

Le pulsar de Tayloe et Hulse : Prix Nobel de physique 1993

Autor(en): **Nicolet, B.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **53 (1995)**

Heft 266

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898706>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Le pulsar de Taylor et Hulse¹

Prix Nobel de physique 1993

B. NICOLET

1. Introduction

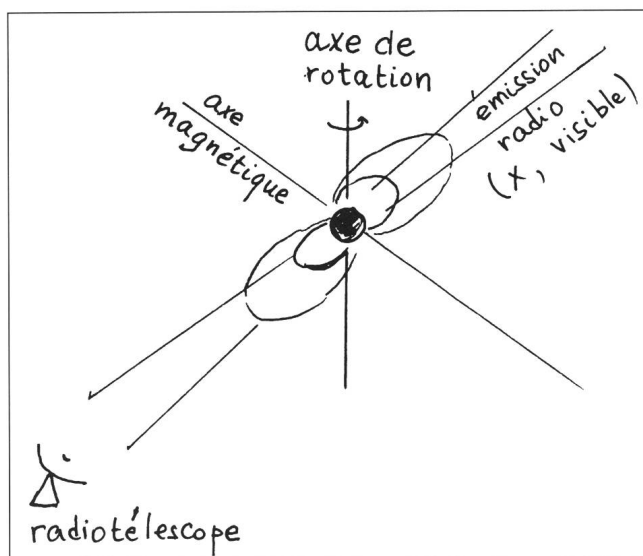
Le phénomène pulsar a été découvert en 1967 par un groupe de radioastronomes dirigé par Hewish. Plusieurs objets, dont la nature n'a pas été comprise tout de suite, provoquaient des impulsions (pulses en anglais, d'où le nom pulsar) périodiques d'une stabilité extraordinaire. Le fameux pulsar du Crabe est très rapide et sa période est de 0,033 s.

Il s'agit nécessairement d'astres de dimensions très réduites, sinon les pics d'impulsion seraient flous. Par ailleurs, la masse de ces astres doit être grande, sinon les périodes seraient moins régulières et ralentiraient rapidement. On a d'ailleurs mis en évidence des allongements très lents de la période des pulsars. On verra que la masse du pulsar de Taylor et Hulse (PSR 1913 + 16 pour les intimes, car situé en $\alpha = 19^{\text{h}} 13$ et $\delta = 16^{\circ}$ environ) vaut $1,442 \pm 0,003 M_{\odot}$.

Une grande masse et des dimensions de quelques dizaines de kilomètres impliquent une densité considérable de l'ordre de 10^{12} fois celle de l'eau. On sait maintenant que le phénomène pulsar provient des étoiles à neutrons. Lorsqu'une étoile massive termine son évolution par la spectaculaire phase de supernova, les couches périphériques sont éjectées violemment dans l'espace alors que le noyau central se condense tout aussi fortement pour dégénérer en un objet très compact: naine blanche ou étoile à neutrons.

Lors de leur contraction, ces objets acquièrent une vitesse de rotation ultrarapide. Par ailleurs, leur axe magnétique peut très bien ne pas coïncider avec l'axe de rotation. Des rayonnements radio sont associés à ce champ magnétique et leurs cônes de balayage peuvent atteindre nos récepteurs à chaque tour.

Pour les quelque 500 pulsars actuellement connus les périodes de rotation P vont de 0,0016 à 4 secondes. Les nuages de plasma qui les entourent émettent des impulsions radio (et X) détectables.



2. Premières propriétés du pulsar PSR 1913 +16

En 1975, les astrophysiciens américains Hulse et Taylor publiaient les résultats et les premières interprétations des mesures qu'ils avaient effectuées au radio-télescope d'Arecibo sur le pulsar binaire PSR 1913 +16.

La fréquence de pulsation ν de PSR 1913 +16 est, en moyenne, de 16,94 Hertz environ, mais oscille de $\pm 0,01$ Hz sur une période de 7h 45mn. Cela s'explique par la présence d'un compagnon de masse similaire. Le pulsar et son compagnon orbitent autour de leur centre de masse et la variation de ν provient de l'effet *Doppler-Fizeau* qui se retrouve tant en optique (déplacement des raies par la vitesse radiale d'une source) qu'en acoustique par une variation périodique de ν dans le temps.

A partir de $\nu(t)$ on peut reconstituer, à un facteur de projection $\sin i$ près, les paramètres orbitaux de ce système qui correspond presque parfaitement à un problème de 2 corps libres de perturbations.

Table 1: Quelques paramètres orbitaux

Fréquence $\nu = 16,94953830295 \pm 2$ unités du dernier ordre [Hz]

Augmentation séculaire de la fréquence moyenne:

$\dot{\nu} = -2,47583 + 2 [10^{-18} \text{ Hz/s}]$

ν et $\dot{\nu}$ sont données pour l'époque J2000.0

Pér. orbitale $T = 27906,9816$ [s]

$a_1 \sin i = 7,02072 \cdot 10^8$ m

a_1 : demi grand axe de M_1 p. r. au centre de masse

i : inclinaison du plan de l'orbite p. r. au plan du ciel local

$M_1 + M_2 = 2,82827 \pm 4 [M_{\odot}]$

Excentricité $e = 0,617313 \pm 10$

Or les prédictions théoriques classique d'une part, relativistique d'autre part, sont sensiblement différentes pour ce qui concerne le problème des 2 corps. On va le voir dans les sections suivantes et les appendices.

Ce pulsar binaire fournit des tests inégalables. Les mesures ont donc été poursuivies avec un appareillage de plus en plus raffiné. Le chronométrage a été étalonné sur les meilleures horloges atomiques et les barres d'erreurs se limitaient à quelques microsecondes sur 1974-1989.

3. Quelques aspects de la mécanique classique

L'essentiel de cette mécanique a été développée par Newton. Elle suffit à décrire de nombreuses situations et correspond bien au «bon sens»:

a) Séparation du temps et de l'espace

Il s'agit, dans cette optique, de deux entités bien distinctes. Si toutes les horloges des quais, d'une part et des locomotives CFF, d'autre part sont mises à l'heure et synchronisées au repos, un mécanicien s'attendra «naturellement» à ce que sa

¹ Exposé présenté le 25 octobre 1994 à l'Astrotagung 1994 de Lucerne



pendule (mobile!) indique, tout au long d'un trajet, la même heure que les pendules (au repos) qu'il voit sur les quais.

b) *Loi additive des vitesses*

La vitesse est limitée à 33.3 m/s (120km/h) sur les autoroutes. Une voiture de police équipée d'un radar mobile roule à 28 m/s. Ses occupants verbalisent dès qu'un véhicule se déplace à plus de 5,3 m/s par rapport au radar en vertu de la loi $v_{tot} = v_1 + v_2$.

c) *Orbites fixes dans le problème des deux corps*

Si deux corps isolés et liés orbitent autour de leur centre de masse ils décrivent des *orbites elliptiques fixes*.

4. **Quelques aspects de la relativité restreinte (Einstein, 1905)**

On a observé que la vitesse de la lumière est la même dans tous les systèmes quel que soit leur mouvement. Ceci viole la loi classique d'addition des vitesses. La mécanique classique a été améliorée. Un examen attentif de l'appendice A montre que:

- des termes spatiaux et des termes temporels coexistent. Les deux notions ne sont plus séparées et on parlera d'*espace-temps*.
- on a une *dilatation du temps* dans un système Σ' en mouvement $v = \beta c$ par rapport à Σ au repos.

Par exemple, pour un mécanicien de locomotive qui se rend de Genève à Zürich à 30 m/s et 8000 s, l'horloge de bord sera en retard de 5 ns (5 milliardièmes de secondes) par rapport à celle des quais. Le point de vue classique n'est pas erroné; il est un cas limite de la mécanique relativiste aux faibles vitesses.

5. **Quelques aspects de la relativité générale (Einstein, 1915)**

L'idée de base est le **Principe de Mach**: La présence de matière modifie la métrique de l'espace-temps

Les particules d'épreuve sont *libres* et parcourent des *géodésiques* (trajectoires de métrique totale s_{tot} *minimales*). C'est la *déformation de l'espace-temps qui dévie les particules* (qui peuvent être des photons lumineux).

a) *Déviation de la lumière et retard Shapiro*

Si l'on assimile un photon à un grain de lumière d'énergie c^2 par unité de masse (rel. restreinte) passant à une distance q d'une masse M , on trouve qu'il est dévié de

$$\delta_{cl} = 2 GM/qc^2 \text{ [radians] en mécanique classique et } \delta_{RG} = 4 GM/qc^2 \text{ en relativité générale}$$

La lumière d'une étoile frôlant le Soleil est déviée de: $\delta_{cl} = 0,87''$ ou de $\delta_{RG} = 1,75''$. Qui a raison?

Lors de l'éclipse totale de Soleil du 29 mai 1919, qui par chance avait lieu dans les Hyades riches en étoiles brillantes, on a observé $1,8 \pm 0,3''$ dans des conditions fort délicates. C'était une confirmation de la relativité générale.

De telles déviations provoquent à la conjonction supérieure des planètes un *retard Shapiro* dans l'arrivée des photons

Pour Mars, Viking a confirmé $\Delta t_{Sh} = 2,40 \cdot 10^{-4} s$ à $\pm 1\%$

b) *Avance du périhélie*

Schwarzschild a décrit, en 1916, un cas particulier intéressant: celui d'un Univers comportant une masse isolée ponctuelle M . La métrique est déformée par des facteurs $(1-2m/r)$ qui courbe les trajectoires (voir appendice B).

L'orbite est fixe $\Delta\phi = 0$ dans la solution newtonnienne, le périastre avance de $\Delta\phi = \frac{6\pi m}{(1-e^2) a}$ en relativité générale.

Classiquement, des perturbations peuvent avoir un effet semblable, mais, pour Mercure, la théorie classique prédisait $\Delta\phi_{cl} = 5557,18 \pm 0,85''$ par siècle alors que l'on observait $\Delta\phi_{obs} = 5599,74 \pm 0,41''$ par siècle donc:

$O - C = 42,56 \pm 0,94''$ par siècle, soit moins de 1% ce qui était très gênant. On imagina même une planète ad hoc: Vulcain.

Or la contribution relativiste est de $43,03''$ par siècle et explique le désaccord classique. C'est encore un succès de la relativité générale.

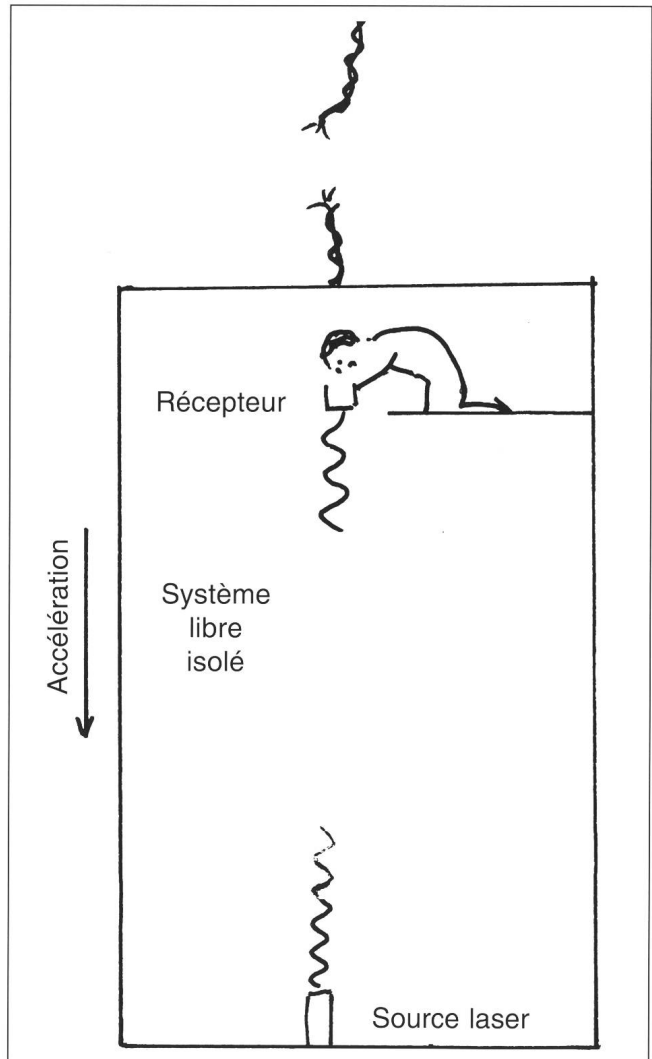
c) *Décalage Einstein vers le rouge*

D'autres tests de la métrique de Schwarzschild (ou de la relativité générale par abus de langage) peuvent être réalisés expérimentalement, par exemple l'*effet Einstein* découlant du

Principe d'équivalence. Dans un laboratoire local et isolé, aucune expérience ne permet de distinguer:

- un système inertiel (et sans rotation) classique
- un système en mouvement uniforme en relativité restreinte
- un système (en chute) libre en relativité générale

Dans une cage d'ascenseur en chute libre, l'expérimentateur qui se trouve au-dessus d'une source laser monochromatique gagne de la vitesse entre l'émission et la mesure de la fréquence.





En *théorie classique* il devrait observer un décalage Doppler-Fizeau vers le bleu, mais cela viole le principe d'équivalence.

Pour sauver ce principe, il faut admettre que la gravité induit un *décalage vers le rouge* (Einstein) qui contrebalance le décalage classique.

On l'observe pour le Soleil à $\pm 1\%$.

Vessot et Levine ont mesuré le décalage Einstein à $\pm 10^{-4}$ sur une horloge maser H à bord d'un satellite.

d) *Ondes gravitationnelles*. Il s'agit d'ondes usuellement très faibles émises lors d'un fort changement gravitationnel (effondrement conduisant à la formation d'une étoile à neutrons par exemple). Un groupe a annoncé une détection dans les années 1970, mais ce fait observationnel n'a pas été confirmé depuis lors.

6. Les effets testés et les résultats

Le pulsar accompagné PSR 1913 + 16 a été mesuré durant plus de 15 ans au radio-télescope d'Arecibo à l'aide d'horloges de la plus haute précision accessible.

Les résultats observés: retard Shapiro, avance du périhélie, effet Einstein et, même, un effet Doppler transversal se superposent, et ils ont dû être traités à l'aide d'une méthode de χ^2 minimal.

a) *Retard Shapiro* (retard près de la conjonction supérieure significatif également, quoique moins qu'avec Mars.

b) *Avance du périhélie*. Le pulsar a une période beaucoup plus courte que Mercure: 8 heures au lieu de 88 jours et une excentricité plus grande, des masses de l'ordre de celle du Soleil, on a un demi grand axe $a \approx 10^9$ m ($\approx 1,5 R_{\odot}$). L'effet gravifique est intense, le nombre d'orbites énorme, donc des conditions idéales pour les tests.

L'avance du périhélie: $\dot{\omega} = 4,226^\circ$ par an, confirme la métrique de Schwarzschild à $1,4 \cdot 10^{-4}$ près en erreur relative.

c) *Effet Einstein*. Plus intense près du périastre. Il se fait sentir sur la fréquence ν . Vérifié à $2 \cdot 10^{-4}$ près

d) *Perte d'énergie par les ondes gravitationnelles*: \dot{P}/P

$$\dot{P}/P \text{ théorique} = -2,40216 (\pm 4) \cdot 10^{-12}$$

$$\dot{P}/P \text{ observé} = -2,427 (\pm 26) \cdot 10^{-12}$$

Le bon accord entre les \dot{P}/P théorique et observé est en faveur de la théorie des ondes gravitationnelles, mais montre que G ne varie pas ou peu: $\dot{G}/G = -(\dot{P}_{\text{obs}} - \dot{P}_{\text{th}})/2P = (1,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$

e) *Effet Doppler-Fizeau transversal*. Il est dû en fait à la dilatation du temps et dépend de v_{transv} . C'est un test de la relativité restreinte. L'effet est significatif.

La méthode de χ^2 minimal a permis d'estimer $\sin i$ et de compléter la table 1:

$$\sin i \approx 0,734$$

$$a_1 \approx 9,57 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$M_1 = 1,442 (\pm 3) M_{\odot}$$

$$M_2 = 1,386 (\pm 3) M_{\odot}$$

On remarque que les masses individuelles M_1 et M_2 sont connues avec une précision moindre que $M = M_1 + M_2 = 2,82827 (\pm 4) (M_{\odot})$ en raison de l'incertitude qui plane sur $\sin i$. Quoiqu'il en soit, nous avons là les meilleures valeurs d'une masse hors du système solaire. Il est même impossible de donner $M_1 + M_2$ en kg avec une précision relative de $2 \cdot 10^{-5}$ en raison de l'incertitude sur la constante G !

Epilogue: Etalons de temps secondaires

Jusqu'en 1967, la définition officielle de la seconde était fondée sur l'année tropique 1900. Les horloges atomiques sont beaucoup plus précises (erreur relative: 10^{-14} , soit $0,3 \mu\text{s}$ par an) et, en principe, constructibles dans n'importe quel laboratoire. Depuis 1967, la définition de la seconde est *atomique*.

Peut-être s'est-il trouvé des astronomes nostalgiques qui ont regretté que la définition du temps leur échappe. Mais il faut se rendre compte qu'avec une incertitude de 0,5 milliseconde sur 15 ans, l'effet Doppler transversal était noyé dans le bruit de fond! L'astronomie a donc profité de la mesure du temps atomique.

D'un autre côté, on s'est aussi aperçu que, même si les pulsars n'ont pas les qualités métrologiques des étalons atomiques, ils n'en sont pas loin, du moins les pulsars simples. Ils pourraient servir d'horloges secondaires pour les radio-télescopes. On reviendrait à un temps astronomique beaucoup plus précis et maîtrisable que celui qui a défini la seconde jusqu'en 1967.

APPENDICE A

Considérations sur la métrique

1) Métrique euclidienne

Le théorème de Pythagore est rigoureusement valable et la distance dr entre deux points A et B est donnée par

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 \text{ dans un système orthonormé}$$

$$= dr^2 + r^2 d\vartheta^2 + r^2 \sin^2\vartheta d\varphi^2 \text{ en coordonnées sphériques}$$

Peu importe si A et B sont mobiles par rapport à l'origine du système.

Le chemin le plus court de A à B est un *segment de droite*.

2) Métrique de Minkowski

La métrique invariante est

$$ds^2 = -dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2 + c^2 dt^2 = -dr^2 - r^2 d\vartheta^2 - r^2 \sin^2\vartheta d\varphi^2 + c^2 dt^2$$

On voit que:

- c , vitesse de la lumière est fondamentale et ne peut être dépassée, sinon $ds^2 < 0$.

- des termes spatiaux et des termes temporels coexistent.

- Si l'on pousse le calcul, on a une *dilatation du temps* dans un système Σ' en mouvement $v = \beta c$ par rapport à Σ au repos.

$$dt' = \sqrt{1 - \beta^2} dt$$

La masse inerte m croît dans le même rapport:

$$m = \sqrt{1 - \beta^2} m_0$$

et le gain d'énergie cinétique vaut $\Delta E_{\text{cin}} = \Delta m c^2$

Enfin la loi de composition des vitesses β rapportées à c est

$$\beta = \beta_1 \text{ T } \beta_2 = (\beta_1 + \beta_2)/(1 + \beta_1 \beta_2)$$

Un photon a une vitesse de c ($\beta = 1$) dans *n'importe quel repère inertiel*. Mais la trajectoire de métrique minimale («la plus courte») d'un point A en t_A à B en t_B (on est obligé d'inclure le temps) est le mouvement uniforme le long du segment AB (la «droite» au sens étendu).

3) Métrique de Robertson - Walker

$$ds^2 = R^2(t) \left(-dr^2 (1 - kr^2)^{-1} - d\tau^2 \right) + c^2 dt^2$$

Elle concerne un Univers isotrope et homogène, donc la cosmologie, et sort de notre sujet.

4) Métrique de Schwarzschild (1916)

L'Univers est formé d'une masse ponctuelle M . $m := GM/c^2$ a la dimension d'une longueur: 1457 mètres pour le Soleil, p. ex. La métrique s'écrit:

$$ds^2 = - dr^2 \frac{1}{1 - 2m/r} - d\tau^2 + c^2 dt^2 (1 - 2m/r)$$



APPENDICE B

1) Gravitation newtonnienne

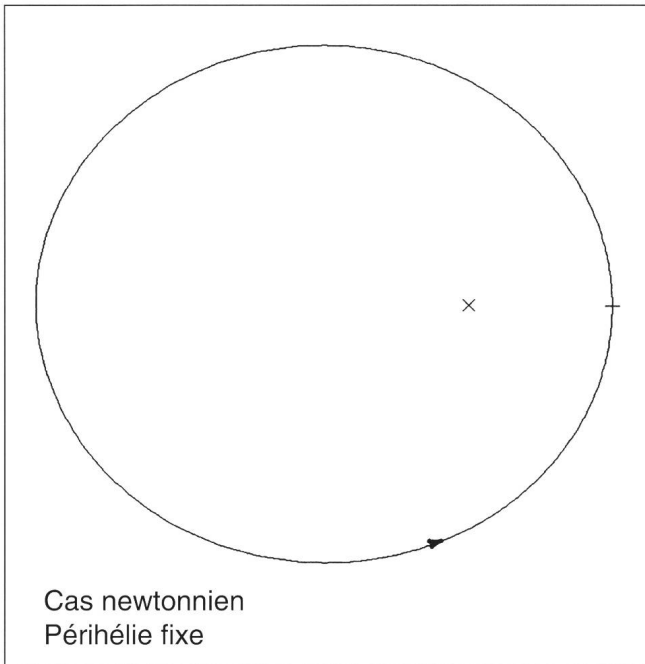
Soient deux corps ponctuels de masses respectives M_1 et M_2 et \vec{r} le vecteur allant de M_1 et M_2 . Chacun de ces corps exerce une force sur l'autre qui se traduit par une accélération

$$\vec{a} = \ddot{\vec{r}} = -G \frac{M_1 + M_2}{r^2} \vec{u} \text{ avec } \vec{u} = \frac{1}{r} \cdot \vec{r}$$

La résolution de cette équation différentielle montre que:

M_2 décrit par rapport à M_1 une orbite conique plane. Si les 2 corps sont liés, cette orbite est une ellipse *inamovible*. On obtient la masse totale

$$M = M_1 + M_2 = \frac{1}{G} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 a^3$$



2) Géodésiques dans la métrique de Schwarzschild

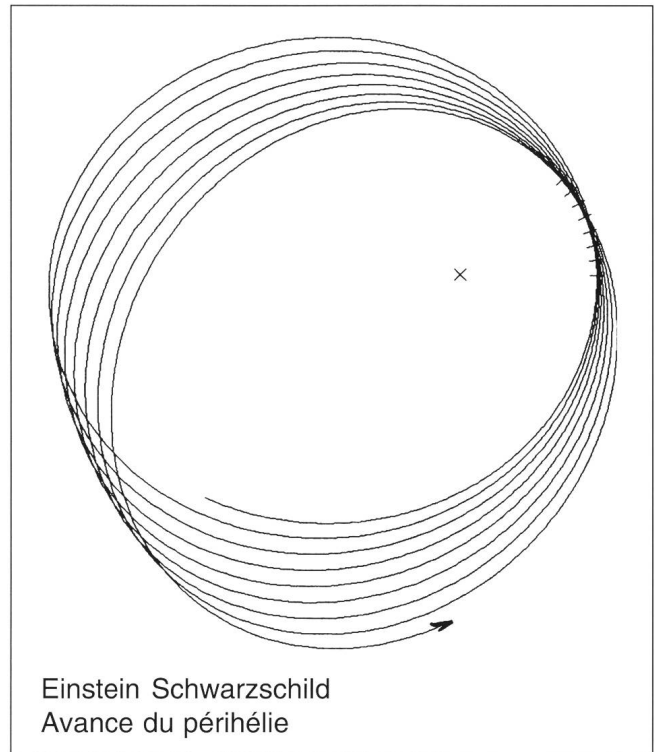
La solution du problème des géodésiques est un peu plus compliquée que le problème classique des 2 corps de Newton et les résultats ne sont pas tout à fait identiques. Si l'énergie totale est négative (orbites elliptiques):

l'orbite est fixe $\Delta\phi = 0$ dans la solution newtonnienne, le périastre avance de

$$\Delta\phi = \frac{6\pi m}{(1-e^2) a}$$

à chaque tour dans la métrique de Schwarzschild.

BERNARD NICOLET
Observatoire de Genève, 1290 Sauverny



Zürcher Sonnenfleckenzahlen

Oktober 1994 (Mittelwert 43,6)

Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
R	17	16	17	23	45	52	46	40	51	53	
Tag	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
R	49	48	51	61	55	49	43	59	53	45	
Tag	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
R	45	30	31	31	30	58	53	51	49	48	52

Nombres de Wolf

HANS BODMER, Schlottenbuelstrasse 9b, CH-8625 Gossau

November 1994 (Mittelwert 17,8)

Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	49	42	34	27	34	30	17	20	23	16
Tag	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
R	8	15	14	7	0	7	13	20	15	7
Tag	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
R	8	8	8	7	23	19	21	22	11	10