

Kosmologie

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

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

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

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

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

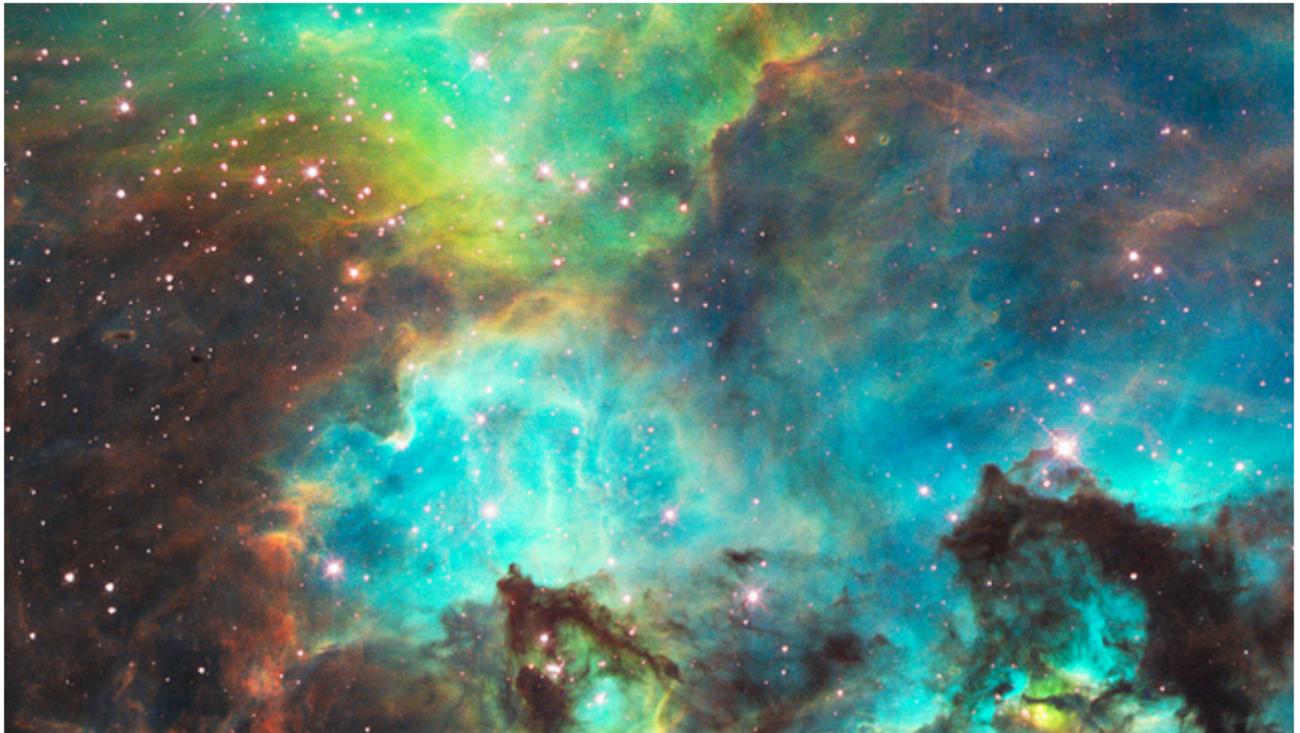
IV. Die dunkle Seite des Universums

Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie



(Falschfarben-)Bild des Hubble Teleskops

Vorlesungsreihenüberblick

I. Geschichte und Überblick

II. Allgemeine Relativitätstheorie als Grundlage der Kosmologie

III. Die helle Seite des Universums — Astronomische Beobachtungen

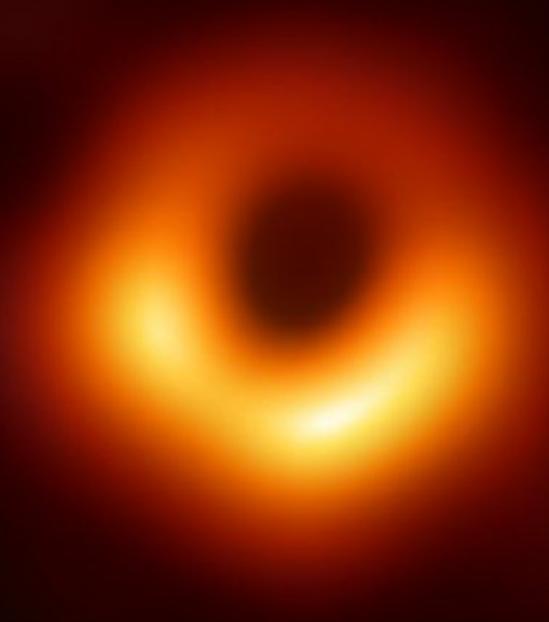
IV. Die dunkle Seite des Universums

Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie



Erstes Photo des Schatten eines Schwarzen Loches

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)
- ▶ K. Schwarzschild (1916): Erste exakte ART Lösung: Schwarzes Loch!

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)
- ▶ K. Schwarzschild (1916): Erste exakte ART Lösung: Schwarzes Loch!

Schwarze Löcher sind die einfachsten und kompliziertesten Objekte im Universum!

Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

Schwarze Löcher — Phantasie und Wirklichkeit

Schwarzes Loch, Pokemon Karte



Schwarzes Loch, Gemälde



Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

Schwarze Löcher — Phantasie und Wirklichkeit

Schwarzes Loch, Gemälde



Schwarzes Loch, Computersimulation



Am Computer berechnet für den Film
“Interstellar”

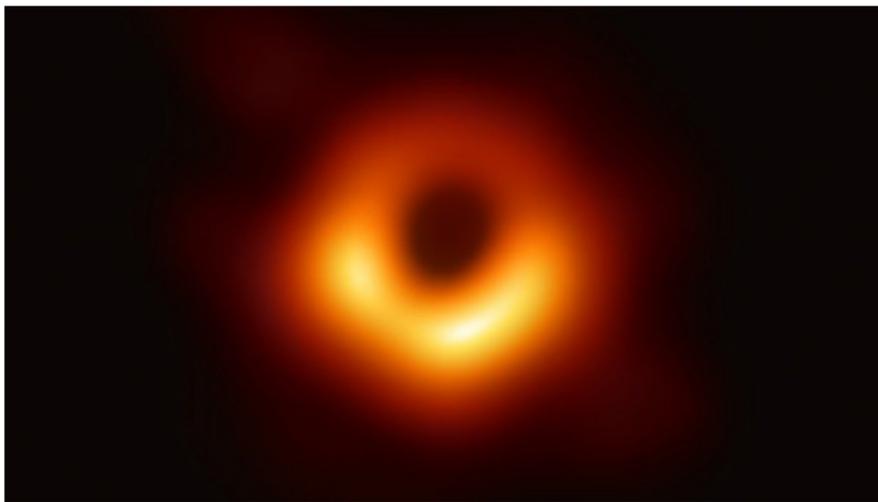
Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

Schwarze Löcher — Phantasie und Wirklichkeit

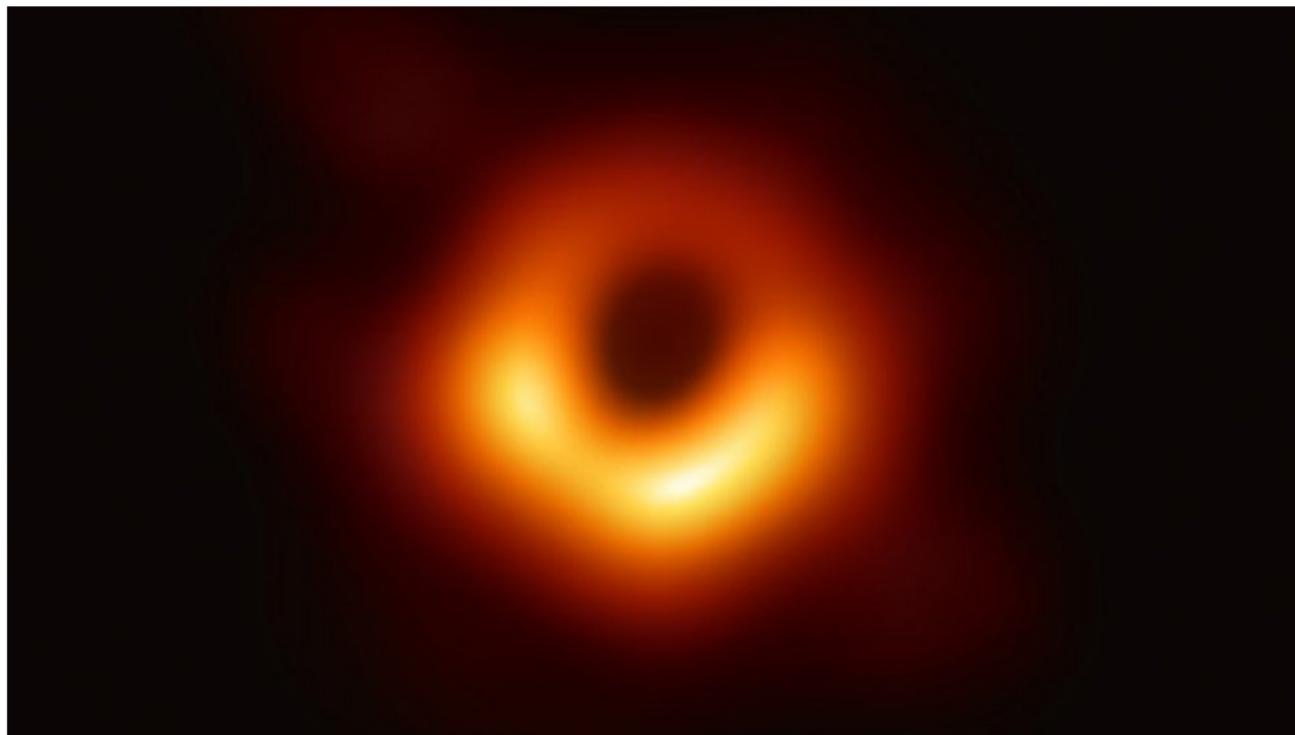
Schwarzes Loch, Computersimulation



Schwarzes Loch, Foto

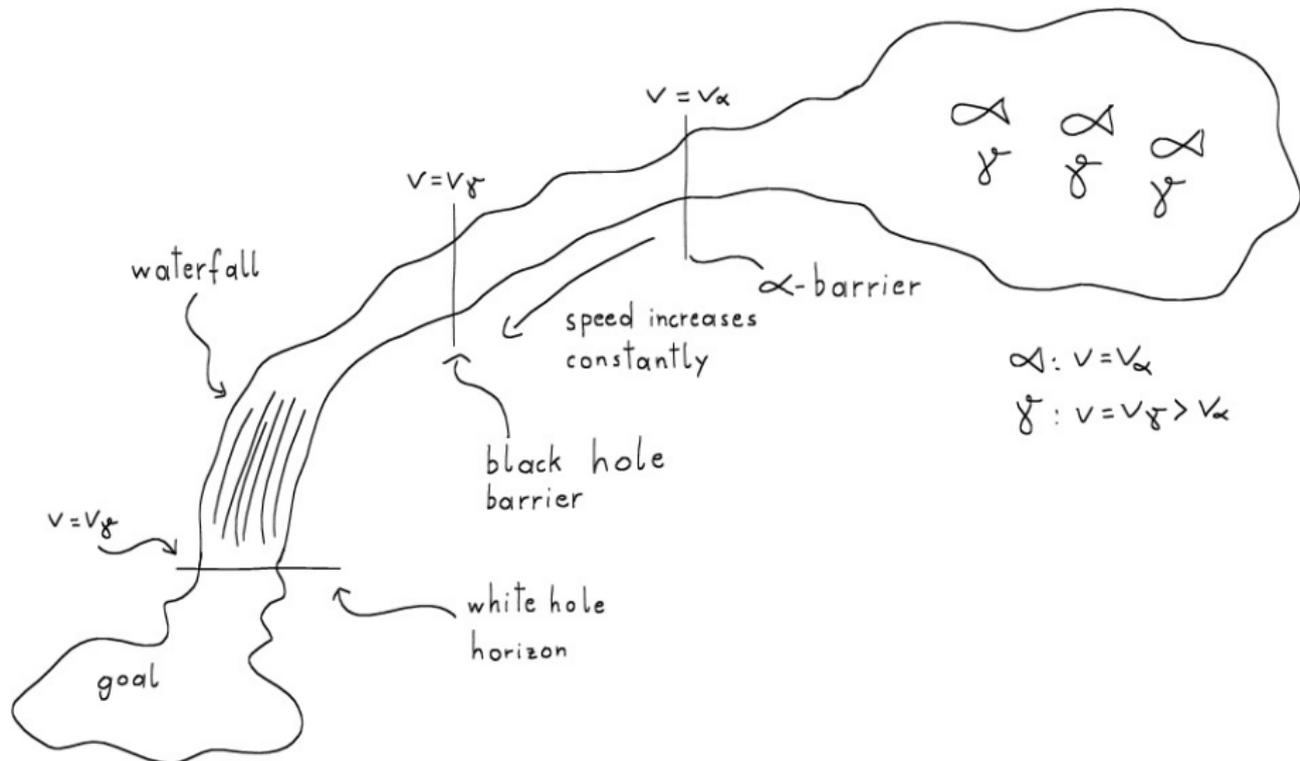


Was ist ein Schwarzes Loch?



Schatten des Schwarzen Lochs M87 (Distanz: $5.3 \cdot 10^7$ ly, Masse: $6.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$)
aufgenommen im April 2019 vom Event Horizon Telescope (EHT)

Fischanalogie

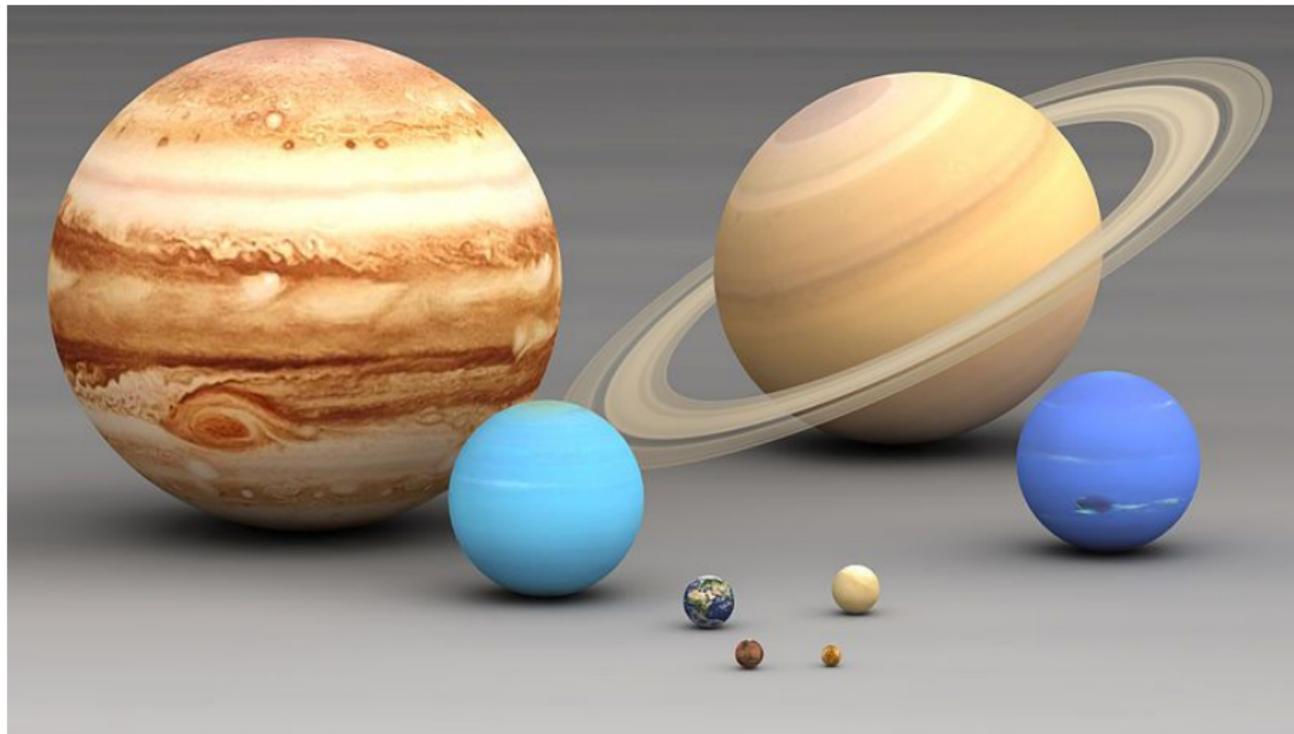


Schwarzes Loch: Bereich ohne Entkommen!



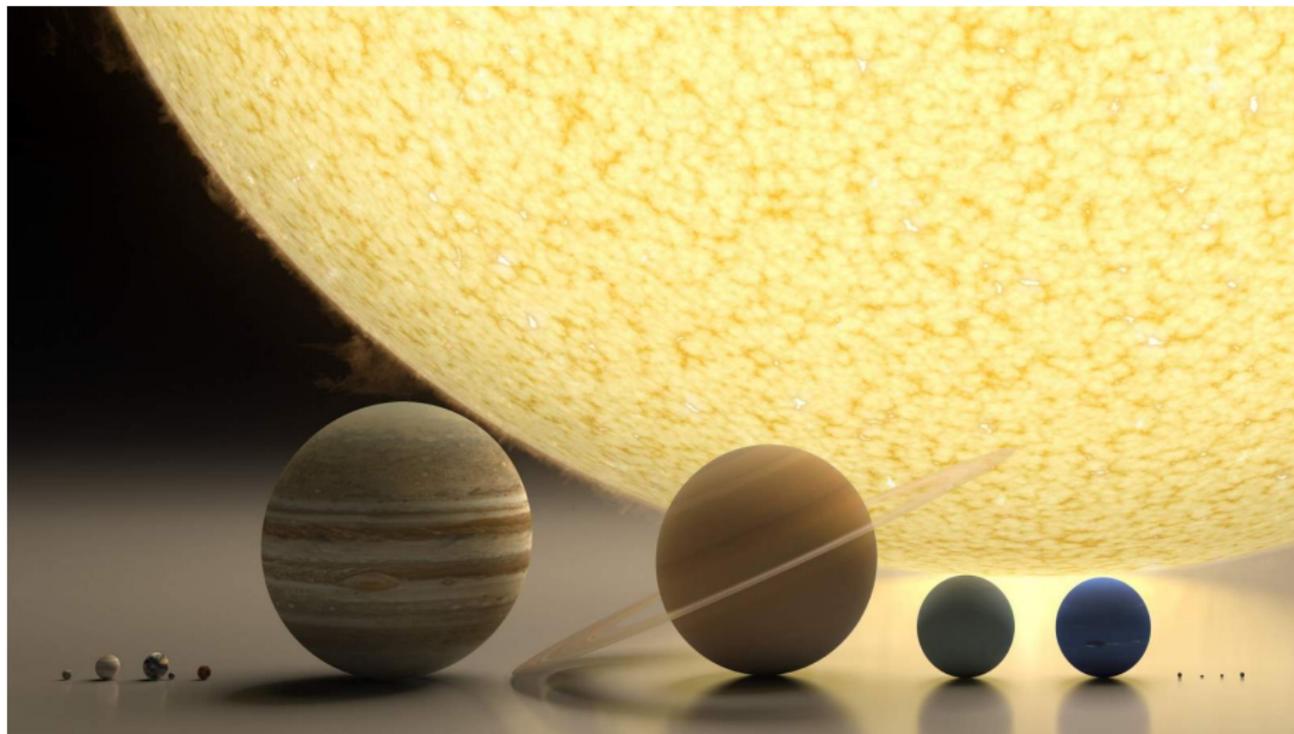
Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Planeten: schwere (z.B. Eisen) und leichte (z.B. Wasserstoff) Elemente



Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Sterne: leichte (Wasserstoff und Helium) Elemente

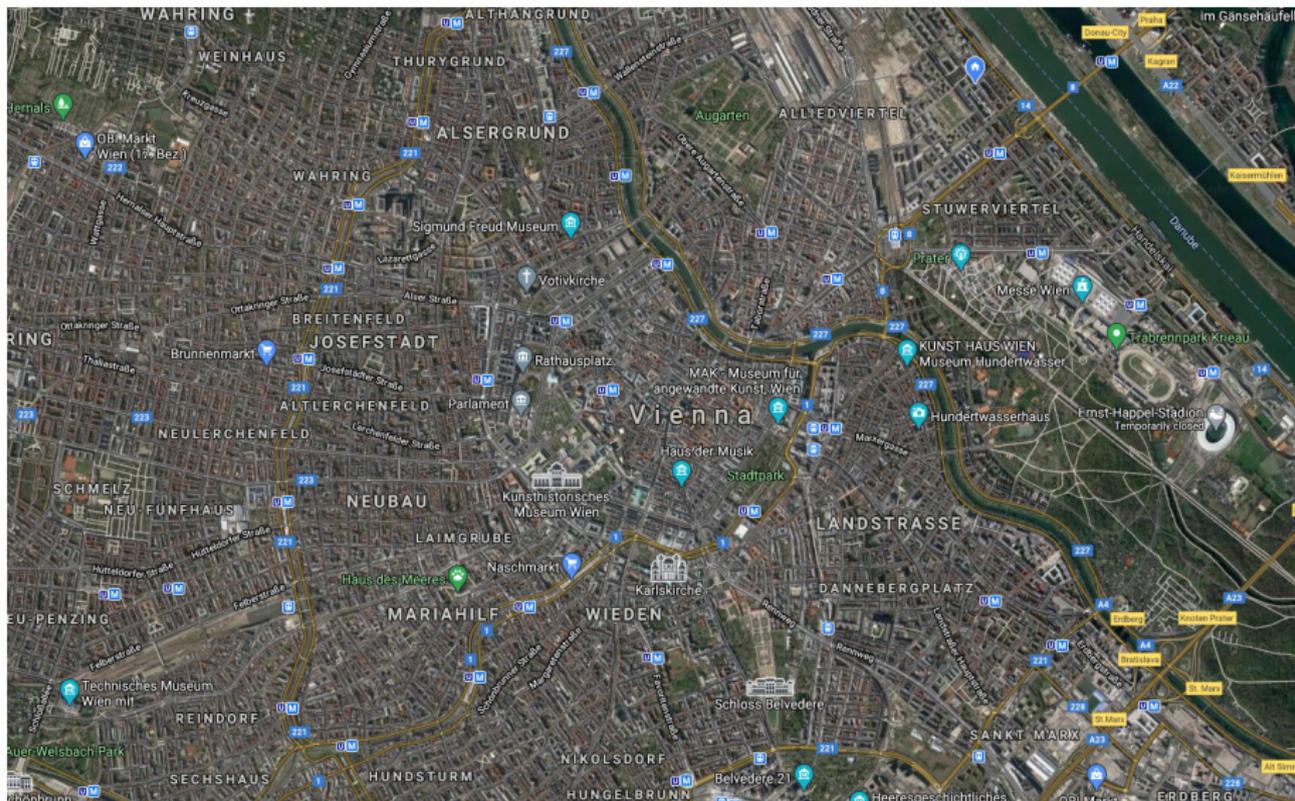


Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Schwarzes Loch: nichts (außer Raum und Zeit)

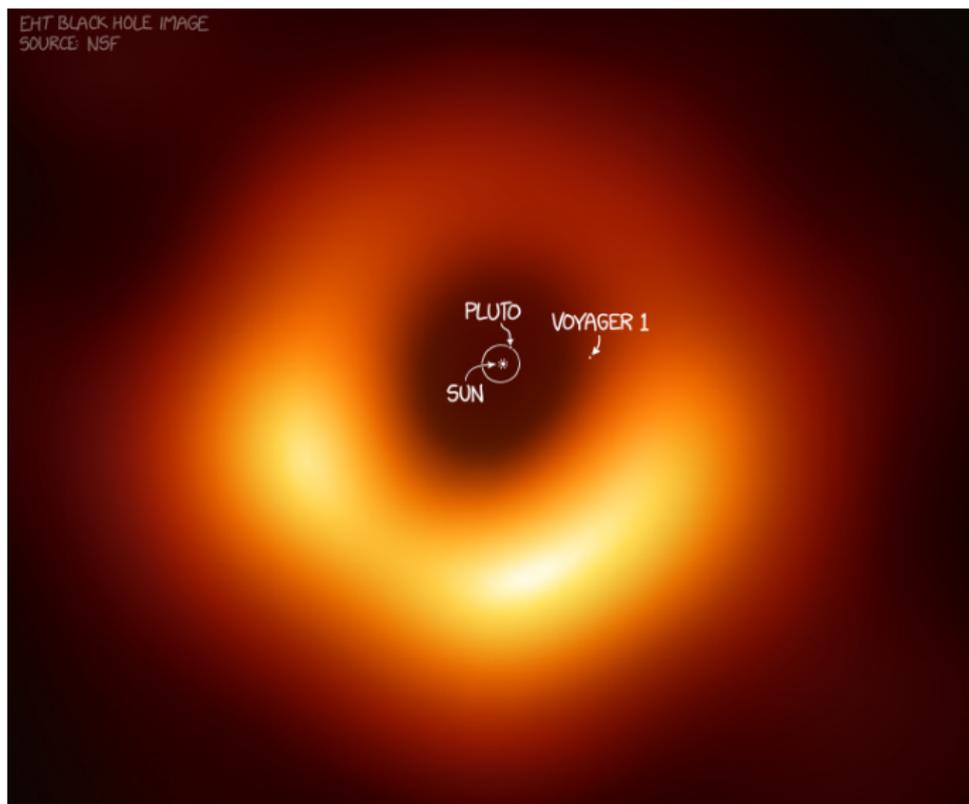
Wie groß ist ein Schwarzes Loch? (ein paar Kilometer)

Stellare Schwarze Löcher: ca. so groß wie Wiener Innenstadt

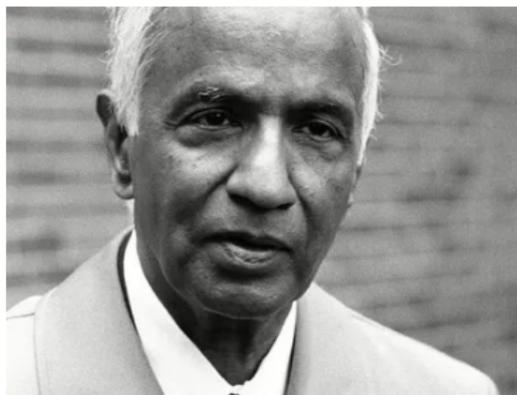


Wie groß ist ein Schwarzes Loch? (viele Milliarden Kilometer)

Galaktische Schwarze Löcher: ca. so groß wie unser Sonnensystem



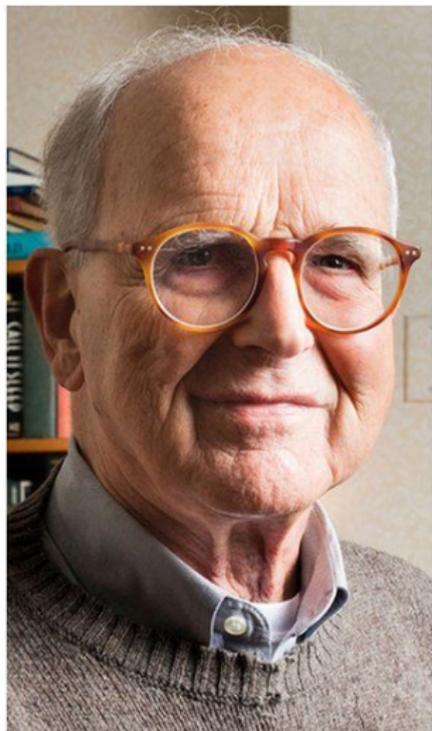
Wie beobachtet man Schwarze Löcher? Physiknobelpreis 1983



Subrahmanyan Chandrasekhar

Sternentwicklung (inkl. gravitationeller Kollaps zu Schwarzem Loch)

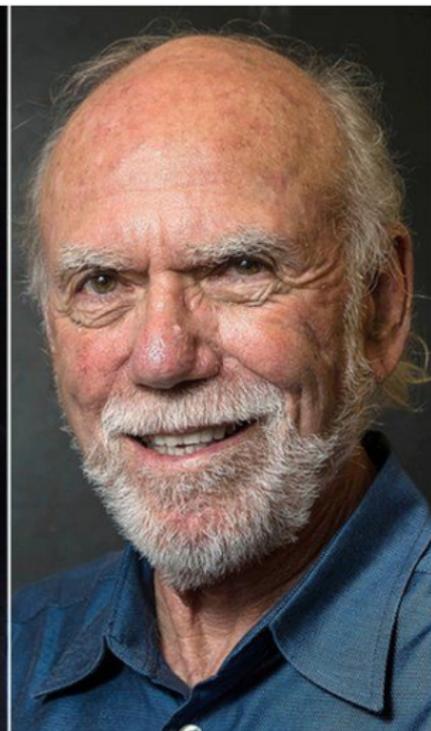
Wie beobachtet man Schwarze Löcher? Physiknobelpreis 2017



Rainer Weiss



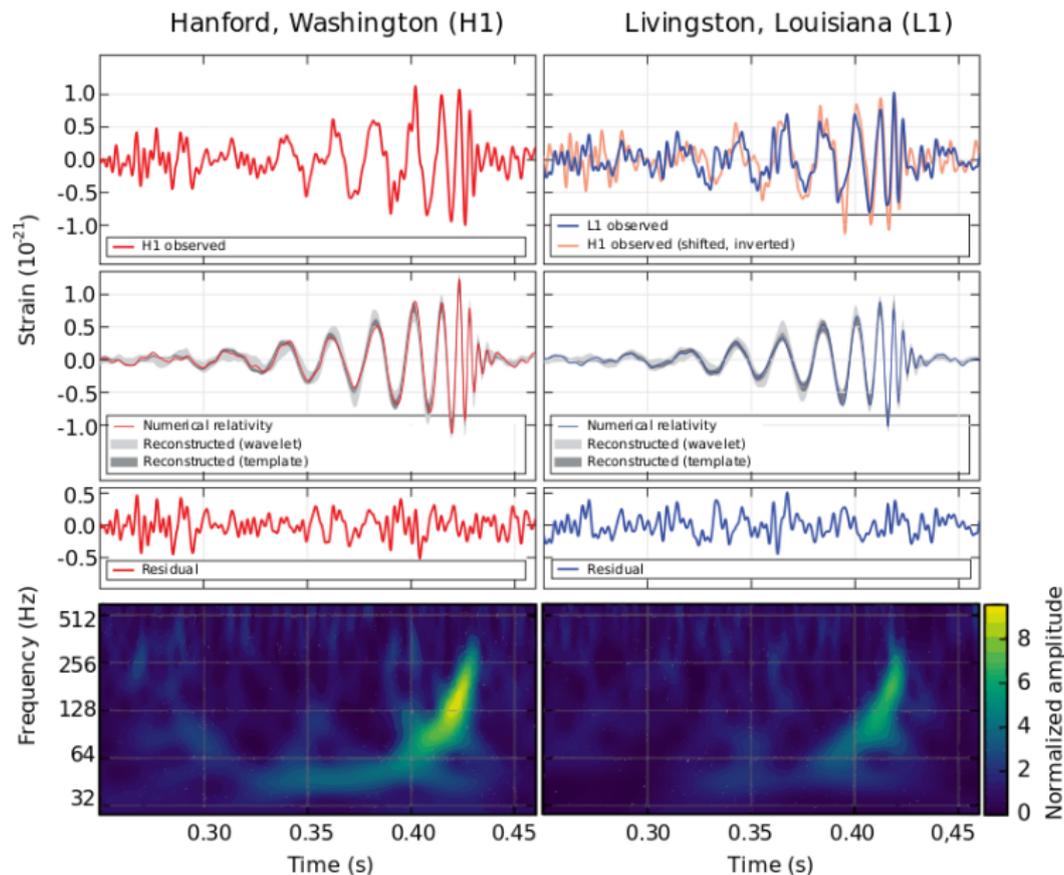
Kip Thorne



Barry Barish

Beobachtung von Gravitationswellen einer Schwarzen-Loch-Verschmelzung

Wie beobachtet man Schwarze Löcher? Physiknobelpreis 2017 (LIGO)



Wie beobachtet man Schwarze Löcher? Physiknobelpreis 2020



Roger Penrose

Theorie Schwarzer
Löcher



Andrea Ghez

Beobachtung des Schwarzen Lochs im Zentrum
der Milchstrasse

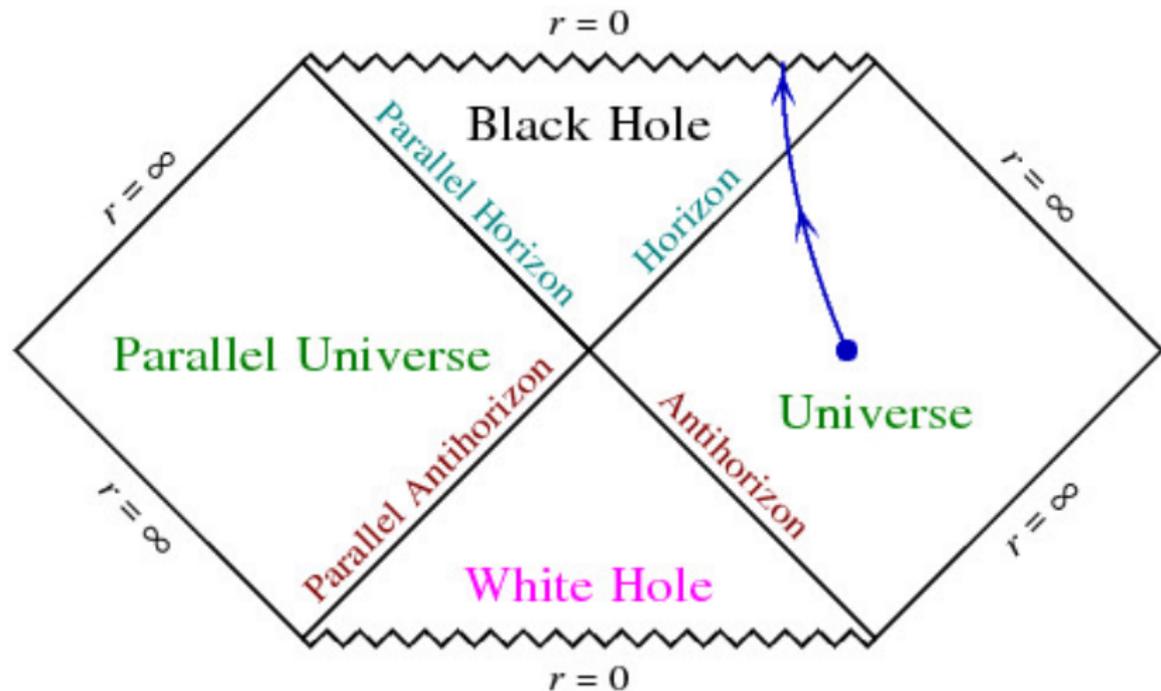


Reinhard Genzel

Wie beobachtet man Schwarze Löcher? Physiknobelpreis 2020

Roger Penrose:

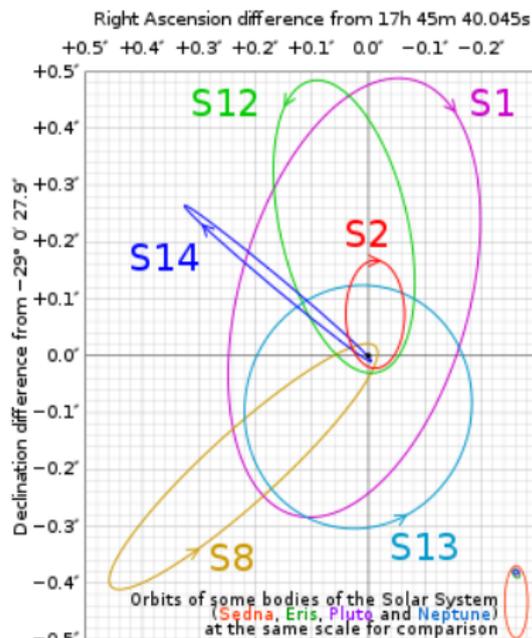
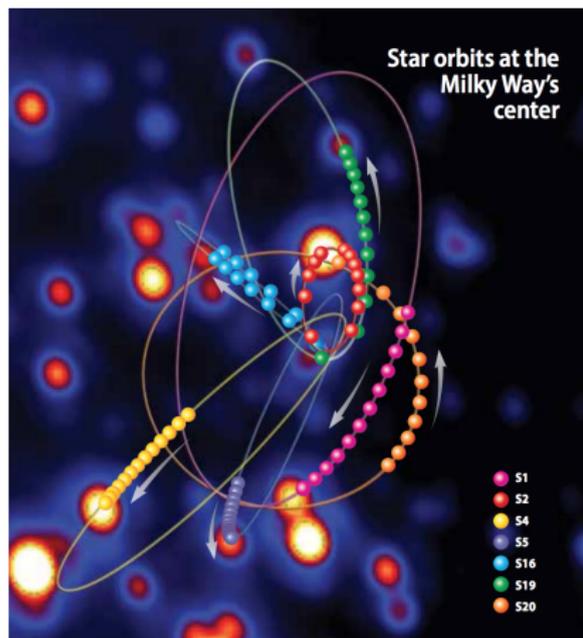
Hat die Unendlichkeit endlich gemacht und gezeigt, dass Schwarze Löcher eine robuste Vorhersage der ART sind.



Wie beobachtet man Schwarze Löcher? Physiknobelpreis 2020

Andrea Ghez und Reinhard Genzel:

Haben supermassives Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstrasse entdeckt.



Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930

Warum explodieren Sterne nicht?

Warum implodieren Sterne nicht?

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930

Warum explodieren Sterne nicht?

Warum implodieren Sterne nicht?

kritische Masse: Fermidruck = Gravitationsdruck

Rechnung ergibt

$$M_{\text{krit}} \approx 3M_{\odot}$$

Unsichtbare stellare Objekte mit Masse $> M_{\text{krit}}$ sind SL!

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps [Chandrasekhar 1930](#)
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe [Bolton, Webster, Murdin 1972](#)

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps [Chandrasekhar 1930](#)
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe [Bolton, Webster, Murdin 1972](#)

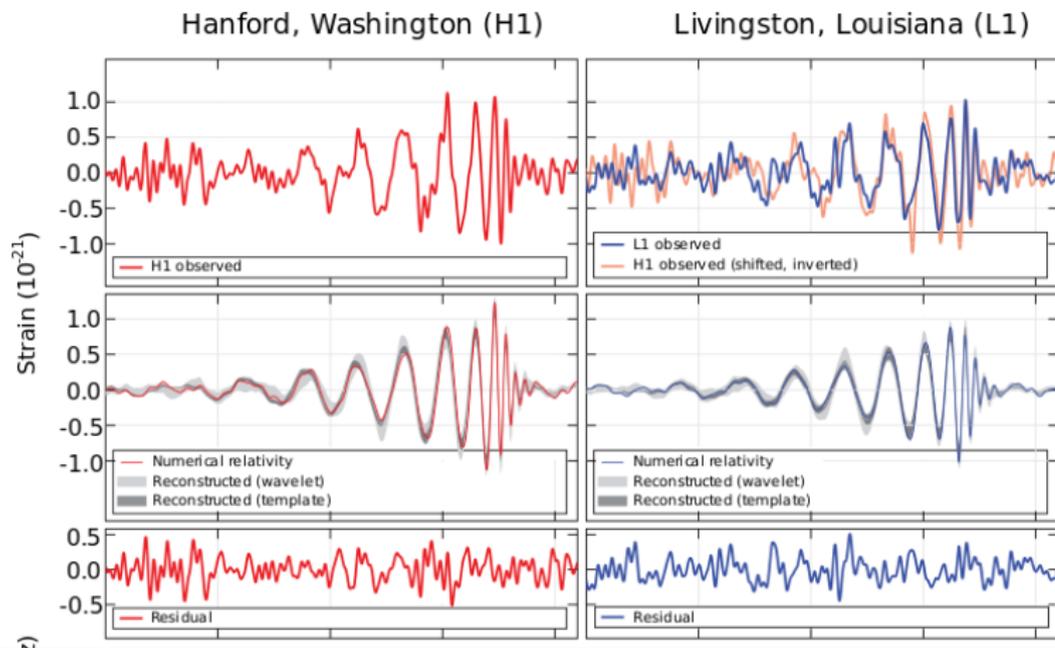
Objekte dessen Masse größer ist als kritische $M > 3M_{\odot}$ (2006):

System	P_{orb} [days]	$f(M)$ [M_{\odot}]	Donor Spect. Type	Classification	M_x [†] [M_{\odot}]
GRS 1915+105 ^a	33.5	9.5 ± 3.0	K/M III	LMXB/Transient	14 ± 4
V404 Cyg	6.471	6.09 ± 0.04	K0 IV	„	12 ± 2
Cyg X-1	5.600	0.244 ± 0.005	09.7 Iab	HMXB/Persistent	10 ± 3
LMC X-1	4.229	0.14 ± 0.05	07 III	„	> 4
XTE J1819-254	2.816	3.13 ± 0.13	B9 III	IMXB/Transient	7.1 ± 0.3
GRO J1655-40	2.620	2.73 ± 0.09	F3/5 IV	„	6.3 ± 0.3
BW Cir ^b	2.545	5.74 ± 0.29	G5 IV	LMXB/Transient	> 7.8
GX 339-4	1.754	5.8 ± 0.5	–	„	
LMC X-3	1.704	2.3 ± 0.3	B3 V	HMXB/Persistent	7.6 ± 1.3
XTE J1550-564	1.542	6.86 ± 0.71	G8/K8 IV	LMXB/Transient	9.6 ± 1.2
4U 1543-475	1.125	0.25 ± 0.01	A2 V	IMXB/Transient	9.4 ± 1.0
H1705-250	0.520	4.86 ± 0.13	K3/7 V	LMXB/Transient	6 ± 2
GS 1124-684	0.433	3.01 ± 0.15	K3/5 V	„	7.0 ± 0.6
XTE J1859+226 ^c	0.382	7.4 ± 1.1	–	„	
GS2000+250	0.345	5.01 ± 0.12	K3/7 V	„	7.5 ± 0.3
A0620-003	0.325	2.72 ± 0.06	K4 V	„	11 ± 2
XTE J1650-500	0.321	2.73 ± 0.56	K4 V	„	
GRS 1009-45	0.283	3.17 ± 0.12	K7/M0 V	„	5.2 ± 0.6
GRO J0422+32	0.212	1.19 ± 0.02	M2 V	„	4 ± 1
XTE J1118+480	0.171	6.3 ± 0.2	K5/M0 V	„	6.8 ± 0.4

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

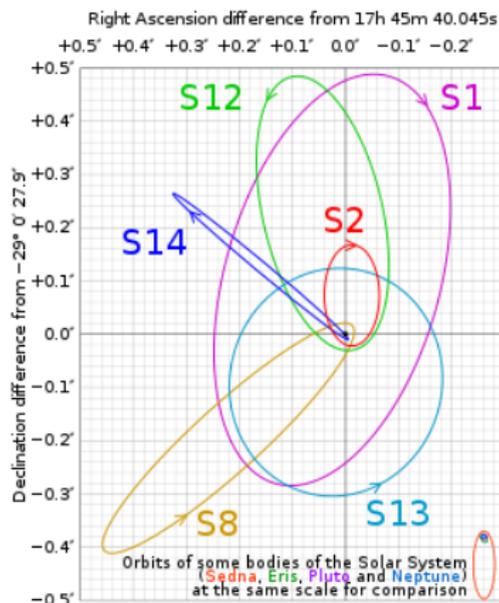
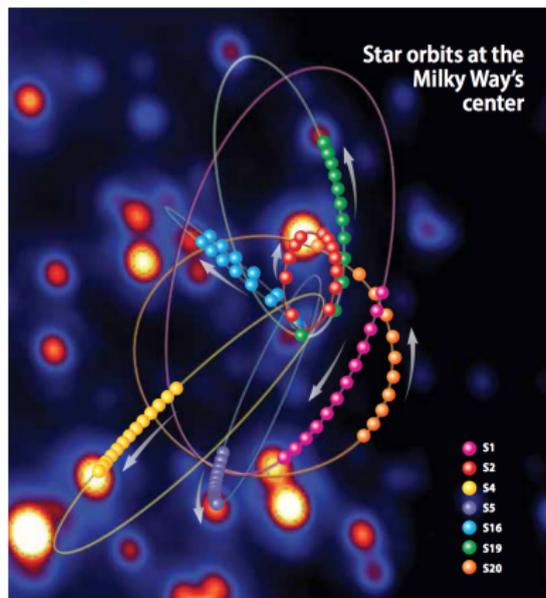
- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps **Chandrasekhar 1930**
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe **Bolton, Webster, Murdin 1972**
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion **LIGO '16**



Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

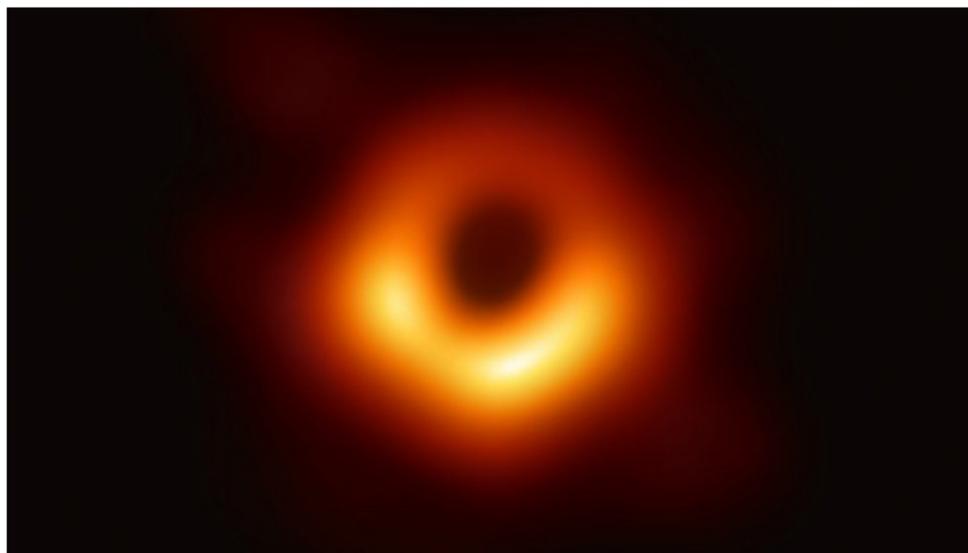
- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps **Chandrasekhar 1930**
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe **Bolton, Webster, Murdin 1972**
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion **LIGO '16**
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen **Ghez et al '08; Gillessen et al '09**



Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps [Chandrasekhar 1930](#)
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe [Bolton, Webster, Murdin 1972](#)
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion [LIGO '16](#)
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen [Ghez et al '08](#); [Gillessen et al '09](#)
- ▶ Supermassive SL: Schatten [EHT '19](#)



Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521
- ▶ Primordiale SL: keine Evidenz in Kosmologie

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

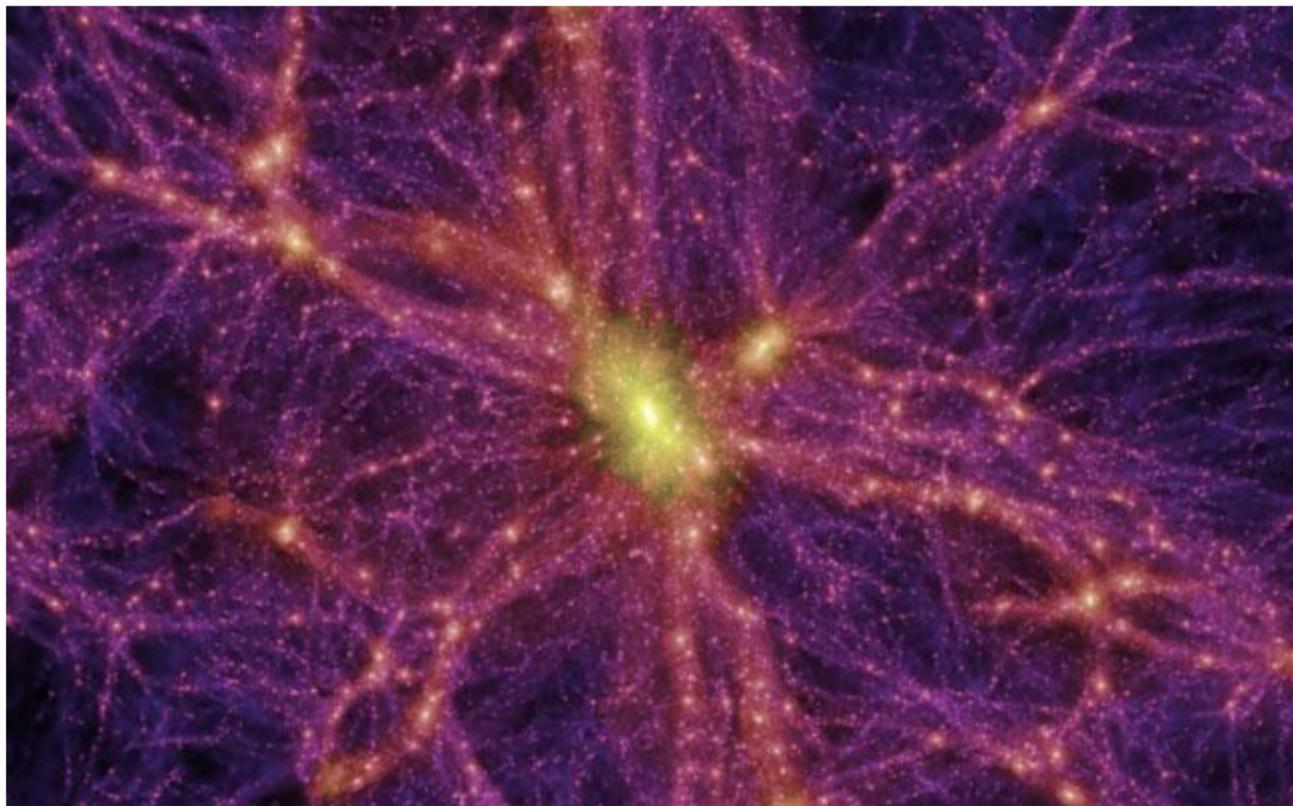
- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521
- ▶ Primordiale SL: keine Evidenz in Kosmologie
- ▶ Teilchenstoß-erzeugte SL: keine Evidenz vom LHC

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521
- ▶ Primordiale SL: keine Evidenz in Kosmologie
- ▶ Teilchenstoß-erzeugte SL: keine Evidenz vom LHC

- ▶ überwältigende Evidenz für stellare and supermassive SL
- ▶ bestätigte Massenbereiche: $3 - 142 M_{\odot}$ und $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$
- ▶ SL können prinzipiell für alle Massen $> 10^{-5} g$ existieren



Strukturformation im Universum nachhaltig beeinflusst von Dunkler Materie

Zusammenfassung von dem was wir (reduktionistisch betrachtet) wissen

- ▶ Standard Modelle der Teilchenphysik und Kosmologie (inkl. ART) konsistent mit fast Allem was wir in der Natur beobachten

Zusammenfassung von dem was wir (reduktionistisch betrachtet) wissen

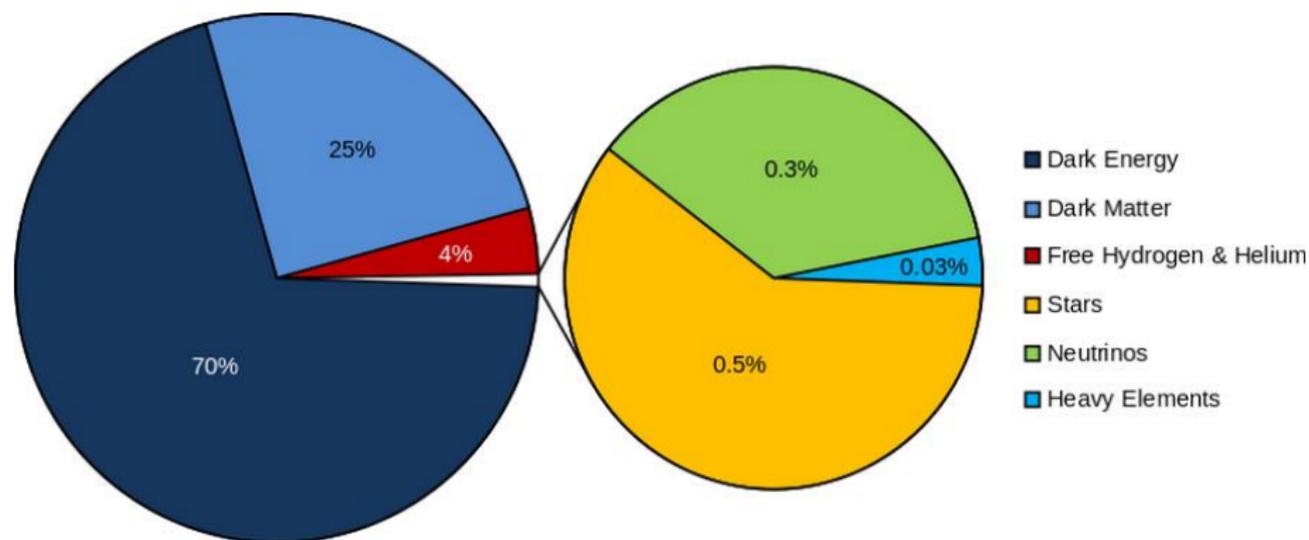
- ▶ Standard Modelle der Teilchenphysik und Kosmologie (inkl. ART) konsistent mit fast Allem was wir in der Natur beobachten

Fehlt noch etwas?



Zur Erinnerung: Experimentelle Daten von z.B. PLANCK benötigen Dunkle Materie zur Erklärung

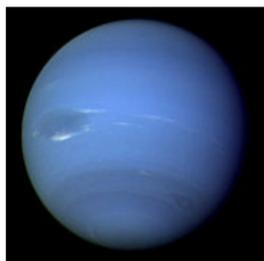
...oder eine Modifikation der Einsteinschen Theorie



- ▶ Weniger als 5% in Form von bekannter Materie (Standardmodell)
- ▶ ca. 25% Dunkle Materie
- ▶ ca. 70% Dunkle Energie

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

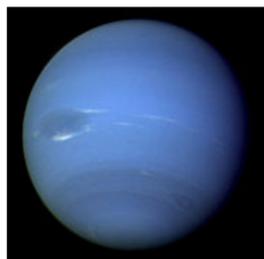


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

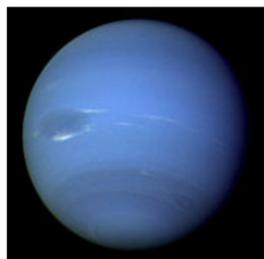


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

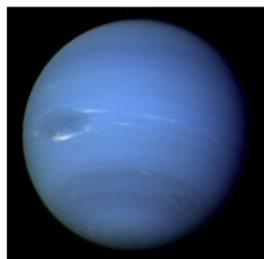


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

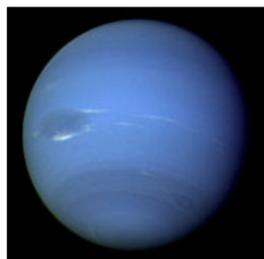


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1845: John Couch Adams und Urbain Le Verrier sagen neuen Planeten vorher und berechnen seine Position

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

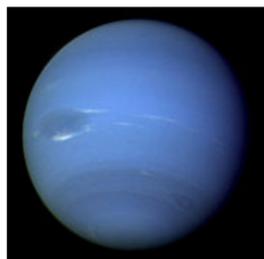


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1845: John Couch Adams und Urbain Le Verrier sagen neuen Planeten vorher und berechnen seine Position
- ▶ 1846: Bestätigung durch Beobachtung durch Johann Gottfried Galle und Heinrich Louis d'Arrest

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:



(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1845: John Couch Adams und Urbain Le Verrier sagen neuen Planeten vorher und berechnen seine Position
- ▶ 1846: Bestätigung durch Beobachtung durch Johann Gottfried Galle und Heinrich Louis d'Arrest

Entdeckung Neptuns erster Erfolg des Dunkle-Materie-Konzeptes!

Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor

Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!

Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher

Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position

Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position
- ▶ 1860: “Bestätigung” durch Beobachtung durch Lescarbault

Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position
- ▶ 1860: “Bestätigung” durch Beobachtung durch Lescarbault
- ▶ 1915: Einstein erklärt Merkurs Periheldrehung mit ART

Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position
- ▶ 1860: “Bestätigung” durch Beobachtung durch Lescarbault
- ▶ 1915: Einstein erklärt Merkurs Periheldrehung mit ART

Nicht-Entdeckung von Vulcan erster Fehlschlag des Dunkle-Materie-Konzeptes!

Astrophysik

Eine moderne Variante des Neptun–Vulcan Dilemmas...

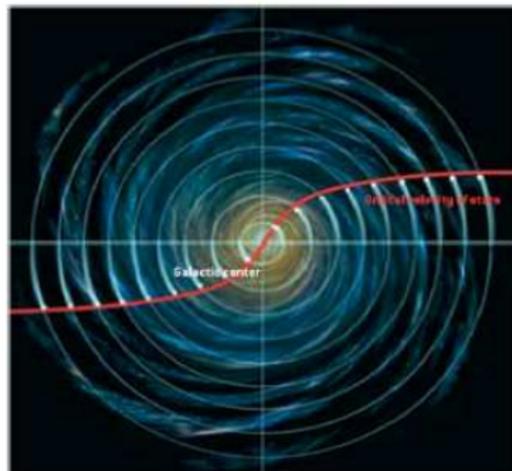
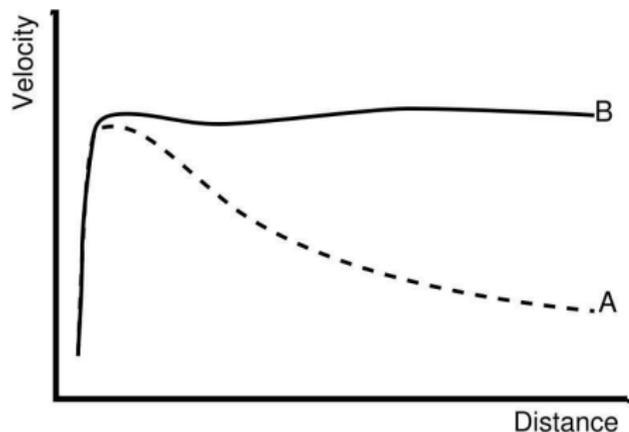
Prominentes Beispiel für Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung:

Astrophysik

Eine moderne Variante des Neptun–Vulcan Dilemmas...

Prominentes Beispiel für Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung:

- ▶ Galaktische Rotationskurven (pictures by Wikipedia)



A = Theorie, B = Beobachtung

Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden



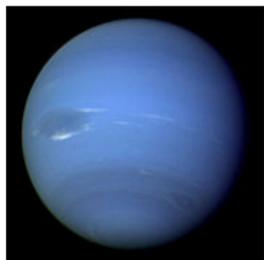
MOND, TeVeS, modifizierte Gravitationstheorien, ...

Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden
- ▶ Neptun-Szenario erscheint wahrscheinlich, aber Dunkle Materie ist noch nicht direkt beobachtet worden



LSP, axion, WIMP, MACHO, ELKO, ...

Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

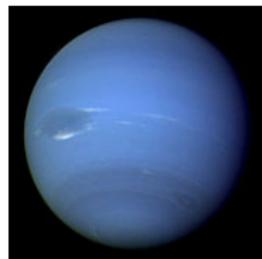
Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden
- ▶ Neptun-Szenario erscheint wahrscheinlich, aber Dunkle Materie ist noch nicht direkt beobachtet worden
- ▶ Disput, welches Szenario in der Natur tatsächlich auftritt



vs.



Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

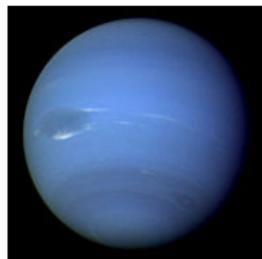
Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden
- ▶ Neptun-Szenario erscheint wahrscheinlich, aber Dunkle Materie ist noch nicht direkt beobachtet worden
- ▶ Disput, welches Szenario in der Natur tatsächlich auftritt



vs.



Mögliche Strategien um weiterzukommen:

- ▶ Zeige dass Vulcan-Szenario stimmt (z.B. mit überzeugender Theorie)
- ▶ Zeige dass Neptun-Szenario stimmt (z.B. mit LHC)

Beide Strategien sind derzeit noch ausser Reichweite!

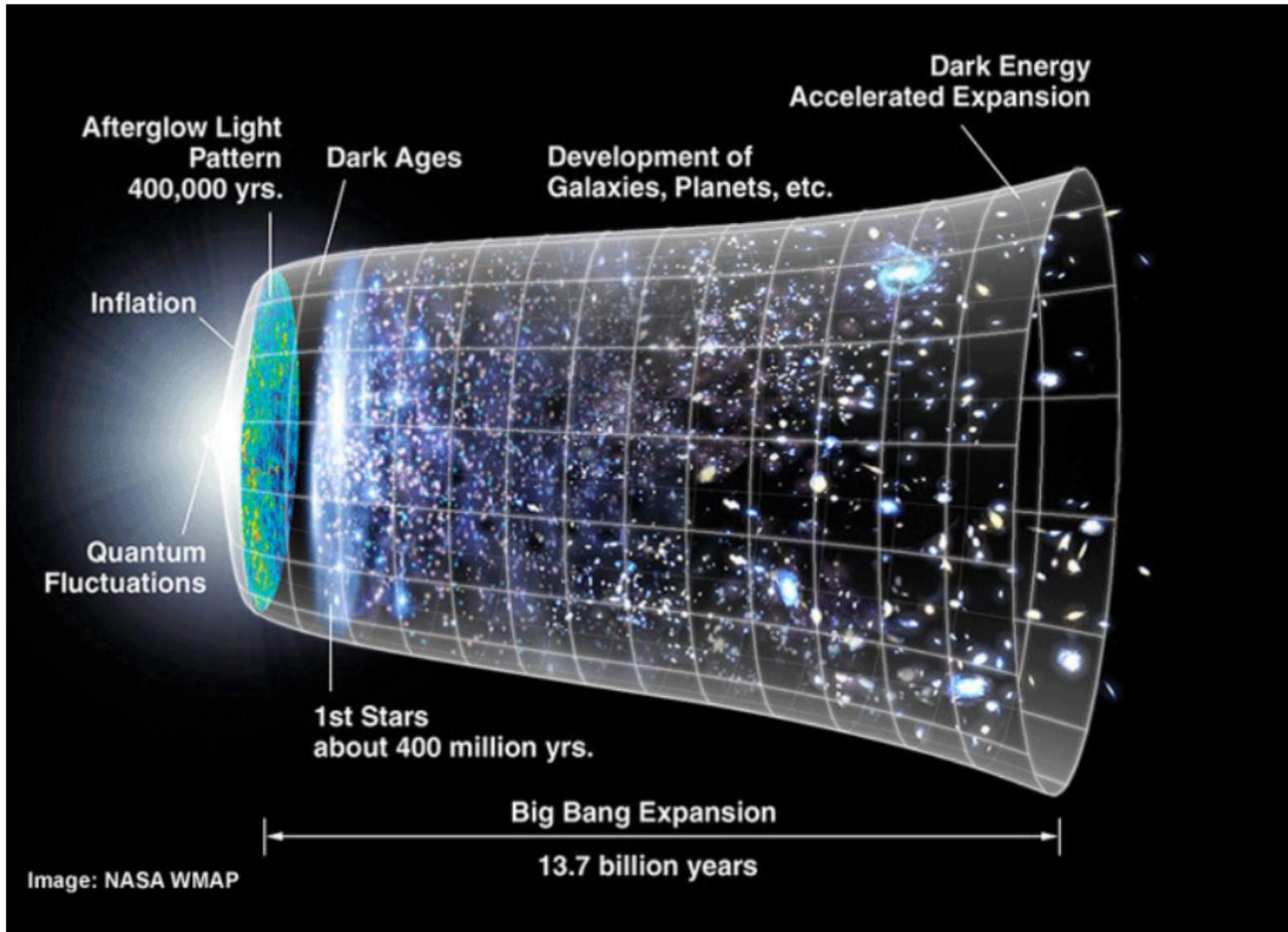


Image: NASA WMAP

Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante Λ für statisches Universum

Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante Λ für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien

Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante Λ für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB, $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB

Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante Λ für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB, $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB
- ▶ Dicke 1969: Warum ist das Universum so flach?
- ▶ Erklärung durch Guth 1980: Inflation!

Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante Λ für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB, $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB
- ▶ Dicke 1969: Warum ist das Universum so flach?
- ▶ Erklärung durch Guth 1980: Inflation!

Vorhersage von Inflation: Universum hat kritische Dichte

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{Materie}} + \Omega_{\text{Dunkle Materie}} + \Omega_{\Lambda} = 100\% \Omega_{\text{kritisch}}$$

Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante Λ für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB, $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB
- ▶ Dicke 1969: Warum ist das Universum so flach?
- ▶ Erklärung durch Guth 1980: Inflation!

Vorhersage von Inflation: Universum hat kritische Dichte

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{Materie}} + \Omega_{\text{Dunkle Materie}} + \Omega_{\Lambda} = 100\% \Omega_{\text{kritisch}}$$

Unabhängige Messungen (Galaxien, Cluster, Strukturformation, ...):

$$\Omega_{\text{Materie}} \approx 5\% \quad \Omega_{\text{Dunkle Materie}} < 35\%$$

Preisfrage: Wo sind die restlichen 60-70% im Budget???



S. Perlmutter



B. Schmidt



A. Riess

Für die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein
- ▶ Alle experimentellen Daten im Einklang mit der Tatsache, dass etwa 70% der Energie des heutigen Universums “Dunkle Energie” sind

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein
- ▶ Alle experimentellen Daten im Einklang mit der Tatsache, dass etwa 70% der Energie des heutigen Universums “Dunkle Energie” sind
- ▶ Zum ersten Mal in Geschichte der Kosmologie ergeben alle Daten Sinn

Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein
- ▶ Alle experimentellen Daten im Einklang mit der Tatsache, dass etwa 70% der Energie des heutigen Universums “Dunkle Energie” sind
- ▶ Zum ersten Mal in Geschichte der Kosmologie ergeben alle Daten Sinn
- ▶ Alles geklärt?

Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus

Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich “Dunkler Energie”

Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich “Dunkler Energie”
- ▶ Universum ist instabil und wird irgendwann zerfallen

Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

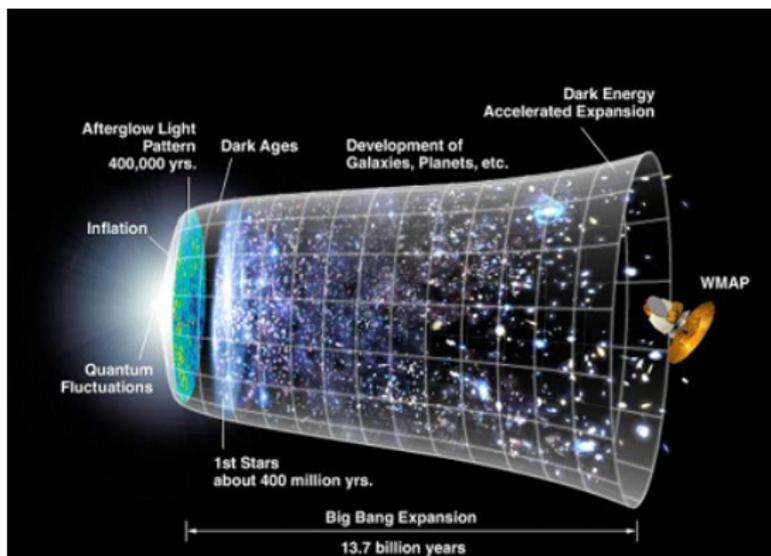
Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich "Dunkler Energie"
- ▶ Universum ist instabil und wird irgendwann zerfallen
- ▶ Kosmologische Konstante unglaublich klein: 10^{-123}

Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich "Dunkler Energie"
- ▶ Universum ist instabil und wird irgendwann zerfallen
- ▶ Kosmologische Konstante unglaublich klein: 10^{-123}
- ▶ Bisher einzige Erklärung der kosmologischen Konstante: Multiversum



Weinberg's anthropisches Argument

Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

Weinberg's anthropisches Argument

Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viele Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante

Weinberg's anthropisches Argument

Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viele Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist

Weinberg's anthropisches Argument

Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viele Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist
- ▶ Deshalb kann die kosmologische Konstante nicht zu gross sein

Weinberg's anthropisches Argument

Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viele Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist
- ▶ Deshalb kann die kosmologische Konstante nicht zu gross sein

Mit diesen Argumenten hat Weinberg die richtige Grössenordnung der kosmologischen Konstante vorhergesagt vor ihrer Entdeckung durch Perlmutter, Riess und Schmidt im Jahr 1998

Keine andere (“echte”) Erklärung ist davor oder seither gefunden worden, trotz vieler beherzter Versuche

Weinberg's anthropisches Argument

Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viele Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist
- ▶ Deshalb kann die kosmologische Konstante nicht zu gross sein

Mit diesen Argumenten hat Weinberg die richtige Grössenordnung der kosmologischen Konstante vorhergesagt vor ihrer Entdeckung durch Perlmutter, Riess und Schmidt im Jahr 1998

Keine andere ("echte") Erklärung ist davor oder seither gefunden worden, trotz vieler beherzter Versuche

Vielleicht können wir nicht alle Konstanten vorhersagen...

Beispiel: Titius-Bode "Gesetz" für grosse Bahnhälften vermutlich nur Zufall

Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden

Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts, $\Lambda \approx 10^{-123}$

Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts, $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente

Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts, $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung

Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts, $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung
- ▶ Vermutlich wäre jeder glücklich über eine nicht-anthropische Erklärung der kosmologischen Konstante und einer eindeutigen Herleitung der Standardmodelle aus Stringtheorie

Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts, $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung
- ▶ Vermutlich wäre jeder glücklich über eine nicht-anthropische Erklärung der kosmologischen Konstante und einer eindeutigen Herleitung der Standardmodelle aus Stringtheorie
- ▶ Wenn aber keine Erklärung dieser Art existiert müssen wir die Realität der “Landscape” akzeptieren

Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts, $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung
- ▶ Vermutlich wäre jeder glücklich über eine nicht-anthropische Erklärung der kosmologischen Konstante und einer eindeutigen Herleitung der Standardmodelle aus Stringtheorie
- ▶ Wenn aber keine Erklärung dieser Art existiert müssen wir die Realität der “Landscape” akzeptieren

Anzeichen sprechen dafür, dass wir gerade einen Paradigmenwechsel erleben

Schlusswort von Steven Weinberg

‘About the multiverse, it is appropriate to keep an open mind, and opinions among scientists differ widely. In the Austin airport on the way to this meeting I noticed for sale the October issue of a magazine called Astronomy, having on the cover the headline “Why You Live in Multiple Universes.” Inside I found a report of a discussion at a conference at Stanford, at which Martin Rees said that he was sufficiently confident about the multiverse to bet his dog’s life on it, while Andrei Linde said he would bet his own life.’

‘About the multiverse, it is appropriate to keep an open mind, and opinions among scientists differ widely. In the Austin airport on the way to this meeting I noticed for sale the October issue of a magazine called Astronomy, having on the cover the headline “Why You Live in Multiple Universes.” Inside I found a report of a discussion at a conference at Stanford, at which Martin Rees said that he was sufficiently confident about the multiverse to bet his dog’s life on it, while Andrei Linde said he would bet his own life.’

‘As for me, I have just enough confidence about the multiverse to bet the lives of both Andrei Linde and Martin Rees’s dog.’

Ausblick

Wie geht es weiter?

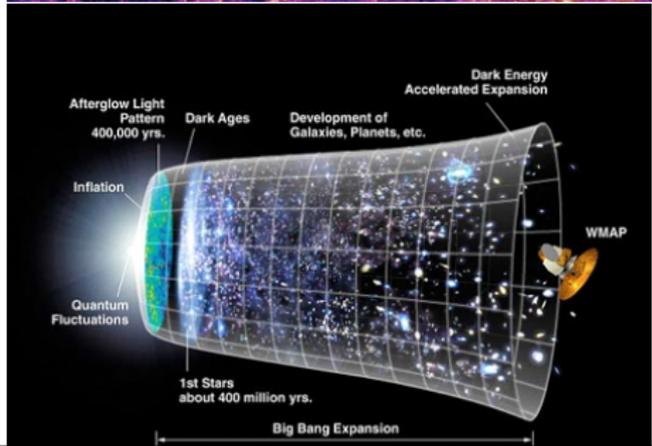
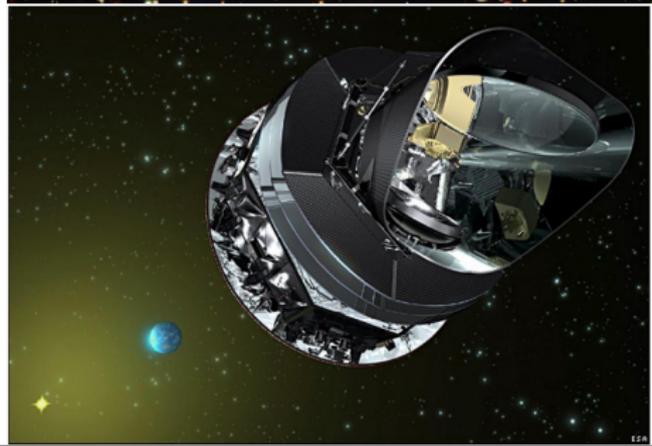
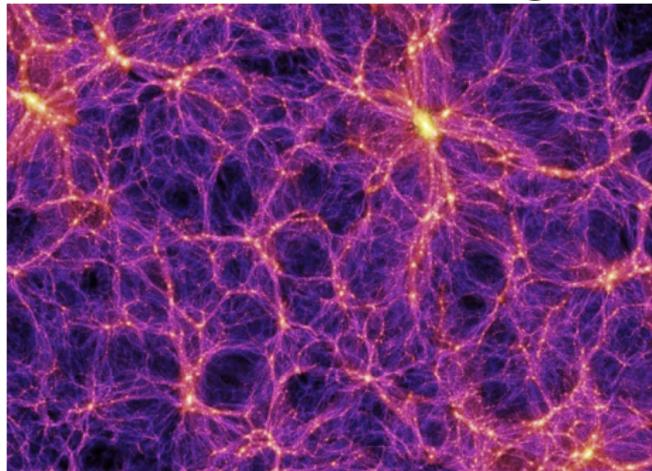
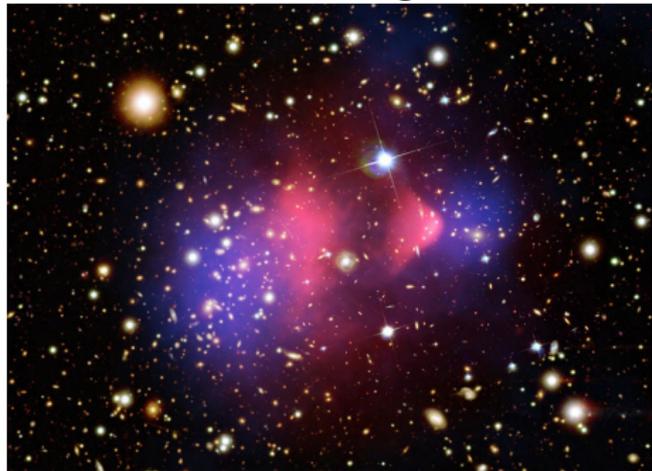
Wie geht es weiter?

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

Dunkle Energie

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie