

# Kosmische Strings

Franz Embacher

## Einleitung

Wir wissen heute über das Universum, daß sein Inhalt an sichtbarer Materie klumpig ist. Galaxien treten manchmal in Haufen, und Galaxienhaufen in Superhaufen auf, wobei die größten beobachteten Strukturen eine Ausdehnung von etwa 100 Mpc haben. (Abb. 1)



Abb. 1: Schematische Skizze der großräumigen Strukturen im Universum.

Das ist zu vergleichen mit der Größe des heute sichtbaren Teils des Universums (etwa 3000 Mpc). Andererseits datiert die kosmische Hintergrundstrahlung, ein Mikrowellenhintergrund der Temperatur 2,7 K, auf die Zeit zurück, als der Strahlungsinhalt des Universums von der Materie abkoppelte, d.h. als durch die Entstehung von Atomen das Universum "durchsichtig" wurde, etwa  $10^5$  Jahre nach dem Urknall bei einer Temperatur von etwa 1000 K. Die hohe Isotropie der Hintergrundstrahlung zeigt, daß damals ein sehr hoher Grad an Homogenität und Isotropie geherrscht hat. Das Satellitenexperiment COBE von 1992 hat diesen Sachverhalt genauer geklärt: Die relativen Schwankungen der Temperatur der Hintergrundstrahlung, die in verschiedenen Raumrichtungen gemessen wurde (d.h. deren Anisotropie), lassen auf die relativen Dichteschwankungen zur Zeit der Entkopplung ("decoupling") schließen:

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right)_{\text{heute}} \approx \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)_{\text{dec}} \approx 10^{-5}$$

Nun besteht aber das Problem, daß solche Schwankungen mit massiven Strukturen verbunden waren, die es nach dem Standardmodell der Kosmologie nicht gegeben haben darf: der Strahlungsdruck in dieser frühen Phase hätte jede derartige Verdichtung ausgeglättet. Andererseits war schon vor

dem COBE-Experiment klar, daß das Standardszenario den zufälligen Materieverdichtungen, die nach der Entkopplung entstanden sind, nicht genug Zeit gibt, um die heute beobachteten großräumigen Strukturen aufzubauen.

Ein möglicher Ausweg besteht in der Vermutung, es habe im frühen Universum ausgedehnte Objekte gegeben, die den Strahlungsdruck nicht spürten. Eines der spannendsten Beispiele für die Verbindung, die von der Kosmologie mit der Teilchenphysik eingegangen wurde, liegt darin, daß die Spekulationen über eine mögliche große vereinheitlichte Feldtheorie (grand unified theory - GUT) Hinweise auf die Existenz gerade derartiger Objekte geliefert haben.

Die Idee einer großen vereinheitlichten Feldtheorie basiert auf der Annahme, daß alle fundamentalen Wechselwirkungen (außer der Gravitation) bei sehr hohen Temperaturen ( $kT > 10^{16}$  GeV oder  $T > 10^{29}$  K) auf alle Teilchensorten gleich stark wirken. Diese Symmetrie "bricht" bei fallender Temperatur einige Male, so daß sich zuletzt die Aufspaltung der Wechselwirkungen in die elektromagnetische, die schwache und die starke ergibt. Zu diesem Zweck wurde ein Higgs-Feld (oder mehrere Higgs-Felder) postuliert, das in einer Weise die Brechung von Symmetrien bewirkt, die wir gleich besprechen werden, und zusätzlich für die Massen der Elementarteilchen sorgt. Die zu den Higgs-Feldern gehörenden Teilchen werden in den großen Beschleunigern gesucht, wurden aber (noch) nicht gefunden.

## Topologische Defekte

Kosmische Strings sind "topologische Defekte", die bei einer Symmetriebrechung im frühen Universum entstehen. Um diesen Mechanismus zu verstehen, wenden wir uns zunächst einem Modell zu, in dem zwar keine Strings auftreten, das aber die Mechanismen besser verdeutlicht.

Wenn ein Modell einer großen vereinheitlichten Feldtheorie ein einziges reelles Higgs-Feld  $\phi$  enthält, so ist damit ein Potential

$$V(\phi) = \lambda(\phi^2 - v^2)^2 + bT^2\phi^2$$

verbunden. Dabei ist zu verstehen, daß das Feld in jedem Raum- und Zeitpunkt einen Wert annehmen kann. Mit einem solchen Wert ist dann eine potentielle (Feld-)Energie  $V(\phi(t, x))$  verbunden. Falls ein derartiges Feld in einem Raum mit Temperatur  $T$  betrachtet wird, so ist der  $T$ -abhängige Term im Potential (die "Quantenkorrektur" -  $b$  hängt von  $\lambda$  und  $v$  ab) dazuzunehmen. Diese Sachverhalte werden also aus der Teilchenphysik übernommen und haben zunächst mit Kosmologie nichts zu tun.

Nun stellen wir dieses Modell in einen kosmologischen Zusammenhang. Nach dem wohl wichtigsten Paradigma der modernen Kosmologie, dem Szenario des heißen Urknalls, besteht zunächst ein extrem heißer und dichter Zustand. Der

Univ. Doz. Dr. Franz Embacher, Institut für Theoretische Physik der Universität Wien.

Dieser Beitrag wurde als Vortrag während der 48. Fortbildungswoche in Wien am 1. März 1994 gehalten.

"Radius" des Universums  $a(t)$  ist proportional zu  $t^{1/2}$ , die Temperatur  $T(t)$  nimmt ab wie  $t^{-1/2}$ . Diese Beschreibung bricht sicher zur Planck-Zeit ( $10^{-43}$  s) zusammen (und muß durch eine noch unbekannt Theorie der Quantengravitation ersetzt werden). Wir aber interessieren uns für den späteren Zeitpunkt  $t = 10^{-35}$  s. Dies ist gerade jene Zeit, in der  $T$  soweit abgenommen hat, daß der temperaturabhängige Term im Potential von derselben Größenordnung wie der andere Term ist.

Eine einfache Kurvendiskussion zeigt den Verlauf des Potentials  $V$  als Funktion von  $\phi$  (Abb. 2). Ist  $T$  größer als die kritische Temperatur

$$T_{krit} = \sqrt{\frac{2\lambda v^2}{b}},$$

so gibt es nur ein Minimum bei  $\phi = 0$ . Für  $T < T_{krit}$  wird diese Stelle zu einem lokalen Maximum, und zwei neue Minima bilden sich aus. Ist  $T$  so klein, daß man den  $T$ -Term vernachlässigen kann, so nimmt  $V(\phi)$  bei  $\phi = -v$  und  $\phi = v$  den Wert 0 an. Dynamisch ergibt sich also folgendes: Zunächst herrschen hohe Temperaturen, und das Higgs-Feld wird (im Mittel, d.h. bis auf thermische und Quantenfluktuationen) im ganzen Raum den Wert  $\phi = 0$  annehmen. Fällt  $T$  unter die kritische Temperatur, so findet sich  $\phi$  "on top of the hill", d.h. in einem instabilen Zustand und wird jede kleinste Fluktuation benützen, um Werte in Richtung auf eines der beiden Minima anzunehmen. Das nennt man spontane Symmetriebrechung. ("Gebrochen" wird dabei die Symmetrie  $\phi \rightarrow -\phi$ , also mathematisch ausgedrückt eine diskrete Gruppe).

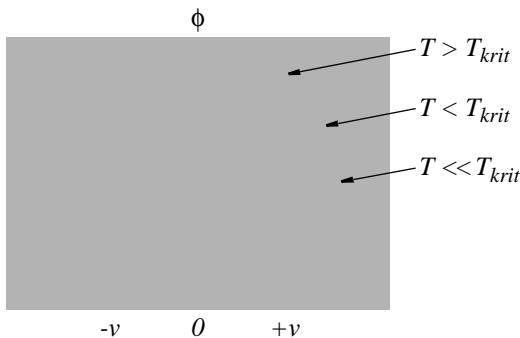


Abb. 2: Formen des Higgs-Potentials für verschiedene Temperaturen.

Der springende Punkt ist nun, daß zwei beliebige Orte zu dieser frühen Zeit nicht unbedingt kausal verbunden sind, d.h. auch keine "gemeinsame Ursache" haben müssen. Das rührt daher, daß seit dem Urknall erst kurze Zeit vergangen ist und Wirkungen sich nicht schneller als das Licht ausbreiten können. Aber auch ohne dieses Argument ist intuitiv klar, daß die thermischen Zufallsschwankungen an weit entfernten Raumpunkten weitgehend unabhängig von einander sind. In Zahlen ausgedrückt: zu dieser Zeit hat das Universum einen "Radius"  $a$  von einigen Zentimetern, während Raumgebiete, in denen das Feld  $\phi$  sich einheitlich verhalten wird, nur etwa  $10^{-25}$  cm groß sind (diese Größe heißt "kosmologischer Teilchenhorizont"). Wenn aber  $\phi$  nach einiger Zeit in einer solchen Region den Wert  $-v$  annimmt und in der Nachbarregion den Wert  $+v$ , was passiert dann an der "Grenzfläche" (Abb. 3a)?

Da das Feld insgesamt stetig sein muß (sogar differenzier-



Abb. 3a: In verschiedenen Regionen kann das Higgs-Feld  $\phi$  verschiedene Minima des Potentials annehmen ( $-$  steht für  $-v$ ,  $+$  steht für  $+v$ ).

bar), muß es eine Fläche geben, nahe der  $\phi$  aus den Minima des Potentials "herausgezogen" wird, und auf der der (ehemals stabile) Zustand  $\phi = 0$  angenommen wird (Abb. 3b). Dieser Zustand heißt "falsches Vakuum". In ihm ist nicht  $V = 0$ , wie in den beiden Minima, die auch "echte Vakua" heißen, sondern, wie aus obigem Ausdruck für das Potential leicht ersichtlich ist,  $V = V(0) = \lambda v^4$ . Daher ist mit so einer Grenzfläche eine lokale Energie verbunden, die gewissermaßen eingefangen ist. Diese Flächen heißen *domain walls*, sie sind die einfachsten Beispiele für topologische Defekte. Klarerweise stellen sie ausgedehnte Objekte dar, die nicht aus "Standardmaterie" bestehen, sondern aus einem Einschluß des falschen Higgs-Vakuums.



Abb. 3b: Der entsprechende Verlauf des Higgs-Feldes als Funktion einer Raumkoordinate  $x$ , die den Abstand zur Grenzfläche mißt.

In der weiteren Entwicklung können domain walls vibrationsartige Bewegungen ausführen und führen zu einem "kosmologischen Desaster": ihre Energiedichte wächst bald über die der normalen Materie hinaus, und daraus ergeben sich kosmologische Konsequenzen, die mit all unseren Beobachtungen nicht übereinstimmen. Daher muß jedes Modell der fundamentalen Wechselwirkungen, das in der eben gezeigten Weise eine Symmetriebrechung mit einem einzigen Higgs-Feld benützt und daher *domain walls* voraussagt, aus kosmologischen Gründen verworfen (oder zumindest stark abgeändert) werden. Das ist ein schönes Beispiel für das Ineinandergreifen von Teilchenphysik und Kosmologie.

Man kann sich eine ähnliche Situation leicht vorstellen: Auf einer (unendlich langen) Wäscheleine hängen nebeneinander Wäscheklammern und sind jeweils mit ihrem Nachbarn, um Unstetigkeiten zu vermeiden, durch ein elastisches Band verbunden. Wenn man dann die rechts einer gegebenen Stelle herunterhängenden Wäscheklammern ganz um die Wäscheleine herumwindet und danach die Klammern nach beiden Seiten hin "bis ins Unendliche" wieder herunterhän-

gen läßt, erhält man eine ähnliche "Feldkonfiguration" der man sogar einen Schubs geben kann, und die sich danach als "Teilchen" benimmt. Auch hier ist eine potentielle Energie "topologisch eingeschlossen", die sich nicht etwa in die Energie eines harmlosen Wellenpakets mit kleinen Auslenkungen umwandeln kann. (Man kann sich den Winkel jeder Wäscheklammer zur Senkrechten als Feld  $\phi$  vorstellen. Das ganze System wird dann durch die "Sinus-Gordon-Gleichung"

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\phi = -\sin\phi$$

beschrieben, und obige Feldkonfiguration heißt "Soliton").

### Kosmische Strings

Kosmische Strings treten in Modellen mit zwei reellen Higgs-Feldern (d.h. einem komplexen = geladenen Higgs-Feld)  $\phi = \phi_1 + i\phi_2$  auf. Das Potential ist hier gegeben durch

$$V(\phi) = \lambda(|\phi|^2 - v^2)^2 + bT^2|\phi|^2,$$

wobei der  $T$ -Term wieder eine "Quantenkorrektur" ist, deren Existenz bei hohen Temperaturen (im Mittel) für  $\phi = 0$  sorgt. Fällt  $T$  unter den kritischen Wert, so wird  $\phi = 0$  wieder ein instabiler Zustand (das "falsche Vakuum"), und  $V$  bildet unendlich viele Minima aus, die (wenn  $T$  vernachlässigbar klein wird) in einem  $(\phi_1, \phi_2)$ -Koordinatensystem einen Kreis mit Radius  $v$  bilden (Abb. 4).  $\phi$  ist nun wieder bestrebt, einen Wert auf diesem Kreis (d.h. ein "echtes Vakuum" anzunehmen).

Im kosmologischen Kontext heißt das nun wie beim vorigen Beispiel, daß diese spontane Symmetriebrechung (Brechung einer Rotationssymmetrie) in entfernten Regionen unabhängig von einander geschehen wird. Dabei ist es möglich (und wird, statistisch gesehen, auch vorkommen), daß die Werte, die das Higgs-Feld  $\phi$  entlang einer räumlichen geschlossenen Kurve annimmt, gerade einmal die Kreislinie der Minima durchlaufen (Abb. 5a, 5b). Zieht man die räumliche geschlossene Kurve entlang irgendeiner Fläche immer mehr zusammen und betrachtet die Werte, die das Feld dort annimmt, so ist klar, daß  $\phi$  zumindest in der Nähe eines Punktes die Menge der echten Vakua verlassen muß und irgendwo den Wert des falschen Vakuums  $\phi = 0$  annimmt. Da aber die Fläche, entlang derer die ursprüngliche räumliche Kurve zusammengezogen wurde, beliebig ist, ergibt sich,

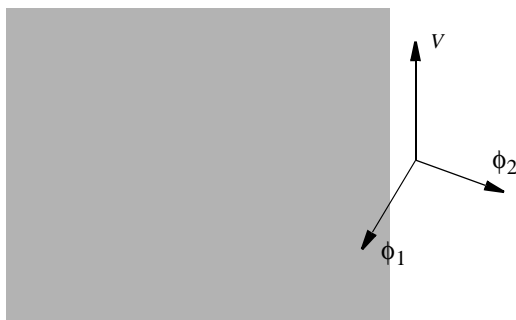


Abb. 4: Potential im Fall eines komplexen Higgs-Feldes für kleine Temperaturen. Der Graph läßt sich als Rotationsfläche aus der entsprechenden Kurve von Abb. 2 darstellen.

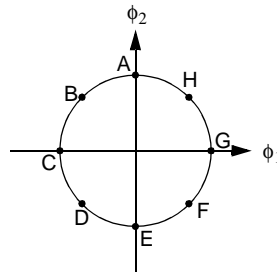


Abb. 5a



Abb. 5b

Abb. 5a: Die Minima des Potentials liegen in einem  $(\phi_1, \phi_2)$ -Koordinatensystem auf einem Kreis vom Radius  $v$ .

Abb. 5b: Das komplexe Higgs-Feld kann entlang einer geschlossenen räumlichen Kurve Werte annehmen, die die Menge der Potentialminima einmal "umrunden". (Windungszahl = 1)

daß der Wert  $\phi = 0$  auf einer ganzen Linie angenommen wird (Abb. 5c).



Abb. 5c: Es folgt die Existenz eines schlauchförmigen Gebiets, in dem das Higgs-Feld Werte nahe Null hat.

Solche Linien heißen kosmische Strings. Sie sind topologische Defekte so wie domain walls, nur sind die Details ihrer Entstehung unserer Anschauung etwas schwerer zugänglich. Sie bestehen aus schlauchförmigen Einschlüssen von "falschem Higgs-Vakuum", und in ihrem Inneren herrscht eine Energiedichte  $V(0) = \lambda v^4$ . Ohne Zweifel sind sie ausgedehnte Objekte; sie können nur entweder geschlossen oder unendlich lang sein. Ihre Dicke ergibt sich zu  $10^{-30}$  cm (in Formeln  $d \sim v^{-1}\lambda^{-1/2}$ , wobei  $\lambda \sim 1$  und  $v \sim 10^6$  GeV die GUT-Energieskala ist). Pro Kilometer Länge wiegen diese Objekte etwa 0,2 Erdmassen. Ist  $\mu$  die Energie pro Länge, so ist (setzt man  $c=1$ )  $G\mu$  dimensionslos und hat ungefähr den Wert  $10^{-6}$ . Diese Zahlen folgen aus den Größenordnungen, bei denen man die Vereinheitlichung der Wechselwirkungen erwartet.

Tatsächlich wird in einem solchen Modell ein ganzes Netzwerk kosmischer Strings vorausgesagt (Abb. 6). In numerischen Simulationen hat man errechnet, daß etwa 20% der gesamten String-Länge in Form geschlossener Schleifen (Loops) auftritt, der Rest in Form unendlich langer Strings (wobei ein String als unendlich lang zählt, wenn er den Rand des Simulationsvolumens trifft; dieses Verhältnis 20:80 ist dann unabhängig von der Größe des Volumens). Der typische Abstand zweier Loops oder eines Loops zum nächsten langen String ist dann von der Größenordnung  $10^{-25}$  cm.

Durch die Expansion des Raumes werden diese typischen Abstände aber schnell größer.

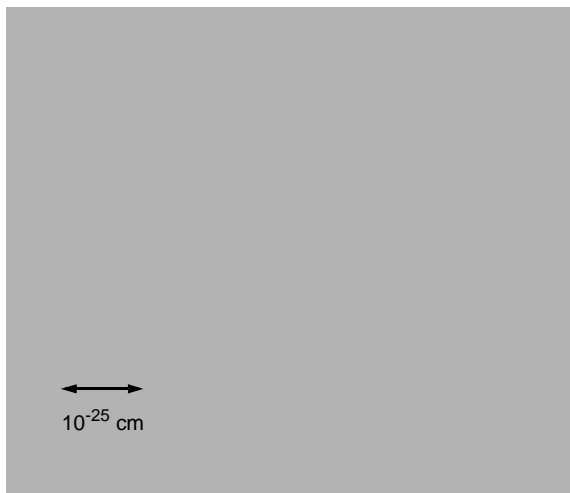


Abb. 6: Als Folge der spontanen Symmetriebrechung entsteht ein Netzwerk kosmischer Strings.

Kosmische Strings wurden zuerst 1976 von Tom Kibble als möglicherweise kosmologisch relevante Objekte untersucht. Im Unterschied zu den domain walls führen sie nicht zu einem kosmologischen Desaster. Im Gegenteil: sie sind Kandidaten für eine Erklärung der großräumigen klumpigen Struktur der Materieverteilung im Universum. Könnte man sie experimentell (durch Beobachtungen des Universums) nachweisen, so müßte man sich unter den möglichen GUT-Modellen auf solche beschränken, die sie voraussagen. Könnte man sie experimentell ausschließen, so wäre man klarerweise gezwungen, gerade diese Modelle auszuschließen. Im folgenden soll kurz dargelegt werden, wie kosmische Strings auf die Materie wirken und wie die derzeitige experimentelle Situation aussieht.

### Eigenschaften und Wechselwirkungen kosmischer Strings

Kosmische Strings können sich bewegen, insbesondere führen Loops Oszillationen aus, deren Frequenz umgekehrt proportional zur Energie ist. Auf langen Strings führen unregelmäßige Strukturen zu "wellenförmigen" Bewegungen, ähnlich wie auf elastischen Bändern.

Die wichtigste Wechselwirkung kosmischer Strings untereinander ist das "Interkommutieren": Treffen zwei String-Stücke aufeinander (wie in Abb. 7), so werden die Teilstücke durchtrennt und ausgetauscht. Das führt dazu, daß lange Strings Loops produzieren, Loops ihrerseits in kleinere Loops zerfallen und schließlich (mit einer kleineren Rate) Loops sich in lange Strings wieder eingliedern oder mit anderen Loops vereinigen können. Diese Wechselwirkungsform ist die mathematisch am schwierigsten zu fassende - sie ist verantwortlich dafür, daß wir in unserer Kenntnis der Evolution des String-Netzwerks vor allem auf numerische Simulationen angewiesen sind.

Schließlich senden die oszillatorischen Bewegungen von Loops bzw. von Teilstücken langer Strings Gravitationswellen aus. Dies zusammen mit dem Interkommutieren und der

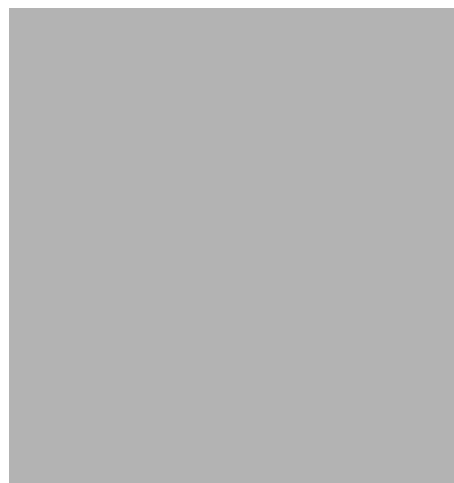


Abb. 7: Das Interkommutieren kosmischer Strings führt zu einer Reihe von Effekten, die die statistischen Eigenschaften des Netzwerks verändern.

Expansion des Raumes führt zu einem ständigen Verlust der im String-Netzwerk steckenden Energie, so daß heute nur noch ganz wenige solcher Objekte in beobachtbarer Nähe zu erwarten sind.

Der für die Wirkung kosmischer Strings auf die Materieverteilung entscheidende Mechanismus rührt von der sogenannten "konischen Geometrie" des Raumes in ihrer Nähe her. Legt man einen Kreis mit Radius  $r$  um ein gerades String-Stück (siehe Abb. 8), so gilt für das Verhältnis von Umfang  $u$  zum Radius  $r$  dieses Kreises  $u/r = 2\pi - 8\pi G\mu$ . Der Zusatzterm heißt Defizitwinkel. Dies ist genau die Geometrie, die auf einem Kegel (in der Nähe der Spitze) herrscht. Mathematisch wird dieser Sachverhalt dargestellt wie in Abb. 9a: Aus einer Ebene (orthogonal zum String) wird ein Sektor herausgeschnitten und je zwei Punkte auf den entstehenden Strahlen werden identifiziert. Wie man dann Abb. 9b entnehmen kann, bewegen sich Materieteilchen, zwischen denen ein String passiert hat (oder die an einem String vorbeifliegen, indem sie ihn in ihre Mitte nehmen), aufeinander zu. Dieser Effekt heißt "gravitational lensing" und bewirkt Materieverdichtungen (sogenannte "wakes") hinter bewegten Strings. Eine andere Spielart desselben Phänomens ist die relative Ablenkung zweier ursprünglich paralleler Lichtstrahlen, nachdem sie einen String auf verschiedenen Seiten passiert haben.

Nun sind wir bei den eingangs erwähnten großräumigen Strukturen im Universum angelangt: Die Verdichtungen hinter den Strings werden immer wieder neu erzeugt, widerstehen also tendenziell dem Strahlungsdruck im frühen Univer-

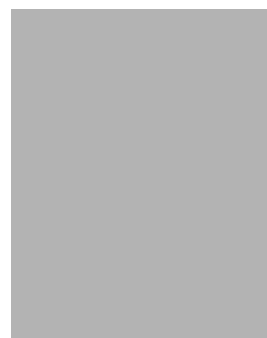


Abb. 8: Konische Geometrie in der Nähe eines Strings.

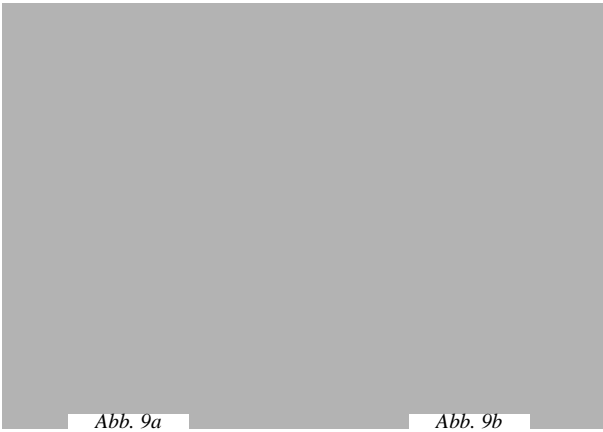


Abb. 9a: Darstellung der konischen Geometrie durch Herausschneiden eines "Tortenecks" und Identifizieren entsprechender Punkte.

Abb. 9b: Zwei Teilchen, die am String vorbeifliegen und ihn dabei in ihre Mitte nehmen, erfahren danach eine relative Richtungsänderung ihrer Geschwindigkeiten. Dasselbe Phänomen tritt auf, wenn die Teilchen ruhen und der String sich

sum. Ab der Zeit der Entkopplung von Strahlung und Materie ( $t = 10^5$  Jahre) stellen sie Keime für Superhaufen von Galaxien (heute etwa 100 Mpc groß) dar. Ihre heute erreichte Größenordnung hängt von vielen Details des konkreten Modells ab (insbesondere davon, ob die "dunkle Materie", von der wir hier gar nicht gesprochen haben, als heiß oder kalt angenommen wird). Ein mittlerer Wert ist  $(50 \text{ Mpc})^2 \times 6 \text{ Mpc}$ . Zerfallen solche Gebilde (z.B. durch auseinanderstrebende Bewegung der Materie, aus der sie bestehen), so bleiben immerhin noch Verdichtungen von der Größenordnung der Galaxienhaufen (5 Mpc) übrig. Auf diese Weise werden kosmische Strings zu Kandidaten zur Erklärung der größten heute beobachteten Strukturen im Universum.

Nach der Entkopplung verdünnt sich, wie oben erwähnt, das Netzwerk. Nach groben Schätzungen können wir im heute beobachtbaren Universum (der Größe  $10^{28}$  cm oder 3000 Mpc) etwa ein langes String-Stück und an die  $10^4$  Loops erwarten. Letztere haben typischerweise die Größe einer Galaxie ( $10^{-2}$  Mpc). Die Entfernung bis zum nächsten Loop wird (mit statistischer Unsicherheit) 100 Mpc betragen.

### Experimentelle Situation

Wie wir bereits erwähnt haben, legen die Spekulationen um eine große vereinheitlichte Theorie der fundamentalen Wechselwirkungen einen Wert  $G\mu \approx 10^{-6}$  nahe. Detaillierte Studien zum Anwachsen der Verdichtungen haben ergeben, daß kosmische Strings mit  $G\mu \geq 10^{-7}$  "schwer genug" sind, um die heutigen Strukturen zu erklären. Die Verträglichkeit mit den COBE-Messungen verlangt  $G\mu < 10^{-5}$ . Ein weiterer Effekt, die Störung der Periodendauer von Millisekundenpulsaren durch Gravitationswellen, ergibt  $G\mu \leq 10^{-6}$  als bisher beste experimentelle Schranke. Kann sie durch verfeinerte Beobachtungen noch um eine Größenordnung verkleinert werden, so scheiden strukturbildende kosmische Strings aus. Wird andererseits im Zeitspektrum dieser Sterne ein Hinweis auf die von der Theorie vorhergesagten Gravitationswellen gefunden, so könnte man dies durchaus als in-

direkten Hinweis auf kosmische Strings als Verursacher interpretieren.

Zu den besonderen Hoffnungen zählt die angestrebte verbesserte Winkelauflösung der Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung, deren Spektrum im Falle der Existenz kosmischer Strings eine ganz charakteristische Form hätte. Eine Entscheidung über diese spannende Variante der kosmischen Strukturbildung wird innerhalb der nächsten Jahre erwartet.

### Literatur:

T. W. B. Kibble, *Topology of cosmic domains and strings*, J.Phys. A 9 (1976) 1387. In dieser Publikation wurde die "theoretische Entdeckung" der kosmischen Strings vorgestellt.

A. Vilenkin, *Kinky cosmic strings*, Nature 343 (1990) 591. Kurze lesenswerte Zusammenfassung.

J. Silk, *Cosmology back to the beginning*, Nature 356 (1992) 741. Darstellung der ersten COBE-Daten.

D. N. Spergel and N. G. Turok, *Textures and cosmic structure*, Scientific American (March 1992) 36. Eine weitere Spielart topologischer Defekte wird diskutiert und den kosmischen Strings gegenübergestellt.

G. W. Gibbons, S. W. Hawking and T. Vachaspati (ed.), *The formation and evolution of cosmic strings*, Cambridge University Press, Cambridge 1990. In diesem Buch werden zahlreiche Aspekte des Themas auf wissenschaftlichem Niveau abgehandelt.