

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

Daniel Grumiller

Institut für Theoretische Physik
TU Wien

VHS, Planetarium Wien
März 2021



Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie

Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie

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”

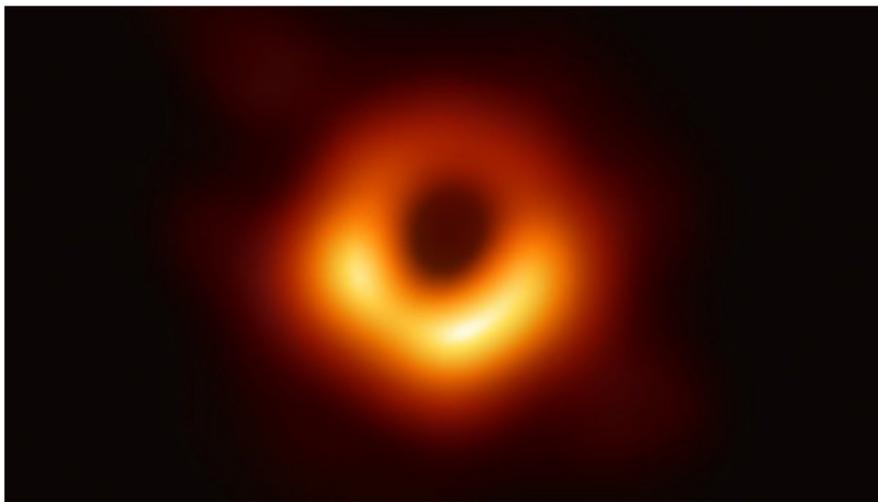
Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

Schwarze Löcher — Phantasie und Wirklichkeit

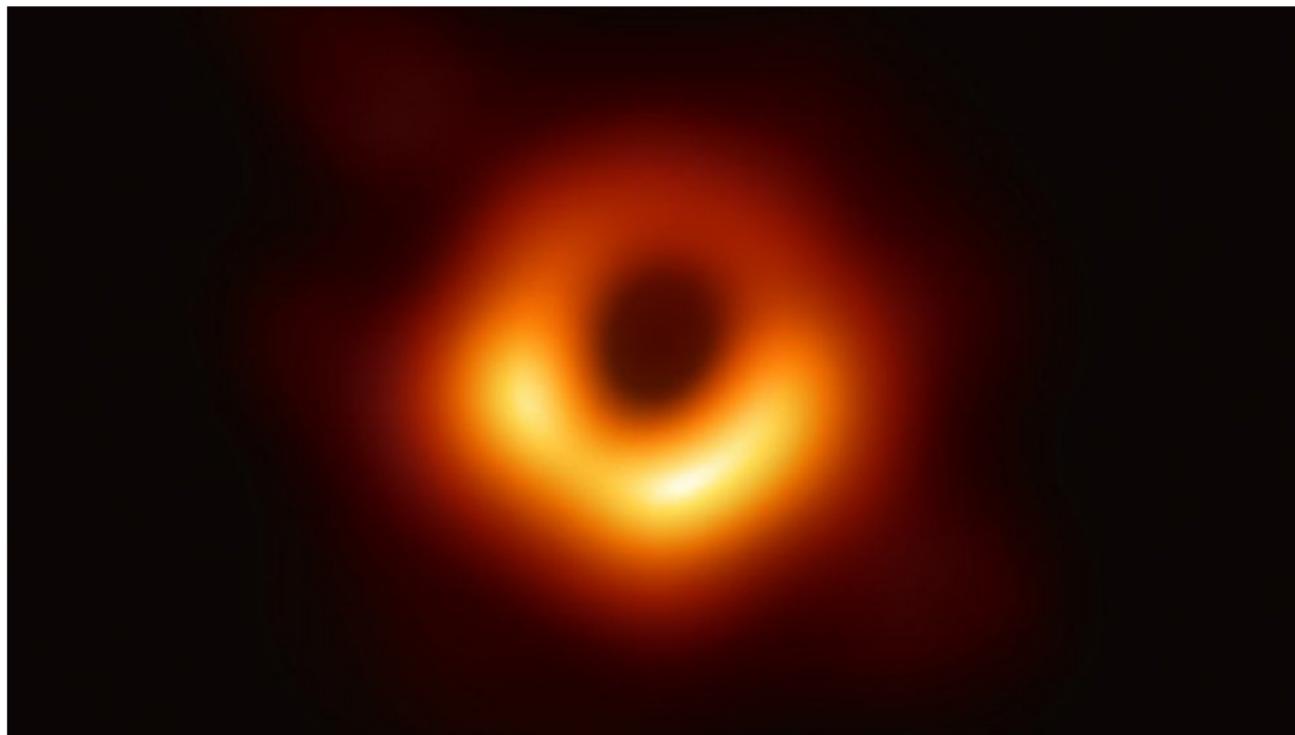
Schwarzes Loch,
Computersimulation



Schwarzes Loch, Foto

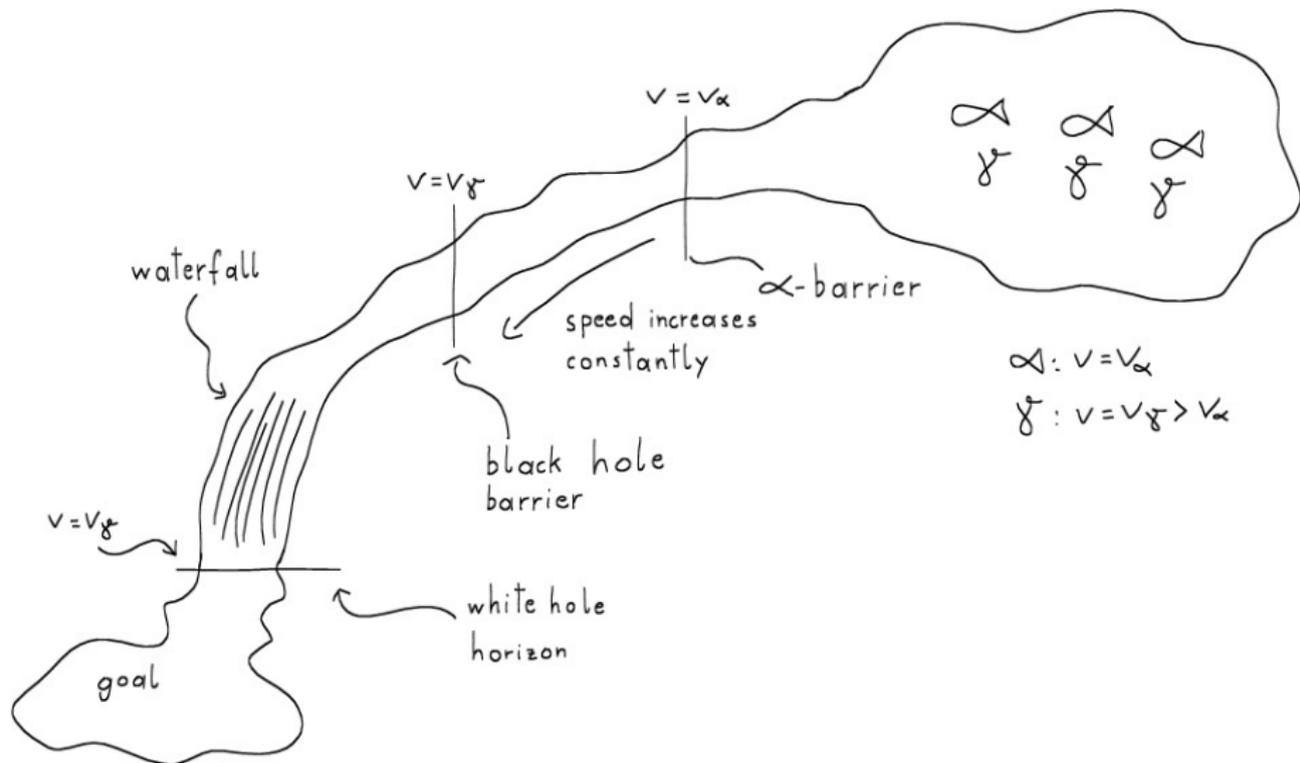


Was ist ein Schwarzes Loch?



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)

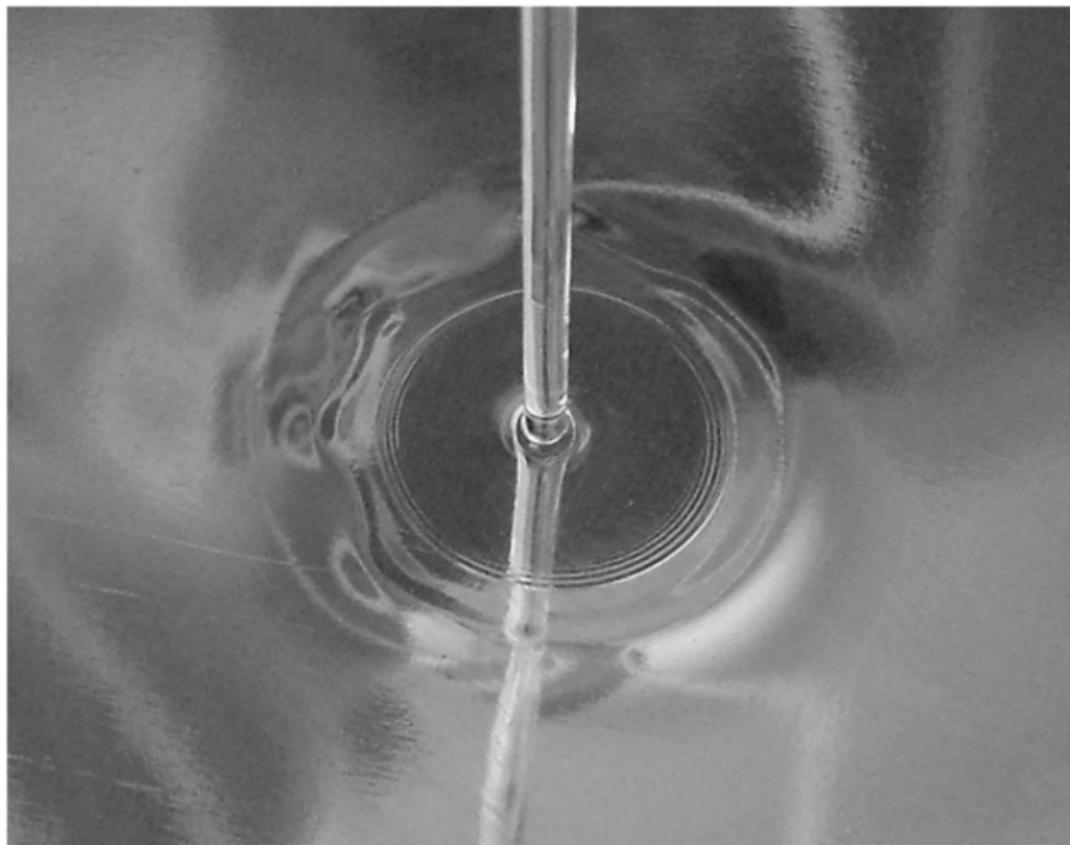
Fischanalogie



Schwarzes Loch: Bereich ohne Entkommen!

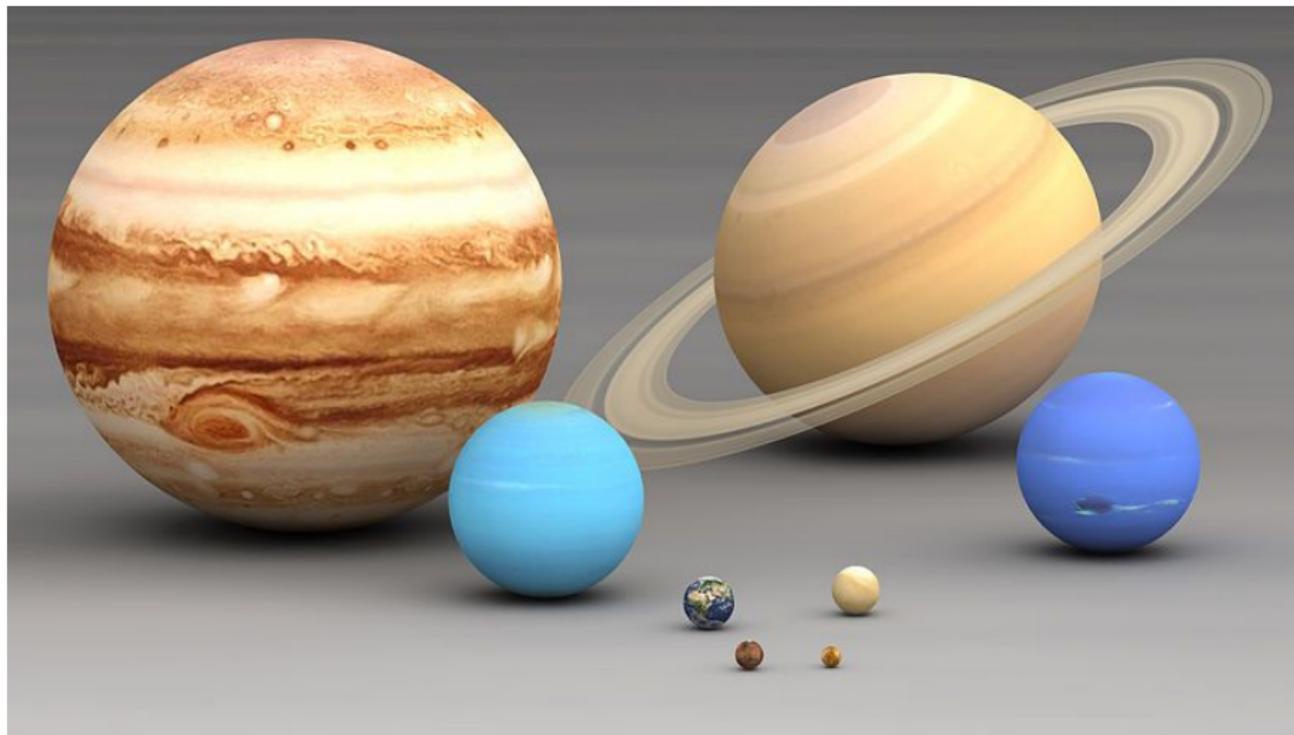


Weisses Loch: Bereich erzwungenen Entkommens



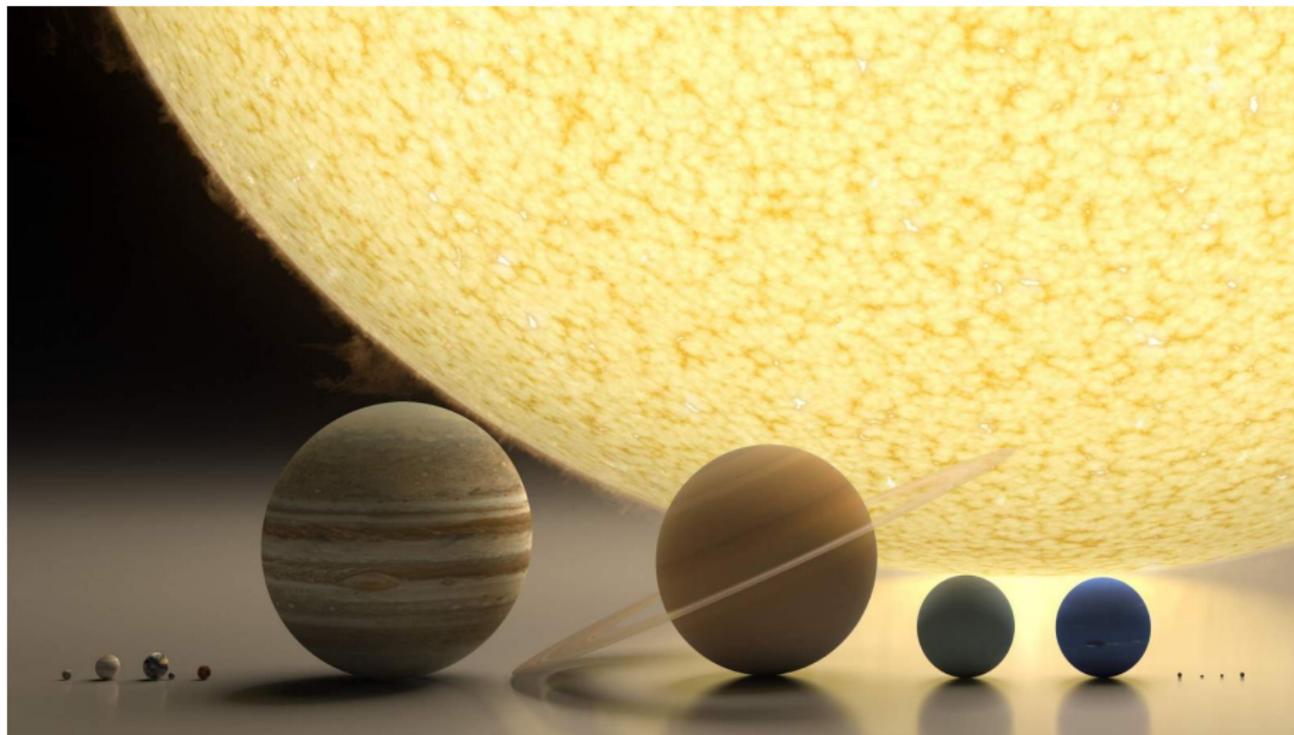
Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

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



Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

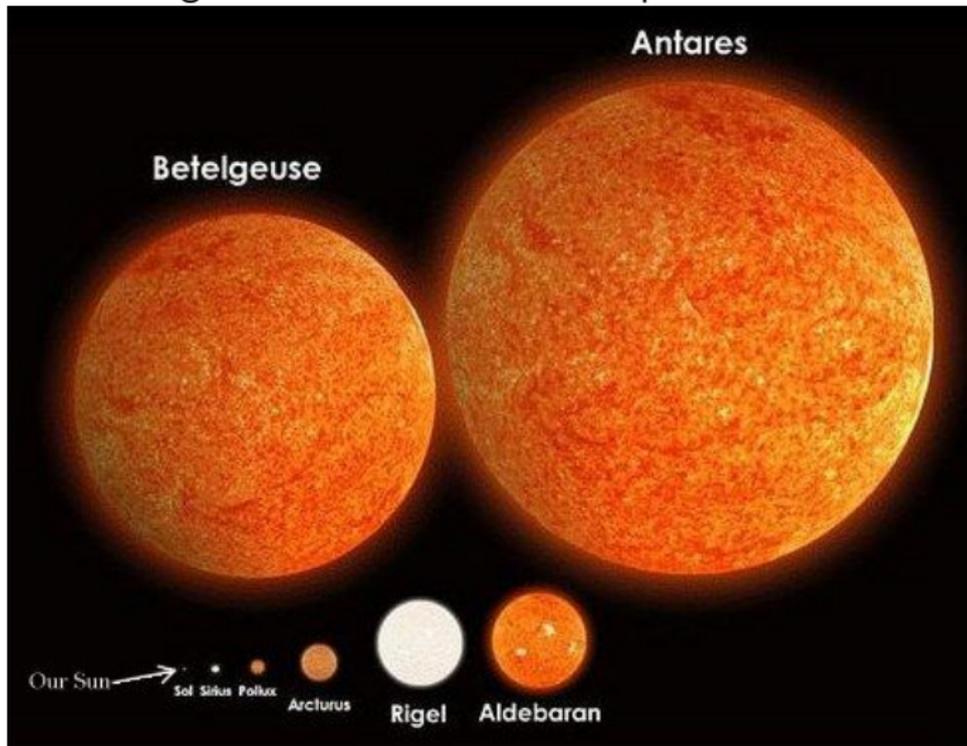
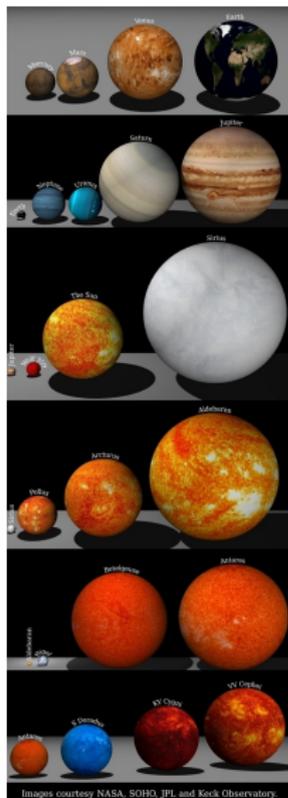
Sterne: leichte (Wasserstoff und Helium) Elemente



Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Sterne: leichte (Wasserstoff und Helium) Elemente

Größenvergleich diverser Himmelskörper

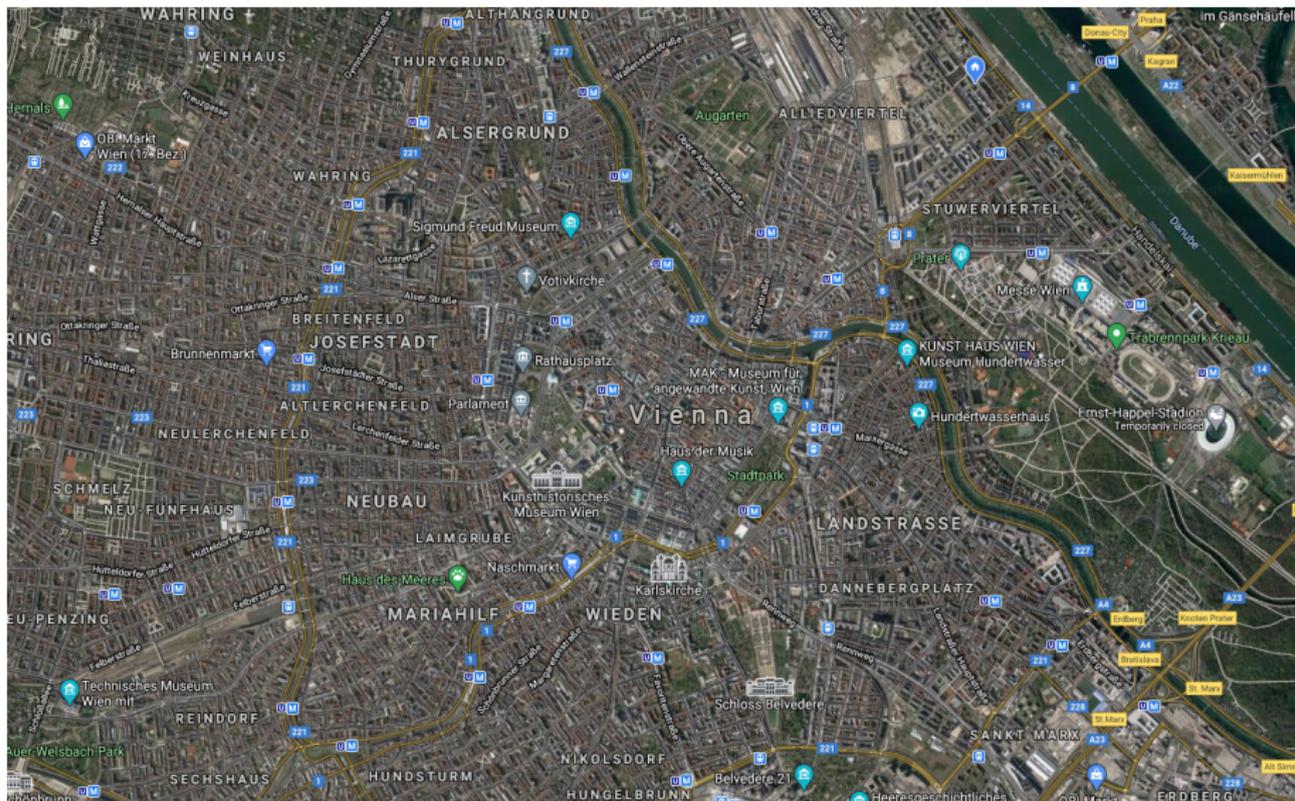


Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Schwarzes Loch: nichts (außer Raum und Zeit)

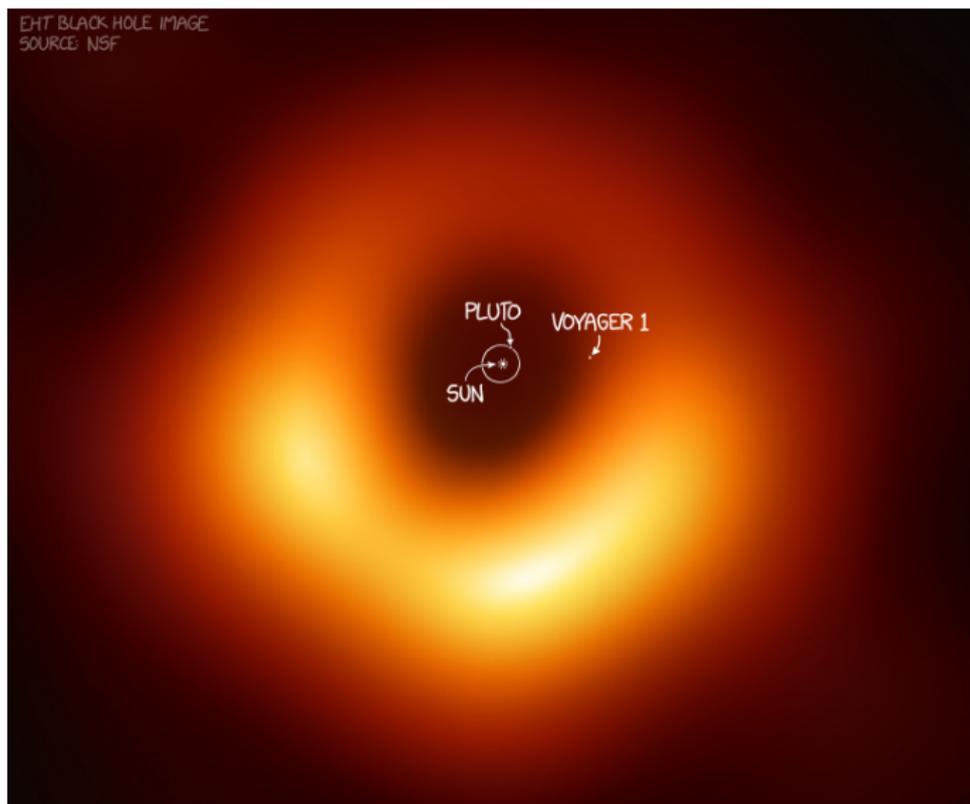
Wie groß ist ein Schwarzes Loch? (ein paar Kilometer)

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





Roger Penrose

Theorie Schwarzer
Löcher



Andrea Ghez

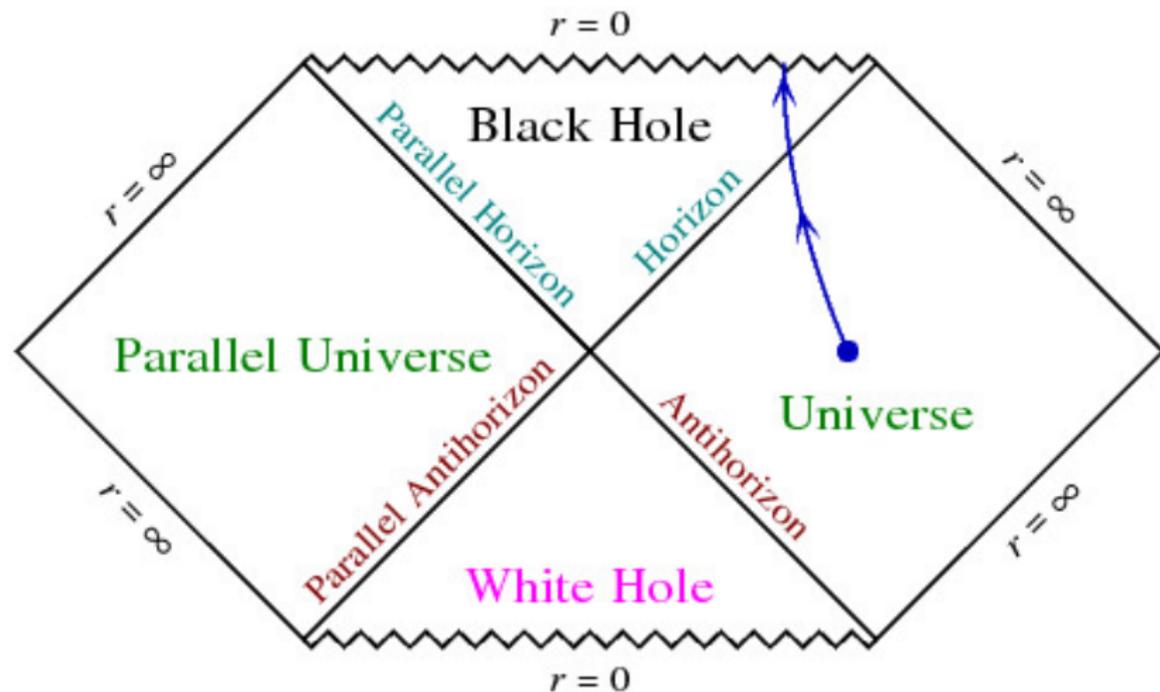
Beobachtung des Schwarzen Lochs im Zentrum
der Milchstrasse



Reinhard Genzel

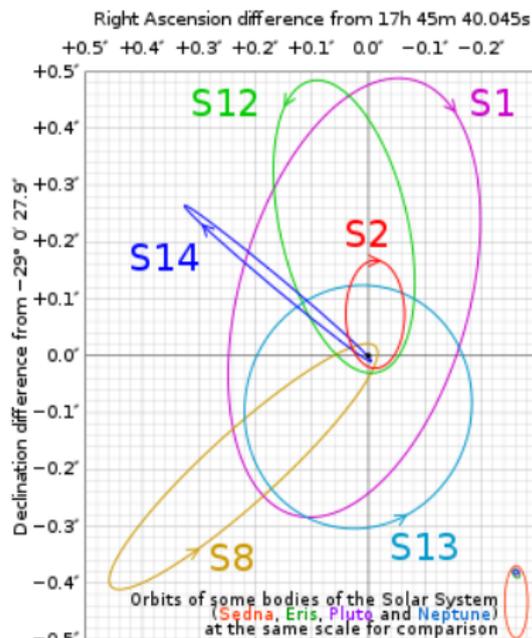
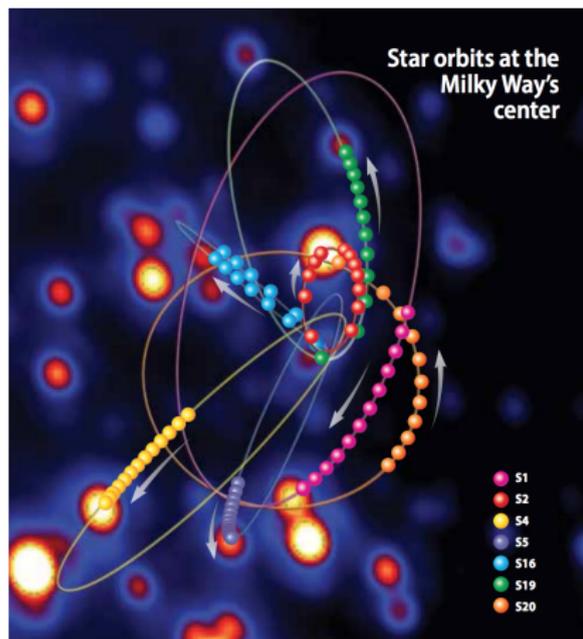
Roger Penrose:

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



Andrea Ghez und Reinhard Genzel:

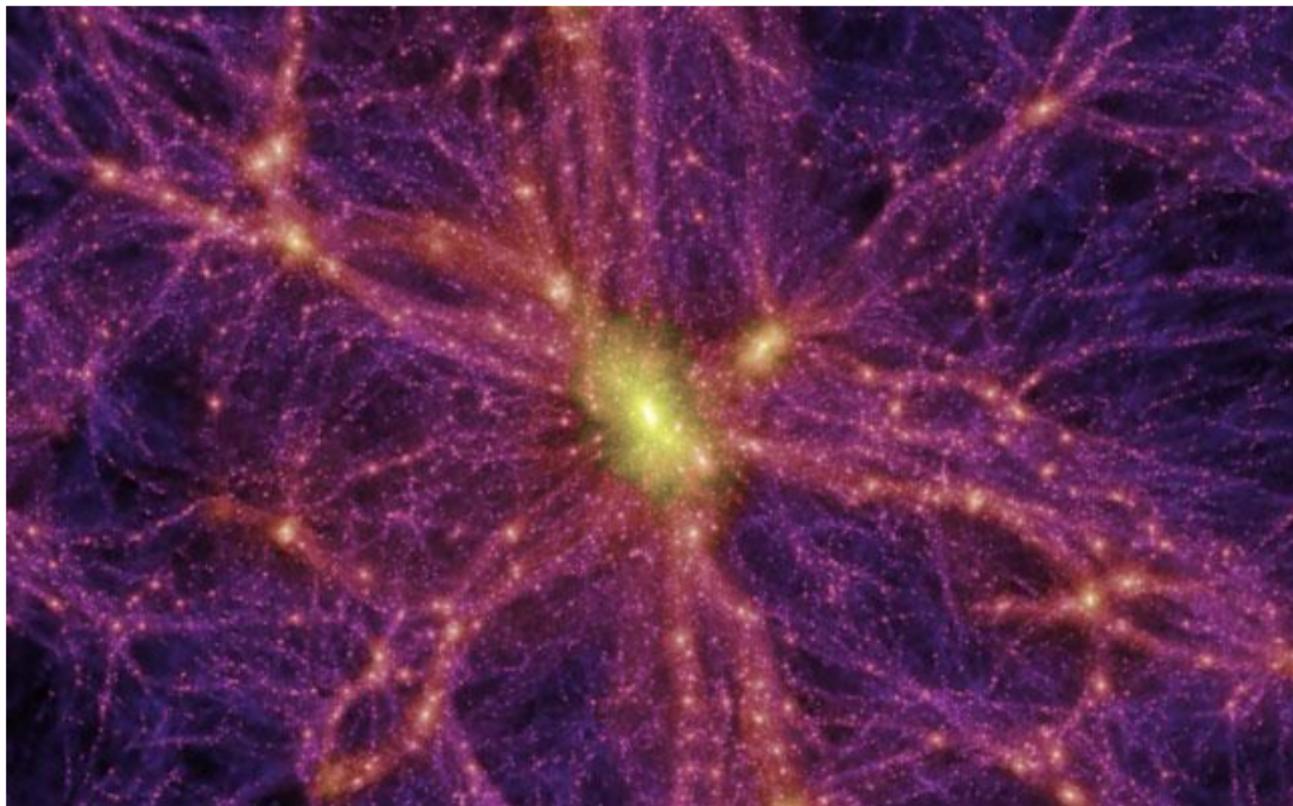
Haben supermassives Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstrasse entdeckt.



Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie



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

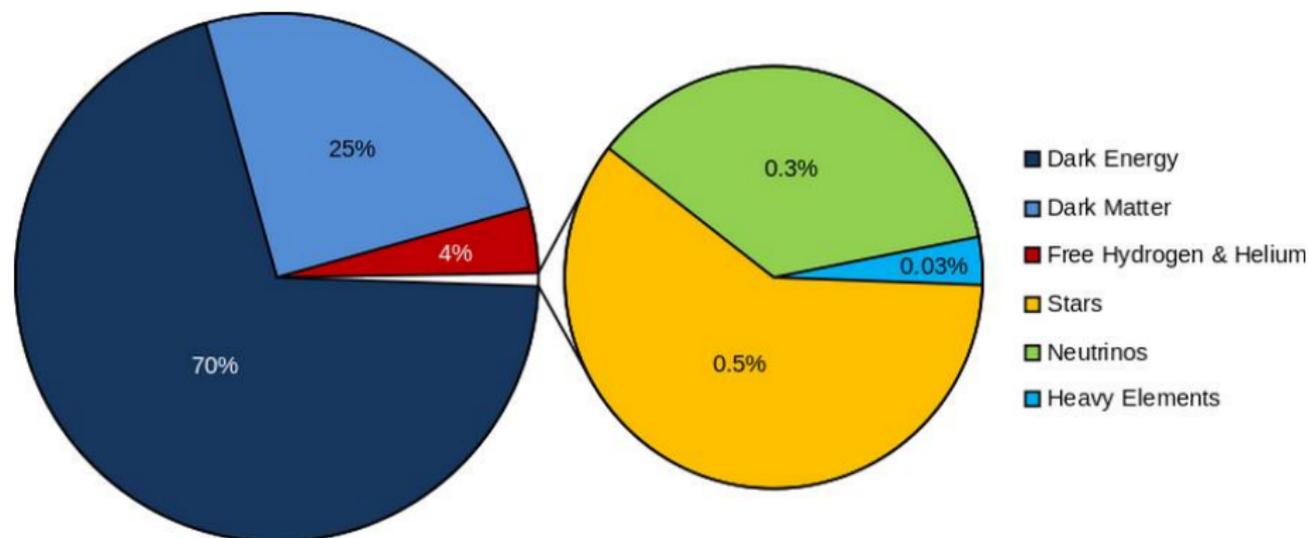
- ▶ Standard Modelle der Teilchenphysik und Kosmologie (inkl. ART) konsistent mit fast Allem was wir in der Natur beobachten

Fehlt noch etwas?



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

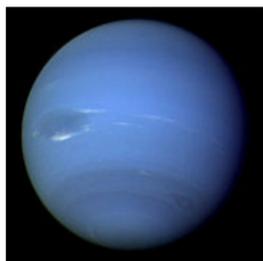
...oder eine Modifikation der Einsteinschen Theorie



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

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

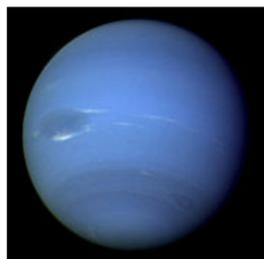


(picture by NASA)

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

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

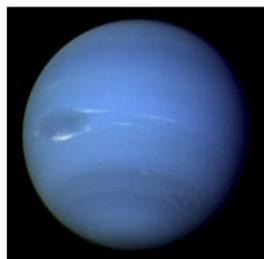


(picture by NASA)

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

Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

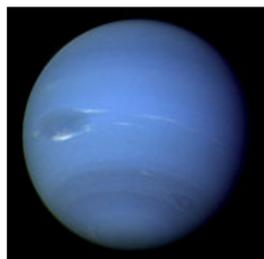


(picture by NASA)

- ▶ 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:

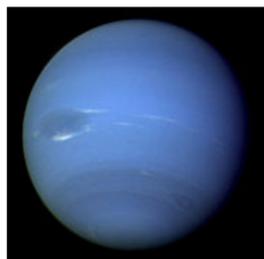


(picture by NASA)

- ▶ 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:



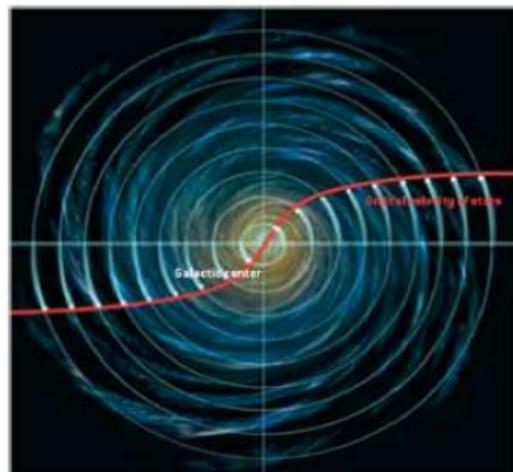
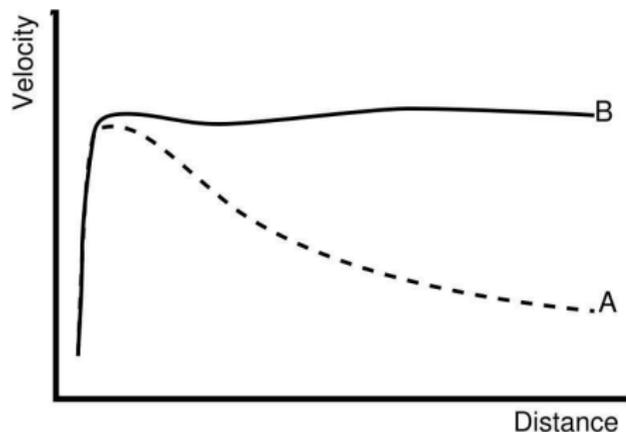
Vera Rubin (hier als Studentin, 1940)

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



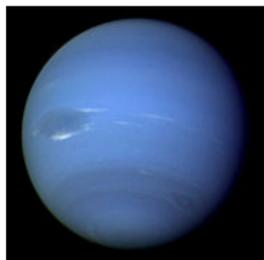
MOND, TeVeS, modifizierte Gravitationstheorien, ...

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, ...

Leichtester Kandidat für Dunkle Materie: leichter als ein Neutrino

Schwerster Kandidat für Dunkle Materie: schwerer als die Sonne

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

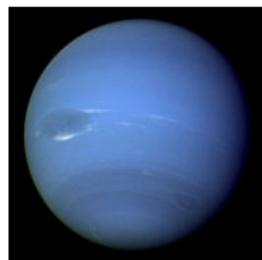
Was ist Dunkle Materie?

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?

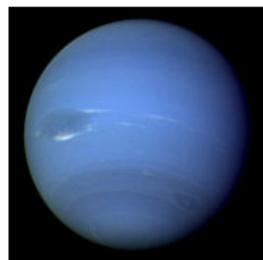
Was ist Dunkle Materie?

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:

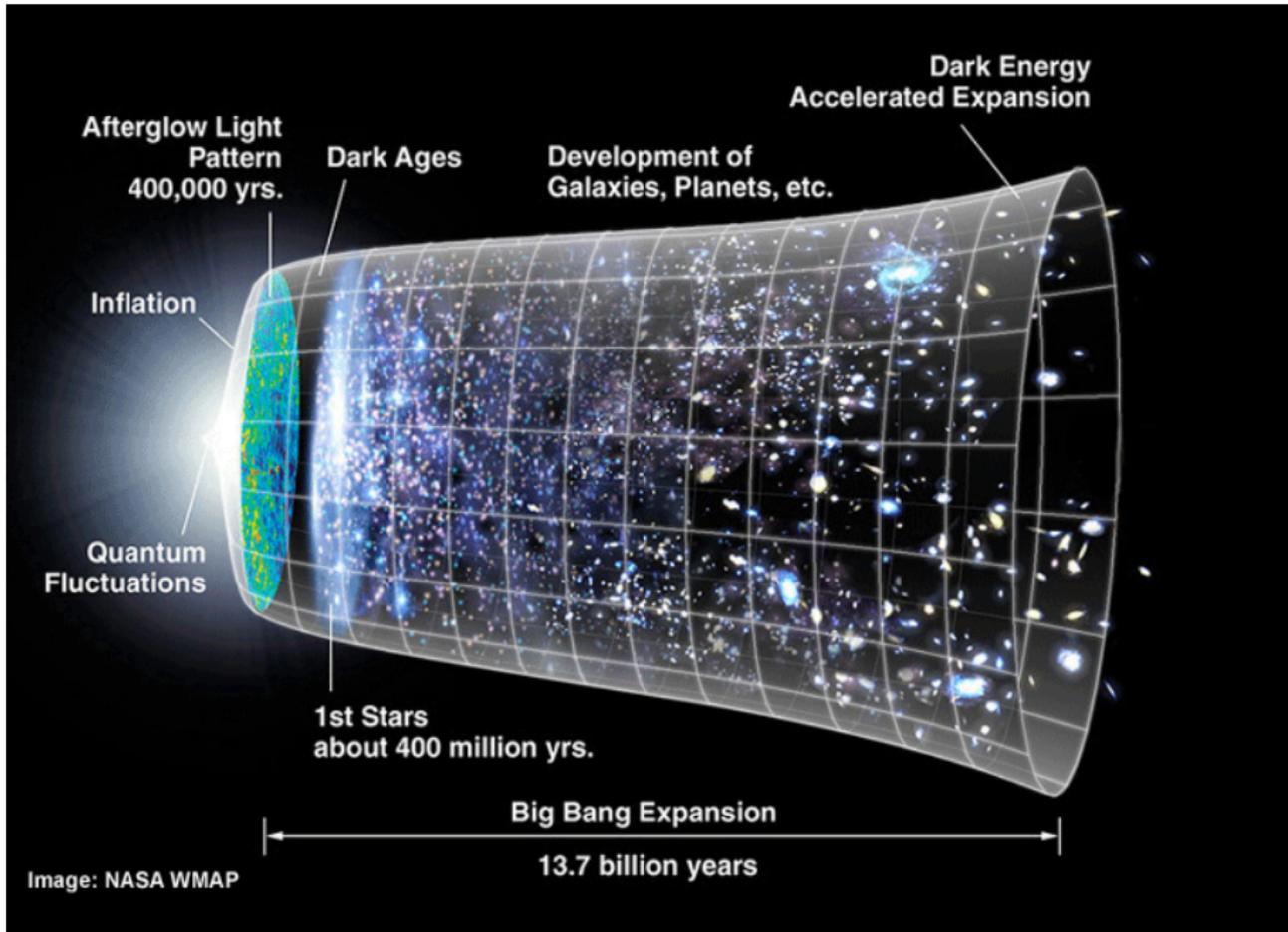
- ▶ Zeige dass Vulcan-Szenario stimmt (z.B. mit überzeugender Theorie)
- ▶ Zeige dass Neptun-Szenario stimmt (z.B. mit LHC)

Beide Strategien sind derzeit noch ausser Reichweite!

Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie



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 **Stimmt nicht mehr ganz — aktuell gibt es “Hubble tension” Diskrepanz zwischen verschiedenen Messungen der Hubblekonstante**

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

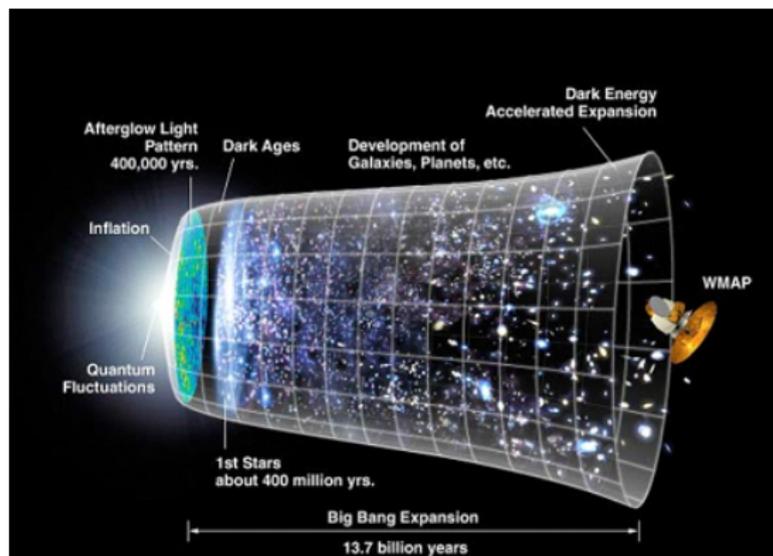
Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ 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...

Schlusswort von Steven Weinberg

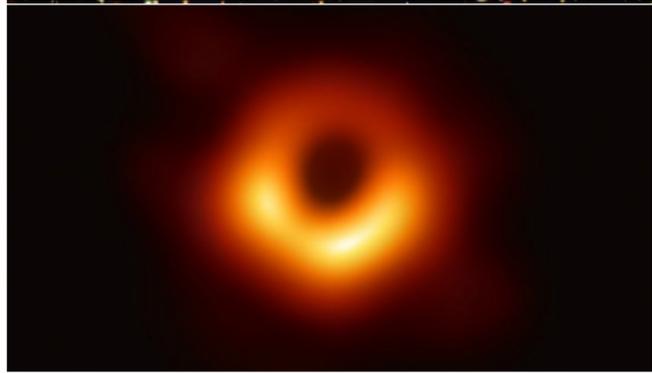
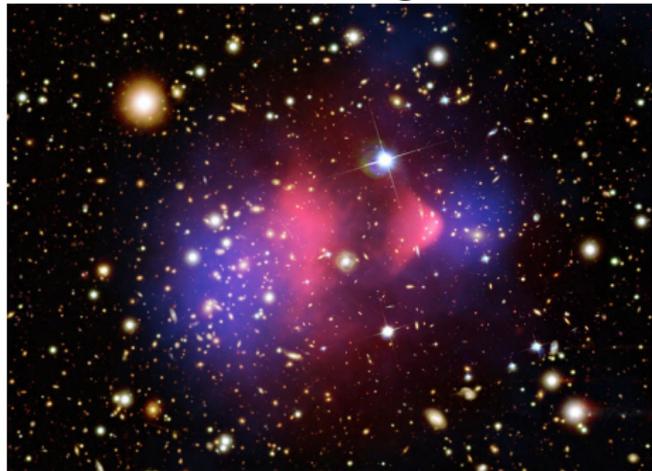
‘About the multiverse, it is appropriate to keep an open mind, and opinions among scientists differ widely. In the Austin airport on the way to this meeting I noticed for sale the October issue of a magazine called Astronomy, having on the cover the headline “Why You Live in Multiple Universes.” Inside 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.’

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.’

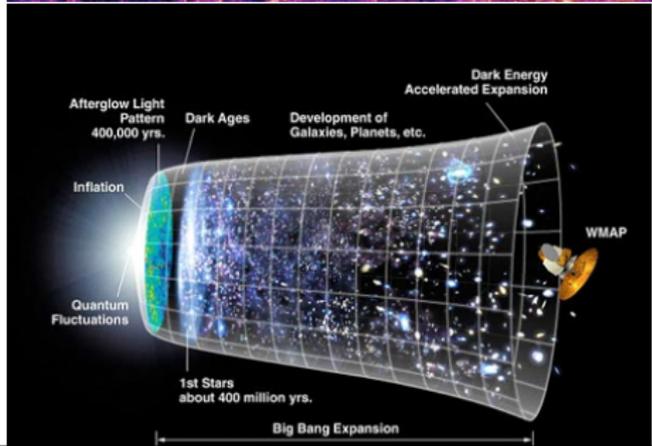
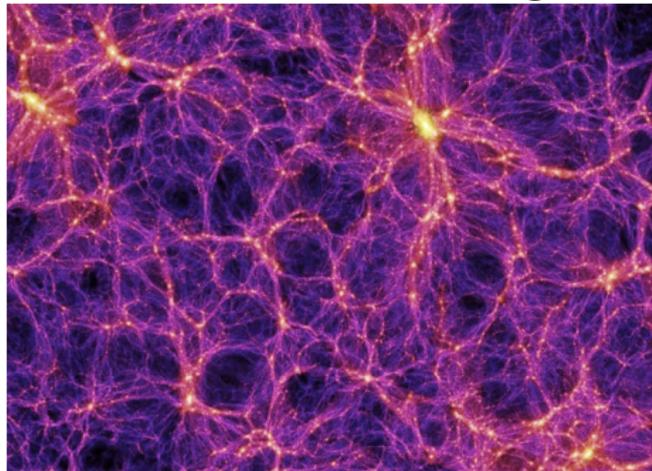
‘As for me, I have just enough confidence about the multiverse to bet the lives of both Andrei Linde and Martin Rees’s dog.’

Ich hoffe es hat Ihnen gefallen...



Vorschau: Mai 2022 Schwarze Loch Euro Münze

...noch Fragen?



Dunkle Energie