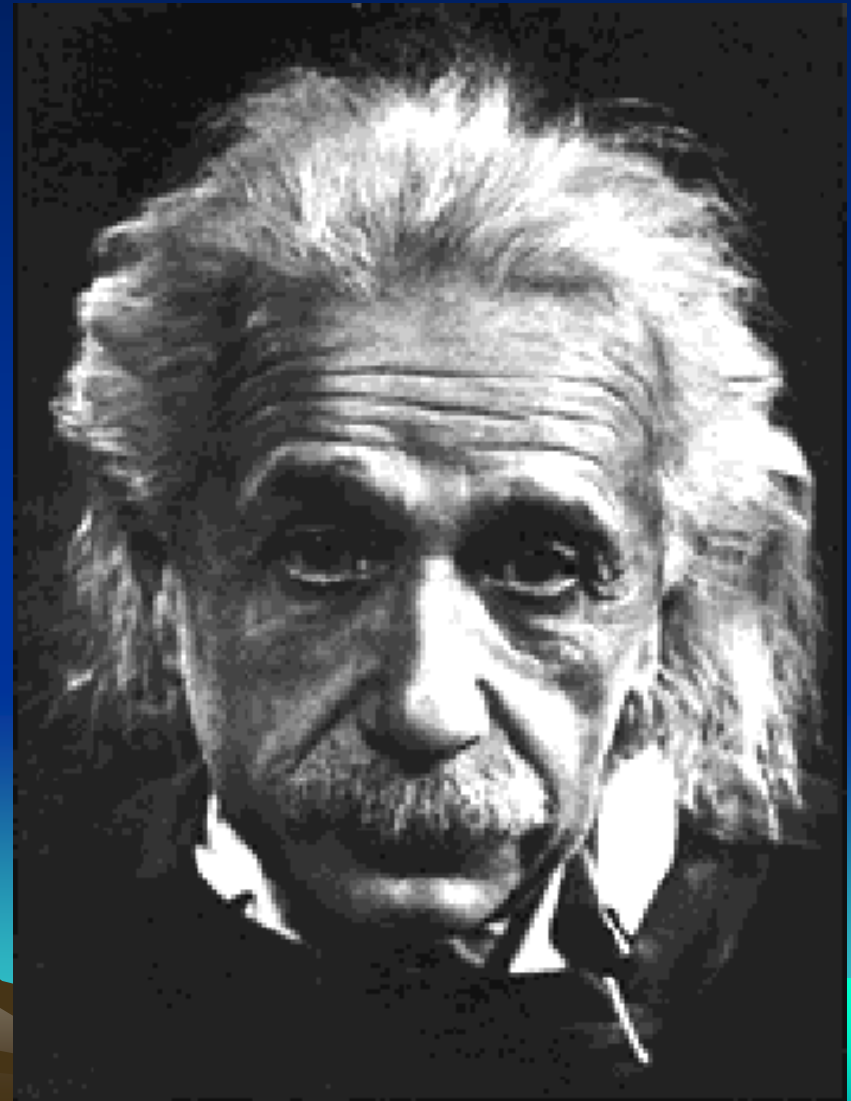


1905年，何が変革されたか？

--- アインシュタインの
特殊相対性理論
誕生100年を
記念して ---



2005年は「世界物理年」です

自己紹介

小出 義夫

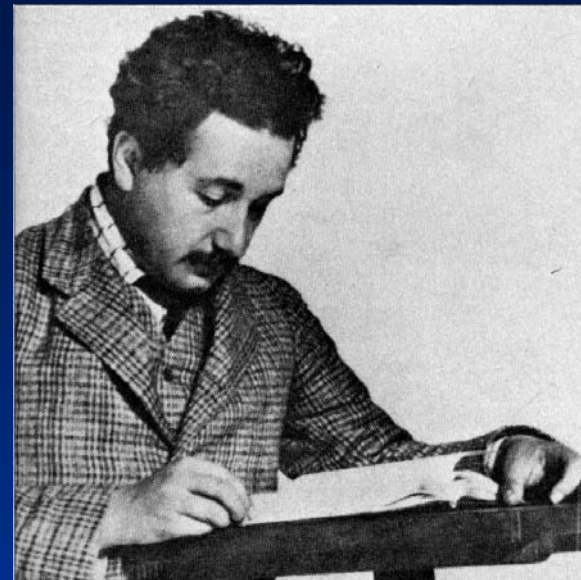
- 生まれ： 石川県金沢市
- 洋家具店の息子
- 趣味： 山歩きとビール
- 専門研究分野：
理論物理学(高エネルギー素粒子物理学)
- 博士論文：(1968年)
ディラック粒子の相対論的2体束縛問題

1905年3月 A. Einstein

光量子仮説の提案

1905年7月 A. Einstein

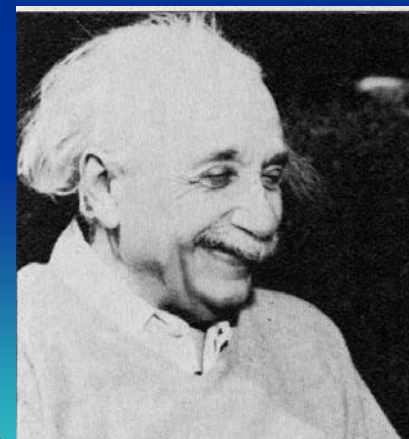
特殊相対性理論の提案



2005年は「世界物理年」です 1905 スイス特許庁技師



190X スイス工科大学学生



1951 プリンストン高等研究所教授

特殊相対性理論

次の2つの原理を出発点として構築された理論

光速度不変の原理: 慣性系に対する真空中の光の速度は, 光源と観測者の相対速度には全く関係なく, すべての観測者に対して, 同一の値 c を持つ.

特殊相対性原理: すべての物理法則は, 互いに等速並進運動をするすべての慣性系に対して, 同一の形式で与えられる.

特殊相対性理論からの結論

- ローレンツ短縮

$$l' = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- 時計の遅れ

$$T' = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

- 速度の合成則

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2 / c^2}$$

- 質量とエネルギー

$$E = mc^2$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

一見，奇妙な結論だが，今日では実験でいずれも正しいということが厳密に確認されている

これら奇妙な結論が出てくる根源は，「時間」の概念が変更されていることにある

今日は，アインシュタイン理論の登場によって，「時間」の概念がどう変わったかを紹介したい



なぜ「光速」の値が「定義値」となっているのか？

物 10(430)

物理 / 化学

基礎物理

名称と記号	数値	単位
普遍定数および電磁気定数		
真空中の光速 c	$2.99792458^{2)}$	$10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
真空中の透磁率 μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ $= 1.2566370614 \dots$	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ $10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$
真空中の誘電率 ϵ_0	$(4\pi)^{-1} c^{-2} \times 10^7$ $= 8.854187817 \dots$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ $10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
万有引力定数 G	$6.67259(85)$	$10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$

- 1) CODATA 1986 調整値による。()の中は標準誤差.
- 2) 定義値.
- 3) ジョセフソン効果電圧標準の基礎を与えるために,
 $K_J = 2e/h$ と仮定した量 K_J をジョセフソン定数とよぶ.

陽子の
陽子の
中性子の
ミュー粒
電子の
陽子の
微細構

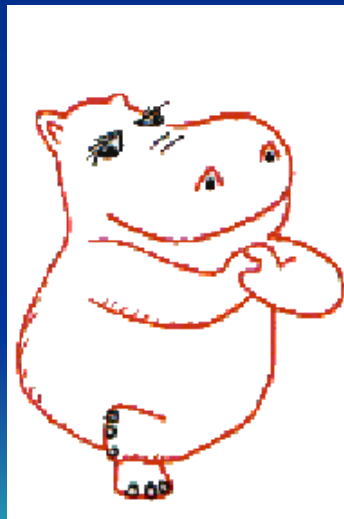
K_J
4)
 R_K
 R_K

「光速度不変の原理」は矛盾していないか？

「光源と観測者の相対速度には全く関係なく、
すべての観測者に対して、同一の値 c を持つ」

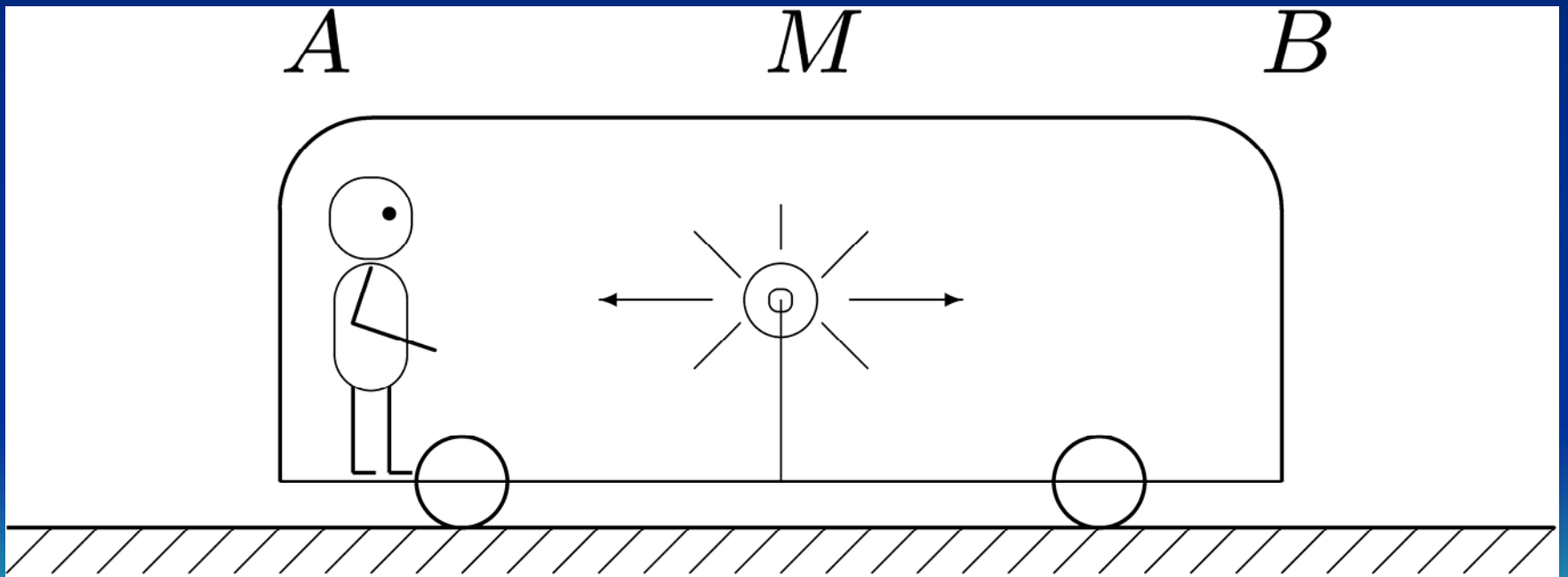
← 風速 20m/s

風下からの
音速 →
 $340\text{m/s} - 20\text{m/s}$

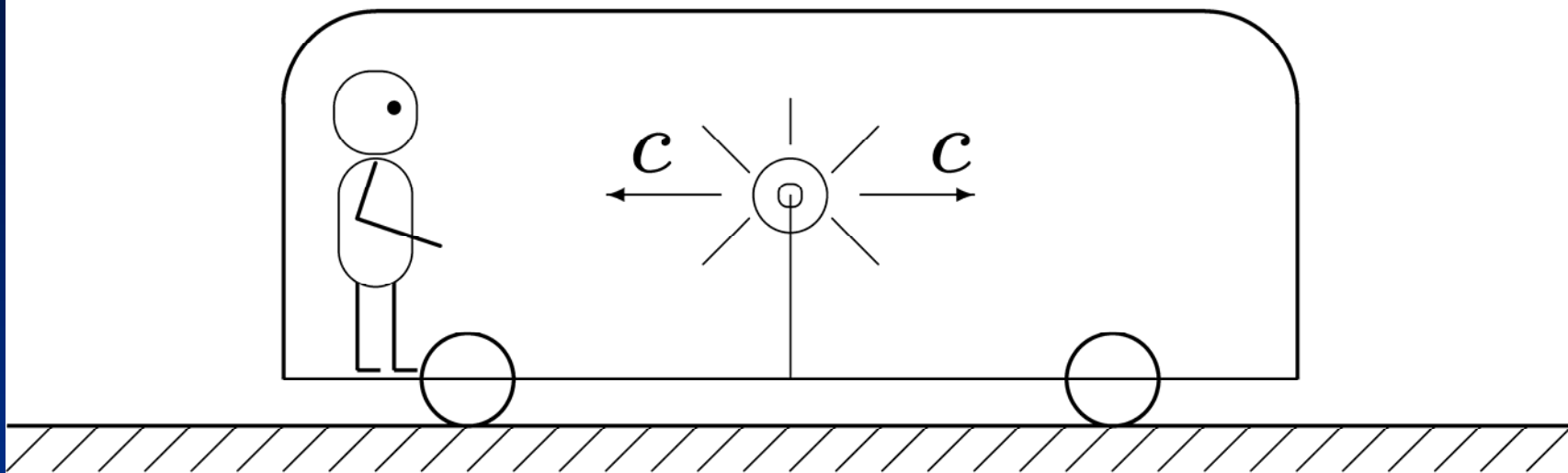


風上からの
音速 ←
 $340\text{m/s} + 20\text{m/s}$

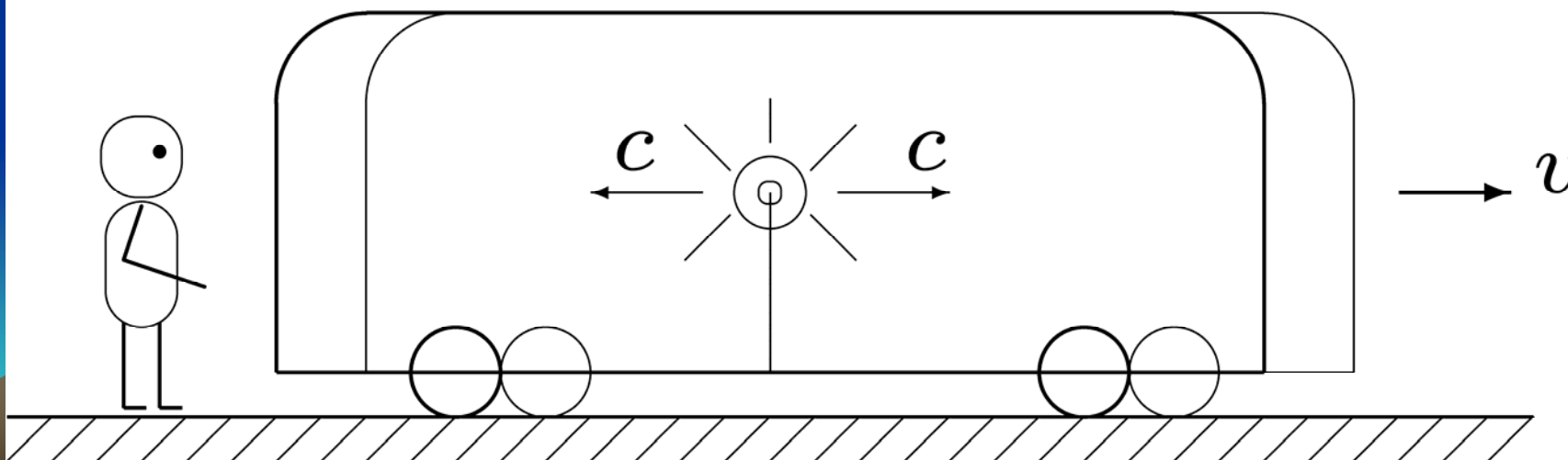
[問題] バスの中央で発した光はバスの前壁と後壁とではどちらへ先にたどり着くか？



A M B



$A A'$ MM' $B B'$



同じ1つの現象を、異なった見方をすると
というのは、おかしいのでは？

どちらかが正しくて、
どちらかが間違っているのでは？



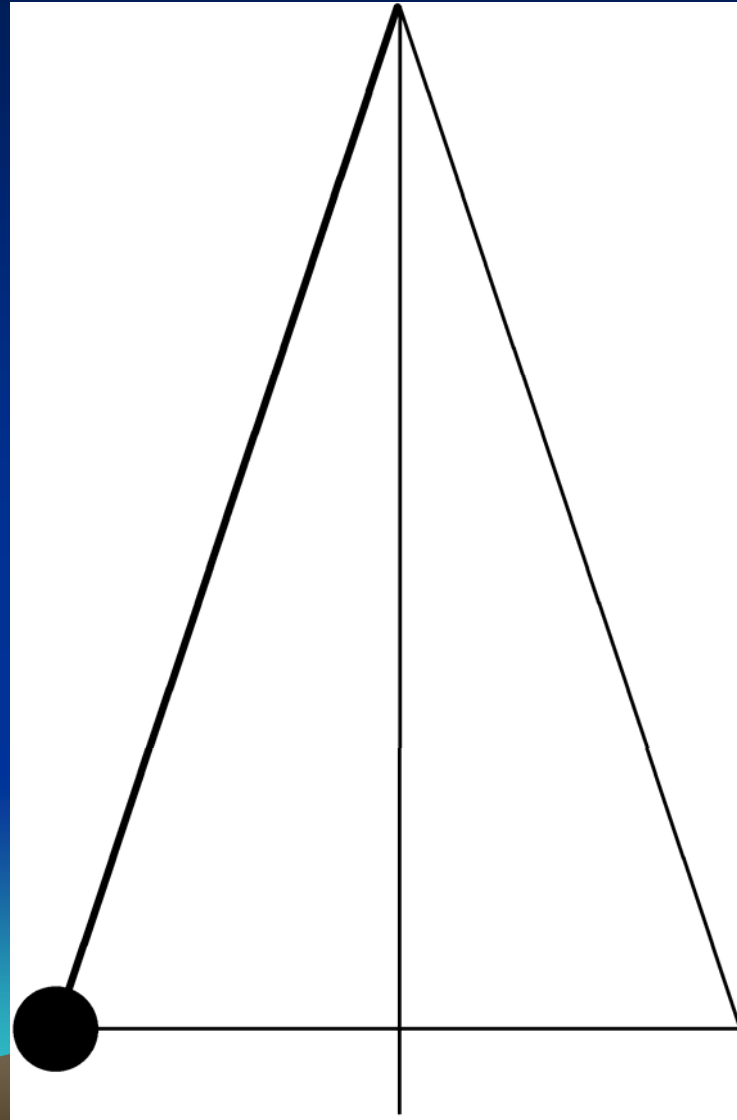
アインシュタイン

「なんら矛盾はない. それは今までの物理学で, 時間というものを正しく規定してこなかったから」

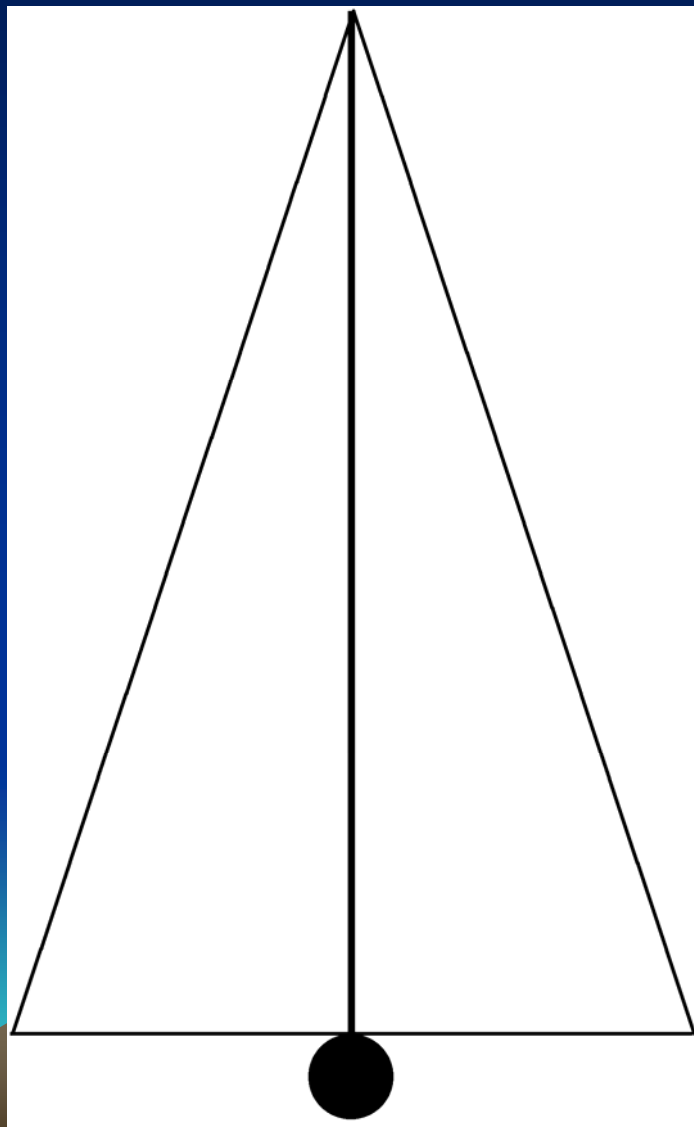
[問題] 2つの離れた場所に置かれた時計をどのようにして同時刻に合わせることができるか？



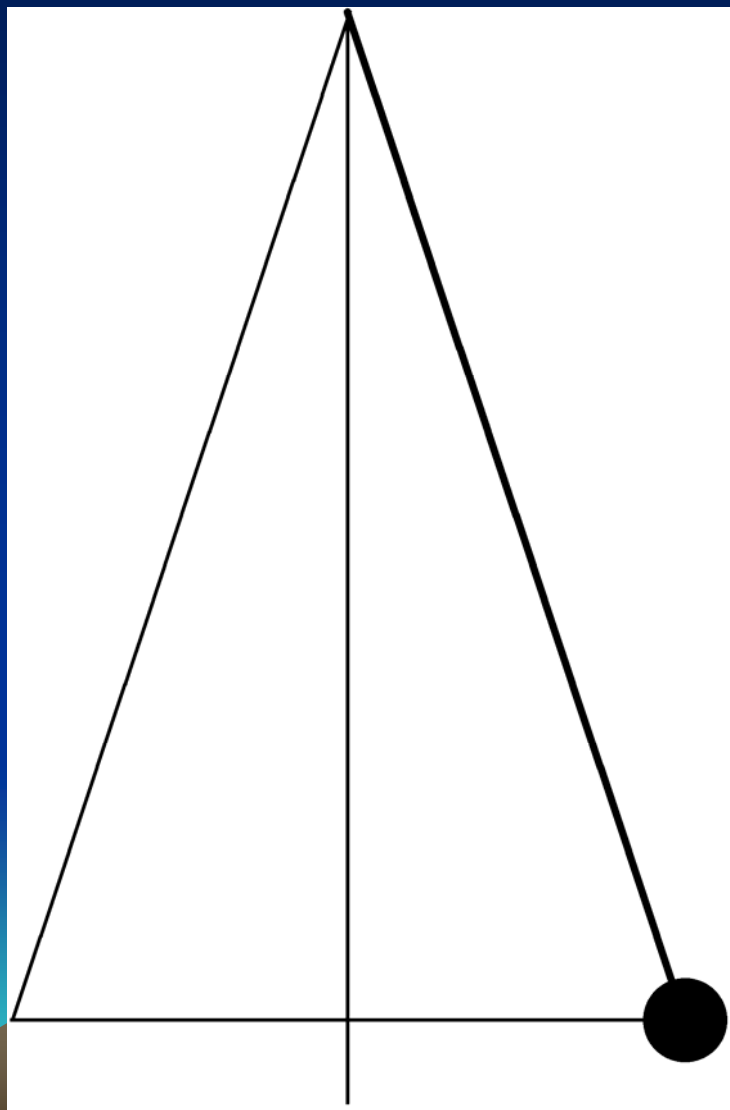
振り子時計



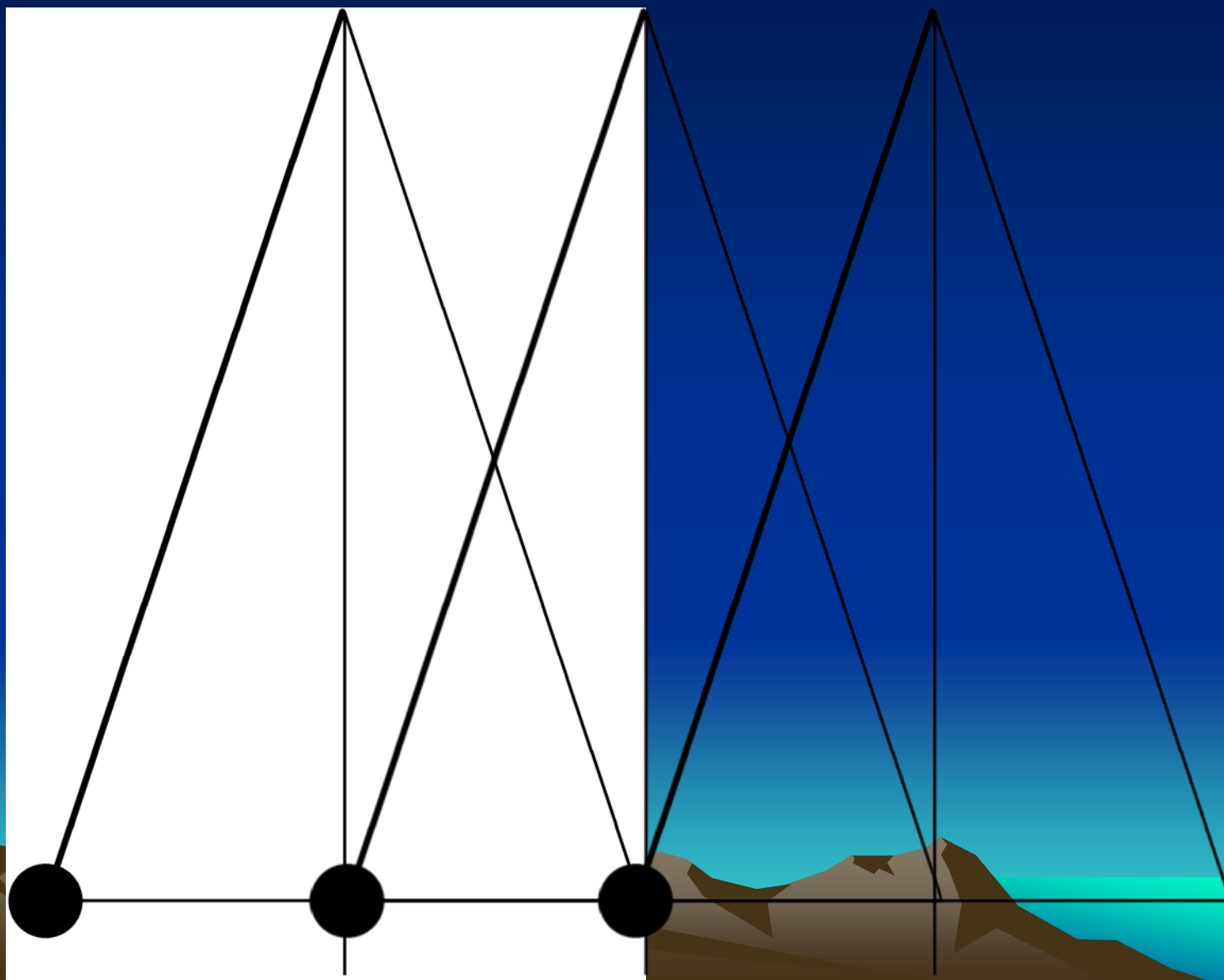
振り子時計



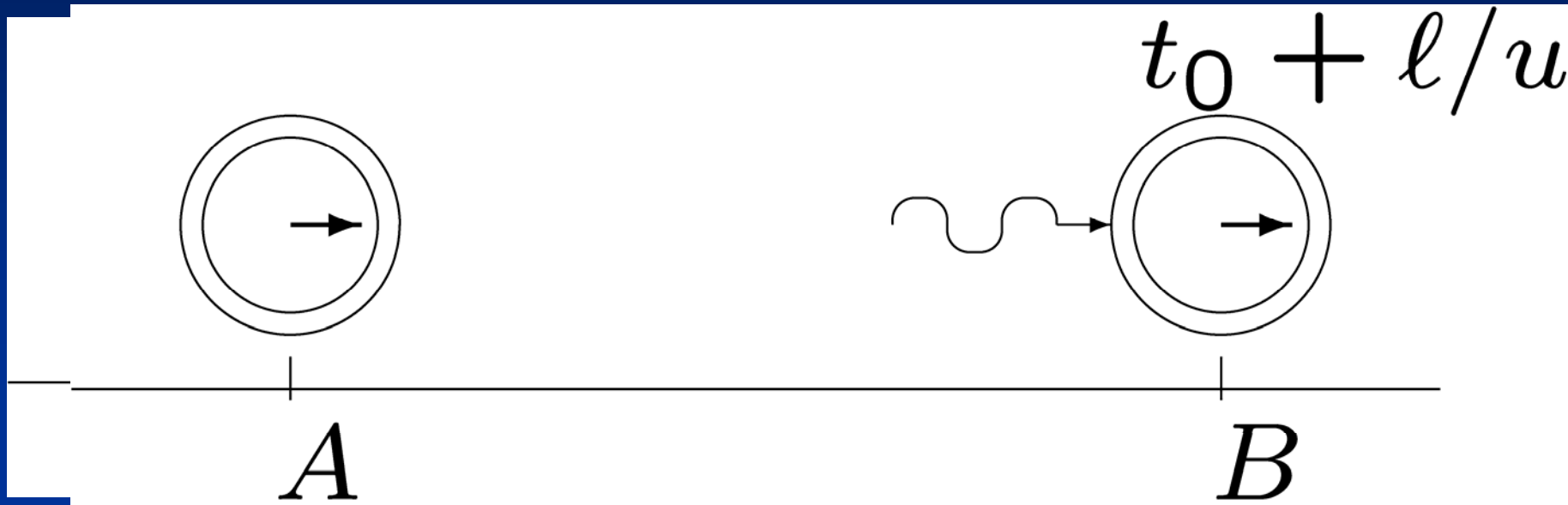
振り子時計



振り子時計の移動

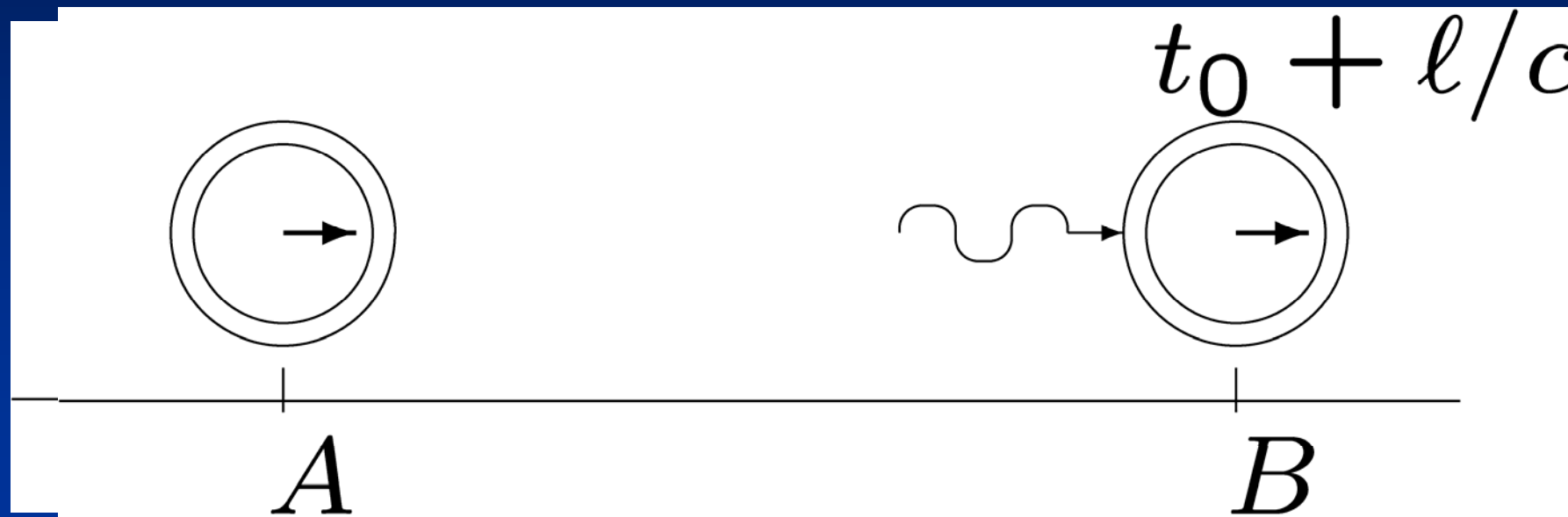


信号を用いての時計合わせ



時刻 t_0 にある信号 (速さ u) を時計Aから発信
その信号がB点に達したとき, 時計Bを
 $t_0 + l/c$ に合わせる

アインシュタインによる時間の定義

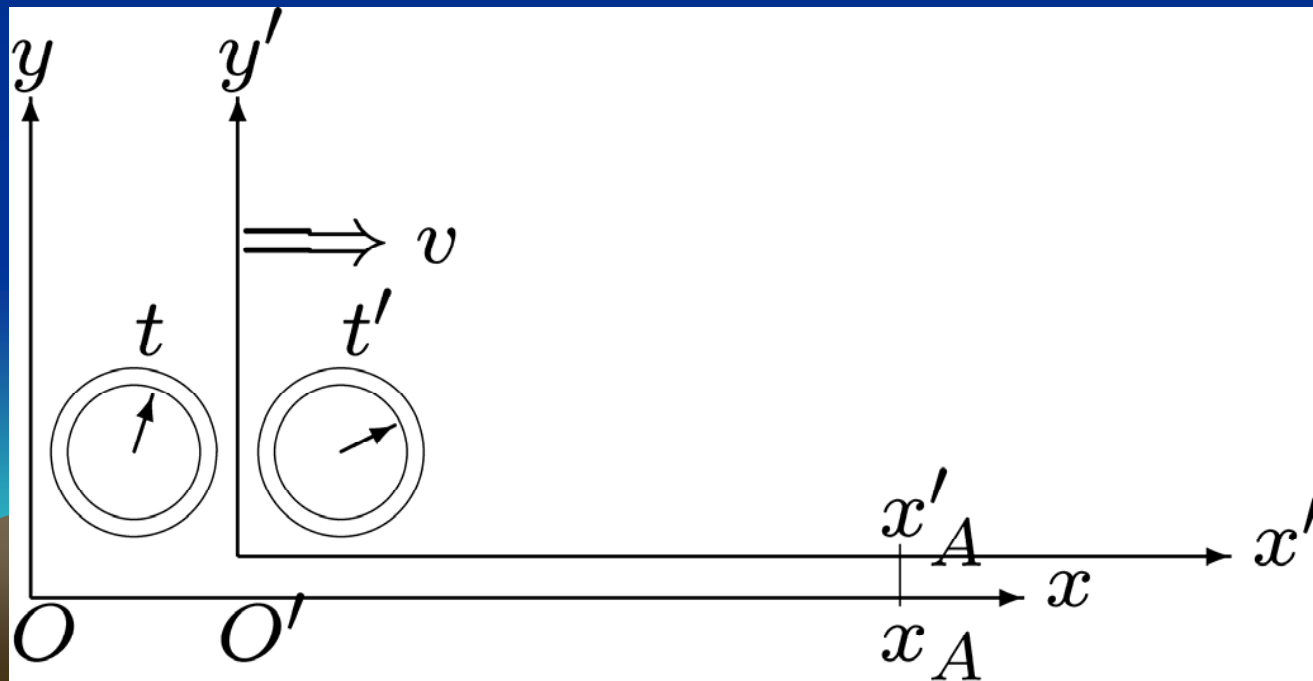


時刻 t_0 に光の信号を時計Aから発信
その信号がB点に達したとき、時計Bを
 $t_0 + l/c$ に合わせる

(注意) この方法での「時間」の定義では, 自分達の座標が運動しているかどうかには無関係に, 自分達の座標での時間が定義できる.

しかし, 互いにある相対速度をもって運動している2つの座標の間の「時間」には使えない.

(各々座標ごとに異なる時間 (t と t') が定義される.)



[問題] ある座標 S とそれに相対速度 v で運動をしている別の座標 S' があるとき, S におけるある座標点 x とその場所の時間 t と, S' におけるある座標点 x' とその場所の時間 t' とは, どのような関係が成立するか?

(x, t) と (x', t') の関係は?



アインシュタイン

(x, t) と (x', t') の関係式

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

を得る

それを用いてはじめに紹介したいろいろな公式が得られる

それらすべてが実験的に確かめられている

従って、現在、アインシュタインの特殊相対性理論は正しいものとして物理学の中に確立されている

注意: 「光速度不変の原理」そのものは直接実験で確かめることはできない

(重要)

従来:

(距離)/(時間) = (光速) から

「光速」を測定

現在:

「光速の定義値」を用いて

(時間) = (距離)/(光速) より

「時間」を定義



物理学は決して難しくない！

ごく常識通りの考えに基づく

常識を越えているように見えるのは
従来の「常識」が不適切であったから



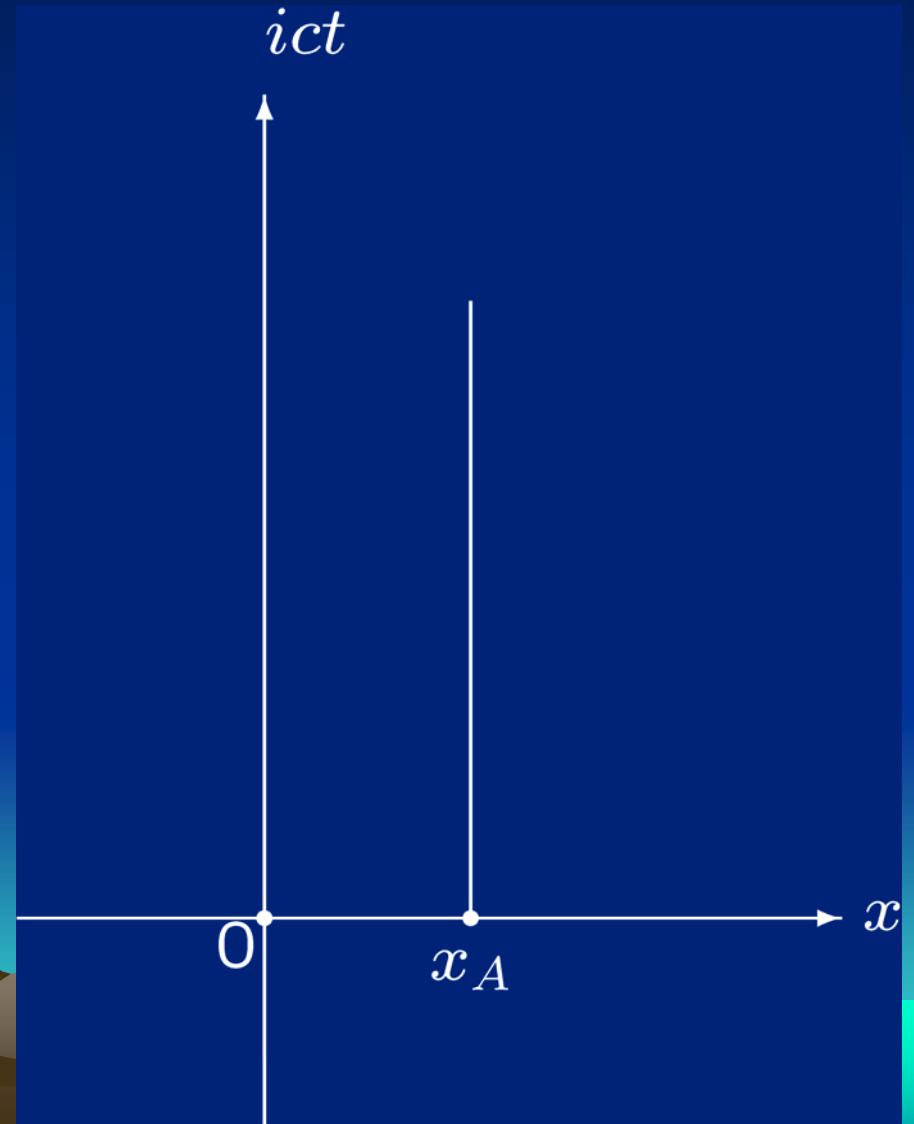
(参考)ローレンツ短縮と4次元時空

空間軸 (x,y,z)に加えて、第4の軸

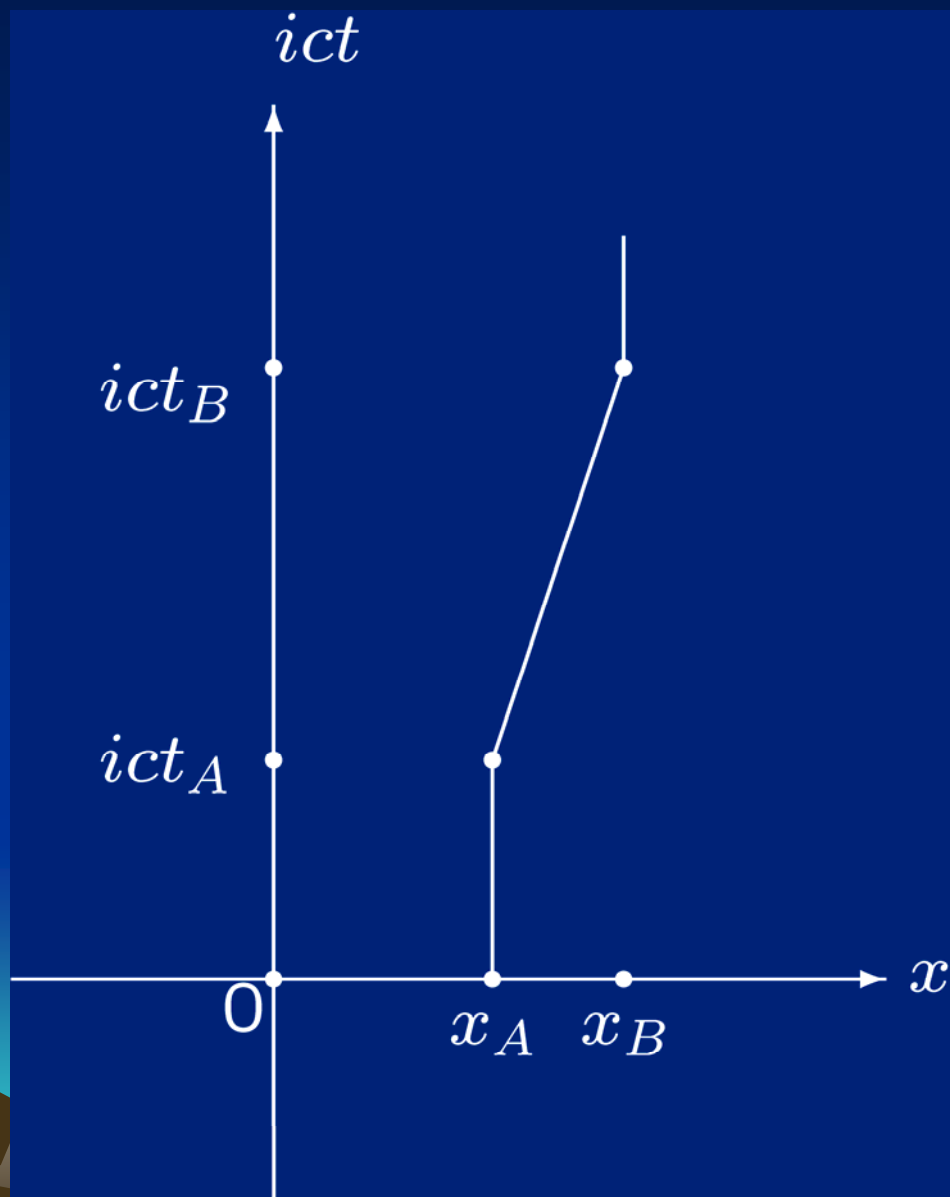
$$x_4 = ict$$

を考える

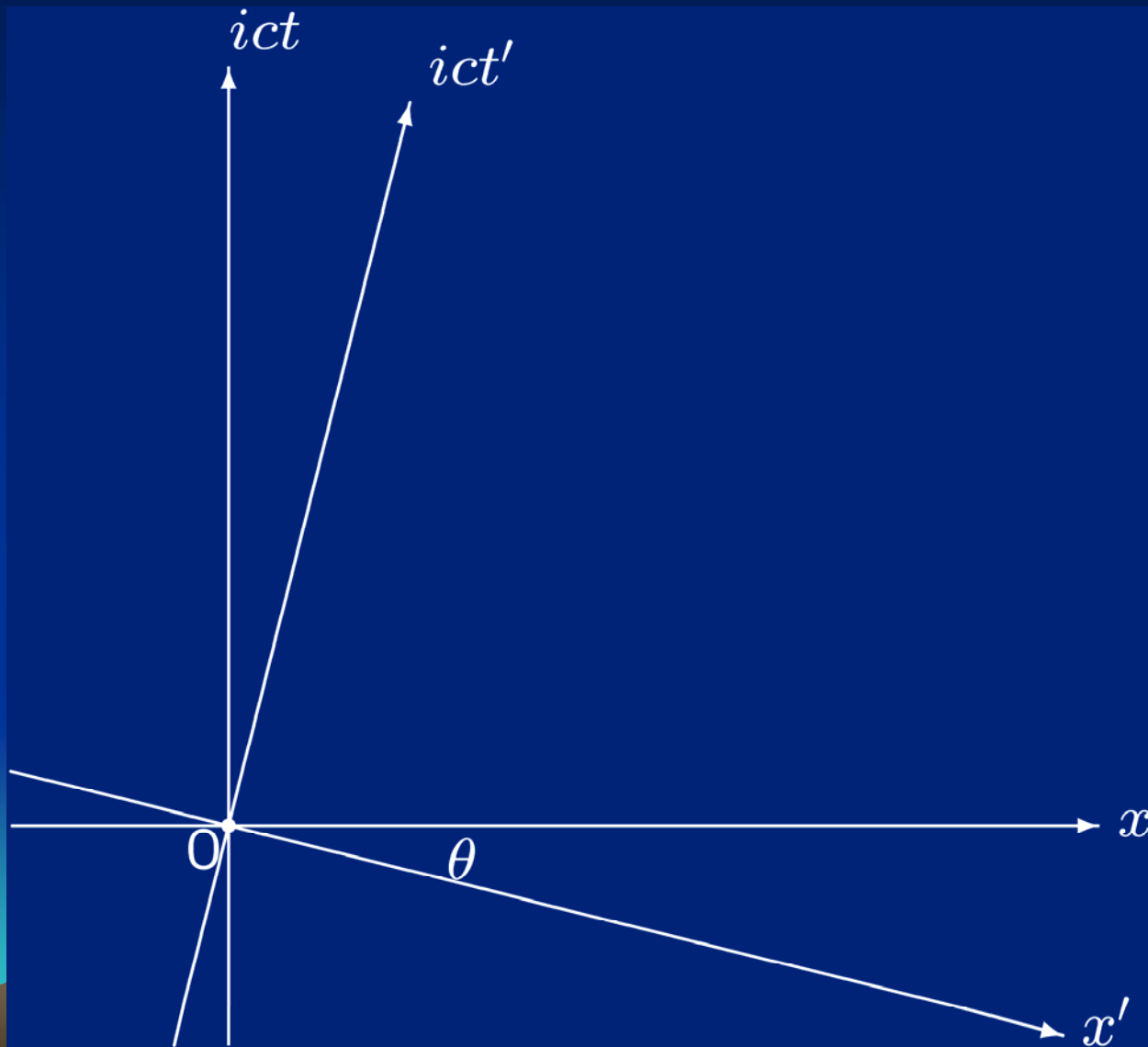
例：物体が $x = x_A$ に
静止している



物体が、
時刻 $t=t_A$ に $x=x_A$
からスタートして、
時刻 $t=t_B$ に $x=x_B$ に
たどり着く



S系に対し速度 v で運動している他の座標S'

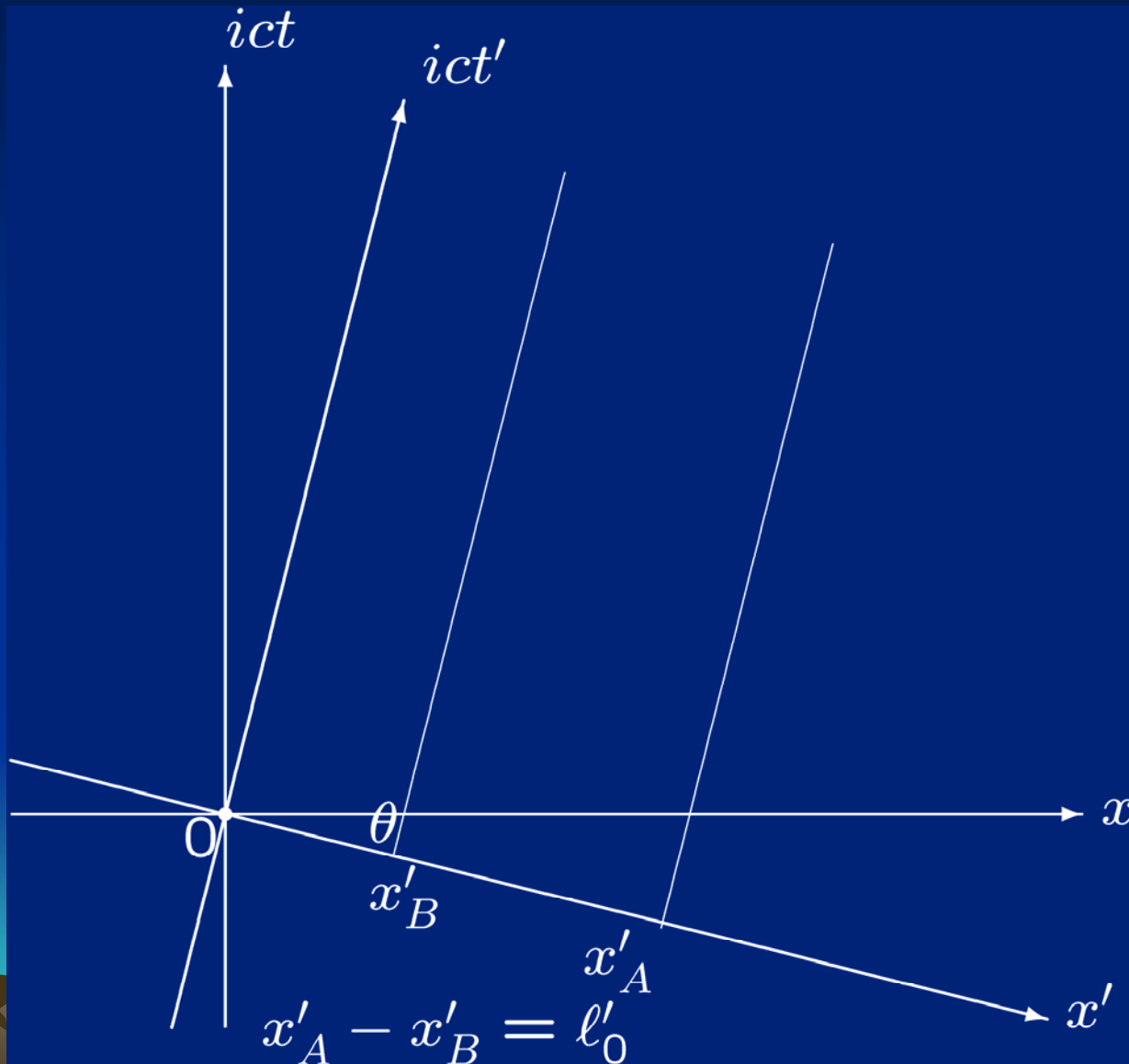


ただし、2つの座標軸
のなす角 θ には

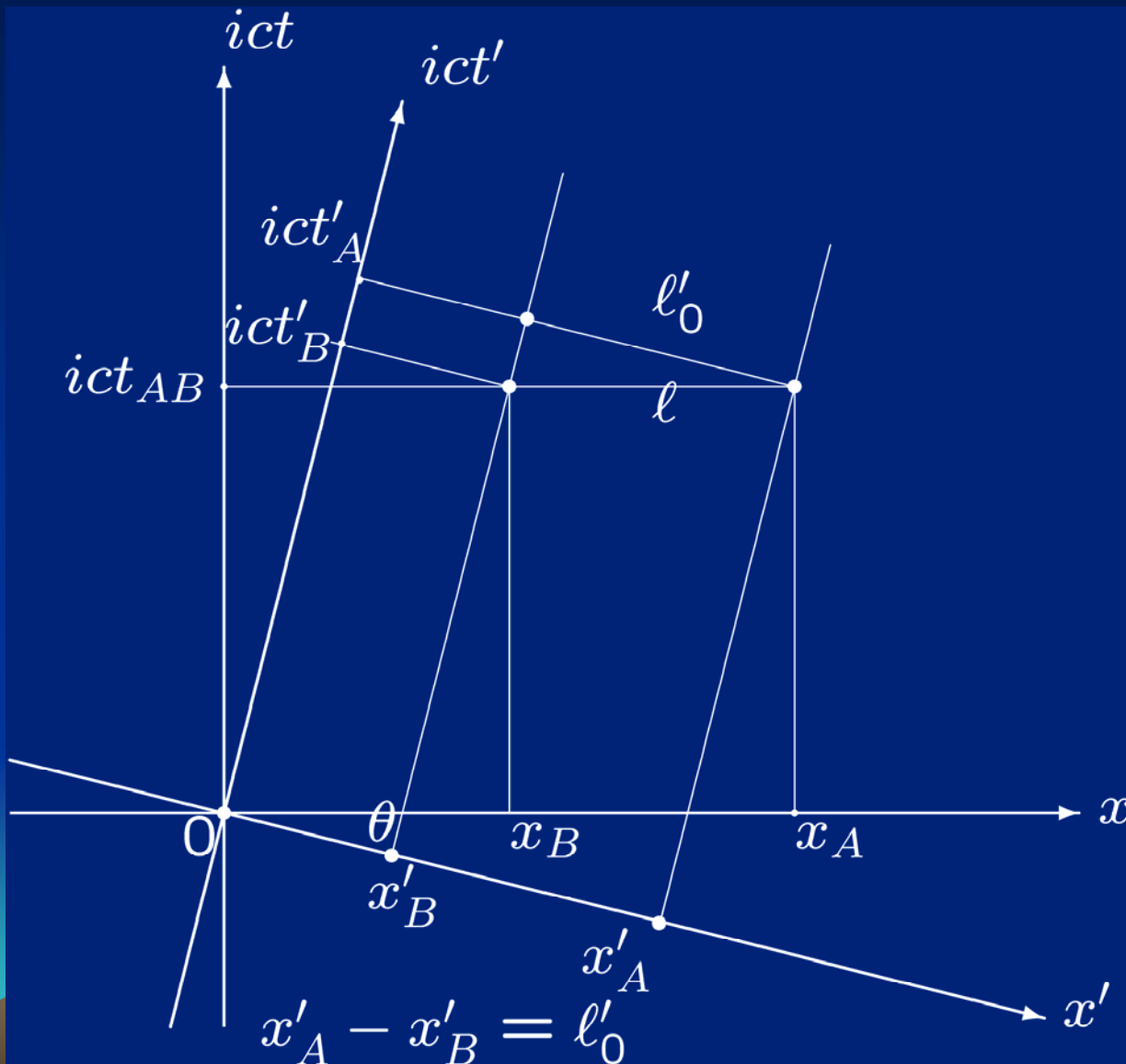
$$\sin \theta = \frac{iv/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$
$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

なる関係が成立

S'系に静止した長さ l_0' の棒



S系でそれを測ると



S系の時計で同時刻に棒の先端と後端の座標を記録

$l = x_A - x_B$
がその棒のS系での長さである

4次元図より

$$\begin{aligned} \frac{l'_0}{l} &= \cos \theta \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}$$

ローレンツ短縮を得る