

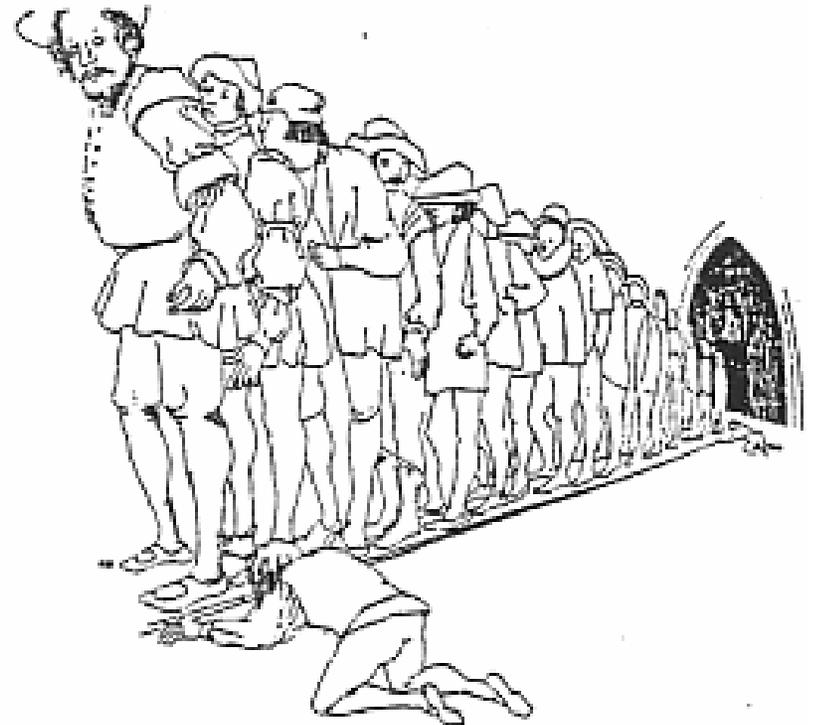
基本単位

(1) 長さ

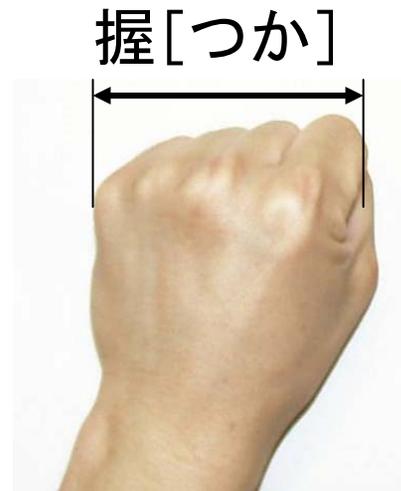
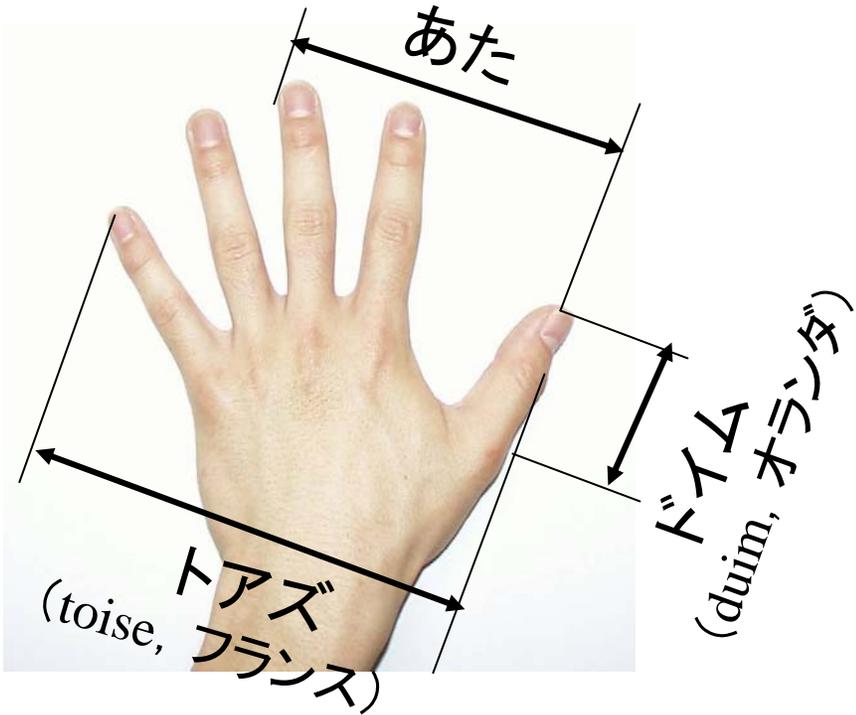
経済活動のために長さの基準がまず必要となる。
最初は人の身体の一部を用いる。



1 foot (イギリス)



尋[ひろ]



工業的活動, 科学的活動活発化 →

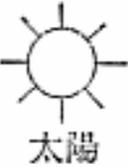
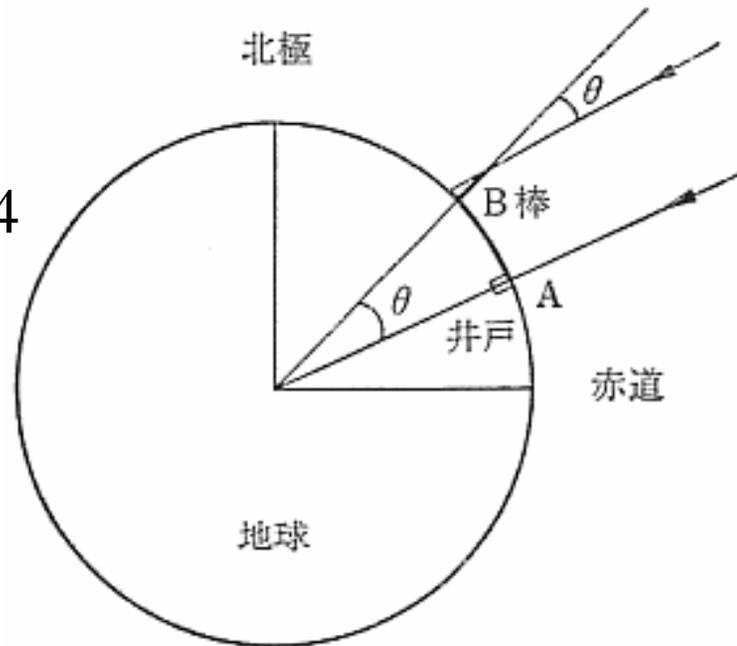
長さ基準の普遍性 (universality), 不変性 (invariability)

→ 長さ基準の検討: 1970, パリ科学学士院
Talleyrand-Perigordが動議
検討委員: Lagrange, Laplace, Borda

検討比較

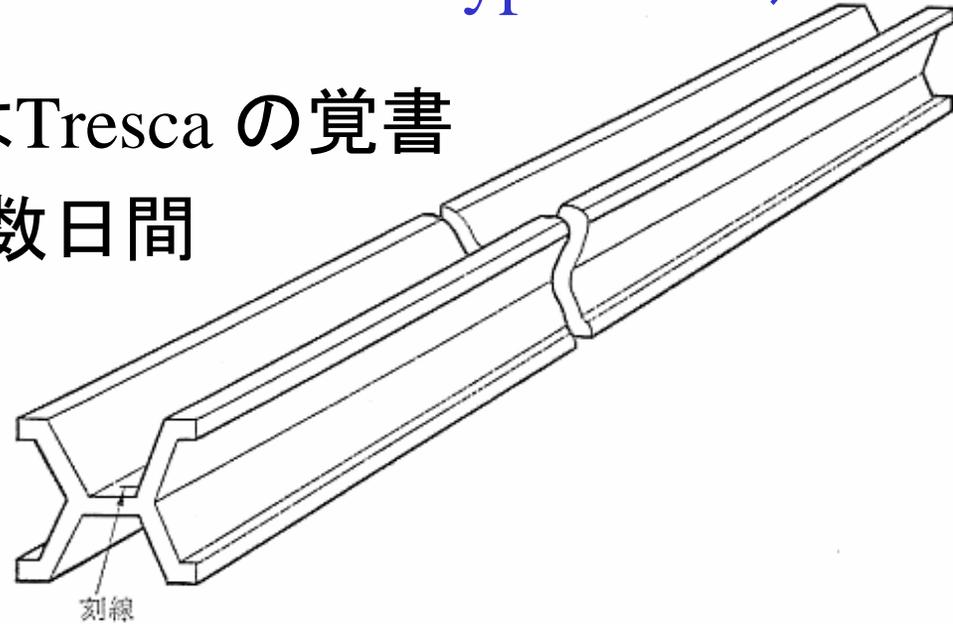
- (1) 1秒振子の長さ
- (2) 地球赤道の長さ
- (3) 地球子午線の1/4

1,000 km (ダンケルク
~バルセロナ) の三
角網測量



国際メートル原器 (International Prototype Metre)

- 1) 全長 102 cm, 断面形はTresca の覚書
- 2) Pt 90% + Ir 10%, 焼鈍数日間
- 3) 0°C で 1 m



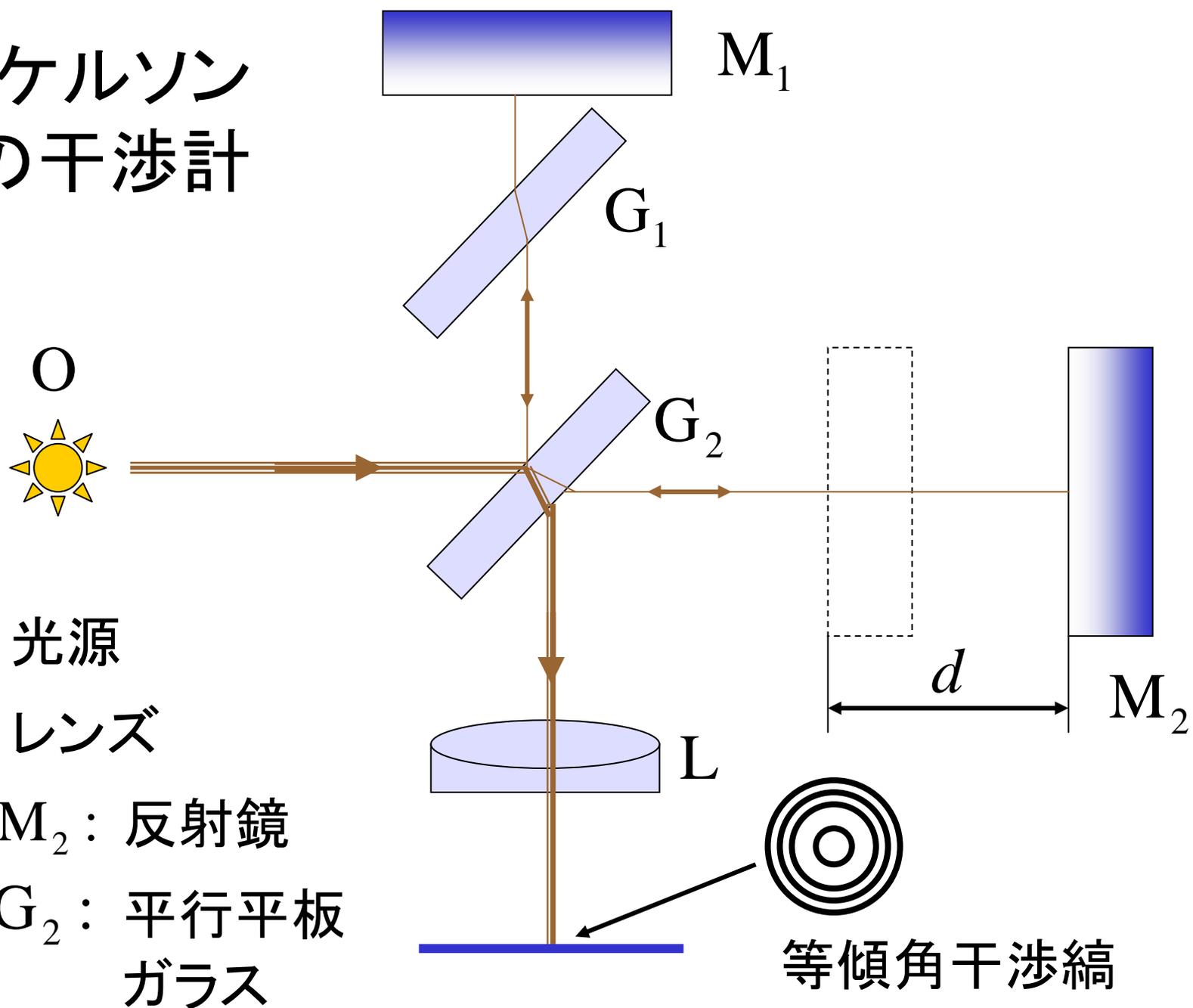
Maxwell: 長さ基準に光波長使用の指摘

Michelson, Benoit が光波長で干渉計により測定

可干渉距離の長い光 (超微細構造のない偶数質量数の同位元素)

^{198}Hg : 500 mm, ^{86}Kr : 800 mm, ^{114}Cd : 300 mm

マイケルソンの干渉計



O : 光源

L : レンズ

M_1, M_2 : 反射鏡

G_1, G_2 : 平行平板
ガラス

等傾角干渉縞

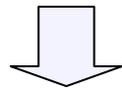
エタロン(etalon, 波長副標準器)

$$10/2^8 (= 0.390625 \text{ mm}), 10/2^7, \dots, 10 \text{ mm}$$

$$1 \text{ m} = 1553163.6 \lambda (\lambda = 0.64384717 \mu\text{m}, \text{Cd})$$

第11回国際度量衡総会(1960/10)

“メートルは ^{86}Kr 原子の準位 $2p_{10}$ と $5d_5$ の遷移に対応する光波の真空中における波長の1650763.73倍に等しい長さ”

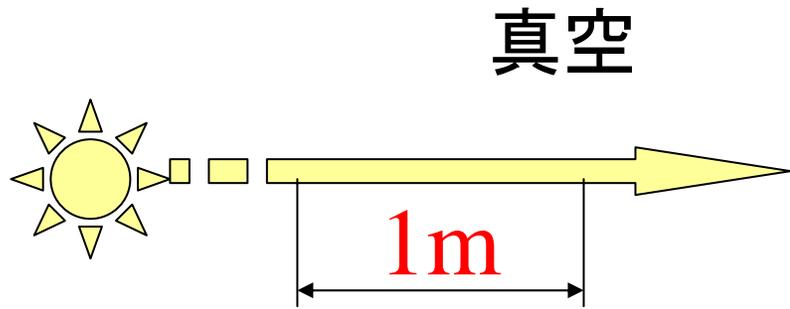


レーザーの発明とその波長安定化

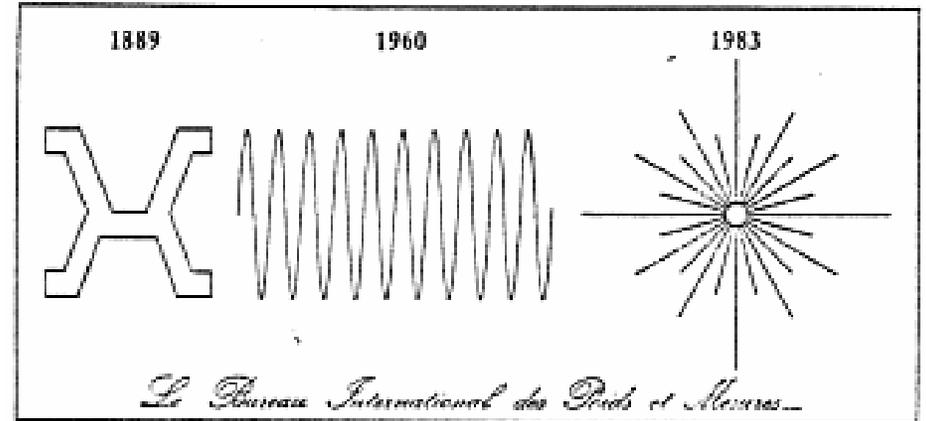
今後, 精度の高い標準が出現の可能性

第17回国際度量衡総会

“メートルは1秒の1/299792458の時間に光が真空中を伝わる行程の長さとする”



1/299792458秒間の行程



メートルの定義の実現法

a) $l = ct$

b) $\lambda = c/\nu$

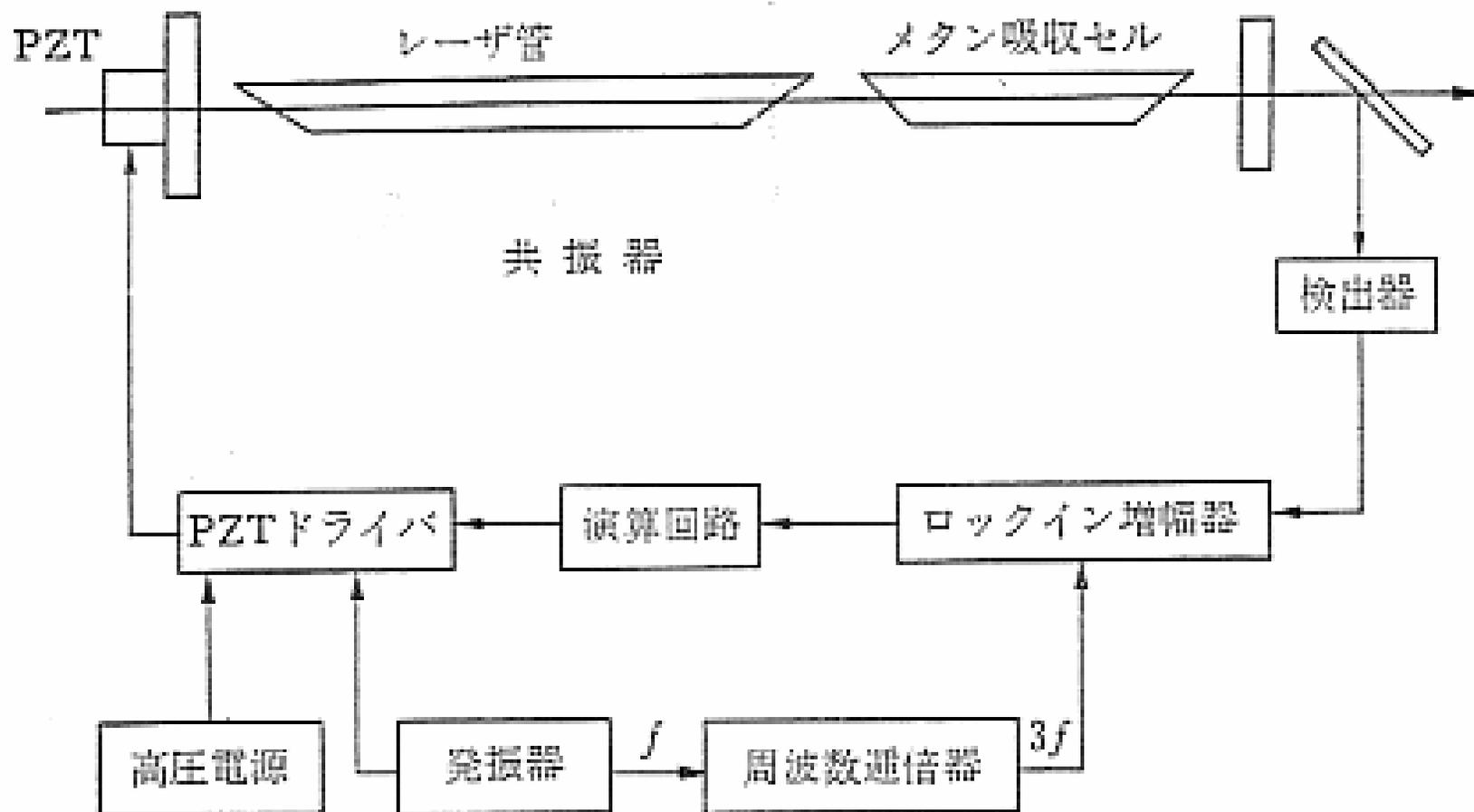
c) レーザーを干渉計の光源

レーザーの周波数(波長)安定化

温度変化などで共振器長変化 → 発振周波数変化

PZTで共振器長制御 → 吸収セルで飽和吸収

→ レーザー出力が相対的に増加



レーザーの周波数絶対測定 (周波数合成チェーン)

ヘテロダイン法

原子周波数標準で校正されたマイクロ波発振器から出発

$$\Delta f = f_L - n f_M$$

三周波数混合

$$\Delta f = n_1 f_{L_1} \pm n_2 f_{L_2} \pm f_M$$

$$\nu_6 = 3\nu_5 + 0.049 + \nu_{6B}$$

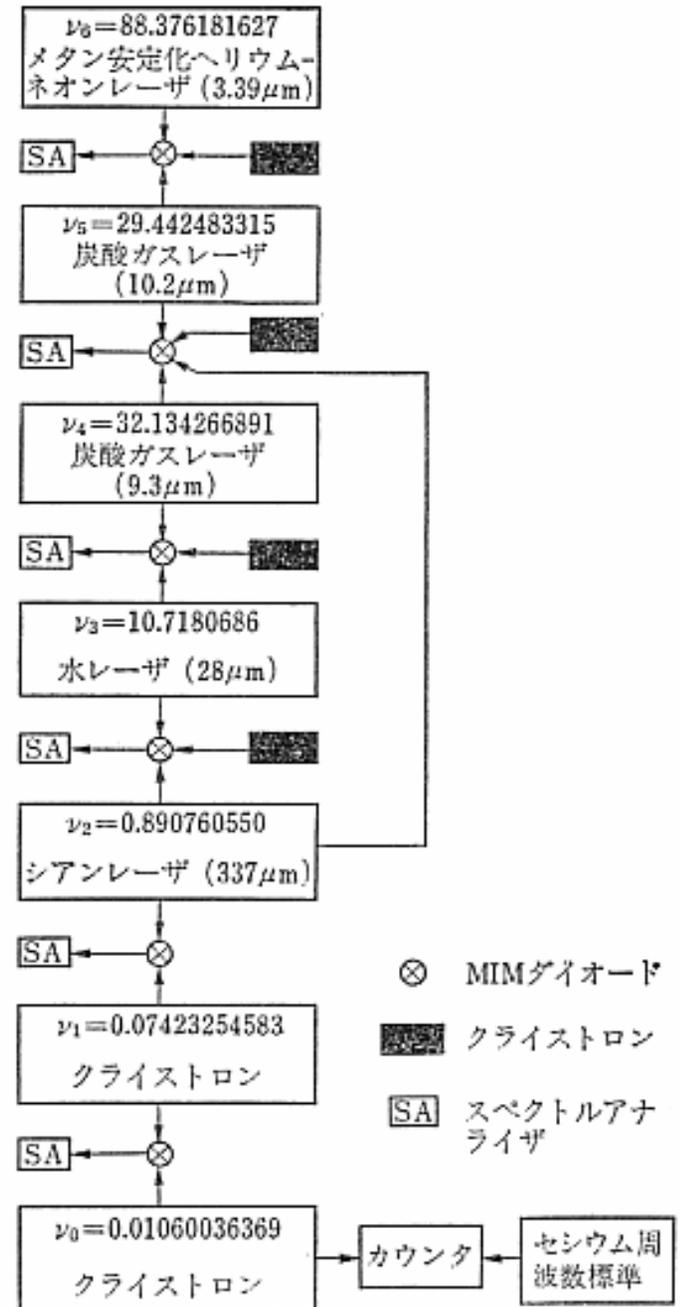
$$\nu_5 = \nu_4 - 3\nu_2 - 0.020 + \nu_{5B}$$

$$\nu_4 = 3\nu_3 - 0.020 + \nu_{4B}$$

$$\nu_3 = 12\nu_2 + 0.029 + \nu_{3B}$$

$$\nu_2 = 12\nu_1 + \nu_{2B}$$

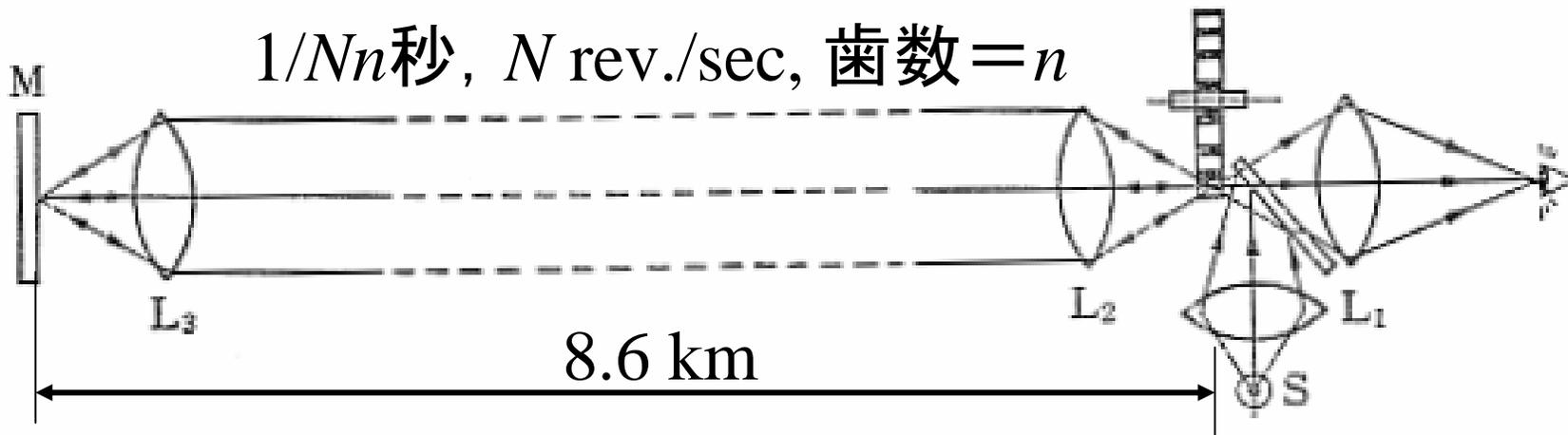
$$\nu_1 = 7\nu_0 + \nu_{1B}$$



光速の直接測定

フィゾーの装置

$1/Nn$ 秒, N rev./sec, 歯数 = n



マイケルソンの装置

$c=LNn$, N rev./sec, n 多角形



(2) 質量

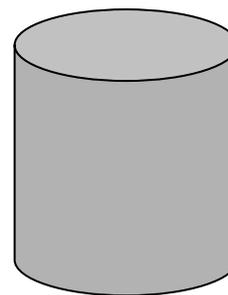
国際キログラム原器が基準

変わるべき方法がない. 天秤の精度 = 10^{-8}



BIPM(国際度量衡局)に保管
されている国際キログラム原器
二重真空ガラス容器内

キログラム



国際キログラム原器

(3) 時間

時間基準の安定度と正確さ → 広く科学諸分野に利点

標準となる原子周波数に求められる性質

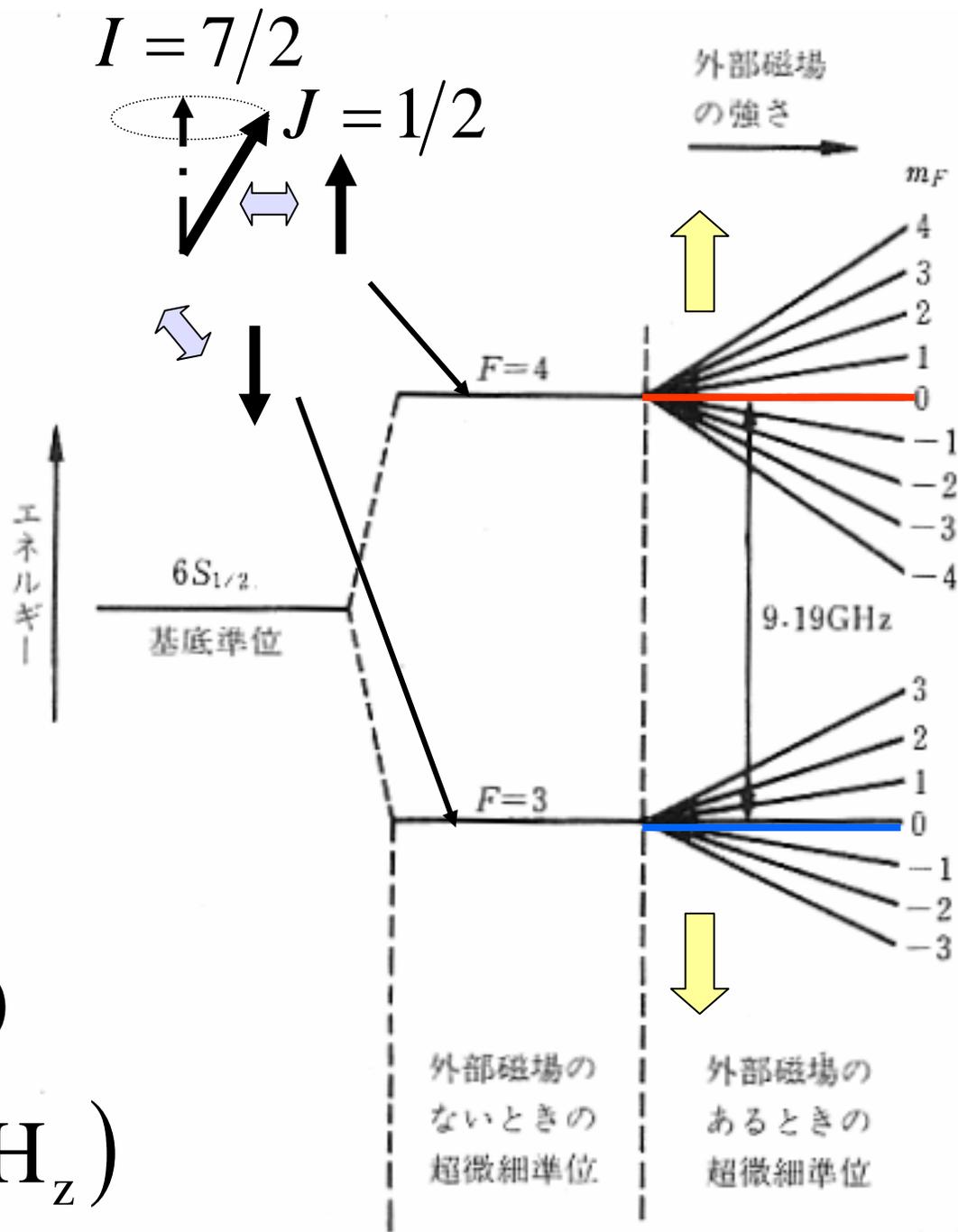
充分大きな強度, 小さな線幅, 外界の影響受け難い
取り扱いが容易, 適切なガス・水蒸気化温度

→ 小さなエネルギー遷移の現象に伴う電磁波
= 原子核スピンの基づく超微細準位間遷移

水素・アルカリ金属原子にみられる超微細構造
= 原子核スピン(量子数 I) と電子スピン(J) との
間の磁氣的相互作用

$$\nu = \nu_0 + \nu_0 \frac{x^2}{2}$$

$$\nu = 9,192,631,770 + 0.06746 H_0^2 \text{ (Hz)}$$

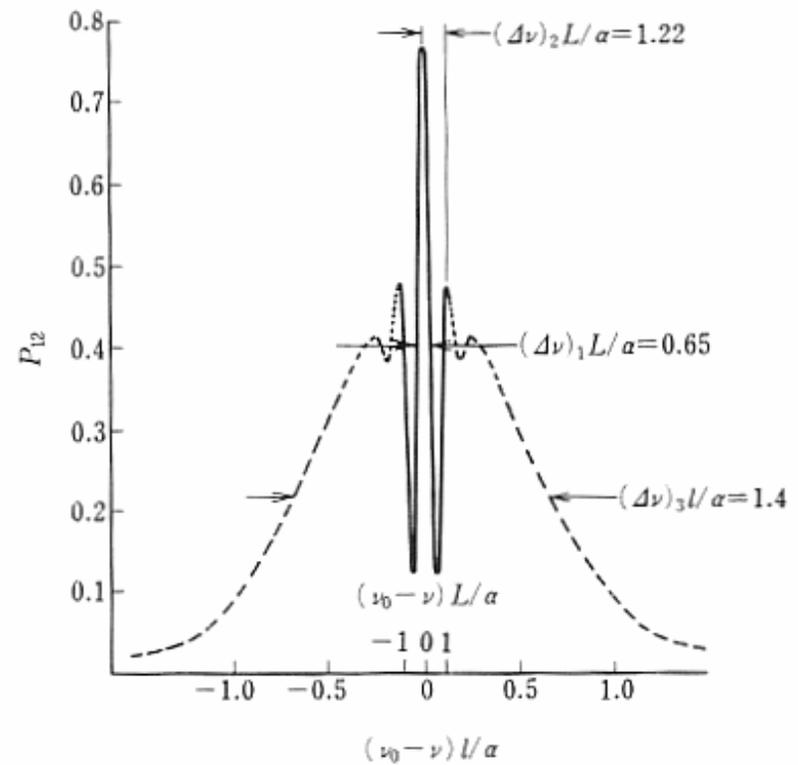




^{133}Cs

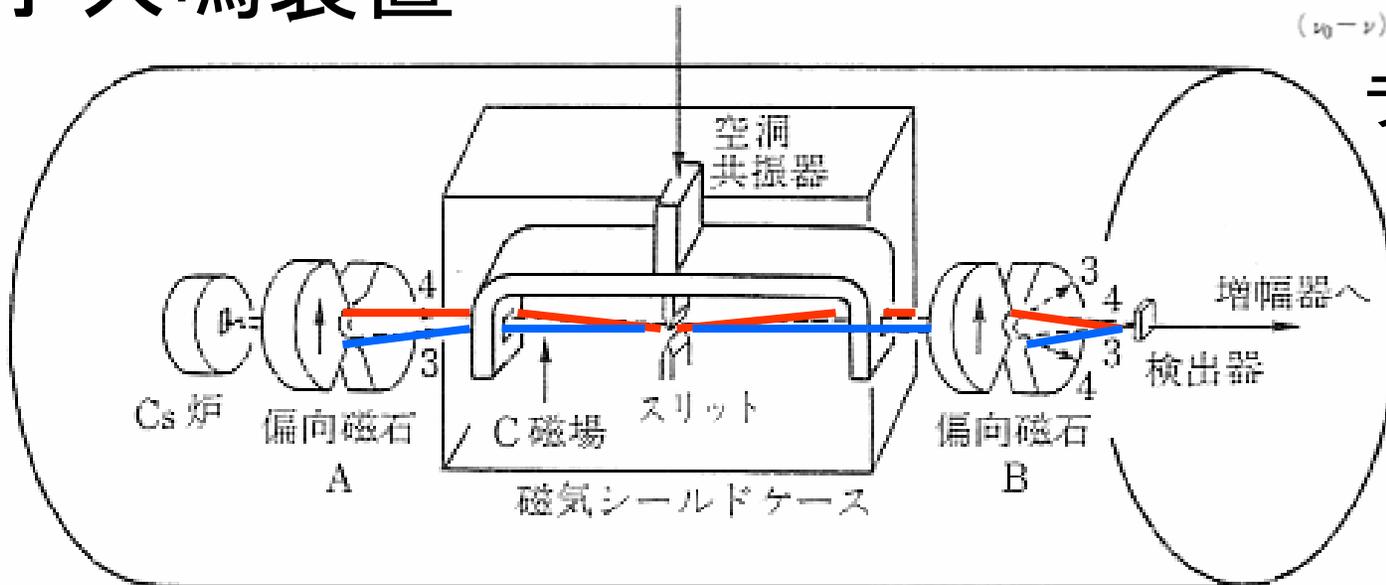
1s

9192631770周期の継続時間



原子共鳴装置

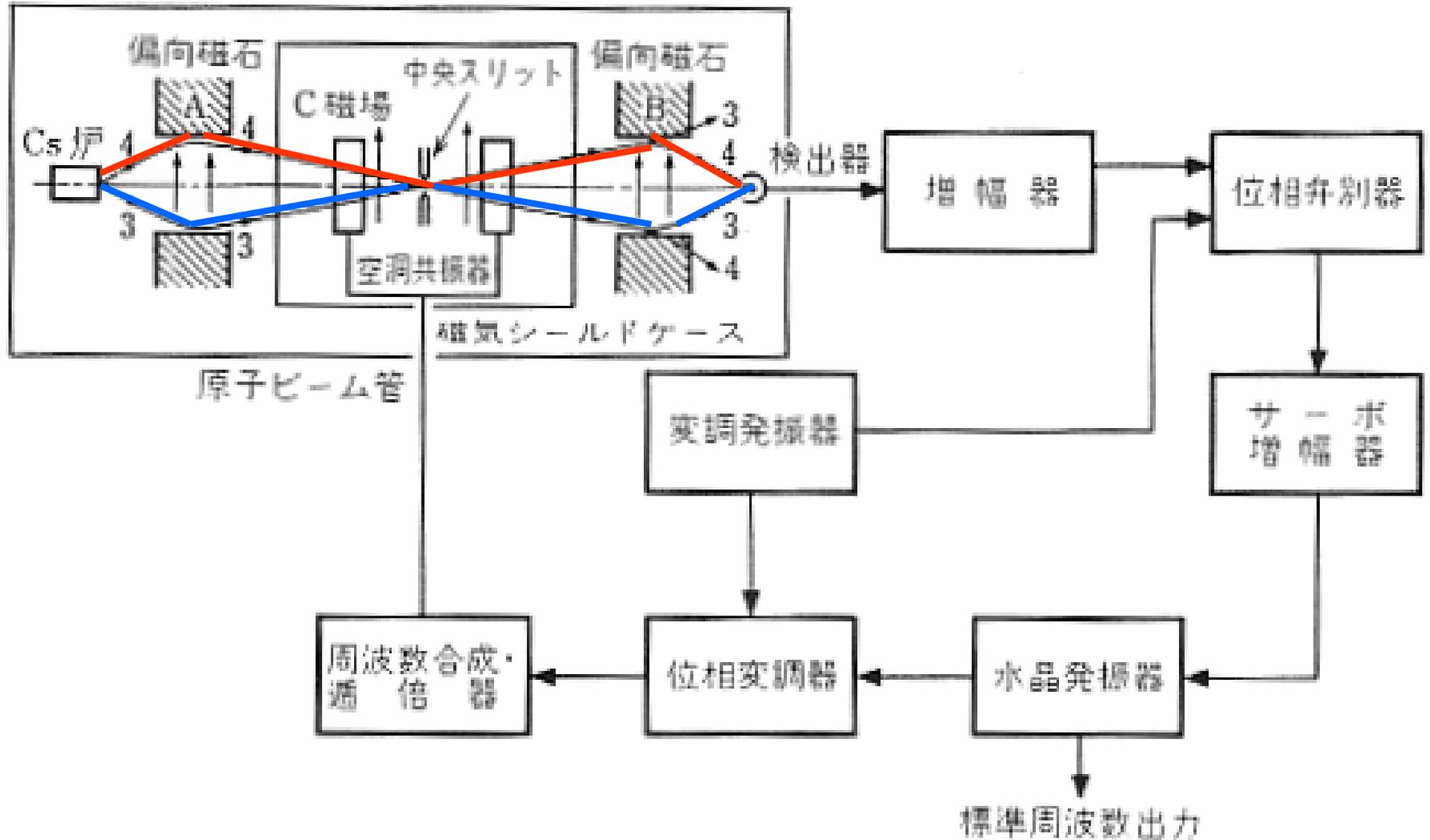
周波数合成逡振器から



ラムゼイ
共振
スペクトル

電子ビーム管 (高真空チャンバ)

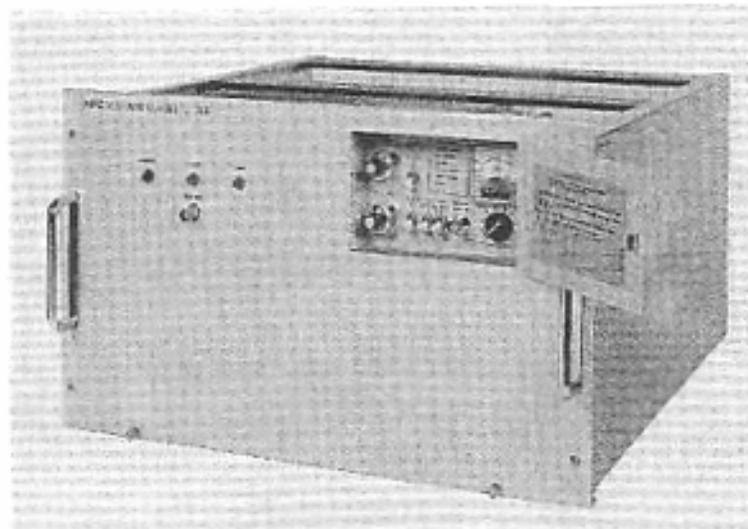
原子周波数標準器



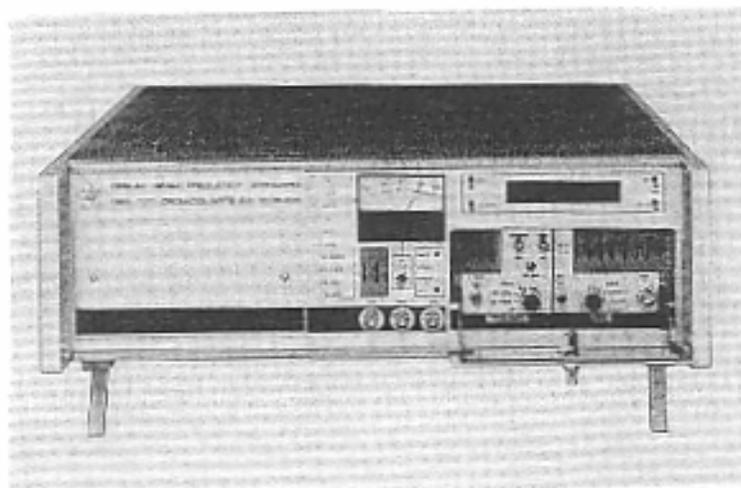
各種 Cs 原子時計



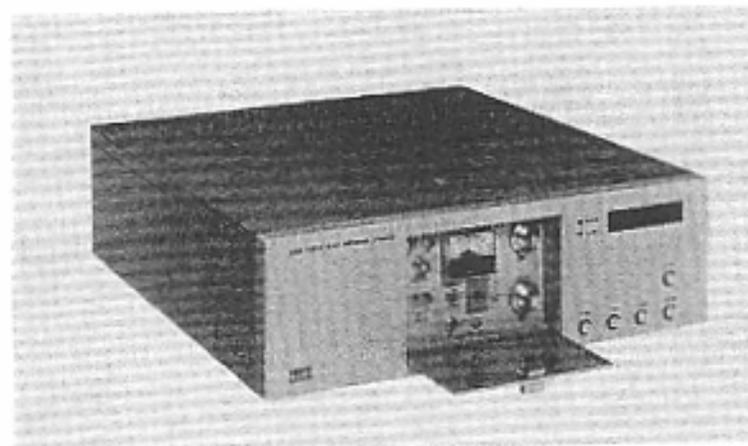
(a) HP 社 5061B 型



(c) 日本電気(株) Cs4001 型



(b) オシロクオーツ社 3210 型



(d) 富士通(株) 5453A 型

大規模近代航法システム

距離 = 光速度 × 時間 \longrightarrow 距離の測定 = 時間の測定

ロラン(Loran: Long Range Navigation) : 2つの固定局からの電波の到達時間差(距離差)が一定の軌跡
= 2局を焦点とする双曲線 \rightarrow 2組の固定局から
 \rightarrow 自己の位置定まる

ロランC チェーン:

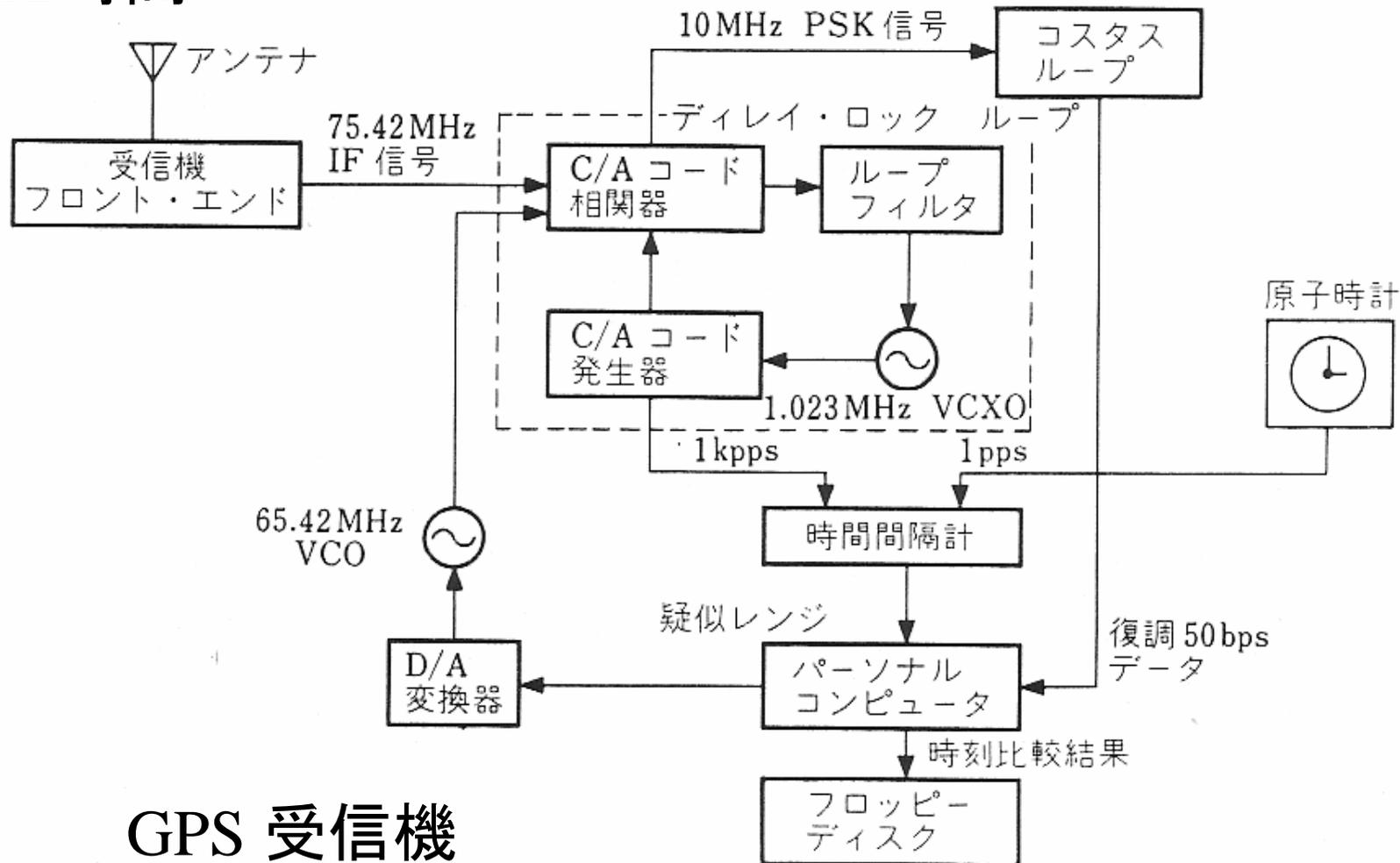
1つの主局(M) + 2~4
の従局(W~Z)

各局に3台のCs原子
時計



GPS(Global Positioning System):

合計24個の衛星, 常時どこからでも3次元測位可能,
Cs, Rb 原子時計搭載, 軌道傾斜角63度, 高度20, 200 km
周期12時間

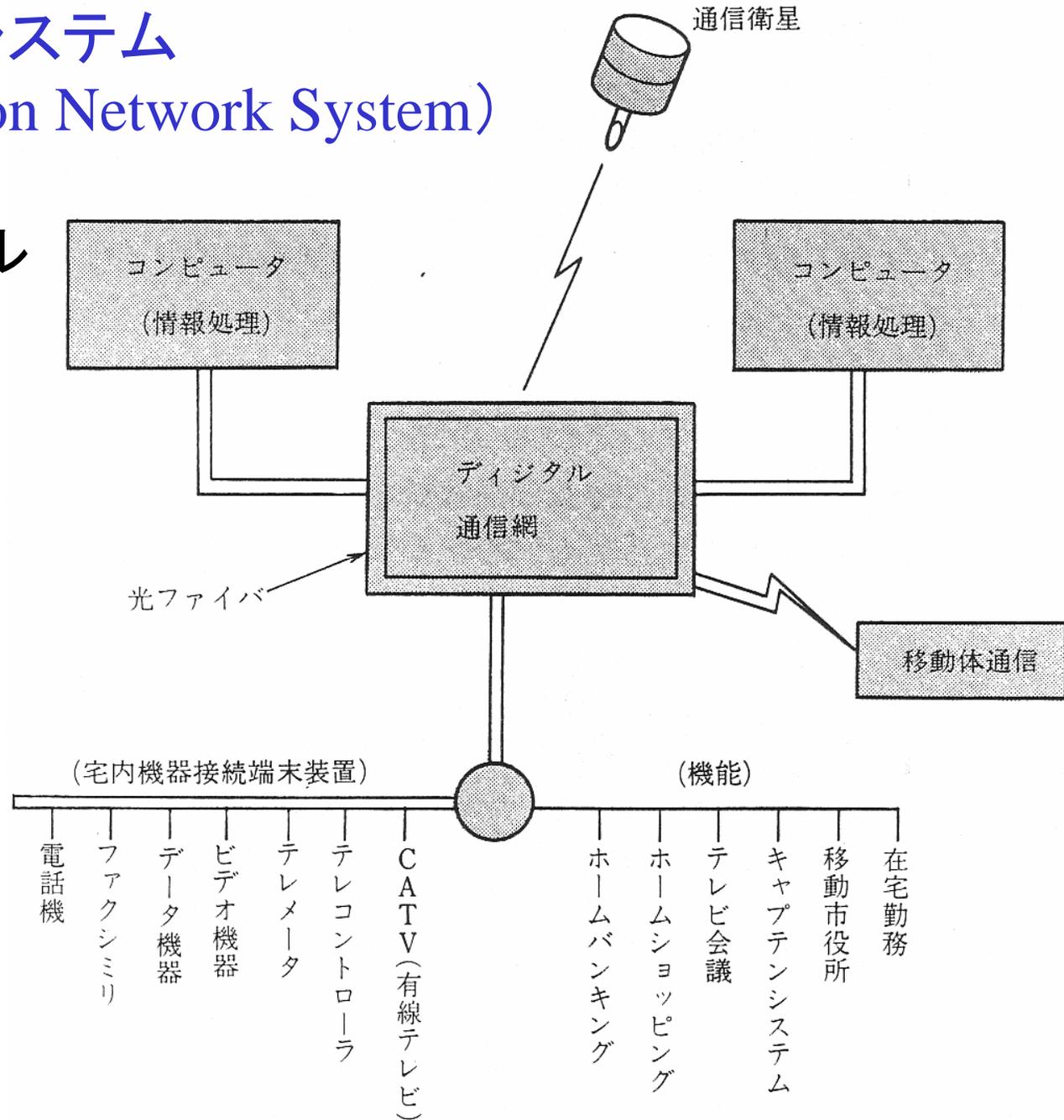


GPS 受信機

高度情報通信システム (INS: Information Network System)

大容量デジタル
通信網

総合通信網

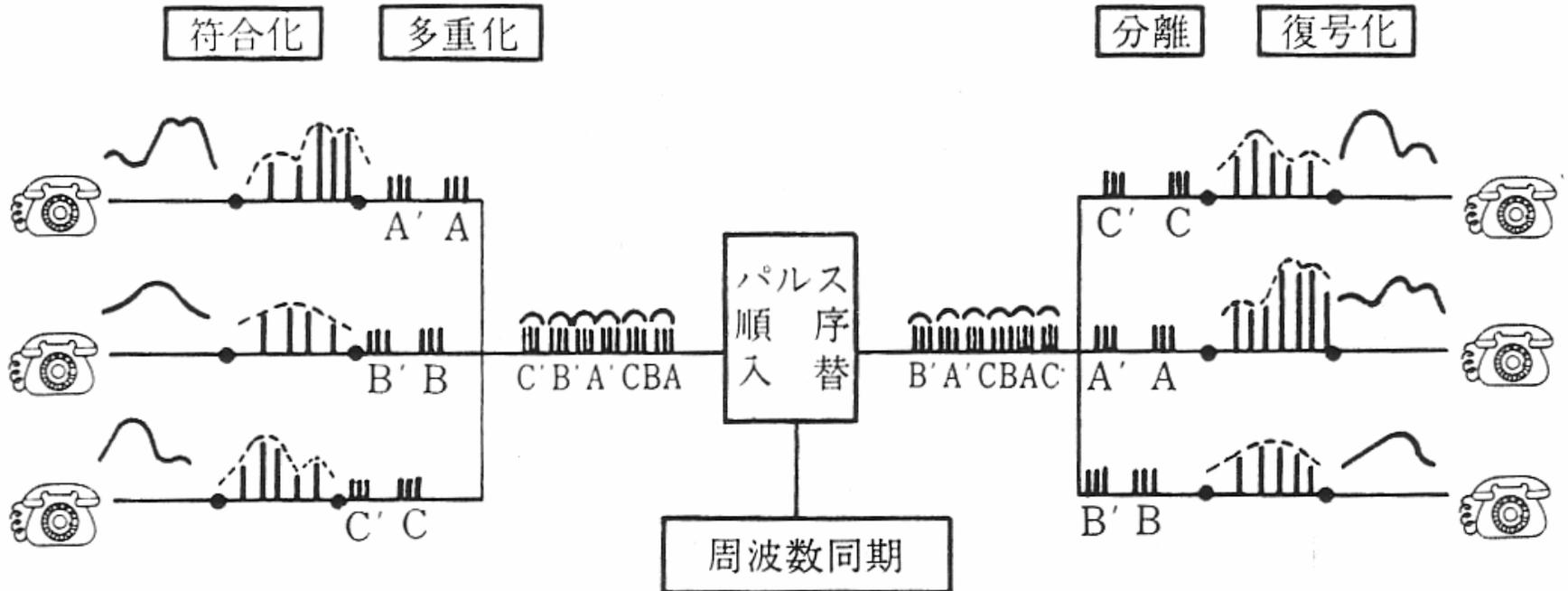


多重デジタル伝送

音声認識(64kb/s), データ通信(3.2, 4.2, 12.8, 64kb/s),
ステレオ放送情報(768kb/s)が混在

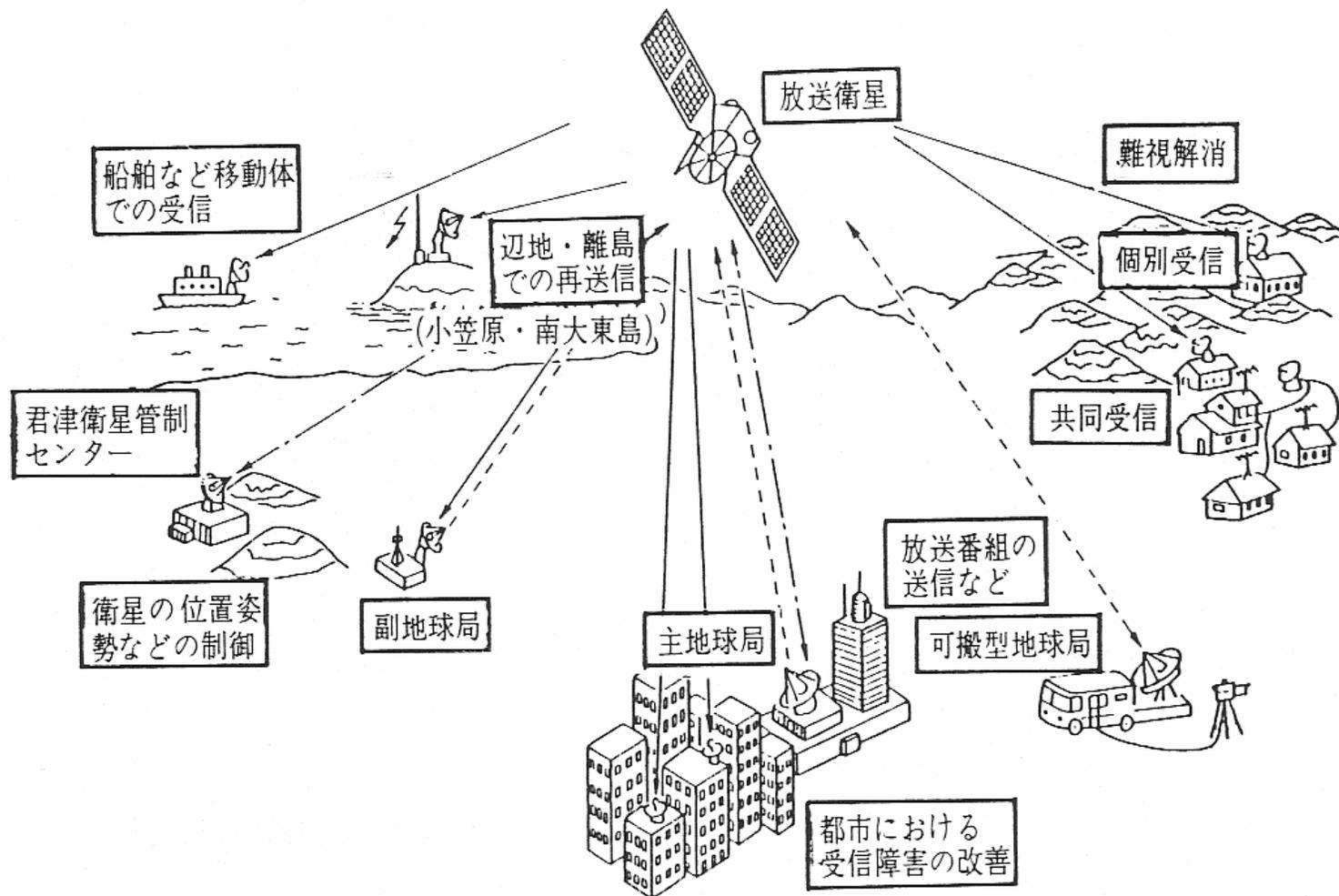
→ 1.544Mb/sより小さい束で頻繁に分岐, 接続

→ 全国的に通信網のクロック周波数を合致させる網同期 = 原子時計



テレビジョン放送

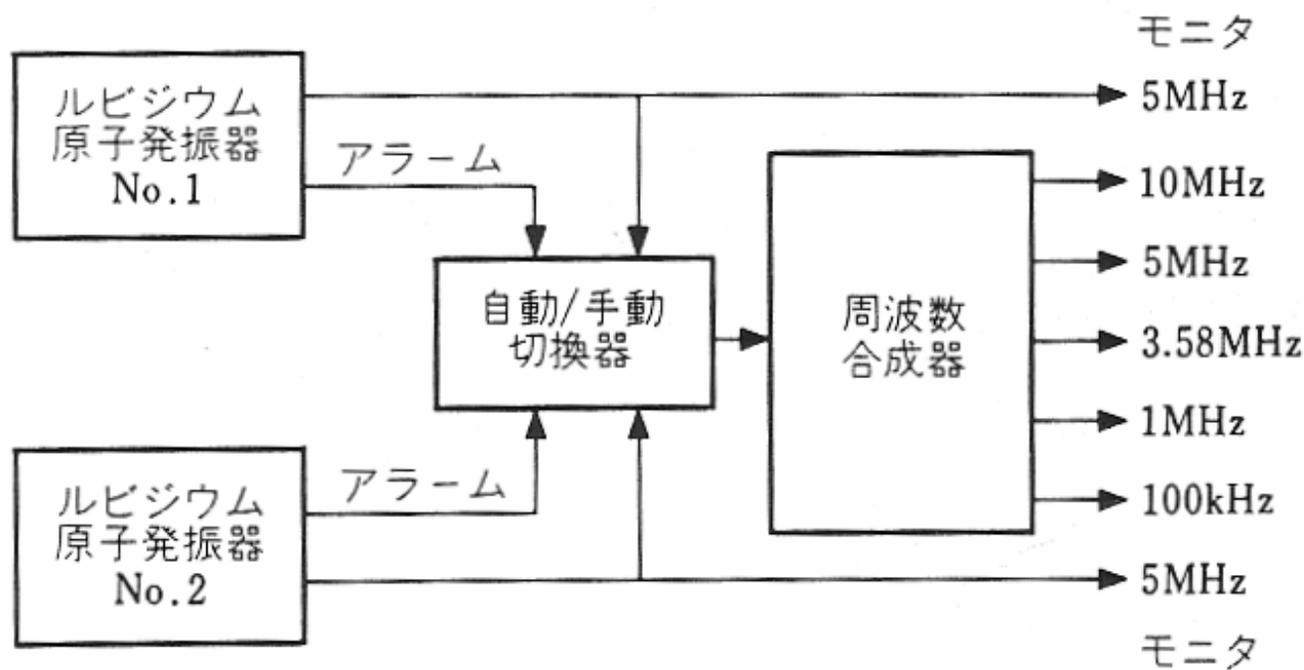
使用できるチャンネル数，放送周波帯は限られている
⇔ 混信妨害を起こさないようにする



各テレビ局

Rb 原子標準器

$\pm 3 \times 10^{-9}$ の周波数安定度



測距: 超長基線電波干渉計 (VLBI)

電波星からの電波を離れた2地点で独立, 同時に受信

→ 受信データ間の相関 → 電波の到達時間差

→ { 大陸間距離の高精度測定
高分解能の電波天文観測

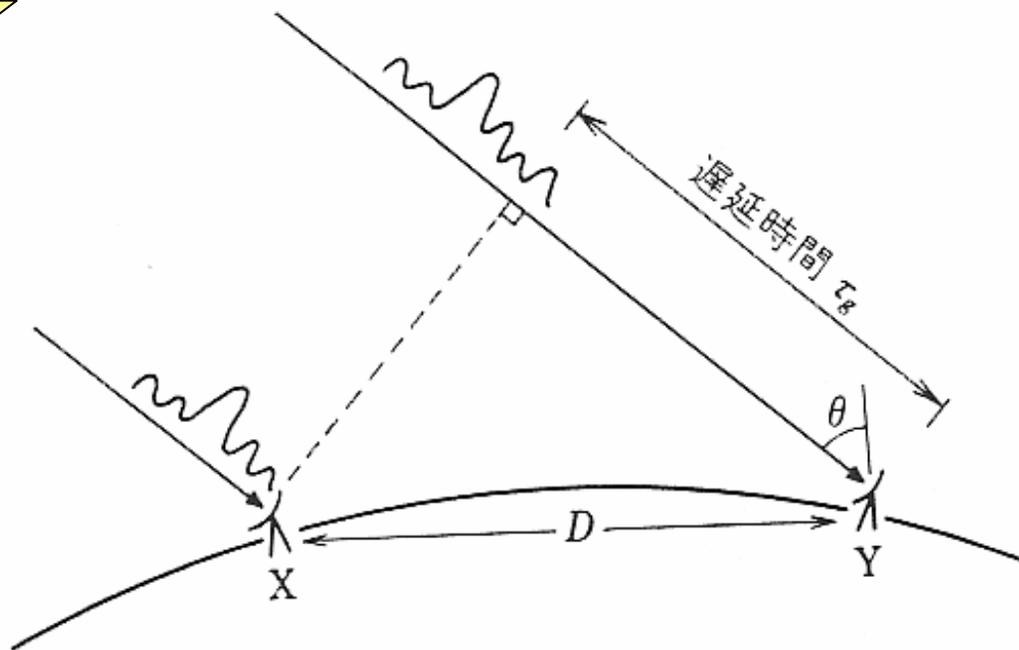
測定精度 3cm



→ 時間精度 0.1ns

水素メーザー時計

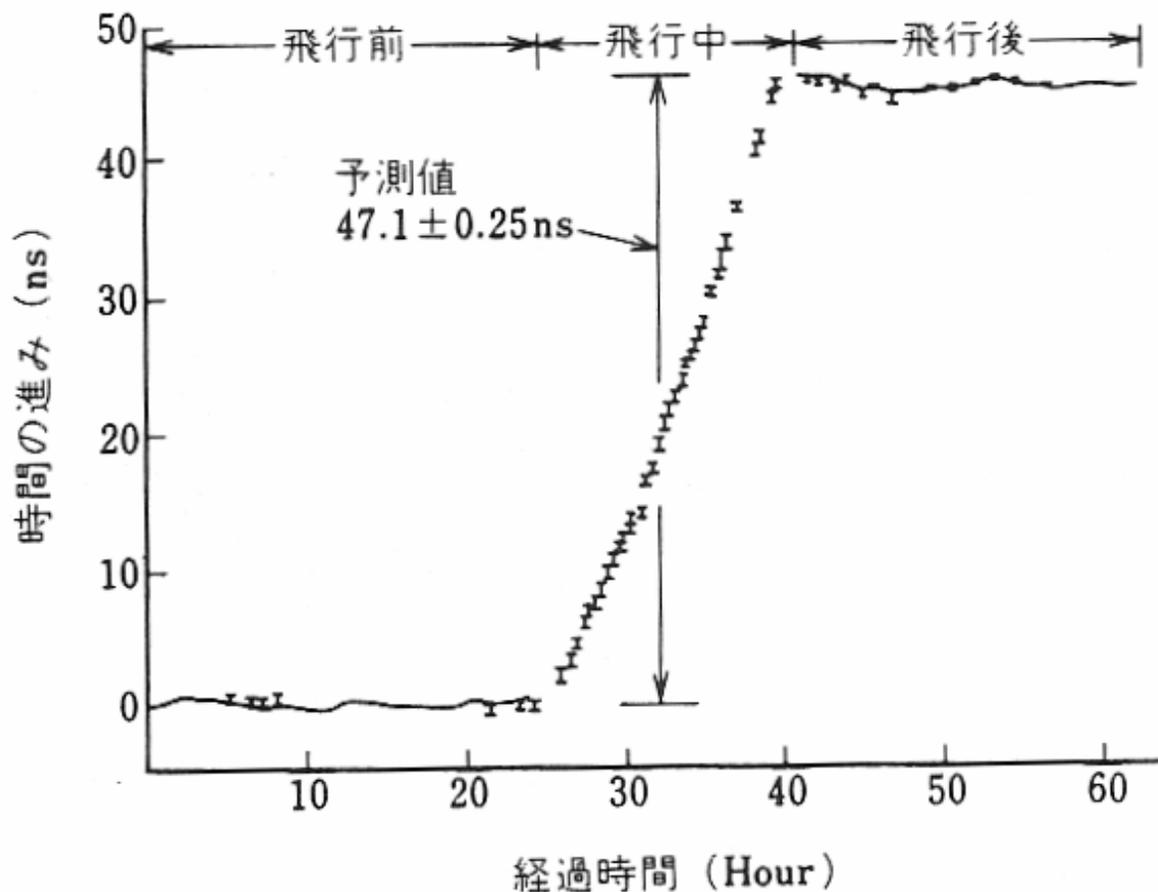
$$D = c \cdot \tau_g / \sin \theta$$



特殊および一般相対性理論の検証

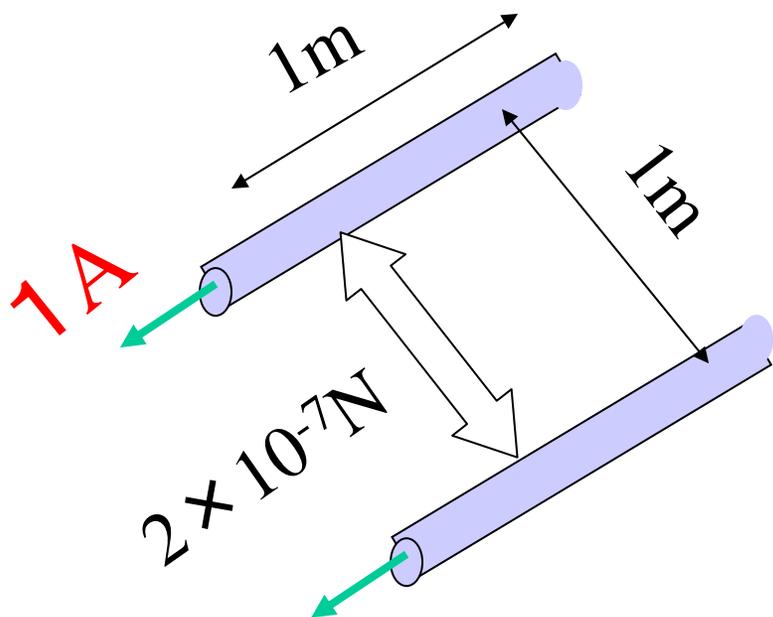
時間は相対的 → 速度, 重力, 座標系の取り方で異なる
飛行機にCs, Rb 原子時計を3台ずつ搭載

地上からレーザー
パルスで時計
の動きを測定

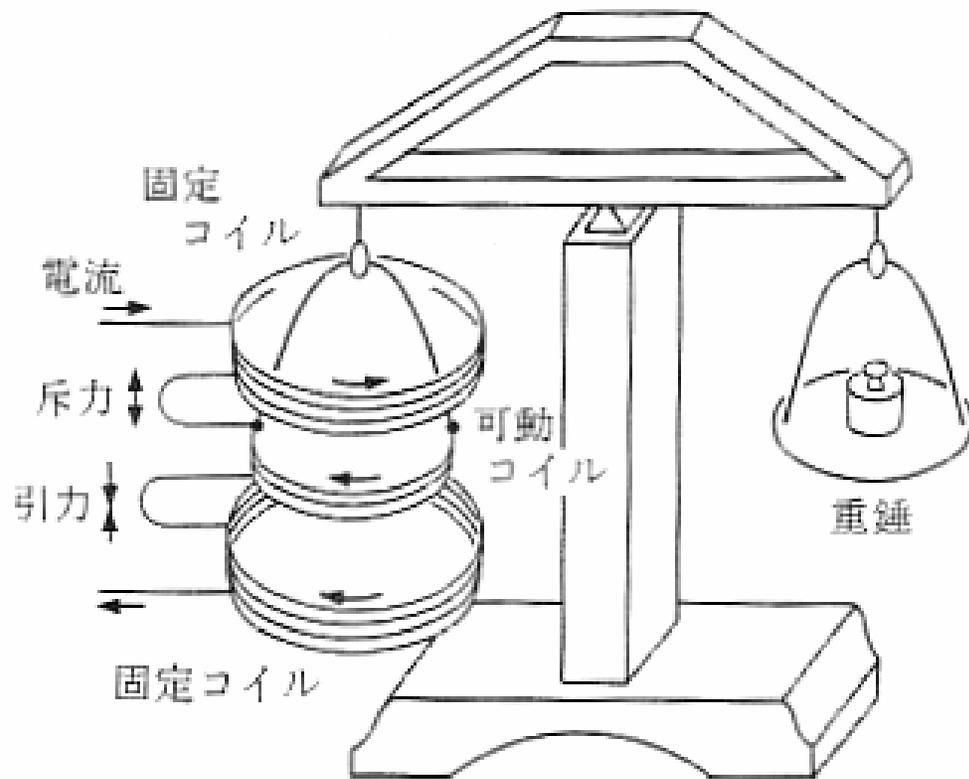


(4) 電流

標準は次々と変更
二電流間の力を基準
原子標準への移行



レーリー電流天秤



(5) 熱力学温度

「経験温度」: 皮膚の冷温感覚を下敷き

定義定点: 0°C (氷点), 100°C (水の沸点)

$0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ を物質の熱膨張率によって100等分

→ 物質によって目盛が異なる?

⇒ 物質として不活性気体 → 困難克服

ところが,
温度計の目盛 $\nearrow V = R \cdot T / p$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{圧力 } p \text{ (機械的)} \\ \text{温度 } T \text{ (熱的)} \end{array} \right.$

V は T と1対1対応でない.

→ 気体の状態方程式は温度定義式として相応しくない

$\delta W = J\delta Q \longrightarrow \delta W, \delta Q$ は状態量でなく
和をとった量が状態量

$dU = \delta W + \delta Q$: 熱力学第1法則

分子運動 $\longleftrightarrow p, T$

熱 = 制御不能な無秩序性 \longrightarrow 無秩序度 $\longleftrightarrow T$

ここで, カルノーサイクル

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \longrightarrow dS = \frac{\delta Q}{T} \quad S \text{ は状態量}$$

したがって, 温度の定義としてカルノーサイクルを
基にして決めればよい.

[カルノーサイクル]

温度 T_1, T_2 の熱源から体系が受け取る熱量を Q_1, Q_2 とすれば, 状態方程式を用いて

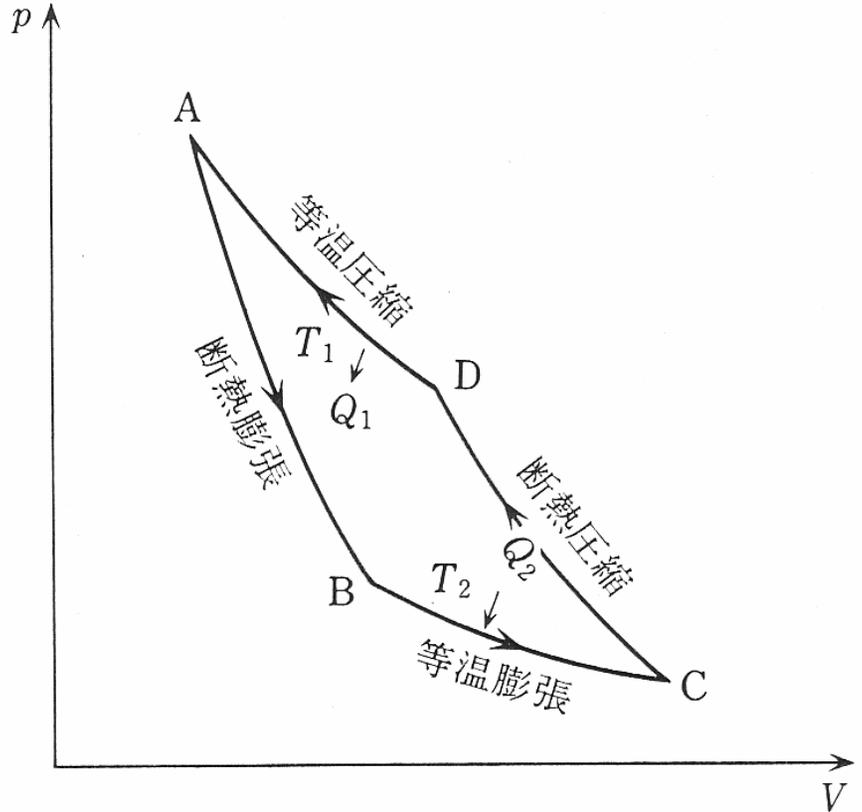
$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

すなわち,

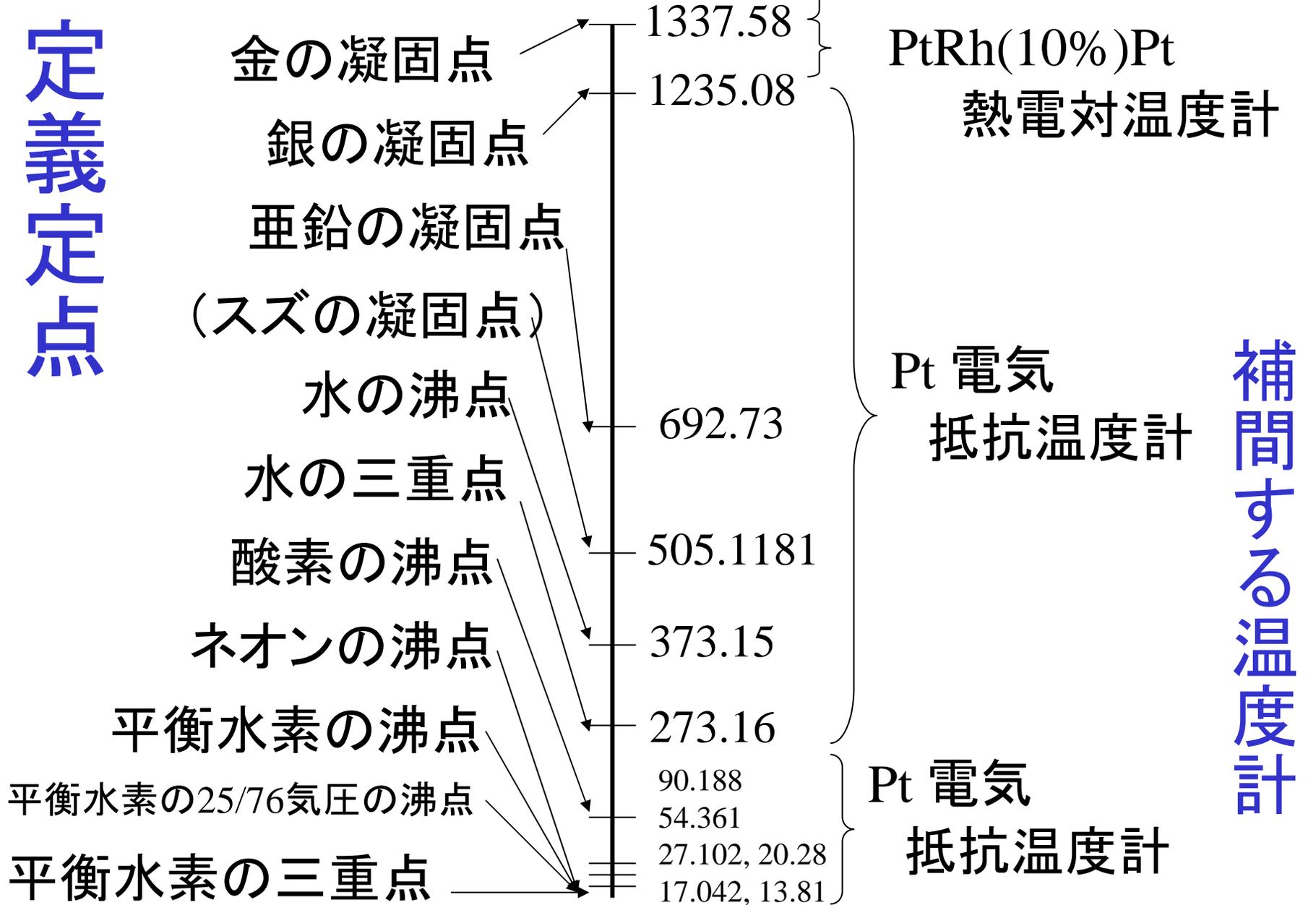
$$T_2 = -\frac{Q_2}{Q_1} T_1$$

T_1 既知, Q_1, Q_2 測定

→ T_2 を得る



定義定点



補間する温度計

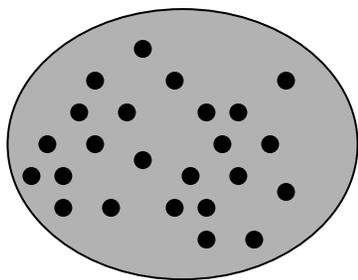
(6) 物質質量 (モル)

当初, 酸素の原子量を16

↙ 酸素: 同位元素16, 17, 18の同位体

→ あいまい

$$M(X) = \left\{ \frac{m(X)}{m(^{12}\text{C})} \right\} \times 0.012 \text{ kg/mol}$$



^{12}C 0.012kg(=12g)の原子数 $\cong 6.023 \times 10^{23}$ 個

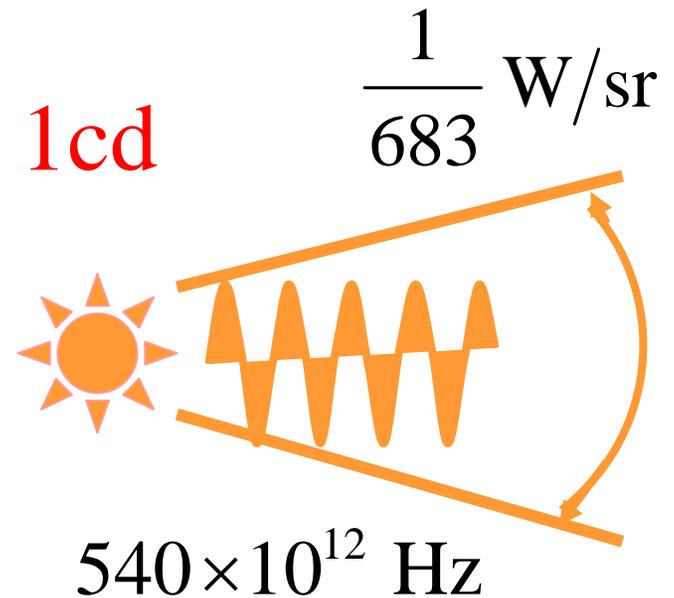
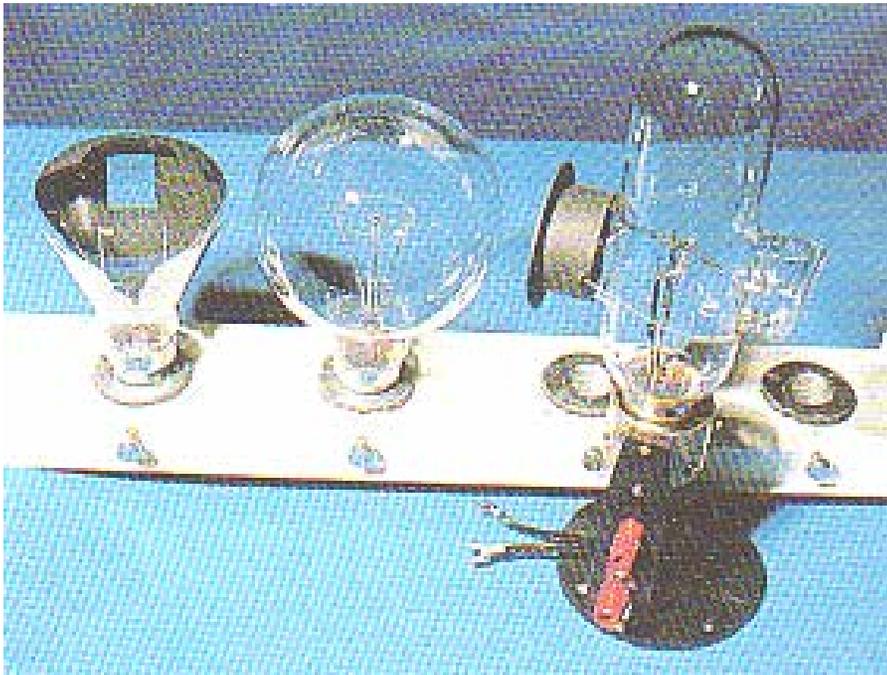
の要素集合体

(7) 光度 (カンデラ)

心理物理量

光度標準電球を標準器として比較測定

BIPM(国際度量衡局)に保管
されている光束, 光度標準



トレーサビリティ(標準供給体制)

国際標準機関

国立標準機関

指定された団体, (準)国立機関

計測器の校正サービスを行う認可企業

計測器を使用・製造・販売・修理・保守
を行う認可企業

校正連鎖

温度に関するトレーサビリティ

熱力学温度 T K, t °C

国際実用温度 T_{68} K, t_{68} °C
定義定点, Pt測温抵抗体,
PR10%熱電対, 光学温度計

実用標準温度計, 比較装置
ガラス製温度計, 比較槽, 比較炉,
リボン標準電球, 完全放射炉

実用温度計

熱電温度計, サーミスタ, 電気式温度計, 光高温計
圧力温度計, 抵抗温度計, 放射温度計, 液体封入温度計

校正連鎖