

# 現代物理学入門

## 特殊相対論と量子物理

保坂淳、岸本忠史 核物理研究センター

hosaka@rcnp.osaka-u.ac.jp

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~hosaka/>

TA: 堀井香織 (D1)

# 今年度の予定

[1]	1 0 / 5		}	特殊相対論 (保坂)
[2]	/ 1 2			
[3]	/ 1 9			
[4]	/ 2 6			
	1 1 / 2			
[5]	/ 9			
[6]	/ 1 6	(中間試験)		
[7]	/ 2 3	(休日)		
[8]	/ 3 0			
[9]	1 2 / 7			
[10]	/ 1 4		}	量子論 (岸本)
[11]	/ 2 1			
[12]	1 / 1 1			
[13]	/ 1 8			
[14]	1 / 2 5			
[15]	2 / 1	(最終試験)		

# 物理学

自然現象に潜む法則を探求する

奥行き と 広がり を兼ね備えている  
究極 多様性  
より基本的 現実の再構成

単純な法則を式で表現する  
その解のなかに多様な現象を見いだす

# 古典物理学

# 力学



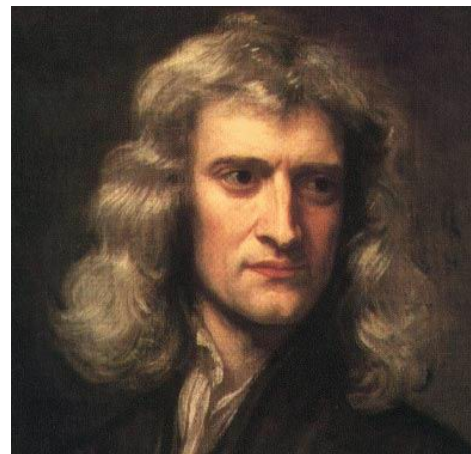
Galileo Galilei  
1564-1642

慣性の法則

天体の運行



Johannes Kepler  
1571-1630



Isaac Newton  
1642-1727

運動法則

$$F = ma$$

# 電磁気



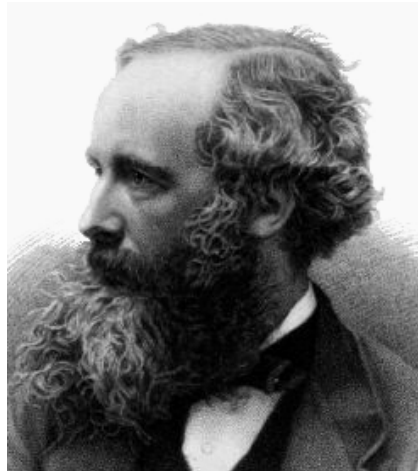
$1/r^2$ 則

Charles de Coulomb  
1736-1806



電場と磁場

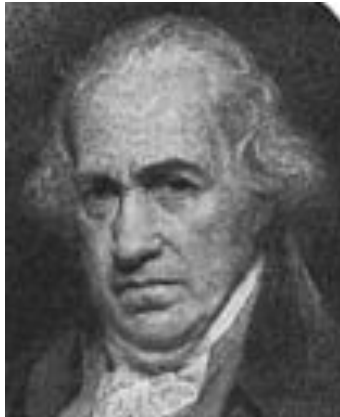
Michael Faraday  
1791-1867



マックスウェル  
の方程式

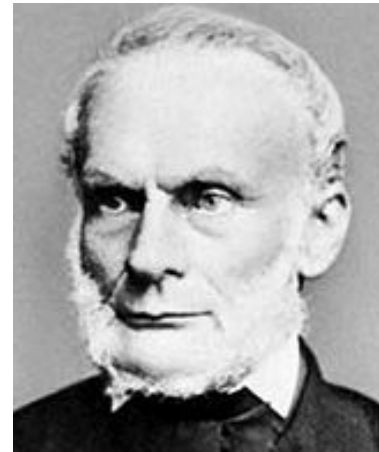
James Clerk Maxwell  
1831-1879

# 熱力学



蒸気機関

James Watt  
1736-1819



エントロピー

Rudolf J.E. Clausius  
1822-1888



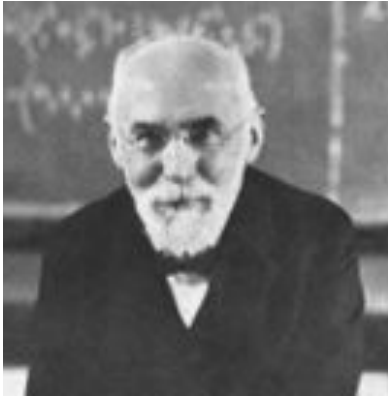
Ludwig Eduard Boltzmann  
1844-1906

$$S = k \log W$$

# 現代物理



# 相對論



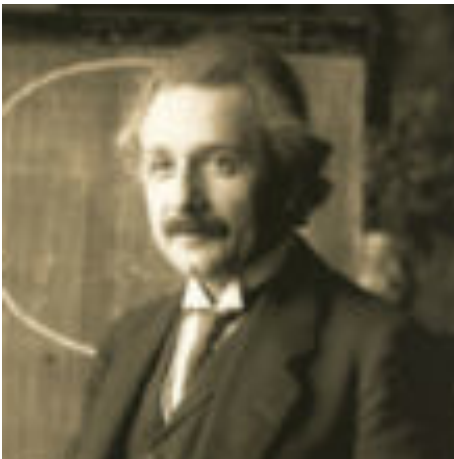
Hendrik A. Lorentz  
1853-1928



Albert A.  
Michelson  
1852-1931



Edward W.  
Morley  
1838-1923



Albert Einstein  
1879-1855

# 量子論



Max K.E.L. Planck  
1858-1947



Niels H.D. Bohr  
1885-1962



Louis-Victor-Pierre-Raymond,  
7th duc de Broglie  
1892-1987



Erwin Rudolf Josef  
Alexander Schroinger  
1887-1961



Werner Karl Heisenberg  
1901-1976



Wolfgang Ernst Pauli  
1900 - 1958

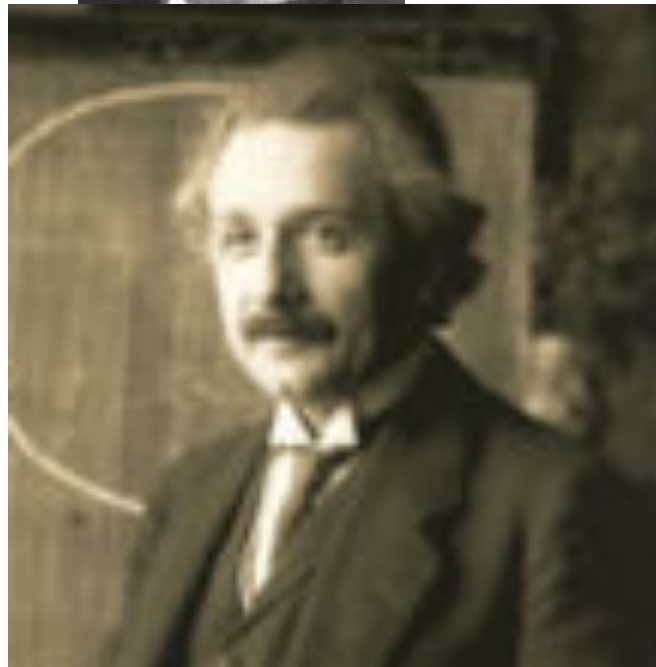
# 量子論



Max K.E.L. Planck  
1858-1947



Louis-Victor-Pierre-Raymond,  
duc de Broglie  
1892-1987



Werner Karl Heisenberg  
1901-1976



Erwin Rudolf Josef  
Alexander Schroinger  
1887-1961



Wolfgang Ernst Pauli  
1900 - 1958

# 現代物理

相対論  
量子論

時空  
物質



の新たな概念を構築

場(field)の考え方

現在の物理学へ

系の母関数  
(ラグランジアン)

運動方程式

対称性

保存則



南部陽一郎

for the discovery of the mechanism of  
**spontaneous broken symmetry** in  
**subatomic physics**



小林誠、益川敏英

for the discovery of the origin of the **broken symmetry**  
which predicts the existence of at least **three families of**  
**quarks** in nature

# 南部 自発的対称性の破れ

強い相互作用の解明 = 物質生成の起源

Clay数学研究所の2000年問題

<http://www.claymath.org/millennium/>

★質量の起源

★クォークの閉じこめ

★カイラル対称性の自発的破れ

クォークの質量 5 ~ 10 MeV

$$E = mc^2$$

核子の質量 940 MeV

90 %以上が相互作用(力)によってもたらされている

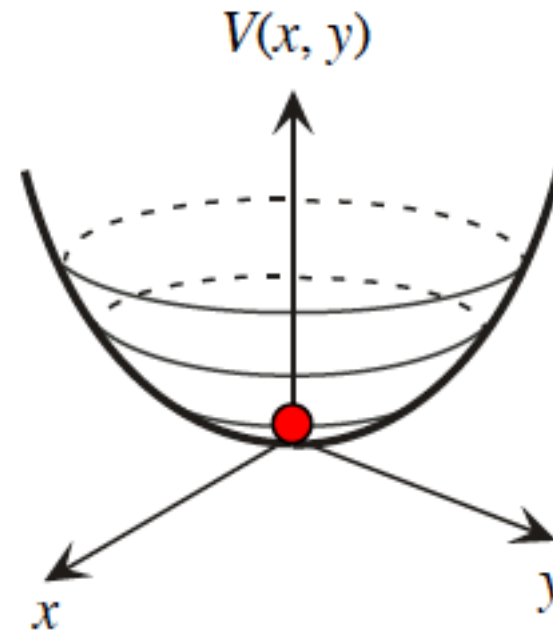
# 真空とその周りの運動

ポテンシャルエネルギーの最低点

$$V(x, y) = (x^2 + y^2)^2 + a(x^2 + y^2)$$

$a$  が正の場合

真空からどちらに進んでも  
同じ  
=>  
対称性がある



# 真空とその周りの運動

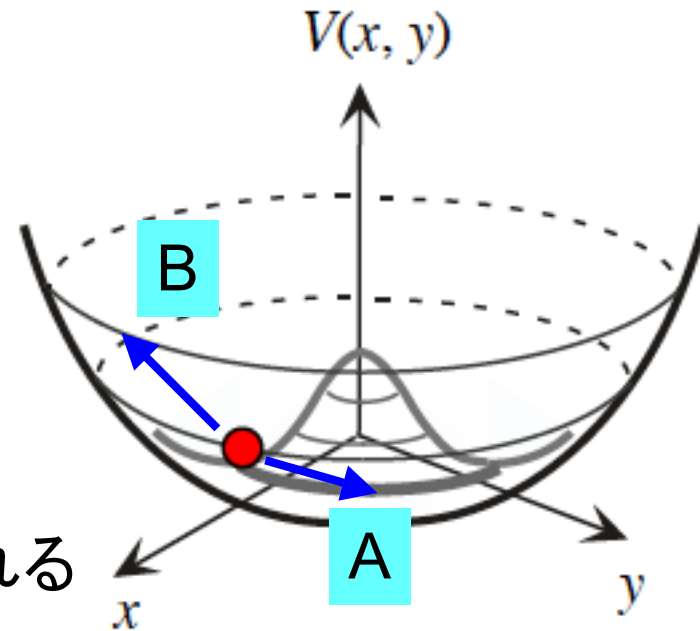
ポテンシャルエネルギーの最低点

$$V(x, y) = (x^2 + y^2)^2 + a(x^2 + y^2)$$

$a$  が負の場合

真空から  
Aに進む = 平ら  
Bに進む = 坂を上る

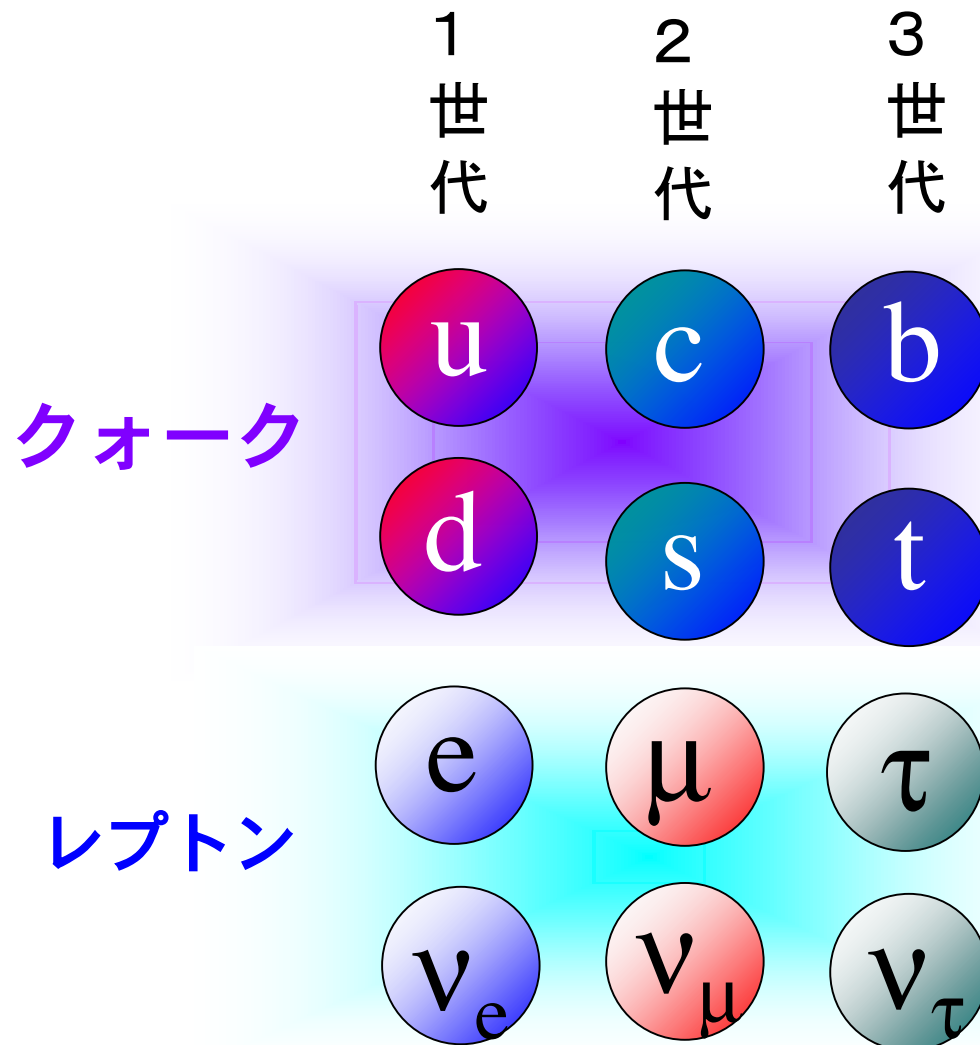
違いが生じる = 対称性が破れる





# 小林一益川

CP対称性の破れとクォークの数(世代)



# 粒子と反粒子

物理法則は、**粒子・反粒子**の間の対称性を維持？  
**相対論と量子論の帰結**

わずかながら破れている

宇宙に反物質がない

さらにクォークの種類に関係

# 3世代を結ぶ行列

$(u, c, t) \leftrightarrow (d, s, b)$  複素数波動関数  
量子論

$$\begin{pmatrix} d^* & s^* & b^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}$$

CKM行列 (ユニタリ)

$$V_{ij} = V_{ji}^*$$

$N^2$ 個の実数で表現できる

## 2x2の場合

$$\begin{pmatrix} d^* & s^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -e^{i\alpha} \sin \theta \\ e^{i\beta} \sin \theta & e^{i\gamma} \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ c \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \theta, \alpha, \beta, \gamma \\ 4\text{つの実数} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} u \\ c \\ d \\ s \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} e^{ix} u \\ e^{iy} c \\ e^{iz} d \\ e^{iw} s \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{と再定義することで、} \alpha, \beta, \gamma \\ \text{を消去することが出来る} \\ \\ \text{CKM行列は実数で} \\ \text{CPの破れを引き起こさない} \end{array}$$

# 一般に

## $N^2$ 個の実数の内

$N(N-1)/2$  個は角度  
 $2N-1$  個は位相で吸収できる

残りの  $N^2 - [N(N-1)/2 + (2N-1)]$   
 $= (N-1)(N-2)/2$  個  
が複素位相となりCP対称性を破る

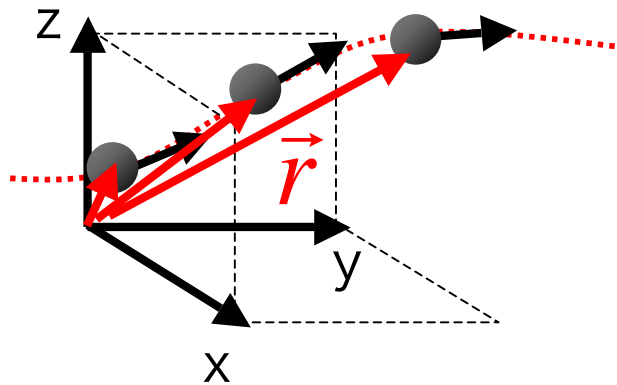
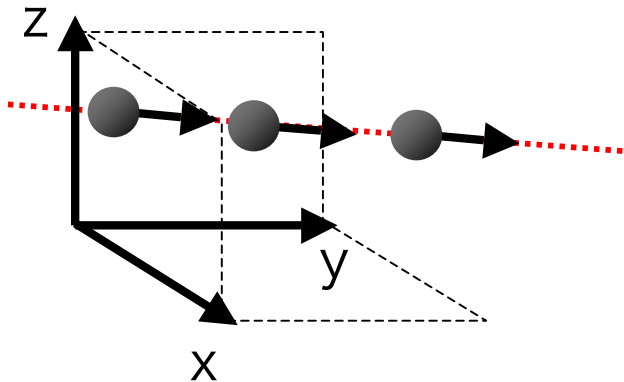
$N \geq 3$ であればよい  $\Rightarrow$  クォークは3世代

# 光速度不変の原理

相対性理論発見へのへの第一歩

# 座標系（慣性系） = > 時空

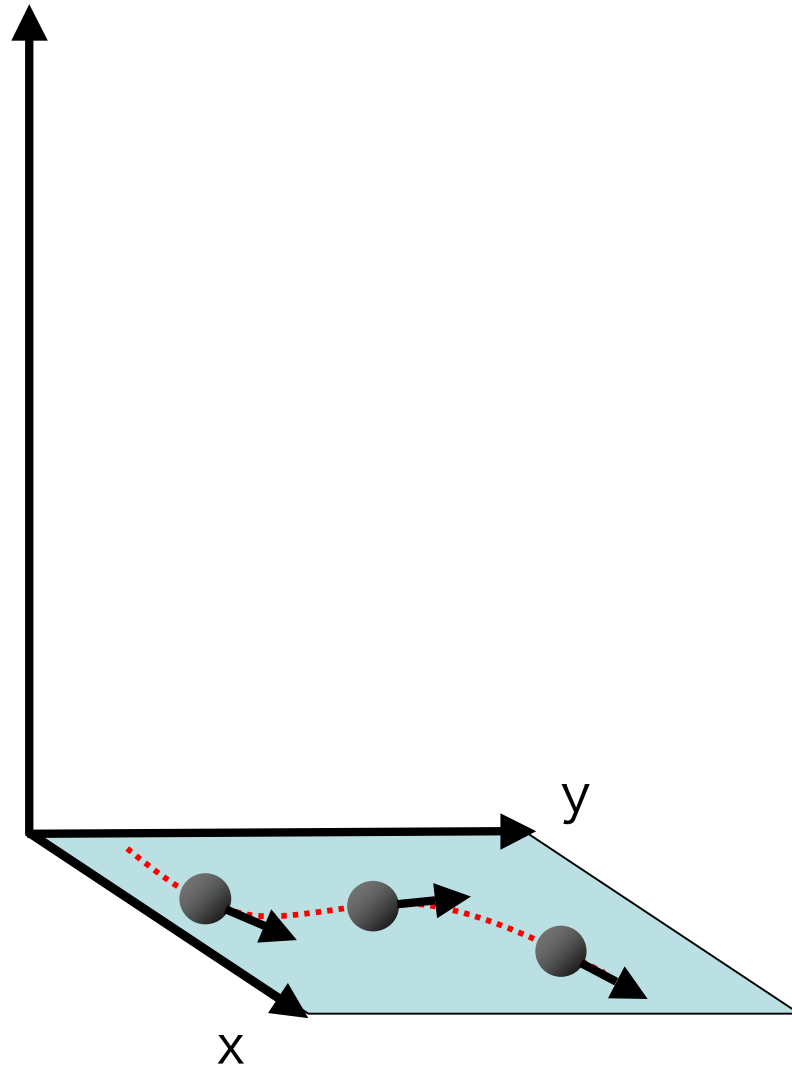
力を受けないものが等速直線運動する



時刻  $t$  の関数としての位置  
( $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ )

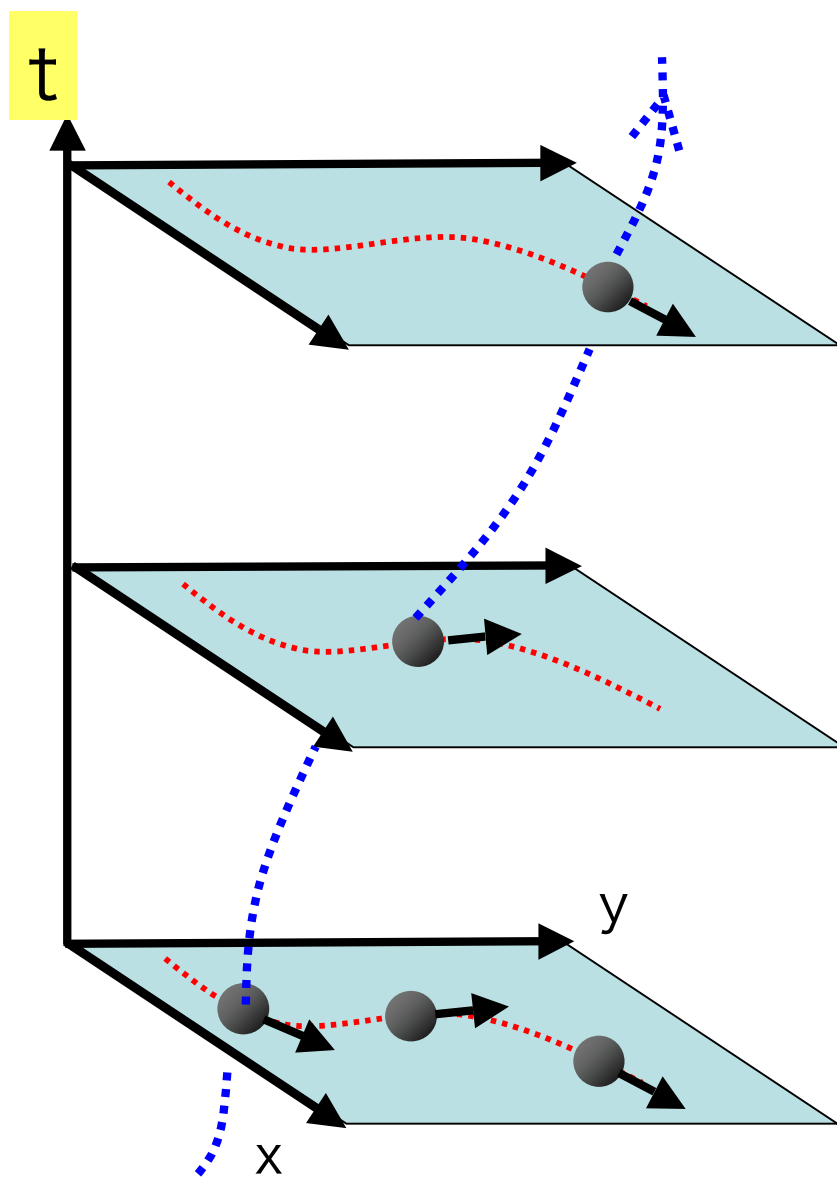
$$\vec{F}(t, \vec{r}) = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad \vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{dt}$$

# 世界線

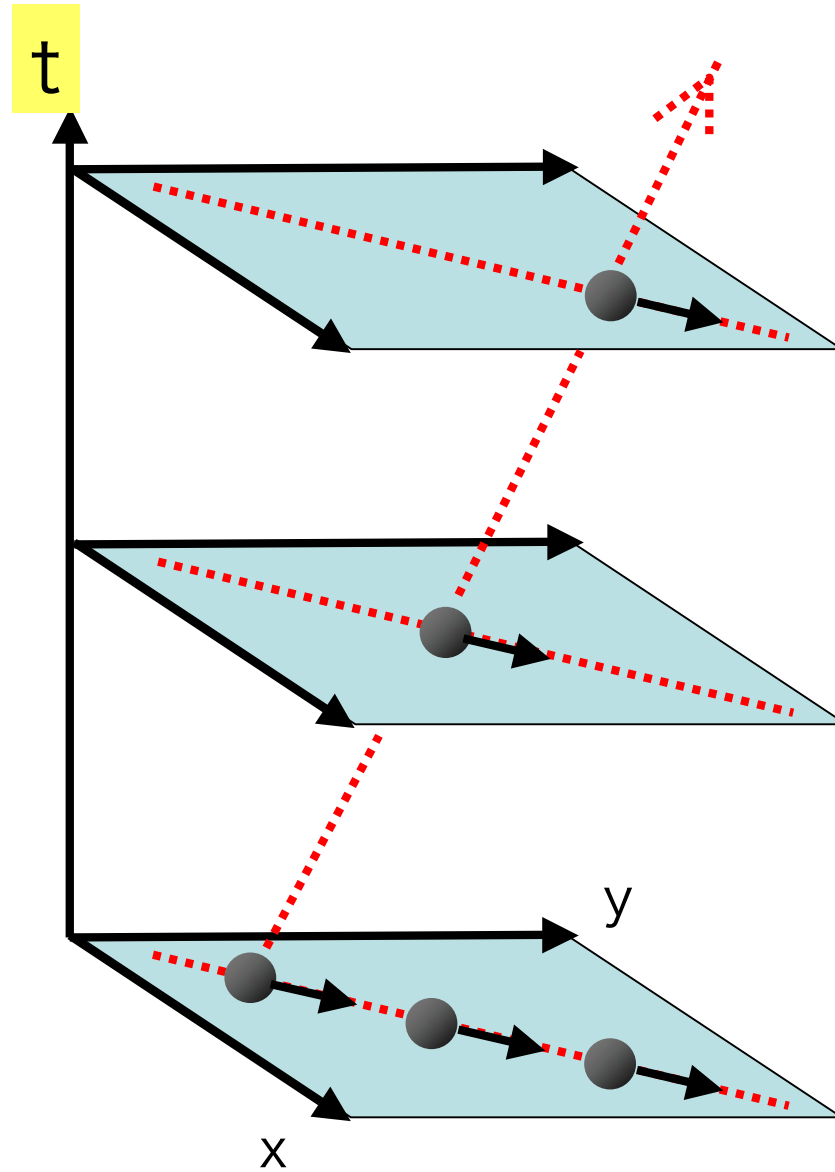




# 世界線



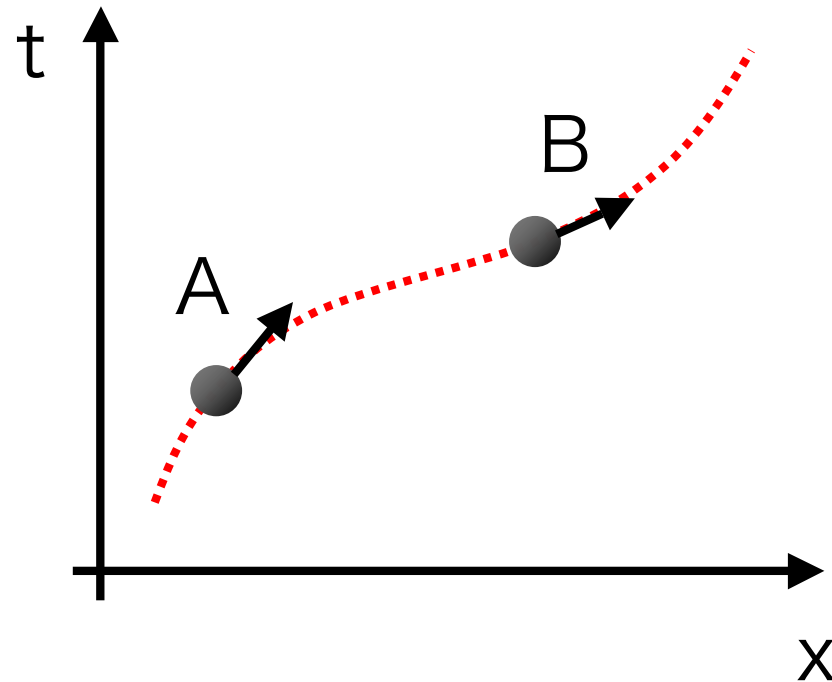
# 世界線



等速直線運動

# 2次元の世界線

X方向に運動する物体

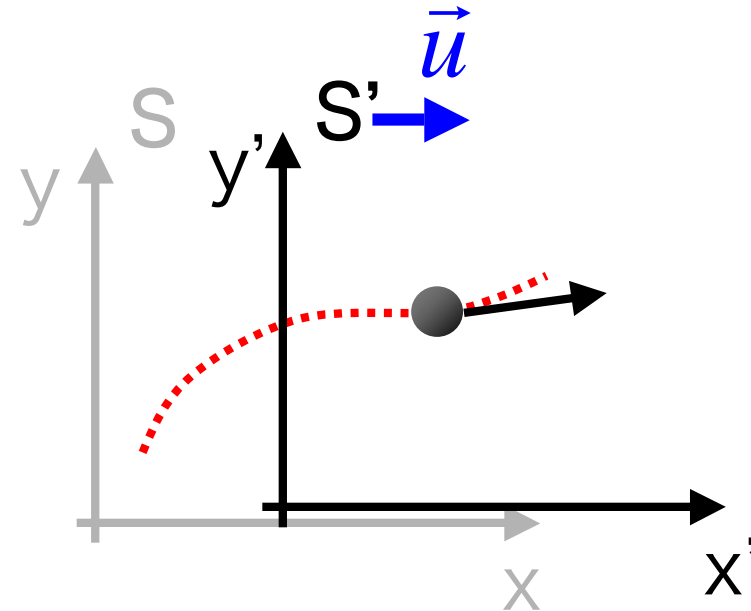
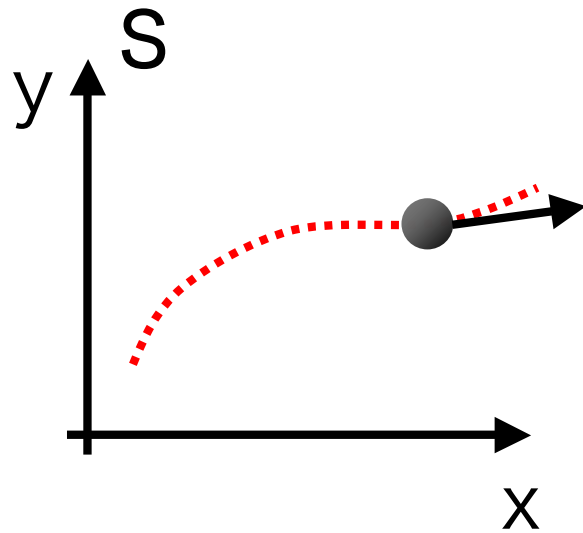


問：AとBではどちらが速く運動しているか

問： $x_0$ に静止する物体の世界線はどのようなか

# 座標変換

2 の慣性系 S, S'



$\vec{u}$  Sから見たS'の速度

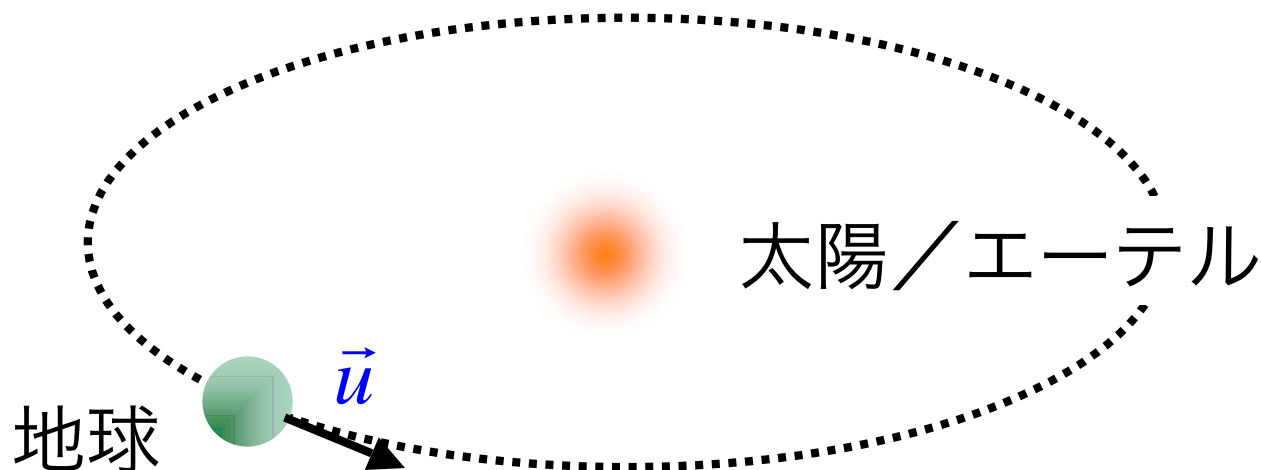
古典力学の仮定

$$\boxed{t = t'}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t = t' \\ x = x' + ut \\ y = y', z = z' \end{array} \right.$$

# マイケルソン・モーレーの実験

1887

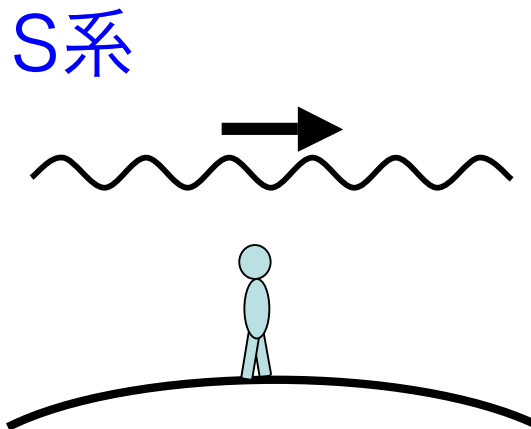


地球の座標系 ( $S'$ ) はエーテルの座標系 ( $S$ )  
に対して速度  $\vec{u}$  で運動している

# 光の速度 Speed of light in vacuum

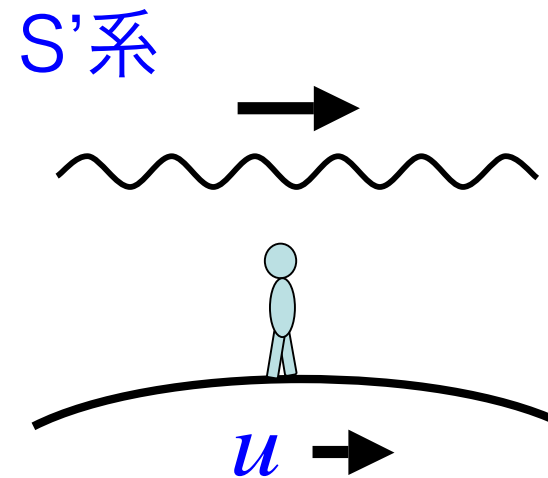
$$c = 299\,792\,458 \text{ [m / s]}$$

定義



エーテルの系

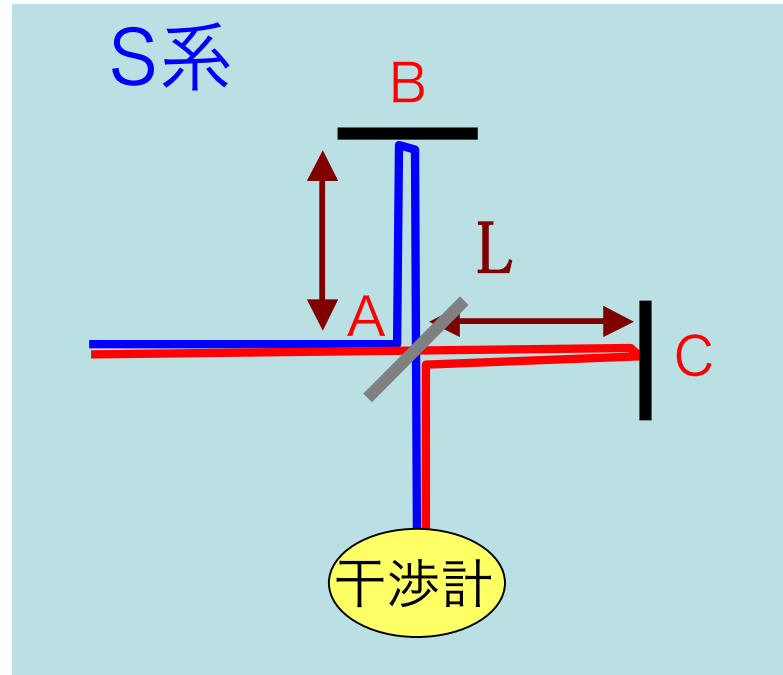
$$v_{\text{Light}} = c$$



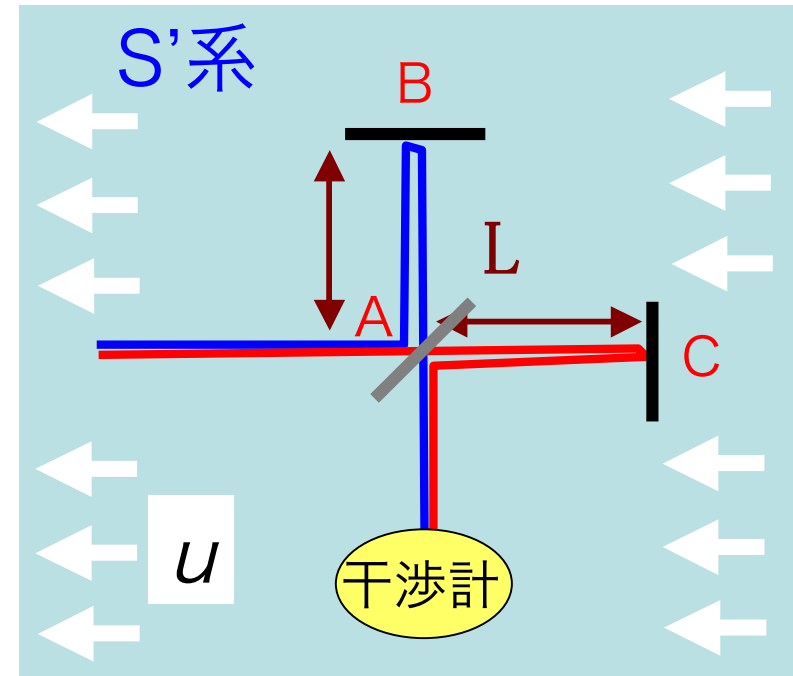
エーテルに対して  
速度  $u$  で動く系

$$v_{\text{Light}} = c - u$$

# MMの干渉計

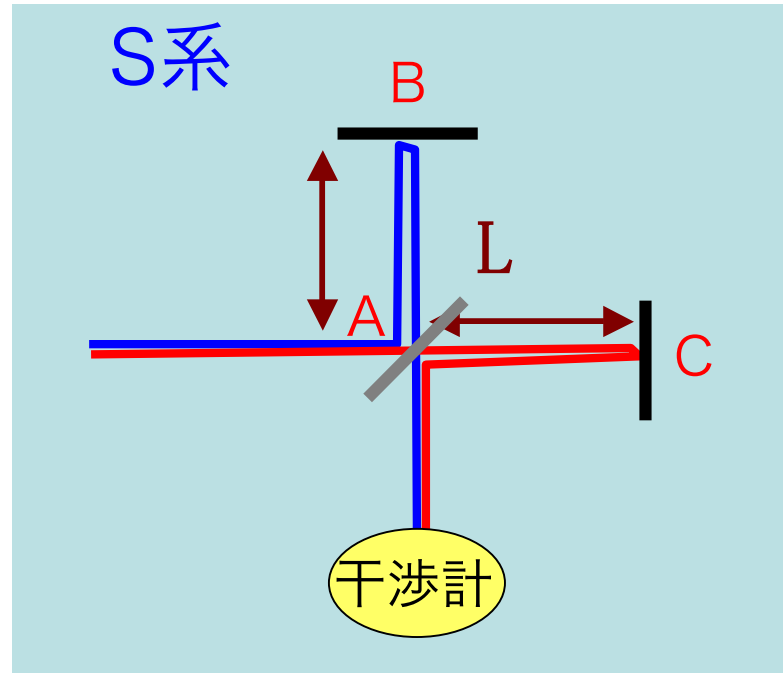


$$T_{ABA} = T_{ACA} = T_0$$



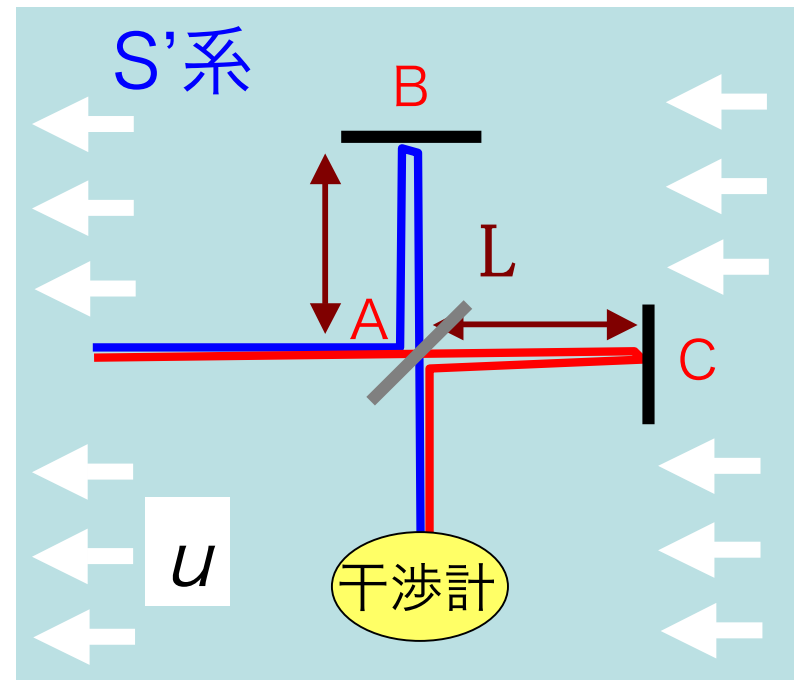
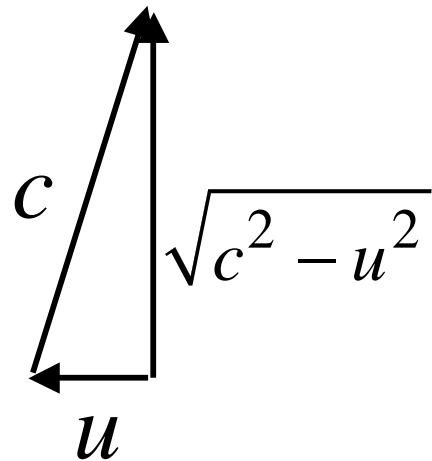
$$T_{ABA} \neq T_{ACA}$$

# MMの干渉計



$$t_{ABA} = t_{ACA} = \frac{2L}{c} \\ = t_0$$





$$t_{ABA} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t_{ACA} = \frac{L}{c - u} + \frac{L}{c + u} = \frac{t_0}{1 - \beta^2}$$

時間差は

$$\Delta t \equiv \left| \frac{t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{t_0}{1 - \beta^2} \right| \sim t_0 \frac{\beta^2}{2}$$

# 干渉

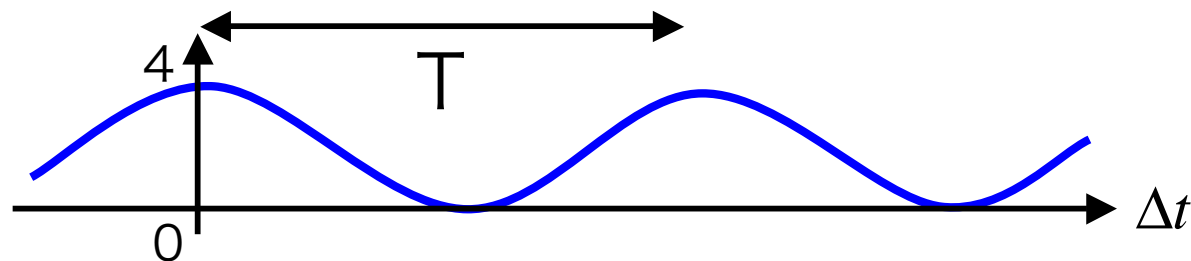
光は波で振動する  $A(t) \sim \exp(i\omega t)$

時間（位相）のずれた**波の重ね合わせ**

$$A(t) + A(t + \Delta t) = \exp(i\omega t)(1 + \exp(i\omega \Delta t))$$

→

$$\begin{aligned} |A(t) + A(t + \Delta t)|^2 &= |1 + \exp(i\omega \Delta t)|^2 \\ &= (1 + \cos(\omega \Delta t))^2 + \sin^2(\omega \Delta t) = 2 + 2\cos(\omega \Delta t) \end{aligned}$$

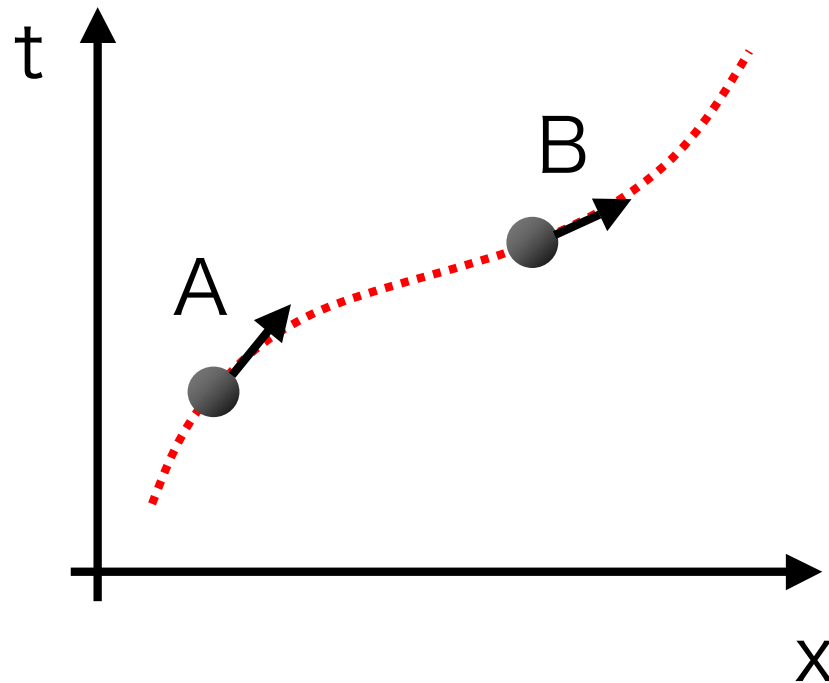


問：周期 $T$ を  $\omega$  で表せ

# レポート問題1回目

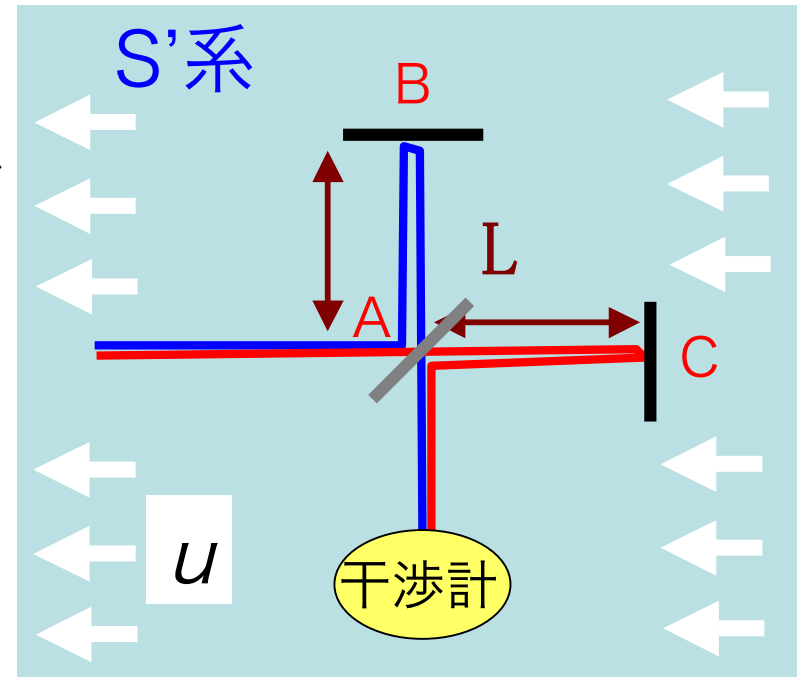
問1 : AとBではどちらが速く運動しているか

問2 :  $x_0$ に静止する物体の世界線はどうなるか



問3：以下最初の等号を説明し、  
また、2番目の近似式を示せ。

$$|t_{ABA} - t_{ACA}| = \left| \frac{T_0}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{T_0}{1-\beta^2} \right| \sim T_0 \frac{\beta^2}{2}$$



問4：以下  $\Delta t$  の関数  $f(\Delta t)$  を計算しそのグラフを  
 $\Delta t$  の関数として書け。また周期  $T$  を  $\omega$  で表せ。

$$A(t) = e^{i\omega t}$$

$$f(\Delta t) = |A(t) + A(t + \Delta t)|^2$$

また  $\Delta t$  を実験で変えるにはどうしたら良いか。

問5：マイケルソンは1887年の実験は失敗だったと言っている。どのような意味かを説明せよ。



# レポート提出方法

ホチキス

提出日  
学科、学籍番号、氏名

締め切り  
原則次週

レポート問題\*\*回目

問1：問題を書く

答え

問2：問題を書く

A4

答え

...

...

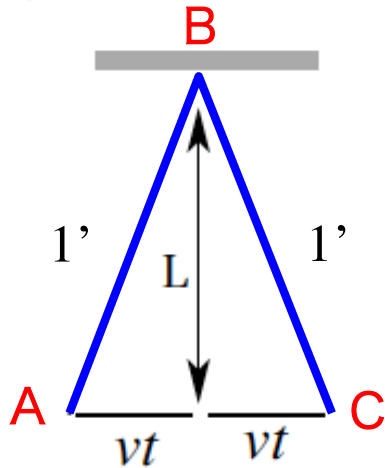
# 成績

(試験の合計) \*0.8 くらい  
+  
レポート (適宜)

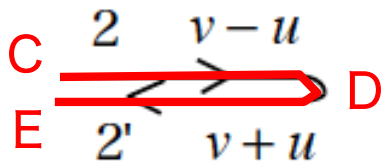
とりあえずレポートは全て  
出しておくのが得策

# 計算

エーテル系から見ると光は三角形の斜辺を通る



地球から見ると2のときはゆっくり、2'のときは速く進む



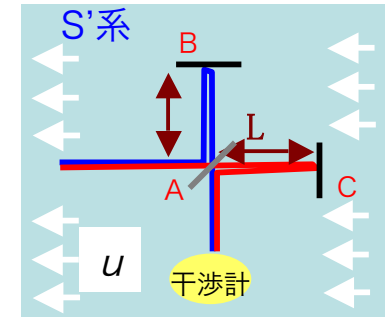
ABCに要する時間

$$\left( c \frac{t_{ABC}}{2} \right)^2 = \left( v \frac{t_{ABC}}{2} \right)^2 + L^2$$

$$t_{ABC} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

CDEに要する時間

$$t_{CDE} = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{T_0}{1 - \beta^2}$$





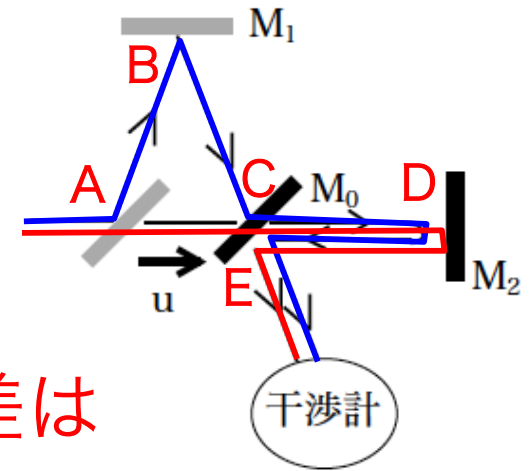
# 計算

ABC→干渉計

ACDE→干渉計

に要する時間と

に要する時間の差は



$$|t_{ABC} - t_{CDE}| = \left| \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{T_0}{1 - \beta^2} \right|$$
$$\sim T_0 \frac{\beta^2}{2}$$

問：最後の近似式を示せ