

VISTO  
EM 18 / 8 / 1977



O TEMPO NA ASTRONOMIA

MARGARET DE QUEIROZ

O T E M P O N A A S T R O N O M I A

Análise comparativa dos diversos  
padrões e escalas de tempo.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Eduardo da Silva Machado

RIO DE JANEIRO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA

1 9 7 6

Quero expressar meus sinceros  
agradecimentos ao Prof. Dr. LUIZ  
EDUARDO DA SILVA MACHADO, pela ex-  
celente orientação neste trabalho,  
bem como ao Prof. JORGE DE ALBU-  
QUERQUE VIEIRA, pela grande ajuda  
prestada, aos colegas ALEXANDRE  
HUMBERTO ANDREI e JUCIRA LOUSADA  
PENNA, pela cooperação, à minha  
mãe pelo trabalho de datilografia.

MARGARET DE QUEIROZ

## S U M Á R I O

A noção de tempo, a mais fundamental entre todas na Astronomia, é particularmente delicada e tem sido submetida, desde o passado a numerosas reformulações; segundo foram melhorando os meios de medida e conservação do tempo, os astrônomos puderam cons<sup>u</sup>tatar os defeitos da definição corrente de tempo e têm se dedica<sup>u</sup>do a aperfeiçoa-la. Para que se tenha uma idéia em termos quantitativos, a precisão em apenas quarenta anos passou de  $10^{-4}$  a  $10^{-12}$ , é natural que, assim como a rotação da Terra já não nos serve de relógio, tenhamos que rever muitos de nossos conceitos.

Ao longo deste trabalho serão vistos as várias escalas de tempo empregadas na Astronomia, veremos também as diversas maneiras usadas para definir o segundo e o dia, nossas unidades de tempo. É conveniente portanto estabelecer, neste início, as definições de escala e unidade de tempo.

Para que se obtenha uma escala de tempo, deve-se ter: um fenômeno material mensurável, permanente e estável, o qual evolui no tempo, no sentido intuitivo da palavra; uma teoria que forneça o desenrolar deste fenômeno em função de uma variável independente, que será chamado exatamente de tempo. A unidade de tempo, em relação à qual todos os eventos são definidos, será: ou um intervalo que separa dois instantes no passado, precisamente referenciados na escala de tempo; ou a duração de um fenômeno que deve ser rigorosamente reproduzível.

Numa época, portanto, onde cada vez mais a definição e determinação do tempo sensibiliza os astrônomos, sem dúvida é útil que repassemos as definições dos diversos tempos empregados pela Astronomia e os diversos relógios que se encarregaram de guarda-lo.

*Cuidado com  
as vírgulas  
(do português)*

# I - INTRODUÇÃO

## I.1 - CONCEITUAÇÕES MODERNAS DE TEMPO

O assunto sobre o que é o tempo físico é muito difícil , ele apela para noções complexas de física.

Há pelo menos quatro meios de acesso ao tempo científico.

- 1- Teoria Clássica
- 2- Teoria Relativista
- 3- Teoria Quântica
- 4- Teoria da Informação

Examinaremos o problema da medida do tempo e de suas consequências nas teorias clássica, quântica, da informação e relativista.

### O TEMPO CLÁSSICO

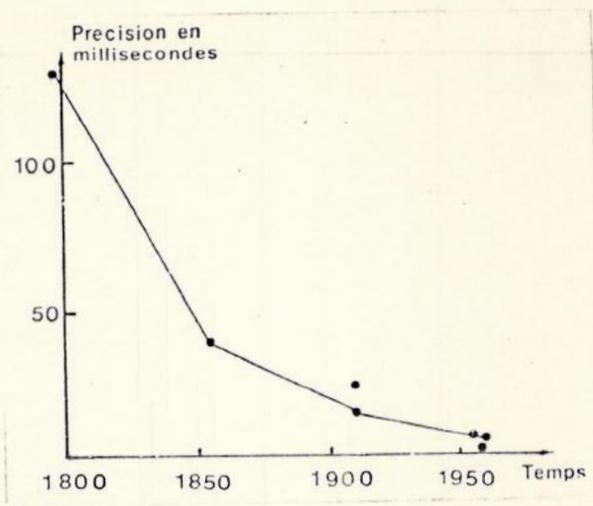
Admite a simultaneidade, a ordem de sucessão, é universal e absoluto, se mede pelo movimento, é puramente matemático.

Danjon, apresentou de maneira clara toda a dificuldade da medida do tempo, escrevendo: " O problema que se coloca é de trazer a data dos acontecimentos estudados a uma época determinada. Não basta para isso de um relógio utilizável momentaneamente, é necessário um relógio perpétuo cujo funcionamento não sofresse nenhuma interrupção e que permita medir durações quaisquer."

O Tempo Clássico se mede a partir da evolução de um siste

ma físico, olhando-se por exemplo uma ampulheta que se esvazia, um pêndulo que oscila, uma agulha que gira ou o movimento do Sol.

O astrônomo que observa o movimento dos astros tem definido diferentes espécies de tempo, como por exemplo o tempo sideral ou o tempo solar verdadeiro. A precisão sobre a medida do tempo não deixou de ser aperfeiçoada ( fig.1). Mas apesar disto, as irregularidades imprevisíveis do movimento da Terra, ocasionadas por exemplo pelos tremores de terra, fazem com que a precisão relativa das medidas não possa jamais ser superior a  $10^{-7}$ .



*Fig. 1 - As primeiras medidas foram feitas sobre o Sol com os olhos. As últimas com um micrômetro pessoal de dupla imagem.*

A fig. 2 devida a Danjon, mostra como a duração do dia médio tem variado de 1770 a 1955: ilustra também a dificuldade encontrada pelos astrônomos.

Apesar destas dificuldades, é o astrônomo que define a unidade de tempo: o segundo representa o  $1/31556925,9747$  do ano trópico para 1900 janeiro 0 a 12h. do tempo das efemérides. Esta definição é um pouco complicada e comporta números estranhos.

??

Estes são meios mecânicos que foram primeiro utilizados para medir esta duração. Mas são rapidamente inadaptados para medir fracos intervalos de tempo; é necessário construir sistemas físicos cada vez mais complicados: primeiro pela eletrônica -- se mede a duração das vibrações de um quartzo ( fig.3) -- depois em seguida por meio do relógio atômico ou molecular se observa o bailado incessante das transições dos elétrons entre níveis de energia. Isto nos conduz ao tempo quântico.

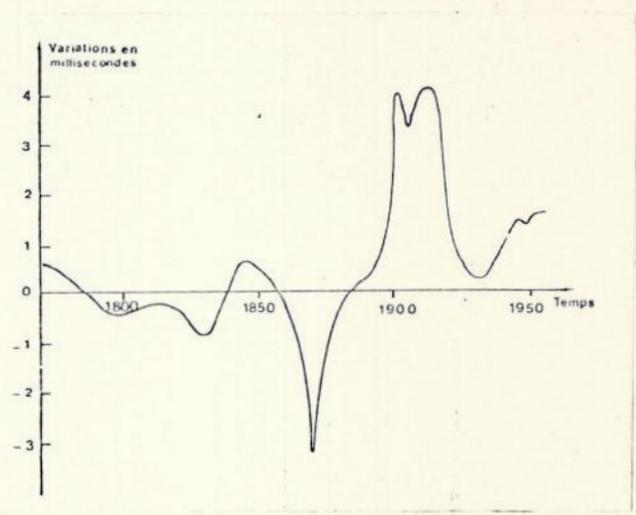


Fig. 2 - Variações do dia médio de 1770 à 1955: elas são pequenas mas irregulares.

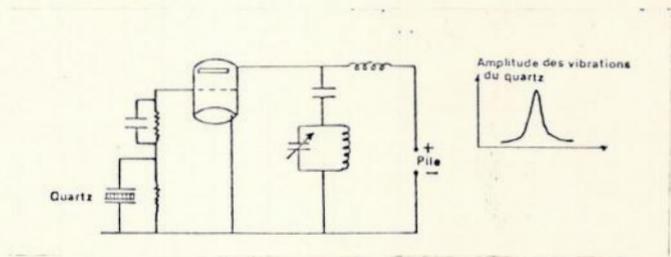


Fig. 3 - Esquema do princípio de um oscilador à quartzo

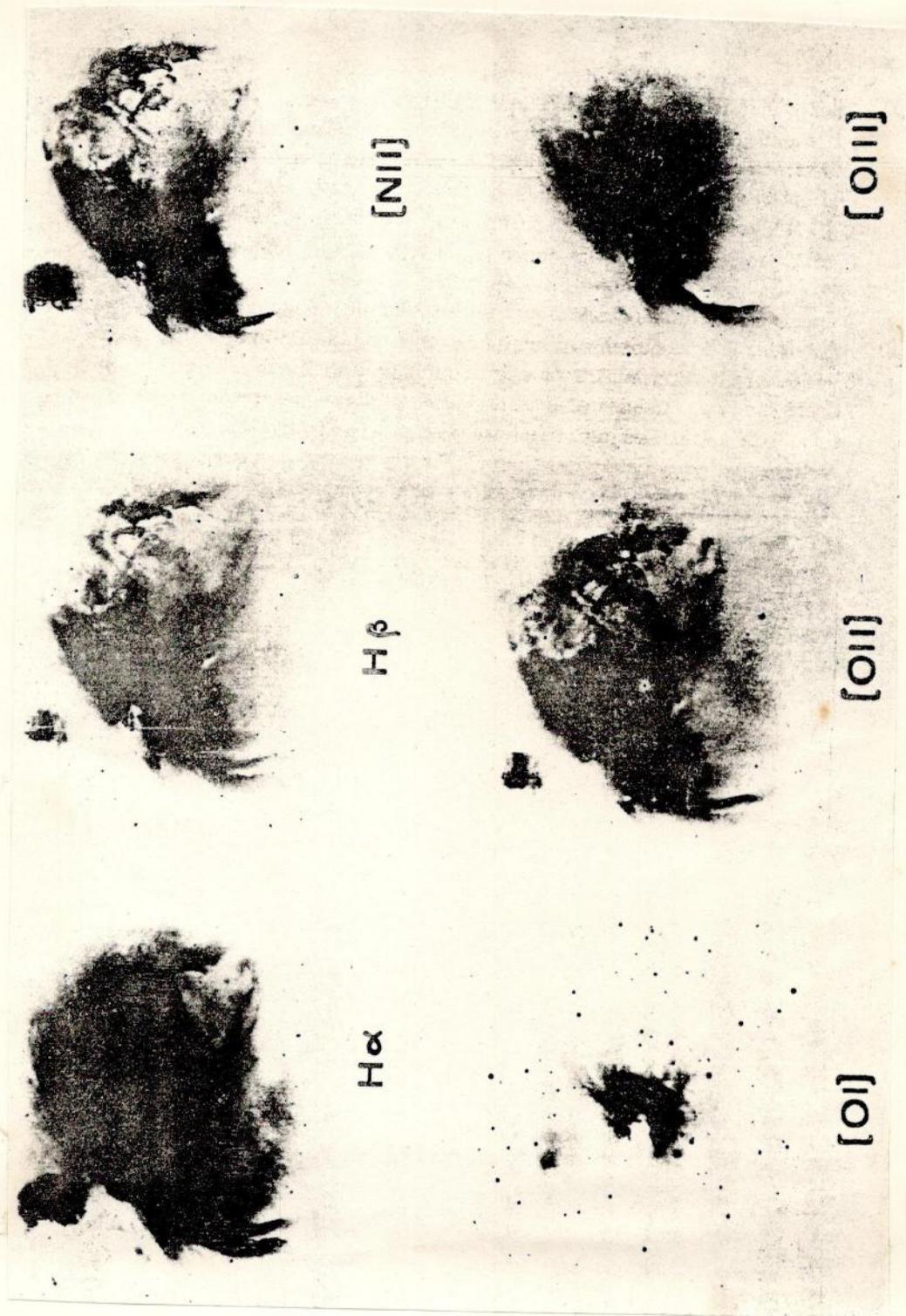


Fig. 4 - O caráter difuso é mais ou menos acentuado segundo a cor (ou o comprimento de onda) considerado: leva-se em conta o número de átomos emitidos e sua repartição na nebulosa de Orion.

## O TEMPO QUÂNTICO

É um desvio da noção de tempo clássico, se aplica às grandes reuniões, não há mais simultaneidade, nem ordem de sucessão.

Quando se considera uma grande reunião de átomos, de hidrogênio por exemplo, e se a excita por uma descarga elétrica ou como nas nebulosas por uma irradiação ultra-violeta intensa, há emissão de luz. A fig. 4 mostra diversos aspectos da nebulosa de Orion: conforme a cor utilizada para a fotografia, ela apresenta uma morfologia diferente que dá conta da distribuição do gás excitado pela estrela central. A luz emitida se distribui portanto em certos domínios espectrais privilegiados - os traços espectrais - cujas frequências centrais podem ser deduzidas das leis quânticas. Cada vez que um eletrón troca de órbita, há emissão de um foton que vem se estabelecer em um traço espectral bem determinado: quanto maior for o número de transições e mais largo o traço, fica reduzida a precisão da medida da frequência central do traço. Traços muito finos vão portanto permitir aumentar esta precisão ( fig. 5) -.

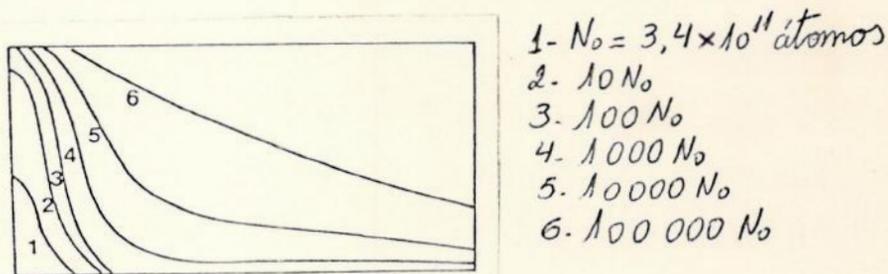


Fig. 5 - Semi perfil de uma raia espectral em função do número de átomos absorvidos.

6

Isto é o princípio; os meios empregados são muito complicados mas se limitam na medida de uma frequência; e medir uma frequência, isto é, o número de vezes por segundo que um fenômeno periódico se repete, é medir um tempo. Cada vez que se quer ganhar em precisão, é necessário reduzir a largura natural do traço espectral, portanto o número de átomos onde se produzem as transições: a conclusão será a de ter relações com um só átomo. Mas " a física quântica formula leis que regem multidões e não indivíduos", como o sublinham Einstein e Infeld, também não sabem prever quando uma transição particular pode ter lugar. O exemplo que segue vai nos fazer compreender melhor esta idéia.

Consideramos uma reunião de átomos rádio-ativos; um átomo se transforma ao curso do tempo permitindo a seu núcleo ceder ao meio ambiente um de seus constituintes. O número de átomos se desintegrando assim é regido por uma lei exponencial; a análise desta lei, revela que se a probabilidade de desintegração de um átomo no segundo que vem é de  $1/2$ , e que ao fim deste segundo, o átomo não é sempre desintegrado, então a probabilidade para que o seja no segundo seguinte é ainda igual a  $1/2$ . A probabilidade não cai em desuso: quando bem ainda este átomo será o último, sua probabilidade de desintegração resta sempre igual a  $1/2$  e neste sentido se pode dizer que um átomo não tem idade e que nosso tempo não tem valia sobre ele. (fig. 6)

Bem entendido, se no lugar de um gás rádio-ativo se consideram transições entre níveis de energia, o problema é o mesmo e a conclusão é idêntica.

Chegado a este ponto se pode dizer que o tempo não aparece mais como uma grandeza contínua assim como nossos sentidos podem nos fazer crer, mas como uma quantidade aleatória: se deve tratar o problema da medida do tempo pela lei dos grandes números, como todas as grandezas obedientes às leis do acaso e lhe dar uma significação probabilista. É a grande diferença com o tempo clássico, o segundo vem da noção de simultaneidade.

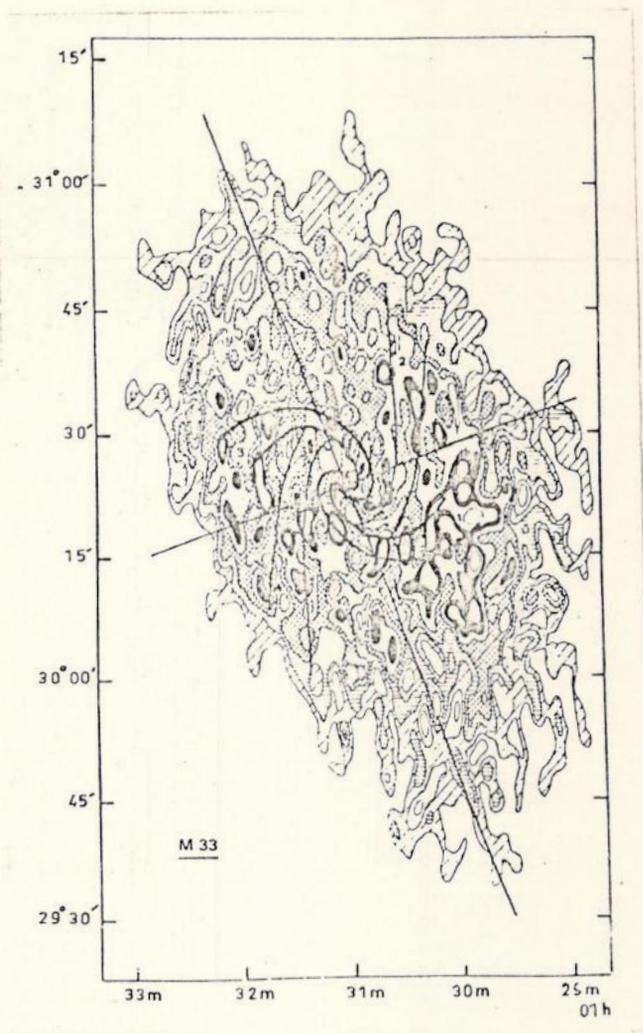


Fig. 6 - Este mapa representa a distribuição do hidrogênio neutro (raia 21cm) sobre M33.

Então como a noção de simultaneidade é clara em física clássica ( são simultâneos todos os acontecimentos, qualquer que seja o lugar onde se passa, que se produzem no mesmo tempo  $t$  da Mecânica) é impossível defini-la em mecânica quântica como será mostrado.

Quando se estuda corpúsculos, se utiliza a equação de Schrodinger; o tempo que aparece nesta equação é o tempo do observador, nosso tempo; e o físico que experimenta não faz senão produzir no plano espacial temporal, que é o seu, os elementos do mundo atômico. O tempo das equações de onda não prejudica em nada do que será, se existe, o tempo efetivamente vivido pelos corpúsculos.

Esta nota é importante porque não se toma consciência dos fenômenos da microfísica, que na ocasião de transferência de energia são portanto, submetidos aos princípios da Incerteza de Heisenberg e são regidos pela equação de Schrodinger. A medida de energia emitida pelas partículas implica um erro  $\Delta E$  sobre esta energia e um erro  $\Delta t$  sobre o instante de transição. A quarta relação da Incerteza de Heisenberg  $\Delta t \cdot \Delta E > h$  ( $h =$  constante de Planck) implica que o conhecimento exato de um acontecimento exige uma grande duração de observação e exclui o conhecimento do instante exato onde ele se produz: ela perturba portanto a simultaneidade na medida onde não se sabe mais definir, A ordem de sucessão dos acontecimentos é em consequência impossível de definir. É a segunda grande diferença com o tempo clássico.

É necessário então, compreender que o que precede conduz ao abandono do princípio fundamental de causalidade na medida onde as relações da Incerteza de Heisenberg limitam nosso conhecimento de condições iniciais e impedindo por este fato a dedução de todos os detalhes da evolução ulterior ( não se pode mais di-

zer que tal efeito terá causa).

Vista assim, a matéria perde seu caráter de realidade tangível; não se sabe mais quando tem lugar um fenômeno, e qual é a energia colocada em jogo, não se sabe mais nada da trajetória, nem da posição, nem da velocidade, se perde o caráter causal, a ordem de sucessão desvia-se levemente: tudo pode existir ao mesmo tempo, e como disse Einstein " se a matéria não tem existência senão como uma especialização da inteligência, esta será uma falta, não é possível conceber os aspectos psíquico e físico da matéria como dois aspectos absolutamente distintos". Ainda, segundo Einstein, " o espaço e o tempo são os meios pelos quais nós pensamos, e não mais o meio no qual vivemos".

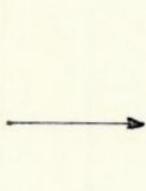
Podemos esclarecer este aspecto subjetivo do tempo no meio da teoria da informação, mas nos será necessário primeiro falar da entropia.

### O TEMPO DA INFORMAÇÃO

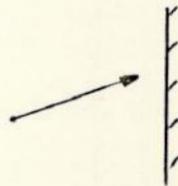
Traduz a ação do homem sobre o Universo, é também um tempo estatístico como o tempo quântico explícito, a consciência do homem interpreta um papel essencial, é ela quem imagina a ilusão da duração.

A definição do tempo clássico é puramente matemático, a do tempo quântico possui um conteúdo físico, do qual as relações de Incerteza de Heisenberg e toda a mecânica quântica são a tradução em termos científicos: o conhecimento que nós temos do mundo resulta exclusivamente da utilização de nossos instrumentos de observação. Dito de outro modo, existe uma relação entre o que observamos, por onde observamos e o observador.

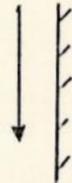
Antes de prosseguir, definiremos primeiro trabalho: é o produto de uma força pelo deslocamento. Um átomo em movimento vindo chocar um obstáculo pode o deslocar e fornece assim um trabalho. Este trabalho é tanto mais importante quanto a chegada do átomo for de grande incidência. ??



a força exercida é máxima = trabalho máximo.



a força exercida é mais fraca = trabalho qualquer.

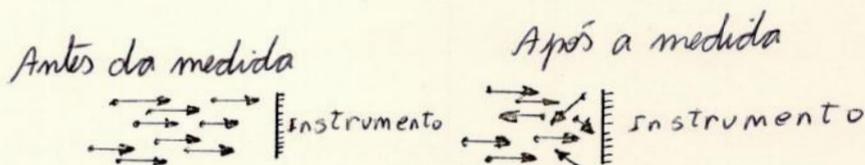


a força exercida é nula = trabalho nulo.

Retomemos nossa reunião de átomos e imaginemos que na origem todos os átomos estavam animados de velocidade tendo mesmo módulo, mesma direção e mesmo sentido, de modo um pouco análogo a este que se passa por um corpo sólido em translação: sua capacidade de trabalho mecânico é máxima, nenhum átomo contraria o trabalho dos outros; é uma imagem de ordem. Para conhecer este estado foi necessário introduzir um instrumento que tem inevitavelmente perturbado o meio. O resultado da medida é que certos átomos têm módulos e direções novas, uma agitação desordenada de átomos começou: teremos diminuído a possibilidade do trabalho mecânico desta reunião de átomos, nós teremos produzido menos eficiência, uma parte desta potencialidade mecânica foi transformada em energia, isto é, em calor; a energia é enfraquecida, perdeu sua qualidade. E quanto mais se quer saber o que se passa, mais se aumenta a perturbação; o simples cálculo das probabilidades nos indica que não é razoavelmente concebível restabelecer a ordem

nesta reunião de átomos: a desordem sempre cresce com o tempo.

É o segundo princípio da Termodinâmica, ou ainda princípio de Carnot, ou ainda princípio da entropia crescente. A entropia representa a desordem de nossa reunião de átomos: cada vez que se quer esclarecer sobre nosso sistema, se aumenta sua entropia, ou diminui sua capacidade de trabalho, sua "nega entropia" como o chamou os físicos. A fig. 7 esquematiza o que acabamos de ver.



*conjunto ordenado: a possibilidade de trabalho é máxima, a entropia é nula.*

Fig. 7

*conjunto já desordenado: a possibilidade de trabalho já diminuiu, a entropia não é mais nula.*

Esta experiência atrai duas notas:

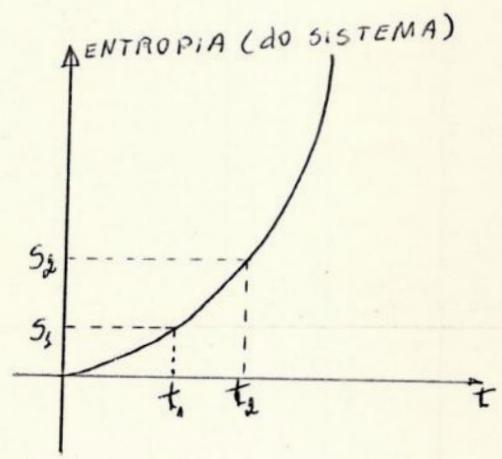
-- voltar no tempo é encontrar um estado passado; como nós vimos pela experiência precedente, isto é impossível, a irreversibilidade da desordem ocasiona a do tempo;

-- quais são as causas da entropia? A desordem como acabamos de ver, mas também o desconhecimento. Desenvolvemos esta idéia.

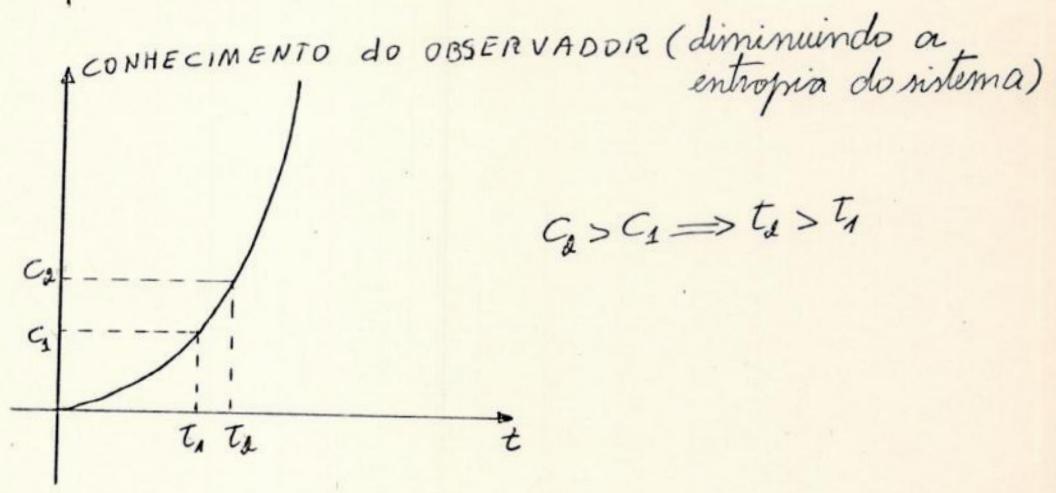
Tomamos duas galáxias em colisão: um observador situado em um domínio onde tem lugar a penetração de uma galáxia em outra, não saberá que há colisão se possui instrumentos ruins, marcará somente uma grande desordem no movimento próprio das estrelas. Um observador situado muito longe verá as duas galáxias e restabelecerá quase instantaneamente a ordem.

Se pode separar a entropia "livre" a que preside a evolu-

ção do sistema independente de toda intervenção humana, e a entropia "lida" que provem do desconhecimento. Esta separação é arbitrária pois basta ter um elemento de informação convenientemente escolhido para fazer da desordem aparente uma ordem real, como no caso das duas galáxias que se interpenetram. É porque, em posterioridade, não utilizaremos a palavra entropia sem lhe dar adjetivo.



$$S_2 > S_1 \implies t_2 > t_1$$



$$C_2 > C_1 \implies t_2 > t_1$$

Voltamos agora à teoria da informação.

Conhecer um sistema físico, é escolher o centro de todas as possibilidades as que são as mais prováveis; se  $P_0$  representa o conjunto das possibilidades do sistema e se  $P_1$  somente as que são as mais prováveis, então a informação se escreve:

$$I = K \log \frac{P_0}{P_1}$$

Isto se traduz assim: estar informado é colocar ordem na grande desordem do desconhecimento inicial, é diminuir o número de graus de liberdade escondido do sistema, em outros termos diminuir sua entropia.

Isto ocasiona que o que temos dito a propósito do trabalho é falso, a saber que a introdução de um instrumento diminui a capacidade de trabalho do sistema? Bem seguro que, no momento da medida, sistema físico e instrumento de medida eram reunidos para não mais formar um só sistema cuja entropia "livre" não pode crescer: ela tem diminuído no sistema porque nós o conhecemos melhor, portanto podemos melhor o utilizar, mas ela tem aumentado no instrumento de medida. É nossa ausência de conhecimento sobre o sistema que nos tinha conduzido em dar à entropia, um valor muito forte: é neste sentido que se pode dizer que a entropia não exprime mais tanto o estado de desordem que a ausência de informação sobre a verdadeira estrutura do sistema. É a tradução matemática do fato que: as informações só existem a partir da medida ou quando dela tomamos conhecimento.

Eis-nos aqui voltado ao homem e à natureza, pois a vida é antes de tudo a aquisição da informação, e seu desenvolvimento vai depender da velocidade desta aquisição. Isto transmitido no meio de um suporte material, é inevitavelmente submisso a outras ações: é o que Shannon tem traduzido demonstrando que;

$$\frac{dI}{dt} \geq K \log \left( I + \frac{S}{B} \right)$$

S/B representa a ação do resto do Universo sobre o suporte material transmitindo a informação. A fórmula de Shannon é a fórmula fundamental do tempo, pois ela fornece cálculo de uma certa cronologia; a quantidade de informação que se pode obter por unidade

de tempo não é infinita, as mensagens são recebidas após sua emissão, a percepção segue o fenômeno: a informação nos chega em uma ordem determinada.

Daí resulta que existe em nosso cérebro uma certa quantidade de informação, disponível ou não, consciente ou não, que cresce obrigatoriamente com o tempo e inversamente o tempo cresce com a informação que permite e condiciona a ação ordenada.

É esta lei de crescimento da informação que obriga nosso psiquismo em fazer desfilar a sua preparação do espaço tempo no sentido das entropias crescentes. Paramos aí esta aproximação do tempo estatístico, pois ela marca de certo modo uma barreira no tempo científico que é só nosso propósito.

### O TEMPO RELATIVISTA

É uma reestruturação do tempo clássico, o movimento o modula, não há simultaneidade e ordem de sucessão senão localmente.

Para a física clássica o espaço é um continente. A relatividade lhe recusa este catálogo, ela se volta em direção da experiência e observa que é impossível medir velocidades maiores que a velocidade da luz. De outro modo dito, não é necessário jamais levar em conta o movimento da fonte luminosa qualquer que seja quando se quer compor velocidades onde só intervem a luz, só conta a distância na fonte para calcular a duração do trajeto até o observador.

Coloquemos em pauta o princípio: observamos um avião armado de um lança míssil; pouco tempo depois que o aviador tem colocado em movimento o lance em fogo ( = disparo, clarão do disparo) nós observamos um relâmpago, depois nós recebemos o míssil. No ca

14

so do relâmpago, a relatividade nos diz não levar em conta o movimento da fonte luminosa porque qualquer que seja, nós mediremos sempre uma velocidade igual a  $c$ . No caso do míssil, cuja a velocidade é mais de 100.000 vezes menor, a física clássica que rege as leis da mecânica a esta velocidade, nos obriga em adicionar a velocidade do avião  $V$  e a do míssil  $v$ ,  $V$  sendo marcado em relação ao observador e  $v$  em relação ao avião, escrevemos  $u = V + v$ . Trata-se portanto de duas tentativas do espírito fundamentalmente diferente.

Geometricamente, esta invariância da velocidade da luz se traduz de maneira elementar; se  $dl$  e  $dt$  representam a distância e a duração em um primeiro sistema de coordenadas,  $dl'$  e  $dt'$  as mesmas grandezas em um segundo sistema, temos:

$$c = \frac{dl}{dt} = \frac{dl'}{dt'} \quad (\text{esta relação se aplica aos raios luminosos exclusivamente})$$

então em geometria clássica teríamos:

$$\begin{aligned} dl &= dl' \\ dt &= dt' \end{aligned}$$

O impacto sobre a geometria é evidente, o comprimento torna-se uma noção ligada ao movimento, o tempo faz uma entrada fracassante ( fig. 8 ).

Retomamos a imagem precedente e completemo-la por um segundo avião animado da mesma velocidade, indo na mesma direção e no mesmo sentido que o primeiro. Nós não nos preocupamos aqui do problema da sincronização dos relógios, nos basta saber que a operação é realizável, e admitir que os aviadores podem colocar em movimento seu tiro ao mesmo tempo ( fig. 9 ).

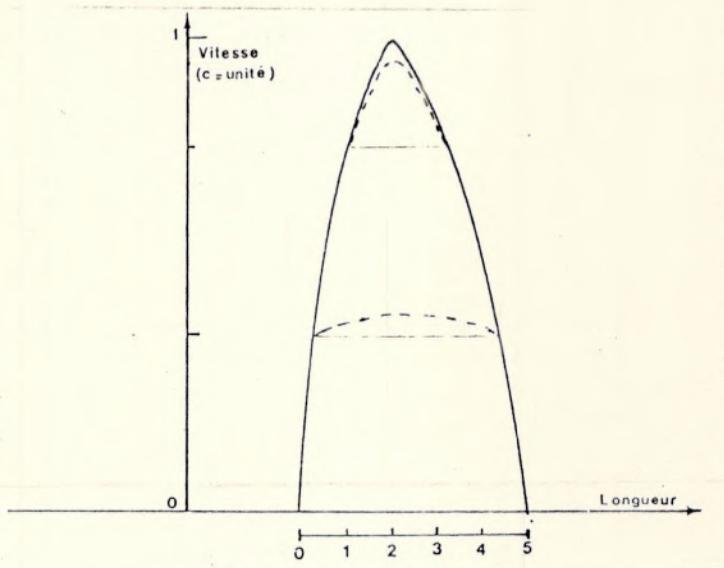


Fig. 8. Ação da geometria.

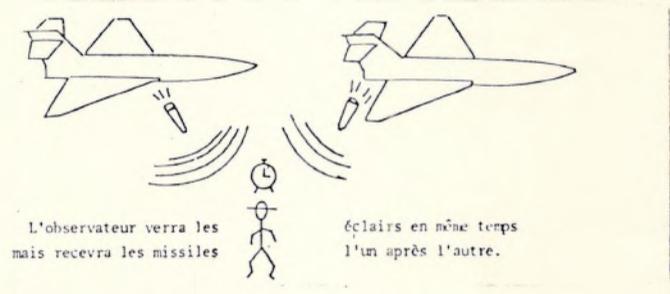


Fig. 9

?

Se o tiro tem lugar no momento onde os dois aviões estão equidistantes do observador ao Sol, este receberá os dois relâmpagos do disparo de maneira simultânea, pois não tem levado em conta do movimento da fonte, em compensação os mísseis não chegarão ao mesmo tempo por causa da composição clássica da velocidade: se D é a distância do observador a cada um dos dois aviões no instante do tiro, então o primeiro míssil chegará no instante  $\frac{D}{|V + v|}$  e

o segundo no instante  $\frac{D}{|V - v|}$ .

Os relâmpagos foram simultâneos para o observador enquanto que a chegada dos mísseis não foram. A simultaneidade torna-se uma propriedade da velocidade, ela não tem portanto uma realidade local.

Completemos o resultado: consideramos uma gaiola transparente e um experimentador no centro da gaiola. O experimentador provoca a emissão da luz: constatará que estando no centro da gaiola os raios luminosos atingem as paredes ao mesmo tempo. Colocamo-nos no exterior da gaiola e atribuímo-nos uma velocidade V em relação à gaiola, nós faremos o raciocínio seguinte: nós não temos que levar em conta o movimento da fonte de luz mas devemos levar em conta o movimento da gaiola, um lado desta foge do sinal enquanto que o outro se aproxima. Veremos assim uma das paredes atingida pelo sinal antes da outra por pequena que seja a diferença, o sinal luminoso não atingirá simultaneamente as duas paredes da gaiola.

Assim, dois acontecimentos simultâneos para o observador no interior da gaiola, não o são mais para nós no exterior.

Retomamos a mesma experiência, mas a completando para um segundo observador exterior indo em sentido contrário do nosso movimento, com a mesma velocidade, e façamos o balanço dos impactos lu

minosos:

Instante do impacto	1ª parede	2ª parede	Caracteres
Observador A em repouso na gaiola	$t_0$	$t'_0$	$t_0 = t'_0$
1º observador B velocidade + V	$t_1$	$t'_1$	$t_1 \neq t'_1$ $t_1 < t'_1$
2º observador C velocidade - V	$t_2$	$t'_2$	$t_2 \neq t'_2$ $t_2 < t'_2$

A tabela tem a seguinte significação para cada observador:

- Observador A: as paredes da gaiola foram atingidas ao mesmo instante, há simultaneidade.
- Observador B: a parede nº 1 foi atingida depois da parede nº 2, não há simultaneidade.
- Observador C: a parede nº 1 foi atingida antes da parede nº 2, não há simultaneidade.

Os observadores B e C estão de acordo quanto a não simultaneidade, mas não o estão mais sobre a ordem de sucessão dos impactos. O princípio de causalidade pode ser violado se a inversão se produz entre a causa e o efeito. Contrariamente à física clássica, torna-se impossível classificar os acontecimentos " já realizados" e " não ainda realizados": de outro modo dito, e impossível afirmar que o passado é já " realizado" e que o futuro é " não ainda realizado", isto não é verdadeiro para certos lugares de observação, mas não é mais verdadeiro " em outro lugar" que nestes lugares, é necessário tratar o contínuo como um todo solidário (fig. 9 ). Esta noção é de tal maneira contrária ao " bom senso" e ao " hábito" que ela é toda a dificuldade da relatividade: passado esta fronteira da compreensão, a relatividade torna-se uma física

nem mais fácil nem mais difícil que uma outra.

De fato, a grande lição da relatividade pode se resumir em uma frase breve: "o que se acreditava exato, não é senão aproximado"; não se suprime as teorias tendo feito suas provas, se os a perfeiçoa.

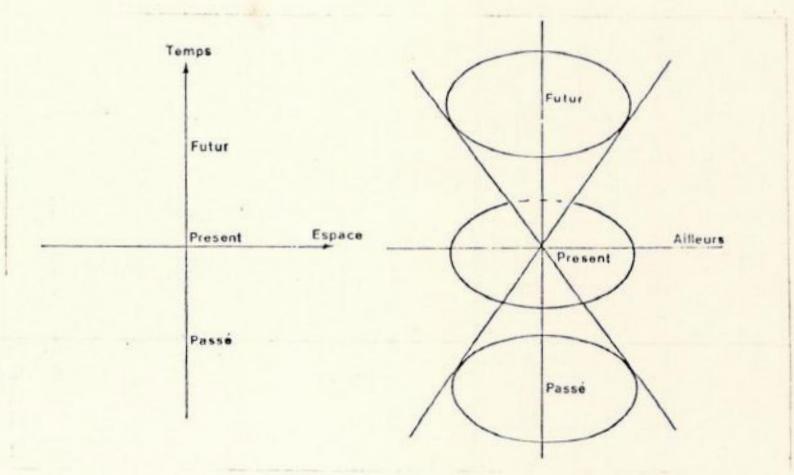


Fig. 9- Na teoria clássica, o movimento pode ser representado por qualquer reta no diagrama Espaço-Tempo, e ele é o mesmo para todos.

" Um dos paradoxos da física moderna, é que há duas teorias principais, relatividade e mecânica quântica, que não foram jamais convencionalmente reconciliadas". Isto apesar dos resultados como a equação de Dirac, a existência de anti-partículas, a correção entre spin e estatística, etc... Einstein e Infeld não veem que uma diferença de espírito na análise " a física quântica não formula leis que prevejam o futuro dos sistemas, mas leis que regem trocas de probabilidades no tempo e em relação a um grande número de indivíduos". É porque o tempo é irreversível nas teorias estatísticas enquanto que a relatividade não exclui uma viagem no tempo, incluindo o passado.

II - PADRÕES, ESCALAS E UNIDADES

II.1 - PADRÕES DE TEMPO

A palavra tempo é usada para expressar duas diferentes idéias, a de época, ou um ponto na escala de tempo, e a de intervalo de tempo. Para o uso de vida civil e astronomia, o tempo de dia e tempo de ano são obrigatórios, e para navegação o tempo de dia é de principal importância. Estes tempos são determinados pela posição da Terra sobre seu eixo e em sua órbita em volta do Sol. As ciências físicas por outro lado, estão principalmente relacionadas com intervalo de tempo ou duração. Este é também importante para vida civil embora com baixa precisão, e sem dúvida contando os dias pode bem ter sido a primeira medida do homem, O dia era a unidade mais evidente para ser adotada na medição da passagem do tempo, e o calendário é um conveniente e natural caminho de guardar a conta do número de dias que tinha transcorrido desde algum zero arbitrário e também indicando a estação do ano. O Calendário Gregoriano introduzido em 1583 e adotado na Inglaterra em 1752 tinha 365 dias em qualquer ano não divisível por 4, e também em qualquer ano divisível por 100 mas não por 400 e 366 dias em outros anos. Isso é devido ao fato que há aproximadamente 365,2425 e não um número redondo de dias no ano.

Se um relógio é usado para dividir o dia em 86,400 segundos e é acertado para ler 12 meio dia quando o Sol cruza o meridiano, lerá o tempo verdadeiro solar e dar o tempo verdadeiro do dia. Intervalo de tempo será obtido como a diferença entre duas leituras de relógio, mas infelizmente eles não serão uniformes. Uma transigência é portanto feita entre tempo verdadeiro e intervalo de tempo uniforme e é um dos problemas de astronomia obter para movimentos complexos dos corpos do sistema solar uma escala

86400

de tempo uniforme, essa leitura é a que corresponde aproximadamente ao tempo do dia. Uma escala de tempo uniforme é a mais próxima possível aproximação que definida por Newton ( 1642-1727 ) como " Tempo verdadeiro absoluto e matemático por ele mesmo e a partir de sua própria natureza flui uniformemente sem relação com alguma coisa externa e por outro nome é chamado duração: tempo relativo e aparente e tempo comum é alguma medida sensível e externa ( ora correta ora desigual) de duração por meio de movimento o qual é comumente usado em vez de tempo verdadeiro tal como uma hora, um dia, um mês, um ano." Filósofos têm algumas vezes optado pela preferência por tempo "absoluto" como oposto a tempo "relativo" mas estas palavras não tinham então as implicações que têm hoje.

É provável que Newton com sua grande perspicácia percebeu que as leis de Mecânica Celeste seriam expressas em uma unidade de tempo que não variavam com o movimento da Terra e os próprios planetas. Como não havia então unidade prática conveniente tinha que ser definida nestes termos ideal.

A medida de tempo astronômico depende fortemente do uso de relógio que fornece uma escala na qual os eventos astronômicos observados podem ser registrados e também subdivide os intervalos entre tais eventos. Um relógio consiste de duas partes básicas , um mecanismo vibratório com um período uniforme e outro mecanismo para contar e registrar o número de vibrações. A segunda parte do problema foi resolvida pela invenção da roda de escape aproximadamente no fim do século 13, mas a primeira parte não foi resolvida até o fim do século 17, quando Huygens com êxito adotou o pêndulo descrito primeiramente por Galileu (1564-1642). Este foi o período quando medidas de tempo apuradas tornou-se finalmente possível. Rápido aperfeiçoamento foi feito sem dúvida, por causa do incentivo da navegação e a expansão do comércio. Bons relógios foram exigidos para permitir aos navegadores determinar sua longitude em

*roda de escape?*

1667

mar. O Observatório de Paris foi fundado em 1671 e o Real Observatório de Greenwich em 1675 a fim de fornecer dados astronômicos básicos para navegação. Relógios de pêndulo foram aperfeiçoados e Harrison em 1759 fez o primeiro cronômetro preciso de navio baseado em uma balança móvel em vez de um pêndulo.

O próximo grande avanço em relógio foi feito em resposta à exigência da rádio tecnologia que necessitou de uma rápida e precisa medida da frequência de ondas de rádio. Isto não pode ser feito em termos do impulso de segundos de um relógio de pêndulo, mas necessitou de um certo padrão para um intervalo bem maior. Os relógios a balancim, ainda utilizados no início do século vinte, foram substituídos por relógios de quartzo. Estes consistem de um pedaço de quartzo que vibra por exemplo em 1MHz acoplado com um circuito eletrônico que conta as vibrações e registra-as em um mostrador de relógio. Relógios de quartzo portanto fornecem uma escala finamente dividida, mas foi achado que eles eram muito mais precisos em períodos longos do que relógios de pêndulos. Eles tinham suficiente precisão para revelar uma significativa e previamente insuspeitada variação na taxa de rotação da Terra.

O Tempo periódico ou frequência de pêndulos, balancins e oscilador de quartzo podem ser calculados a partir de suas dimensões, propriedades elásticas e no caso do pêndulo, a constante gravitacional, mas os cálculos não são muito apurados. Na prática os relógios são ajustados empiricamente de maneira que em média eles estejam regulados com a Terra. Eles portanto servem simplesmente para dividir o dia em pequenos intervalos, para interpolação em observações astronômicas e excluir algum de seus erros e irregularidades. O próximo desenvolvimento, a introdução do relógio atômico foi de uma natureza muito mais fundamental: Ele é baseado em um processo repetitivo natural interno ao átomo, o qual pode realmen

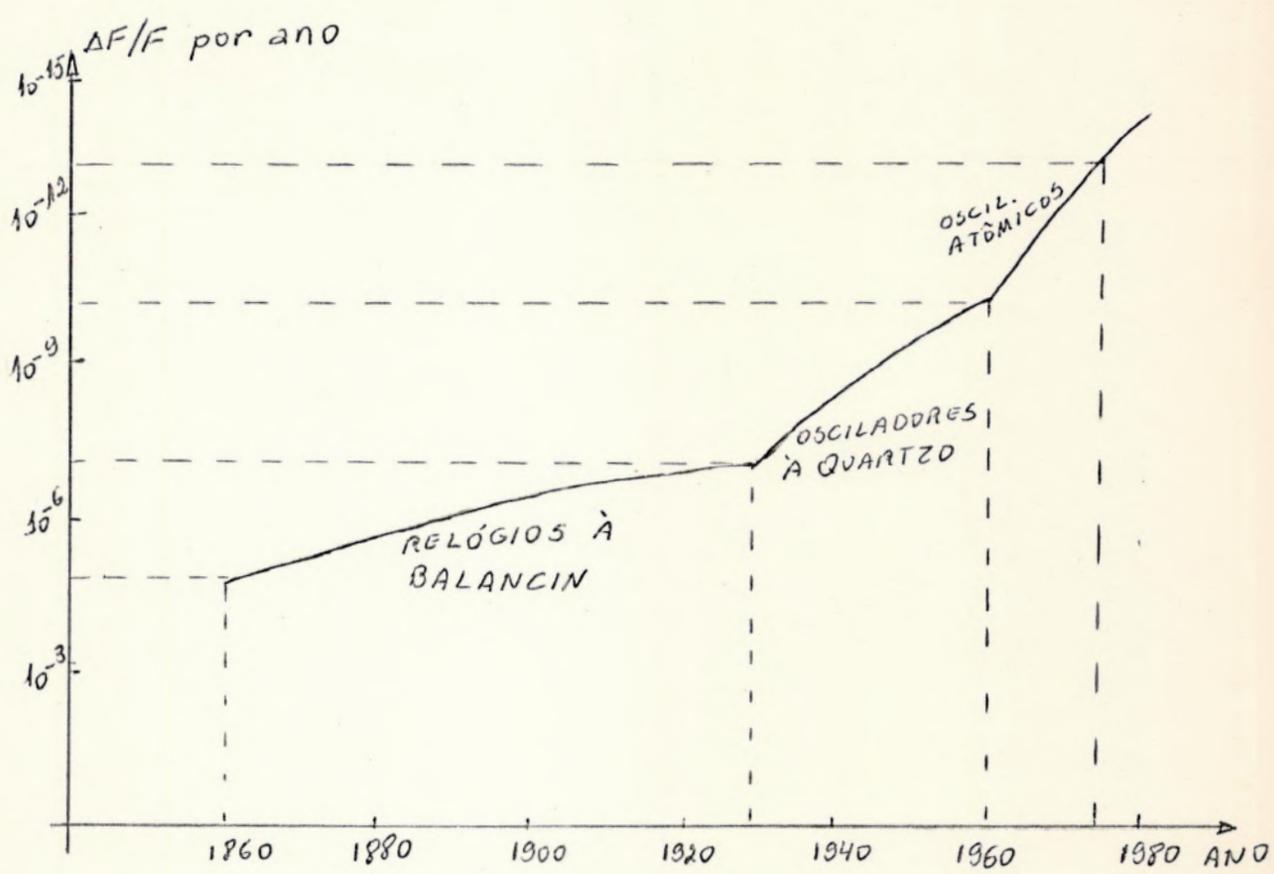
te ser medido para fornecer uma escala de tempo, que é muito mais precisa e muito mais uniforme do que a baseada em qualquer periodicidade do Sistema Solar.

Se um relógio atômico está acertado para corresponder ao tempo astronômico, dará inicialmente o tempo correto do dia bem como intervalos de tempo. A leitura do relógio vai gradualmente desviando-se do tempo astronômico, por causa das mudanças irregulares na velocidade de rotação da Terra.

Em conclusão podemos relembrar os três Padrões de Tempo apresentados acima:

- 1º - Os relógios a balancim, modelo de Observatório, mantidos em câmeras de vácuo, a pressão, temperatura e umidade constantes, conservadas sempre nos subsolos dos observatórios, com precisão da ordem de  $10^{-7}$ ;
- 2º - Os relógios, a oscilador de quartzo, com a lâmina piezoelétrica mantida em temperatura constante, com erro relativo entre  $10^{-7}$  e  $10^{-10}$ ;
- 3º - Os relógios atômicos, ou Padrões Primários ou Absolutos de Tempo e Frequência, com erro relativo entre  $10^{-10}$  e  $10^{-13}$ .

A evolução da técnica, possibilitando que no campo metro-  
lógico as medidas de maior precisão fossem exatamente as de maior  
dificuldade de definição, poderá ser devidamente acompanhada no  
gráfico abaixo:

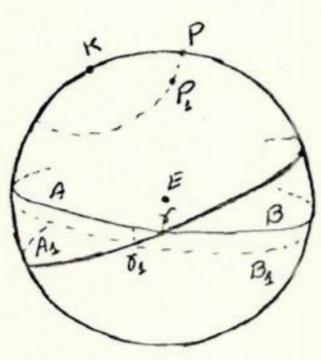


$\Delta F/F \rightarrow$  desvio normalizado de frequência.

II.2 - ESCALAS DE TEMPO

ESCALA ASTRONÔMICA

A mais precisa observação astronômica é o instante no qual uma estrela cruza o meridiano de um observatório e tal medida forma a base da escala de tempo astronômico. A fim de que estrelas possam ser usadas como um relógio, é necessário definir suas posições na esfera celeste por meio de um sistema de coordenadas que pode mais convenientemente consistir de dois planos em ângulo reto. Um evidente plano para usar é o plano equatorial da Terra marcado  $A\delta B$  na figura abaixo, na qual a Terra, está em E. Um outro é o que contém o eixo da Terra e a direção do ponto Vernal. Este ponto na esfera celeste é conhecido como o primeiro ponto de Áries, aqui designado pelo símbolo  $\gamma$ . O sistema solar é muito complexo e o polo P do eixo da Terra move-se com relação ao polo K da eclíptica fazendo um círculo completo estimado em 25,725 anos. Este movimento naturalmente complica o problema de cronometração.



Se o polo transporta-se para a posição  $P_1$  então o plano equatorial transporta-se para  $A_1 \gamma_1 B_1$  e  $\gamma$  mover-se-á completamente ao redor da eclíptica no curso de uma rotação completa do polo. Além disso esta precessão do equinócio tem menor movimento do polo com várias periodicidades e o efeito combinado destas é chamado nutação.

EXPLICAR MELHOR

A posição de uma estrela é especificada pela sua ascensão reta que é sua distância angular do primeiro ponto de Áries para leste ao longo do equador celeste no ponto no qual o grande círculo por entre os polos e a estrela corta o equador celeste e por sua declinação que é a distância angular da estrela do equador celeste.

← explica melhor

???

O tempo local que precisará ser definido deste modo é aproximadamente 12 meio dias quando o Sol está em seu ponto mais alto, mas para propósito astronômico é necessário ter uma única definição mundial. O meridiano de Greenwich foi provavelmente primeiro adotado com a introdução do Almanaque Náutico em 1767, e foi mais tarde reconhecido internacionalmente.

ESCALA FÍSICA

Uma escala de medida é construída por sucessivas adições de unidade. No caso de comprimento, escalas físicas podem ser feitas na forma de réguas e fitas métricas, no caso de massa, aparelhos de pesos são feitos com múltiplos ou frações de unidades. Tempo por sua natureza não presta-se a tais escalas e a passagem de tempo é medida simplesmente por contagem do número de unidades que transcorre entre dois eventos. É possível mostrar uma escala de tempo espacialmente como a distância percorrida pelo ponto de luz em um tubo de raio catódico; e a distância angular percorrida pe-

las estrelas em seu movimento aparente ao redor da Terra consti--  
tué um outro exemplo familiar. Tais escalas são precisas apenas  
se a velocidade é uniforme e mensurável em termos da unidade.

*explicar (ponto importante)*

Tabelas astronômicas da posição de estrelas e planetas  
constituem escalas de tempo para grau de precisão com os quais a  
unidade astronômica é conhecida e constante. Além desta precisão  
elas serão consideradas mais como tabelas de posição relativa. A  
precisão não é aperfeiçoada pela extensão das medidas sobre um in-  
tervalo muito longo. O valor médio pode então ser conhecido mais  
precisamente, mas a menos que exista algum meio físico para divi-  
dir o longo intervalo de tempo em pequenas unidades iguais, o va-  
lor médio pouco serve para finalidades práticas. A dificuldade bá-  
sica no Tempo Astronômico além das limitações de medições é divi-  
dir um longo intervalo em unidades iguais de tamanho conveniente.  
O Tempo Atômico apresenta o problema inverso ou seja, integrar u-  
ma unidade de tempo muito pequena em uma dada escala de tamanho  
conveniente. As durações dos anos são certamente de interesse e é  
portanto importante considerar a precisão com a qual as escalas de  
Tempo Atômico podem ser construídas.

O Tempo Atômico tem sido avaliado pelas transmissões de  
MSF desde 1955. Como essas e outras transmissões vinham a ser ope-  
radas por ou medidas em termos de padrões atômicos independentes,  
os resultados eram correlacionados pelo BIH e as escalas de tem-  
po derivadas de diferentes padrões podem ser comparadae. Os resul-  
tados incluem qualquer erro associado com a transferência de pa-  
drões atômicos para trabalhos padrões e desses padrões para trans-  
missores, e com a recepção e medidas dos sinais. As escalas come-  
çaram em janeiro de 1961 e um sumário dos resultados tirados dos  
boletins do BIH é reproduzido na tabela.

LABORATÓRIO	Jan. 1961	Jan. 1964	Jan. 1965	Jan. 1966	July 1966
N.P.L. Teddington	0	+25	+32	+28	+27
N.B.S. Boulder	0	-1	-6	-5	-5
L.S.R.H. Neuchâtel	0	-24	-27	-23	-21
N.R.L. Washington	0	+68	+63	+63	+63
Tokyo			+1	-1	-1
N.R.C. Ottawa				+1	+1
I.R.N.O. Stockholm				0	-1
Bagnex	0	+181	+176	-3	-5
U.S.N.O. Washington	0	+122	+131	-1	-1
Paris				0	+2

Unidade =  $1 \times 10^{-4}$  s.

Os resultados dos três primeiros padrões na tabela, os quais são baseados em medida de laboratório de padrões de césio tendo feixes longos e alta precisão são combinados para formar uma escala de tempo chamada A3, e a tabela fornece a diferença de escalas individuais em relação a essa escala. No primeiro período de comparações a precisão desses três padrões foi estimada como sendo cerca de  $\pm 2$  partes em  $10^{11}$  e eles foram ultimamente desenvolvidos para  $\pm 1$  parte em  $10^{11}$ . O procedimento operacional também foi gradualmente desenvolvido.

Pode se ver que os desvios na frequência média obtidos a partir da diferença de tempo estão dentro das precisões requeridas para padrões. O resultado mostra claramente que o tempo atômico pode ser integrado sem dificuldade para formar uma escala extensa tendo uma grande precisão de padrões e que como se esperava,

28

alguns erros residuais são excluídos. Os resultados dados nas últimas três colunas indicam que padrões atômicos são agora usados em operações de rotina com uma incerteza de menos que 1 parte em  $10^{11}$  ou  $3 \times 10^{-4}$  segundos por ano. Uma escala de tempo atômico foi estabelecida pelo U.S. Naval Observatory em 1959 e foi retroagida até janeiro de 1958, o zero da escala sendo tomado igual a T.U.2 tal que  $O^h O^m O^s$  em janeiro de 1958, o valor da escala atômica chamada A1 foi  $O^h O^m O^s$ . Outras escalas de tempo atômico estabelecidas em Neuchâtel e em Boulder e uma comparação entre elas (Bonanomi, Kartaschoff, Newman, Barnes e Atkinson, 1964) confirmou os resultados descritos acima e, mostra o desenvolvimento obtido desde 1962 quando tubos de feixe longo de césio foram usados.

Tem-se portanto claramente estabelecido que as escalas de tempo atômico tem boa precisão do padrão mesmo quando elas são mantidas com a ajuda de padrões subsidiários. Uma parada temporária de qualquer padrão não causa nenhuma dificuldade porque os padrões são intercomparados para manter a alta precisão. Uma vez que as relações entre tempo atômico e tempo das efemérides foi estabelecida, as medidas astronômicas feitas durante os últimos 250 anos podem ser expressas em termos de unidades atômicas.

### ESCALA HÍBRIDA

Para fim de uso prático, para uma grande variedade de usuários, os vários serviços de tempo nacional e frequência, divulgam o tempo por difusão de rádio.

Alguns usuários, tais como os navegadores necessitam que as medidas de tempo útil para eles, forneça a posição angular verdadeira da Terra em cerca de  $O^h 1$ . A isso se deve, em 1964, a introdução do Tempo Universal Coordenado (T.U.C.) por difusão de

rádio. TUC é uma escala de tempo híbrido; a velocidade é definida relativamente à velocidade do relógio atômico, enquanto o período é definido relativamente ao TU. Antigamente, quando TUC desviasse muito de TU, a frequência ou o período ou ambos eram ajustados por acordo internacional. Por convenção, as frequências ajustadas eram introduzidas apenas no começo de um ano, enquanto os períodos ajustados eram admissíveis no início de um mês.

A frequência de TUC foi trocada várias vezes desde 1964 em um esforço de minimizar o número de descontinuidades de períodos requerido para seguir TU2 em cerca de 100 mseg. Durante 1971 a frequência diferia de TAI de  $-3 \times 10^{-8}$ , isto é, a variação de duração de 1 segundo de TAI para aquela de 1 segundo de TUC era  $1-3 \times 10^{-8}$ . As regras para definição de TUC não foram trocadas, isto teria sido necessário para aumentar a frequência ajustada para  $-4 \times 10^{-8}$  em 1º de janeiro de 1972. Embora, estas regras tenham sofrido uma revisão drástica pela ação do Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR), aprovado pela União Astronômica Internacional. Em vigor em 1º de janeiro de 1972, TUC se dirigiu para velocidade do TAI e desde então não foi mais submetido à ajustes de frequências. Para o tempo que se seguiu, a duração de segundos de TUC e TAI continua sendo idêntica.

Ao mesmo tempo, maiores trocas foram feitas nos critérios de época ajustada. TUC foi ajustado para seguir TUI em cerca de 700 mseg., com ajustes descontínuos de exatamente 1<sup>o</sup>, a serem feitos em 1º de janeiro ou 1º de julho. É verdade que são necessárias compensações pelo menos anualmente, mas este incremento maior é compensado pelo fato de serem de um segundo as descontinuidades. Um número imposto de batimentos do relógio faz com que TUI-TUC tenha 100 mseg. de resolução.

A 1º de janeiro de 1972, uma descontinuidade não inteira

foi aplicada para que a diferença TAI-TUC passasse a ser lo seg., sendo assim essa diferença passa a ser uma intégrel exata do número de segundos que se passaram. Ainda a respeito dessa descontinuidade fracionada, é útil notar que, enquanto os serviços de irradiação tentam emitir TUC como sendo preciso, desvios oscilatórios e outros fatores fazem que cada serviço de irradiação tenha uma escala de tempo levemente diferente. Por exemplo, em 16 de Agosto de 1971, o WWV irradiado diferia do TUC de 147,6 seg. Quando discrepâncias da época são introduzidas, é feito também uma tentativa para minimizar essas discordâncias. Portanto, embora a discrepância aplicada anunciada oficialmente pelo B.I.H. seja de  $-0,1077577$ , a que é realmente aplicada no WWV é de  $-0,107600$ .

???

II.3 - UNIDADES DE TEMPO

No início do século, os relógios mecânicos foram substituídos, devido ao desenvolvimento da técnica, pelos osciladores atômicos; isto alterou a definição em curso das unidades de Tempo e de Frequência, bem como modificou a própria escala das referências temporais, como permitiu a construção dos Padrões Primários ou Absolutos de Tempo.

Por outro lado, a existência dos padrões físicos para a comparação das durações e das frequências, somente possível após 1960, trouxe do campo da Astronomia para o da Metrologia a responsabilidade final das medidas e avaliações temporais.

Esta alteração de rumo, prende-se, essencialmente a dois fatores básicos:

- 1 - Irregularidades na duração do movimento de rotação da Terra, com flutuações periódicas e aleatórias, suspeitadas muito antes de 1900 por Kepler, Newton, Emmanuel Kant, Lalande, Ferrel e Delaunay, mas que teriam que esperar a confirmação, face a insuficiência dos Padrões Mecânicos de Tempo para assinalar discrepâncias da ordem de  $10^{-4}$ , as mais sensíveis, na rotação terrestre.
- 2 - Construção dos Padrões Físicos de Tempo, os Relógios Atômicos, que atingindo as precisões de  $10^{-10}$  e  $10^{-13}$  e com estabilidade garantida, podem detetar e avaliar / com precisão, as menores irregularidades no movimento da Terra em torno do seu eixo de rotação, funcionando como elementos primários ou de primeira ordem para a conservação e medida do Tempo.

No nosso século, até o ano de 1973, já foram confirmadas/ e utilizadas três unidades fundamentais ou três padrões para as medidas de Tempo, a saber:

SEGUNDO SOLAR MÉDIO (Tempo Solar Médio) definido como a fração  $1/86400$  do Dia Solar Médio, indiretamente obtido pelos registros das passagens meridianas das estrelas horárias.

SEGUNDO DAS EFEMÉRIDES (Tempo das Efemérides, Tempo Gravitacional ou Tempo Newtoniano) definido como a fração  $1/31556925,9747$  do ano trópico 1900, a partir de Janeiro 0, às 12 horas T.E. Tal riqueza de detalhes na definição da unidade fundamental se justifica devido às irregularidades no período da rotação da Terra, ocasionando uma variação na duração do dia. Os dias não são iguais, como aconteceria se a velocidade de rotação da Terra fosse rigorosamente uniforme. A escala do Tempo das Efemérides é obtida, a longo prazo, indiretamente, pelas observações / relativas a astros com movimentos rápidos, como a Lua e os planetas Vênus e Mercúrio.

SEGUNDO ATÔMICO (Tempo Atômico) independente das observações astronômicas, portanto, isento das peculiaridades relacionadas com a constante universal da gravitação, mas profundamente dependente da constante  $h$  de Planck, do campo eletromagnético, é definido como: a duração correspondente a  $9\ 192\ 631\ 770$  períodos da radiação relativa a transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de Césio 133.

O Segundo Solar Médio (base da definição do Tempo Universal, ou Tempo Civil de Greenwich) foi homologado com a própria / institucionalização do Sistema Métrico Internacional. A partir de

1955, face a resolução da União Astronômica Internacional, foi substituído pelo Segundo das Efemérides. O Brasil, efetuou a substituição do Segundo Solar Médio pelo Segundo das Efemérides, um pouco mais tarde, logo após a realização da 11a. Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1960.

O Segundo Atômico, tem naturalmente, origem mais recente, tendo sido homologado pela 13a. Conferência Geral de Pesos e Medidas de 1967.

Finalmente, a 14a. Conferência Geral de Pesos e Medidas, reunida em Paris, em outubro de 1971 aprovou a seguinte definição do Tempo Atômico Internacional, preparada pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas:

" O Tempo Atômico Internacional é a coordenada de referência temporal estabelecida pelo Bureau International de l'Heure / com base nas indicações dos relógios atômicos em funcionamento em diversos estabelecimentos, conforme a definição do segundo, unidade de tempo do Sistema Internacional de Unidade."

Na sessão de junho de 1970, o Comité Consultivo para a definição do Segundo, estabeleceu regras para a utilização do Tempo Atômico Internacional, das quais é interessante, apenas, reproduzir a 4a. , que relaciona o Tempo Atômico com o Tempo Universal:

"4a.) A origem da escala do Tempo Atômico Internacional é definida conforme as recomendações da União Astronômica / Internacional ( XIII Assembléia Geral, Praga, 1967), isto é, que esta escala concorde aproximadamente com a do T.U. 2, à 0 h do dia 1 de janeiro de 1958".

### III - TEMPO ASTRONÔMICO

#### TEMPO SOLAR

O Tempo Solar é regido pela rotação da Terra em relação à direção SOL-TERRA.

O Tempo Solar se subdivide em:

TVL - tempo solar verdadeiro

TML - tempo solar médio

TMG - tempo médio em Greenwich = TU = TCG

TCL - tempo civil

TL - tempo legal

O Tempo Solar Verdadeiro de um dado instante é por definição, o ângulo horário aparente do Sol neste instante:

$$H_0 = T - \alpha_0, T \text{ sendo o Tempo Sideral}$$

Por causa da variação de cerca de  $\pm 1\%$  (relativo ao tempo sideral) causada pela excentricidade orbital da Terra, Tempo Solar Verdadeiro não é mais usado para fins sérios, embora possa se obter com facilidade de um relógio de Sol. IMPROPRIEDADES CIENTÍFICAS

O dia solar verdadeiro é definido como sendo o intervalo de tempo que separa duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano superior do lugar.

O Tempo Solar Médio é definido como 12h mais o ângulo horário do equinócio médio da data, menos a ascensão reta do "Sol fictício". EXPLICAR ????

A definição do Tempo Solar Médio não admite na prática, determinação em um caminho totalmente consistente por 2 razões:

(1) - O sol fictício não pode ser observado

(2) - A definição requer um simultâneo conhecimento do Tempo das Efemérides.

Antes de 1925, o Tempo Solar Médio era contado a partir do meio dia em lugar da meia noite. O dia solar médio iniciando / no meio dia, 12h após o início da mesma data civil é conhecido co mo dia astronômico. Para facilitar a computação cronológica, os dias astronômicos são numerados consecutivamente a partir de uma data suficientemente afastada; o número que representa um dia nes sa contagem é o número do dia juliano. A contagem destes dias co meça com o número do dia juliano 0 (zero), em 4713AC, calendário juliano. Na American Ephemerides, os argumentos são dados pelas datas julianas em acréscimo às datas gregorianas. Quando o argu mento é o tempo das efemérides, as datas juliana e do calendário se referem a dias das efemérides.

O período de um circuito completo do Sol médio fictício iniciado no instante em que sua ascensão reta é 18h40min é conhe cido como ano solar besseliano. Em 1972 o início do ano besselia no aconteceu em janeiro 1,252d do tempo das efemérides; para o calendário besseliano este instante é dito 1972,0. Devido ao ex cesso secular da ascensão reta do Sol médio fictício sobre a lon gitude média do Sol, o ano besseliano é mais curto do que o ano tropical pela quantidade  $0,148 s \times T$ , sendo T o nº de séculos a pós 1900.

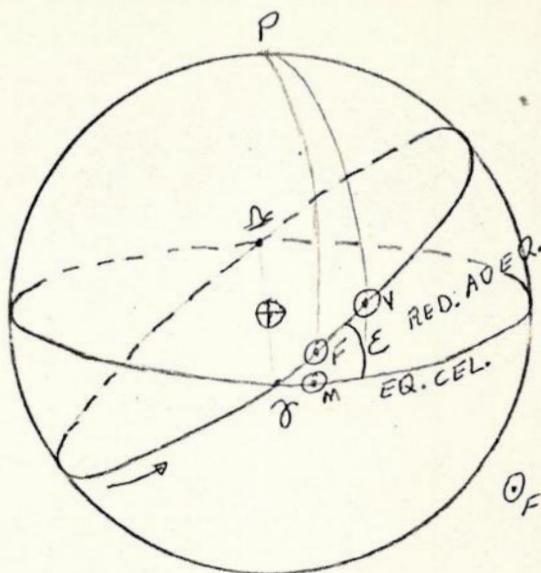
Se define Tempo Civil como sendo o Tempo Solar Médio au mentado de 12 horas.

A diferença entre Tempo Solar Verdadeiro (TVL) e Tempo Solar Médio (TML) é chamada a Equação do Tempo (ET). A equação do tempo é fornecida nos Anuários Astronômicos, nas tabelas do Sol para cada dia do ano. *(a mudança de sinal de ET)*

A equação do tempo se anula 4 vezes ao ano e o seu valor/ máximo é de aproximadamente  $\pm 16^m$ . A E.T. nos Anuários é fornecida para Oh TU.

hoje:  $TVL = TML + ET$  } ?  
 ambig  $TML = TVL + ET$  }

Anuário 1900



$\odot_V \rightarrow \odot_F$  equação do centro

$\odot_F \rightarrow \odot_M$  redução ao equador

$\odot_F$  coincide com  $\odot_V$  { perigeu / apogeu

Tempo Legal - As horas astronômicas de lugares situados em meridianos diferentes são necessariamente diferentes. A convenção dos fusos horários que a maior parte dos países civilizados, adotaram veio proporcionar justamente a unificação das horas em regiões de considerável extensão geográfica, acrescentando a vantagem de ser em geral igual a um número inteiro de horas a diferença, se a houver, entre dois países, estados, ou em geral, entre dois pontos quaisquer do globo. Este sistema chamado das horas legais, consiste em dividir a Terra em 24 fusos tendo o primeiro para meridiano central o meridiano de Greenwich.

Por convenção, a hora legal num certo lugar é a hora civil do meridiano central do fuso a que esse lugar pertence, em geral pela sua situação geográfica e, excepcionalmente, por uma opção especial, previamente decretada. As vantagens do sistema legal são evidentes. Os relógios em trânsito, por exemplo, só sofrerão alteração (de uma hora justa ou de meia hora, conforme o fuso) na passagem de um fuso para outro; essa precaução deverá ser sempre tomada sob pena de arriscar-se o viajante a equívocos de hora, sobretudo importantes em viagens por estrada de ferro.

Tempo legal = TU - fuso

(e avião?)  
é preciso atualizar o relógio

No Brasil a hora legal foi introduzida por decreto de 1º de janeiro de 1914.

TEMPO SIDERAL

É o mais simples dos vários tempos astronômicos, é o mais diretamente ligado com as observações. Entende-se por Tempo Sideral ao tempo medido em relação à Terra fixa e à esfera celeste girando de E para W.

O dia sideral é definido como sendo o intervalo de tempo que separa duas passagens consecutivas do ponto Vernal pelo meridiano superior do lugar; é subdividido em 24 horas, 1440 minutos e 86400 segundos siderais.

Tendo em vista que o ponto Vernal não é acessível à observação direta, a determinação do Tempo Sideral é feita em função da observação do Sol, cujo movimento aparente na eclíptica o define. Assim, na realidade, o Tempo Sideral é um tempo definido por observações do Sol, e não unicamente de estrelas, que constituem um padrão secundário na sua determinação.

Em um dado lugar, o ângulo horário do ponto Vernal é definido em um dado instante como a hora sideral deste instante. Levando em conta a relação fundamental:  $T = \alpha + H$ , a ascensão reta do meridiano será igual ao Tempo Sideral.

Em virtude do deslocamento dos planos fundamentais pelos fenômenos da precessão e nutação, a posição do ponto Vernal não é fixa, devendo-se considerar um equinócio verdadeiro e um equinócio médio.

Em consequência considera-se o Tempo Sideral Verdadeiro ou Aparente, e o Tempo Sideral Médio ou Uniforme.

O Tempo Sideral Médio flui uniformemente.

O fluxo do Tempo Sideral Verdadeiro não é uniforme uma vez que irregularidades no movimento do ponto Vernal denominadas/

32

genericamente de Equação dos Equinócios tiram o caráter da uniformidade do Tempo Sideral medido.

A marcha dos padrões de Tempo sendo determinada ao milésimo de segundo pôs em evidência estas desigualdades. Por isto, os relógios de precisão de alguns observatórios não dão mais o Tempo Sideral e sim o Tempo Médio, servindo o primeiro como um auxiliar na observação.

Equação dos Equinócios (E.Q.), compreende termos de longo período da nutação em ascensão reta mais os de curto período da nutação em ascensão reta.

$$T.S.V. - T.S.M. = E.Q.$$

O Tempo Sideral em Greenwich é obtido somando a longitude oeste do meridiano local ao Tempo Sideral Local.

$$\begin{aligned} 1 \text{ dia sideral} &= \frac{86400}{86636,555} \text{ dia médio} \\ &= 0,9972696 \text{ dia médio} \\ &= 86164,09 = 1 \text{ dia médio} - 3 \text{ } 55,91 \end{aligned}$$

Este resultado numérico oferece uma grande importância, sendo de um uso constante para a passagem do Tempo Sideral ao Tempo Médio ou vice-versa.

TEMPO GRAVITACIONAL

TEMPO UNIVERSAL

É definido pelo movimento rotacional da Terra, e deduzido do movimento diurno; não é um padrão uniforme de tempo.

O Tempo Universal é dado por relações convencionais com o Tempo Sideral, o qual pode ser rápido e eficientemente determinado pelo movimento diurno das estrelas.

O Tempo Universal é o tempo solar médio em Greenwich, computado em 24 horas solares médias, com origem a 0h de Tempo Sideral (meia noite).

$TU = 12h \text{ ângulo horário do sol médio em Greenwich}$

O T.U. diretamente determinado das observações recebe o nome de TU0, o qual após correções para as variações do meridiano do observador devido ao movimento dos polos, passa a constituir o TUL. Quando este por sua vez é corrigido para as variações sazonais médias na razão da rotação da Terra temos o TU2. Ele é a mais próxima aproximação do tempo "uniforme" baseado em primeiro lugar na rotação da Terra. TUL e TU2 são afetados pelas incertezas instantâneas que pode ser maior que 5 mseg., embora este limite não deva ser encarado com rigor.

Uma outra medida, designada TUC, será examinada em Tempo Atômico.

TEMPO DAS EFEMÉRIDES

O mais preciso padrão de tempo astronômico é o tempo das efemérides definido como a medida uniforme de tempo decorrentes das leis da dinâmica e determinado em princípio, do movimento orbital dos planetas, especialmente o da Terra (tábuas do Sol de Newcomb).

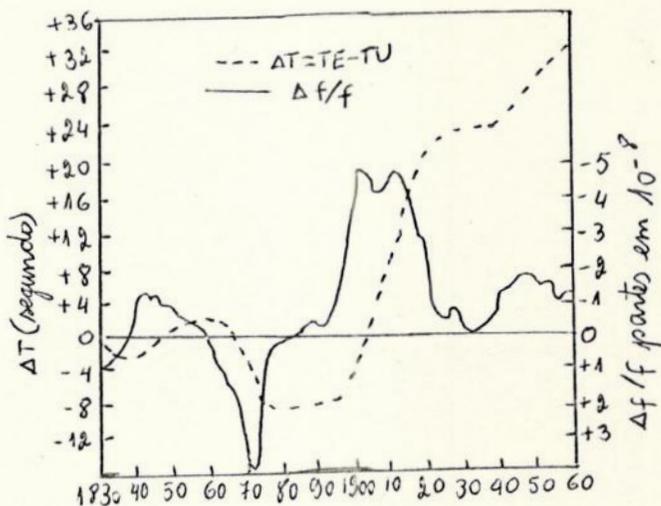
O melhor tipo de observação para a determinação do T.E. são as relativas ao movimento lunar, em especial, através das ocultações lunares. Contudo dado os longos prazos exigidos nas medidas

rigorosas, na prática se determina correções  $\Delta T$  a serem aplicadas ao TU para determinação do tempo das efemérides:

$$TE = TU + \Delta T$$

A importância do T.E. está contida na sua uniformidade, entretanto o T.U. é o padrão, para as observações astronômicas, para a contagem civil do Tempo, e para a astronomia aplicada.

É o movimento anual do Sol em longitude que permite determinar numericamente o T.E.



*Diferenças de tempo e frequência entre T.U. e T.E.*

IV - TEMPO ATÔMICO

TEMPO ATÔMICO

Dado um padrão de frequência atômica ( tal como a irradiação de césio) e uma unidade de intervalo de tempo baseado neste ( o segundo atômico), uma escala de tempo atômico pode ser derivada.

Todas as subseções, precedentes lidaram com as medidas de tempo derivadas do movimento de objetos materiais. Em princípio, qualquer processo repetitivo com uma alta precisão adequada/ pode ser usado para definir a unidade de tempo. Tal é o processo da ressonância atômica correspondente a transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do Césio 133. A frequência desta ressonância é 9192613770Hz, com uma estabilidade de  $2 \times 10^{-13}$  para um tempo médio de um dia. Estabilidade neste contexto significa intercomparação entre dois osciladores operando sob condições idênticas. A calibração foi regulada de maneira a fazer com que o segundo atômico seja definido por essa frequência de ressonância, como o mais próximo possível da definição de segundo das efemérides.

*explicar*

Embora, o fluxo possa ser definido desse modo, a ressonância atômica não pode ser usada para definir período, o qual requer um evento único. O período para o relógio de tempo atômico nos U.S.A. ( Al ) é fornecido pela definição que se segue: no período 1958 janeiro 1, as  $0^h 0^m 0^s$  TU2, Al era precisamente  $0^h 0^m 0^s$ . Uma vez tendo o fluxo e período definidos, Al é o padrão de tempo atômico usado nos U.S.A. e em alguns outros países. Ele não é idêntico à escala de tempo atômico (TAI) adotado pelo B.I.H., o qual é o padrão internacional, diferindo em período por poucos milissegundos.

Enquanto o tempo do relógio atômico é certamente uma apro

ximação mais próxima do tempo uniforme do que é TEL, não existem razões para chamá-lo de tempo uniforme. É sabido que a frequência de transição deve ser submetida à variações devidas a efeitos relativistas e à variações no campo magnético local. Tais efeitos foram observados, mais recentemente por Hafele e Keating (1972), cujos resultados confirmam a teoria do relógio relativista.

TEMPO UNIVERSAL COORDENADO

*explicar ???*

TU2 quando difundido de maneira uniforme recebe o nome de Tempo Universal Coordenado, que é mantido próximo do TU2 pela introdução no TUC de valores discretos toda vez que a diferença entre os dois parâmetros atinge uma tolerância arbitrária pré-fixada.

O Tempo Coordenado é identificado como ideal de tempo uniforme no qual a definição do TE é baseada.

Falando de maneira geral, o Tempo Coordenado pode ser interpretado como o tempo atômico médio. A transformação do tempo próprio para o tempo coordenado depende da posição e da velocidade inercial do observador dentro do sistema solar e tem origem na variação instantânea do tempo próprio em relação ao tempo coordenado.

$$t = \gamma_{432,15} + 1,658 \times 10^{-3} ( \text{sen } E + 0,0368 ) + 2,03 \times 10^{-6} \cos \psi ( \text{sen } ( TU + \lambda ) - \text{sen } \lambda ) + \dots$$

onde:

- t = tempo coordenado em segundos
- $\gamma$  = tempo do relógio atômico ( tempo próprio )
- E = anomalia excêntrica do Sol
- TU = tempo universal
- $\psi$  = latitude geocêntrica do relógio
- $\lambda$  = longitude do relógio, a leste de Greenwich.

V - ANEXOSConversões de Intervalos de Tempo.

Transformação de Tempo Solar Verdadeiro em Tempo Médio

$$TL = TVL - (ET)_0 - (\dot{HET})(TU) + \lambda + F$$

onde:

$TL$  = Tempo Legal  
 $TVL$  = Tempo Solar Verdadeiro  
 $ET$  = Equação do Tempo  
 $\dot{HET}$  = variação horária da  $ET$   
 $\lambda$  = longitude do lugar.  
 $F$  = Fuso.

Exemplo:

$$R.J. \left\{ \begin{array}{l} TVL = 12h \ 00min \ 00s \\ F = -3h \\ DATA = 16/01/77 \\ \lambda = 2h \ 52min \ 44,69s \end{array} \right.$$

TVL	12	00	00
-ET <sub>0</sub>		9	38,5
-( $\dot{HET}$ )(TU)			10,44
+ $\lambda$	2	52	44,69
+F	-3		
TL	8h	57min	26,37s

# Transformação de Tempo Médio em Tempo Solar Verdadeiro

$$TVL = TL - F + (ET)_0 + (YHET)(TU) - \lambda$$

Exemplo:

$$R.J. \begin{cases} TL = 2h & 21min & 36,572s \\ F = -3h \\ DATA = 16/01/77 \\ \lambda = 2h & 52min & 44,69s \end{cases}$$

TL	2	21	36,572
-F	+3		
TU	5	21	36,572
(ET) <sub>0</sub>	+	9	38,5
(YHET)(TU)	+		0,313
TU <sub>0</sub>	5	30	75,385
-λ	2	52	44,69
TVL	2h	38min	30,695s

# Transformação de Tempo Sideral em Tempo Médio

$$TL = TSL + \lambda - TSG_0 - \underbrace{\sqrt{(TSG - TSG_0)}}_{\text{correção}} - EQ + F$$

Exemplo:

$$\left\{ \begin{array}{l} TSL = 10^h \ 19^m \ 26,15^s \\ \lambda = 2^h \ 52^m \ 44,69^s \\ F = -3^s \\ DATA = 10/05/77 \end{array} \right.$$

TSL	10	19	26,15
+λ	2	52	44,69
TSG	13	12	10,84
+24	37	12	10,84
-TSG <sub>0</sub>	15	10	43,135
- correção	22	1	27,705
		3	0,075
-EQ	21	58	27,630
			0,00
TU	21	58	27,630
+F	-3		
TL	18 <sup>h</sup>	58 <sup>min</sup>	27,630 <sup>s</sup>

## Transformação de Tempo Médio em Tempo Sideral

$$TSL = TL - F + TSG_0 + \Delta TV - EQ - \lambda$$

$\Delta TV$  = correção (tabelado com a denominação de conversão de tempo médio em sideral)

$EQ$  = equação dos equinócios.

Exemplo:

$$R.J. \begin{cases} TL = 19h \ 55min \ 10,0s \\ F = -3 \\ \lambda = 2h \ 52min \ 44,69s \\ DATA = 04/04/77 \end{cases}$$

TL	19	55	10
-F	3		
<hr/>			
TU	22	55	10
TSG <sub>0</sub>	12	48	47,194
$\Delta TV$		3	46,905
<hr/>			
	34	106	103,099
TSG =	34	106	103,099
-EQ			0,05
<hr/>			
TSG	34	106	103,149
- $\lambda$	2	52	44,69
<hr/>			
TSL	32	54	58,459

$$TSL = 8h \ 54min \ 58,459s$$

## VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MACHADO, Luiz Eduardo da S.- Hora: Conservação, recepção e transmissão. Regulamentação da Hora Oficial (R.J., 1973 )
2. Bureau International de L'Heure -Rapport Annuel pour 1975 (Paris - 1976)
3. MULHOLLAND, J.D. - Measures of time in Astronomy ( Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 84 nº 499, jun, 1972)
4. PARCELIER, P. et KOCH, C. - Le Controle des Horloges Atomiques ( Paris - 1970)
5. Frequency and Time Standars ( Application Note 52, Hewlett Packard CO., nov. 1965)
6. KOVALEVSKY, J. - Le temps des éphémérides (L'Astronomie , set. 1964)
7. DECAUX, B. - La détermination du temps atomique ( Bulletin de la Société Astronomique de France, octobre 1964)
8. TARDI, P. - La définition et la mesure du temps (L'Astronomie, octobre 1964)
9. PETON, A. - Le temps physique: Qu'est- ce que c'est? (L'Astronomie, mars 1976)
10. DANJON, A.- Variations saisonnière et aléatoire de la rotation de la Terre ( L'Astronomie, février 1959)
11. Esplanatory Supplement to The Astronomical Ephemeris and The American Ephemeris and Nautical Almanac ( 1961)
12. ESSEN, L. - The Measurement of time (Vistas in Astronomy , vol. 11, 1967)
13. DANJON, A. - Astronomie Générale (Paris - 1953)
14. Anuário do Observatório Nacional ( 1959 e 1960)