



# Frontiers of Extragalactic Astrophysics

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

E-mail: [sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)

Internet: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/>

Tel.: 0228 525 280

Vorlesungs-Information: Kommentiertes Vorlesungsverzeichnis, Universität Heidelberg  
<http://www.kip.uni-heidelberg.de/veranstaltungen/#up>

- 10.10.08: Überblick über die Themen des Semesters
- 24.10.08: Kurze Einführung in die String-Theorie
- 07.11.08: Urknall & Inflation
- 21.11.08: Universum & Multiversen
- 05.12.08: GLAST
- 19.12.08: ....

## *Weihnachtsferien*

- 09.01.09: Wurmlöcher und Schwarze Löcher
- 23.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen

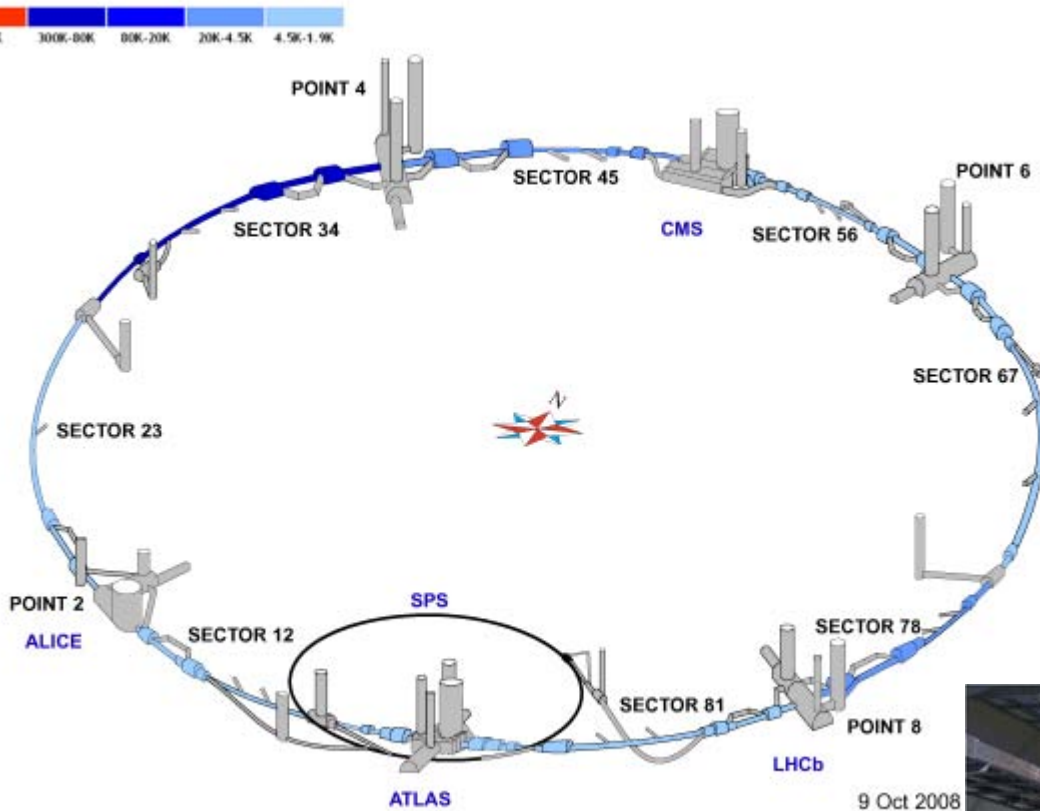




.... und außerdem:



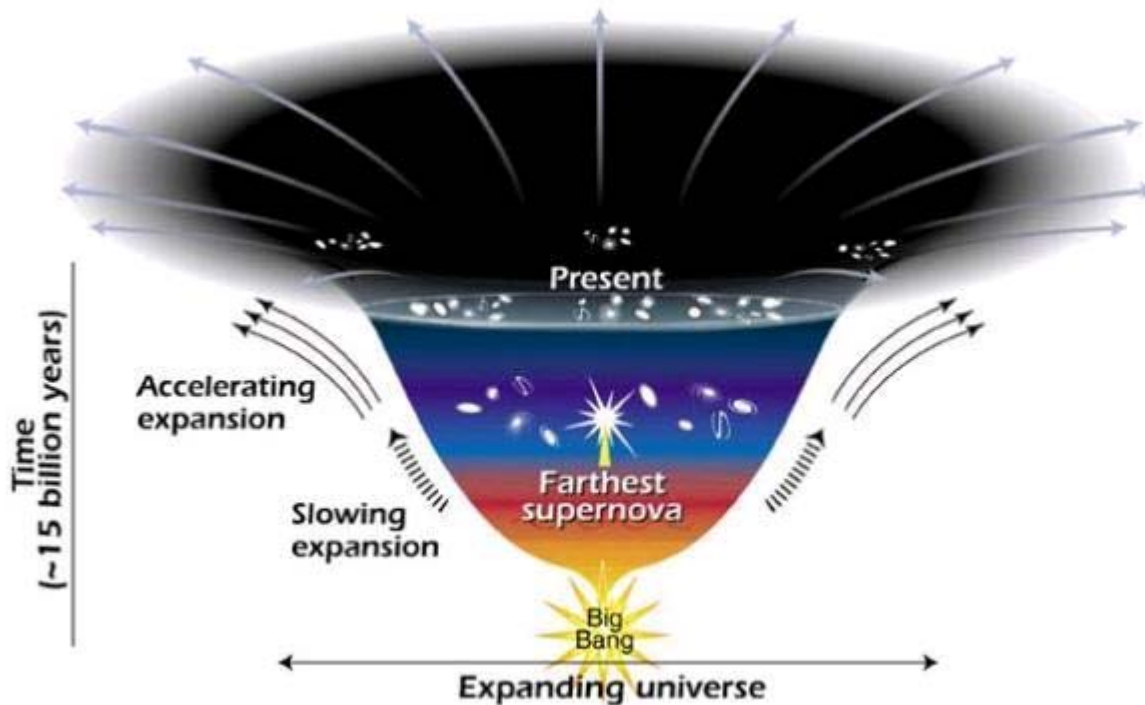
# LHC Large Hadron Collider



Symmetriebrechung  
Higgs-Teilchen  
Urknall  
Stringtheorie  
SUSY  
Inflation  
Dunkle Materie  
etc.



# Dunkle Energie, Dunkle Materie, etc.




Warum expandiert das Universum immer schneller?  
Dunkle Energie: unbekannte Kraft beschleunigt die Expansion

Leben wir in einer „ausgezeichneten“ Region??  
„Void“ mit ungewöhnlich geringer Dichte??

„Dark Fluid“ = Dark energy & Dark matter: die Lösung??

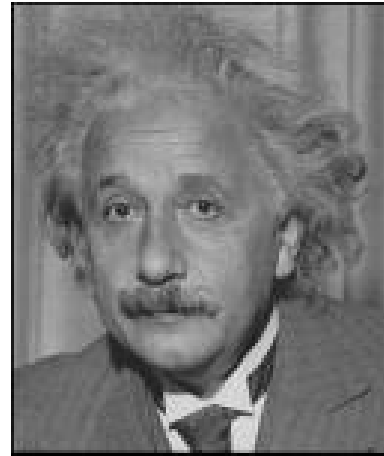




Kurze Einführung in die  
String-Theorie

Spezielle Relativität & Allgemeine Relativität; bestes theoretisches Konstrukt für die Gravitation: ART

Aber: keine Quantennatur, keine Unschärfe, keine Wahrscheinlichkeitsinterpretation, keine Wellenfunktion

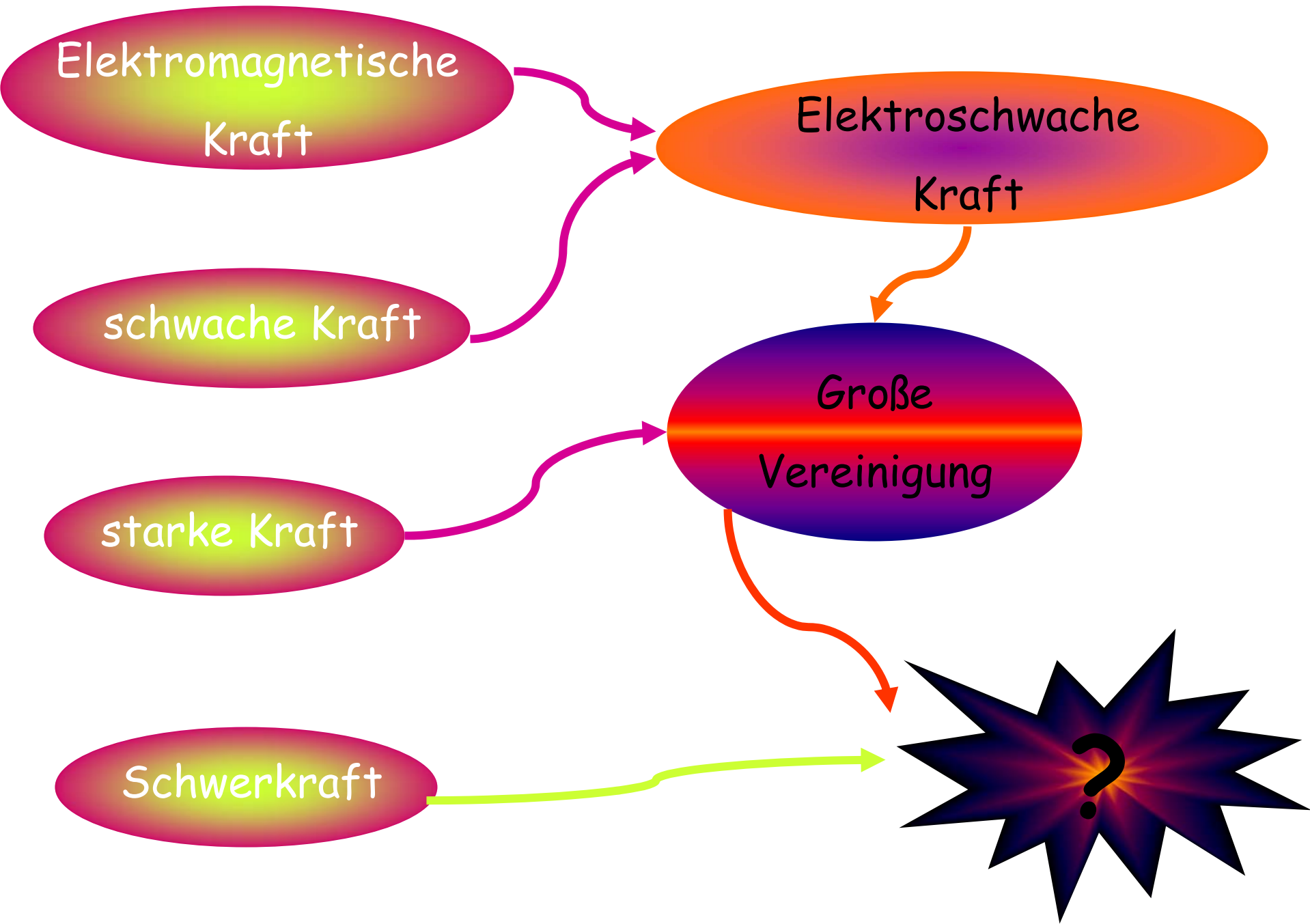


Unschärferelation, Wahrscheinlichkeitsphysik,  
Nicht kompatibel mit allgemeiner Relativitätstheorie

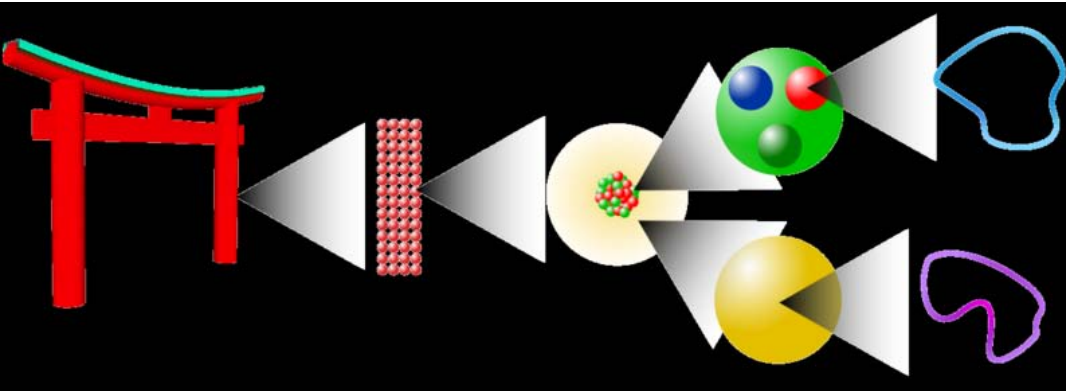
Vereinheitlichungstheorien: schwache, starke und elektromagnetische Kräfte,  
Gravitation gehört nicht dazu

Supergravitation: Unschärferelation mit allgemeiner Relativitätstheorie vereinbart



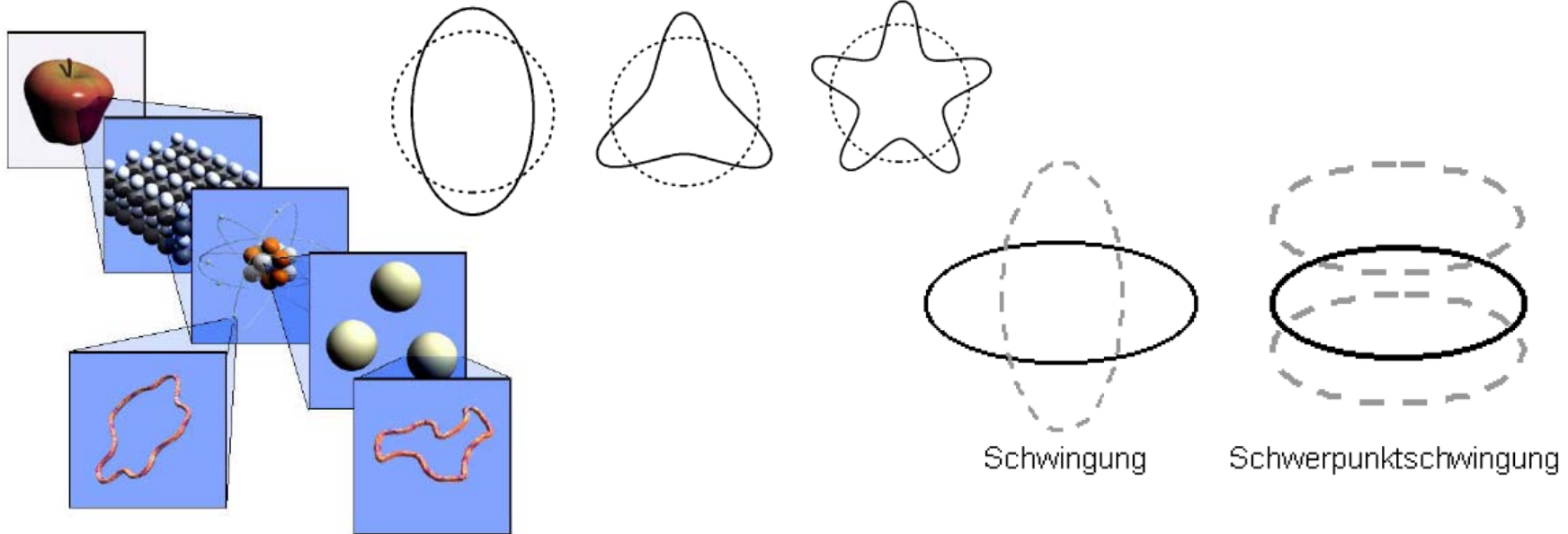






- Superstringtheorie (kurz: Stringtheorie) eine Sammlung eng verwandter hypothetischer physikalischer Modelle, die alle bisher beobachteten Fundamentalkräfte der Physik einheitlich erklären
- Gilt als Ansatz der gesuchten Vereinheitlichung der Gravitation mit der Quantenfeldtheorie der nichtgravitativen Wechselwirkungen
- Bislang: keine experimentellen Beweise
- Strings (engl. für Saite) werden als vibrierende Objekte mit eindimensionaler räumlicher Ausdehnung angenommen – Gegensatz zum Modell der Elementarteilchen, die als nulldimensional angenommen wird
- Ein Elementarteilchen kann man sich als Schwingungsanregung der Strings vorstellen, wobei die Frequenz nach der Quantenmechanik einer Energie entspricht
- Weiterentwicklung der Stringtheorie: Brane-Theorie, hat als Basisobjekte höherdimensionale Objekte

# String-Theorie



- Die Größe, ab der Effekte der Quantengravitation wichtig werden:

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \cong 1.61624(12) \times 10^{-35}$$

- Auf viel größeren Längenskalen (Labor) sind sie nicht von nulldimensionalen punktförmigen Partikeln zu unterscheiden; aber die Vibrationszustände und die Struktur lassen sie als verschiedene Elementarteilchen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik erscheinen (Photon, Quark, ...)
- Aber: noch keine bekannte Lösung dieser Theorie reproduziert genau die Vielzahl von Teilchen, die das Standardmodell kennt
- Strings können offen, oder geschlossen sein; mit offenen wie geschlossenen Strings sind immer charakteristische Schwingungsarten (Moden) verbunden. Eine bestimmte Vibration eines geschlossenen Strings kann als Graviton identifiziert werden
- Strings können eine „Orientierung“ besitzen





- Bei allen Teilchen handelt es sich um Vibrationen auf einem unendlich langen, dünnen String
- Strings können offen oder geschlossen sein
- Strings bewegen sich durch die Zeit und bilden ein world-sheet

# Geschichte der String-Theorie

- Enthält wesentliche Erkenntnisse der Kaluza-Klein-Theorie (1920er): Erweiterung der ART um Elektrodynamik und Gravitation
- «Ich habe grossen Respekt vor der Schönheit und Kühnheit Ihres Gedankens», schrieb Albert Einstein 1919 begeistert dem Königsberger Privatdozenten Theodor Kaluza.
- Historische Urform: bosonische Stringtheorie (60iger,70iger): 26 Dimensionen, 25 Raum- und eine Zeitdimension, beschreibt nur Bosonen, Fermionen nicht enthalten, bringt Teilchen mit imaginärer Masse hervor (Tachyonen, nie beobachtet)
- 70iger Jahre: Vermutung, daß die Stringtheorien alle vier Wechselwirkungen in der Natur vereinigen könnten: Stringtheorie kann Spin-2-Anregungen (Tensorbosonen) erzeugen, die mit dem (hypothetischen) Graviton in Verbindung gebracht werden
- 80iger: nicht nur Strings als Fäden, sondern auch höherdimensionale Objekte sind möglich (Paul Townsend: P-Branen mit einer Dimension  $p$ , Membran: flächenhaft, schwingendes Objekt; 0-Bran: Punktteilchen, 1-Bran: String; 2-Bran: Membran)



Kaluza



Klein

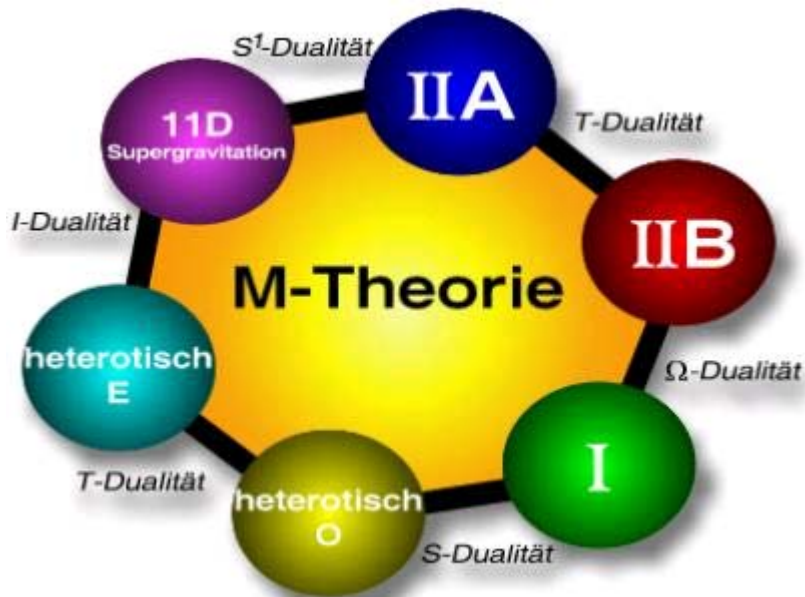


# Geschichte der String-Theorie

- 1997: Juan M. Maldacena findet die AdS/CFT-Korrespondenz; neue Erkenntnisse über die Zusammenhänge von Gravitation und Teilchenphysik
- Bis Mitte der 90iger: eine 26D bosonische Stringtheorie und 5 verschiedene, zehndimensionale Stringtheorien
- Wichtige Untersuchungen am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) in den USA und am LHC am CERN



Maldacena



# Erfinder der String-Theorie?



John Schwarz



Michael Green

Literatur:

[The elegant universe](#)

by Brian Greene

[Superstring theory](#)

by Michael Green, John Schwarz and Edward Witten

[String theory](#)

by Joe Polchinski

[D-branes](#)

by Clifford Johnson





# Urknall & Inflation



# Das Hubble-Gesetz

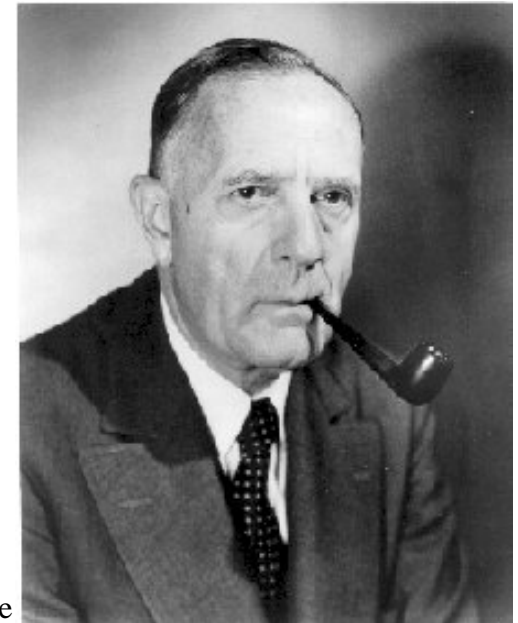
- *Edwin Hubble* untersucht 1923 M31 mit hochauflösendem Teleskop und berechnet die Entfernung auf 900.000 Lichtjahre anhand der Helligkeit einzelner Sterne (später mehrmals korrigiert auf etwa 2.000.000 Lichtjahre).
- Voraussetzung: Der Andromedanebel ist eine Galaxie ähnlich der unseren.
- Weitere Nebel/Galaxien werden vermessen.
- *Hubble* entdeckt 1929: Bis auf wenige, sehr nahe Galaxien weisen alle Galaxien Rotverschiebungen in ihren Spektren auf. Dabei nehmen die **Rotverschiebungen** der Galaxien **proportional zur Entfernung** von uns zu!

-Allgemeingültigkeit folgt aus dem Kosmologischen Prinzip  
-Hinweise auf Gültigkeit des Kosmologischen Prinzips:  
Das Universum ist isotrop und homogen!  
(bei entsprechender Skala - mehrere Gpc)


Probleme: Gültigkeit im Kleinen und relativistische Geschwindigkeiten



- 1931 veröffentlicht *Hubble* besseres Beweismaterial.
- Hubble* verifiziert die Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und Entfernung von Galaxien mit Geschwindigkeiten bis zu 20.000 km/s.
- Nach damaligen Schätzungen kommt er zu dem Schluss: Eine Geschwindigkeit von 20.000 km/s entspricht einem Abstand von  $120 \cdot 10^6$  Lichtjahren.
- Dieser Quotient heißt **Hubble-Konstante**, obwohl er sich mit dem Alter des Universums ändert (s.u.).
- Die Zahlen werden später des öfteren korrigiert.



Edwin Hubble


$$\frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = H$$

$$\dot{r}(t) = v(t) = H \cdot r(t)$$

$$H(t = \text{heute}) = 70 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$$

R(t) : kosmologische Entfernung

r(t) : Abstand zu einer Galaxie

H : Hubble-Konstante

experimentell bestimmt

1 parsec

$$1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ Lichtjahre}$$



# Wie alt ist unser Universum?

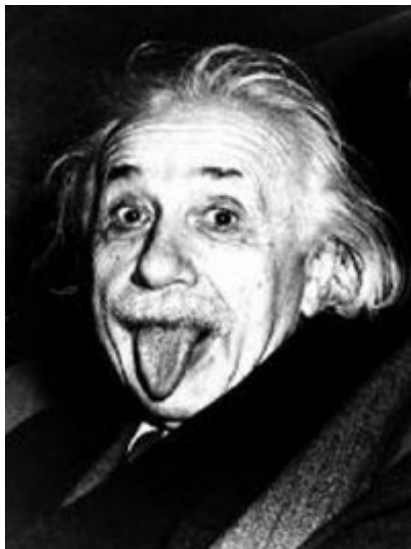
- Voraussetzung: Die Galaxien streben mit konstanter Geschwindigkeit auseinander. Dann waren die Galaxien vor „langer“ Zeit einmal sehr dicht zusammen. Damals muss das Universum entstanden sein!
  - Aus der Geschwindigkeit und dem relativen Abstand zweier Galaxien zueinander lässt sich das Alter des Universums bestimmen.
  - Die Rechnung ergibt: Das Universum ist 20 Milliarden Jahre alt. Dies nennt man die „**charakteristische Expansionszeit**“.
- Aber: Die Galaxien streben nicht mit konstanter Geschwindigkeit auseinander, sondern werden langsamer (Hubble-Konstante ändert sich).
- Weitere Belege führen zu einem **Alter von etwa 15 Milliarden Jahren**: Überlegungen zur Evolution von Sternen, Häufigkeiten verschiedener radioaktiver Isotope auf der Erde (insbesondere: U-235 und U-238)



- Frage nach der Dynamik des Universums
- erste und lange Zeit einzige Überlegungen von *Isaac Newton* zum endlichen und unendlichen Universum
- Erst *Einsteins* „Allgemeine Relativitätstheorie“ brachte neue Impulse. Nach Abschluss seiner Theorie im Jahre 1916 wollte er 1917 eine Lösung für seine Gleichungen finden, in der die Raum-Zeit-Geometrie des gesamten Universums beschrieben wäre.
- *Einsteins* Annahme: Die Lösung ist **homogen, isotrop und statisch**.
- Zur Lösung musste *Einstein* die sogenannte „**kosmologische Konstante**“ einführen. Damit ließ sich die Gravitation über große Entfernungen erklären.
- Neue Impulse verliehen *de Sitters* Modell von 1917. Es wurde in Europa aber erst 1922 populär. *De Sitter* strebte ebenfalls eine homogene, isotrope und statische Lösung an.

# Die kritische Dichte $\rho_c$

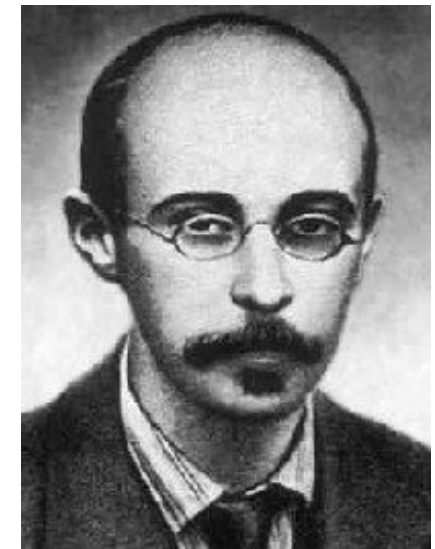
- Aber: *De Sitters* Modell enthielt Fehler. Sein Modell war **nicht-statisch**.
- *Einstein* bedauerte die Einführung der „kosmologischen Konstante“, ließ sich doch eine Lösung ohne diese für den nicht-statischen Fall finden.
- *Alexander Friedmann* fand 1922 die **allgemeine homogene und isotrope Lösung** für Einsteins ursprüngliche Gleichungen.



Albert Einstein



hinten: Albert Einstein, Paul Ehrenfest, Willelm de Sitter  
vorne Arthur Eddington Hendrik Lorentz ; Leiden, Niederlande



Alexander Friedmann

# Willem de Sitter





- Universum ohne Materie, nur mit  $\Lambda$
- De Sitter 1917:

$$\ddot{a}(t) = \frac{\Lambda}{3} \cdot a(t)$$

$$a(t) \propto e^{H_\infty \cdot t}$$

$$H_\infty = \sqrt{\Lambda / 3} = \text{const}$$

Exponentiell beschleunigte Expansion



# A. Friedmann



- Gleichungen der Einsteinschen ART  
• (Friedmann-Lemaître Gleichungen ohne Druckterm)

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{Materie}(t) + \frac{1}{3} \Lambda - (\text{Krümmungsterm})$$

$$\ddot{a}(t) = \frac{1}{3} \left( -4\pi G \cdot \rho_{Materie}(t) + \Lambda \right) a(t)$$



# Wirkung der **Materie**

- **Negativer** Beitrag zur Beschleunigung
- Bremst die Expansion
- Könnte sogar zur Schrumpfung führen
- Die Dichte **nimmt** bei der Expansion **ab**:

$$\rho_{Materie}(t) \propto \frac{1}{a^3(t)} \xrightarrow{a \rightarrow \infty} 0$$

- Positiver Beitrag zur Beschleunigung der Expansion
- Bleibt konstant mit  $t$
- **Von Einstein 1917 eingeführt** zur Kompensation des negativen Materiebeitrags, um ein statisches Universum zu erreichen
- Nach der Entdeckung der Expansion von Einstein bedauert: “**biggest blunder of my life**“ ( $\neq$  „Eselei“!)
- **Die zweitgrösste Entdeckung von Einstein** (nach ART)?


$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + \frac{kc^2}{R^2} = \frac{8\pi}{3}G\rho$$

Friedmann-Gleichung: Dgl für Skalenparameter  $R$ ,  
 $k$  : Vorzeichen-Parameter, entweder -1, 0 oder 1

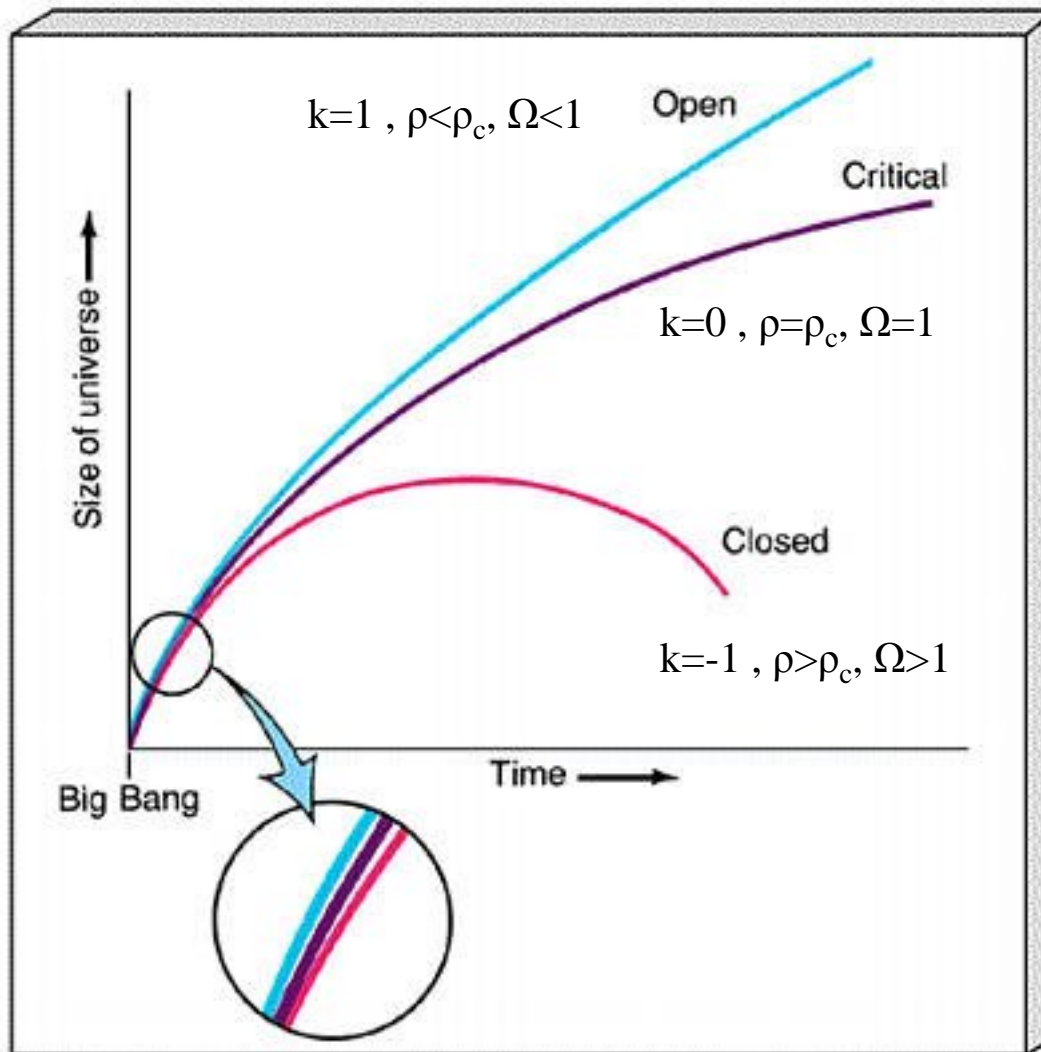
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

kritische Dichte  $\rho_c$  : Dichte  $\rho$ , bei der  $k=0$  wird

$$\Omega = \frac{\rho(t)}{\rho_c}$$

Einführung des  $\Omega$ -Parameters

- Konsequenzen der Dichte: Die Bewegung der Galaxien wird gebremst.
- Fraglich ist nur, wie stark abgebremst wird: Kann das Universum für alle Zeiten expandieren ( $\rho < \rho_c$  offenes Universum), wird die Expansion zum Stillstand kommen und in eine Kontraktion übergehen ( $\rho > \rho_c$  geschlossenes Universum) oder geht die Expansionsrate asymptotisch gegen Null ( $\rho = \rho_c$  flaches Universum)?



- Stand von 1977: Alles deutet auf ein offenes Universum hin.
- Stand heute:  $\Omega=1$   
Das **Universum ist flach**, dies haben zahlreiche Beobachtungen untermauert.

Offenes, flaches oder geschlossenes Universum?





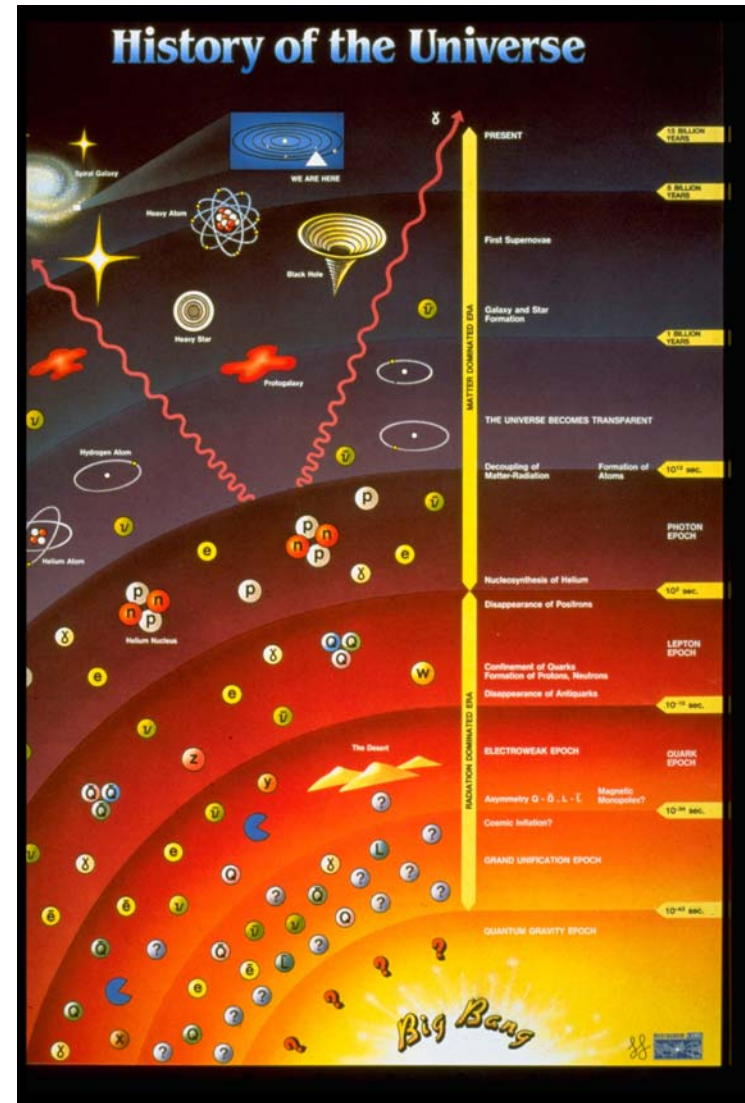
# Zwei wichtige kosmologische Entdeckungen

- Das neue Universum wurde **rapide beschleunigt (Inflation)**
- Eine neue (langsame) Phase der Beschleunigung begann vor 5 Milliarden Jahren **new (Dunkle Energie)**
- .... und ganz viele Fragen:
- Wie hat das Universum begonnen, was war davor, welches Modell erklärt die Beobachtungen am besten, wie sehen die Alternativen aus, welche Probleme sind nicht geklärt, was ist das einfachste Modell, ist das einfachste Modell immer das richtige Modell, wie geht es weiter, wie wird es enden, aufgrund welcher Beobachtungen können wir auf das richtige Modell schließen, wie groß sind die Unsicherheiten?

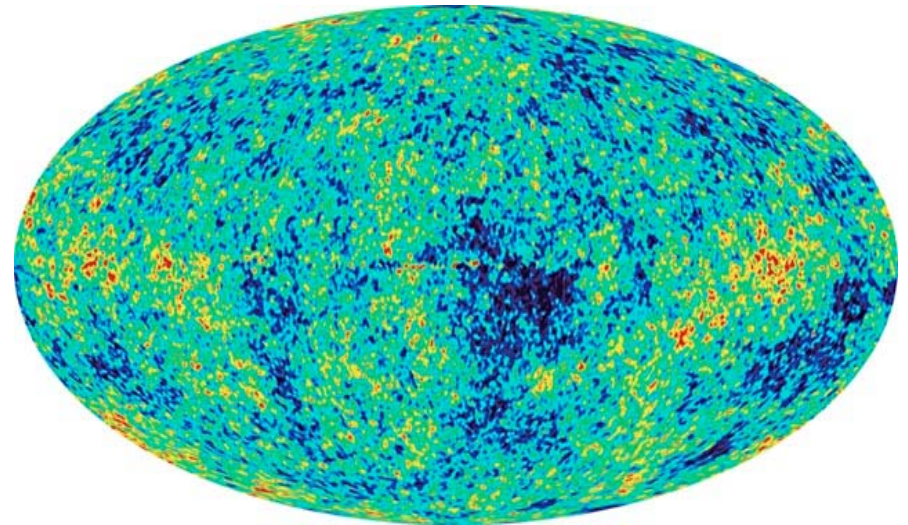
## Probleme der Standard Urknall-Theorie:

- Was war vor dem Big Bang?
- Warum ist unser Universum so **homogen** (besser als 1 in 10000) ?
- Warum ist es **isotrop** (gleich in allen Richtungen)?
- Warum haben alle Teile gleichzeitig mit der Expansion begonnen ?
- Warum ist es **flach**? Warum schneiden sich parallele Linien nicht? Warum enthält es so viele Teilchen ?

- Universum ist vor ca. 13 Mrd. Jahren im Urknall entstanden
- Seitdem grundsätzlich bekannter Verlauf (Standardmodell der Kosmologie)
- Leider einige Widersprüche
- .... Und Fragen: gibt es ein Heute ohne Gestern?



- Hubble-Expansion
- Kosmischer Mikrowellenhintergrund
- Elementverteilung im Universum





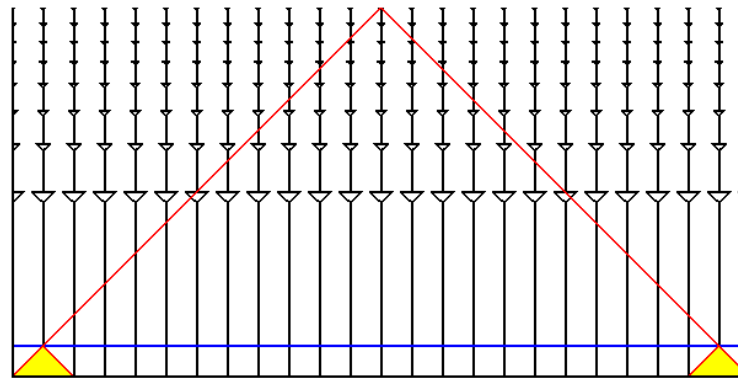
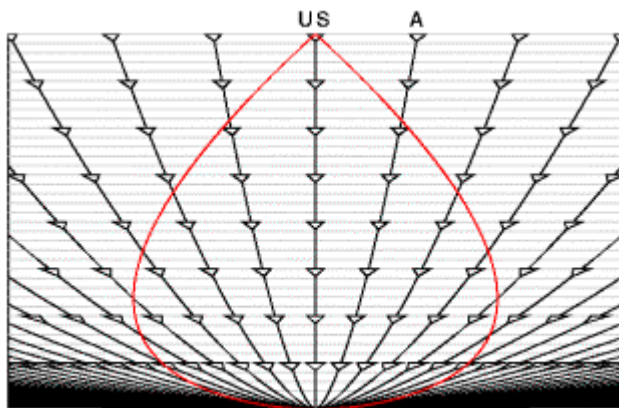
- Horizontproblem
- Homogenitätsproblem
- Flachheitsproblem
- Monopolproblem
- Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie
- Dunkle Materie
- Dunkle Energie

# Horizontproblem

- Temperatur des Mikrowellenhintergrundes ist bis auf  $10^{-5}$  K homogen
- Wechselwirkung (Gleichgewicht) zwischen sichtbaren Teilen des Universums aber nicht möglich!

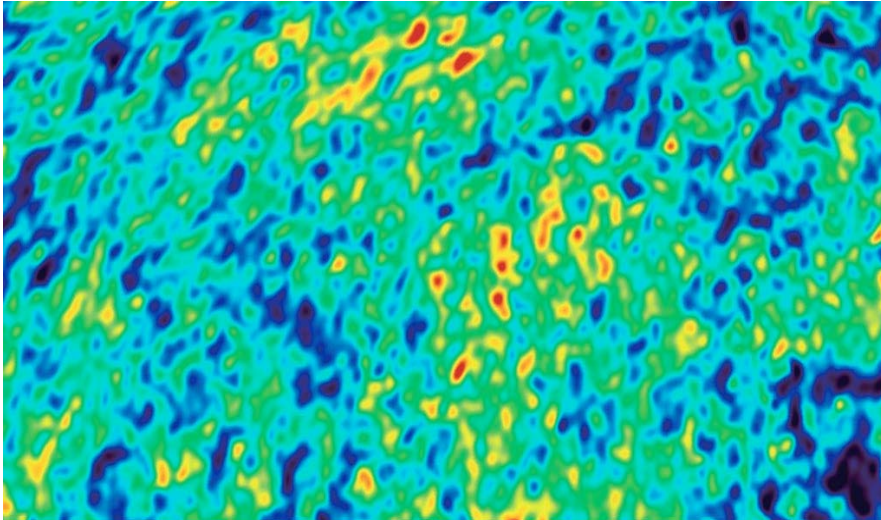


- Homogenität muss als Anfangsbedingung erzwungen werden!



# Homogenitätsproblem

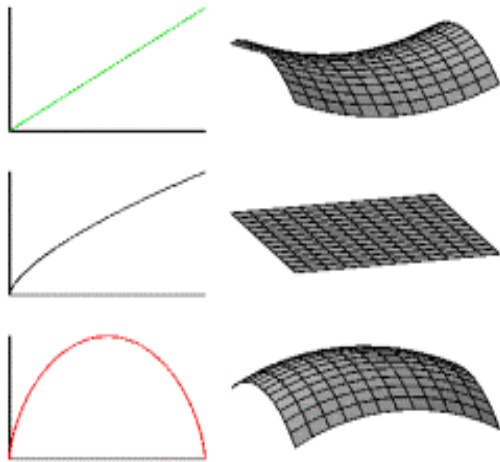
- In kleinen Bereichen kommen doch Inhomogenitäten vor
- Auch für Galaxienbildung etc. sind Inhomogenitäten erforderlich
- Problematisch, wenn genaue Homogenität gefordert



- Grad der Homogenität muss wieder sehr präzise gefordert werden!

# Flachheitsproblem

- $\Omega$  = Dichte / kritische Dichte
- $\Omega - 1$  ist Maß für Krümmung (ART)



- $0,1 < \Omega < 2$  experimentell erwiesen
- Erfordert genaueste Einstellung der Parameter, denn Dichte entwickelt sich von  $\Omega = 1$  weg (exponentiell)
- Genauigkeit von etwa  $10^{15}$  erforderlich

- Flaches Universum nur für  $\Omega = 1$



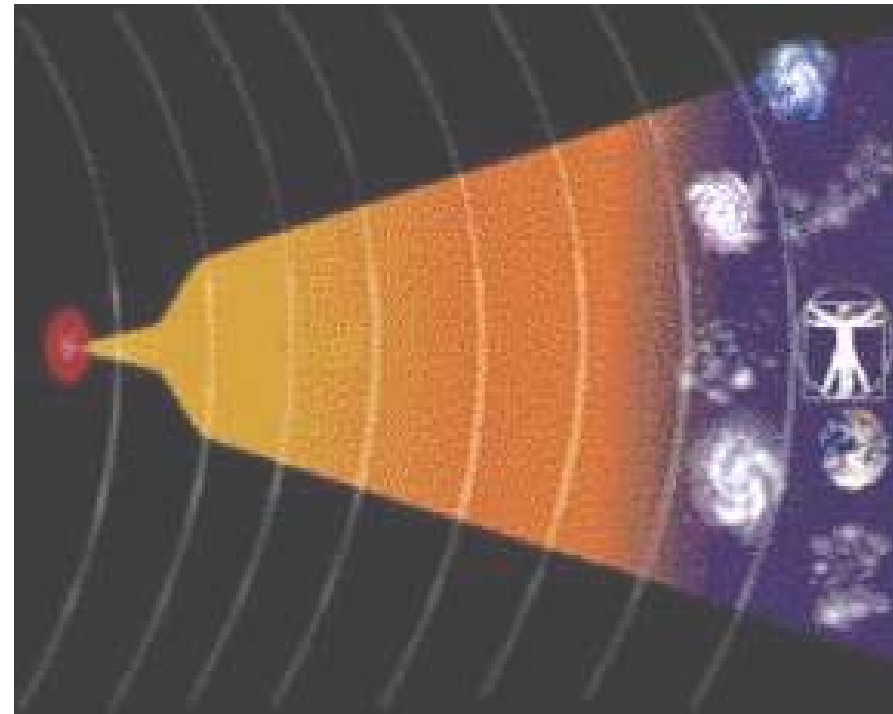


# Monopolproblem

- Nach dem Standardmodell müssten im frühen Universum zahlreiche Defekte entstanden sein
- Diese können als magnetische Monopole interpretiert werden
- Die Energie dieser Monopole ( $10^{16}$  GeV) würde die Gesamtenergie im Universum dominieren
- Damit hätte die Entwicklung vom Urknall bis heute nur 300000 Jahre gedauert
- Außerdem: Magnetische Monopole bisher nicht beobachtet

# Die kosmologische Inflation

- Inflationshypothese: Universum hat sich einige Zeit lang exponentiell („inflationär“) ausgedehnt
- „Inflational Era“ ca.  $10^{-35}$  –  $10^{-30}$  s nach dem Urknall
- kann einige der Widersprüche der Urknalltheorie auflösen
- Wie kommt es dazu?



- Energetisch niedrigster Zustand eines Systems muss die volle Symmetrie nicht widerspiegeln
- Beispiel: Kristalle haben nicht die volle Rotationssymmetrie
- Dann aber natürlich viele energetisch gleiche Zustände
- Im Kristallmodell: Gedrehter Kristall
- Symmetrie heißt dann „spontan gebrochen“

- Beim Abkühlen geht das Universum vom symmetrischen Zustand in den Zustand gebrochener Symmetrie über
- Zunächst alle Energie in den Higgsfeldern: falsches Vakuum wird angenommen
- Phasenübergang muss „langsam“ vor sich gegangen sein
- Dies ist wegen Energiebarriere gewährleistet



# Spontane Symmetriebrechung – Nobelpreis 2008



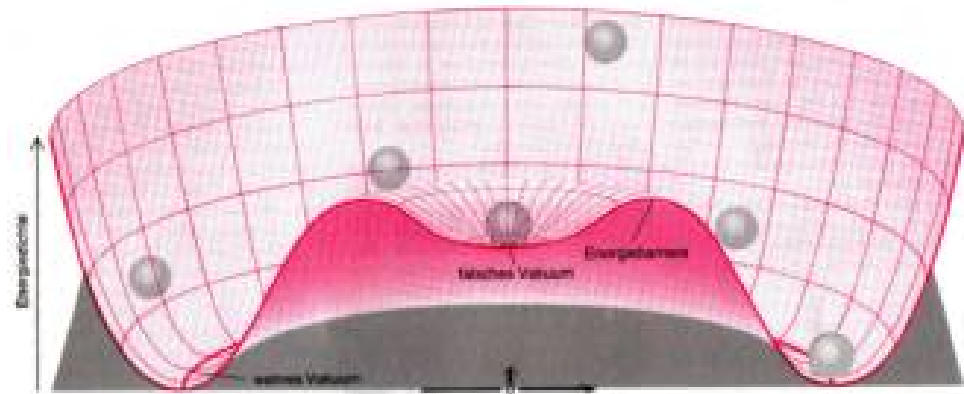
Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa  
Physik Nobelpreis 2008

▪

Symmetriebrechung - Inflation - Urknall - Stringtheorie - SUSY

# Symmetriebrechung und Urknall

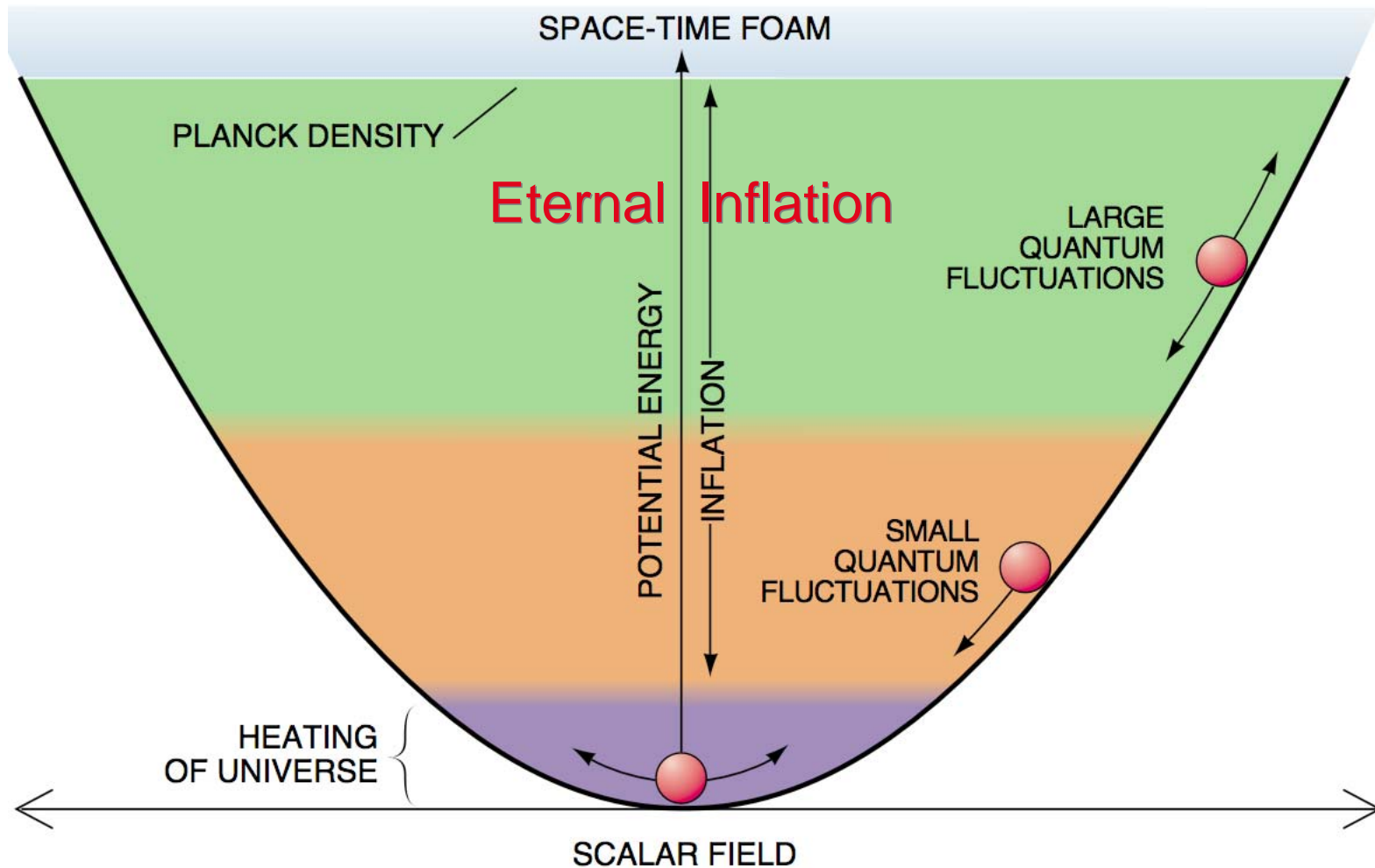
- Entscheidend im frühen Universum (und in der Teilchenphysik): Higgsfeld
- Zeigt gebrochene Symmetrie an
- Energetisch tiefster Zustand: Nichtverschwindender Wert der Higgsfelder („Wahres Vakuum“)
- Im wahren Vakuum gebrochene Symmetrie



- Aber: Lokales Minimum der Energie im Zustand verschwindender Higgsfelder (volle Symmetrie)
- Heißt „Falsches Vakuum“

# Inflation in der Theorie des harmonischen Oszillators

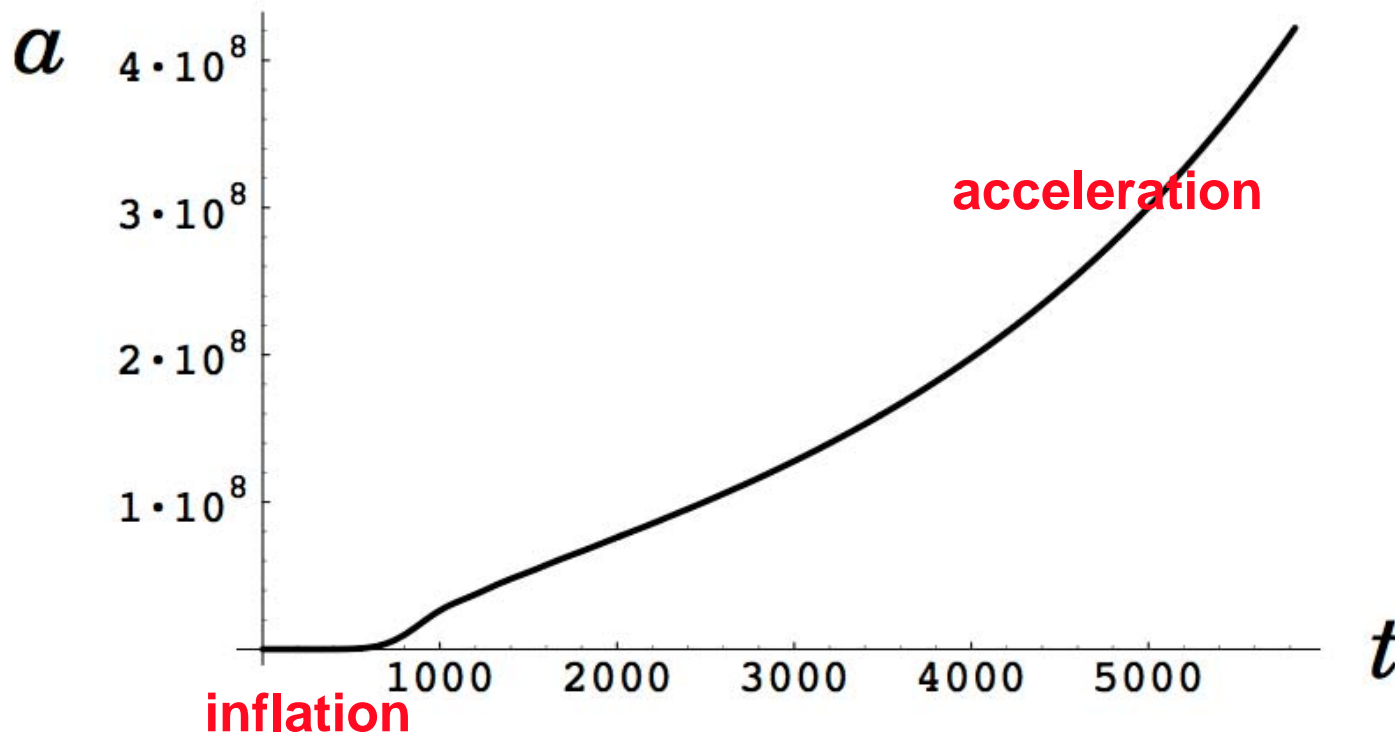
$$V(\phi) = \frac{m^2}{2}\phi^2$$



# Inflation in der Theorie des harmonischen Oszillators

Eine Konstante zum inflationären Potential hinzufügen - man erhält **Inflation** und **Beschleunigung**

$$V = \frac{m^2}{2} \phi^2 + \Lambda$$



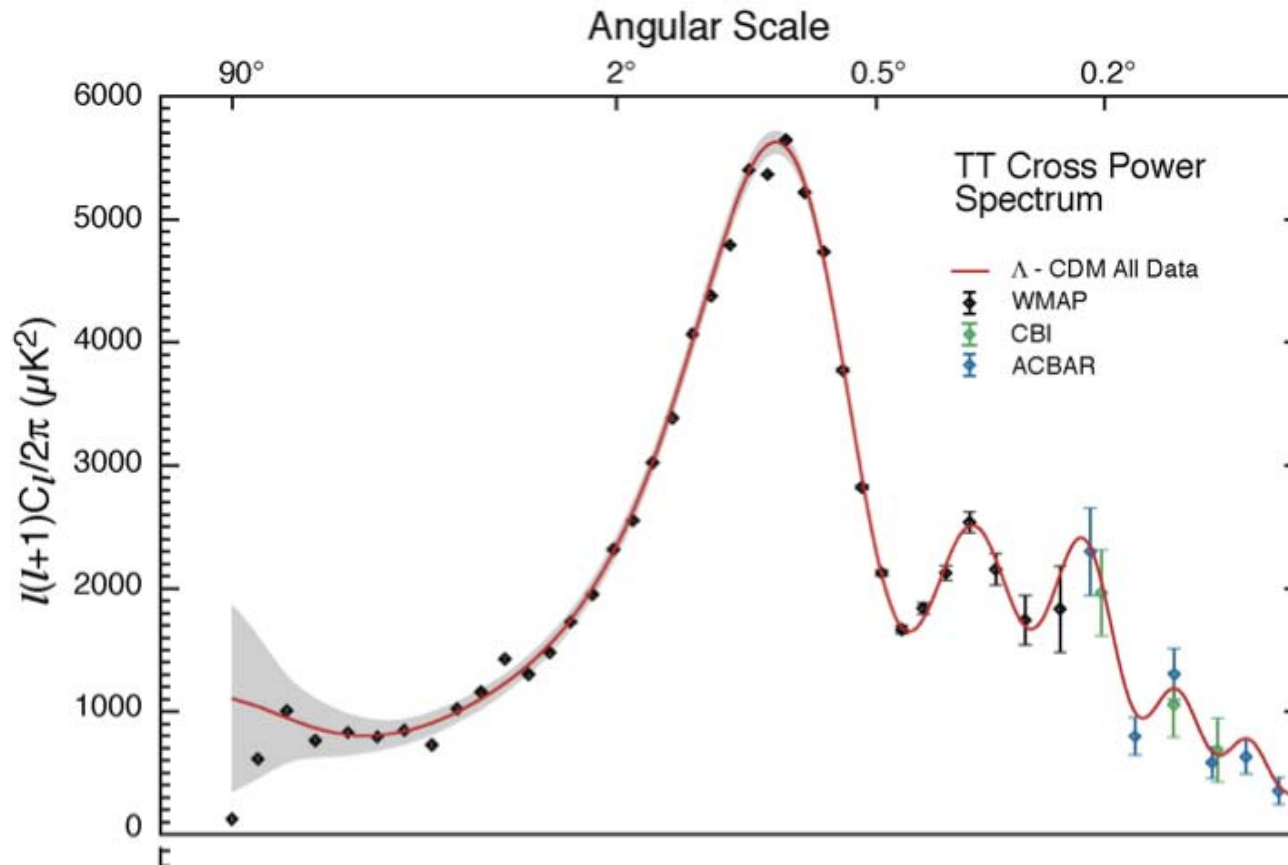


# WMAP

## and cosmic microwave background anisotropy

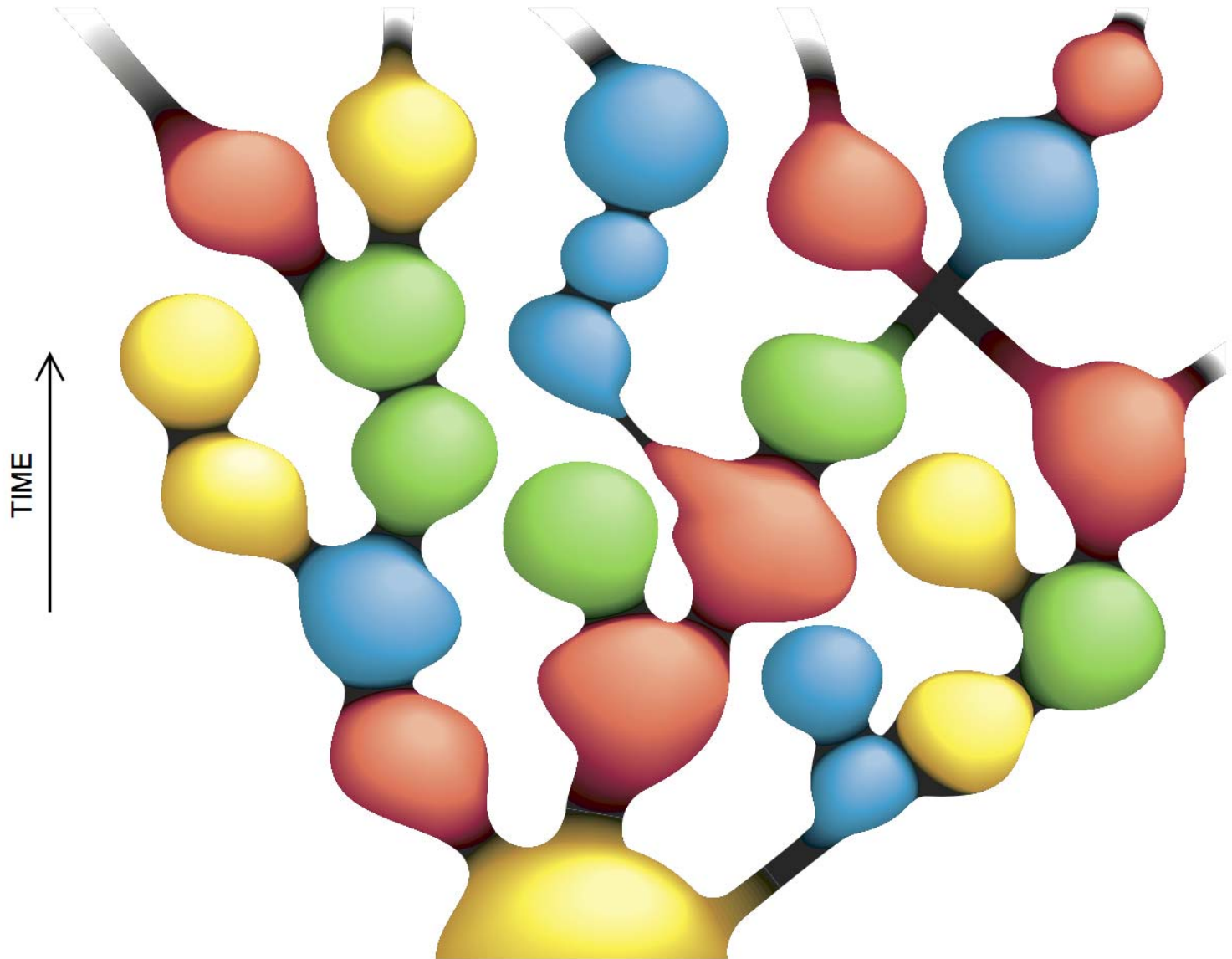
Black dots - experimental results.

Red line - predictions of inflationary theory



- Es ist möglich die internen Dimensionen zu stabilisieren und ein beschleunigendes Universum mit diesem Modell zu erzeugen.
- Unser Teil des Universums wird irgendwann zerfallen und zehndimensional werden – aber erst in  $10^{10^{120}}$  Jahren
- Vacuum Stabilisierung kann auf  $10^{100} - 10^{1000}$  verschiedene Arten erreicht werden. Das bedeutet, dass die potentielle Energie der Stringtheorie  $10^{100} - 10^{1000}$  Minima haben könnte wo wir (oder jemand anders) das Leben genießen kann...

# Self-reproducing Inflationary Universe



# String Theory Landscape

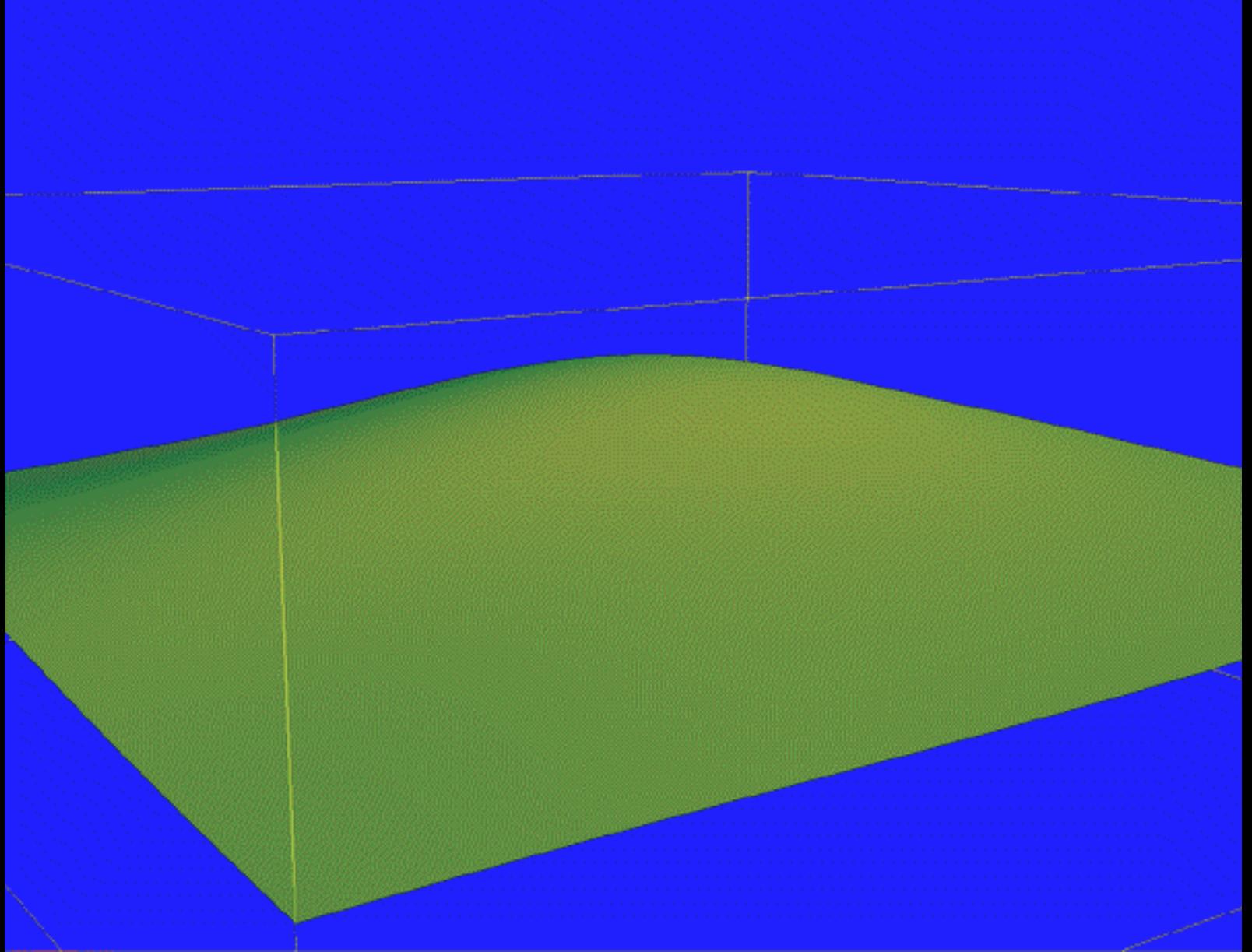


Perhaps  $10^{100} - 10^{1000}$   
different minima

Lerche, Lust, Schellekens 1987

Bousso, Polchinski; Susskind; Douglas, Denef,...







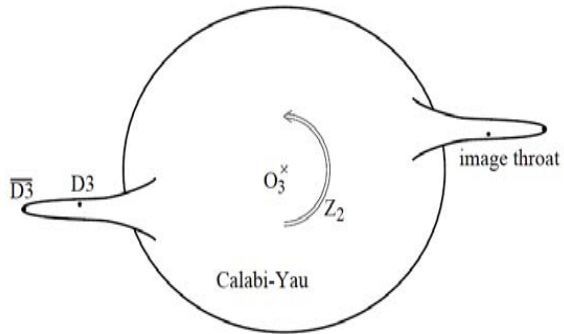


# Zwei Typen String-Inflations-Modelle

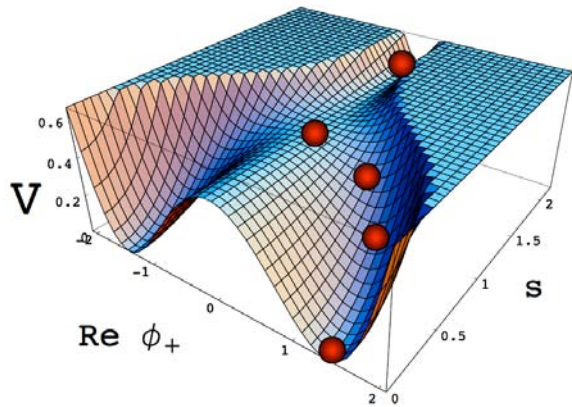
- **Moduli Inflation.** Die einfachste Klasse der Modelle. Benutzt nur die Felder die ohnehin schon im KKLT Modell vorhanden sind.
- **Brane inflation.** Das Inflations-Feld entspricht der Entfernung zwischen den Branen im Calabi-Yau Raum. Historisch gesehen, war dies die erste Klasse der String-Inflations-Modelle.

Die Original Idee stammt Dvali und Tye, 1998

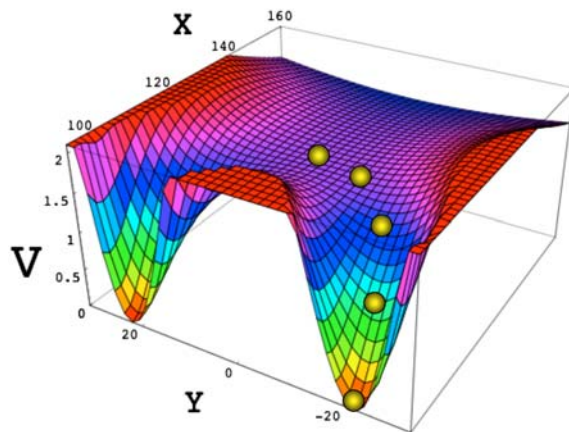
# Inflation in string theory



KKLMMT brane-anti-brane inflation



D3/D7 brane inflation



Racetrack modular inflation

DBI inflation (non-minimal kinetic terms)





# Universum & Multiversen



# *Maßarbeit im Universum*

- *Warum ist unser Universum abgestimmt für Leben?*
- *Was sind mögliche Erklärungen dafür?*



## 1. Hypothese des Zufalls:

„Das Universum ist eben so und braucht keine weitere Erklärung.“

## 2. Hypothese des logischen Notwendigkeit:

„Es muss ja so gewesen ein, sonst würden wir nicht existieren.“

## 3. Hypothese der Maßarbeit:

„Es existiert eine endgültige fundamentale Theorie, welche die Feinabstimmung erklären kann. Wir kennen diese heute nur noch nicht.“

## 4. Multiversum-Theorie:

„Es gibt unendlich viele unterschiedliche Universen. Wir leben in einem Universum, das lebensfreundlich ist, während viele andere Universen steril sind.“

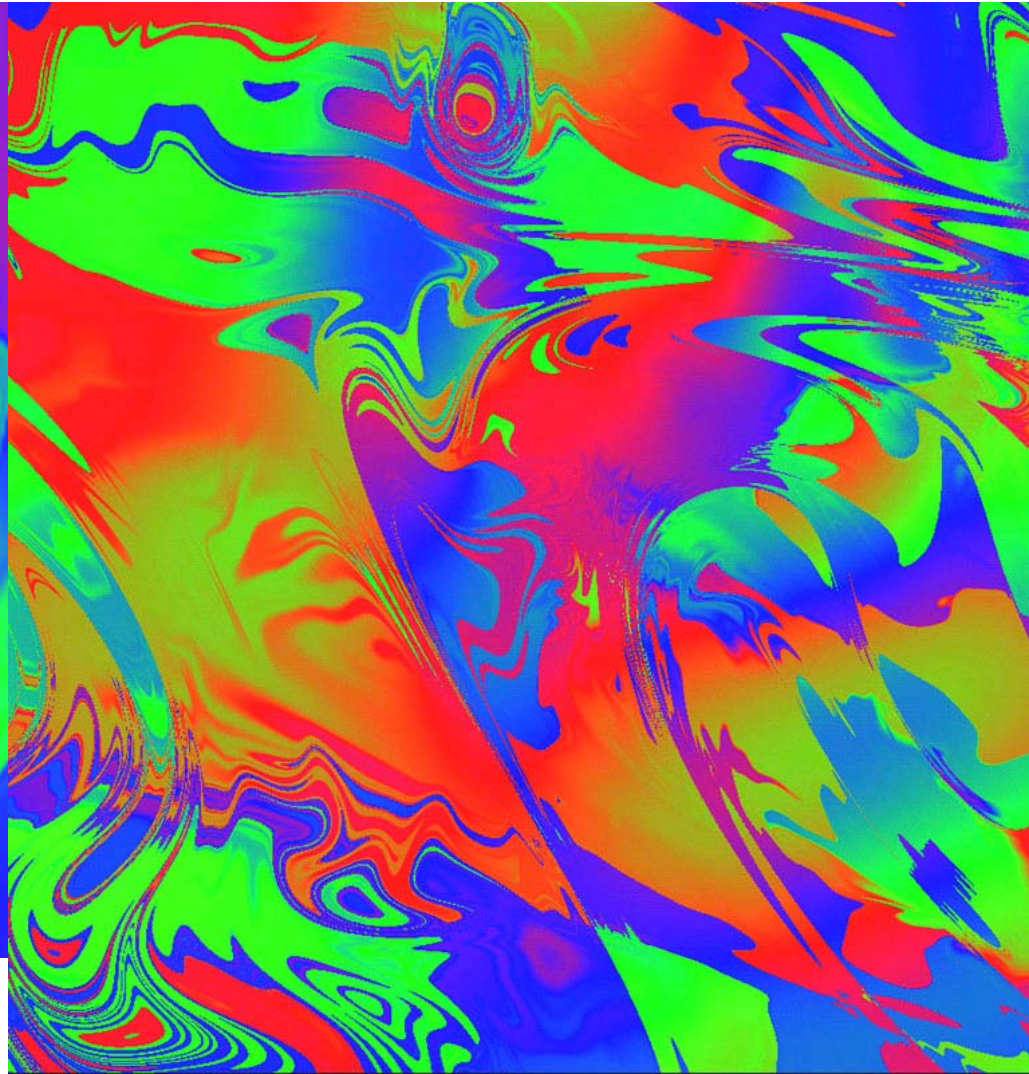
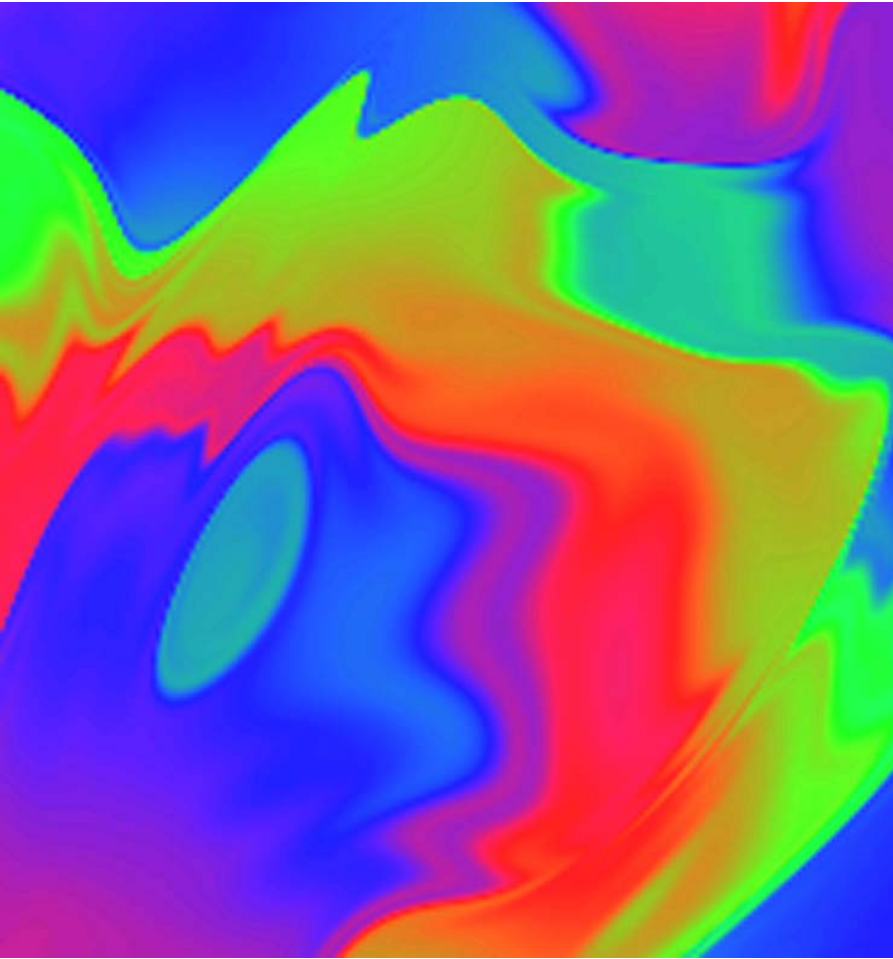
## 5. „Intelligent Design“:

„Es gibt einen Schöpfer.“






# Kandinsky Universen



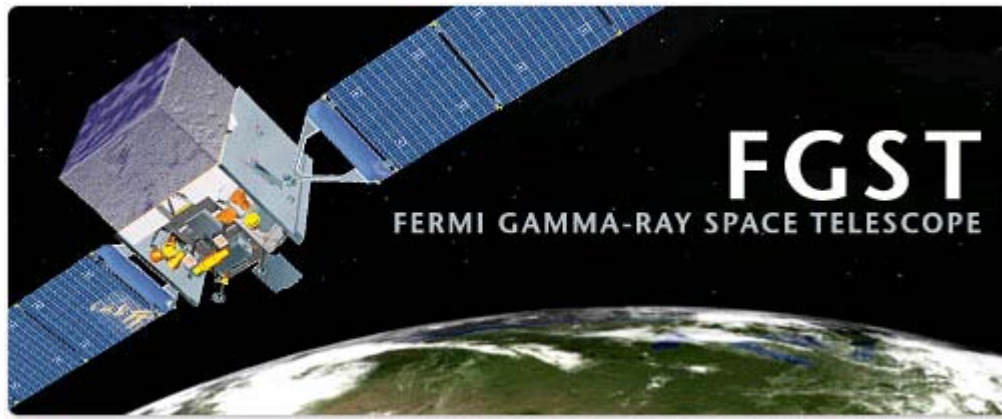




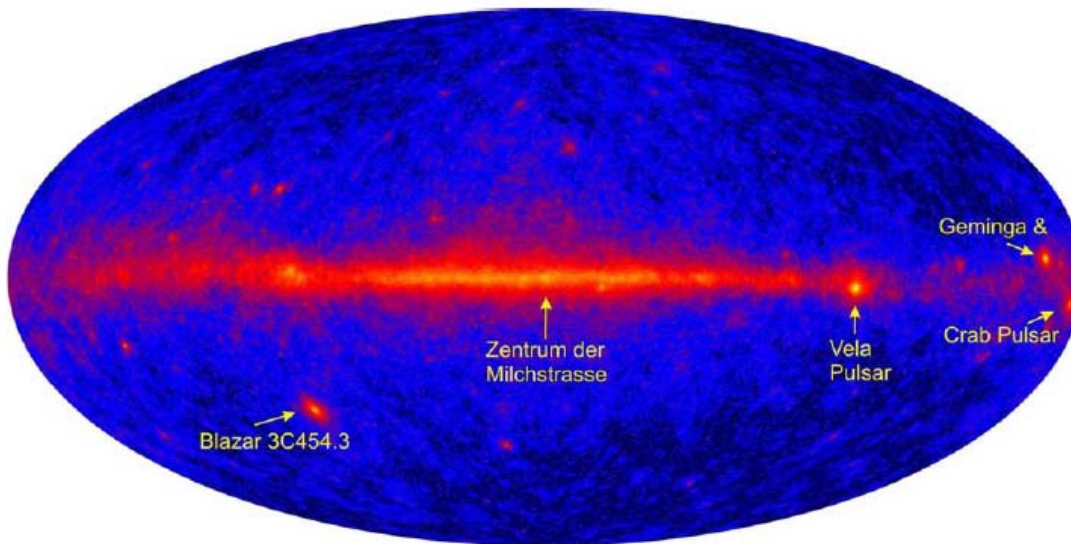
GLAST = Fermi



# GLAST = FERMI

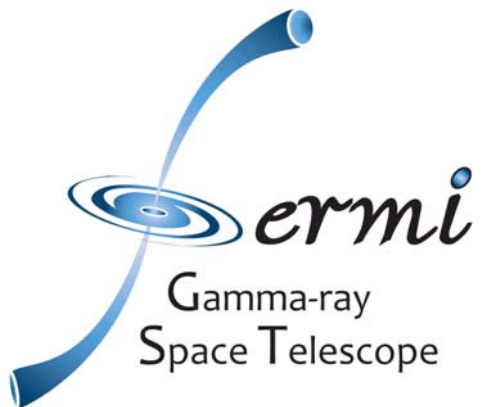
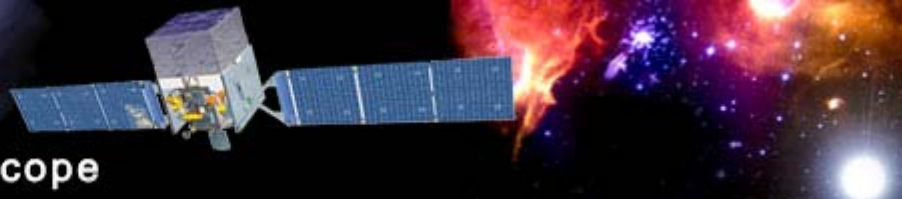


- <http://www.n2yo.com/?s=33053> gibt den momentanen Aufenthaltsort über der Erde an – live - **REAL TIME SATELLITE TRACKING**

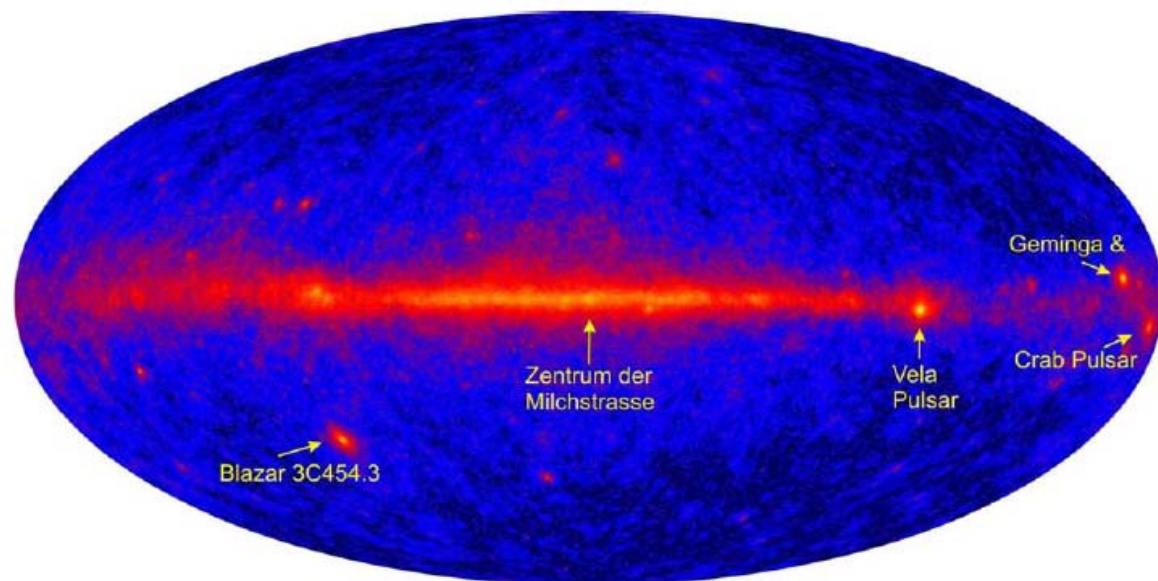
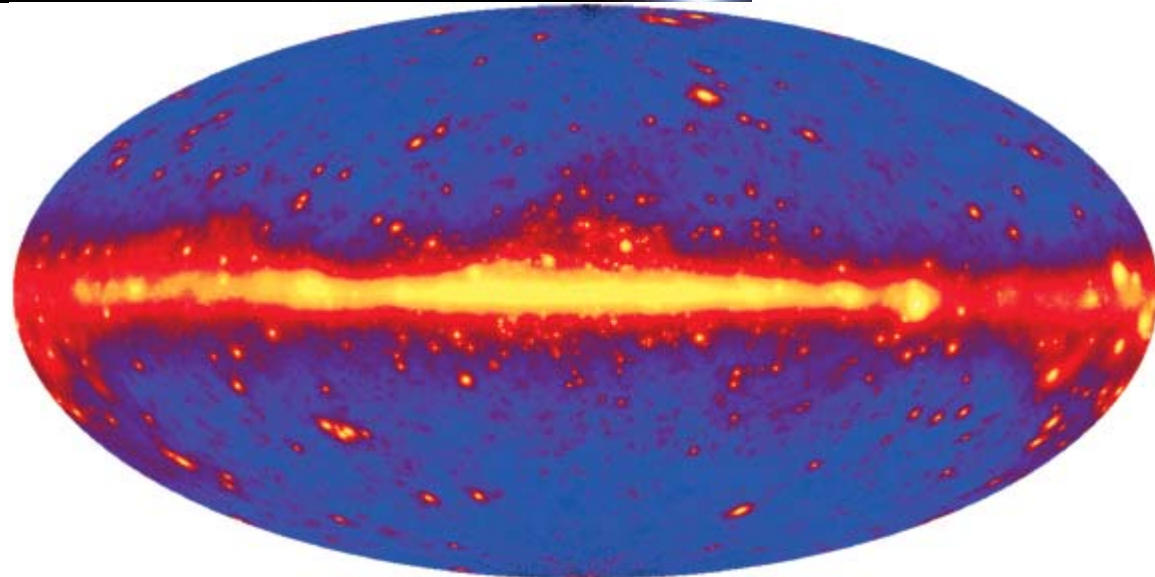


# Fermi


Gamma-ray Space Telescope



- Offizielles Logo



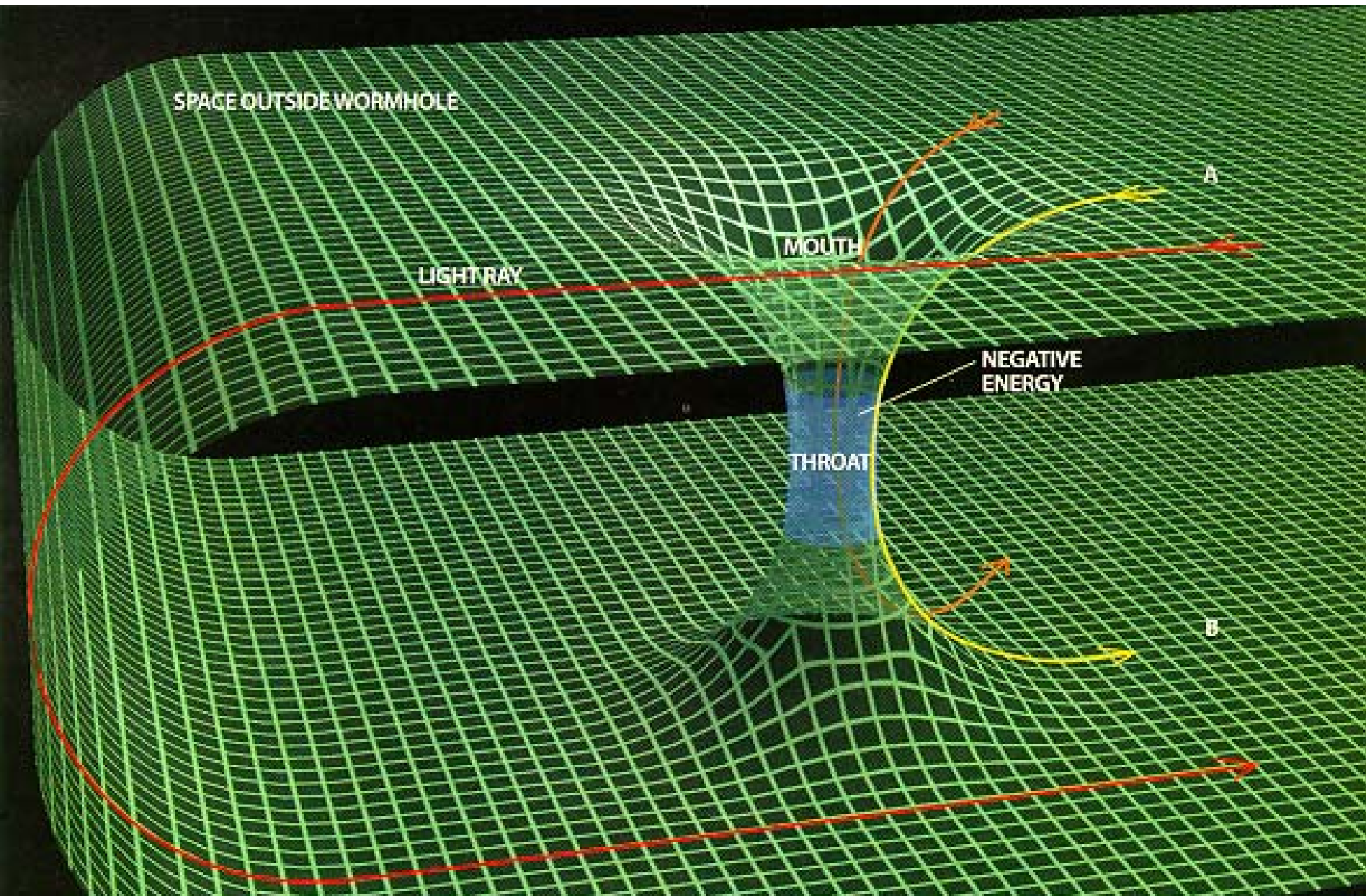




# Wurmlöcher & Schwarze Löcher



# Wurmlöcher



- **Wurmlöcher:** Systeme aus einem Schwarzen und einem Weißen Loch – spekulativ
- Weißes Loch: das Ende eines Wurmlochs, Materie und Strahlung treten aus, sichtbare Singularität; noch nicht beobachtet
- Wurmlöcher sind theoretische Gebilde, ergeben sich möglicherweise aus speziellen Lösungen (Kruskal-Lösungen) der Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie
- Name Wurmloch aus Analogie mit einem Wurm, der sich durch einen Apfel hindurch frisst – er verbindet die zwei Seiten desselben Raums (der Oberfläche) durch einen Tunnel: Wurmloch verbindet zwei Orte im Universum oder zwei parallele Raumzeiten („Universen“) miteinander
- Erstmals 1935 von Einstein und Nathan Rosen beschrieben, daher ursprünglicher Name: Einstein-Rosen-Brücke
- Um den schmalen Raumzeit-Kanal zwischen Schwarzem und Weißem Loch passieren zu können, ist „exotische Materie“ nötig (weist negative Energiedichte auf)

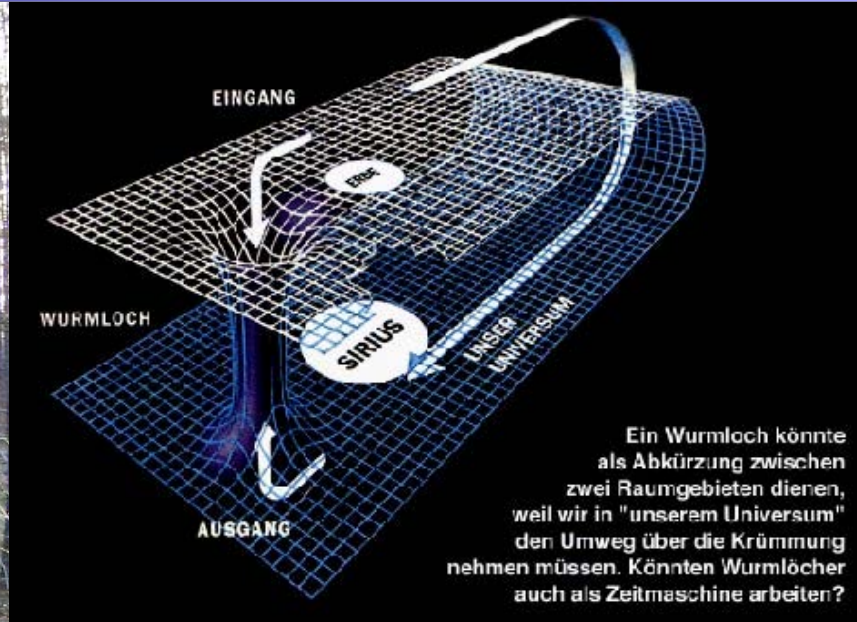


# Wurmlöcher

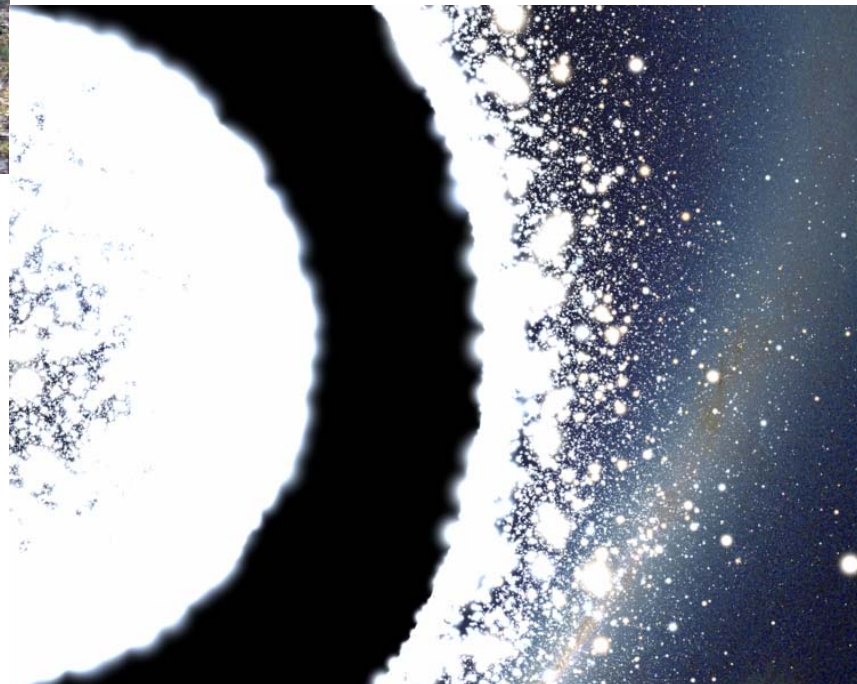
- „Astrophysics of Wormholes“ (Kardashev, Novikov, Shatskiy, 2006): einige Aktive Galaxienkerne oder andere kompakte astrophysikalische Objekte könnten jetzt oder früherere Eingänge zu Wurmlöchern gewesen sein; breites Massenspektrum für astrophysikalische Wurmlöcher ist möglich; Binäre Systeme; Überbleibsel der inflationären Epoche des Universums; Phantom-Materie notwendig, starkes Magnetfeld; Stabilität??
- Keine experimentellen Beweise für Wurmlöcher
- Exotische Materie kann in einem Wurmloch antigravitativ wirken (negative mittlere Energiedichte)
- Für ein Wurmloch mit einem Meter Durchmesser braucht man exotische Materie äquivalent einer Jupitermasse – vielleicht nur mikroskopische Wurmlöcher mit der Größe weniger Atomradien möglich



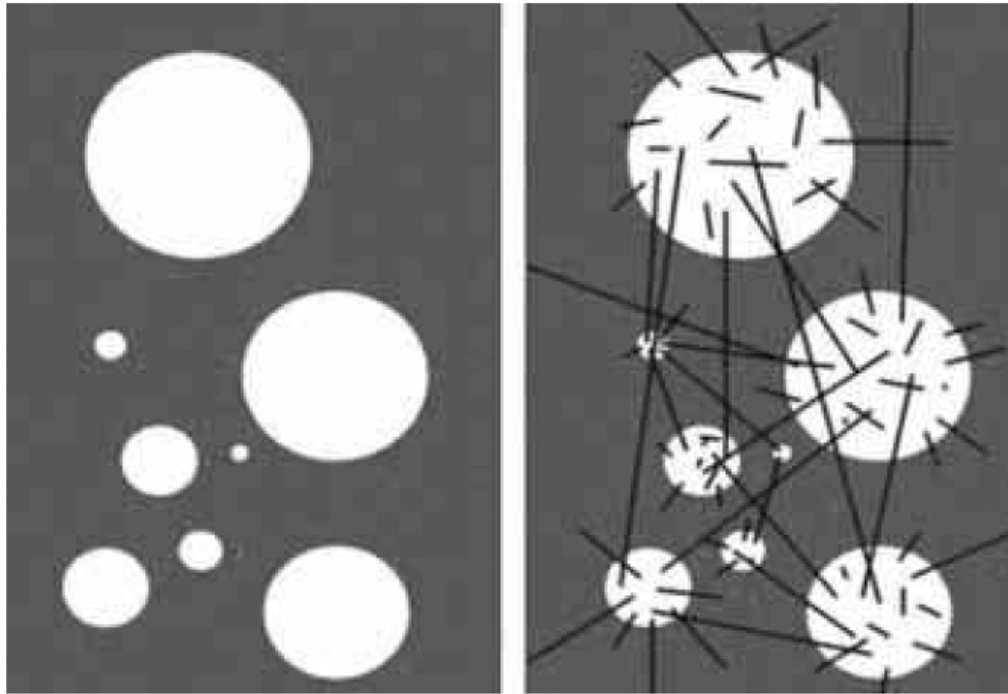
# Wurmlöcher



Ein Wurmloch könnte als Abkürzung zwischen zwei Raumgebieten dienen, weil wir in "unserem Universum" den Umweg über die Krümmung nehmen müssen. Könnten Wurm Löcher auch als Zeitmaschine arbeiten?

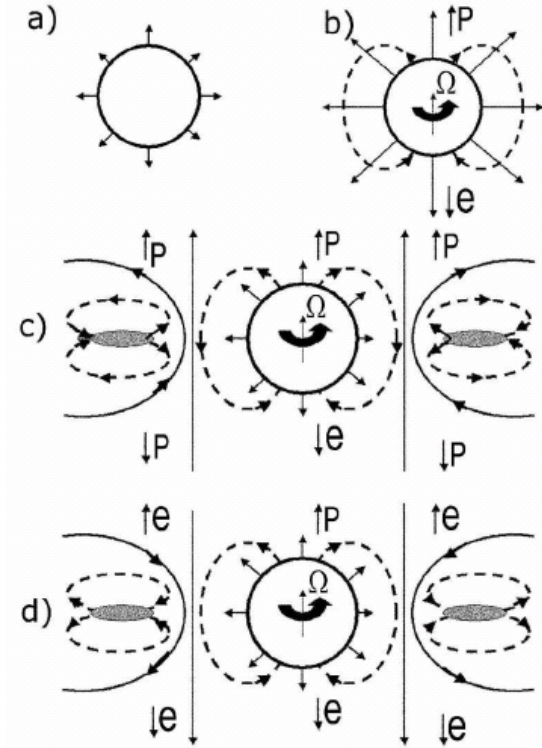


# Wurmlöcher



Modell: chaotische Inflation in einem Multi-Element  
Universum ohne (links) und mit (rechts) Wurmlöchern

Kardashev et al. 2006







# Zeitreisen & Zeitmaschinen

- Was ist Zeit?
- Verschiedene Arten der Zeit:
  - Psychologische Zeit
  - Biologische Zeit
  - Tageszeit
  - Jahreszeit
  - Kosmische Zeit – Raum expandiert mit der Zeit, Hubble-Parameter, kosmologisches Modell, dynamisches, expandierendes Universum: Expansionsradius kann als Zeitparameter dienen - Skalenparameter
- Ist die Zeit absolut?
- Teleskope als Zeitmaschinen
- Relativität der Zeit, SRT, ART
- Reise mit Zeitmaschine im großen Umfang bisher nicht möglich – in sehr geringem Umfang doch: vom Tal in die Berge reisen – Reise in die Zukunft
- Kausalität, 2. Hauptsatz der Thermodynamik, thermodynamischer Zeitpfeil
  - Erzeugung und Vernichtung: Neuinterpretation der klassischen Teilchenbahn; bewegt sich nicht kontinuierlich sondern wird an einem Ort der Bahn vernichtet und an einem anderen Punkt der Bahn erzeugt, die Bahn ist diskret und nicht kontinuierlich; Parametrisierung durch den Zeitentwicklungsoperator
  - Übertragung auf Erzeugung und Vernichtung von Universen?? Multiversen, Viele-Welten-Theorie



- Teilchen, die sich lichtschnell bewegen: Luxonen (Photon, Graviton, Gluon)
- Diese Teilchen „erleben“ wegen ihrer hohen Geschwindigkeit keine Zeit
- Zeitsprünge: verläuft die Zeit kontinuierlich??
  - Stetiger Zeitbegriff geht auf Aristoteles zurück
  - Versuche, die Zeit in der Quantentheorie zu diskretisieren scheiterten
  - Loop-Quantengravitation (dt. Schleifenquantengravitation), folgt, wenn man die Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie mit denjenigen der Quantenmechanik vereint, Konsequenzen: Granulation der Raumzeit und Quantisierung der Zeit in Zeitquanten; Raumzeit ist gekörnt, jedes Korn mißt  $10^{-33}\text{cm}$ ; ein Zeitquant hat eine Länge, vergleichbar mit der Planck-Zeit  $10^{-43}\text{s}$ ; Zeit ist gemäß der Loop-Quantengravitation kein kontinuierlicher Zeitfluss, sondern sie besteht aus Zeitsprüngen: ein 100m-Läufer bewegt sich schnappschussartig vom Start ins Ziel, ein Elementarteilchen im Teilchenbeschleuniger springt auf der Beschleunigungsstrecke auf Planck-Längen in Planck-Zeiten (Frosch!!); Pointilismus
- Kann man auf den Zeitbegriff in der modernen Physik ganz verzichten??
- Der Ablauf der Zeit ist überall anders! Jedes Individuum hat sein eigenes, ganz persönliches Zeitmaß



E-mail: [sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)

Internet: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/>

Tel.: 0228 525 280

Vorlesungs-Information: Kommentiertes Vorlesungsverzeichnis, Universität Heidelberg  
<http://www.kip.uni-heidelberg.de/veranstaltungen/#up>

- 10.10.08: Überblick über die Themen des Semesters
- **24.10.08: Kurze Einführung in die String-Theorie**
- 07.11.08: Urknall & Inflation
- 21.11.08: Universum & Multiversen
- 05.12.08: GLAST
- 19.12.08: ....

## *Weihnachtsferien*

- 09.01.09: Wurmlöcher und Schwarze Löcher
- 23.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen