

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 51 (1993)  
**Heft:** 258

**Artikel:** Einige wenig bekannte Aspekte der Gravitation = Quelques aspects méconnus du phénomène de la gravité  
**Autor:** Fischer, G.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-898205>

### **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:** 02.04.2025

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



# Einige wenig bekannte Aspekte der Gravitation

G. FISCHER

Die Erscheinung der Gravitation, oder einfacher gesagt, die der Schwerkraft, ist uns im täglichen Leben recht vertraut, dennoch bleiben uns viele Aspekte dieser Kraft unbekannt. Einige ihrer Erscheinungen sollen hier diskutiert werden. Fragen nach dem Ursprung der Schwerkraft, der Gravitation im allgemeinen, kann man jedoch auch heute noch nicht beantworten.

## Die Entstehung der Galaxien und der Planetensysteme

In einem Gasvolumen herkömmlicher Dimensionen gibt es dauernd Dichteschwankungen. Diese werden von der thermischen Bewegung (oder Brownschen Bewegung) hervorgerufen; die gleiche Bewegung zerstreut diese aber eben so schnell. In einem Volumen dessen Abmessungen Lichtjahre beträgt, oder in noch grösseren Abmessungen, können extreme Schwankungen zu einem Anziehungskern führen, der sich der thermischen Bewegung widersetzt und einen gravitativen Zusammenbruch hervorruft. Dieses Ereignis setzt enorme Mengen potentieller Energie frei, die das sich rapid verdichtende Gasvolumen aufheizen bis Prozesse der Kernfusion einsetzen. So entstehen die Sterne und in dieser Geburt spielt die Gravitation die Rolle eines Zündholzes.

# Quelques aspects méconnus du phénomène de la gravité

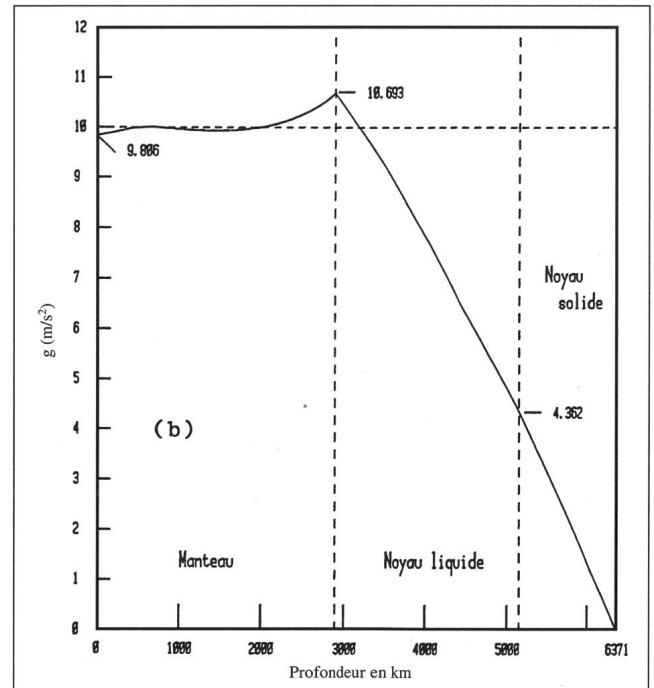
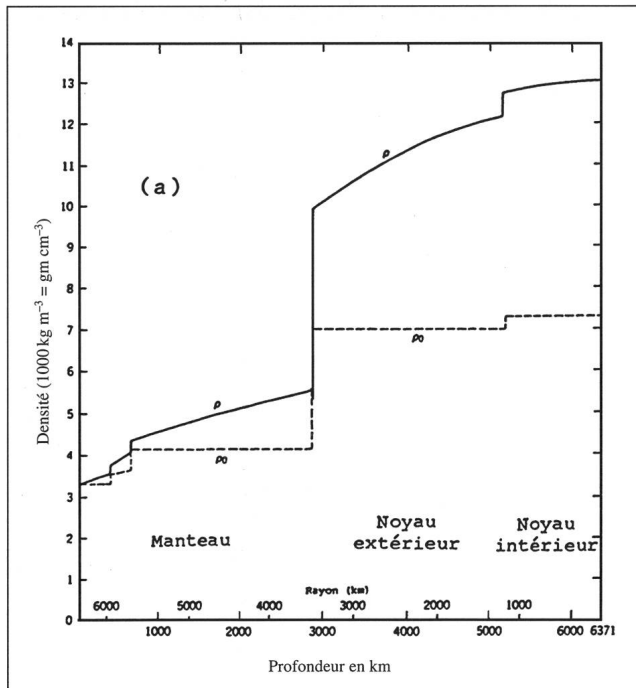
Le phénomène de la gravité, ou plus simplement celui de la pesanteur, nous est assez familier, mais de nombreux aspects de cette force sont fort mal connus. Dans cet article, nous discutons quelques-une de ses propriétés. Les questions relatives à l'origine de la gravité, par contre, sont sans réponse aujourd'hui encore.

## Formation des galaxies et des systèmes planétaires

Dans un volume de gaz aux dimensions qui nous sont familières il y a constamment des fluctuations de densité. Elles sont provoquées par l'agitation thermique (le mouvement brownien), mais cette même agitation les disperse presque aussitôt. Pour un volume aux dimensions d'années lumière ou davantage, certaines fluctuations extrêmes peuvent conduire à la formation d'un centre d'attraction gravifique qui pourra s'opposer à la dispersion par l'agitation thermique et conduire à un effondrement gravitationnel. Ce phénomène va libérer une énorme quantité d'énergie potentielle et chauffer le volume de gaz qui se contracte toujours plus rapidement jusqu'à allumer les processus de fusion thermonucléaire. C'est ainsi que naissent les étoiles, et dans ce processus, la gravité joue en quelque sorte le rôle d'une allumette.

Fig. 1. (a) Dichte und (b) Schwerebeschleunigung  $g$  als Funktion der Tiefe im Innern der Erdkugel. In (a) geben die gestrichelten Linien die Dichten bei normalem Druck und Temperatur (eine Atmosphäre und 20° Celsius).

(a) Densité et (b) accélération  $g$  en fonction de la profondeur à l'intérieur de la terre. En (a) les lignes en tirets donnent la densité à pression et température normales (une atmosphère et 20 degrés centigrades).





Im allgemeinen besitzt das zusammenfallende Gasvolumen ein resultierendes Drehmoment und somit treten Zentrifugalkräfte auf. Diese Kräfte sind die einzigen, die sich dem gravitativen Zusammenbruch widersetzen, und das erklärt die abgeflachte Form der Planetensysteme und der Galaxien, sowie die Beobachtung, dass meistens alle Teile solcher Systeme in einer gemeinsamen Wirbelbewegung verknüpft sind.

### Die Schwerkraft an der Erdoberfläche

An der Erdoberfläche entsteht das Gewicht eines Gegenstandes als Folge der gravitativen Anziehung der gesamten Erdmasse, sowie einer kleinen Gegenkomponente von der Zentrifugalkraft, die von der Erdrotation stammt. Wäre die Dichte der Erdkugel gleichmässig, dann müsste dieses Gewicht, d. h. die Schwerebeschleunigung  $g$ , in der Tiefe linear mit dem Erdradius abnehmen und im Zentrum verschwinden. Das entspricht jedoch nicht den tatsächlichen Beobachtungen. Gegen das Erdinnere nimmt die Dichte sehr schnell zu (siehe dazu Fig. 1). Insbesondere fällt die Unstetigkeit bei 2900 km auf, beim Übergang in den flüssigen Kern, wo die Dichte von etwa  $5,5 \text{ gr/cm}^3$  auf  $10 \text{ gr/cm}^3$  springt. In der Tat findet man, dass in der Nähe der Erdoberfläche die Schwerkraft mit der Tiefe über weite Strecken zunimmt. Erst unterhalb der Dichteunstetigkeit fällt sie fast linear mit dem Radius ab.

Über der Erde nimmt die Schwerebeschleunigung  $g$  mit der Höhe ab, was man für einen Körper endlicher Abmessungen, wie den Erdball, auch erwarten muss. Wäre die Erde nicht kugelförmig, sondern in alle Richtungen flach bis ins Unendliche, so würde  $g$  mit der Höhe nicht abnehmen, sondern einen konstanten Wert annehmen. Würde sich die Erde auch in die Tiefe ins Unendliche erstrecken, so würde  $g$  selbst unendlich werden: An der Erdoberfläche wäre jeder Gegenstand unendlich schwer! (das hätte im Mittelalter ein Argument gegen eine unendliche flache Erde sein können). Wenn dies zutreffen würde, könnte selbst die Struktur der Erde diesen unendlichen Kräften nicht widerstehen und würde total einbrechen. Dies ist das eindimensionale Beispiel für ein **astronomisches schwarzes Loch**, das immer dann entsteht, wenn in einem vorgegebenen Volumen die Masse eine gewisse Grenze überschreitet.

### Die Präzession der Nachtgleichen

Wegen ihrer Eigenrotation, und den daraus entstehenden Zentrifugalkräften, ist die Erdkugel etwas abgeflacht. In erster Näherung nimmt sie die Form eines Rotationsellipsoids an. So ist der Äquatorialradius um etwa 43 km länger als der Polarradius. Aber die Erde rotiert auch um die Sonne, in einer Ebene die man Ekliptik nennt. Nun ist die Achse der Eigenrotation um etwa  $23,5^\circ$  gegenüber der Normalen zur Ekliptik geneigt und jedermann weiss, dass dies zum Wechsel der Jahreszeiten führt. Es ist leicht einzusehen, dass die gravitative Wechselwirkung zwischen der Sonne und der abgeflachten Kugel zu Kräften führt, welche die Rotationsachse der Erde aufrichten möchten. Wegen ihrer Eigenrotation verhält sich die Erde jedoch wie ein Kreisel (siehe weiter unten den Abschnitt über den Kreisel): Anstatt sich aufzurichten, bewegt sich die Drehachse auf einem Kegel, sie beschreibt eine Präzession. Zeigt die Drehachse heute fast genau in die Richtung des Polarsternes, so lag sie vor vier- bis fünftausend Jahren in der Richtung der Konstellation des Drachens und in etwa 25 700 Jahren wird sie einen Kegel von  $47^\circ$  Öffnungswinkel (zweimal  $23,5^\circ$ ) beschreiben. Der Mond, dessen

En général, la masse de gaz qui s'effondre possède un moment cinétique orbital, générateur de forces centrifuges. Ces forces sont les seules qui s'opposent à l'effondrement et cela explique la forme généralement aplatie des galaxies et des systèmes solaires, et l'observation que dans ces systèmes toutes les composantes sont presque toujours affectées du même mouvement de rotation tourbillonnaire.

### La gravité à la surface de la terre

A la surface du sol, le poids d'un objet provient de l'attraction gravitationnelle de toute la masse de la terre, avec une petite contribution opposée due à la force centrifuge, par suite de la rotation du globe. Si la densité de la terre était uniforme, alors ce poids, c.-à-d. l'accélération terrestre  $g$ , devrait diminuer de façon linéaire avec la profondeur, de façon à s'annuler à son centre. Ce n'est pas ce qu'on observe car la densité augmente fortement vers l'intérieur du globe (voir la Fig. 1), avec en particulier une énorme discontinuité à 2900 km de la surface, lorsqu'on pénètre dans le noyau liquide, où elle passe de  $5,5 \text{ gr/cm}^3$  à  $10 \text{ gr/cm}^3$  environ. De fait, on voit que sur un grand domaine près de la surface de la terre, l'accélération  $g$  augmente avec la profondeur. Ce n'est qu'au dessous de la discontinuité de densité qu'elle diminue presque linéairement avec le rayon.

En altitude, l'accélération gravifique  $g$  diminue, comme on doit s'y attendre pour un corps aux dimensions finies, tel que notre sphère terrestre. Mais si au lieu d'être sphérique notre terre était plate, à l'infini dans toutes les directions,  $g$  ne diminuerait pas en altitude, mais prendrait une valeur constante. Et si la terre s'étendait aussi à l'infini vers le bas, ayant alors la forme d'un demi-espace illimité,  $g$  tendrait vers l'infini: à sa surface tout objet serait infiniment lourd! (au Moyen Age déjà, cela aurait pu exclure l'idée d'une terre plate s'étendant à l'infini dans toutes les directions). Dans ces conditions, la structure de la terre elle-même ne pourrait pas résister à ces forces infinies et s'effondrerait totalement. C'est l'équivalent à une dimension du **trou noir astronomique**, qui se forme irrémédiablement lorsque dans un volume donné une quantité de masse dépasse certaines limites.

### La précession des équinoxes et les marées

La rotation propre de la terre, par suite des forces centrifuges, donne au globe une forme un peu aplatie. En première approximation elle se présente comme un ellipsoïde de rotation. Ainsi son diamètre équatorial dépasse d'environ 43 km le diamètre polaire. Mais la terre tourne aussi autour du soleil, dans un plan qu'on nomme l'écliptique. Il se trouve que l'axe de la rotation propre est incliné de  $23,5^\circ$  par rapport à la normale de l'écliptique et chacun sait que cela conduit à l'alternance des saisons. Il est facile de voir que l'interaction gravitationnelle du soleil avec notre globe un peu aplati cherche à redresser l'axe de la rotation propre. Mais parce qu'elle tourne, la terre réagit comme un gyroscope (voir plus bas le paragraphe consacré au gyroscope): au lieu de se redresser, son axe de rotation se met à dériver sur un cône, il exécute une précession. S'il pointe aujourd'hui tout près de l'étoile polaire, il y a 4 à 5 mille ans il visait dans la constellation du Dragon et parcourt le cône de  $47^\circ$  d'ouverture (2 fois  $23,5^\circ$ ) en 25 700 ans environ. La lune, dont l'orbite moyenne est aussi dans l'écliptique, apporte à cet effet une contribution supérieure à celle du soleil, car elle est beaucoup plus près de nous et bien qu'elle soit moins massive, sa densité est plus élevée.



mittlere Bahn auch in der Ekliptik liegt, trägt über zweimal so viel zu diesem Effekt bei, denn dieser Himmelskörper ist uns viel näher und obwohl er viel kleiner als die Sonne ist, hat er eine höhere Dichte.

Die Gezeiten sind auch die Folge gravitativer Wechselwirkungen zwischen Erde, Mond und Sonne. Die Energie, welche sie verschleissen, hauptsächlich am Meeresboden und in Küstennähe, verlangsamt fast unmerklich die Geschwindigkeit der Erdrotation. Bekanntlich gibt es aber keine Aktion ohne Reaktion und man kann zeigen, dass dieser Effekt auch zu einer langsamen Vergrößerung der Entfernung des Mondes führt. Mit den Retroreflektoren, von den Apollo Astronauten auf dem Mond hinterlassen, kann man heute diese progressive Vergrößerung genau verfolgen und eine von der Theorie vorhergesagte Rate von etwa 3 cm pro Jahr bestätigen.

### Die genaue Form der Erdkugel

An der Erdoberfläche ist die Massenverteilung alles andere als gleichmässig; man braucht nur an Berge, Täler und Seen zu denken. Dazu kommt auch, dass die Dichte der Gesteine sehr

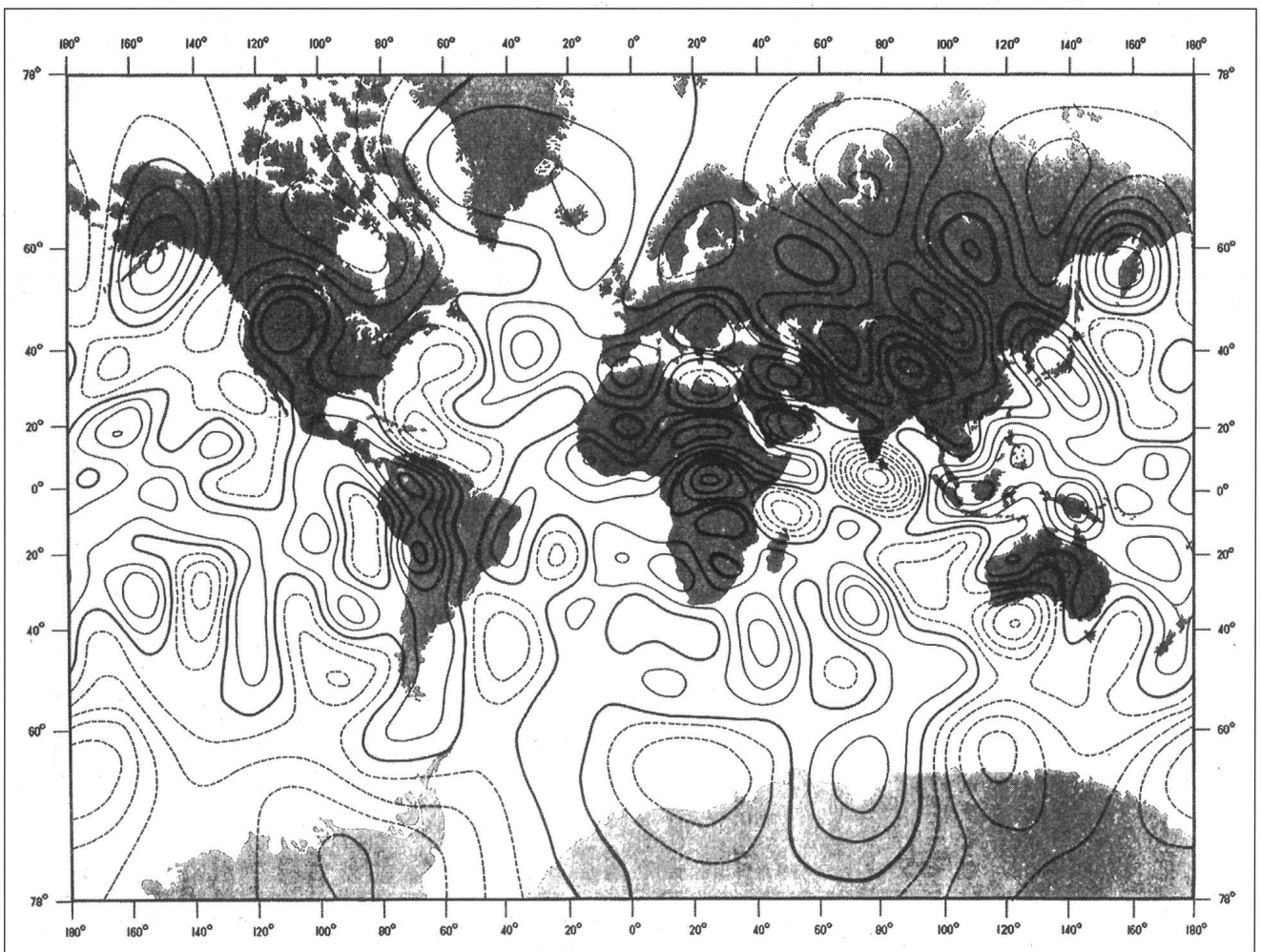
Les marées sont aussi le résultat d'une interaction gravitationnelle entre la terre, la lune et le soleil. L'énergie qu'elles dissipent sur les fonds océaniques, surtout aux abords des côtes, ralentit presque imperceptiblement la vitesse de rotation de la terre. Mais comme il n'y a pas d'action sans réaction, on peut montrer que ce phénomène a aussi pour effet d'éloigner progressivement la lune. Grâce aux rétro-rélecteurs déposés par les astronautes d'Apollo, on peut aujourd'hui suivre cet éloignement progressif et confirmer le taux d'environ 3 cm par an que prédisaient les calculs.

### La forme du globe terrestre

A la surface du globe, la répartition des masses est loin d'être très régulière, il suffit de penser aux montagnes, lacs et vallées. D'autre part, les roches du sous-sol peuvent avoir des densités très variables. Cela explique que la force de la pesanteur puisse, elle aussi, varier d'un endroit à l'autre. En certaines régions on observe même de fortes anomalies de la gravité, ce qui est d'ailleurs utilisé comme moyen de prospection géologique.

Fig. 2. Das Geoid. Die Höhenlinien sind im Abstand von 10 m, für Höhen durchgezogen und für Tiefen gestrichelt. Der festere Strich entspricht dem Nullniveau.

Le géoïde. Les courbes de niveau vont de 10 en 10 m et les lignes continues correspondent aux élévations, celles en tirets aux dépressions. Le trait plus foncé est le niveau zéro.





unterschiedlich sein kann. So erklärt sich, dass die Schwere von Ort zu Ort verschieden ist. In gewissen Regionen beobachtet man sogar ausgeprägte Schwereanomalien; wohlbekannt ist ja, dass diese als geologische Prospektionsmethode verwendet werden.

Es ist besonders leicht, die Konsequenzen von Schwereanomalien auf hoher See zu betrachten. Dort wo die Schwere grösser ist, wird sich Wasser anhäufen und der Meeresspiegel wird ansteigen. Wo dagegen die Schwere kleiner ist, gibt es ein Tief der Wasseroberfläche. Man beobachtet also Variationen der Nullebene, d. h. des Meeresspiegels gegenüber dem idealen Rotationsellipsoid, das man ohne Schwereanomalien hätte. Diese Höhenvariationen haben natürlich Lotabweichungen zur Folge: Die lokale Richtung des Lotes weicht von der Normalen zum Rotationsellipsoid ab, steht jedoch überall senkrecht zur Oberfläche.

Die ozeanischen Gräben sind Regionen wo es ein grosses Massendefizit gibt. Sie produzieren negative Schwereanomalien. Berge und Vulkane über dem Meeresboden sowie die ozeanischen Rücken sind dagegen Orte positiver Anomalien. Dies sind Charakteristiken, die man mittels Satelliten genau bestätigen konnte. Wenn sich solche Anomalien über grosse Distanzen erstrecken, beeinflussen sie die Bahn von erdnahen Satelliten. Das ist wiederum ein Kreiseffekt, aus dem man die exakte Form des Erdkörpers ableiten konnte. Die Anomalien kleinerer Abmessungen werden mittels Methoden der Echographie bestimmt: Aus der Laufzeit von hin und zurück laufenden Radarpulsen, die von hochfliegenden Satelliten ausgestrahlt werden, lässt sich heute die Höhe des Meeresspiegels, oder des Bodens, mit Zentimetergenauigkeit bestimmen. Diese Nullfläche, mit ihren geglätteten Höhen und Tiefen, nennt man das Geoid, wovon Fig. 2 eine Darstellung wiedergibt.

#### Ein Vergleich elektrostatischer und gravimetrischer Kräfte

Berechnet man, für typische atomare Teilchen wie Protonen oder Elektronen, das Verhältnis der elektrostatischen oder Coulomb Kraft zur gravimetrischen Kraft (drittes Newtonsches Gesetz), so findet man astronomische Zahlen: Etwa  $10^{36}$  für Protonen und  $4 \cdot 10^{42}$  für Elektronen. Die Coulomb Kräfte sind also für atomare Teilchen unglaublich viel stärker als die gravitativen Kräfte. Über grosse Entfernungen spielen jedoch die elektrostatischen Kräfte keine Rolle, denn in grossen Volumen hat man meistens **elektrische Neutralität**. Über grosse Distanzen bleibt meistens nur die Schwere als Kraft wirksam (und, wie wir gesehen haben, manchmal die Zentrifugalkraft); und diese kann sehr gross werden, denn astronomische Körper enthalten leicht Teilchenzahlen die  $10^{50}$  übersteigen.

#### Die elektromagnetischen Photonen

Die statischen Gesetze von Coulomb und Newton verleiten zu dem Schluss, dass Ladungen oder Massen stets über ihre gegenseitigen Positionen informiert sind. Für Newton war das eine Folge seiner Anschauung, dass jeder Massenkörper stets von seinem Schwerefeld umgeben ist. Für Einstein, der postulierte, dass kein Signal sich schneller als das Licht ausbreiten kann, konnte das nicht wahr sein. Wir werden weiter unten sehen, dass ihn das dazu führte anzunehmen, dass jedes Massenteilchen den Raum verformt. Ein Raum mit geradlinigen Koordinaten (ein Euklidischer Raum) wird dann zu einem gekrümmten Raum. Eine sich bewegende Testmasse läuft dann nicht mehr auf einer einfachen Newtonschen Bahn, insbesondere bei einer Zentralmasse eine Kepler Bahn

Il est intéressant d'étudier les conséquences des anomalies gravifiques en haute mer. Les régions de gravité plus forte attirent davantage d'eau et provoquent ainsi une élévation du niveau de la mer. Les zones où la gravité est plus faible voient la mer se creuser. On observe ainsi des variations du niveau zéro, celui de la mer, par rapport à l'ellipsoïde de rotation parfait qu'on aurait en l'absence d'anomalies gravifiques. Ces variations de niveau entraînent naturellement des déviations de la verticale d'un lieu. La direction locale du fil à plomb s'écarte alors un peu de la perpendiculaire à l'ellipsoïde idéal, puisque c'est à la surface du géoïde qu'elle est verticale.

Les fosses océaniques sont des zones où il y a un grand défaut de masse. Elles donnent lieu à des anomalies gravifiques négatives. Les monts ou volcans sous-marins, de même que les dorsales océaniques, sont par contre des régions d'anomalies positives. Ces caractéristiques ont été parfaitement confirmées par les études qu'on en a faites au moyen de satellites. En effet, à grande échelle ces anomalies perturbent les trajectoires orbitales des satellites en orbites basses; il s'agit encore une fois d'un effet de gyroscope dont l'analyse permet de déduire la forme exacte du globe. Quant aux anomalies de petite échelle, elles sont révélées par échographie: des radars à bord de satellites de haute altitude peuvent aujourd'hui déterminer le niveau de la mer ou du sol à la précision de quelques centimètres en mesurant les temps d'aller et retour d'impulsions électromagnétiques. Cette surface du globe de niveau zéro avec ses creux et ses bosses lisses, est appelée «le géoïde», dont une représentation est donnée à la Fig. 2.

#### Comparaison des forces électrostatiques et gravifiques

Si on calcule, pour des particules atomiques types, telles que les protons ou les électrons, le rapport des forces électrostatiques, ou de Coulomb, et gravifiques (troisième loi de Newton), on trouve des nombres astronomiques: environ  $10^{36}$  pour les protons et  $4 \cdot 10^{42}$  pour les électrons. Les forces de Coulomb sont donc incroyablement plus fortes que l'attraction gravitationnelle pour les particules atomiques. Mais aux grandes distances, les forces électriques ne jouent généralement aucun rôle, car il y a **neutralité électrique**. A ces grandes distances, à part les forces centrifuges déjà mentionnées, seule reste la gravité, qui peut devenir très importante car des corps planétaires contiennent aisément des nombres de particules supérieurs à  $10^{50}$ .

#### Les photons électromagnétiques

Les lois statiques de Coulomb ou de Newton pourraient donner à penser que les charges ou les masses sont toujours informées instantanément de leurs positions réciproques. Pour Newton cela provenait du fait que chaque masse était toujours entourée de son champ de force. Pour Einstein, qui admettait qu'aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière, cela ne pouvait pas être vrai et il proposa que toute masse déforme l'espace. Un espace aux coordonnées rectilignes (c.-à-d. un espace euclidien) devient alors un espace courbe, dans lequel une masse test ne parcourt plus une trajectoire selon les lois de Newton, en particulier une conique képlerienne dans le cas d'une masse centrale, mais une courbe plus compliquée. Et même la lumière, déjà déviée d'une droite dans la théorie classique newtonnienne, subit alors une déviation additionnelle.

Une autre façon de voir ce problème est de considérer deux charges, d'abord au repos. Chacune ne produit qu'un champ électrostatique. Dès qu'on déplace l'une des charges son champ électrique n'est plus statique. En un point donné il varie



(Kegelschnitt), sondern durchläuft eine kompliziertere Trajektorie. Sogar das Licht, das sich in Anwesenheit von konzentrierten Massen schon bei Newton nicht geradlinig ausbreitet, wird dann weiter abgelenkt.

Eine andere Betrachtungsweise für dieses Problem, besteht darin, zwei Ladungen anzusehen, die zuerst zueinander ruhen. Jede Ladungen empfindet das elektrostatische Feld der anderen. Solange die beiden Ladungen ruhen, spüren sie keine anderen reziproken Felder. Sobald aber eine der Ladungen sich bewegt, sind die Felder nicht mehr statisch. Dies erzeugt magnetische Felder, die auch zeitlich variabel sind, umso mehr, als eine bewegte Ladung einem Strom entspricht, der wiederum ein Magnetfeld erzeugt. Diese gekoppelten variierenden Felder strahlen, einer Antenne gleich, elektromagnetische Energie in den Raum. Der Physiker kann diese Vorgänge ebenso gut mit Hilfe **elektromagnetischer Photonen** beschreiben, jene Energiequanten, die uns im beschränkten Frequenzbereich des sichtbaren Lichtes sehr gut bekannt sind. Durch diese Emission von Photonen erfahren also die beiden Ladungen von ihrer gegenseitigen Verschiebung. Aus diesem Grunde wird das Photon als Uebermittler der elektromagnetischen Kräfte aufgefasst. Auch im statischen Fall werden Photonen ausgetauscht, aber durch Interferenz beseitigen sich hier die Photonen gegenseitig und das System strahlt keine Energie aus. Der Physiker spricht dann vom Austausch **virtueller Photonen**, die zu **reellen Photonen** werden, sobald eine Ladung gegenüber der anderen verschoben wird, was die vorher perfekte Interferenz zerstört.

Das Konzept des virtuellen Photons ist nicht so künstlich wie es auf den ersten Blick erscheint: in einem Atom werden die Elektronen der Hülle auf ihren Bahnen enormen Beschleunigungen unterworfen; man würde also erwarten, dass sie eine starke Strahlung emittieren (Čerenkov Strahlung) und Energie verlieren. Dem ist jedoch nicht so: im Atom sind die Elektronen in wohldefinierten Quantenzuständen und die ausgestrahlte Energie hat die Form virtueller Photonen, die sich durch Interferenz gegenseitig aufheben. Erst beim Übergang von einem Quantenzustand zu einem anderen werden reelle Photonen emittiert oder absorbiert.

### Das Konzept des Gravitons

Die gravitative Wechselwirkung befolgt sehr ähnliche Gesetze und der Uebermittler der Anziehungskraft ist hier das **Graviton**, ein dem Photon ähnliches Teilchen. Alle Verschiebungen von Massen sind an die Ausstrahlung und den Empfang von Gravitonen gebunden. Bis heute ist es jedoch noch nicht gelungen, auf der Erde Gravitonen wahrzunehmen, die im Weltraum erzeugt wurden. Dennoch ereignen sich dort gravitative Phänomene von enormen Ausmassen, wie die Explosionen von Supernovae. Aber die erzeugten Gravitonen sind von tiefer Frequenz und ihre schwache Energie ist auf ein unermesslich grosses Volumen verteilt, so dass sich ihr Nachweis als aussergewöhnlich schwierig erweist. Mittlerweile werden aber neuartige Empfänger gebaut, mit der Hoffnung, doch bald einen Erfolg vorweisen zu können.

Wenn man auch bis heute noch keine im Weltall erzeugten Gravitonen nachweisen konnte, so hat man doch ein Doppelsystem studieren können, zwei Neutronensterne in gekoppelter Rotation um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, dessen ausgestrahlte gravitative Energie (das gravitative Gegenstück zur Čerenkov Strahlung) die unmittelbare Zukunft des Sternpaares bestimmt. Einer der Partner ist ein Pulsar, eine Art elektromagnetischer Leuchtturm am Himmel, der regelmässige Pulse ausstrahlt. Wegen seiner Bewegung auf der Umlaufbahn

en fonction du temps. Cela engendre immédiatement des champs magnétiques, variables eux-aussi, et cela d'autant plus que le déplacement d'une charge peut être assimilé à un courant électrique, source encore une fois d'un champ magnétique. Dès qu'on déplace une charge électrique on est donc mis en présence de champs électromagnétiques qui rayonnent alentour comme une antenne. Ce phénomène peut être décrit par des **photons électromagnétiques**, dont la lumière n'est qu'une forme à des fréquences particulières; les photons sont d'ailleurs souvent présentés comme particules élémentaires de la lumière. On voit ainsi que les deux charges électriques sont renseignées mutuellement, par l'émission de photons à la vitesse de la lumière, sur leurs déplacements réciproques, et l'on comprend pourquoi on peut dire que les photons sont le véhicule ou le vecteur des forces électromagnétiques. Dans l'état statique il y a aussi échange de photons, mais ces photons s'annulent continuellement par interférence, le système ne rayonne pas d'énergie dans cette situation. On dit qu'il y a échange de **photons virtuels**, qui deviennent **photons réels**, dès qu'on déplace les charges l'une par rapport à l'autre, l'interférence parfaite étant alors détruite.

Le concept de photons virtuels est moins arbitraire qu'il n'y paraît: dans un atome, les électrons orbitaux sont soumis à d'énormes accélérations; ils devraient donc rayonner (rayonnement de Čerenkov) et perdre leur énergie. Mais ils sont dans un état quantique bien défini et le rayonnement qu'ils émettent est composé de photons virtuels qui s'annulent par interférence. C'est seulement lors d'un changement de l'état quantique que des photons réels sont émis ou absorbés.

### Le concept de graviton

L'interaction gravitationnelle obéit à des lois très similaires et le véhicule des forces gravitationnelles est une particule semblable au photon, le **graviton**. Tout déplacement de masse est lié à l'émission ou la réception de gravitons, mais on n'a pas encore pu détecter de gravitons venant de l'espace sidéral. Pourtant il s'y passe des phénomènes gravitationnels d'une ampleur énorme, tels que les explosions de supernovas. Mais les gravitons générés sont de fréquences très basses et leur faible énergie est diluée dans d'immenses volumes, ce qui rend leur détection incroyablement difficile. On est cependant en train de construire des récepteurs très sophistiqués avec espoir de succès dans un proche avenir.

Si l'on n'a pas encore pu capter de gravitons d'origine sidérale, on a par contre pu étudier un système d'étoile double, deux étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre, où l'émission d'énergie gravitationnelle détermine l'évolution à court terme de la paire d'étoiles. L'un des partenaire est un pulsar, une sorte de phare radioélectrique dans le ciel qui émet une suite régulière d'impulsions. A cause du mouvement orbital du pulsar et de l'effet Doppler, les impulsions que nous recevons ont une cadence variable. L'étude de ces variations a permis une connaissance très détaillée du système. Les deux étoiles sont si massives et si proches l'une de l'autre qu'elles émettent un rayonnement gravitationnel très intense (le pendant gravitationnel du rayonnement de Čerenkov). Cette perte d'énergie du système fait que les deux étoiles se rapprochent toujours plus et leur période orbitale diminue rapidement. Les observations sont en excellent accord avec les calculs basés sur la théorie de la relativité généralisée d'Einstein, pour laquelle elles fournissent une magistrale confirmation. Mais cela n'est pas l'équivalent d'une expérience de laboratoire permettant de vérifier que les résultats dépendent correctement de paramètres initiaux qu'on peut modifier.



und dem Dopplereffekt kommen die empfangenen Pulse bei uns mit wohldefinierten Schwankungen an. Aus diesen Schwankungen konnte das Sternenpaar in vielen Einzelheiten studiert werden. Insbesondere sind die zwei Sterne so massiv, dass sie in ihrer Bewegung um das Massenzentrum grosse Mengen gravitativer Energie, in Form von Gravitonen, aussenden. Dieser Energieverlust hat zur Folge, dass die beiden Sterne immer näher zusammenrücken, wobei sich ihre Bahnperiode rapide verkleinert. Die Beobachtungen sind in sehr guter Übereinstimmung mit den Rechnungen nach Einsteins Theorie der allgemeinen Relativität, für welche sie eine glänzende Bestätigung darstellen. Dies ist jedoch einem Laborexperiment nicht äquivalent, in dem man die Parameter des Experimentes ändern kann um zu sehen, ob sich dann auch die Ergebnisse der Theorie entsprechend verändern.

### Die Gravitation und die Relativitätstheorie Einsteins

Der Name Einstein ist uns allen ein Begriff, der genaue Inhalt seiner Theorien ist jedoch im allgemeinen wenig bekannt. Dabei handelt es sich strenggenommen um zwei Theorien, oder vielmehr um zwei Stufen unserer Wahrnehmung, einmal des Raumes und der Zeit, andererseits der Phänomene der Gravitation und der Trägheit. Die erste Stufe, die spezielle Relativitätstheorie, stammt aus dem Jahre 1905 und vereinigt innerhalb eines neuen Konzeptes die Begriffe von Raum und Zeit, das *Raum-Zeit Kontinuum*. Die spezielle Relativitätstheorie beruht auf dem Axiom, dass sich kein Signal schneller als die Lichtgeschwindigkeit  $c$  fortbewegen kann. Als Folgerung kommt dabei bereits die bekannte Beziehung  $E = mc^2$  heraus, wobei  $E$  = Energie und  $m$  = Masse sind. Das *Raum-Zeit Kontinuum* unterscheidet 3 Regionen: In der ersten findet man die Ereignisse der Vergangenheit; in der zweiten diejenigen der Zukunft; während eine grosse dritte Region nur dann zu erreichen wäre, wenn man über Geschwindigkeiten grösser als die des Lichtes verfügen würde.

Die allgemeine Relativitätstheorie geht weit über dieses vorherige Prinzip hinaus. Es handelt sich dabei um eine umfassende Theorie der Gravitation. Nachdem Einstein behauptet hatte, dass kein Signal die Lichtgeschwindigkeit überschreiten kann, musste er erklären, wie zwei Massen, getrennt durch beliebige Distanzen, gar von astronomischen Ausmassen, *jederzeit* Kenntnis über ihre gegenseitigen Positionen besitzen (dies war die Auffassung von Newton). Im Jahre 1916 schlug Einstein ein Feld als Ersatz für das Konzept der Gravitationskraft vor, welches das *Raum-Zeit Kontinuum* zu deformieren vermag (siehe dazu auch der letzte Abschnitt). Somit umkreisen die Planeten die Sonne nicht auf elliptischen Bahnen. Vielmehr bewegen sie sich im *Raum-Zeit Kontinuum* auf "geradlinigen" Bahnen, so genannten *geodätischen Trajektorien*. Dieses vierdimensionale *Raum-Zeit Kontinuum* hat keine vorgegebene, feststehende, Realität. Nach den neuesten Vorstellungen der Kosmologie haben Raum, Zeit und Massen einen gemeinsamen Ursprung im "Big Bang". Bis heute ist es jedoch noch nicht gelungen die Geometrie des *Raum-Zeit Kontinuums* mit Laborexperimenten zu bestätigen.

### Warum neue Tests?

Forscher der Universität Stanford in Kalifornien arbeiten an neuen Tests der Einsteinschen allgemeinen Relativitätstheorie. Diese Tests sollen mit Hilfe eines Satelliten ausgeführt werden, der mit äusserst raffinierten Instrumenten ausgerüstet ist. Um sicherzustellen, dass alle Teilsysteme richtig funktionieren, ist 1993 ein Testflug vorgesehen, während das eigentliche Experiment für 1995 programmiert ist.

### La gravité et la théorie de la relativité d'Einstein

Si nous connaissons tous le nom d'Einstein, l'objet de sa théorie nous est en général moins familier. Il s'agit en fait de deux théories, ou plutôt de deux étapes dans notre perception de l'espace et du temps d'abord, du phénomène de la gravité et de l'inertie ensuite. La première étape, celle de la relativité restreinte, date de 1905 et réalise la synthèse de l'espace et du temps en un nouveau concept, celui de l'*espace-temps*. Elle accepte comme axiome qu'aucun signal ne peut se propager à des vitesses supérieures à celle de la lumière,  $c$ , et conclut déjà que  $E = mc^2$ , où  $E$  = énergie et  $m$  = masse. Dans l'*espace-temps* on reconnaît trois régions distinctes, celle des événements passés, celle du futur et une grande zone inaccessible, ou qui ne pourrait être accessible que si l'on disposait de vitesses supérieures à celle de la lumière.

La relativité générale va bien au delà; c'est une théorie de la gravitation. Après avoir dit qu'aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière, Einstein se devait d'expliquer comment deux masses à des distances quelconques, même astronomiques, pouvaient être renseignées à *tout instant et instantanément* de leurs positions respectives (c'était la conception de Newton). Comme pour les charges on peut expliquer cette transmission d'information par un échange de gravitons virtuels, mais en 1916, ces idées n'avaient pas encore été développées. Ceci amena Einstein à offrir cette explication équivalente consistant à remplacer le concept de force gravitationnelle par celui d'un champ qui déforme l'*espace-temps*. Ainsi les planètes, qui nous semblent tourner autour du soleil sur des orbites elliptiques, se déplacent en fait sur des trajectoires «rectilignes», appelées des *géodésiques*, dans l'*espace-temps* déformé par les masses qui s'y trouvent. Cet *espace-temps* à quatre dimensions n'a pas de réalité indépendante. Selon les conceptions de la cosmologie moderne, espace, temps et masses ont une origine commune dans le «big bang». Il n'y a donc pas d'espace et d'échelle de temps infinis, à l'intérieur desquels se déroulerait l'évolution cosmique. Mais jusqu'à ce jour on n'a pas pu confirmer la géométrie de l'*espace-temps* par des expériences de laboratoire.

### Pourquoi de nouveaux tests?

Des chercheurs de l'université de Stanford, en Californie, sont en train de mettre au point de nouveaux tests de la théorie de la relativité généralisée d'Einstein. Ces tests se feront au moyen d'un satellite sur lequel prendront place des instruments d'un extrême raffinement. Pour s'assurer que tous les systèmes seront bien au point, un vol préliminaire est prévu pour 1993, alors que l'expérience proprement dite, d'une durée de deux ans, est programmée pour 1995.

Pourquoi de nouveaux tests, serait-on tenté de dire? Malgré des différences essentielles entre les théories de Newton et d'Einstein, leurs prédictions pour tout ce qui se passe dans le système solaire sont presque identiques. Ce n'est qu'à l'échelle du Cosmos que des écarts importants se font jour. Einstein lui-même s'était bien rendu compte des difficultés qu'il y avait à vérifier la relativité généralisée et il ne pu proposer que trois effets, tous très petits.

(1) La précession du périhélie de Mercure, c.-à-d. la rotation graduelle de l'ellipse orbitale de cette planète selon l'esquisse de la Fig. 3. Il faut noter que la théorie de Newton prédit aussi une telle rotation, mais son ampleur ne s'accordait pas bien avec les faits.

(2) La déflexion de la lumière par des masses importantes, par exemple celle émise par les étoiles lorsqu'elle effleure les bords du soleil. Ici encore, la théorie classique prédit déjà un tel

Es zwingt sich nun die Frage nach dem Grund für diese neuen Tests auf. Denn trotz aller grundlegenden Unterschiede zwischen der Theorie von Newton und jener von Einstein stimmen die Voraussagen beider Theorien für sämtliche Vorgänge, welche im Sonnensystem ablaufen, praktisch identisch überein. Nur in kosmischen Abständen treten relevante Unterschiede auf.

Einstein war sich selber der Schwierigkeiten bewusst, die eine Überprüfung seiner allgemeinen Relativitätstheorie stellen würde und konnte nur drei Effekte vorschlagen, alle sehr klein, um seine Theorie zu prüfen.

(1) Die Präzession des Perihels des Planeten Merkur, d.h. die allmähliche Rotation der elliptischen Bahn des Merkurs (siehe Fig. 3). Dazu sollte bemerkt werden, dass die Theorie von Newton auch schon eine solche Rotation vorsieht, deren Amplitude stimmt jedoch nicht mit den Beobachtungen überein, im Gegensatz zu den Vorhersagen von Einstein.

(2) Die Ablenkung des Lichtes durch Körper grosser Masse, z.B. anhand der Ablenkung von Sternenlicht, wenn dieses am Rande der Sonne auftaucht. Wie wir oben schon gesagt haben, sieht auch hier die klassische Theorie einen solchen Effekt vor, der aber um die Hälfte schwächer ist. Erneut haben spätere Beobachtungen bei totalen Sonnenfinsternissen Einstein recht gegeben.

(3) Die *gravitative Rotverschiebung*, d. h. eine Versetzung in Richtung grösserer Wellenlängen der gesamten elektromagnetischen Strahlung eines sehr massiven Körpers, wie z.B. diejenige eines Sternes. Die Bestätigung dieser letzten Aussage war erheblich schwieriger als diejenige der zwei ersteren. Erst 1976 ist dies in einem laborähnlichen Versuch im Massstab der Erde gelungen. Dazu wurde an einer Weltraumsonde, bezeichnet mit dem Namen *Gravity Probe A*, eine extrem genaue Uhr montiert und mit einer gleichen stationären Uhr verglichen.

Trotz des Erfolges der drei Experimente konnte noch nicht gesagt werden, dass sich die allgemeine Relativitätstheorie bereits auf brillante Weise, und über alle konkurrierenden Theorien der Gravitation, durchgesetzt hätte. Die Suche nach zusätzlichen Bestätigungen sollte weiterhin die Forschung in Anspruch nehmen.

Wie es auch schon bei *Gravity Probe A* der Fall war, wird das Labor der Forscher die gesamte Erde sein, deren Masse das *Raum-Zeit Kontinuum* in ihrer Nachbarschaft deformiert. Vom Standpunkt der Relativitätstheorie aus besitzt unser Planet unglücklicherweise aber nur eine geringe Masse. Dennoch sollen jetzt sehr subtile Versuche unternommen werden, möglich erst durch höchstmoderne Techniken, um Einsteins Theorien endgültig zu bestätigen. Das Experiment wird mit Hilfe einer Weltraumsonde durchgeführt, die den Namen *Gravity Probe B* tragen soll. Die Sonde wird sich auf einer polaren Erdumlaufbahn in 640 km Höhe befinden und mit vier ausgeklügelten Kreiseln ausgestattet sein. Dabei handelt es sich um zwei unterschiedliche Versuche, die sich über eine Zeitspanne von zwei Jahren erstrecken werden.

### Kreisel als Sonden

Wieso eignen sich gerade Kreisel als Mess-Sonden? Jeder kennt den Kreisel als ein sich um die eigene Achse drehendes Spielzeug. Bei genügend hoher Drehgeschwindigkeit scheint er die Gesetze der Gravitation herauszufordern. Statt umzukippen bleibt er aufrecht. Mit dem allmählichen Langsamerwerden beginnt der Kreisel zu tanzen oder genauer zu präzedieren. Die Rotationsachse beschreibt dabei einen Kegel, dessen

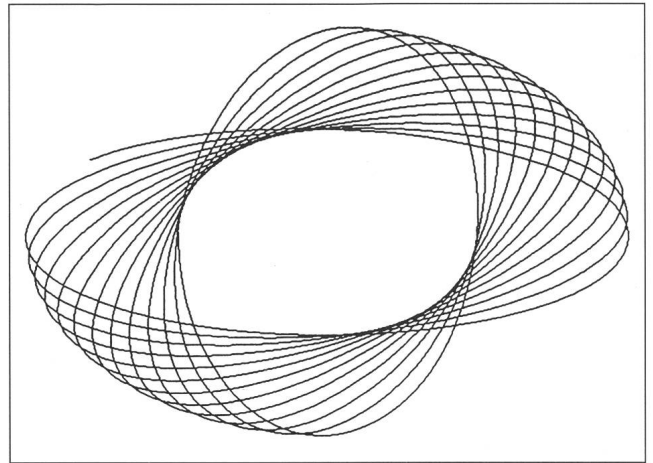


Fig. 3. Die Umlaufbahn des Merkurs ist, wie die aller anderen Planeten und Satelliten, keine perfekte Ellipse. Sie ist zwar einer Ellipse immer sehr nahe, aber deren Orientierung und Form verändern sich im Laufe der Zeit. Eher entspricht die beschriebene Umlaufbahn einer Rosette, wie sie hier übertrieben dargestellt ist. Die Rotation der Ellipsenachsen ist die "Präzession des Perihels". Wegen der Nähe Merkurs zur Sonne sind die relativistischen Auswirkungen auf diese Präzession verhältnismässig gross, während sie für die übrigen Planeten verschwindend klein sind.  
*L'orbite de Mercure, comme celle de toutes les planètes ou satellites, n'est pas une ellipse parfaite. Elle en est toujours proche, mais son orientation et sa forme évoluent au fil du temps, si bien que l'orbite décrit en fait une rosette, dessinée ici de façon exagérée. La rotation des axes de l'ellipse est ce qu'on appelle «la précession du périhélie». A cause de sa proximité du soleil les effets relativistes sur cette précession sont importants dans le cas de Mercure, alors qu'ils sont négligeables pour les autres planètes.*

effekt, mais trop faible de moitié, et une fois encore les observations qu'on a faites plus tard, à l'occasion d'éclipses totales du soleil, ont donné raison à Einstein.

(3) Le *redshift gravitationnel*, soit un déplacement vers de plus grandes longueurs d'onde de toute radiation électromagnétique émise par un corps de grande masse, tel celui d'une étoile. Pour ce dernier test, il était plus difficile de trouver une confirmation, mais on a finalement réussi une sorte d'expérience de laboratoire, à l'échelle de la terre, au moyen d'une horloge ultra-précise placée sur une fusée et qu'on a comparée avec une même horloge restée sur terre. Cette sonde spatiale particulière avait reçu le nom de *Gravity Probe A*.

En dépit de la réussite de ces trois tests, on ne pouvait pas dire que la théorie généralisée d'Einstein s'était imposée avec éclat sur toutes les autres théories de la gravitation avec lesquelles elle est en compétition. Il devenait donc nécessaire de chercher d'autres confirmations.

Comme pour *Gravity Probe A*, le laboratoire des chercheurs de Stanford sera la terre entière, dont la masse déforme l'*espace-temps* en son voisinage. Notre planète ne représente malheureusement qu'une petite masse du point de vue des effets de la relativité, mais des tests très subtils, possibles par la mise en oeuvre de techniques ultra-modernes, devraient permettre deux confirmations magistrales des thèses d'Einstein. L'expérience se fera au moyen d'une sonde spatiale, dénommée «*Gravity Probe B*». Cette sonde voyagera sur une orbite polaire à 640 km d'altitude et emportera 4 petits gyroscopes, d'une conception très raffinée et comme nous venons de la dire, il s'agira de deux tests distincts qui s'étendront sur deux ans.



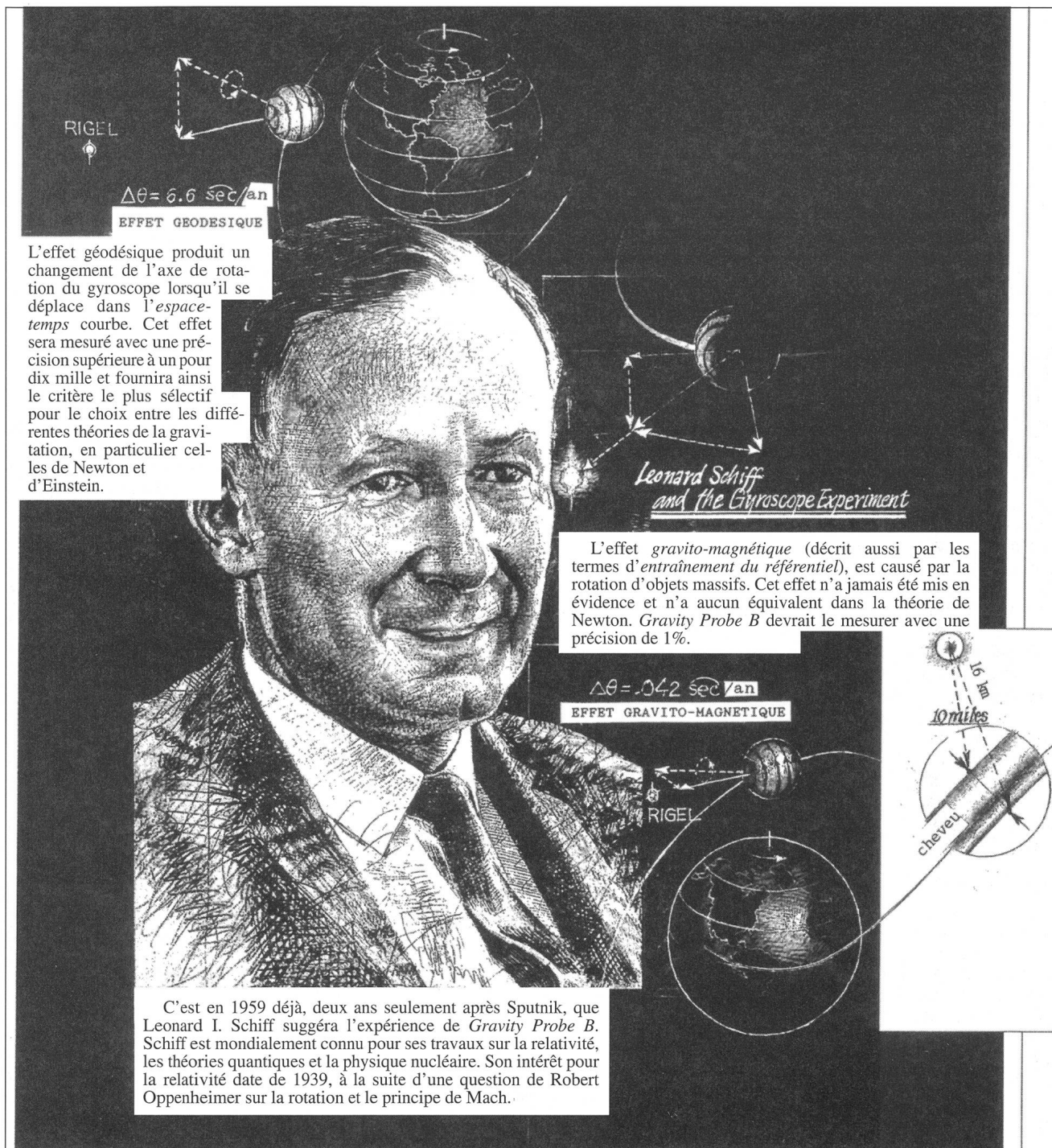


Fig. 4a. Montage artistique de l'université de Stanford. La précision escomptée correspond à un angle inférieur au millième de seconde d'arc, soit environ celui sous lequel on voit l'épaisseur d'un cheveu à 16 km.

Öffnungswinkel mit abnehmender Drehgeschwindigkeit größer wird. Schlussendlich steht der Kreisel still und fällt auf die Seite. Dreht sich nun ein Kreisel mit hoher Geschwindigkeit, kann dieser die Richtung seiner Achse beibehalten. Die Bemühungen, die Richtung zu ändern, führen lediglich zu einer Präzession der Rotationsachse. Diese Eigenschaft soll in

**Des gyroscopes comme capteurs**

Pourquoi va-t-on utiliser des gyroscopes? Nous avons déjà mentionné la propriété principale du gyroscope ou de la toupie, lorsque nous avons parlé de la précession des équinoxes. Chacun connaît la toupie comme jouet et sait que lorsqu'elle tourne très vite, elle semble défier les



der *Gravity Probe B* Sonde ausgenutzt werden. Die Erdumlaufbahn dieses Satelliten entspricht im *Raum-Zeit Konzept* einer geraden Bahn, in einem durch die Masse unseres Planeten kaum deformierten *Raum-Zeit Kontinuum*. Die kleinsten Deformationen werden sich aber in messbaren kleinen Abweichungen der Kreiselachsen widerspiegeln, und diese Abweichungen sollen gemessen werden.

Der erste Versuch entspricht also einer direkten Messung der Krümmung des *Raum-Zeit Kontinuums* durch die Masse der Erde. Diese Krümmung sollte eine Veränderung der Ausrichtung der Kreiselachsen in Bezug auf ein System von Fixsternen bewirken. Während eines ganzen Jahres auf der Umlaufbahn werden die Kreiselachsen eine Ablenkung ihrer Ausrichtung, **parallel zur Umlaufbahnebene**, von einem Winkel von nur 6,6 Bogensekunden widerfahren (siehe dazu Fig. 4). Die Empfindlichkeit und die Stabilität der benutzten Instrumente erlauben das Messen eines so kleinen Winkels mit einer Genauigkeit von einigen Zehntausendstel Bogensekunden. Dies wird der erste Laborversuch sein, der die Krümmung des *Raum-Zeit Kontinuums* nachvollzieht. Bis heute sind dafür nur indirekte Bestätigungen bekannt, welche auf astronomischen Phänomenen beruhen.

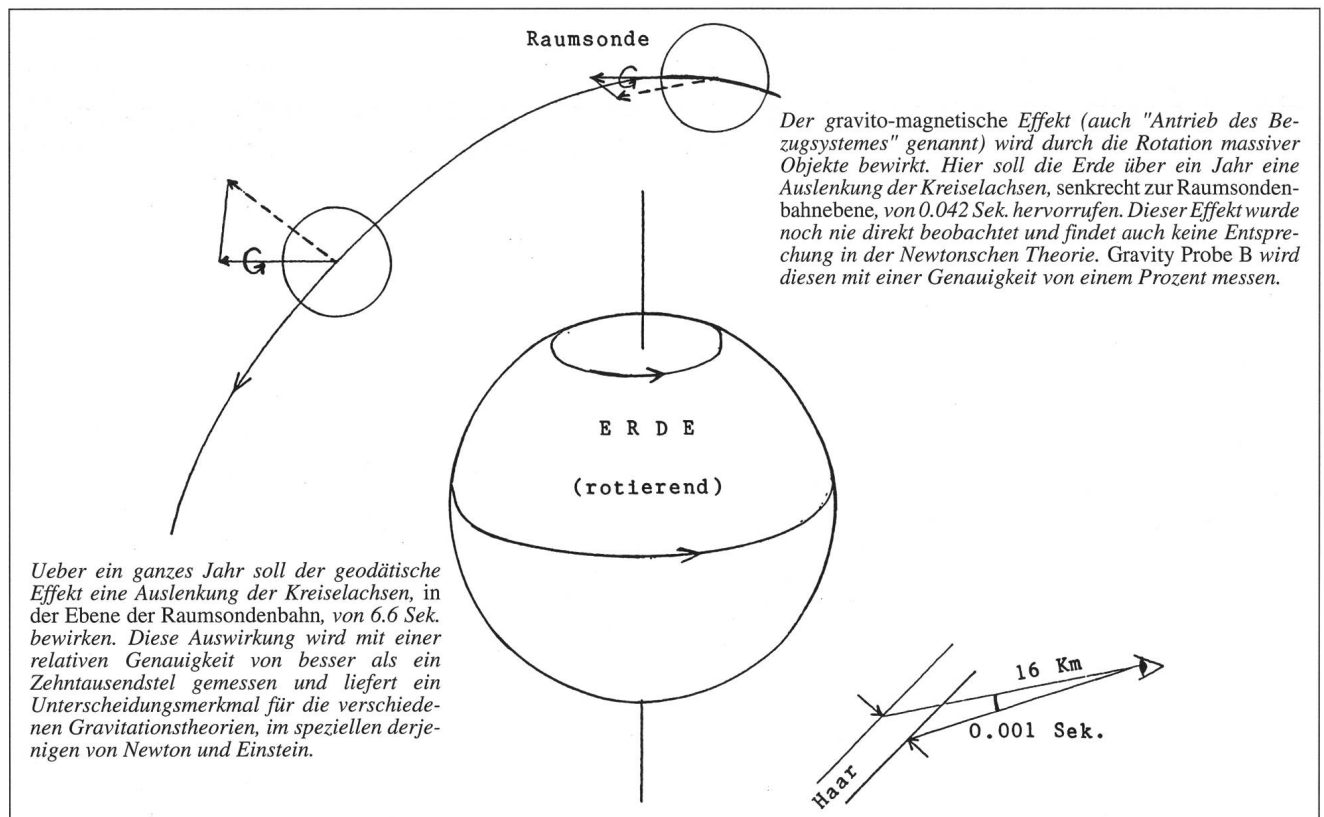
#### Das Trägheitsäquivalent des magnetischen Momentes

Der zweite Versuch ist noch um einiges subtiler und erfordert für das Verständnis erneut eine Analogie mit dem Elektromagnetismus. Es ist wohlbekannt, dass Elektronen eine elektrische Ladung besitzen und mit einem *kinematischen Drehmoment*, dem *Spin*, versehen sind. Der Spin entspricht einer Rotation der

lois de la gravité, se tenant bien droite au lieu de tomber. A mesure qu'elle ralentit, la toupie se met pourtant à danser, on dit qu'elle précesse. Son axe de rotation décrit alors un cône qui s'ouvre de plus en plus à mesure que la vitesse de rotation diminue. Finalement la toupie s'arrête et se couche de côté. Lorsqu'il tourne à grande vitesse, un gyroscope réussit donc à conserver la direction de son axe de rotation. Les efforts qu'on pourrait faire pour changer cette direction ne réussissent qu'à faire précesser les gyroscopes (nous avons vu plus haut que cela engendre la précession des équinoxes). Cette propriété sera utilisée dans la sonde *Gravity Probe B*. L'orbite de ce satellite autour de la terre correspond, dans l'*espace-temps*, à une trajectoire «rectiligne» dans un espace à peine déformé par la petite masse de notre planète. Ces déformations minuscules se traduiront par un désalignement apparent des gyroscopes, et c'est cela qu'on va mesurer.

La première expérience est donc une mesure directe de la courbure de l'*espace-temps* par la masse de la terre. Cette courbure devrait avoir pour effet de modifier l'alignement des gyroscopes par rapport à un système de coordonnées lié aux étoiles fixes. Sur une année entière du parcours orbital, l'orientation des gyroscopes devrait subir une déviation, **dans le plan de l'orbite**, d'un arc de seulement 6,6 secondes (voir la Fig. 4); mais la sensibilité et la stabilité du système sont telles que ce petit angle pourra être mesuré avec une précision supérieure à un dix-millième. Ce sera le premier test de laboratoire du concept de courbure de

Fig. 4b. Veranschaulichung der Gravity Probe B Experimente. Die erhoffte Genauigkeit entspricht einem Winkel, der kleiner als ein Tausendstel einer Bogensekunde ist, entsprechend etwa der Dicke eines Haars betrachtet aus einer Entfernung von 16 km.





elektrischen Ladung. In der klassischen Physik hat die Rotation einer Ladung die Entstehung eines magnetischen Momentes zur Folge. Beim Elektron ist dies auch so und entspricht dem magnetischen Moment des Teilchens.

In der Gravitationstheorie ist die von einem rotierenden Massenkörper, z.B. der Erde, erzeugte sekundäre gravitative Erscheinung das Gegenstück zum magnetischen Moment. Es handelt sich dabei nicht um ein magnetisches Feld, sondern um ein tensorielles Gravitations- oder Schwerfeld, aber wegen der geschilderten Analogie sprechen die Physiker von einer *gravito-magnetischen* Kraft, oder auch vom Lense-Thirring Effekt (nach H. Thirring & J. Lense, 1918: Über den Einfluss der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Phys. Z.* 19, 156-163). Diese Kraft bewirkt bei den Kreiseln eine jährliche Ablenkung der Kreiselachsen um nur 0.042 Bogensekunden, diesmal **senkrecht zur Umlaufbahnebene** (siehe Fig. 4). Hier reduziert sich die Messgenauigkeit auf ein Prozent, oder möglicherweise etwas besser. Gelingt das Experiment, so wird dies jedoch das erste Mal überhaupt sein, dass dieser Effekt beobachtet werden konnte. In diesem Versuch liegt sogar die Hoffnung einen Weg zu finden, der die Realisierung eines der ehrgeizigsten Träume der modernen Physik ermöglichen soll: Die Synthese der Gravitationskraft mit den drei anderen bekannten Kräften, der starken und schwachen Kernkräfte und der elektromagnetischen Kraft.

#### Erst ganz raffinierte Kunstgriffe ermöglichen das Experiment

Es sollen hier zwar nicht alle Details über die angewendeten technologischen Spitzenleistungen in der Planung und Erstellung von *Gravity Probe B* aufgezählt werden. Einige besondere Eigenschaften sollen aber dennoch hervorgehoben werden. Die Kreisel bestehen aus Quarzkugeln mit einem Durchmesser von 4 cm. Ihre Herstellung soll angeblich so perfekt sein, dass, verglichen mit einer Kugel von der Grösse der Erde, Abweichungen von der idealen Kugeloberfläche höchstens 5 m betragen würden. Die Kreisel werden innerhalb eines Ultrahochvakuums mit 10'000 Umdrehungen pro Minute rotieren und ihre unveränderte Lage im Gehäuse soll durch ein elektrisches Schweben erreicht werden. Die Verluste an Energie durch Reibung werden dabei so gering sein, dass die Kreisel in hundert Jahren nicht mehr als ein Prozent ihrer Drehgeschwindigkeit verlieren würden.

Eine wichtige Rolle wird das exakte Einhalten der vorgegebenen Umlaufbahn spielen. Es ist notwendig sich zu vergewissern, dass die Sonde wirklich auf einer *geodätischen* Bahn die Erde umkreist, ohne durch Bremseffekte der auf 640 km Höhe noch vorhandenen Restatmosphäre und dem Druck der Sonnenstrahlung gestört zu werden. Dies soll mit dem Einsatz einer zusätzlichen fünften Kugel erreicht werden. Diese wird innerhalb der Sonde im selben Hochvakuum gelagert sein, aber ohne sich dabei zu drehen. Da diese Kugel nicht den atmosphärischen Bremseffekten und der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, wird sie sich auf einer idealen *geodätischen* Bahn fortbewegen. Ihr Schwebesystem dient dann nicht der Korrektur ihrer Position innerhalb des Gehäuses, sondern liefert elektrische Signale, mit deren Hilfe die Düsen der Raumsonde gesteuert werden. Somit soll es der Raumsonde möglich sein, der perfekten *geodätischen* Umlaufbahn der fünften Kugel zu folgen.

*Für seine Hilfe bei der deutschen Fassung dieses Artikels ist der Autor Herrn Dr. Hartmut Schweda sehr dankbar.*

*l'espace-temps*, pour lequel on n'avait, jusqu'ici, que des confirmations indirectes, basées sur des phénomènes astronomiques.

#### L'équivalent gravitationnel du moment magnétique

La seconde expérience est encore plus subtile et requiert, pour sa compréhension, que nous fassions appel une fois encore à une analogie avec l'électromagnétisme. Nous savons que les électrons possèdent une charge électrique. Ils sont aussi animés d'un *moment cinétique*, leur *spin*, ce qui veut dire que la charge électrique est en mouvement rotatoire. La combinaison de ces deux propriétés en implique une troisième, celle d'un moment magnétique. Pour la gravité, l'équivalent est qu'une masse en rotation, comme la terre, engendre l'apparition d'un effet de gravitation secondaire de nature tensorielle, le pendant du moment magnétique. Il ne s'agit nullement d'un champ magnétique, mais à cause de l'analogie les physiciens parlent d'une force *gravito-magnétique* ou d'effet Lense-Thirring (selon H. Thirring & J. Lense, 1918: Ueber den Einfluss der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Phys. Z.* 19, 156-163). Elle produira sur les gyroscopes une déviation annuelle, **perpendiculaire au plan orbital cette fois**, de seulement 0,042 seconde d'arc. Ici la précision de la mesure sera réduite au pourcent, ou un peu mieux. Mais si l'expérience réussit ce sera la première fois que cet effet aura été observé. Par ce test on caresse même l'espoir de faire s'entrouvrir la voie qui permettrait la réalisation de l'un des rêves les plus ambitieux de la physique moderne: la synthèse des forces gravitationnelles avec les trois autres forces connues, les forces nucléaires fortes et faibles et les forces électromagnétiques.

#### Seuls des raffinements extrêmes rendent l'expérience possible

Nous n'allons pas décrire en détail les prouesses technologiques mises en oeuvre dans la conception et la réalisation de *Gravity Probe B*, mais nous citerons seulement quelques faits particulièrement remarquables. Les gyroscopes sont des sphères de quartz d'environ 4 cm de diamètre. Leur usinage est si parfait que les écarts de sphéricité correspondraient, pour une sphère de la taille de la terre, à des écarts d'altitude extrêmes de seulement 5 mètres. Les gyroscopes tourneront à 10 000 tours par minute dans un vide ultra-poussé et seront tenus en place par lévitation électrique. Les pertes d'énergie par frottements seront si faibles qu'en cent ans ils ne perdraient qu'un pourcent de leur vitesse.

Un important problème est de bien «guider» la sonde. Il faut s'assurer que le vaisseau spatial parcourra vraiment une *géodésique*, sans être perturbé par le freinage des restes d'atmosphère à l'altitude de 640 km et les effets de pression de la radiation solaire. Cela se fera à l'aide d'une cinquième boule, qui, elle, ne tournera pas, mais sera placée dans le même vide presque parfait à l'intérieur de la sonde. Cette boule, n'étant pas soumise au freinage atmosphérique ni à la radiation du soleil, se déplacerait naturellement sur une *géodésique* idéale. Son système de lévitation, au lieu de servir à corriger sa position à l'intérieur de son enceinte fournira au contraire des signaux électriques par lesquels on contrôlera les tuyères de la sonde, pour assurer que cette dernière suive bien la *géodésique* parfaite de la cinquième boule.

GASTON FISCHER  
Institut de Géologie, Université de Neuchâtel  
Adresse de l'auteur:  
Observatoire Cantonal, CH-2000 Neuchâtel