

Kosmologie

Teil III: Die helle Seite des Universums — Astronomische
Beobachtungen

Daniel Grumiller

Institut für Theoretische Physik
TU Wien

VHS, Planetarium Wien
Oktober 2016



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

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



Einsteingleichungen als Graffiti am Uyuni Eisenbahnfriedhof, Bolivien

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



(Falschfarben-)Bild des Hubble Teleskops

Was die Welt im Innersten zusammenhält

Was sind die fundamentalen Legosteine der Natur und wie wechselwirken sie miteinander?

Habe nun, ach! Philosophie,
Juristerei und Medizin,
Und leider auch Theologie
Durchaus studiert, mit heißem Bemühn.
Da steh ich nun, ich armer Tor!
Und bin so klug als wie zuvor;

J. W. v. Goethe : Faust

F a u s t.

Ein Fragment

von

Goethe.

Neuere Ausgabe.

Leipzig

bei Georg Joachim Göschen 1790.

Foto von Wikimedia, <http://is.gd/dUymlC>

Was die Welt im Innersten zusammenhält

Was sind die fundamentalen Legosteine der Natur und wie wechselwirken sie miteinander?

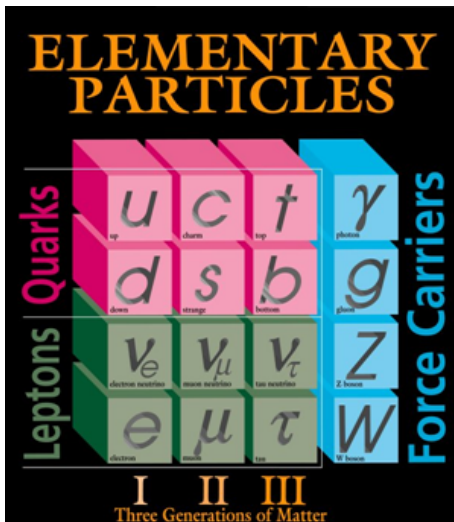
Drum hab ich mich der Magie ergeben,
Ob mir durch Geistes Kraft und Mund
Nicht manch Geheimnis werde kund,
Dass ich nicht mehr mit saurem Schweiss
Rede von dem, was ich nicht weiss,
***Dass ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,
Schau alle Wirkungskraft und Samen***
Und tu nicht mehr in Worten kramen.

Faust

Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

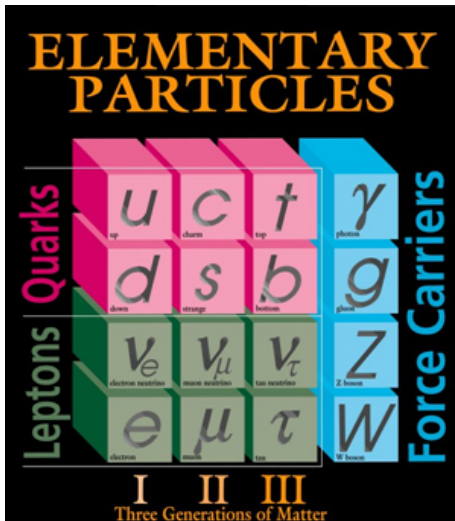
- ▶ Drei leichte Generationen



Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

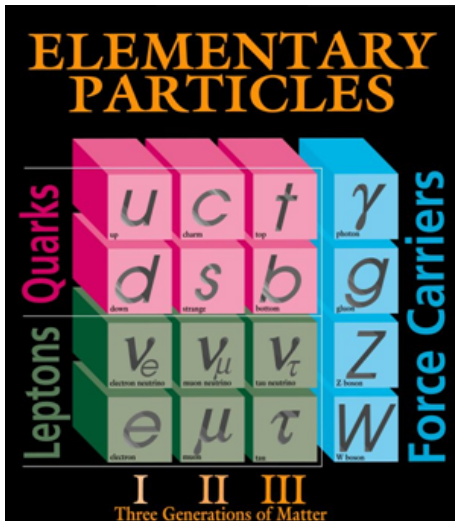
- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks



Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

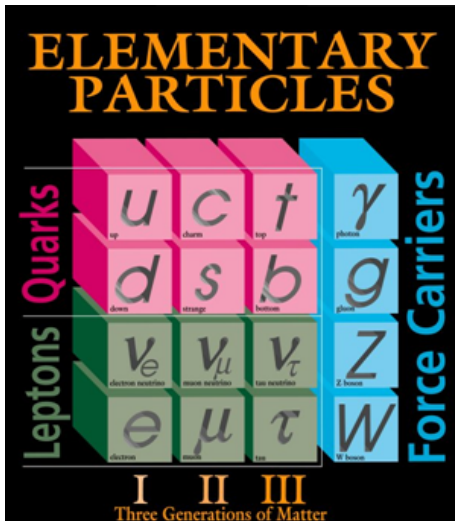
- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen



Periodensystem der Elementarteilchen

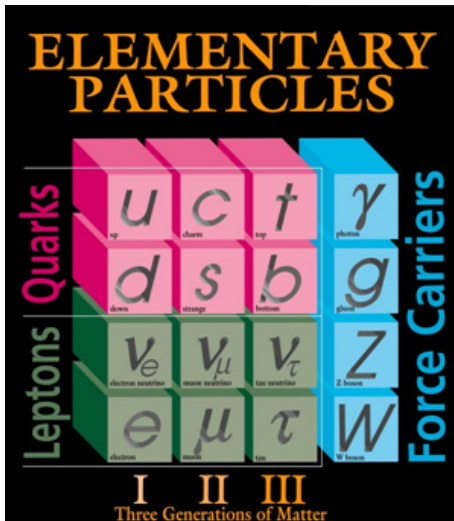
Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen



Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:



- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!

Periodensystem der Elementarteilchen

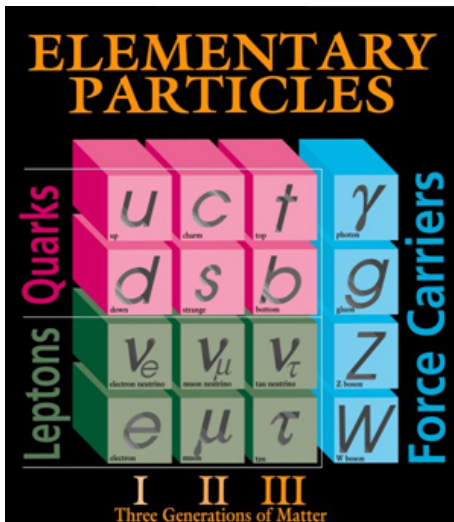
Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

ELEMENTARY PARTICLES			
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
			Force Carriers
			γ photon
			g gluon
			Z Z boson
			W W boson
I II III			
Three Generations of Matter			

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen

Periodensystem der Elementarteilchen

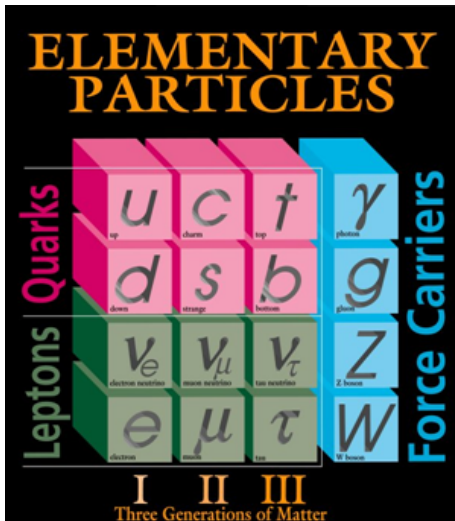
Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:



- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon γ

Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:



- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon γ
- ▶ Schwache Kraft: Vektorbosonen W^{\pm}, Z

Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

ELEMENTARY PARTICLES				
	I	II	III	
Quarks	u up	c charm	t top	Force Carriers
	d down	s strange	b bottom	
Leptons	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	Z Z boson
	e electron	μ muon	τ tau	W W boson
				I II III
				Three Generations of Matter

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon γ
- ▶ Schwache Kraft: Vektorbosonen W^{\pm}, Z
- ▶ Starke Kraft: Gluonen g

Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

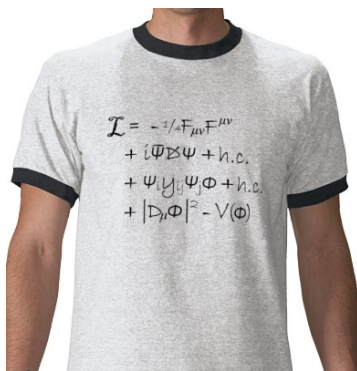
	I	II	III	
Quarks	u up	c charm	t top	Force Carriers
	d down	s strange	b bottom	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	
	e electron	μ muon	τ tau	
			γ photon	
			g gluon	
			Z Z boson	
			W W boson	

I II III
Three Generations of Matter

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon γ
- ▶ Schwache Kraft: Vektorbosonen W^\pm, Z
- ▶ Starke Kraft: Gluonen g
- ▶ Das ist alles! (naja, fast...)

Standard Model der Teilchenphysik

Eine Theorie von (fast) allem: ▶ Alle Experimente bisher im Einklang mit SM!

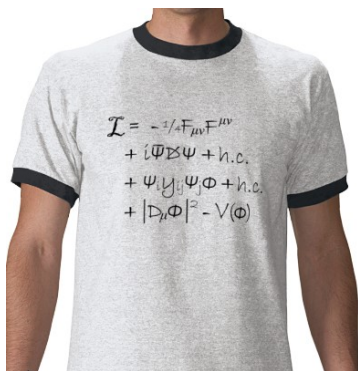


Standard Model (SM) Lagrange density

$F_{\mu\nu}$: bosons, Ψ : fermions, Φ : Higgs

Standard Model der Teilchenphysik

Eine Theorie von (fast) allem:



- ▶ Alle Experimente bisher im Einklang mit SM!
- ▶ Unglaublich präzise
z.B. gyromagnetischer Faktor
Experiment (2008):

$$\frac{g_e^{\text{exp}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.00000000000028$$

Theorie (2012):

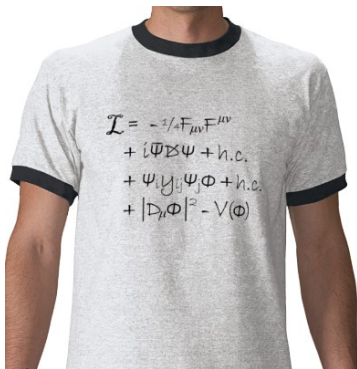
$$\frac{g_e^{\text{the}}}{2} = 1.00115965218178 \pm 0.00000000000077$$

Standard Model (SM) Lagrange density

$F_{\mu\nu}$: bosons, Ψ : fermions, Φ :
Higgs

Standard Model der Teilchenphysik

Eine Theorie von (fast) allem:



Standard Model (SM) Lagrange density

$F_{\mu\nu}$: bosons, Ψ : fermions, Φ : Higgs

- ▶ Alle Experimente bisher im Einklang mit SM!
- ▶ Unglaublich präzise z.B. gyromagnetischer Faktor Experiment (2008):

$$\frac{g_e^{\text{exp}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.00000000000028$$

Theorie (2012):

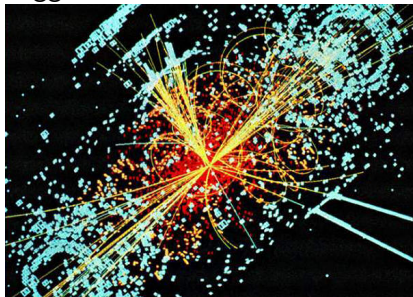
$$\frac{g_e^{\text{the}}}{2} = 1.00115965218178 \pm 0.00000000000077$$

- ▶ SM derzeit verbessert am LHC



Keine Fehlenden Einträge in dem “Periodensystem” seit 2016

Higgs!

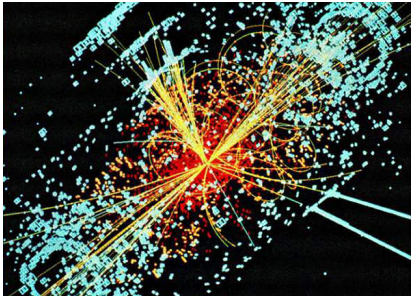


~~LHC wird es dieses Jahrzehnt~~
finden hat es entdeckt im Juli
2012!

$$m_H \sim 126 \text{ GeV}$$

Keine Fehlenden Einträge in dem "Periodensystem" seit 2016

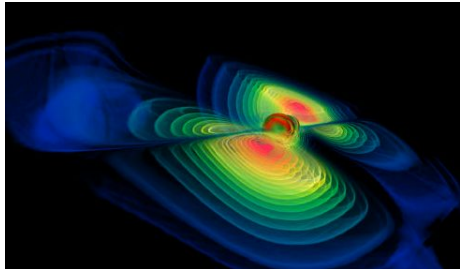
Higgs!



~~LHC wird es dieses Jahrzehnt~~
finden hat es entdeckt im Juli
2012!

$$m_H \sim 126 \text{ GeV}$$

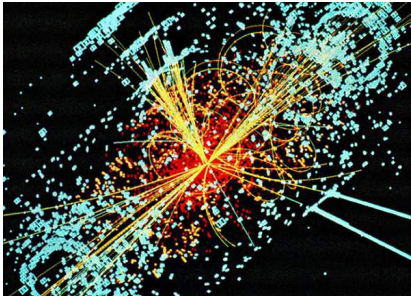
Gemäss ART:



Gravitonen (Gravitationswellen)
~~LIGO findet sie diese Dekade~~ hat
sie entdeckt im Februar 2016!

Keine Fehlenden Einträge in dem "Periodensystem" seit 2016

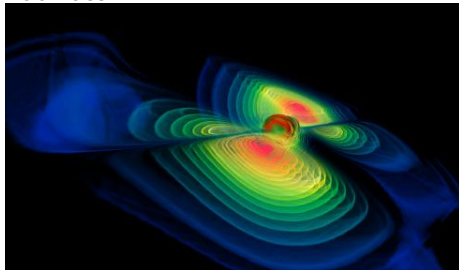
Higgs!



~~LHC wird es dieses Jahrzehnt~~
~~finden~~ hat es entdeckt im Juli
2012!

$$m_H \sim 126 GeV$$

Gemäss ART:



Gravitonen (Gravitationswellen)
~~LIGO findet sie diese Dekade~~ hat
sie entdeckt im Februar 2016!

Weitere Teilchen jenseits des SM?
Inflaton?, SUSY?, Axionen?, Dunkle
Spinoren?, Kaluza-Kleins?, ...

**LHC und Astro/Astroteilchen-
-physik könnten Hinweise finden!**

- ▶ Wir kennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen (bei hinreichen niedrigen Energien sind das alle die es gibt)

Standardmodell und Kosmologie

- ▶ Wir kennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen (bei hinreichen niedrigen Energien sind das alle die es gibt)
- ▶ Drei davon werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben

Standardmodell und Kosmologie

- ▶ Wir kennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen (bei hinreichen niedrigen Energien sind das alle die es gibt)
- ▶ Drei davon werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben
- ▶ Die vierte ist Gravitation und wird durch die ART beschrieben

Standardmodell und Kosmologie

- ▶ Wir kennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen (bei hinreichen niedrigen Energien sind das alle die es gibt)
- ▶ Drei davon werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben
- ▶ Die vierte ist Gravitation und wird durch die ART beschrieben
- ▶ Wir kennen alle fundamentalen Bausteine der hellen Seite des Universums (also alles bis auf Dunkle Materie)

- ▶ Wir kennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen (bei hinreichen niedrigen Energien sind das alle die es gibt)
- ▶ Drei davon werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben
- ▶ Die vierte ist Gravitation und wird durch die ART beschrieben
- ▶ Wir kennen alle fundamentalen Bausteine der hellen Seite des Universums (also alles bis auf Dunkle Materie)
- ▶ Dabei handelt es sich um die Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik

- ▶ Wir kennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen (bei hinreichen niedrigen Energien sind das alle die es gibt)
- ▶ Drei davon werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben
- ▶ Die vierte ist Gravitation und wird durch die ART beschrieben
- ▶ Wir kennen alle fundamentalen Bausteine der hellen Seite des Universums (also alles bis auf Dunkle Materie)
- ▶ Dabei handelt es sich um die Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik
- ▶ Verwenden nun dieses Wissen um sichtbare Objekte im Universum zu beschreiben: Sterne, Galaxien, kosmischer Mikrowellenhintergrund, Supernovae, ...

Standardmodell und Kosmologie

- ▶ Wir kennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen (bei hinreichen niedrigen Energien sind das alle die es gibt)
- ▶ Drei davon werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben
- ▶ Die vierte ist Gravitation und wird durch die ART beschrieben
- ▶ Wir kennen alle fundamentalen Bausteine der hellen Seite des Universums (also alles bis auf Dunkle Materie)
- ▶ Dabei handelt es sich um die Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik
- ▶ Verwenden nun dieses Wissen um sichtbare Objekte im Universum zu beschreiben: Sterne, Galaxien, kosmischer Mikrowellenhintergrund, Supernovae, ...

Bis 2015 war Licht (in allen Frequenzen) das einzige Mittel mit dem man experimentelle Kosmologie betreiben konnte!

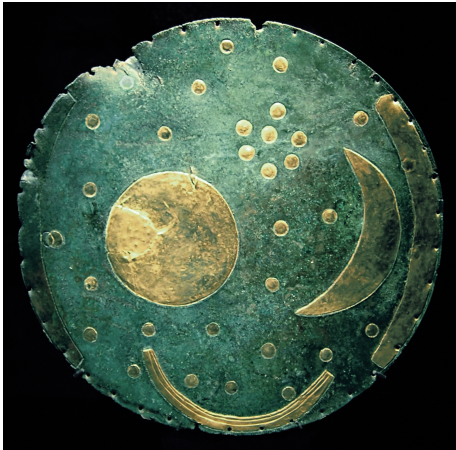


Sternenhimmel über Chile

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Himmelscheibe von Nebra:



- ▶ Sterne bedeutungsvoll in allen Zivilisationen



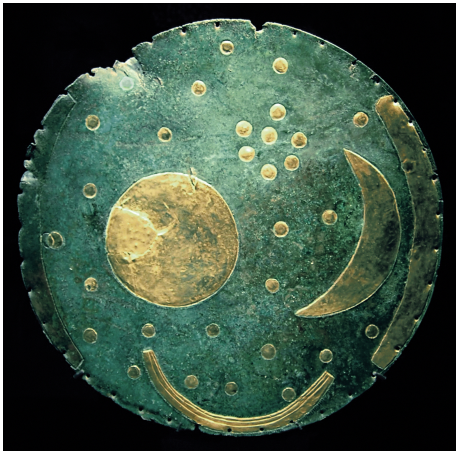
Interpretation + Geschichte: siehe

https://de.wikipedia.org/wiki/Himmelscheibe_von_Nebra

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Himmelscheibe von Nebra:



- ▶ Sterne bedeutungsvoll in allen Zivilisationen
- ▶ Religion, Mystizismus, Aberglaube



Interpretation + Geschichte: siehe

https://de.wikipedia.org/wiki/Himmelscheibe_von_Nebra

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Himmelscheibe von Nebra:



- ▶ Sterne bedeutungsvoll in allen Zivilisationen
- ▶ Religion, Mystizismus, Aberglaube
- ▶ Energiequelle, Zeitmessung, Navigation



Interpretation + Geschichte: siehe

https://de.wikipedia.org/wiki/Himmelscheibe_von_Nebra

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Himmelscheibe von Nebra:



- ▶ Sterne bedeutungsvoll in allen Zivilisationen
- ▶ Religion, Mystizismus, Aberglaube
- ▶ Energiequelle, Zeitmessung, Navigation
- ▶ Klima, Sonnenwinde, Weltraumwetter



Interpretation + Geschichte: siehe

https://de.wikipedia.org/wiki/Himmelscheibe_von_Nebra

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Himmelscheibe von Nebra:



- ▶ Sterne bedeutungsvoll in allen Zivilisationen
- ▶ Religion, Mystizismus, Aberglaube
- ▶ Energiequelle, Zeitmessung, Navigation
- ▶ Klima, Sonnenwinde, Weltraumwetter
- ▶ Suche nach erdähnlichen Planeten um sonnenähnliche Sterne, langfristiges Überleben der Zivilisation

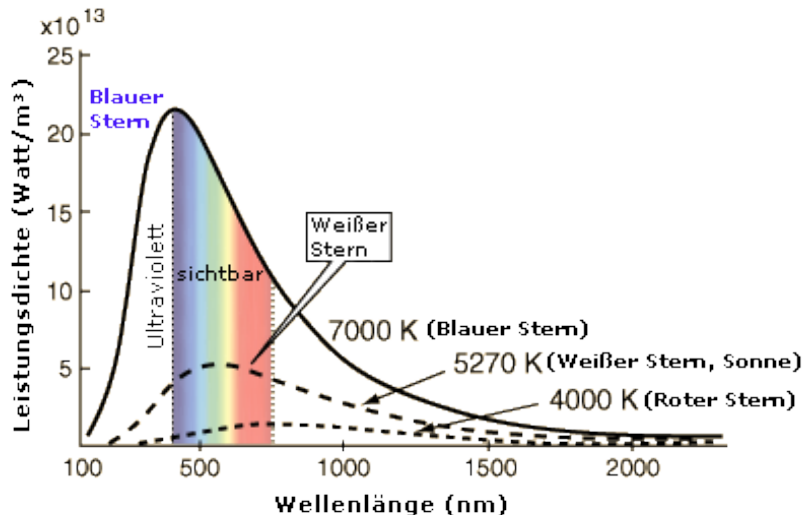
Interpretation + Geschichte: siehe

https://de.wikipedia.org/wiki/Himmelscheibe_von_Nebra

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Spektrum von Sternen abhängig von Oberflächentemperatur:

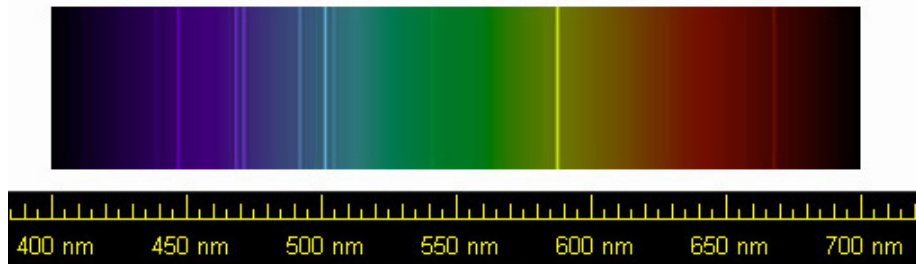


Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Wenn man genauer hinsieht:

Spektrallinien geben Aufschluss über chemische Zusammensetzung



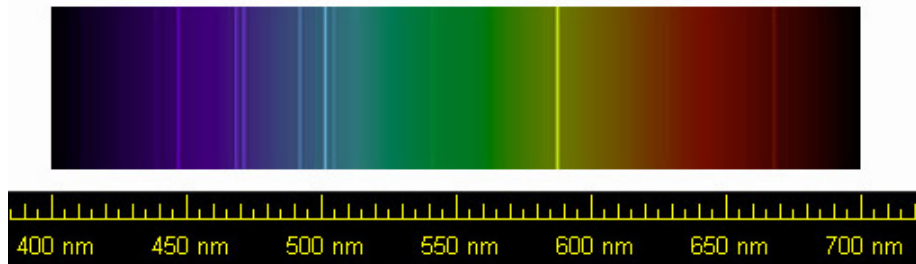
- ▶ Chemisches Element Helium wurde auf diese Art 1868 entdeckt!

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Wenn man genauer hinsieht:

Spektrallinien geben Aufschluss über chemische Zusammensetzung



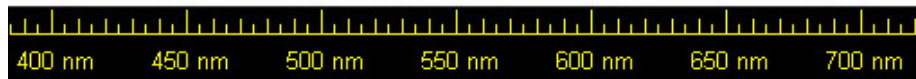
- ▶ Chemisches Element Helium wurde auf diese Art 1868 entdeckt!
- ▶ Erst danach auf Erde entdeckt (1882 im Vesuv)

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Wenn man genauer hinsieht:

Spektrallinien geben Aufschluss über chemische Zusammensetzung



- ▶ Chemisches Element Helium wurde auf diese Art 1868 entdeckt!
- ▶ Erst danach auf Erde entdeckt (1882 im Vesuv)
- ▶ aussergewöhnliche physikalische Eigenschaften: niedriger Siedepunkt, niedrige Dichte, geringe Lösbarkeit, hohe thermische Leitfähigkeit, ...

Sterne

Die offensichtlichsten Lichtquellen im Universum

Wenn man genauer hinsieht:

Spektrallinien geben Aufschluss über chemische Zusammensetzung



- ▶ Chemisches Element Helium wurde auf diese Art 1868 entdeckt!
- ▶ Erst danach auf Erde entdeckt (1882 im Vesuv)
- ▶ aussergewöhnliche physikalische Eigenschaften: niedriger Siedepunkt, niedrige Dichte, geringe Lösbarkeit, hohe thermische Leitfähigkeit, ...
- ▶ Zahlreiche Anwendungen: Kühlung, Lichtbogenschweissen, Schutzgas, Ultraschallwindtunnel, Leckdetektion, Flug, ...

Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

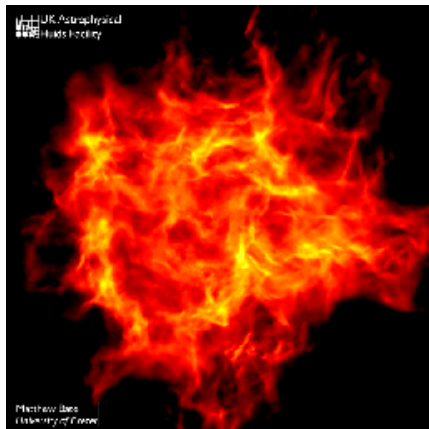
- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte



Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)

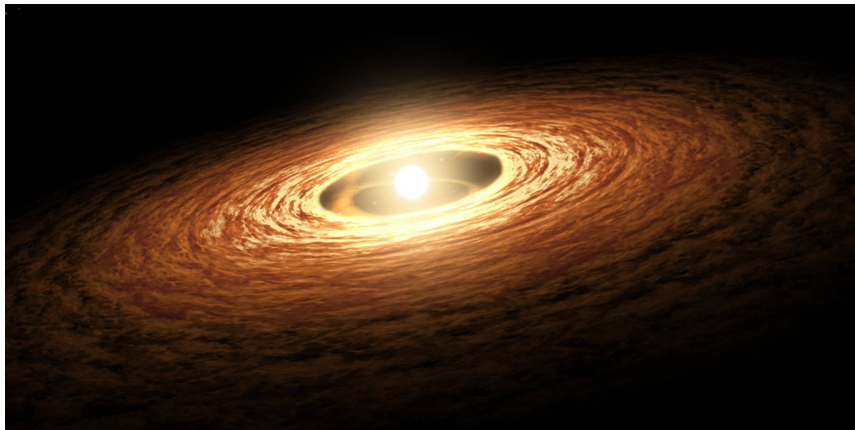


Matthew R. Bate, Ian A. Bonnell, and Volker Bromm, U. of Leicester, <http://www.ukaff.ac.uk/starcluster/>

Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

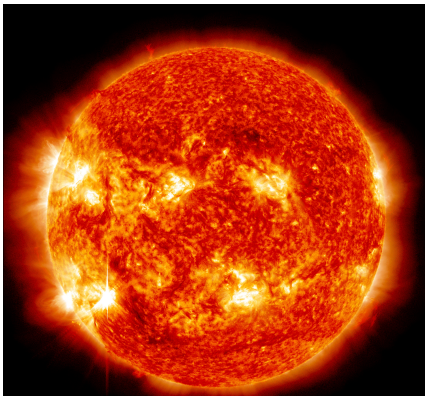
- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)
- ▶ Kompaktes, dichtes Objekt aus Wasserstoff entsteht (Stern)



Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

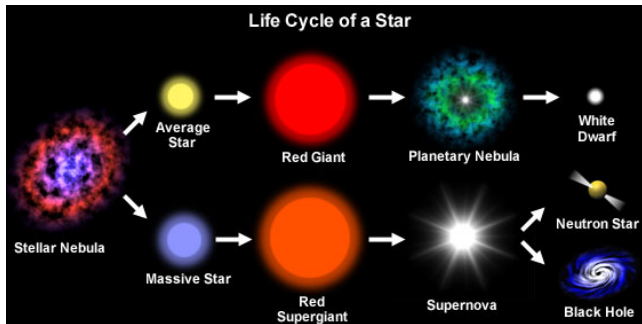
- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)
- ▶ Kompaktes, dichtes Objekt aus Wasserstoff entsteht (Stern)
- ▶ Wasserstoff fusioniert zu Helium (Gegendruck gegen weiteren Kollaps!); Stern leuchtet



Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

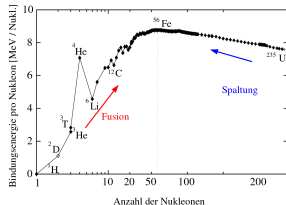
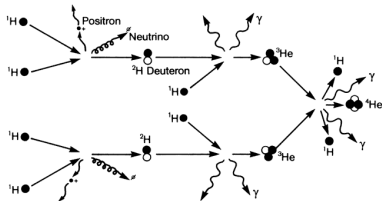
- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)
- ▶ Kompaktes, dichtes Objekt aus Wasserstoff entsteht (Stern)
- ▶ Wasserstoff fusioniert zu Helium (Gegendruck gegen weiteren Kollaps!); Stern leuchtet
- ▶ Lebensdauer: je massiver umso kürzer (100.000 – 1000 Milliarden Jahre: Vergleich: Alter des Universums: 13,8 Milliarden Jahre)



Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)
- ▶ Kompaktes, dichtes Objekt aus Wasserstoff entsteht (Stern)
- ▶ Wasserstoff fusioniert zu Helium (Gegendruck gegen weiteren Kollaps!); Stern leuchtet
- ▶ Lebensdauer: je massiver umso kürzer (100.000 – 1000 Milliarden Jahre: Vergleich: Alter des Universums: 13,8 Milliarden Jahre)
- ▶ Wenn Wasserstoff verbraucht: Helium verbrennt zu schwereren Elementen und diese zu noch schwereren, bis irgendwann Fusion stoppt (mit Eisen = "Sternasche"); Anwendung von $E = mc^2$!



Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)
- ▶ Kompaktes, dichtes Objekt aus Wasserstoff entsteht (Stern)
- ▶ Wasserstoff fusioniert zu Helium (Gegendruck gegen weiteren Kollaps!); Stern leuchtet
- ▶ Lebensdauer: je massiver umso kürzer (100.000 – 1000 Milliarden Jahre: Vergleich: Alter des Universums: 13,8 Milliarden Jahre)
- ▶ Wenn Wasserstoff verbraucht: Helium verbrennt zu schwereren Elementen und diese zu noch schwereren, bis irgendwann Fusion stoppt (mit Eisen = “Sternasche”); Anwendung von $E = mc^2$!
- ▶ Danach: Gravitationskollaps zu kompaktem Objekt

Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)
- ▶ Kompaktes, dichtes Objekt aus Wasserstoff entsteht (Stern)
- ▶ Wasserstoff fusioniert zu Helium (Gegendruck gegen weiteren Kollaps!); Stern leuchtet
- ▶ Lebensdauer: je massiver umso kürzer (100.000 – 1000 Milliarden Jahre: Vergleich: Alter des Universums: 13,8 Milliarden Jahre)
- ▶ Wenn Wasserstoff verbraucht: Helium verbrennt zu schwereren Elementen und diese zu noch schwereren, bis irgendwann Fusion stoppt (mit Eisen = “Sternasche”); Anwendung von $E = mc^2$!
- ▶ Danach: Gravitationskollaps zu kompaktem Objekt
- ▶ bis ca. $3M_{\odot}$: weisser Zwerg als Endzustand

Lebenszyklus eines Sterns

Ausführlicher: siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>

- ▶ Geburtsort: Wasserstoffgaswolke mit überdurchschnittlicher Dichte
- ▶ Gravitation verstärkt Über- und Unterdichten (Gravitationskollaps)
- ▶ Kompaktes, dichtes Objekt aus Wasserstoff entsteht (Stern)
- ▶ Wasserstoff fusioniert zu Helium (Gegendruck gegen weiteren Kollaps!); Stern leuchtet
- ▶ Lebensdauer: je massiver umso kürzer (100.000 – 1000 Milliarden Jahre: Vergleich: Alter des Universums: 13,8 Milliarden Jahre)
- ▶ Wenn Wasserstoff verbraucht: Helium verbrennt zu schwereren Elementen und diese zu noch schwereren, bis irgendwann Fusion stoppt (mit Eisen = “Sternasche”); Anwendung von $E = mc^2$!
- ▶ Danach: Gravitationskollaps zu kompaktem Objekt
- ▶ bis ca. $3M_{\odot}$: weisser Zwerg als Endzustand
- ▶ $> M_{\odot}$: Supernova und weiterer Kollaps möglich zu kompaktem Objekt wie Neutronenstern oder Schwarzes Loch)



YOU ARE HERE

Milchstrasse und unser Platz darin

- ▶ Demokrit (ca. -400): Vorschlag Milchstrasse könnte aus Sternen bestehen

Galaxien

Unsere Milchstrasse

- ▶ Demokrit (ca. -400): Vorschlag Milchstrasse könnte aus Sternen bestehen
- ▶ Galilei (1610): Beobachtung von Sternen in Milchstrasse mit Teleskop

Galaxien

Unsere Milchstrasse

- ▶ Demokrit (ca. -400): Vorschlag Milchstrasse könnte aus Sternen bestehen
- ▶ Galilei (1610): Beobachtung von Sternen in Milchstrasse mit Teleskop
- ▶ Wright (1750): Spekulation das Milchstrasse rotiert und durch Gravitation zusammengehalten wird, ähnlich wie Sonnensystem (korrekt)

Galaxien

Unsere Milchstrasse

- ▶ Demokrit (ca. -400): Vorschlag Milchstrasse könnte aus Sternen bestehen
- ▶ Galilei (1610): Beobachtung von Sternen in Milchstrasse mit Teleskop
- ▶ Wright (1750): Spekulation das Milchstrasse rotiert und durch Gravitation zusammengehalten wird, ähnlich wie Sonnensystem (korrekt)
- ▶ Herschel (1785): Erste Kartographie der Milchstrasse (aber mit Sonne im Zentrum)

- ▶ Demokrit (ca. -400): Vorschlag Milchstrasse könnte aus Sternen bestehen
- ▶ Galilei (1610): Beobachtung von Sternen in Milchstrasse mit Teleskop
- ▶ Wright (1750): Spekulation das Milchstrasse rotiert und durch Gravitation zusammengehalten wird, ähnlich wie Sonnensystem (korrekt)
- ▶ Herschel (1785): Erste Kartographie der Milchstrasse (aber mit Sonne im Zentrum)
- ▶ Shapely (ca. 1920): Sonne ist nicht im Zentrum der Milchstrasse (aber "Nebel" sind Teil der Milchstrasse)

Galaxien

Unsere Milchstrasse

- ▶ Demokrit (ca. -400): Vorschlag Milchstrasse könnte aus Sternen bestehen
- ▶ Galilei (1610): Beobachtung von Sternen in Milchstrasse mit Teleskop
- ▶ Wright (1750): Spekulation das Milchstrasse rotiert und durch Gravitation zusammengehalten wird, ähnlich wie Sonnensystem (korrekt)
- ▶ Herschel (1785): Erste Kartographie der Milchstrasse (aber mit Sonne im Zentrum)
- ▶ Shapely (ca. 1920): Sonne ist nicht im Zentrum der Milchstrasse (aber "Nebel" sind Teil der Milchstrasse)
- ▶ Trumpler (1930): Heutiges Bild unserer Milchstrasse etabliert ("Nebel" sind entfernte Galaxien)

Galaxien

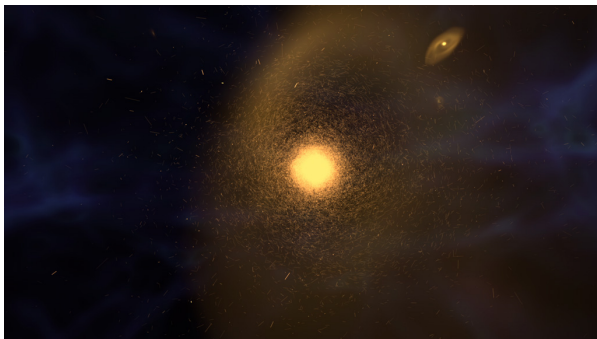
Unsere Milchstrasse

- ▶ Demokrit (ca. -400): Vorschlag Milchstrasse könnte aus Sternen bestehen
- ▶ Galilei (1610): Beobachtung von Sternen in Milchstrasse mit Teleskop
- ▶ Wright (1750): Spekulation das Milchstrasse rotiert und durch Gravitation zusammengehalten wird, ähnlich wie Sonnensystem (korrekt)
- ▶ Herschel (1785): Erste Kartographie der Milchstrasse (aber mit Sonne im Zentrum)
- ▶ Shapely (ca. 1920): Sonne ist nicht im Zentrum der Milchstrasse (aber "Nebel" sind Teil der Milchstrasse)
- ▶ Trumpler (1930): Heutiges Bild unserer Milchstrasse etabliert ("Nebel" sind entfernte Galaxien)
- ▶ Hubble Space Telescope (seit 1990er): detaillierte Kartographie unserer Milchstrasse; ca. 300 Milliarden Sterne in Milchstrasse
- ▶ Bestätigung dass Dunkle Materie in Milchstrasse nicht bloss aus zu schwach leuchtenden Sternen bestehen kann

- ▶ Unsere Erde ist nicht einzigartig, es gibt viele Planeten

- ▶ Unsere Sonne ist nicht einzigartig, es gibt viele Sterne

- ▶ Unsere Milchstrasse ist nicht einzigartig, es gibt viele Galaxien



NASA Simulation der Formierung einer Galaxie

<https://svs.gsfc.nasa.gov/11534>

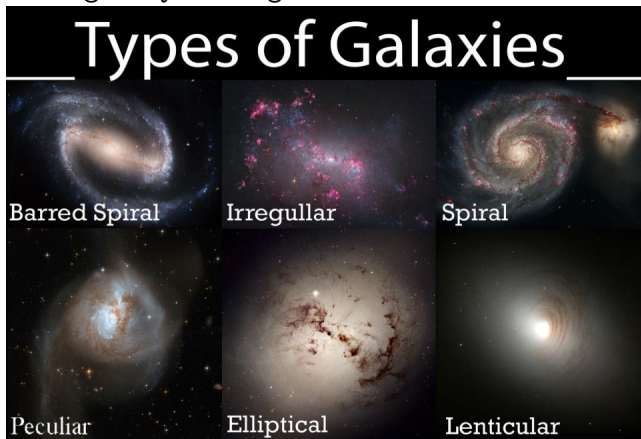
- ▶ Unser Universum ist nicht einzigartig, es gibt ein Multiversum(?)

Galaxien

Andere Galaxien

- ▶ Unsere Milchstrasse ist nicht einzigartig, es gibt viele Galaxien
- ▶ Klassifikation der Galaxien von zu Hause möglich!

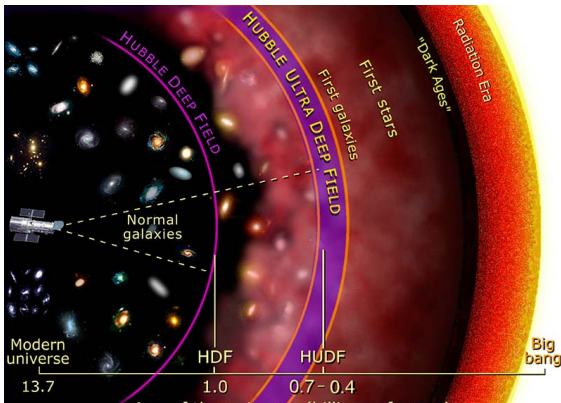
<https://www.galaxyzoo.org/>

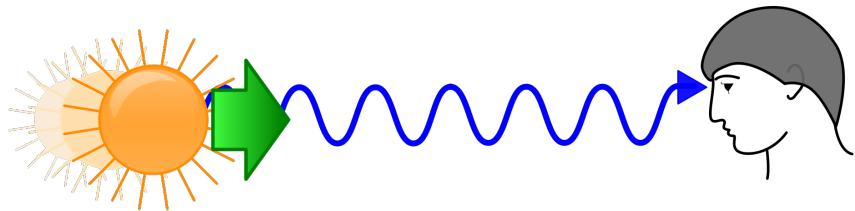
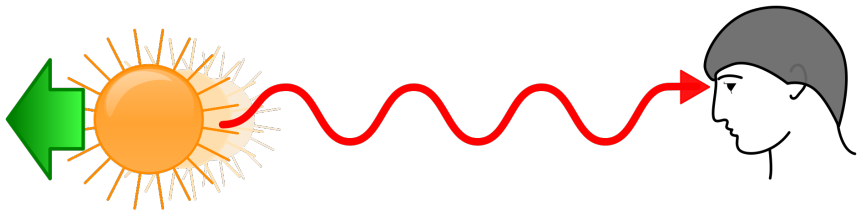


Galaxien

Andere Galaxien

- ▶ Unsere Milchstrasse ist nicht einzigartig, es gibt viele Galaxien
- ▶ Klassifikation der Galaxien von zu Hause möglich!
<https://www.galaxyzoo.org/>
- ▶ Hubble Deep Field: ca. 125 Milliarden Galaxien im Universum



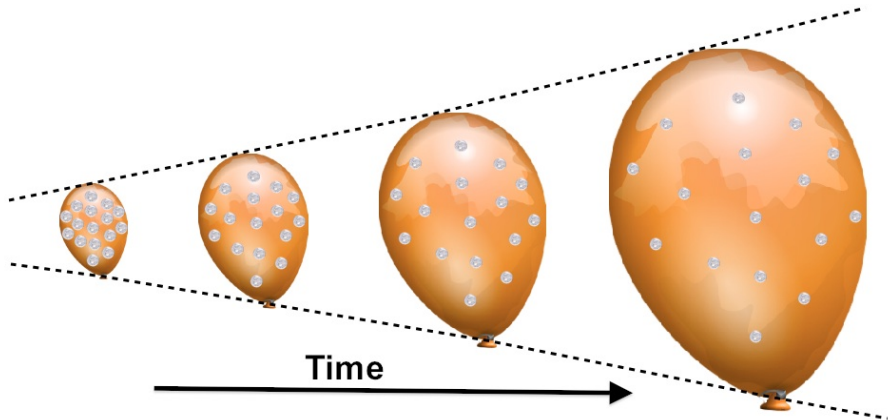


Rot- und Blauverschiebung durch Dopplereffekt

Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

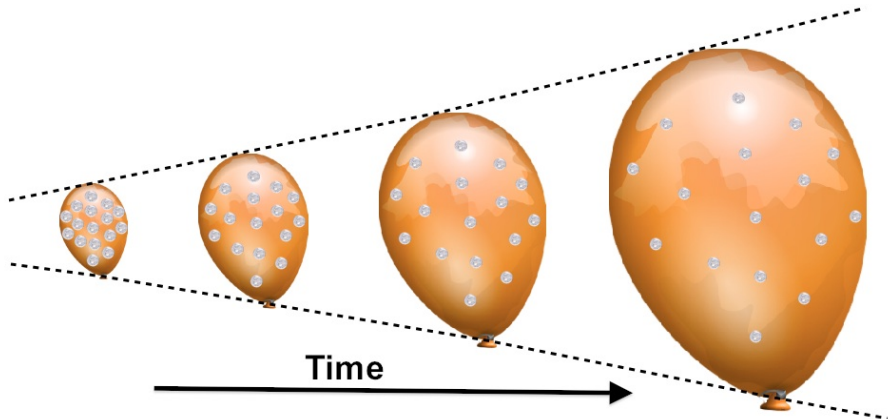
- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]



Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

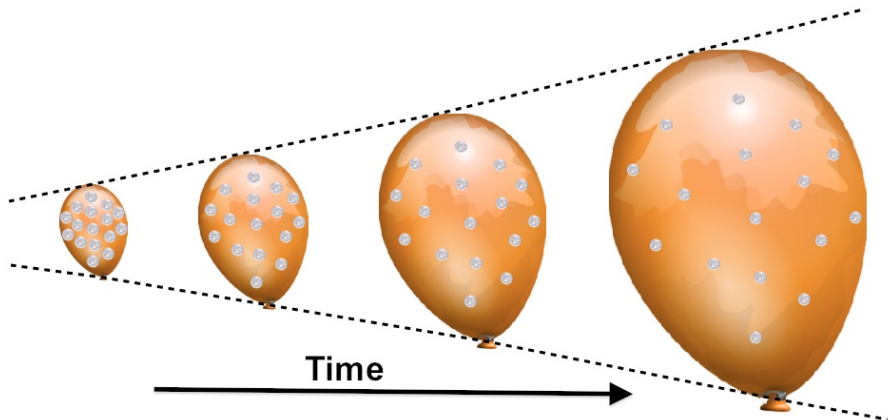
- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns



Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns
- ▶ Schlussfolgerung 2: je weiter weg umso schneller entfernt sich Objekt

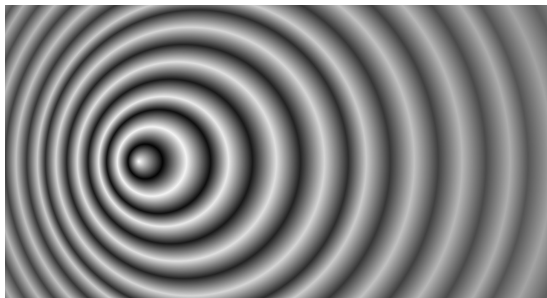


Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns
- ▶ Schlussfolgerung 2: je weiter weg umso schneller entfernt sich Objekt
- ▶ Zutat 2: Dopplereffekt (gibt es für alle Wellen, inklusive Licht)

$$(1 + z) := \frac{\lambda_{\text{Beobachter}}}{\lambda_{\text{Sender}}} = \frac{a_{\text{Beobachter}}}{a_{\text{Sender}}}$$



Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns
- ▶ Schlussfolgerung 2: je weiter weg umso schneller entfernt sich Objekt
- ▶ Zutat 2: Dopplereffekt (gibt es für alle Wellen, inklusive Licht)

$$(1 + z) := \frac{\lambda_{\text{Beobachter}}}{\lambda_{\text{Sender}}} = \frac{a_{\text{Beobachter}}}{a_{\text{Sender}}}$$

- ▶ Anmerkung 1: $z > 0 =$ Rotverschiebung, $z < 0 =$ Blauverschiebung

Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns
- ▶ Schlussfolgerung 2: je weiter weg umso schneller entfernt sich Objekt
- ▶ Zutat 2: Dopplereffekt (gibt es für alle Wellen, inklusive Licht)

$$(1 + z) := \frac{\lambda_{\text{Beobachter}}}{\lambda_{\text{Sender}}} = \frac{a_{\text{Beobachter}}}{a_{\text{Sender}}}$$

- ▶ Anmerkung 1: $z > 0$ = Rotverschiebung, $z < 0$ = Blauverschiebung
- ▶ Schlussfolgerung 3: je mehr rotverschoben Galaxie desto weiter weg

Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns
- ▶ Schlussfolgerung 2: je weiter weg umso schneller entfernt sich Objekt
- ▶ Zutat 2: Dopplereffekt (gibt es für alle Wellen, inklusive Licht)

$$(1 + z) := \frac{\lambda_{\text{Beobachter}}}{\lambda_{\text{Sender}}} = \frac{a_{\text{Beobachter}}}{a_{\text{Sender}}}$$

- ▶ Anmerkung 1: $z > 0$ = Rotverschiebung, $z < 0$ = Blauverschiebung
- ▶ Schlussfolgerung 3: je mehr rotverschoben Galaxie desto weiter weg
- ▶ Zutat 3: H21 Spektrallinie (charakteristische Wasserstofflinie mit 21cm Wellenlänge)

Rotverschiebung

Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns
- ▶ Schlussfolgerung 2: je weiter weg umso schneller entfernt sich Objekt
- ▶ Zutat 2: Dopplereffekt (gibt es für alle Wellen, inklusive Licht)

$$(1 + z) := \frac{\lambda_{\text{Beobachter}}}{\lambda_{\text{Sender}}} = \frac{a_{\text{Beobachter}}}{a_{\text{Sender}}}$$

- ▶ Anmerkung 1: $z > 0$ = Rotverschiebung, $z < 0$ = Blauverschiebung
- ▶ Schlussfolgerung 3: je mehr rotverschoben Galaxie desto weiter weg
- ▶ Zutat 3: H21 Spektrallinie (charakteristische Wasserstofflinie mit 21cm Wellenlänge)
- ▶ Gründe: einfach zu messen; Wasserstoff überall im Universum

Rotverschiebung

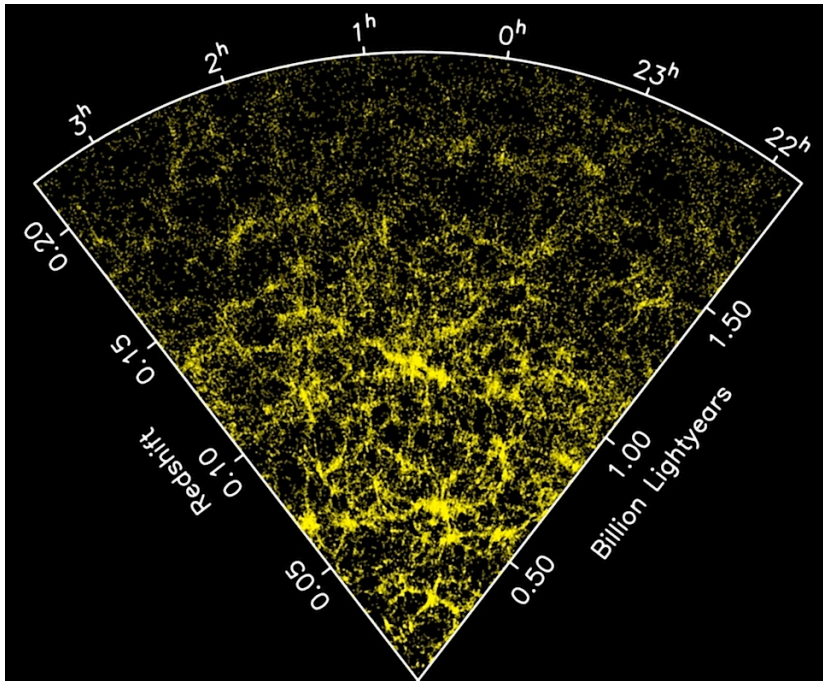
Woher wissen wir Entfernung von Objekten?

- ▶ Zutat 1: Hubblegesetz $v = Hr$ (Geschwindigkeit = Hubbleparameter mal Abstand) [folgt aus Friedmanngleichungen, siehe Teil II]
- ▶ Schlussfolgerung 1: alles entfernt sich von uns
- ▶ Schlussfolgerung 2: je weiter weg umso schneller entfernt sich Objekt
- ▶ Zutat 2: Dopplereffekt (gibt es für alle Wellen, inklusive Licht)

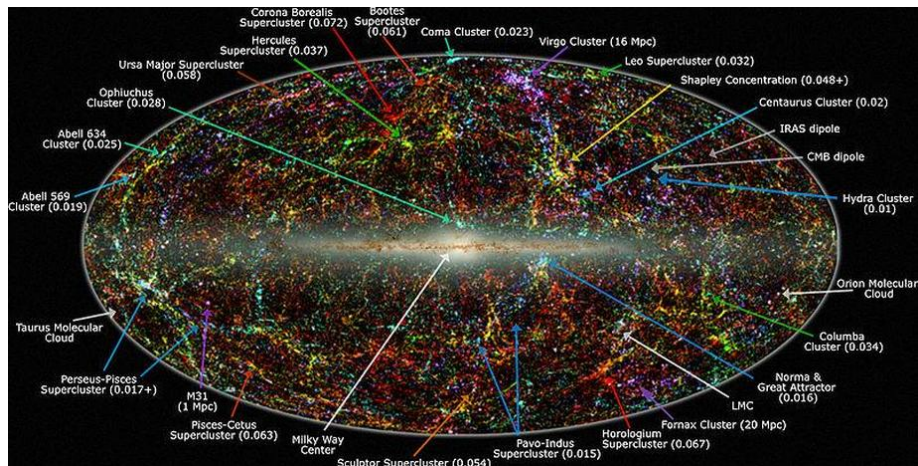
$$(1 + z) := \frac{\lambda_{\text{Beobachter}}}{\lambda_{\text{Sender}}} = \frac{a_{\text{Beobachter}}}{a_{\text{Sender}}}$$

- ▶ Anmerkung 1: $z > 0$ = Rotverschiebung, $z < 0$ = Blauverschiebung
- ▶ Schlussfolgerung 3: je mehr rotverschoben Galaxie desto weiter weg
- ▶ Zutat 3: H21 Spektrallinie (charakteristische Wasserstofflinie mit 21cm Wellenlänge)
- ▶ Gründe: einfach zu messen; Wasserstoff überall im Universum

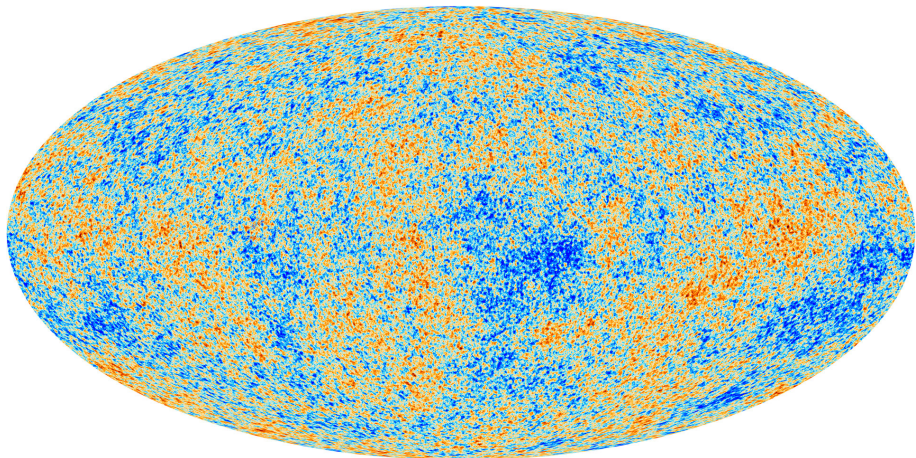
Rotverschiebung der H21 Spektrallinie erlaubt Entfernungsbestimmung



Aktuelle Karte des sichtbaren Universums mit Hilfe von Rotverschiebung



Sloan Digital Sky Service (SDSS) seit 2000, <http://www.sdss.org/>

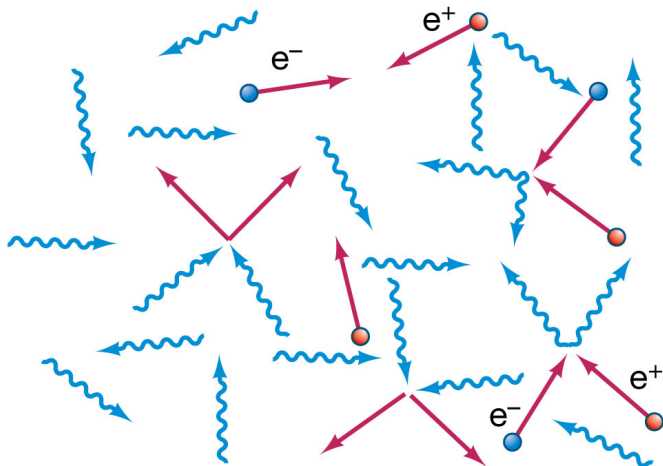


PLANCK-Daten der Temperaturfluktuationen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes

Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!

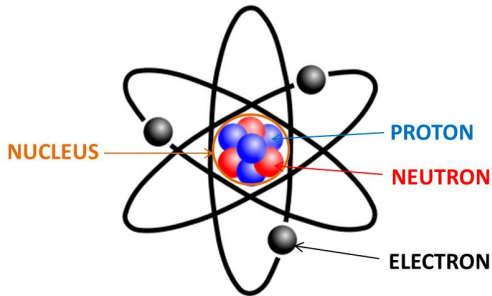


(a) 10 billion K

Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

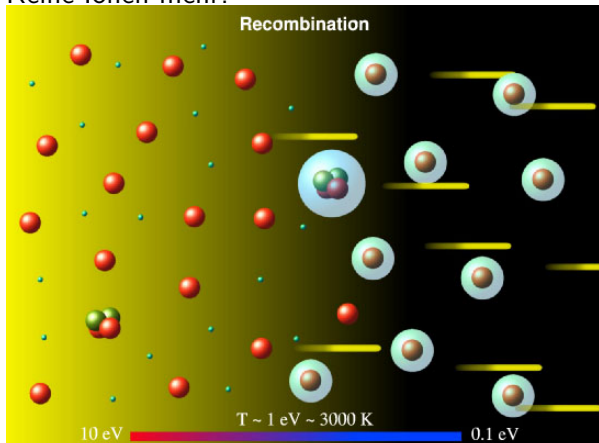
- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!
- ▶ Als Universum etwa 380.000 Jahre alt war: $6000K \approx 1eV$: Atome



Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!
- ▶ Als Universum etwa 380.000 Jahre alt war: $6000K \approx 1eV$: Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!



Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

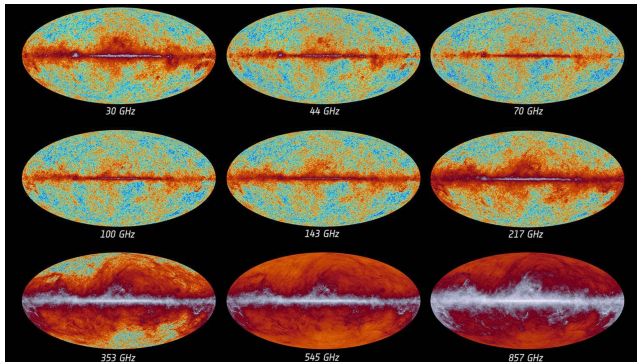
- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!
- ▶ Als Universum etwa 380.000 Jahre alt war: $6000K \approx 1eV$: Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!
- ▶ Universum transparent für Photonen



Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

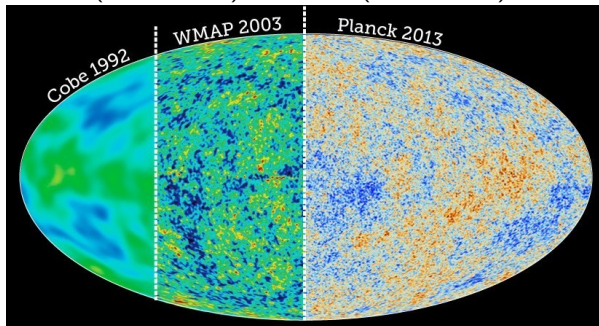
- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!
- ▶ Als Universum etwa 380.000 Jahre alt war: $6000K \approx 1eV$: Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!
- ▶ Universum transparent für Photonen
- ▶ Fluktuationen: "Echo" des Urknalls!



Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!
- ▶ Als Universum etwa 380.000 Jahre alt war: $6000K \approx 1eV$: Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!
- ▶ Universum transparent für Photonen
- ▶ Fluktuationen: "Echo" des Urknalls!
- ▶ COBE (1989-1993), WMAP (2001-2012), Planck (seit 2009)

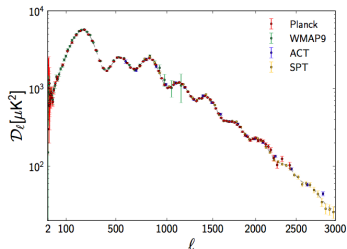
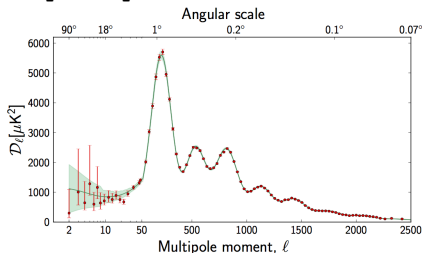


Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!
- ▶ Als Universum etwa 380.000 Jahre alt war: $6000K \approx 1eV$: Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!
- ▶ Universum transparent für Photonen
- ▶ Fluktuationen: "Echo" des Urknalls!
- ▶ COBE (1989-1993), WMAP (2001-2012), Planck (seit 2009)
- ▶ Präzise Bestimmung der kosmologischen Parameter

http://space.mit.edu/home/tegmark/parmovies/01_movie.html



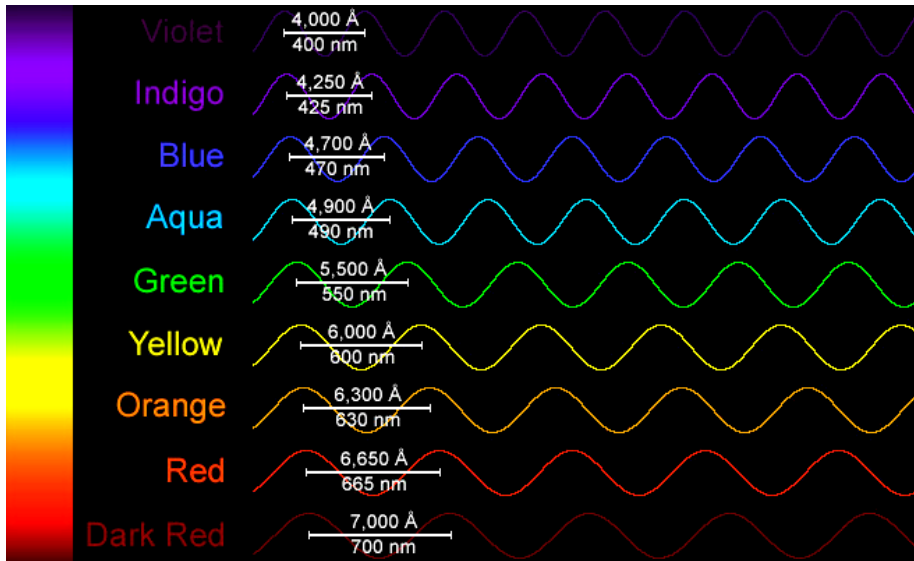
Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

Bietet reichhaltiges Datenmaterial!

- ▶ Frühes Universum: heisses Plasma (Ionen und Elektronen); undurchsichtig für Licht!
- ▶ Als Universum etwa 380.000 Jahre alt war: $6000K \approx 1eV$: Atome
- ▶ Keine Ionen mehr!
- ▶ Universum transparent für Photonen
- ▶ Fluktuationen: "Echo" des Urknalls!
- ▶ COBE (1989-1993), WMAP (2001-2012), Planck (seit 2009)
- ▶ Präzise Bestimmung der kosmologischen Parameter
http://space.mit.edu/home/tegmark/parmovies/01_movie.html

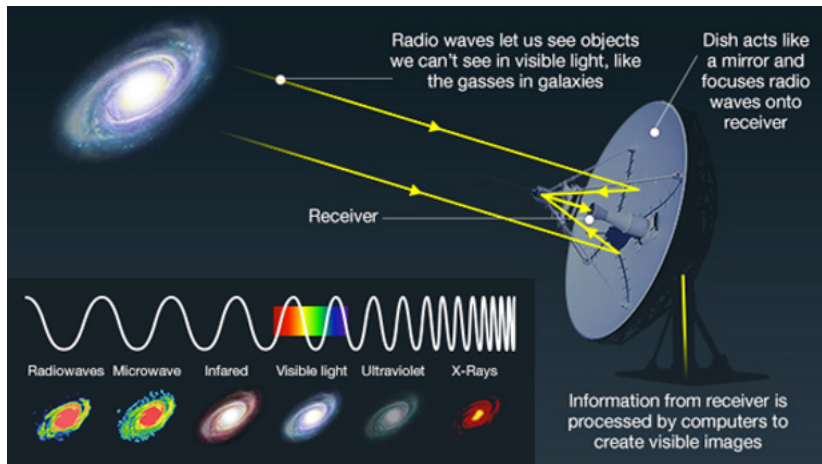
- ▶ CMB erlaubt detaillierte experimentelle Überprüfung unserer kosmologischen Modelle
- ▶ Standardmodell der Kosmologie kompatibel mit CMB Daten (seit etwa 1998 dominantes Modell, ähnlich wie Standardmodell der Teilchenphysik)

Radio- und γ -Strahlen-Astronomie



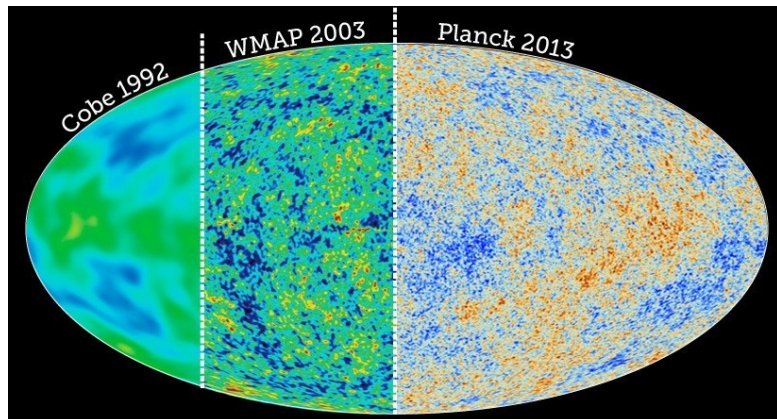
Radio- und γ -Strahlen-Astronomie

- ▶ Licht ist nicht bloss “sichtbares” Licht (rot-blau)!
- ▶ Radioastronomie ($\lambda > 1m$): 1933 entdeckt Jansky Radiowellen aus der Milchstrasse; SETI <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>



Radio- und γ -Strahlen-Astronomie

- ▶ Licht ist nicht bloss “sichtbares” Licht (rot-blau)!
- ▶ Radioastronomie ($\lambda > 1m$): 1933 entdeckt Jansky Radiowellen aus der Milchstrasse; SETI <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>
- ▶ Mikrowellenastronomie ($\lambda \approx 1mm - 1m$): 1965, Penzias & Wilson; CMB und H21-Linie



Radio- und γ -Strahlen-Astronomie

- ▶ Licht ist nicht bloss “sichtbares” Licht (rot-blau)!
- ▶ Radioastronomie ($\lambda > 1m$): 1933 entdeckt Jansky Radiowellen aus der Milchstrasse; SETI <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>
- ▶ Mikrowellenastronomie ($\lambda \approx 1mm - 1m$): 1965, Penzias & Wilson; CMB und H21-Linie
- ▶ Infrarotastronomie ($\lambda \approx 780nm - 1mm$): 1830er, Herschel



Andromeda Galaxie im Infrarotbereich

Radio- und γ -Strahlen-Astronomie

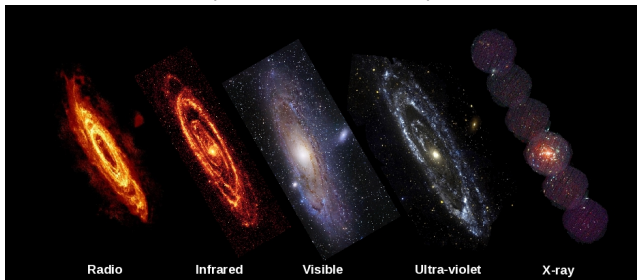
- ▶ Licht ist nicht bloss “sichtbares” Licht (rot-blau)!
- ▶ Radioastronomie ($\lambda > 1m$): 1933 entdeckt Jansky Radiowellen aus der Milchstrasse; SETI <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>
- ▶ Mikrowellenastronomie ($\lambda \approx 1mm - 1m$): 1965, Penzias & Wilson; CMB und H21-Linie
- ▶ Infrarotastronomie ($\lambda \approx 780nm - 1mm$): 1830er, Herschel
- ▶ (Licht-)Astronomie ($\lambda \approx 320 - 780nm$): seit Anbeginn der Menschheit



Vorteil von sichtbarem Licht: mit freiem Auge erkennbar

Radio- und γ -Strahlen-Astronomie

- ▶ Licht ist nicht bloss “sichtbares” Licht (rot-blau)!
- ▶ Radioastronomie ($\lambda > 1m$): 1933 entdeckt Jansky Radiowellen aus der Milchstrasse; SETI <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>
- ▶ Mikrowellenastronomie ($\lambda \approx 1mm - 1m$): 1965, Penzias & Wilson; CMB und H21-Linie
- ▶ Infrarotastronomie ($\lambda \approx 780nm - 1mm$): 1830er, Herschel
- ▶ (Licht-)Astronomie ($\lambda \approx 320 - 780nm$): seit Anbeginn der Menschheit
- ▶ Ultraviolettastonomie ($\lambda \approx 10 - 320nm$): 1970er, Bowyer



Radio- und γ -Strahlen-Astronomie

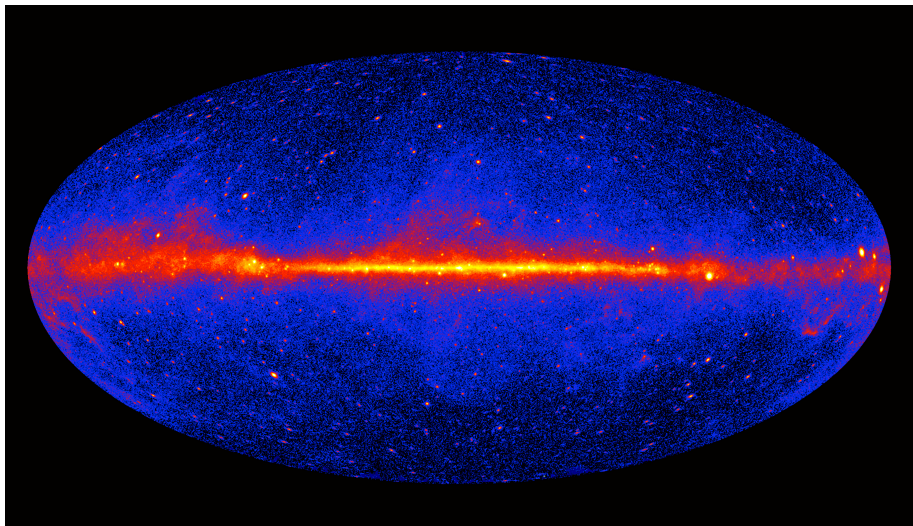
- ▶ Licht ist nicht bloss “sichtbares” Licht (rot-blau)!
- ▶ Radioastronomie ($\lambda > 1m$): 1933 entdeckt Jansky Radiowellen aus der Milchstrasse; SETI <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>
- ▶ Mikrowellenastronomie ($\lambda \approx 1mm - 1m$): 1965, Penzias & Wilson; CMB und H21-Linie
- ▶ Infrarotastronomie ($\lambda \approx 780nm - 1mm$): 1830er, Herschel
- ▶ (Licht-)Astronomie ($\lambda \approx 320 - 780nm$): seit Anbeginn der Menschheit
- ▶ Ultraviolettastonomie ($\lambda \approx 10 - 320nm$): 1970er, Bowyer
- ▶ Röntgenastonomie ($\lambda \approx 0,01 - 10nm$): 1948, US Armee (Projekt Hermes)



Radio- und γ -Strahlen-Astronomie

- ▶ Licht ist nicht bloss “sichtbares” Licht (rot-blau)!
- ▶ Radioastronomie ($\lambda > 1m$): 1933 entdeckt Jansky Radiowellen aus der Milchstrasse; SETI <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>
- ▶ Mikrowellenastronomie ($\lambda \approx 1mm - 1m$): 1965, Penzias & Wilson; CMB und H21-Linie
- ▶ Infrarotastronomie ($\lambda \approx 780nm - 1mm$): 1830er, Herschel
- ▶ (Licht-)Astronomie ($\lambda \approx 320 - 780nm$): seit Anbeginn der Menschheit
- ▶ Ultraviolettastonomie ($\lambda \approx 10 - 320nm$): 1970er, Bowyer
- ▶ Röntgenastronomie ($\lambda \approx 0,01 - 10nm$): 1948, US Armee (Projekt Hermes)
- ▶ γ -Strahlenastronomie ($\lambda < 10pm$): 1961, Explorer 11 Satellit (MIT)

Teleskope in allen Frequenzbereichen erlauben umfassenderes “Sehen” des Universums!



Wichtige γ -Quellen: Neutronensterne und Schwarze Löcher!

Supernovae

- ▶ Wenn sehr massive Sterne sterben: Supernova!



Krebsnebel 1054

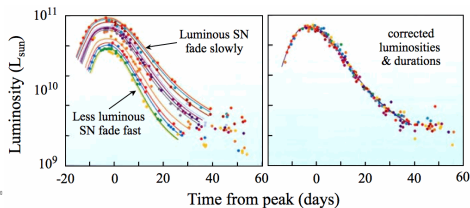
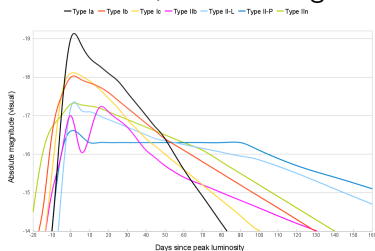
Supernovae

- ▶ Wenn sehr massive Sterne sterben: Supernova!
- ▶ Erste beobachtete Supernovae: 185 (Chinesische Astronomen), 1006 (Chinesische und Islamische Astronomen), 1054 Krebsnebel (Chinesische Astronomen)
- ▶ wichtige empirische Belege gegen Aristoteles' Idee dass Universum unveränderlich ist (jenseits des Mondes)



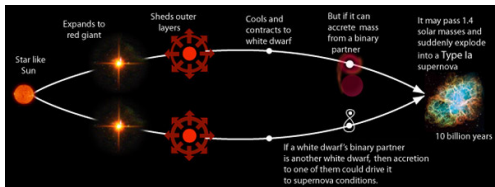
Supernovae

- ▶ Wenn sehr massive Sterne sterben: Supernova!
- ▶ Erste beobachtete Supernovae: 185 (Chinesische Astronomen), 1006 (Chinesische und Islamische Astronomen), 1054 Krebsnebel (Chinesische Astronomen)
- ▶ wichtige empirische Belege gegen Aristoteles' Idee dass Universum unveränderlich ist (jenseits des Mondes)
- ▶ Supernova selbst dauert wenige Sekunden (scheinen in der Zeit heller als eine Galaxie!)
- ▶ Licht kommt aber nicht nur von Explosion selbst, sondern auch von Materiewolke, die man Tage- oder Monatlang sehen kann



Supernovae

- ▶ Wenn sehr massive Sterne sterben: Supernova!
- ▶ Erste beobachtete Supernovae: 185 (Chinesische Astronomen), 1006 (Chinesische und Islamische Astronomen), 1054 Krebsnebel (Chinesische Astronomen)
- ▶ wichtige empirische Belege gegen Aristoteles' Idee dass Universum unveränderlich ist (jenseits des Mondes)
- ▶ Supernova selbst dauert wenige Sekunden (scheinen in der Zeit heller als eine Galaxie!)
- ▶ Licht kommt aber nicht nur von Explosion selbst, sondern auch von Materiewolke, die man Tage- oder Monatlang sehen kann
- ▶ Von speziellem Interesse: Typ Ia Supernovae!



Supernovae

- ▶ Wenn sehr massive Sterne sterben: Supernova!
- ▶ Erste beobachtete Supernovae: 185 (Chinesische Astronomen), 1006 (Chinesische und Islamische Astronomen), 1054 Krebsnebel (Chinesische Astronomen)
- ▶ wichtige empirische Belege gegen Aristoteles' Idee dass Universum unveränderlich ist (jenseits des Mondes)
- ▶ Supernova selbst dauert wenige Sekunden (scheinen in der Zeit heller als eine Galaxie!)
- ▶ Licht kommt aber nicht nur von Explosion selbst, sondern auch von Materiewolke, die man Tage- oder Monatlang sehen kann
- ▶ Von speziellem Interesse: Typ Ia Supernovae!
Typ Ia Supernovae Beobachtungen erste Evidenz für Dunkle Energie!
Grund: Standardkerzen!



Ausblick

Wie geht es weiter?

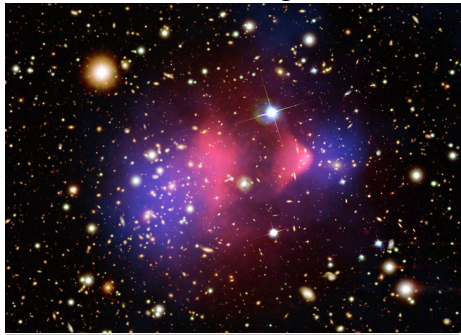
Wie geht es weiter?

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

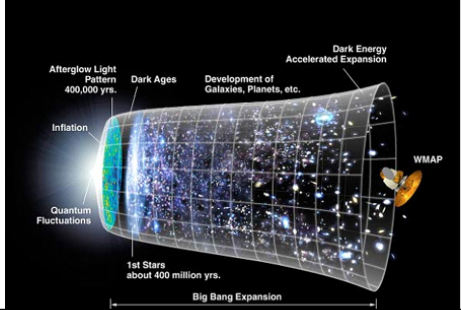
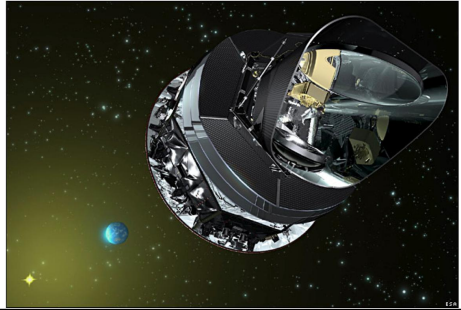
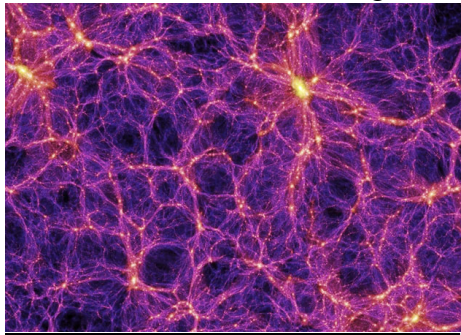
Wie geht es weiter?

- 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