

Gravitationswellen

Daniel Grumiller

Institut für Theoretische Physik
TU Wien

VHS, Planetarium Wien
März 2021



Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

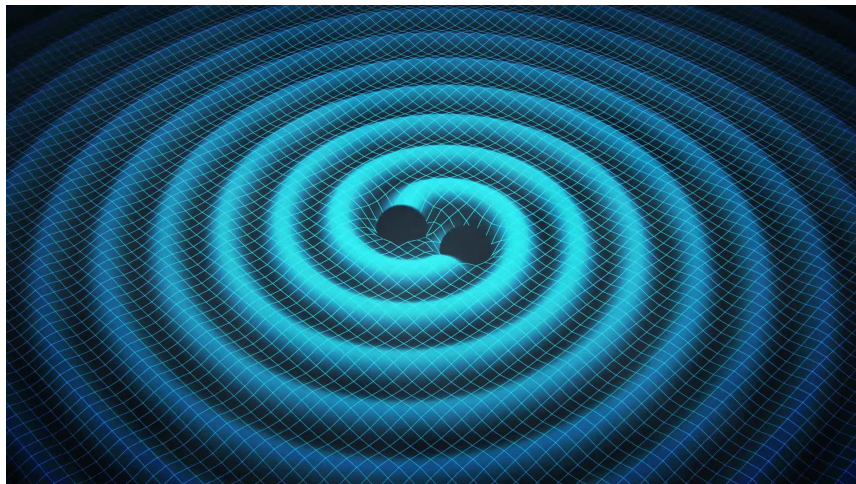
Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Executive Summary

- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher

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



Executive Summary

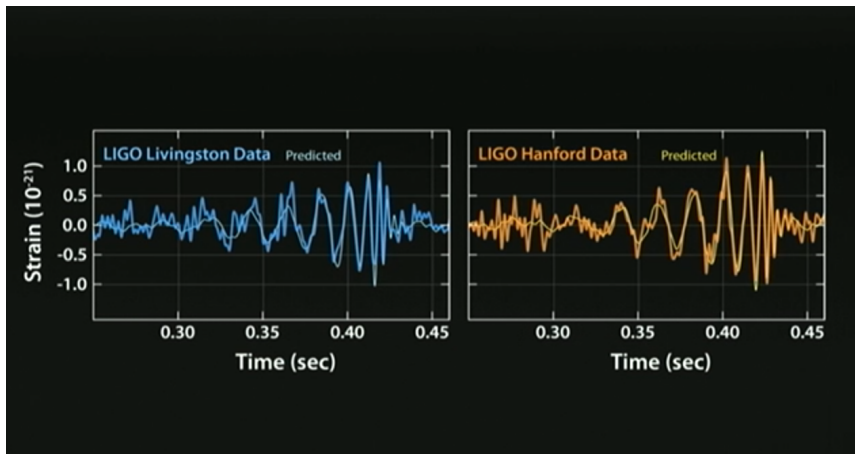
- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher
- ▶ 1916: Schwarzschild konstruiert erste Schwarze Loch Lösung

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



Executive Summary

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



Executive Summary

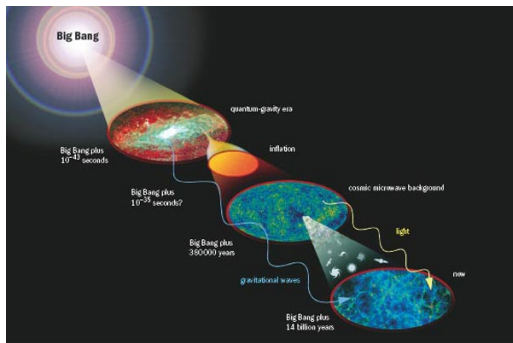
- ▶ 1915: Einsteins ART sagt Gravitationswellen vorher
- ▶ 1916: Schwarzschild konstruiert erste Schwarze Loch Lösung
- ▶ 2015: LIGO detektiert Gravitationswellen
- ▶ 2016: LIGO gibt erste Resultate bekannt

Interpretation: Schwarze Loch-Verschmelzung



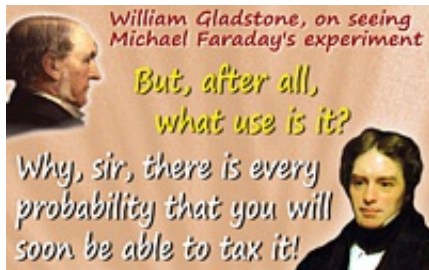
Executive Summary

- ▶ 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

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

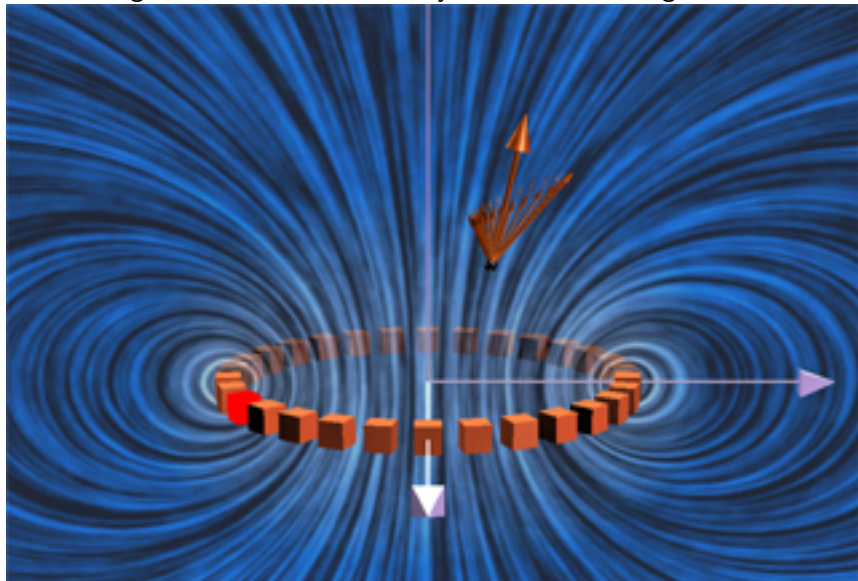
Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

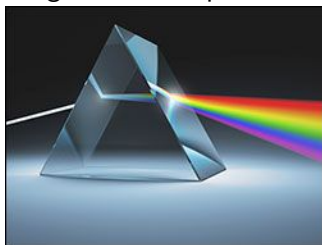
Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt

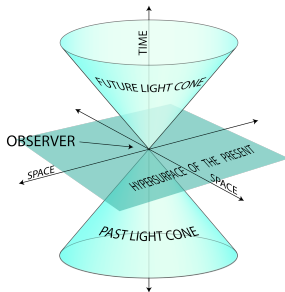


Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ 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

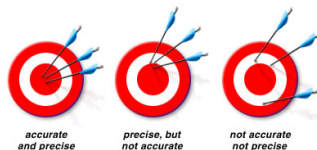
Beispiel: gyromagnetischer Faktor des Elektrons

Experiment (2008):

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

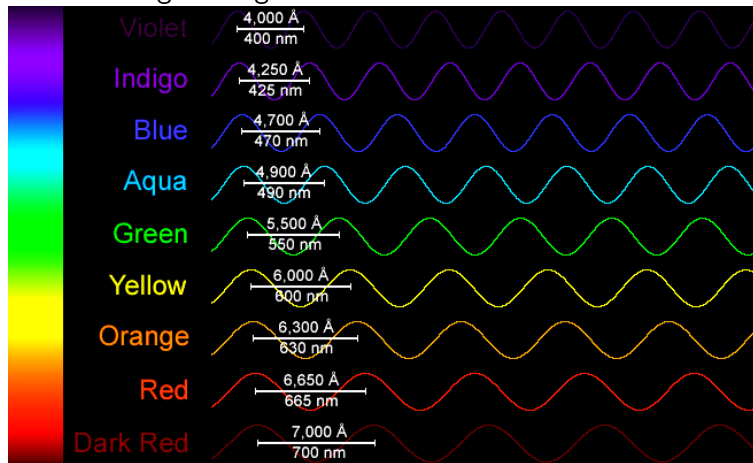
Theorie (2012):

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



Aufwärmübung: Elektromagnetismus

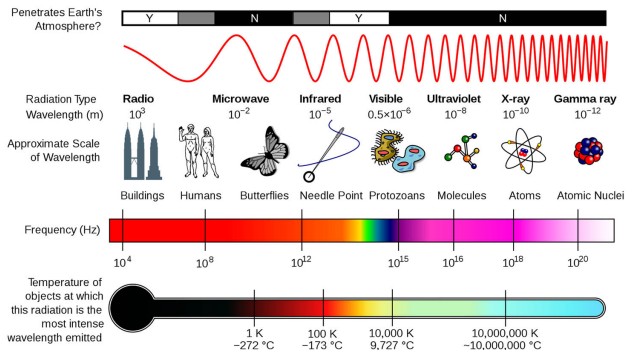
- ▶ Elektromagnetismus: Theorie die Dynamik von Ladungen beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Elektrizität, Magnetismus, Optik und SRT
- ▶ Quantenelektrodynamik mit unglaublicher Präzision getestet
- ▶ Ohne Ladungen: es gibt immer noch Lichtwellen



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

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

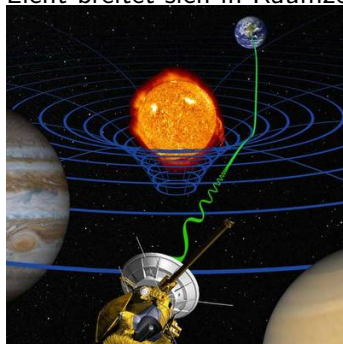


Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ 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

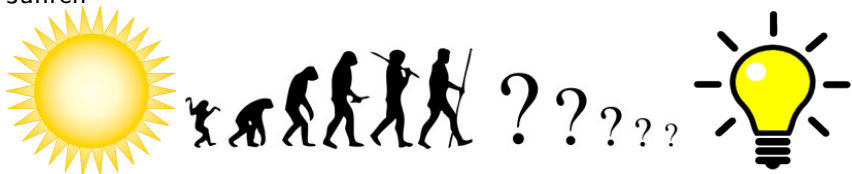


Aufwärmübung: Elektromagnetismus

- ▶ 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

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

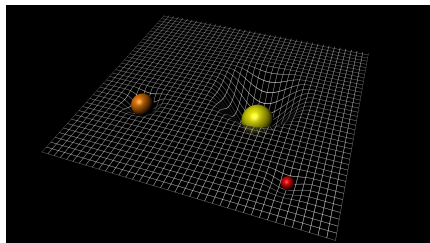
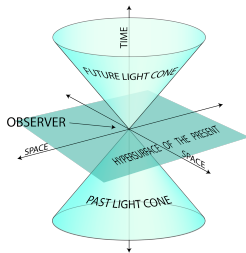
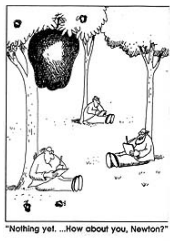
- ▶ Licht breitet sich in Raumzeit aus
- ▶ Im Vakuum breitet sich Licht mit grösstmöglicher Geschwindigkeit aus
- ▶ Erste Beobachtung von Licht durch Menschheit: vor ca. 4 Millionen Jahren



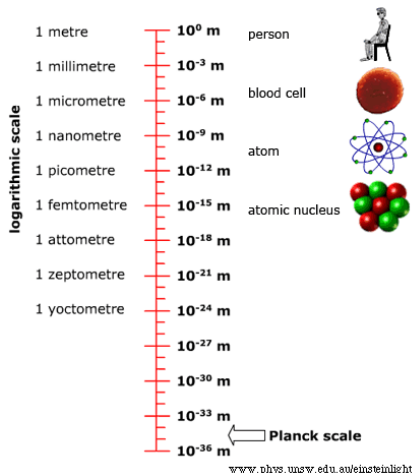
- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen (genauer: Energie) beschreibt



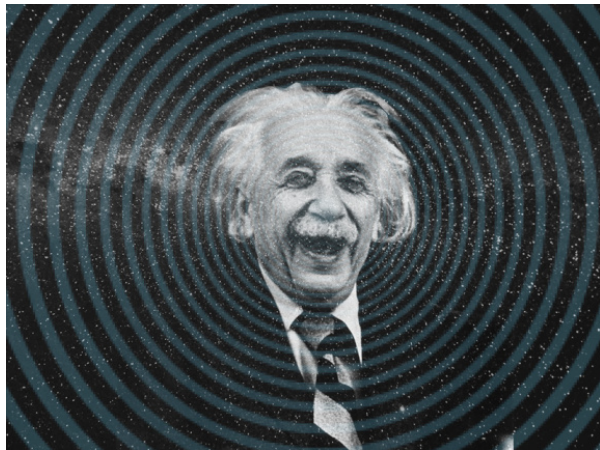
- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen (genauer: Energie) beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung



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

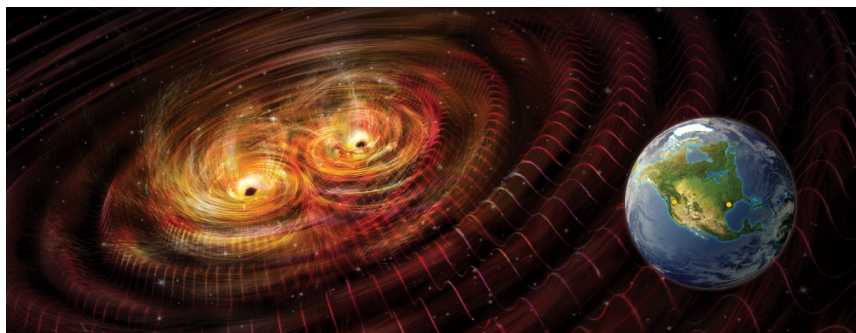


- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen (genauer: Energie) beschreibt
- ▶ Vereinheitlicht Gravitation und SRT; beschreibt Raumzeitkrümmung
- ▶ Quantengravitation bislang nicht direkt experimentell getestet
- ▶ Ohne Massen: es gibt immer noch Gravitationswellen



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

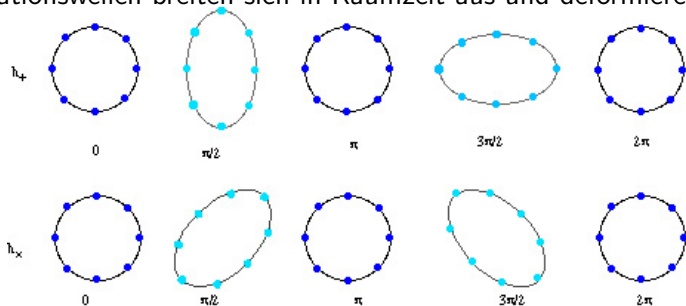
$$R_{\mu\nu} = 0 \quad \Rightarrow \quad \square h_{\mu\nu} = 0$$



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

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

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



- ▶ ART: Theorie die Dynamik von Massen (genauer: Energie) 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. 4 Jahren



Gravitationswellenquellen

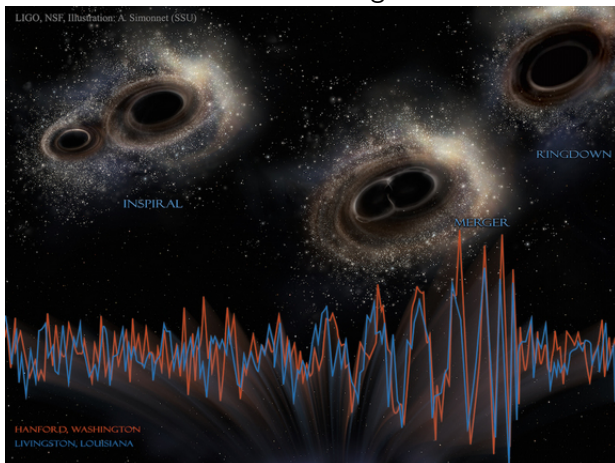
- ▶ Jede Beschleunigung die nicht sphärisch oder zylindrisch symmetrisch ist produziert Gravitationswellen

Gravitationswellenquellen

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

Gravitationswellenquellen

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



Gravitationswellenquellen

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

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

Gravitationswellenquellen

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

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

Erhalten obere Schranke an Gravitationswellenenergie

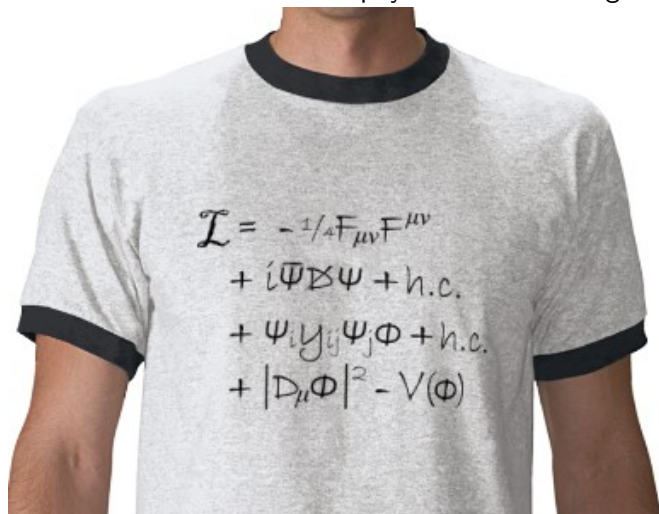
$$E \leq (2 - \sqrt{2})m \approx 29\% \text{ of initial energy}$$

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

Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

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

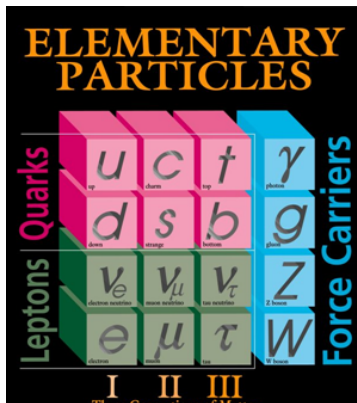
- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie



Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

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

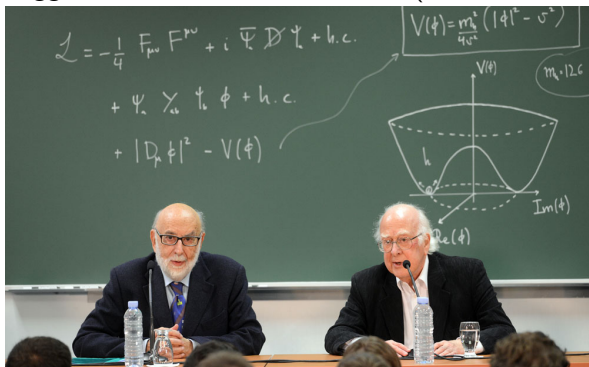
- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 10 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)



Gravitationswellen als letztes bekanntes Puzzlesteinchen

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

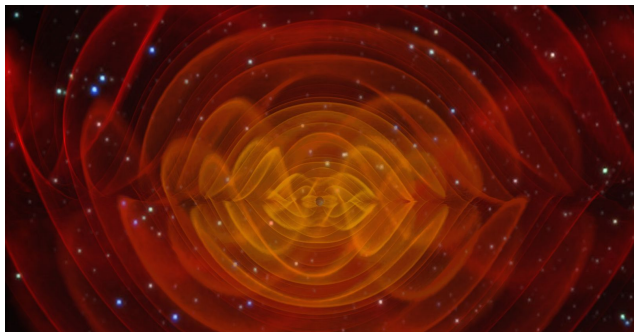
- ▶ Alle bekannten Naturkräfte mit erstaunlicher Genauigkeit beschrieben durch Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie
- ▶ Vor 10 Jahren: alle Teilchen die Standardmodelle vorhergesagt haben entdeckt, bis auf Higgs & Graviton (oder klassisches Gegenstück, Gravitationswellen)
- ▶ Juli 2012: 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 10 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 10 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 10 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 10 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 10 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!

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen

Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ Im Prinzip einfach!



Wie misst man Gravitationswellen?

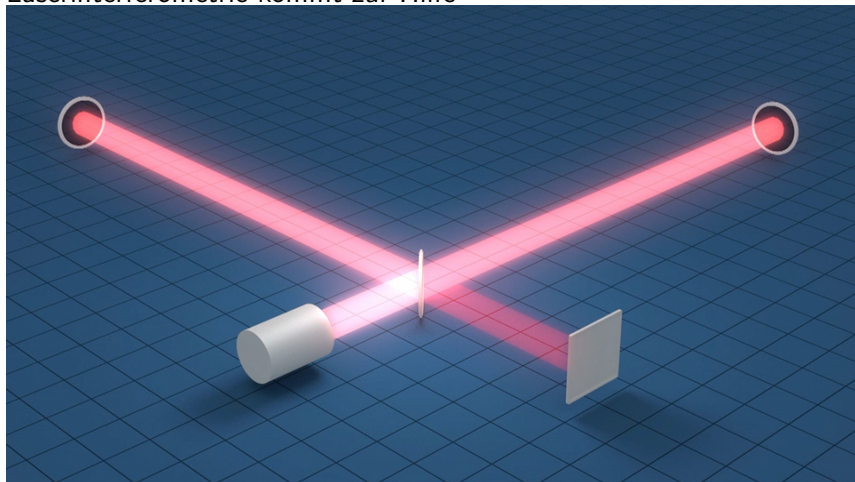
- ▶ Im Prinzip einfach!
- ▶ In Praxis fast unmöglich!

Typische Gravitationswellen ändern räumliche Abstände um kleinen Bruchteil des Protonradius!



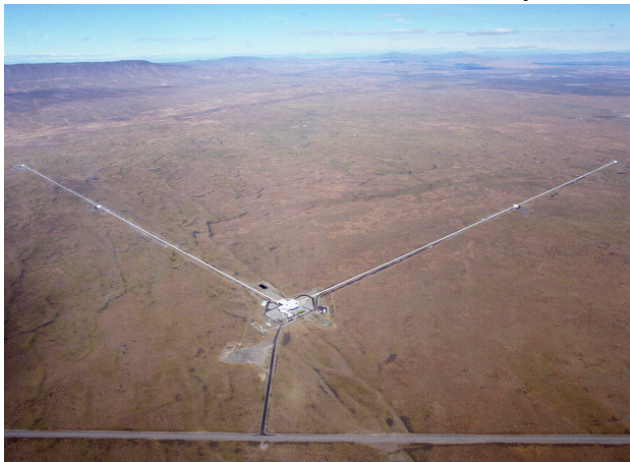
Wie misst man Gravitationswellen?

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



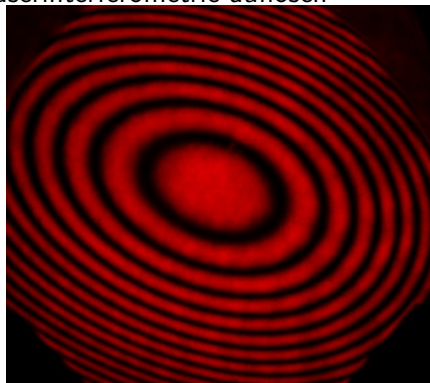
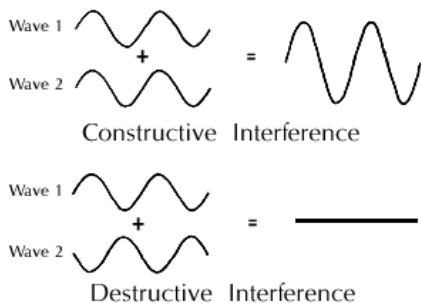
Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ 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)

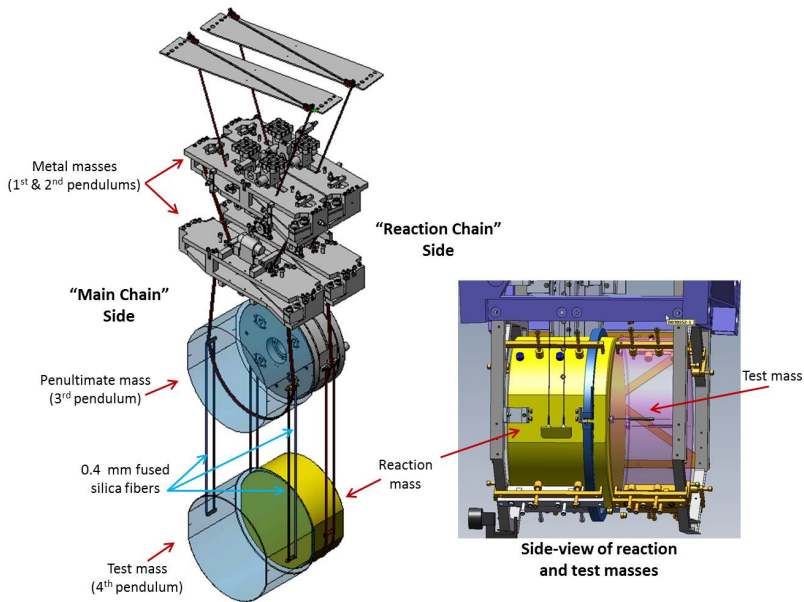


Wie misst man Gravitationswellen?

- ▶ 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



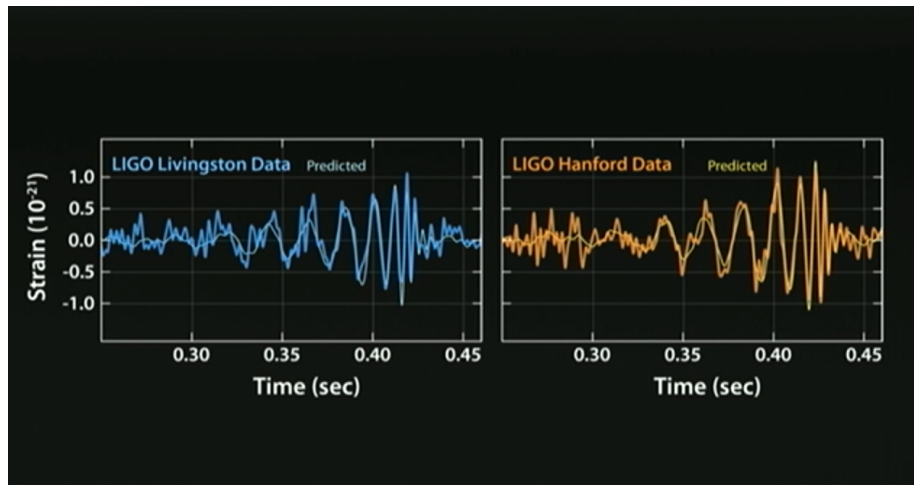
Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

Gravitationswellenanwendungen



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

Gravitationswellenzusammenfassung

Gravitationswellentheorie

Gravitationswellentechnologie

Gravitationswellenbeobachtung

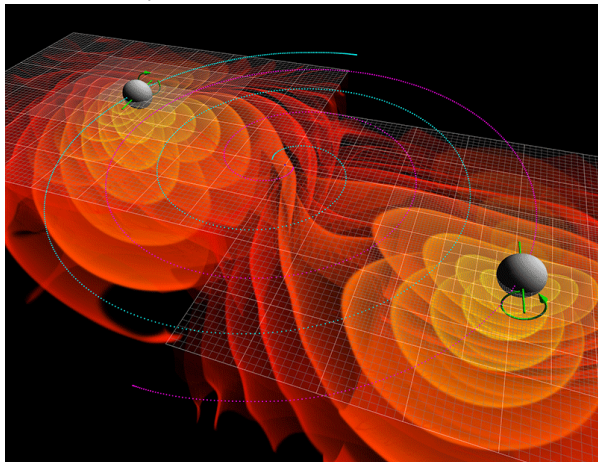
Gravitationswellenanwendungen

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

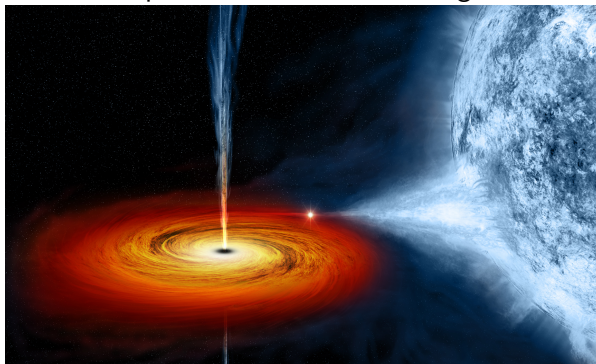
- ▶ ART auf qualitativ neue Art bestätigt
- ▶ Präziser: 2-Körperproblem unglaublich kompliziert in ART (100-tausend CPU-Stunden nötig um Verschmelzung zwei Schwarzer Löcher zu beschreiben)
- ▶ Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus

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 (2016)

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 (2016)
- ▶ 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 (2016)
- ▶ Kann vor Licht im Schatten verstecken, aber nicht vor Gravitation
- ▶ Beispiel 1: neue Eigenschaften Schwarzer Löcher, Neutronensterne oder anderen massiven Objekten

Experimentelle Anwendungen: Gravitationswellenastronomie

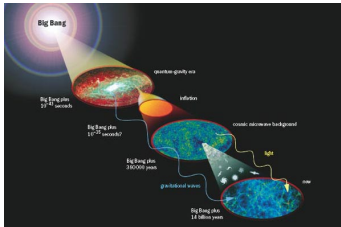
Eine neue Art das Universum wahrzunehmen!

- ▶ 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 (2016)
- ▶ 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 (2016)
- ▶ 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

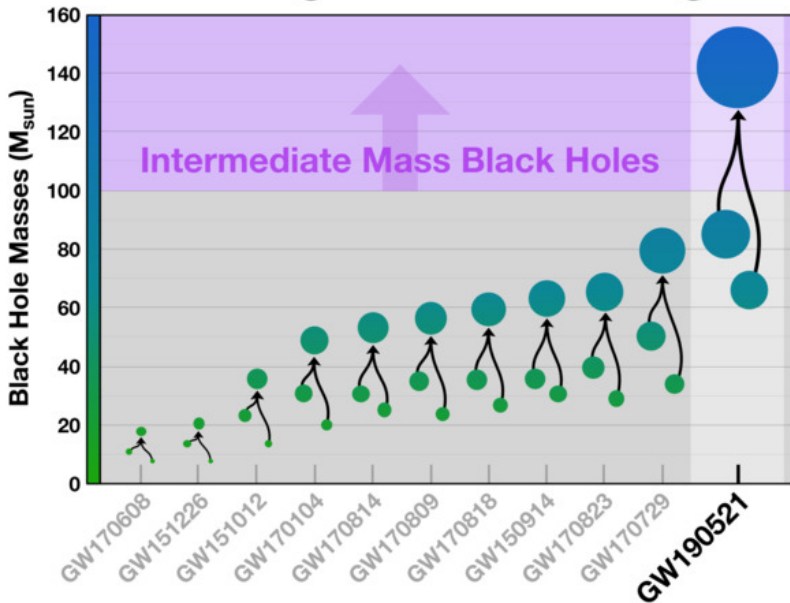
Industrielle Anwendungen

- ▶ 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

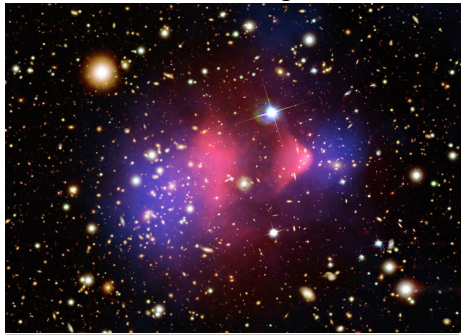
Industrielle Anwendungen

- ▶ 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)

LIGO-Virgo Black Hole Mergers



Ich hoffe es hat Ihnen gefallen...



...noch Fragen?

