

30 ✓

CONTRIBUTI
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI MILANO-MERATE

a cura del Direttore
Prof. FRANCESCO ZAGAR

NUOVA SERIE

N. 179

EDOARDO PROVERBIO

COMPARAISONS
ENTRE ÉTALONS ATOMIQUES
DE FRÉQUENCE

Extrait des *Annales Françaises de Chronométrie*,
Tome XVI (1962) fascicule 2

MILANO
1961

COMPARAISONS ENTRE ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

par

Edoardo PROVERBIO

Observatoire Astronomique de BRERA-MILAN

RÉSUMÉ - Après la constitution des étalons de fréquence à résonance moléculaire et atomique et la successive détermination de la fréquence de l'étalon à césium de L. Essen en termes du Temps des Ephémérides, l'homogénéisation des fréquences d'autres étalons atomiques et la révision des constantes atomiques déterminées ont une très grande importance.

Les signaux horaires des stations MSF et HBN sont transmis dans une échelle de temps qui diffère de l'échelle de temps atomique. En effet, cette dernière est adaptée au T.E. tandis que la première s'adapte le plus possible au Temps Universel Uniforme provisoire.

Si avec f_0 nous indiquons la fréquence nominale (temps atomique) et avec f la fréquence actuelle (temps référé au TU2) d'une horloge atomique, on peut écrire

$$f = f_0 (1 + s),$$

où s représente la correction en fréquence entre les deux temps.

Les comparaisons entre les signaux de temps étalons HBN et MSF permettent de déterminer la différence

$$s_{\text{HBN}} - s_{\text{MSF}} = \Delta f.$$

La différence entre les valeurs Δf observées et calculées permet un contrôle fondamental des constantes f_0 et s .

L'Observatoire Astronomique de Brera a fait des comparaisons oscillographiques directes et contemporaines entre les signaux HBN et MSF sur les fréquences 2 500 et 5 000 MHz.

La valeur observée de Δf de mai à décembre 1960 sur 2 500 MHz est $\Delta f = (+ 24,6 \pm 0,01) \cdot 10^{-10}$.

SUMMARY - After the constitution of the atomic frequency and the successive determination of the Cesium beam frequency standards of the N.P.L. in terms of Ephemeris Time the homogeneity of the different atomic frequencies and the revision of the atomic constants assumes great importance.

The time signals of the stations MSF and HBN are transmitted on a time scale that differs from the atomic time. In reality the atomic time is referred to as Ephemeris Time while the time signals are referred to as UT2. If we call f_0 the nominal frequency (Atomic Time) and f the actual frequency (referred to as UT2) we can write

$$f = f_0 (1 + s),$$

where s denotes the correction in frequency between the frequencies.

The comparison between the time signals HBN et MSF makes it possible to determine the difference.

$$s_{\text{HBN}} - s_{\text{MSF}} = \Delta f,$$

which enables a control of the constants f_0 and s to be made.

The Brera Observatory carries out direct and simultaneous oscilloscopic comparisons between the time signals HBN and MSF at 2,500 Mcs.

The observed value of Δf from May to December 1960 at 2,500 Mcs was found to be $\Delta f = (+24,6 \pm 0,01) \cdot 10^{-10}$.

ZUSAMMENFASSUNG - Nach der Aufstellung von Frequenzmustern mit molekularer und atomarer Resonanz und der nachfolgenden Bestimmung der Frequenz des Caesium-Musters von L. Essen nach dem Ephemeridenzeitmass, hat die Homogenisierung der Frequenzen anderer Atommuster sowie die Revision der festgelegten Atomkonstanten eine erhebliche Bedeutung angenommen.

Die Stundensignale der Stationen MSF und HBN werden nach einem von der atomaren Zeitskala abweichenden Zeitmuster durchgegeben. In Wirklichkeit ist die atomare Zeitskala dem Ephemeridenzeitmass angeglichen, wogegen letzteres sich so weit als möglich der vorläufigen vereinheitlichten Universalzeit angleicht.

Wenn wir die Nominalfrequenz (Atomzeit) als f_0 bezeichnen und die gegenwärtige Frequenz einer Atomuhr als f (also die auf TU2 bezogene Zeit) so kann man setzen :

$$f = f_0 (1 + s),$$

wobei s die Frequenzkorrektion zwischen den beiden Zeitmassen darstellt.

Der Vergleich zwischen den Mustersignalen HBN und MSF gestattet die Feststellung der Differenz

$$s_{\text{HBN}} - s_{\text{MSF}} = \Delta f.$$

Der Unterschied zwischen den Werten Δf , so wie sie beobachtet und berechnet wurden, gestattet einen grundsätzlichen Vergleich der Konstanten f_0 und s .

Die Sternwarte Brera hat oszillographische Direkt- und Simultanvergleiche zwischen den HBN und MSF-Signalen auf den Frequenzen 2,500 und 5,000 MHz vorgenommen.

Der beobachtete Wert von Δf von Mai bis Dezember 1960 auf 2,500 MHz ergibt $\Delta f = (+24,6 \pm 0,01) \cdot 10^{-10}$.

1. La définition de la fréquence du césium en temps des Ephémérides a ouvert de remarquables perspectives à l'étude du mouvement de la Terre et aux problèmes qui s'y rapportent.

Si nous désignons par ν_0 la fréquence de transition de l'atome de césium par rapport à la seconde de TU2 et par ν_E la fréquence du césium par rapport à la seconde de temps des Ephémérides basé sur le mouvement de la Lune, on peut écrire :

$$\nu_0 = \nu_E \left(1 + \frac{\Delta\nu}{\nu} \right) , \quad (1)$$

où $\Delta\nu/\nu$ représente l'écart de ν_E par rapport à ν_0 .

Réciproquement, on obtient à partir de l'expression précédente :

$$\nu_E = \nu_0 \left(1 + \frac{\Delta\nu}{\nu} \right)^{-1} \quad (2)$$

La comparaison des signaux WWV et GBR au temps de l'horloge au césium du National Physical Laboratory de Teddington a permis de déterminer la fréquence moyenne $\bar{\nu}_0$ du césium par rapport au TU2 sur un long intervalle de temps (1).

Par la suite, en tenant compte de cette valeur $\bar{\nu}_0$, et en utilisant les observations photographiques de la Lune effectuées à l'aide de la caméra de Markowitz, qui fournissent la valeur de $\Delta\nu/\nu$, on a pu déterminer à partir de l'expression (2) la valeur de ν_E (2).

La valeur de la fréquence de transition du césium en temps des Ephémérides pour l'année 1957 est :

$$\nu_E' = 9.162.631.770 \pm 20 \text{ Hz.}$$

La valeur de l'erreur probable indique qu'actuellement l'échelle de temps atomique correspond à l'échelle de temps des Ephémérides avec une approximation inférieure à ± 2 unités sur 10^9 .

Sur la base de la fréquence du césium, on a calculé, par la suite, en utilisant les signaux et les fréquences de MSF, les fréquences des masers à ammoniac du Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères de Neuchâtel (3). La fréquence actuelle du maser $N^{15}H_3$ a comme valeur :

$$\nu_E'' = 22.789.421.730 \text{ Hz.}$$

La connaissance de valeurs toujours plus précises des fréquences ν_E s'avérant d'une grande importance pour l'étude de la rotation de la Terre et pour la comparaison des échelles de temps atomique et gravitationnel, les recherches et les expériences, tendant à effectuer de nouvelles mesures de ces deux quantités, revêtent un intérêt certain.

2. Les signaux horaires et les fréquences étalons sont transmis par les émissions HBN et MSF sur la base d'un temps uniforme atomique dont la fréquence fondamentale ν_0 est adaptée de telle façon que l'échelle du temps atomique soit, avec une bonne approximation, égale à l'échelle du temps universel uniforme provisoire. La quantité $\Delta\nu/\nu$, en unités de ν_E , nécessaire pour effectuer cette adaptation, tirée de l'expression (1) est :

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\nu_0 - \nu_E}{\nu_E} .$$

Il s'ensuit que la comparaison des deux temps atomiques peut être effectuée en confrontant les phases des signaux horaires étalons ou en utilisant, pour les comparaisons, les mêmes fréquences porteuses des émissions HBN et MSF.

A l'Observatoire de Erera, pendant toute l'année 1960, les phases des signaux HBN et MSF sur 2 500 et 5 000 MHz ont été comparées entre elles, en mesurant l'écart au moyen d'un dispositif oscillographique dont la base de temps est commandée par un circuit retardateur de temps aux dix-millième de seconde.

Les signaux prélevés du récepteur en moyenne fréquence et envoyés à l'oscillographe étaient déphasés de façon à faire coïncider le début du signal avec le début de la base de temps. On a pris, comme début du signal, le premier minimum nettement marqué pour les signaux MSF, et la moitié de l'amplitude du front de la première interruption pour les signaux HBN.

Puisque les deux signaux étaient enregistrés à des instants très proches et dans les mêmes conditions de réception, l'écart mesuré entre les deux signaux correspond, à la constante de propagation et à ses éventuelles variations près, à la différence entre les signaux HBN et MSF à l'émission, avec une précision de $\pm 0,1$ ms.

Le tableau I donne les valeurs moyennes mensuelles des différences :

$$\Delta t = t_{\text{HBN}} - t_{\text{MSF}}$$

entre les instants de réception t des signaux HBN et MSF sur 2 500 MHz, sans tenir compte de la correction de 20 ms apportée pendant le mois de novembre aux signaux MSF.

La première colonne indique l'époque moyenne T de la réception; la dernière colonne, la même époque comptée en jours solaires moyens. Les valeurs de n représentent le nombre des comparaisons effectuées pendant les différents mois au cours desquels la réception a été possible.

TABLEAU I

T	n	Δt	ϵ	T_a
10.60 Jan.	5	- 0. ^s 06392	+ 0. ^s 00002	10.60
19.18 fév.	11	- 0.06174	- 0.00001	50.18
3.50 mar.	2	- 0.06105	+ 0.00002	63.50
25.57 mai	7	- 0.05303	- 0.00159	146.57
19.06 juin	16	- 0.04846	- 0.00093	171.06
17.33 juil.	18	- 0.04314	- 0.00023	199.33
16.35 août	17	- 0.03729	+ 0.00031	229.35
12.63 sept.	8	- 0.03288	+ 0.00171	256.63
23.17 oct.	12	- 0.02230	- 0.00023	297.17
13.67 nov.	6	- 0.01685	- 0.00110	318.67
17.69 déc.	13	- 0.01037	- 0.00054	352.69

Dans le tableau II, ont été réunies les données analogues, relatives à la réception de signaux sur 5 000 MHz pendant la période juin-décembre 1960.

TABLEAU II

T	n	Δt	ϵ	T_a
17.6 juin	6	- 0 ^s 04820	- 0 ^s 00153	169.6
17.4 juil.	5	- 0.04326	- 0.00019	199.4
12.0 août	3	- 0.03793	- 0.00011	225.0
10.0 sept.	2	- 0.03365	+ 0.00172	254.0
24.0 oct.	2	- 0.02230	- 0.00034	298.0
13.7 déc.	3	- 0.01043	- 0.00125	348.7

Si nous désignons par x la marche journalière relative à Δt , nous pouvons écrire :

$$T_a x + y = \Delta t, \quad (3)$$

où y représente la valeur de Δt à l'époque initiale $T_a = 0$, c'est-à-dire au début de l'année.

Les données du tableau I ont permis de calculer les valeurs de x et de y en utilisant la méthode des moindres carrés.

Le calcul des valeurs de x et de y a été effectué pour les périodes de janvier à mars et de mai à décembre. Ces valeurs sont indiquées dans le tableau III, avec les poids respectifs p , relatifs aux émissions HBN et MSF sur 2 500 MHz pour la première et la deuxième période et sur 5 000 MHz pour la deuxième période.

TABLEAU III

Période	MHz	y	x	p
I	2 500	- 0 ^s 06448	$(+ 5s44 \pm 0s01) \cdot 10^{-5}$	18
II	2 500	- 0 ^s 08583	$(+ 2s13 \pm 0s01) \cdot 10^{-4}$	97
III	5 000	- 0 ^s 08552	$(+ 2s11 \pm 0s06) \cdot 10^{-4}$	21

L'ordre de grandeur des erreurs moyennes des quantités x est donc en moyenne $\pm 0^s2 \cdot 10^{-5}$.

3. Si l'on désigne par Δf_o les valeurs de x observées et exprimées en fréquence, on devrait théoriquement obtenir

$$\Delta f_o = \Delta f_c,$$

Δf_c représentant la marche relative théorique entre les signaux et les fréquences étalons de HBN et MSF, qui peut être calculée a priori à l'aide de la relation :

$$\Delta f_c = \left(\frac{\Delta v}{v} \right)_{\text{HBN}} - \left(\frac{\Delta v}{v} \right)_{\text{MSF}} = \left(\frac{v_U - v_E}{v_E} \right)_{\text{HBN}} - \left(\frac{v_U - v_E}{v_E} \right)_{\text{MSF}}$$

Les écarts éventuels obtenus expérimentalement,

$$\Delta_2 f = \Delta f_o - \Delta f_c ,$$

entre les valeurs observées et les valeurs calculées, peuvent être attribués à des causes apparentes ou à des causes réelles.

Si nous excluons l'intervention d'effets instrumentaux à caractère séculaire, les seules causes apparentes doivent être attribuées à des phénomènes de propagation. Cependant, comme on le sait, ces phénomènes présentent, en général, un caractère périodique avec une période tout au plus semi-annuelle, si l'on exclut l'influence de phénomènes à longue période liés au cycle solaire.

Parmi les causes réelles, qui peuvent justifier de telles différences entre les valeurs Δf_o et Δf_c , la cause principale pourrait être attribuée à une variation de la fréquence ν_E du césium et de l'ammoniac, due surtout à des variations du champ magnétique.

Une autre source possible d'erreurs peut être enfin cherchée dans des différences éventuelles entre les valeurs $\Delta \nu/\nu$ théoriques et celles utilisées effectivement.

Nous avons calculé successivement, pour les périodes considérées, les écarts ε entre les Δt observés et ceux calculés à l'aide de la relation (3). Ces écarts sont donnés dans les tableaux I et II et reportés sur la figure 1. Les croix portées sur la figure 1 représentent les écarts relatifs à l'émission 2 500 MHz, tandis que les points représentent, au contraire, les écarts relatifs à l'émission 5 000 MHz.

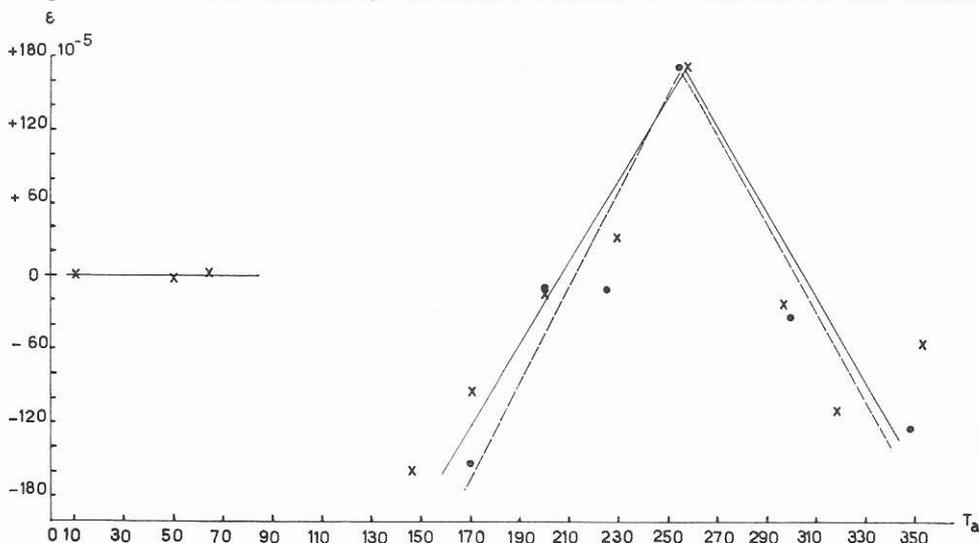


Figure 1

Nous avons tracé, en même temps, des lignes régularisées qui représentent avec une approximation suffisante la marche des écarts ε en fonction du temps, la ligne en trait plein se rapportant aux écarts relatifs à l'émission 2 500 MHz.

L'allure des deux diagrammes montre qu'il y a eu, au cours du mois de septembre, un changement de fréquence dans les fréquences étalons, changement qui a été aussi trouvé par M. Bonneau à Besançon, et par M. Bonanomi à Neuchâtel, et attribué par M. Bonneau à une variation des émissions MSF.

La discontinuité visible sur la figure, au mois d'avril, et le petit poids de la valeur de Δt relative au mois de mars ne confirment pas nettement une discontinuité probable dans les fréquences pour cette période, discontinuité que suggère la figure 1.

Dans le tableau V sont reportées, pour la première et la deuxième périodes de 1960 et pour les deux fréquences de 2 500 et 5 000 MHz, les valeurs de Δf_o observées expérimentalement et les valeurs correspondantes moyennes Δf_c calculées pour les périodes examinées, à partir des données reportées dans le tableau IV et exprimées en unités de 10^{-10} .

TABLEAU IV

	Jan.	Fév.	Mars	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
HBN	172	154	153	133	132	133	133	133	133	133	133
MSF	166	163	164	150	153	154	156	159	162	164	144

TABLEAU V

Période	MHz	Δf_o	Δf_c	$\Delta_2 f$
I	2 500	+ 6,3.10 ⁻¹⁰	+ 4,6.10 ⁻¹⁰	+ 1,7.10 ⁻¹⁰
II	2 500	+ 24,6.10 ⁻¹⁰	+ 22,4.10 ⁻¹⁰	+ 2,2.10 ⁻¹⁰
II	5 000	+ 24,4.10 ⁻¹⁰	+ 21,9.10 ⁻¹⁰	+ 2,5.10 ⁻¹⁰

La valeur moyenne pondérée de $\Delta_2 f$, déduite des valeurs du tableau IV, est égale à

$$\Delta_2 f = (+ 2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$$

Si l'on attribue cet écart, entre les valeurs observées et les valeurs calculées de Δt , à la valeur Δ'_E actuellement adoptée pour la fréquence de transition de l'atome de césium, et à elle seule, on obtient une correction à la fréquence ν'_E adoptée de + 2,0 Hz, conduisant pour la fréquence corrigée à la valeur

$$\nu'_E = 9.192.631.772$$

De même, en attribuant l'écart $\Delta_2 f$ à une erreur sur la fréquence ν''_E du maser à N¹⁵H₃, on obtient pour cette fréquence une correction de -5,0 Hz, dont on tirerait pour la fréquence d'un maser à N¹⁵H₃ la valeur

$$\nu''_E = 22.789.421.725 \text{ Hz.}$$

En réalité, l'écart moyen, déterminé expérimentalement, doit être probablement distribué entre les deux valeurs des fréquences adoptées pour le césium et pour l'ammoniac.

Les résultats obtenus doivent être nécessairement reconfirmés quantitativement par de nouvelles mesures effectuées sur une longue période de temps. Les conclusions expérimentales obtenues dans cette recherche mettent, de toute façon, en évidence la précision de la méthode utilisée et la possibilité d'employer cette méthode pour améliorer la connaissance des valeurs des fréquences du césium et de l'ammoniac.

Il est à souhaiter, à ce sujet, que les Instituts qui transmettent des signaux horaires étalons dans une échelle de temps atomique conservent inchangée, pour une période de temps d'une année au moins, la valeur des corrections $\Delta v/v$ de façon à permettre des mesures plus précises de Δf étendues sur de longues périodes.

Je tiens à remercier ici M. N. Stoyko qui a bien voulu vérifier ces résultats et me communiquer les valeurs des corrections reportées dans le tableau IV.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 Essen L., Parry J.V.L., Markowitz W., Hall R.G., Nature, 181, 1054, 1958.
- 2 Markowitz W., Hall R.G., Essen L., Parry J.V.L., Physical Review Letters, 3 (I), 1958.
- 3 Blaser J.P., Bonanomi J., Nature, 182, 859, 1958.