

時間学公開講座 in 山口

# 「時間学への招待」

第2回 2022年11月19日

藤澤 健太（山口大学 時間学研究所）

# 各回の内容

## • 第1回 11月12日【暦】

- 宇宙 宇宙の現象と我々の生活には関連があり、それを端的に表しているのが暦である。
- 社会 暦には、生活をリズムづける特別な区切り（祝祭日）がある。20世紀には、この区切りのありかたを国家や企業が大きく変える。

## • 第2回 11月19日【時間を守る】

- 宇宙 精密な時計を使うことで、宇宙の観測や研究が発展してきた。特に最近のブラックホールの撮像では、原子時計が重要であった。
- 社会 時間厳守という考えは、学校や企業や鉄道など、近代的な施設・組織の登場をきっかけに末端の民衆にまで広まった。

## • 第3回 11月26日【進化】

- 宇宙 宇宙は不変なものではなく、ビッグバンによって始まり、現在まで変化を続けている。これを宇宙の進化史と呼び、人間もその中に位置づけられる。
- 社会 進化論が日本社会に紹介され普及をはじめたのは明治時代である。それは当時のインテリ層の時間イメージに大きな影響をあたえた。

# 日時計：精密な時間のはじまり

- 1日
  - 太陽が空を通過する運行の周期
  - あらゆる「時間」の基礎
- 時間の計測 = 日時計
  - 太陽の南中から次の南中までを1日とする
  - 棒を立てて影の長さを計れば、南中時刻 = 真昼を決められる
- 時間、分、秒
  - 1日を24分割して1時間、1時間を60分割して1分、1分を60分割して1秒を作る
  - $1日 = 60 \times 60 \times 24 = 86400$ 秒 (約10万秒)



日時計のレプリカ (セイコーミュージアム)

# 機械式時計：振り子時計

- 様々な歴史的時計
  - 漏刻（水時計）、香時計、砂時計
- 機械式時計
  - 錘やゼンマイを動力機構にした時計
- 機械式時計開発の歴史
  - 1090年、中国で機械式時計（動力は水）が作られる
  - 1300年頃、ヨーロッパで重錘式機械式時計が作られる
  - 1583年、振り子の等時性の発見（ガリレオ）
  - 1656年、振り子時計（ホイヘンス）  
→高精度、1日に数分というわずかなずれ



# クロノメーター：大航海時代

- 大洋の航海
  - 大洋の航海のために、自分の位置を知る必要
  - 天体位置の観測と正確な時刻から自分の位置を知る
  - 長期間の航海中、揺れる船の中で正確さを保つ時計が必要
  - 技術開発競争、懸賞金
- クロノメーター
  - 時計職人ジョン・ハリソン
  - 1759年「クロノメーターH4」を製作
  - イギリスからジャマイカまで81日間航行した間に8.1秒遅れただけ（Wikipediaより）
- 時計技術が大洋の航海を発展させた



クオーツ

# 水晶時計：あらゆる現代機器

- 水晶の結晶の振動
  - 20世紀になって開発された
  - 水晶（石英,  $\text{SiO}_2$ ）の結晶に振動電圧を加えると特定の振動数で安定に共鳴する
- 特徴
  - 安価、小型
  - 高い安定度
    - $10^{-6}$  = 100万秒（約10日）で1秒のずれ
- 広い用途
  - ほとんどあらゆる現代的な電子機器に内蔵されている
  - スマホ、パソコン、テレビ、自動車、炊飯器、電子レンジ、原子時計...



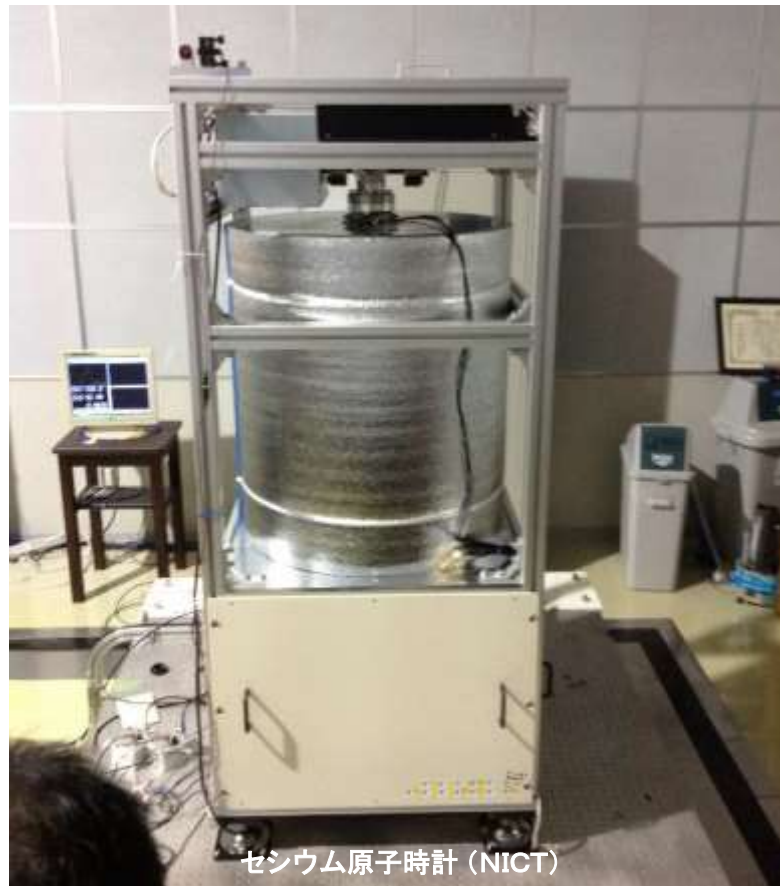
1000円の腕時計「チープカシオ」

# 原子時計

- 圧倒的高精度
  - $10^{-14}$ を容易に達成できる
  - 1年間に0.3マイクロ秒しかずれない
- 時間の定義
  - 20世紀中頃まで「地球・天体の運動」
  - 1967年～現在「原子の振動」
- 現在の時間（1秒）の定義

「セシウム133原子の基底状態における2つの超微細準位の間遷移に対応する放射の周期の9192631770倍を1秒とする」

  - 天体の動きも地球の自転も無関係
  - 秒を定義して、分、時、日を作る
  - 国際度量衡局
    - 長さ、重さ、時間などをの単位を統一する国際的な維持供給機関



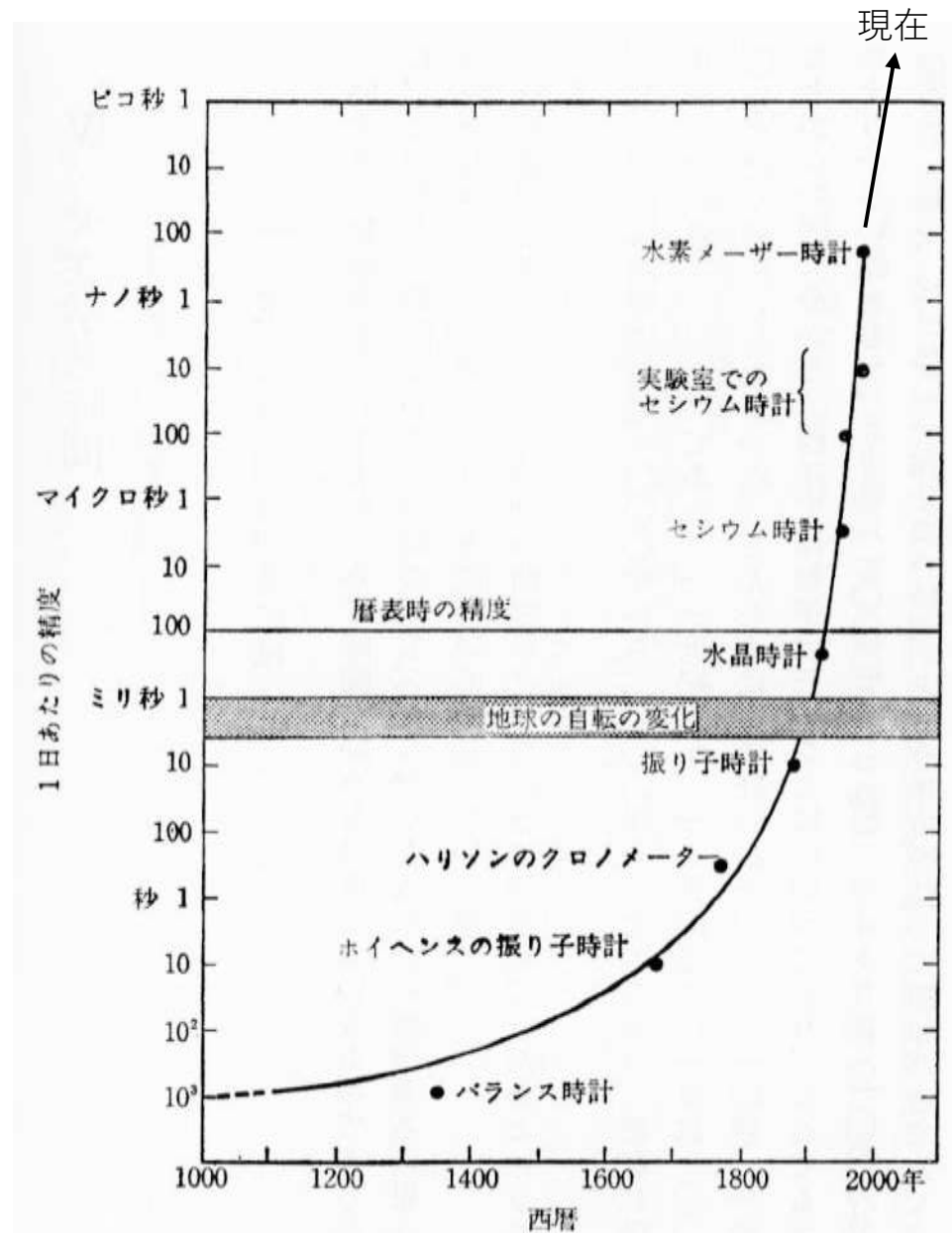
セシウム原子時計 (NICT)



水素メーザー型原子時計 (山口大学で使用中のもの)

# 時計の精度の向上

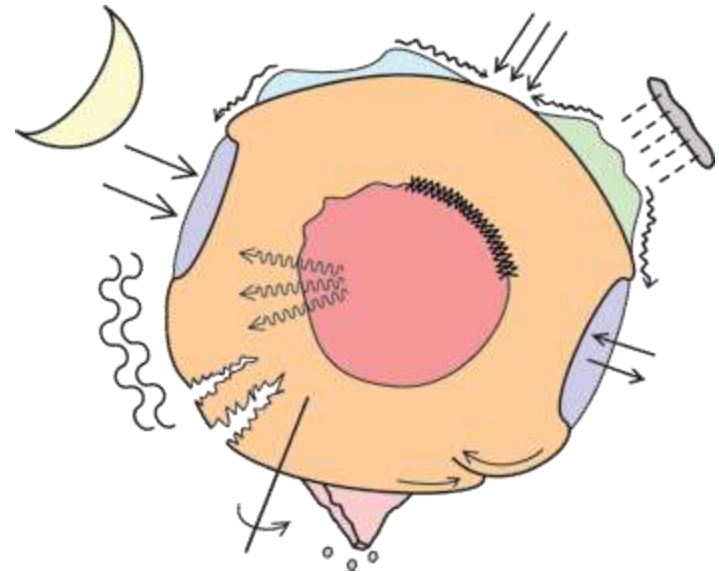
- 精度向上
  - 時代とともに時計技術が進み、精度は向上した
- 地球の自転のゆらぎ
  - 水晶時計の登場で、地球の自転（当時の時間の基準）が揺らいでいることが判明した
  - 時間の基準とするには不十分
- うるう秒
  - 時間の定義は原子時計、しかし生活のためには地球の自転に合った時間を使いたい
  - 両者の調整をするために、数年に1回、1秒の調整を行う



第1図 時計の精度の向上

# 地球の自転は揺らぐ

- 地球の自転の揺らぎ
  - 3年間に1秒程度ずれる
  - 3年間～約1億秒
    - 1億分の1程度のずれ
  - 現代でも地球がどのようにゆらぐか予想できない
- 揺らぐ理由
  - 潮汐：月と太陽の引力で海水や地面が変形・移動する現象
    - 満潮の潮が海峡を流れていく、風が大山脈にぶつかる等
  - 潮汐は地球の自転をふらつかせ、長期的には遅らせてゆく
    - その反作用で1年間に3cmずつ月は地球から遠ざかる



# 原子時と「うるう秒」

## 国際原子時 (TAI)

### 特別調整

1972年1月1日0時において国際原子時 (TAI)と協定世界時 (UTC)との差が10秒になるように調整

### 協定世界時 (UTC)

1972年からオフセット方式を廃止し、「うるう秒」調整により UT1 に近似させている原子時 (1秒の長さが国際原子時 (TAI) と同一)

### うるう秒調整

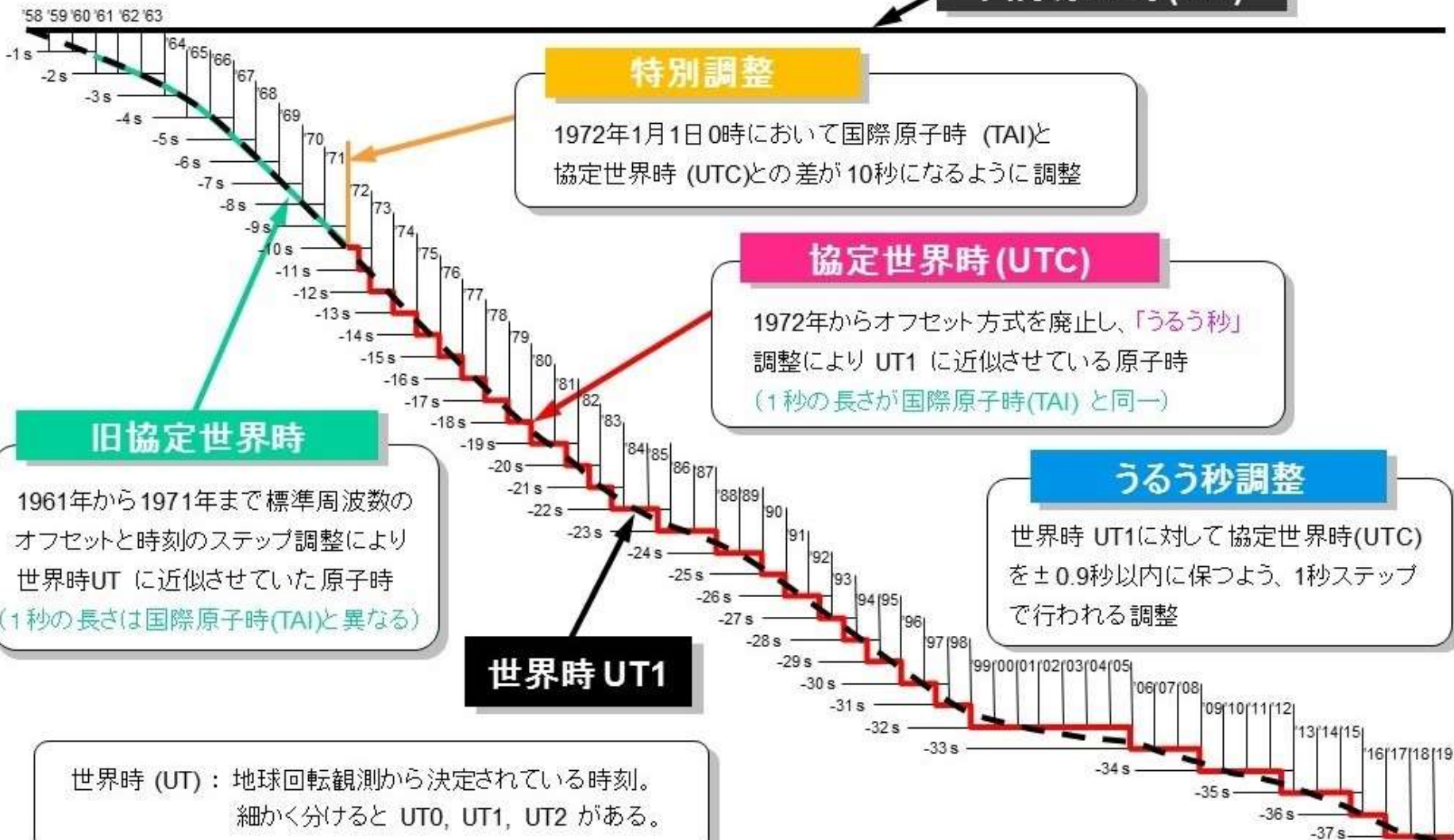
世界時 UT1に対して協定世界時 (UTC) を±0.9秒以内に保つよう、1秒ステップで行われる調整

### 旧協定世界時

1961年から1971年まで標準周波数のオフセットと時刻のステップ調整により世界時 UT に近似させていた原子時 (1秒の長さは国際原子時 (TAI) と異なる)

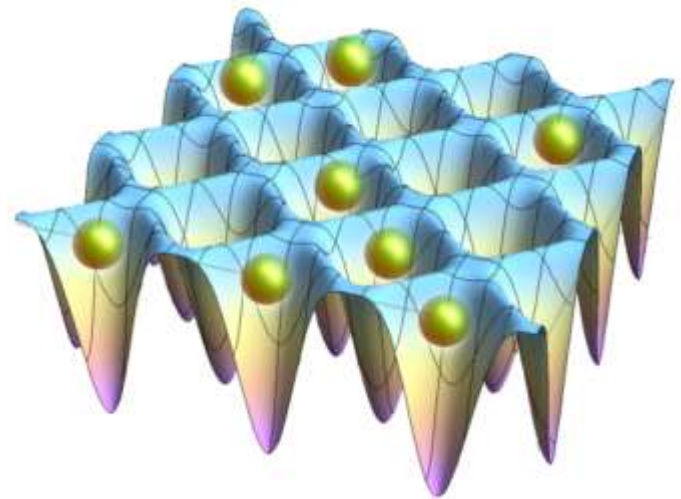
### 世界時 UT1

世界時 (UT) : 地球回転観測から決定されている時刻。  
細かく分けると UT0, UT1, UT2 がある。



# 現代の時計技術開発

- 原子時計の高精度化
  - 「光格子時計」
  - 香取秀俊教授（東京大学）
  - 多数の原子を真空中に保持して振動させる
    - 保持する仕組みが「光格子」
  - $10^{-18}$ に達する超高精度
- 時間の定義が変わる？
  - セシウム原子時計より圧倒的に高精度
  - 高精度な原子時計を用いた時間の定義に変更する可能性



[https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/f\\_00063.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/f_00063.html)

# 精密な時間の利用

- 定時運行
  - 鉄道、航空など汎世界的に正確な時間の利用が必須
- 通信・放送、商取引、工場
  - 遠隔地との情報、物体のやり取りがある場合に、互いの時間が一致していることが必須
- **GPS/GNSS**（位置情報）
  - 原子時計を搭載した人工衛星が送信する電波を受信して、正確な時間と位置を知る
- 科学の研究

# GNSS

Global Navigation Satellite System /  
全球測位衛星システム

- しくみ

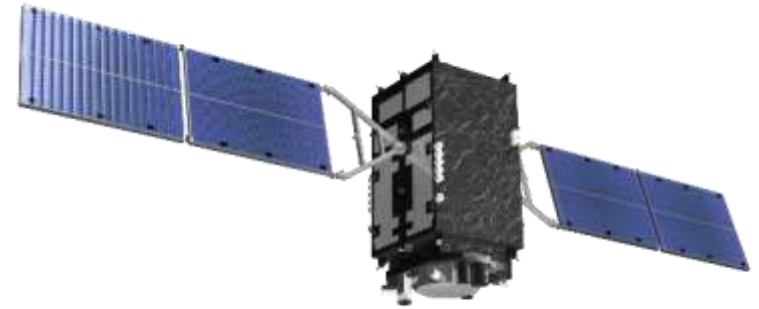
- 原子時計を搭載した人工衛星が送信する電波を受信して、正確な時間と位置を知る

- 様々なGNSS

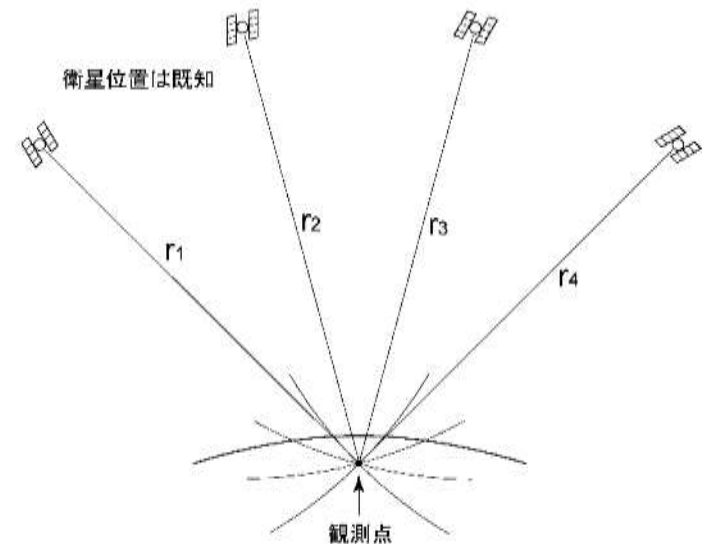
- アメリカ = GPS、ヨーロッパ = ガリレオ、ロシア = GLONAS、中国 = 北斗、日本 = 準天頂衛星

- 利用

- 自動車、スマートフォン、道路交通、鉄道、農業、測量、海洋
- 大きな経済効果



みちびきウェブサイト (<https://qzss.go.jp/index.html>) より



衛星を中心に擬似距離を半径とする球面を描く。4つの球面が1点で交わるように、受信機内の時計を調整する

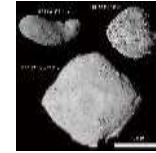
<https://geod.jpn.org/web-text/part2/2-4/index.html>



# 高精度な時間の科学研究への応用 (1)

## 惑星探査機の電波航法

- 惑星探査機の航法のひとつ
  - 惑星探査機を目的の天体に到着させるために特殊な技術が必要
  - 惑星間空間の大きさ = 約10億km
  - 目的の天体の大きさ = 1 km (「はやぶさ」の例)
- RARR (レンジ & レンジレート)
  - 地上の通信基地から探査機に電波を送り、探査機が電波を送り返す
  - 往復にかかった時間と、電波の周波数のずれを精密に測定する
    - このとき原子時計が必要になる
  - 距離と速度が分かる
  - 多くの探査機で広く使われる技術

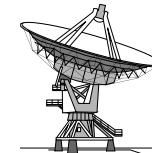


© JAXA/ISAS

<https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/210901.html>



電波の往復と  
ドップラー効果



原子時計

<https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/210901.html>

# 惑星探査機の軌道決定に使われる 原子時計



<https://www.jaxa.jp/projects/sas/hayabusa2/>

高精度な原子時計を使うことで、惑星探査機を遠くの天体に送り届けることができる

JAXA白田宇宙空間観測所 白田64mアンテナ



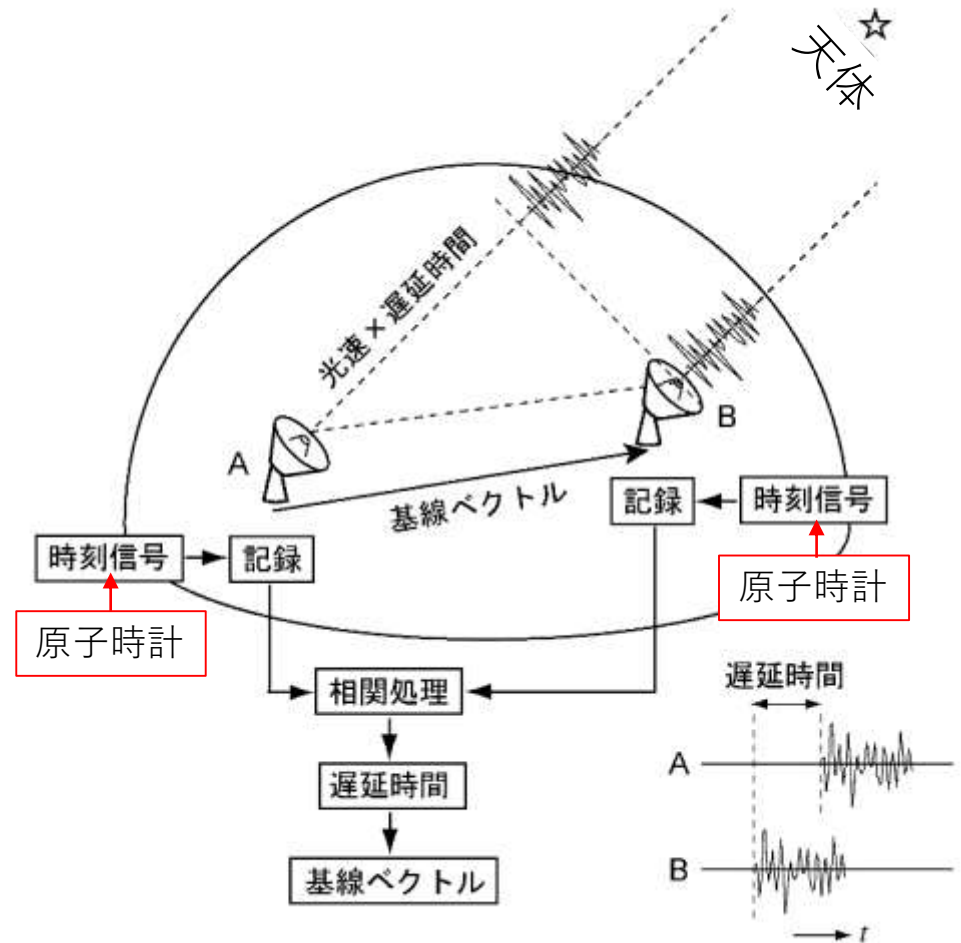
白田宇宙空間観測所に設置されている水素メーザー型原子時計。バックアップのために3台動作している⇒



# 高精度な時間の科学研究への応用 (2)

## VLBI 超長基線電波干渉計

- 電波天体の観測方法
  - 天体が放射する電波を複数のアンテナ = 電波望遠鏡で受信
  - 原子時計で正確な時刻を使って記録
  - データを持ち寄って相関処理
- 得られる情報
  - アンテナ間距離が1cm以下の精度でわかる
    - プレートテクトニクスの検証
  - 天体の微細な構造が分かる
    - ブラックホールの撮像



# VLBIによるブラックホールの撮像

- ブラックホール
  - 小さい空間に大きな質量が詰め込まれた天体
  - 重力が極めて強く、光も吸い込む
  - そのためブラックホール=黒い穴という名前
- これまでに知られていたこと
  - 宇宙に多数のブラックホールが存在する
  - ブラックホールは遠くにあって小さい天体なので、点のようにしか見えない
- 2019年、ついにブラックホールの撮像に成功
  - その1：2019年4月10日、観測対象 = M87
  - その2：2022年5月12日、観測対象 = Sgr A\*

# イベントホライズン望遠鏡 (EHT)

- Event Horizon Telescope
  - 国際的な協力で実現したVLBI観測ネットワーク
  - 8台の電波望遠鏡を用いた
  - 望遠鏡間の距離は最大 $D = 10,000$  km
  - 観測波長は $\lambda = 1.3$  mm
- 小さな構造を見る高い能力
  - 角度分解能  $\theta = \lambda/D$
  - EHTは $D$ が大きく $\lambda$ 小さい



© EHT

- 観測日 2017年4月5-11日
- 25マイクロ秒角という前例のない高角度分解能で観測成功

# M87のブラックホール画像

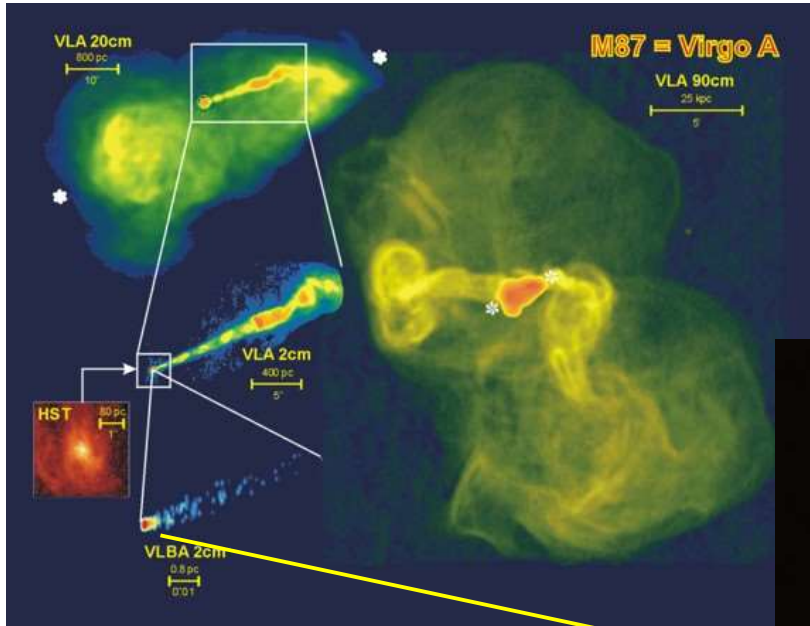
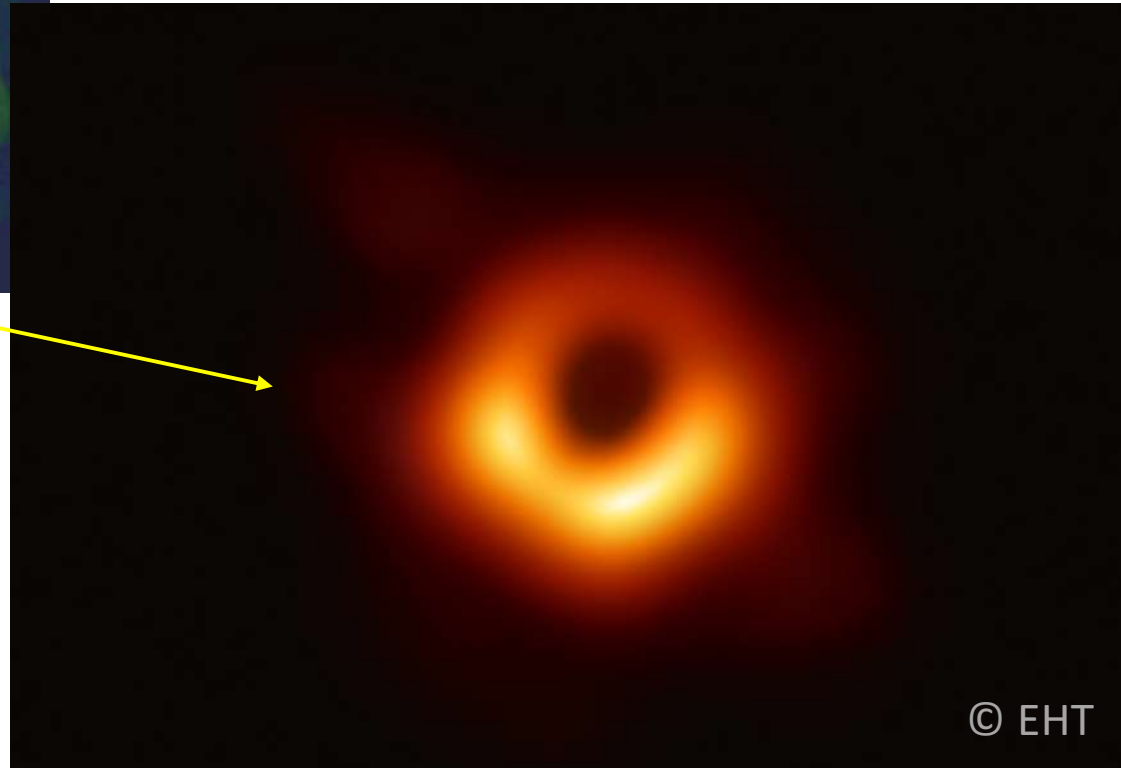


Image courtesy of NRAO/AUI

M87のこれまでの観測結果  
広がったガスが見えていたが、中心  
部分の細かな構造はわからなかった

EHTの観測で得られた画像

リング状に光る部分の中央に暗い穴が見える。これがブラックホールによってできた「影」と考えられる。リングの直径は0.01光年、ブラックホール質量は太陽の65億倍。人類が初めて「見た」ブラックホールの姿。



高精度な原子時計によって初めてブラックホールの姿を見ることができた

# 山口にある電波望遠鏡



山口34m電波望遠鏡（左）と32m電波望遠鏡（右）  
KDDI山口衛星通信所内にある。もとは衛星通信用のパラボラアンテナ。  
VLBI観測でブラックホールや星の誕生の研究を行っている。

# まとめ

- 日時計から始まった時間の計測技術 = 時計は時代とともに発展した
- 高精度な時計を使うことで社会における利便性の向上や科学研究の発展がもたらされた

