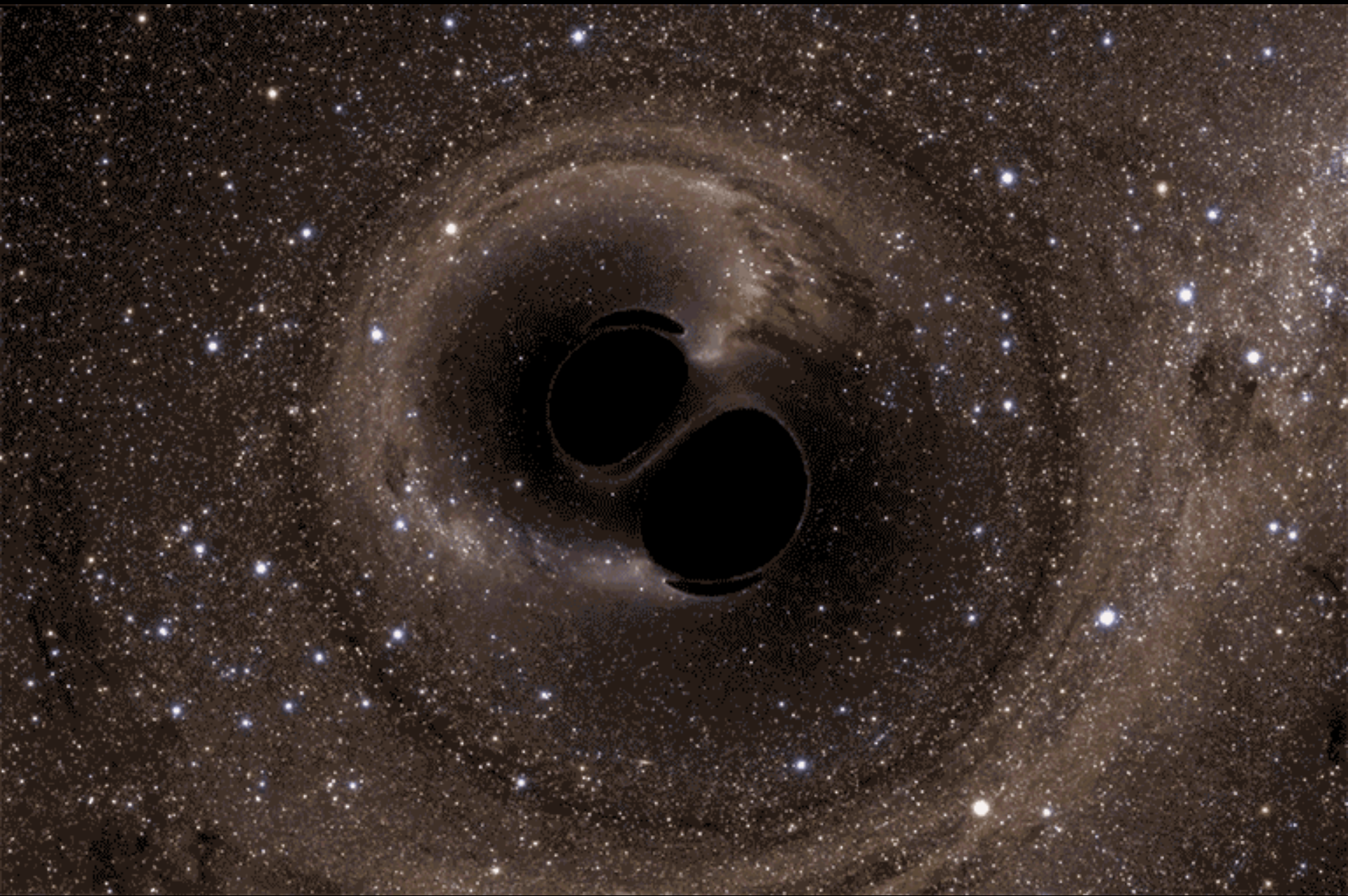
Wenn zwei Schwarze Löcher kollidieren…



Schwarze Löcher lassen sich anhand der Gravitationswellen, die bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher entstehen und die sich mit Vakuumlichtgeschwindigkeit ausbreiten, detektieren.

- Die Gravitationswellen stauchen und strecken den Raum. Sie beeinflussen die Struktur der Raumzeit
- Gravitationswellen sind eine Verzerrung der Geometrie, d. h. des Raumes selbst
- Gravitatonswellen breiten sich völlig ungehindert im Universum aus
- Gravitationswellen deformieren alle im Raum eingebettete Objekte auf eine ganz spezielle Art und Weise
- Die „Quelle“ von Gravitationswellen sind beschleunigte schwere Massen

→ Gravitationswellen-Teleskope

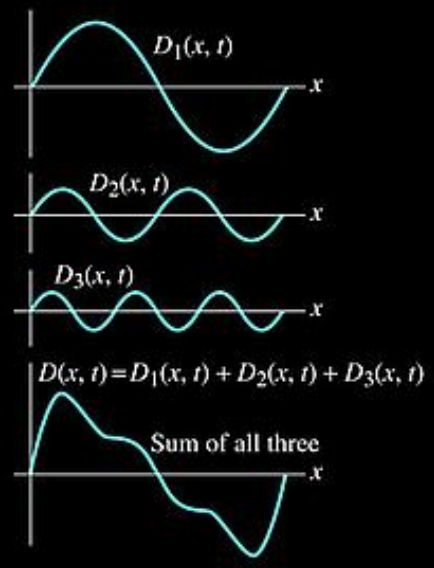
Eigenschaften von Gravitationswellen

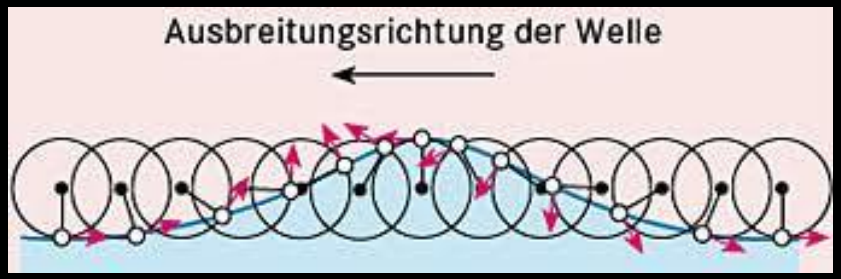
„Klassische“ Wellen:

Mechanische Wellen (Seilwellen, Wasserwellen) - transversal
Elektromagnetische Wellen (Licht, Radiowellen) - transversal
Dichtewellen (Schall) - longitudinal

„Medium“, Amplitude, Frequenz (Wellenzahl), Wellenlänge, Ausbreitungsrichtung, momentane Auslenkung (Elongation, Phase) , Dispersion

- darstellbar durch die Überlagerung (Superposition) von Sinus- und Kosinuswellen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz (Fourier-Theorem)
- Wellen übertragen Energie von einem Ort zu einem anderen



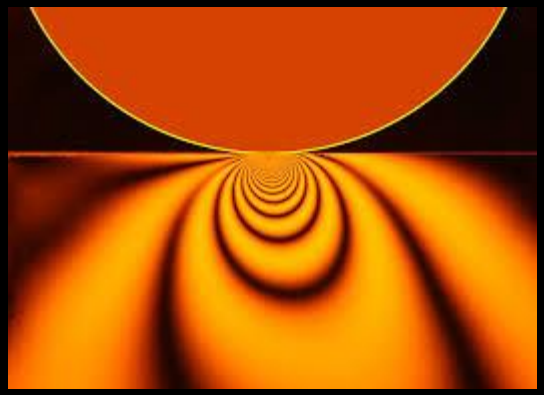


„Klassische“ Felder

Skalarfelder (Temperatur, Dichte)
– jedem Raumpunkt wird eine Zahl zugeordnet

Vektorfelder (Strömung, Magnetfeld)
– jedem Raumpunkt wird ein Vektor zugeordnet

Tensorfelder (Spannungen in Festkörpern, Raumzeit)
– jedem Raumpunkt wird ein Tensor zugeordnet

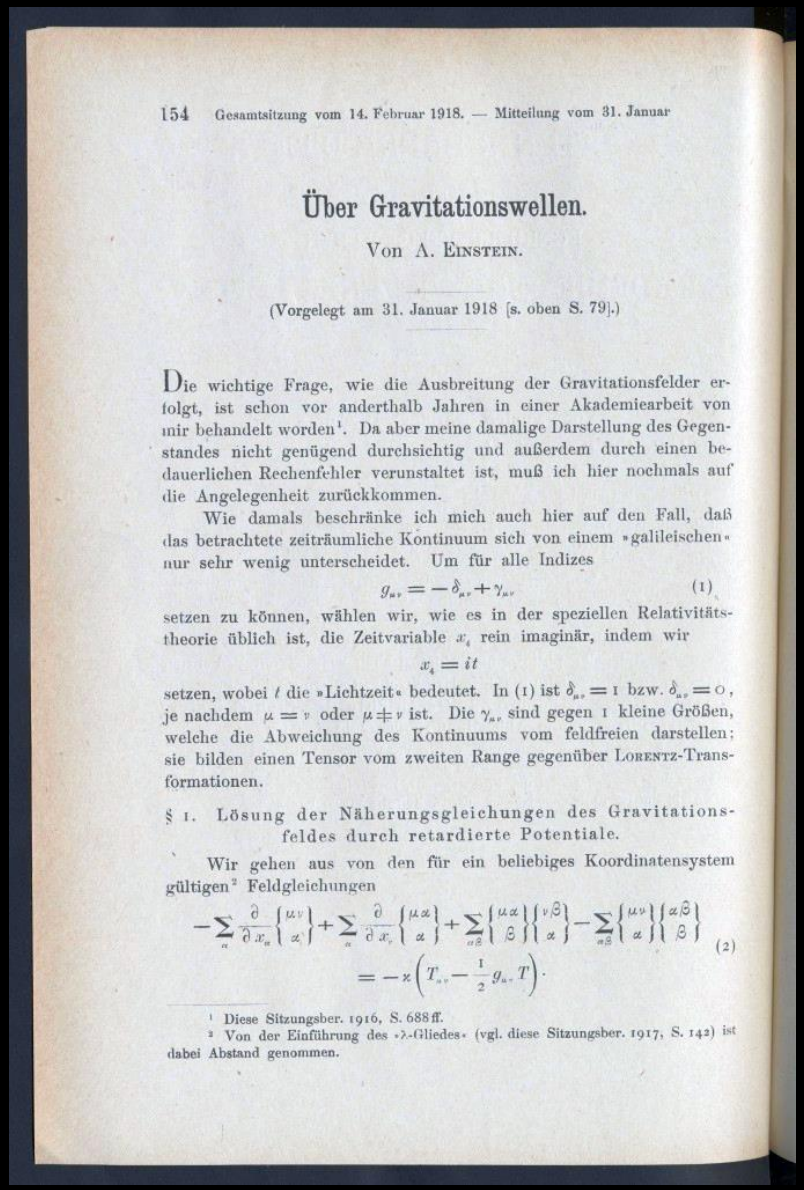


➢ Wellen sind Phänomene, die Vektor- und Tensorfeldern immanent sind

In der Allgemeinen Relativitätstheorie wird die Gravitation als eine Krümmung der Raumzeit beschrieben. Dazu werden jedem Punkt der Raumzeit 10 Zahlen zugeordnet, die den metrischen Tensor bilden. Beim „Durchlaufen“ einer Gravitationswelle ändern sich diese 10 Zahlen wellenartig → Gravitationswelle

Gravitationswellen sind Erschütterungen des Raum-Zeit-Kontinuums oder „Raumzeitbeben“, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Entdeckung der Gravitationswellen (Albert Einstein, 1916)



154 Gesamtsitzung vom 14. Februar 1918. — Mitteilung vom 31. Januar

Über Gravitationswellen.

Von A. Einstein.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden[1]. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \tag{1}$$

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitätstheorie üblich ist, die Zeitvariable x_4 rein imaginär, indem wir

$$x_4 = it$$

setzen, wobei t die »Lichtzeit« bedeutet. In (1) ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$ ist. Die $\gamma_{\mu\nu}$ sind gegen 1 kleine Größen, welche die Abweichung des Kontinuums vom feldfreien darstellen; sie bilden einen Tensor vom zweiten Range gegenüber Lorentz-Transformationen.

§ 1. Lösung der Näherungsgleichungen des Gravitationsfeldes durch retardierte Potentiale.

Wir gehen aus von den für ein beliebiges Koordinatensystem gültigen[2] Feldgleichungen

$$-\sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \begin{Bmatrix} \mu\nu \\ \alpha \end{Bmatrix} + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\nu} \begin{Bmatrix} \mu\alpha \\ \alpha \end{Bmatrix} + \sum_{\alpha\beta} \begin{Bmatrix} \mu\alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \nu\beta \\ \alpha \end{Bmatrix} - \sum_{\alpha\beta} \begin{Bmatrix} \mu\nu \\ \alpha \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha\beta \\ \beta \end{Bmatrix} = -\varkappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right). \tag{2}$$

[1] Diese Sitzungsber. 1916, S. 688ff.

[2] Von der Einführung des »λ-Gliedes« (vgl. diese Sitzungsber. 1917, S. 142) ist dabei Abstand genommen.

Eine kleine Störung in der Metrik breitet sich wellenförmig aus

Ursache: Beschleunigte Massen

Gravitationswellenstrahlung ist eine Quadrupolstrahlung!

Nur zeitliche Änderungen des Quadrupolmoments einer Masseverteilung führt zur Emission von Gravitationsstrahlung (GS)

- Rotierende Kugeln → keine GS
- Rotierende Kugeln mit „Höcker“ → GS
- Kollabierende Objekte → GS
- Um einen Stern rotierende Objekte → GS

Die Einsteinsche Quadrupolformel gibt die Leistungsabgabe einer Masseverteilung an

Die die Formel für die durch Gravitationswellen emittierte „Strahlung“ den Vorfaktor

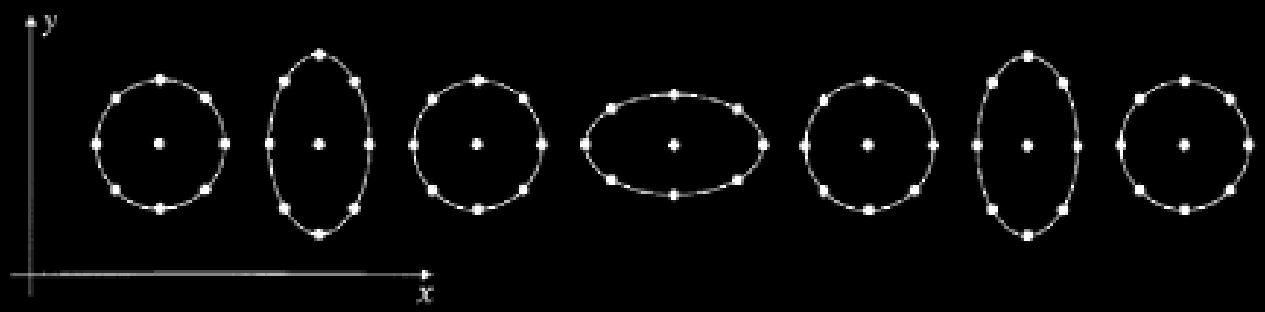
$$\frac{G}{c^5} \approx 10^{-53}$$

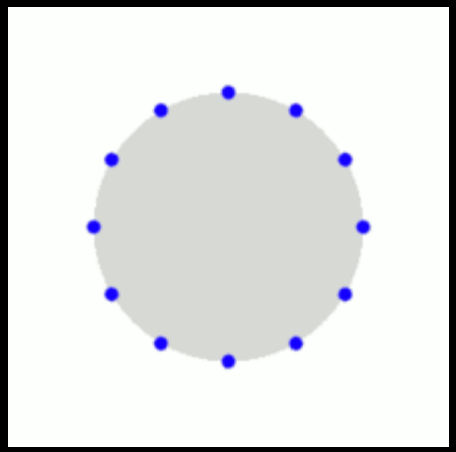
enthält, ist die Leistungsabgabe EXTREM GERING!

<u>Beispiel:</u>

Die Erde emittiert bei ihrer Umlaufbewegung um die Sonne etwa 200 Watt an Gravitationswellenstrahlungsleistung (= „Gravitationswellenleuchtkraft).

Unter „normalen“ kosmischen Bedingungen sind Gravitationswellen nicht nachweisbar.





Prinzipielle Möglichkeit des Gravitationswellennachweises

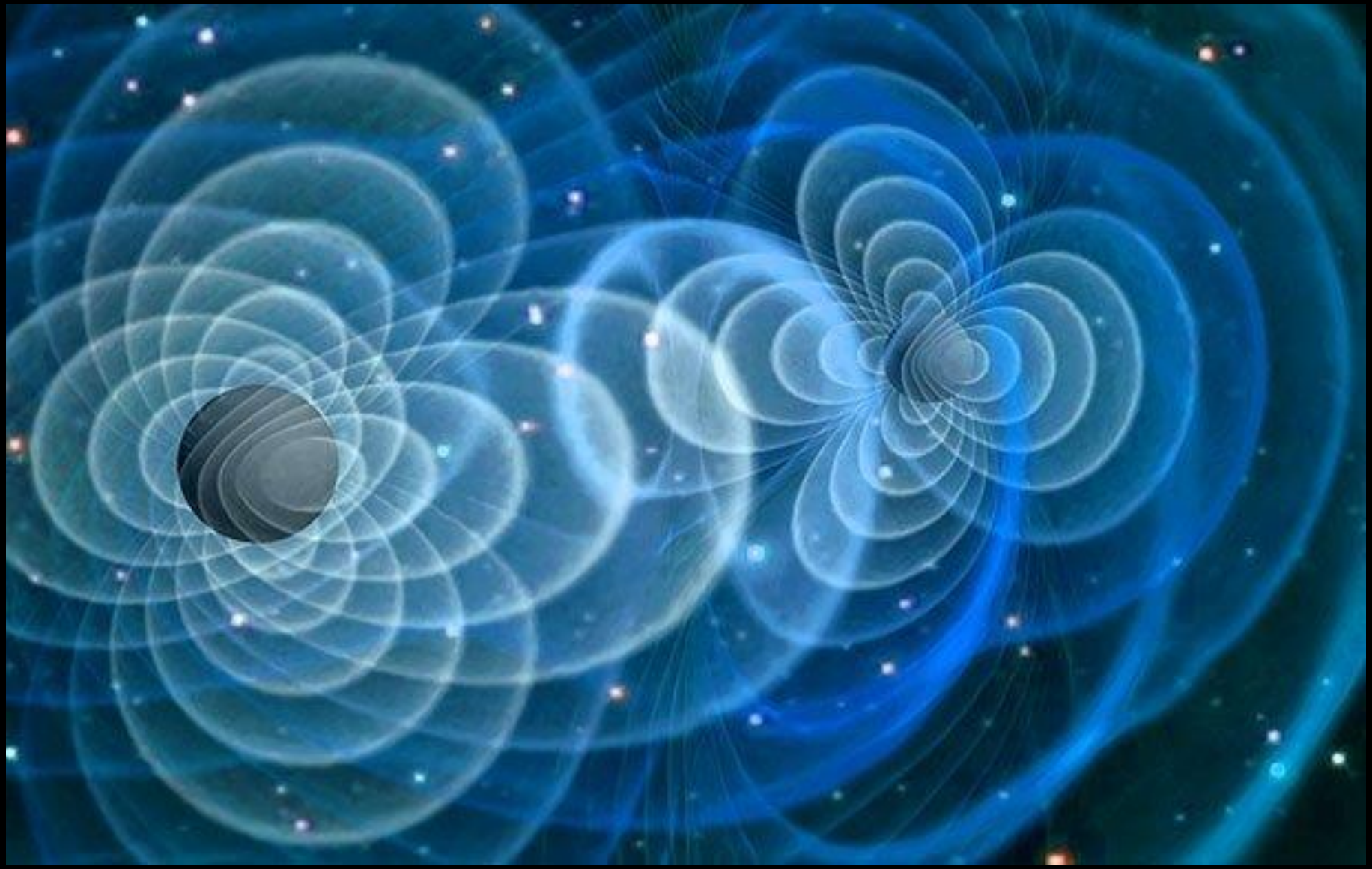
Die „Quelle“ der Gravitationswellen muss AUßERGEWÖHNLICH STARK sein:

- Kernkollaps einer nicht allzu weit entfernten Supernova (quadratisches Abstandsgesetz)
- Binäre Pulsare – Abstrahlung erhöht Umlauffrequenz
- Verschmelzung von Neutronensternen bzw. Schwarzen Löchern

Eine durchlaufende Gravitationswelle staucht und streckt den Raum, den die Welle durchläuft, auf eine ganz bestimmte Art und Weise. Damit ändern sich die Entfernungen zwischen zwei verschiedenen Objekten auf eine charakteristische Art und Weise (ein „Festkörper“ wird quasi dadurch periodisch deformiert).

<u>Messprinzip:</u>

Messung der Deformation („Weber-Zylinder“) oder des Objektabstandes (Interferometrie)

Erwartete Längendifferenz: ca. 1/1000 des Protonendurchmessers (8*10^-16 m = 0.9 fm)

VIDEO: Gravitationswellen – ein neues Fenster zum Universum