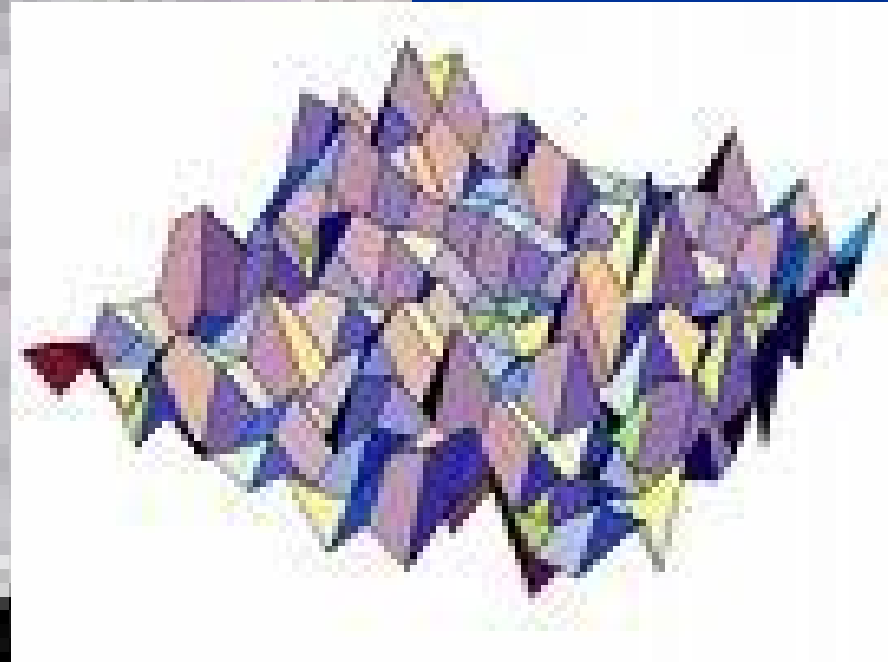


# Der Urknall

Wie unser Universum aus fast  
Nichts entstand



# 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 ?**

# Grenzen der Physik

über die Schwierigkeit , Antworten zu finden ...

- Thermische Grenze
- Energiegrenze , Auflösungsgrenze
- Raumgrenze
- Komplexitätsgrenze
- Grenzen der jetzigen Gesetze der Physik ?

# Thermische Grenze

- Das frühe Universum war im thermischen Gleichgewicht .
- Das Universum “ vergisst “ !
- Werfen Sie einmal ein Buch auf die Sonne und versuchen , es 10 000 Jahre später zu lesen ...

andererseits : nur wenige Größen werden zur Beschreibung des frühen Universums benötigt !

# Thermisches Gleichgewicht

Energie  $\sim$  Masse  $\sim$  Temperatur

- Welche Teilchensorten gibt es mit Masse  $<$  Temperatur ?  
( Elektronen , Quarks , Photonen , Neutrinos , W-Bosonen , ...???? )
- Was ist ihre Masse ?



**Elementarteilchen - Physik**

# Näher an den Urknall

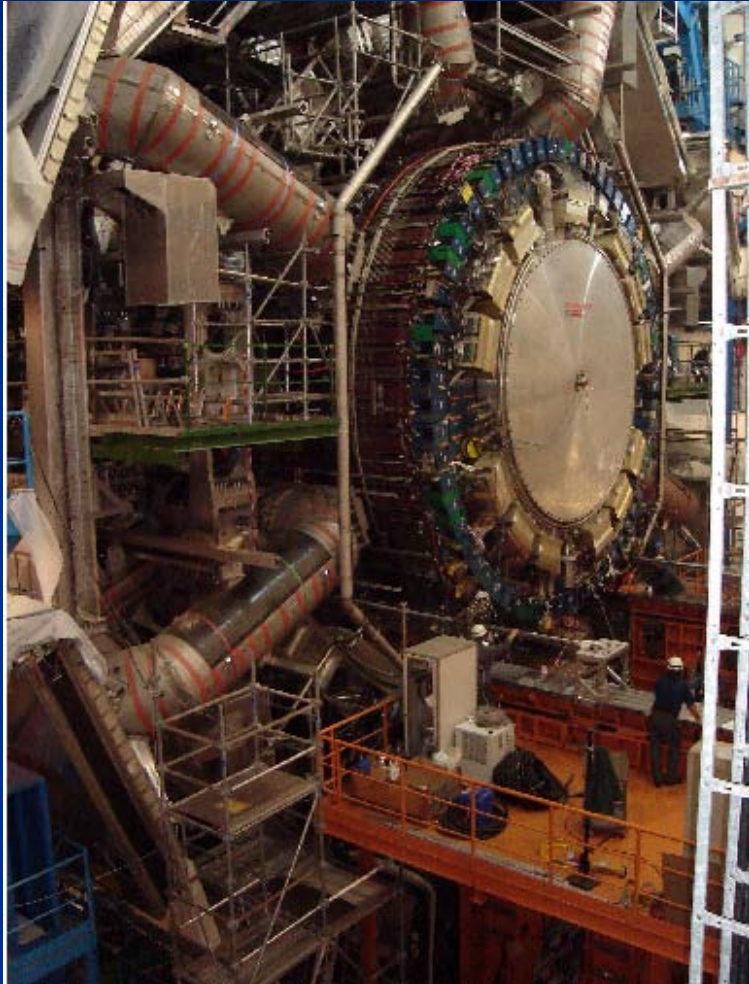
- Je näher an den Urknall, desto höher die Temperatur und Energie der Teilchen
- Physik bei hohen Energien weniger gut bekannt
- Erst ab  $10^{-12}$  Sekunden ab : Im wesentlichen bekannte Physik

# Teilchenphysik nähert sich Urknall

- vor Zeiten von  $10^{-12}$  Sekunden ab sind die Teilchen mit Masse  $<$  Temperatur nicht experimentell bekannt
- LHC erforscht Physik, die für  $10^{-12}$  Sekunden ab wichtig ist
- spontane Symmetriebrechung, Phasenübergang

**Energiegrenze ...**

# Energiegrenze



LHC , CERN , Genf



Komplexitätsgrenze

Galaxien-Entstehung



# Komplexitätsgrenze :

Details der Galaxienentstehung  
vermutlich nicht wichtig  
für Verständnis der Entwicklung des  
Universums als Ganzem

# Grenzen der Gesetze :

## Waren die Naturkonstanten konstant ?

- Gelten die Gesetze der Physik auch noch eine Minute abb ?
- Oder hatten damals Naturkonstanten andere Werte ?

anderes Verhältnis Elektronmasse/Protonmasse  
oder andere Gravitationskonstante , oder ???

**nur 4,5 % des Universums  
bestehen aus Atomen :**

**bekannt von**

**Hintergrundstrahlung ,**

400 000 Jahre abb  
Atomphysik

**Nucleosynthese**

Minute abb  
Kernphysik

$$\Omega_b = 0.045$$

# Präzise Bestätigung unseres Verständnisses der Physik und Kosmologie

Auch vor 13.7 Milliarden Jahren hatten  
die Konstanten der Physik die  
( fast ) gleichen Werte

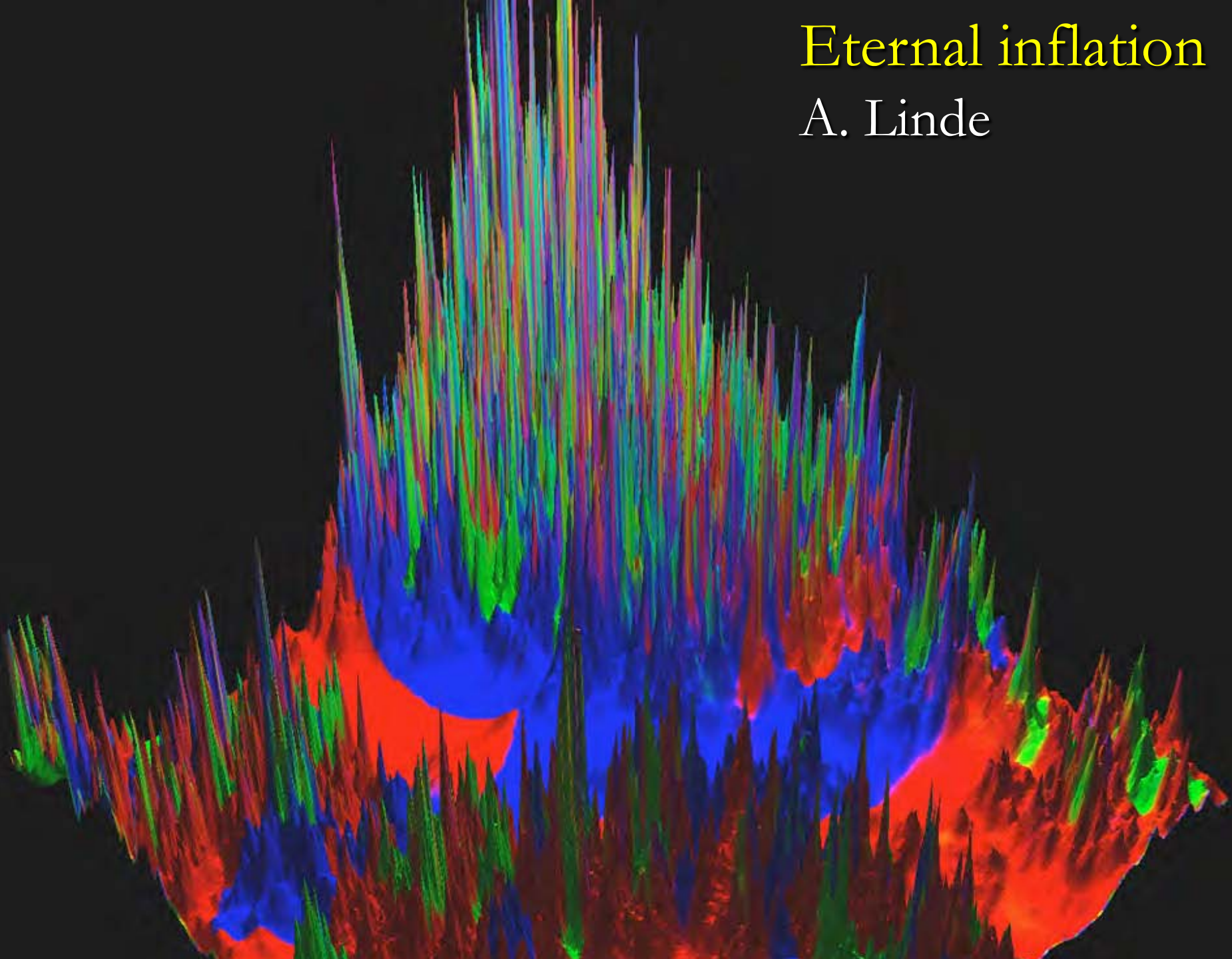
*Wir verfügen über zuverlässiges Wissen  
über die Entwicklung des Universums  
seit den ersten  $10^{-12}$  Sekunden !*

**aber vorher ?**

# Abenteuerreise an den Anfang der Welt

# Eternal inflation

A. Linde





**Was ist reell ?**

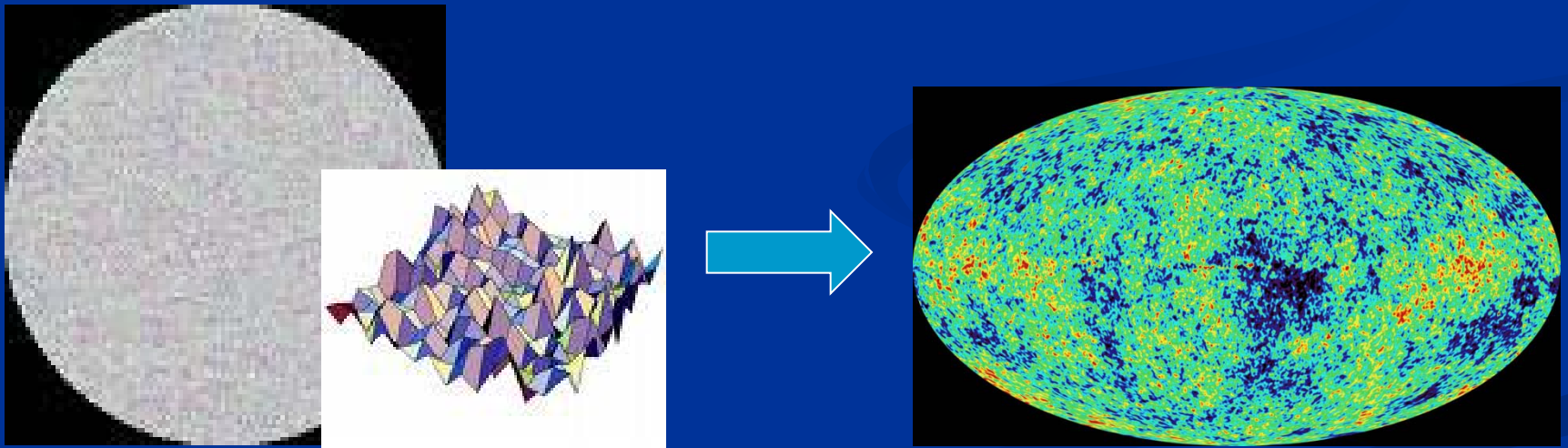
**Was ist Vorstellung ?**

**Was ist pure Spekulation ?**

**Quantenfluktuationen am Urknall  
werden beobachtbar !**

# Inflationäres Universum

- Ca  $10^{-30}$  -  $10^{-40}$  Sekunden abb
- Entstehung der primordialen Fluktuationen aus Quantenfluktuationen

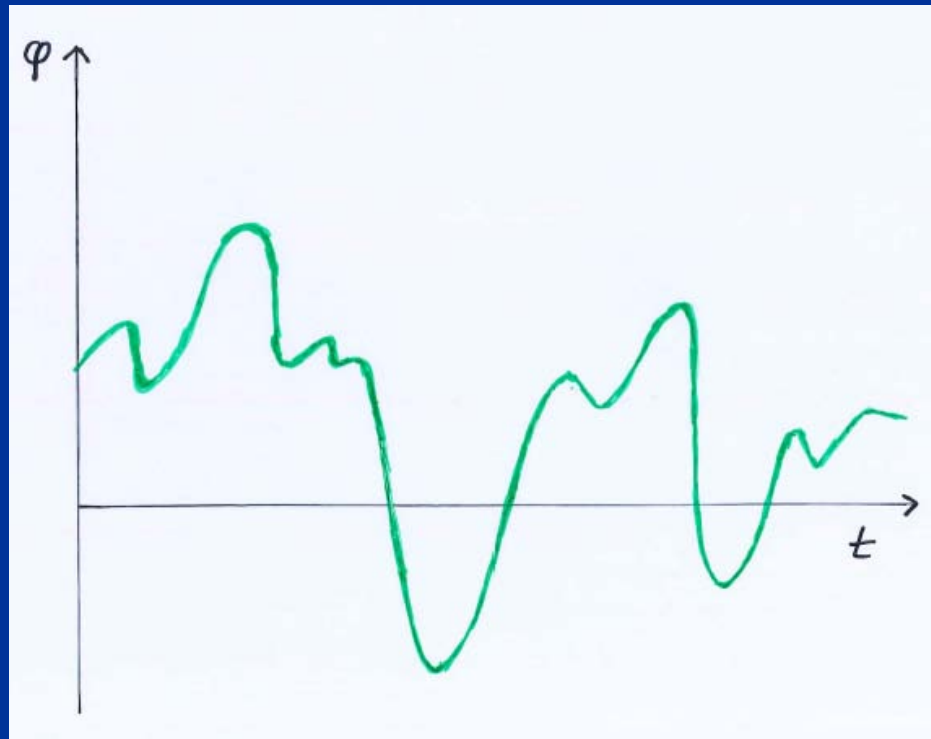


**Signale vom Urknall !**

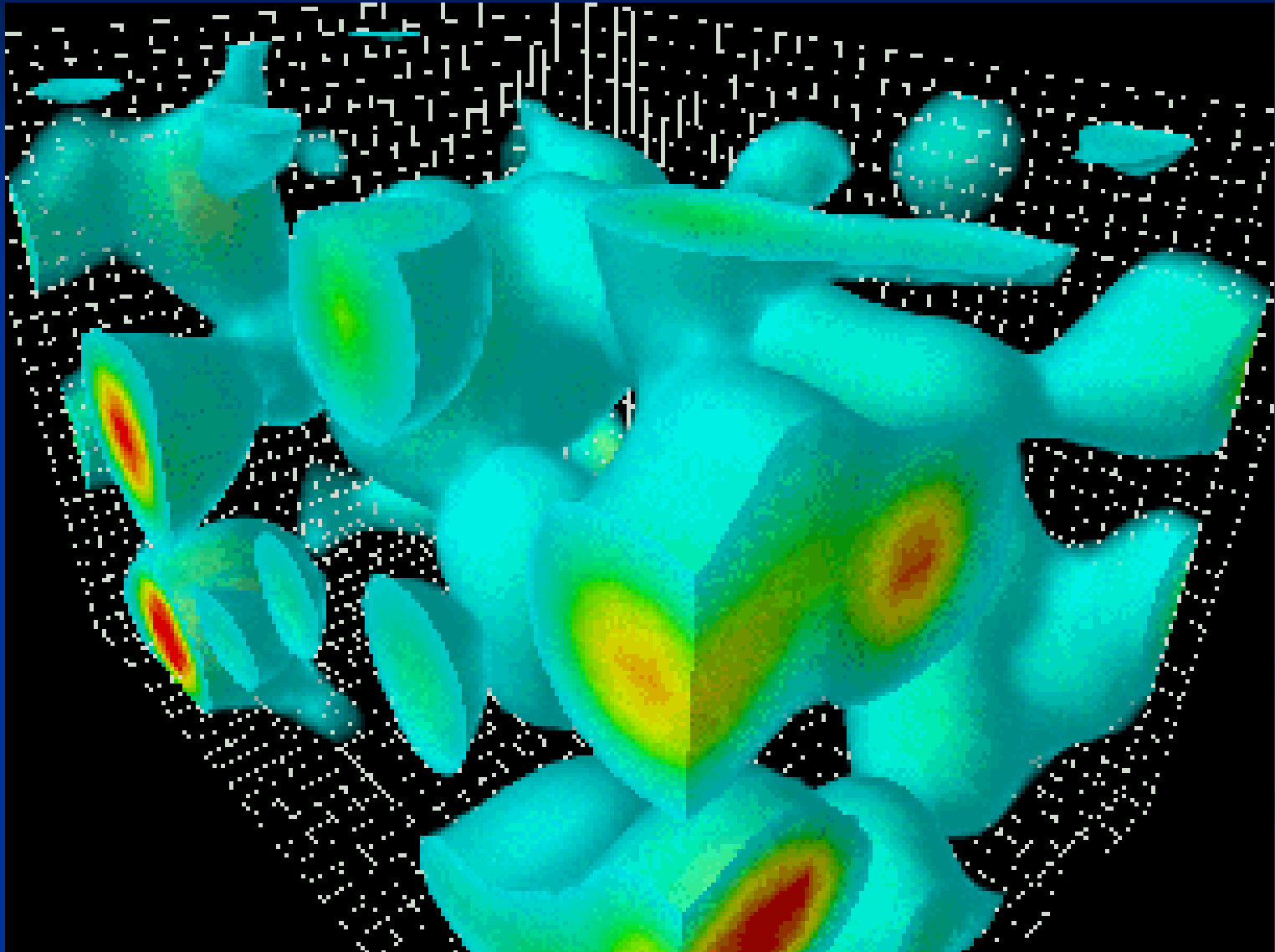
*Das Vakuum ist nicht leer !*

# Quantenfelder

Fluktuierende Felder : Feldwerte ändern sich mit Zeit und im Raum

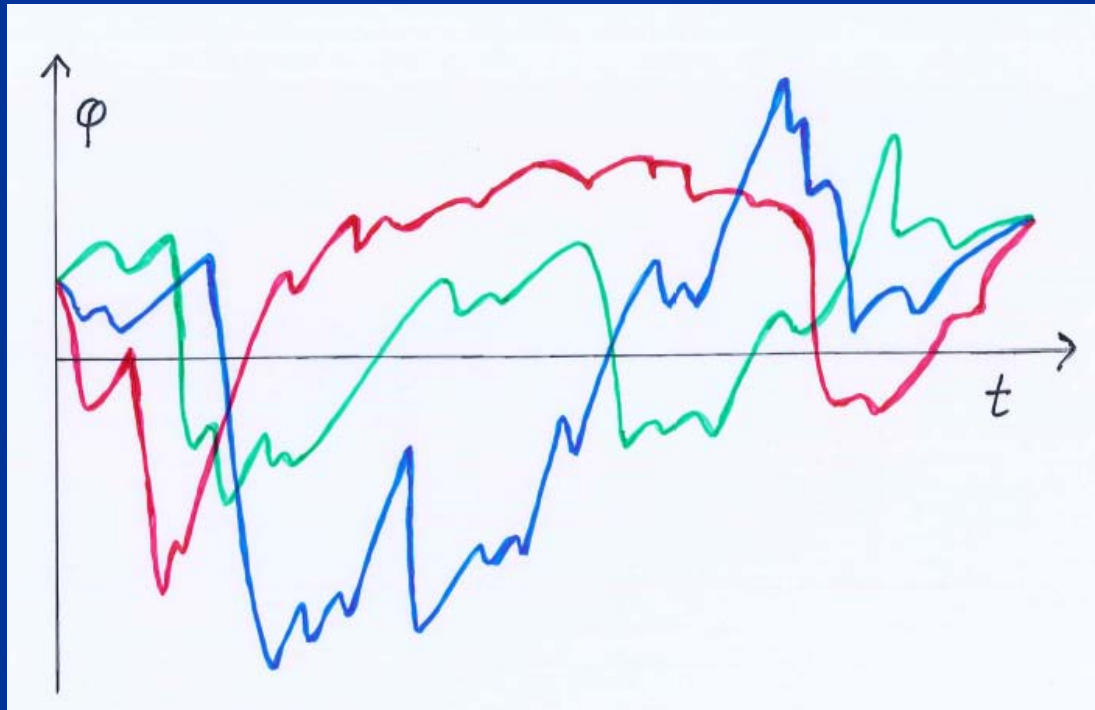


# Quantenfluktuationen im Vakuum



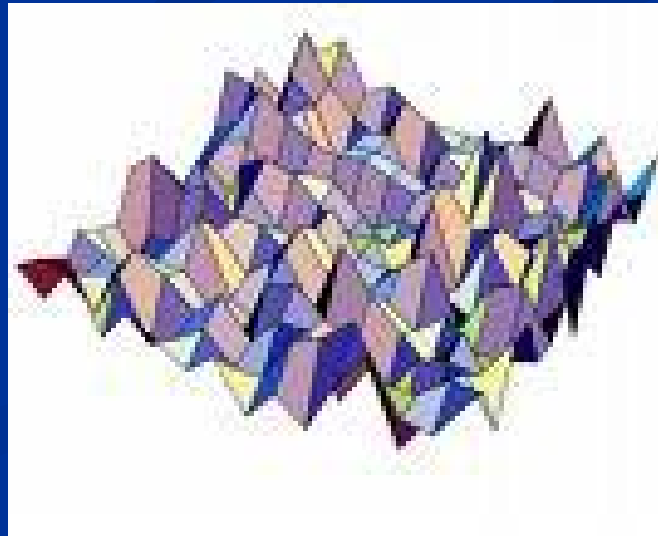
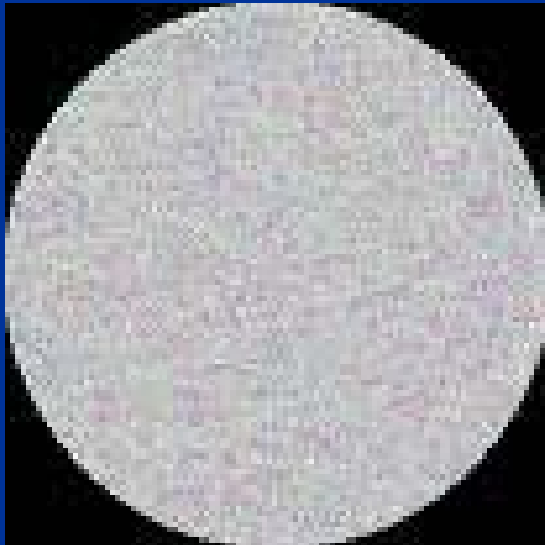
# Quantentheorie ist probabilistisch

Quantentheorie gibt nur **Wahrscheinlichkeiten** für  
verschiedene Verläufe (Trajektorien, Geschichten)



# Quantentheorie für Felder

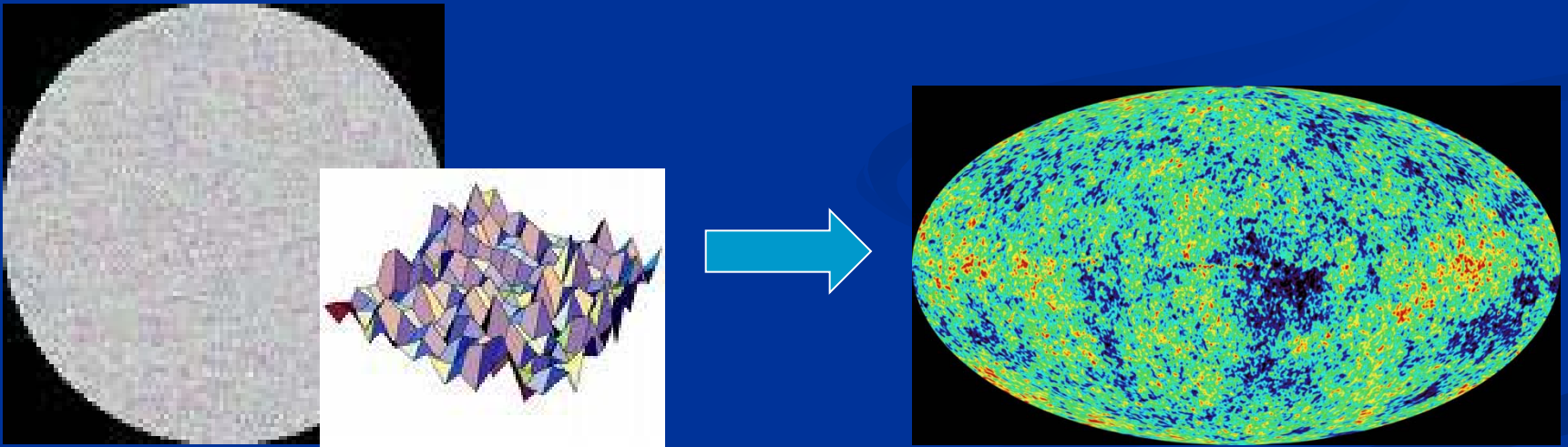
- Mittelwert
- Fluktuationen um Mittelwert :  
gekennzeichnet durch Korrelationen
- Unschärfe – Prinzip ( Heisenberg ) :  
Untergrenze für Stärke der Fluktuationen





# Inflationäres Universum

- Ca  $10^{-30}$  -  $10^{-40}$  Sekunden abb
- Entstehung der primordialen Fluktuationen aus Quantenfluktuationen



**Signale vom Urknall !**

$t = 1$  Milliarde Jahre ( $z = 5.7$ )

500 Mpc/h



$t = 13.6$  Milliarden Jahre ( $z=0$ )

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at  $t = 13.6$  billion years ( $z=0$ ). The image shows a complex, interconnected network of filaments and nodes, rendered in shades of purple and yellow. A horizontal scale bar is positioned in the upper-middle section, labeled "500 Mpc/h". The filaments form a dense, web-like structure that fills the entire frame.

# Kosmische Strukturbildung im Grossrechner

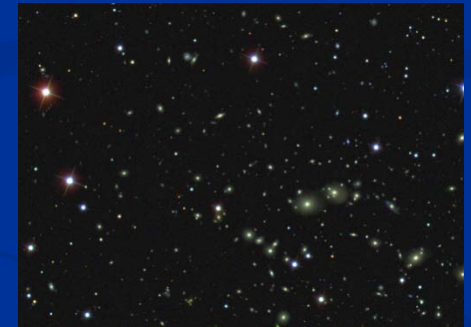
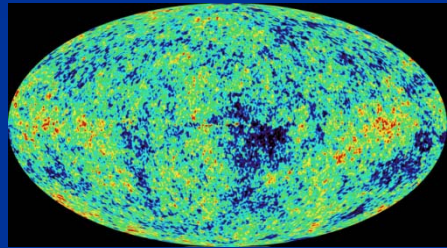
Simon White, Mainz, 1.7.

500 Mpc/h



# Strukturbildung

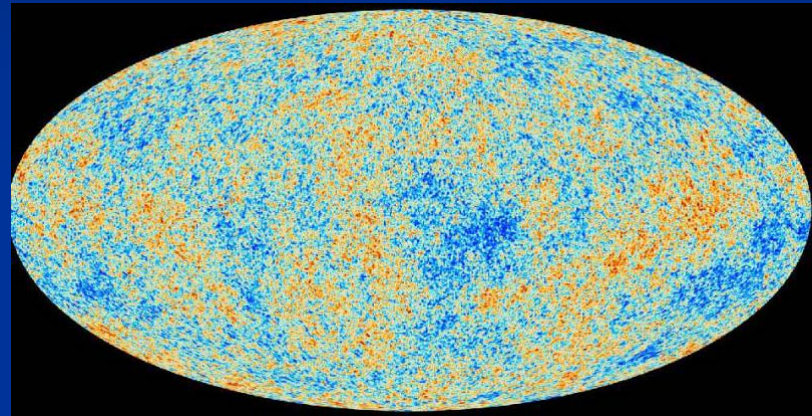
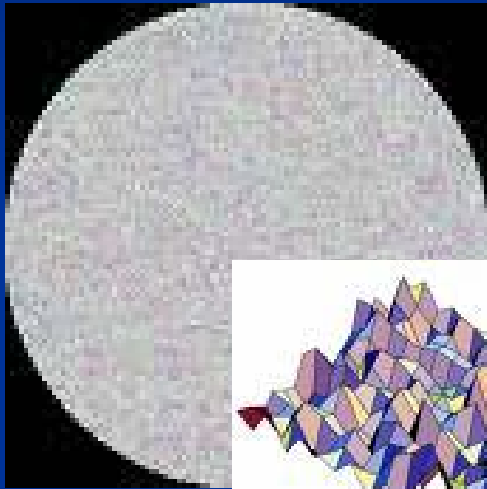
Aus winzigen Anisotropien wachsen die Strukturen des Universums



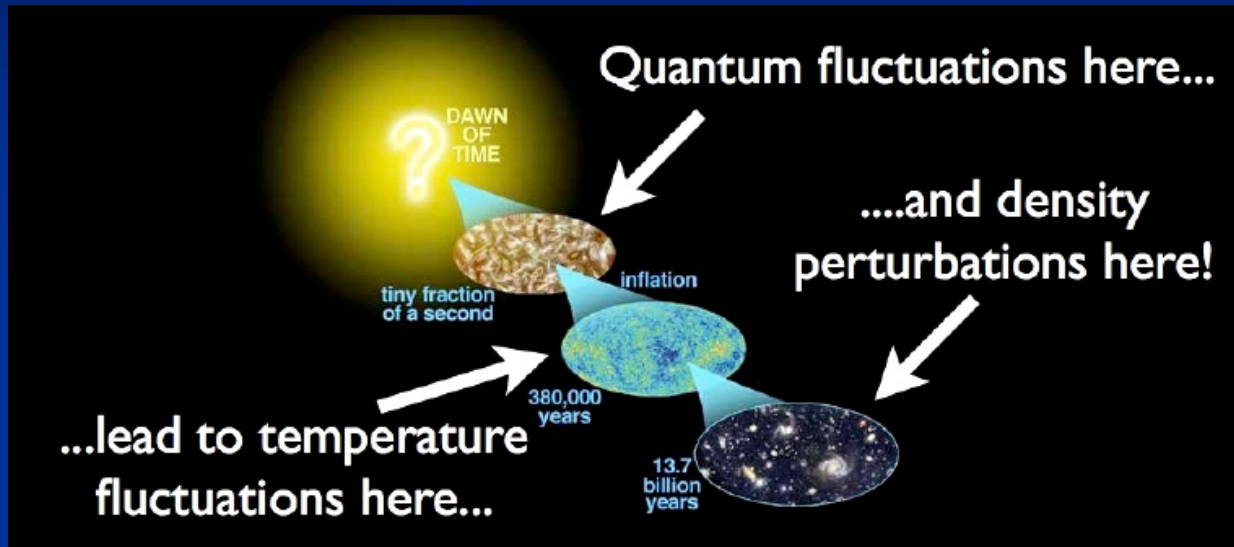
Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt alle Korrelationsfunktionen !

# (1) Die Strukturen im Universum sind aus Quantenfluktuationen während des Urknalls entstanden



# Vortrag F. Wilczek, 20.5.14



# Unzulänglichkeiten des Friedmann- Universums



Warum hat das Universum die  
kritische Dichte ?

# Kritische Dichte

$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$

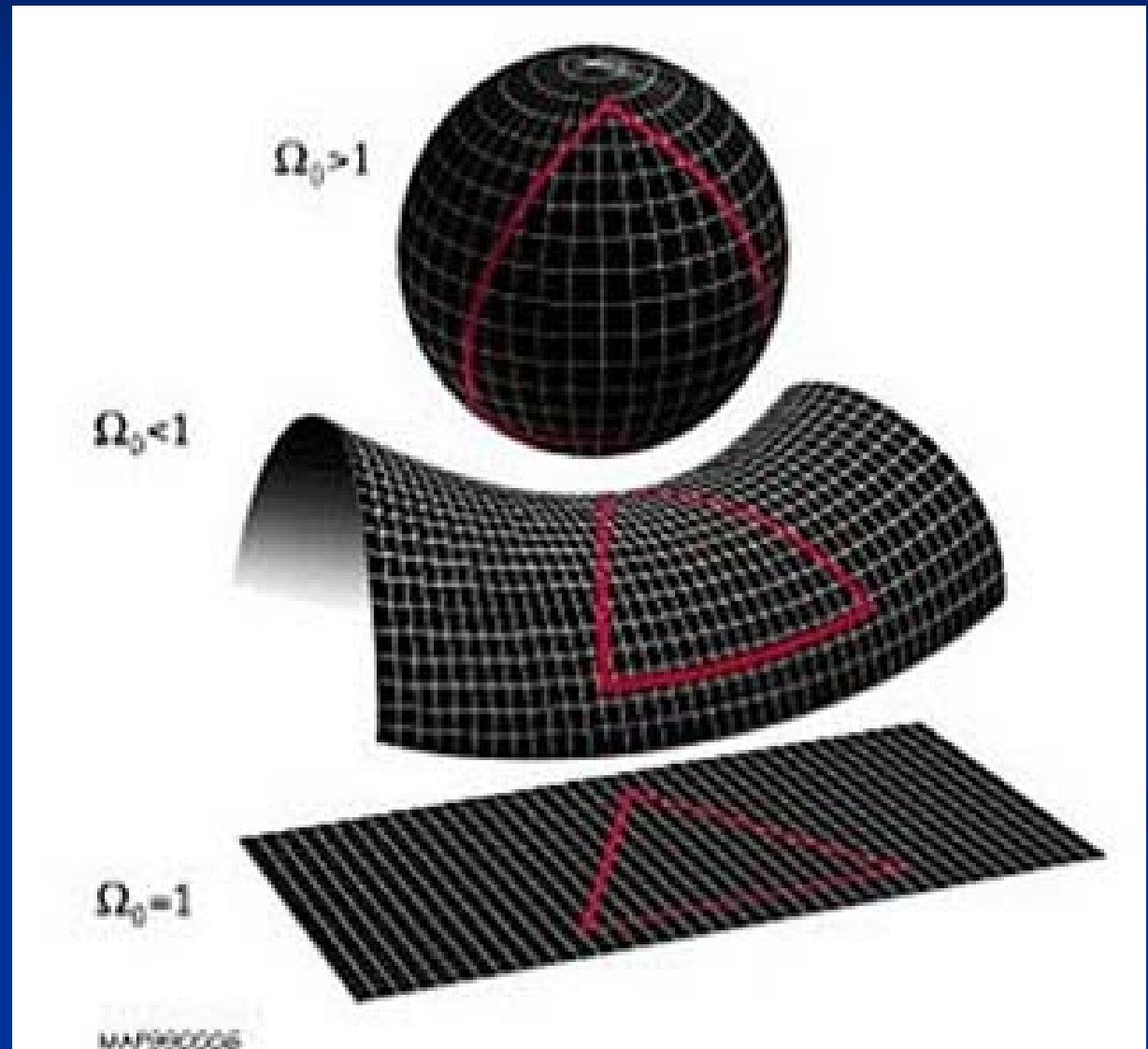
flaches Universum

$$\Omega_{\text{tot}} > 1$$

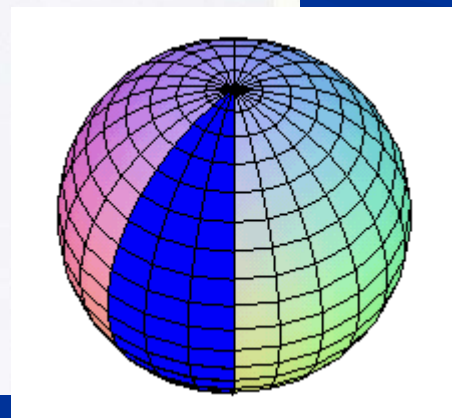
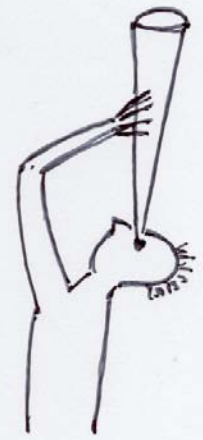
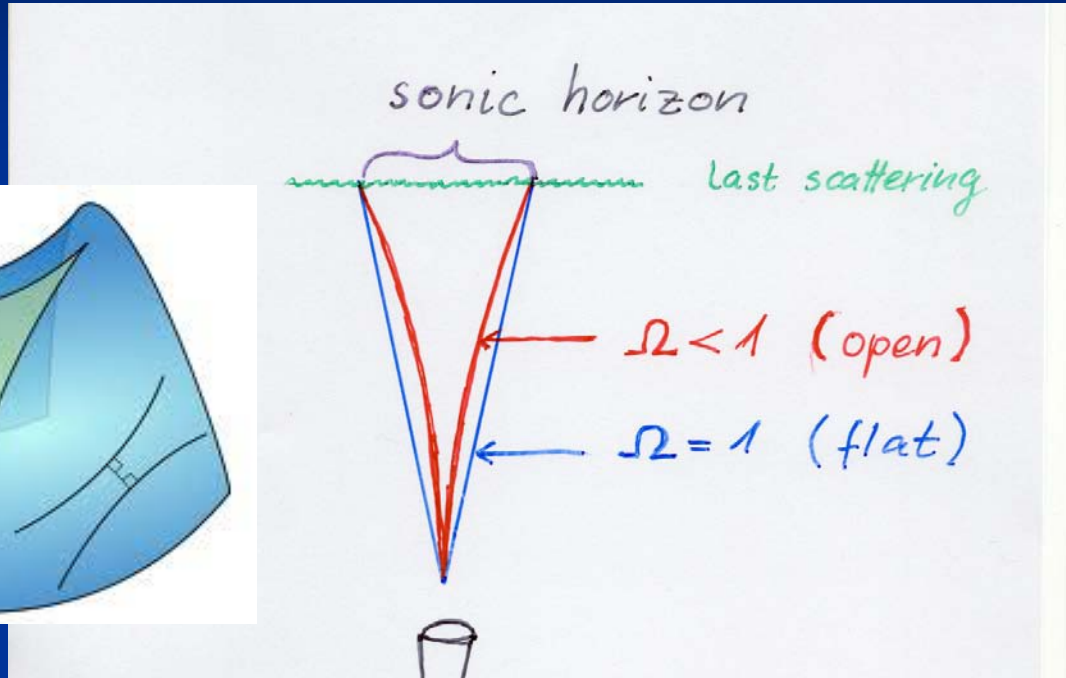
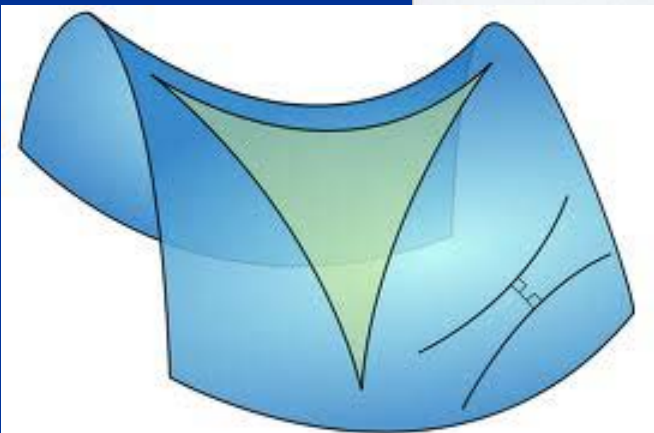
Kugeloberfläche

$$\Omega_{\text{tot}} < 1$$

hyperbolische  
Geometrie

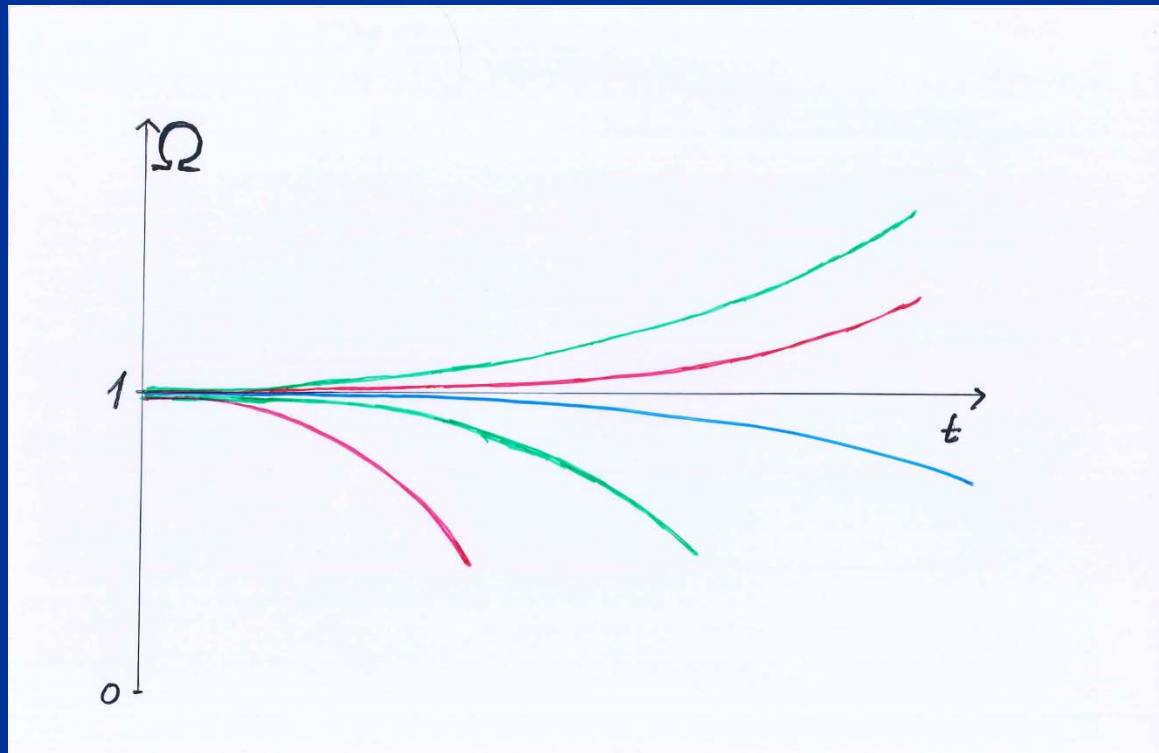


# gekrümmte Bahnen der Lichtstrahlen

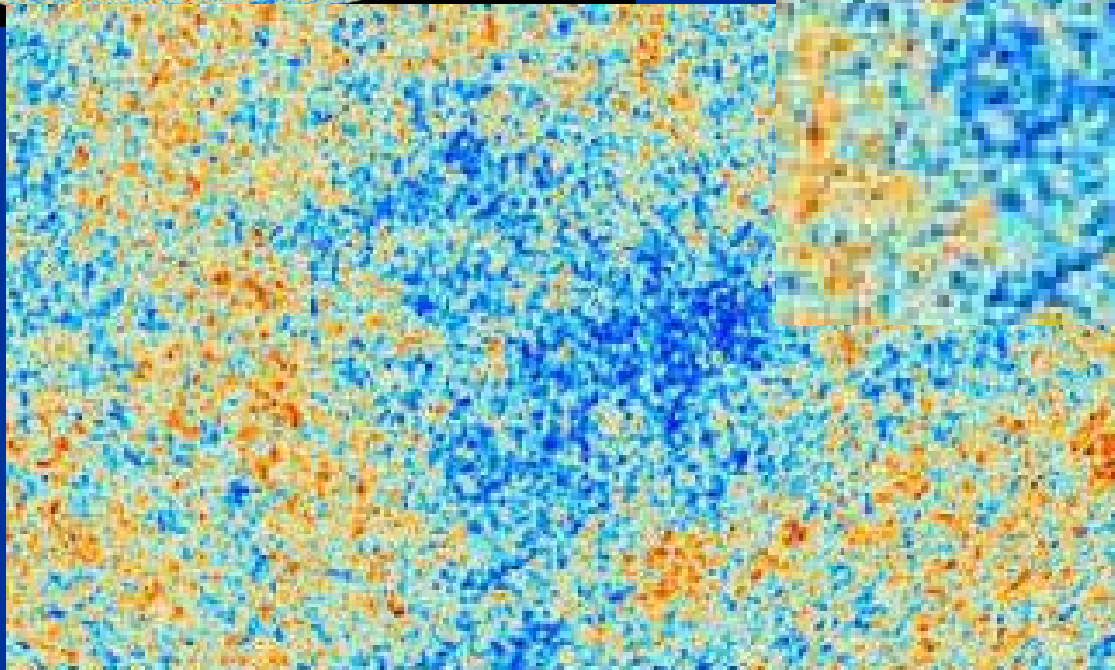
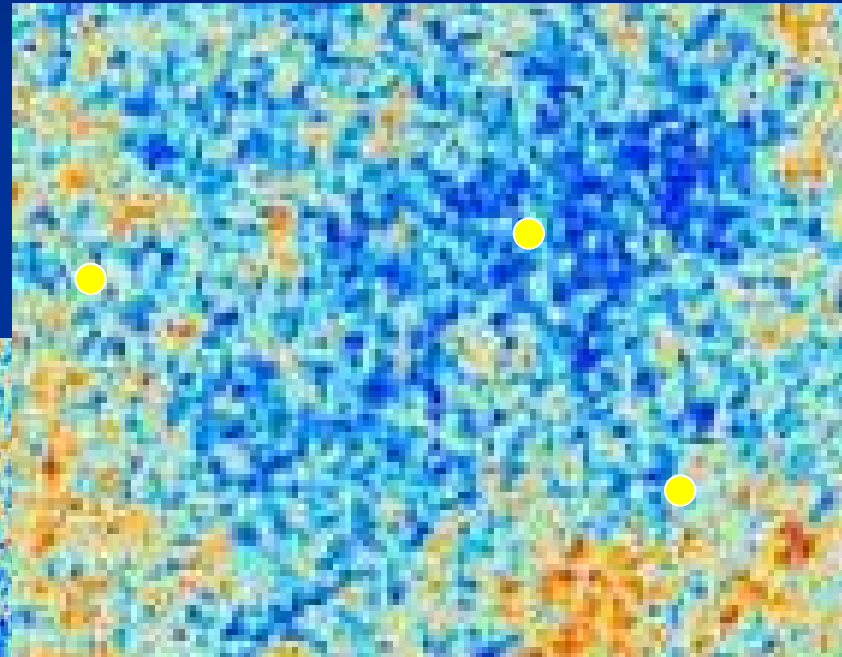
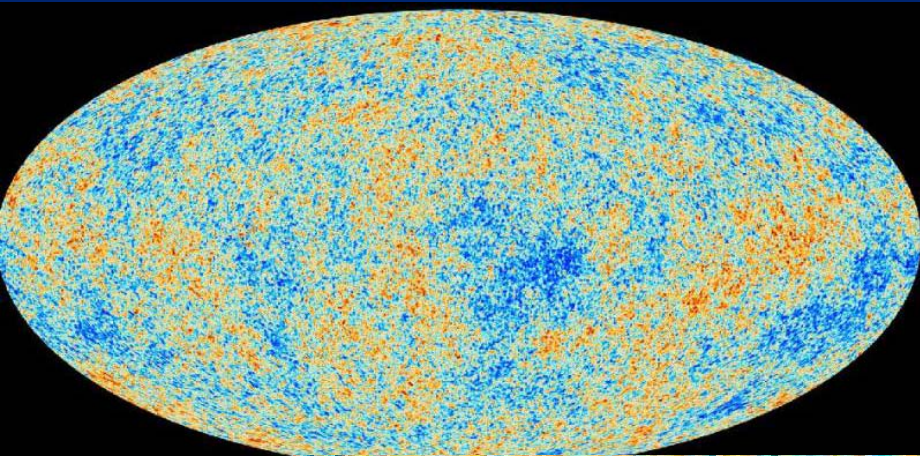


# Instabilität der flachen räumlichen Geometrie

Zeitentwicklung von  $\Omega$  für Friedmann- Gleichung mit gekrümmter Geometrie



# Kausalität



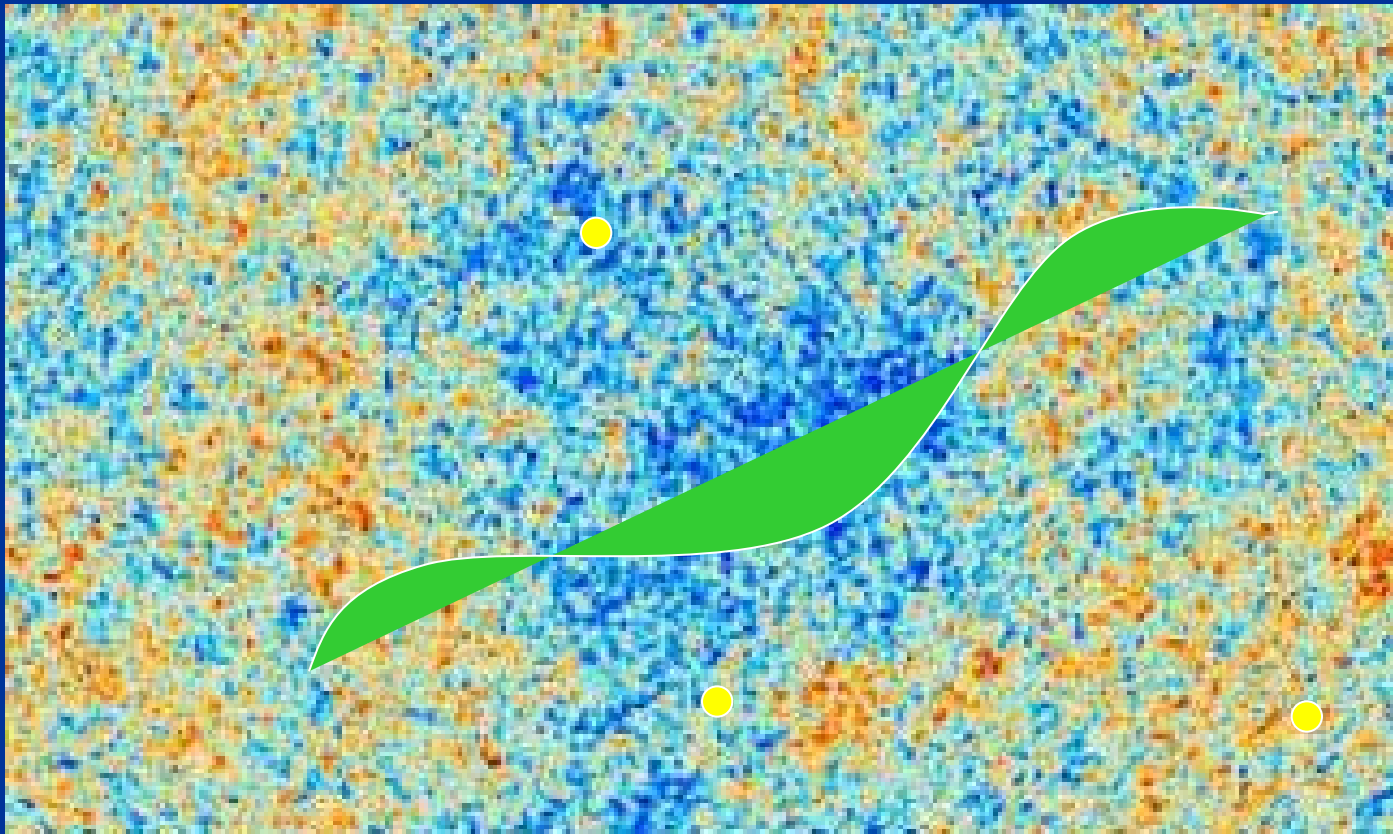
● Horizont bei  
CMB - Emission

Das Ganze ist mehr als die  
Summe seiner Teile

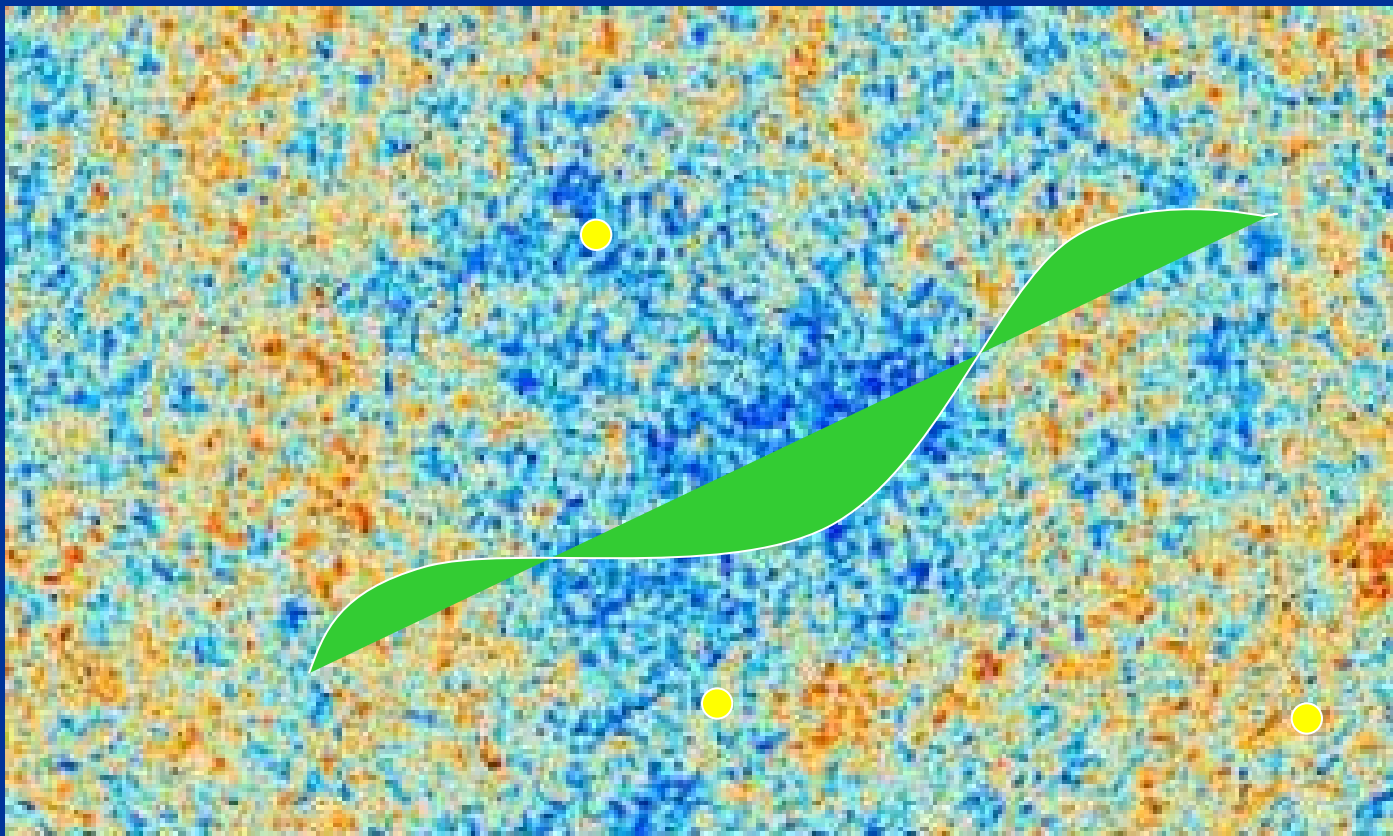
*Physik : Korrelationen*

# Langreichweitige Korrelationen

Korrelationen in der Hintergrundstrahlung über Abstände, die größer sind als der Horizont



**(2) Grenzen der Einstein- Gleichungen:  
kein Verständnis von  
Homogenität, Isotropie, flacher räumlicher  
Geometrie, langreichweitigen Korrelationen**





# Inflationäres Universum

# Gleichung für die kosmologische Evolution : Friedmann Gleichung

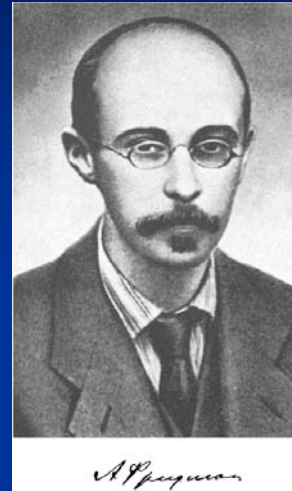
$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$

$a(t)$  : Skalenfaktor  
 $\rho(t)$  : Energie-  
Dichte  
 $t$  : Zeit

$M$  : Planck-Masse  
verknüpft mit  
Gravitationskonstante  $G$

$$G = \frac{1}{8\pi M^2}$$

# Friedmann Gleichung



- Mit Friedmann Gleichung läßt sich Evolution des Universums einfach verstehen

- Spezialfall der Einstein Gleichung

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$

# Friedmann Gleichung

- beschreibt die Änderung der kosmologischen Abstände mit der Zeit ;  $a(t)$
- enthält Ableitung
- Differentialgleichung
- erlaubt Bestimmung der Zukunft und Vergangenheit wenn  $a$  und  $\rho$  zu bestimmtem Zeitpunkt  $t$  gegeben
- benötigt Eigenschaften von  $\rho$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$

wenn Materie dominiert :

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$

$$\rho = mn$$

n : Teilchendichte

$$n = \frac{c}{a^3}$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{cm}{3M^2 a}} \sim \frac{1}{\sqrt{a}}$$

Expansion wird  
langsamer , wenn  
a größer wird

wenn Energiedichte konstant ist :

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$

$\rho$  konstant:  
Expansion wird schneller  
wenn  $a$  größer wird

Dunkle Energie und Dunkle Materie sind (heute) Gegenspieler :

**Dunkle Materie verlangsamt Expansion**

**Dunkle Energie beschleunigt Expansion**

wenn Energiedichte konstant ist :

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$

$\rho$  konstant:

Expansion wird schneller  
wenn  $a$  größer wird

Inflation :

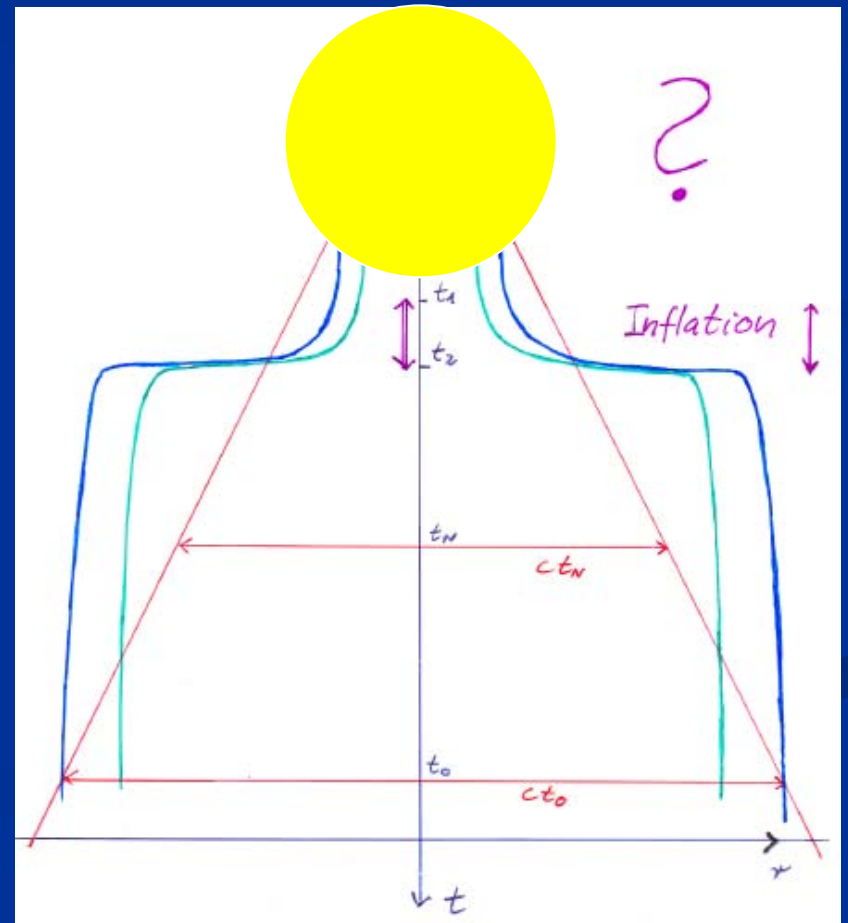
Periode mit fast konstanter Energiedichte

explosionsartige Expansion

Inflation = Urknall

# Explosionsartige Expansion der Inflation löst Problem der Kausalität

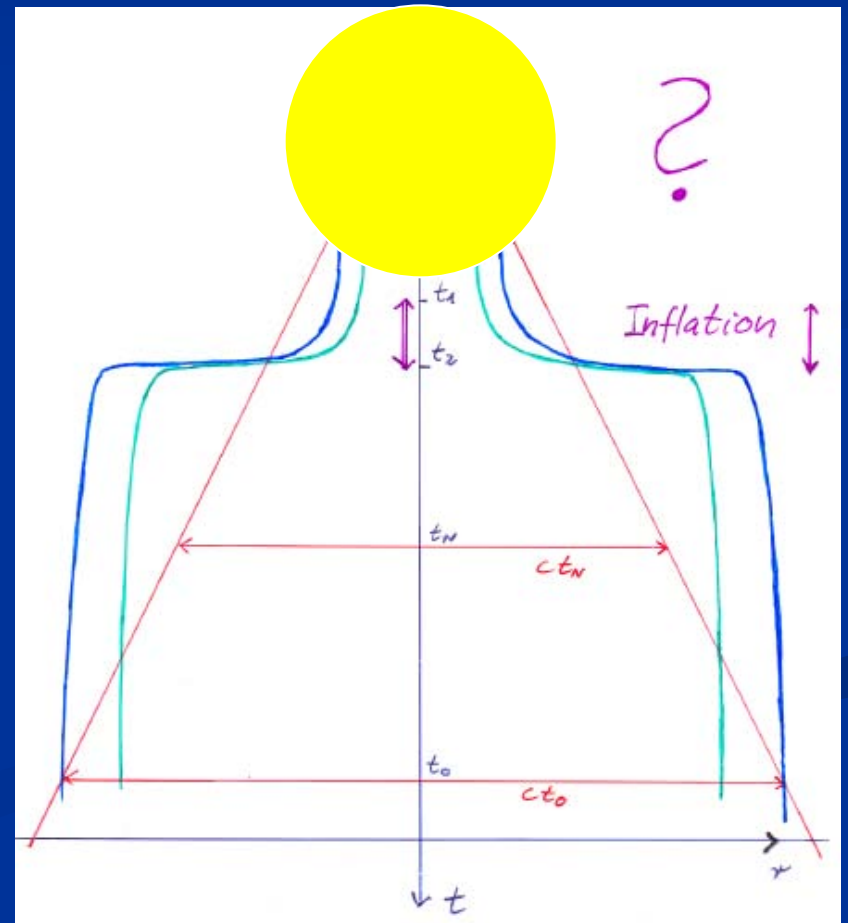
$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$





# Explosionsartige Expansion der Inflation löst Problem der Kausalität und erklärt, wie **Information bis heute gespeichert** werden kann

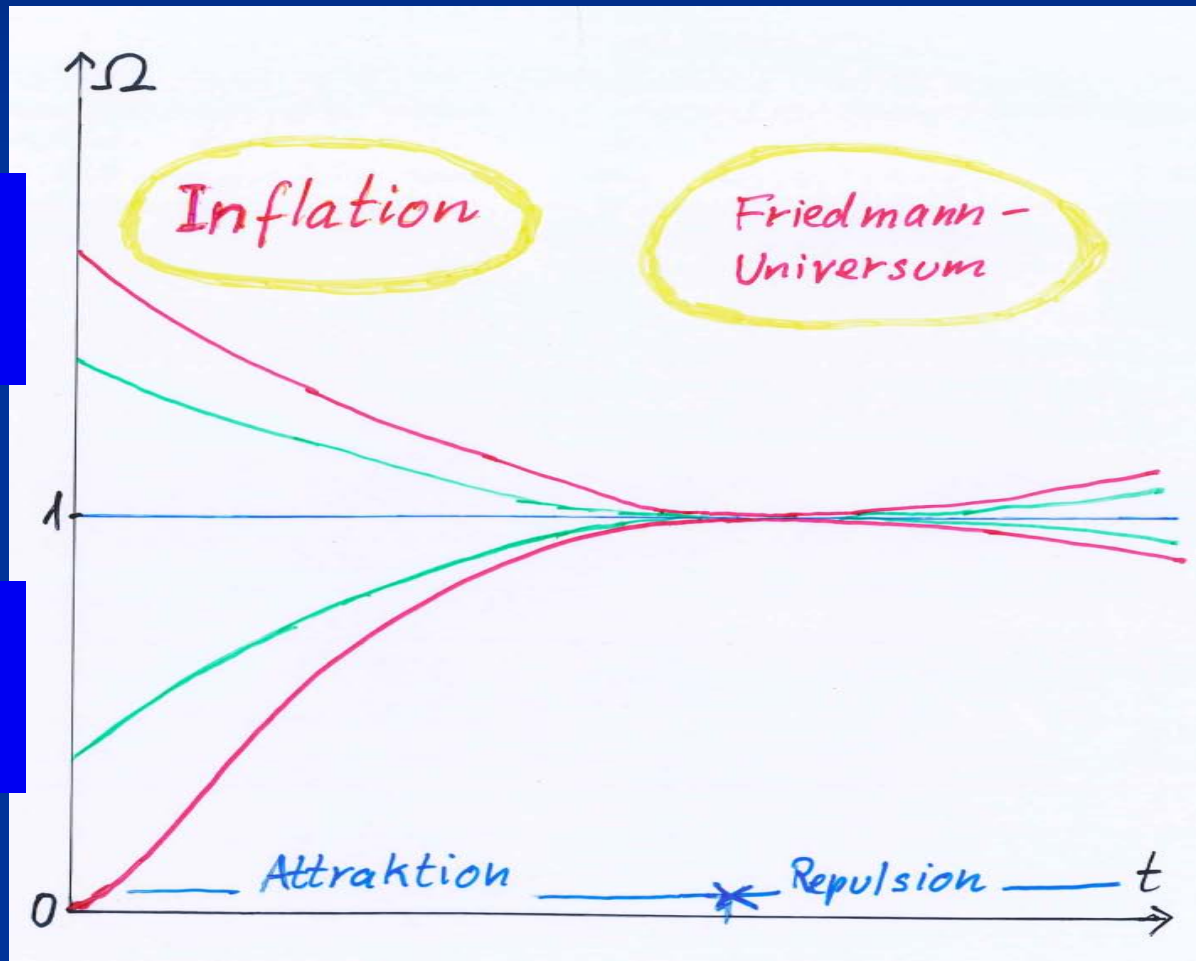
$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$



# Explosionsartige Expansion der Inflation erklärt räumlich flache Geometrie

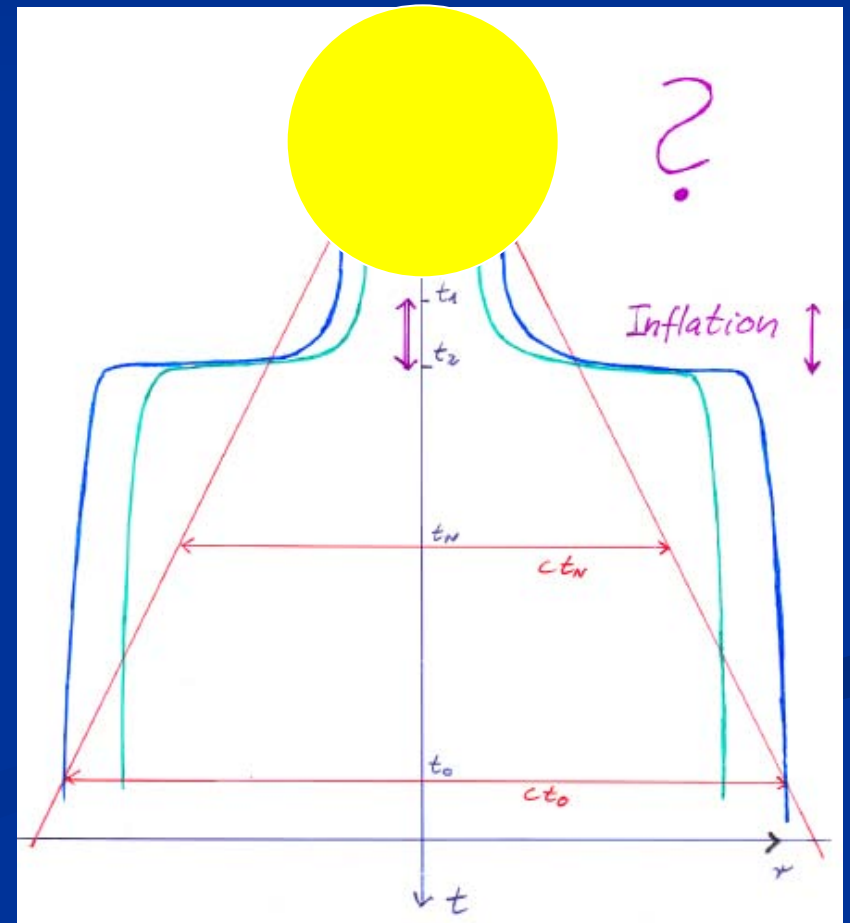
?

?



### (3) Fast konstante Energiedichte führt zu explosionsartiger Ausdehnung des Raums

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$



# Inflaton : das Skalarfeld der Inflation

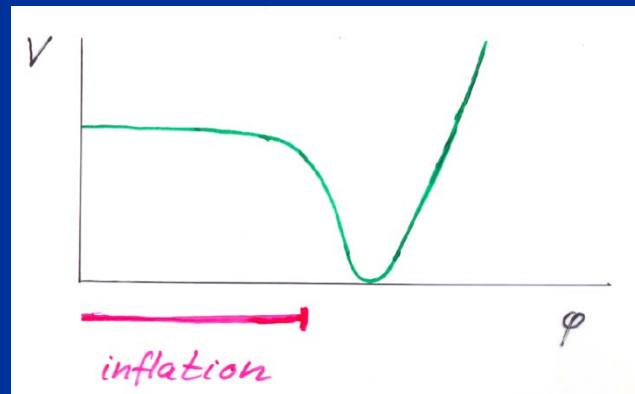
# Skalarfeld und fast konstante Energiedichte

potentielle Energie  $V$  trägt zur Energiedichte bei

$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$

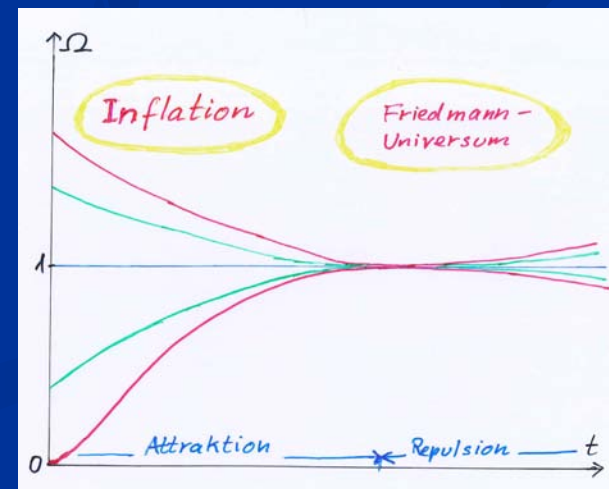
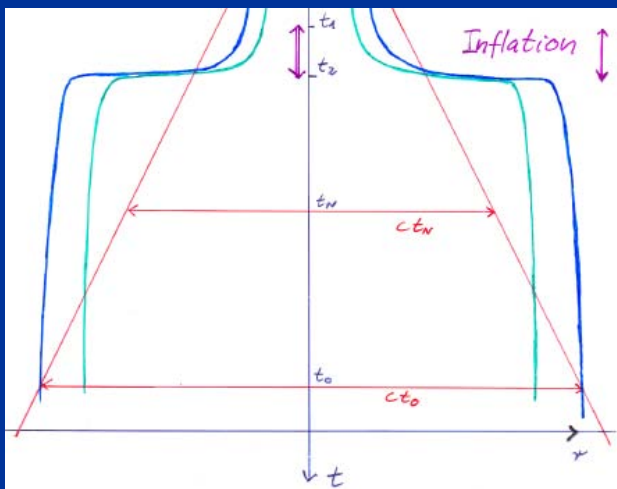
flaches Potential : langsame Änderung

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -dV/d\phi$$

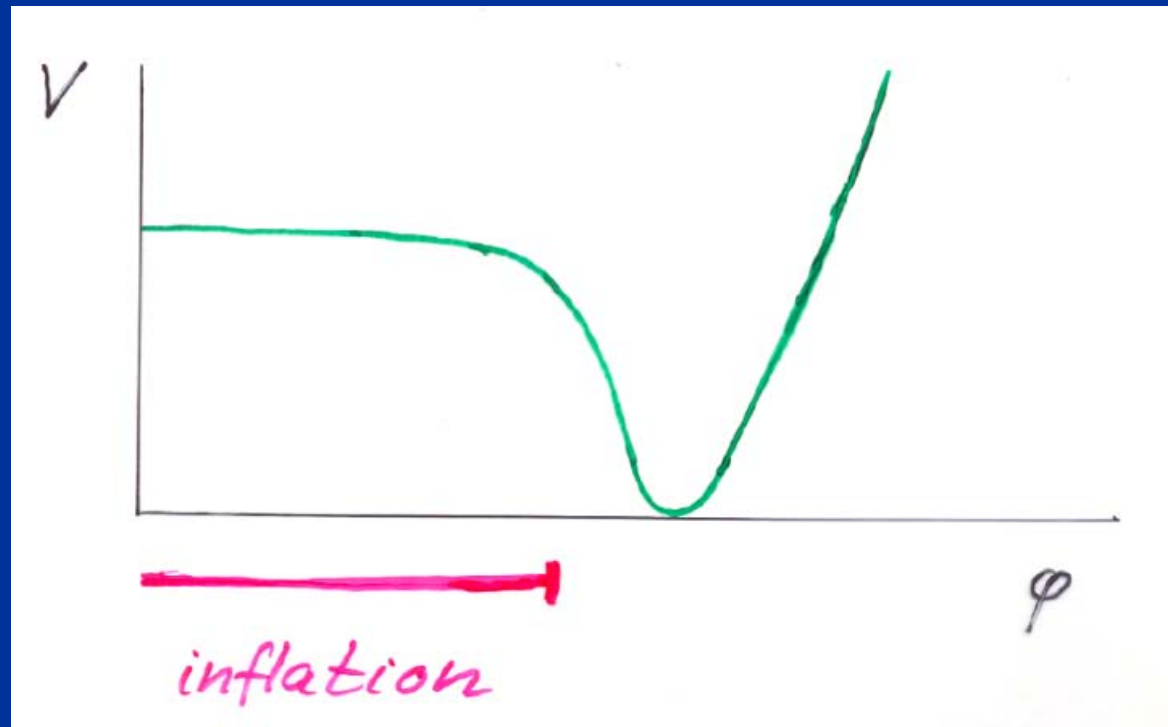


# Urknall : Explosion des Raums

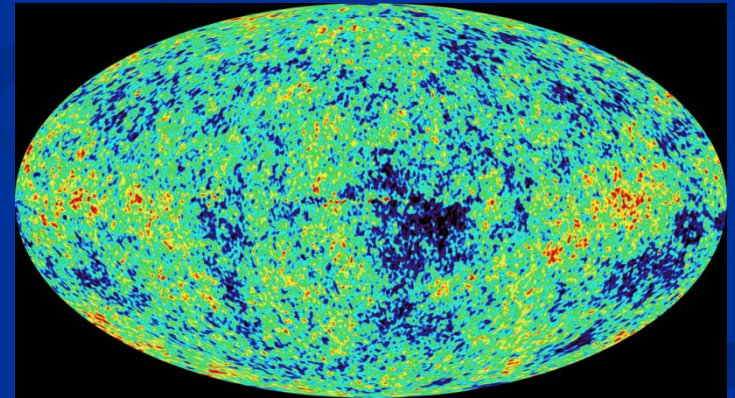
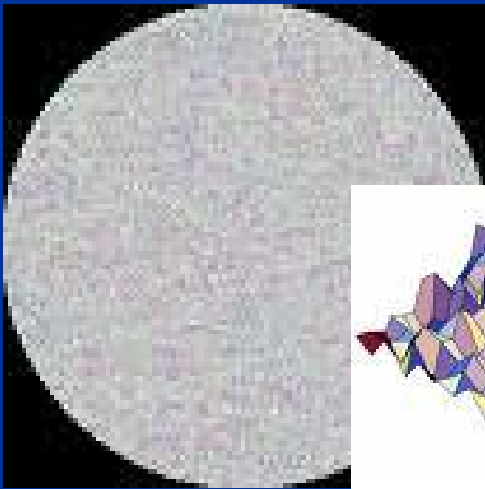
- am Anfang waren Raum und Zeit und Felder
- während der Inflation ist Universum leer
- Materie und Strahlung werden am Ende der Inflation erzeugt



# Erzeugung von Teilchen, Strahlung und Entropie am Ende der Inflation



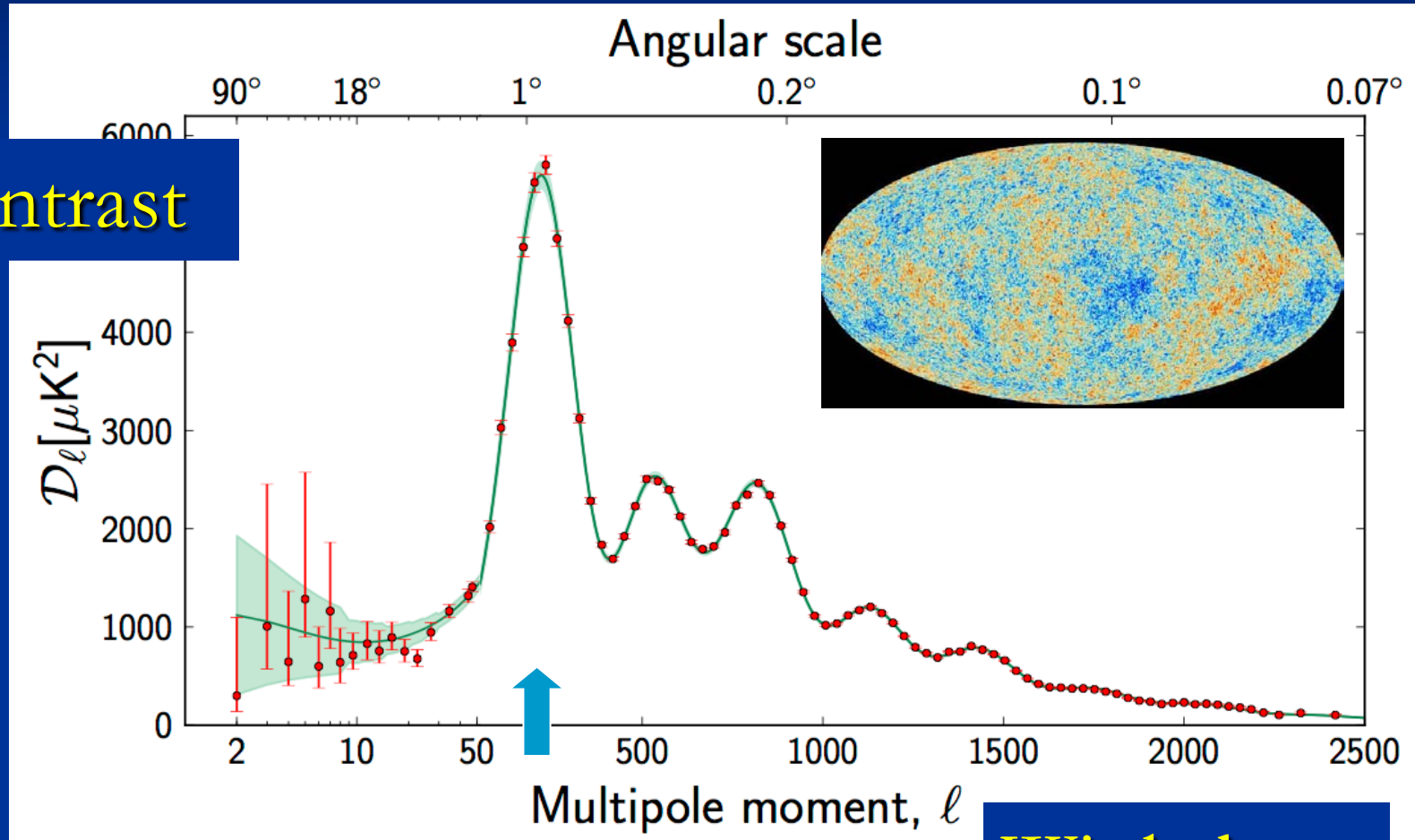
# Quantenfluktuationen des Skalarfelds sind berechenbar





# Vorhersage der Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von Fleckengröße ( im Winkel )

Kontrast

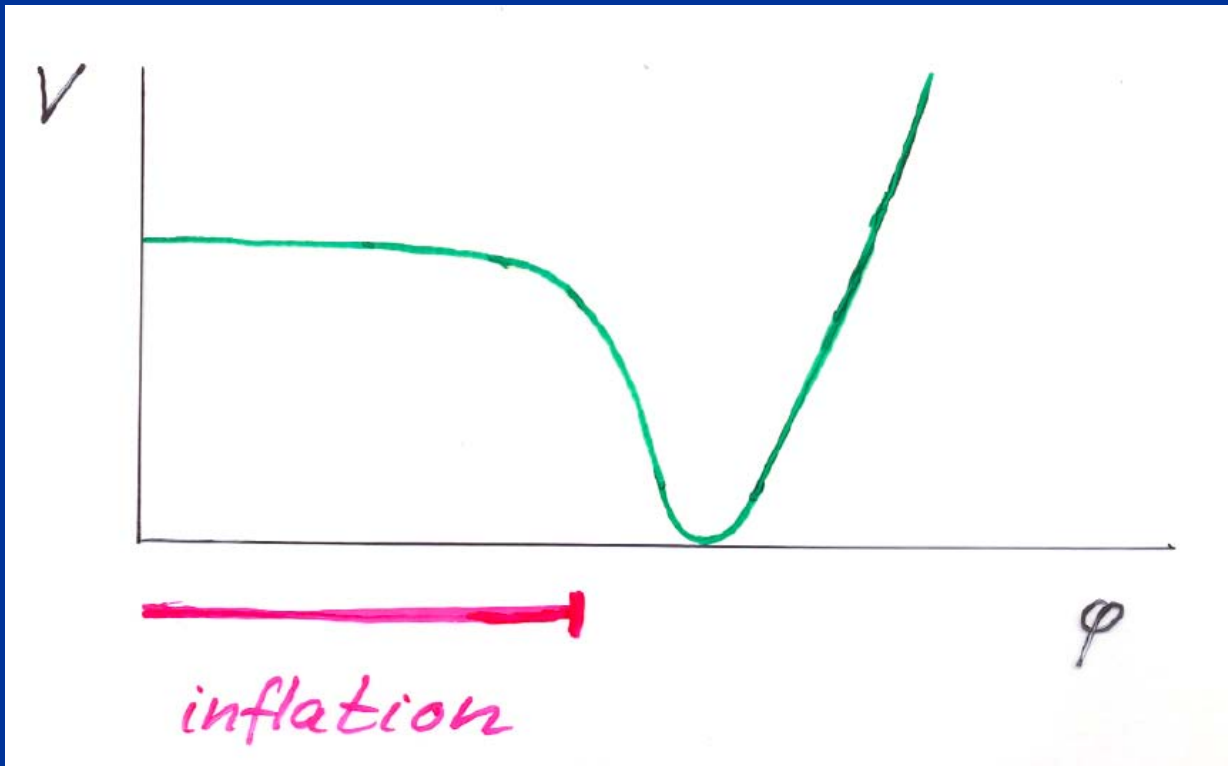


ca 10 Grad

ca 1 Grad

Winkel

(4) Am Anfang war das Universum  
öd und leer :  
Skalarfeld, Gravitationsfeld,  
Quantenfluktuationen der Felder



# Chancen der Verifizierung ?

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

# Vorhersage: räumlich flaches Universum

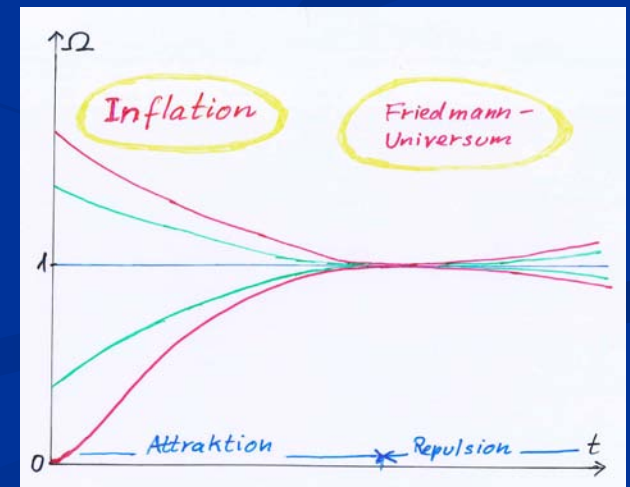
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$

- Theorie (Inflationäres Universum )

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.0000 \dots \dots \dots x$$

- Beobachtung ( Planck )

$$\Omega_{\text{tot}} = 0.99 \left( \pm 0.006 \right)$$

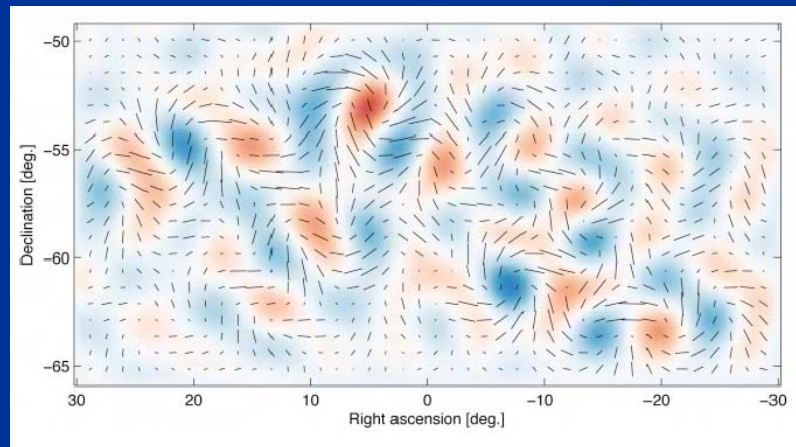


# Vorhersagen der Inflation

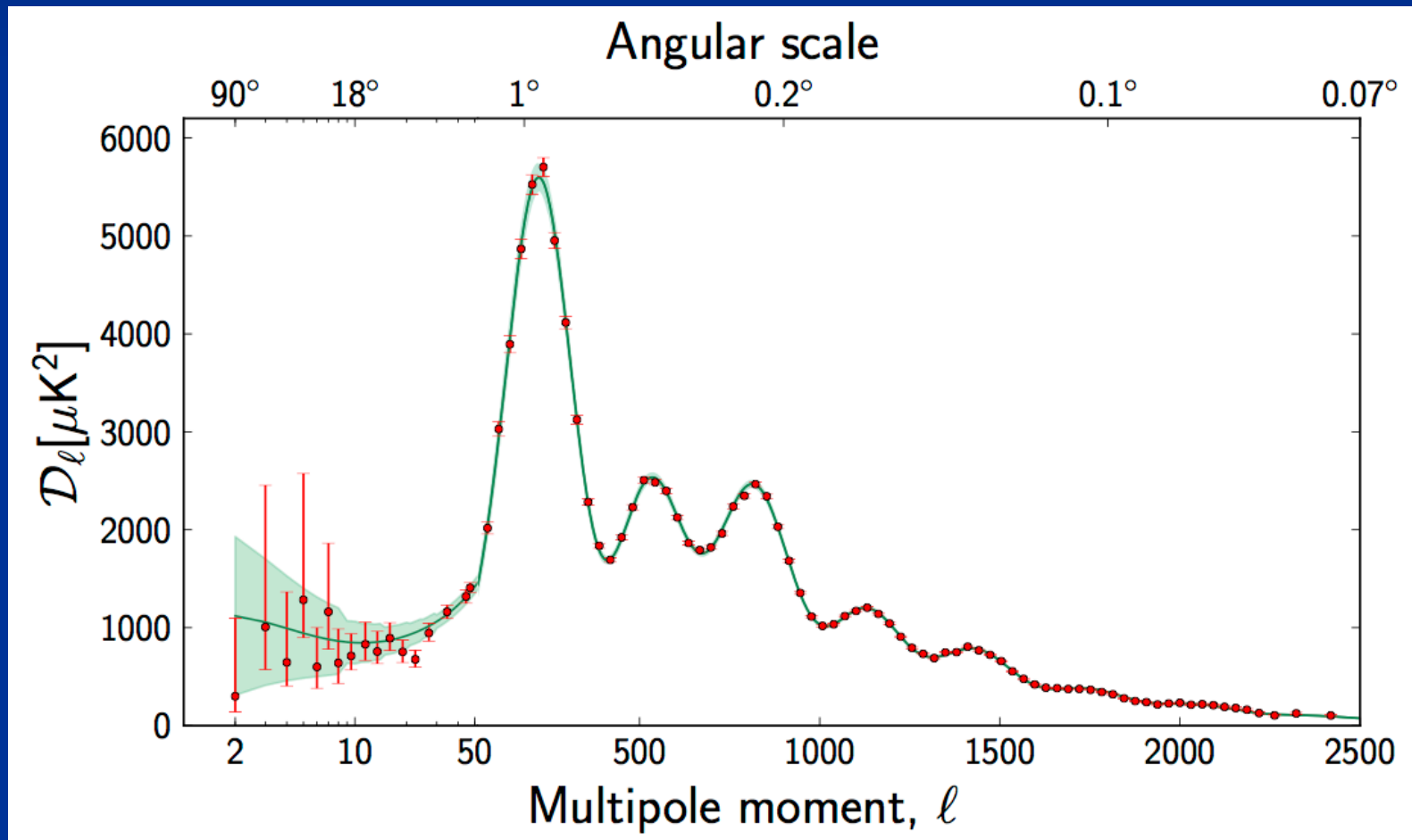
- Universum hat kritische Dichte ☺
- Quantenfluktuationen aus der Zeit der Inflation werden zu “Schallwellen“ zum Zeitpunkt der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung ☺
- Fluktuationen sind adiabatisch (erhaltene Entropie) ☺

# Vorhersagen der Inflation

- Fluktuationen sind Gauss-verteilt ☺
- Fluktuationen sind fast skaleninvariant ☺
- Quantenfluktuationen der Metrik führen zu Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung ( B-modes )



# (5) Vorhersagen der Inflation bisher alle bestätigt !



# Viele Modelle der Inflation ...

für die meisten Modelle :

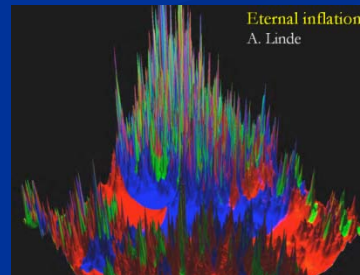
Am Nullpunkt der Zeit werden Lösungen der kosmologischen Gleichungen singular



**Was ist Ursache der Inflation ?**

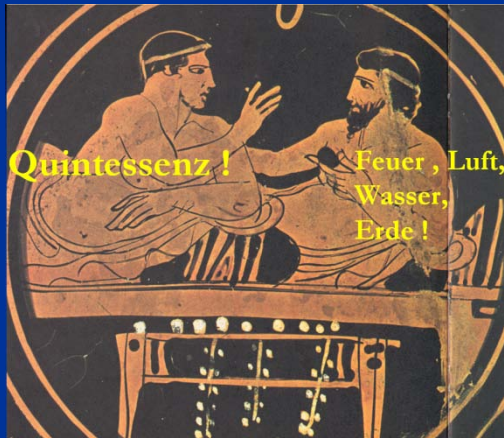
# Spekulative Physik ..

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

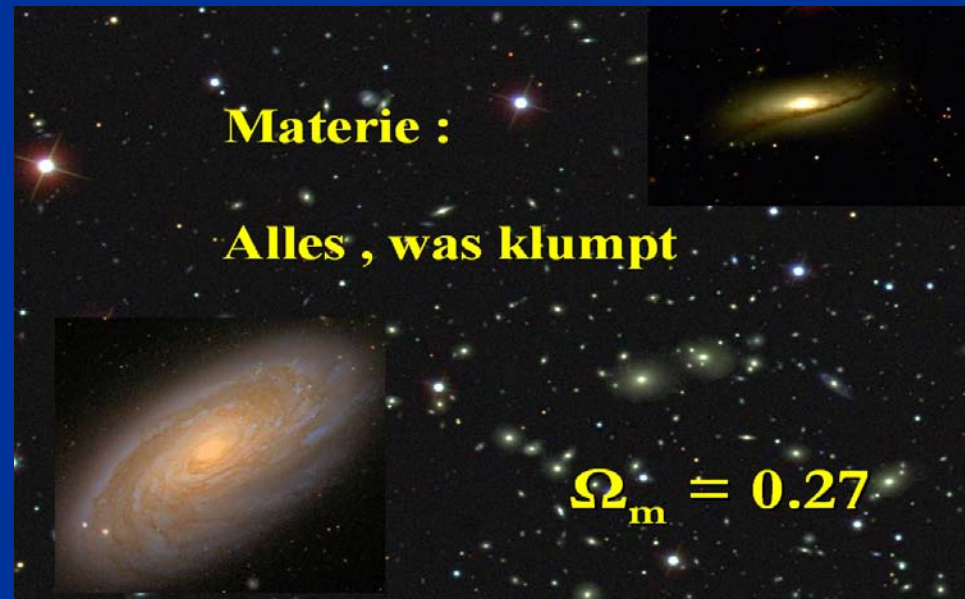


# Dunkle Energie

- nur ein Viertel der Energiedichte des Universums besteht aus Materie
- drei Viertel sind völlig gleichmäßig verteilte Dunkle Energie



Woraus besteht das  
Universum ?

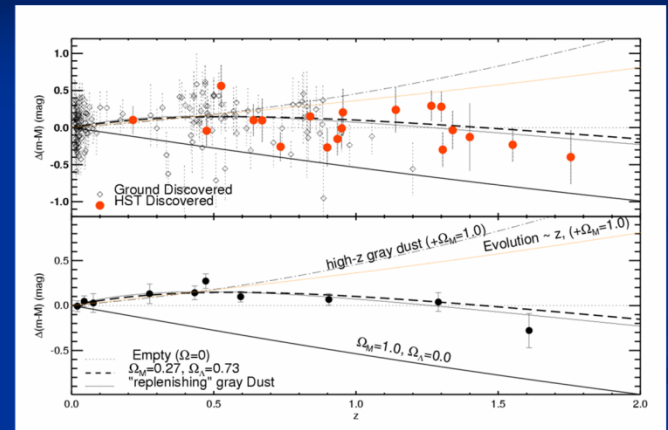


# Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums  
beschleunigt sich heute !*

*ähnlich zur Inflation*

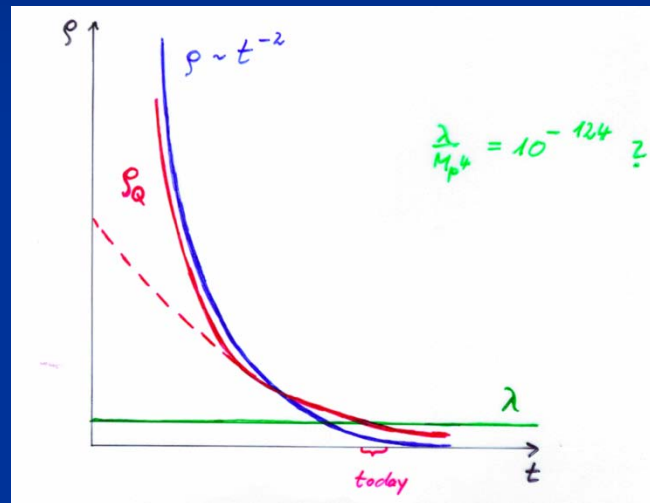
## Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung  $z$

Riess et al. 2004

# Dynamische Dunkle Energie benötigt Skalarfeld ( Kosmon )



**Dieses Feld kann auch für die  
Inflation verantwortlich sein !**

(6) Inflaton = Kosmon ?

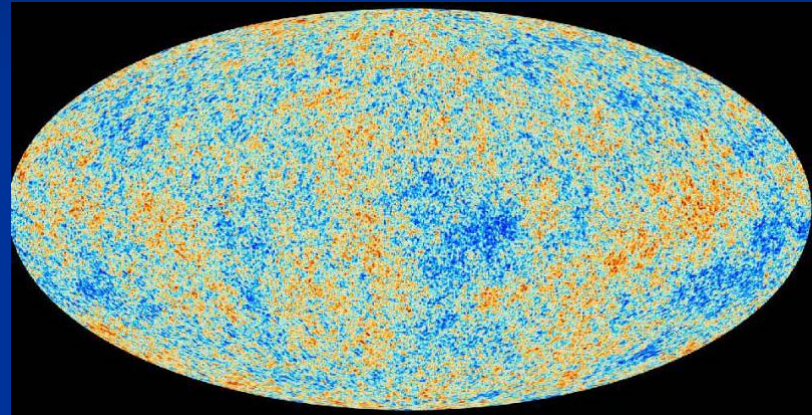
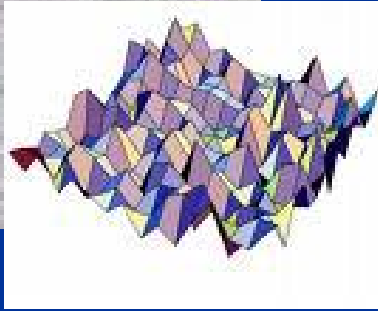
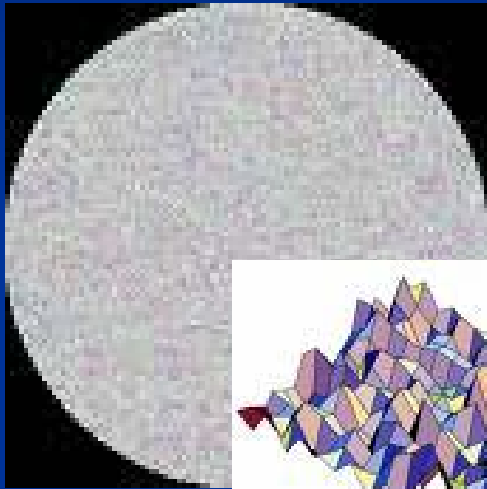
Frühe und späte Dunkle Energie  
können durch ein einziges Skalarfeld  
beschrieben werden

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -dV/d\phi$$

$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$

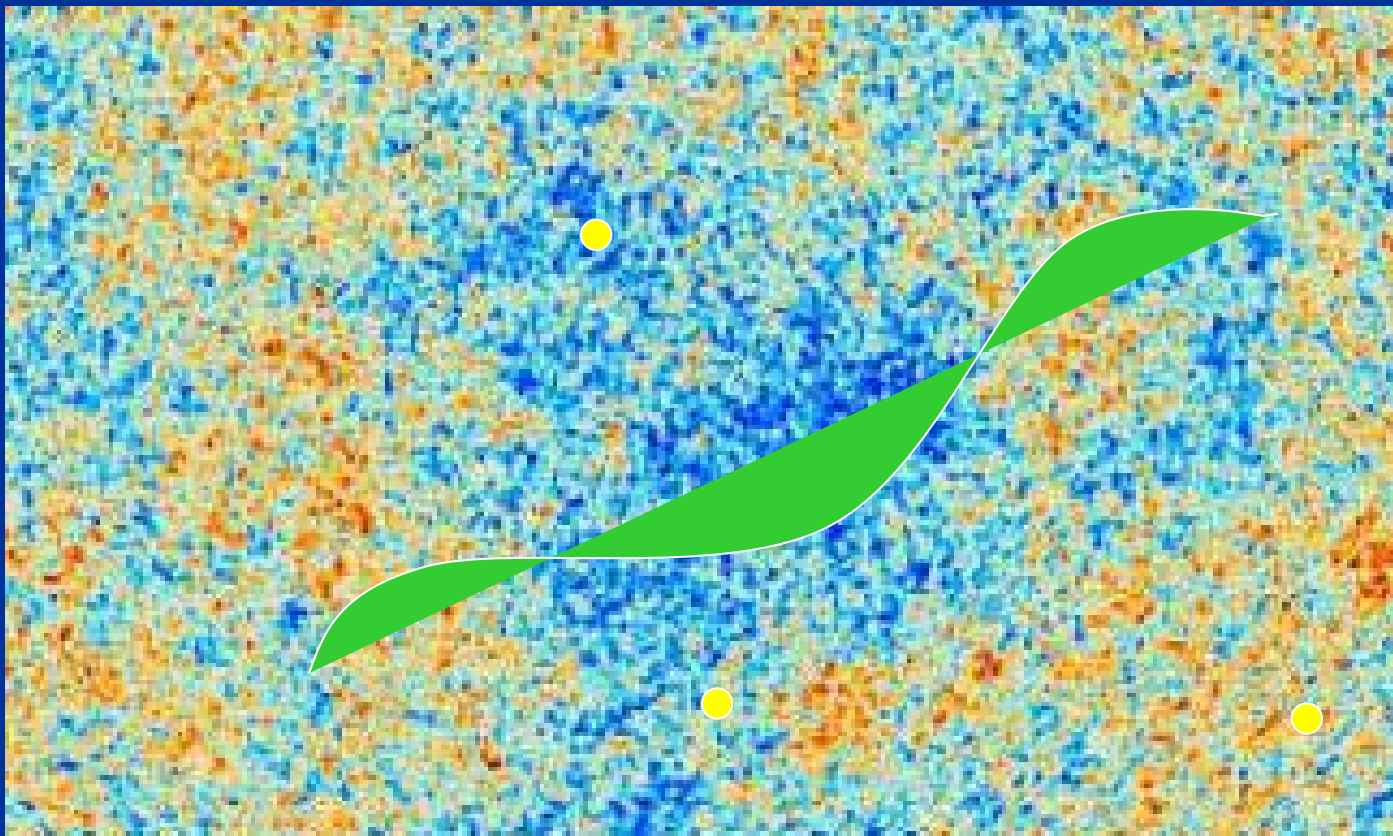
# Zusammenfassung

# (1) Die Strukturen im Universum sind aus Quantenfluktuationen während des Urknalls entstanden



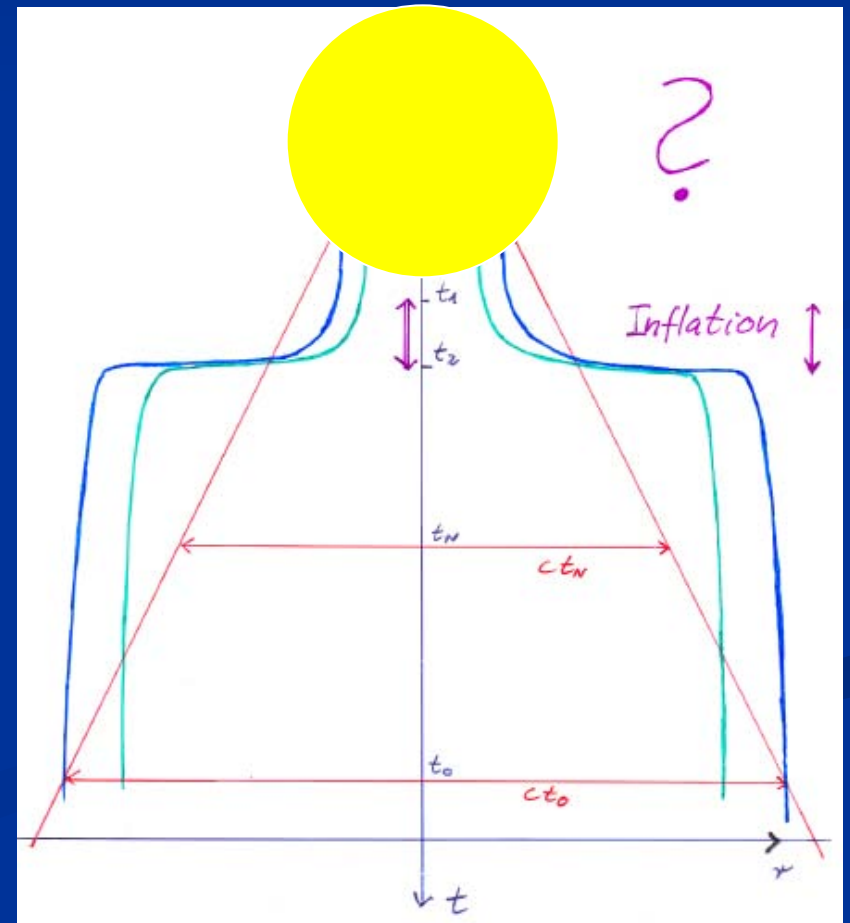


**(2) Grenzen der Einstein- Gleichungen:  
kein Verständnis von  
Homogenität, Isotropie, flacher räumlicher  
Geometrie, langreichweitigen Korrelationen**

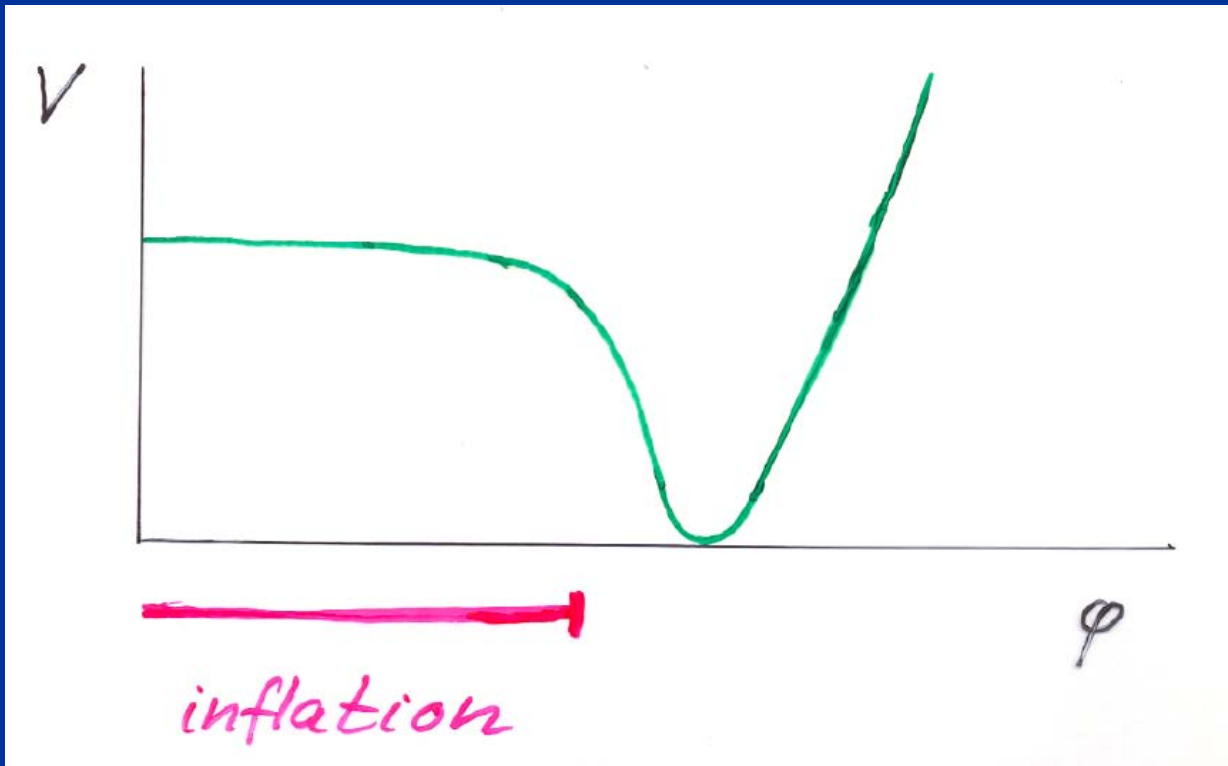


### (3) Fast konstante Energiedichte führt zu explosionsartiger Ausdehnung des Raums

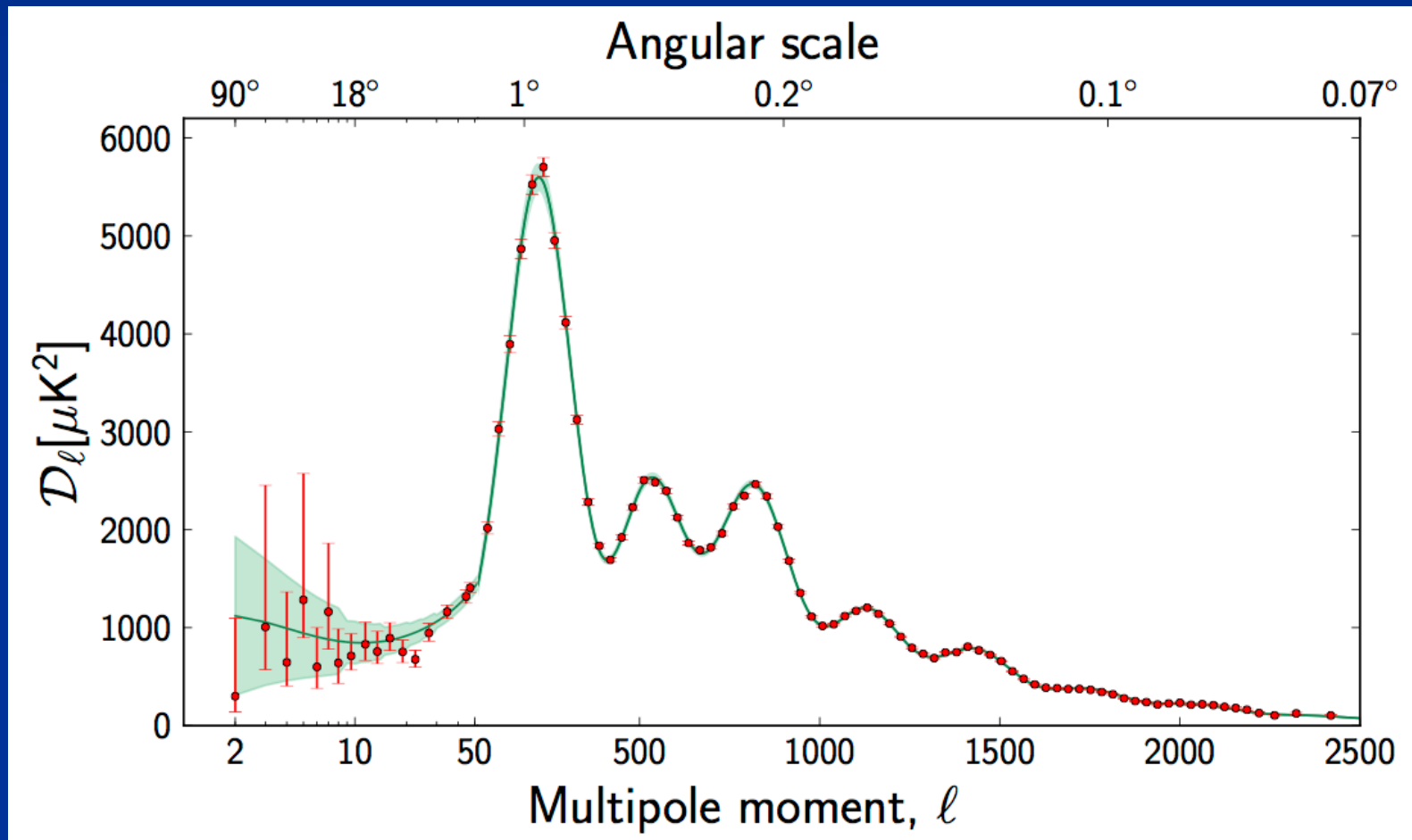
$$\frac{\partial a}{\partial t} = \sqrt{\frac{\rho}{3M^2}} a$$



(4) Am Anfang war das Universum  
öd und leer :  
Skalarfeld, Gravitationsfeld,  
Quantenfluktuationen der Felder



# (5) Vorhersagen der Inflation bisher alle bestätigt !



(6) Inflaton = Kosmon ?

Frühe und späte Dunkle Energie  
können durch ein einziges Skalarfeld  
beschrieben werden

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -dV/d\phi$$

$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$



Ende