (griech. *anthropos* – „Mensch“).

4. Anthropisches Prinzip

Der Ausdruck „anthropisches Prinzip“ wurde von Brandon Carter, einem theoretischen Astrophysiker, 1973 auf einem Symposium in Kraków zum 500. Geburtstag von Nikolaus Kopernikus eingeführt – als Reaktion auf das Kopernikanische Prinzip, welches besagt, dass der Mensch keine ausgezeichnete, spezielle Stellung im Universum einnimmt. Was besagt also das Anthropische Prinzip? Nun, es kann und wird unterschiedlich formuliert, in seiner sog. „starken“ Version, die für uns relevant ist, klingt es so:

„Das Universum muss derart sein, dass es die Entstehung von Beobachtern in ihm in manchen Phasen erlaubt.“ (Brandon Carter, 1974)

Im Prinzip ist diese Formulierung eine Tautologie – sie ist immer wahr – jedoch wird sie nur zur Beweisführung verwendet und nicht als eigene Aussage. Carter selbst betonte 1983, dass dieses Prinzip in seiner ursprünglichen Form nur dazu dienen sollte, Wissenschaftler vor möglichen Fehlern bei der Interpretation astronomischer und kosmologischer Daten zu warnen, falls biologische Randbedingungen des Beobachters nicht miteinbezogen würden.

Das Anthropische Prinzip wurde aber sehr schnell zur „Beantwortung“ der Frage herangezogen, warum unser Universum so ist, wie es ist. Das verschwommen formulierte Prinzip lässt sich auf unterschiedlichste Art und Weise interpretieren. Auf der Oberfläche liegt die theologische Interpretation: Die Welt wurde so wie sie ist erschaffen, es gibt keine wissenschaftliche Erklärung und kein physikalisches Prinzip hinter den Naturgesetzen. Oder eine „quantenmechanische“ Interpretation: Im Augenblick der ersten Beobachtung (vom ersten Beobachter) ist die Wellenfunktion des Universums, die eine Überlagerung aller möglichen Zustände war, kollabiert und hat den Zustand „unser Universum“ angenommen. Oder ganz trivial: Die Welt ist nun so, es gibt keine Erklärung, vergeudet die Zeit nicht mit sinnloser Suche nach einer Antwort, treibt lieber praktischere Physik.

Kritisiert wurde das anthropische Prinzip, weil es anscheinend alles erklärt, ohne irgendetwas zu erklären, es wird von vielen Physikern als „nicht wissenschaftlich“ verworfen. Außerdem wird es als Aufgeben der Suche nach tieferen physikalischen Zusammenhängen angesehen. Bemerkenswert ist, dass es genau einen weitgehend anerkannten Fall gibt, in dem die Anwendung vom anthropischen Prinzip zum praktischen Erfolg geführt hat: die Vorhersage eines Resonanzzustandes bei Kohlenstoff-12, der unbedingt existieren muss, damit Kohlenstoff in den Sternen gebildet werden kann (Drei-Alpha-Prozess).

Wechseln wir die Skala und fragen uns zum Beispiel, warum unsere Erde so gut für menschliches Leben geeignet ist: Temperatur, Druck, Schwerkraft liegen alle in einem ganz schmalen Bereich – kann ja kein Zufall sein. Die anthropische Antwort wäre: Die Erde wurde extra für die Menschen kreiert. Klingt bekannt, oder? Heute würde man eher umgekehrt sagen: Wir Menschen existieren auf diesem Planeten, weil er so gut für das Leben geeignet ist. Allein in unserer Galaxie gibt es circa 10^{11} Sterne, viele von ihnen haben Planeten, davon sind einige im günstigen Abstand vom Stern etc. Im gesamten Universum gibt es rein statistisch gesehen sicherlich genug Planeten, auf denen das Leben möglich sein sollte – vor allem wenn man nicht nur das menschliche Leben betrachtet (es gibt ja auch auf der Erde genug Lebewesen, die sich bei für uns unvorstellbaren Bedingungen sehr wohl fühlen). Wir befinden uns also auf der Erde und nicht auf Pluto alleine aus dem Grund, dass wir nur hier leben können. Es steckt kein grundlegendes mathematisches Prinzip hinter den Werten von unseren „Erdkonstanten“, so lässt sich beispielsweise die Temperatur auf der Erde zwar mit dem Abstand zur Sonne erklären, jedoch ist sie eine der Ursachen unserer Existenz und nicht

ihre notwendige Folge. Unsere Erde ist ein rein zufälliger Planet im Universum, mit rein zufälligen „Lebensbedingungen“ – und nur weil diese zufälligen Werte ein Leben, ja sogar ein intelligentes Leben ermöglichen, gibt es uns hier.

Es bietet sich an, diese Aussage auf das gesamte Universum anzuwenden: Es ist ein rein zufälliges Universum in einem großen Multiversum, mit rein zufälligen physikalischen Gesetzen – und nur weil diese zufälligen Gesetze die Entwicklung vom Leben ermöglichen, gibt es uns hier. Unendlich viele Universen mit allen möglichen Eigenschaften würden ja rein statistisch alles erklären – aber wie kommt man überhaupt auf die Idee, dass es viele gibt? Nun, in der Stringtheorie existieren schätzungsweise 10^{500} Lösungen, sogenannte falsche Vakua, im Prinzip verschiedene Weltkonfigurationen. Einen Versuch der konkreten Implementierung des anthropischen Prinzips auf Basis der Stringtheorie stellt das Konzept des Landscape dar.

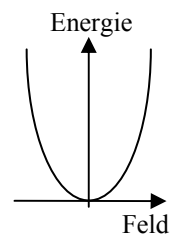
5. Landscape

5.1 Das Konzept

Der Begriff „Landscape“ im heutigen Sinne wurde von Leonard Susskind im Jahre 2003 in seinem Paper „The Anthropic Landscape of String Theory“ eingeführt. Er beschreibt einen mathematischen Raum aller möglichen Umgebungen, die die Theorie erlaubt. Jede dieser Umgebungen hat ihre eigenen Gesetze der Physik, eigene Elementarteilchen und Naturkonstanten. Es kann zum Beispiel Umgebungen geben, die unserer Welt ähnlich sind, jedoch eine viel stärkere Gravitationskraft haben oder mehr Raumdimensionen besitzen. Von den 10^{500} Welten sind die meisten mit Sicherheit tödlich bzw. ungeeignet für die Entwicklung vom Leben, jedoch wird ein kleiner Teil von ihnen durchaus „freundlich“ sein und man glaubt, dass in mindestens einer dieser Umgebungen die bekannten Gesetze der Physik, das Standardmodell mit seiner Teilchenliste und die allgemeine Relativitätstheorie auftreten könnten.

Das Landscape besitzt eine gewisse Ähnlichkeit mit der gewöhnlichen irdischen Landschaft, es hat auch Berge und Täler, jedoch ist es nicht bloß dreidimensional – es besitzt Hunderte oder gar Tausende von Dimensionen, eine pro grundlegendes Feld. Jeder Punkt im Landscape beschreibt also den Wert aller Felder und damit auch die Liste möglicher Teilchen und Wechselwirkungen – ein konkretes Vakuum. Umgekehrt kann man sagen, dass sich ein (oder unser) Universum in einem bestimmten Punkt auf dem Landscape befindet. Eine Analogie bietet eine Wetterstation, die die Temperatur, den Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit anzeigt: Jeder Punkt in dieser dreidimensionalen Wetterlandschaft gibt an, in welcher Phase das Wasser existieren kann.

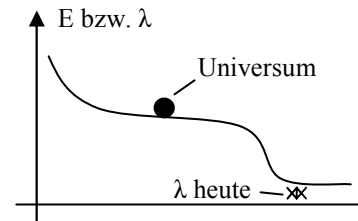
Es existiert auch eine wichtige und direkte Analogie zur potentiellen Energie in der Landschaft, zur Höhe: die Energie des konkreten Universums. Betrachtet man beispielsweise ein eindimensionales Landscape, welches nur das Magnetfeld beinhaltet, so hängt die zur Erzeugung des Feldes benötigte (oder im Feld gespeicherte) Energie quadratisch von der Stärke des Feldes ab – das Landscape ist also eine Parabel. Fügt man das elektrische Feld als zweite Dimension hinzu, so bekommt man einen elliptischen Paraboloiden. Jedem Punkt auf dem Landscape ist eine Energiedichte zugeordnet, manchmal bezeichnet man sie tatsächlich als Höhe. Man glaubt, dass das tatsächliche Landscape hauptsächlich aus Skalarfeldern besteht. Ignoriert man die Quantenfluktuationen, so sind die meisten der uns bekannten Felder im Vakuum Null – es kostet schließlich Energie, sie zu erzeugen. Ein wichtiges Gegenbeispiel ist das Higgs-Feld mit der uns bereits bekannten Form des Potentials, dabei ist unsere Welt im Landscape bergab gerollt und liegt jetzt irgendwo auf dem Kreis der Minima. Es ist auch ein grundlegendes Prinzip, dass wir uns in einem Minimum auf dem Landscape befinden, also in einem Tal. Es muss nicht unbedingt absolut sein, auch ein lokales Minimum ist stabil – und beschreibt ein stabiles (sog. „falsches“) Vakuum mit bestimmten Gesetzen der Physik – und insgesamt gibt es eben 10^{500} solcher Minima.



Das Landscape als ein rein theoretisches Gebilde reicht jedoch alleine nicht aus, um unsere Welt und die fundamentalen Konstanten zu erklären – die Frage, warum sich unser Universum in einem konkreten und für das menschliche Leben so günstigen Punkt auf dem Landscape befindet, ist dadurch immer noch nicht geklärt. Gibt es etwa ein Vakuum-Auswahlprinzip, ein mathematisches Prinzip, welches auf genau unsere Welt führt? Das scheint mittlerweile sehr unwahrscheinlich zu sein. Dann bleibt noch die direkte

Implementation des Landscape in Form von tatsächlich existierenden Abermilliarden von Universen – dann ist unsere Welt nur eine von vielen. Dieses Konzept, genannt „populated Landscape“, wurde beispielsweise in der inflationären Kosmologie, in der „Eternal Inflation“-Theorie realisiert.

Zuerst aber einige Bemerkungen: Die Inflation war eine Periode der exponentiellen Ausdehnung und ließe sich damit durch eine viel größere kosmologische Konstante plausibel beschreiben. Erinnern wir uns daran, dass diese gerade der Vakuumenergie entspricht, so folgt, dass sich unser Universum zur Zeit der Expansion einfach „höher“ im Landscape befindet haben könnte! Man stelle sich eine Art Plateau vor, entlang dessen das Universum „rollt“: Ist das Plateau flach genug, so kann sich das Universum während dieser Phase auf das vielfache ausdehnen, bis es anschließend den steilen Hang erreicht und in ein Tal mit sehr kleiner Vakuumenergie herabgleitet. Die „potentielle“ Energie wird dabei in Wärme und neue Materie umgewandelt („Reheating“).



Man muss beachten, dass eine supersymmetrische Theorie wegen Aufhebung aller Energiebeiträge auf die kosmologische Konstante und Vakuumenergie exakt gleich Null führt. Dies scheint in unserem Universum nicht der Fall zu sein (abgesehen von noch nicht entdeckten supersymmetrischen Partnern). Da jedoch eine supersymmetrische Erweiterung bekannter Theorien viele mathematische Vereinfachungen mit sich bringt und oft sinnvolle Vorhersagen macht, hofft man, dass unsere Welt wenigstens in der Nähe des supersymmetrischen Teils des Landscape liegt und wir über dessen Erforschung indirekt auf unser Universum schließen können. Eine weitere Bemerkung: Stellt man sich eine gleichmäßige (zufällige) Verteilung des Wertes der kosmologischen Konstante auf die 10^{500} Vakua vor, so liegt nur bei einem Vakuum von 10^{120} dieser Wert im anthropischen Bereich – dennoch sind es unvorstellbar viele.

5.2 Multiverse

Kommen wir zurück zur „Eternal Inflation“: Sie beschreibt unsere Welt als ein Multiversum (oder Megaversum), welches aus „Taschenuniversen“ besteht, die „wie Seifenblasen (Bubbles) aus dem sich aufblähenden Raum sprudeln“. Man sollte die beiden Begriffe – Landscape und Multiversum – nicht miteinander verwechseln: Landscape ist ein (virtueller) Raum der möglichen Zustände, dagegen besteht das Multiversum aus realen Taschenuniversen, die sich jeweils in einem Punkt auf dem Landscape befinden. Eine Veranschaulichung (von Susskind): Man stelle sich einen sehr großen, aber seichten See vor (zweidimensionaler Raum), wobei durch den Seegrund ständig mehr und mehr Wasser in den See gepumpt wird (neuer Raum). Zusätzlich stelle man sich jetzt einige Boote auf der Wasseroberfläche vor, die versuchen, Signale untereinander auszutauschen. Wegen der Expansion des Sees werden die Boote auseinander getragen. Ist die Expansionsrate größer als die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals, so ist kein Informationsaustausch möglich. Analog dehnen sich die Bubbles zwar sehr schnell aus, jedoch fliegen sie aufgrund der Expansion des Universums auch sehr schnell auseinander: Wenn neuer Raum zwischen den Bubbles schnell genug erzeugt wird, werden sie sich nie berühren. Andererseits wird jeder Punkt zwischen den Bubbles früher oder später von irgendeinem Bubble verschlungen. Die Expansion (oder „space cloning“) wird dabei durch die positive kosmologische Konstante verursacht.

Der Zusammenhang mit dem „populated Landscape“ basiert auf dem Prinzip der Metastabilität des Vakuums. Ein System bezeichnet man als metastabil, wenn es gegenüber kleinen Änderungen als stabil erscheint, jedoch bei größeren Änderungen plötzlich instabil wird. So kann beispielsweise das (reine) Wasser bei vorsichtiger Abkühlung auf unter 0°C (Unterkühlung) oder Aufheizung auf über 100°C immer noch flüssig bleiben, wird jedoch bei kleinster Störung zu Eis bzw. Dampf. Im Falle des unterkühlten Wassers kann die Umwandlung auch ohne äußere Störung stattfinden, wenn man lange genug wartet: Die Wassermoleküle können rein zufällig einen Eiskristall bilden, der groß genug ist, um als Keim für explosionsartigen Umwandlungsprozess zu dienen. Manchmal wird dieses Wachstum der neuen Phase wegen annähernd kugelförmiges Verlaufs als Bubble-Nukleation bezeichnet. Dabei bildet ein Domain-Wall die Grenze zwischen den Phasen – ein Begriff, der uns aus der Symmetriebrechung bekannt ist; es besteht außerdem ein Zusammenhang mit den D-Branes.

Ein Vakuum mit positiver kosmologischen Konstante verhält sich ähnlich – es ist metastabil. Offensichtlich können auch Quantenfluktuationen als Störungen dienen, was uns auf den Tunneleffekt führt. Wegen Quantenfluktuationen werden ständig kleine Bubbles des „fremden“ Vakuums erzeugt, die den benachbarten Tälern entsprechen. Die meisten dieser Bubbles sind zu klein und verschwinden wieder. Wenn aber ein Tal in der Nähe eine kleinere kosmologische Konstante („Höhe“) besitzt, dann kann irgendwann ein größeres Bubble auftreten, das wachsen wird. Was passiert dann mit dem „Wirt“-Vakuum des Bubbles? Um diese Frage zu beantworten, kann man wieder das Beispiel mit dem expandierenden See nehmen, nur betrachten wir diesmal statt den Booten zufällig entstehende Eisinseln. Diese wachsen sehr schnell, zusätzlich wird innerhalb dieser Inseln statt Wasser Eis „hinzugepumpt“. Entsteht auf einer der Eisinseln durch Fluktuationen eine weitere Phase, so lässt sich ihre Entwicklung im Eis analog zur Entwicklung des Eises auf dem See beschreiben.

Ob sich zwei Eisinseln oder zwei Bubbles berühren können oder nicht hängt natürlich von der Expansionsrate und von der Häufigkeit der Bubble-Erzeugung ab. Die letztere ist jedoch als Tunnelprozess relativ unwahrscheinlich. Dagegen hängt die Rate der Raumklonierung von der Höhe der kosmologischen Konstante ab, die in den meisten Fällen ziemlich groß sein wird – der Raum expandiert also exponentiell. Die meisten der neu erzeugten Bubbles werden aber tiefer im Landscape liegen und expandieren langsamer. Liegt der Wert der kosmologischen Konstante in einem Bubble bei exakt Null, so kann dieses gar nicht mehr wachsen.

5.3 Kritik

Wie schon erwähnt, stellt das Konzept des Landscape eine Anwendung des anthropischen Prinzips auf die Stringtheorie dar. Dies ist auch einer der Kritikpunkte – oft verstärkt allein die Erwähnung vom anthropischen Prinzip den Skeptizismus. Wie man aber sieht, kann das Prinzip auch sinnvoll und produktiv zur Argumentation verwendet werden, obwohl es alleine offensichtlich und manchmal fast schon dumm klingt („Die Gesetze der Physik müssen die Existenz vom Leben ermöglichen, sonst gäbe es niemanden, der über sie nachdenken könnte“). Ein weiterer Kritikpunkt: Man stellt eine sehr spekulative und komplizierte Theorie von Abermilliarden von anderen Welten auf, um nur eine einzige – die unsere – zu beschreiben. Diese Kritik wendet sich aber in gleichem Maße auch auf die Stringtheorie selbst, denn allein dieser haben wir die 10^{500} Lösungen zu verdanken. Das Landscape folgt aus der Stringtheorie und der Inflation fast automatisch – sollte sich aber eine dieser Theorien als falsch erweisen, so wird es mit ihnen gleichfalls automatisch untergehen.