

Kosmologie

Teil I: Geschichte und Überblick

Daniel Grumiller

Institut für Theoretische Physik
TU Wien

VHS, Planetarium Wien
März 2025



Vorlesungsreihenüberblick

I. Geschichte und Überblick

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen

IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Vorlesungsreihenüberblick

I. Geschichte und Überblick

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen

IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

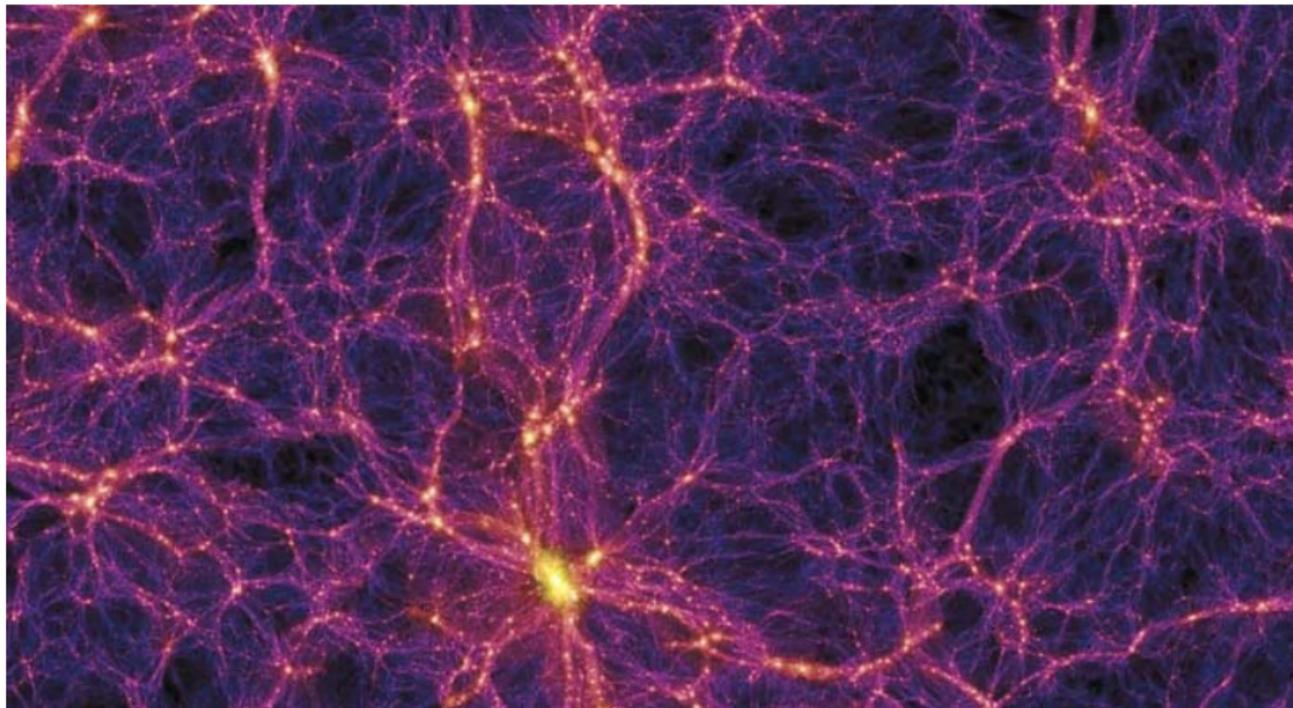


C. Flammarion, Holzschnitt, 1888

Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten



Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten

$\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\varsigma$ (kosmos) = "Welt" $-\lambda\omicron\gamma\acute{\iota}\alpha$ (-logia) = "Studium von"

Relevante Fragen zum Universum die in Kosmologie behandelt werden:

Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten

$\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\zeta$ (kosmos) = "Welt" $-\lambda\omicron\gamma\acute{\iota}\alpha$ (-logia) = "Studium von"

Relevante Fragen zum Universum die in Kosmologie behandelt werden:

- ▶ Wie ist es entstanden? [I, II, V]

Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten

$\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\zeta$ (kosmos) = "Welt" $-\lambda\omicron\gamma\acute{\iota}\alpha$ (-logia) = "Studium von"

Relevante Fragen zum Universum die in Kosmologie behandelt werden:

- ▶ Wie ist es entstanden? [I, II, V]
- ▶ Wie hat es sich entwickelt? [II]

Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten

$\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\zeta$ (kosmos) = "Welt" $-\lambda\omicron\gamma\acute{\iota}\alpha$ (-logia) = "Studium von"

Relevante Fragen zum Universum die in Kosmologie behandelt werden:

- ▶ Wie ist es entstanden? [I, II, V]
- ▶ Wie hat es sich entwickelt? [II]
- ▶ Was beinhaltet es? [III, IV]

Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten

$\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\zeta$ (kosmos) = “Welt” $-\lambda\omicron\gamma\acute{\iota}\alpha$ (-logia) = “Studium von”

Relevante Fragen zum Universum die in Kosmologie behandelt werden:

- ▶ Wie ist es entstanden? [I, II, V]
- ▶ Wie hat es sich entwickelt? [II]
- ▶ Was beinhaltet es? [III, IV]
- ▶ Was ist seine Zukunft? [IV, V]

Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten

$\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\varsigma$ (kosmos) = "Welt" $-\lambda\omicron\gamma\acute{\iota}\alpha$ (-logia) = "Studium von"

Relevante Fragen zum Universum die in Kosmologie behandelt werden:

- ▶ Wie ist es entstanden? [I, II, V]
- ▶ Wie hat es sich entwickelt? [II]
- ▶ Was beinhaltet es? [III, IV]
- ▶ Was ist seine Zukunft? [IV, V]
- ▶ Ist unser Universum einzigartig oder eines von vielen? [IV, V]

Definition von Kosmologie

Kosmologie ist wie Liebe: alle machen gerne ihre eigenen Fehler (Giancarlo Setti)

Kosmologie ist das Studium des Universums und seiner Komponenten

$\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\varsigma$ (kosmos) = “Welt” $-\lambda\omicron\gamma\acute{\iota}\alpha$ (-logia) = “Studium von”

Relevante Fragen zum Universum die in Kosmologie behandelt werden:

- ▶ Wie ist es entstanden? [I, II, V]
- ▶ Wie hat es sich entwickelt? [II]
- ▶ Was beinhaltet es? [III, IV]
- ▶ Was ist seine Zukunft? [IV, V]
- ▶ Ist unser Universum einzigartig oder eines von vielen? [IV, V]

... und etliche weitere “grosse” Fragen, die die Menschheit seit langem beschäftigen

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)
- ▶ Endliche Zeit Kosmologie (z.B. Mittelalter, Terry Pratchett)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)
- ▶ Endliche Zeit Kosmologie (z.B. Mittelalter, Terry Pratchett)
- ▶ Kosmologie mit Erde als Zentrum (z.B. Aristoteles, Ptolemäus, Maragha)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)
- ▶ Endliche Zeit Kosmologie (z.B. Mittelalter, Terry Pratchett)
- ▶ Kosmologie mit Erde als Zentrum (z.B. Aristoteles, Ptolemäus, Maragha)
- ▶ Kosmologie mit Sonne als Zentrum (z.B. Aristarchus, Aryabhata, Kepler)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)
- ▶ Endliche Zeit Kosmologie (z.B. Mittelalter, Terry Pratchett)
- ▶ Kosmologie mit Erde als Zentrum (z.B. Aristoteles, Ptolemäus, Maragha)
- ▶ Kosmologie mit Sonne als Zentrum (z.B. Aristarchus, Aryabhata, Kepler)
- ▶ Statisches Universum (z.B. Newton, Kant, Einstein)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)
- ▶ Endliche Zeit Kosmologie (z.B. Mittelalter, Terry Pratchett)
- ▶ Kosmologie mit Erde als Zentrum (z.B. Aristoteles, Ptolemäus, Maragha)
- ▶ Kosmologie mit Sonne als Zentrum (z.B. Aristarchus, Aryabhata, Kepler)
- ▶ Statisches Universum (z.B. Newton, Kant, Einstein)
- ▶ Expandierendes Universum (z.B. de Sitter, Friedmann, Lemaître)

Urgeschichte der Kosmologie

Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)
- ▶ Endliche Zeit Kosmologie (z.B. Mittelalter, Terry Pratchett)
- ▶ Kosmologie mit Erde als Zentrum (z.B. Aristoteles, Ptolemäus, Maragha)
- ▶ Kosmologie mit Sonne als Zentrum (z.B. Aristarchus, Aryabhata, Kepler)
- ▶ Statisches Universum (z.B. Newton, Kant, Einstein)
- ▶ Expandierendes Universum (z.B. de Sitter, Friedmann, Lemaître)
- ▶ Inflationäres Universum (z.B. Starobinsky, Guth, Linde)

Urgeschichte der Kosmologie

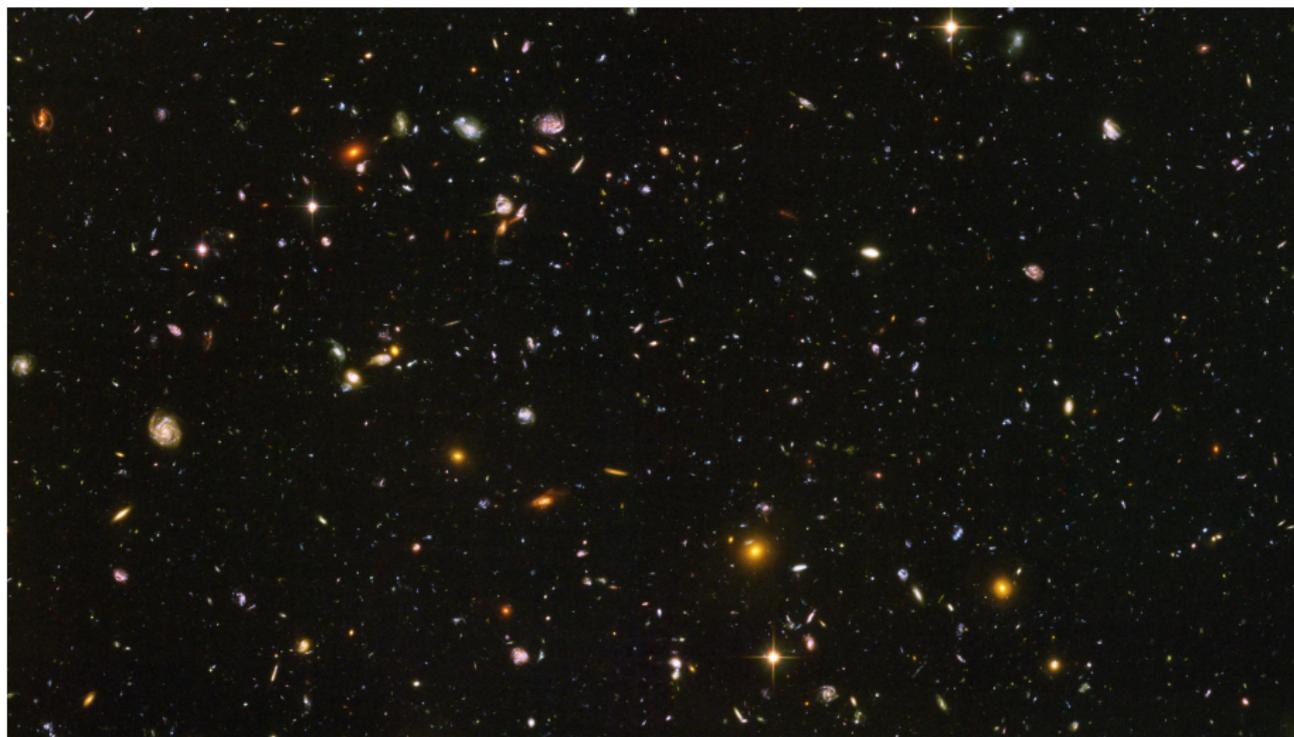
Siehe z.B. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmology>

Mystizismus und Religiöse Schöpfungsgeschichten

- ▶ Zyklische Kosmologie (z.B. Hindu, Ekpyrotisch, Penrose)
- ▶ Kosmologie mit Beginn (z.B. Sumerisch, Biblisch, Urknall)
- ▶ Räumlich unendliche Kosmologie (z.B. Babylonisch, Anaxagoras, Bruno)
- ▶ Inselkosmologie (z.B. Eleatisch, Stoisch, Descartes)
- ▶ Endliche Zeit Kosmologie (z.B. Mittelalter, Terry Pratchett)
- ▶ Kosmologie mit Erde als Zentrum (z.B. Aristoteles, Ptolemäus, Maragha)
- ▶ Kosmologie mit Sonne als Zentrum (z.B. Aristarchus, Aryabhata, Kepler)
- ▶ Statisches Universum (z.B. Newton, Kant, Einstein)
- ▶ Expandierendes Universum (z.B. de Sitter, Friedmann, Lemaître)
- ▶ Inflationäres Universum (z.B. Starobinsky, Guth, Linde)
- ▶ Multiversum (z.B. Fakhr al-Din al-Razi, Linde, Weinberg)

Probleme mit frühen Kosmologischen Modellen und Schöpfungsgeschichten

- ▶ Keine Bestätigung durch Beobachtungen



Hubble Deepfield Telescope

Probleme mit frühen Kosmologischen Modellen und Schöpfungsgeschichten

- ▶ Keine Bestätigung durch Beobachtungen
- ▶ Keine umfassende Theorie von Raum, Zeit und Gravitation

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Einsteingleichungen

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Friedmanngleichungen

Probleme mit frühen Kosmologischen Modellen und Schöpfungsgeschichten

- ▶ Keine Bestätigung durch Beobachtungen
- ▶ Keine umfassende Theorie von Raum, Zeit und Gravitation
- ▶ Keine umfassende Theorie der Bausteine des Universums
- ▶ Leicht irreführende Schlüsse zu ziehen¹



¹Nicht nur in Kosmologie, in allen Wissenschaften...

Probleme mit frühen Kosmologischen Modellen und Schöpfungsgeschichten

- ▶ Keine Bestätigung durch Beobachtungen
- ▶ Keine umfassende Theorie von Raum, Zeit und Gravitation
- ▶ Keine umfassende Theorie der Bausteine des Universums
- ▶ Leicht irreführende Schlüsse zu ziehen
- ▶ Vermischung von wissenschaftlichen mit metaphysischen Fragen



Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)
- ▶ 1915: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)
- ▶ 1915: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein)
- ▶ 1916: Erste Schwarze Loch-Lösung der Einsteingleichungen (Schwarzschild)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)
- ▶ 1915: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein)
- ▶ 1916: Erste Schwarze Loch-Lösung der Einsteingleichungen (Schwarzschild)
- ▶ 1922: Friedmanngleichungen

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)
- ▶ 1915: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein)
- ▶ 1916: Erste Schwarze Loch-Lösung der Einsteingleichungen (Schwarzschild)
- ▶ 1922: Friedmannleichungen
- ▶ 1927: Dunkle Materie vorgeschlagen (Zwicky)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)
- ▶ 1915: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein)
- ▶ 1916: Erste Schwarze Loch-Lösung der Einsteingleichungen (Schwarzschild)
- ▶ 1922: Friedmangleichungen
- ▶ 1927: Dunkle Materie vorgeschlagen (Zwicky)
- ▶ 1927: Urknalltheorie und theoretische Herleitung des Hubble-Gesetzes (Lemaître)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherford, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)
- ▶ 1915: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein)
- ▶ 1916: Erste Schwarze Loch-Lösung der Einsteingleichungen (Schwarzschild)
- ▶ 1922: Friedmangleichungen
- ▶ 1927: Dunkle Materie vorgeschlagen (Zwicky)
- ▶ 1927: Urknalltheorie und theoretische Herleitung des Hubble-Gesetzes (Lemaître)
- ▶ 1929: experimentelle Bestätigung des Hubble-Gesetzes (Hubble)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ ab 1780er: erste Vermessung der Struktur des Universums auf grossen Skalen (Herschel)
- ▶ 1830er: erste Entfernungsmessung durch Parallaxenmessung von Sternen (Bessel, Struve, Henderson)
- ▶ ab 1850er: technologische Durchbrüche durch Spiegelteleskope und photographische Platten (Rutherfurd, Draper, Common, Carver)
- ▶ 1868: Entdeckung von Helium in Sonne (Janssen)
- ▶ 1915: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein)
- ▶ 1916: Erste Schwarze Loch-Lösung der Einsteingleichungen (Schwarzschild)
- ▶ 1922: Friedmangleichungen
- ▶ 1927: Dunkle Materie vorgeschlagen (Zwicky)
- ▶ 1927: Urknalltheorie und theoretische Herleitung des Hubble-Gesetzes (Lemaître)
- ▶ 1929: experimentelle Bestätigung des Hubble-Gesetzes (Hubble)
- ▶ 1948: Vorhersage des CMB [ca. 5 K] (Alpher, Gamow, Herman)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)
- ▶ 1970er: Hinweise auf dunkle Materie durch Beobachtung von Galaxie-Rotationskurven (Rubin et al.)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)
- ▶ 1970er: Hinweise auf dunkle Materie durch Beobachtung von Galaxie-Rotationskurven (Rubin et al.)
- ▶ 1974: theoretische Beschreibung von Supersymmetrie (Wess, Zumino)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)
- ▶ 1970er: Hinweise auf dunkle Materie durch Beobachtung von Galaxie-Rotationskurven (Rubin et al.)
- ▶ 1974: theoretische Beschreibung von Supersymmetrie (Wess, Zumino)
- ▶ 1974: indirekter Nachweis von Gravitationswellen durch Beobachtung von Pulsar (Hulse, Taylor)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)
- ▶ 1970er: Hinweise auf dunkle Materie durch Beobachtung von Galaxie-Rotationskurven (Rubin et al.)
- ▶ 1974: theoretische Beschreibung von Supersymmetrie (Wess, Zumino)
- ▶ 1974: indirekter Nachweis von Gravitationswellen durch Beobachtung von Pulsar (Hulse, Taylor)
- ▶ 1980: Inflationstheorie (Starobinsky, Guth, Linde)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)
- ▶ 1970er: Hinweise auf dunkle Materie durch Beobachtung von Galaxie-Rotationskurven (Rubin et al.)
- ▶ 1974: theoretische Beschreibung von Supersymmetrie (Wess, Zumino)
- ▶ 1974: indirekter Nachweis von Gravitationswellen durch Beobachtung von Pulsar (Hulse, Taylor)
- ▶ 1980: Inflationstheorie (Starobinsky, Guth, Linde)
- ▶ 1981: Quantenfluktuationen als kosmische Keime (Mukhanov, Chibisov)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)
- ▶ 1970er: Hinweise auf dunkle Materie durch Beobachtung von Galaxie-Rotationskurven (Rubin et al.)
- ▶ 1974: theoretische Beschreibung von Supersymmetrie (Wess, Zumino)
- ▶ 1974: indirekter Nachweis von Gravitationswellen durch Beobachtung von Pulsar (Hulse, Taylor)
- ▶ 1980: Inflationstheorie (Starobinsky, Guth, Linde)
- ▶ 1981: Quantenfluktuationen als kosmische Keime (Mukhanov, Chibisov)
- ▶ 1987: Anthropische Vorhersage der kosmologischen Konstante [= dunkle Energie] (Weinberg)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1964: Messung des CMB [ca. 3 K] (Penzias, Wilson)
- ▶ 1966: Urknall kompatibel mit Heliummenge im Universum (Peebles)
- ▶ späte 1960er: mathematischer Beweis der Urknallsingularität (Hawking, Penrose)
- ▶ 1970er: Hinweise auf dunkle Materie durch Beobachtung von Galaxie-Rotationskurven (Rubin et al.)
- ▶ 1974: theoretische Beschreibung von Supersymmetrie (Wess, Zumino)
- ▶ 1974: indirekter Nachweis von Gravitationswellen durch Beobachtung von Pulsar (Hulse, Taylor)
- ▶ 1980: Inflationstheorie (Starobinsky, Guth, Linde)
- ▶ 1981: Quantenfluktuationen als kosmische Keime (Mukhanov, Chibisov)
- ▶ 1987: Anthropische Vorhersage der kosmologischen Konstante [= dunkle Energie] (Weinberg)
- ▶ 1989: COBE Experiment (CMB = schwarzer Körper mit geringen Anisotropien; Dipol: unser Galaxienhaufen 630 km/s relativ zu CMB)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)
- ▶ 2005: Sloan Digital Sky Survey entdeckt baryonische akustische Oszillationen (Vorhersage von dunkler Materie)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)
- ▶ 2005: Sloan Digital Sky Survey entdeckt baryonische akustische Oszillationen (Vorhersage von dunkler Materie)
- ▶ ab 2009: PLANCK Experiment (CMB power spectrum, 7 peaks)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)
- ▶ 2005: Sloan Digital Sky Survey entdeckt baryonische akustische Oszillationen (Vorhersage von dunkler Materie)
- ▶ ab 2009: PLANCK Experiment (CMB power spectrum, 7 peaks)
- ▶ 2012: Experimentelle Entdeckung des letzten Bausteins des Standardmodells der Teilchenphysik, des Higgsteilchens (ATLAS und CMS am LHC am CERN)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)
- ▶ 2005: Sloan Digital Sky Survey entdeckt baryonische akustische Oszillationen (Vorhersage von dunkler Materie)
- ▶ ab 2009: PLANCK Experiment (CMB power spectrum, 7 peaks)
- ▶ 2012: Experimentelle Entdeckung des letzten Bausteins des Standardmodells der Teilchenphysik, des Higgsteilchens (ATLAS und CMS am LHC am CERN)
- ▶ 2014: BICEP “Entdeckung” (zunächst primordiale Gravitationswellen, dann Staub)

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)
- ▶ 2005: Sloan Digital Sky Survey entdeckt baryonische akustische Oszillationen (Vorhersage von dunkler Materie)
- ▶ ab 2009: PLANCK Experiment (CMB power spectrum, 7 peaks)
- ▶ 2012: Experimentelle Entdeckung des letzten Bausteins des Standardmodells der Teilchenphysik, des Higgsteilchens (ATLAS und CMS am LHC am CERN)
- ▶ 2014: BICEP “Entdeckung” (zunächst primordiale Gravitationswellen, dann Staub)
- ▶ 2016: Experimentelle Entdeckung von Gravitationswellen (LIGO und Virgo) ⇒ Gravitationswellenastronomie

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

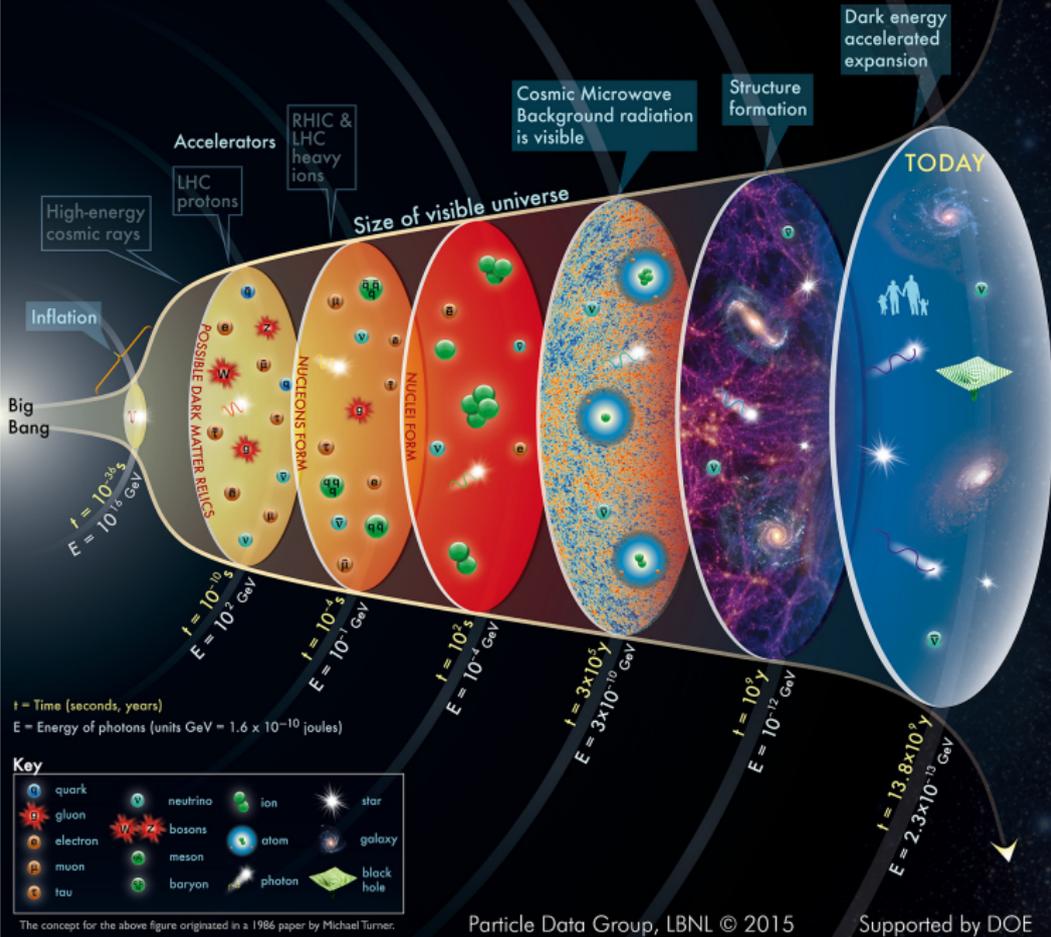
- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)
- ▶ 2005: Sloan Digital Sky Survey entdeckt baryonische akustische Oszillationen (Vorhersage von dunkler Materie)
- ▶ ab 2009: PLANCK Experiment (CMB power spectrum, 7 peaks)
- ▶ 2012: Experimentelle Entdeckung des letzten Bausteins des Standardmodells der Teilchenphysik, des Higgsteilchens (ATLAS und CMS am LHC am CERN)
- ▶ 2014: BICEP “Entdeckung” (zunächst primordiale Gravitationswellen, dann Staub)
- ▶ 2016: Experimentelle Entdeckung von Gravitationswellen (LIGO und Virgo) \Rightarrow Gravitationswellenastronomie
- ▶ 2019: Erstes Photo (des Schatten) eines Schwarzen Loches

Geschichte der Kosmologie

Fokus auf ausgewählte Aspekte — keine vollständige Geschichte!

- ▶ 1998: Experimentelle Entdeckung der beschleunigten Expansion (Perlmutter et al., Riess, Schmidt et al.)
- ▶ ab 1998: BOOMERanG Experiment (CMB power spectrum, 1. peak)
- ▶ ab 2001: WMAP Experiment (CMB power spectrum, 3 peaks)
- ▶ 2005: Sloan Digital Sky Survey entdeckt baryonische akustische Oszillationen (Vorhersage von dunkler Materie)
- ▶ ab 2009: PLANCK Experiment (CMB power spectrum, 7 peaks)
- ▶ 2012: Experimentelle Entdeckung des letzten Bausteins des Standardmodells der Teilchenphysik, des Higgsteilchens (ATLAS und CMS am LHC am CERN)
- ▶ 2014: BICEP “Entdeckung” (zunächst primordiale Gravitationswellen, dann Staub)
- ▶ 2016: Experimentelle Entdeckung von Gravitationswellen (LIGO und Virgo) \Rightarrow Gravitationswellenastronomie
- ▶ 2019: Erstes Photo (des Schatten) eines Schwarzen Loches
- ▶ 2021: James Webb Space Telescope gestartet

HISTORY OF THE UNIVERSE



Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

Geschichte des Universums

Geschichte der Kosmologie ist wissenschaftshistorisch interessant

Geschichte des Kosmos (=Universums) ist wissenschaftlich interessant

Fokus auf Geschichte des Universums

Geschichte des Universums

Geschichte der Kosmologie ist wissenschaftshistorisch interessant

Geschichte des Kosmos (=Universums) ist wissenschaftlich interessant

Fokus auf Geschichte des Universums

- ▶ Betrachten im Folgenden Überblick über Standard Modell von Kosmologie und Teilchenphysik

Geschichte des Universums

Geschichte der Kosmologie ist wissenschaftshistorisch interessant

Geschichte des Kosmos (=Universums) ist wissenschaftlich interessant

Fokus auf Geschichte des Universums

- ▶ Betrachten im Folgenden Überblick über Standard Modell von Kosmologie und Teilchenphysik
- ▶ Allgemeiner Trend: Frühe Zeiten = hohe Energien

Geschichte des Universums

Geschichte der Kosmologie ist wissenschaftshistorisch interessant

Geschichte des Kosmos (=Universums) ist wissenschaftlich interessant

Fokus auf Geschichte des Universums

- ▶ Betrachten im Folgenden Überblick über Standard Modell von Kosmologie und Teilchenphysik
- ▶ Allgemeiner Trend: Frühe Zeiten = hohe Energien
- ▶ Deshalb zwei Klassen von Experimenten von Relevanz für Kosmologie:
 1. Beobachtungen (mit Teleskopen, Ballonexperimenten, Satelliten, Gravitationswellendetektoren, ...)
 - ▶ Vorteil: direkte Beobachtungen des Universums
 - ▶ Nachteil: keine Kontrolle über die Bedingungen im Universum

Geschichte des Universums

Geschichte der Kosmologie ist wissenschaftshistorisch interessant

Geschichte des Kosmos (=Universums) ist wissenschaftlich interessant

Fokus auf Geschichte des Universums

- ▶ Betrachten im Folgenden Überblick über Standard Modell von Kosmologie und Teilchenphysik
- ▶ Allgemeiner Trend: Frühe Zeiten = hohe Energien
- ▶ Deshalb zwei Klassen von Experimenten von Relevanz für Kosmologie:
 1. Beobachtungen (mit Teleskopen, Ballonexperimenten, Satelliten, Gravitationswellendetektoren, ...)
 - ▶ Vorteil: direkte Beobachtungen des Universums
 - ▶ Nachteil: keine Kontrolle über die Bedingungen im Universum
 2. Hochenergieexperimente (LEP, Tevatron, RHIC, LHC, ILC, ...)
 - ▶ Vorteil: kontrollierbare Bedingungen bei Beschleunigerexperimenten
 - ▶ Nachteil: indirekte Beobachtungen des Universums

Geschichte des Universums

Geschichte der Kosmologie ist wissenschaftshistorisch interessant

Geschichte des Kosmos (=Universums) ist wissenschaftlich interessant

Fokus auf Geschichte des Universums

- ▶ Betrachten im Folgenden Überblick über Standard Modell von Kosmologie und Teilchenphysik
- ▶ Allgemeiner Trend: Frühe Zeiten = hohe Energien
- ▶ Deshalb zwei Klassen von Experimenten von Relevanz für Kosmologie:
 1. Beobachtungen (mit Teleskopen, Ballonexperimenten, Satelliten, Gravitationswellendetektoren, ...)
 - ▶ Vorteil: direkte Beobachtungen des Universums
 - ▶ Nachteil: keine Kontrolle über die Bedingungen im Universum
 2. Hochenergieexperimente (LEP, Tevatron, RHIC, LHC, ILC, ...)
 - ▶ Vorteil: kontrollierbare Bedingungen bei Beschleunigerexperimenten
 - ▶ Nachteil: indirekte Beobachtungen des Universums
- ▶ Viele Aspekte detaillierter erklärt in Vorlesungen II–V

Geschichte des Universums

Geschichte der Kosmologie ist wissenschaftshistorisch interessant

Geschichte des Kosmos (=Universums) ist wissenschaftlich interessant

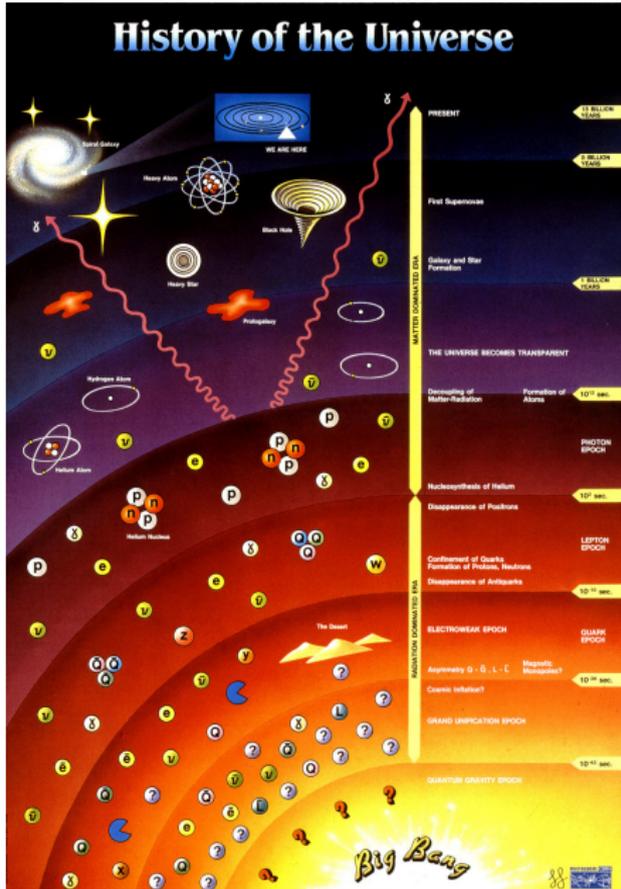
Fokus auf Geschichte des Universums

- ▶ Betrachten im Folgenden Überblick über Standard Modell von Kosmologie und Teilchenphysik
- ▶ Allgemeiner Trend: Frühe Zeiten = hohe Energien
- ▶ Deshalb zwei Klassen von Experimenten von Relevanz für Kosmologie:
 1. Beobachtungen (mit Teleskopen, Ballonexperimenten, Satelliten, Gravitationswellendetektoren, ...)
 - ▶ Vorteil: direkte Beobachtungen des Universums
 - ▶ Nachteil: keine Kontrolle über die Bedingungen im Universum
 2. Hochenergieexperimente (LEP, Tevatron, RHIC, LHC, ILC, ...)
 - ▶ Vorteil: kontrollierbare Bedingungen bei Beschleunigerexperimenten
 - ▶ Nachteil: indirekte Beobachtungen des Universums
- ▶ Viele Aspekte detaillierter erklärt in Vorlesungen II–V

Fragen jederzeit willkommen!

Die erste Planck-Sekunde

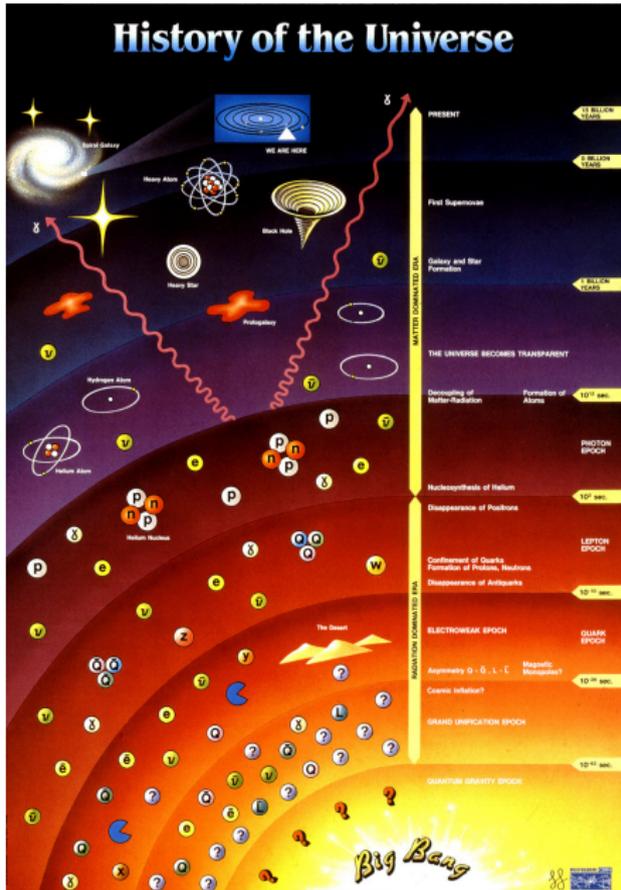
($1 \approx 10^{-43} \text{ s} \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg}$)



Die erste Planck-Sekunde

($1 \approx 10^{-43} \text{ s} \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg}$)

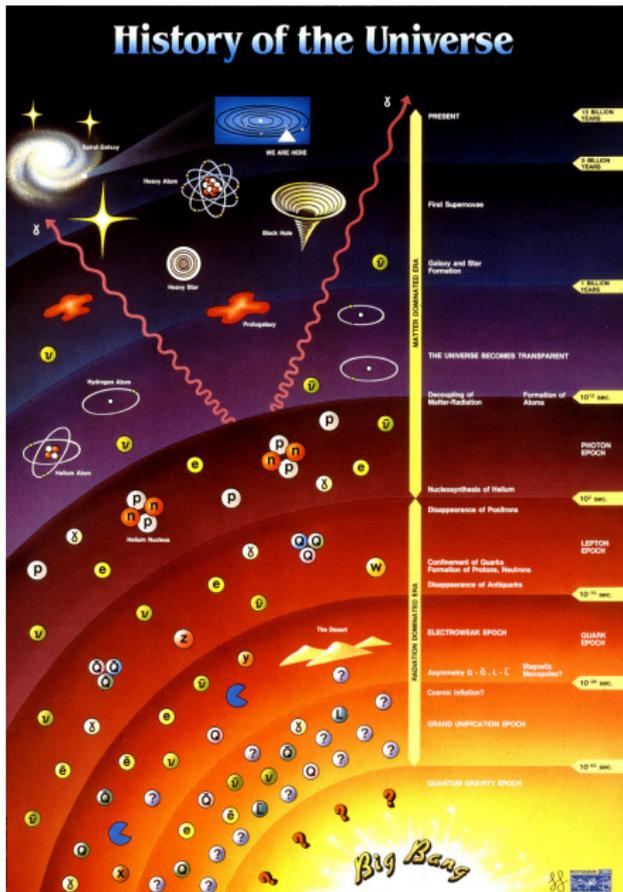
- ▶ Beginn des Universums: Urknall



Die erste Planck-Sekunde

($1 \approx 10^{-43} \text{s} \approx 10^{19} \text{GeV} \approx 10^{-8} \text{kg}$)

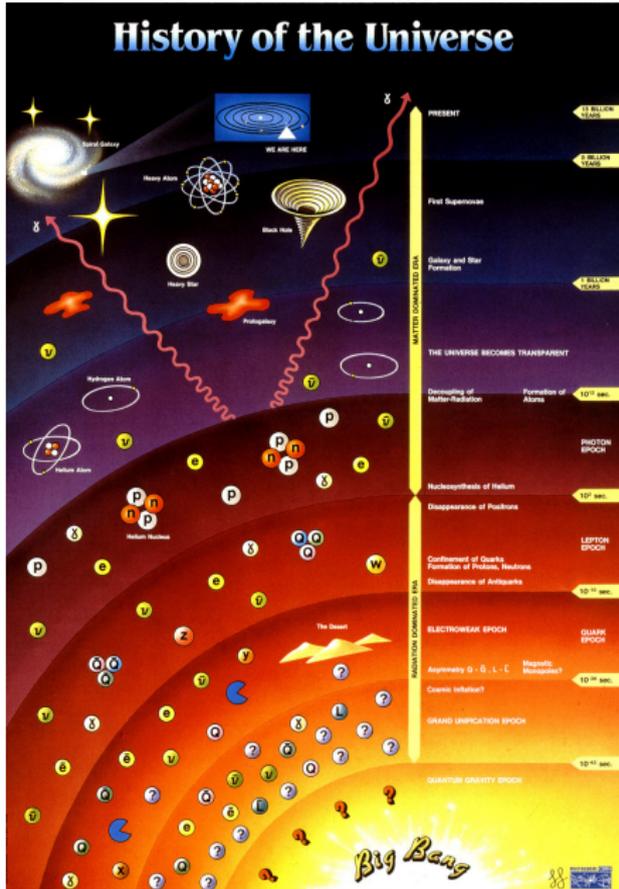
- ▶ Beginn des Universums: Urknall
- ▶ Physik des Urknalls?



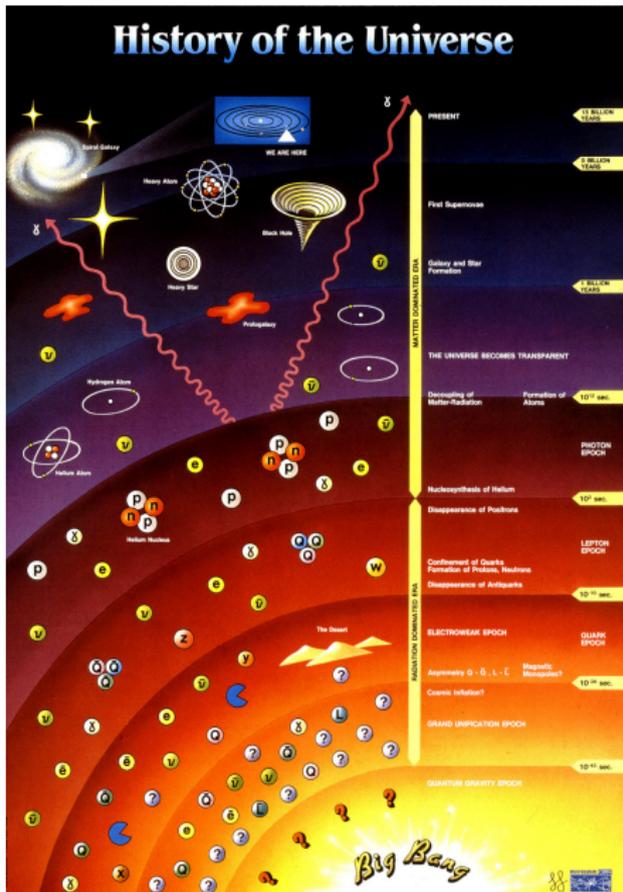
Die erste Planck-Sekunde

($1 \approx 10^{-43} \text{ s} \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg}$)

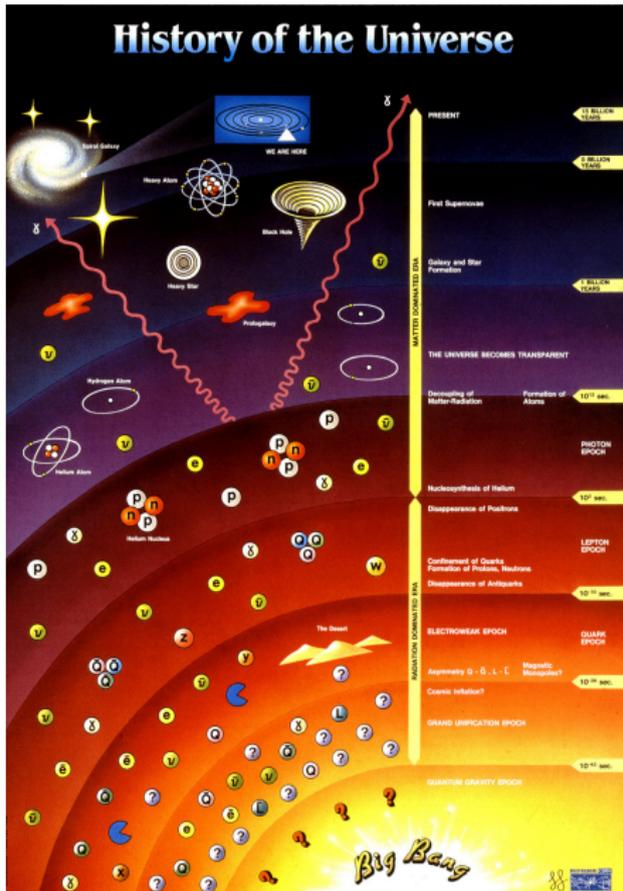
- ▶ Beginn des Universums: Urknall
- ▶ Physik des Urknalls?
- ▶ Alle vier Kräfte relevant



($1 \approx 10^{-43} \text{ s} \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg}$)



- ▶ Beginn des Universums: Urknall
- ▶ Physik des Urknalls?
- ▶ Alle vier Kräfte relevant
- ▶ Quantengravitation!



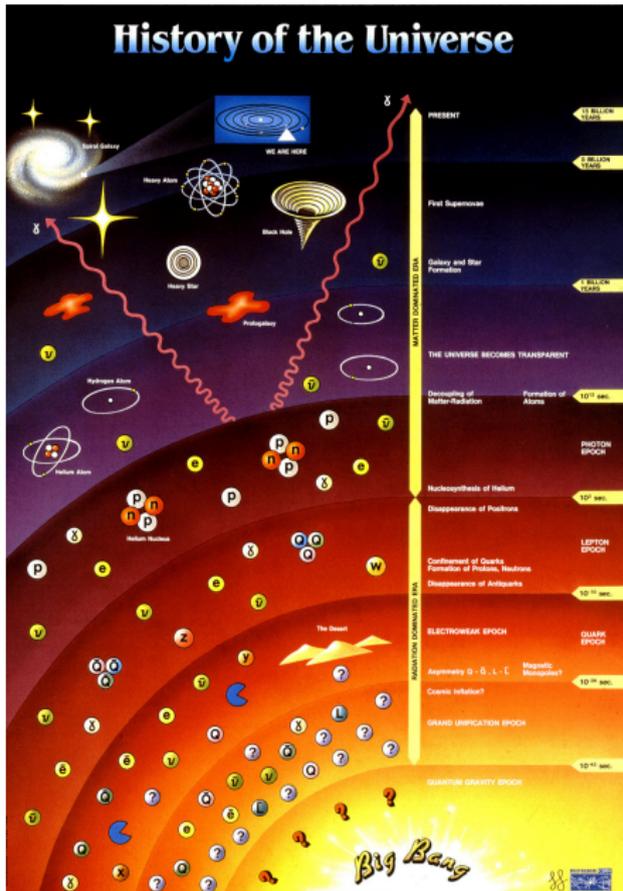
Die erste Planck-Sekunde

($1 \approx 10^{-43} \text{ s} \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg}$)

- ▶ Beginn des Universums: Urknall
- ▶ Physik des Urknalls?
- ▶ Alle vier Kräfte relevant
- ▶ Quantengravitation!

Warum Urknall?

- ▶ Olbers paradox (1823)



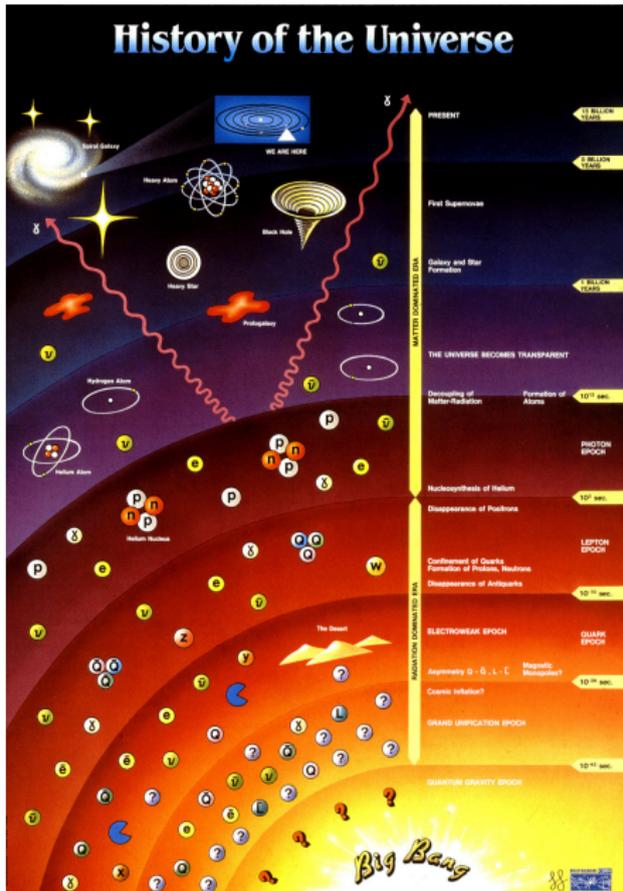
Die erste Planck-Sekunde

$$(1 \approx 10^{-43} s \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg})$$

- ▶ Beginn des Universums: Urknall
- ▶ Physik des Urknalls?
- ▶ Alle vier Kräfte relevant
- ▶ Quantengravitation!

Warum Urknall?

- ▶ Olbers paradox (1823)
- ▶ Hubble 1929: $v \propto r$



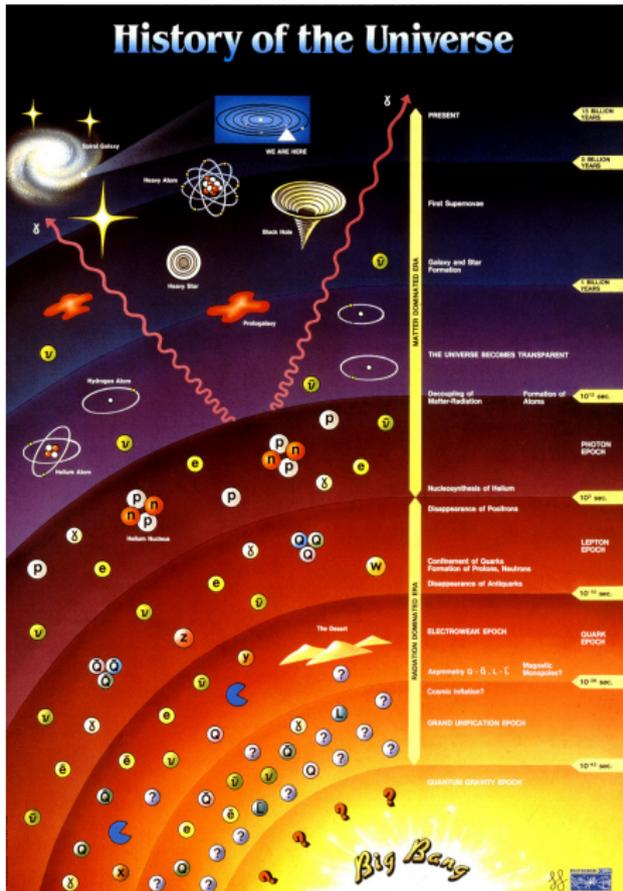
Die erste Planck-Sekunde

($1 \approx 10^{-43} \text{ s} \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg}$)

- ▶ Beginn des Universums: Urknall
- ▶ Physik des Urknalls?
- ▶ Alle vier Kräfte relevant
- ▶ Quantengravitation!

Warum Urknall?

- ▶ Olbers paradox (1823)
- ▶ Hubble 1929: $v \propto r$
- ▶ FLRW (-1927)



Die erste Planck-Sekunde

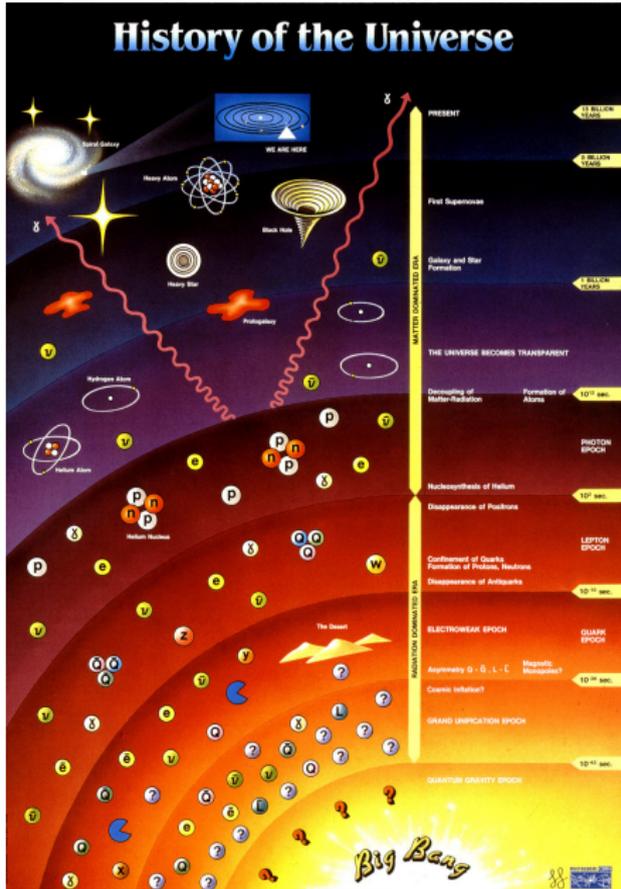
$$(1 \approx 10^{-43} s \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ kg})$$

- ▶ Beginn des Universums: Urknall
- ▶ Physik des Urknalls?
- ▶ Alle vier Kräfte relevant
- ▶ Quantengravitation!

Warum Urknall?

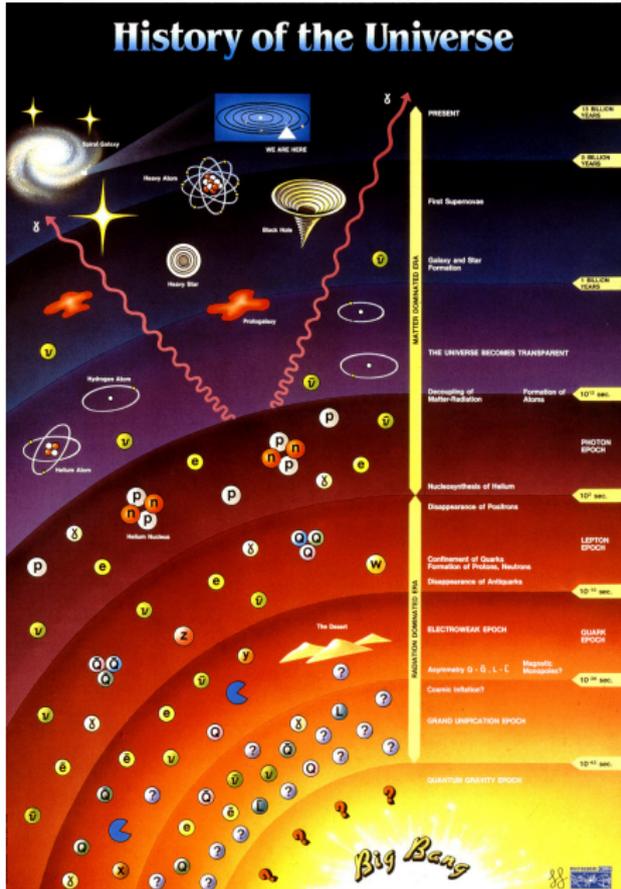
- ▶ Olbers paradox (1823)
- ▶ Hubble 1929: $v \propto r$
- ▶ FLRW (-1927)
- ▶ Nukleosynthese (75% H, 25% He)
- ▶ CMB (1964)

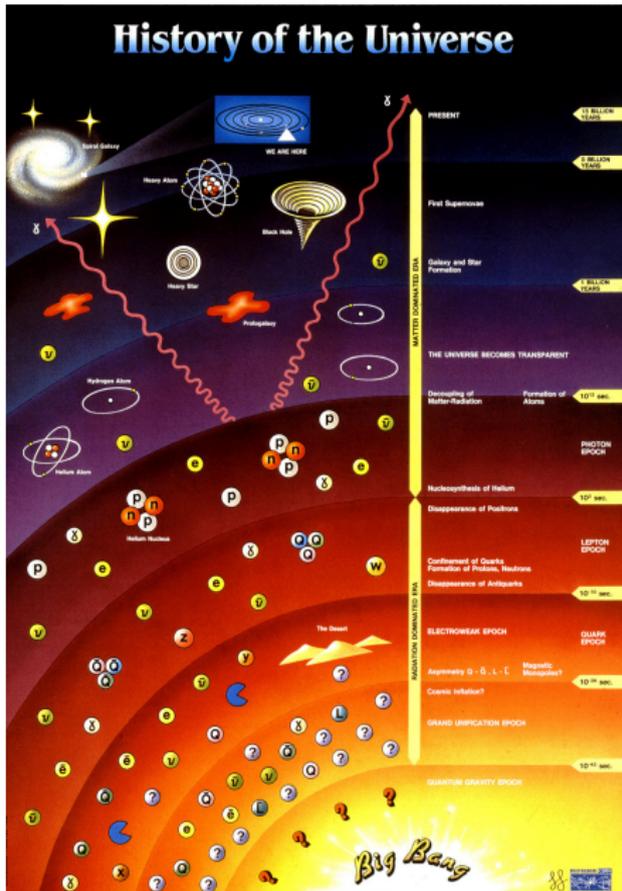
Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10^{16} GeV)?



Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10^{16} GeV)?

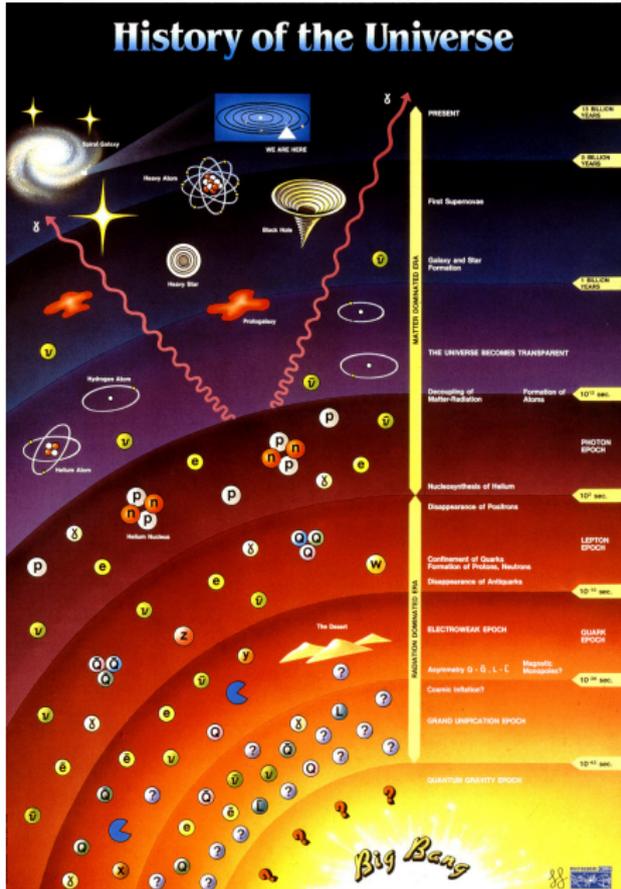
► Grand Unified Theories (GUT)





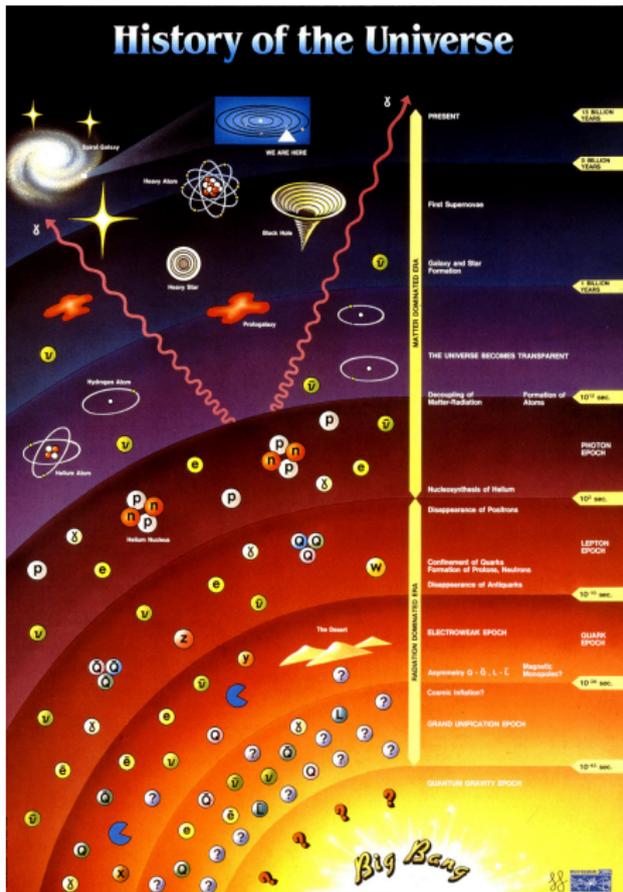
Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10^{16} GeV)?

- ▶ Grand Unified Theories (GUT)
- ▶ Drei der vier Kräfte vereinheitlicht



Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10¹⁶ GeV)?

- ▶ Grand Unified Theories (GUT)
- ▶ Drei der vier Kräfte vereinheitlicht
- ▶ Proton Zerfall?

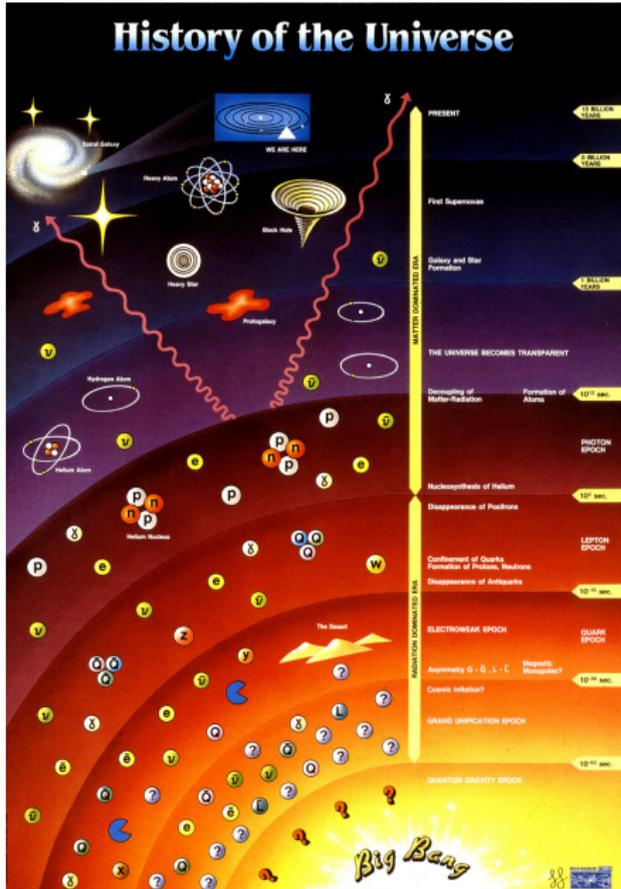


Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10^{16} GeV)?

- ▶ Grand Unified Theories (GUT)
- ▶ Drei der vier Kräfte vereinheitlicht
- ▶ Proton Zerfall?

Warum GUT?

- ▶ Elektromagnetismus, Maxwell 1873

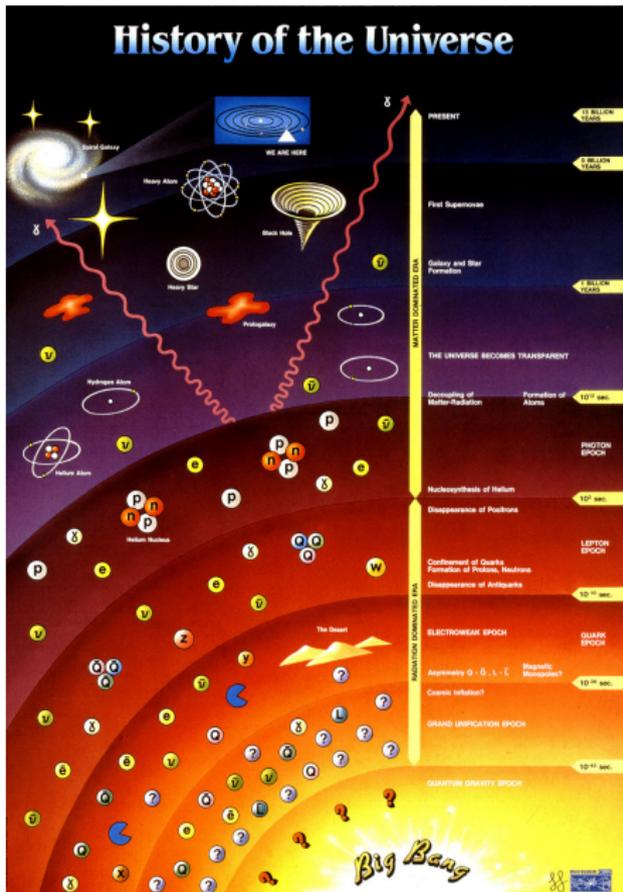


Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10^{16} GeV)?

- ▶ Grand Unified Theories (GUT)
- ▶ Drei der vier Kräfte vereinheitlicht
- ▶ Proton Zerfall?

Warum GUT?

- ▶ Elektromagnetismus, Maxwell 1873
- ▶ QED, 1940er

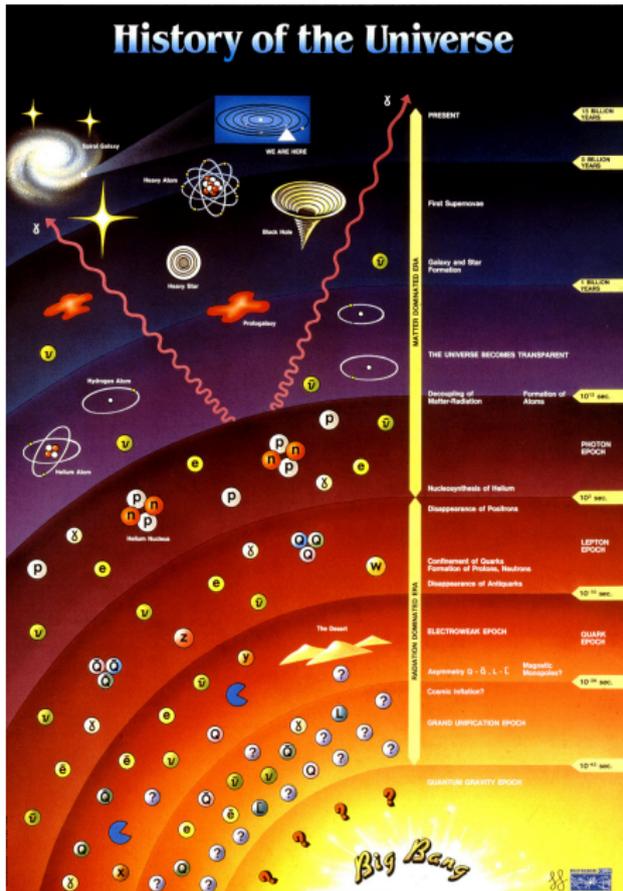


Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10^{16} GeV)?

- ▶ Grand Unified Theories (GUT)
- ▶ Drei der vier Kräfte vereinheitlicht
- ▶ Proton Zerfall?

Warum GUT?

- ▶ Elektromagnetismus, Maxwell 1873
- ▶ QED, 1940er
- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung und QCD (Standard Model), 1960/70er



Die grosse Vereinheitlichung (GUT):
(10^{16} GeV)?

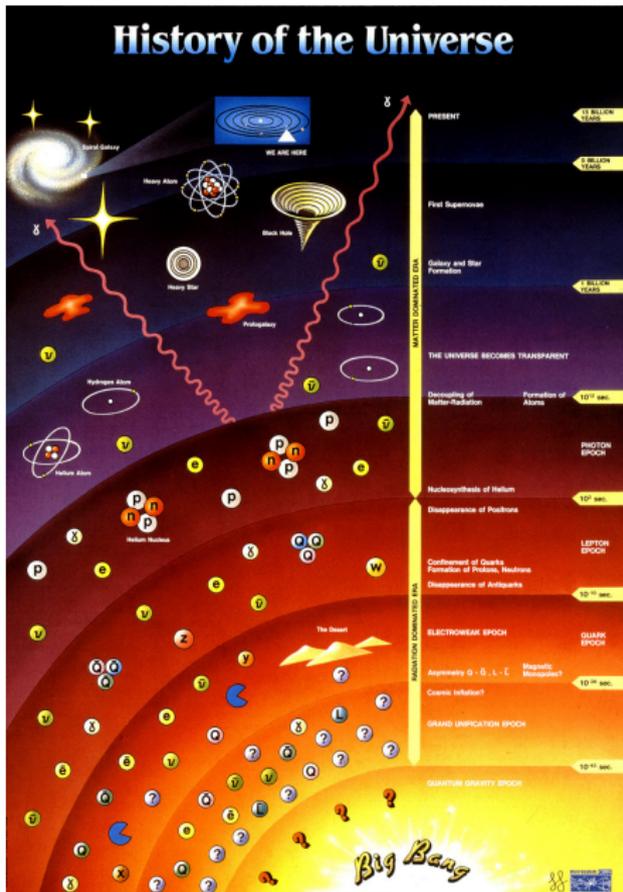
- ▶ Grand Unified Theories (GUT)
- ▶ Drei der vier Kräfte vereinheitlicht
- ▶ Proton Zerfall?

Warum GUT?

- ▶ Elektromagnetismus, Maxwell 1873
- ▶ QED, 1940er
- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung und QCD (Standard Model), 1960/70er
- ▶ GUT, seit 1970er

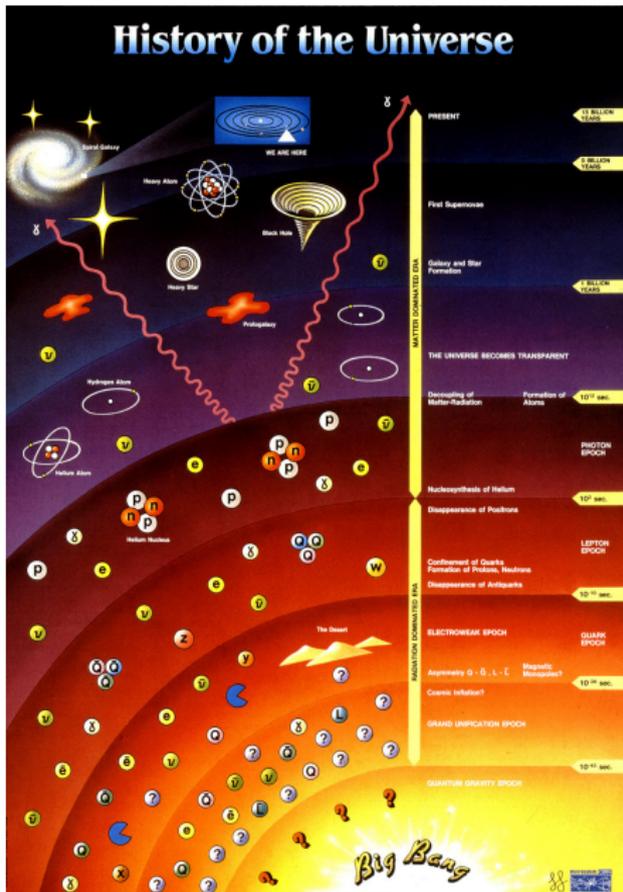
Literatur: Richard Feynman: QED

Inflation:
(10^{14} GeV)?

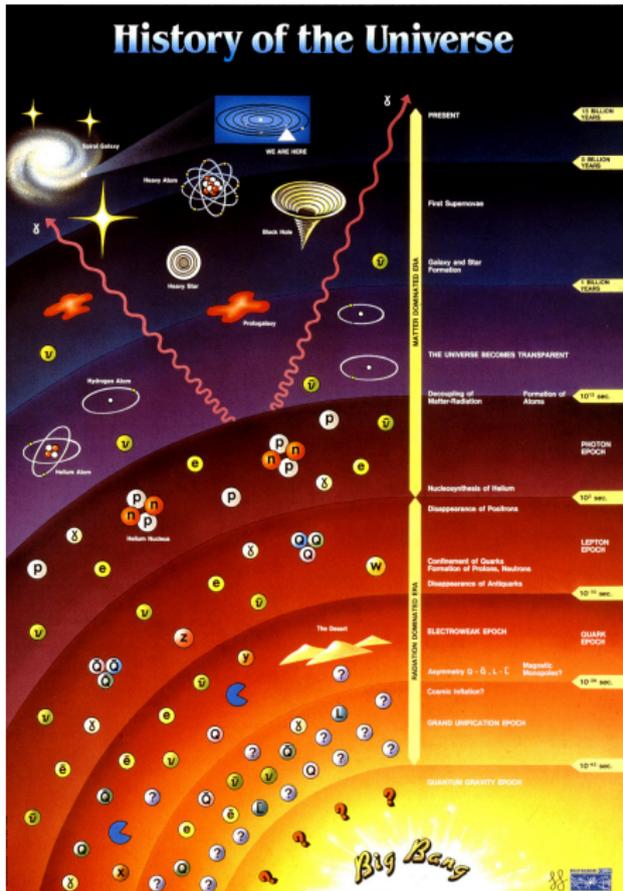


► Inflationäre Expansion (10^{26} -fach)

Inflation:
(10^{14} GeV)?



- ▶ Inflationäre Expansion (10^{26} -fach)
- ▶ Quantenfluktuationen = Struktur



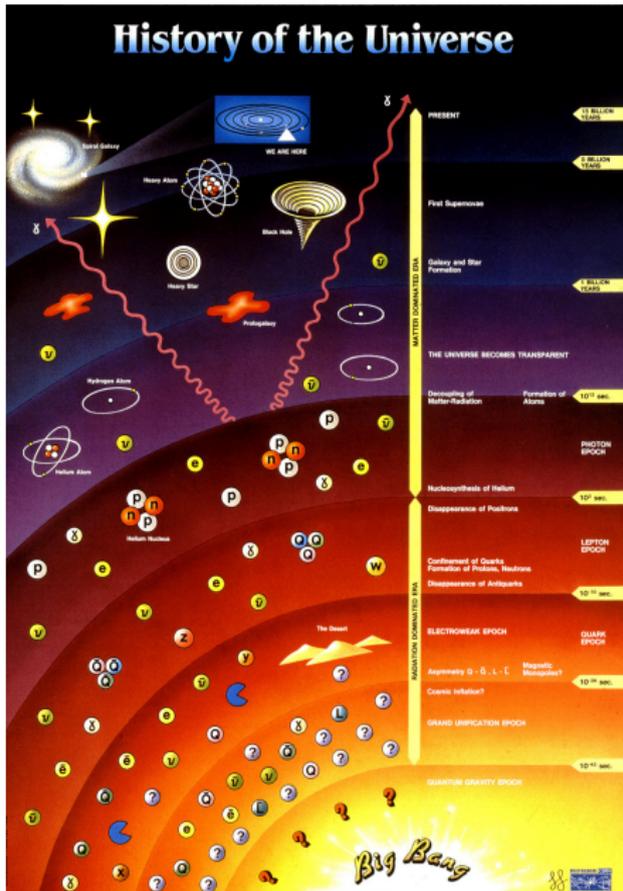
Inflation:
(10^{14} GeV)?

- ▶ Inflationäre Expansion (10^{26} -fach)
- ▶ Quantenfluktuationen = Struktur
- ▶ Inflaton?

Warum Inflation?

- ▶ Flachheitsproblem
- ▶ Magnetisches Monopolproblem

Literatur: Alan Guth
The inflationary Universe



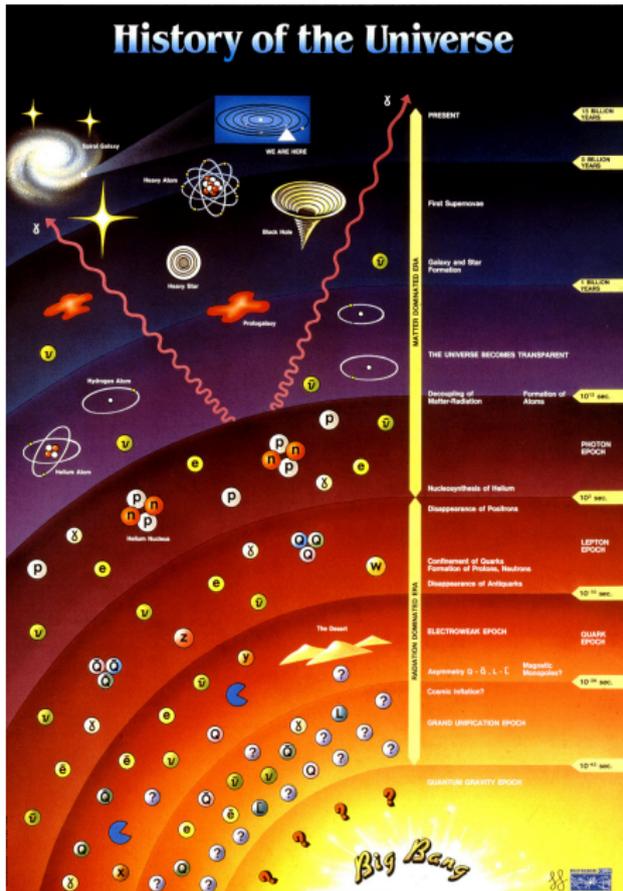
Inflation:
(10^{14} GeV)?

- ▶ Inflationäre Expansion (10^{26} -fach)
- ▶ Quantenfluktuationen = Struktur
- ▶ Inflaton?

Warum Inflation?

- ▶ Flachheitsproblem
- ▶ Magnetisches Monopolproblem
- ▶ Horizontproblem

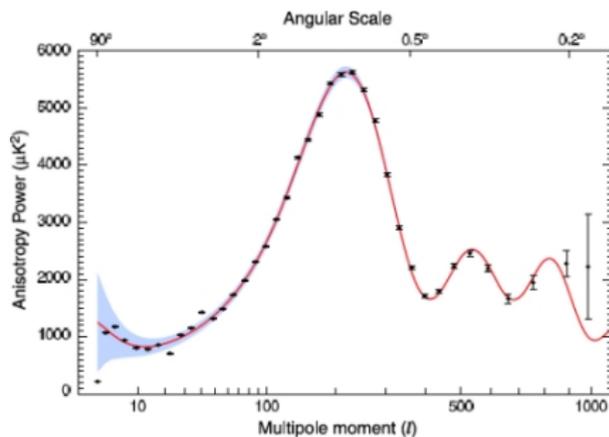
Literatur: Alan Guth
The inflationary Universe



Inflation:
(10^{14} GeV)?

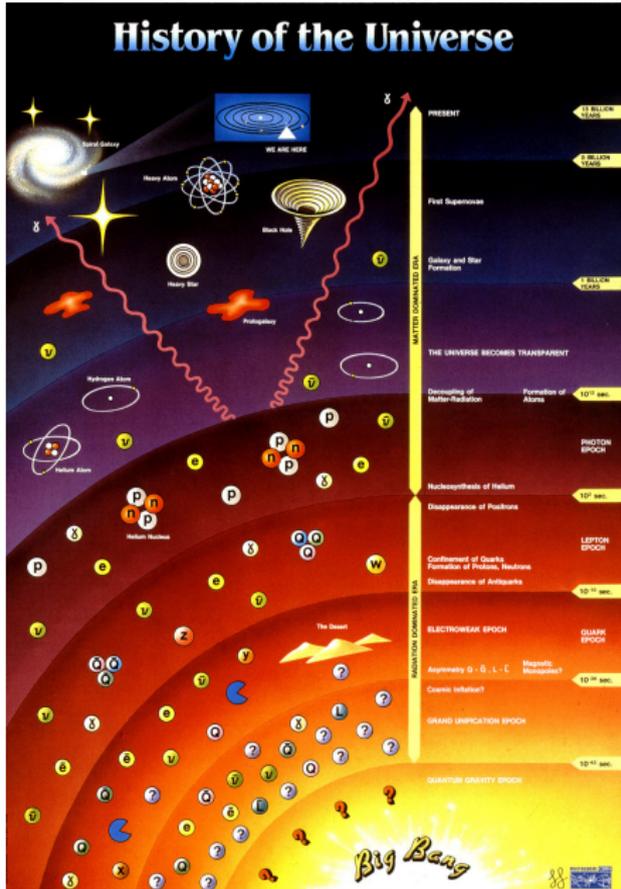
- ▶ Inflationäre Expansion (10^{26} -fach)
- ▶ Quantenfluktuationen = Struktur
- ▶ Inflaton?

Warum Inflation?



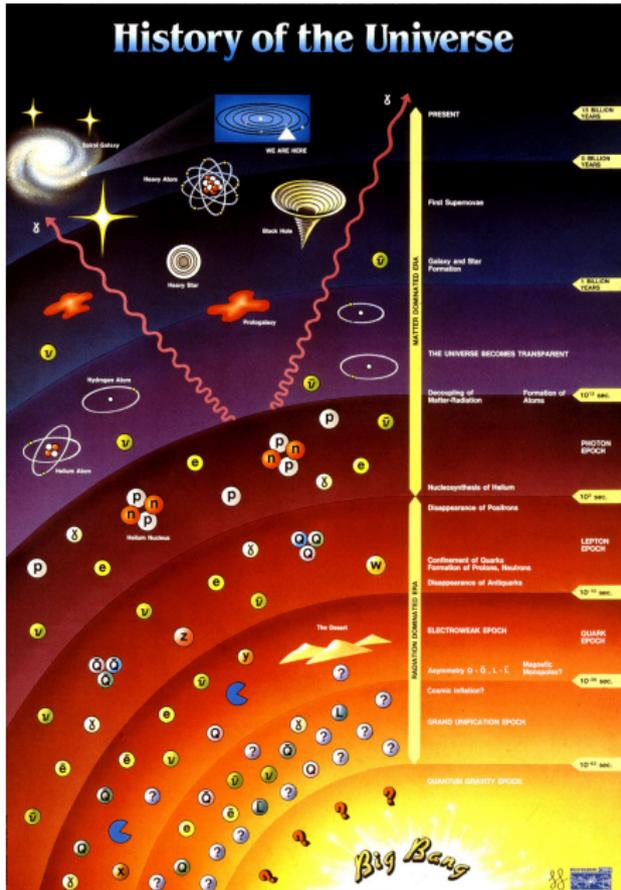
From the WMAP data (2008)

Elektroschwache Epoche:
 ($10^{-10}s$: $10^2 - 10^3 GeV$)

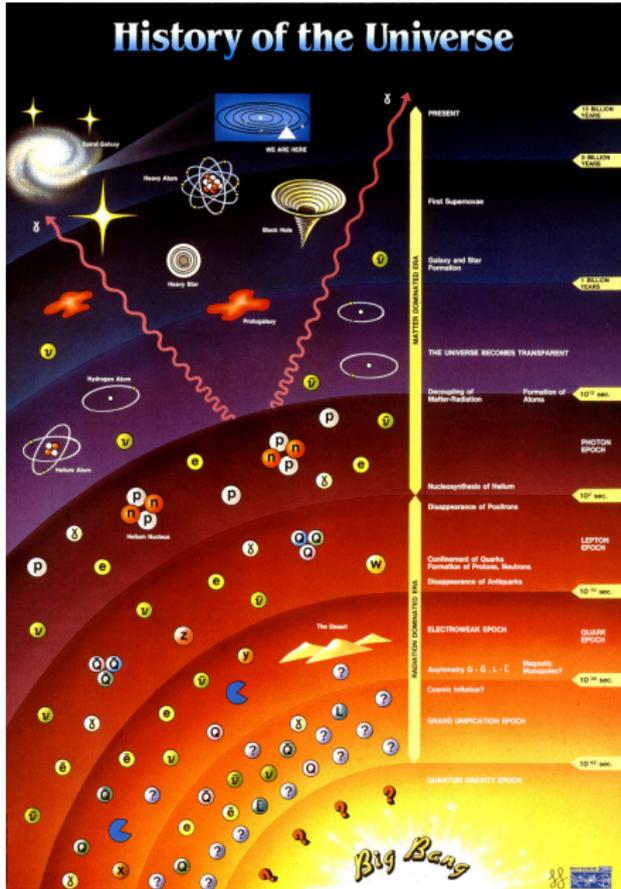


Elektroschwache Epoche:
($10^{-10}s$: $10^2 - 10^3 GeV$)

- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung

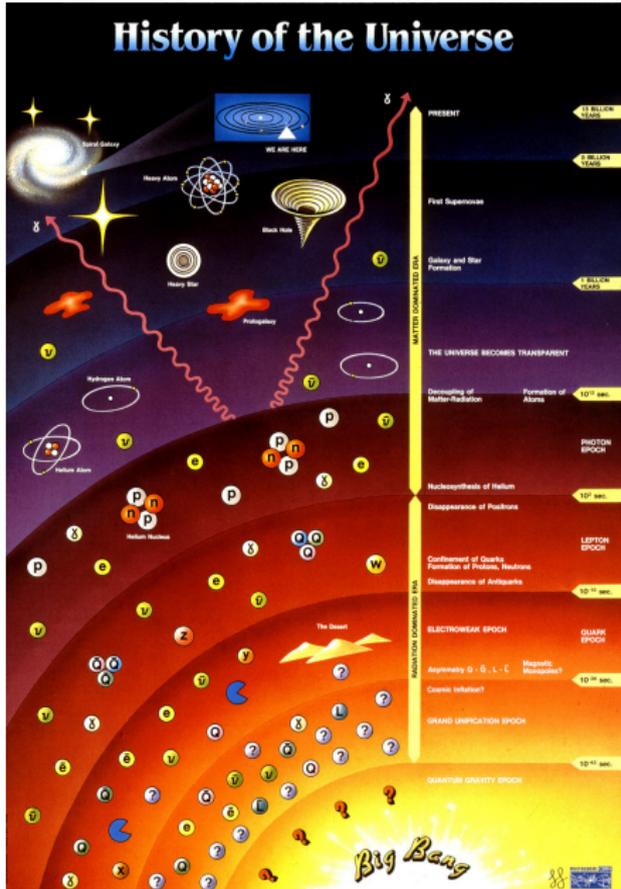


Elektroschwache Epoche:
($10^{-10}s$: $10^2 - 10^3 GeV$)

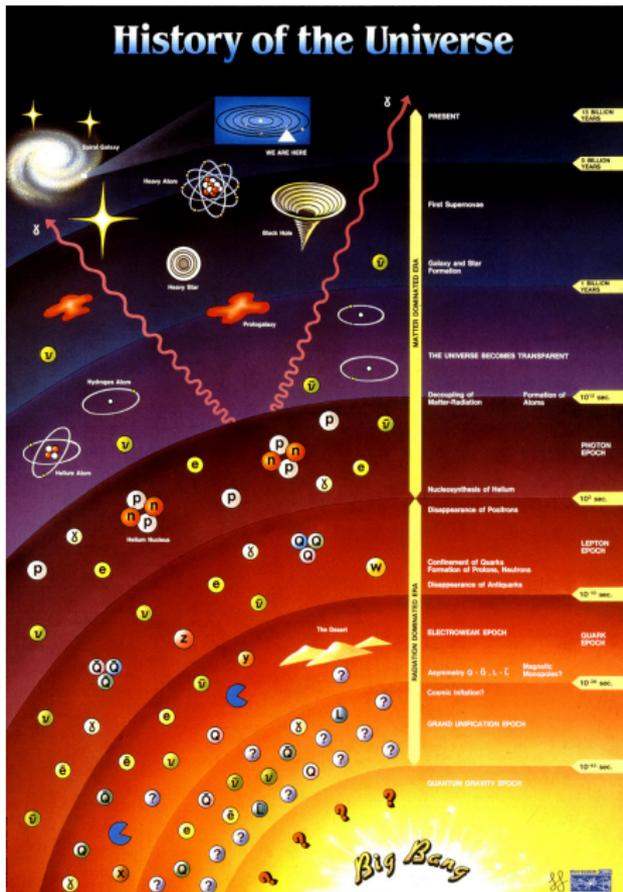


- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung
- ▶ Freie quarks

Elektroschwache Epoche:
 ($10^{-10} s$: $10^2 - 10^3 GeV$)



- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung
- ▶ Freie quarks
- ▶ Higgsmechanismus? SUSY? LHC!



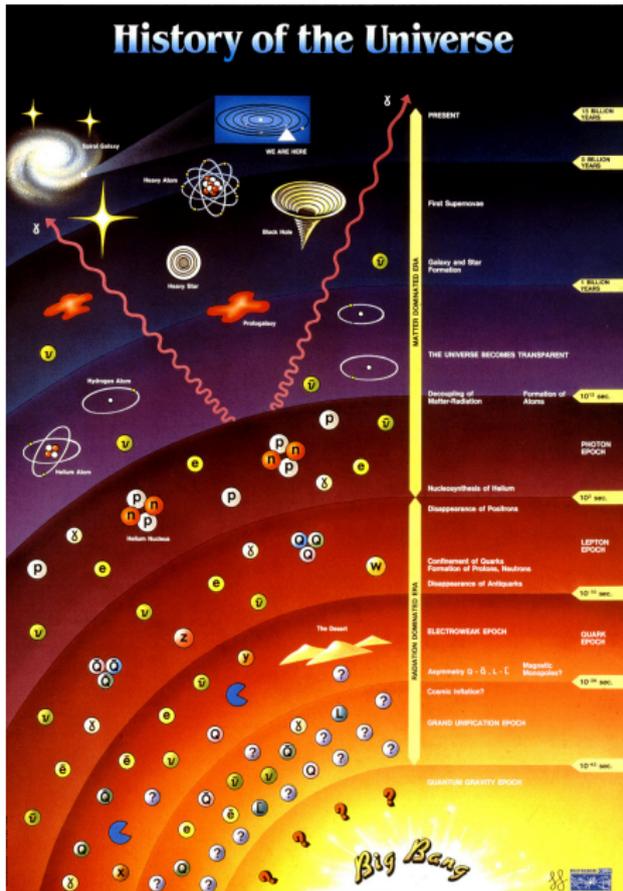
Elektroschwache Epoche:
($10^{-10}s$: $10^2 - 10^3 GeV$)

- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung
- ▶ Freie quarks
- ▶ Higgsmechanismus? SUSY? LHC!

Warum Higgs und SUSY?

- ▶ Higgs gibt Masse

Literatur: Leon Lederman
The God particle



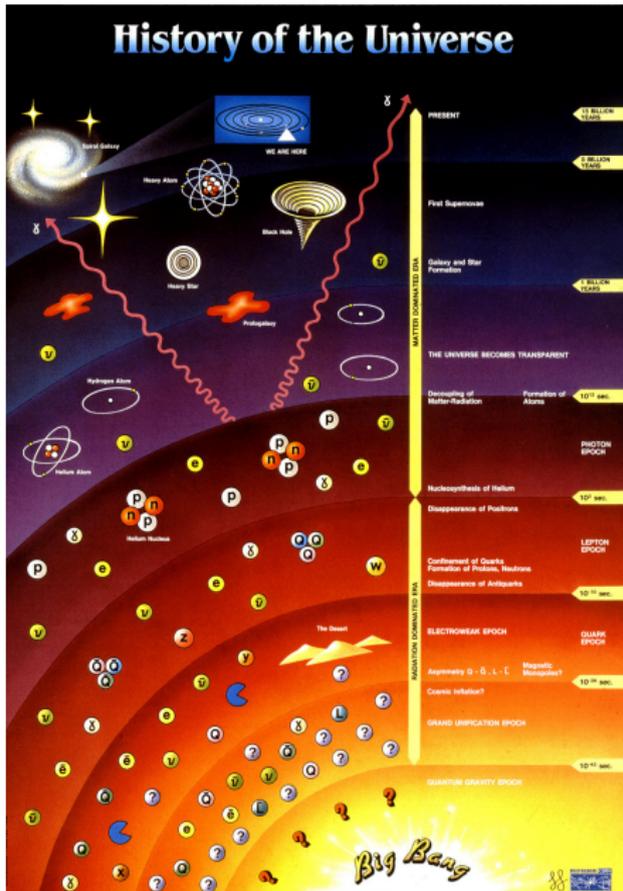
Elektroschwache Epoche:
($10^{-10}s$: $10^2 - 10^3\text{GeV}$)

- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung
- ▶ Freie quarks
- ▶ Higgsmechanismus? SUSY? LHC!

Warum Higgs und SUSY?

- ▶ Higgs gibt Masse
- ▶ Higgs Teil des Standardmodells

Literatur: Leon Lederman
The God particle



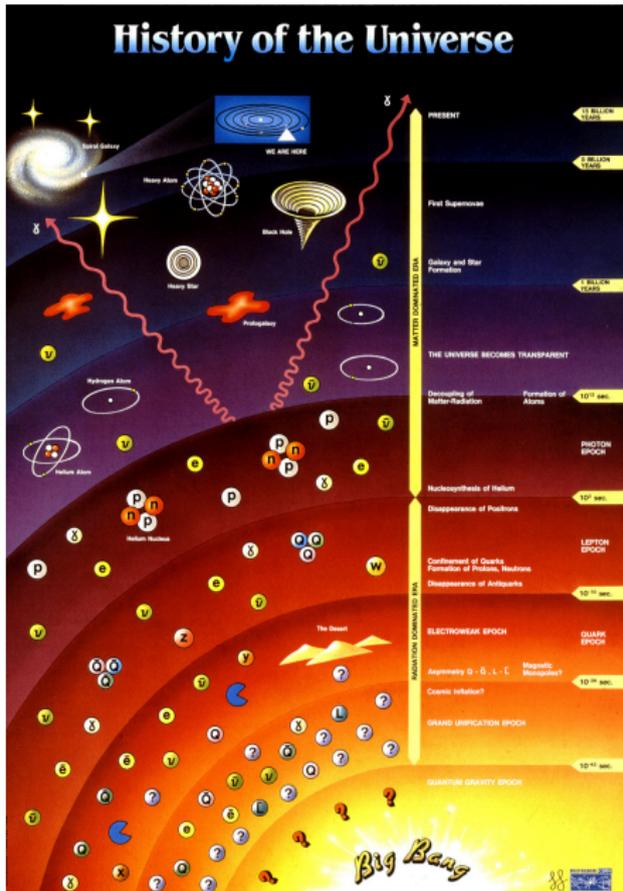
Elektroschwache Epoche:
($10^{-10}s$: $10^2 - 10^3 GeV$)

- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung
- ▶ Freie quarks
- ▶ Higgsmechanismus? SUSY? LHC!

Warum Higgs und SUSY?

- ▶ Higgs gibt Masse
- ▶ Higgs Teil des Standardmodells
- ▶ SUSY erlaubt GUT

Literatur: Leon Lederman
The God particle



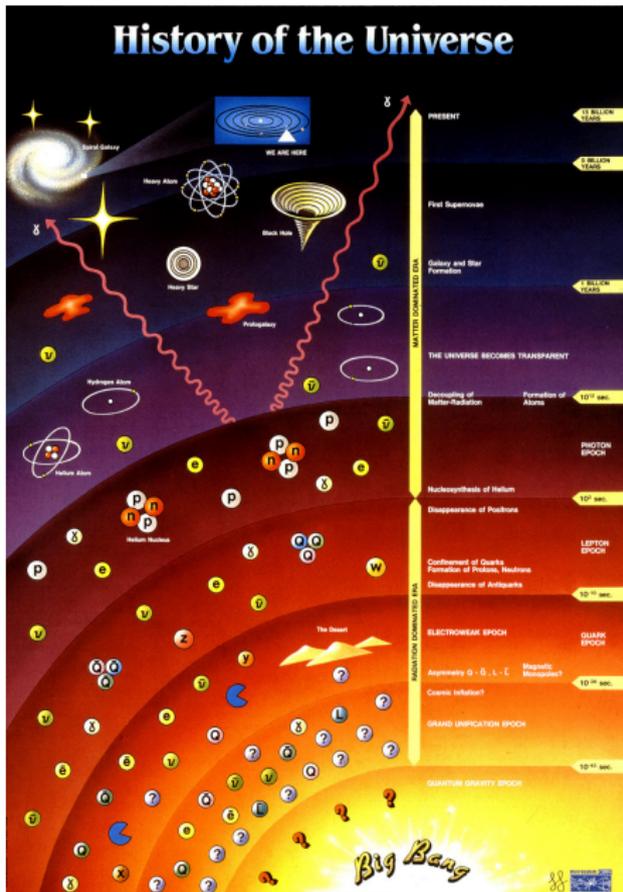
Elektroschwache Epoche:
($10^{-10} s$: $10^2 - 10^3 GeV$)

- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung
- ▶ Freie quarks
- ▶ Higgsmechanismus? SUSY? LHC!

Warum Higgs und SUSY?

- ▶ Higgs gibt Masse
- ▶ Higgs Teil des Standardmodells
- ▶ SUSY erlaubt GUT
- ▶ SUSY Teil von Stringtheorie

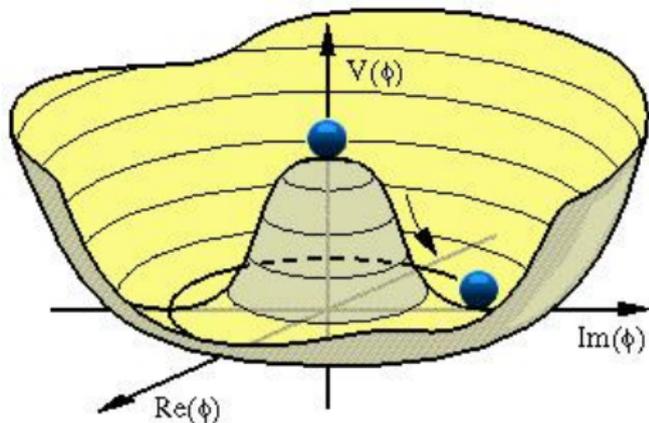
Literatur: Leon Lederman
The God particle



Elektroschwache Epoche:
($10^{-10} s$: $10^2 - 10^3 GeV$)

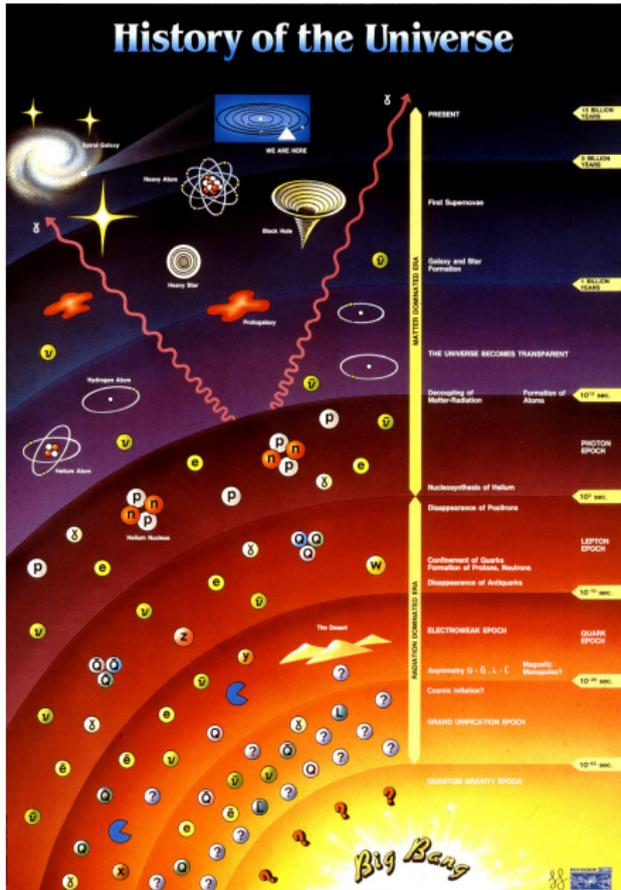
- ▶ Elektroschwache Vereinheitlichung
- ▶ Freie quarks
- ▶ Higgsmechanismus? SUSY? LHC!

Warum Higgs?

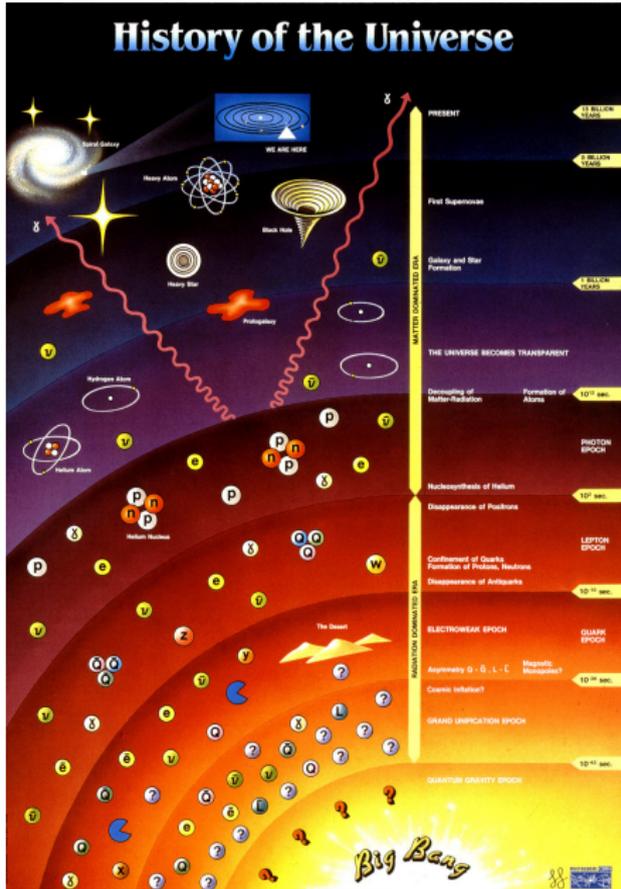


Nukleosynthese:

- ▶ 100MeV: QCD Phasenübergang (RHIC, LHC)



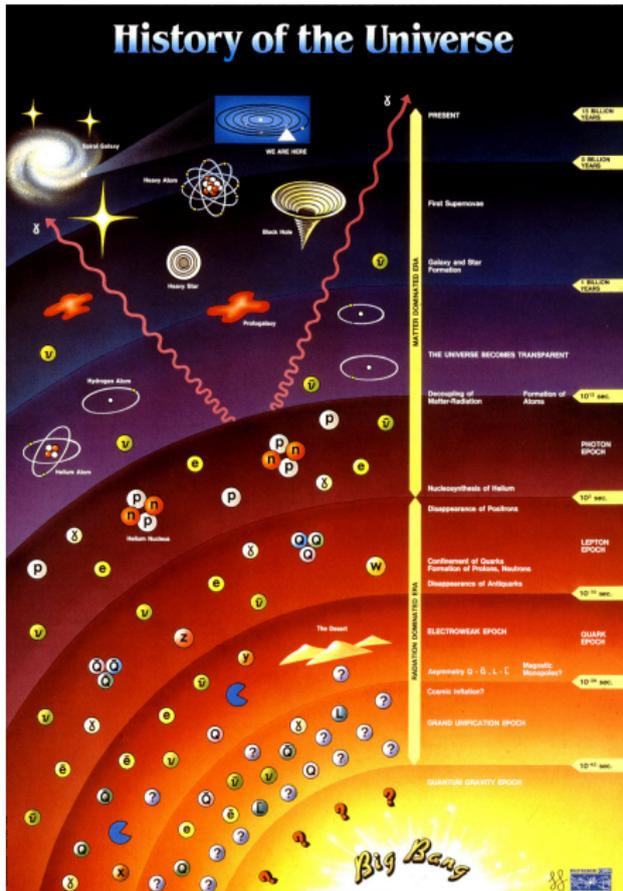
Literatur: Steven Weinberg
The first three minute



Nukleosynthese:

- ▶ 100MeV: QCD Phasenübergang (RHIC, LHC)
- ▶ 0.01s, 10MeV: n, p

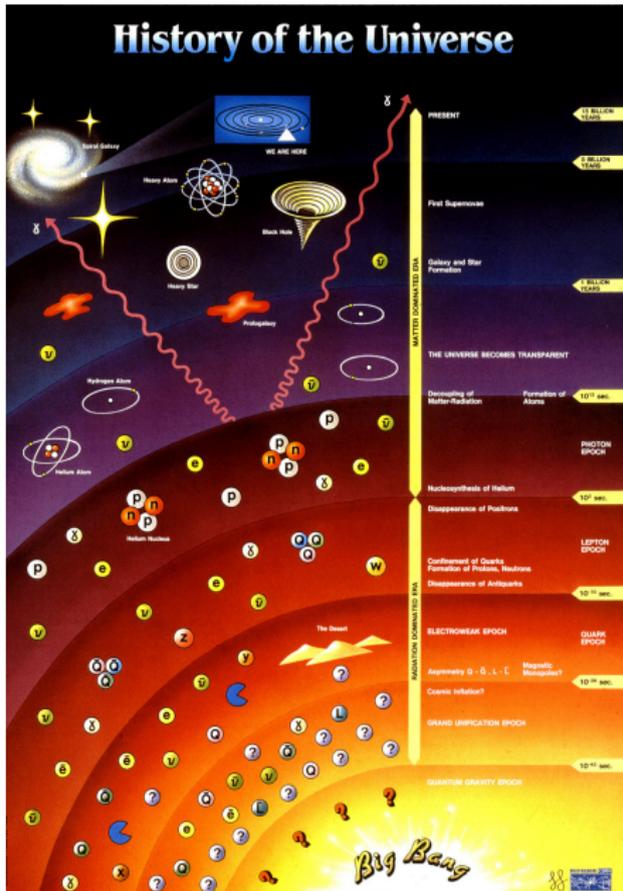
Literatur: Steven Weinberg
The first three minute



Nukleosynthese:

- ▶ 100MeV: QCD Phasenübergang (RHIC, LHC)
- ▶ 0.01s, 10MeV: n, p
- ▶ Antimaterie verschwindet (Sakharov)

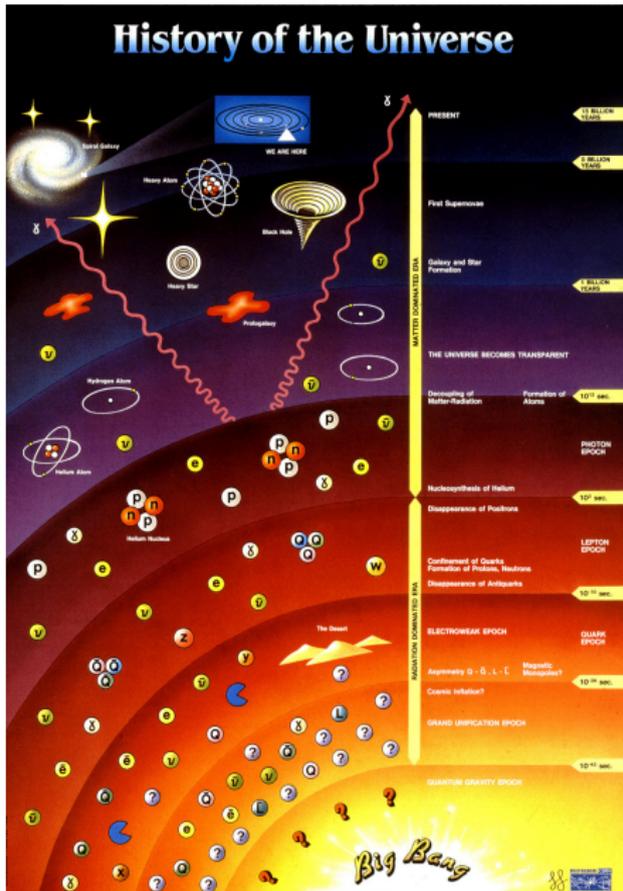
Literatur: Steven Weinberg
The first three minute



Nukleosynthese:

- ▶ 100MeV: QCD Phasenübergang (RHIC, LHC)
- ▶ 0.01s, 10MeV: n, p
- ▶ Antimaterie verschwindet (Sakharov)
- ▶ 1s, 1MeV: n instabil ($\nu!$)
- ▶ 3min, 100keV: Nukleosynthese

Literatur: Steven Weinberg
The first three minute

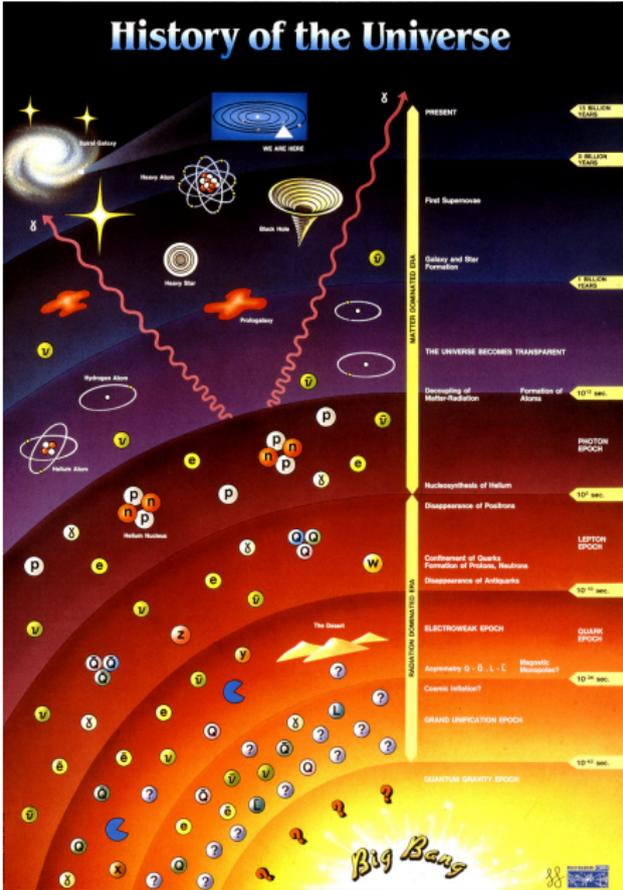


Nukleosynthese:

- ▶ 100MeV: QCD Phasenübergang (RHIC, LHC)
- ▶ 0.01s, 10MeV: n, p
- ▶ Antimaterie verschwindet (Sakharov)
- ▶ 1s, 1MeV: n instabil ($\nu!$)
- ▶ 3min, 100keV: Nukleosynthese
- ▶ 7p pro 1n: 75% H, 25% He
- ▶ Spuren von D, Li, Be, ...

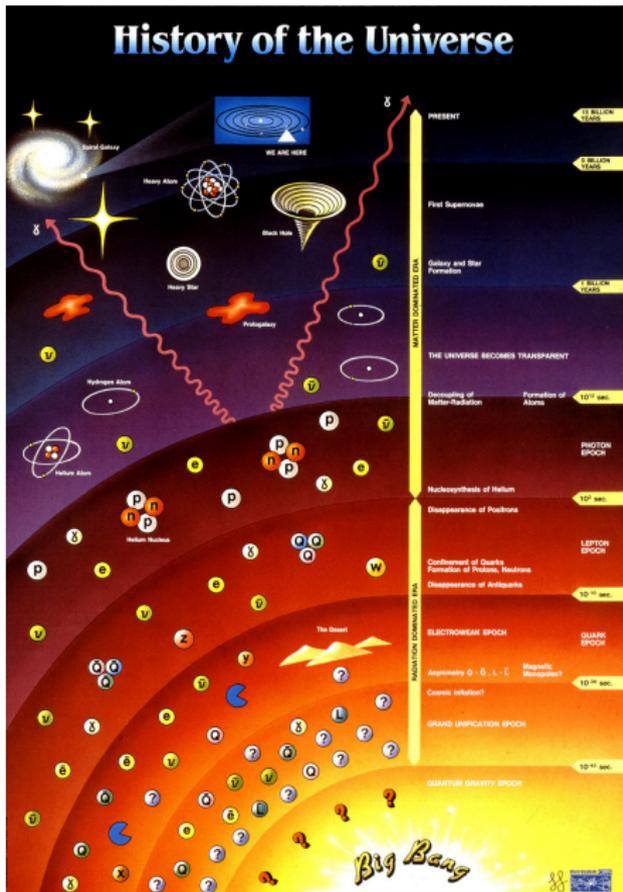
Literatur: Steven Weinberg
The first three minute

CMB:

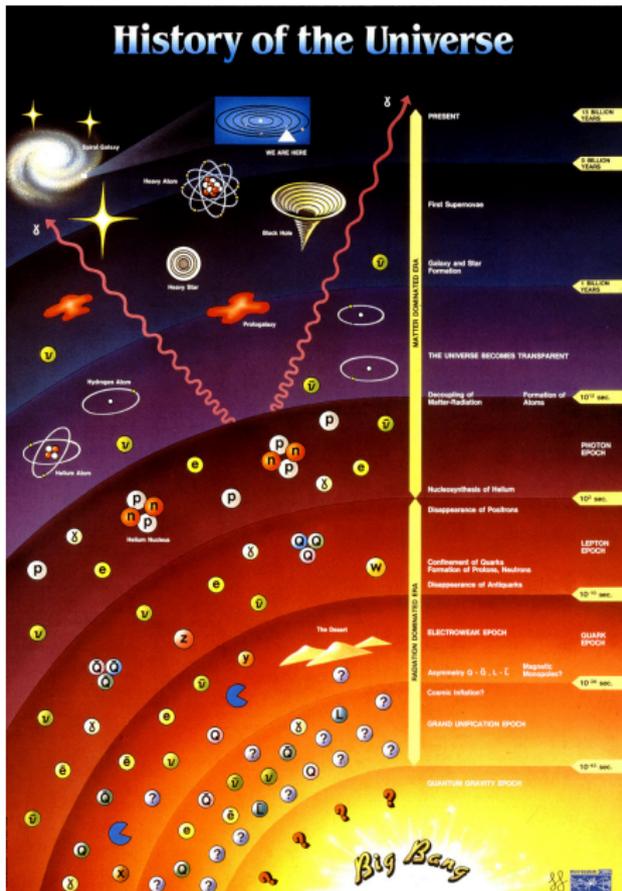


CMB:

- ▶ 380.000 Jahre: $6000K \approx 1eV$:
Atome

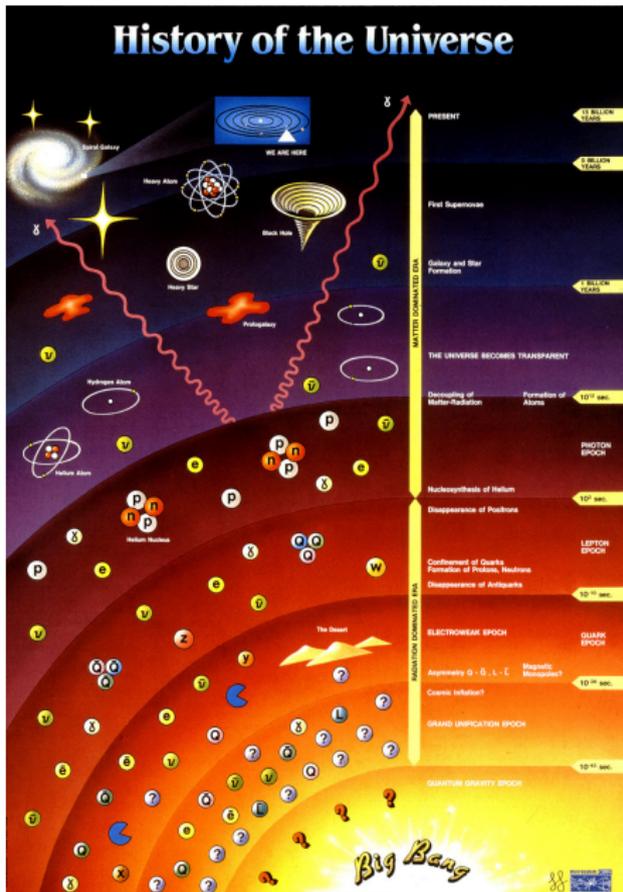


CMB:

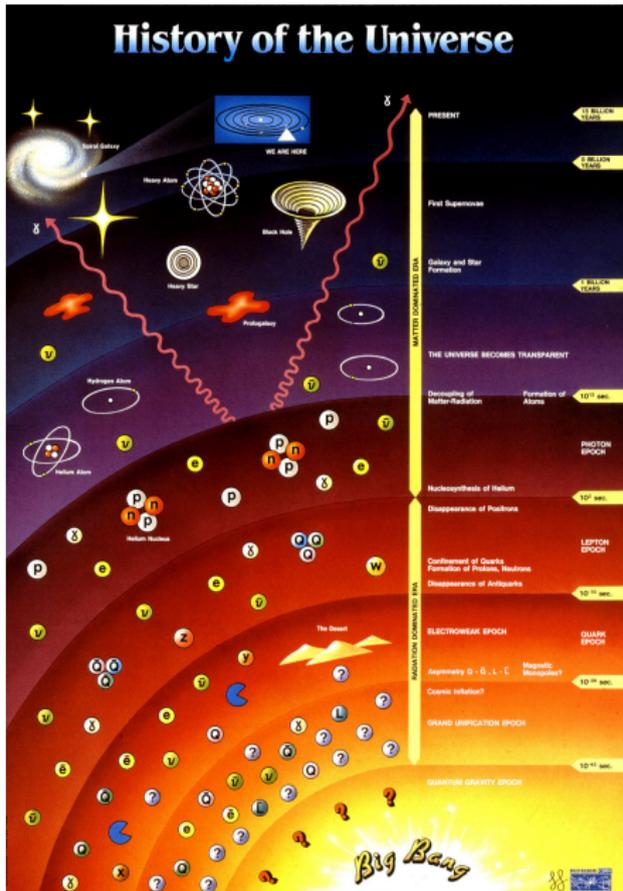


- ▶ 380.000 Jahre: $6000K \approx 1eV$:
Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!

CMB:



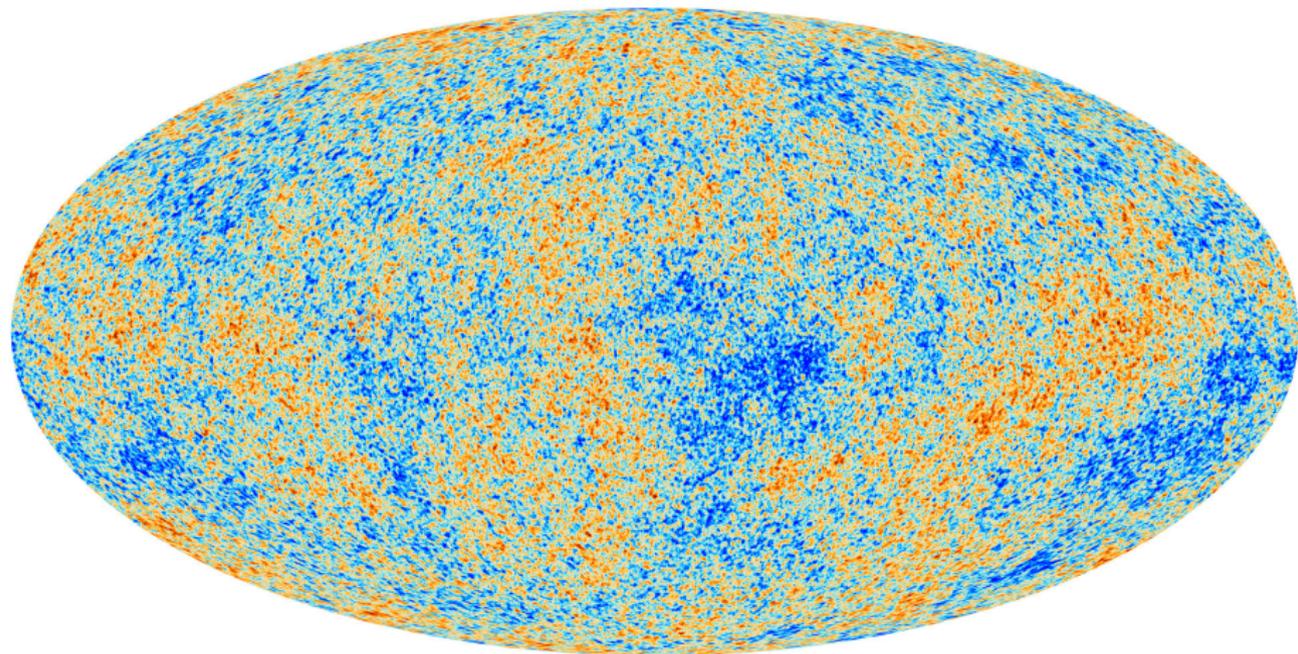
- ▶ 380.000 Jahre: $6000K \approx 1eV$:
Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!
- ▶ Universum transparent für
Photonen



- ▶ 380.000 Jahre: $6000K \approx 1eV$:
Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!
- ▶ Universum transparent für
Photonen
- ▶ Fluktuationen: "Echo" des
Urknalls!

Aktuelleste Daten: PLANCK Satellit (ESA, 2009–2013)

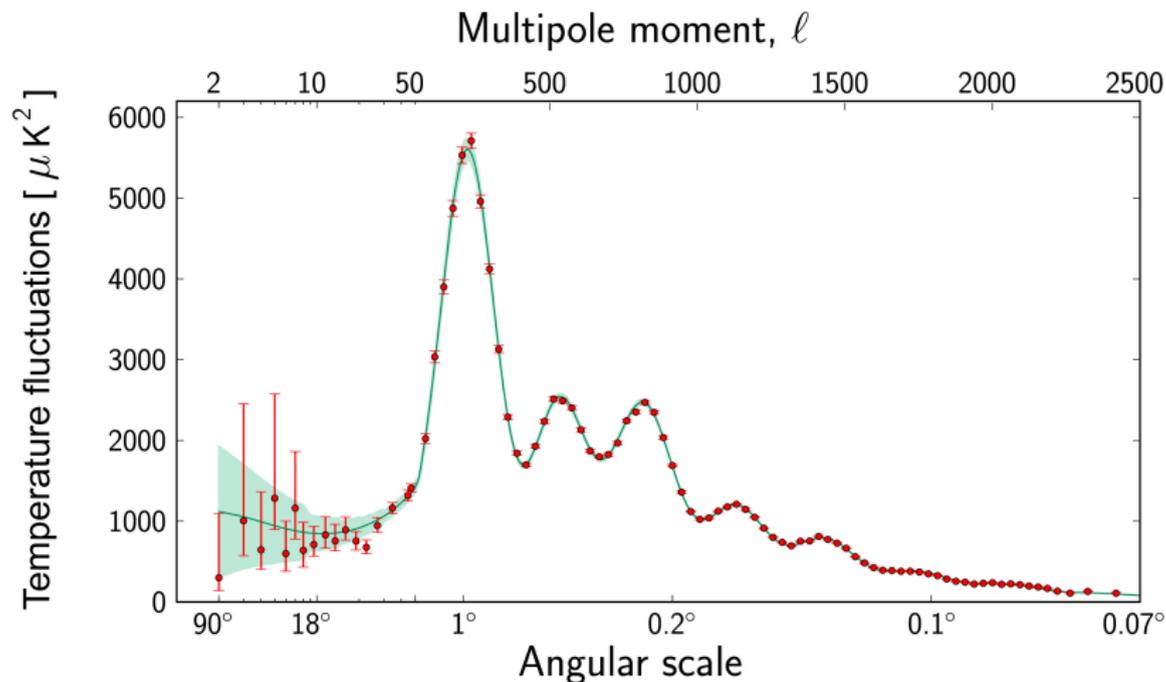
Dargestellt sind wieder die Temperaturfluktuationen des kosmischen
Mikrowellenhintergrundes (CMB)



Rot = überdurchschnittlich warm ($T = 2.727$ Kelvin)

Blau = unterdurchschnittlich kalt ($T = 2.723$ Kelvin)

Power spectrum (= Zerlegung der PLANCK-Daten in sog. Multipolmomente)



Mit “freiem Auge” sichtbar: Kurve hat sehr viel Struktur!

Nicht trivial eine Theorie zu finden die diese Kurve präzise erklärt!

Max Tegmarks webpage: [Animation bei Änderung kosmologischer Parameter](#)

Erkenntnisse aus den PLANCK-Daten

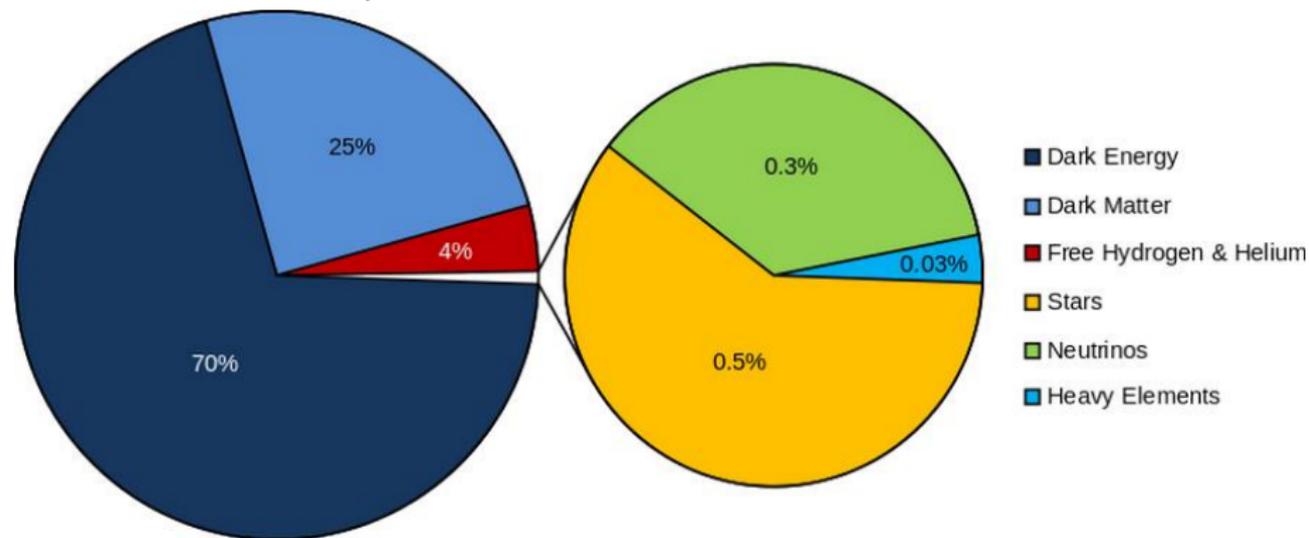
- ▶ Bestätigung des Standardmodells der Kosmologie
Universum 13,7 Milliarden Jahre alt, begann mit Urknall, hat Materie, Dunkle Materie und Dunkle Energie, ...

Erkenntnisse aus den PLANCK-Daten

- ▶ Bestätigung des Standardmodells der Kosmologie
- ▶ Konsistent mit Vorhersagen der Inflationstheorie

Erkenntnisse aus den PLANCK-Daten

- ▶ Bestätigung des Standardmodells der Kosmologie
- ▶ Konsistent mit Vorhersagen der Inflationstheorie
- ▶ Präzise Bestimmung der kosmologischen Parameter (z.B. Energiedichten von Materie, von dunkler Materie und von dunkler Energie)



Ausblick

Wie geht es weiter?

Wie geht es weiter?

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

- ▶ Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ Gravitation als Scheinkraft
- ▶ Geodäten und Autoparallele
- ▶ Riemanntensor
- ▶ Hilbertwirkung
- ▶ Einsteingleichungen
- ▶ Kosmologisches Prinzip
- ▶ Friedmangleichungen
- ▶ Expandierende Universen

Wie geht es weiter?

- II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie
- III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen
 - ▶ Standardmodell der Teilchenphysik
 - ▶ Sterne
 - ▶ Galaxien
 - ▶ Rotverschiebung
 - ▶ Kosmischer Mikrowellenhintergrund
 - ▶ Radio- und γ -Strahlen-Astronomie
 - ▶ Supernovae

Wie geht es weiter?

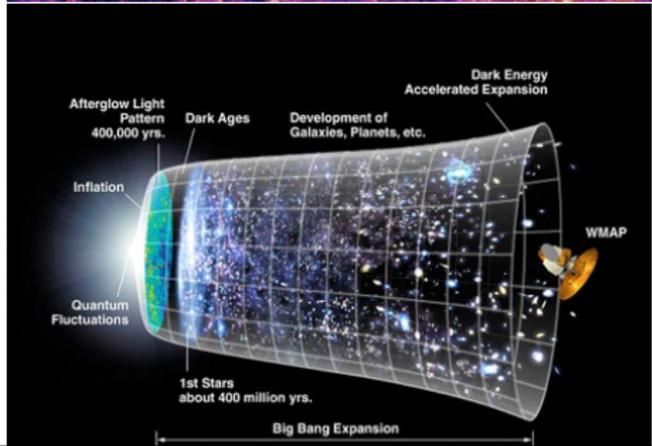
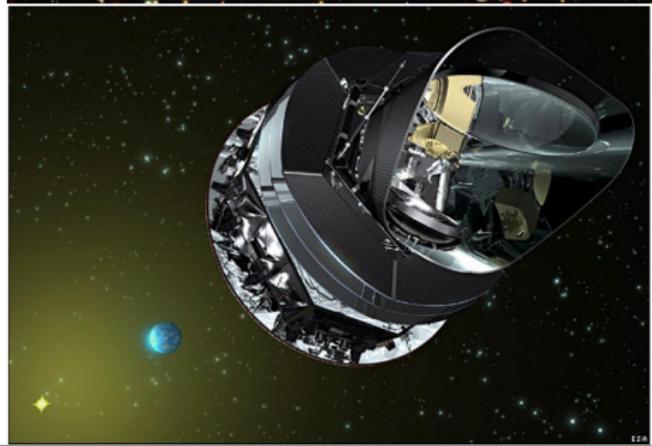
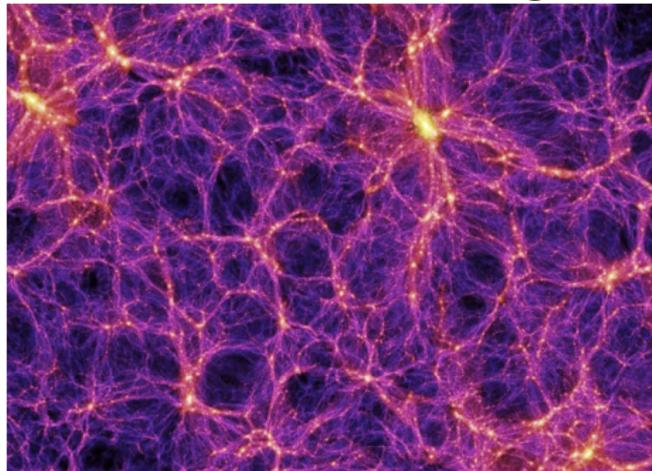
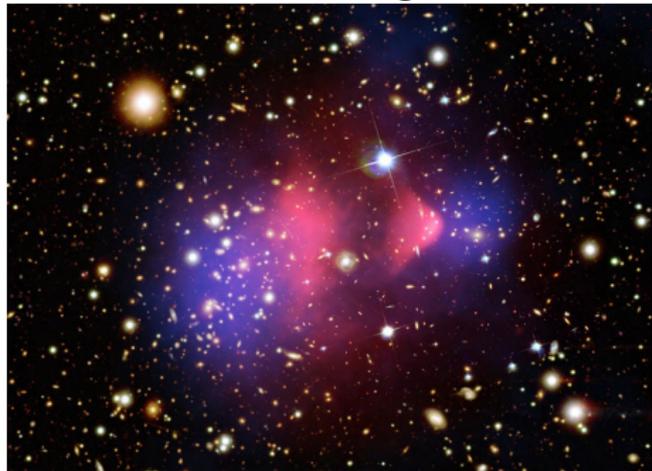
- II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie
- III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen
- IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie
 - ▶ Schwarze Löcher
 - ▶ Dunkle Materie
 - ▶ Dunkle Energie

Wie geht es weiter?

- II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie
- III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen
- IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie
- V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie
 - ▶ Das inflationäre Universum
 - ▶ Gravitationswellen
 - ▶ Zukunftsprognosen

Ich hoffe es hat Ihnen gefallen...

...noch Fragen?



Vorlesungsreihenüberblick

I. Geschichte und Überblick

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen

IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Vorlesungsreihenüberblick

I. Geschichte und Überblick

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen

IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Vorlesungsreihenüberblick

I. Geschichte und Überblick

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen

IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Vorlesungsreihenüberblick

I. Geschichte und Überblick

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen

IV. Die dunkle Seite des Universums — Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie