

## **Gravitationswellen**

Von Univ. Prof. Dr. Roman U. Sexl, Wien

Vortrag, gehalten am 24. März 1971

### **G r a v i t a t i o n s w e l l e n**

In den letzten Monaten wurden die Resultate eines Experimentes veröffentlicht, das für die Physik von ähnlich fundamentaler Bedeutung sein könnte wie die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch H. Hertz: Josef Weber konnte nach zehnjährigen Vorarbeiten die ersten experimentellen Beweise für die Existenz von Gravitationswellen vorlegen.

Gravitationswellen wurden von A. Einstein aufgrund der allgemeinen Relativitätstheorie 1920 theoretisch vorhergesagt. Er hielt jedoch ihre Messung für praktisch unmöglich, da alle Meßanordnungen die von ihm in Betracht gezogen wurden um viele Größenordnungen zu unempfindlich waren, um beobachtbare Effekte zu liefern. So wurden in den Jahren 1920 bis 1960 zwar zahlreiche theoretische Spekulationen über Gravitationswellen veröffentlicht, ihre Messung jedoch nicht

ernstlich versucht. Erst 1960 begann Weber mit den Vorarbeiten für sein Experiment, dem sowohl die ungeheuren Fortschritte der Meßtechnik, als auch neue Ideen über Quellen und Entstehung von Gravitationswellen erstmals — wenn auch geringe — Erfolgchancen gaben. Um diese Ideen über die Entstehung von Gravitationswellen näher zu erläutern, müssen wir uns zunächst mit dem Energiehaushalt des Kosmos beschäftigen.

### Der Energiehaushalt des Kosmos

Die Energien, die in Sternen freigesetzt werden, haben ihren Ursprung üblicherweise in der Kernenergie. Wasserstoff wird im Sterninnern zu Helium verschmolzen, wobei ein geringer Bruchteil, etwa 1%, der Masse der Wasserstoffkerne (Protonen) in Energie umgewandelt wird. Dies geschieht nach der berühmten Einstein'schen Relation

$$E = mc^2 \quad (1)$$

die den Wechselkurs Energie (E) gegen Masse (m) festlegt. In (1) ist  $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/sec}$ . die Lichtgeschwindigkeit. Eine anschauliche Deutung von (1) vermittelt vielleicht die Feststellung, daß Österreich jährlich etwa 1 kg elektrische Energie erzeugt, wenn man anstelle der üblichen Charakterisierung der Energiemenge durch Kilowattstunden mit Hilfe von (1) auf Gramm als Energieeinheit übergeht. Die Sonne dagegen strahlt pro Sekunde etwa

$4 \cdot 10^{12}$  g ihrer Masse in Form von elektromagnetischen Wellen (Licht etc.) ab. Die Sonnenmasse, etwa  $10^{33}$  g, erlaubt es die Lichtaussendung für eine beruhigend lange Zeit aufrecht zu erhalten: Ein Prozent der Gesamtmasse, also etwa  $10^{31}$  g, kann in Energie umgesetzt werden,  $4 \cdot 10^{12}$  g wird pro Sekunde verbraucht, so daß eine Lebensdauer  $T$  von

$$T \cong 3 \cdot 10^{18} \text{ sec.} = 100 \text{ Milliarden Jahre.} \quad (2)$$

für die Sonne zu erwarten ist.

### Gravitationsenergie

Vor der Aufweisung der Kernenergie als wesentliche Energiequelle der Sterne schien nur ein anderer Mechanismus in Frage zu kommen, der sich aber als unzureichend erwies: Die Bildung eines Sterns aus einer diffusen Wolke von Materie (Wasserstoffgas) (siehe Fig. 1)

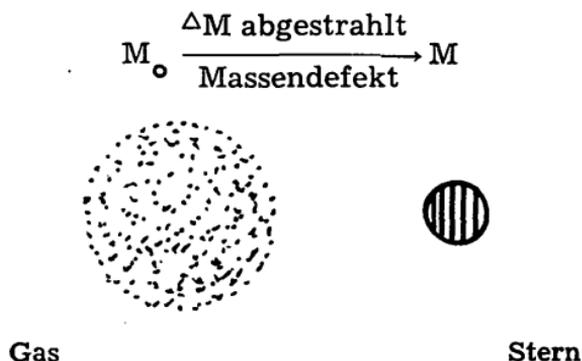


Fig. 1 Zur Sternentstehung

geschieht bekanntlich durch die wechselseitige Gravitationsanziehung der einzelnen Gasmoleküle. Zuerst langsamer und dann immer schneller beginnen die Gasmoleküle aufeinander zuzufallen, bis schließlich die Kontraktion durch den entstehenden Druck gebremst wird, hohe Temperaturen entstehen, und ein Stern leuchtet auf. Hier ist offenbar die Gravitation die Energiequellen, deren Stärke wir nun abzuschätzen haben. Aus der Theorie folgt, daß die bei der Sternentwicklung freiwerdende Gravitationsenergie von der Größenordnung

$$E = G M^2/R \quad (3)$$

ist, wobei  $G$  die Gravitationskonstante ( $G = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{g}^{-1} \text{cm}^3 \text{sec}^{-2}$ ) und  $R$  der Radius des entstehenden Sternes ist. Diese Energie wird bei der Sternentstehung in Form von Licht abgestrahlt, so daß der entstehende Stern eine um  $\Delta M = E/c^2$  geringere Masse  $M$  hat als die Gaswolke (Masse  $M_0$ ), aus der er entstanden ist; es gilt

$$M = M_0 - \frac{GM_0^2}{c^2 R} = M_0 \left( 1 - \frac{GM_0}{c^2 R} \right) \quad (4)$$

Die Größe

$$R = \frac{GM_0}{c^2} \quad (5)$$

ist nach (4) eine Länge, da sie nach Division durch den Sternradius  $R$  eine dimensionslose Größe, nämlich das Verhältnis von  $\Delta M$  (dem Massendefekt) zu  $M_{\odot}$ , der Ausgangsmasse angibt

$$\boxed{\frac{\Delta M}{M_{\odot}} = \frac{R}{R}} \quad (6)$$

$R$  ist der berühmte Schwarzschildradius. Für die Sonne ist  $R = 1.5 \text{ km}$  und  $R = 10^6 \text{ km}$ , so daß  $\Delta M/M_{\odot} \cong 10^{-6}$ . Die Gravitationsenergie der Sonne macht daher nur ein zehntausendstel ihrer Kernenergie aus und die Gravitationsenergie könnte die Leuchtkraft der Sonne nur einige Jahrmillionen lang garantieren, dann würde die Sonne erlöschen — wenn es nicht Kernreaktionen gäbe, für die das anfängliche Zusammenstürzen der Gaswolke zum Stern und die dabei entstehenden hohen Temperaturen nur die Initialanordnung darstellen.

### Weiß e Z w e r g e, N e u t r o n e n s t e r n e, C o l l a p s a r s

Warum aber ist die Gravitation für den Energiehaushalt des Normalsternes nicht bedeutender? Der Grund dafür liegt in der gewaltigen Größe des Sternradiuses  $R$ , der das Verhältnis  $R/R$ , das in (6) eingeht, sehr klein macht. Wegen ihrer hohen

Temperatur und den dadurch bewirkten hohen Drucken haben normale Sterne einen Radius von der Größenordnung von Millionen Kilometern.

Wenn aber die Kernreaktionen erlöschen und der Stern seine Temperatur nicht mehr aufrechterhalten kann, so stürzt er weiter in sich zusammen und seine Altersphase beginnt. Wie weit er zusammenstürzt, hängt von seiner Masse ab: Sterne bis zu etwa zwei Sonnenmassen stürzen bis auf einen Radius von einigen tausend Kilometern zusammen und bilden (bei einer Dichte von etwa einer Tonne pro Kubikzentimeter) weiße Zwerge, die den Astronomen seit langem bekannt sind.

Sterne, die schwerer sind als zwei Sonnenmassen, stürzen nach dem Erlöschen der Kernreaktion noch weiter in sich zusammen: Bei etwa 2—10 Sonnenmassen entsteht in einer ungeheuren Supernovaexplosion ein Neutronenstern, der etwa ein-einhalbmal so schwer wie die Sonne ist, aber einen Radius von nur 10 km hat, so daß ein Kubikzentimeter eines derartigen Sternes 100 Millionen Tonnen wiegt.

Ein Großteil der Masse des ursprünglichen Sternes wird bei der Supernovaexplosion, die zur Entstehung des Neutronensternes führt, hinausgeschleudert und bildet eine leuchtende Wolke, einen Nebel. Der bekannteste derartige Nebel ist der Krabbennebel, dessen explosionsartige Entstehung

im Jahre 1054 von chinesischen Astronomen registriert wurde.

Ist der Stern schwerer als 10 Sonnenmassen, so stürzt er theoretisch in seiner Altersphase völlig in sich zusammen und nichts kann den kompletten Kollaps aufhalten. Ein „Collapsar“ entsteht und nur ein „schwarzes Loch“ im Raum erinnert daran, daß dort einmal ein Stern gewesen war.

Bei der Entstehung von Neutronensternen (und noch vielmehr bei der Bildung von Collapsaren, die aber experimentell noch nicht gefunden wurden und deren Existenz daher nicht feststeht) werden ungeheure Energien frei: Das Verhältnis von Schwarzschildradius zu Radius, das ja den Bruchteil der Sternmasse angibt, der beim Kollaps in Energie umgewandelt wird, ist etwa 0.1 oder noch größer.

Etwa 10% der Gesamtmasse des Sternes, eine Energie also, die die Sonne in ihrer gesamten Lebensdauer nicht ausstrahlen wird, werden beim Kollaps frei. Dieser Kollaps dauert nur Bruchteile einer Sekunde, da die entscheidenden letzten Phasen bei der Bildung eines Neutronensternes fast einem freien Fall mit Lichtgeschwindigkeit gleichkommen.

### Gravitationswellen

Die beim Kollaps freiwerdende Energie wird teilweise in der Form von elektromagnetischen

Wellen (Licht) abgestrahlt, teilweise aber auch in Form von Gravitationswellen emittiert. Was aber sind Gravitationswellen? Dies kann am besten durch einen Vergleich mit elektromagnetischen Wellen erläutert werden.

Wenn eine elektrische Ladung beschleunigt wird (z. B. hin- und herschwingt), so sendet sie elektromagnetische Wellen aus (siehe Fig. 2).

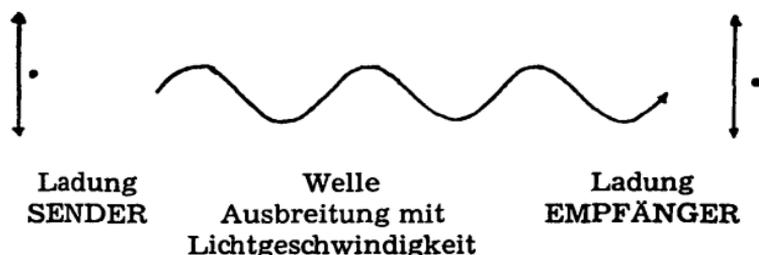


Fig. 2 — Elektromagnetische Wellen

Treffen diese Wellen auf eine andere Ladung, so bringen sie diese Ladung zum Mitschwingen, jede elektrische Ladung kann demnach sowohl als Sender als auch als Empfänger von Strahlung dienen. Genauso verhält es sich mit Gravitationswellen: Wird eine Masse beschleunigt, so sendet sie Gravitationswellen aus, die wieder andere Massen zum Mitschwingen anregen können (Fig. 3). Genau wie Lichtwellen breiten sich auch Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$$

aus.

Es scheint daher sehr einfach zu sein, Gravitationswellen zu messen: Man nimmt eine Masse, bringt sie zum Schwingen und stellt in einiger Entfernung eine andere schwingungsfähige Masse auf, die zum Mitschwingen gebracht wird. Die Rechnung zeigt aber, daß bei allen Massen und Schwingungen, die im Labor erzeugt werden können, nur eine unmeßbar kleine Energieströmung



Fig. 3 — Gravitationswellen.

in Form von Gravitationswellen zustandekommt. Ja selbst ein so großer Körper wie die Erde, die ja auf ihrer Bahn um die Sonne ständig Beschleunigungen unterworfen ist, sendet nur 1 Watt in Form von Gravitationswellen aus.

Effektive Gravitationswellensender können heute noch nicht im Labor gebaut werden, und das ist auch der Grund warum 40 Jahre lang niemand ernstlich an eine Entdeckung von Gravitationswellen dachte.

### Weber's Experiment

Im Jahre 1960 begann Prof. J. Weber (University of Maryland) mit dem Bau eines Gravitationswellenempfängers, wobei er sich der Unmöglichkeit, einen analogen Sender zu bauen, wohl bewußt war. Er hoffte aber auf Gravitationswellen, die ihren Ursprung in den Supernovaausbrüchen und der Entstehung von Neutronensternen haben. Wenn ein derartiger Vorgang sich in unserer Milchstraße ereignet, so sollte es doch möglich sein, die dabei auftretenden Gravitationswellen zu messen. Webers Grundidee war, zur Messung von Gravitationswellen Resonanzphänomene heranzuziehen, die man auch beim Empfang von Radiowellen verwendet: Wenn die einfallende Welle und der Empfänger aufeinander abgestimmt sind, so kommt es zu einer sehr starken Steigerung der Empfindlichkeit des Empfängers. Weber schätzte die Frequenz der bei einer Supernovaexplosion entstehenden Gravitationswellen näherungsweise ab und kam auf etwa 1000—5000 Hz. Der Empfänger, den er dann in den folgenden Jahren baute, ist in Fig. 4 skizziert:

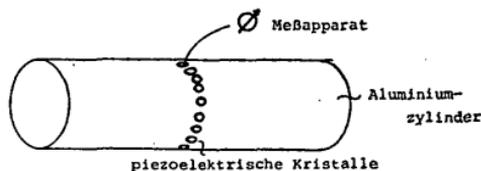


Fig. 4 — Webers Gravitationswellenempfänger

Es ist ein Aluminiumzylinder von etwa 1.50 m Länge und 50 cm Durchmesser mit einem Gewicht von einer Tonne. Der Zylinder ist in einem großen Kessel isoliert freischwebend aufgehängt und mit piezoelektrischen Kristallen entlang seiner Mittellinie bestückt, die kleinste Längenänderungen des Zylinders zu messen gestatten.

Fällt nun eine Gravitationswelle senkrecht auf die Zylinderachse auf den Zylinder ein, so beginnen seine beiden Enden gegeneinander zu schwingen. Hat die Gravitationswelle ziemlich genau die gleiche Frequenz (1660 Hz) wie die Eigenschwingung des Zylinders, so beginnt sich die Schwingung aufzuschaukeln und allmählich einen meßbaren Wert zu erreichen. Sehr kleine ( $< 10^{-13}$  cm) Schwingungen des Zylinders lassen sich ja nicht feststellen, da das „thermische Rauschen“ dauernd kleine und kleinste Längenänderungen des Zylinders bewirkt und die Meßinstrumente daher ständig kleine Längenänderungen anzeigen (Fig. 5).

Manchmal — mehrmals täglich — beobachtet Weber aber einen stärkeren Ausschlag des Meßinstrumentes. Um die Frage zu entscheiden, ob diese Signale auf eine Gravitationswelle zurückzuführen sind, oder nur eine zufällige momentane Verstärkung des Rauschens darstellen, hat Weber einen zweiten derartigen Zylinder in 2000 km Entfernung (Chicago) vom ersten aufgestellt und kann auf diese Art sowohl lokale Störungen (Gewitter,

Verkehr, etc.), die den Zylinder beeinflussen könnten, wie auch Rauscheffekte weitgehend ausschalten: Nur wenn beide Zylinder gleichzeitig deutlich über das Rauschniveau hinausgehende Signale zeigen, kann man annehmen, daß eine Gravitationswelle beobachtet wurde.

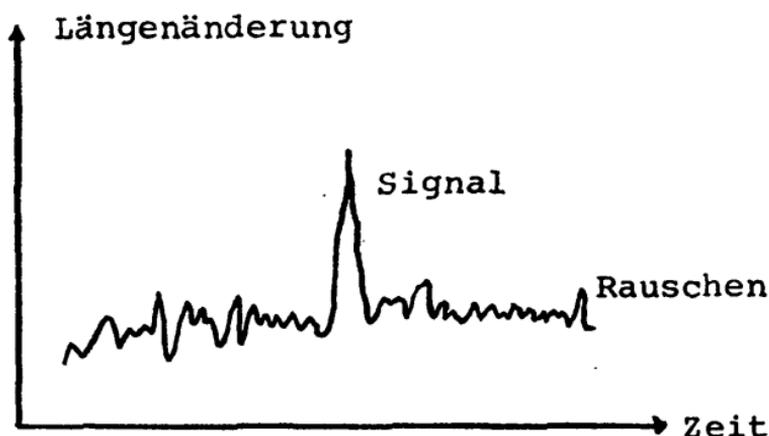


Fig. 5 — Rauschen und Signale

Das Experiment zeigt nun, daß im Mittel einmal täglich eine derartige „Koinzidenz“ beider Zylinder beobachtet wird! Es fallen also tatsächlich Gravitationswellen auf die Erde ein.

#### Quelle und Stärke der Gravitationswellen

Die Signale, die Weber beobachtet, sind — wie auch Fig. 5 zeigt — kurz, ihre Dauer beträgt

weniger als 1 Sekunde. Sie kommen scheinbar unregelmäßig, etwa 300—400 pro Jahr. Was aber kann die Quelle dieser Gravitationswellen sein? Um dies festzustellen, trägt Weber die Intensität der Signale einmal als Funktion der Sonnenzeit, einmal als Funktion der Sternzeit auf. Der Aluminiumzylinder ist nämlich in Ost-West-Rich-

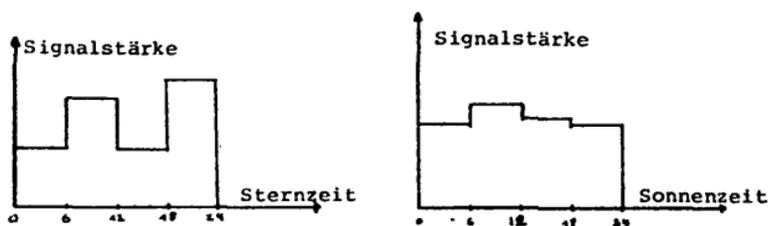


Fig. 6 — Webers Meßresultate

tung orientiert und überstreicht durch die Erdrotation einmal täglich die gesamte Himmelskugel, wobei er bei konstanter Sonnenzeit in eine fixe Richtung in bezug auf die Sonne, bei konstanter Sternzeit in eine fixe Richtung in bezug auf den Fixsternhimmel zeigt. In Fig. 6 sind Webers Resultate aufgetragen, es zeigt sich eindeutig, daß die beobachteten Signale keine Korrelation mit dem Sonnenstand aufweisen, sondern aus einer fixen Richtung des Fixsternhimmels kommen.

Wie Fig. 7 zeigt, erklären sich die beiden Maxima, die Weber beobachtet, daraus, daß die Welle prak-

tisch ungeschwächt durch die Erde hindurchgeht und die Richtung, aus der die Wellen kommen, erweist sich als Richtung zum Zentrum unserer Galaxis hin!

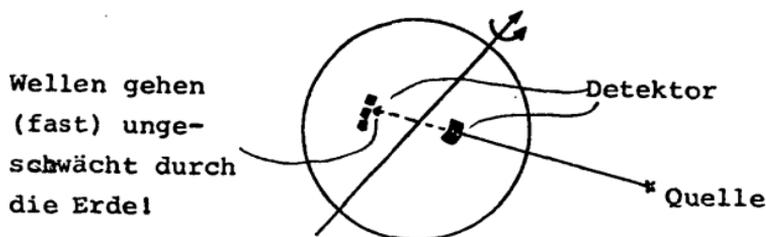


Fig. 7 — Detektor und Erde

Das Zentrum unserer Milchstraße scheint daher ziemlich regelmäßig Gravitationswellen auszusenden. Aus der bekannten Empfindlichkeit des Gravitationswellenempfängers und der Entfernung zum Zentrum der Galaxis läßt sich auch die Gesamtenergie errechnen, die notwendig ist, um die beobachteten Signale zu erklären:

Jedes Ereignis, das Weber beobachtet, entspricht der vollständigen Umwandlung von etwa 1 Sonnenmasse in (Gravitations) Energie!

Diese Energieumwandlung ist weit größer als irgendjemand erwartet hätte, da Weber ja einige hundert Signale pro Jahr beobachtet, also insgesamt vom Zentrum unserer Galaxis hunderte Sonnenmassen jährlich ausgestrahlt werden sollten.

Bisher gibt es noch keine zufriedenstellende oder auch nur möglich erscheinende astrophysikalische Erklärung dieser Daten. Hier liegt der Hauptgrund für die große Skepsis, mit der Webers Resultate aufgenommen werden: Die Daten lassen keine bekannte astrophysikalische Interpretation zu. Gravitationskollaps einzelner Sterne, der Ausgangspunkt von Webers Überlegungen, könnte eventuell ein Ereignis jährlich (auch das ist bereits hoch angesetzt), aber nicht hunderte von Gravitationswellenblitzen erklären.

Hier wird in den nächsten Jahren noch viel zu erforschen sein und man kann die weitere Entwicklung der „Gravo-Astronomie“ mit größter Spannung erwarten.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien](#)

Jahr/Year: 1971

Band/Volume: [111](#)

Autor(en)/Author(s): Sexl Roman Ulrich

Artikel/Article: [Gravitationswellen. 127-141](#)