




特殊と一般		
	特殊相対論(特殊相対性理論)	一般相対論(一般相対性理論)
成立年	1905年	1916年
内容	運動の理論 ( $c \rightarrow \infty$ でニュートン理論)	重力の理論 ( $c \rightarrow \infty$ でニュートン理論)
原理	光速不変の原理 特殊相対性原理	等価原理 一般相対性原理
結果	時間+空間=時空 エネルギーと物質を統一	時空とエネルギー-物質を統一
性質	亜光速での時間の遅れ 空間の収縮 同時刻の相対性 アインシュタインの式: $E=mc^2$	重力場中での時間の遅れ 重力場での空間の曲がり アインシュタイン方程式: $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$
天体現象	太陽の核融合エネルギー シンクロトロン放射 ドップラー効果 宇宙ジェット加速	ブラックホール 重力レンズ 重力波 ビッグバン

目次		
	特殊相対論	一般相対論
	相対性と不変性	特殊と一般の違い
1.	たった2つの基本原理	2. 曲がった時空の性質
2.	時空の不思議な性質	3. 曲がった時空の光線
3.	現実世界での検証	4. 宇宙における検証
4.	物理理論の修正	5. 相対論と究極理論

## 1 相対性理論って何だろう？




相対性理論について、その基本的な考え方と理論的予測、実験的あるいは観測的検証、そして実際の利用法などを紹介していきます。まず最初に、相対性理論の基本的な考え方の根底にあるものを眺めておきましょう。それは“すべては相対的”だということと、“相対的な中で不変なもの”ということです。

## 1 動いている？動いていない？

### 相対的とは

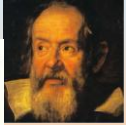
- 部屋は静止している
- 部屋は動いている
- どちらが正しいか？
- どちらも正しい！
- 相対性・相対的
- 不変性・不変量



## 2 電車の中でボールを落とす

### ガリレオの相対性原理

- 電車でボールを落とす
  - 電車の中でみたとき
  - 線路脇でみたとき
- ガリレオ(1564~1642)

### 3 時間も空間も万人に共通 ニュートンの絶対時間と絶対空間

- 絶対空間
- 絶対時間
- ニュートン(1642~1727)

微積分  
光学  
力学・万有引力

絶対空間・絶対時間とは？

ニュートンの絶対空間と絶対時間

アインシュタインの考え方

共通の舞台がある

共通の舞台はない

### 4 誰が観測しても同じにみえる量 変換と不変量

- 相対論の基本的な考え方:
  - 絶対的な基準はない
  - お互いの相対的な関係(変換)で世界を構築する
  - そのような世界で、誰が観測しても不変なモノとは
- モノの個数
- パターン
- 光速
- 線素(時空の微小な長さ)
- 物理法則
- ...

2011/11/18 相対論入門 8

## 2 たった2つの基本原理

特殊相対性理論にかかわる話をします。具体的には、特殊相対性理論の考え方、時間と空間の統一、光に関する性質、そして物理学において特殊相対性理論が重要な役割を果たす現象の順に紹介します。本章では、特殊相対性理論の**基本的な前提**をまとめます。

### 電磁波のスペクトル

ガンマ線

X線

可視光

赤外線

電波

波長(オングストローム)

4000 5000 6000

γ線 X線 紫外線 可視光線 赤外線 電波

### 1 光の速さは変わらない 光速不変の原理

- 電車と併走する
- 光と併走する
- 原理: 証明することはできないが、だれもが正しいと考える言明(命題)
- 定理、法則
- 光速不変の原理: “光は誰からみても光速で進む。どんなスピードで運動をしている観測者が測っても、光の速さはつねに光速  $c$  になる”

光の速さ(光速)  $c = 299792458 \text{ m/s}$

2011/11/18 相対論入門 11



### 2 自然の法則は万人に平等 特殊相対性原理と慣性系

- 特殊相対性原理:
  - 静止している人にとっても、動いている人にとっても、自然の法則は同じように成り立つ。
- 外部からの力が働かなければ、物体は静止しているか、あるいは速度が一定のまま**等速直線運動**を行う。
- このようなシステムを簡単に**慣性系**と呼ぶ。
- 固有時間**: 各慣性系の時間 = **固有の物理量**

2011/11/18 相対論入門 12

**3 時間と空間の統一  
時空の不思議な性質**

特殊相対性理論では、時間と空間は絶対的なものではなく、観測者によって変化する物理量だと考えます。ただし、**時間と空間の関係においては変化しない不変量**が存在します。本章では、特殊相対性理論によって時間と空間がどのように変化したか、何を不変量として考えるべきかを紹介します。

**1 高速で走ると時間が遅くなる  
光時計と時間の遅れ**

- 時計
  - ・ 同じ周期で繰り返し起こる現象で時の流れを測る
  - 地球の自転→1日
  - 地球の公転→1年
  - 水晶の振動→クォーツ時計
- **光時計**: 光の反射往復で時間を測る時計
- ナノ秒光時計(長さ15cm、往復30cm)
  - 30cm/秒速30万km=1ナノ秒(10億分の1秒)



2011/11/18 相対論入門 14

**1 高速で走ると時間が遅くなる  
光時計と時間の遅れ**

- 上  
ある速度 $v$ で動く宇宙船内の光時計
- 下  
運動していない光時計

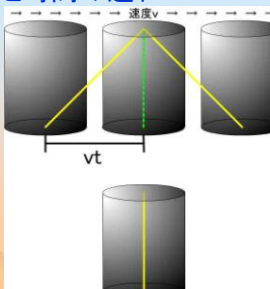
宇宙船の方が長い  
=時間が長い!



2011/11/18 相対論入門 15

**1 高速で走ると時間が遅くなる  
光時計と時間の遅れ**

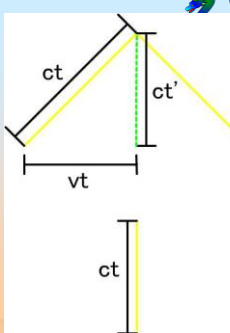
- 上  
ある速度 $v$ で動く宇宙船内の光時計  
時間  $t'$
- 下  
運動していない光時計  
時間  $t$



2011/11/18

● 光速 $c$ (**誰から見ても同じ速度!**)とそれぞれの時計での片道の時間  $t, t'$  を用いて、各長さを表わす。

宇宙船内の三角形で三平方の定理を用いると……。



$$(ct)^2 = (vt)^2 + (ct')^2$$

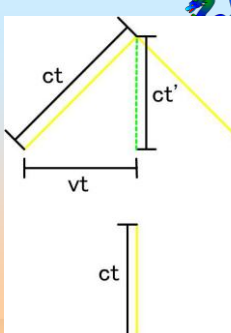
$$c^2 t^2 - v^2 t^2 = c^2 t'^2$$

$$t^2 (c^2 - v^2) = c^2 t'^2$$

$$t^2 = \frac{c^2 t'^2}{c^2 - v^2}$$

$$= \frac{t'^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

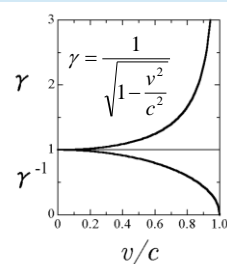
$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



つまり  $t > t'$  である！

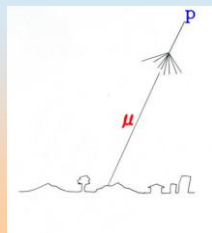
- 時間の遅れの割合
- ローレンツ因子  $\gamma$

※ 重光透き山船の船内時間と地球時間				
速度 $v$	ローレンツ因子 $\gamma$	船内時間 $t_0$	地球時間 $t$	
0	1	1年	1年	
0.1	1.005	1	1.005	
0.2	1.021	1	1.021	
0.3	1.048	1	1.048	
0.4	1.091	1	1.091	
0.5	1.155	1	1.155	
0.6	1.250	1	1.250	
0.7	1.400	1	1.400	
0.8	1.667	1	1.667	
0.9	2.294	1	2.294	
0.99	7.089	1	7.089	
0.999	22.368	1	22.368	
0.9999	70.711	1	70.711	
0.99999	223.61	1	223.61	
0.999999	707.11	1	707.11	



- 宇宙線(高速の陽子など)
- **ミューオン**(中間子の一種)
  - 質量: 電子の200倍
  - 寿命: 2.2マイクロ秒

光速×寿命＝660m  
高度20kmで発生したミュオンが地上まで到達！



● 素粒子の寿命が延びるしくみ

★ ミューオンの発生

宇宙線

大気圏

パイオンとカオン

ミューオン

ミューオンの寿命  
× 光速でほぼ  
10分まではずに  
消失するはず  
約660m

しかし、ミューオンは地  
下100mでも検出できる

ミューオンの崩壊

電子

ニュートリノ

陽子

電子

ニュートリノ

ミューオンは陽子と不安定な素  
粒子。すぐに、電子とニュートリ  
ンと反ニュートリノに崩壊する

CEBNの実験で測定されたミ  
ューオン・陽子の割合。ほぼ定数のミ  
ューオンは残存率が高い。

1.0  
0.5  
0.25  
0

停止ミューオン

CEBNミューオン

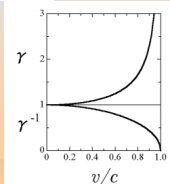
ミューオン

50 100 150

マイコン

表 高速で回転するモータと静止系で測った長さ

速度 $v$	$\gamma$	$l$	$l_m$	長さ $l$ の長さ
0.1	1.005	1	0.996	
0.2	1.011	1	0.979	
0.3	1.018	1	0.954	
0.4	1.026	1	0.917	
0.5	1.155	1	0.886	
0.6	1.250	1	0.836	
0.7	1.400	1	0.714	
0.8	1.667	1	0.600	
0.9	2.294	1	0.294	
0.99	7.089	1	0.436	
0.999	22.368	1	0.0447	
0.9999	70.712	1	0.0148	
0.99999	223.61	1	0.00447	



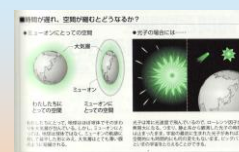
- ミューオンの立場
  - 自分自身の時間(固有時間)では2.2マイクロ秒で崩壊→660mしか飛べない
  - 一方、地上まで20km

➤ **パラドックス！**

- ミューオンからみたら？
  - 空間が縮んでいる！
  - 地上まで数百m

パラドックスなし！

- 光子の場合
  - 時間の遅れ  $\infty$
  - 空間の縮み  $1/c$



## 5 時間と空間を一つの図に ミンコフスキーダイアグラム

- 時間+空間=時空
- 時空図
- 光速度を基準にする
  - 光の動きが $45^\circ$ の直線
- ミンコフスキーダイアグラム

ふつうの時空間 ミンコフスキー時空間

25

## 6 ミンコフスキー時空の世界線 光円錐と世界線

- 光の波面
  - 空間内では球状
  - 時空内では円錐状
- 光円錐
- 事象の世界線
- 因果関係
  - 過去
  - 未来
  - 過去でも未来でもない

2011/11/18 相対論入門

## 7 ミンコフスキー時空での変換 ローレンツ変換

- 座標変換、座標回転
- ガリレイ変換
- 時空座標の変換
- ローレンツ変換

2011/11/18 相対論入門

## 8 時空の座標変換で変わらない 世界間隔と不変量

- ピタゴラスの定理
- 時空のピタゴラス定理

2011/11/18 相対論入門

## 8 時空の座標変換 世界間隔

- 空間の間隔
- 世界間隔

2011/11/18 相対論入門

## 9 自分には同時でも他人には 同時刻の相対性

- 自分にとって“同時”な現象

2011/11/18 相対論入門

## 9 自分には同時でも他人には同時刻の相対性

- 他人にとっては“同時”ではないかも

■ “同時刻”は人によって変わる

図9-9 光速で飛ぶ宇宙船 S は 1.25 年間に B からの信号を、1 年間に A からの信号を受信する。もともと地球上では A・B の同時とも、2 年後に「同時」に変化する。

同時刻の相対性

2011/11/18 相対論入門

## 10 ウラシマ効果で歳をとらない双子のパラドックス

- 亜光速の宇宙旅行
  - 地球に残った**静子**
  - 宇宙旅行する**翔子**
- 相対的ではない双子
- 亜光速タイムマシンと
- ウラシマ効果

2011/11/18

## 4 光とエネルギー

特殊相対性理論では、時間と空間が統一されると同時に、物質とエネルギー(光)も統一されました。光は同時に物質世界を観測するためのもっとも基本的な手段です。本章では、特殊相対性理論における**光とエネルギー**を考えてみましょう。

2011/11/18

## 1 光源が運動すると光の色が光のドップラー効果

- 音のドップラー効果
- 光のドップラー効果
- 光の波の山(谷)
- 相対論的不変量

2011/11/18 相対論入門

## 2 ドップラー効果で天体の運動宇宙ジェットSS433

- 光(可視光) 14等星
- 電波 ジェットパターン

SS433 VLBA

Amy Mioduszewski  
Michael Rupen  
Craig Walker  
Greg Taylor

2011/11/18

## 2 ドップラー効果で天体の運動宇宙ジェットSS433

- ブラックホール連星
- 双方向ジェット


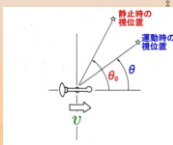
光速の26% !!

2011/11/18 相対論入門



### 3 光源が運動すると方向が 光行差

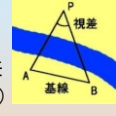
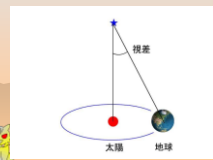
- 雨の降ってくる方向
- 光行差

2011/11/18 相対論入門


### 4 光行差の発見は18世紀 光行差の実証

- 視差
- 年周視差 (<1秒角)
- 年周光行差 (20秒角ぐらい)
- 1727年(ブラッドリー)
- りゅう座ガンマ星

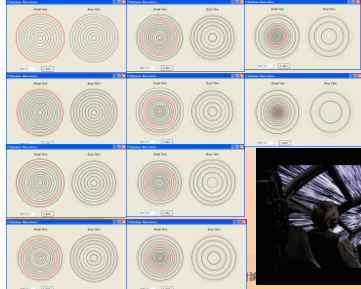
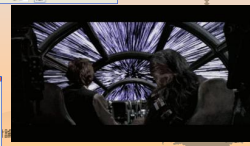
2011/11/18 相対論入門

### 『スターウォーズ』は間違い！？



2011/11/18 相対論入門


### 3 光源が運動すると方向が 光行差

2011/11/18 相対論入門

### 6 質量とエネルギーは同じ? アインシュタインの式

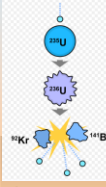
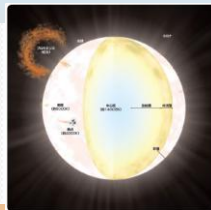
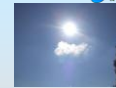
- 静止質量エネルギー
- $E = mc^2$
- 質量とは
- エネルギーとは



2011/11/18 相対論入門

### 7 太陽のエネルギー源 核分裂と核融合

- 核分裂
- 核融合

2011/11/18 相対論入門