

# 宇宙科学II (電波天文学) 第4回

## 電波干渉計

## 前回の復習

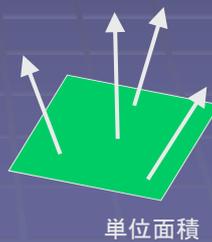
## 電波の強度

- フラックス(flux): 電波の強さを表す量

単位時間、単位周波数あたりに単位面積を通過する電磁波のエネルギー

単位例:  $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$

$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$

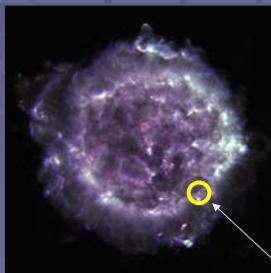


## 輝度

- 輝度 (Brightness)

フラックスのうち、ある方向(立体角)からきているものを表す

(単位時間、単位周波数あたりに単位面積、単位立体角を通過する電磁波のエネルギーを表す)



電波写真の例 (超新星残骸Cas A):  
天球面上の各点での輝度から電波写真が得られる。

フラックスはこれをすべて積分したもの。

ある立体角から来ているフラックスが輝度

## 望遠鏡の分解能

- 分解能を決める要因： 波長と望遠鏡の口径

$$\Theta = \lambda / D$$

$\Theta$ : 分解能

$\lambda$ : 波長、  $D$ : 望遠鏡口径

望遠鏡を大きくすると、より細かくものが見える  
また、集光力も増えるので感度も向上する

大きい望遠鏡ほど分解能、感度とも良い  
(その分建設費も高いが...)

## 巨大望遠鏡の例

- Green Bank 100m鏡



- Effelsberg 100m鏡



# 干渉計の基礎

- 複数の望遠鏡を合成する手法
- 干渉計の基本的な観測量：  
幾何学的遅延時間 $\tau_g$



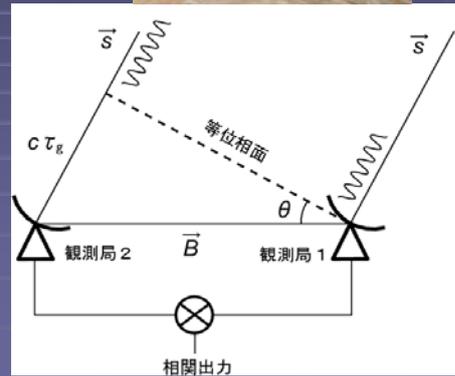
$$\tau_g = \frac{\vec{s} \cdot \vec{B}}{c},$$

$s$ : 天体の方向ベクトル

$B$ : 基線ベクトル

$c$ : 光速

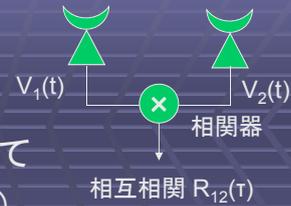
※ここでは、簡単のため天体は点源としている



電波干渉計の模式図

## 電波干渉計(続)

# 相関器



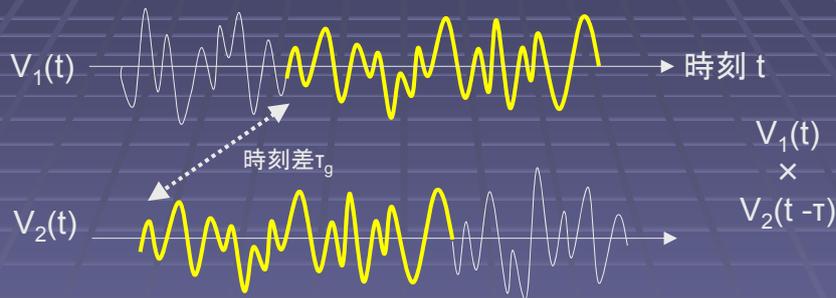
- 各アンテナからの信号を掛け合わせて干渉させる装置 (= 干渉計の心臓部)
- 2つのアンテナでの受信電圧  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$  に対して、以下の相互相関関数  $R_{12}(\tau)$  を求める

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V_1(t) V_2(t - \tau) dt$$

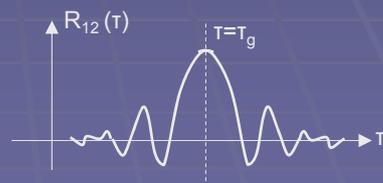
$T \rightarrow \infty$  は十分多くのサンプルをとるという意味。実際には、たとえば  $v=1\text{GHz}$  なら  $T=1$  秒でも10億サイクルのデータが含まれるので実効的に無限大と考えてよい

## 直感的な見方

- 相関器はある種のパターンマッチングを行っている。



- $R_{12}(\tau)$  は  $V_1$  と  $V_2$  を時刻  $\tau$  ずらして積分したもの。  $\tau$  が  $\tau_g$  に一致すると当然最大になる。これより遅延時間を求めることが可能



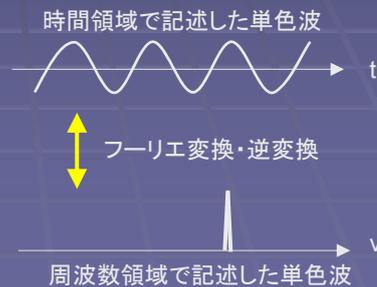
## 相関関数とパワースペクトル

- 相関関数をフーリエ変換するとパワースペクトルになる(詳しくはスペクトル解析などの教科書を参照)  
→ 相関結果からスペクトル(輝線周波数等)の情報も得られる
- フーリエ変換とは、ある物理現象を時間領域(t)から周波数領域(ν)に(あるいは逆に)変換する演算

$$X(\nu) = \int x(t) e^{-2\pi i \nu t} dt,$$

$$x(t) = \int X(\nu) e^{2\pi i \nu t} d\nu,$$

フーリエ変換と逆変換  
(干渉計でもっとも重要な数学?)



## 相関器

- つい最近までは専用計算機(スーパーコンピューター)
- 最近はパソコンのクラスターで処理する、ソフト相関器が出現



国立天文台三鷹のFX相関器  
(VERAなどで使用)



米国立電波天文台のソフト相関器(PCクラスター)

通常、波は複素数として処理される(複素相関器)

→ 観測者が手にするデータも複素数(の羅列)!  
これをvisibilityという

## 干渉計観測のまとめ

- アンテナ間の相互相関から

- 1) 幾何学的遅延時間が求まる
- 2) 遅延時間から点源の天体位置が求まる
- 3) 天体画像が点源の重ね合わせで得られる
  
- 4) 相互相関関数のフーリエ変換からスペクトルの情報が得られる

これらより、最終的に各周波数での天体画像が得られる。

## 電波干渉計の画質について

## 画質を決める要因

- 情報量(相互相関)の数が多ければ多いほどよい
- 相互相関数は基線数 $N_{\text{base}}$ に比例する

$$N_{\text{base}} = N_{\text{ant}} \times (N_{\text{ant}} - 1) / 2$$

アンテナ数 $N_{\text{ant}}$ のおよそ2乗に比例  
→ アンテナ数は多いほどよい

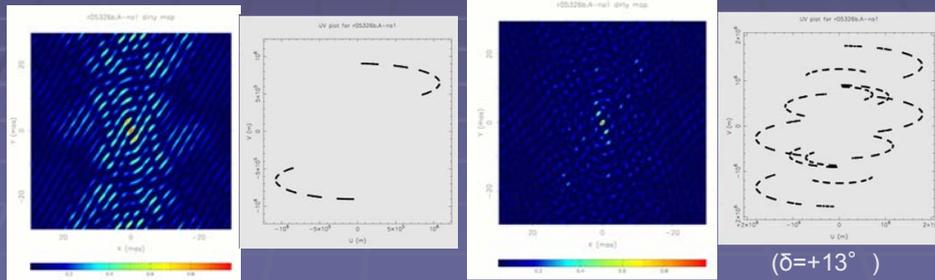
## super-synthesis (超合成)

- アンテナ位置(基線)は地球回転とともに時々刻々変化する
- この効果を使い、時刻の異なる様々な相関情報を合成することで、さらにより画像を得ることが可能(super-synthesis)
- ただし、観測時間(数時間~24時間)内で天体像は不変であることを仮定

※天文現象は時間スケールが極めて長いので、通常はこの仮定は正しい

## UV平面とビームパターン

- 天体から見た基線ベクトルの軌跡の投影をUV平面という。この平面が均質にうまると、良いイメージが得られる。
- 強度1の点源を観測したときに得られるイメージをビームパターンという。これがきれいな方が画質が良い。



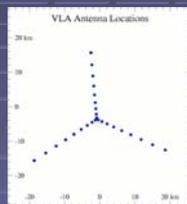
VERAの水沢一入来基線のUVとビーム

通常のVERA(4局6基線)のUVとビーム

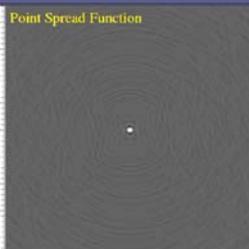
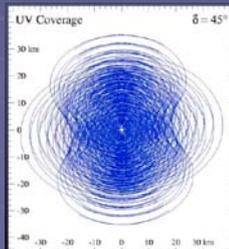
## VLAのビームパターン

- 27台のアンテナをY字状に最適化して配置

局配置



イメージ



UVとビームパターン

## よい画像を得るには

- 電波干渉計の画質を改善するには

- 1) アンテナの数を増やす

- 2) UV平面がよく埋まるようにアンテナ配置を工夫する

- 3) 地球回転の効果を用いて超合成を行う

## 超長基線電波干渉計

(VLBI: Very Long Baseline Interferometer)

## VLBIとは？

- 電波干渉計の分解能も  $\theta = \lambda / D$   
ただし、Dは干渉計の最大基線長
- 基線長Dを地球規模にとれば、究極の分解能を持った装置が得られる

→ VLBI: Very Long Baseline Interferometer

## 結合素子型干渉計とVLBI

- 両者は原理的に同じだが、技術的には違いがある。

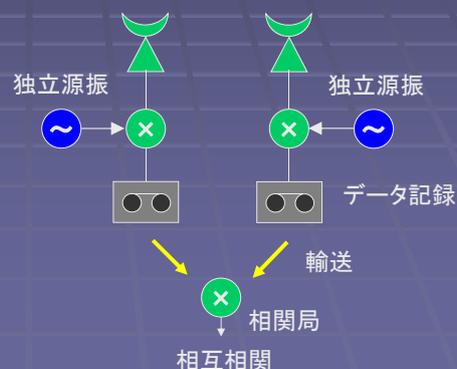
結合素子型:

すべてのアンテナはケーブルで接続されていて、原振も共通。



VLBI:

アンテナ間は接続されていない。原振は独立で、データは記録して相関局へ輸送。



## VLBIを特徴づける装置

- 周波数標準  
原振が独立なので、アンテナ間で可干渉性を保つため、超高安定度の原振(周波数標準)が必要



水素メーザー  
(アンリツ製)

- レコーダー  
相関局へのデータ輸送のため、記録媒体にデータを記録する(磁気テープ、HDDなど)



データレコーダー DIR-2000とテープ(ソニー製)

## VLBI観測網の例

VLBA (米国)  
25m x 10台



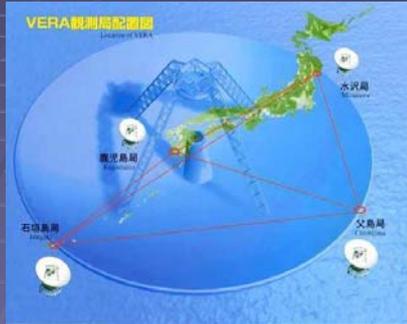
EVN (ヨーロッパを中心に世界中の望遠鏡が参加)



EVN Members MAG 03/2002

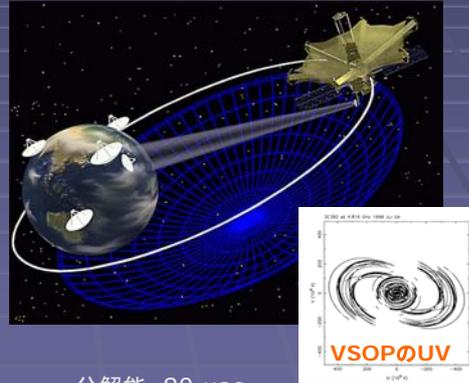
## VLBI観測網 2

VERA  
20m x 4台



分解能 1 mas  
波長1 cm, D = 2300 km

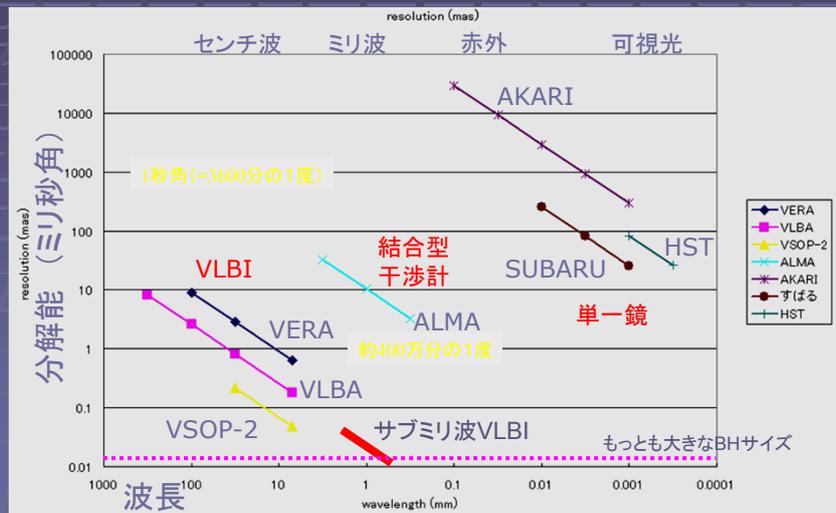
VSOP (VLBI用アンテナを  
積んだ衛星, 1997年打上)



分解能 80  $\mu$ as  
波長1 cm, D = 30000 km

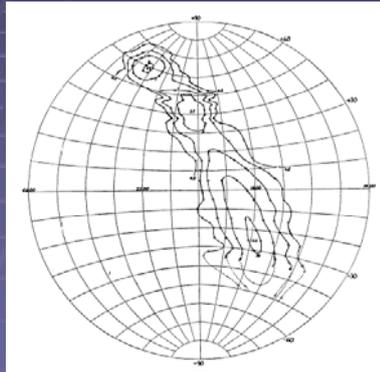
## VLBIの分解能

### ■ 様々な望遠鏡の分解能の比較



## 電波観測技術の進歩

- 70年余りのわずかな時間で、電波望遠鏡はすべての波長帯で最も高い分解能を達成(干渉計技術による)



リーバーの電波地図 (1944)

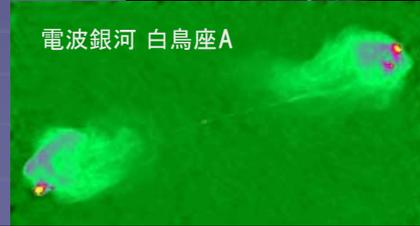
わずか70年

現在の  
電波写真

超新星残骸 Cas A



電波銀河 白鳥座A



## 干渉計の産みの親: マーチン・ライル

- Martin Ryle (1918-84)  
英国ケンブリッジ大学で  
電波干渉計を開発

同時受賞はA. Hewish  
(パルサーの発見)



### The Nobel Prize in Physics 1974

"for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars"



**Sir Martin Ryle**  
1/2 of the prize  
United Kingdom

University of Cambridge  
Cambridge, United Kingdom  
b. 1918  
d. 1984



**Antony Hewish**  
1/2 of the prize  
United Kingdom

University of Cambridge  
Cambridge, United Kingdom  
b. 1924

1974年ノーベル賞

# 電波干渉計の関連技術

## 関連技術1: 測地VLBI



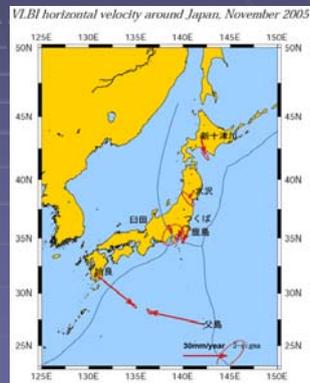
- VLBI(電波干渉計)は、位置の判っている星の観測から地面の動きを求めることも可能  
(大陸移動説を実証)



国土地理院の  
筑波32m望遠鏡



日本地図における  
VLBIの役割



日本列島の動き

## 測地観測

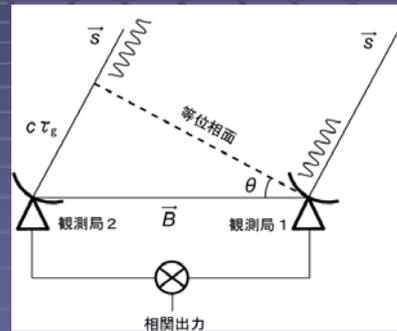
- 干渉計の基礎方程式

$$\tau_g = \frac{\vec{s} \cdot \vec{B}}{c},$$

において天体位置 $s$ を既知とすると、幾何学的遅延時間 $\tau_g$ の観測から基線ベクトル $B$ の情報が得られる。

= 測地観測

測地観測は干渉計による天文観測と表裏一体の関係にある。  
(局位置は3次元なので、複数の $\tau_g$ 計測が必要)



電波干渉計の模式図

## 関連技術2: GPS

- GPS (Global Positioning System)

24機の人工衛星からの電波によって位置を計測するシステム。電波干渉計と同じ原理で遅延時間を用いて、位置を計測 (カーナビなど日常生活で利用)。



GPS衛星: 衛星には原子時計が積まれ、時刻と衛星位置を地表にむけて送信している



GPSの分布の模式図

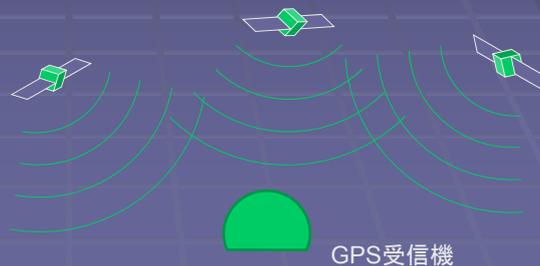
## GPS測位

- 位置3次元+受信機の時計ずれを同時に求めるために、最低4個の衛星を観測
- 必要な情報は衛星位置と時刻  
→ GPSは正確な時計でもある

精度

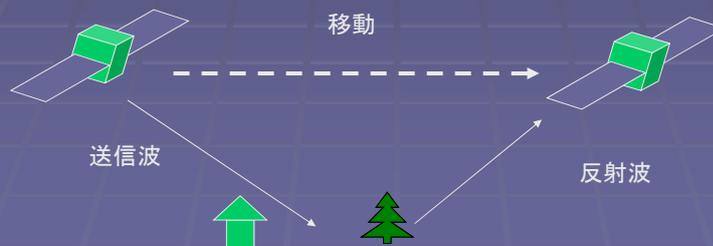
$c\Delta t \sim 30 \text{ m}$ なら

$\Delta t \sim 0.1 \mu\text{sec}$



## 関連技術3: 開口合成レーダー

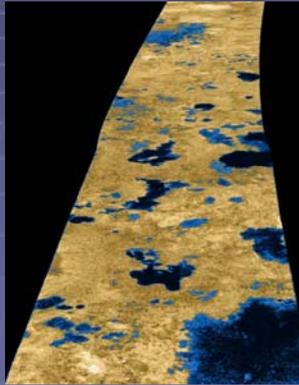
- 開口合成レーダー(SAR; Synthetic Aperture Radar)  
移動する衛星からレーダーを目標に照射し、送信波と受信波を干渉させる。リモートセンシングで活躍



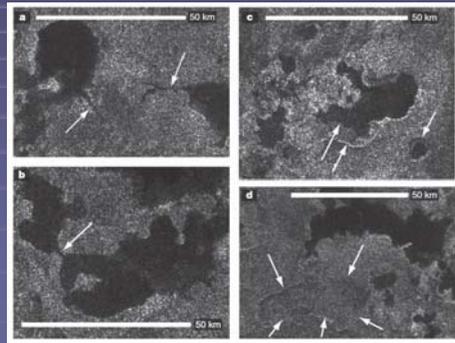


## カッシーニによるタイタン観測

- カッシーニがタイタン近傍を航行した際に、開口合成レーダー観測を行い、メタンの湖を発見(2007)



カッシーニが得たレーダー画像

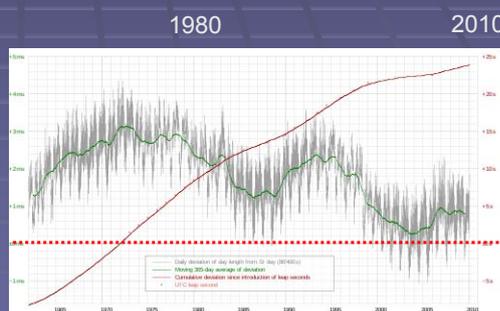


地形の詳細。レーダー反射率の低い、湖のような地形が存在

時と暦

## 天文時と原子時

- 昔の1秒の定義  
太陽の子午線通過の間隔を1日(=86400秒)としていた(生活に直結)。現在もUT1という「天文時」が存在。
- 今は原子時計が基準の「原子時」
- 地球自転は細かく変動する(大気への角運動量輸送等)  
安定度  $\sigma_y \sim 10^{-8}$  程度。
- そのため、原子時の12時は天文時の正午(南中)とずれていく。これを補正するのが「うるう秒」



最近50年の地球回転(1日の長さ)の変動

## セシウム原子時計と1秒

- セシウム原子基底状態の超微細構造遷移を利用
- 水素メーザーは短期安定度( $\tau < 1000$  sec)に優れVLBIなどで役に立つが、セシウム原子時計は長期安定度に優れる。

- 1秒の定義：  
セシウム133の原子の基底状態の2つの超微細準位の間遷移に対応する放射の周期の

91億9263万1770倍

に等しい時間  
(つまりこの放射の周波数を  
 $\nu = 9.192631770$  GHzとする定義)



セシウム原子時計(NiCT)

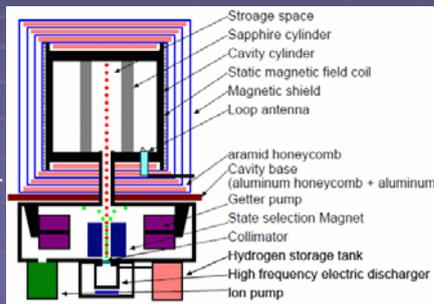
# 水素メーザー

- HI 21cm線を用いた人工的なメーザー。超高安定度の周波数標準として用いられる。
- 短期安定度はセシウム時計より良い( $\sigma \sim 10^{-13}$ )



左: アンリツ社水素メーザー

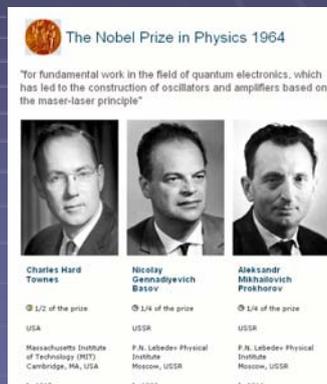
右: 水素メーザーの模式図



# メーザーの発明

- 最初のメーザーはタウンズらによる人工的なもの(マイクロ波増幅技術として, 1954年)
- その後、宇宙空間でのメーザー現象が発見された

レーザーは現在の日常生活に欠かせない技術  
 レーザーポインター、  
 CD、DVD  
 加工用レーザー、医療用レーザー等



1964年ノーベル賞  
(メーザーとレーザー)

## 時計の安定度

ある時間幅Tの間にどれくらいずれるか( $\Delta t$ )で決まる  
 $\sigma \sim \Delta t / T$

一日に1秒くるう時計	$\sigma \sim 10^{-5} @ 10^5 \text{ sec}$
天文時(地球自転)	$\sigma \sim 10^{-8} @ 10^5 \text{ sec}$
水素レーザー	$\sigma \sim 10^{-15} @ 10^3 \text{ sec}$
セシウム原子時計	$\sigma \sim 10^{-15} @ 10^5 \text{ sec}$
光格子時計	$\sigma \sim 10^{-17} @ 10^3 \text{ sec}$

...

## 国立天文台と「中央標準時」

- 法律で規定されている日本の時刻は「中央標準時」
- これを決定・維持するのは国立天文台
- 国立天文台(文科省)は「中央標準時」を管理  
国立天文台の法律上の役割:「天文学及びこれに関連する分野の研究、天象観測並びに暦書編製、**中央標準時の決定**及び現示並びに時計の検定に関する事務」(現行の国立大学法人法施行規則)

## 中央標準時と日本標準時

- 「中央標準時」は明治28年に定義された言葉。日清戦争により台湾が日本領となり、東経135度を中央標準時、東経120度を西部標準時とした(台湾+宮古列島、八重山諸島)。当時、時刻は天文時であり、その測定・維持は天文台の役割だった。

これが依然法律上有効である。国立天文台水沢の保持室では、原子時計が4台あり、中央標準時が決定されている。  
(日本標準時とは別のもの !!)

- NiCT(総務省)は、「周波数標準値を設定し、標準電波を発射し、及び標準時を通報すること」と法律に規定されている。「日本標準時」はNiCTが作り報時している。これは法律には定義されていないが、国民生活はこちらにリンクしている。

現実と法律がかみ合っていない...

## 国立天文台と国民祝日

- 暦要項  
国立天文台が発表する日本の公式な暦。  
前年の2月に官報にて公示される。
- 国民祝日のうち、日付が規定されていない「春分の日」「秋分の日」は暦要項によって決定されている。
- その他の暦も、この要項による