

# L'importance scientifique de étalons atomiques de fréquences

Autor(en): **Rossel, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **37 (1959)**

Heft 1: **Zeit- und Frequenzbestimmung = La détermination du temps et de la fréquence**

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-875419>

## **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.

Trägerversatz mit einer Frequenztoleranz von  $\pm 500$  Hz empfohlen. Man war sich damals allerdings darüber einig, dass eine solche Toleranz erst nach einigen Jahren respektiert werden könnte. Heute diskutiert man allen Ernstes die künftigen Möglichkeiten eines sogenannten Präzisions-Trägerversatzes, mit einer Frequenztoleranz von einigen Hertz! Die gewaltige Beanspruchung des Radiowellenspektrums ist nicht zuletzt auch aus den Aufzeichnungen des IFRB (International Frequency Registration Board) des Internationalen Fernmeldevereins ersichtlich. Dort sind gegenwärtig über 300 000 Radiokanäle kodifiziert.

Angesichts der grundlegenden, wissenschaftlichen und weltweiten Bedeutung der Zeit- und Frequenzbestimmung befasst sich die Union Radio-Scientifique Internationale bereits seit den zwanziger Jahren damit, und deshalb hatte denn auch das Schweizerische Nationalkomitee dieser Union den wissenschaftlichen Teil seiner Jahrestagung 1958 einmal diesem Thema zugedacht. Tagungsort war Neuenburg. Das Programm umfasste sechs Vorträge am Vormittag, und nachmittags den Besuch der Elektronischen Abteilung des Laboratoire suisse de recherches horlogères (LSRH) und des Astronomischen Observatoriums.

Sämtliche Vorträge sind nun im folgenden wiedergegeben und damit einem weiteren Interessentenkreis zugänglich gemacht. Die ersten drei dieser sechs Beiträge befassen sich mit den verschiedenen Aspekten der atomaren Mittel, die zwei folgenden sind der astronomischen Zeit- und Frequenzbestimmung gewidmet, während der letzte die technischen Anordnungen der schweizerischen PTT-Betriebe erläutert.

W. Gerber

J. ROSSEL, Neuchâtel

## L'importance scientifique des étalons atomiques de fréquences

531.764.5

Les problèmes d'étalons de longueur et de temps ont subi depuis quelques années une évolution semblable. La référence à des systèmes macroscopiques de définition s'est révélée peu satisfaisante.

Le mètre étalon est constitué par un ensemble très grand d'atomes; les propriétés de la matière dont est fait le barreau métallique de référence sont soumises à des modifications imprévisibles dues aux regroupements des éléments nombreux dont est formée la structure cristalline du solide. Il en résulte des variations non négligeables de la longueur.

De même les caractéristiques matérielles et mécaniques de la terre en rotation autour de son axe sont sujettes à des modifications dont certaines sont encore inexplicables et irrégulières. Cela conduit à des variations erratiques dans la durée du jour, qui peuvent atteindre plusieurs millisecondes.

Le remplacement de ces étalons macroscopiques par des étalons atomiques apparaît donc comme désirable. En effet, aucune théorie établie et éprouvée

alors qu'une telle tolérance ne pourrait être respectée qu'au bout de plusieurs années. Aujourd'hui, on discute sérieusement des futures possibilités d'un décalage dit de précision, avec une tolérance de quelques hertz. Les indications fournies par l'IFRB (International Frequency Registration Board) de l'Union internationale des télécommunications montrent éloquentement l'utilisation intensive du spectre des ondes radio. Elles portent actuellement sur plus de 300 000 canaux.

La détermination scientifique du temps et de la fréquence revêt une importance primordiale et universelle. L'Union Radio-Scientifique Internationale s'en occupe depuis plus de trente ans; c'est pourquoi le Comité national suisse de l'URSI a consacré à ce thème la partie scientifique de sa session de 1958, qui eut lieu à Neuchâtel. Le programme comprenait six travaux présentés le matin et, pour l'après-midi, la visite de la section électronique du Laboratoire suisse de recherches horlogères (LSRH) et de l'Observatoire astronomique.

Tous ces travaux sont reproduits ci-après, de manière à être portés à la connaissance de plus larges milieux. Les trois premiers traitent des divers aspects des moyens atomiques, les deux suivants sont consacrés à la détermination astronomique du temps et de la fréquence; le dernier enfin concerne les dispositions techniques des PTT suisses.

W. Gerber

jusqu'ici ne prévoit une altération sensible et rapide des caractéristiques d'atomes en concentration suffisamment faible pour limiter à un minimum leurs interactions mutuelles. Cette stabilité des propriétés physiques des atomes et molécules, et le fait que des collections d'éléments identiques sont indiscernables, devraient fournir les garanties de permanence, de reproductibilité et de large disponibilité que requièrent les étalons de haute précision dont la physique moderne ne peut plus se passer.

Dans les deux cas de la longueur comme du temps, les propriétés atomiques utilisables pour l'établissement d'étalons reposent sur l'échange d'énergie entre atomes et radiation; les caractéristiques de référence, longueur d'onde  $\lambda$  et fréquence  $\nu$  de la raie spectrale, sont portées finalement par l'onde électromagnétique.

La définition d'étalons atomiques implique naturellement la nécessité d'un raccordement avec les unités macroscopiques existantes: mètre étalon et seconde de temps astronomique.

Pour les longueurs, cette opération est depuis longtemps possible avec une bonne précision (de l'ordre de  $10^{-6}$ ) grâce au phénomène d'interférences. (Nouvel étalon atomique probable: la raie vert jaune du  $\text{Kr}^{86}$  de  $\lambda$  voisine de  $5650 \text{ \AA}$ ).

Dans le cas de la fréquence (ou du temps), des méthodes utilisables n'ont été disponibles que depuis quelques années seulement, grâce aux très grands progrès de l'électronique d'après guerre. Une oscillation entretenue et de grande cohérence, tombant dans le domaine des fréquences spectrales atomiques ou moléculaires, est nécessaire à ce raccordement; elle peut maintenant s'obtenir aisément, par exemple au moyen de tubes klystrons. De même, la division et la multiplication de fréquence que requiert la comparaison avec la seconde traditionnelle sont actuellement réalisables avec une très grande sûreté et une excellente stabilité.

Lorsqu'on aborde le problème des nouveaux étalons de temps, il convient de distinguer entre deux notions souvent insuffisamment précisées: d'une part, la notion de *fréquence*, c'est-à-dire celle d'un intervalle de temps limité se répétant régulièrement et, d'autre part, la notion d'*état* à l'intérieur d'un écoulement temporel continu, autrement dit le repérage de la position dans l'échelle du temps.

Il s'agit dans le premier cas de reproduire, rigoureusement identique à lui-même, un intervalle de temps donné ou une succession limitée de tels intervalles égaux. Dans le second cas, le problème consiste à sommer ces intervalles sans aucune interruption, c'est-à-dire sans perte de la phase, à partir d'une origine fixe. C'est le problème de la *conservation de l'heure* dont on voit qu'il apparaît nécessairement lié à la définition d'une fréquence ou plus exactement d'une période.

Pour des mesures physiques localisées, seule la définition d'intervalles de temps est nécessaire. Le problème de la reproductibilité d'une fréquence étalon intervient donc uniquement.

Pour des mesures intéressantes des domaines étendus de l'espace dont les différents points éloignés doivent être reliés par des signaux, la réalisation d'une échelle absolue du temps, c'est-à-dire la définition de l'état, apparaît comme indispensable. Ceci explique l'intérêt particulier des astronomes pour ce problème et souvent leur indifférence à l'égard des questions relatives aux fréquences.

A. Examinons d'abord l'utilisation des fréquences atomiques.

Deux systèmes seulement ont été développés jusqu'ici avec succès comme étalons primaires de fréquence. Le premier est basé sur l'absorption de résonance de structure hyperfine magnétique de l'atome de césium (Résonateur à césium); le second utilise l'oscillation moléculaire entretenue par émission induite de la raie d'inversion de la molécule  $\text{NH}_3$  (Maser à ammoniaque).

Dans les deux cas on élimine l'élargissement de la raie spectrale résultant des collisions et de l'effet

*Doppler* en utilisant la technique des *jets*. Dans ces conditions, la largeur  $\Delta\nu$  de la raie de résonance est donnée approximativement par la condition  $\Delta\nu \cdot \Delta t \approx 1$  où  $\Delta t$  est essentiellement l'intervalle de temps pendant lequel le résonateur atomique est soumis au champ électromagnétique induisant la transition.

Par exemple, pour des atomes de vitesse thermique de l'ordre de  $10^4 \text{ cm/s}$  soumis au champ haute fréquence sur un trajet de  $1 \text{ m}$ , on aura  $\Delta t = \frac{10^3}{10^4} = 10^{-2} \text{ s}$ ,

d'où  $\Delta\nu = 100 \text{ Hz}$ . Pour une fréquence nominale de  $10^4 \text{ MHz}$ , on en déduit un facteur de qualité

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} = 10^8.$$

Pour un standard de construction donnée, la reproductibilité de fréquence est sensiblement la même pour les deux types ( $\text{Cs}$  ou  $\text{NH}_3$ ) soit de l'ordre de  $10^{-10}$ .

La définition d'une fréquence atomique intrinsèque indépendante des particularités techniques des étalons est plus facilement réalisable avec les résonateurs à  $\text{Cs}$  (erreur relative de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-10}$ ).

Actuellement, ces nouveaux standards de fréquence atomiques sont utilisés conjointement avec des observations astronomiques de précision à deux endroits seulement, en Angleterre (N.P.L. de Teddington) [1] où on utilise des résonateurs au  $\text{Cs}$  et à Neuchâtel (L.S.R.H.) [2] où sont employés des étalons du type Maser à  $\text{NH}_3$ .

La signification de ces nouveaux étalons de fréquence pour la physique n'a guère besoin d'être soulignée. Nous relèverons ici uniquement deux champs importants d'application, l'un général, l'autre plus particulier.

a) La première signification, de portée générale, réside dans la possibilité de fournir au physicien, pour la première fois, un étalon de fréquence de très grande stabilité, de haute reproductibilité et en principe disponible immédiatement dans tous les laboratoires.

Il est évident que l'astronomie a été, jusqu'à aujourd'hui, incapable de mettre un tel étalon à la disposition de la physique. Elle ne peut garantir que l'échelle de temps (l'état) et encore a posteriori et avec des délais considérables dus au caractère statistique de ses observations. La définition d'une fréquence étalon ou l'établissement d'une unité complètement satisfaisante d'intervalle de temps exige, dans ces conditions, la différentiation de la courbe d'états dont le tracé est plus ou moins irrégulier; cela restera toujours une opération peu précise et hasardeuse; nous reviendrons tout à l'heure sur cette difficulté.

Il n'est pas possible, dans cette brève introduction, de présenter les multiples applications qu'une fréquence atomique étalon peut trouver en physique fondamentale comme en physique appliquée.

b) Nous relèverons cependant un domaine particulier où l'utilisation de tels standards peut constituer un progrès fondamental et décisif. C'est le pro-

blème de la confirmation expérimentale de la théorie de la relativité restreinte et surtout générale.

Le physicien *C. Moeller*, spécialiste bien connu de la relativité, a plus spécialement étudié ces possibilités [3]. La relativité restreinte ne semblerait pas avoir besoin de tests de validité (pour le champ d'application des expériences physiques localisées dans l'espace). Elle constitue en fait, actuellement, un des principaux fondements de la microphysique; on exige automatiquement de toute théorie nouvelle dans ce domaine qu'elle soit invariante relativiste. En réalité cependant, il n'existe que deux tests expérimentaux directs de bonne précision et encore cette précision initiale n'a-t-elle pas été améliorée jusqu'ici: l'expérience bien connue de *Michelson* et celle de *Ives* portant sur l'effet *Doppler*.

Un nouveau test direct très précis pourrait être fourni par l'emploi de deux Masers fonctionnant avec des faisceaux parallèles, mais de sens opposé.

En vertu d'effets liés à l'effet *Doppler*, la fréquence d'oscillation du Maser est donnée par

$$v_m = \int v(\vec{e}) f(\vec{e}) d\Omega; \quad \vec{e} = \text{vecteur unitaire}$$
 dans la direction d'émission du photon par la molécule  $\text{NH}_3$ ;  $f(\vec{e}) =$  fonction de poids dépendant de facteurs géométriques.

S'il existe un éther absolu, on aurait pour le système en mouvement relatif (à l'approximation du second ordre) une fréquence apparente:

$$v = v_0 \left[ 1 + \frac{\vec{e} \cdot \vec{u}}{c} + \frac{(\vec{e} \cdot \vec{u})^2}{c^2} + \frac{\vec{v} \cdot \vec{u}}{c^2} \right]$$

où  $\vec{u}$  = vitesse de la molécule dans le système du laboratoire et  $\vec{v}$  = vitesse absolue du laboratoire entraîné par la terre dans son mouvement autour du soleil.

Dans ces conditions

$$v_m = v_0 \left[ 1 + g(u) + \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{c^2} \right]$$

ici  $g(u) = \frac{\vec{e} \cdot \vec{u}}{c} + \frac{(\vec{e} \cdot \vec{u})^2}{c^2}$  est fonction de  $|\vec{u}|$  seul; par contre le 3<sup>e</sup> terme est *anisotrope*.

Avec  $u \simeq 4.10^4$  cm/s et  $v = 3.10^6$  cm/s = vitesse orbitale de la terre sur sa trajectoire autour du soleil, on aura

$$\frac{v \cdot u}{c^2} \simeq 10^{-10}$$

La rotation de la terre sur elle-même fait alternativement agir cet effet (ce déplacement de fréquence) sur chacun des deux jets, ce qui conduirait à une variation périodique de 24 h. dans la différence des fréquences des deux Masers, de grandeur relative voisine de  $10^{-10}$ . Cette variation diurne serait aisément observable avec la stabilité actuelle d'oscillation des Masers. Un test positif de la théorie de la relativité consisterait donc à démontrer que cette variation n'existe pas.

Une telle expérience dont le résultat attendu est négatif n'a rien de très attractif et nous ne pensons pas qu'il soit nécessairement utile de la réaliser\*.

Pour la théorie de la relativité générale, la situation est différente; les preuves expérimentales ne sont pas suffisamment concluantes et le besoin de tests précis est urgent.

L'une des expériences les plus immédiates pourrait être basée sur l'effet de déplacement gravitationnel de fréquence (déplacement vers le rouge).

Les périodes de deux oscillateurs identiques, mais situés dans des potentiels de gravitation différents  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont dans le rapport:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\sqrt{1 + 2\varphi_1/c^2}}{\sqrt{1 + 2\varphi_2/c^2}} \approx 1 - (\varphi_2 - \varphi_1)/c^2$$

La différence relative de marche sera donc

$$\Delta = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1} = - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{c^2}$$

Nous considérons les deux cas suivants:

1. Pour deux étalons atomiques de fréquence (Maser par exemple) fixes sur la terre, l'un au niveau de la mer et l'autre à l'altitude  $h$ , on aura une différence relative de marche

$$\Delta = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1} = - \frac{\Delta\varphi}{c^2} \approx - \frac{h}{c^2} |\text{grad } \varphi| \simeq - \frac{hg}{c^2}$$

avec  $h = 3$  km on obtient  $\Delta = - \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 10^3}{(3 \cdot 10^{10})^2} = -3 \cdot 10^{-13}$ .

2. Dans le cas d'une horloge liée à un satellite artificiel de la terre, l'autre étalon étant fixe sur la terre, la différence de fréquence a pour valeur

$$\Delta = \frac{\tau_{\text{sat}} - \tau_{\text{terre}}}{\tau_{\text{terre}}} = - \frac{\Delta\varphi}{c^2} = - \frac{\gamma M}{c^2} \left( \frac{1}{R} - \frac{3}{r_1 + r_2} \right)$$

(le second terme contient une contribution [ $\sim 30\%$ ] due au mouvement du satellite et qui constitue un effet *Doppler*).

$R$  = rayon de la terre,  $r_{1,2}$  = plus petite, respectivement plus grande distance à la terre de la trajectoire du satellite.

On voit que le déplacement spectral peut changer de signe suivant l'extension de l'orbite; il est le plus grand pour une trajectoire très excentrique pour laquelle  $r_2 \gg R \simeq r_1$ . On obtient alors la différence de marche maximum soit

$$\Delta_{\text{max}} = - \frac{\gamma M}{c^2 R} = -0,7 \cdot 10^{-9}$$

(Cette diminution de la période de l'oscillateur par rapport à la terre représente ici un déplacement vers le violet).

Au rythme actuel de perfectionnement des satellites artificiels et des étalons atomiques de fréquence, un tel test paraît fort possible dans un avenir relativement proche.

\* Immédiatement après la rédaction de ce texte, nous avons appris par les journaux qu'une telle expérience venait d'être réalisée aux Etats-Unis avec le résultat négatif attendu.

B. Considérons maintenant le problème de la conservation de l'heure.

Il apparaît que l'établissement d'une échelle atomique de temps exige d'abord la mise au point d'un procédé d'intégration de la marche d'un étalon atomique de fréquence.

Cette question a été étudiée par notre groupe de chronométrie atomique, plus particulièrement par *M. De Prins*. Il s'agissait d'établir une comparaison valable entre l'échelle atomique fournie par les Masers et l'échelle astronomique basée sur les déterminations de l'Observatoire de Neuchâtel.

Il a été montré que le fonctionnement ininterrompu de l'oscillateur atomique n'est pas nécessaire et que l'intégration peut fort bien être basée sur le fonctionnement d'une horloge à quartz de précision et de grande stabilité dont la fréquence est contrôlée périodiquement par l'étalon atomique [4].

Un tel système constitue ce qu'il convient d'appeler une *horloge atomique*. (C'est le prototype d'une telle horloge qui a été présenté à l'exposition internationale 1958 de Bruxelles).

Un autre résultat intéressant de ces études [5] est le fait que la comparaison avec le temps astronomique doit se faire de préférence par le moyen de l'état et non de la fréquence, ce qui était ordinairement le cas jusqu'ici. Comme nous l'avons déjà relevé plus haut, il est quasi impossible de déduire une fréquence suffisamment précise des observations astronomiques.

L'astronomie déduit des observations de la rotation de la terre différents «temps universels» qui se distinguent par le degré croissant des corrections apportées:

$TU_0$  = Temps universel brut, obtenu statistiquement à partir des observations de la rotation de la terre sans corrections particulières.

$TU_1$  = Temps universel  $TU_0$  corrigé du mouvement des pôles, par conséquent valable pour toutes les positions géographiques.

$TU_2$  = Temps universel  $TU_1$  égalisé par rapport aux variations de rotation de la terre supposées périodiques et obtenues par extrapolation à partir de la comparaison avec les données des horloges à quartz.

Pour se libérer des inconvénients dus aux irrégularités de la rotation de la terre, les astronomes ont introduit récemment une nouvelle échelle de temps basé sur la révolution de la terre autour du soleil.

Ce *temps des éphémérides*, TE, qui devrait représenter le temps de la gravitation, est défini sur la base de l'année tropique 1900 ou plus exactement sur les conditions initiales, dans l'équation de la longitude du soleil, prévalant à l'instant 1900, 00.

Il est probable et même certain que l'introduction des étalons atomiques est en train d'apporter au problème de l'échelle du temps (de l'état) une contribution importante qui consiste:

1. A permettre par une comparaison entre l'état atomique (intégration de la fréquence) et l'état

défini par  $TU_1$  (de préférence à  $TU_2$ !) une mesure rapide et précise des fluctuations de la rotation de la terre. Cette méthode permet d'aborder efficacement un important problème géophysique et astronomique tout à la fois. L'étude de cette question est en cours à Neuchâtel et les résultats obtenus sont déjà encourageants [5].

2. A permettre l'établissement de l'échelle du temps des éphémérides TE en assurant les interpolations de haute précision indispensables et que seuls les étalons atomiques peuvent fournir. Par là même, il s'établit une comparaison à longue durée entre le temps atomique et le temps gravitationnel ou newtonien.

Des données sur la valeur actuelle de la fréquence du césium en unité de temps des éphémérides ont déjà été publiées en Angleterre [6]; elles nécessiteront cependant encore des contrôles plus précis et plus définitifs. Une détermination analogue pour la fréquence de l'ammoniaque vient d'être faite à Neuchâtel [7].

La possibilité de telles comparaisons nous engage à faire, au sujet des différentes échelles de temps, une remarque que nous présenterons en guise de conclusion.

Les phénomènes périodiques (ou non) utilisables pour la définition d'un intervalle de temps, sont conditionnés par les lois d'interaction intervenant dans la description de la nature.

Actuellement la physique est conduite à distinguer essentiellement 4 types différents de forces d'interaction sans qu'il soit possible de les décrire dans le cadre d'une théorie englobante unique. Elles sont indiquées dans le tableau suivant où figurent également leur intensité relative exprimée au moyen d'un paramètre adéquat (voir *tableau I*).

Tableau I

| Types de forces   | Intensité             |
|---|-----------------------|
| 1. Forces nucléaires du type interaction forte (qui assurent la liaison entre les nucléons du noyau) . . . . .  | 10 - 30               |
| 2. Forces intervenant dans la désintégration spontanée des particules fondamentales et dites du type interaction faible (interaction universelle de Fermi). . . . . | $10^{-3} - 10^{-7}$   |
| 3. Forces électromagnétiques . . . . .  | 1                     |
| 4. Forces gravitationnelles . . . . .   | $10^{-18} - 10^{-20}$ |

Chacune de ces catégories est en principe susceptible de fournir une échelle de temps. Rien ne permet de prétendre que ces échelles coïncideront; il se peut qu'elles soient accélérées les unes par rapport aux autres.

Le fonctionnement des étalons atomiques est conditionné par les forces électromagnétiques; l'échelle astronomique de temps des éphémérides dépend de son côté des forces de gravitation.

L'étude comparative de ces deux échelles est donc dès maintenant possible.

On conçoit qu'il s'agisse là d'un problème fondamental et passionnant, mais de longue haleine; son étude pourrait bien ne pas être sans importance pour le succès éventuel d'une théorie unitaire.

#### Bibliographie

- [1] *Essen L.* et *J. V. Parry*. Phil. Trans. Roy., Soc., London. Series A **250** (1957), 45.  
 [2] *Bonanomi J.* et *J. Herrmann*. Helv. Phys. Acta **29** (1956), 228.  
*Bonanomi J.*, *J. De Prins*, *J. Herrmann*, *P. Kartaschoff* et *J. Rossel*. Arch. Sc. Genève **10** (1957), 187 (Actes VI<sup>e</sup> Colloque A.M.P.E.R.E.) et Helv. Phys. Acta **30** (1957), 288.

- [3] *Moeller C.* Nuovo Cimento. Suppl. Vol. VI (1957), 381.  
 [4] *Bonanomi J.*, *J. De Prins*, *J. Herrmann* et *P. Kartaschoff*, et *J. P. Blaser*, *R. Cavedon*, *R. Payot* et *W. Schuler*. Helv. Phys. Acta **31** (1958), 278.  
 [5] *Blaser J. P.* et *J. De Prins*. Nature **182** (1958), 859.  
 [6] *Essen L.*, *J. V. Parry*, *W. Markowitz* et *R. G. Hall*. Nature **181** (1958), 1054.  
 [7] *J. De Prins* et *P. Kartaschoff*. Bulletin technique PTT 1959, n° 1, p. 10...14.

Adresse de l'auteur: *Jean Rossel*, professeur, Institut de physique de l'Université, Neuchâtel.

J. BONANOMI, Neuchâtel

## Die Atomuhren

### Beschreibung der verschiedenen Typen

531.764.5

Unter Atomuhr verstehen wir eine Uhr – praktisch immer eine Quarzuhr – deren Gang mittels der Frequenz einer Spektrallinie gesteuert oder gegebenenfalls auch nur gemessen wird. Die Kernaufgabe beim Bau einer Atomuhr ist die genaue und reproduzierbare Messung der Frequenz einer Spektrallinie.

Die Spektrallinien im Mikrowellengebiet eignen sich ideal für die Steuerung einer Uhr. Erstens ist die Frequenz der Spektrallinie, das heisst die Resonanzfrequenz der betrachteten Atome oder Moleküle eine Naturkonstante, also unabhängig von Zeit und Ort; zweitens ist die Resonanzgüte ausserordentlich hoch ( $Q = \nu/\Delta\nu$ ); sie ist theoretisch etwa  $10^{15}$ , praktisch  $10^7$  bis  $10^9$ .

Von der grossen Zahl der bekannten Spektrallinien im Mikrowellen-Spektral-Bereich sind bisher nur deren drei als Frequenznormale zur Anwendung gelangt, nämlich eine Linie des Inversionsspektrums von Ammoniak und je eine Linie des Hyperfeinstrukturspektrums von Cäsium und Rubidium.

Zwei für die Mikrowellenspektroskopie charakteristische physikalische Gesetze bestimmen weitgehend die Wahl der Spektrallinie und den Aufbau eines atomaren Frequenznormals. Sie seien nachstehend kurz beschrieben.

1. Eines der wesentlichen Merkmale der Mikrowellen-Spektroskopie ist, dass Moleküle oder Atome in diesem Bereich nur emittieren oder absorbieren können, solange sie einer Bestrahlung durch ein elektromagnetisches Feld geeigneter Frequenz ausgesetzt sind (induzierte Emission und Absorption). Im Gegensatz dazu emittieren Atome und Moleküle im optischen Bereich ihre Anregungsenergie spontan (spontane Emission), nach erfolgter Anregung irgendwelcher Art. Die Breite  $\Delta\nu$  einer Mikrowellenspektrallinie wird demnach bestimmt durch die Zeit  $\Delta t$ , während der das Mikrowellenfeld auf das im übrigen ungestörte Molekül wirken kann, gemäss der einfachen Beziehung

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \approx 1$$

Es leuchtet ein, dass eine möglichst schmale Linie erwünscht ist, denn die Ungenauigkeit der Bestimmung der Linienmitte, wie im allgemeinen auch die äusseren Einflüsse auf die Frequenz der Linienmitte, sind der Linienbreite direkt proportional.

2. Ein weiteres wichtiges Merkmal der Mikrowellenspektroskopie gegenüber der klassischen Spektroskopie betrifft die Verteilung der Moleküle im thermodynamischen Gleichgewichtszustand auf die verschiedenen möglichen Energieniveaus. Im einfachsten Falle eines Moleküls (oder Atoms) mit nur zwei Energieniveaus, verhält sich die Anzahl der Moleküle  $N_2$  im oberen Zustand zur Anzahl  $N_1$  im unteren Zustand, wie:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

mit  $h = 6,7 \cdot 10^{-27}$  erg sec

$k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  erg grad<sup>-1</sup>

$\nu$  = Frequenz des Ueberganges ( $10^{10}$  für Mikrowellen  $10^{15}$  für Licht)

T = Absolute Temperatur

Das Einsetzen der Werte ergibt

$N_2 = 0$  für optische Energiezustände und

$N_2 = N_1$  für Mikrowellenübergänge.

Bei Zimmertemperatur sind also beide Energieniveaus eines Mikrowellenüberganges etwa gleich bevölkert, so dass ein mit Mikrowellen geeigneter Frequenz bestrahltes Gas fast gleich viel absorbiert wie emittiert, und somit die beobachtete Spektrallinie äusserst schwach ist. Als atomares Frequenznormal eignet sich jedoch nur eine starke Spektrallinie, da sonst die Bestimmung ihres Zentrums wegen des immer vorhandenen thermischen Rauschens ungenau wird.

Die besprochenen zwei Gegebenheiten der Mikrowellenspektroskopie:

- Breite der Spektrallinien umgekehrt proportional der Wechselwirkungszeit mit dem Mikrowellenfeld;
- Gleichheit der Besetzungszahlen der Energiezustände;