

stante Phase die noch fluktuierenden Phasen in ihrer Umgebung zur Übereinstimmung mit ihr selbst zwingen. Folglich werden Gebiete im Universum mit jeweils derselben Phase ihres Higgs-Feldes entstehen und so lange wachsen, bis sie auf andere Gebiete stoßen, in denen die Phase einen anderen konstanten Wert angenommen hat. Das Resultat sind topologische Defekte. Der Sprung im Wert der Phase des Higgs-Feldes an den Grenzflächen impliziert große Energiekonzentrationen eben dort. Übrigens wirkt nicht die Phase selbst in die Theorie hinein, sondern die von ihr abhängige Transformation, die sie eliminiert, tut das; die eliminierte Phase hinterlässt sozusagen Spuren in der Theorie. Ob es tatsächlich im Universum topologische Defekte gibt, ist umstritten.

Higgs-Felder und Inflation

Geht das Universum von einem Extremwert der Energie zu einem anderen, tieferen über, muss es die dadurch frei werdende Energie loswerden, und tut das durch Wiederaufheizen und/oder die Produktion von Elementarteilchen als Träger manifester Energie. Pendel geben im Laufe der Zeit ihre Energie durch Reibung an der Luft, also als Wärme, ab. Auch bei Ordnungsprozessen wie bei dem Übergang von Wasser zu Eis bei null Grad Celsius wird Energie in der Form von Wärme frei. Im Universum insgesamt ist es ähnlich, nur dass

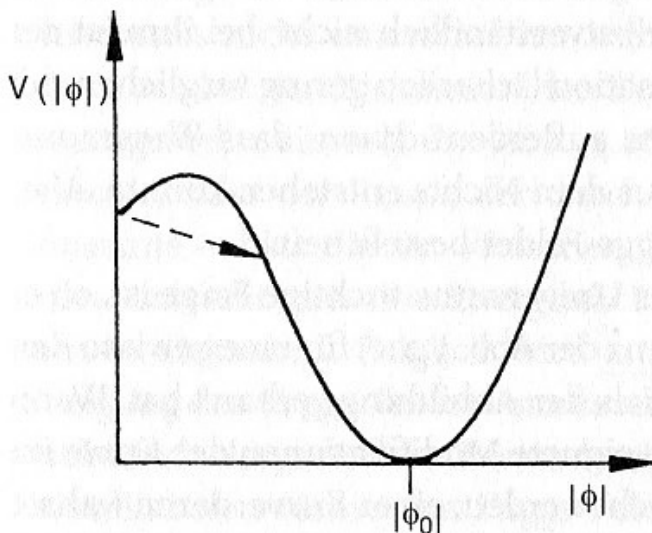


Abbildung 4.14: Ein in der inflationären Kosmologie verwendetes Potenzial

S. W. O.

seine Energieabgabe, wie bereits gesagt, zusätzlich zu den schnelleren und ungeordneteren Bewegungen vorhandener Teilchen die Produktion neuer Teilchen bewirkt. Es kann sogar sein, dass die für die Existenz eines Objektes erforderliche Energie kleiner ist als die, die sein Sichordnen freisetzt.

- Hierzu noch einmal das Szenario der Einleitung, das zwar die Alltagsphysik, die fundamentale aber nicht verbiegt. Bei null Grad Celsius kann Wasser sowohl flüssig als auch fest sein. Wenn es vom flüssigen in den festen Zustand übertritt, gibt es Wärme – Kristallisationswärme – ab. Folglich ist Eis bei null Grad Celsius energieärmer als flüssiges Wasser: Der Vakuumpzustand des Wassers bei und unterhalb dieser Temperatur ist Eis. Weil der Ferromagnet bei seinem Phasenübergang keine latente Energie freisetzt, taugt er übrigens nicht als Beispielsystem für unseren gegenwärtigen Zweck.

- Soweit die unverbogene Alltagsphysik. Nun haben wir uns vorgestellt, es gebe eine Substanz X, die wie Wasser bei einer gewissen Temperatur in zwei Formen auftreten kann: ungeordnet, d.h. »flüssig«, und geordnet, d. h. »fest«. Anders aber als bei Wasser soll es so sein, dass die Substanz X zu ihrer schieren Existenz aufgrund von Einsteins $E = mc^2$ sehr, sehr wenig Energie braucht – weniger sogar, als beim Übergang von ihrem ungeordneten zum geordneten Zustand als »Kristallisationswärme« freigesetzt wird. Dann würde es sich energetisch auszahlen, wenn die Substanz X spontan aus dem Leeren Raum entstünde und einen X-Kristall bildete. Raum in seinem Zustand niedrigster Energie, seinem Vakuumzustand, wäre dann nicht leer im konventionellen Sinn – er enthielte ja den realen X-Kristall, dessen Anwesenheit die Gesamtenergie herabsetzte.

Für Wasser als X gilt das selbstverständlich nicht; bei ihm ist der Energiegewinn durch Kristallisation lächerlich gering verglichen mit seinem $E = mc^2$ – abgesehen außerdem davon, dass Wasser nur zusammen mit Anti-Wasser aus dem Nichts entstehen könnte. Aber ungefähr so soll es um die Higgs-Felder bestellt sein.

Eine für die Entwicklung des Universums wichtige Frage ist, ob es nach der Ausbildung der Minima der Abb. 3.21c) für eine gewisse Zeit in dem Maximum des Potentials der Abbildung verharret hat. Wenn man das will, kann es durch geeignete Modifikationen der Kurve im Bereich ihres Maximums erreicht werden; einer Kurve, deren wahrer Verlauf sowieso nicht bekannt ist. Sagen wir, in einem Zwischenbereich der Temperatur bildet das Maximum der Abb. 3.21c) vorher

oder nachher eine Delle wie in der Abb. 4.14 aus. Nun mag infolge sinkender Temperatur zuerst die Delle abnehmen, oder zuvor noch das Universum per Tunneleffekt den Potenzialwall überwinden – auf jeden Fall verharrt es für eine gewisse Zeit in dem symmetrischen Zustand ohne Higgs-Feld. Indessen gibt es Zustände mit niedrigerer Energie, die das Universum annehmen kann, und folglich muss es

während des Verharrens vermöge der oben abgeleiteten Gleichung $R(t) = R_0 e^{t\sqrt{\Lambda c^2/3}}$ durch seine im Vakuum aufgestaute Energie expandieren – um so schneller, je größer diese Energie ist. Von der Abb. 4.15 lesen wir ab, dass das Universum um die 10^{-37} Sekunden nach seiner Entstehung begonnen hat, innerhalb der nachfolgenden 10^{-35} Sekunden seine Abmessungen um den Faktor 10^{50} zu vergrößern. Hierbei ist alles, was es zuvor enthielt, bis zur Unauf-

findbarkeit verdünnt worden. Zum Beispiel ist die Dichte Magnetischer Monopole, sollte es sie zuvor bemerkbar häufig gegeben haben, durch die Vergrößerung des Universums auf praktisch null zurückgesetzt worden.

Wird positive Vakuumenergie in manifeste Energie umgewandelt, ändert sich abrupt deren Einfluss auf die Entwicklung des Universums – aus der (durch den negativen Druck der Vakuumenergie bewirkten) Abstoßung wird normale gravitative Anziehung. Die Anziehung wird später in der Geschichte des Universums ihre wohlbekannte Rolle spielen.

Eine bemerkenswerte Konsequenz der inflationären Vergrößerung des Universums um den Faktor 10^{50} in nur 10^{-35} Sekunden ist auch, dass es (nahezu) unabhängig von seiner Krümmung zuvor nach der Vergrößerung von einem flachen Universum nicht unterschieden werden kann. Diese Auswirkung haben wir bei der Diskussion der Skalaren Krümmung 3K bereits herausgestellt; sie soll die Abb. 4.16 veranschaulichen. Wir wiederholen, dass der Raum, der durch eine effektive Kosmologische Konstante – hier die im »Falschen Vakuum« verborgene Energie – neu entsteht, dieselbe Energiedichte besitzt wie der Raum, von dem er abstammt. Folglich wird am Ende der Inflation bei dem Übergang des Higgs-Feldes vom durch die Abb. 3.21c) zu Abb. 3.21d) symbolisch dargestellten Zustand sehr viel Energie frei – eben die Kristallisationswärme des Higgs-Feldes. Sie führt zur Produktion von Elementarteilchen und heizt das Universum, das sich in den Bruchteilen von Sekunden seiner Existenz vor der Inflation bereits

+L => -
=> -

U -> -

? nicht wählt

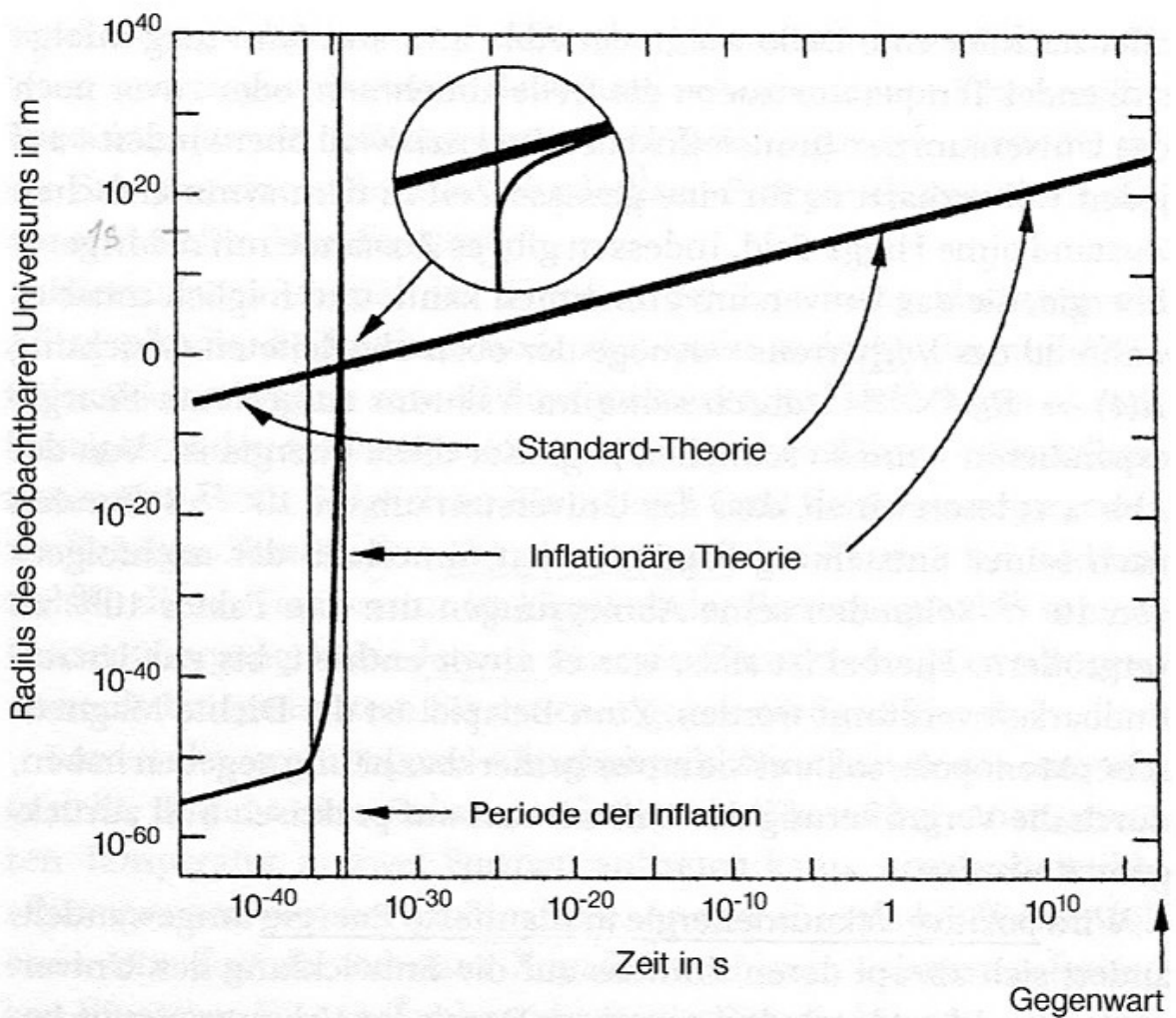


Abbildung 4.15: Die Entwicklung der Größe in Metern des heute beobachtbaren Universums in seiner Frühzeit nach Auskunft zweier Theorien: erstens des Standardmodells des heißen Urknalls und zweitens der inflationären Theorie, um die es uns besonders geht. Die genauen Zahlenwerte der Abbildung sind nicht verlässlich, weil sie von den Details der noch unbekanntem GUT abhängen.

abgekühlt hatte, wieder auf –, sodass am Ende der Inflation die Entwicklung des Universums in jene einmündet, die es nach Auskunft des Modells des heißen Urknalls ohne Inflation von Anfang an durchlaufen hat und weiterhin durchlaufen wird. Auch dies veranschaulicht die Abb. 4.15.

Ein irreales Schreckensszenario

Wie das frühe Universum, kann auch das heutige in einem Minimum mit einer Vakuumenergie gefangen sein, die größer ist als