

Stringtheorie – Teilchenphysik – Multiversum

Arthur Hebecker (Heidelberg U.)

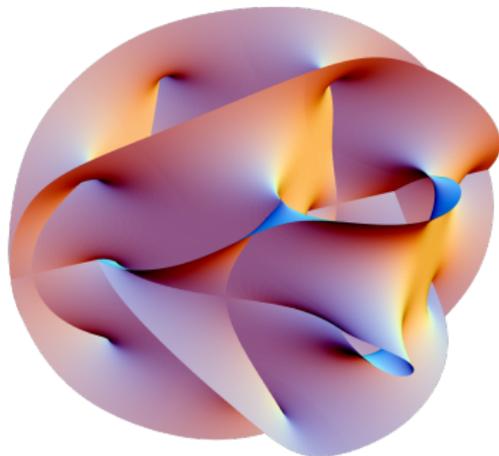
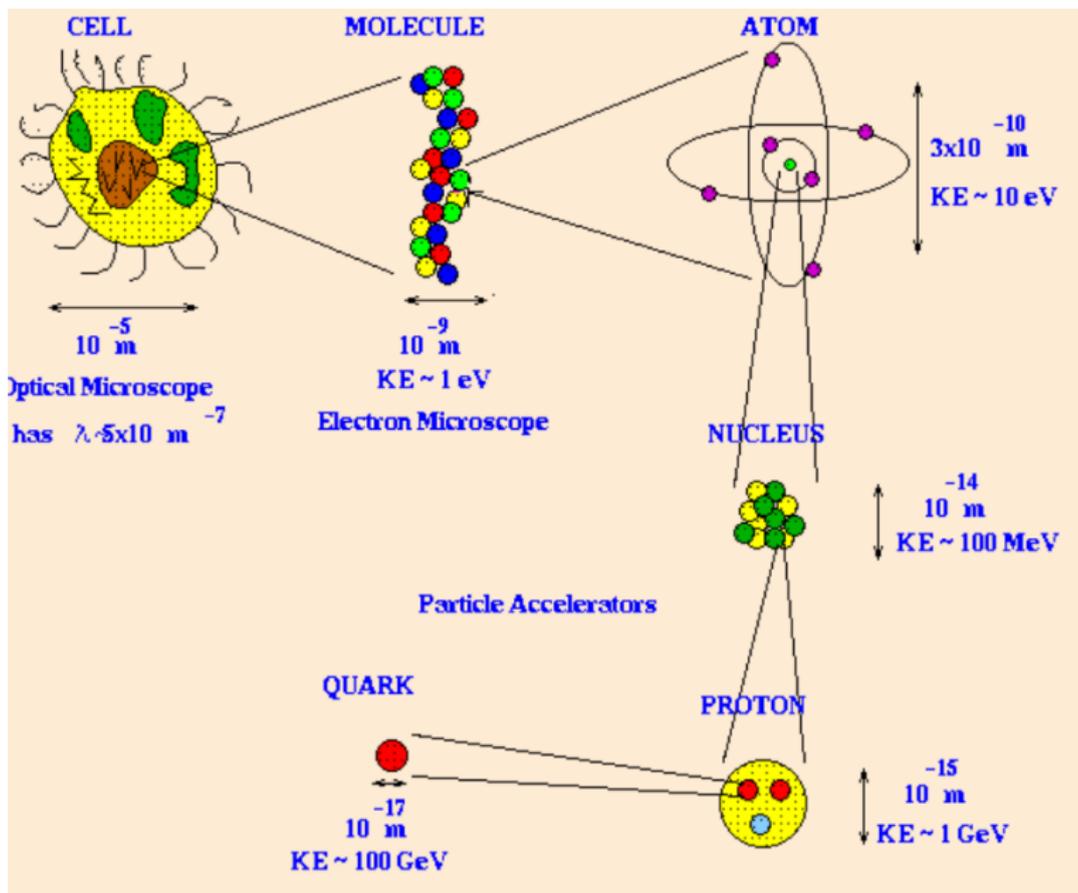


Image by J.F. Colonna

Stringtheorie – Teilchenphysik – Multiversum

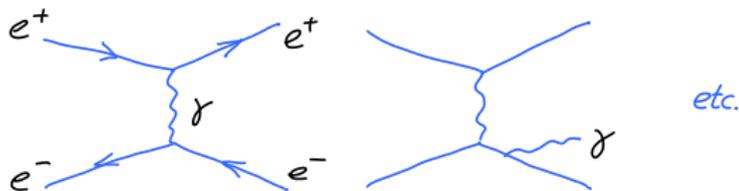
Plan

- Von der Teilchenphysik zur Quantengravitation
- Stringtheorie in 10 Dimensionen
- Kompaktifizierung zu 4 Dimensionen
- Die ‘String Theory Landscape’
- Ewige Inflation (Eternal inflation) und das Multiversum
- Inflation und Urknall in unserem Universum



Von der Teilchenphysik zur Quantengravitation

- Naives Bild der Teilchenphysik:



- Theoretische Beschreibung: Quantenfeldtheorie
- Mathematische Definition durch eine 'Wirkung':

$$S_{(Q)ED} = \int d^4x F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} g^{\mu\rho} g^{\nu\sigma}$$

mit

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{E}^T \\ -\vec{E} & \varepsilon B \end{pmatrix}$$

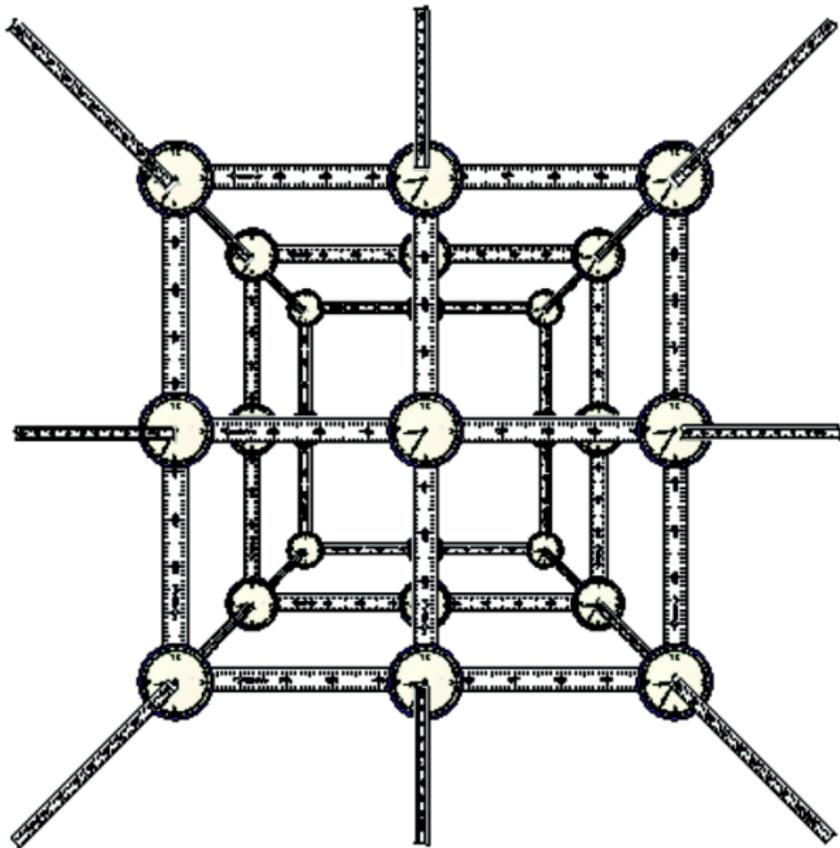
Gravitation ist prinzipiell ähnlich:

- Die Metrik $g_{\mu\nu}$ (lokale Maßstäbe) werden zu einem Feld

$$S_G = \int d^4x \sqrt{-g} R[g_{\mu\nu}] ,$$

wobei R die Krümmung der Raumzeit misst.

- Genauer: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$
- Wobei $h_{\mu\nu}$ die Störungen (Gravitationswellen) auf dem flachen Raum beschreibt und in etwa dem Photon-Feld entspricht.

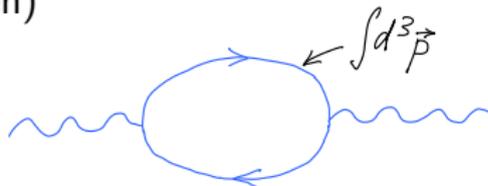


Harrison, U. Toronto (Creative Commons)

- Nun ersetzen wir S_{QED} durch $S_{Standard Model}$ (das ist eine nur geringfügige Komplikation) und schreiben

$$S = S_G + S_{SM} .$$

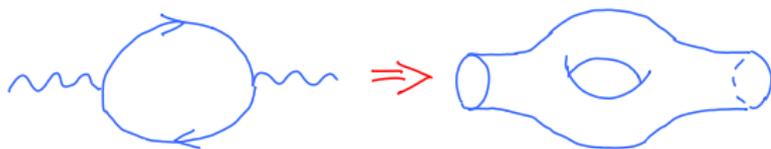
Dies könnte unsere 'Theory of Everything' sein, aber es kommt zu mathematischen Problemen (Unendlichkeiten)



- In der 'normalen' Teilchenphysik ist das ein schwieriges aber lösbares Problem.
- Aber in der Quanten-Gravitation führen diese gleichen Unendlichkeiten dazu, dass man bei der (riesigen) Energieskala $E \sim M_{Planck}$ völlig die Kontrolle verliert.

Stringtheorie

- Die Stringtheorie löst diese Problem in 10 Dimensionen



- Die Unendlichkeiten verschwinden (grob gesagt, weil es keine "Wechselwirkungs-Punkte" mehr gibt).
- Damit erhalten wir in 10 Dimensionen aber bei kleinen Energien ($E \ll 1/l_{string}$), eine wohldefinierte und im Wesentlichen **eindeutige** Teilchenphysik (Quantenfeldtheorie).

'Kaluza-Klein-Kompaktifizierung' zu 4 Dimensionen

- Nehmen wir zunächst an, wir hätten eine **2-dimensionale Theorie**, bräuchten aber eine **1-dimensionale**
- Wir könnten einfach annehmen, der Raum würde einen Zylinder (so wie die Oberfläche eines Seils) bilden:

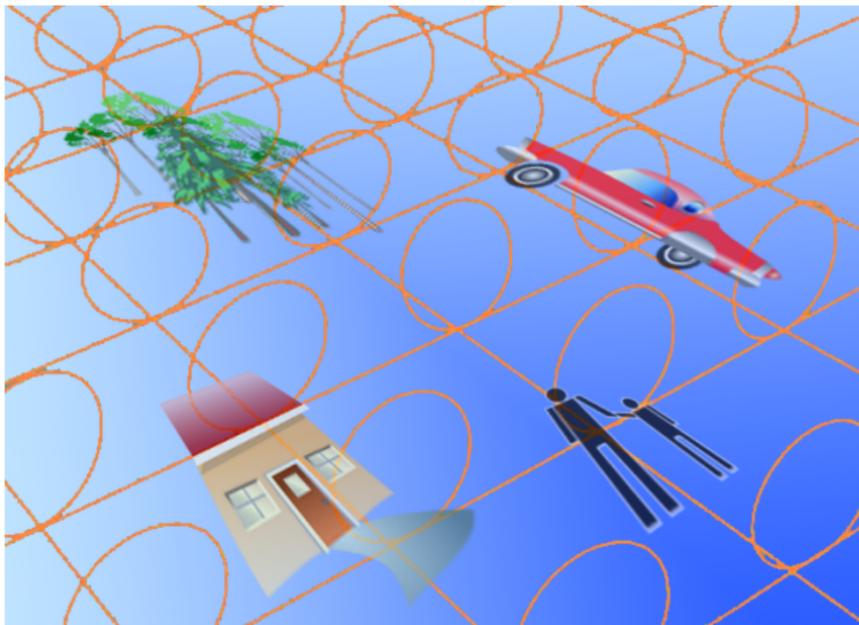


Image by S. Edwards on wikispaces

- Man spricht von einer Kompaktifizierung auf einem Kreis

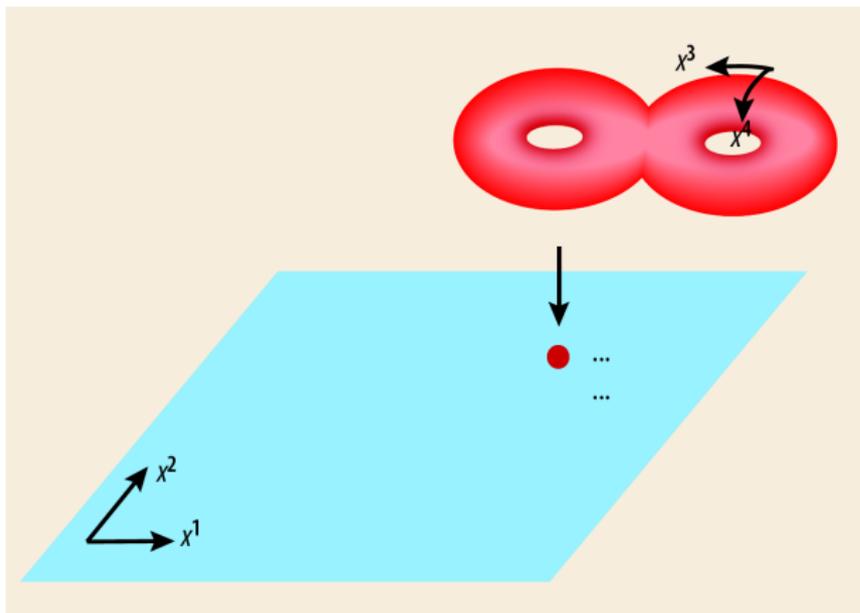
'Kompaktifizierungen' – Fortsetzung

- Analog kann man 'auf einem Kreis' from 3 zu 2 Dimensionen kompaktifizieren.



'Kompaktifizierungen' – Fortsetzung

- Wir können auf sogenannten **Riemann-Flächen** von 4 zu 2 Dimensionen übergehen:



'Kompaktifizierungen' – Fortsetzung

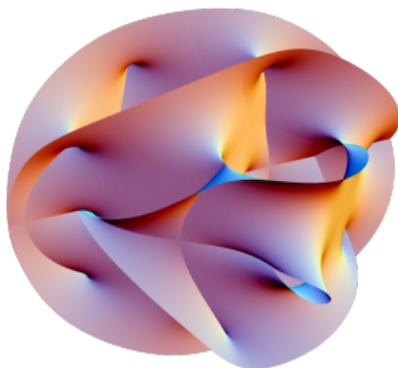
- Es gibt eine unendliche Serie solcher 2-dimensionalen kompakten Räume (Riemann-Flächen):



- Damit würde also eine einzige 4-dimensionale Theorie zu einer unendlichen Serie **verschiedener 2-dimensionaler Theorien** (jeweils mit einer etwas anderen Teilchenphysik) Anlass geben.

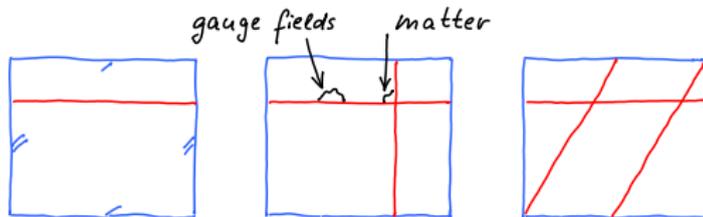
Jetzt zur tatsächlichen Situation:

- Um von 10 zu 4 Raum-Zeit-Dimensionen zu kommen, brauchen wir 6-dimensionale kompakte Räume
- Diese müssen auch Lösungen der Einstein-Gleichungen darstellen.
- Solche Räume nennt man 'Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten' und es sind ca. eine halbe Milliarde von ihnen bekannt.
(Vermutlich gibt es nur endlich viele, aber das ist nicht bewiesen.)



Noch näher zur tatsächlichen Situation:

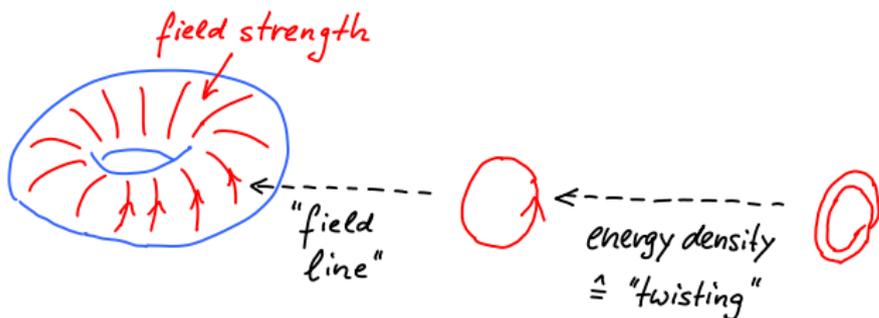
- Es gibt noch viel mehr Möglichkeiten, weil in der Stringtheorie eine Art von (höherdimensionalen) Membranen ('D-branes') vorkommen.
- Zum Beispiel hat ein Torus 2 sogenannte '1-Zykel' auf welche jeweils solche 'Branes' gewickelt werden können.



- Auf diesen Branen leben Felder wie Photonen, Elektronen, Quarks – das ermöglicht Modelle, die unsere reale Welt (zumindest qualitativ) beschreiben.
- Doch das ist noch nicht die 'Landscape'

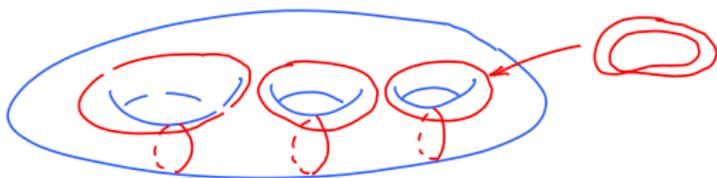
Nächster wichtiger Baustein: Flüsse

- Flüsse sind (höherdimensionale Pendant zu) Feldstärken, wie z.B. des elektrischen oder Magnetischen Feldes.
- Sie können in diskret wählbarer Weise in den extra Dimensionen vorkommen, fixieren dynamisch die Geometrie der Calabi-Yau, und führen zu über $\sim 10^{500}$ Möglichkeiten.
- Versuch einer intuitiven Erklärung:

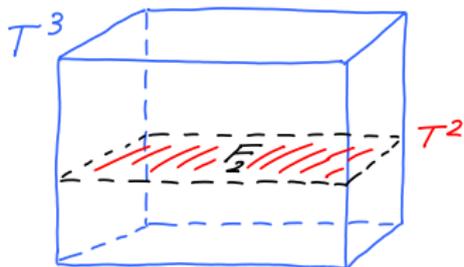


- Dies soll einen auf Fluss auf einem 1-Zykel eines Torus darstellen.

- Ganz allgemein 'leben' Flüsse auf **Zykeln** des kompakten Raumes
- Beispiel: einige 1-Zykel in einem 2d-Raum



- Wichtig: in höherdimensionalen Räumen gibt es höherdimensionale Zykeln (mit Flüssen)
- Beispiel: ein 2-Zykel in eine 3-Torus T^3



Die Stringtheorie-Landscape

- CYs können ca. 300 3-Zykel haben
- Jeder kann zwei Fluss-(oder Windungs-)Zahlen N_{flux} tragen
- Mit z.B. $N_{flux} \in \{-10, \dots, 10\}$ erhält man

$$(2 \times 20)^{300} \sim 10^{500} \text{ Möglichkeiten}$$

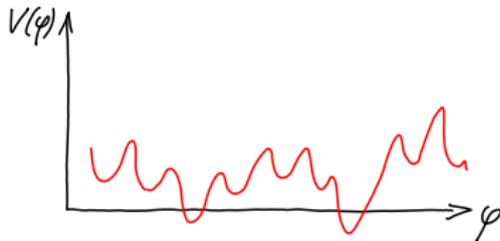
- Das ist die Stringtheory-Landscape!
- Um diese große Zahl zu würdigen, mache man sich klar, dass das sichtbare Universum nur $\sim 10^{80}$ Atome enthält

...our mistake is not that we take our theories too seriously, but that we do not take them seriously enough.

S. Weinberg

Die Stringtheorie-Landscape (Fortsetzung)

- Jede dieser Geometrien entspricht einer Lösung ('einem Vakuum') der gleichen, eindeutigen fundamentalen Theorie
- Als Analogie: Man denke an all die verschiedenen Makromoleküle, welche in Quantenmechanik aus Kernen von Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel (+ Elektronen) entstehen
- Jede Lösung hat eine andere Vakuum-Energie (kosmologische Konstante)

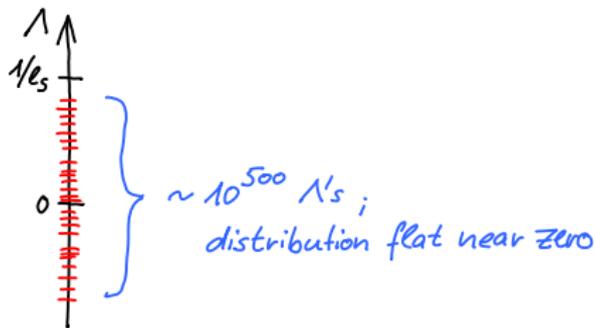


Hier parametrisiert φ (genauer $\{\varphi_1, \dots, \varphi_n\}$) die Form der CY

Die kosmologische Konstante in der Landscape

- Zumindest in einem Teil der Landscape kann man die statistische Verteilung $\Lambda = V(\varphi_{\min})$ berechnen.

Sie ist im Bereich nahe $\Lambda = 0$ relativ 'flach'



- D.h. der gemessene Wert $\Lambda \sim 10^{-120}$ ist zwar sehr unwahrscheinlich, aber **es gibt** solche Vakua
- Man kann nun versuchen, mit **anthropischen** Argumenten zu erklären, warum wir so einem 'seltenen' Vakuum leben.

- Falls man dieses Gesamtbild akzeptiert, dann entspricht dies einem Paradigmenwechsel, der mit der **Kopernikanischen Revolution** vergleichbar ist
- **Kurz gesagt:** Unsere fundamentale (4d) Theorie ist nichts Besonderes - sie ist nur eine von vielen Möglichkeiten

Weinberg '87

Bousso/Polchinski '00

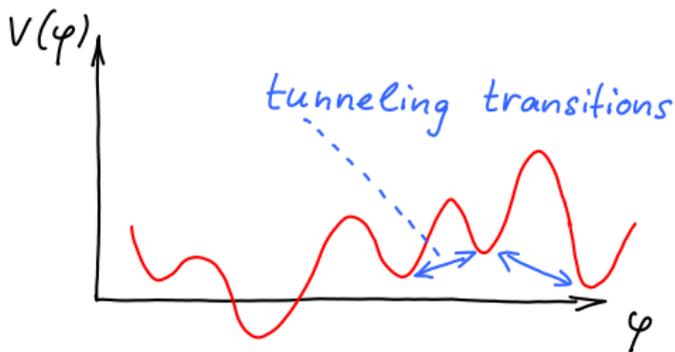
Giddings/Kachru/Polchinski '01 (GKP)

Kachru/Kalosh/Linde/Trivedi '03 (KKLT)

Denef/Douglas '04

Von der Landscape zum Multiversum

- Jedes Vakuum mit $\Lambda > 0$ führt zu einem (klassisch) für immer expandierendem sogenannten de-Sitter-Universum
- Aber durch eine Quantenfluktuation kann sich darin eine Blase mit einem neuen Vakuum bilden, welche dann auch expandiert
- das ist ganz analog zu einem Phasenübergang, wie wir ihn vom kochenden Wasser kennen



Blasen in Blasen in Blasen

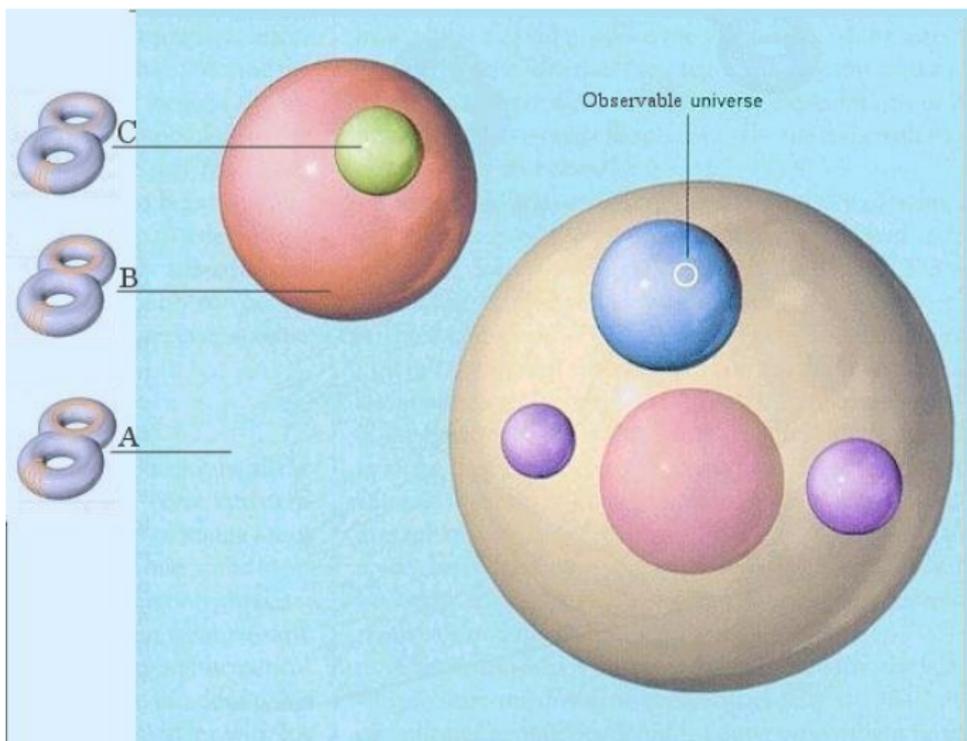
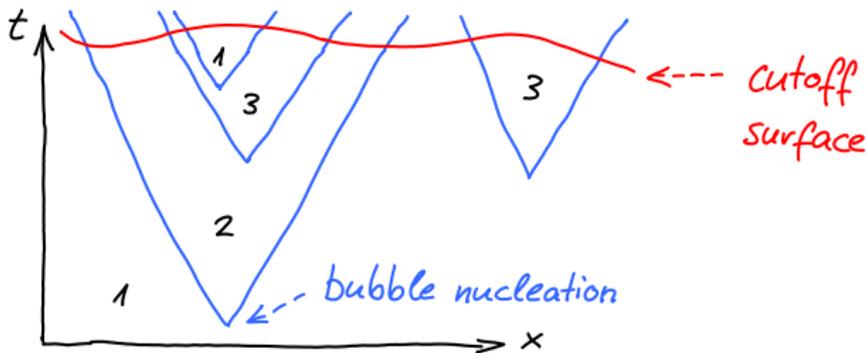


image from "universe-review.ca"

Blasen in Blasen in Blasen

- Wissenschaftlicher aber weniger hübsch: Skizze dieser sogenannten "Eternal Inflation" in 2 Dimensionen

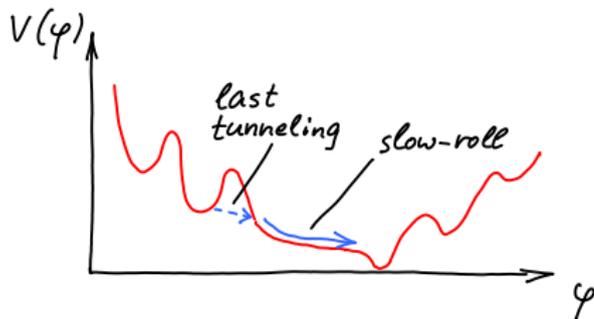


- Die Willkürlichkeit der Zeitfläche ('cutoff surface') ist eines der Gesichter des sogenannten Maß-Problems ('measure problem'): Wir wissen dadurch nicht, wie man auch nur statistische Vorhersagen machen soll.

- Doch auch was 'unser' Universum betrifft, sind wir noch nicht fertig
- Man könnte denken, wir würden uns einfach in einer dieser vielen Blasen befinden. Doch der Raum ist in allen sehr stark gekrümmt
- Um unser Universum so flach zu machen, wie wir es beobachten, bedarf es einer Phase sogenannter 'langsam rollender Inflation' (**slow-roll inflation**) nach dem letzten Tunnel-Ereignis

Starobinsky '80
Guth '81
Linde '82

(langsam-rollende) Kosmologische Inflation in der Landscape

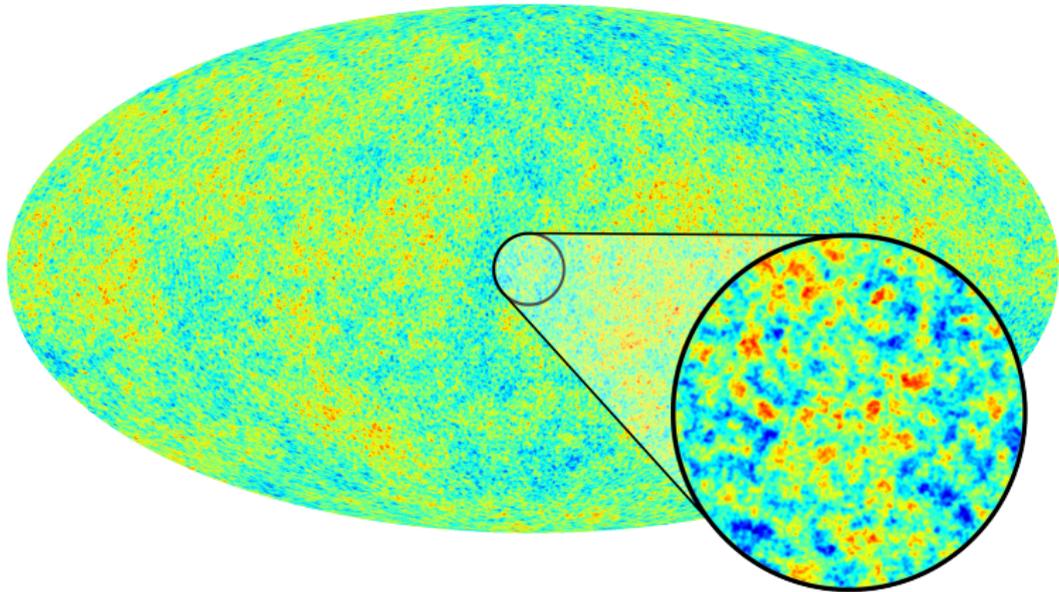


- Diese letzte Periode der kosmologischen Inflation können wir durch die 'kosmische Hintergrundstrahlung' (CMB) am Himmel beobachten

(Quantenfluktuationen von φ führen zu Dichtefluktuationen und diese wiederum zu Temperaturfluktuationen)

- Diesen **flachen** Teil des Potentials zu erklären ist in in der Stringtheorie ein intensiv diskutiertes Problem.

Der Himmel mit Mikrowellen-Augen



...das CMB-Spektrum ist vielleicht auch einer der wenigen experimentellen Wege zur Stringtheorie

Zusammenfassung

- Von der Teilchenphysik zur Quantengravitation
- Stringtheorie in 10 Dimensionen
- Kompaktifizierung zu 4 Dimensionen
- Die 'String Theory Landscape'
- Ewige Inflation (Eternal inflation) und das Multiversum
- Inflation und Urknall in unserem Universum