

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 29 (1971)  
**Heft:** 126

**Artikel:** Gravitationswellen  
**Autor:** Jakober, P.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-899928>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 14.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# ORION

Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
Bulletin de la Société Astronomique de Suisse

29. Jahrgang, Seiten 133–168, Nr. 126, Oktober 1971

29<sup>e</sup> année, pages 133–168, No. 126, octobre 1971

## Gravitationswellen

von P. JAKOBER, Burgdorf

Als A. EINSTEIN im Jahre 1916 seine grosse Abhandlung über die Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte und darin die Existenz von Gravitationswellen voraussagte, glaubte wohl niemand daran, dass es jemals möglich wäre, die EINSTEINSche These experimentell zu beweisen. Und doch darf dieser Beweis heute als weitgehend gesichert gelten.

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie muss jeder irgendwie beschleunigte massenbehaftete Körper Energie in Form von Gravitationswellen abstrahlen, die sich gleich wie elektromagnetische oder andere Wechselwirkungen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Ein mit Masse behafteter Körper müsste, wenn er von Gravitationswellen getroffen wird, eine Beschleunigung erfahren. Die Eigenschaften dieser Wellen leitete A. EINSTEIN aus den nichtlinearen, exakt nicht löslichen Feldgleichungen seiner Theorie durch lineare Approximation ab. Formal stimmen diese Gleichungen weitgehend mit den Wellengleichungen des elektromagnetischen Feldes überein: anstelle der Ladung als Quelle dieser Felder tritt der Spannungstensor materiebehafteter Körper als Quelle der Gravitationsfelder und Gravitationswellen. Gravitationskräfte sind allerdings um 40 Zehnerpotenzen schwächer als elektromagnetische Kräfte; ein weiterer, wesentlicher Unterschied ist ferner darin zu sehen, dass die Gravitationsstrahlung als Folge eines Tensorfeldes – in der Sprache der Allgemeinen Relativitätstheorie des RIEMANNschen Krümmungstensor des Raumes – nicht als Dipolstrahlung, sondern als Quadrupolstrahlung im niedrigsten, d.h. stärksten Schwingungsmodus in Erscheinung treten kann.

Nach A. EINSTEIN ist der durch Gravitationswellen abgestrahlte Energiebetrag eines rotierenden Stabes proportional dem Quadrat des Trägheitsmomentes  $\Theta$  und proportional der 6. Potenz der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , aber umgekehrt proportional der 5. Potenz der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Somit müsste z.B. ein Eisenstab von 1 m Länge, der so rasch rotiert, dass er gerade noch nicht auseinandergerissen wird, eine Energie  $E$  von  $10^{-37}$  Joule als Gravitationsstrahlung aussenden. Nach einer von EDDINGTON im Jahre 1923 veröffentlichten Rechnung verliert ein mit 50 Umdrehungen pro Sekunde rotierender 2 m langer Stab der Masse  $m = 1$  kg in einem Jahr durch Gravitations-

strahlung nur den  $3 \cdot 10^{-35}$ sten Teil seiner Rotationsenergie! Selbst mit den besten heute zur Verfügung stehenden Methoden wäre ein Versuch des Nachweises eines so kleinen Effektes ein völlig aussichtsloses Unterfangen.

Die Quanten der Gravitationswellen, die Gravitonen, sollten den Spin 2 haben, doch liegt ihr Nachweis noch weit ausserhalb der gegenwärtigen Möglichkeiten.

Ein Nachweis von Gravitationswellen ist daher bis auf weiteres an die Bewegungen riesiger Massen gebunden. So müssten beispielsweise die Bewegungen grosser Sternmassen – unter der Voraussetzung, dass die Gravitationstheorien richtig sind – Quellen vielleicht eben noch messbarer Gravitationswellen sein. Objekte dieser Art sind z. B. rasch rotierende Doppelsterne, Supernovae, explodierende Galaxien und vor allem auch Neutronensterne (Pulsare, Spinare).

Im Jahre 1956 entschloss sich JOSEPH WEBER, Professor an der Universität von Maryland, U.S.A., den Versuch zu wagen, die Wirkung von Gravitationswellen aus dem Weltall experimentell nachzuweisen. Die anfänglichen Schwierigkeiten waren gross: Als Einzelgänger, nur von einem sehr fähigen Feinmechaniker unterstützt und mit dem relativ kleinen Jahresbudget der National Science Foundation von 20 000.-Dollar ausgestattet, hatte er zu beginnen, und doch gelang es ihm relativ bald, die von A. EINSTEIN postulierten Gravitationswellen mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit nachzuweisen, worauf sein jährliches Budget zuletzt auf 165.000.-Dollar erhöht wurde, das ihm nun eine grosszügigere Weiterführung seiner Untersuchungen erlaubt.

Als «Empfänger» für einfallende Gravitationswellen kann ein Körper grosser Masse, z. B. die Erde oder der Mond, als ganzes dienen; die Gravitationsstrahlung sollte diese Körper beschleunigen, was eine momentane Erhöhung der Fallbeschleunigung zur Folge haben müsste.

Einer anderen Nachweismöglichkeit von Gravitationswellen liegt die theoretisch begründete Annahme zugrunde, dass massereiche Körper geeigneter Form – z. B. Zylinder oder Kugel – durch Gravitationswellen in elastische Quadrupolschwingungen versetzt werden, die sich mit Hilfe von piezoelektrischen Über-

tragern in elektrische Signale umwandeln lassen sollten.

Diesen Weg des Nachweises wählte J. WEBER: er benützte als Empfänger massive Aluminiumzylinder (vergl. Fig. 1), die, nur im Schwerpunkt unterstüzt, derart isoliert aufgehängt sind, dass mechanische, thermische und elektromagnetische Störungen aus der Umgebung praktisch einflusslos sind, und nur Schwingungen der oben beschriebenen Art den Empfänger beeinflussen. Natürlich waren an das Übertragungssystem extreme Forderungen hinsichtlich Störungsfreiheit und Rauschmutter zu stellen.

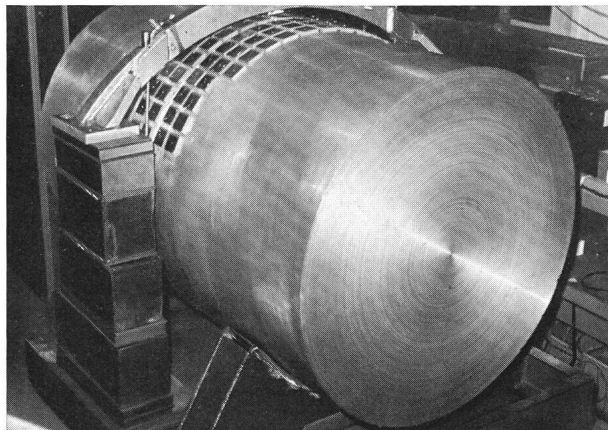


Fig. 1

J. WEBER hat 6 Detektorsysteme gebaut; es sind dies Aluminiumzylinder von 1.54 m Länge mit Durchmesser von 61, 66 und 96 cm (vergl. Fig. 1), die an einem Draht in zylindrischen Vakuumentanks aufgehängt sind. Filter verhindern eine Übertragung mechanischer Störungen von den Tanks auf die Zylinder; erst Hammerschläge auf die Tankwandungen vermögen Signale auszulösen! Entsprechende Filter sind auch in die elektrischen Übertragungsleitungen eingebaut. Die Temperatur des ganzen Systems wird bis auf den Bruchteil eines Kelvins konstant gehalten. Um die Mitte der Detektoren sind gürtelförmig hintereinandergeschaltete Piezoquarze (bei späteren Ausführungen Titanelemente) montiert, welche die Schwingungen registrieren. Um eine optimale Ausgangsleistung zu erhalten, muss die elektrische Ausgangsschaltung eine hohe Impedanz von mehr als  $10^9$  Ohm aufweisen. Um hierbei den Rauschpegel niedrig zu halten, mussten beim ersten gebauten System Vorverstärker und Induktivität durch flüssiges Helium auf 4 K gekühlt werden. Später ermöglichten es spezielle Schaltungen, auf diese Kühlung zu verzichten.

Mit einer Ausnahme sind alle Detektoren bei schmaler Bandbreite auf die Frequenz von 1661 Hz abgestimmt, da nach theoretischer Voraussage die Gravitationswellen kollabierender Supernovae diese Frequenz aufweisen, und die Detektoren (Aluminiumzylinder) somit als Resonanzkörper wirken können. Zur Entdeckung von störenden Zufallsereignissen dient ein auf die Frequenz von 1120 Hz abgestimmter De-

tektor grosser Bandbreite. Bodenerschütterungen durch natürliche oder künstliche Beben werden daneben durch Seismometer verschiedener Frequenzbereiche registriert.

Es dürfte interessant sein, kurz auf die verschiedenen Funktionsprüfungen einzugehen, wie sie nach der Montage des Hauptdetektors durchgeführt worden sind. Beispielsweise verschieben sich die Endflächen des Zylinders durch sein thermisch bedingtes Eigenrauschen (Wärmebewegung der Atome) im Mittel um  $2 \cdot 10^{-16}$  m, also um etwa  $1/5$  des Durchmessers eines Wasserstoff-Atomkerns. Die Empfindlichkeit des Detektor-Systems erwies sich als so gross, dass diese thermischen Bewegungen des Zylinders mit Leichtigkeit registriert werden konnten. Nachdem auch eine spezielle Funktionsprüfung mit einem Gravitationswellen-Generator die erwarteten Ergebnisse erbracht hatte, konnte mit den Versuchen begonnen werden, Gravitationswellen aus dem Weltall zu empfangen und aufzuzeichnen.

Nach J. WEBER werden Aufzeichnungen als «signifikant» betrachtet, wenn deren Amplituden jene des Rauschpegels um mindestens den Faktor 5 übertreffen. Um dabei jede zufällige, nicht gravitationswellenbedingte Aufzeichnung auszuschliessen, werden gegenwärtig alle 5 Detektoren der Frequenz 1661 Hz in Koinzidenzschaltung betrieben, und es wird ein Ereignis nur dann als «echt» angesehen, wenn mindestens 2 der Detektoren innerhalb der Auflösungszeit der Koinzidenzschaltung gleichzeitig ansprechen.

Gegenwärtig sind 4 Detektoren in Maryland und ein fünfter in 1000 km Entfernung im Gelände des Argonne National Laboratory bei Chicago in Betrieb. Einer der Maryland-Detektoren und der Argonne-Detektor sind über eine Telefonleitung in Zweiweg-Koinzidenzschaltung mit einander verbunden, wobei die Signale für den Weg in beiden Richtungen 25 ms benötigen. Einer der Maryland-Detektoren dient zur Kontrolle seismischer Ereignisse und arbeitet mit einer zeitlichen Verzögerung von 2 Sekunden. Mit diesem System von Detektoren ist es möglich, Ereignisse bis zu 4-fach zu registrieren und damit die Sicherheit der Messungen zu erhöhen. Als «echte», also einer gemeinsamen Ursache zuzuschreibende Koinzidenzen werden Signale anerkannt, die innerhalb von 0.44 Sekunden eintreffen und die Mindestamplitude (Rauschpegel-Amplituden mal den Faktor 5) übersteigen (vergl. Fig. 2).

Während der Zeit vom 30. Dezember 1968 bis zum 21. März 1969, also während 88 Tagen, wurden als «signifikant» beobachtet:

- 17 2-fach-Koinzidenzen,
- 5 3-fach-Koinzidenzen, und
- 3 4-fach-Koinzidenzen.

Die Rechnung zeigt, dass diese Zahlen weit über der Zufallswahrscheinlichkeit liegen.

Aufnahmen aus jüngster Zeit mit verbesserter Auflösungszeit der Detektoren und noch sorgfältigerer

Abschirmung gegen Umweltstörungen ergaben im Durchschnitt etwa ein «rechtes» Ereignis pro Tag.

Die Gravitationswellen-Detektoren von J. WEBER zeigen eine Richtungscharakteristik: sie sind quer zur Zylinderachse wesentlich empfindlicher als in der Längsachse. Da die Zylinder in Ost-West-Richtung aufgehängt sind und mit der Erde im Verlauf eines Tages einmal um  $360^\circ$  gedreht werden, tasten sie in dieser Zeit den ganzen Himmel ab. Die «Bandbreite» ist mit etwa  $70^\circ$  im Azimut, bezogen auf den Meridian, allerdings gross, doch beschäftigt sich J. WEBER damit, die Richtwirkung der Detektoren zu verbessern. Trotz der noch schlechten Richtwirkung gelang es aber, eine Erhöhung der Messrate in der Richtung auf den Kern unserer Milchstrasse festzustellen. Schwerewellen auslösende kosmische Ereignisse dürften also in dieser Richtung häufiger als in anderen Richtungen stattfinden.

Über die Natur dieser Ereignisse gibt es im Moment nur Spekulationen, von denen drei besonders zur Diskussion stehen:

1. Sterne von der Grösse unserer Sonne werden in ein «schwarzes Loch» gezogen. Ein «schwarzes Loch» ist eine SCHWARZSCHILD-Singularität, ein extrem dichter Neutronenstern ( $\rho \cong 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$ ), entstanden durch dynamischen Kollaps eines Sternes, der eine so grosse Massenanziehung besitzt, dass nicht einmal elektromagnetische Wellen ihn verlassen können und der sich daher unserer Beobachtung für immer entzieht. Die Beschleunigung, die ein solches «schwarzes Loch» einem anderen Fixstern erteilen kann, könnte Gravitationswellen-Impulse hervorrufen.
2. Kollabierende Supernovae, bei denen Materie sehr stark nach aussen oder innen beschleunigt wird, könnten ebenfalls Gravitationsstrahlungen aussenden.
3. Aus der Entstehungszeit unserer Milchstrasse könnten durch grosse Massen im Kern Gravitationsfelder gebunden sein, von denen Stosswellen emittiert werden können.

Die Gravitationswellen-Forschung hat eben erst begonnen. Dabei gelang J. WEBER zweifelsohne ein Durchbruch mit der Aufzeichnung dieser Wellen. Wie stimulierend die Arbeiten von J. WEBER bereits sind, zeigt sich daran, dass seine Ideen und Überlegungen inzwischen von zahlreichen Forschergruppen aufgenommen worden sind, die sich nun auch mit dem Bau von Detektoren, zum Teil nach neuen Prinzipien, befassen. Eine amerikanische Forschergruppe beabsichtigt, die Detektoren magnetisch aufzuhängen und fast bis auf den absoluten Nullpunkt zu kühlen, um möglichst alle thermischen Effekte auszuschalten. Weitere Forschergruppen haben sich in Grossbritannien, der Sowjetunion, in Deutschland und in Japan gebildet.

Es ist geplant, mit einem der nächsten Apollo-Raumfahrzeuge auf dem Mond ein LA COSTE-ROMBERG-Gravimeter, wie es bei der Erdöl-Prospektion ver-

wendet wird, zu deponieren. Mit diesem Instrument sollen Mondschwingungen, hervorgerufen durch Gravitationswellen aus dem Weltall, nachgewiesen werden. Das Gerät wird eine Masse von weniger als 10 kg haben und soll während eines Jahres ununterbrochen im Betrieb sein.

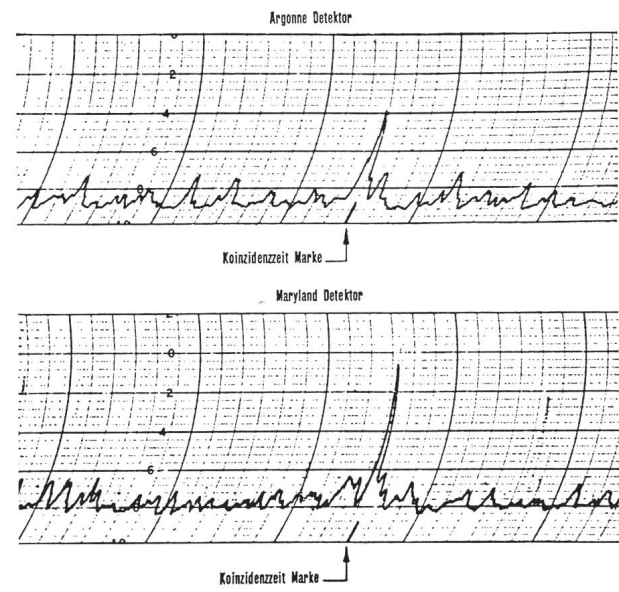


Fig. 2

Zweifelsohne konnte J. WEBER Gravitationswellen mit grosser Evidenz nachweisen, sodass die wissenschaftliche Welt mit Spannung eine Bestätigung durch weitere Forschergruppen erwartet, die teils mit anderen Methoden und Instrumenten zu arbeiten gedenken. J. WEBER hat sich bei seinen Messungen mit guten Gründen zunächst auf die Frequenz 1661 Hz beschränkt; aus Analogiegründen ist aber anzunehmen, dass auch das Gravitationswellen-«Spektrum» ein breites ist und auch andere Frequenzbereiche interessante Ergebnisse erbringen können. Eine hohe Winkelauflösung bei neuartigen Gravitationswellen-Empfängern wird es vielleicht einmal ermöglichen, diskrete Quellen (z.B. Pulsare) ausfindig zu machen und damit den Ursprung der Gravitationswellen besser zu definieren, als dies gegenwärtig möglich ist.

#### Literatur:

- 1) W. THIRRING, Gravitation. Plenarvortrag an der 34. Physiker-Tagung 1969 in Salzburg, S. 17.
- 2) J. WEBER, Gravitationswellen. Vortrag an der Jahresversammlung der deutschen physikalischen Gesellschaft 1970 in Hannover.
- 3) G. L. WICK, The Gravitational Waves. The Evidence Mounts. Science 167, 1237 (1970).
- 4) J. WEBER, General Relativity and Gravitational Waves. Physics Today, 1968, S. 34.
- 5) J. WEBER, Physical Review Letters: 17, 1228 (1966); 18, 418, 795 (1967); 20, 1307 (1968); 22, 198, 1307, 1320 (1969); 23, 1514 (1969); 24, 276, 945 (1970); 25, 180 (1970).
- 6) H. HÖNL, Was ist Gravitation? Umschau 71, 371, 412 (1971). Dort auch weitere Literatur.
- 7) P. KAFKA, Gravitationswellen aus dem Kosmos? Physik in unserer Zeit, S. 186, Nov. 1970.

Adresse des Autors: Dr. P. JAKOBER, Hofgutweg 26, 3400 Burgdorf.

## Ondes gravitationnelles

D'après la théorie de la relativité générale d'EINSTEIN, tout corps possédant une masse doit rayonner de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Les forces de gravitation sont cependant infiniment plus faibles que les forces électromagnétiques.

Suivant un calcul d'EDDINGTON (1923), un bâton de 2 m de long et de masse  $m = 1$ , tournant à raison de 50 tours à la seconde, ne perd en un an par rayonnement gravitationnel que la  $3 \cdot 10^{-35}$ ème partie de son énergie de rotation.

En admettant que les théories de la gravitation soient exactes, des mesures ne peuvent donc être effectuées que sur des masses énormes, telles que celles de certaines étoiles, notamment des étoiles doubles en rotation rapide, des supernovae, des galaxies en explosion et surtout des étoiles à neutrons.

En 1956, JOSEPH WEBER, professeur à l'Université du Maryland, tenta de démontrer expérimentalement l'effet des ondes gravitationnelles dans l'univers. Il utilisa comme récepteurs des cylindres massifs d'aluminium (figure 1) soutenus en leur centre de gravité seulement. Il y en avait 6 d'une longueur de 1 m 54 et d'un diamètre de 61, 66 et 96 cm, suspendus par un fils dans des tanks cylindriques à température constante et où le vide avait été fait. Autour du centre des détecteurs se trouvaient des quartz piézo-électriques sous forme d'anneaux disposés les uns derrière les autres, et qui enregistraient les vibrations.

Tous les détecteurs, à une seule exception, furent mis sur la fréquence de 1661 Hz, car d'après des calculs théoriques les ondes gravitationnelles des supernovae devaient avoir cette fréquence. Ainsi les détecteurs pouvaient agir comme résonateurs.

Quatre détecteurs se trouvent au Maryland, et un cinquième à 1 000 km de là, près de Chicago. Un des détecteurs du Maryland et celui de Chicago étaient reliés en double coïncidence.

Du 30. 12. 1968 au 21. 3. 1969, soit en l'espace de 88 jours, on observa:

- 17 coïncidences doubles
- 5 coïncidences triples
- 3 coïncidences quadruples.

On ne peut pour le moment que spéculer sur la nature de ces phénomènes, dont nous retiendrons les trois suivants:

1) Les étoiles de la grandeur de notre Soleil seront entraînées dans un «trou noir». Ce trou noir est une singularité de SCHWARZSCHILD: une étoile à neutrons, extrêmement dense ( $\rho = 10^{15}$  g cm<sup>-3</sup>) provenant du collapse dynamique d'une étoile qui ne peut plus émettre d'ondes électromagnétiques, et disparaît ainsi pour toujours à notre vue. Ce phénomène peut provoquer la formation d'ondes gravitationnelles.

2) Les supernovae peuvent également émettre un rayonnement gravitationnel.

3) Lors de la formation de notre galaxie, d'énormes masses de son noyau ont pu être liées par des champs gravitationnels, d'où des ondes purement émis.

Les idées et les recherches de J. WEBER ont été reprises par d'autres groupes de savants en Amérique, en Angleterre, en France, en Allemagne et au Japon.

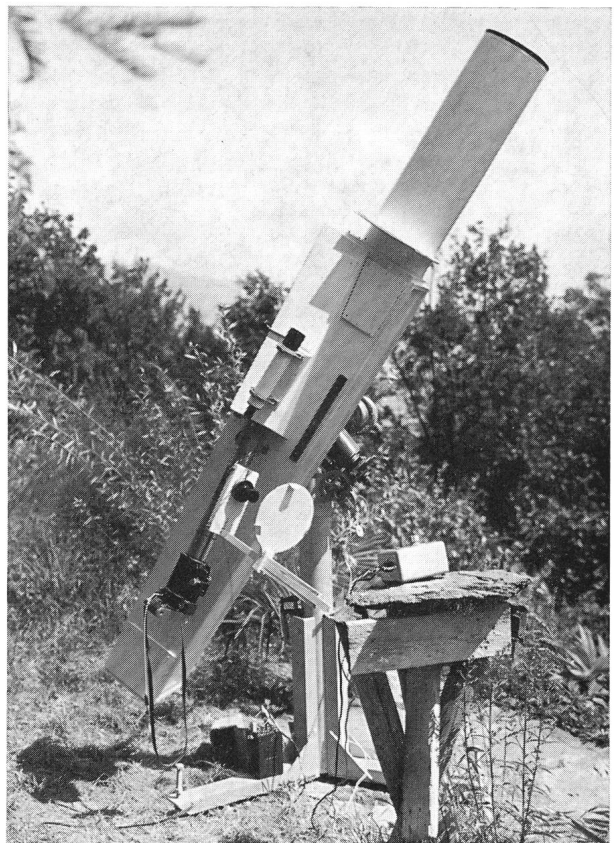
On prévoit d'emporter sur Apollo XVI un gravimètre LA COSTE-ROMBERG. Cet instrument permettra d'enregistrer les vibrations de la Lune provoquées par des ondes gravitationnelles.

Résumé par E. ANTONINI, Le Cèdre, 1211 Conches/Genève

## Zu unserem Titelbild

Die sehr schöne Aufnahme eines Sonnenflecks, die auch die Strahlungsrichtung in der Penumbra und die Granulation der Sonnenoberfläche erkennen lässt, hat uns Herr WALTER BRÜCKNER freundlicherweise zu Verfügung gestellt. Er gibt uns hierzu den folgenden Kommentar:

«Die Aufnahme entstand (zusammen mit anderen) am 27. 8. 1967 in Ronco/TI. Der hierzu benützte Refraktor (siehe Bild) besitzt ein Objektiv der Fa. Lichtenknecker von 170 mm Öffnung und 3940 mm Brenn-



Der gefaltete Refraktor von W. BRÜCKNER, mit welchem das Titelbild dieses Heftes aufgenommen worden ist. Man erkennt die durch die Faltung des Strahlengangs bedingte Schräglage der Kamera, sowie den zusätzlichen Projektionsschirm, aber auch die stabile Montierung. Wir danken dem Autor für die Überlassung dieser Aufnahme.  
E. WIEDEMANN