

# **„Dunkle Energie“ Und was Physiker damit meinen**

**Axel Maas**

13. Dezember 2017



**NAWI Graz**  
Natural Sciences

 **@axelmaas**  
**axelmaas.blogspot.com**

# Überblick

# Überblick

- “Dunkle Energie”: Worum geht es?

# Überblick

- “Dunkle Energie”: Worum geht es?
- Die Entwicklung des Kosmos

# Überblick

- “Dunkle Energie”: Worum geht es?
- Die Entwicklung des Kosmos
- Die Zusammensetzung des Kosmos

# Überblick

- “Dunkle Energie”: Worum geht es?
- Die Entwicklung des Kosmos
- Die Zusammensetzung des Kosmos
  - Materie

# Überblick

- “Dunkle Energie”: Worum geht es?
- Die Entwicklung des Kosmos
- Die Zusammensetzung des Kosmos
  - Materie
  - Dunkle Materie

# Überblick

- “Dunkle Energie”: Worum geht es?
- Die Entwicklung des Kosmos
- Die Zusammensetzung des Kosmos
  - Materie
  - Dunkle Materie
  - Dunkle Energie



# Überblick

- “Dunkle Energie”: Worum geht es?
- Die Entwicklung des Kosmos
- Die Zusammensetzung des Kosmos
  - Materie
  - Dunkle Materie
  - Dunkle Energie
- Was könnte das sein?

# Worum geht es

- Ursprüngliche Fragen

# Worum geht es

- Ursprüngliche Fragen
  - Wie hat das Universum sich entwickelt?

# Worum geht es

- Ursprüngliche Fragen
  - Wie hat das Universum sich entwickelt?
    - Urknall

# Worum geht es

- Ursprüngliche Fragen
  - Wie hat das Universum sich entwickelt?
    - Urknall
  - Woraus besteht das Universum?

# Worum geht es

- Ursprüngliche Fragen
  - Wie hat das Universum sich entwickelt?
    - Urknall
  - Woraus besteht das Universum?
  - Was davon verstehen wir?

# Worum geht es

- Ursprüngliche Fragen
  - Wie hat das Universum sich entwickelt?
    - Urknall
  - Woraus besteht das Universum?
  - Was davon verstehen wir?
  - Woher wissen wir all das?

# Worum geht es

- Ursprüngliche Fragen
  - Wie hat das Universum sich entwickelt?
    - Urknall
  - Woraus besteht das Universum?
  - Was davon verstehen wir?
  - Woher wissen wir all das?
  - Wie wird sich das Universum weiterentwickeln?



# Die Entwicklung des Universums

---

Das Universum heute



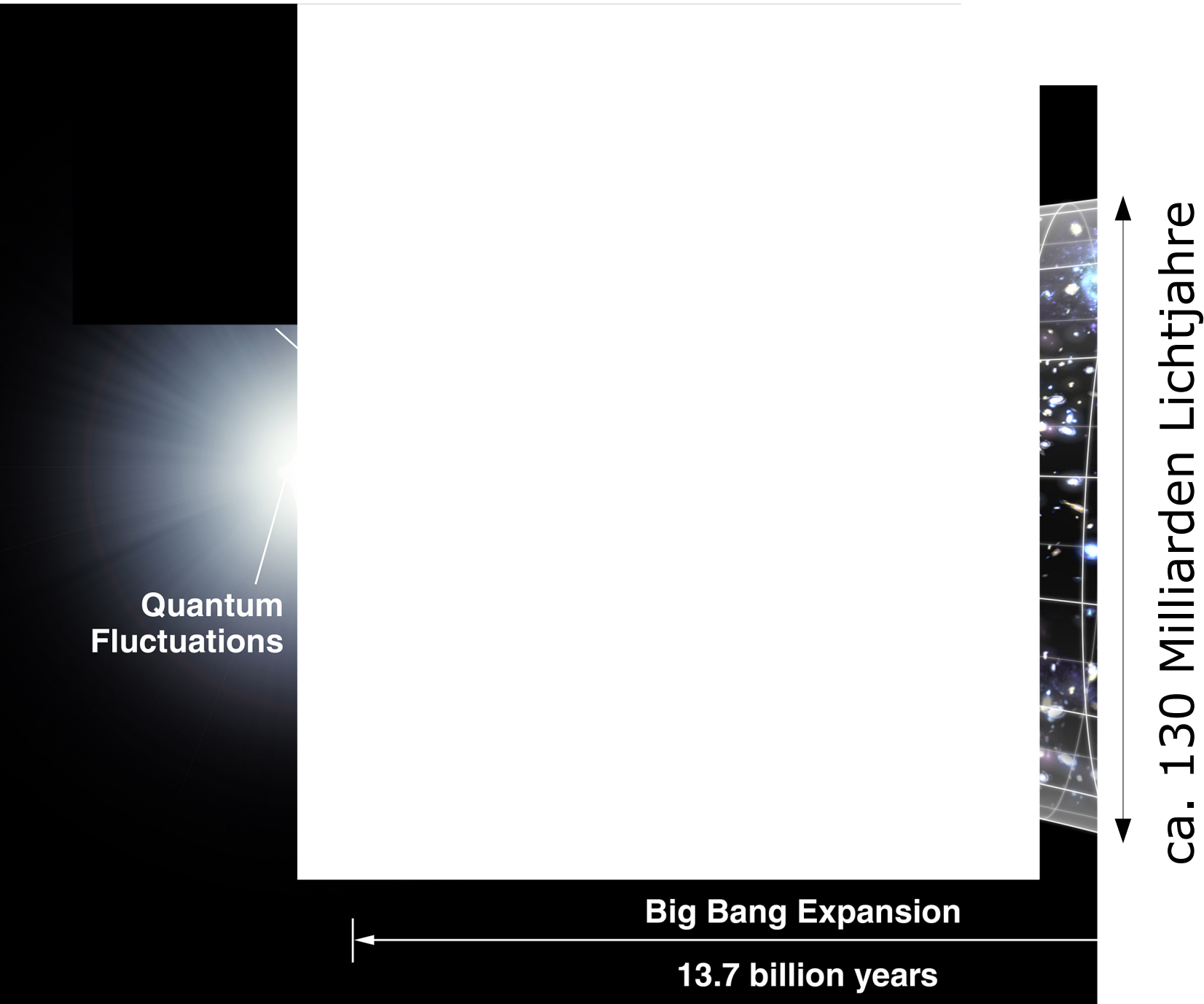
# Die Entwicklung des Universums

Das Universum heute

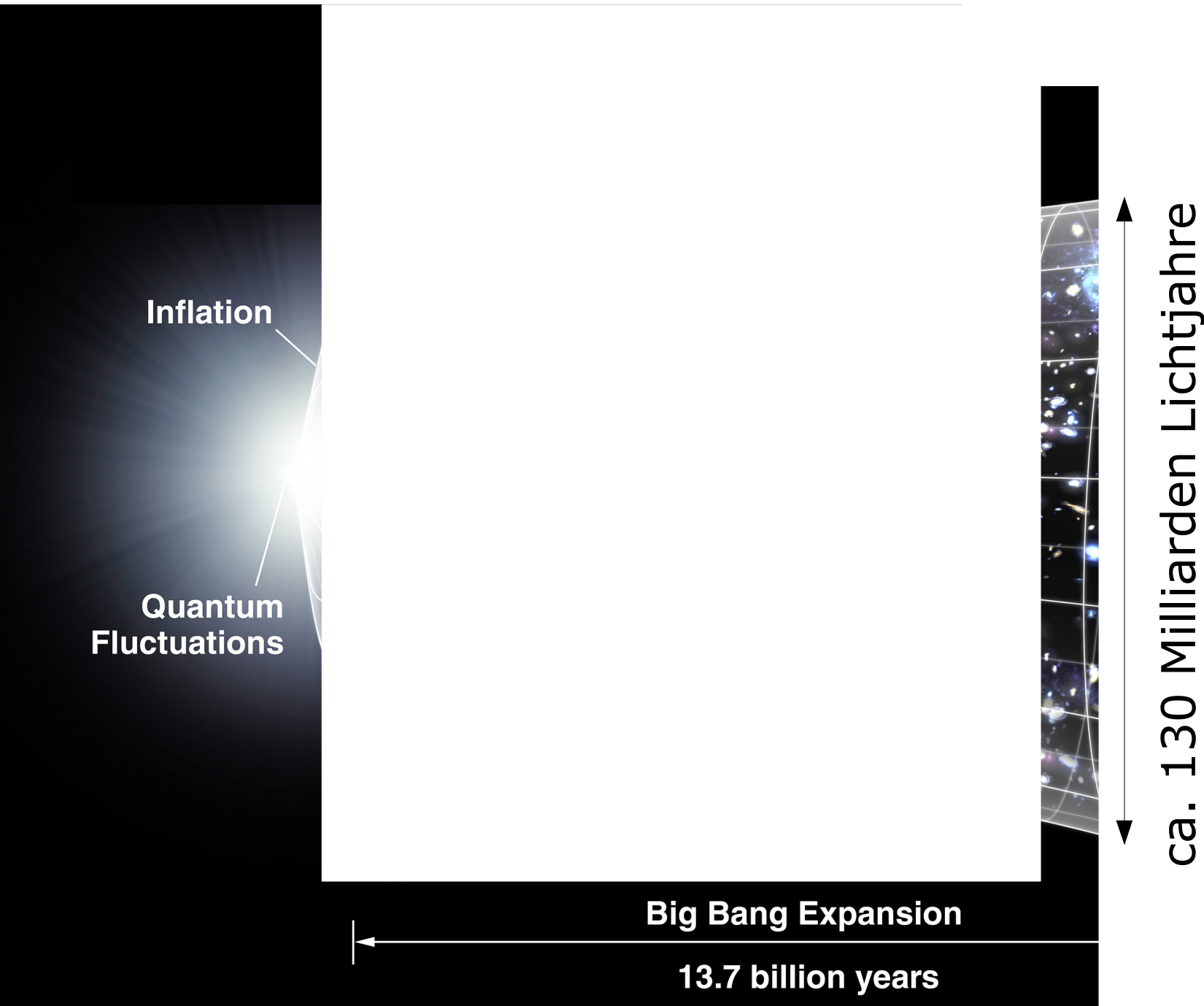


ca. 130 Milliarden Lichtjahre

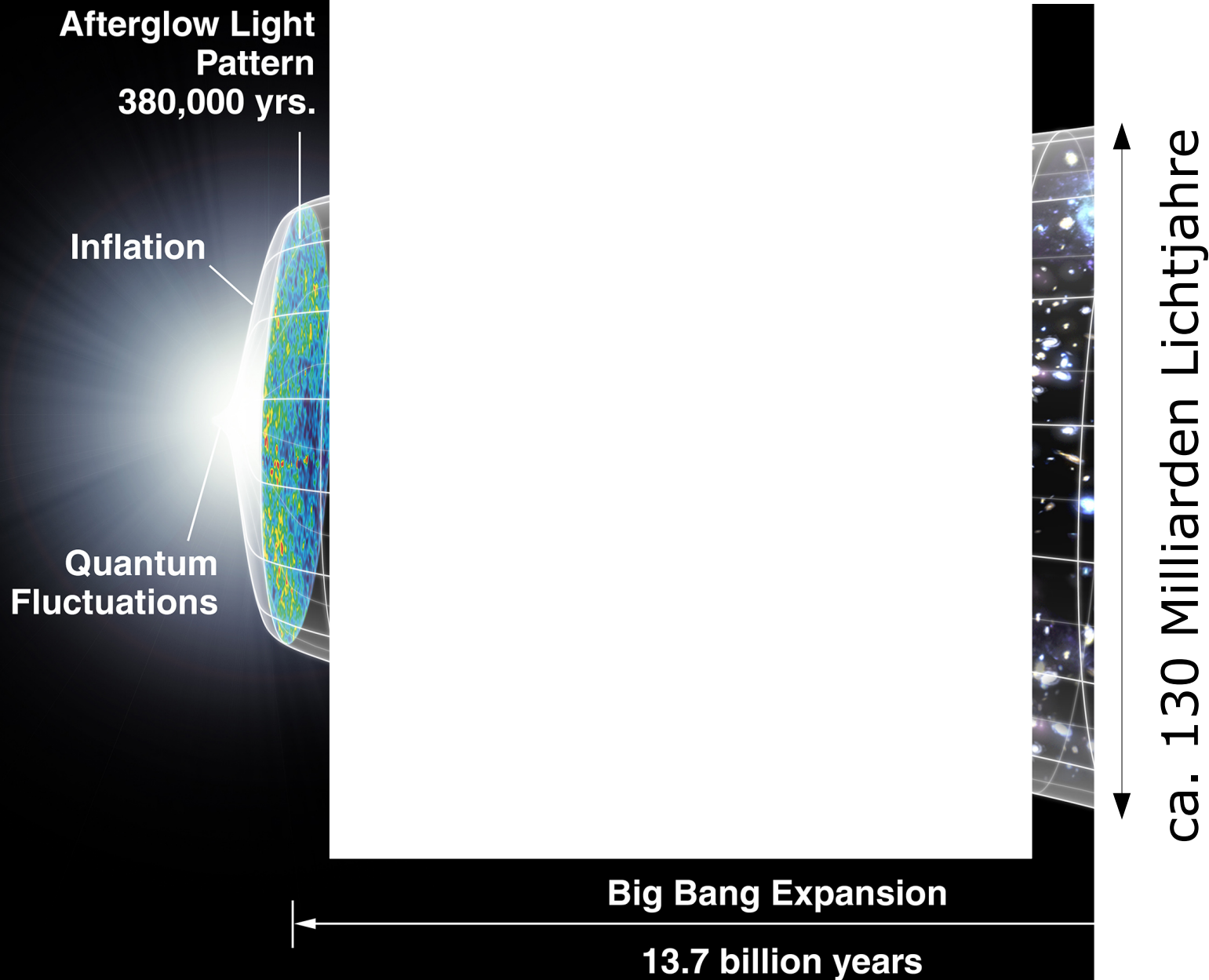
# Die Entwicklung des Universums



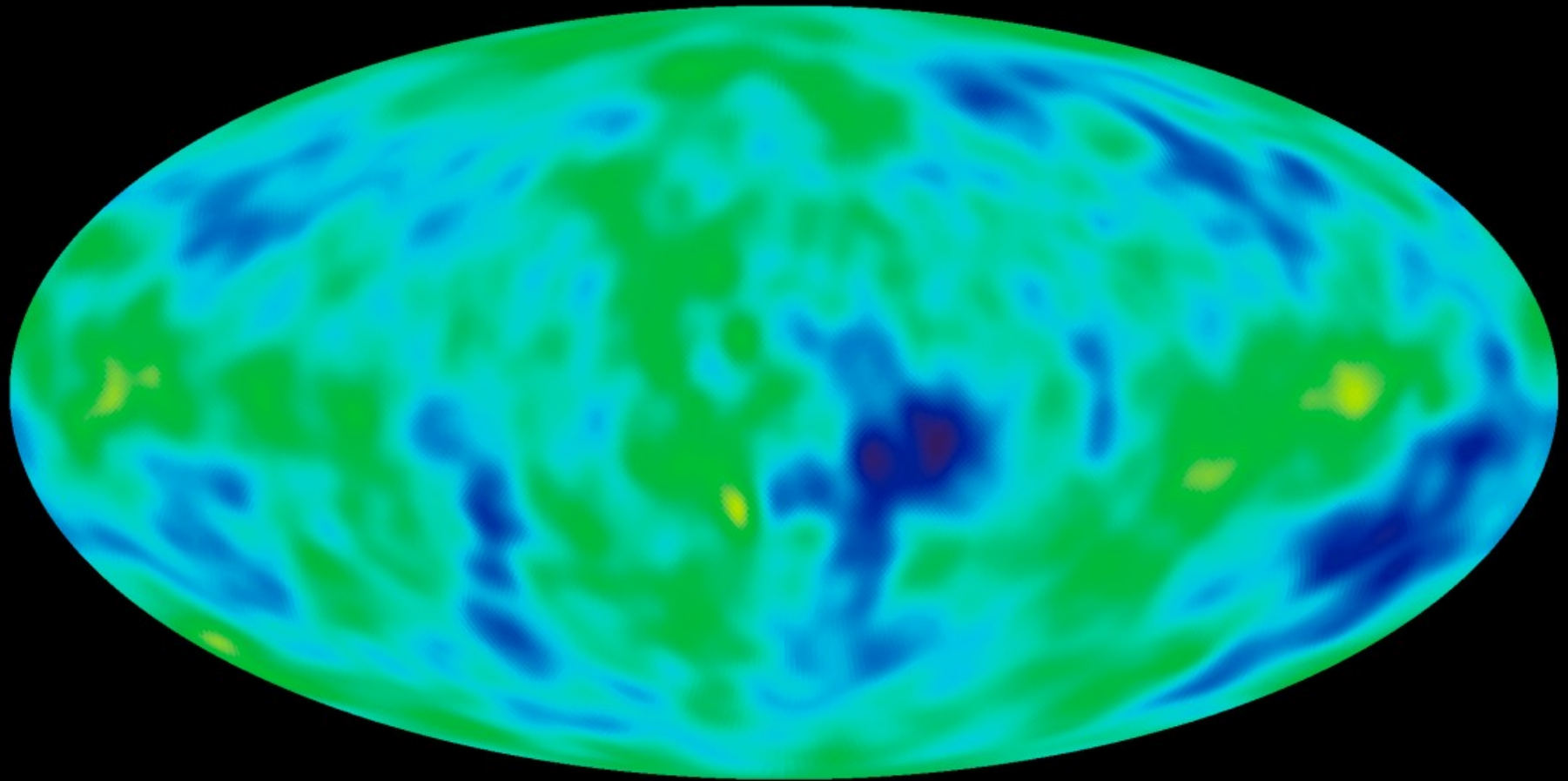
# Die Entwicklung des Universums



# Die Entwicklung des Universums

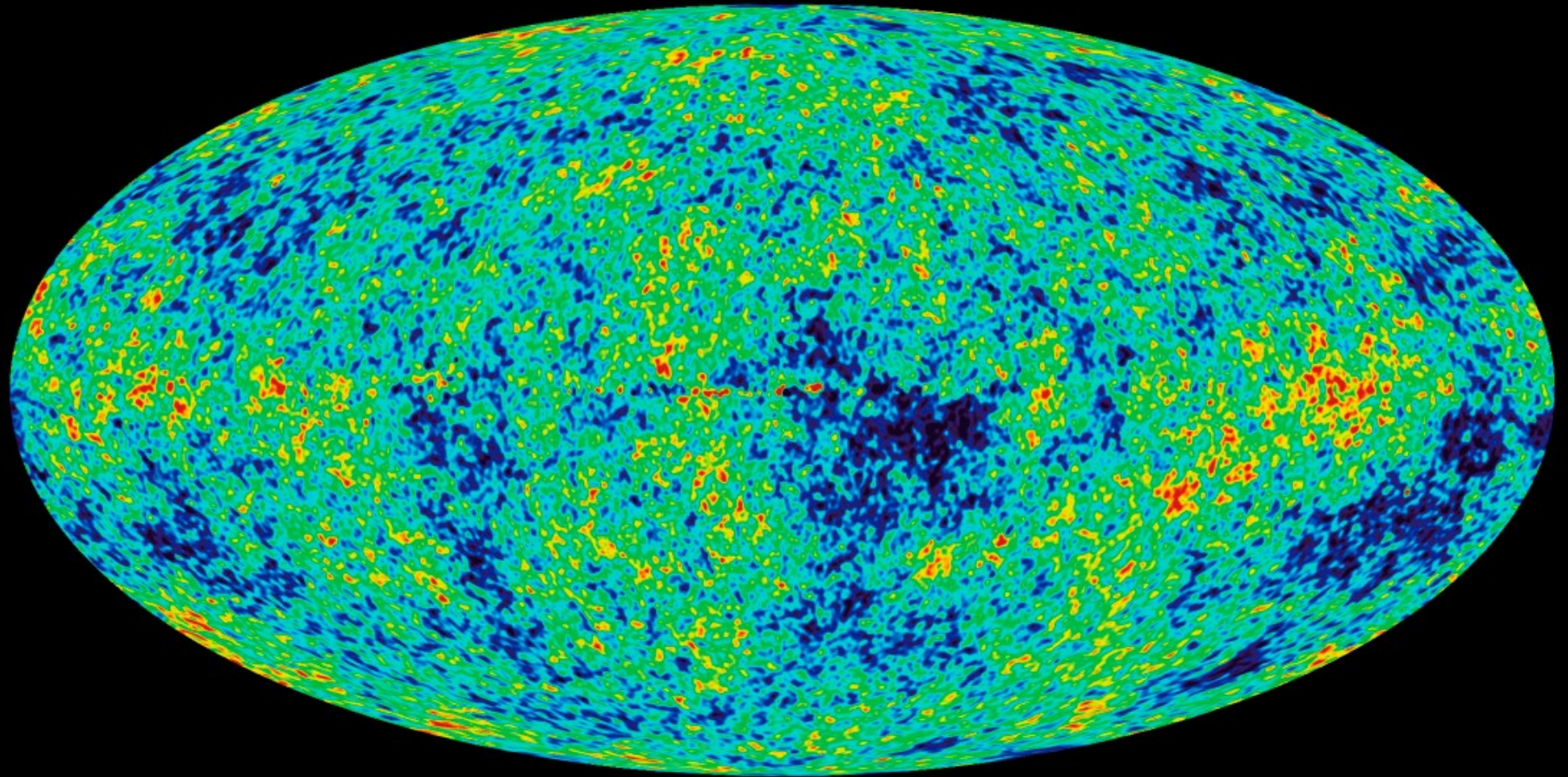


# Der kosmische Hintergrund





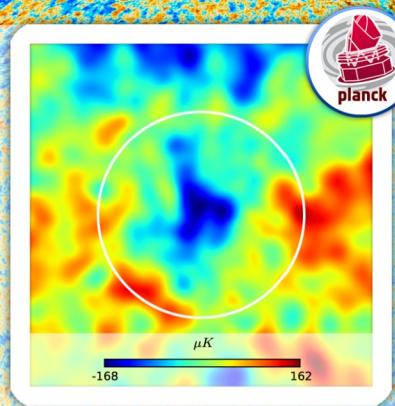
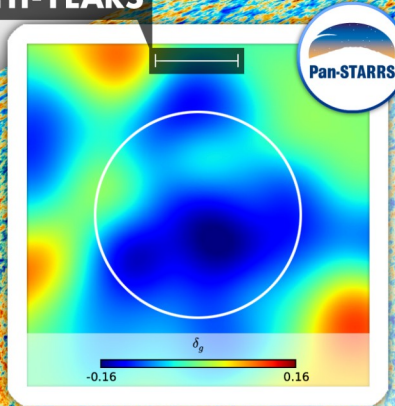
# Der kosmische Hintergrund





# Der kosmische Hintergrund

1 BILLION LIGHT-YEARS

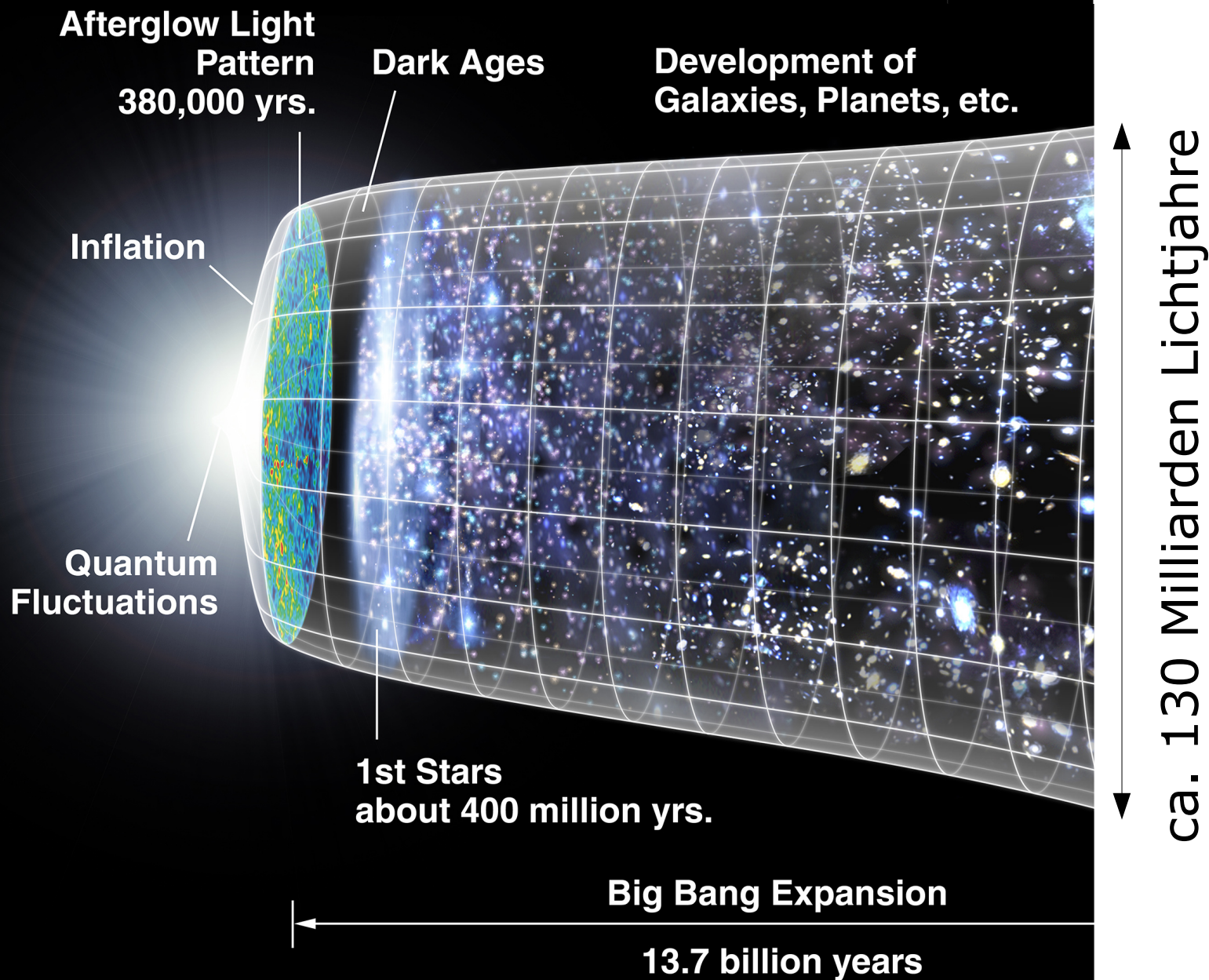


ANDROMEDA

MOON



# Die Entwicklung des Universums



# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie

# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas

# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher

# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher
  - Photonen ( $E=mc^2$ )

# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher
  - Photonen ( $E=mc^2$ )
  - Neutrinos

# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie ( $\sim 20\%$ )
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher
  - Photonen ( $E=mc^2$ )
  - Neutrinos

# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie ( $\sim 20\%$ )
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher
  - Photonen ( $E=mc^2$ )
  - Neutrinos
- Unbekannte, dunkle Materie



# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie ( $\sim 20\%$ )
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher
  - Photonen ( $E=mc^2$ )
  - Neutrinos
- Unbekannte, dunkle Materie
  - Nur durch Gravitationswirkung bemerkbar

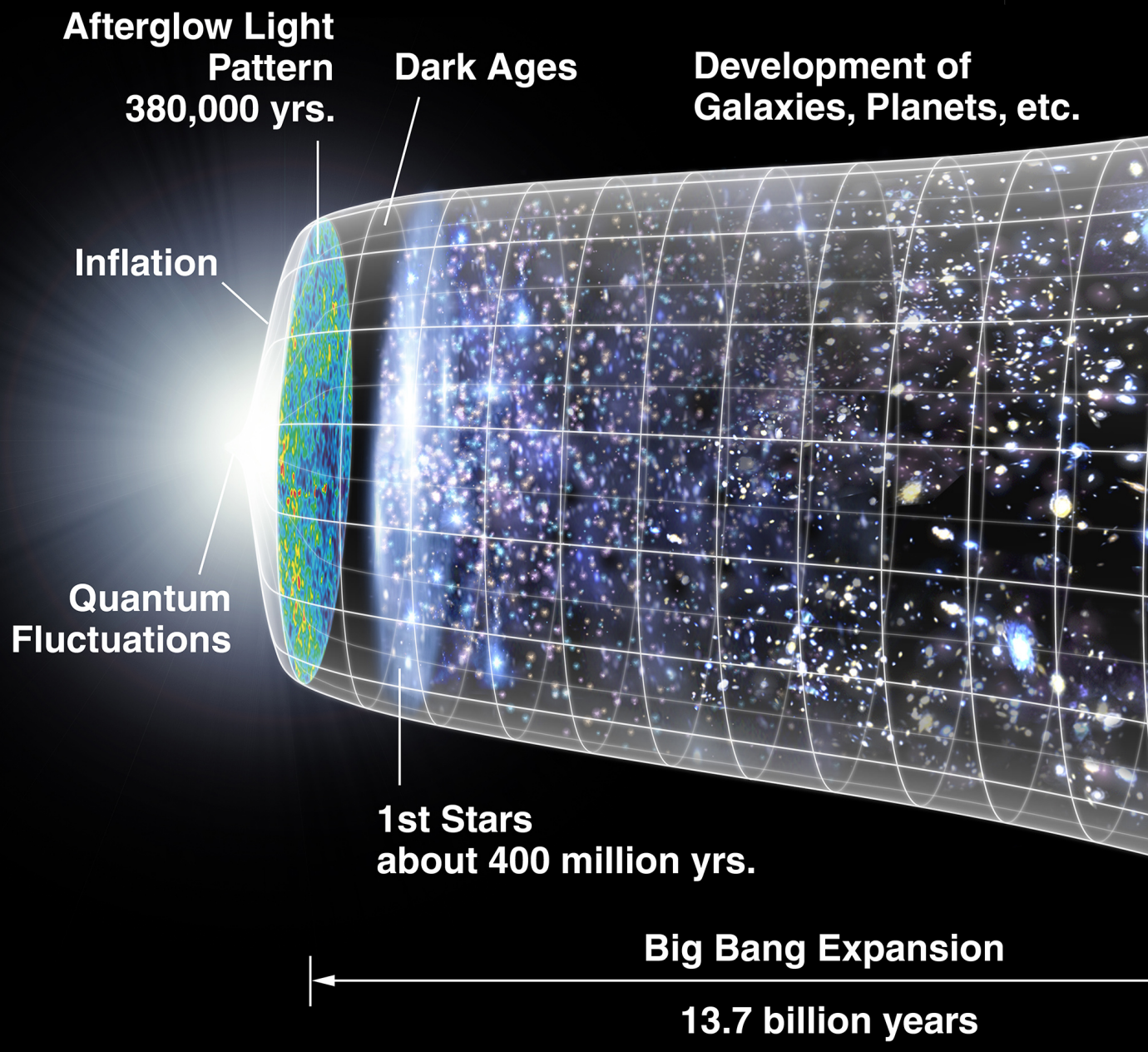
# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie ( $\sim 20\%$ )
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher
  - Photonen ( $E=mc^2$ )
  - Neutrinos
- Unbekannte, dunkle Materie
  - Nur durch Gravitationswirkung bemerkbar
  - Details unbekannt

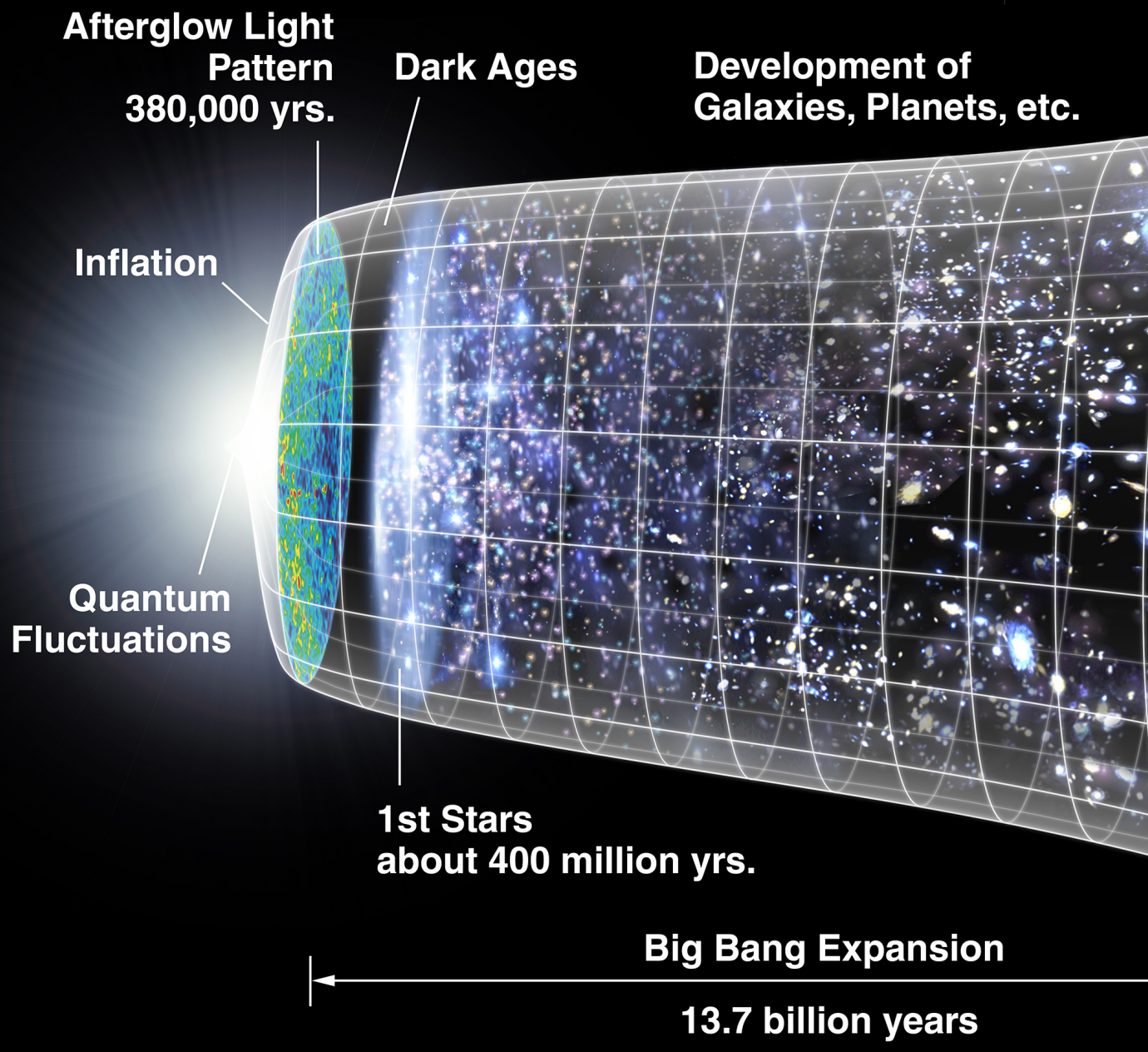
# Die Bestandteile des Universums

- Bekannte Materie ( $\sim 20\%$ )
  - Sonnen, Planeten, interstellares Gas
  - Asteroiden, Neutronensterne, schwarze Löcher
  - Photonen ( $E=mc^2$ )
  - Neutrinos
- Unbekannte, dunkle Materie
  - Nur durch Gravitationswirkung bemerkbar
  - Details unbekannt
  - Könnte auch was ganz anderes sein...

# Die Entwicklung des Universums



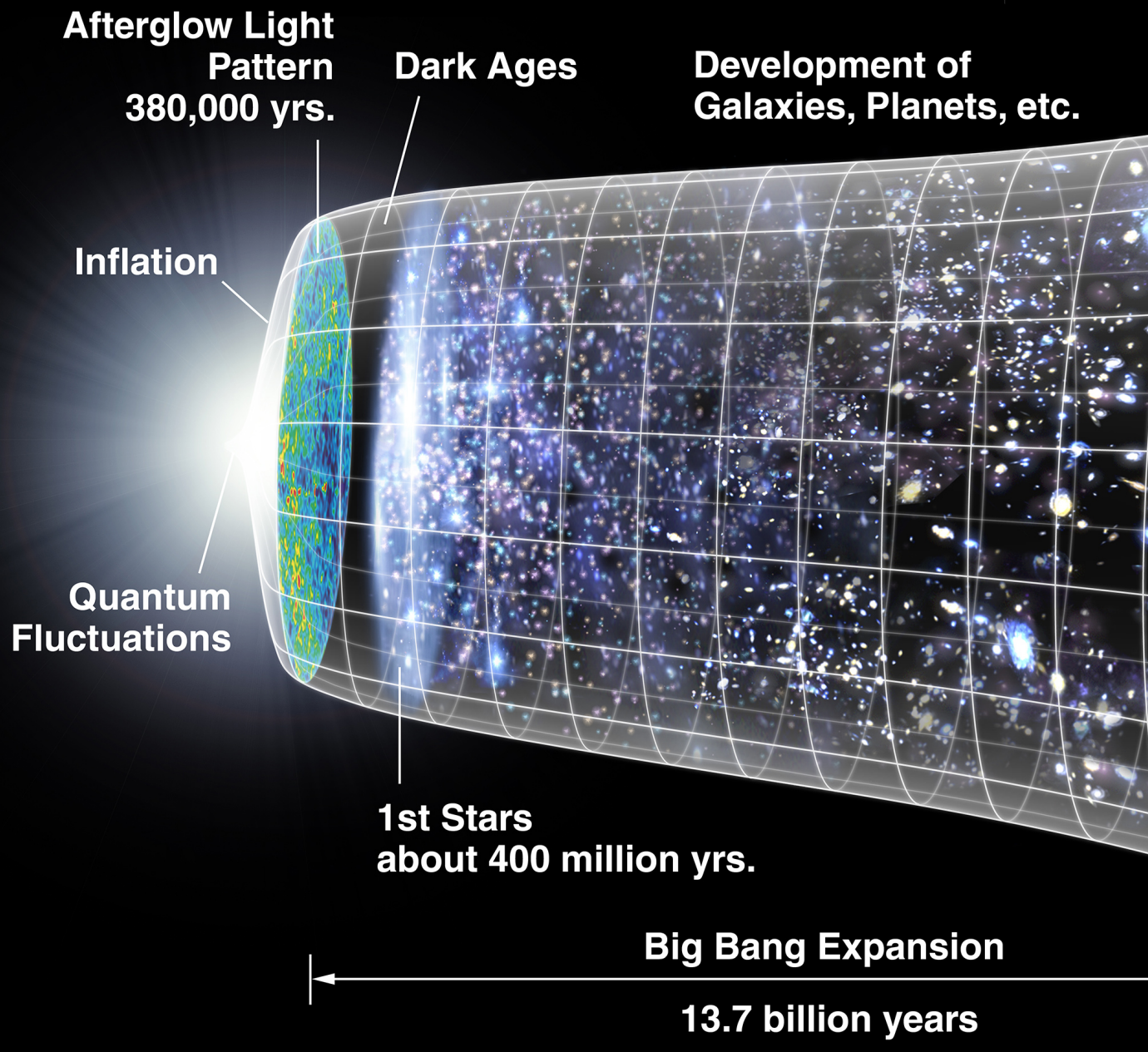
# Die Entwicklung des Universums



Wie weiter?



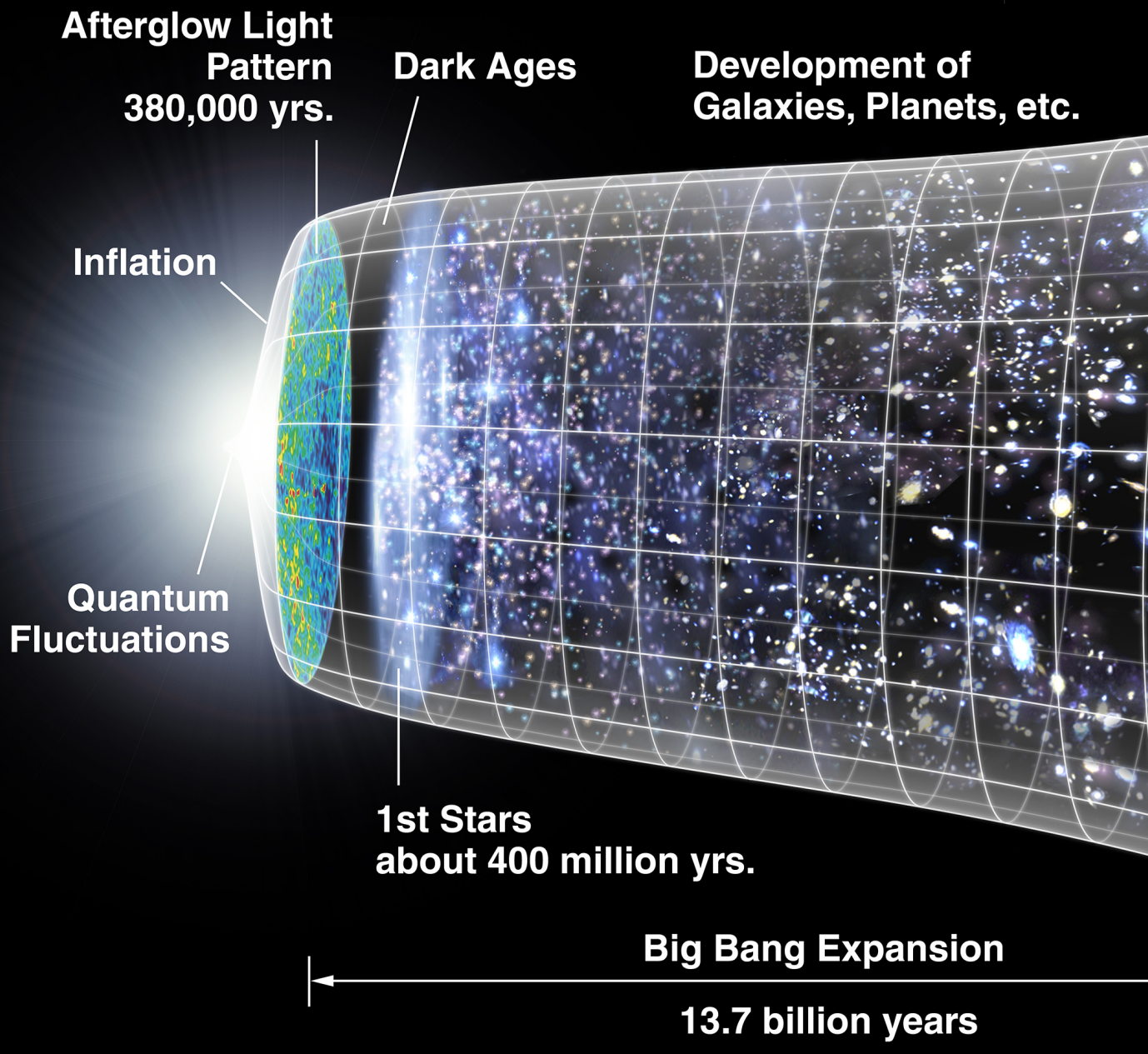
# Die Entwicklung des Universums



Wie weiter?

Zusammenstürzen  
(Big Crunch)

# Die Entwicklung des Universums



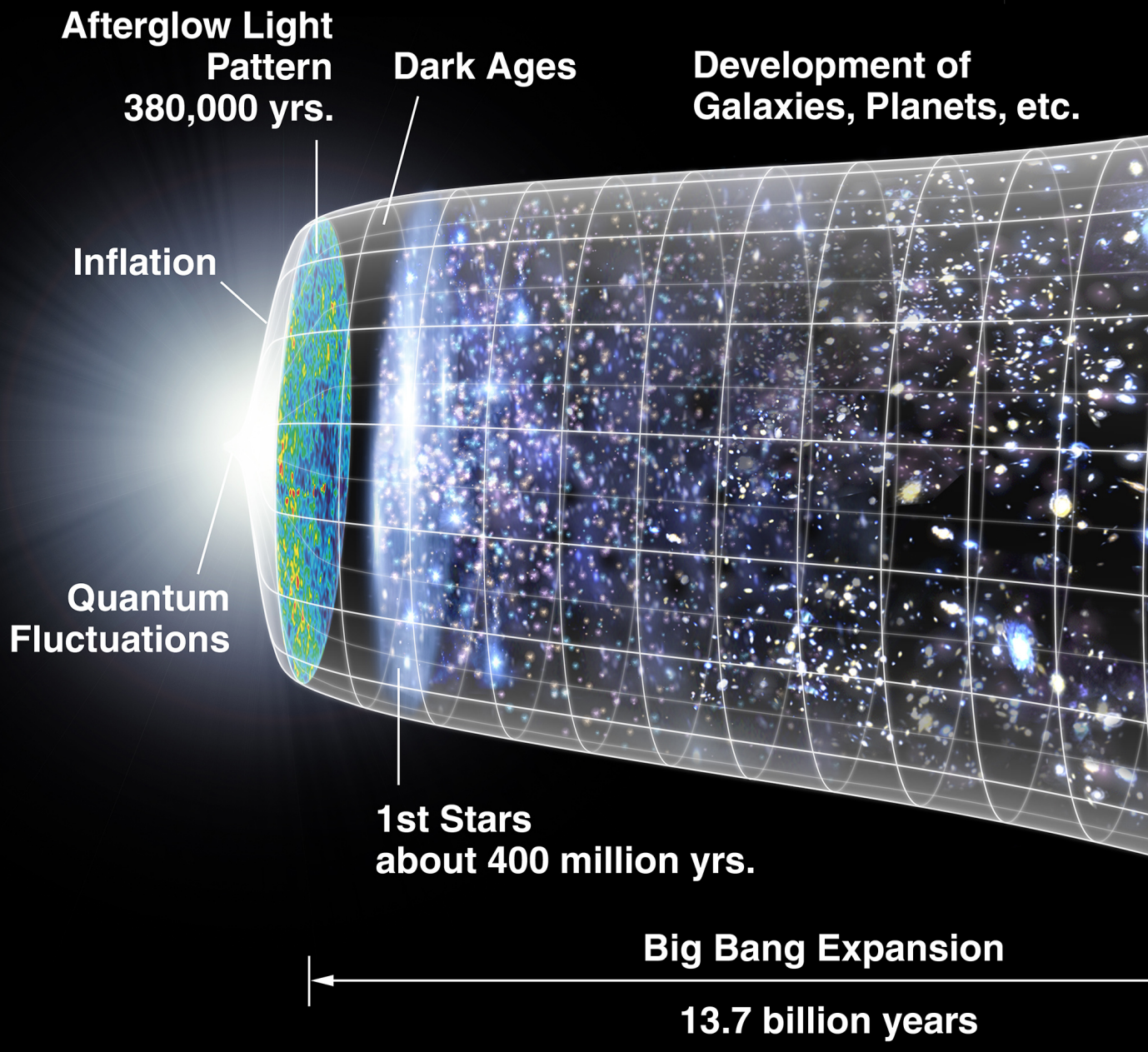
Wie weiter?

Zusammenstürzen  
(Big Crunch)

Erreicht eine  
bestimmte Größe



# Die Entwicklung des Universums



Wie weiter?

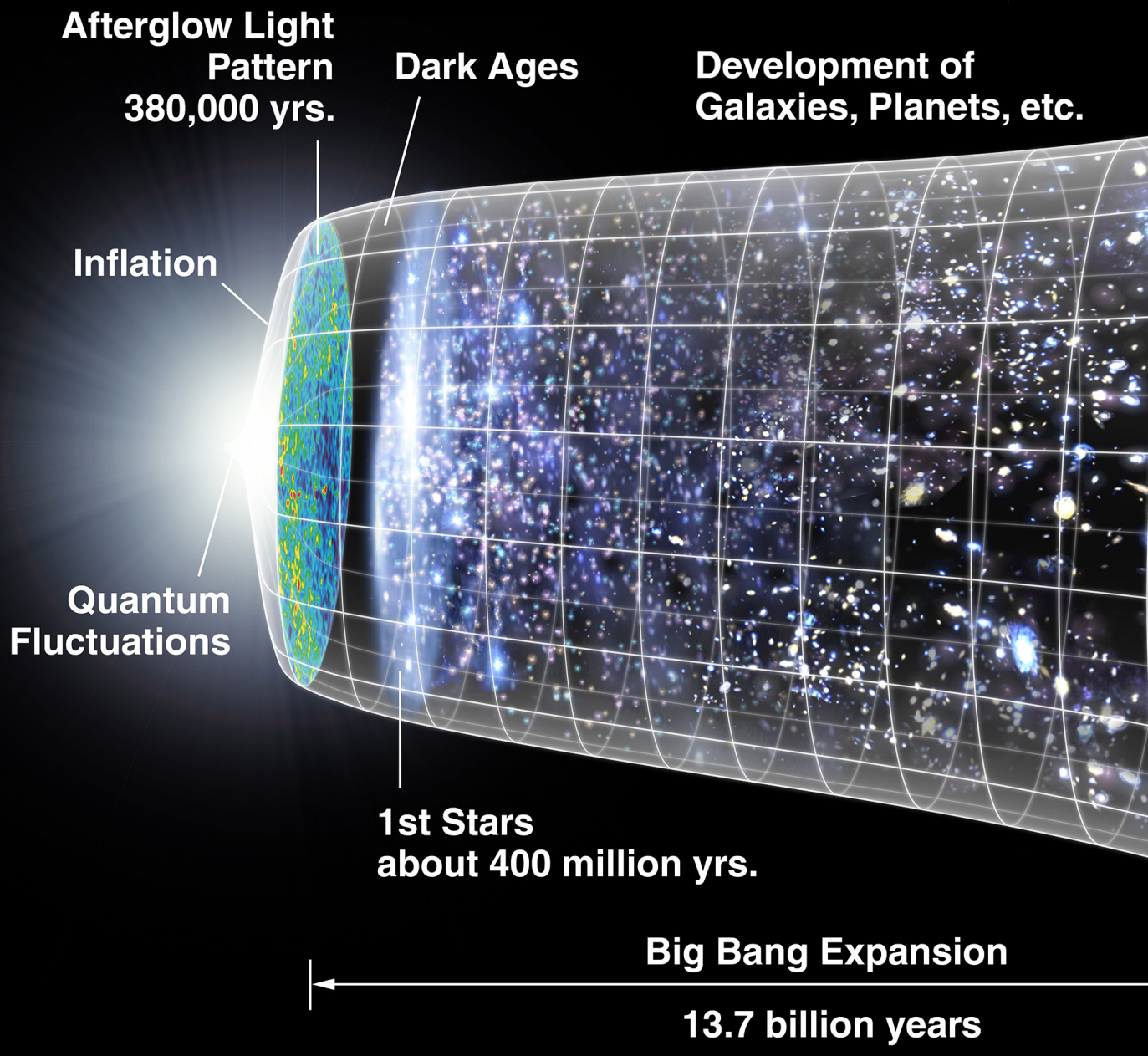
Zusammenstürzen  
(Big Crunch)

Erreicht eine  
bestimmte Größe

Wächst weiter



# Die Entwicklung des Universums



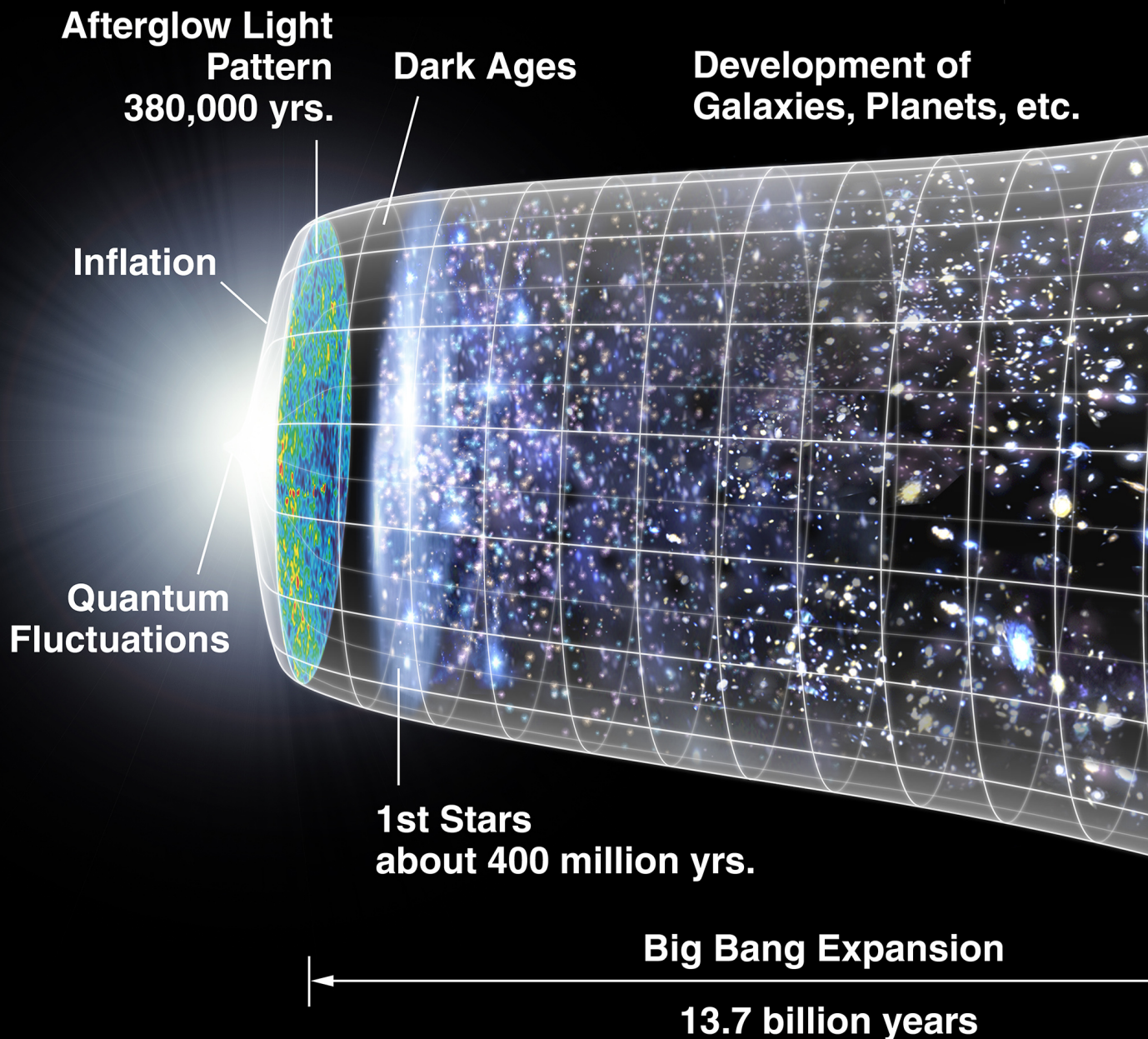
Wie weiter?

Zusammenstürzen  
(Big Crunch)

Erreicht eine  
bestimmte Größe

Wächst weiter  
Langsamer?

# Die Entwicklung des Universums



Wie weiter?

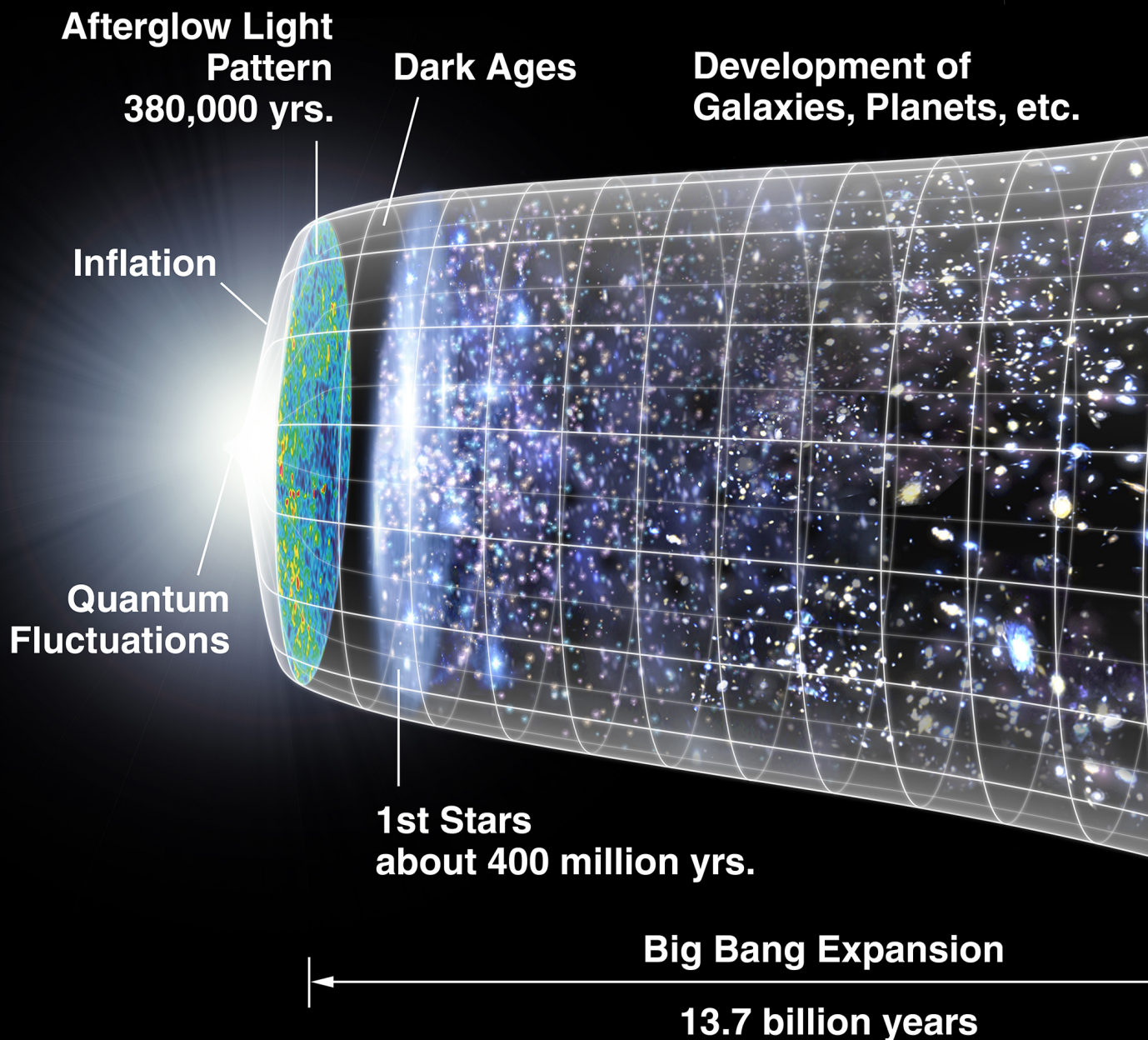
Zusammenstürzen  
(Big Crunch)

Erreicht eine  
bestimmte Größe

Wächst weiter  
Langsamer?  
Gleich?



# Die Entwicklung des Universums



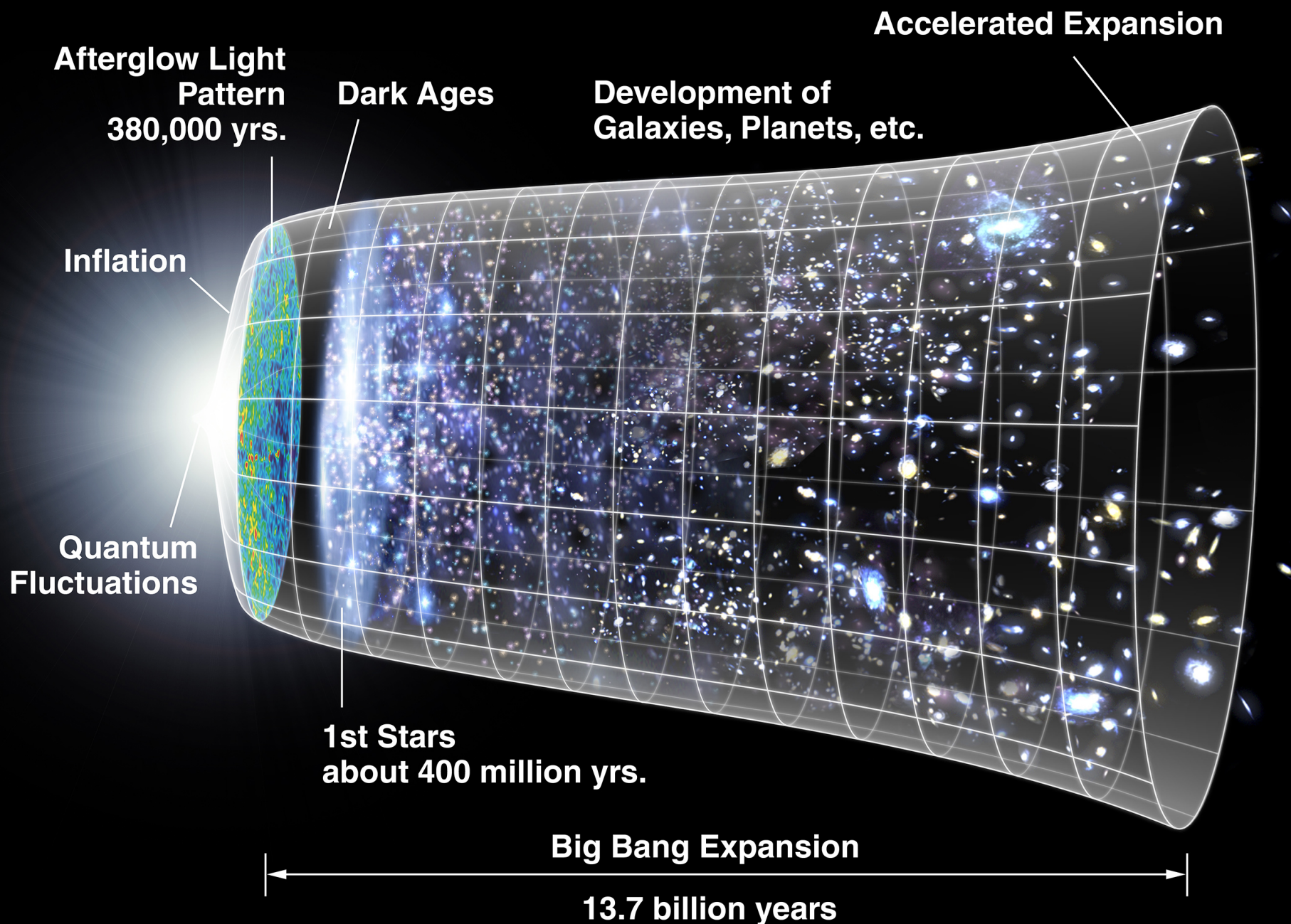
Wie weiter?

Zusammenstürzen  
(Big Crunch)

Erreicht eine  
bestimmte Größe

Wächst weiter  
Langsamer?  
Gleich?  
Schneller?

# Die Entwicklung des Universums





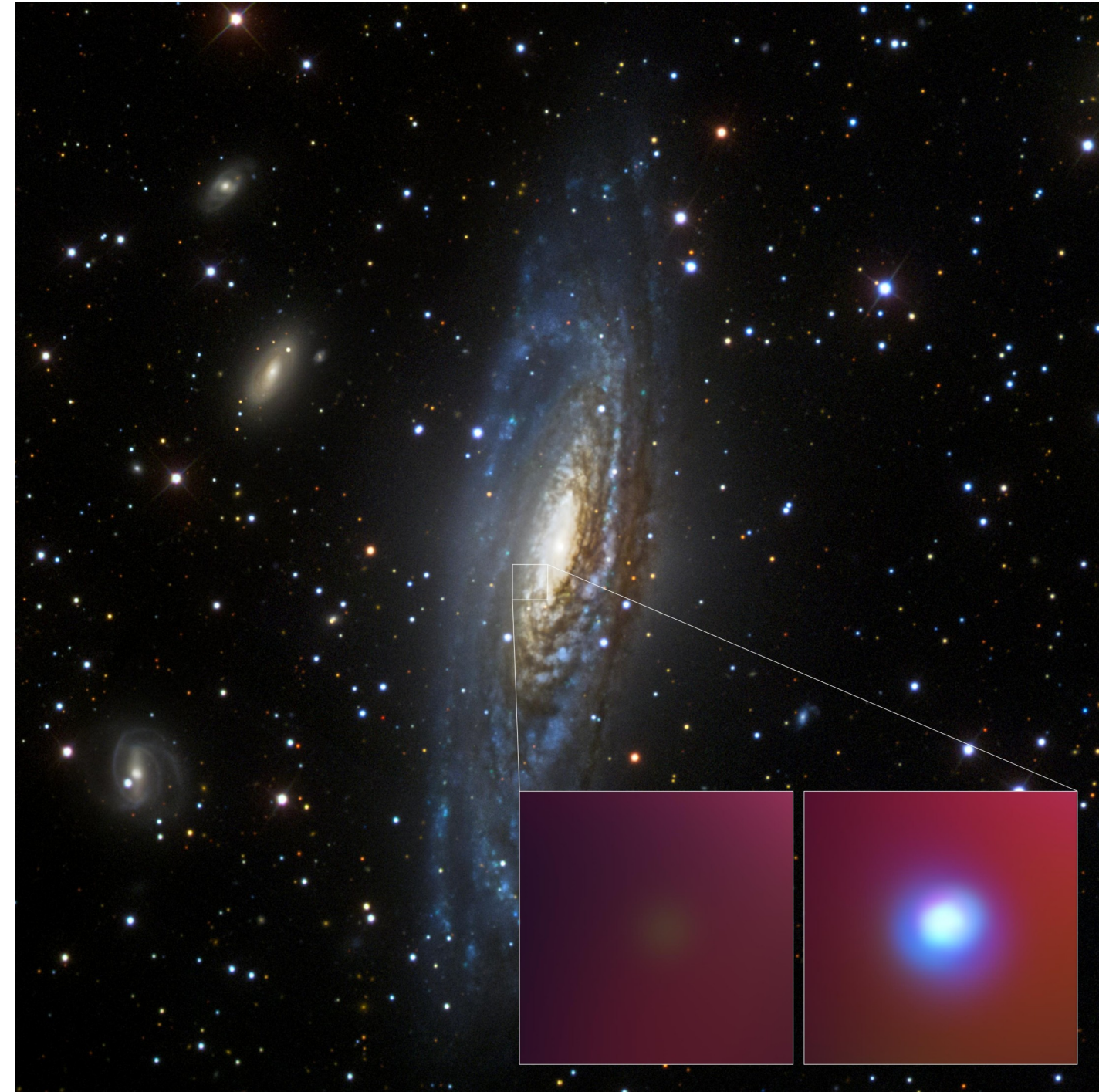
# Beobachtung der Beschleunigung



Supernova

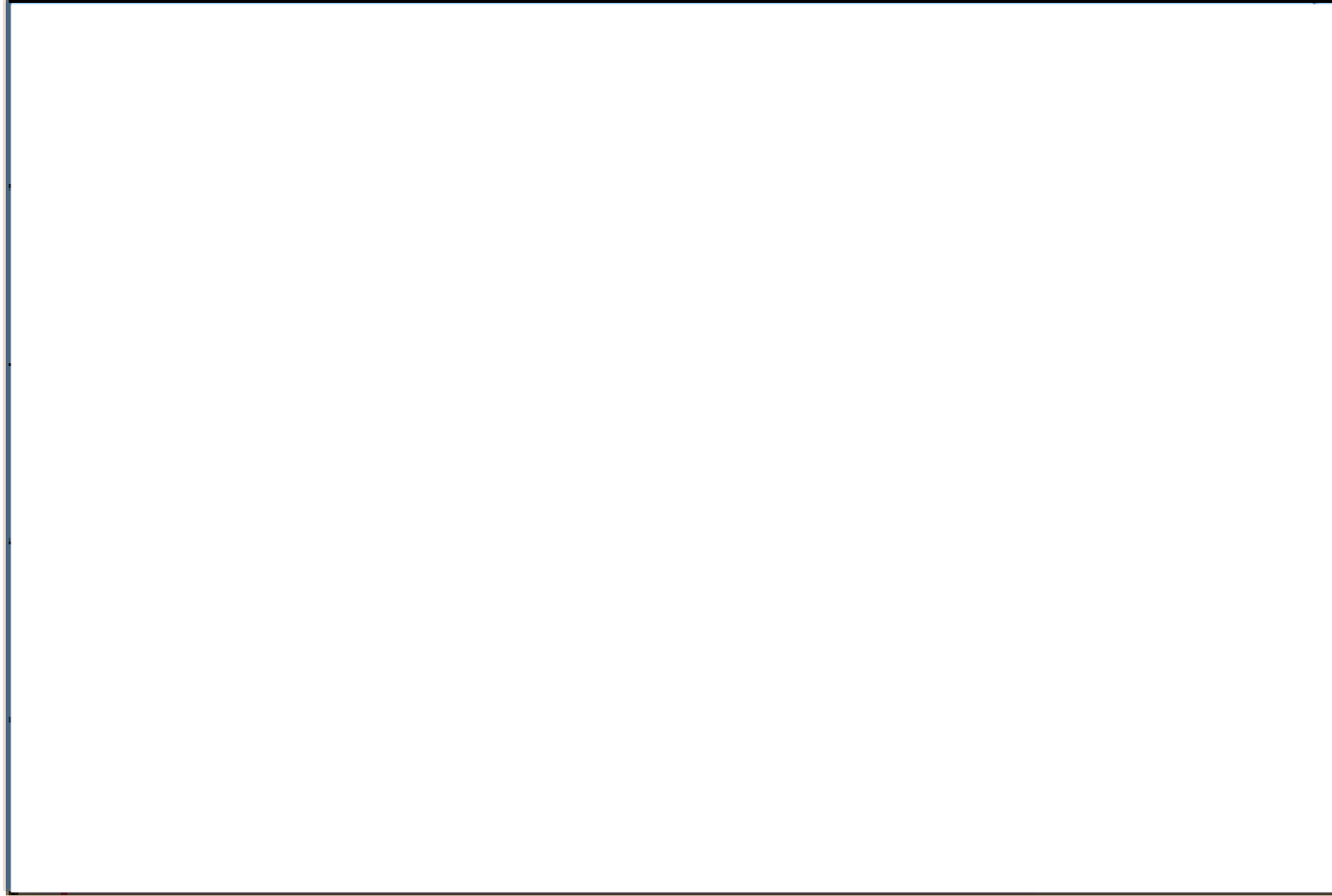


# Beobachtung der Beschleunigung

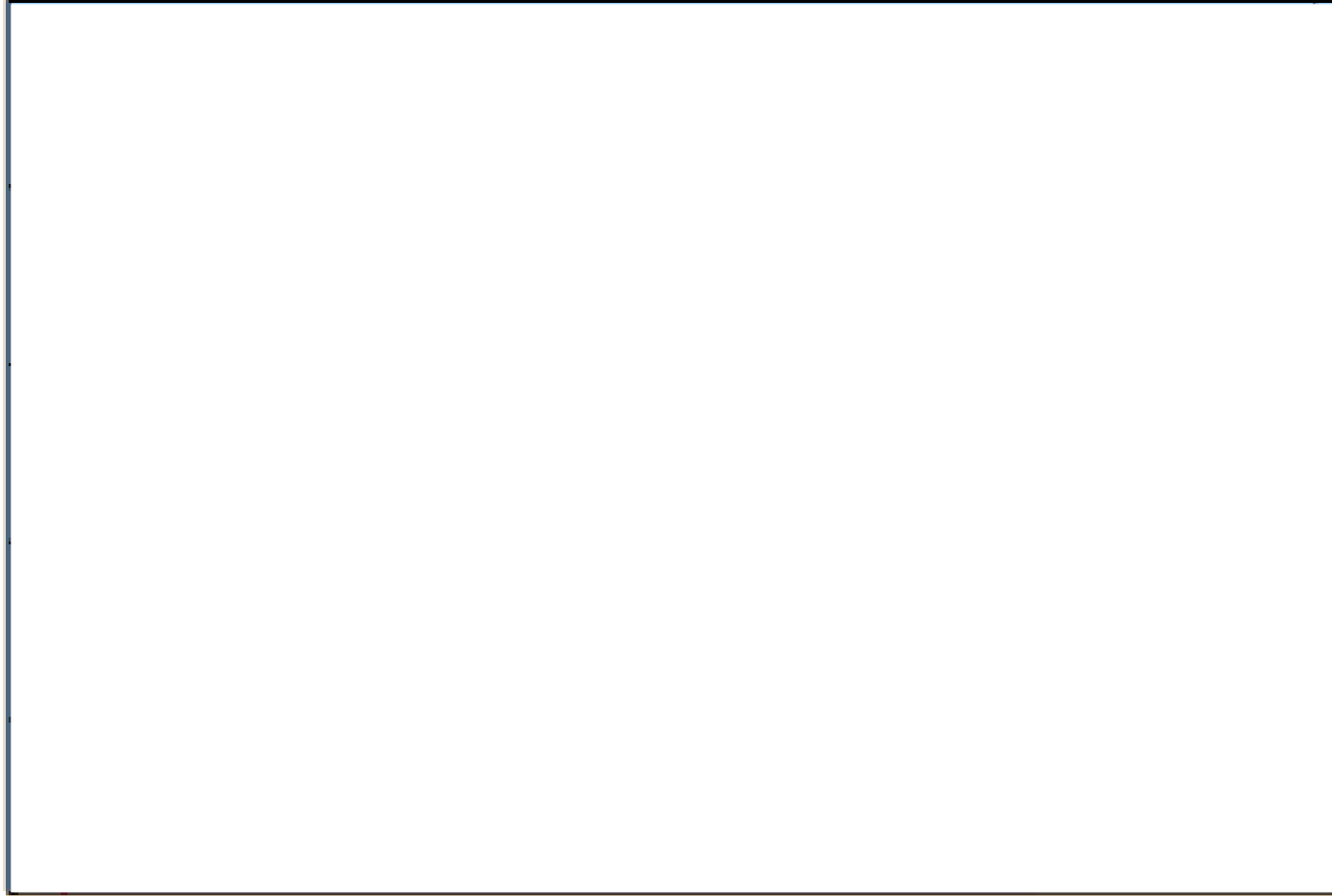


Supernova  
Typ Ia: Immer gleich

# Beobachtung der Beschleunigung



# Beobachtung der Beschleunigung



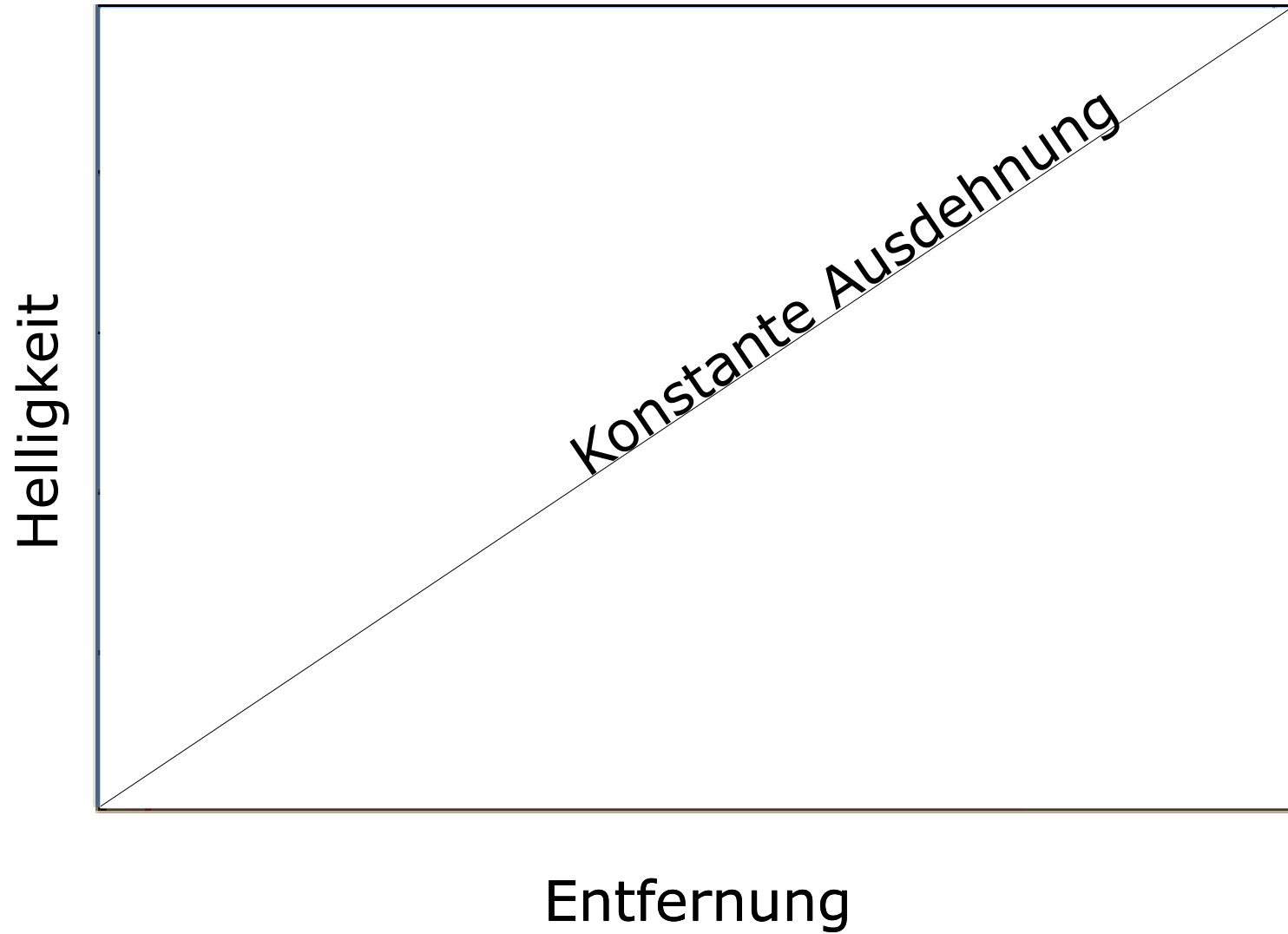
Entfernung



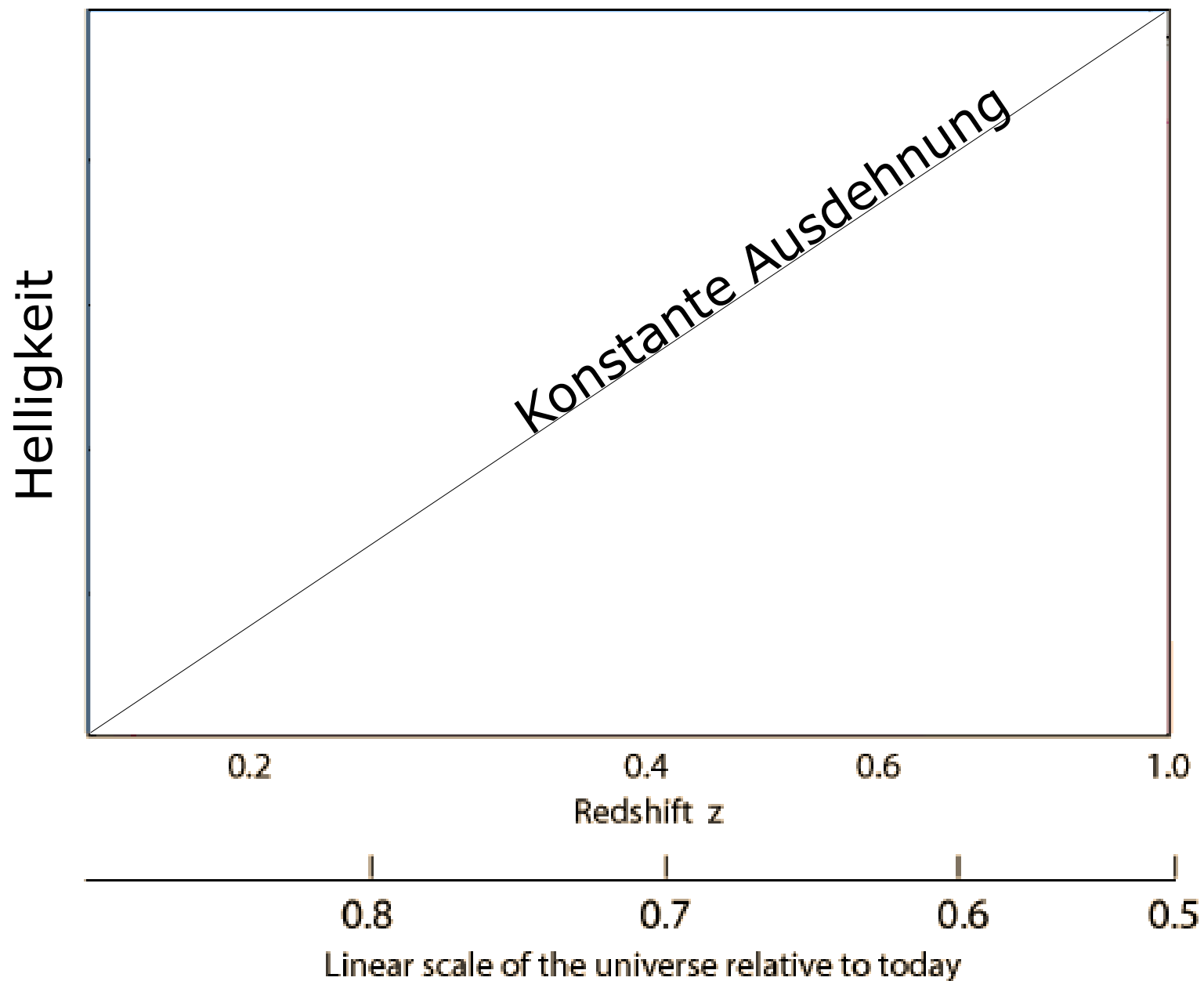
# Beobachtung der Beschleunigung



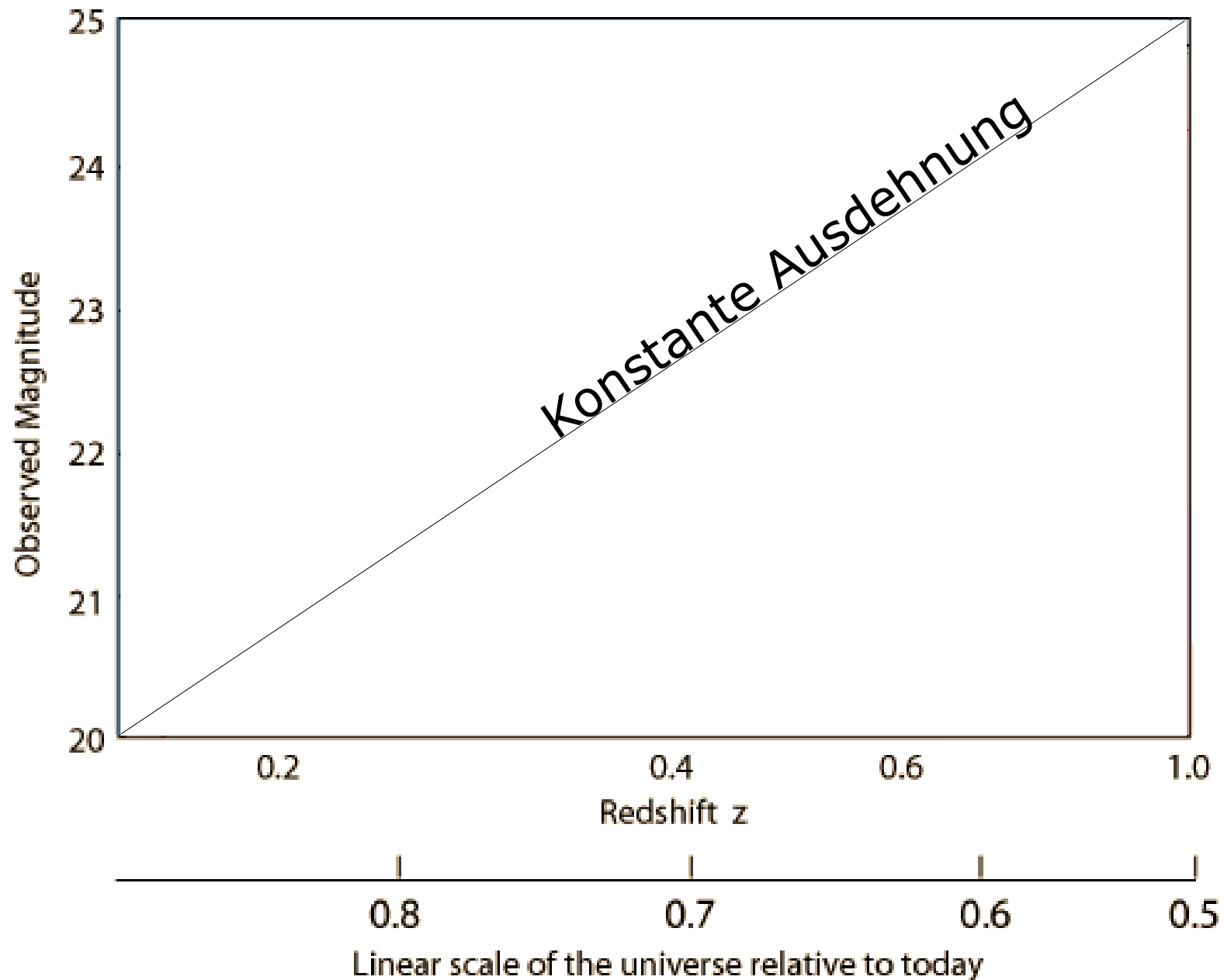
# Beobachtung der Beschleunigung



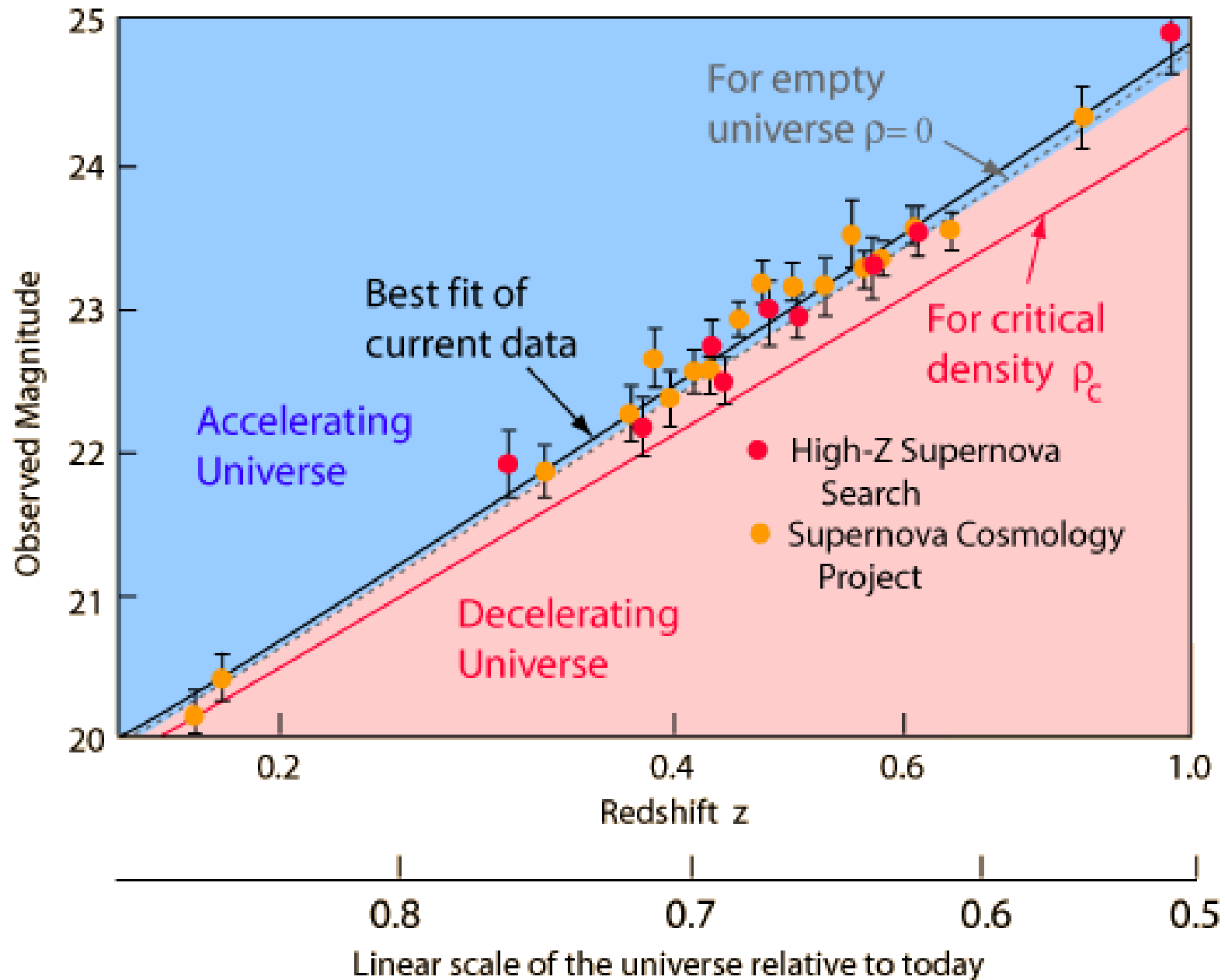
# Beobachtung der Beschleunigung



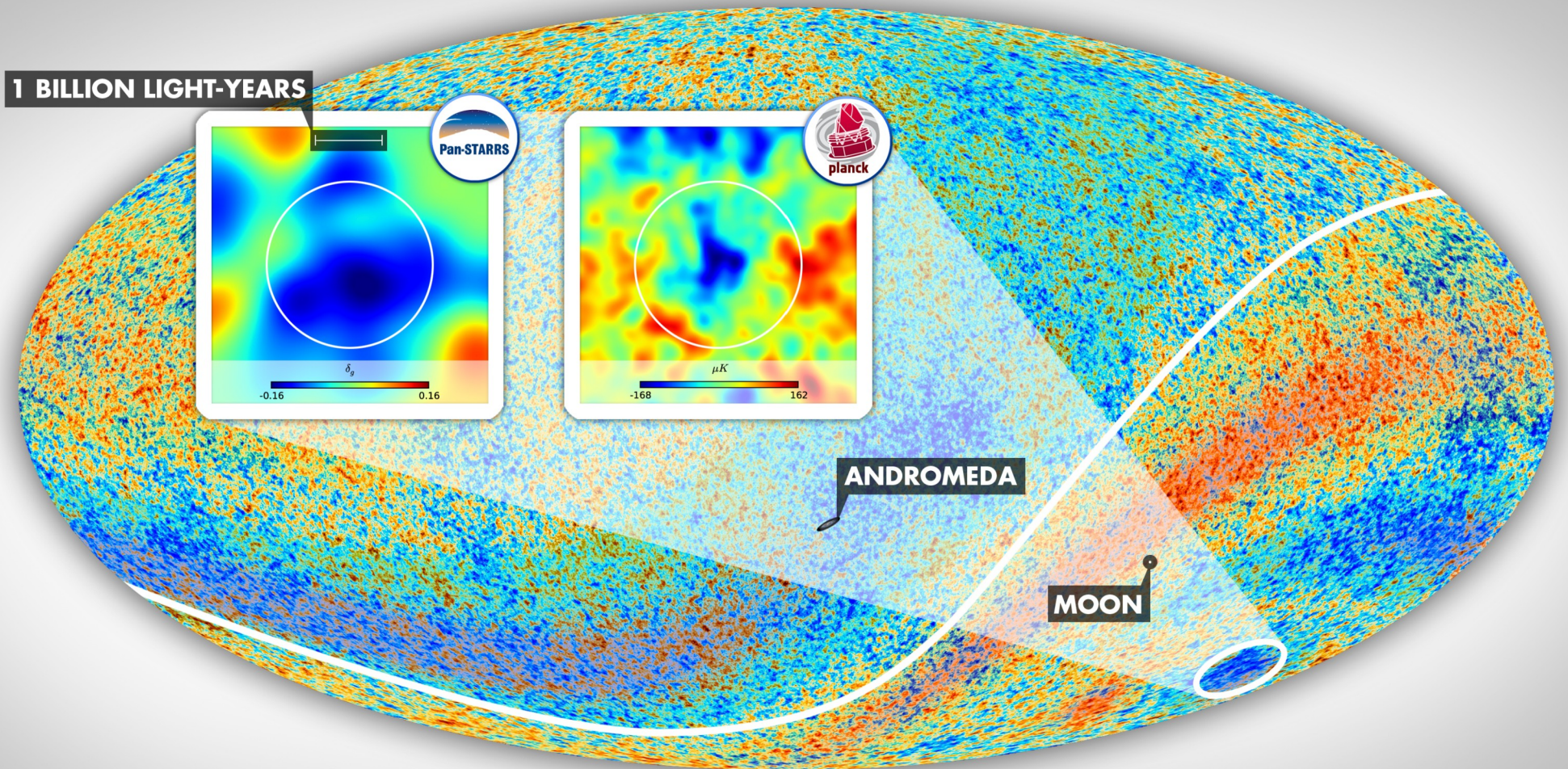
# Beobachtung der Beschleunigung



# Beobachtung der Beschleunigung



# Der kosmische Hintergrund



Enthält auch indirekte Hinweise

# Woher kommt die Beschleunigung?

- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie

# Woher kommt die Beschleunigung?

- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie
  - Form und Größe des Universums



# Woher kommt die Beschleunigung?

- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie
  - Form und Größe des Universums
- Beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie

# Woher kommt die Beschleunigung?

- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie
  - Form und Größe des Universums
- Beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie

Energie  
der  
Materie

# Woher kommt die Beschleunigung?

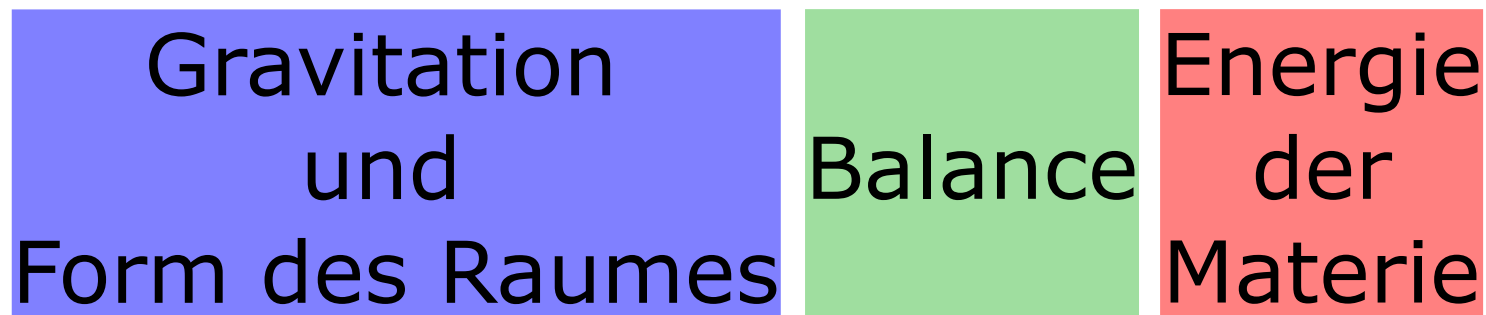
- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie
  - Form und Größe des Universums
- Beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie

Gravitation  
und  
Form des Raumes

Energie  
der  
Materie

# Woher kommt die Beschleunigung?

- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie
  - Form und Größe des Universums
- Beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie



# Woher kommt die Beschleunigung?

- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie
  - Form und Größe des Universums
- Beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie

Gravitation und Form des Raumes	Balance	Energie der Materie	Kosmo- und logische Konstante
---------------------------------------	---------	---------------------------	-------------------------------------

# Woher kommt die Beschleunigung?

- Entwicklung des Universums bestimmt durch Gravitation der Materie
  - Form und Größe des Universums
- Beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie



Der Effekt der kosmologischen Konstante heisst  
**Dunkle Energie**



**Was ist die kosmologische Konstante?**

# Was ist die kosmologische Konstante?

- Naturkonstante wie die elektrische Ladung oder die Masse eines Elementarteilchens

# Was ist die kosmologische Konstante?

- Naturkonstante wie die elektrische Ladung oder die Masse eines Elementarteilchens
  - Muss gemessen werden und kann nicht vorausgesagt werden

# Was ist die kosmologische Konstante?

- Naturkonstante wie die elektrische Ladung oder die Masse eines Elementarteilchens
  - Muss gemessen werden und kann nicht vorausgesagt werden
- Führt dazu das leerer Raum sich ausdehnt

# Was ist die kosmologische Konstante?

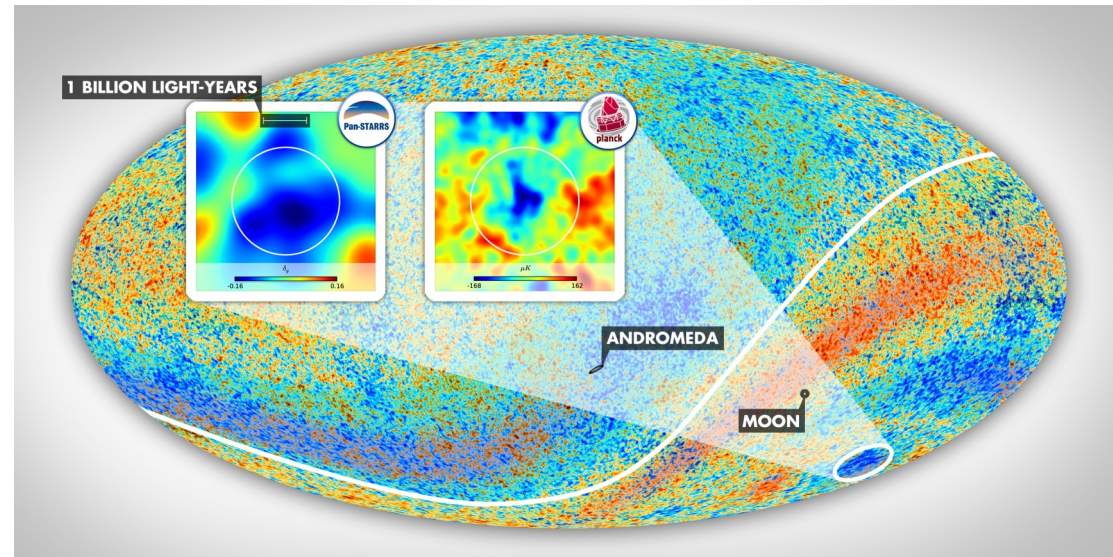
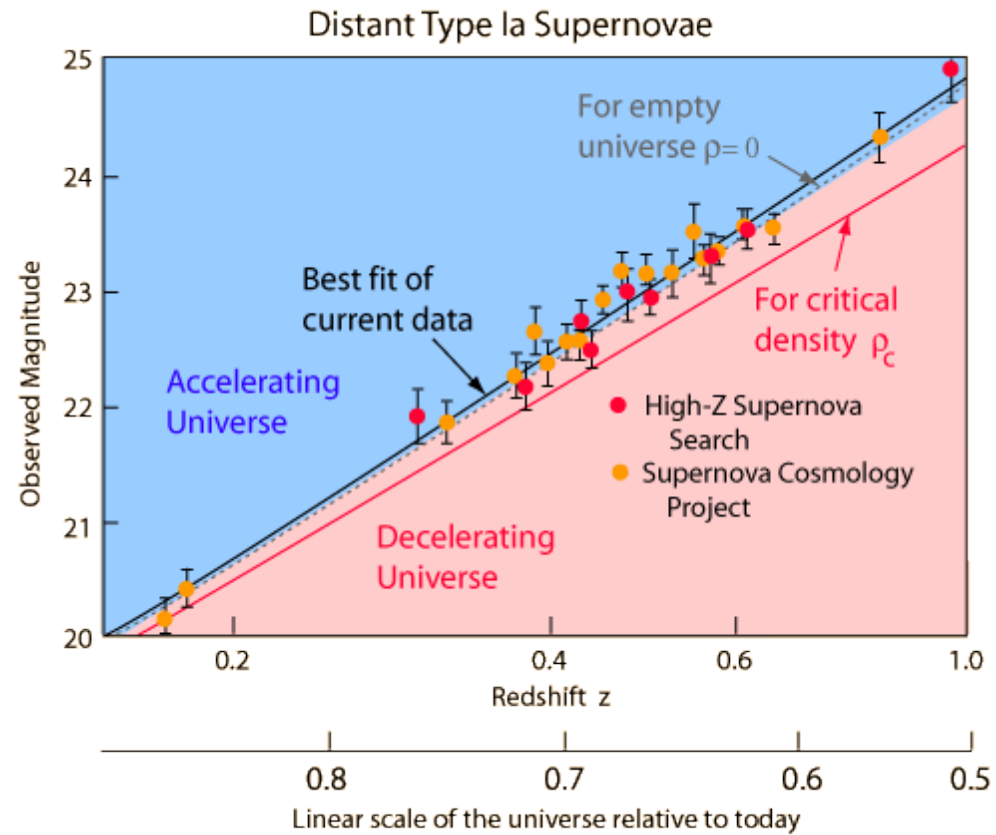
- Naturkonstante wie die elektrische Ladung oder die Masse eines Elementarteilchens
  - Muss gemessen werden und kann nicht vorausgesagt werden
- Führt dazu das leerer Raum sich ausdehnt
  - Kann durch genug Materie kompensiert werden

# Was ist die kosmologische Konstante?

- Naturkonstante wie die elektrische Ladung oder die Masse eines Elementarteilchens
  - Muss gemessen werden und kann nicht vorausgesagt werden
- Führt dazu das leerer Raum sich ausdehnt
  - Kann durch genug Materie kompensiert werden
- Wie gross ist sie?

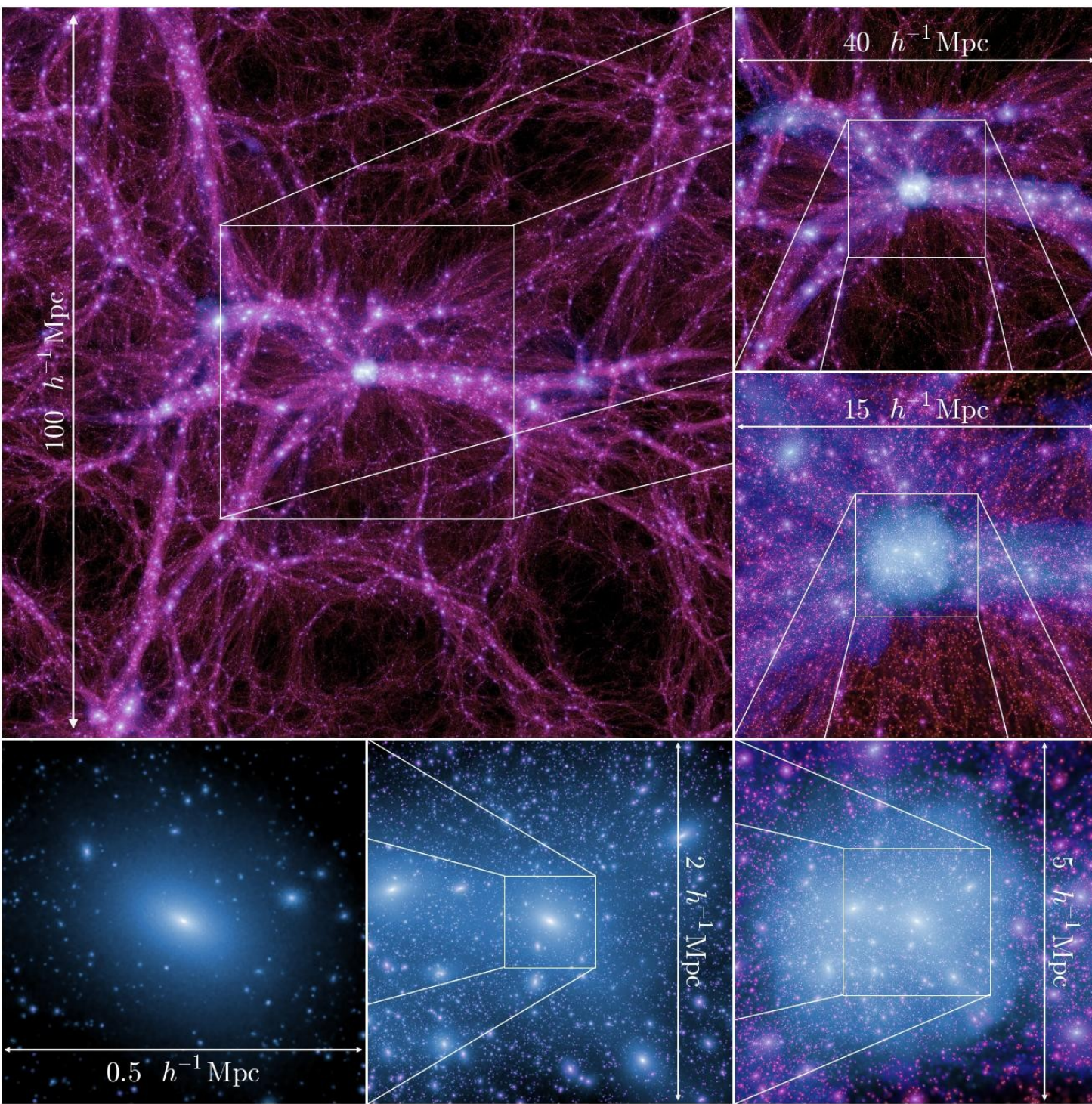


# Indirekte Messung





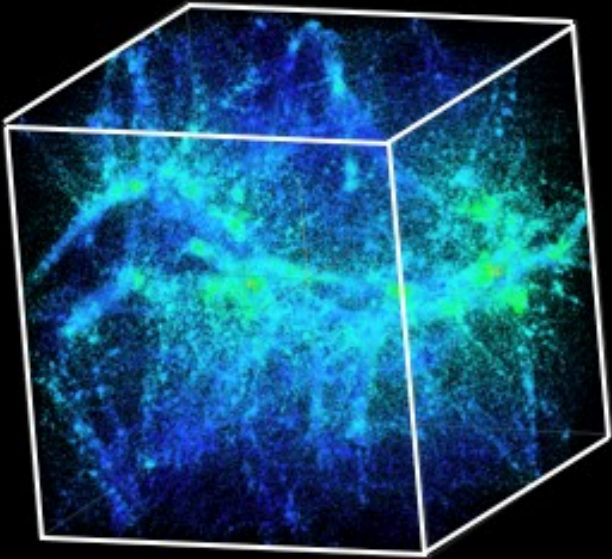
# Einfluss auf das Universum



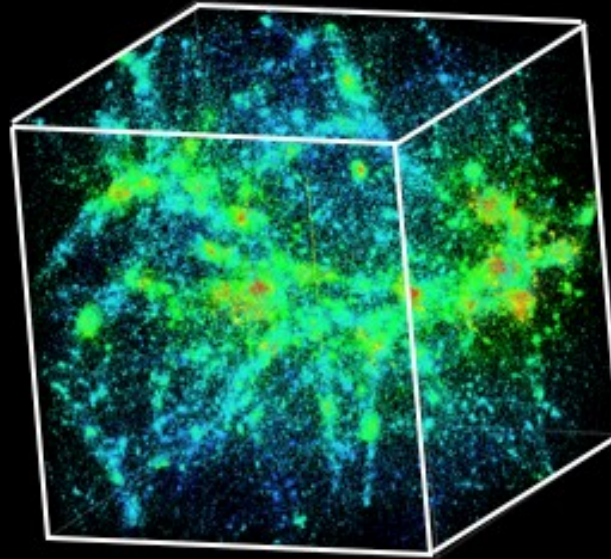


# Einfluss auf das Universum

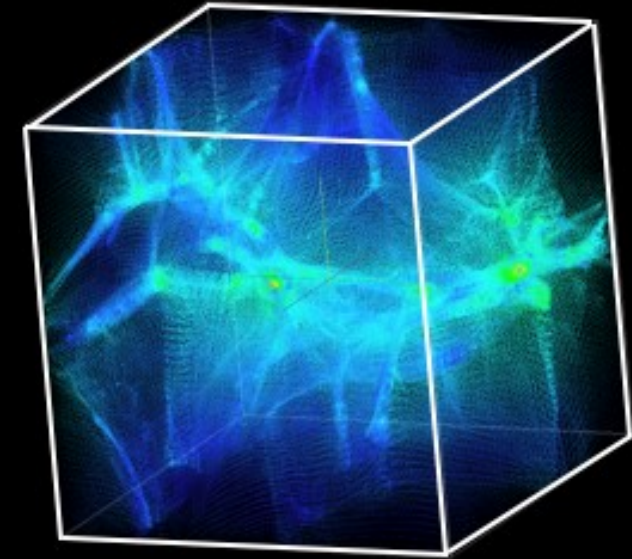
Standard Model



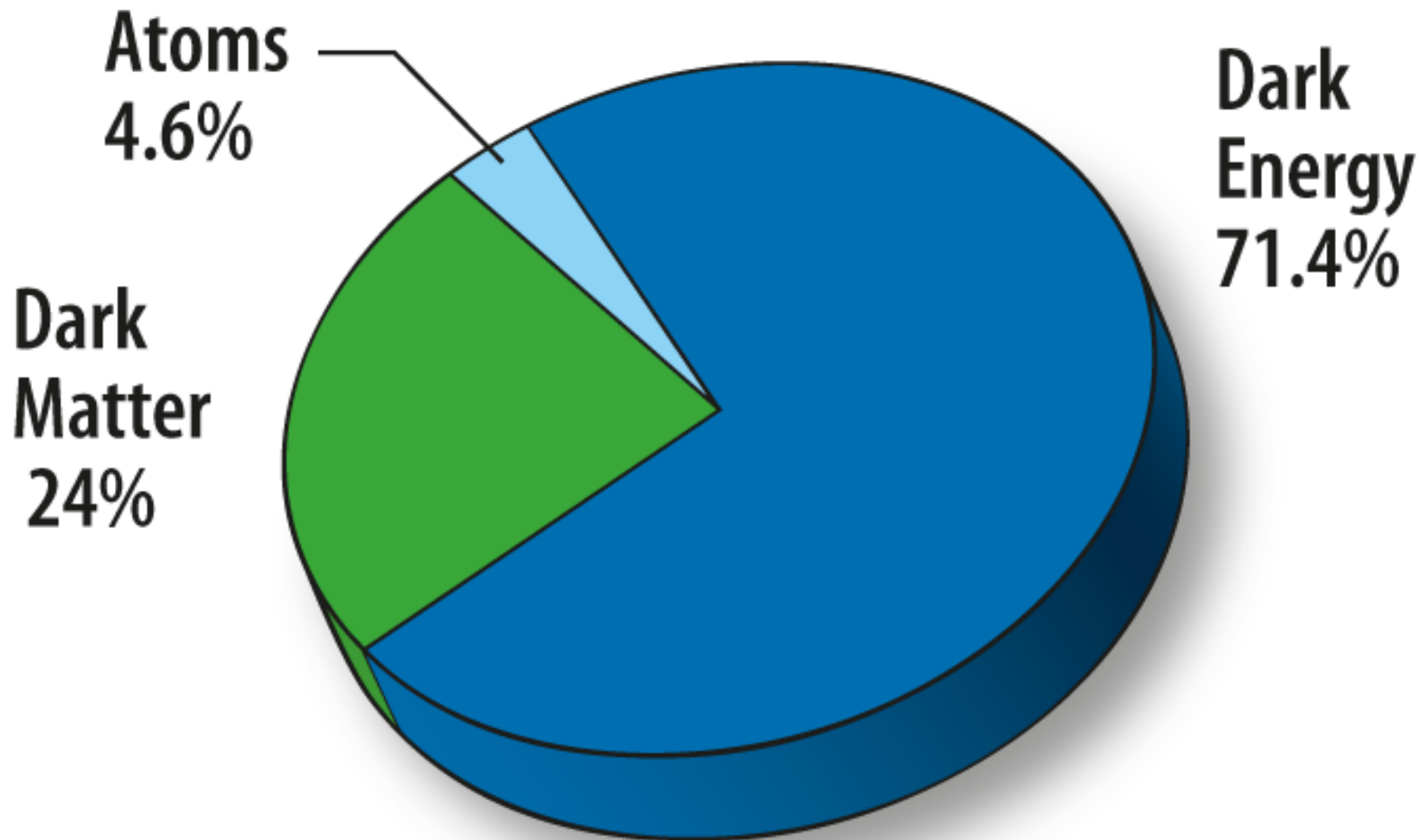
No dark energy



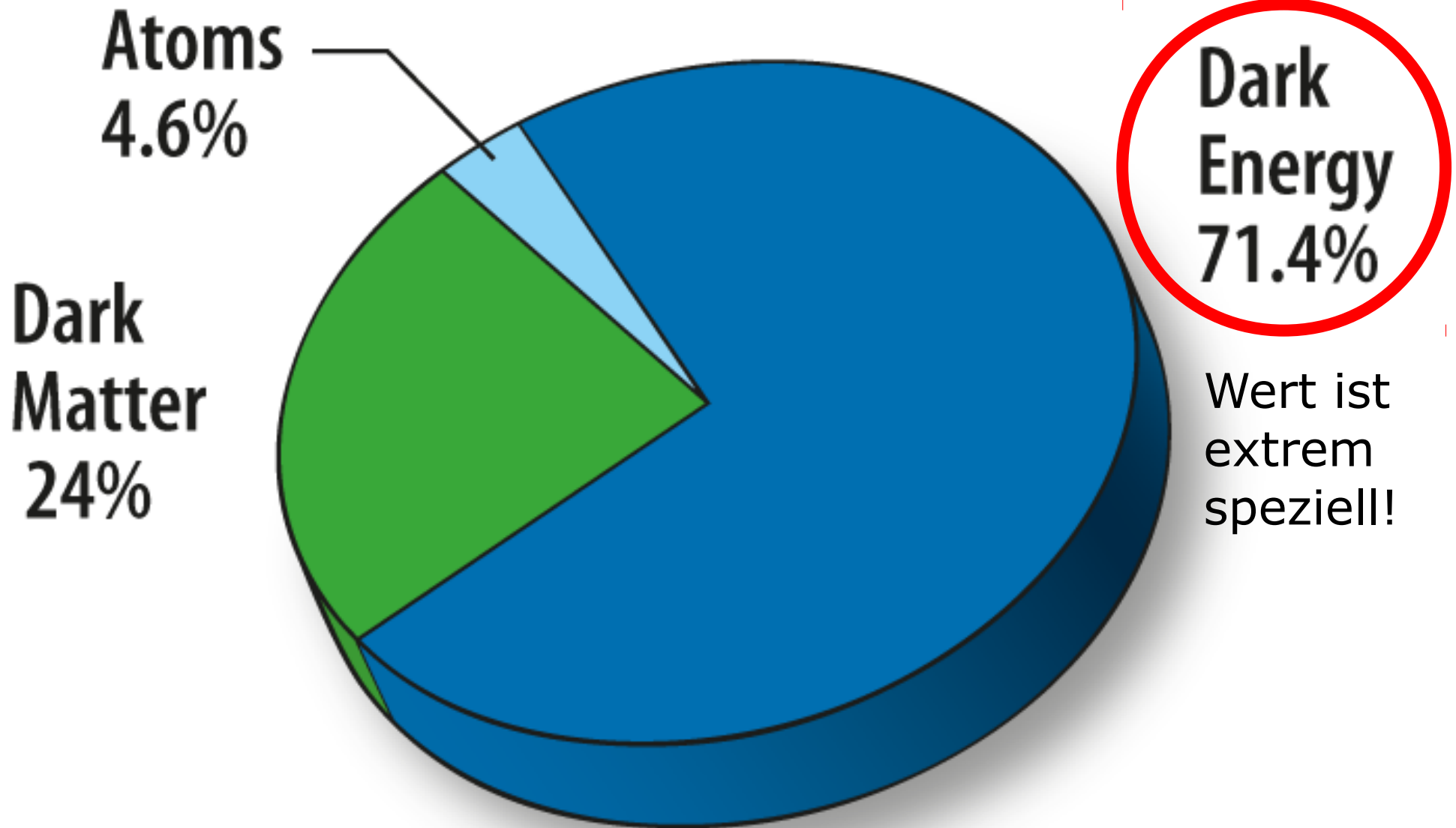
Warm dark matter



# Zusammensetzung des Universums



# Zusammensetzung des Universums



# Warum der Wert speziell ist

- Gesamtmasse  
des Universums  
bestimmt  
Raumkrümmung



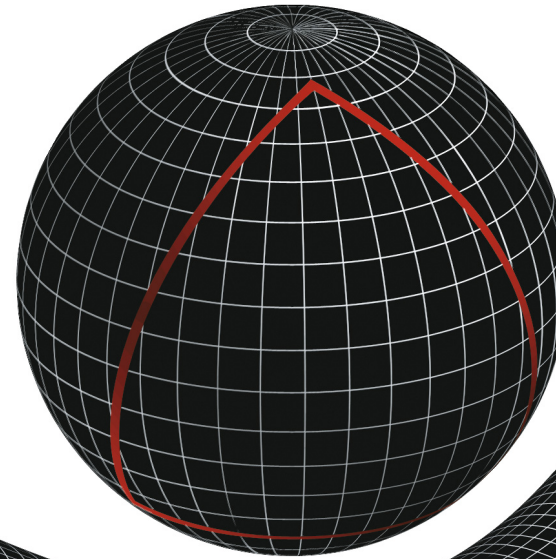
# Warum der Wert speziell ist

- Gesamtmasse  
des Universums  
bestimmt  
Raumkrümmung
- Messbar per  
Satellit

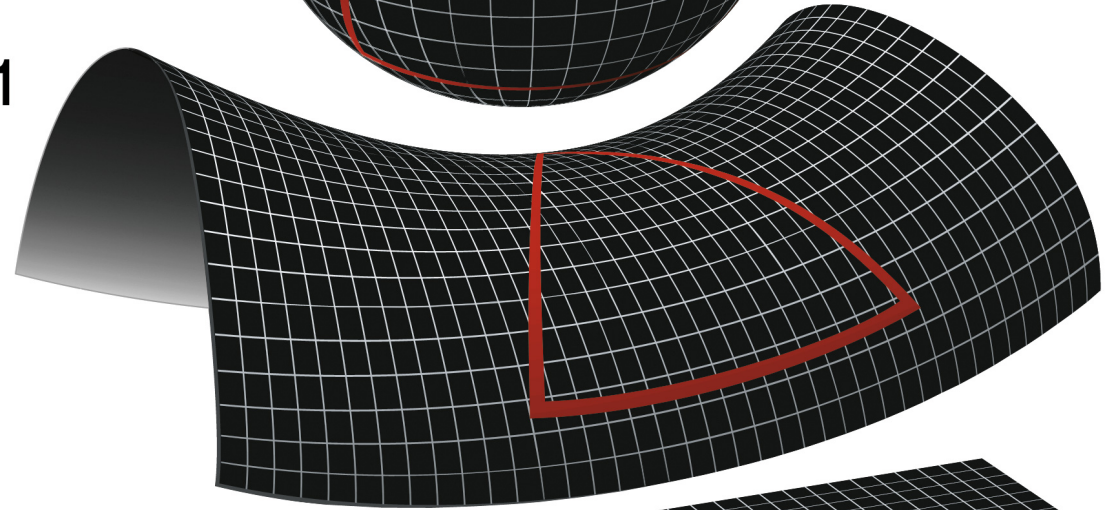
# Warum der Wert speziell ist

- Gesamtmasse des Universums bestimmt Raumkrümmung
- Messbar per Satellit

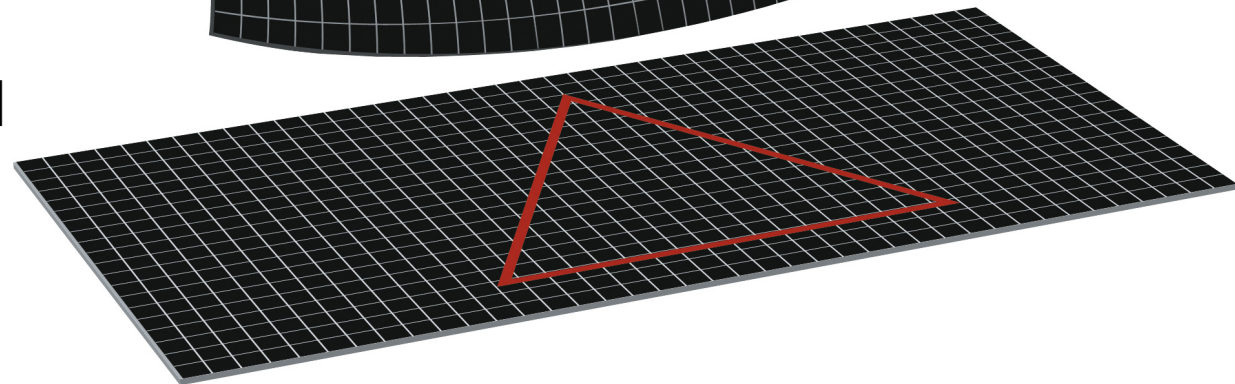
$$\Omega_0 > 1$$



$$\Omega_0 < 1$$

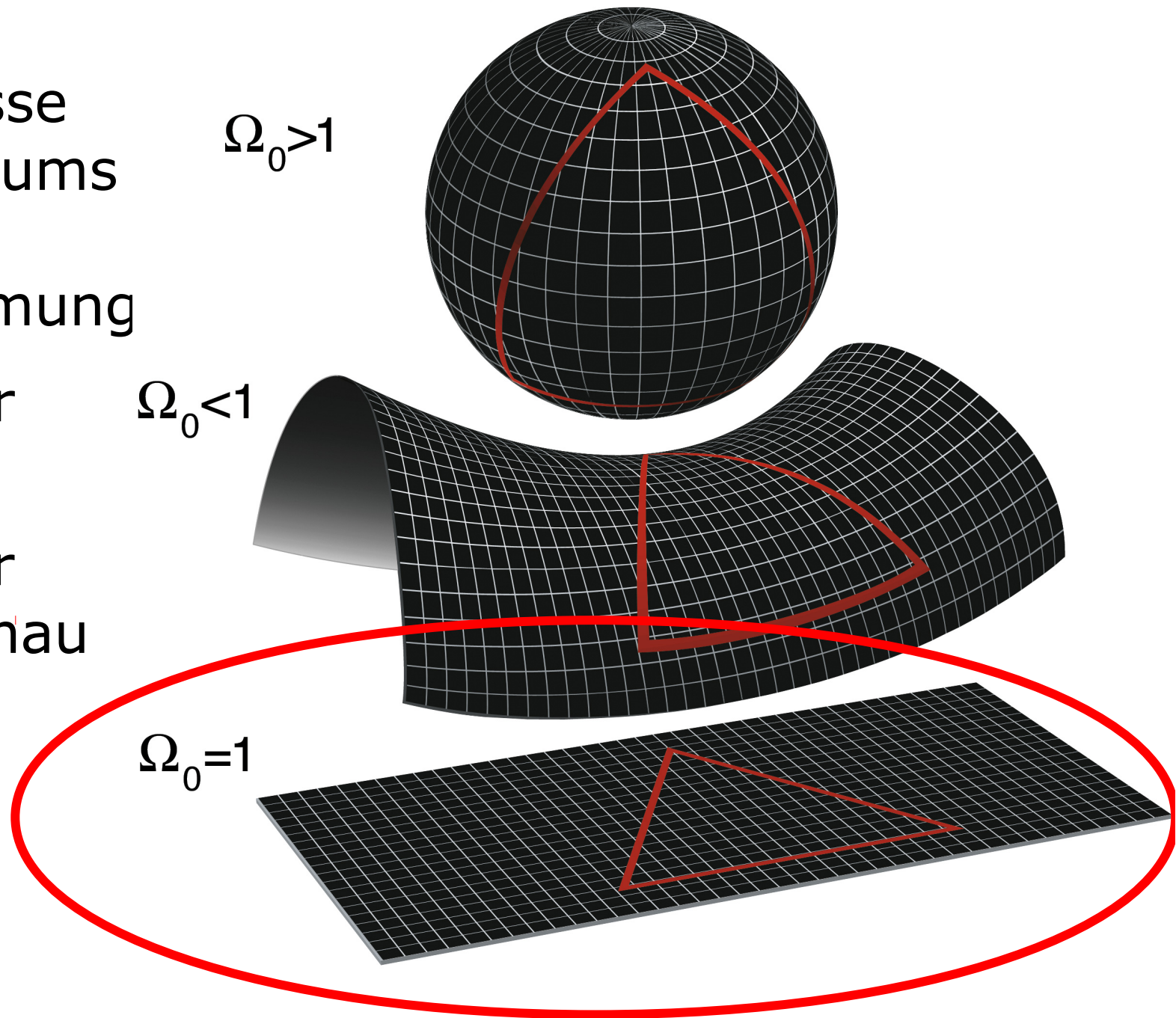


$$\Omega_0 = 1$$



# Warum der Wert speziell ist

- Gesamtmasse des Universums bestimmt Raumkrümmung
- Messbar per Satellit
- Auf ein paar Promille genau flach

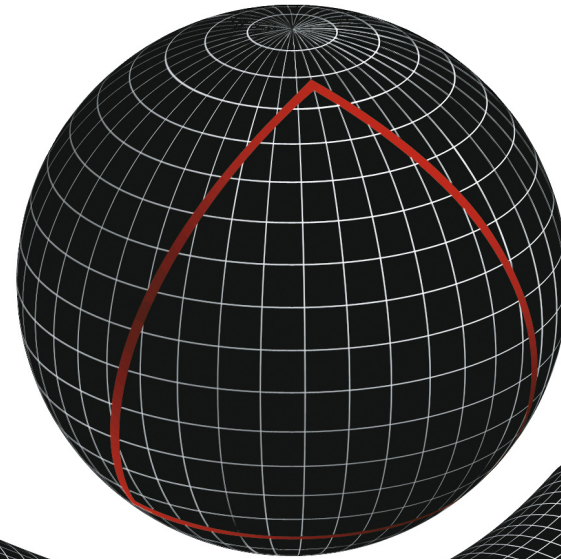




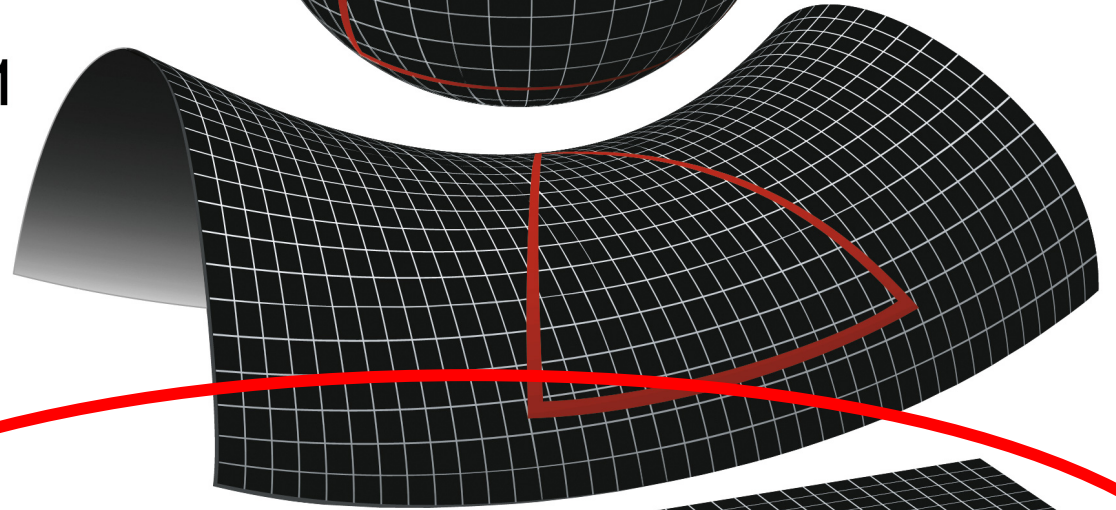
# Warum der Wert speziell ist

- Gesamtmasse des Universums bestimmt Raumkrümmung
- Messbar per Satellit
- Auf ein paar Promille genau flach
- Hängt kritisch mit der Inflation zusammen

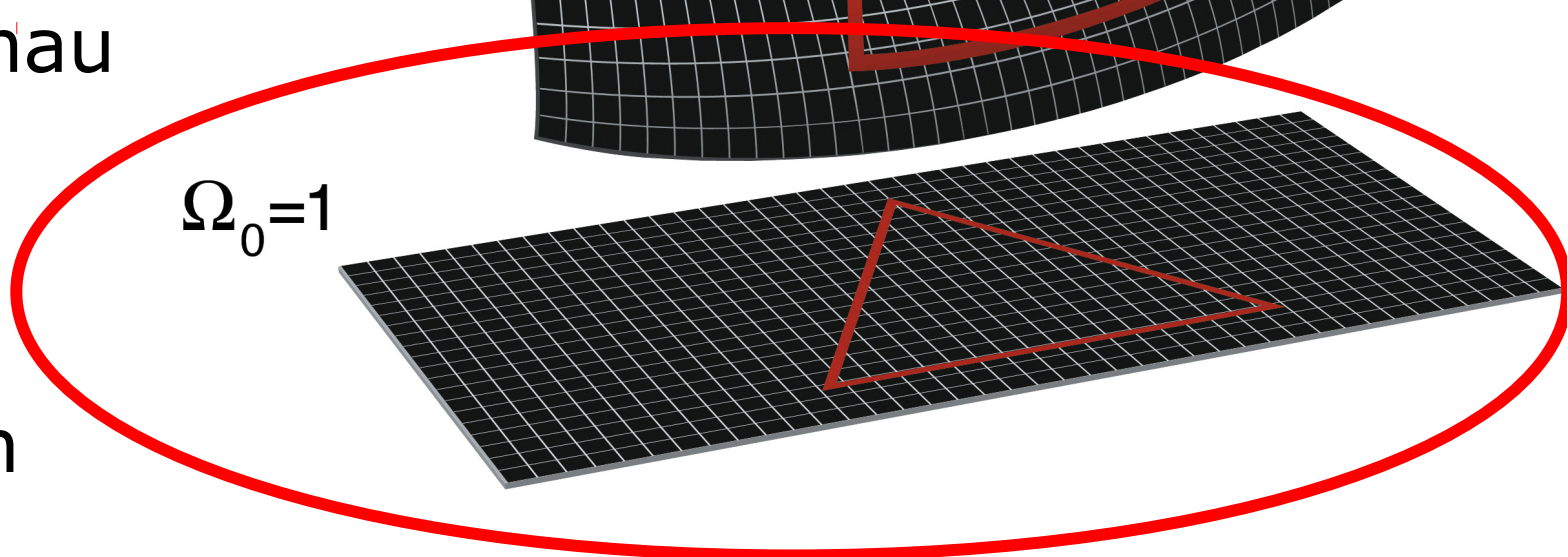
$$\Omega_0 > 1$$



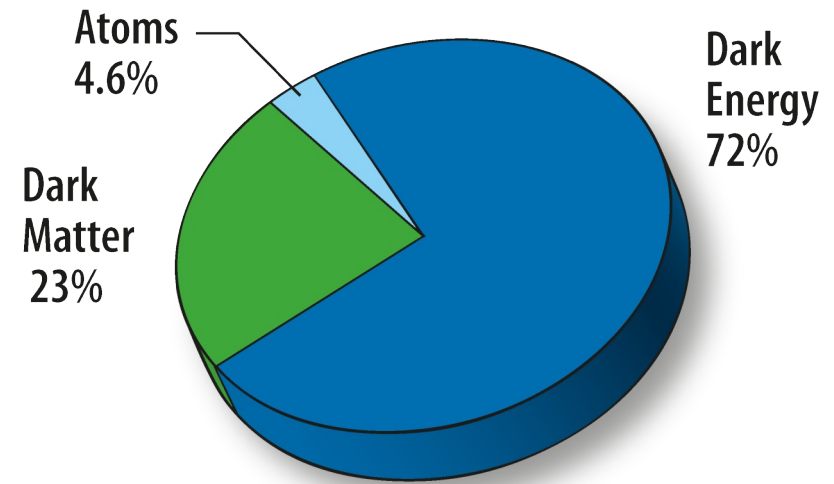
$$\Omega_0 < 1$$



$$\Omega_0 = 1$$

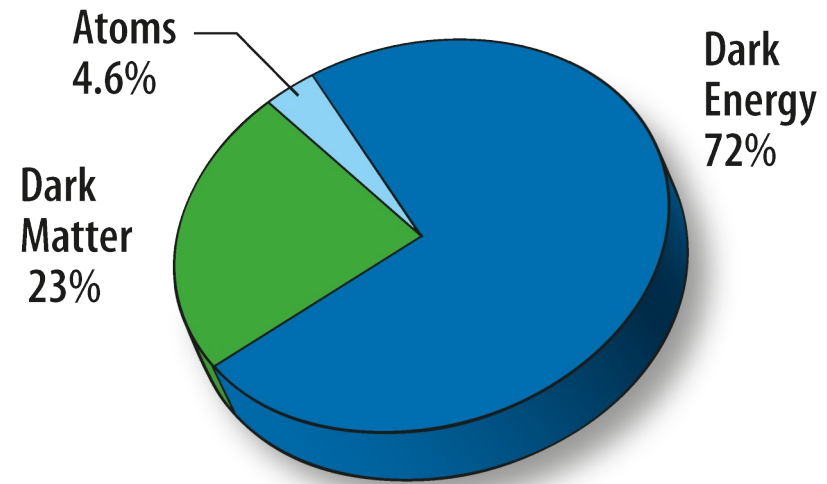


# Warum der Wert speziell ist



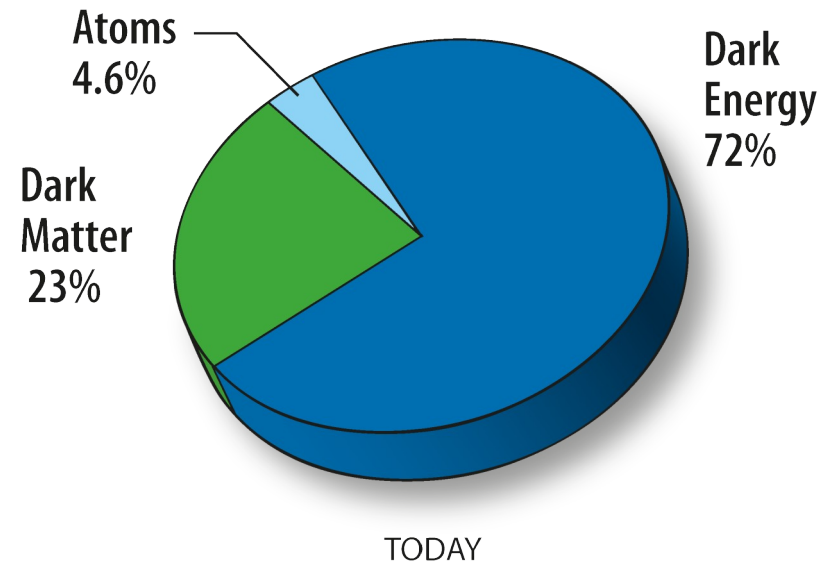
# Warum der Wert speziell ist

- Masse durch die kosmologische Konstante steigt mit Volumen



# Warum der Wert speziell ist

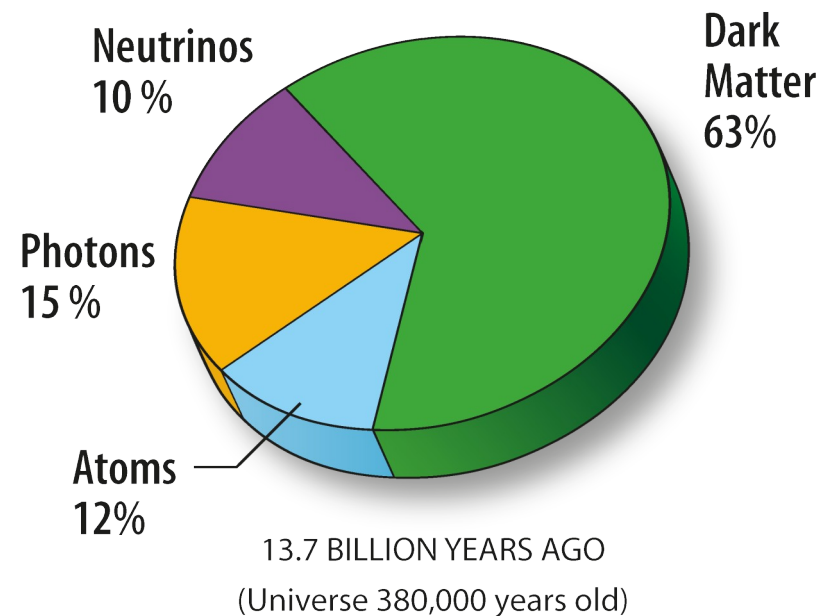
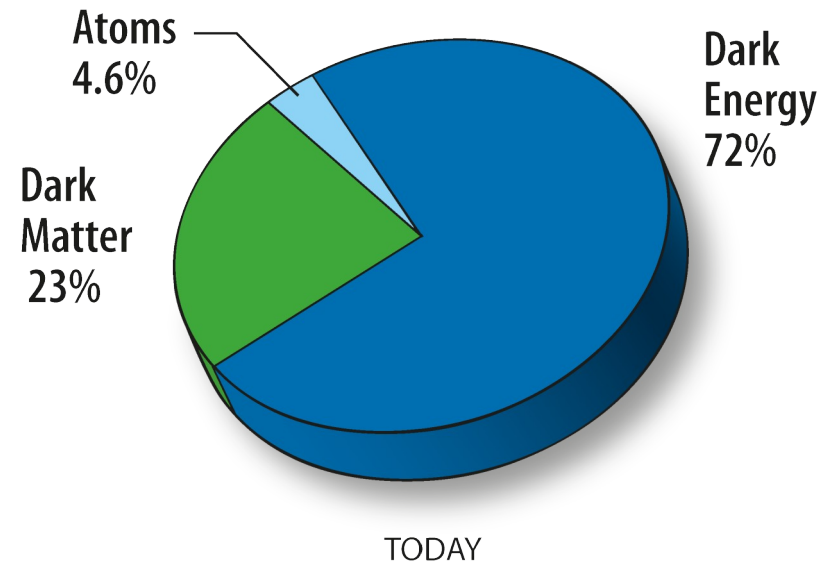
- Masse durch die kosmologische Konstante steigt mit Volumen





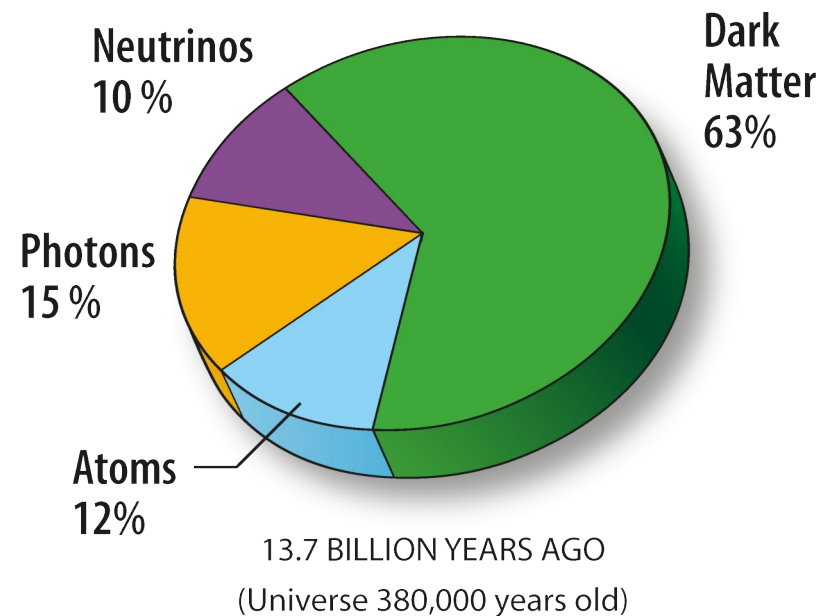
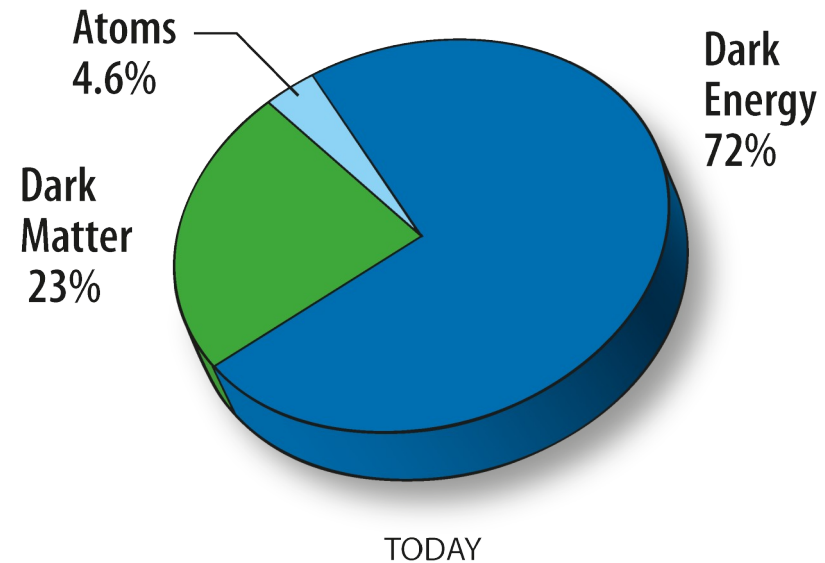
# Warum der Wert speziell ist

- Masse durch die kosmologische Konstante steigt mit Volumen



# Warum der Wert speziell ist

- Masse durch die kosmologische Konstante steigt mit Volumen
- Warum ist sie heute ungefähr 100%?



# Warum der Wert speziell ist

- Hat als Naturkonstante einen fixen Wert

# Warum der Wert speziell ist

- Hat als Naturkonstante einen fixen Wert
- Ihr grosser Beitrag kommt durch das grosse Volumen des Universums

# Warum der Wert speziell ist

- Hat als Naturkonstante einen fixen Wert
- Ihr grosser Beitrag kommt durch das grosse Volumen des Universums
- Zahlenmässig ist sie extrem klein







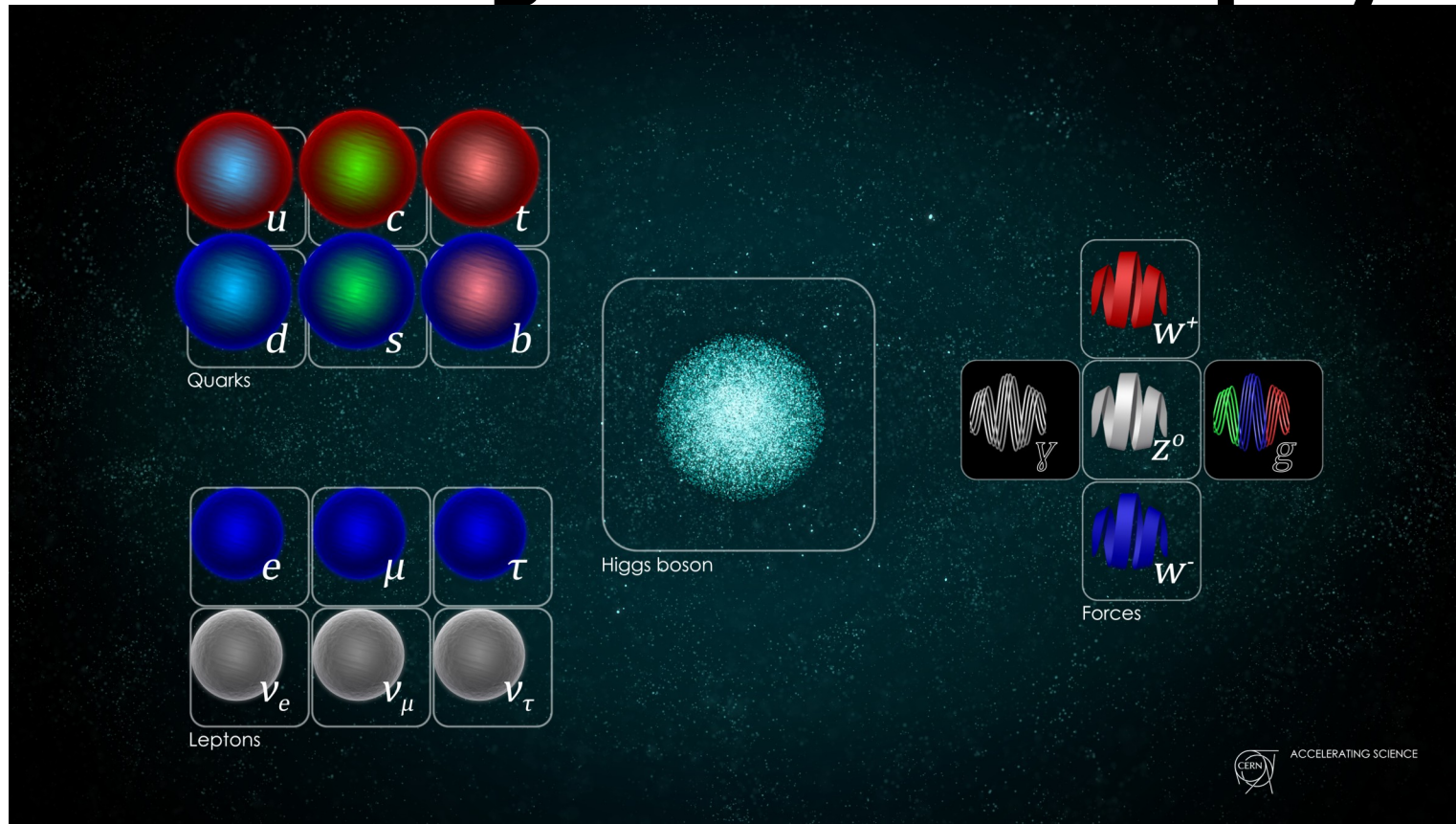


# Zusammenhang zur Teilchenphysik

# Zusammenhang zur Teilchenphysik

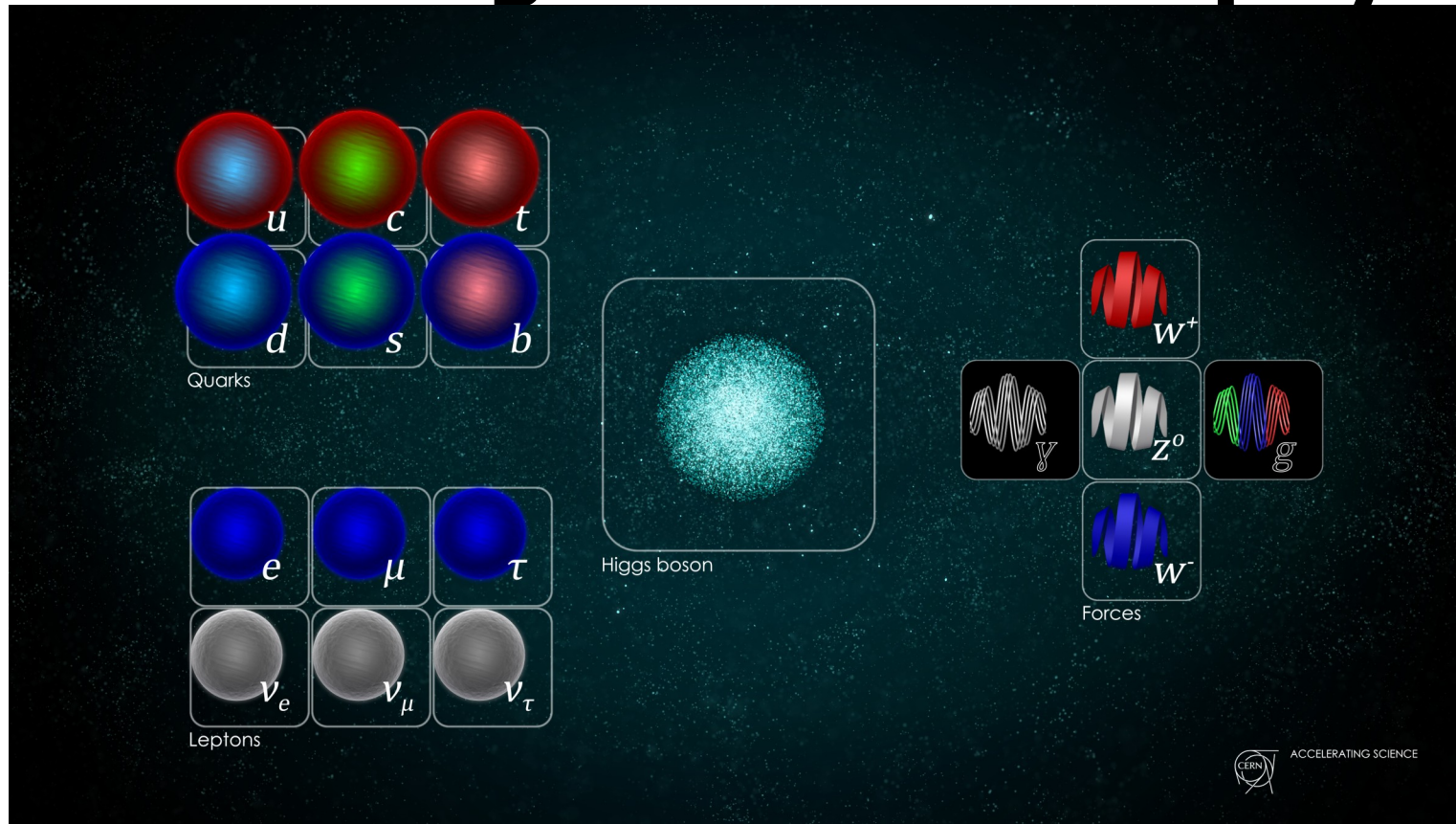
- Zweiter Teil der heute bekannten Naturgesetze

# Zusammenhang zur Teilchenphysik



- Zweiter Teil der heute bekannten Naturgesetze:  
Standardmodell der Teilchenphysik

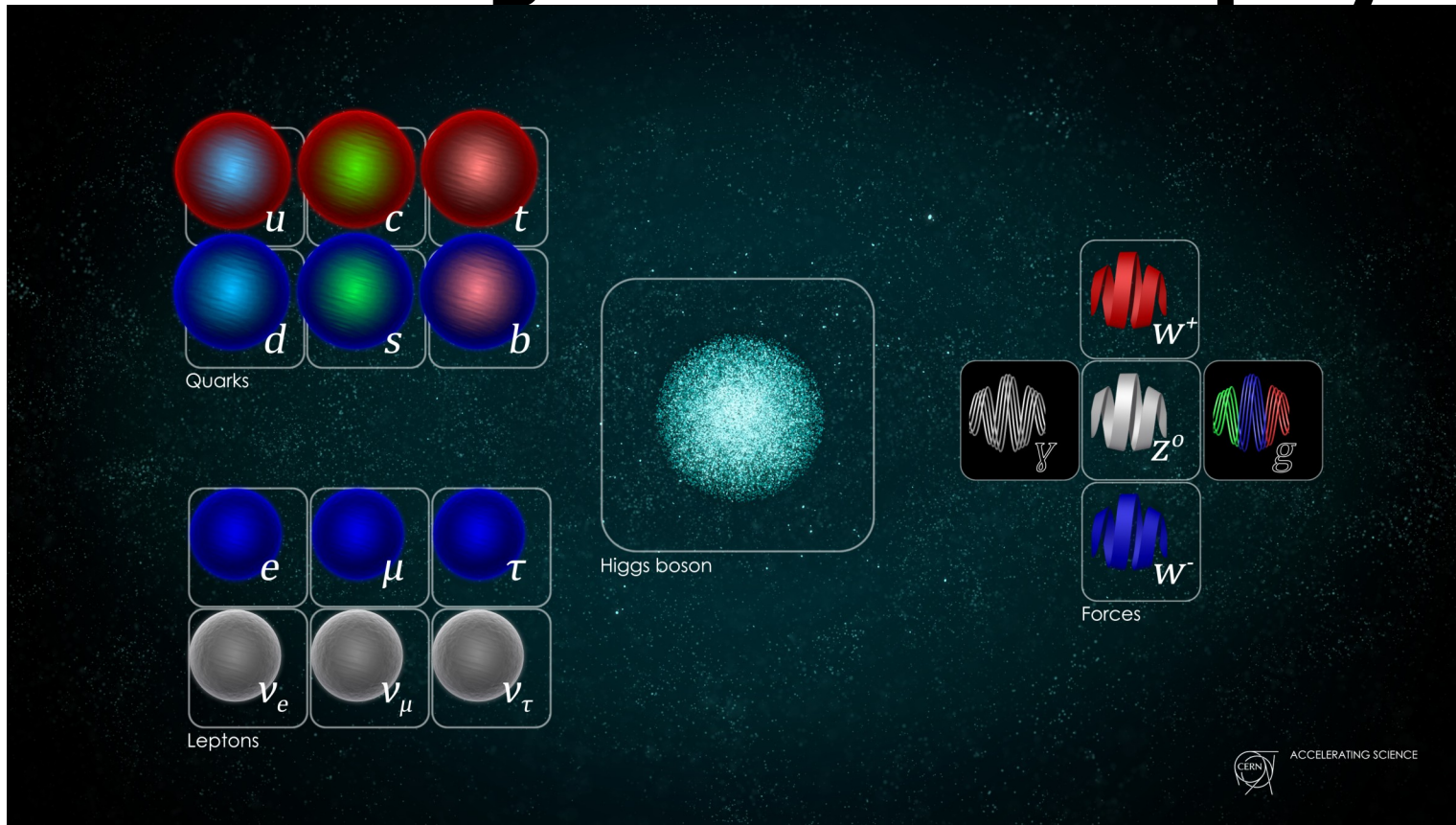
# Zusammenhang zur Teilchenphysik



- Zweiter Teil der heute bekannten Naturgesetze: Standardmodell der Teilchenphysik
- Kann potentiell den Effekt der kosmologischen Konstante beeinflussen



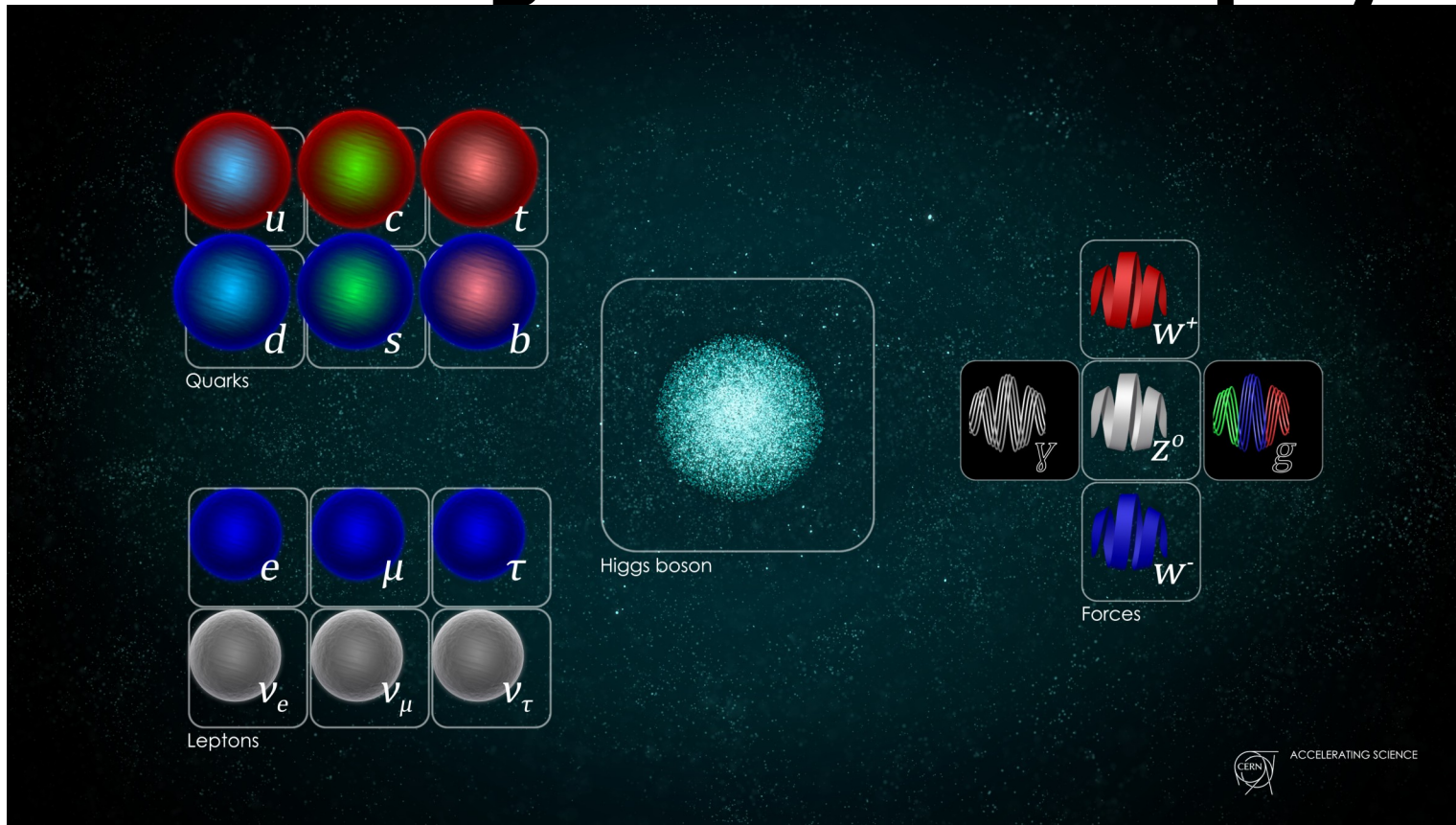
# Zusammenhang zur Teilchenphysik



- Zweiter Teil der heute bekannten Naturgesetze: Standardmodell der Teilchenphysik
- Kann potentiell den Effekt der kosmologischen Konstante beeinflussen
- Aber jeder Effekt würde riesig sein



# Zusammenhang zur Teilchenphysik



- Zweiter Teil der heute bekannten Naturgesetze: Standardmodell der Teilchenphysik
- Kann potentiell den Effekt der kosmologischen Konstante beeinflussen
- Aber jeder Effekt würde riesig sein
- Kein Effekt feststellbar: Warum?

# Mögliche Gründe

# Mögliche, **spekulative** Gründe

# Mögliche, **spekulative** Gründe

- Quanteneffekte der Gravitation

# Mögliche, **spekulative** Gründe

- Quanteneffekte der Gravitation
  - Quantentheorie der Gravitation nötig

# Mögliche, **spekulative** Gründe

- Quanteneffekte der Gravitation
  - Quantentheorie der Gravitation nötig
- Unbekannte teilchenphysikalische Effekte verhindern eine Beeinflussung



# Mögliche, **spekulative** Gründe

- Quanteneffekte der Gravitation
  - Quantentheorie der Gravitation nötig
- Unbekannte teilchenphysikalische Effekte verhindern eine Beeinflussung
  - Supersymmetrie

# Mögliche, **spekulative** Gründe

- Quanteneffekte der Gravitation
  - Quantentheorie der Gravitation nötig
- Unbekannte teilchenphysikalische Effekte verhindern eine Beeinflussung
  - Supersymmetrie
  - Zusammenhang mit der Inflation

# Mögliche, **spekulative** Gründe

- Quanteneffekte der Gravitation
  - Quantentheorie der Gravitation nötig
- Unbekannte teilchenphysikalische Effekte verhindern eine Beeinflussung
  - Supersymmetrie
  - Zusammenhang mit der Inflation
- Gravitation und Teilchenphysik haben einen gemeinsamen Ursprung und was wir sehen ist eine Konsequenz davon

# Mögliche, **spekulative** Gründe

- Quanteneffekte der Gravitation
  - Quantentheorie der Gravitation nötig
- Unbekannte teilchenphysikalische Effekte verhindern eine Beeinflussung
  - Supersymmetrie
  - Zusammenhang mit der Inflation
- Gravitation und Teilchenphysik haben einen gemeinsamen Ursprung und was wir sehen ist eine Konsequenz davon
  - Stringtheorie

# Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- So weit wir wissen dehnt sich das Universum (derzeit) beschleunigt aus



# Zusammenfassung

- So weit wir wissen dehnt sich das Universum (derzeit) beschleunigt aus
- Läßt sich durch eine neue Naturkonstante (kosmologische Konstante) beschreiben

# Zusammenfassung

- So weit wir wissen dehnt sich das Universum (derzeit) beschleunigt aus
- Läßt sich durch eine neue Naturkonstante (kosmologische Konstante) beschreiben
- Deren Wert ist extrem und speziell

# Zusammenfassung

- So weit wir wissen dehnt sich das Universum (derzeit) beschleunigt aus
- Läßt sich durch eine neue Naturkonstante (kosmologische Konstante) beschreiben
- Deren Wert ist extrem und speziell
- Viele Ansätze, warum das so ist

# Zusammenfassung

- So weit wir wissen dehnt sich das Universum (derzeit) beschleunigt aus
- Läßt sich durch eine neue Naturkonstante (kosmologische Konstante) beschreiben
- Deren Wert ist extrem und speziell
- Viele Ansätze, warum das so ist
- Benötigt neue Beobachtungen, entweder in der Teilchenphysik oder der Astrophysik, für eine endgültige Klärung

# Zusammenfassung

- So weit wir wissen dehnt sich das Universum (derzeit) beschleunigt aus
- Läßt sich durch eine neue Naturkonstante (kosmologische Konstante) beschreiben
- Deren Wert ist extrem und speziell
- Viele Ansätze, warum das so ist
- Benötigt neue Beobachtungen, entweder in der Teilchenphysik oder der Astrophysik, für eine endgültige Klärung
  - Daten sind nicht genau genug um Erklärungen stark einzugrenzen

# Zusammenfassung

- So weit wir wissen dehnt sich das Universum (derzeit) beschleunigt aus
- Läßt sich durch eine neue Naturkonstante (kosmologische Konstante) beschreiben
- Deren Wert ist extrem und speziell
- Viele Ansätze, warum das so ist
- Benötigt neue Beobachtungen, entweder in der Teilchenphysik oder der Astrophysik, für eine endgültige Klärung
  - Daten sind nicht genau genug um Erklärungen stark einzugrenzen
  - Theoretische Vorstellungen auch noch nicht zwingend

# Zusammenhänge

- Geometrie des Universums benötigt Inflation, dunkle Materie und dunkle Energie



# Zusammenhänge

- Geometrie des Universums benötigt Inflation, dunkle Materie und dunkle Energie
- Strukturbildung ebenso

# Zusammenhänge

- Geometrie des Universums benötigt Inflation, dunkle Materie und dunkle Energie
- Strukturbildung ebenso
- Alles hängt mit der Gravitation und der Teilchenphysik zusammen

# Zusammenhänge

- Geometrie des Universums benötigt Inflation, dunkle Materie und dunkle Energie
- Strukturbildung ebenso
- Alles hängt mit der Gravitation und der Teilchenphysik zusammen
- Alles sehr ausbalanciert

# Zusammenhänge

- Geometrie des Universums benötigt Inflation, dunkle Materie und dunkle Energie
- Strukturbildung ebenso
- Alles hängt mit der Gravitation und der Teilchenphysik zusammen
- Alles sehr ausbalanciert

Gemeinsamer Ursprung?