

Der Ursprung von Raum und Zeit

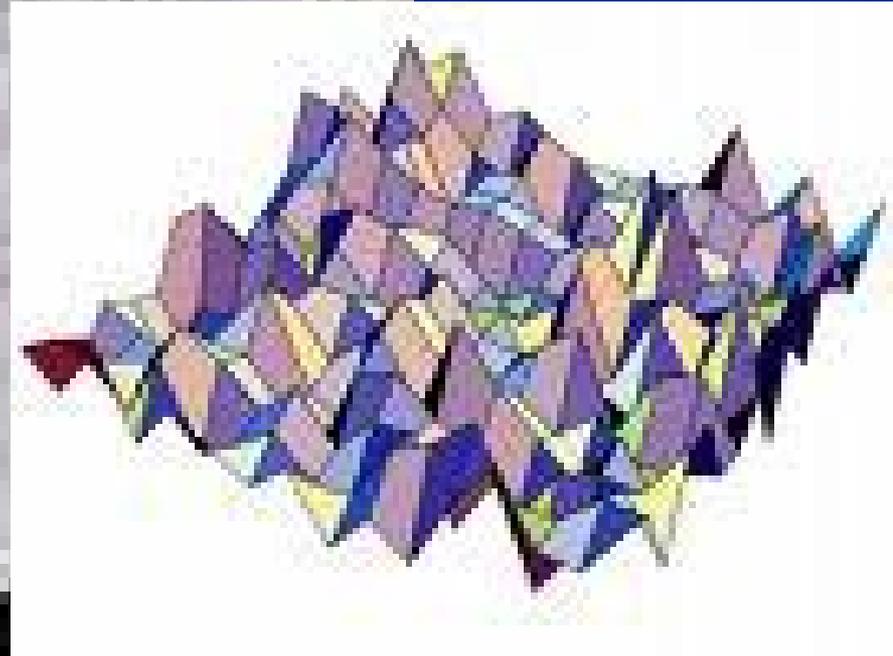


Die großen Fragen

- Woraus besteht das Universum ?
- Wie sah das Universum am Anfang aus ?
Plasma ! und vorher ?
- Woraus haben sich Strukturen entwickelt ?
- Gibt es Leben und Intelligenz in anderen Regionen des Universums ?
- Woher kommen Materie und Strahlung ?
- **Was war vor dem Urknall ?**
- Was wird aus unserem Universum in der Zukunft ?
- Was liegt außerhalb unseres Horizonts ?

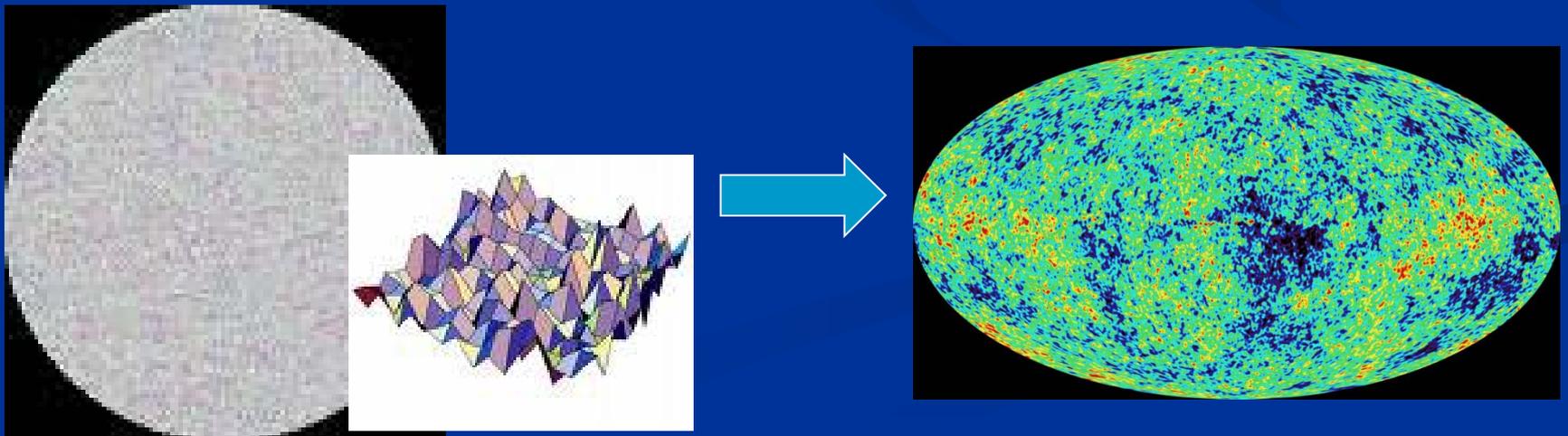
Der Urknall

Wie unser Universum aus fast
Nichts entstand



Inflationäres Universum

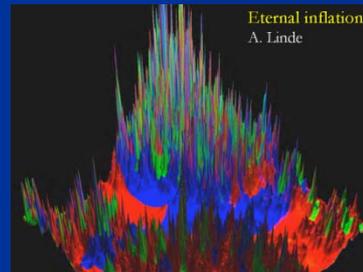
- Explosionsartige Expansion
ca 10^{-30} - 10^{-40} Sekunden ab
- Entstehung der primordialen Fluktuationen
aus Quantenfluktuationen



Was ist Ursache der Inflation ?

Spekulative Physik ..

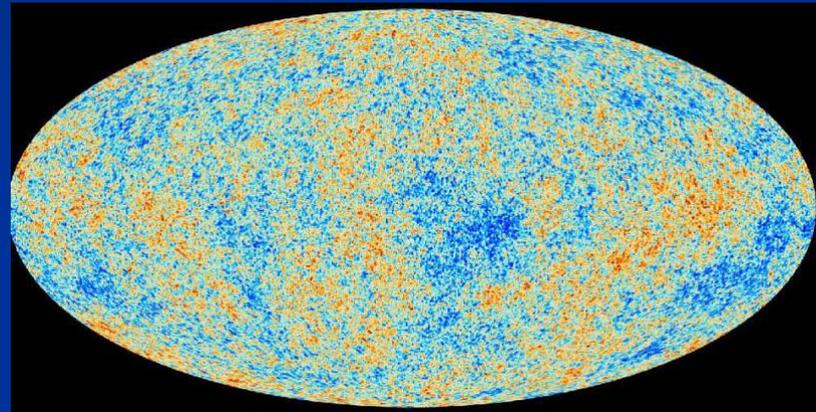
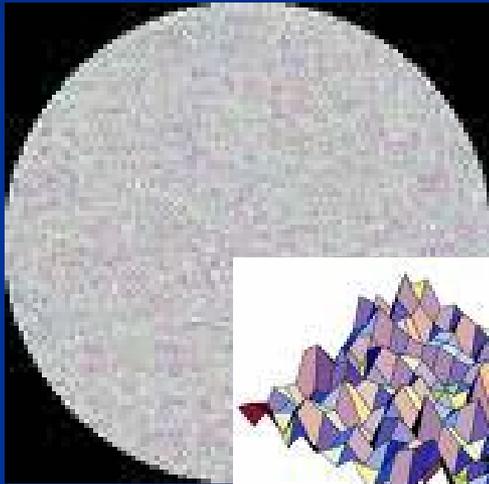
- Zusätzliche Raumdimensionen
- “Kosmologie vor dem Urknall”
- Superstringtheorien
- Multiversum
- Kosmon - Inflation



Chancen der Verifizierung ?

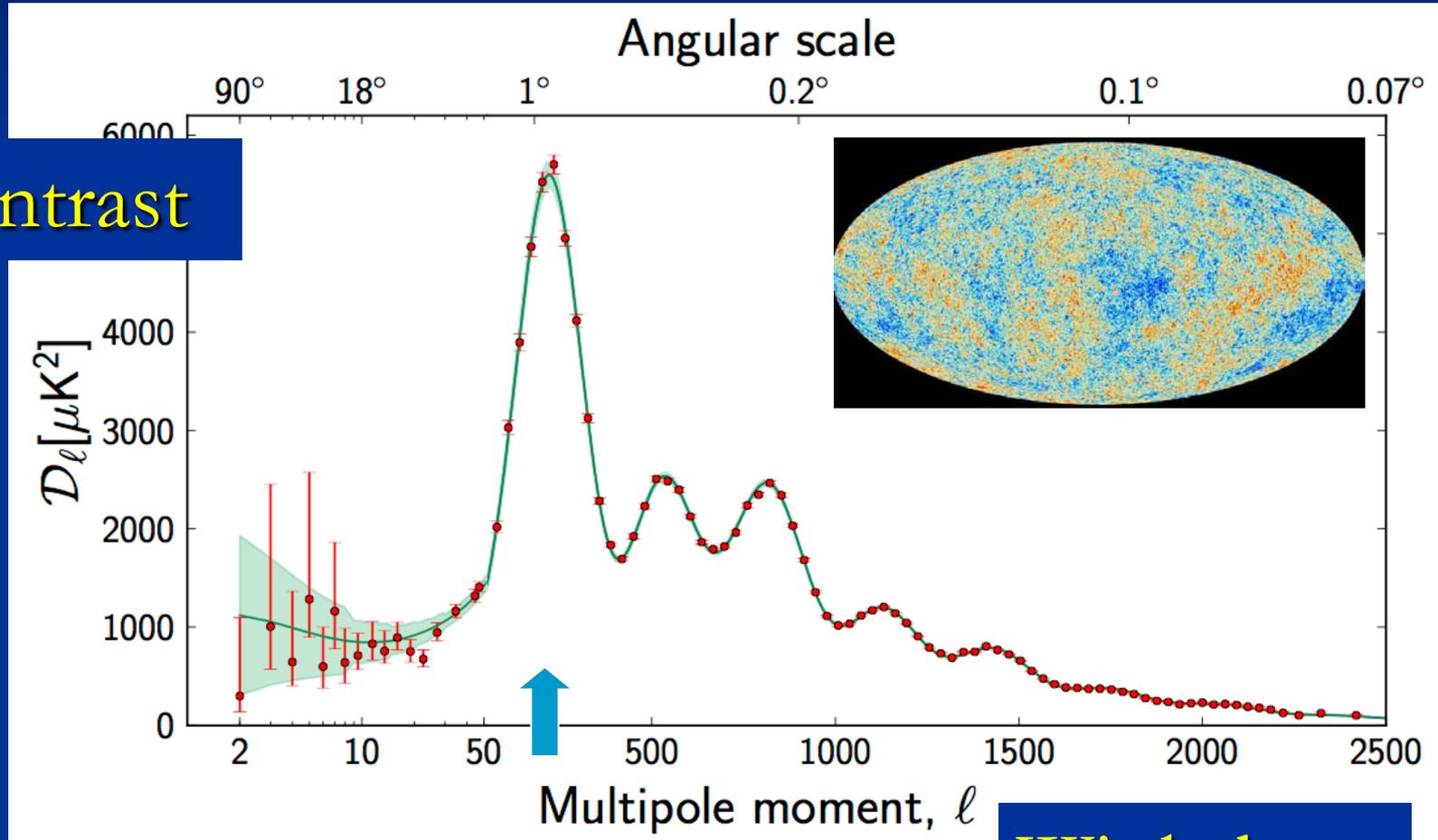
- Es fehlt vereinheitlichte Theorie aller Wechselwirkungen !
- Dennoch : Beobachtungen geben Aufschluss über extreme frühe Epochen der kosmologischen Entwicklung !

Die Strukturen im Universum sind aus Quantenfluktuationen während des Urknalls entstanden



Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

Kontrast



ca 10 Grad

ca 1 Grad

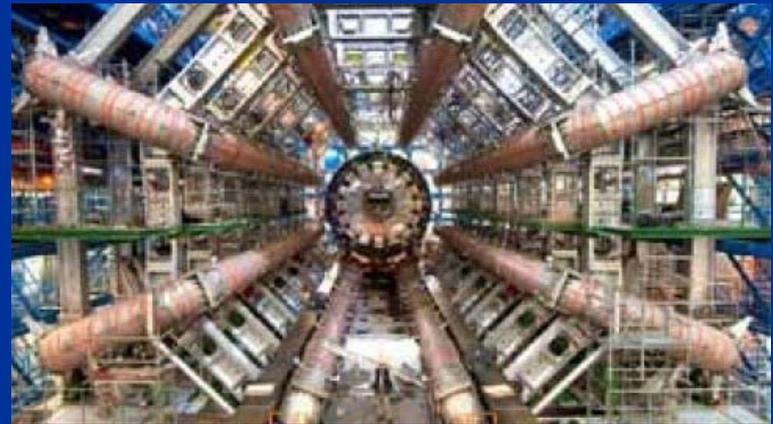
Winkel

Womit beginnt die Inflation ?

Vakuum



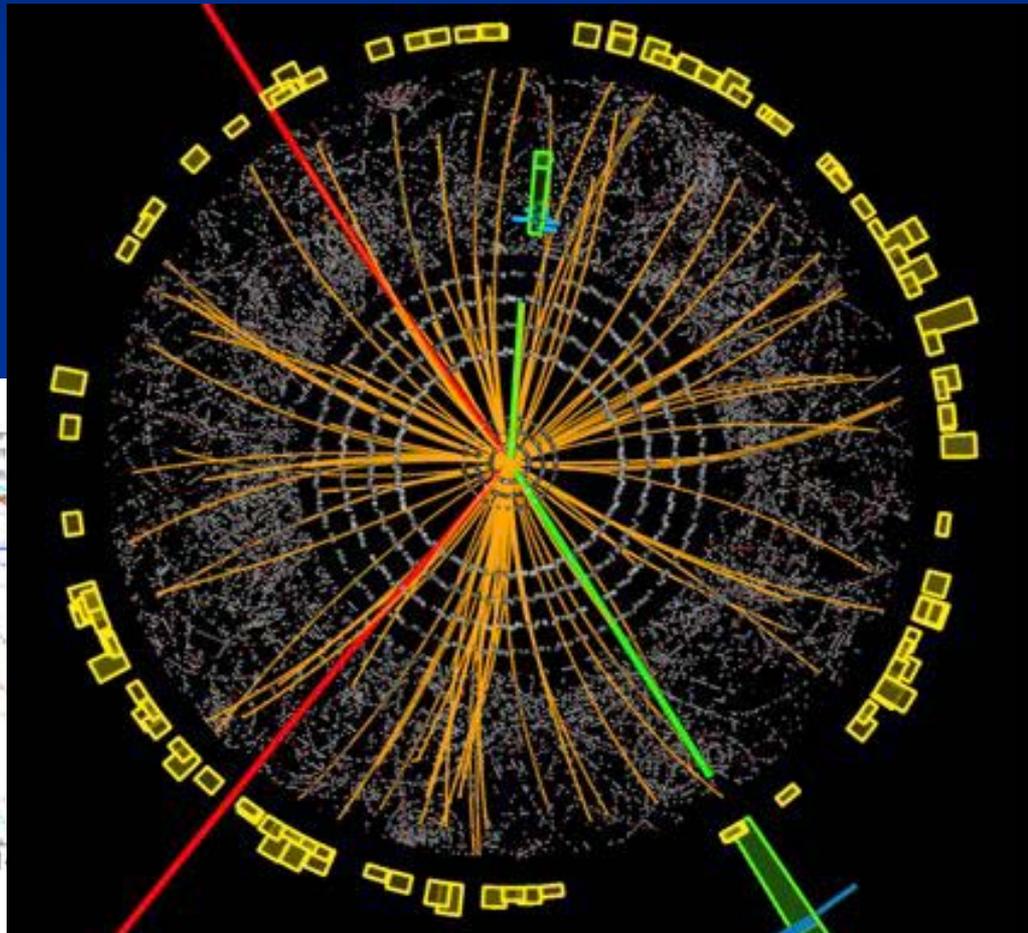
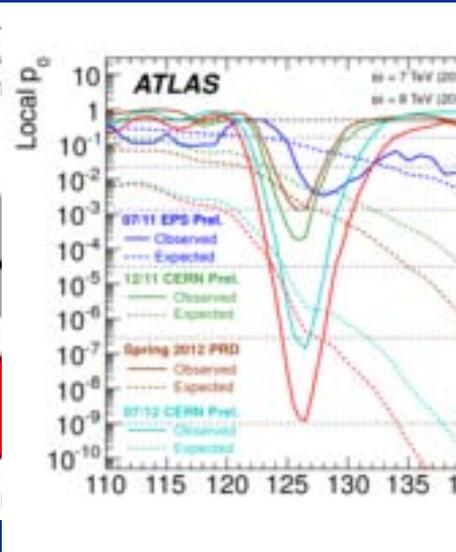
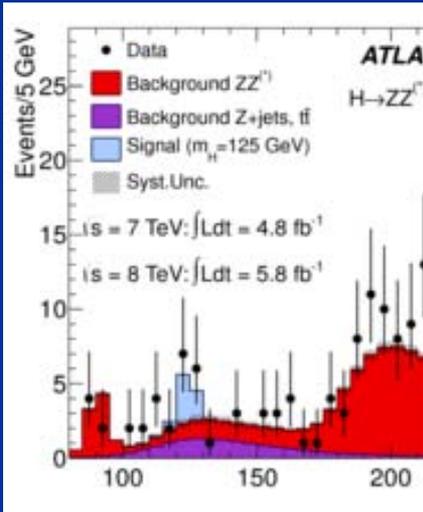
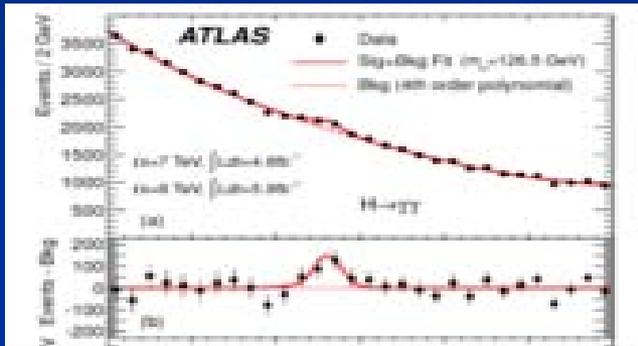
Supraleitung : Photon Masse $m=e \varphi$



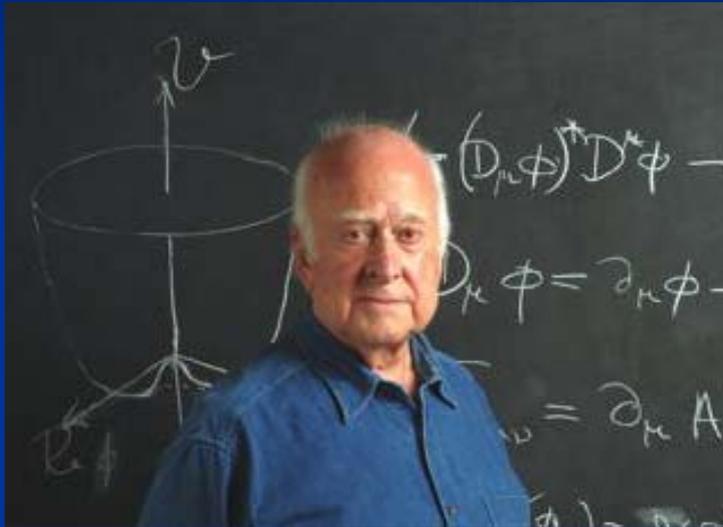
Gesetze hängen vom Zustand der Materie ab

Higgs Boson gefunden !

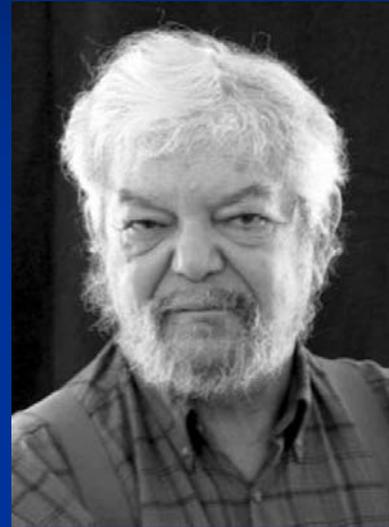
Masse 125-126 GeV



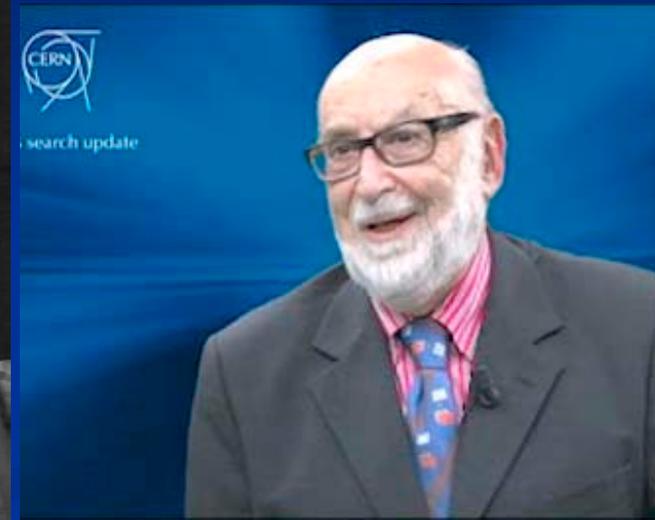
Brout-Englert-Higgs Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung bestätigt



Higgs



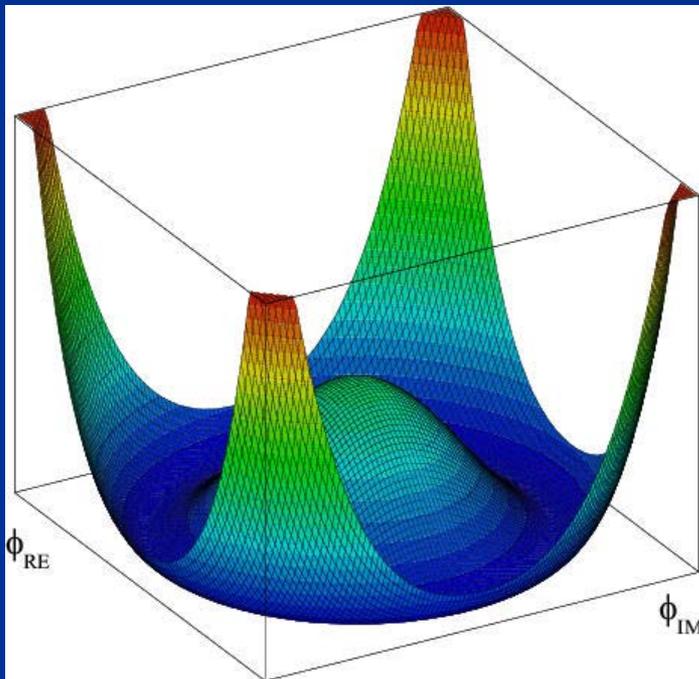
Brout



Englert

Gesetze hängen vom Vakuum ab

Potenzial für Higgs-Skalar



$$\mu^2 > 0$$

$$\begin{aligned} V(\varphi) &= -\mu^2 \varphi^\dagger \varphi + \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 \\ &= \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.} \end{aligned}$$

φ : komplexes
Feld $\varphi^\dagger = \varphi^*$

Standard-Modell der Elementarteilchen-Physik :

Elektroschwache Eichsymmetrie ist durch
Erwartungswert des Higgs-Skalars spontan
gebrochen.

Und wenn dieser früher einen anderen Wert hatte ?

Kosmologie :

- Universum ist nicht in festem statischen Zustand
- Dynamische Evolution
- Gesetze hängen von der Zeit ab

Restoration der Symmetrie bei hoher Temperatur im frühen Universum

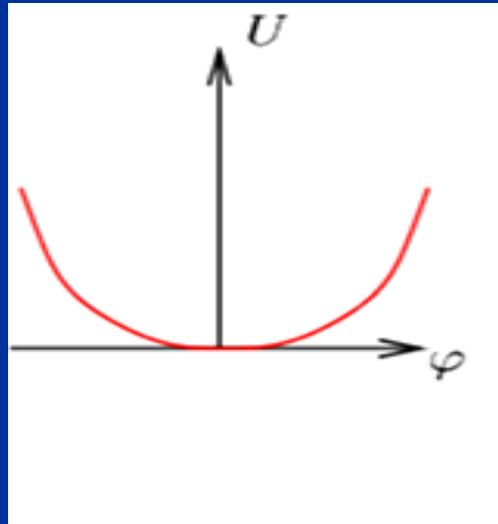
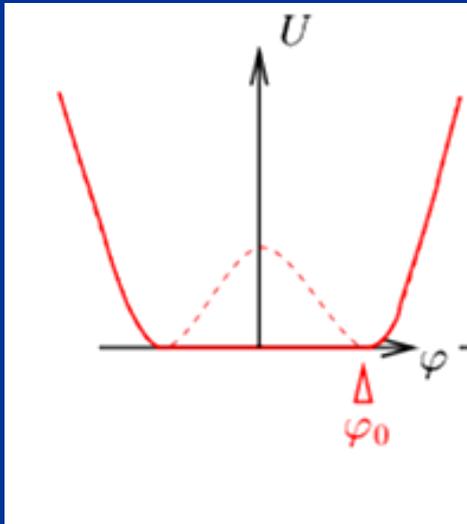
Niedrige T
SSB

$$\langle \varphi \rangle = \varphi_0 \neq 0$$

Hohe T
SYM

$$\langle \varphi \rangle = 0$$

hohe Temperatur :
Weniger Ordnung
Mehr Symmetrie



Bespiel:
Magnete

Im heissen Plasma
des frühen Universums :

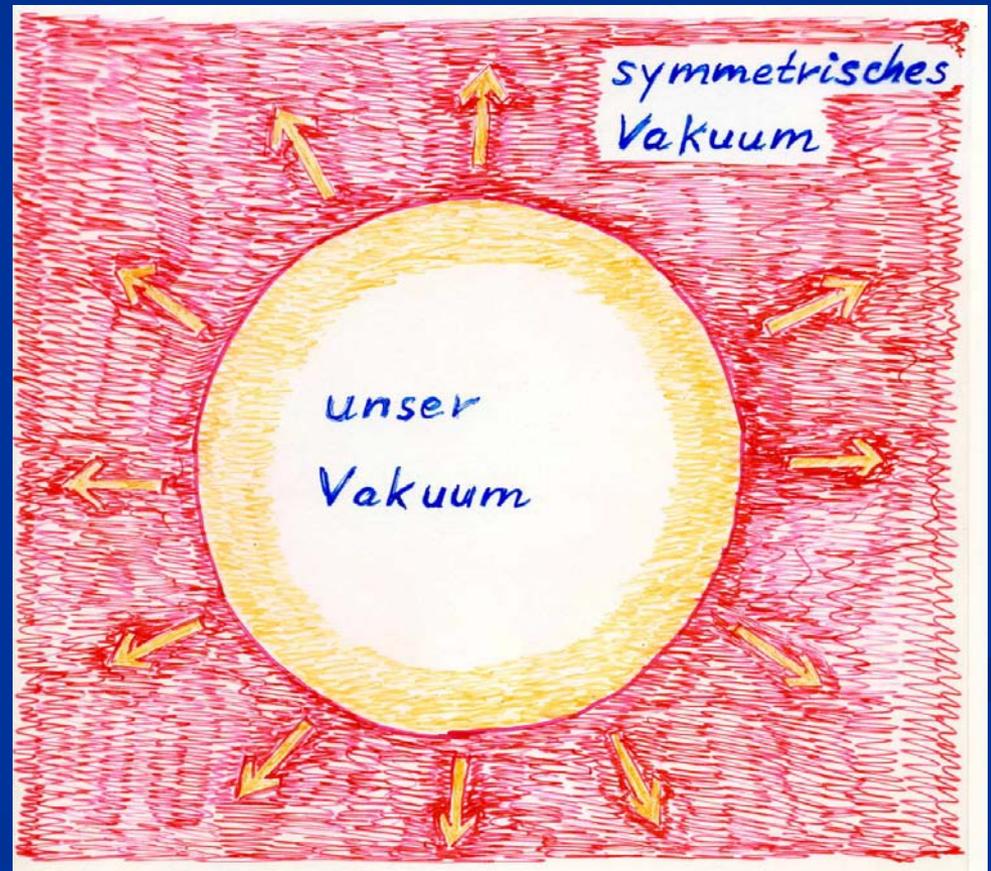
**Gleiche Masse von Elektron
und Myon !**

**Ähnliche Stärke der
elektromagnetischen and schwachen
Wechselwirkung**

Elektroschwacher Phasenübergang im frühen Universum

10^{-12} s nach Urknall

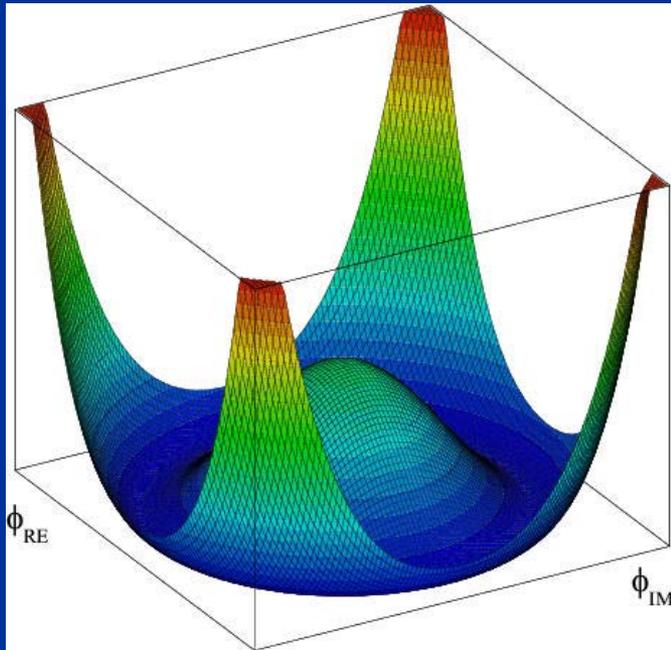
crossover



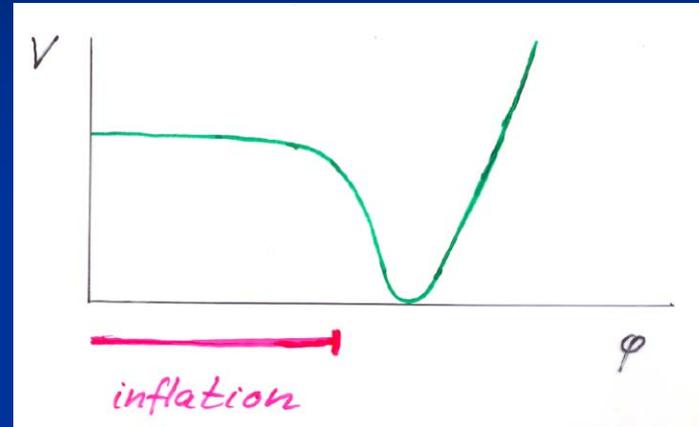
Zeitliche Änderung von Kopplungskonstanten

Wie stark ist die **gegenwärtige** Änderung
der Kopplungskonstanten ?

(1) Das Vakuum ist nicht leer



Higgs Potenzial



Inflaton
Potenzial

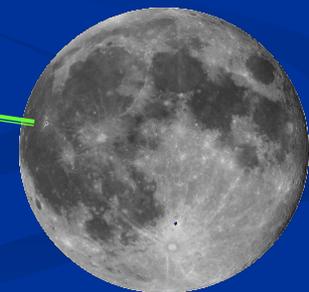
$$\rho = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2$$

Dynamische
Dunkle Energie

Raum und Zeit

Ist Raum einfach da ?

- Eigenschaften des Raums werden durch physikalische Eigenschaften bestimmt
- Wie lange braucht ein Lichtstrahl von Mainz nach Wiesbaden oder zum Mond ?



Ist Raum einfach da ?

- Wieviele Atome liegen in einem Kristall zwischen zwei Punkten A und B ?



- Es gibt keinen „leeren Raum“ außerhalb physikalischer Prozesse



(2) Raum und Zeit sind
Eigenschaften des Materiellen

In Abwesenheit von Teilchen :
Raum und Zeit sind
Eigenschaften des Vakuums

Raum und Zeit sind *Eigenschaften* des Materiellen

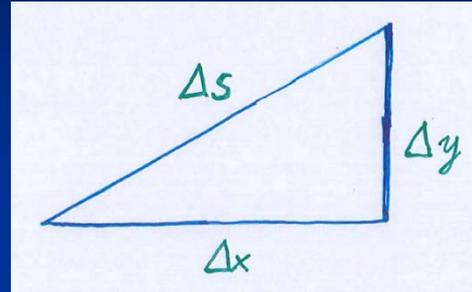
- Raum ist nicht „einfach da“ und wir bewegen uns in ihm.
- Raum ist nicht starr.
- Zeit ist nicht „einfach da“ und starr.
- Wo nichts Materielles ist , gibt es auch keinen Raum und keine Zeit !
- „Außerhalb des Universums“ ist nicht sinnvoll.
- „Vor dem Universum“ ist nicht sinnvoll.

Metrik

Abstand und Metrik

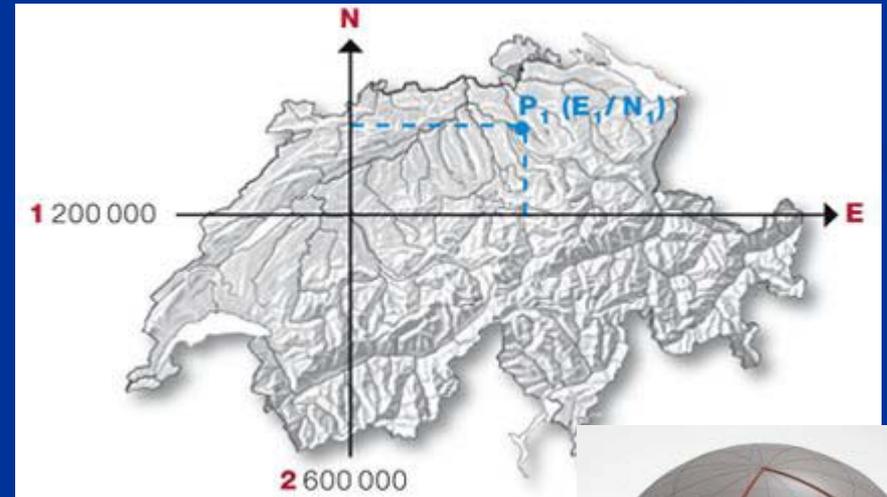
Pythagoras :

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$



Riemann Geometrie :

$$ds^2 = g_{11} dx^2 + g_{22} dy^2 + g_{12} dx dy$$



Metrik $g_{\mu\nu}$

Einheitlicher Raum für Ort und Zeit : Raumzeit

Vierer - Vektor

$$x^\mu$$

$$x^0 = t$$

$$x^1 = x$$

$$x^2 = y$$

$$x^3 = z$$

Abstand und Metrik

Riemann Geometrie :



$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Metrik $g_{\mu\nu}$

Gravitations - Feld: 10 Größen

$$g_{\mu\nu}(t, x, y, z)$$

$$g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$$

$$g_{\mu\nu} : (g_{00}, g_{01}, g_{02}, g_{03}, g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{22}, g_{23}, g_{33})$$

Matrix :

$$g_{\mu\nu} : \begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ g_{10} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{20} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{30} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix}$$

Das Gravitationsfeld ist die Metrik der Raumzeit

Geometrie wird dynamisch !

Metrik des Universums homogen und isotrop

$$g_{\mu\nu} : \begin{pmatrix} -1, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & a(t), & 0, & 0 \\ 0, & 0, & a(t), & 0 \\ 0, & 0, & 0, & a(t) \end{pmatrix}$$

Räumlicher Abstand ist proportional $a(t)$
Ausdehnung des Raums wenn $a(t)$ wächst

Kein Raum , keine Zeit ohne Metrik

$g_{\mu\nu}=0$: alle Abstände sind Null

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$a=0$: Urknall Singularität ?

$$g_{\mu\nu} : \begin{pmatrix} -1, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & a(t), & 0, & 0 \\ 0, & 0, & a(t), & 0 \\ 0, & 0, & 0, & a(t) \end{pmatrix}$$

(3) Die Eigenschaften von Raumzeit werden durch metrisches Feld beschrieben



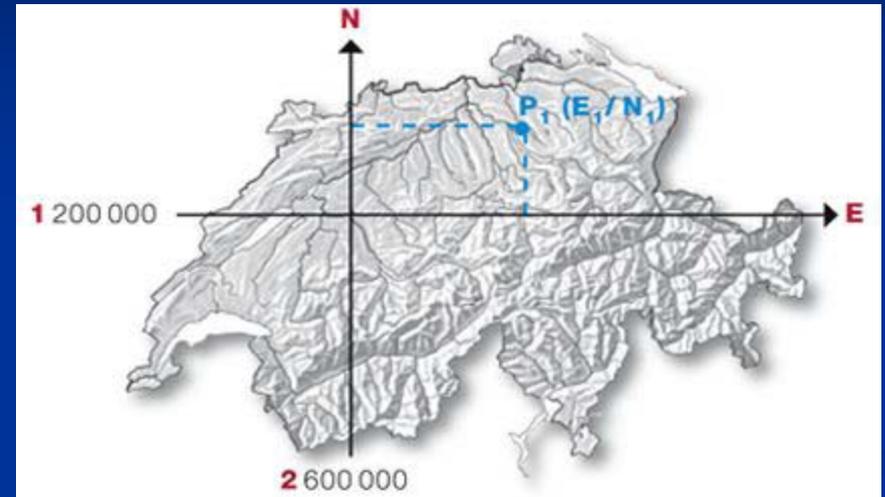
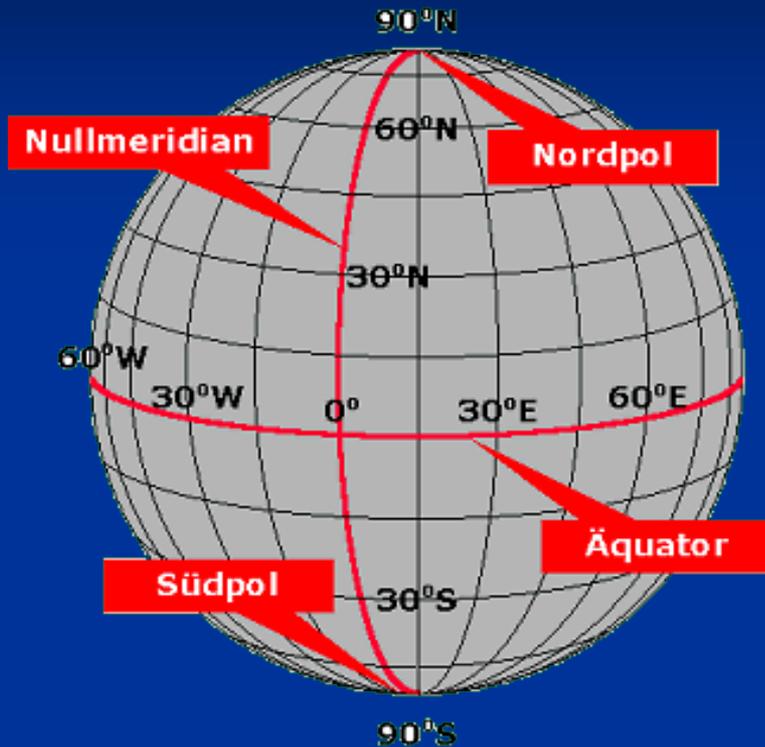
$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Allgemeine Relativitätstheorie

Was steckt hinter der Einstein Gleichung ?

- Allgemeine Relativitätstheorie
- Invarianz unter Änderung der Koordinaten
- Symmetrie

Koordinatensystem



$$ds^2 = g_{11} dx^2 + g_{22} dy^2 + g_{12} dx dy$$

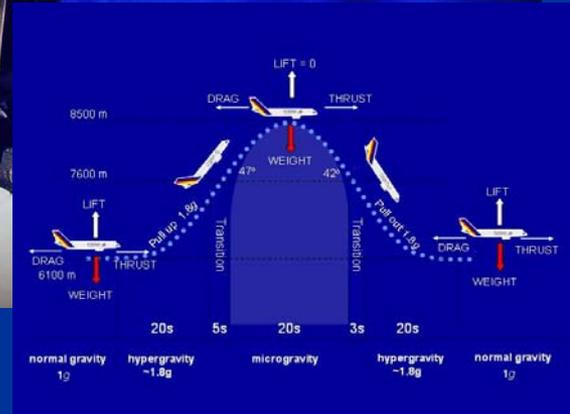
Im Allgemeinen : In verschiedenen Koordinatensystemen könnten Gesetze verschiedene Formen annehmen

Koordinatenwechsel

- In verschiedenen Koordinaten hat die Metrik verschiedene Form
- Metrik muss bei Koordinatenwechsel transformiert werden
- Invarianz unter allgemeinen Koordinatentransformationen : Gesetze haben in allen Koordinatensystemen die gleiche Form
- Symmetrie der allgemeinen Relativitätstheorie

Symmetrie der allgemeinen Koordinatentransformationen

*Physik ist die Gleiche
in allen lokalen frei fallenden Systemen*



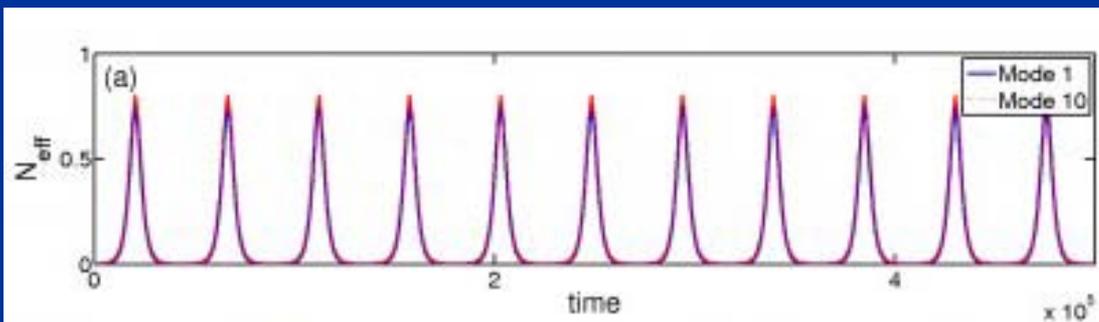
Zeitkoordinate ändert sich bei Koordinatentransformation

$$t' = t - 1/t :$$

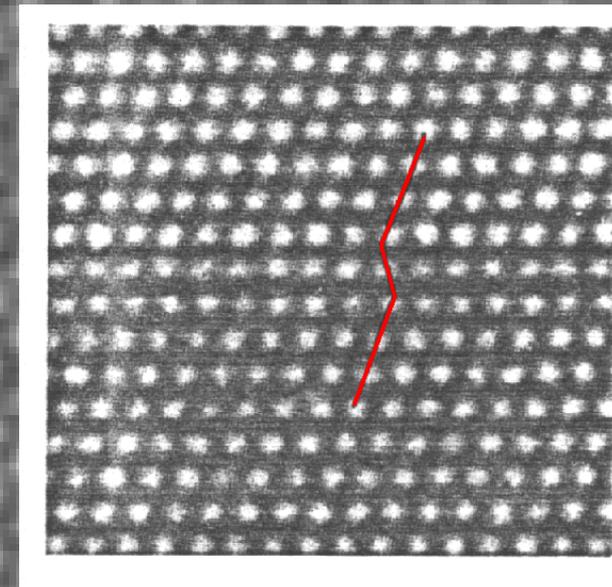
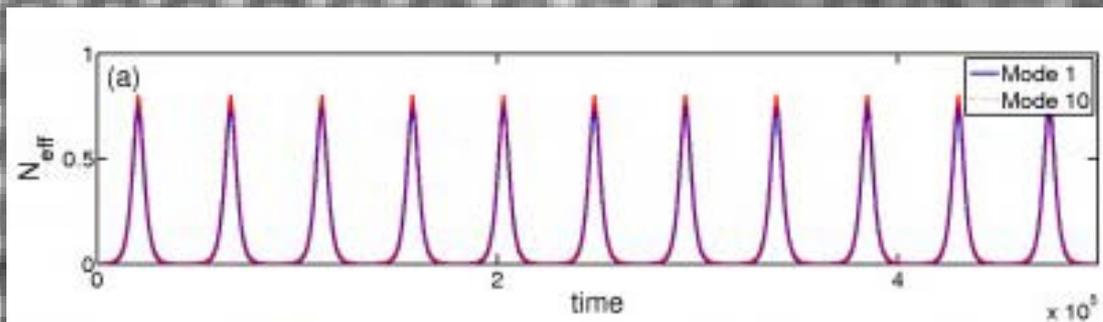
- t geht von Null bis Unendlich
- t' geht von $-$ Unendlich bis $+$ Unendlich

Physikalische Zeit

- Physikalische Zeit muss invariant unter Koordinatentransformationen sein
- Zeitkoordinate \neq physikalische Zeit
- Physikalische Zeit muss durch physikalischen Prozess definiert werden



(4) Zeit und Raum müssen durch physikalische Prozesse definiert werden



*Haben wir gemessen,
dass sich der Raum ausdehnt ?*

Urknall oder Kältestarre ?

- Wissen wir wirklich , ob das Universum sich ausdehnt ?
- Beobachtet : der Abstand zwischen Galaxien, geteilt durch die Größe der Atome , wächst.
- Atome könnten auch kleiner werden...

Verschiedene **Bilder** sind möglich !

- Einfaches Modell mit wachsenden Teilchenmassen : Kosmon und Inflaton sind das gleiche Feld.

NATURE | NEWS

Cosmologist claims Universe may not be expanding
**Particles' changing masses could explain why
distant galaxies appear to be rushing away.**

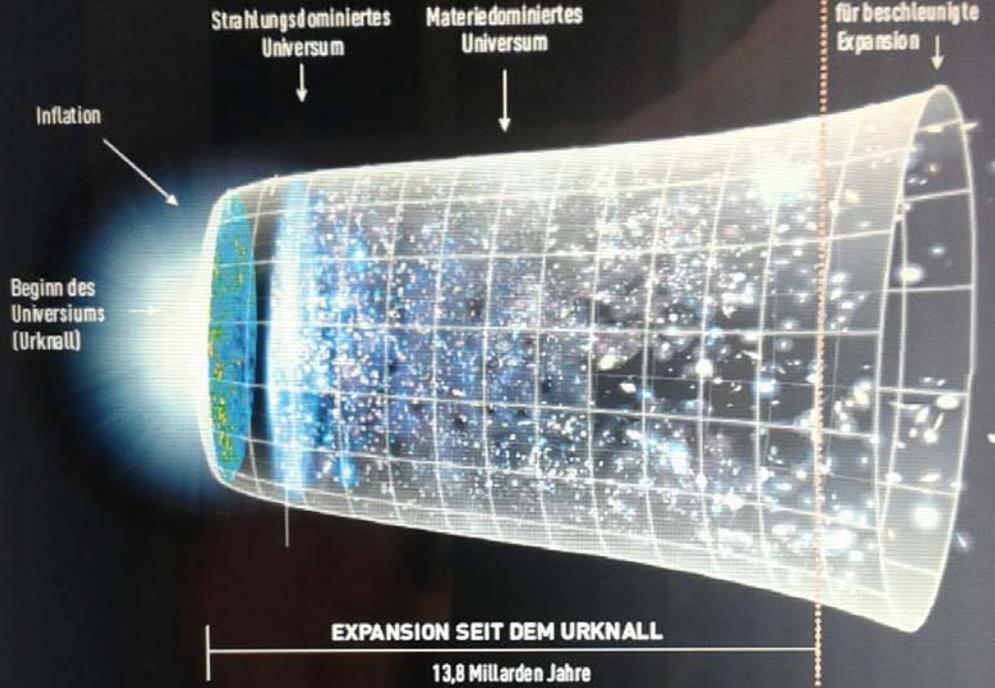
Jon Cartwright 16 July 2013



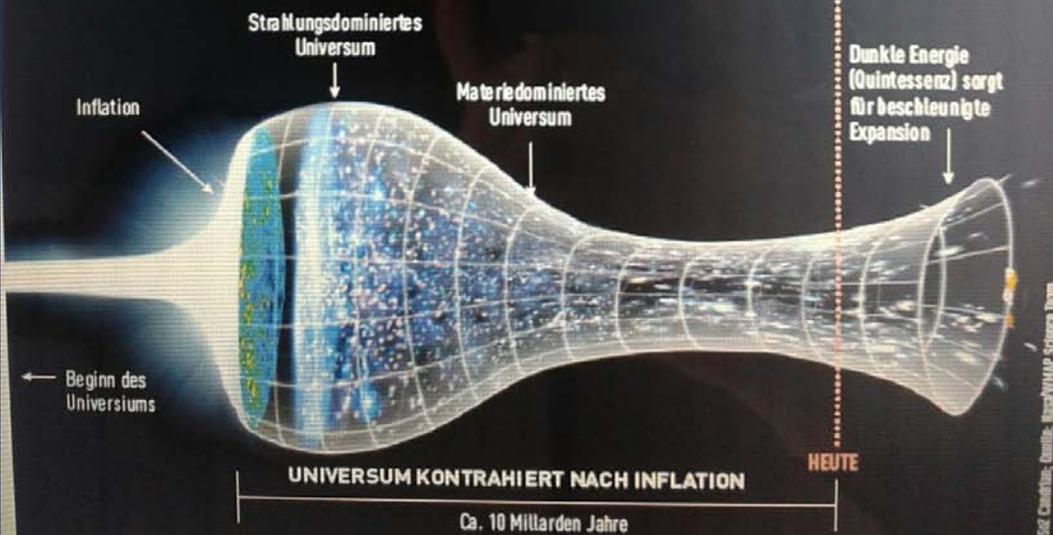
German physicist stops
Universe

25.07.2013

Klassisches Bild der Kosmologie



Model von Wetterich



Sonntagszeitung
Zürich
Laukenmann

Das Universum schrumpft

Das Universum schrumpft ...

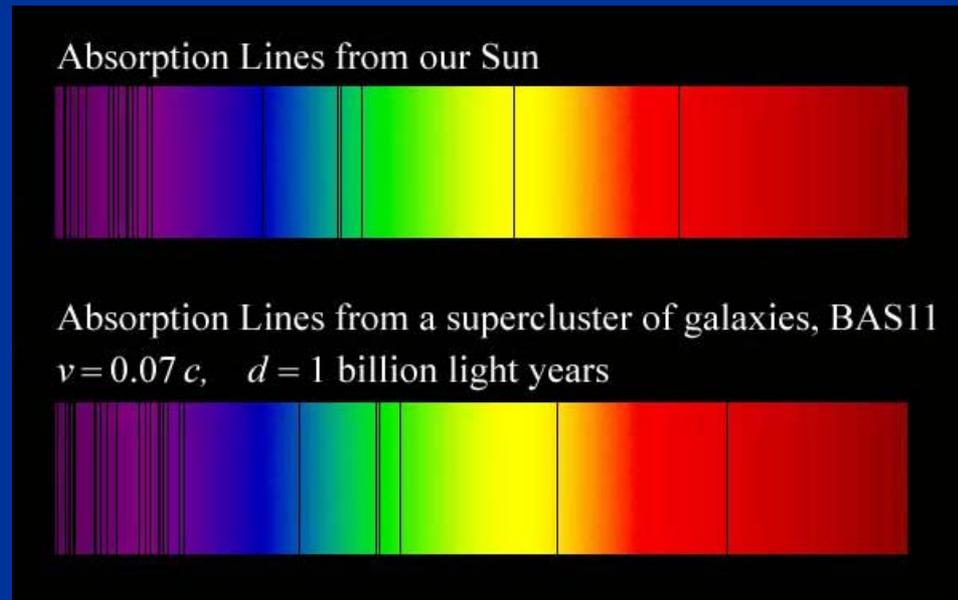
während

**Massen der Elementarteilchen
und Planck Masse wachsen**

Rotverschiebung

statt Expansion des Universums:

Wir beobachten größere Wellenlängen,
weil die Atome früher größer waren !



Was wächst ?

Verhältnis des Abstands der Galaxien
und des Atomdurchmessers !

Atomradius konstant :
Geometrie dehnt sich aus

Alternative : Atome werden kleiner

alte Idee : Hoyle, Narlikar,...

Plasma - Phase

- **Universum war früher kälter !**
- **Aber Teilchenmassen waren viel kleiner !**
- was zählt : Temperatur/Masse
- Dieses Verhältnis war früher größer,
ebenso wie beim Urknall
- **Aussendung der Hintergrundstrahlung , sobald
die Massen groß genug waren , damit sich
neutrale Atome bilden konnten**

Verschiedene Bilder der Kosmologie

- Die gleichen physikalischen Tatsachen können durch verschiedene Bilder beschrieben werden
- Man kann zur Beschreibung verschiedene Felder wählen
- **Feld – Relativität** : Physikalische Größen und Beobachtungen hängen nicht von der Wahl der Felder ab
- Verschiedene Wahl der Metrik : verschiedene Geometrie
- Exakte mathematische Abbildung zwischen verschiedenen Bildern

Modell

$$S = \int_x \sqrt{g} \left\{ -\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} K(\chi) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi + V(\chi) \right\}$$

$$V(\chi) = \mu^2 \chi^2$$

$$\mu = 2 \cdot 10^{-33} \text{ eV}$$

$$K(\chi) = \frac{4}{\tilde{\alpha}^2} \frac{m^2}{m^2 + \chi^2} + \frac{4}{\alpha^2} \frac{\chi^2}{m^2 + \chi^2} - 6$$

Variable Gravitation

$$S = \int_x \sqrt{g} \left\{ -\frac{1}{2}\chi^2 R + \frac{1}{2}K(\chi)\partial^\mu\chi\partial_\mu\chi + V(\chi) \right\}$$

Kosmon Feld χ spielt Rolle der Planck Masse.
Wächst mit der Zeit.

Gravitations- (Newton's) "Konstante" wird
kleiner : "Gravitation wird schwächer" .

Wachsende Massen der Teilchen :

Gravitations-Anziehung zwischen massiven
Teilchen bleibt konstant.

Langsames Universum

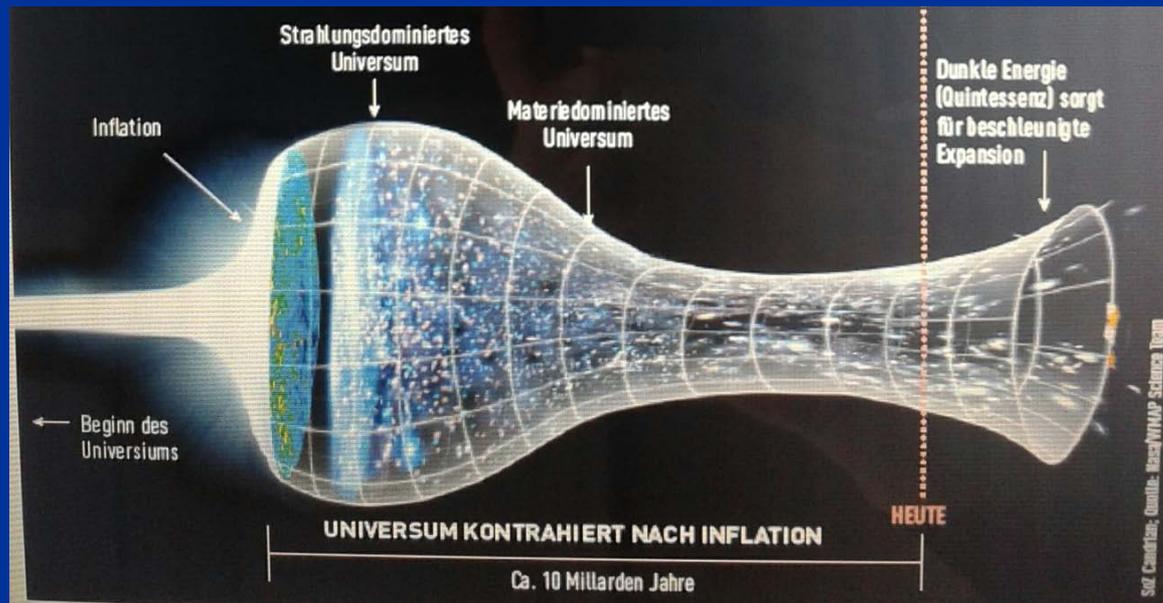
$$H = b\mu, \quad \chi = \chi_0 \exp(c\mu t)$$

$$\mu = 2 \cdot 10^{-33} \text{ eV}$$

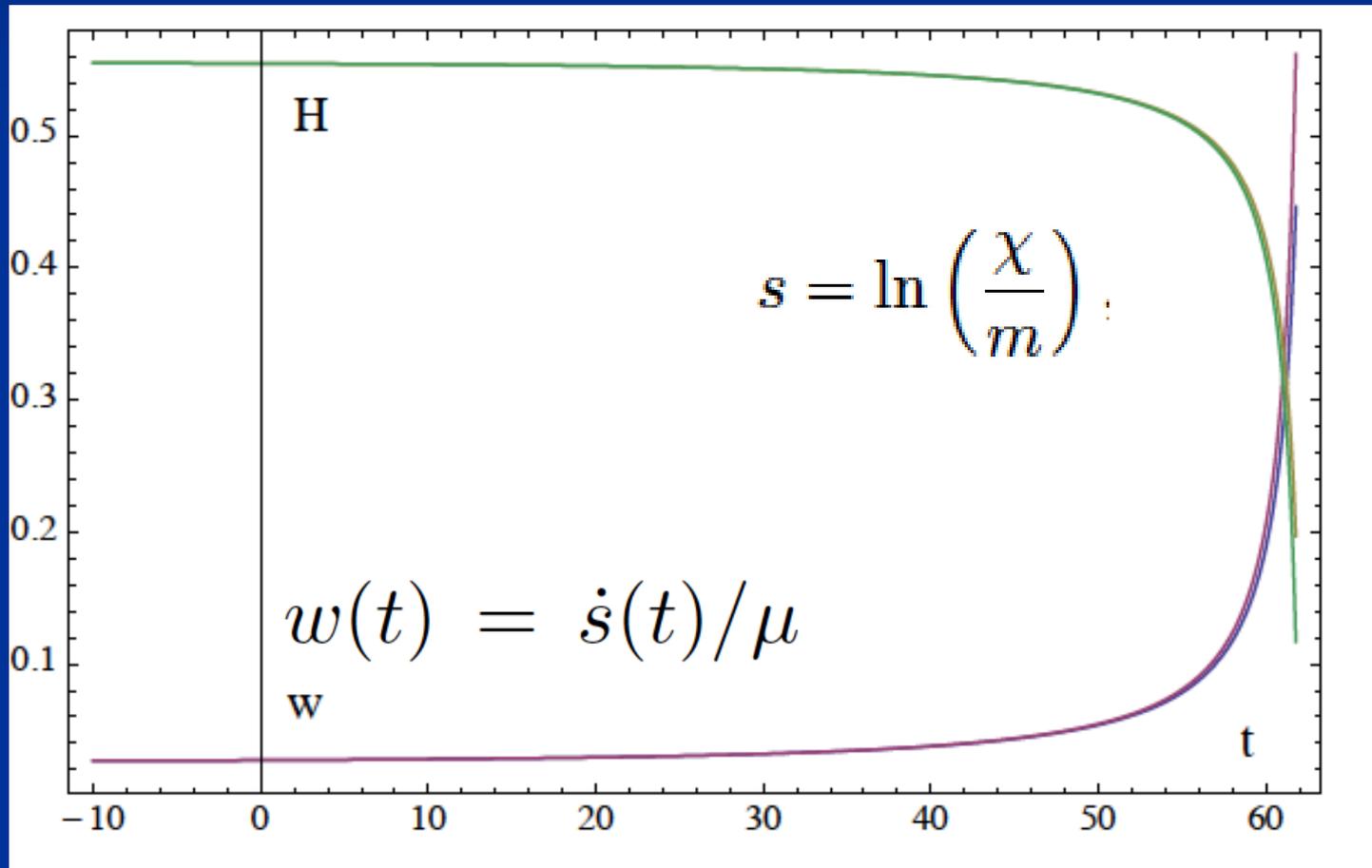
Ausdehnung oder Schrumpfen ist immer sehr langsam ,
charakteristische Zeitskala: $t_{\text{ch}} \sim \mu^{-1} \sim 10 \text{ Milliarden Jahre !}$
Hubble Parameter ungefähr wie **jetziger** Hubble parameter
für **alle Zeiten** , einschließlich Inflation und “Urknall” !
Langsames Anwachsen der Teilchen-Massen !

Langsames Universum

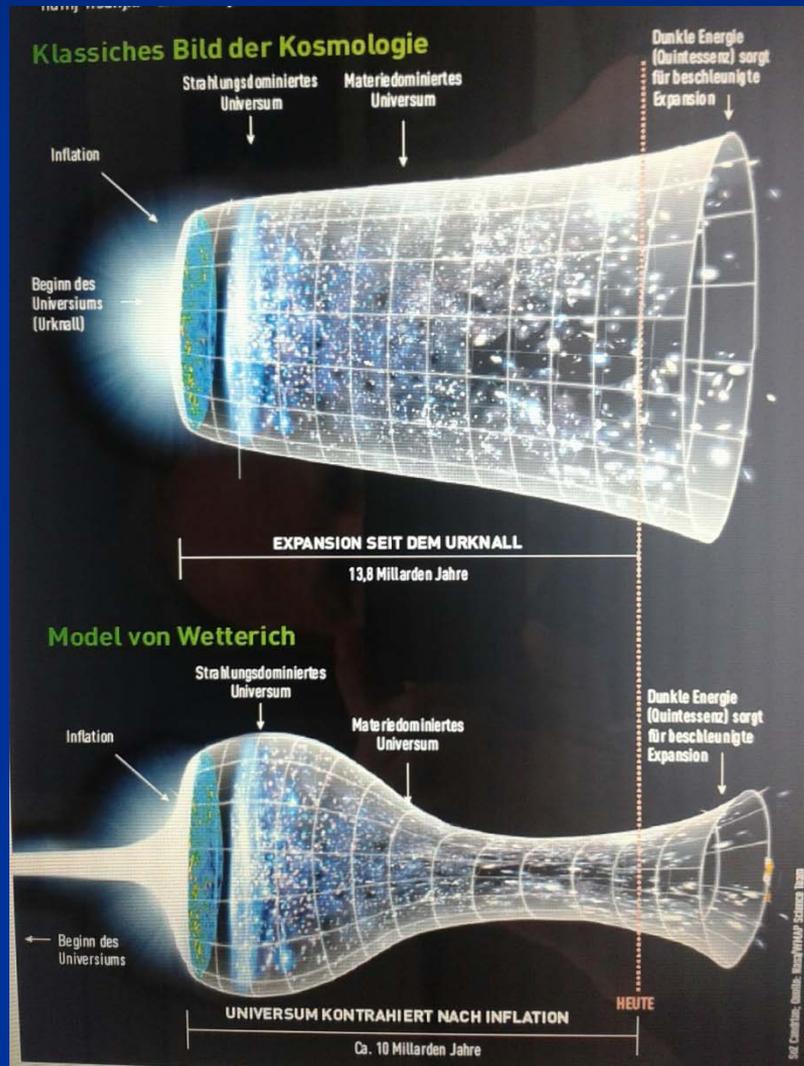
$$H = b\mu, \quad \chi = \chi_0 \exp(c\mu t)$$



Anfangsphase = Inflation hat ein Ende



(5) Zeit, Raum und Geometrie sind nicht eindeutig



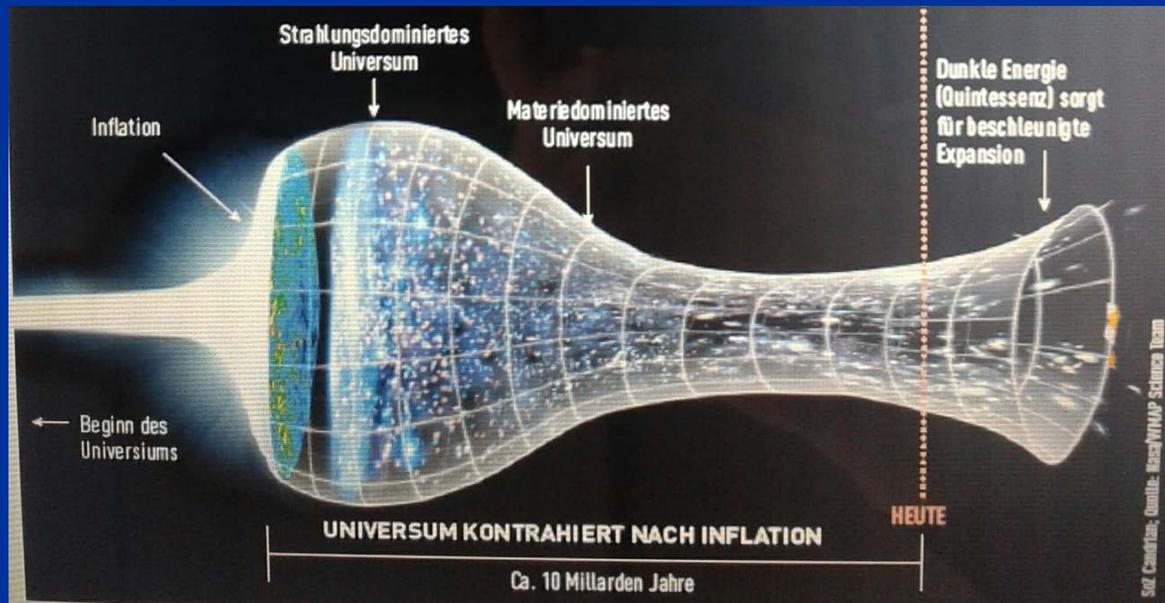
Heißer Urknall

Das Universum, das aus der Kältestarre kam

Was war am Anfang ?

Inflation bis in die unendliche Vergangenheit

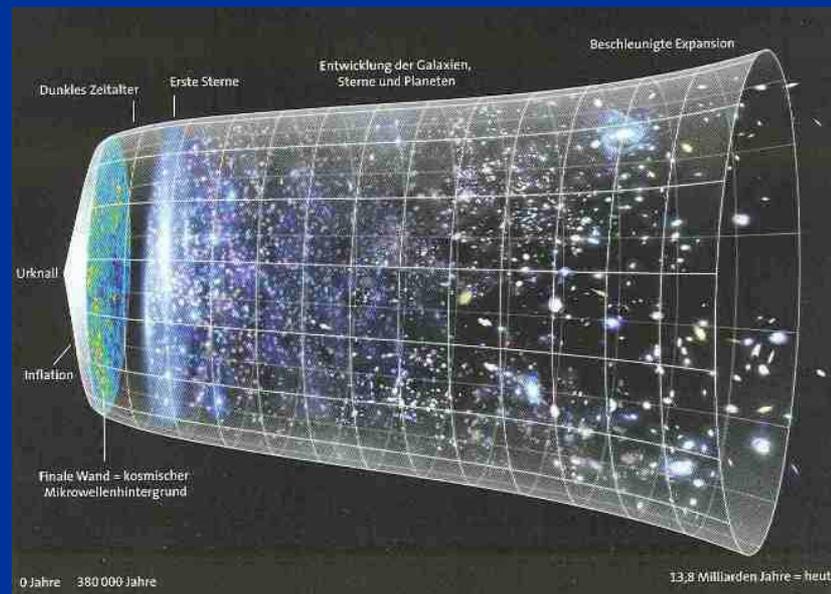
keine Singularität!



Im Bild des Urknalls :

- Zeitskalen werden immer kürzer, je mehr man sich dem Zeitpunkt $t=0$ nähert

- *Singularität*



- Singularität wegen ungünstiger Wahl der Metrik

Wenn Geometrie nicht mehr eindeutig ist ...

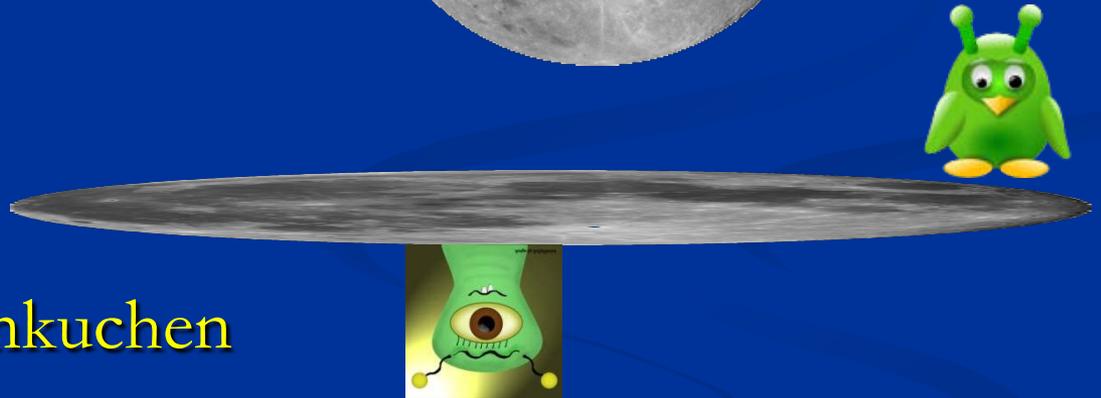
Erdenmensch:

Der Mond ist eine Kugel



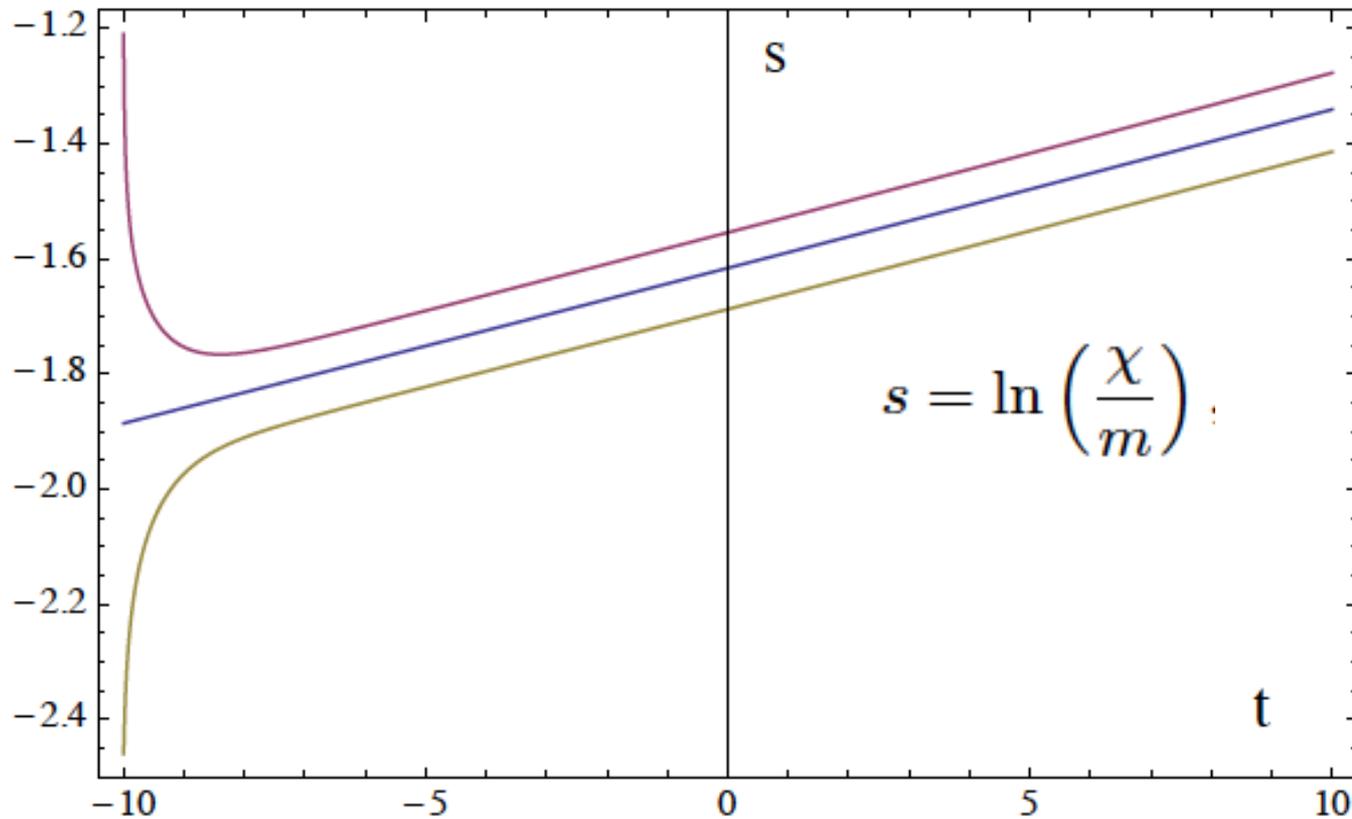
Marsmännchen:

Der Mond ist ein Pfannkuchen

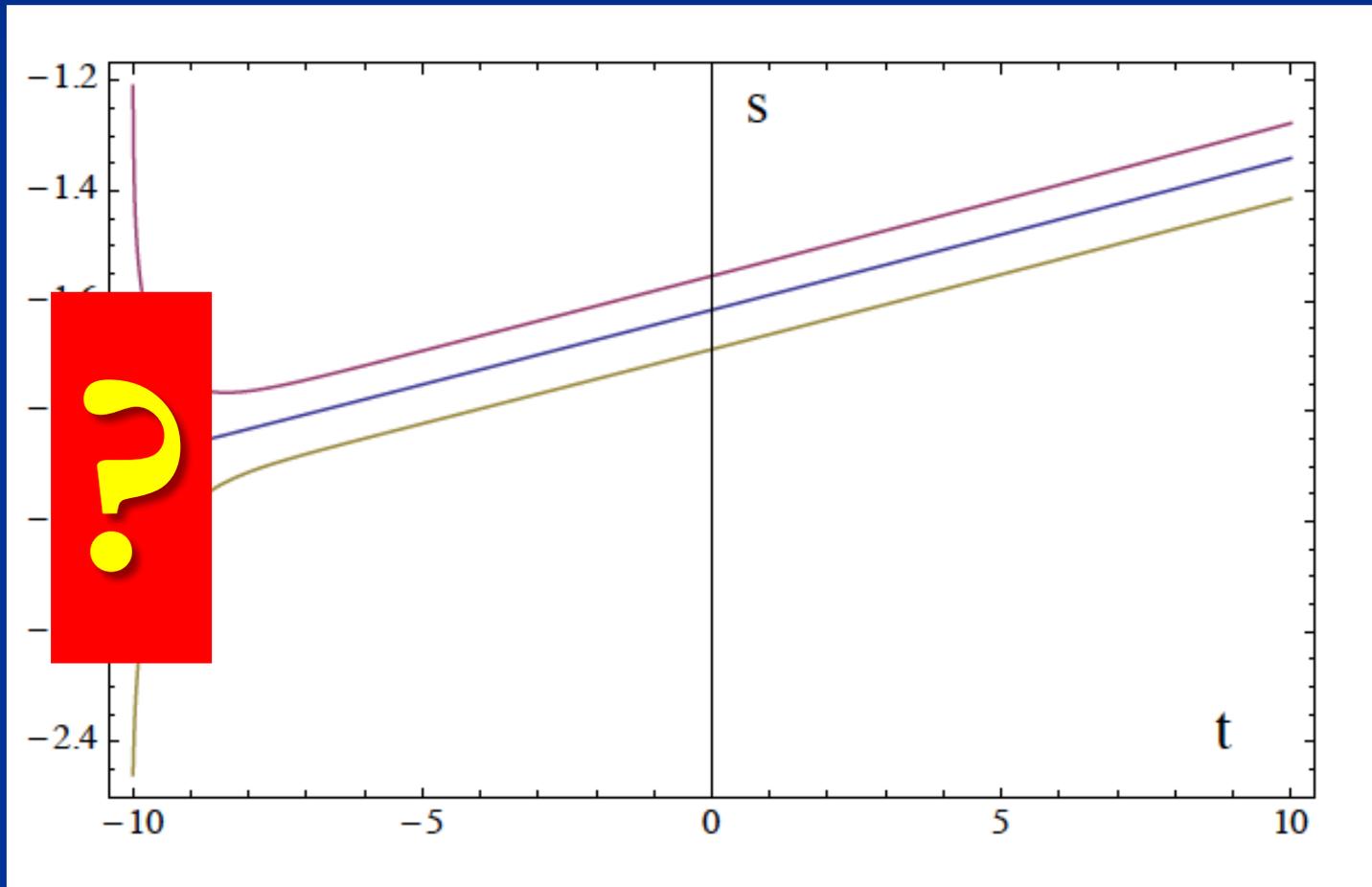


kann sich Raumzeit im Nebel der
Quantenfluktuationen auflösen !

Das Universum vergisst den Anfangszustand

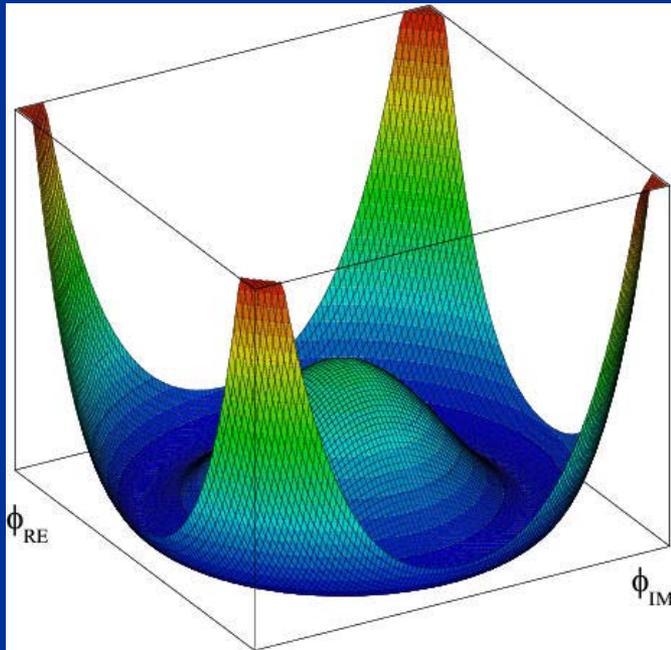


(6) Unendliches Universum oder Entstehung der Raumzeit ?

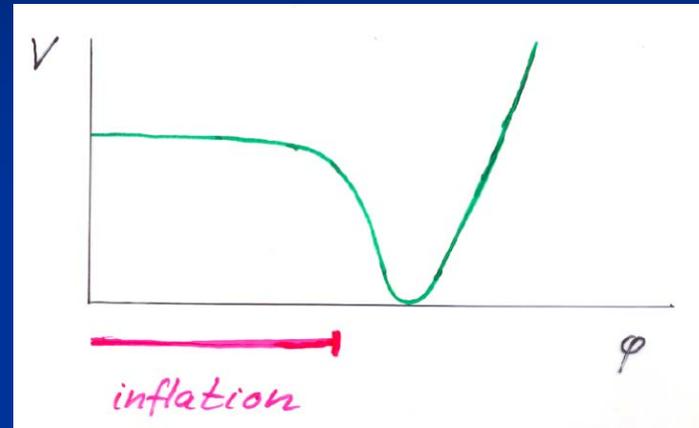


Zusammenfassung

(1) Das Vakuum ist nicht leer



Higgs Potenzial



Inflaton
Potenzial

$$\rho = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2$$

Dynamische
Dunkle Energie



(2) Raum und Zeit sind
Eigenschaften des Materiellen

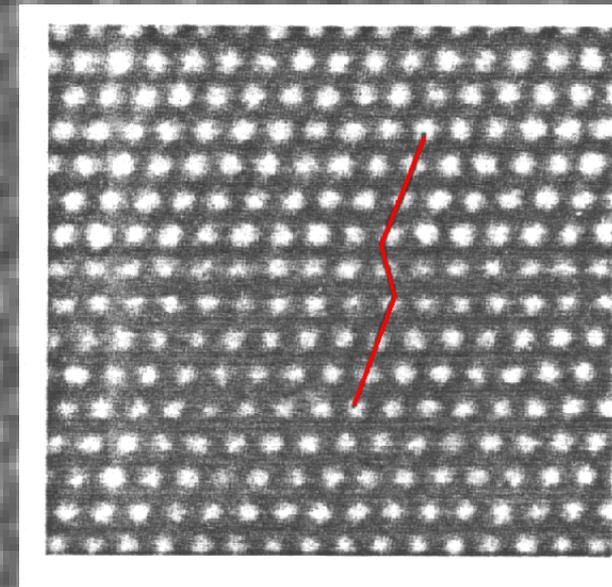
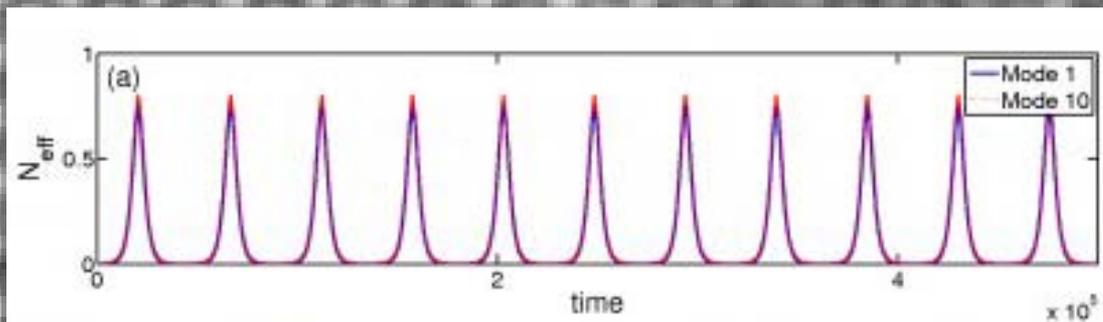
In Abwesenheit von Teilchen :
Raum und Zeit sind
Eigenschaften des Vakuums

(3) Die Eigenschaften von Raumzeit werden durch metrisches Feld beschrieben

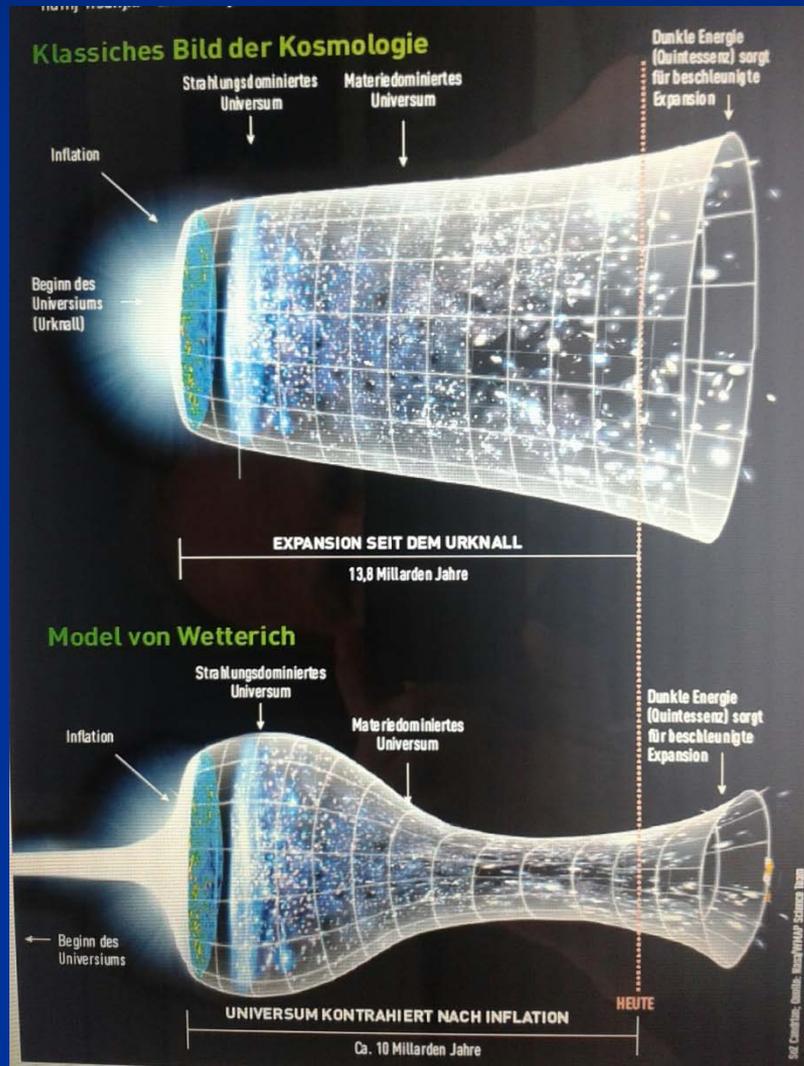


$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

(4) Zeit und Raum müssen durch physikalische Prozesse definiert werden



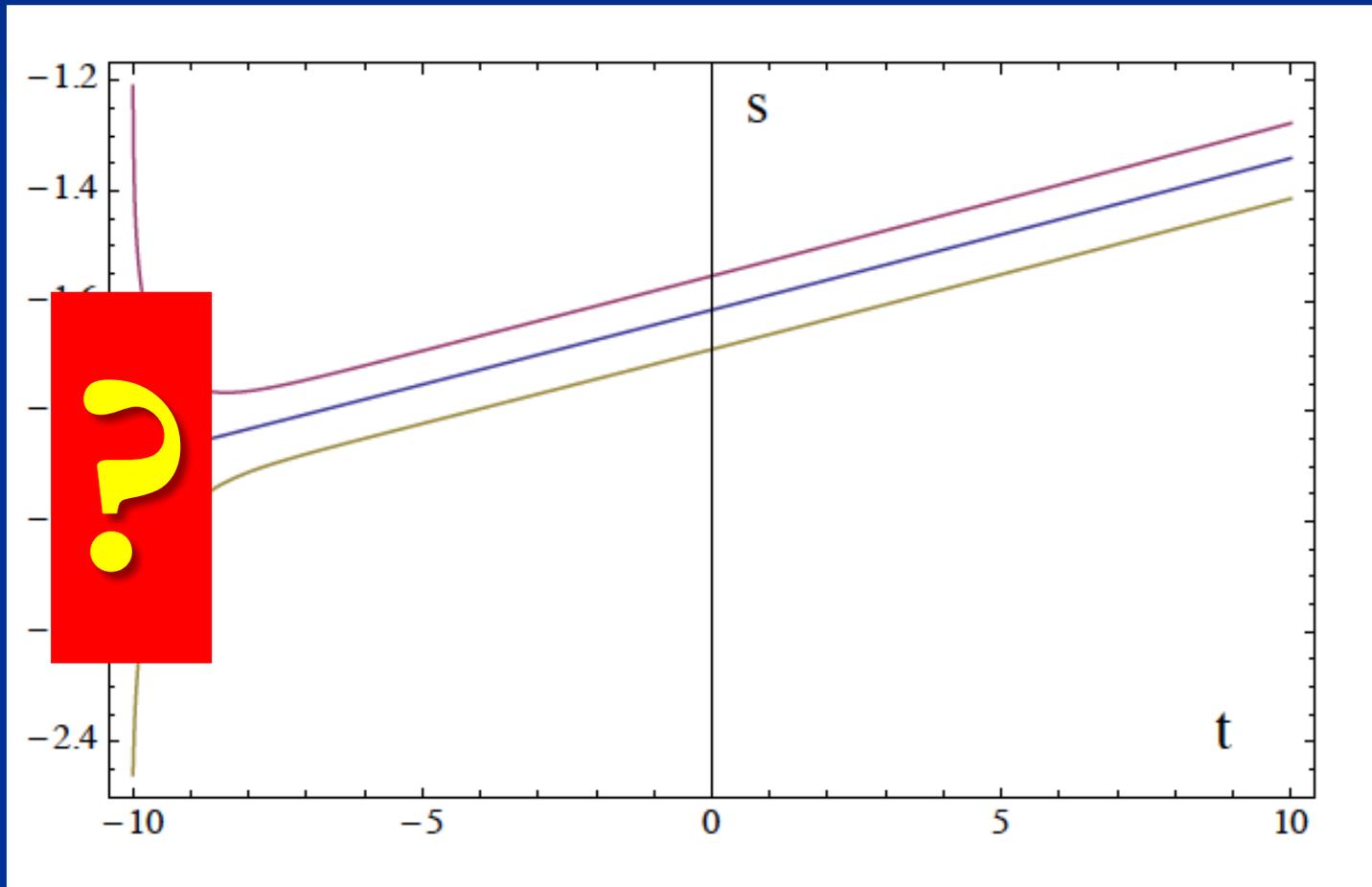
(5) Zeit, Raum und Geometrie sind nicht eindeutig



Heißer Urknall

Das Universum, das aus der Kältestarre kam

(6) Unendliches Universum oder Entstehung der Raumzeit ?



Die großen Fragen

- Woraus besteht das Universum ?
- Wie sah das Universum am Anfang aus ?
- Wie haben sich Strukturen entwickelt ?
- Gibt es Leben und Intelligenz in anderen Regionen des Universums ?
- Woher kommen Materie und Strahlung ?
- Was war vor dem Urknall ?
- Was wird aus unserem Universum in der Zukunft ?
- Was liegt außerhalb unseres Horizonts ?

