

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 (M2)

今年度の予定

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



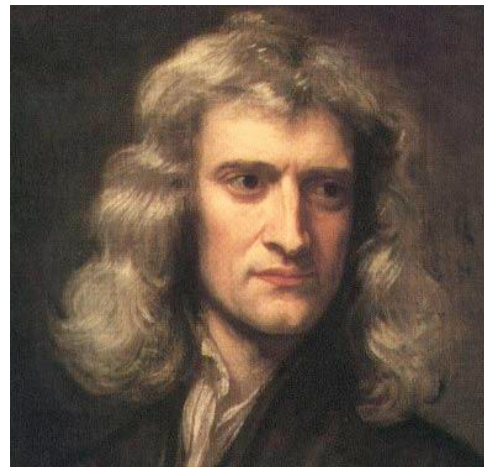
天体の運行

慣性の法則

Galileo Galilei
1564-1642



Johannes Kepler
1571-1630



運動法則

$$F = ma$$

Isaac Newton
1642-1727

電磁気



$1/r^2$ 則

Charles de Coulomb
1736-1806



電場と磁場

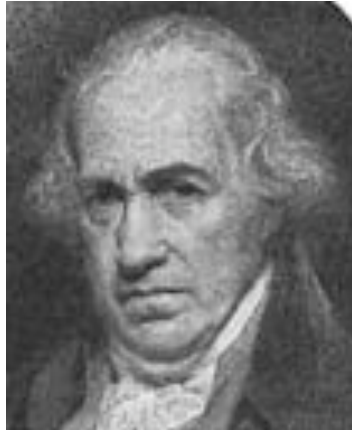
Michael Faraday
1791-1867



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

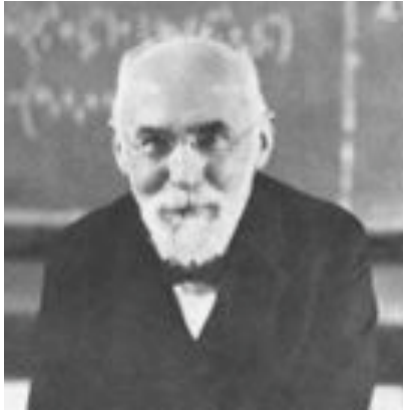


Ludwig Eduard Boltzmann
1844-1906

$$S = k \log W$$

現代物理

相對論



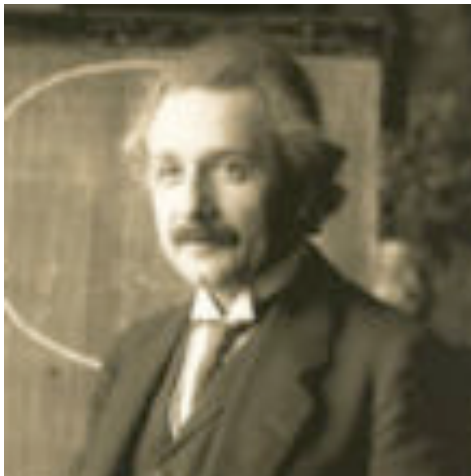
Hendrik A. Lorentz
1853-1928



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

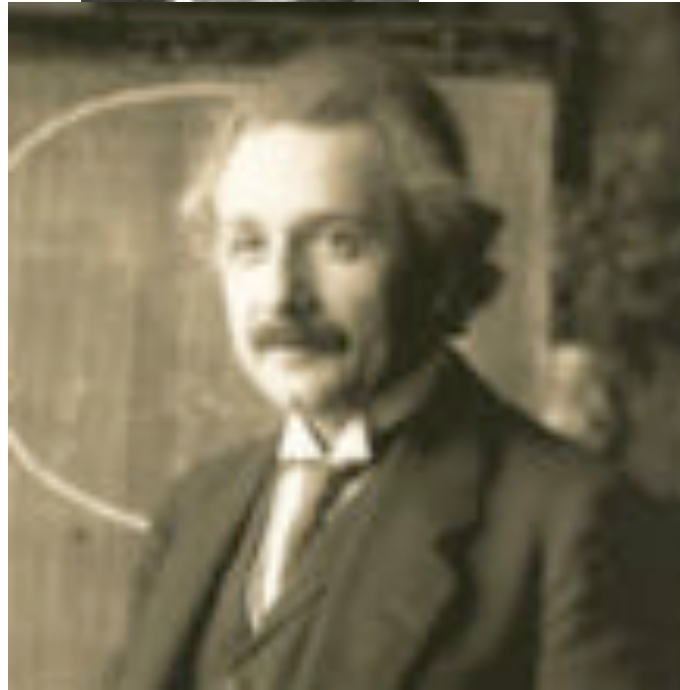
量子論



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

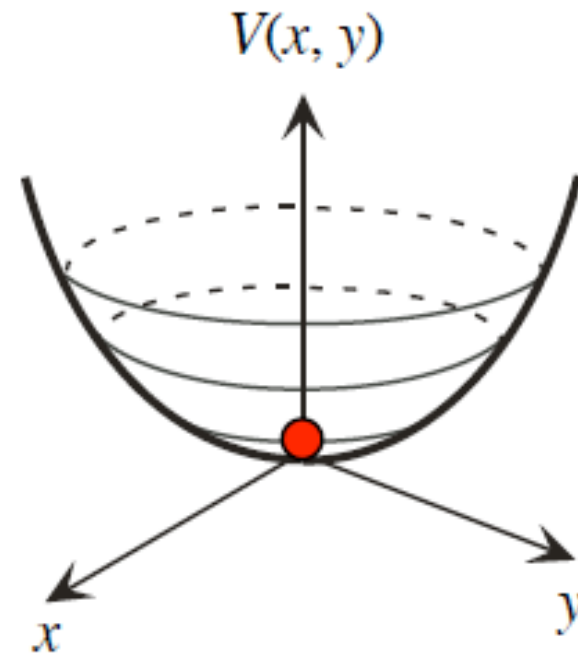
真空とその周りの運動

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

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

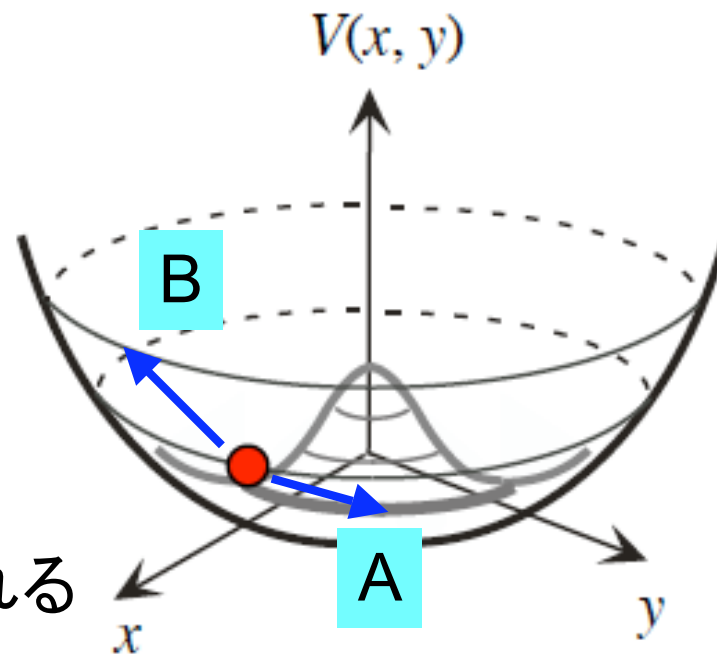
a が負の場合

真空から

Aに進む = 平ら

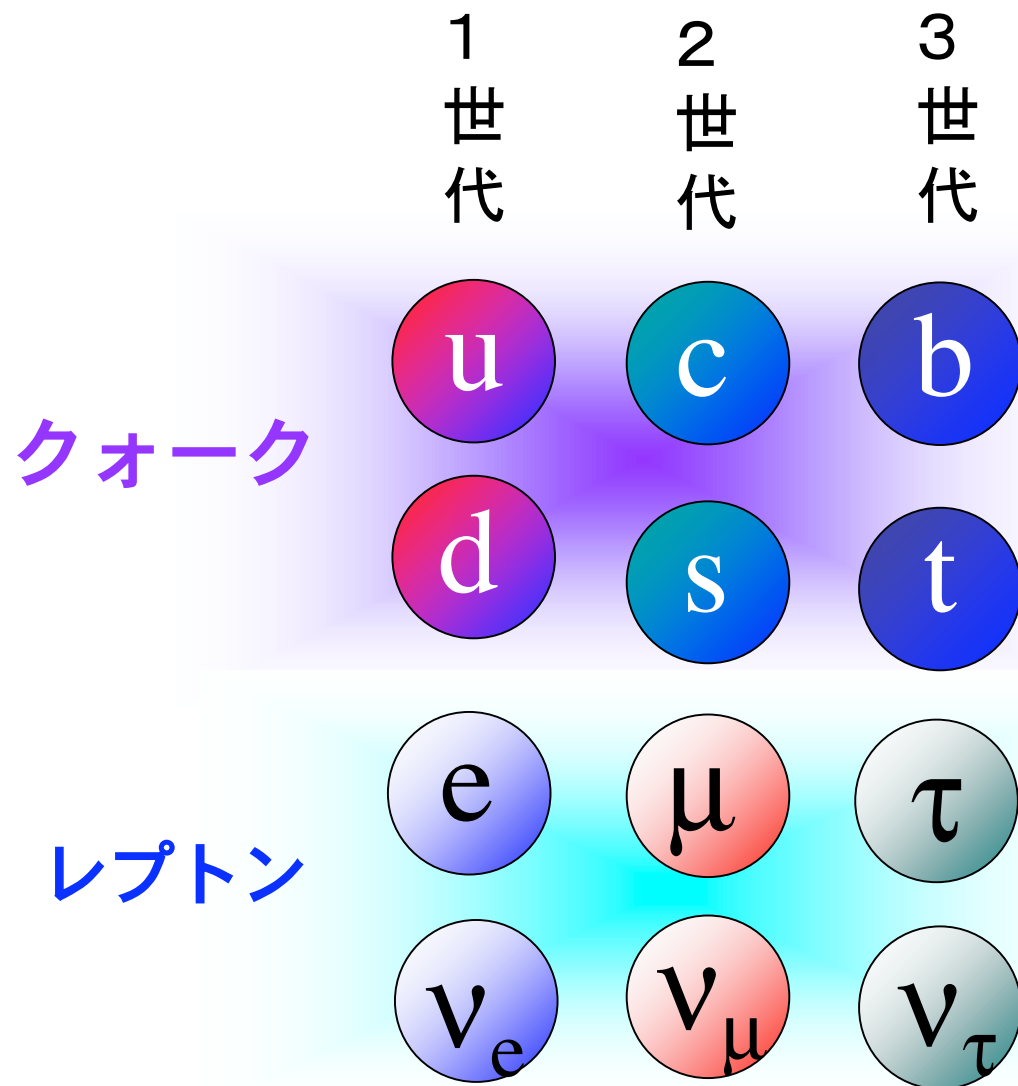
Bに進む = 坂を上る

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

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

$$\begin{array}{l} u \\ c \\ d \\ s \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} e^{ix} u \\ e^{iy} c \\ e^{iz} d \\ e^{iw} s \end{array}$$

と再定義することで、 α, β, γ
を消去することが出来る

CKM行列は実数で
CPの破れを引き起こさない

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

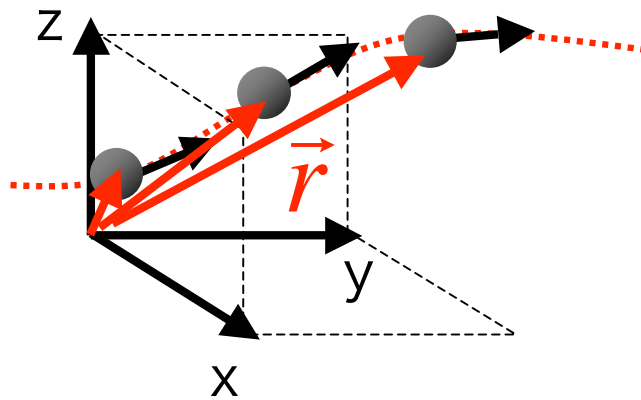
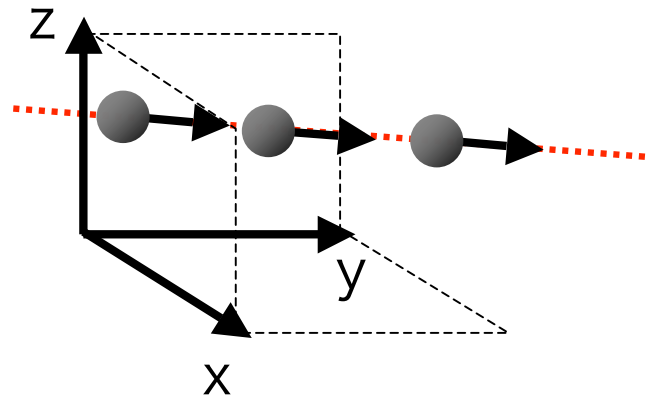
$N \geq 3$ であればよい \Rightarrow クォークは3世代

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）

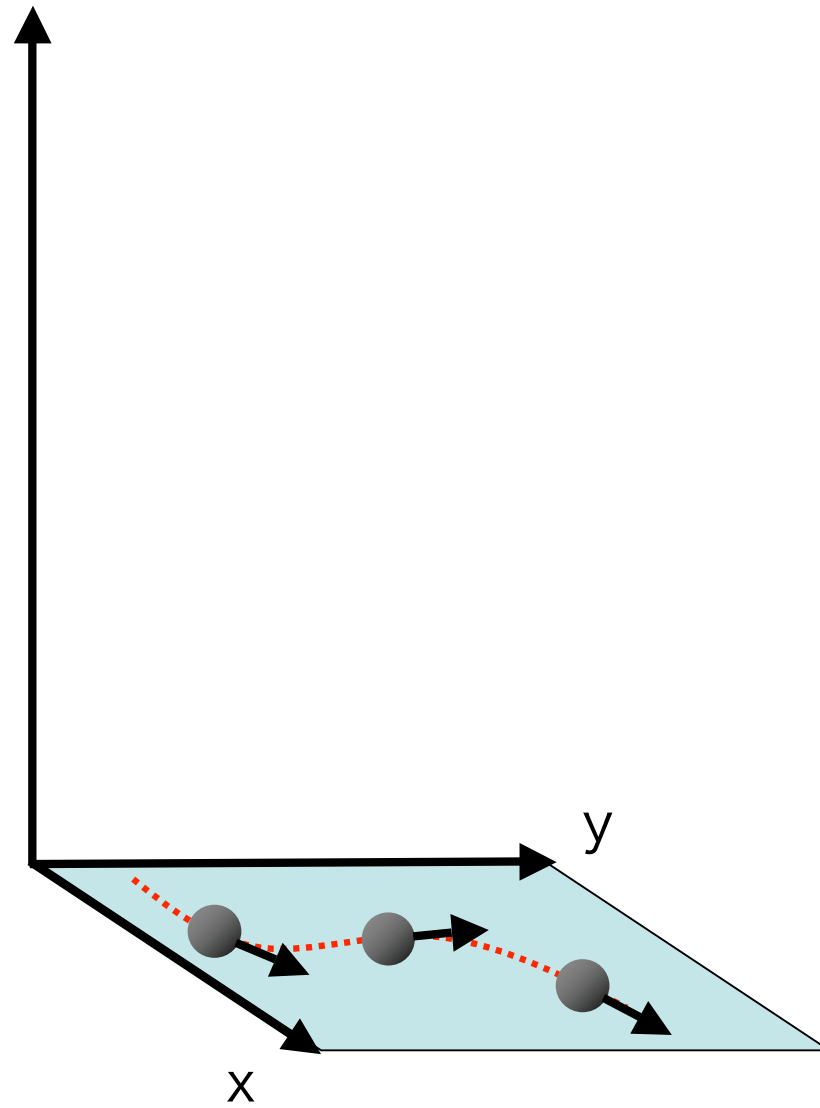
力を受けないものが等速直線運動する



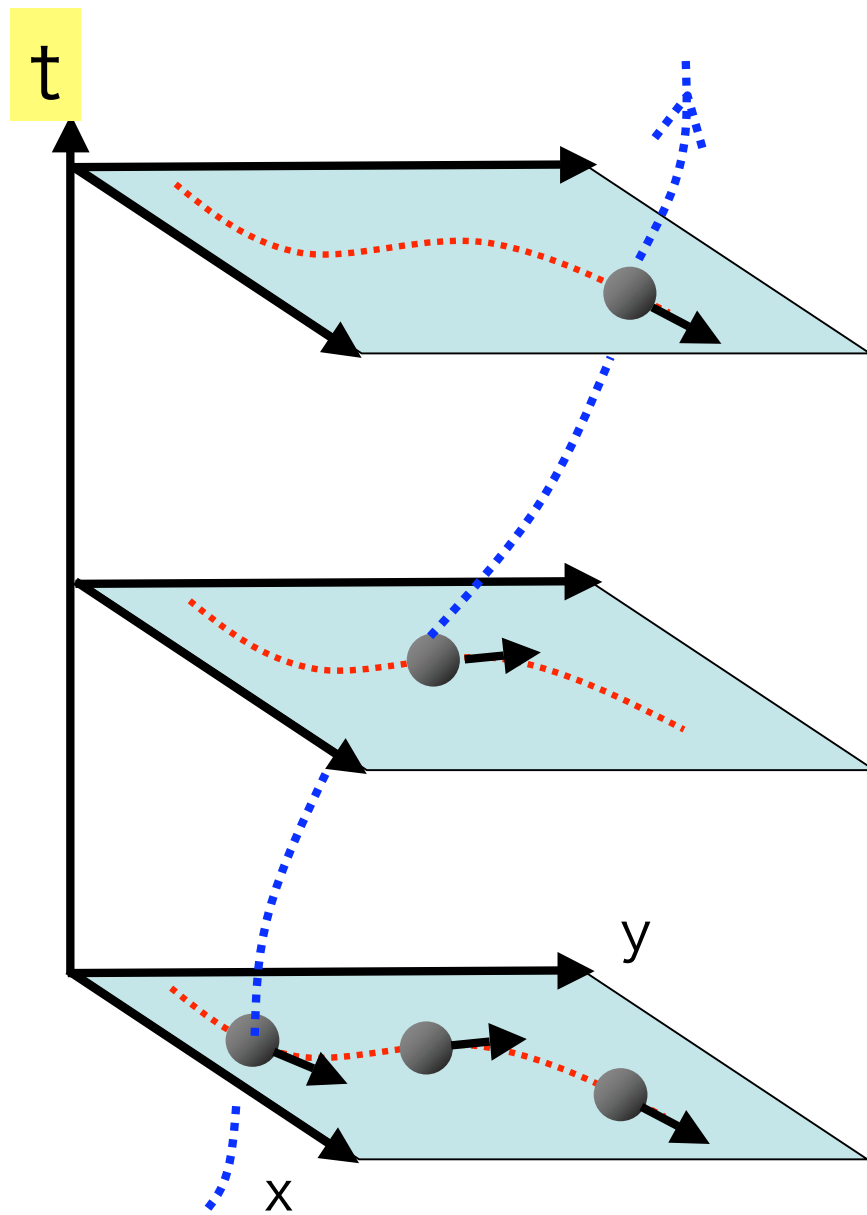
時刻 t の関数としての位置
($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$)

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

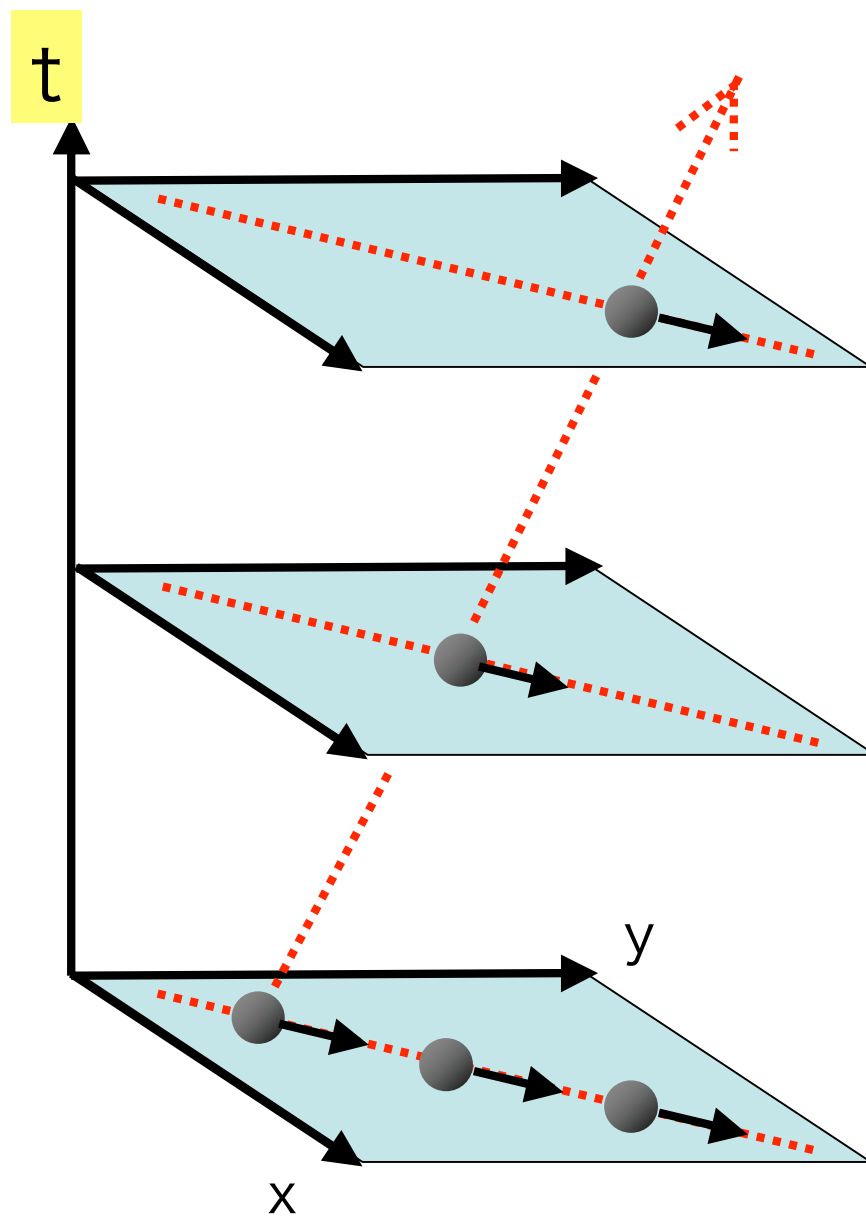
世界線



世界線



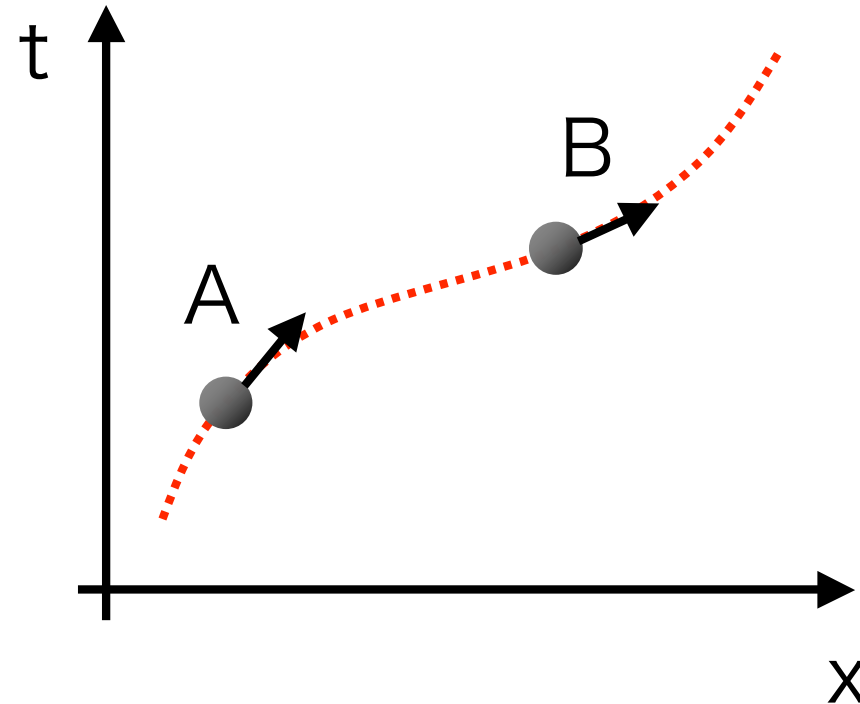
世界線



等速直線運動

2次元の世界線

X方向に運動する物体

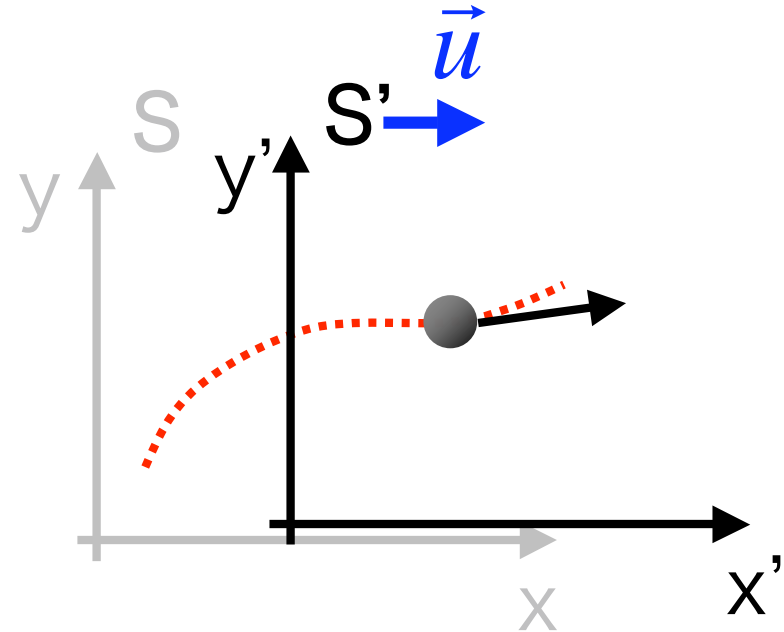
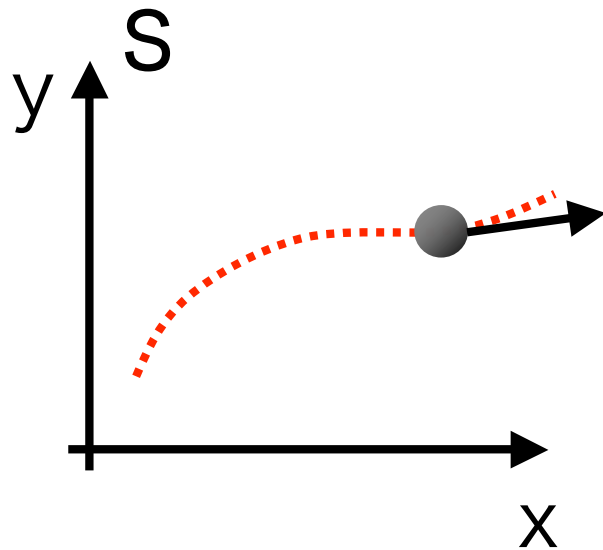


問：AとBではどちらが速く運動しているか

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'



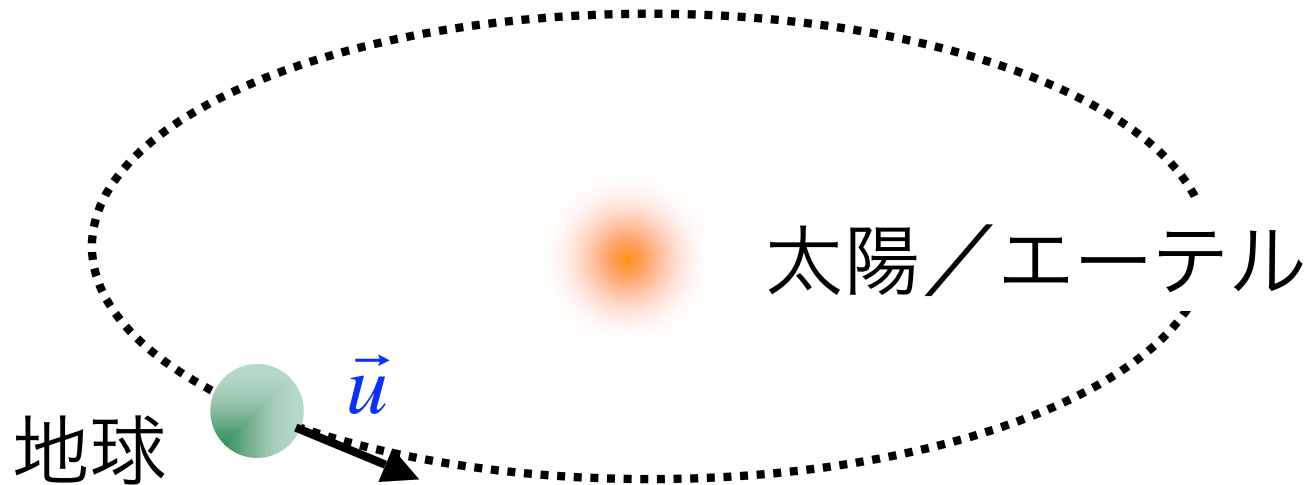
古典力学の仮定 \vec{u} Sから見たS'の速度

$$\begin{cases} t = t' \\ \vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t \end{cases}$$

$$\begin{cases} t = t' \\ x = x' + ut \\ y = y', z = z' \end{cases}$$

マイケルソン・モーレーの実験

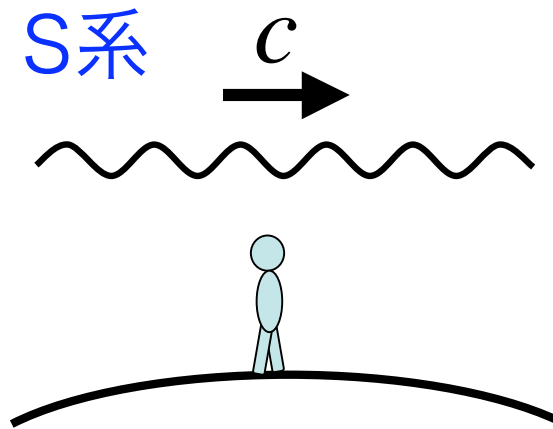
1887



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

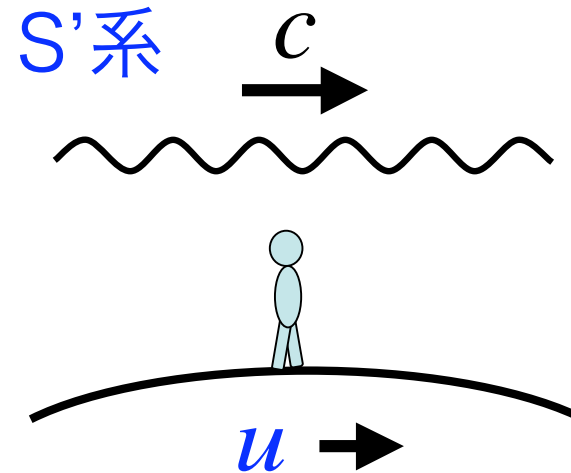
光の速度 Speed of light in vacuum

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



エーテルの系

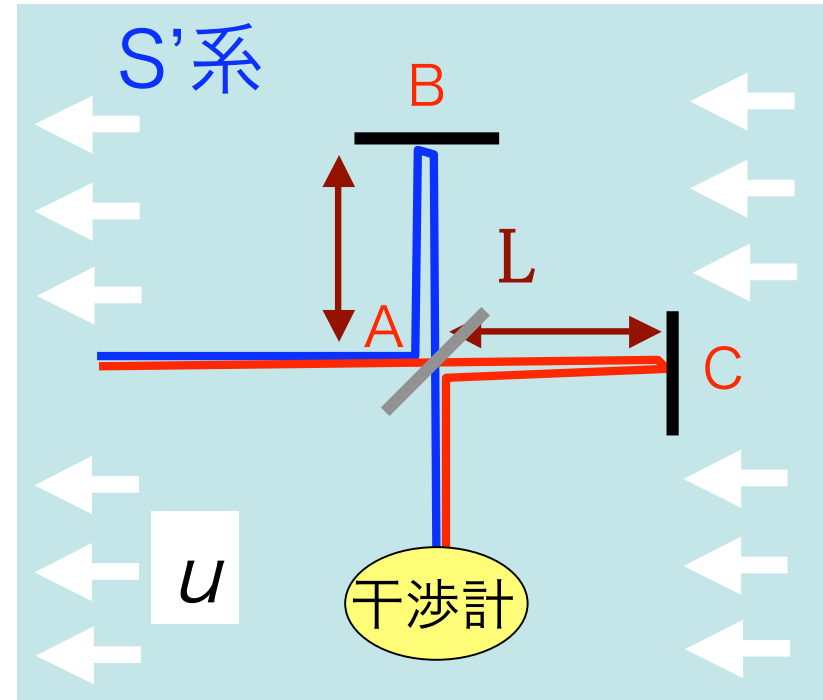
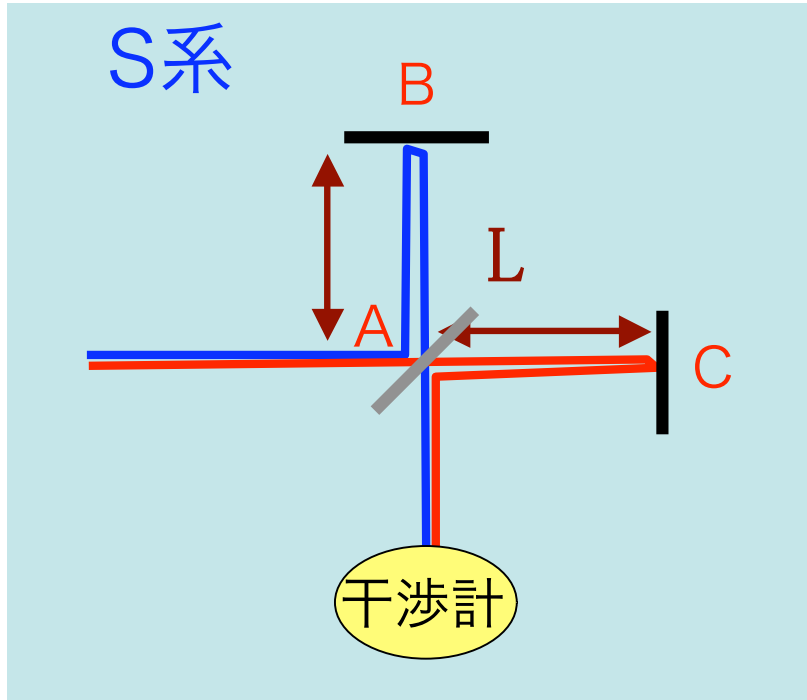
$$v = c$$



エーテルに対して
速度 u で動く系

$$v = c - u$$

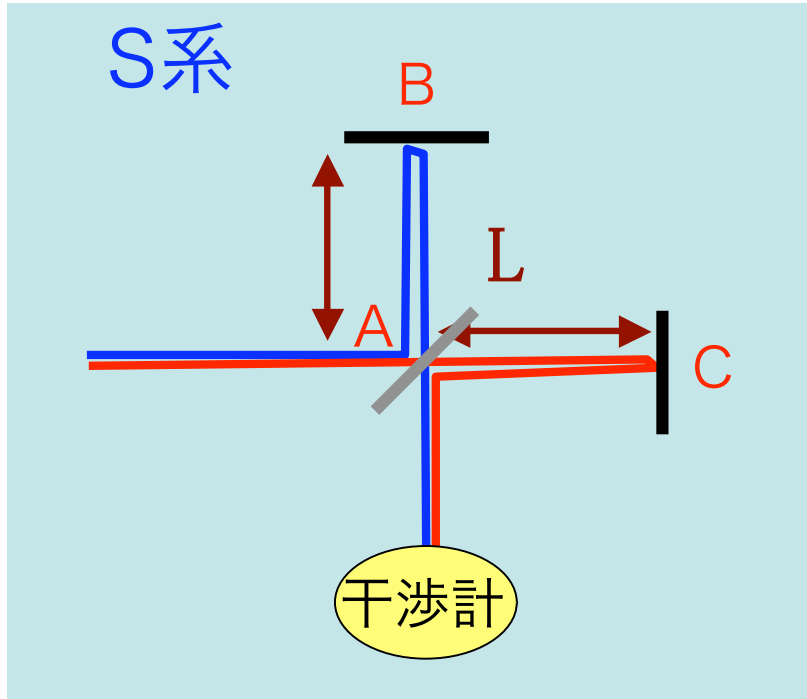
MMの干渉計



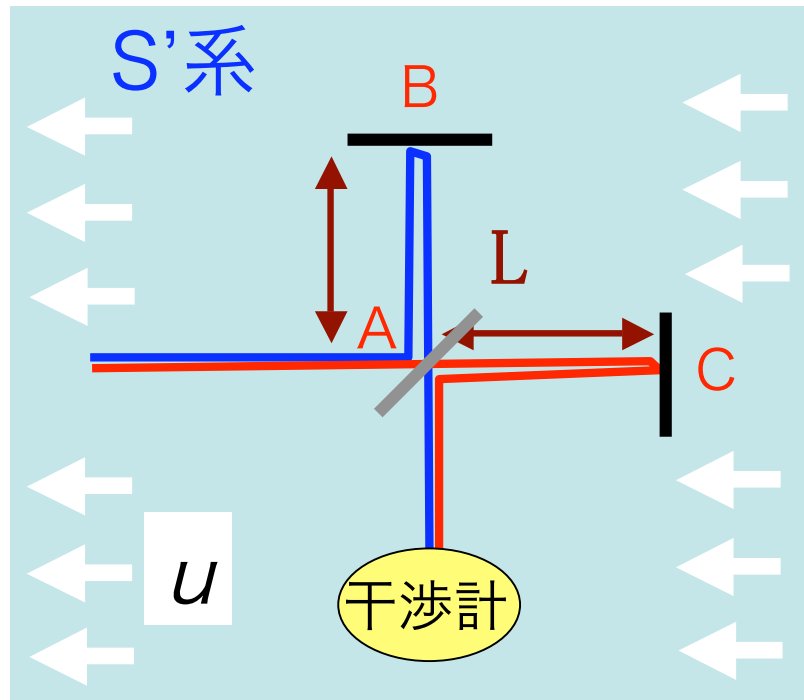
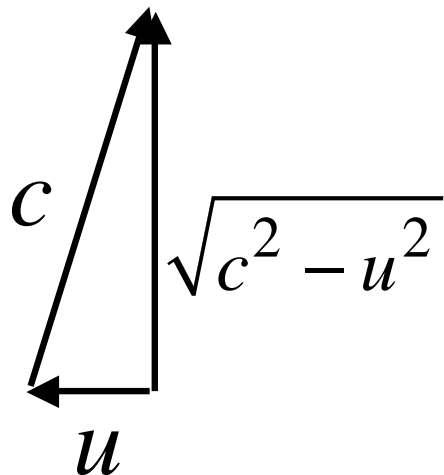
$$T_{ABA} = T_{ACA} = T_0$$

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

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

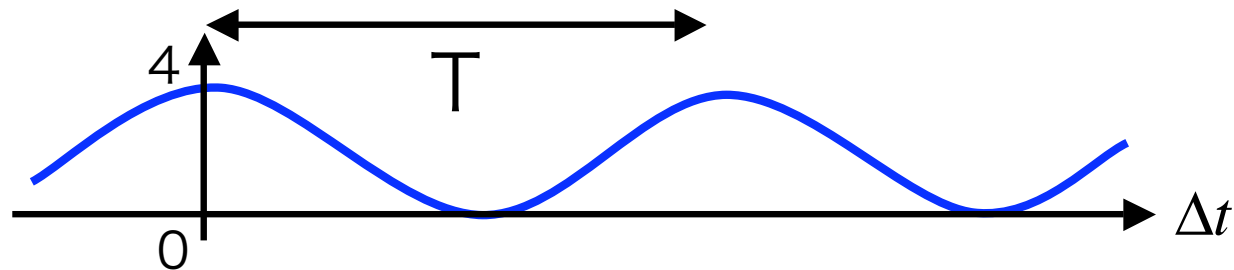
光は波で振動する $A(t) \sim \exp(i\omega t)$

時間 (位相) のずれた**波の重ね合わせ**

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

→

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

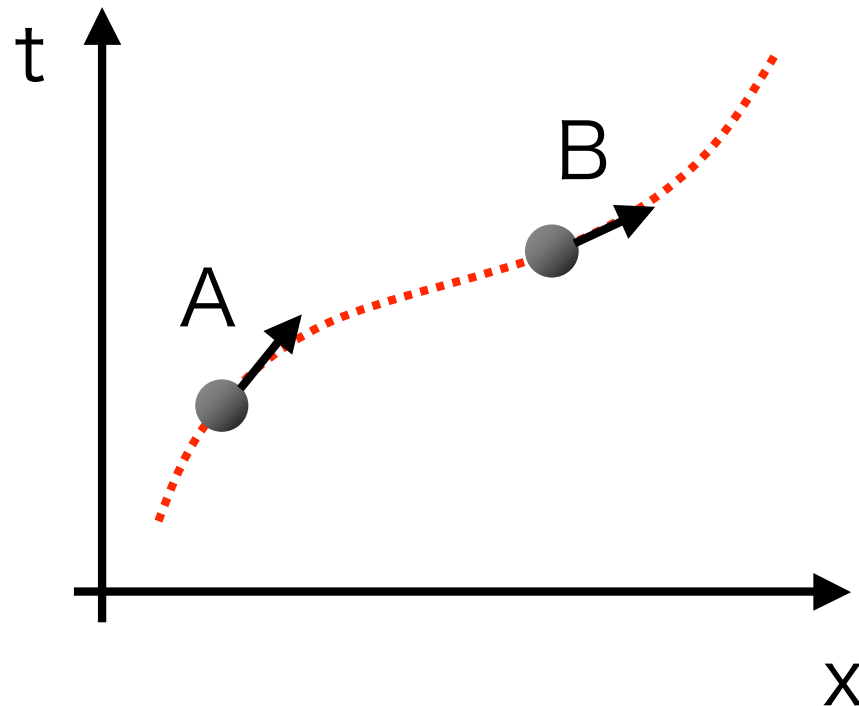


問：周期 T を ω で表せ

レポート問題1回目

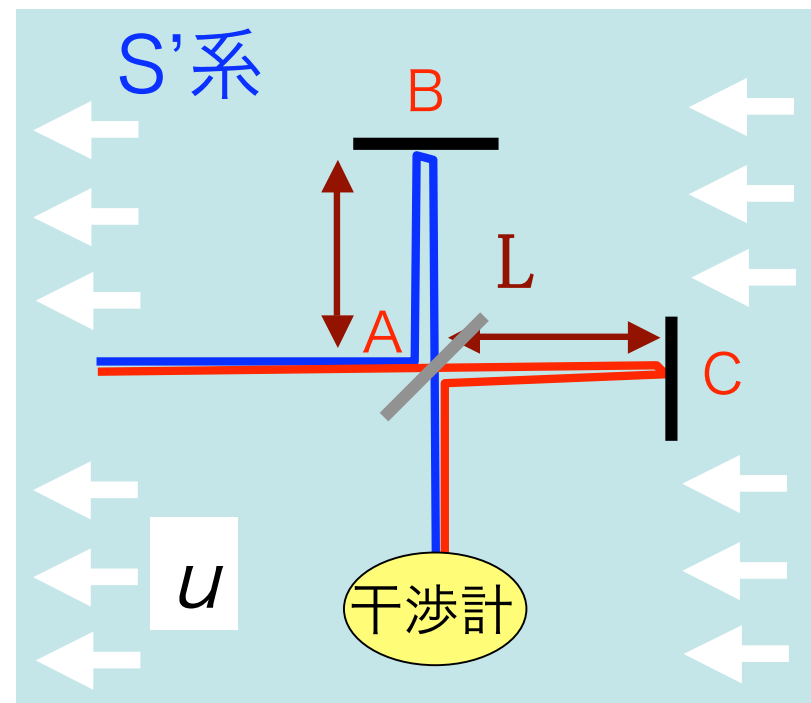
問1 : AとBではどちらが速く運動しているか

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 Δt の関数 $f(\Delta t)$ を計算しそのグラフを書け。また周期 T を ω で表せ。

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

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

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

...

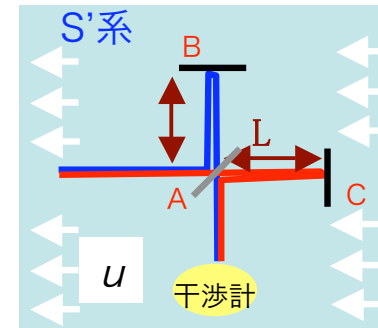
...

成績

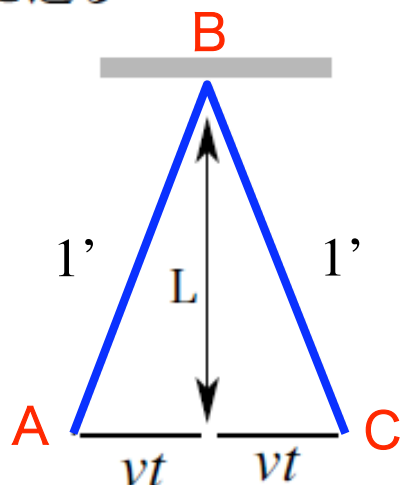
(試験の合計) * 0.8 くらい
+
レポート (適宜)

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

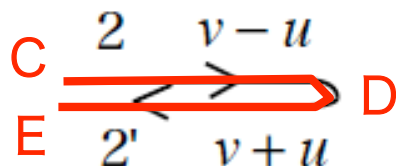


ABCに要する時間

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

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

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



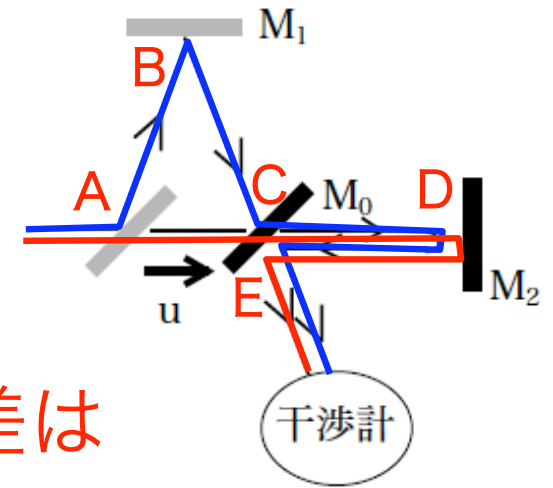
CDEに要する時間

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

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