

Kosmologie

Teil V: Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Daniel Grumiller

Institut für Theoretische Physik
TU Wien

VHS, Planetarium Wien
April 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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

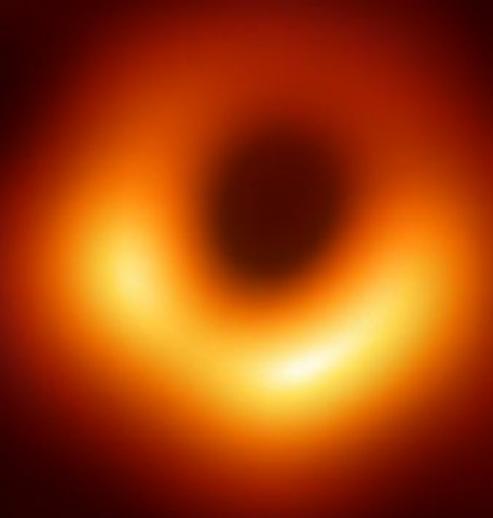
Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie



Erstes Photo des Schatten eines Schwarzen Loches

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

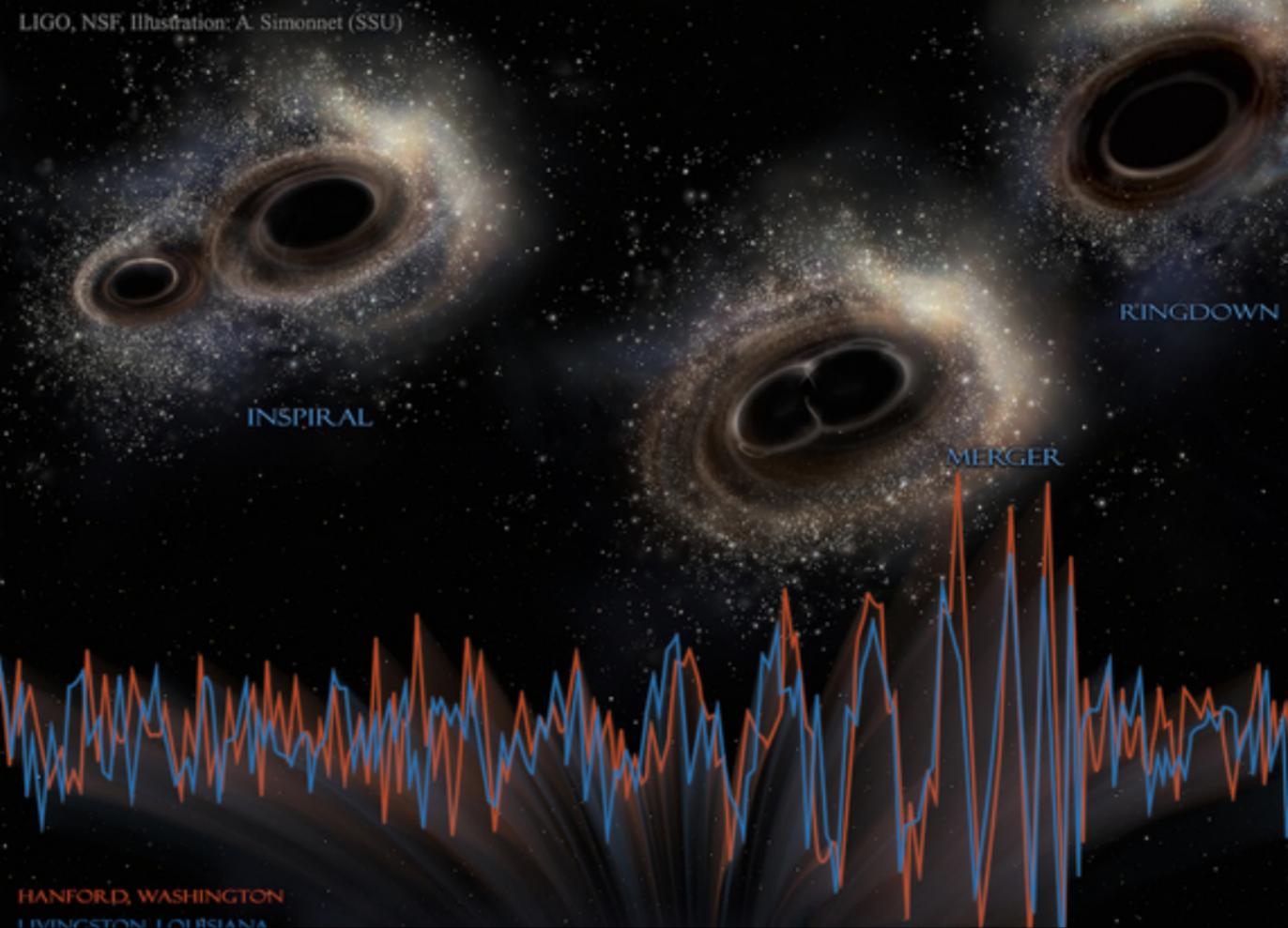
Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie



HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie

Motivation für Inflation

Probleme der klassischen Urknalltheorie

- ▶ Warum ist Universum so homogen und isotrop?
 - ▶ Wird auch als “Horizontproblem” bezeichnet
 - ▶ Verschiedene Bereiche des kosmischen Mikrowellenhintergrunds waren nicht in kausalem Kontakt — warum sieht man trotzdem überall dieselbe Temperatur?

Motivation für Inflation

Probleme der klassischen Urknalltheorie

- ▶ Warum ist Universum so homogen und isotrop?
 - ▶ Wird auch als “Horizontproblem” bezeichnet
 - ▶ Verschiedene Bereiche des kosmischen Mikrowellenhintergrunds waren nicht in kausalem Kontakt — warum sieht man trotzdem überall dieselbe Temperatur?
- ▶ Warum ist Universum so flach?
 - ▶ Da das Universum heute räumlich sehr flach ist, muss es früher (relativ gesehen) noch wesentlich flacher gewesen sein; warum ist das so?
 - ▶ Klassische Urknalltheorie braucht hier ein finetuning von mehr als 16 Größenordnungen!

Motivation für Inflation

Probleme der klassischen Urknalltheorie

- ▶ Warum ist Universum so homogen und isotrop?
 - ▶ Wird auch als “Horizontproblem” bezeichnet
 - ▶ Verschiedene Bereiche des kosmischen Mikrowellenhintergrunds waren nicht in kausalem Kontakt — warum sieht man trotzdem überall dieselbe Temperatur?
- ▶ Warum ist Universum so flach?
 - ▶ Da das Universum heute räumlich sehr flach ist, muss es früher (relativ gesehen) noch wesentlich flacher gewesen sein; warum ist das so?
 - ▶ Klassische Urknalltheorie braucht hier ein finetuning von mehr als 16 Größenordnungen!
- ▶ Warum gibt es so wenig exotische Überbleibsel aus frühem Universum?
 - ▶ Warum keine/so wenig magnetischen Monopole?
 - ▶ Warum keine/so wenig exotischen Teilchen?

Motivation für Inflation

Probleme der klassischen Urknalltheorie

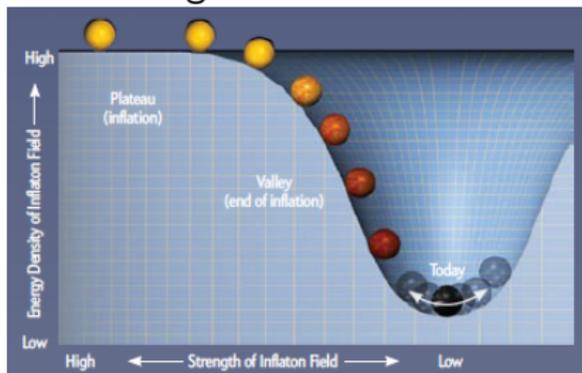
- ▶ Warum ist Universum so homogen und isotrop?
 - ▶ Wird auch als “Horizontproblem” bezeichnet
 - ▶ Verschiedene Bereiche des kosmischen Mikrowellenhintergrunds waren nicht in kausalem Kontakt — warum sieht man trotzdem überall dieselbe Temperatur?
- ▶ Warum ist Universum so flach?
 - ▶ Da das Universum heute räumlich sehr flach ist, muss es früher (relativ gesehen) noch wesentlich flacher gewesen sein; warum ist das so?
 - ▶ Klassische Urknalltheorie braucht hier ein finetuning von mehr als 16 Größenordnungen!
- ▶ Warum gibt es so wenig exotische Überbleibsel aus frühem Universum?
 - ▶ Warum keine/so wenig magnetischen Monopole?
 - ▶ Warum keine/so wenig exotischen Teilchen?

Inflation löst diese Probleme (Starobinsky, Guth, Linde)

Slow-Roll Inflation

Schematischer Mechanismus: langsam rollende Kugel bei starker Reibung

“Urknall” ganz links im Bild:



- ▶ Terminologie: Inflaton=Teilchen dessen Quantenfeld Inflation generiert

Umfassende Enzyklopädie von Inflationsmodellen:

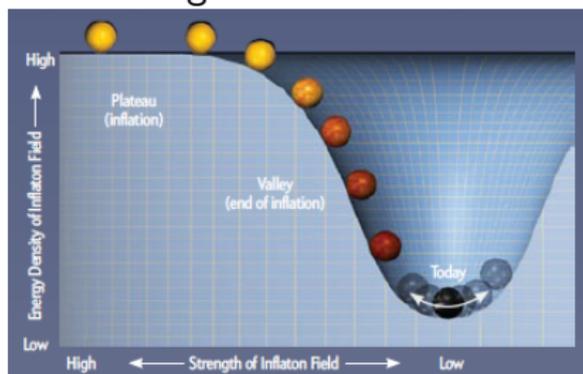
<https://arxiv.org/abs/1303.3787>

(ca. 50 Klassen von Modellen und deren Vorhersagen diskutiert)

Slow-Roll Inflation

Schematischer Mechanismus: langsam rollende Kugel bei starker Reibung

“Urknall” ganz links im Bild:



- ▶ Terminologie: Inflaton=Teilchen dessen Quantenfeld Inflation generiert
- ▶ Beispiel: Inflaton=einzelnes Skalarfeld (z.B. Higgs)

Umfassende Enzyklopädie von Inflationsmodellen:

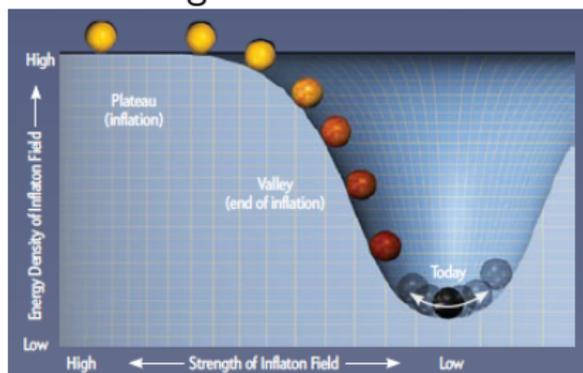
<https://arxiv.org/abs/1303.3787>

(ca. 50 Klassen von Modellen und deren Vorhersagen diskutiert)

Slow-Roll Inflation

Schematischer Mechanismus: langsam rollende Kugel bei starker Reibung

“Urknall” ganz links im Bild:



- ▶ Terminologie: Inflaton=Teilchen dessen Quantenfeld Inflation generiert
- ▶ Beispiel: Inflaton=einzelnes Skalarfeld (z.B. Higgs)
- ▶ Terminologie: “slow roll”=Teilchen ‘rollt’ langsam im Potenzial herab

Umfassende Enzyklopädie von Inflationsmodellen:

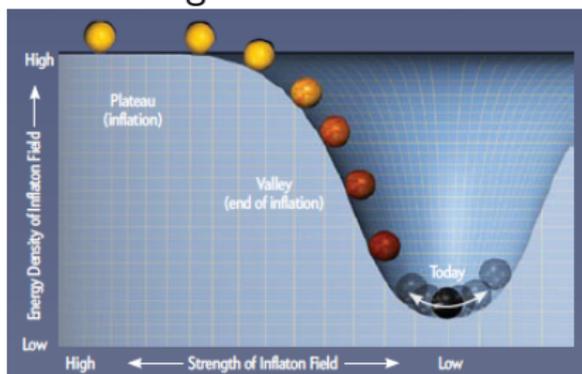
<https://arxiv.org/abs/1303.3787>

(ca. 50 Klassen von Modellen und deren Vorhersagen diskutiert)

Slow-Roll Inflation

Schematischer Mechanismus: langsam rollende Kugel bei starker Reibung

“Urknall” ganz links im Bild:



Umfassende Enzyklopädie von Inflationsmodellen:

<https://arxiv.org/abs/1303.3787>

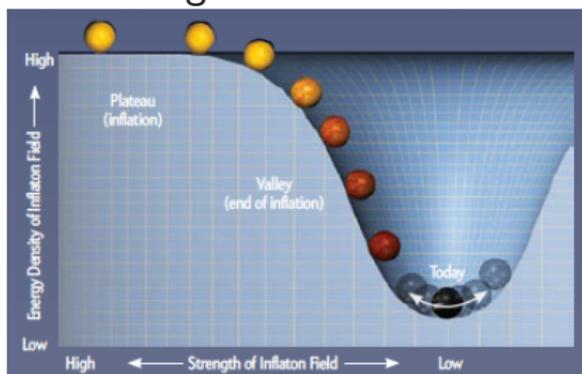
(ca. 50 Klassen von Modellen und deren Vorhersagen diskutiert)

- ▶ Terminologie: Inflaton=Teilchen dessen Quantenfeld Inflation generiert
- ▶ Beispiel: Inflaton=einzelnes Skalarfeld (z.B. Higgs)
- ▶ Terminologie: “slow roll”=Teilchen ‘rollt’ langsam im Potenzial herab
- ▶ Solange slow-roll gute Näherung: kinetische Energie vernachlässigbar; potenzielle Energie wie kosmologische Konstante: exponentielle Ausdehnung des Universums

Slow-Roll Inflation

Schematischer Mechanismus: langsam rollende Kugel bei starker Reibung

“Urknall” ganz links im Bild:



Umfassende Enzyklopädie von Inflationsmodellen:

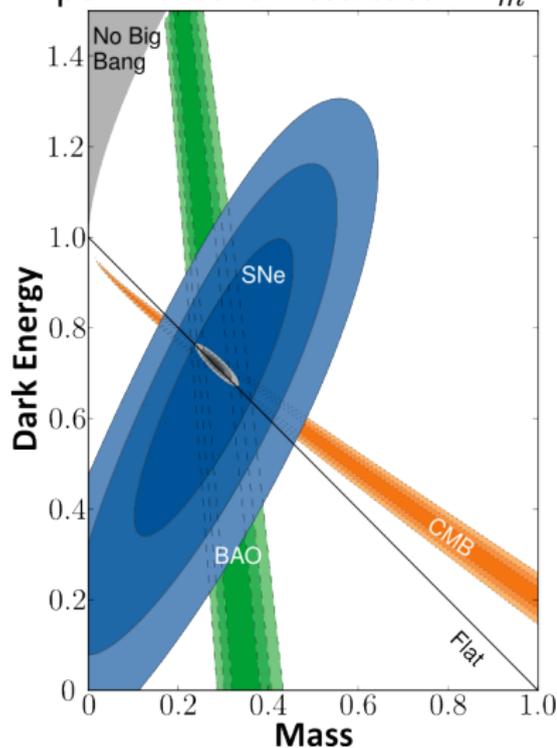
<https://arxiv.org/abs/1303.3787>
(ca. 50 Klassen von Modellen und deren Vorhersagen diskutiert)

- ▶ Terminologie: Inflaton=Teilchen dessen Quantenfeld Inflation generiert
- ▶ Beispiel: Inflaton=einzelnes Skalarfeld (z.B. Higgs)
- ▶ Terminologie: “slow roll” =Teilchen ‘rollt’ langsam im Potenzial herab
- ▶ Solange slow-roll gute Näherung: kinetische Energie vernachlässigbar; potenzielle Energie wie kosmologische Konstante: exponentielle Ausdehnung des Universums
- ▶ Wenn kinetische Energie relevant: Ende der Inflation (“reheating”)

Vorhersagen der Inflationstheorie

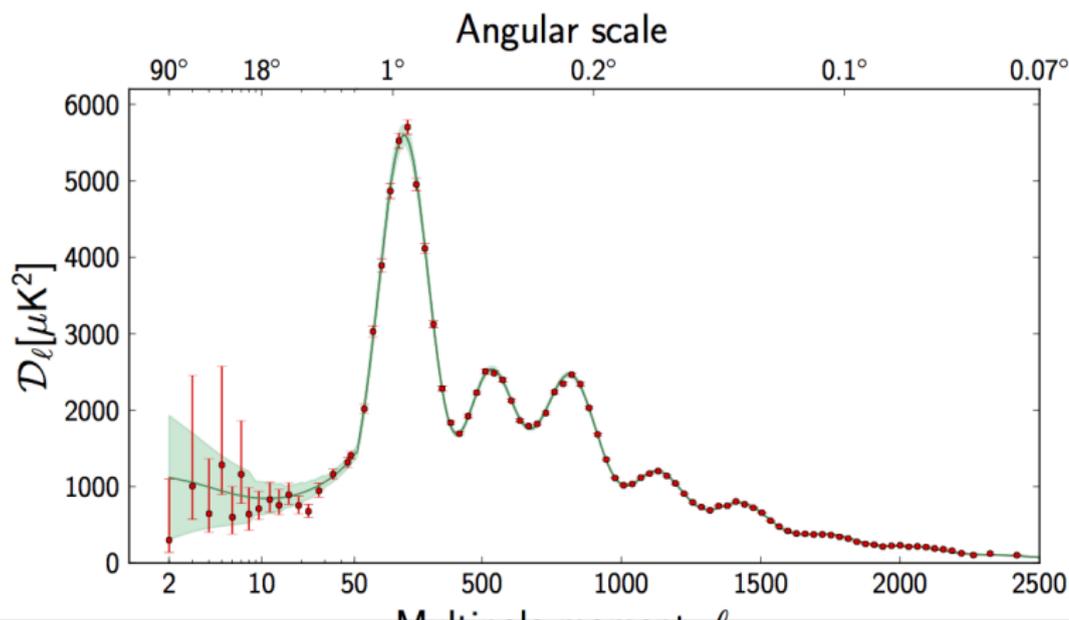
- ▶ Universum ist räumlich flach, d.h. $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$

Experimentelle Resultate: $\Omega_m = 0,293 \pm 0,010$, $\Omega_\Lambda = 0,707 \pm 0,010$



Vorhersagen der Inflationstheorie

- ▶ Universum ist räumlich flach, d.h. $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
Experimentelle Resultate: $\Omega_m = 0,293 \pm 0,010$, $\Omega_\Lambda = 0,707 \pm 0,010$
- ▶ Kleine Fluktuationen während Inflation aufgeblasen auf makroskopische Skalen sichtbar im CMB
Experimentelles Resultat: ja



Vorhersagen der Inflationstheorie

- ▶ Universum ist räumlich flach, d.h. $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
Experimentelle Resultate: $\Omega_m = 0,293 \pm 0,010$, $\Omega_\Lambda = 0,707 \pm 0,010$
- ▶ Kleine Fluktuationen während Inflation aufgeblasen auf makroskopische Skalen sichtbar im CMB
Experimentelles Resultat: ja
- ▶ Fluktuationen sind 100% adiabatisch
Experimentelles Resultat: ja

Derselbe Plot wie zuvor!

Vorhersagen der Inflationstheorie

- ▶ Universum ist räumlich flach, d.h. $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
Experimentelle Resultate: $\Omega_m = 0,293 \pm 0,010$, $\Omega_\Lambda = 0,707 \pm 0,010$
- ▶ Kleine Fluktuationen während Inflation aufgeblasen auf makroskopische Skalen sichtbar im CMB
Experimentelles Resultat: ja
- ▶ Fluktuationen sind 100% adiabatisch
Experimentelles Resultat: ja
- ▶ Fluktuationen fast skaleninvariant, mit "spektralem Index" zwischen 0,92 und 0,98 (für alle Inflationsmodelle!)
Experimentelles Resultat: $n_s \approx 0,958 \pm 0,008$

Siehe Graphik auf nächster Seite!

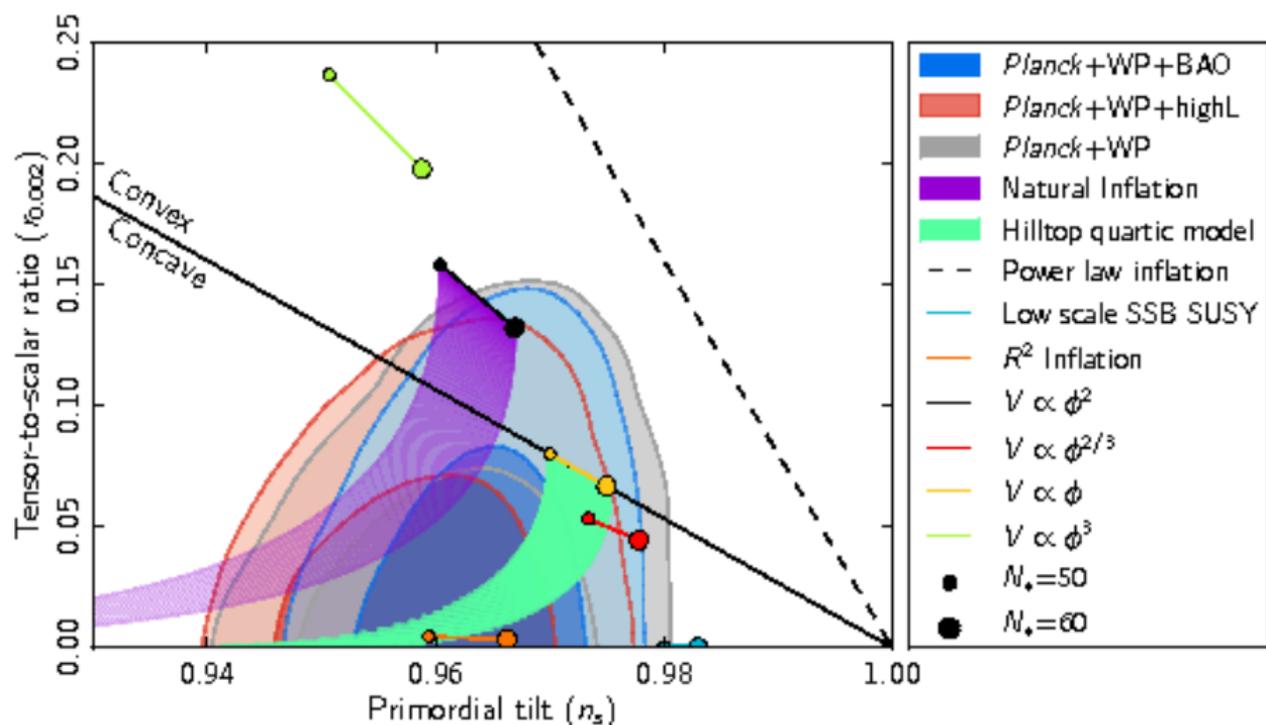
Vorhersagen der Inflationstheorie

- ▶ Universum ist räumlich flach, d.h. $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
Experimentelle Resultate: $\Omega_m = 0,293 \pm 0,010$, $\Omega_\Lambda = 0,707 \pm 0,010$
- ▶ Kleine Fluktuationen während Inflation aufgeblasen auf makroskopische Skalen sichtbar im CMB
Experimentelles Resultat: ja
- ▶ Fluktuationen sind 100% adiabatisch
Experimentelles Resultat: ja
- ▶ Fluktuationen fast skaleninvariant, mit “spektralem Index” zwischen 0,92 und 0,98 (für alle Inflationsmodelle!)
Experimentelles Resultat: $n_s \approx 0,958 \pm 0,008$
- ▶ Gravitationswellenfluktuationen möglich (Modellabhängig!)

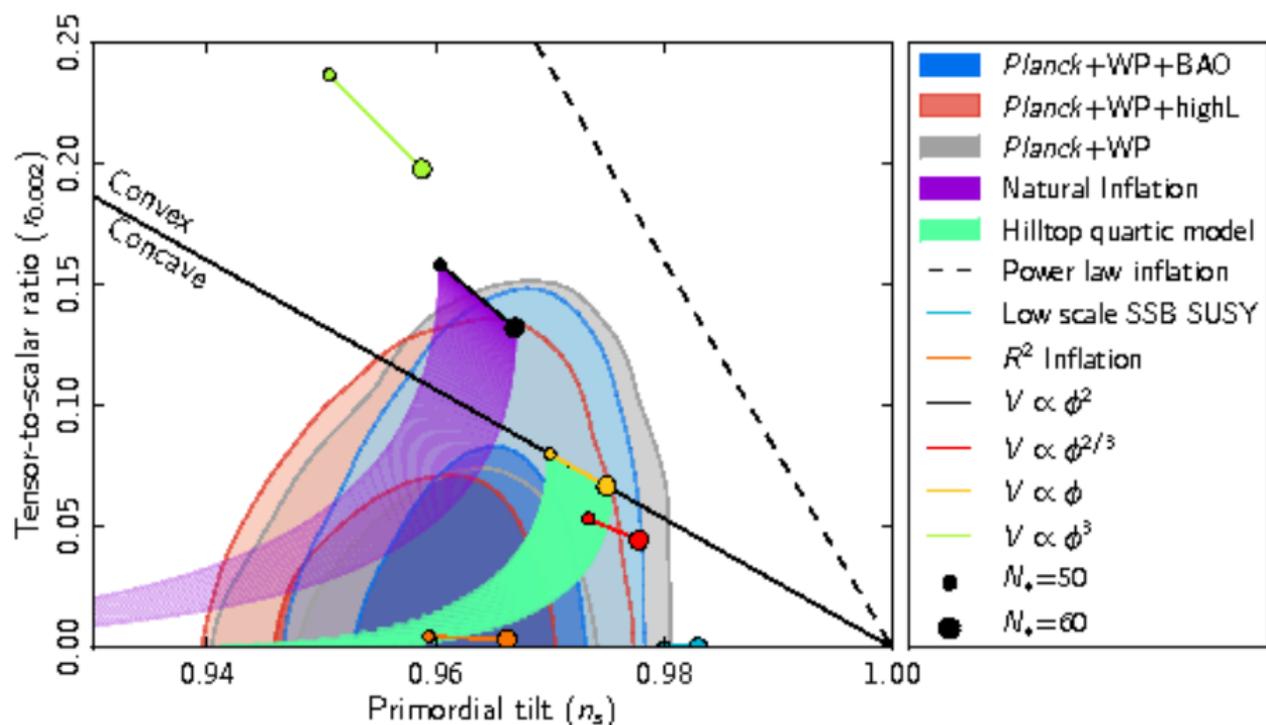
Siehe Graphik auf nächster Seite!

Inflation Teil des Standardmodells der Kosmologie, da alle Tests bisher bestanden

Aktuelle Daten (Planck + andere Experimente)

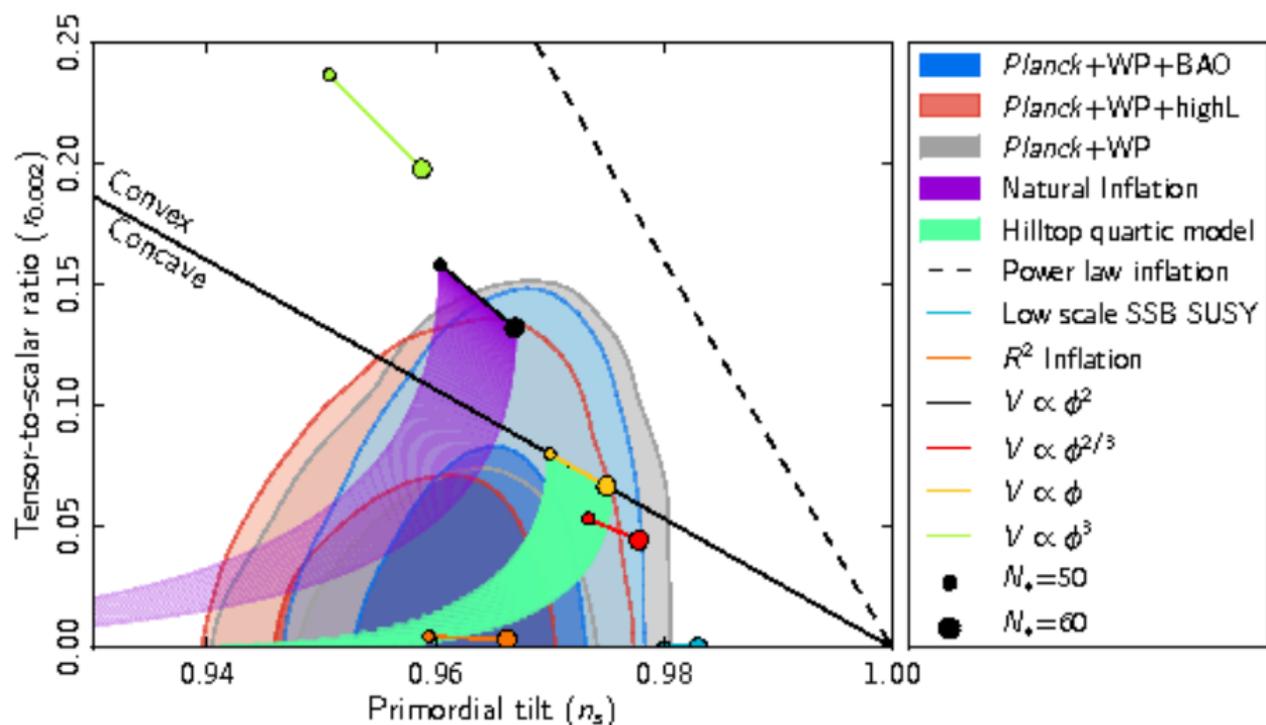


Aktuelle Daten (Planck + andere Experimente)



► Inflationsvorhersage $0.92 < n_s < 0.98$ bestätigt

Aktuelle Daten (Planck + andere Experimente)



- ▶ Inflationsvorhersage $0.92 < n_s < 0.98$ bestätigt
- ▶ Gravitationswellenmessungen schränken bereits Inflationsmodelle ein

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

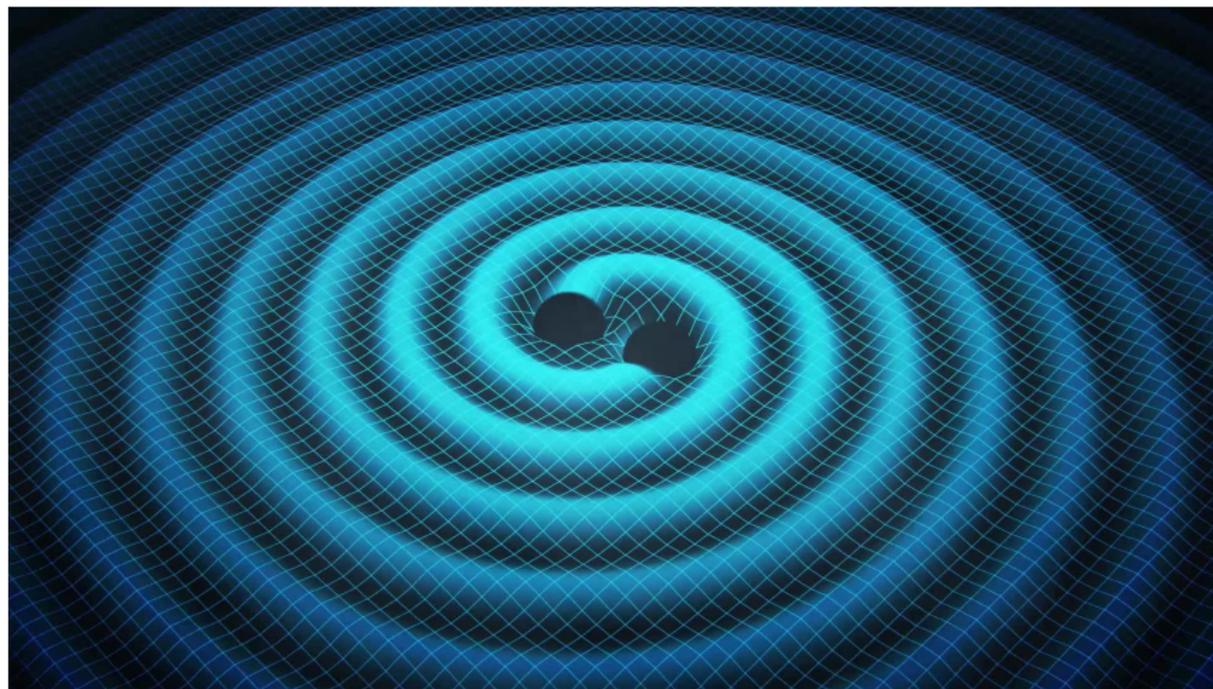
Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie

Executive Summary

- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher

$$R_{\mu\nu} = 0$$



Executive Summary

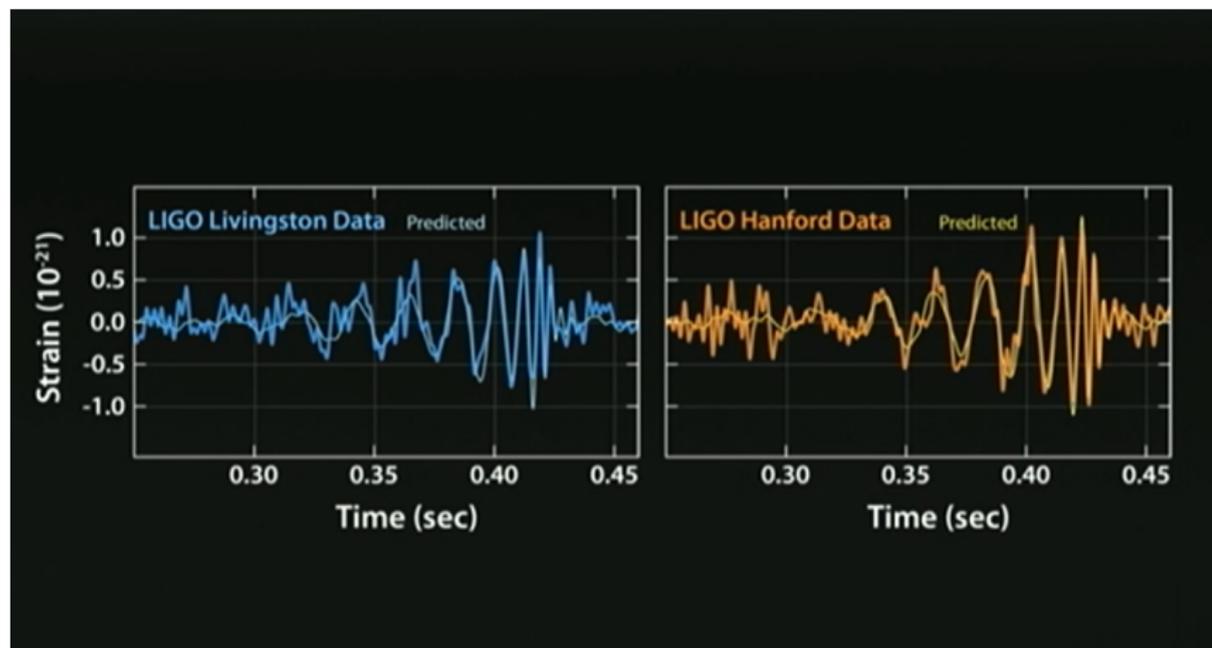
- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher
- ▶ 1916: Schwarzschild konstruiert erste Schwarze Loch Lösung

$$ds^2 = -(1 - 2M/r) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - 2M/r} + r^2 d^2\Omega_{S^2}$$



Executive Summary

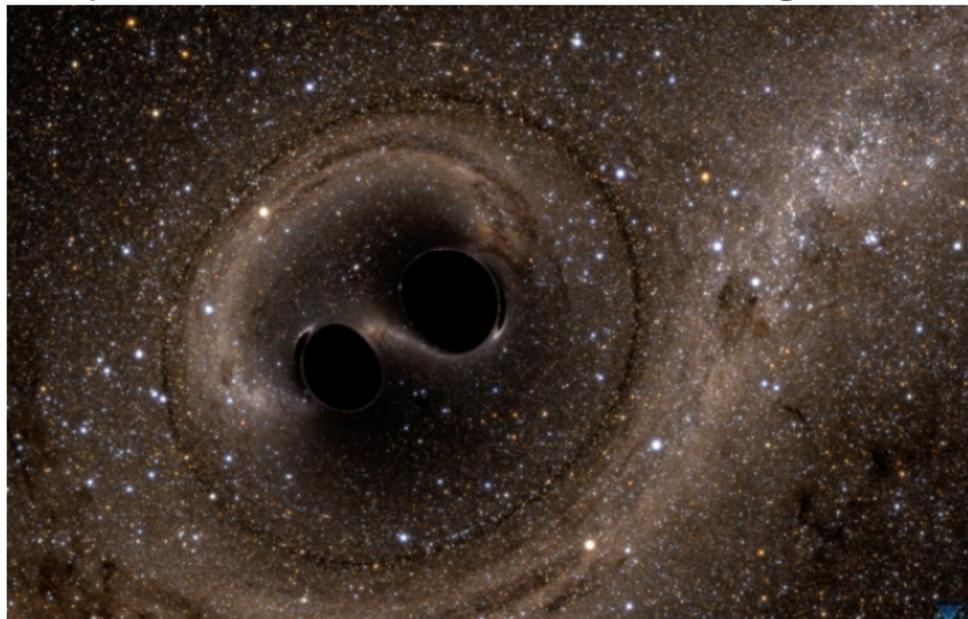
- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher
- ▶ 1916: Schwarzschild konstruiert erste Schwarze Loch Lösung
- ▶ 2015: LIGO detektiert Gravitationswellen



Executive Summary

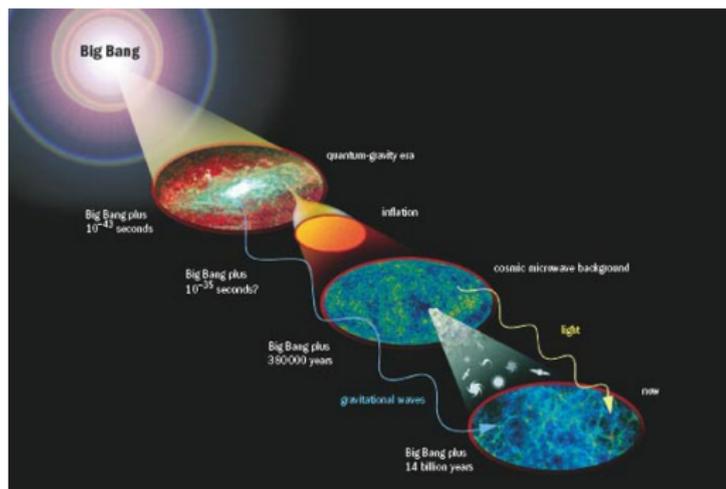
- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher
- ▶ 1916: Schwarzschild konstruiert erste Schwarze Loch Lösung
- ▶ 2015: LIGO detektiert Gravitationswellen
- ▶ 2016: LIGO gibt erste Resultate bekannt

Interpretation: Schwarze Loch-Verschmelzung



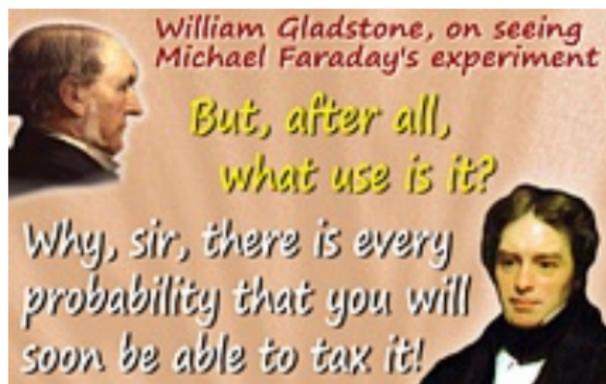
Executive Summary

- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher
- ▶ 1916: Schwarzschild konstruiert erste Schwarze Loch Lösung
- ▶ 2015: LIGO detektiert Gravitationswellen
- ▶ 2016: LIGO gibt erste Resultate bekannt
Interpretation: Schwarze Loch-Verschmelzung
- ▶ 2115: Gravitationswellen Standardwerkzeug in
Astrophysik & Kosmologie



Executive Summary

- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher
- ▶ 1916: Schwarzschild konstruiert erste Schwarze Loch Lösung
- ▶ 2015: LIGO detektiert Gravitationswellen
- ▶ 2016: LIGO gibt erste Resultate bekannt
Interpretation: Schwarze Loch-Verschmelzung
- ▶ 2115: Gravitationswellen Standardwerkzeug in
Astrophysik & Kosmologie
- ▶ 2116: jemand zahlt Steuern für Gravitationswellen



Disclaimer: Zitat oben möglicherweise nicht authentisch

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

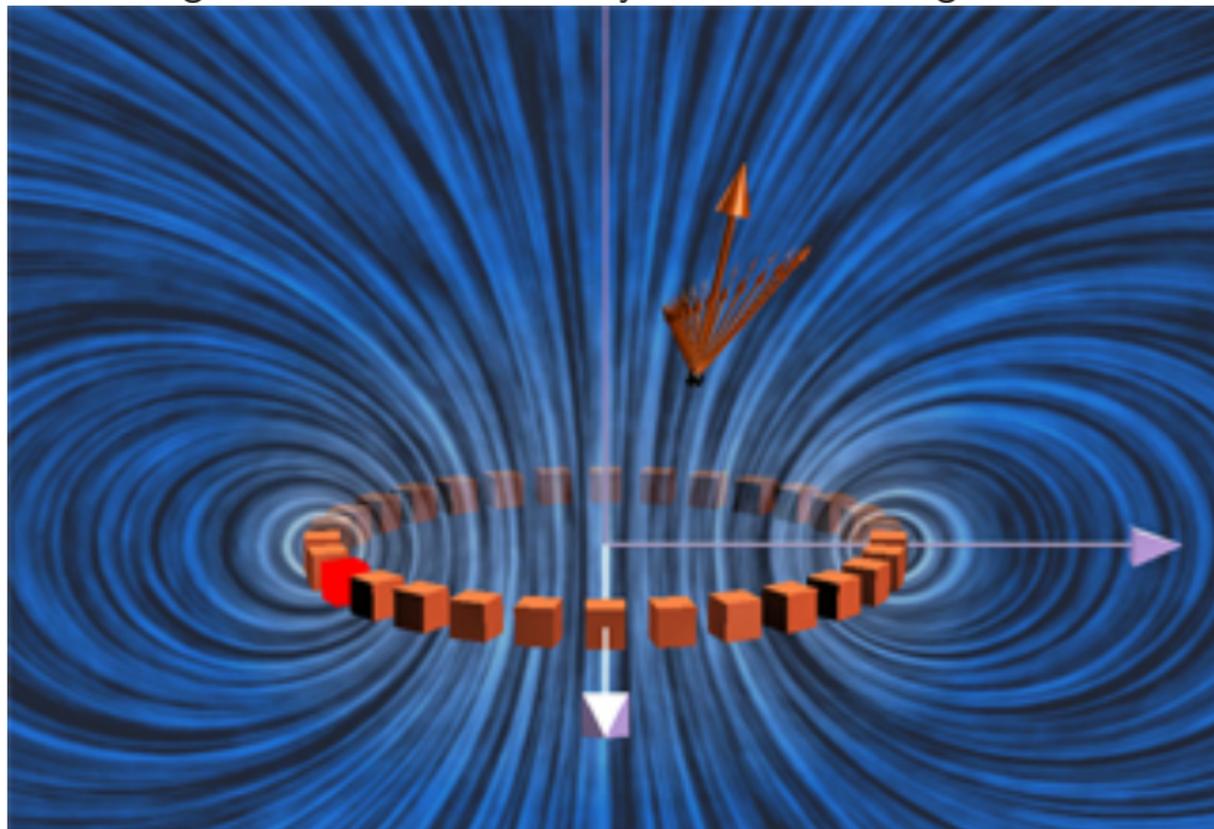
Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie

Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt

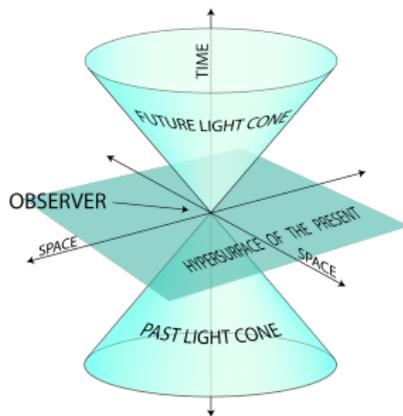


Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT



$$E = mc^2$$



Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT
- ▶ Quantenelektrodynamik mit unglaublicher Präzision getestet

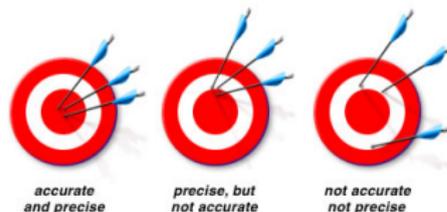
Beispiel: gyromagnetischer Faktor des Elektrons

Experiment (2008):

$$\frac{g_e^{\text{exp}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.000000000000028$$

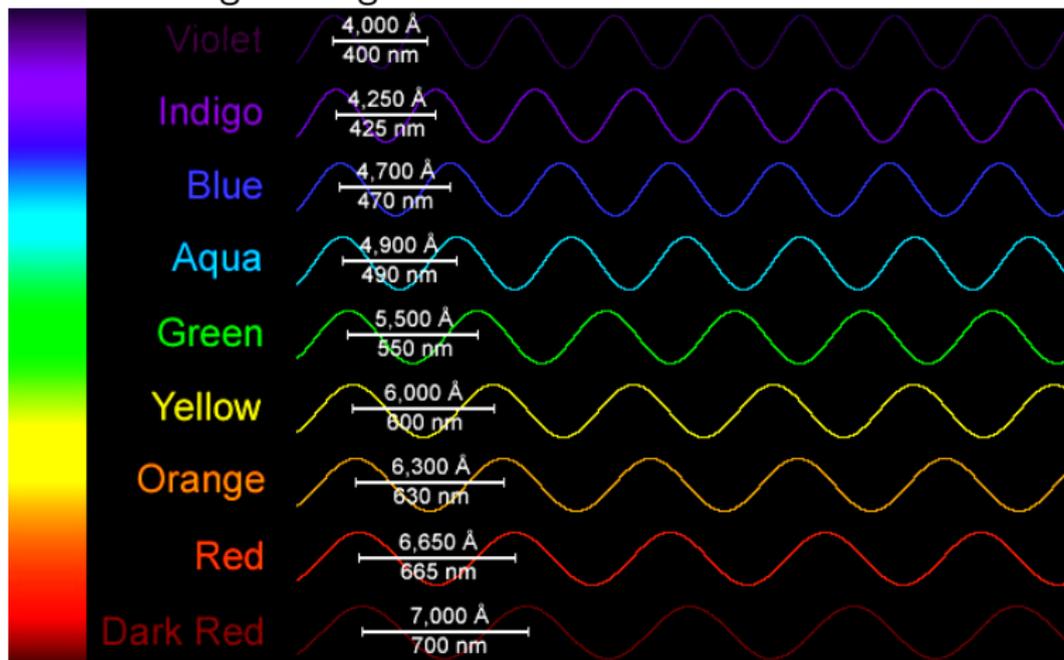
Theorie (2012):

$$\frac{g_e^{\text{the}}}{2} = 1.00115965218178 \pm 0.000000000000077$$



Aufwärmübung: Elektromagnetismus

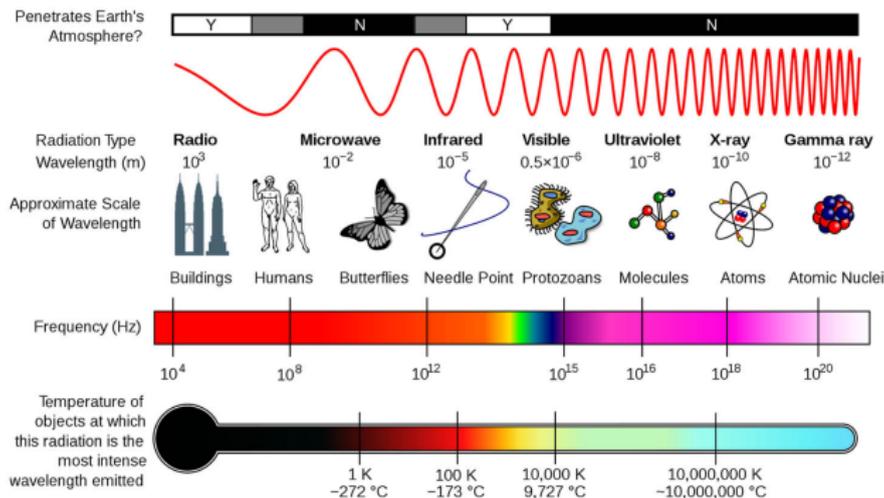
- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT
- ▶ Quantenelektrodynamik mit unglaublicher Präzision getestet
- ▶ Ohne Ladungen: es gibt immer noch Lichtwellen



Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT
- ▶ Quantenelektrodynamik mit unglaublicher Präzision getestet
- ▶ Ohne Ladungen: es gibt immer noch Lichtwellen
- ▶ Lichtwellen Lösungen der Vakuum-Maxwellgleichungen

$$dF = 0 = d*F \quad \Rightarrow \quad \square A_\mu = 0$$

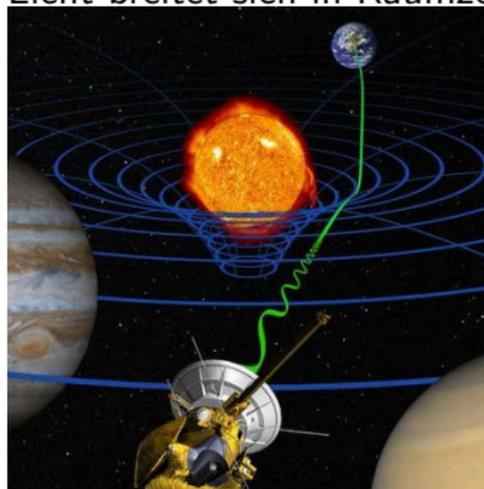


Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT
- ▶ Quantenelektrodynamik mit unglaublicher Präzision getestet
- ▶ Ohne Ladungen: es gibt immer noch Lichtwellen
- ▶ Lichtwellen Lösungen der Vakuum-Maxwellgleichungen

$$dF = 0 = d*F \quad \Rightarrow \quad \square A_\mu = 0$$

- ▶ Licht breitet sich in Raumzeit aus



Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT
- ▶ Quantenelektrodynamik mit unglaublicher Präzision getestet
- ▶ Ohne Ladungen: es gibt immer noch Lichtwellen
- ▶ Lichtwellen Lösungen der Vakuum-Maxwellgleichungen

$$dF = 0 = d*F \quad \Rightarrow \quad \square A_\mu = 0$$

- ▶ Licht breitet sich in Raumzeit aus
- ▶ Im Vakuum breitet sich Licht mit grösstmöglicher Geschwindigkeit aus

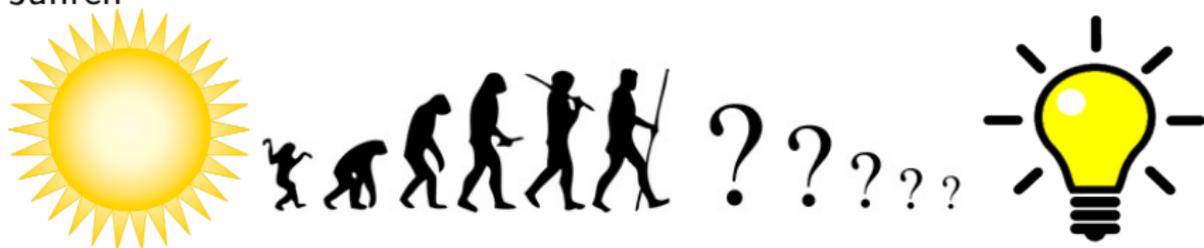


Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT
- ▶ Quantenelektrodynamik mit unglaublicher Präzision getestet
- ▶ Ohne Ladungen: es gibt immer noch Lichtwellen
- ▶ Lichtwellen Lösungen der Vakuum-Maxwellgleichungen

$$dF = 0 = d*F \quad \Rightarrow \quad \square A_\mu = 0$$

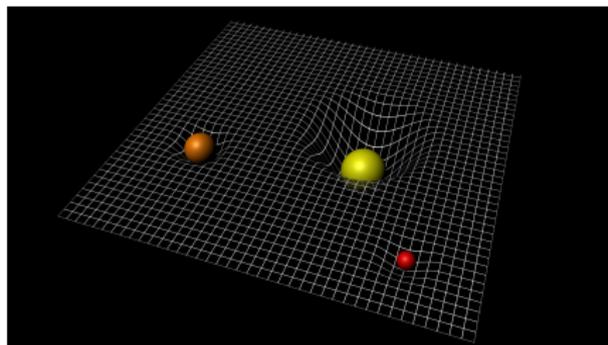
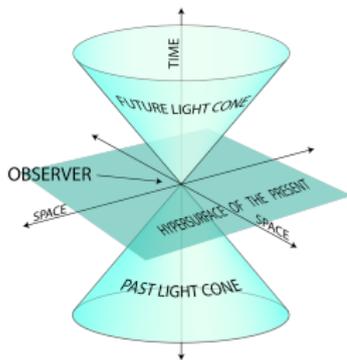
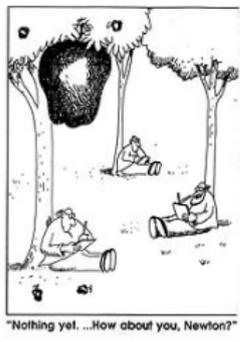
- ▶ Licht breitet sich in Raumzeit aus
- ▶ Im Vakuum breitet sich Licht mit grösstmöglicher Geschwindigkeit aus
- ▶ Erste Beobachtung von Licht durch Menschheit: vor ca. 2 Millionen Jahren



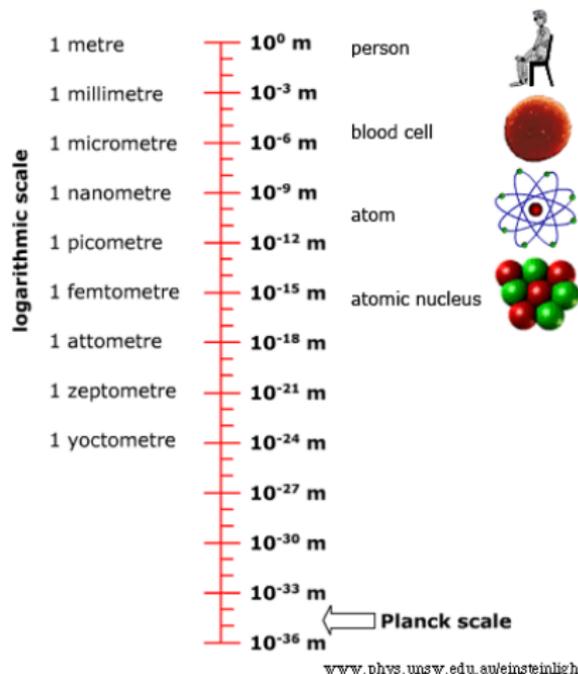
- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt



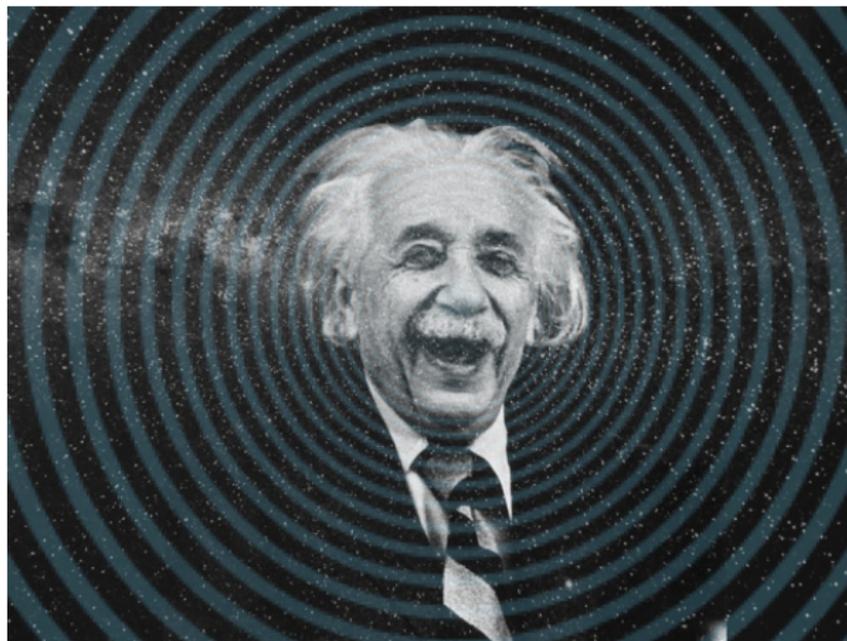
- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung



- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung
- ▶ Quantengravitation bislang nicht direkt experimentell getestet

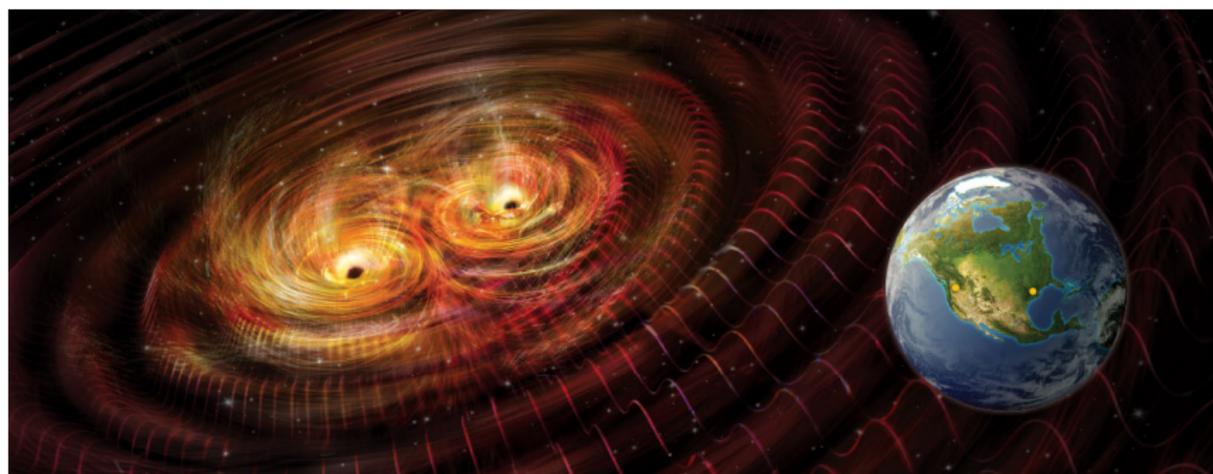


- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung
- ▶ Quantengravitation bislang nicht direkt experimentell getestet
- ▶ Ohne Massen: es gibt immer noch Gravitationswellen



- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung
- ▶ Quantengravitation bislang nicht direkt experimentell getestet
- ▶ Ohne Massen: es gibt immer noch Gravitationswellen
- ▶ Gravitationswellen Lösungen der Vakuumeinsteingleichungen

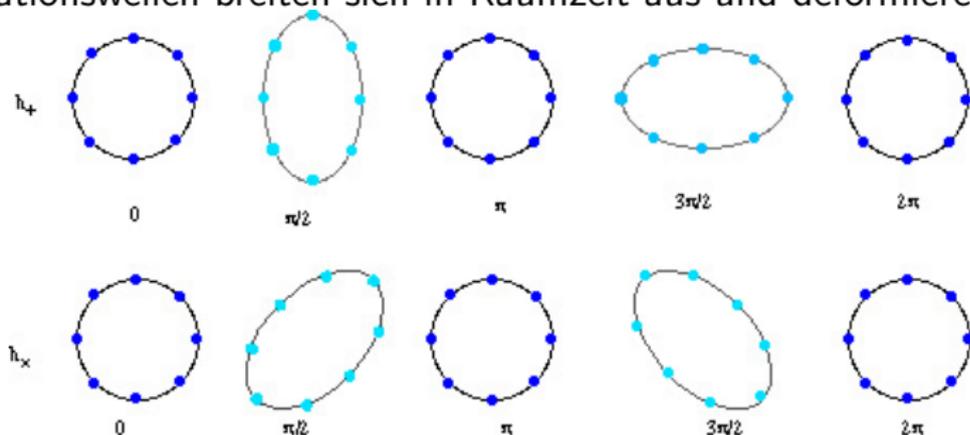
$$R_{\mu\nu} = 0 \quad \Rightarrow \quad \square h_{\mu\nu} = 0$$



- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung
- ▶ Quantengravitation bislang nicht direkt experimentell getestet
- ▶ Ohne Massen: es gibt immer noch Gravitationswellen
- ▶ Gravitationswellen Lösungen der Vakuumeinsteingleichungen

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad \Rightarrow \quad \square h_{\mu\nu} = 0$$

- ▶ Gravitationswellen breiten sich in Raumzeit aus und deformieren sie



- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung
- ▶ Quantengravitation bislang nicht direkt experimentell getestet
- ▶ Ohne Massen: es gibt immer noch Gravitationswellen
- ▶ Gravitationswellen Lösungen der Vakuumeinsteingleichungen

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad \Rightarrow \quad \square h_{\mu\nu} = 0$$

- ▶ Gravitationswellen breiten sich in Raumzeit aus und deformieren sie
- ▶ Im Vakuum breiten sich Gravitationswellen mit grösstmöglicher Geschwindigkeit aus



- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung
- ▶ Quantengravitation bislang nicht direkt experimentell getestet
- ▶ Ohne Massen: es gibt immer noch Gravitationswellen
- ▶ Gravitationswellen Lösungen der Vakuumeinsteingleichungen

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad \Rightarrow \quad \square h_{\mu\nu} = 0$$

- ▶ Gravitationswellen breiten sich in Raumzeit aus und deformieren sie
- ▶ Im Vakuum breiten sich Gravitationswellen mit grösstmöglicher Geschwindigkeit aus
- ▶ Erste Beobachtung von Gravitationswellen durch Menschheit: vor ca. 10 Jahren



Gravitationswellenquellen

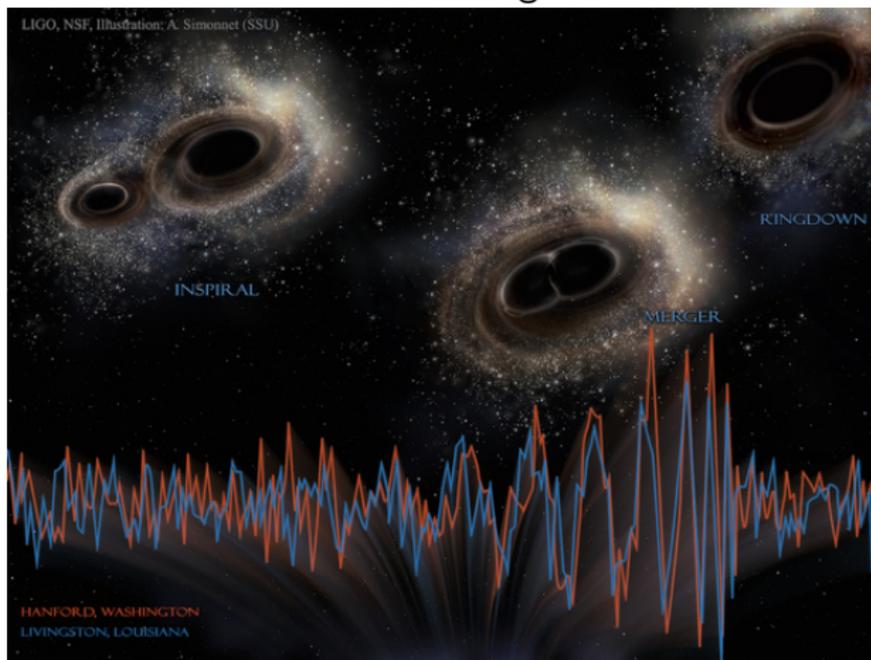
- ▶ Jede Beschleunigung die nicht sphärisch oder zylindrisch symmetrisch ist produziert Gravitationswellen

Gravitationswellenquellen

- ▶ Jede Beschleunigung die nicht sphärisch oder zylindrisch symmetrisch ist produziert Gravitationswellen
- ▶ Beispiele: Supernovae, Schwarze Loch-Verschmelzung, Urknall, Ich, ...

Gravitationswellenquellen

- ▶ Jede Beschleunigung die nicht sphärisch oder zylindrisch symmetrisch ist produziert Gravitationswellen
- ▶ Beispiele: Supernovae, Schwarze Loch-Verschmelzung, Urknall, Ich, ...
- ▶ Fokus auf Schwarze Loch-Verschmelzung



Gravitationswellenquellen

- ▶ Jede Beschleunigung die nicht sphärisch oder zylindrisch symmetrisch ist produziert Gravitationswellen
- ▶ Beispiele: Supernovae, Schwarze Loch-Verschmelzung, Urknall, Ich, ...
- ▶ Fokus auf Schwarze Loch-Verschmelzung
- ▶ Einfache Rechnung um Gravitationswellenenergie abzuschätzen
Nimm zwei Schwarzschild Schwarze Löcher mit Masse m
Finale Schwarze Loch-Masse M und Gravitationswellenenergie E
Energieerhaltung:

$$M + E = m + m \Rightarrow E = 2m - M$$

Gravitationswellenquellen

- ▶ Jede Beschleunigung die nicht sphärisch oder zylindrisch symmetrisch ist produziert Gravitationswellen
- ▶ Beispiele: Supernovae, Schwarze Loch-Verschmelzung, Urknall, Ich, ...
- ▶ Fokus auf Schwarze Loch-Verschmelzung
- ▶ Einfache Rechnung um Gravitationswellenenergie abzuschätzen

Nimm zwei Schwarzschild Schwarze Löcher mit Masse m

Finale Schwarze Loch-Masse M und Gravitationswellenenergie E

Energieerhaltung:

$$M + E = m + m \Rightarrow E = 2m - M$$

Verwenden Hawkingschen Flächensatz (mit Fläche \propto Quadrat der Masse):

$$A_{\text{final}} \geq A_{\text{initial}} \Rightarrow M^2 \geq 2m^2$$

Gravitationswellenquellen

- ▶ Jede Beschleunigung die nicht sphärisch oder zylindrisch symmetrisch ist produziert Gravitationswellen
- ▶ Beispiele: Supernovae, Schwarze Loch-Verschmelzung, Urknall, Ich, ...
- ▶ Fokus auf Schwarze Loch-Verschmelzung
- ▶ Einfache Rechnung um Gravitationswellenenergie abzuschätzen

Nimm zwei Schwarzschild Schwarze Löcher mit Masse m

Finale Schwarze Loch-Masse M und Gravitationswellenenergie E

Energieerhaltung:

$$M + E = m + m \Rightarrow E = 2m - M$$

Verwenden Hawkingschen Flächensatz (mit Fläche \propto Quadrat der Masse):

$$A_{\text{final}} \geq A_{\text{initial}} \Rightarrow M^2 \geq 2m^2$$

Erhalten obere Schranke an Gravitationswellenenergie

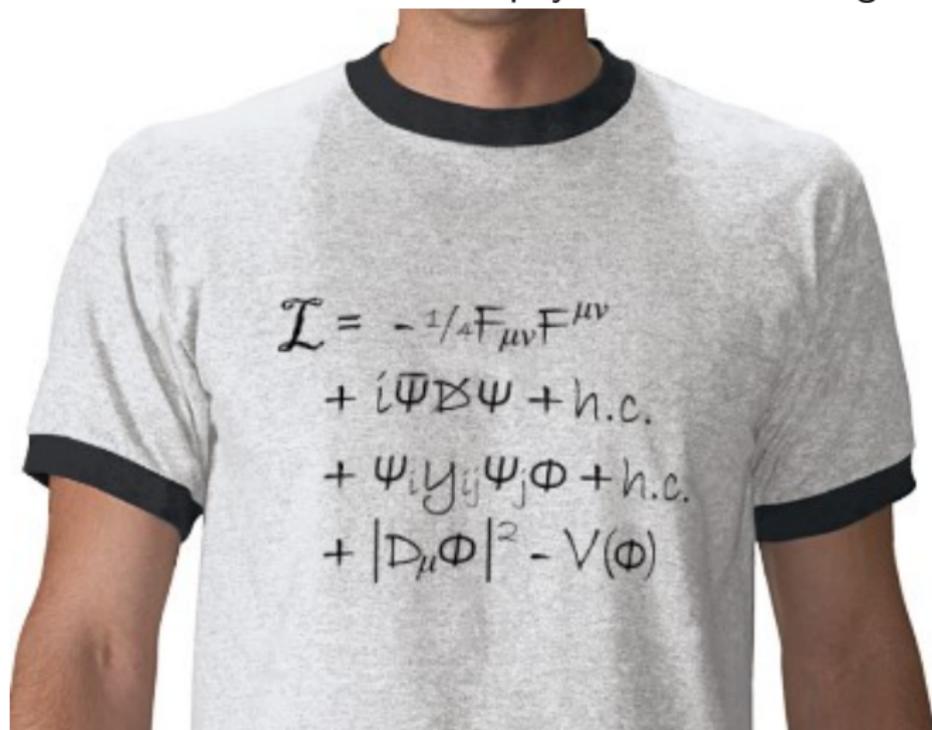
$$E \leq (2 - \sqrt{2})m \approx 29\% \text{ der Anfangsenergie}$$

Energie von $10^{34} - 10^{36}$ Nagasaki-Bomben!

Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

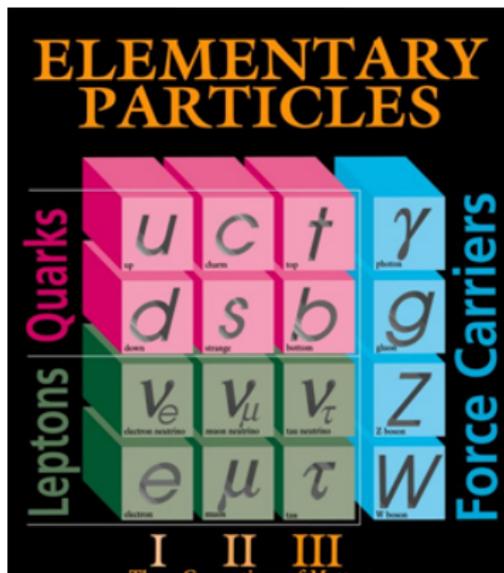
- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie



Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

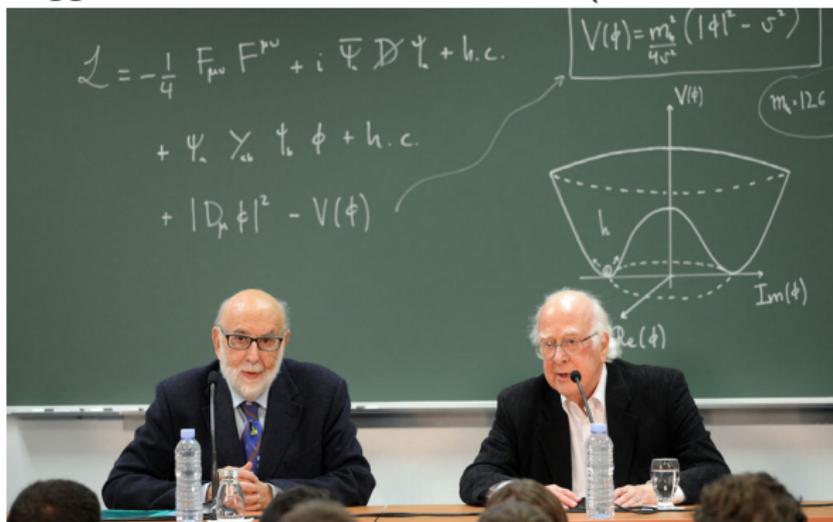
- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 15 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)



Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

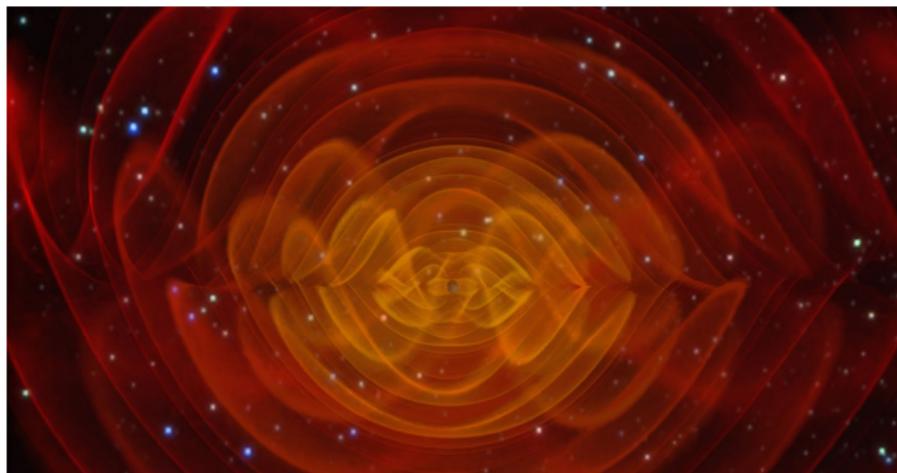
- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 15 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)
- ▶ Juli 2012: Higgsteilchen am LHC detektiert (CMS und ATLAS)



Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 15 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)
- ▶ Juli 2012: Higgsteilchen am LHC detektiert (CMS und ATLAS)
- ▶ September 2015: Gravitationswellen detektiert durch LIGO



Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 15 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)
- ▶ Juli 2012: Higgsteilchen am LHC detektiert (CMS und ATLAS)
- ▶ September 2015: Gravitationswellen detektiert durch LIGO
- ▶ Standardmodelle nun komplett

Phantastische Errungenschaft der Menschheit zwischen 1600 und 2000!

Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 15 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)
- ▶ Juli 2012: Higgsteilchen am LHC detektiert (CMS und ATLAS)
- ▶ September 2015: Gravitationswellen detektiert durch LIGO
- ▶ Standardmodelle nun komplett
- ▶ Fehlt noch etwas?



Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 15 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)
- ▶ Juli 2012: Higgsteilchen am LHC detektiert (CMS und ATLAS)
- ▶ September 2015: Gravitationswellen detektiert durch LIGO
- ▶ Standardmodelle nun komplett
- ▶ Fehlt noch etwas?
- ▶ Ja: die dunkle Seite des Universums! (Dunkle Materie, Dunkle Energie, Quantentheorie Schwarzer Löcher)
Verständnis der dunklen Seite des Universums wird Jahrzehnte beanspruchen — interessante Zeiten für fundamentale Physik!

Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

Grosse Fragen: woraus besteht das Universum? was sind die fundamentalen Naturkräfte?

- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 15 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)
- ▶ Juli 2012: Higgsteilchen am LHC detektiert (CMS und ATLAS)
- ▶ September 2015: Gravitationswellen detektiert durch LIGO
- ▶ Standardmodelle nun komplett
- ▶ Fehlt noch etwas?
- ▶ Ja: die dunkle Seite des Universums! (Dunkle Materie, Dunkle Energie, Quantentheorie Schwarzer Löcher)

Wir könnten Glück haben und in unserer Lebenszeit nicht nur die Komplettierung der Standardmodelle miterleben, sondern auch den ersten Einblick in die dunkle Seite des Universums!

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie

Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!



Wie misst man Gravitationswellen?

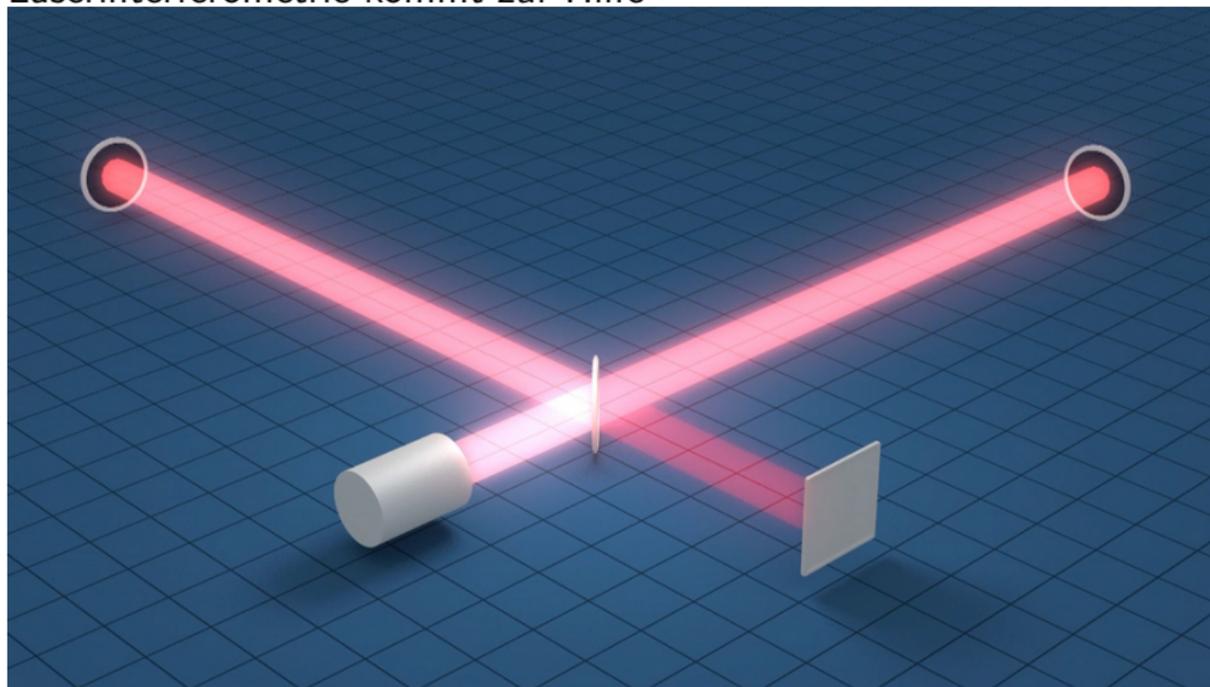
- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!

Typische Gravitationswellen ändern räumliche Abstände um kleinen Bruchteil des Protonradius!



Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!
- ▶ Laserinterferometrie kommt zur Hilfe



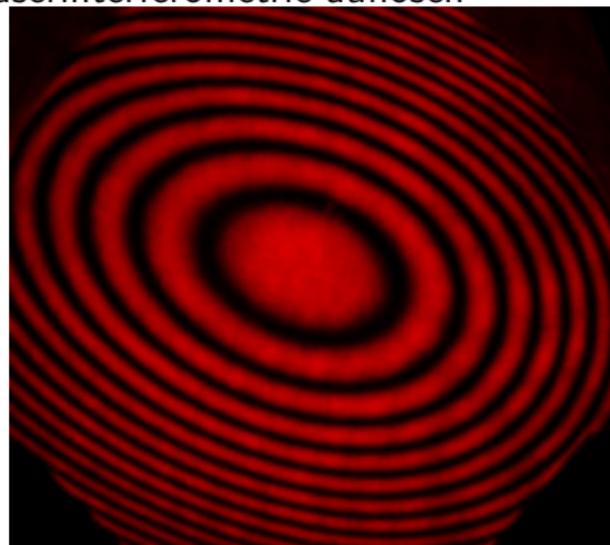
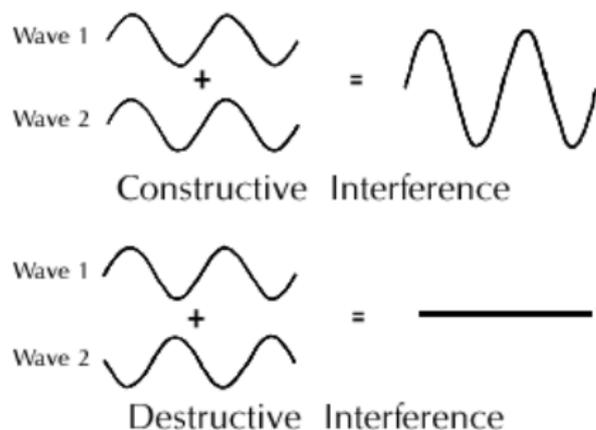
Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!
- ▶ Laserinterferometrie kommt zur Hilfe
- ▶ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!
- ▶ Laserinterferometrie kommt zur Hilfe
- ▶ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
- ▶ Kann subnukleare Abstände mit Laserinterferometrie auflösen



Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!
- ▶ Laserinterferometrie kommt zur Hilfe
- ▶ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
- ▶ Kann subnukleare Abstände mit Laserinterferometrie auflösen
- ▶ Gute Nachricht: sensitiv genug um Gravitationswellen aufzulösen!

(Advanced) LIGO benötigte 25 Jahre Entwicklung, 500 Millionen \$ Investition und mehr als 900 WissenschaftlerInnen und IngenieurInnen

Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!
- ▶ Laserinterferometrie kommt zur Hilfe
- ▶ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
- ▶ Kann subnukleare Abstände mit Laserinterferometrie auflösen
- ▶ Gute Nachricht: sensitiv genug um Gravitationswellen aufzulösen!
- ▶ Schlechte Nachricht: sensitiv auf Hintergrundrauschen (kleine seismische Aktivitäten, thermisches Rauschen, vorbeifahrende Lastautos, Ozeanwellen, ...)

Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!
- ▶ Laserinterferometrie kommt zur Hilfe
- ▶ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
- ▶ Kann subnukleare Abstände mit Laserinterferometrie auflösen
- ▶ Gute Nachricht: sensitiv genug um Gravitationswellen aufzulösen!
- ▶ Schlechte Nachricht: sensitiv auf Hintergrundrauschen (kleine seismische Aktivitäten, thermisches Rauschen, vorbeifahrende Lastautos, Ozeanwellen, ...)
- ▶ Reduzieren Fehler durch zwei identische Experimente, jeweils eines an West- (Hanford, Washington) und Ostküste (Livingston, Louisiana)

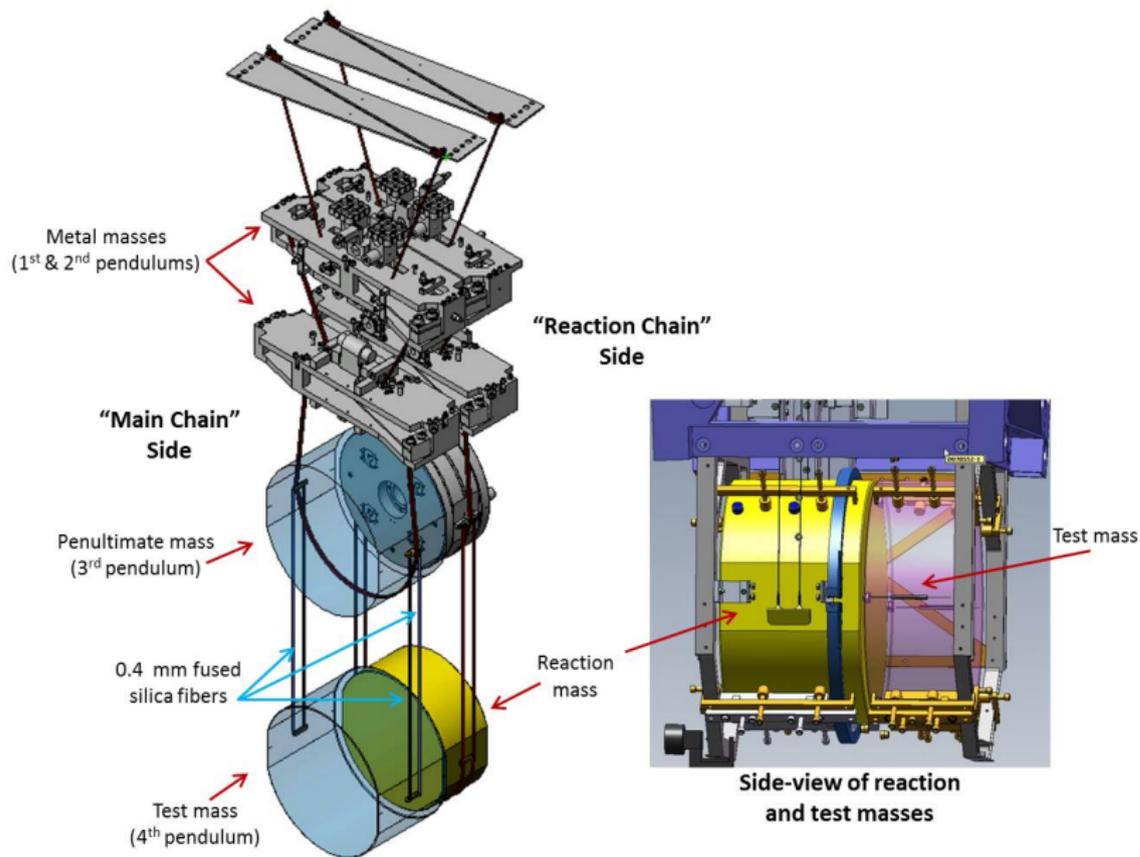


Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!
- ▶ Laserinterferometrie kommt zur Hilfe
- ▶ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
- ▶ Kann subnukleare Abstände mit Laserinterferometrie auflösen
- ▶ Gute Nachricht: sensitiv genug um Gravitationswellen aufzulösen!
- ▶ Schlechte Nachricht: sensitiv auf Hintergrundrauschen (kleine seismische Aktivitäten, thermisches Rauschen, vorbeifahrende Lastautos, Ozeanwellen, ...)
- ▶ Reduzieren Fehler durch zwei identische Experimente, jeweils eines an West- (Hanford, Washington) und Ostküste (Livingston, Louisiana)
- ▶ Reduzieren lokalen Fehler durch Aufhängung um Spiegel von Rütteln zu isolieren

Aufhängung funktioniert (im Prinzip) wie bei einem (sehr fortschrittlichem) Auto — Räder fühlen Bodenwelle, sind aber vom Rest des Autos entkoppelt

LIGO Aufhängungssystem



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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

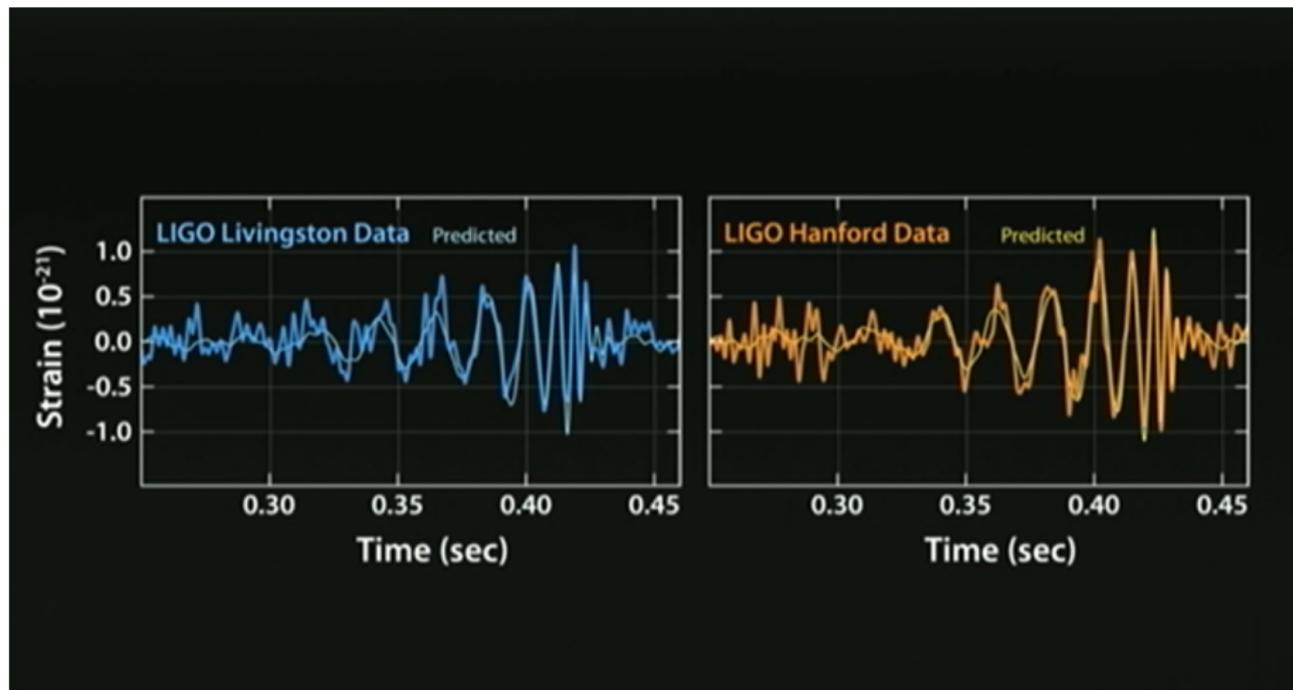
Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie



- ▶ Ost- und Westküstensignale miteinander kompatibel
- ▶ Gravitationswellensignal signifikant über Hintergrund
- ▶ Passt perfekt zu Vorhersagen von Schwarzer Loch-Verschmelzung

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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

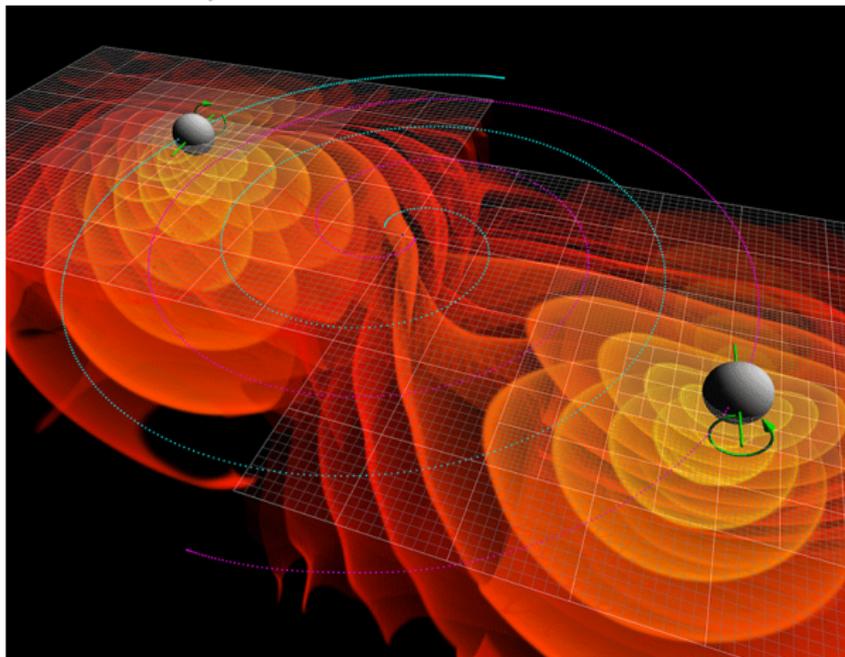
Zukunft der Kosmologie

Theoretische Implikationen der Gravitationswellenentdeckung

- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt

Theoretische Implikationen der Gravitationswellenentdeckung

- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Präziser: 2-Körperproblem unglaublich kompliziert in ART (100-tausend CPU-Stunden nötig um Verschmelzung zwei Schwarzer Löcher zu beschreiben)



Theoretische Implikationen der Gravitationswellenentdeckung

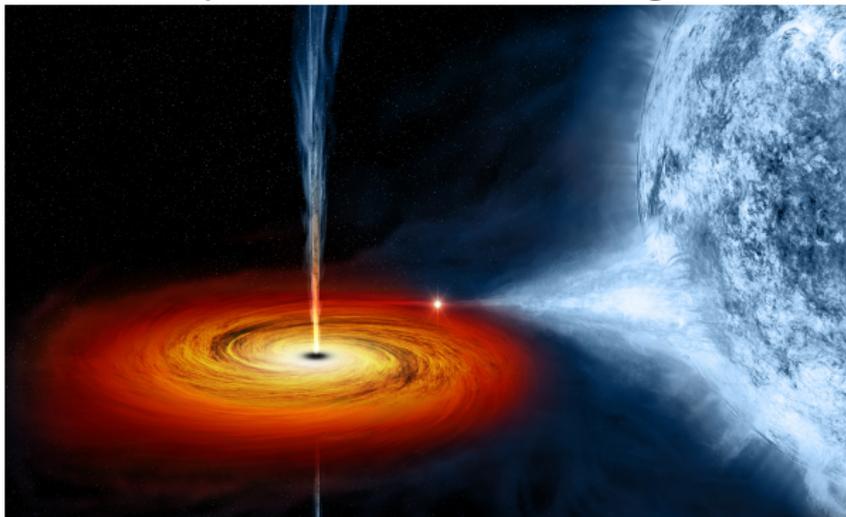
- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Präziser: 2-Körperproblem unglaublich kompliziert in ART (100-tausend CPU-Stunden nötig um Verschmelzung zwei Schwarzer Löcher zu beschreiben)
- ▶ Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus

Theoretische Implikationen der Gravitationswellenentdeckung

- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Präziser: 2-Körperproblem unglaublich kompliziert in ART (100-tausend CPU-Stunden nötig um Verschmelzung zwei Schwarzer Löcher zu beschreiben)
- ▶ Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- ▶ Gravitonen sind masselos (wie Photonen)

Theoretische Implikationen der Gravitationswellenentdeckung

- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Präziser: 2-Körperproblem unglaublich kompliziert in ART (100-tausend CPU-Stunden nötig um Verschmelzung zwei Schwarzer Löcher zu beschreiben)
- ▶ Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- ▶ Gravitonen sind masselos (wie Photonen)
- ▶ Schwarze Löcher auf qualitativ neue Art bestätigt



Theoretische Implikationen der Gravitationswellenentdeckung

- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Präziser: 2-Körperproblem unglaublich kompliziert in ART (100-tausend CPU-Stunden nötig um Verschmelzung zwei Schwarzer Löcher zu beschreiben)
- ▶ Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- ▶ Gravitonen sind masselos (wie Photonen)
- ▶ Schwarze Löcher auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Schwarze Löcher schwer beobachtbar da (per definitionem) nichts entweicht

Theoretische Implikationen der Gravitationswellenentdeckung

- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Präziser: 2-Körperproblem unglaublich kompliziert in ART (100-tausend CPU-Stunden nötig um Verschmelzung zwei Schwarzer Löcher zu beschreiben)
- ▶ Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- ▶ Gravitonen sind masselos (wie Photonen)
- ▶ Schwarze Löcher auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Schwarze Löcher schwer beobachtbar da (per definitionem) nichts entweicht

Nichtsdestotrotz:

- ▶ Existenz von Gravitationswellen war erwartet
- ▶ Interesse daher überwiegend in experimentellen Anwendungen!

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!!!

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!!!
- ▶ Beginn der Ära der Gravitationswellenastronomie

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!!!
- ▶ Beginn der Ära der Gravitationswellenastronomie
- ▶ Kann vor Licht im Schatten verstecken, aber nicht vor Gravitation

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!!!
- ▶ Beginn der Ära der Gravitationswellenastronomie
- ▶ Kann vor Licht im Schatten verstecken, aber nicht vor Gravitation
- ▶ Beispiel 1: neue Eigenschaften Schwarzer Löcher, Neutronensterne oder anderen massiven Objekten

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

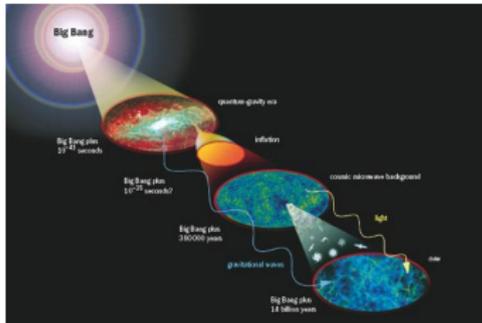
Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!!!
- ▶ Beginn der Ära der Gravitationswellenastronomie
- ▶ Kann vor Licht im Schatten verstecken, aber nicht vor Gravitation
- ▶ Beispiel 1: neue Eigenschaften Schwarzer Löcher, Neutronensterne oder anderen massiven Objekten
- ▶ Beispiel 2: Supernovafrühwarnsystem

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!
- ▶ Menschheit nicht länger taub in Bezug auf Gravitationswellen!!!
- ▶ Beginn der Ära der Gravitationswellenastronomie
- ▶ Kann vor Licht im Schatten verstecken, aber nicht vor Gravitation
- ▶ Beispiel 1: neue Eigenschaften Schwarzer Löcher, Neutronensterne oder anderen massiven Objekten
- ▶ Beispiel 2: Supernovafrühwarnsystem
- ▶ Beispiel 3: frühes Universum (Licht blind bezüglich ersten 370.000 Jahre)



Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen

Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung

“Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”

Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
- ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen

Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
- ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
- ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: `www` am CERN entwickelt

Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
- ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
- ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: `www` am CERN entwickelt
- ▶ Direkte Anwendung der ART: GPS

Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der ART: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln

Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der ART: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln
 - ▶ Geduld nötig in fundamentaler Forschung an grossen Fragen

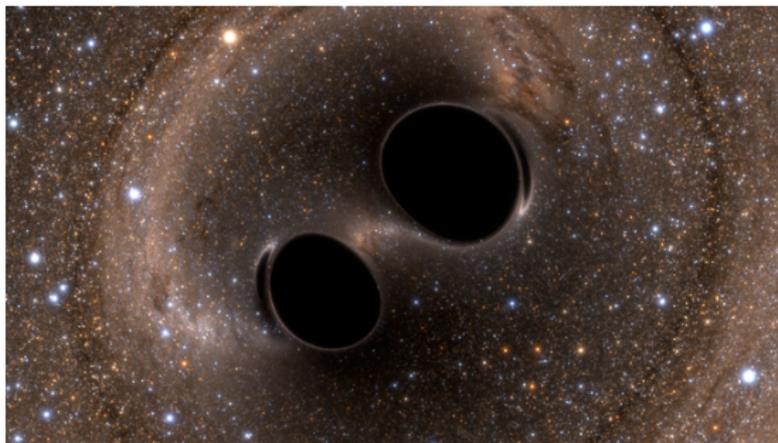
Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der ART: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln
 - ▶ Geduld nötig in fundamentaler Forschung an grossen Fragen
 - ▶ Finanzierung muss aus öffentlichen Quellen kommen und nicht von Industrie

Industrielle Anwendungen

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der ART: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln
 - ▶ Geduld nötig in fundamentaler Forschung an grossen Fragen
 - ▶ Finanzierung muss aus öffentlichen Quellen kommen und nicht von Industrie
 - ▶ Im Gegenzug: öffentliche Forschungsgelder sollten in fundamentale Forschung gehen, nicht in industrielle (FWF in Finanznöten)

Gratulation an Advanced LIGO-Team am MIT und 90 anderen Institutionen!



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

V. Inflation, Gravitationswellen und die Zukunft der Kosmologie

Inflation

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Zukunft der Kosmologie



Bessere Zukunft

keine
Wende-
möglichkeit

Zukunftsprognosen

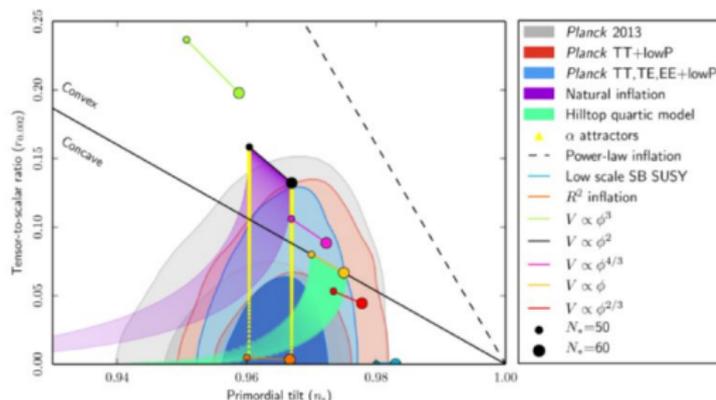
Wie geht es weiter in Kosmologie?

Ich lehne mich aus dem Fenster mit Vorhersagen für die nächsten 5 Jahrzehnte:

- ▶ Standardmodell der Inflation etabliert

(n_s, r) -contour: focus on small r

[Planck 2015 collaborations]



$$n_s = 0.968 \pm 0.006$$

$$r < 0.11 \text{ (95\% CL)}$$

Zukunftsprognosen

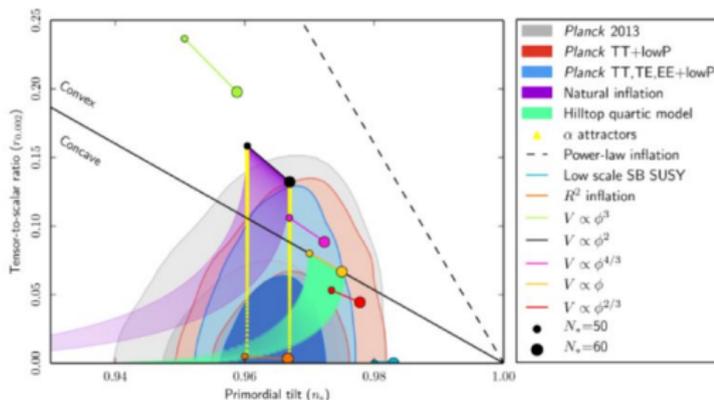
Wie geht es weiter in Kosmologie?

Ich lehne mich aus dem Fenster mit Vorhersagen für die nächsten 5 Jahrzehnte:

- ▶ Standardmodell der Inflation etabliert
- ▶ Primordiale Gravitationswellen ausgeschlossen

(n_s, r) -contour: focus on small r

[Planck 2015 collaborations]



$$n_s = 0.968 \pm 0.006$$

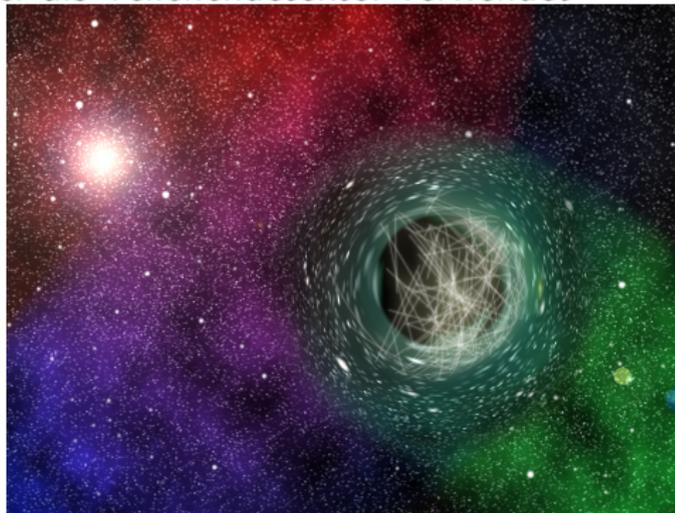
$$r < 0.11 \text{ (95\% CL)}$$

Zukunftsprognosen

Wie geht es weiter in Kosmologie?

Ich lehne mich aus dem Fenster mit Vorhersagen für die nächsten 5 Jahrzehnte:

- ▶ Standardmodell der Inflation etabliert
- ▶ Primordiale Gravitationswellen ausgeschlossen
- ▶ Schwarze Löcher als Teilchendetektor verwendet



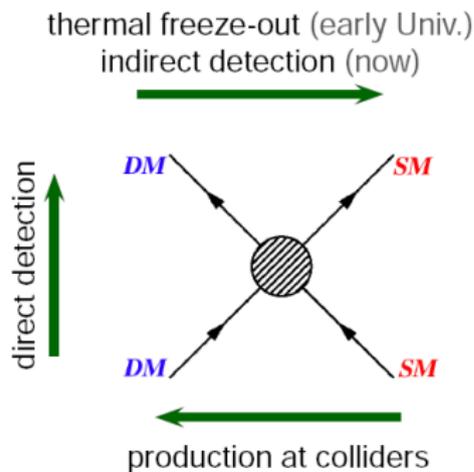
siehe TU News https://www.tuwien.ac.at/news/news_detail/article/7576/

Zukunftsprognosen

Wie geht es weiter in Kosmologie?

Ich lehne mich aus dem Fenster mit Vorhersagen für die nächsten 5 Jahrzehnte:

- ▶ Standardmodell der Inflation etabliert
- ▶ Primordiale Gravitationswellen ausgeschlossen
- ▶ Schwarze Löcher als Teilchendetektor verwendet
- ▶ Dunkle Materie entdeckt



Zukunftsprognosen

Wie geht es weiter in Kosmologie?

Ich lehne mich aus dem Fenster mit Vorhersagen für die nächsten 5 Jahrzehnte:

- ▶ Standardmodell der Inflation etabliert
- ▶ Primordiale Gravitationswellen ausgeschlossen
- ▶ Schwarze Löcher als Teilchendetektor verwendet
- ▶ Dunkle Materie entdeckt
- ▶ Multiversum akzeptiert



Zukunftsprognosen

Wie geht es weiter im Universum? (siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_the_far_future)

Vorhersagen die weit über die nächsten 5 Jahrzehnte hinausgehen:

- ▶ Sonne explodiert (5 Milliarden Jahre in Zukunft)
 - ▶ in 7,5 Milliarden Jahren: Erde und Mars fallen wahrscheinlich in Sonne (Roter Riese)
 - ▶ in 8 Milliarden Jahren: Sonne wird weisser Zwerg
 - ▶ in 100 Milliarden Jahren: alle Galaxien ausserhalb unserer lokalen Gruppe unbeobachtbar weil jenseits des kosmischen Horizontes (wegen Expansion des Universums)
 - ▶ in 150 Milliarden Jahren: kosmischer Mikrowellenhintergrund nicht mehr detektierbar mit heutiger Technologie (ca. 0,3 Kelvin)
 - ▶ in 450 Milliarden Jahren: alle Galaxien unserer lokalen Gruppe bilden eine einzige Galaxie
 - ▶ in 10^{12} – 10^{14} Jahren: letzten Sterne bilden sich in unserem Universum
 - ▶ in 10^{15} Jahren: Sonne auf 5 Kelvin abgekühlt

Zukunftsprognosen

Wie geht es weiter im Universum? (siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_the_far_future)

Vorhersagen die weit über die nächsten 5 Jahrzehnte hinausgehen:

- ▶ Sonne explodiert (5 Milliarden Jahre in Zukunft)
- ▶ Schwarze Löcher im Überfluss (ca. 10^{30} Jahre in Zukunft)
 - ▶ in $2 \cdot 10^{36} - 10^{43}$ Jahren: alle Atomkerne zerfallen (Proton ist instabil in Grand Unified Theories); die einzigen stellaren Objekte im Universum sind ab nun Schwarze Löcher
 - ▶ in $5,8 \cdot 10^{68}$ Jahren: erste stellare Schwarze Löcher verdampfen durch Hawkingstrahlung
 - ▶ in $1,3 \cdot 10^{99}$ Jahren: derzeit bekannte massivste Schwarze Loch verdampft durch Hawkingstrahlung
 - ▶ in 10^{106} Jahren: die letzten Schwarzen Löcher verdampfen durch Hawkingstrahlung

Zukunftsprognosen

Wie geht es weiter im Universum? (siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_the_far_future)

Vorhersagen die weit über die nächsten 5 Jahrzehnte hinausgehen:

- ▶ Sonne explodiert (5 Milliarden Jahre in Zukunft)
- ▶ Schwarze Löcher im Überfluss (ca. 10^{30} Jahre in Zukunft)
- ▶ Dunkle Energie dominiert (Jahreszahl hängt davon ab was man mit “dominiert” meint...)
 - ▶ in $10^{10^{50}}$ Jahren: Boltzmannhirn erscheint durch Zufallsfluktuationen

Zukunftsprognosen

Wie geht es weiter im Universum? (siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_the_far_future)

Vorhersagen die weit über die nächsten 5 Jahrzehnte hinausgehen:

- ▶ Sonne explodiert (5 Milliarden Jahre in Zukunft)
- ▶ Schwarze Löcher im Überfluss (ca. 10^{30} Jahre in Zukunft)
- ▶ Dunkle Energie dominiert (Jahreszahl hängt davon ab was man mit “dominiert” meint...)
- ▶ Universum zerfällt in anderes Universum mit kleinerer kosmologischer Konstante (ca. $10^{10^{123}}$ Jahre in Zukunft)
 - ▶ in $10^{10^{10^{56}}}$ Jahren: Quantenfluktuationen generieren neuen Urknall

Zukunftsprognosen

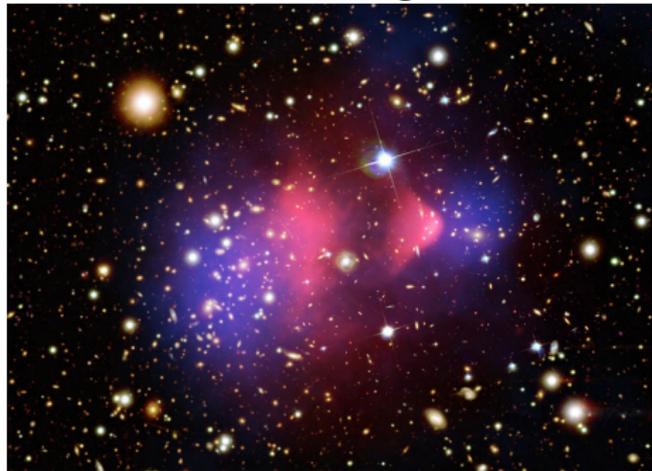
Wie geht es weiter im Universum? (siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_the_far_future)

Vorhersagen die weit über die nächsten 5 Jahrzehnte hinausgehen:

- ▶ Sonne explodiert (5 Milliarden Jahre in Zukunft)
- ▶ Schwarze Löcher im Überfluss (ca. 10^{30} Jahre in Zukunft)
- ▶ Dunkle Energie dominiert (Jahreszahl hängt davon ab was man mit “dominiert” meint...)
- ▶ Universum zerfällt in anderes Universum mit kleinerer kosmologischer Konstante (ca. $10^{10^{123}}$ Jahre in Zukunft)
- ▶ Andere Lebensformen in anderen Universen stellen sich ähnliche Fragen wie wir



Ich hoffe es hat Ihnen gefallen...



...noch Fragen?

