

学術俯瞰講義

2. 物質の生い立ち

—素粒子、原子、宇宙—

理学系研究科物理学専攻
ビッグバン宇宙国際研究センター
佐藤 勝彦

「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

2. 物質の生い立ち—素粒子、原子、宇宙—

- 講義1 私たちは物質世界をどのように認識してきたか —物質の階層構造—
- 講義2 物質世界はどのように運動するのか —物理法則—
- 講義3 時空 —物質の演舞の舞台—
時空と物質は一体となって運動し世界の構造を決めている
- 講義4 宇宙の創生、進化
—統一的自然観をめざして—

時空 —物質の演舞の舞台—

- 1. 時間とは、空間とは？
- 2. 特殊相対論の成立
- 3. 一般相対論の世界
- 4. ブラックホール・ワームホール
- 5. タイムマシン 時間的閉曲線 (CTC) の問題
- 6. 一般相対論は役に立つか？

1. 時間とは、空間とは？

Saint Augustine of Hippo (Hippo Regius) bishop (354-430)

「時間とは何か？ 誰も私に問わなければ、私はそれを知っている。誰かそれを問う者に説明しようとするば、私は知らないのである。」

時間や、空間には果てがあるのだろうか？

もし**時間**に**始まり**があればその前はどうかしているのだろうか？

また、**空間**に**果て**があるならばその向こうはどうかしているのだろうか？

時の始まり

- 神は世界を創造する前に、何をしていたのだろうか？

「神は、そのような質問をする人を落とすために、地獄を作っていたのだ。」

Saint Augustine of Hippo

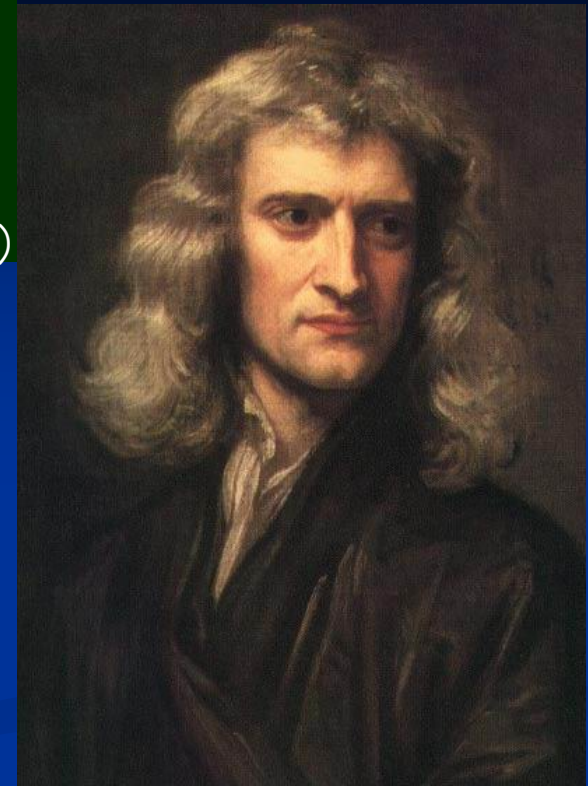
「神は天地を創造する前には、何もなかった。」

「プリンキピア」 自然哲学の数学的原理

(1687)

絶対時間、絶対空間

- 時間: その本質において外界とは何ら関係することなく一様に流れ、これを持続とよぶことのできるもの。
- 空間: その本質において外界とは何ら関係することなく常に 均質であり揺らがないもの。

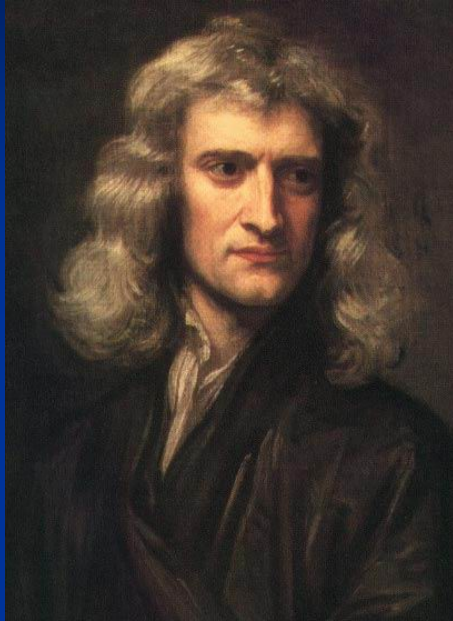


ニュートン(1642- 1727)

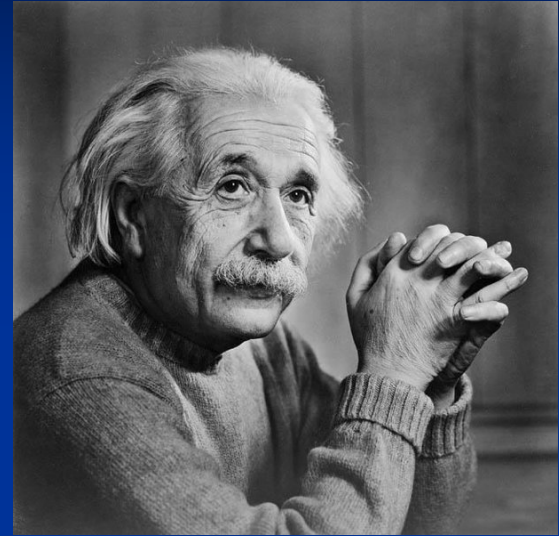
カント (1740ー1786): 時間、空間は人間の先験的なもの。

アインシュタイン以前のニュートン力学の体系では時空は物理学の入れ物であり、物理学の対象ではなかった。

時空 —物質の演舞の舞台—

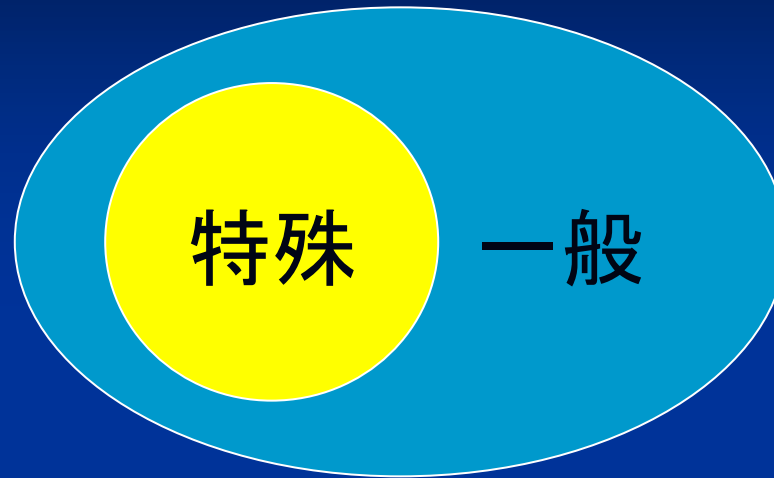


石舞台であり、
そこで物質は床が
へこむこともなく
演舞できた。



トランポリンのように、へこむ
舞台である。そこで物質は
床のゆがみも考えて、演舞し
なければならない。重いと、床
も抜けてしまう。

特殊・一般相対論



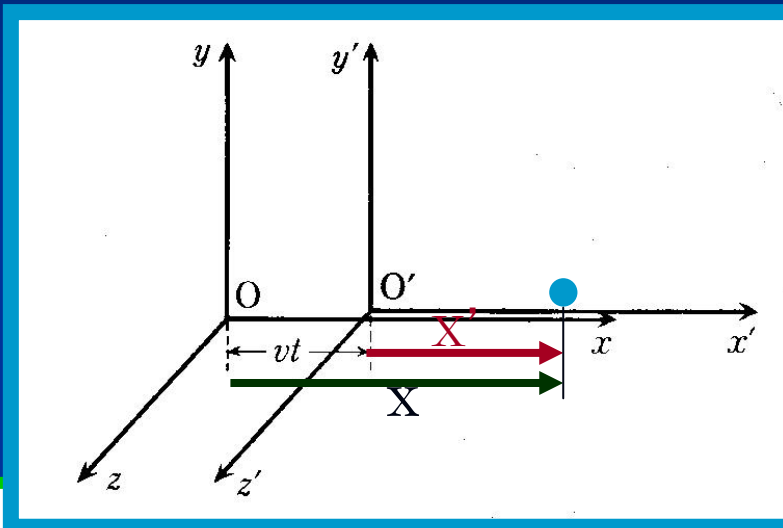
特殊相対論：物理法則は どのような慣性系
(1905) でも不変に書くことができる。

一般相対論：物理法則は どのような一般座標系
(1915) でも不変に書くことができる。

座標の相対性—特殊相対論誕生前—

等速度運動している座標系（慣性系）は、同格、平等 である。

ガリレイ変換



$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$m \frac{d^2 x}{d^2 t} = f$$

ニュートンの運動方程式は
座標によらず不変

$$m \frac{d^2 x'}{d^2 t} = f$$

座標系の相対性原理： 人間が勝手に決める
座標に自然法則はよらない。

光速不変の原理

電磁気学のマックスウエルの方程式（1861）は 電磁波（光）は光速度で伝播すること示していた。これは何にたいしての速さなのか？

2つの立場： いずれが正しいか？

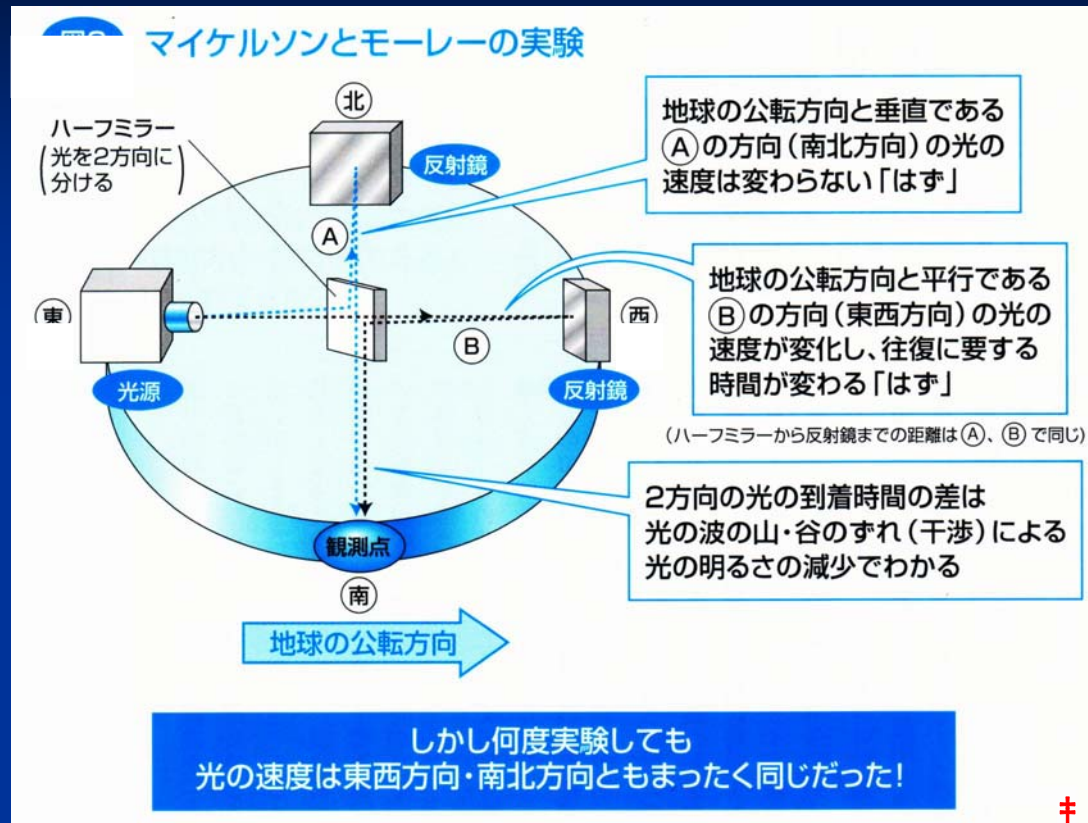
1. この物理法則がどんな慣性系でも正しいなら
光速度は不変。： 光速度不変の原理

2. この物理法則は 絶対慣性系でのみ成立。

エーテルの存在

マイケルソン・モーレイの実験（1887）はエーテルの存在を否定

マイケルソン・モーレイの実験(1887)



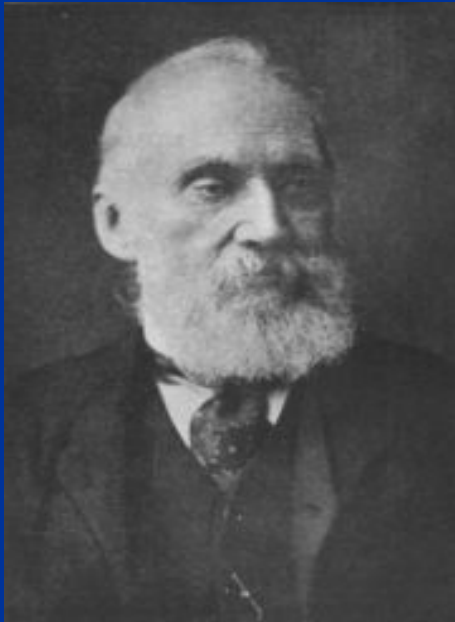
佐藤勝彦 2003「相対性理論がみるみるわかる本」 PHP研究所 p.19

エーテルの存在を否定:

光速不変の原理を実験的に示す。

In 1900, Lord Kelvin gave a lecture "*Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light.*"

"*Beauty and clearness of theory*" was overshadowed by "*two clouds*", *the null result of the Michelson-Morley experiment* and the problems of blackbody radiation."



ケルビン卿
ウィリアム・トムソン

19世紀末、ケルビン卿は
19世紀物理を覆う2つの
暗雲（エーテルの未検出、
黒体輻射の発散）の存在を
指摘した。それらは現代
物理学を支える2本の柱、
相対論と量子論への鍵
だった。

2. 特殊相対論の成立(1905)

特殊相対原理: 物理法則はいかなる座標系
(慣性系)でも同じ。

人間が勝手に決めるような座標系に、自然法則がよるなどあり得ない。

光速度不変の原理: 光の速さはどのような座標系
から観測しても c

**特殊相対論はこのような2つの単純な原理
により導かれる理論**

アインシュタインの偉大であったこと

時間は絶対的なものでなく、観測者(座標系)ごとに異なって良いことを見抜いたこと。“**時間は皆それぞれ違って良い。**”

ガリレイ変換

$$t' = t$$

$$x' = -vt + x$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

ローレンツ変換

$$ct' = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} ct - \frac{v/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}} x$$

$$x' = -\frac{v/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}} ct + \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} x$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

光速度 c
無限大で
ガリレイ変換
に一致

これによって、「**特殊相対原理**」と「**光速度不変の原理**」を共に満たすことができた。

ウラシマ効果

光速度近くの運動によるウラシマ効果



$V=0.9998 \times \text{光速度}$ なら、ロケットの1年は地球の50年。✖

佐藤勝彦 2003「相対性理論がみるみるわかる本」PHP研究所 p.61

$$T = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

t: ロケットの時間

T: 地球の時間

V: ロケットの速さ

私たちは、いくらでも未来に行くことができる。
ただし、もどることはできない。

質量はエネルギーの一形態

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

化学反応、原子核反応、重力収縮などで熱エネルギー ΔE が発生するとき、その系の質量は $\Delta m (= \Delta E / c^2)$ 減少している。

質量欠損の割合： 化学反応 10^{-9} 、核反応 10^{-3} 、ブラックホール形成 10^{-1}

3. 一般相对論

特殊相対論の限界

1. 特殊相対原理を 一般相対原理へ

加速度系にのって議論ができない。慣性系だけでなく、一般の座標に対して物理法則は 同じように書けるべきである。

リーマン幾何学の導入（曲がった空間の幾何学）で解決

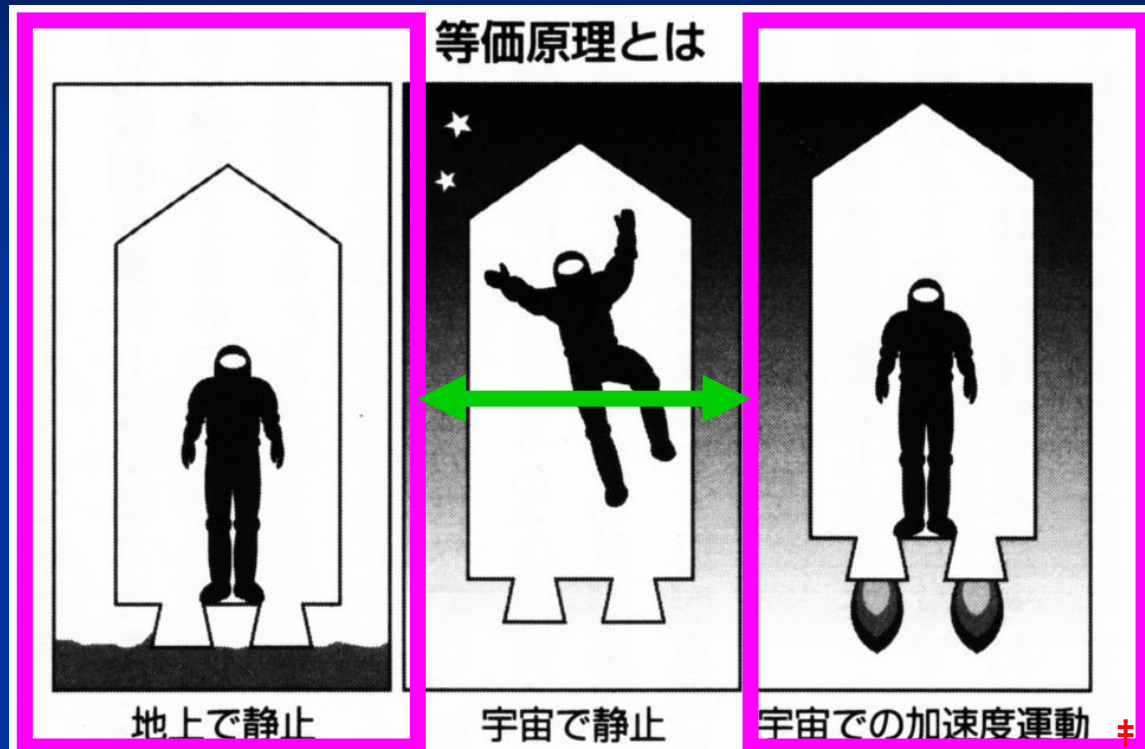
親友 M. Grossman などの協力

2. 重力を相対論的に記述したい。

物理の基本法則を 座標によらないように（座標変換に対して不変に）書きたい。

4つの基本的な法則の3つ（電磁気力、弱い力、強い力（色の力））は相対論的記述ができたが、どうしても重力はできない。

等価原理の導入により一般相対論成功



佐藤勝彦 1998「相対性理論を楽しむ本」 PHP研究所 p.161

地上で静止したロケットの中と、宇宙空間で加速しているロケットの中は等価
また落下しているエレベータの中では重力なし。

加速度運動と 重力とは 等価である。

アインシュタイン方程式(重力場の方程式)

- ニュートンの万有引力の法則とその場の方程式であるポアソン方程式を拡張したアインシュタイン方程式を完成。

$T_{\mu\nu}$: エネルギー運動量テンソル

$g_{\mu\nu}$: 計量テンソル

$R_{\mu\nu}$: リッチテンソル

万有引力の法則

$$\phi = -\frac{GM}{r}$$

ϕ : 重力
ポテンシャル

ポアソン方程式

$$\Delta\phi = 4\pi G\rho$$

ρ : 密度

テンソル成分
に書き換え

$$\Delta g_{00} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{00}$$

テンソル方程式として完成

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時間空間の幾何学
(曲がり)を表す量

物質・エネルギーを表す量

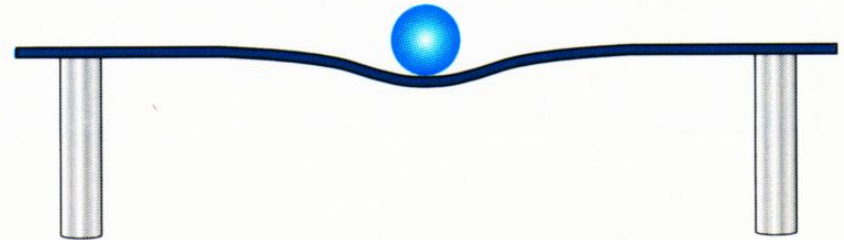
時空の幾何学(時間の伸び縮み、空間の曲がり) を物質・エネルギーが決定

曲がった空間では重力が働く。

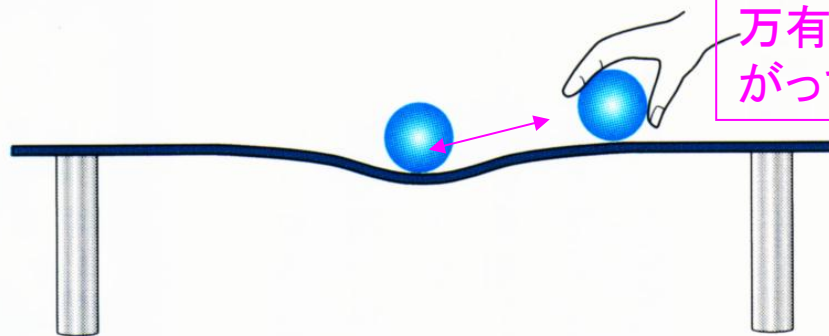
(真横から見た図)



物質が何もない(乗っていない)面

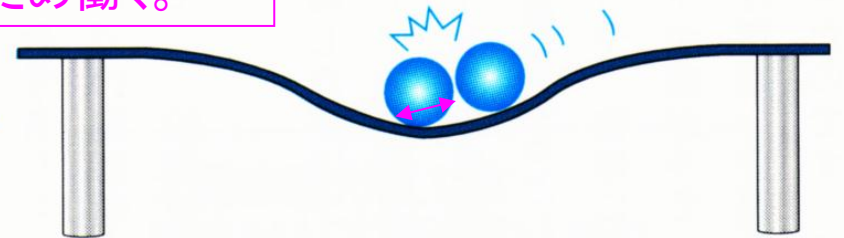


ボールを乗せると表面が曲がる



近くに別のボールを乗せると

万有引力は空間が曲がっているため働く。



表面はさらに曲がり
2つのボールは近づいてくっつく

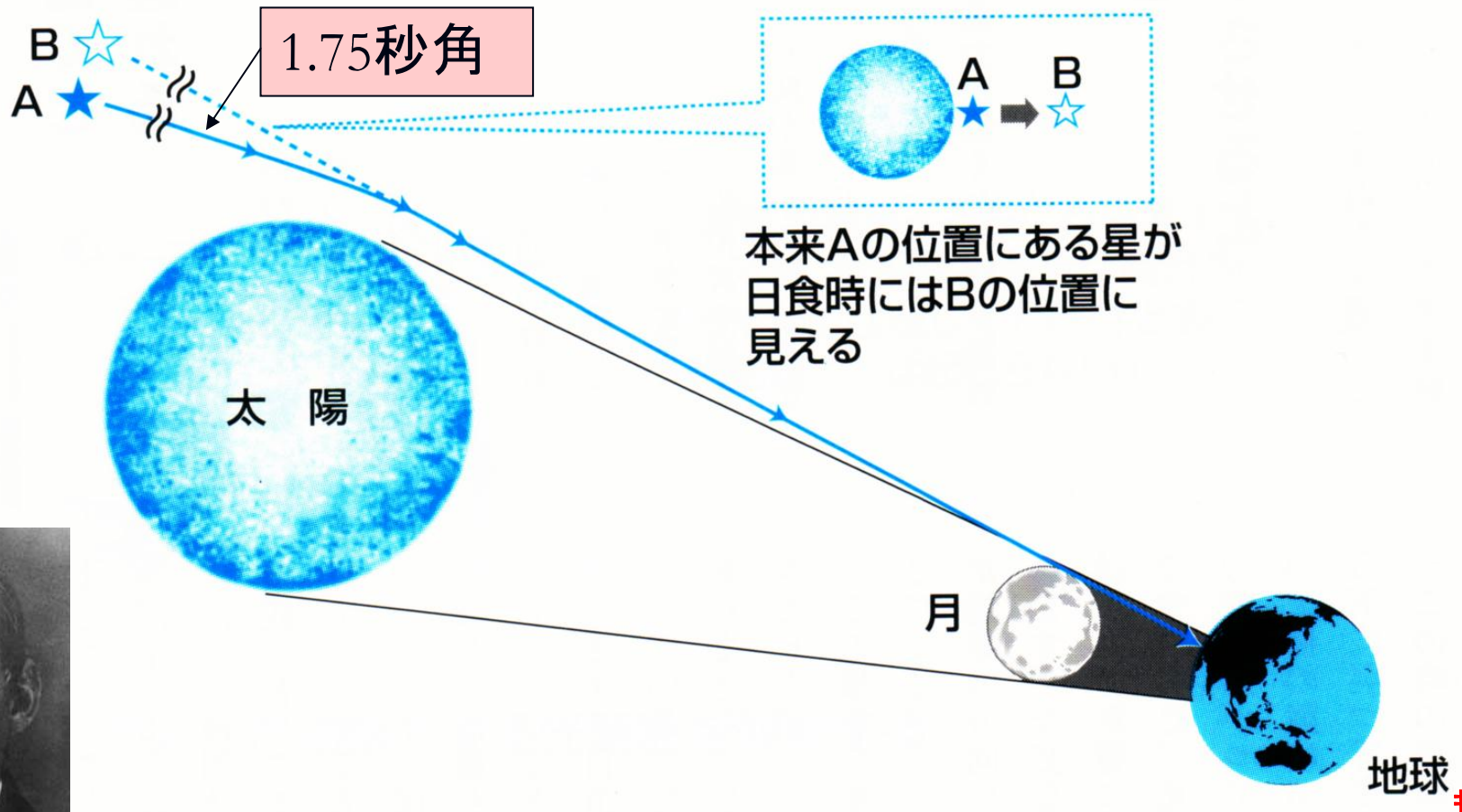
佐藤勝彦 2003「相対性理論がみるみるわかる本」 PHP研究所 p.53

物質・エネルギーは時空を曲げ、またその曲がりに従って運動。

時空は単純に物質の演舞の舞台ではなく、物質の演舞のパートナー

光も空間の曲がりによって折れ曲がる。

日食の際の太陽近くの星の様子



A.S.Eddington の観測(1919)で実証？

佐藤勝彦 2003「相対性理論がみるみるわかる本」PHP研究所 p.57

重力レンズは宇宙論的観測の 重要手段になった。

銀河や銀河団がその強い重力でレンズの役割をする。

アインシュタインの十字架

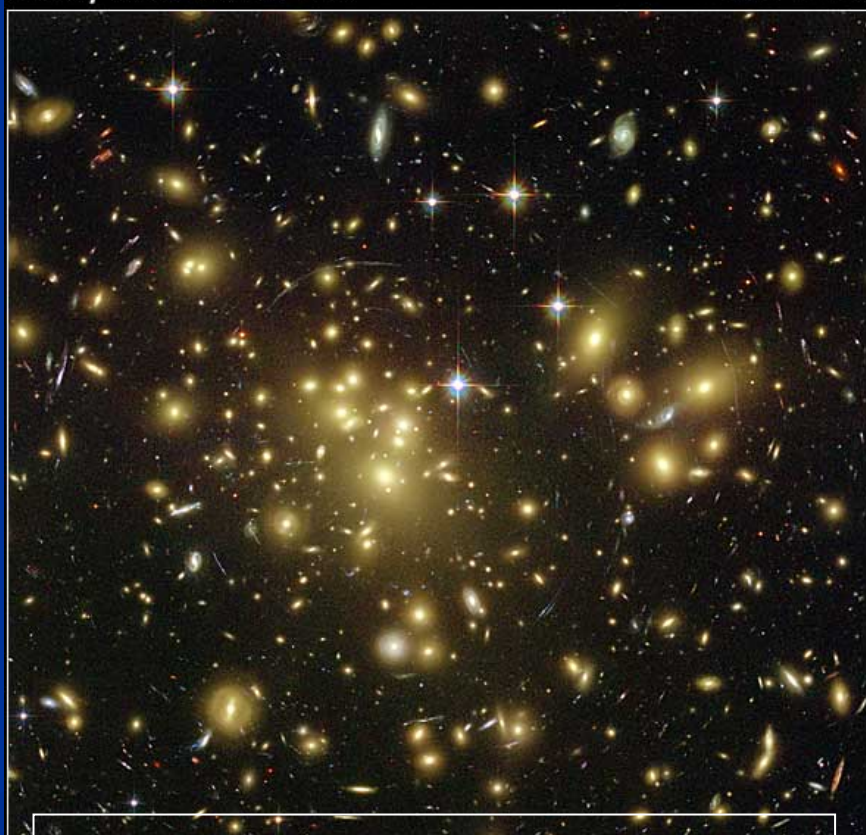


NASA Gravitational Lens G2237+0305

80億光年彼方のひとつのクエーサが5個に見える。

Galaxy Cluster Abell 1689

HST ■ ACS

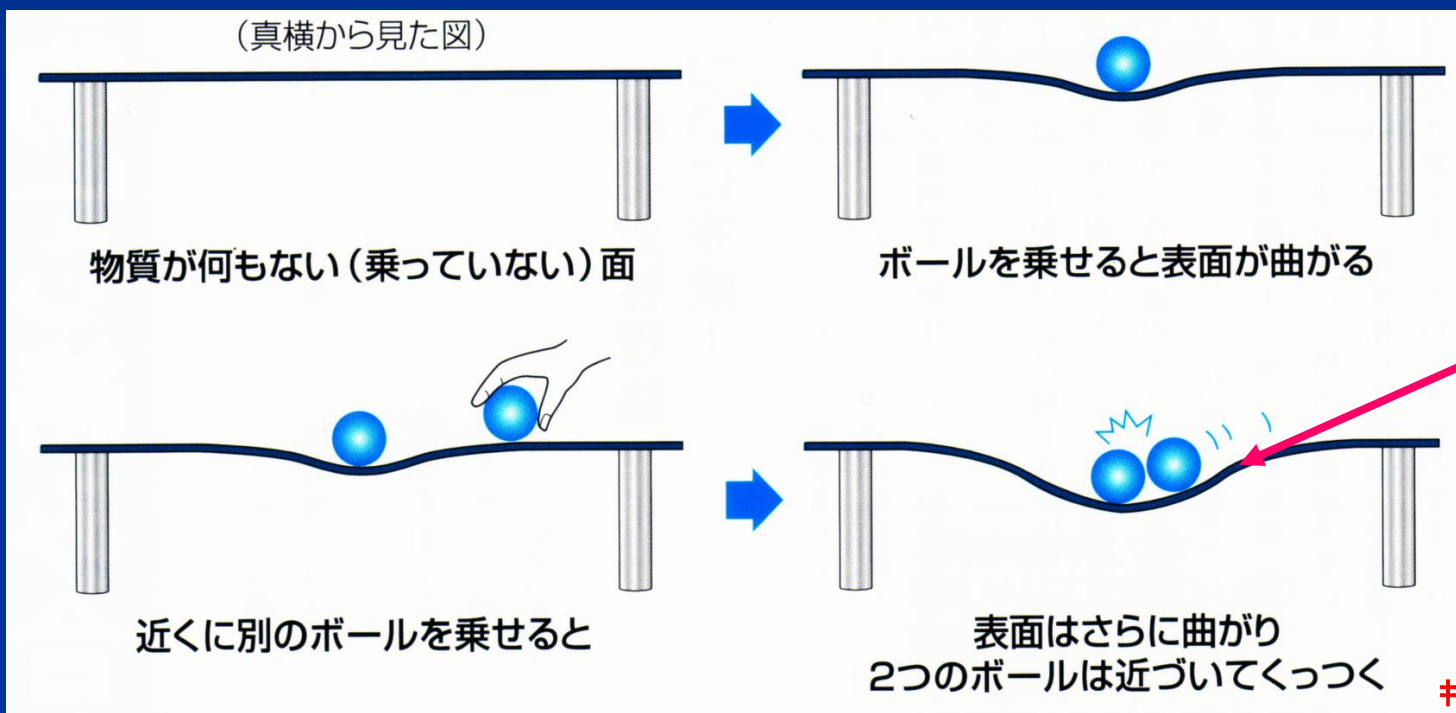


130億光年の遠方にある天体を増光

N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (Hebrew Univ.), H. Ford (JHU),
ampin(STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory),
CS Science Team and ESA STScI-PRC03-01a

重力波も天文学の手段となる。

質量の大きい天体が激しく運動すると、「時空のさざ波、重力波」が発生する。

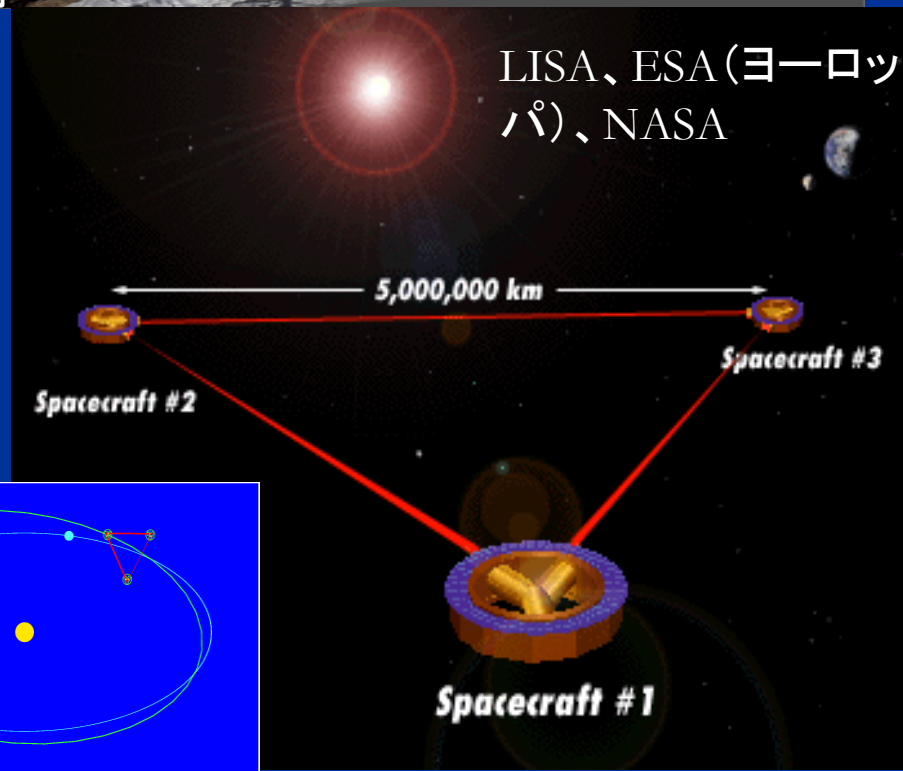
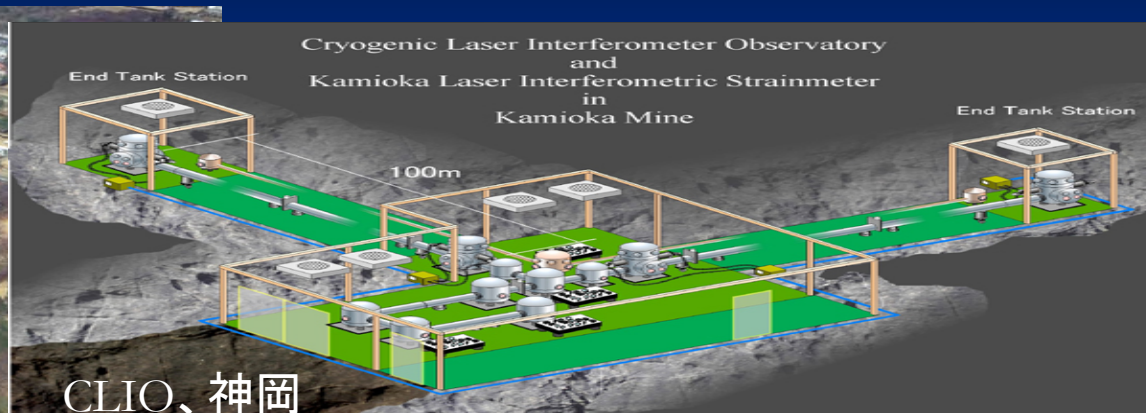


激しく動くと
トランポリンの
面も波立つ。

佐藤勝彦 2003「相対性理論がみるみるわかる本」 PHP研究所 p.53

ブラックホールが作られるときや、近接連星から、強い重力波が放出。

稼働中、計画中の重力波検出装置



時空は単純に物質の演舞の舞台ではなく、物質の演舞のパートナー

■ 宇宙の創生・進化

時空と、物質は絡み合い、一体となって進化

宇宙の多重発生

ワームホール

時間

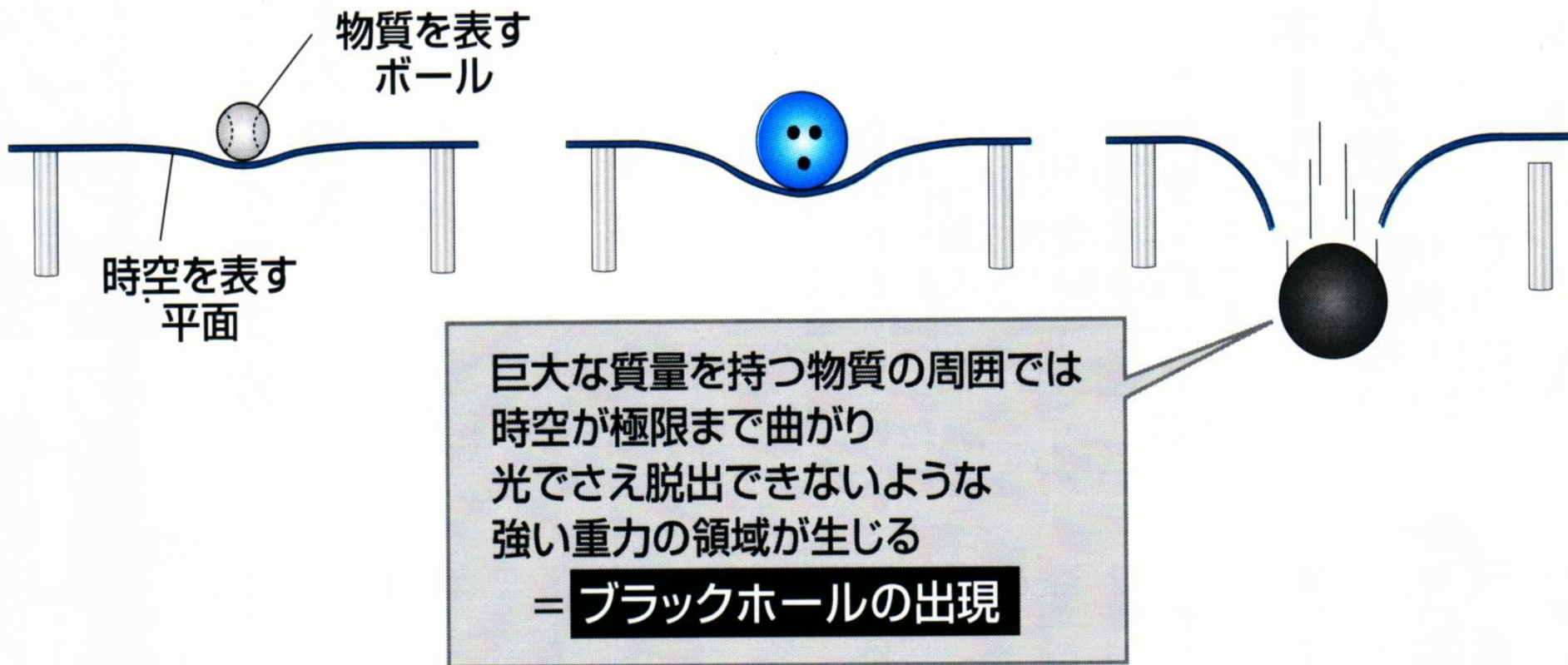
インフレーション

“無”からの創生



4. ブラックホール・ワームホール

巨大な質量を持つ物質と時空



シュバルツシルド ブラックホール

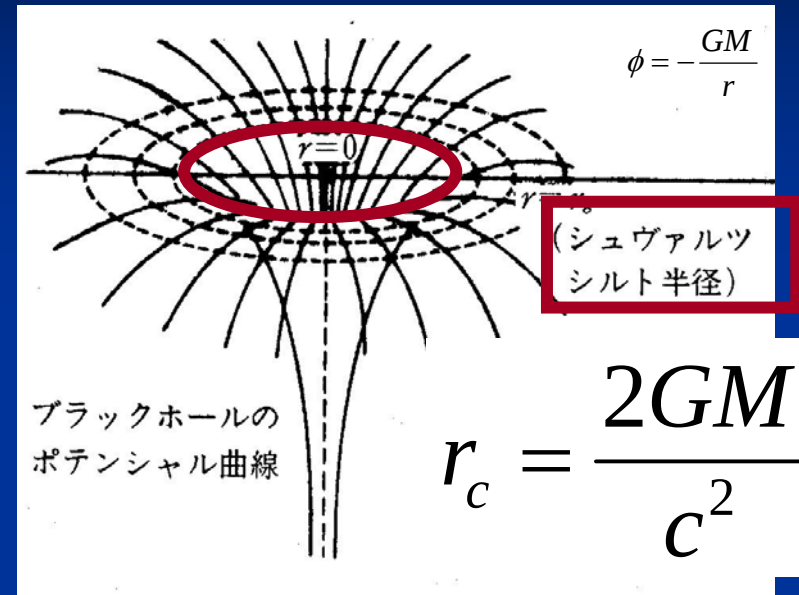
質点の作る重力場のアインシュタイン方程式の解

K. シュバルツシルド(1915)

この解には 事象の地平面(シュバルツシルド面)が存在し、いったんその中に入れば光といえども決して出てこられない。 一方通行面。

アインシュタインはブラックホールを実在するものとは思わなかった。

(Ann. Math., 1939)



シュバルツシルド半径:

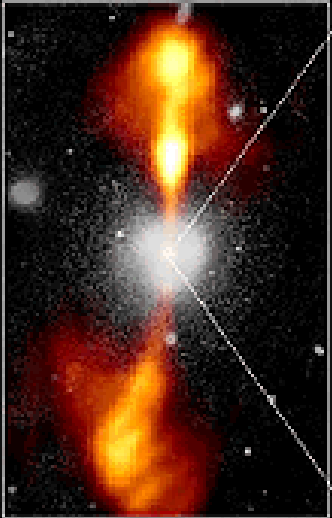
脱出半径が光速になる半径

J.ミッチェル、
1783

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GmM}{r_c}$$
$$v = c$$

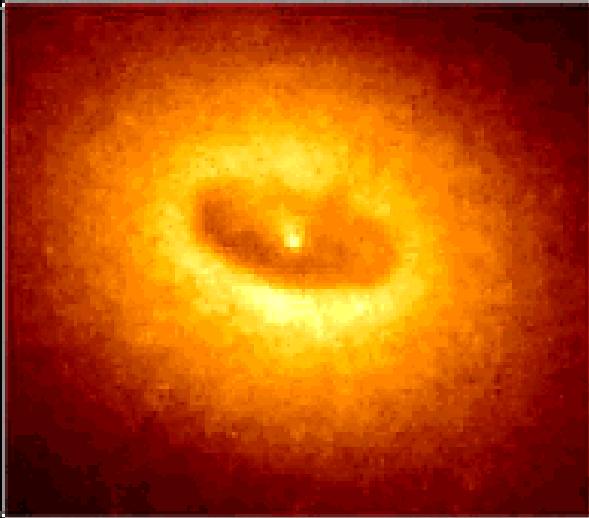
たくさんのブラックホール天体発見

Ground-based Optical/Radio Image



380 Arcseconds
88,000 Lightyears

HST Image of a Gas and Dust Disk

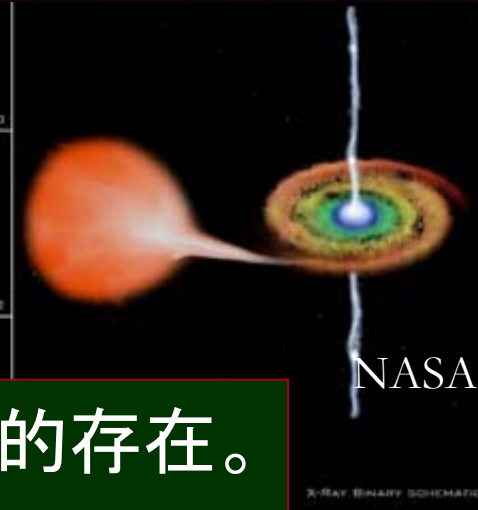


NASA

1.7 Arcseconds
400 Lightyears



NASA



ブラックホールは宇宙の中で普遍的存在。

星の爆発後、銀河の中心など

ブラックホールの蒸発

- ブラックホールの面積定理 (S.Hawking、1973)

ブラックホールの表面積、 A は何個か合体して一つになっても単調増大。

$$\Delta A \geq 0$$

エントロピーの増大と類似

- ブラックホール熱力学 (J.Bekenstein、1973)

$$dE = dMc^2 = T_{BH} dS_{BH}$$

$$S_{BH} \equiv \frac{kc^3}{4G\eta} A$$

- ブラックホールの一般化された熱力学

$$S = S_{matter} + S_{BH}$$

$$\Delta S \geq 0$$

- ブラックホールの温度 (ホーキング温度)

$$T_{BH} \equiv \frac{\eta c^3}{8\pi GM}$$

ブラックホールの蒸発

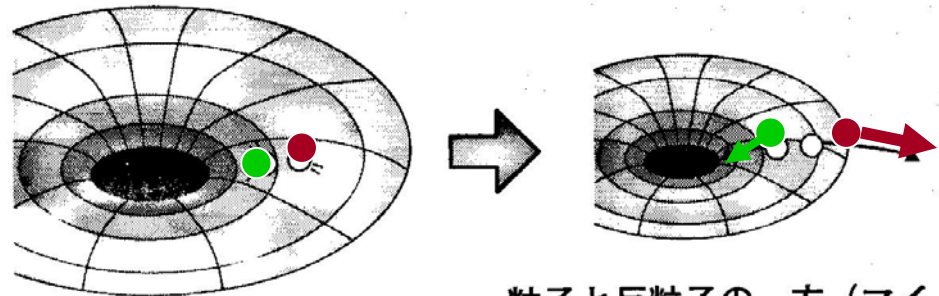
- ブラックホールは温度を持ち、量子論的效果で蒸発してしまう。

$$T_{BH} \equiv \frac{\eta c^3}{8\pi GM}$$

$$= 1.2 \times 10^{26} / M(g) K$$

$$= 6.2 \times 10^{-8} M / M_{Sun} K$$

ブラックホールの蒸発



事象の地平面のすぐ外側で粒子と反粒子のペアが生まれる

粒子と反粒子の一方（マイナスのエネルギーを持つ方）が事象の地平面に飲み込まれるとブラックホールは質量を減らす

佐藤勝彦 2004「「相対性理論」の世界へようこそ」 PHP研究所 p.157

宇宙初期で始原的ブラックホールが作られるかもしれない。 S.Hawking（1974）

その質量 が 10^{15}g より大きいと蒸発までにかかる時間は宇宙年齢、140億年より長くなる。

ワームホール

ブラックホールの下半分を切り
すて、下から 上半分のコピーを
くっつけたもの。

リンゴの虫食い穴のように、表
面の2点を近道で結ぶ時空構造。
SFで 宇宙旅行の近道として
(ワープ) 使われる。

一般には通行不可能

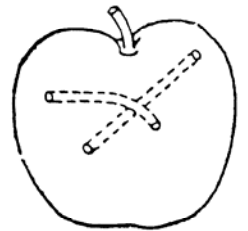
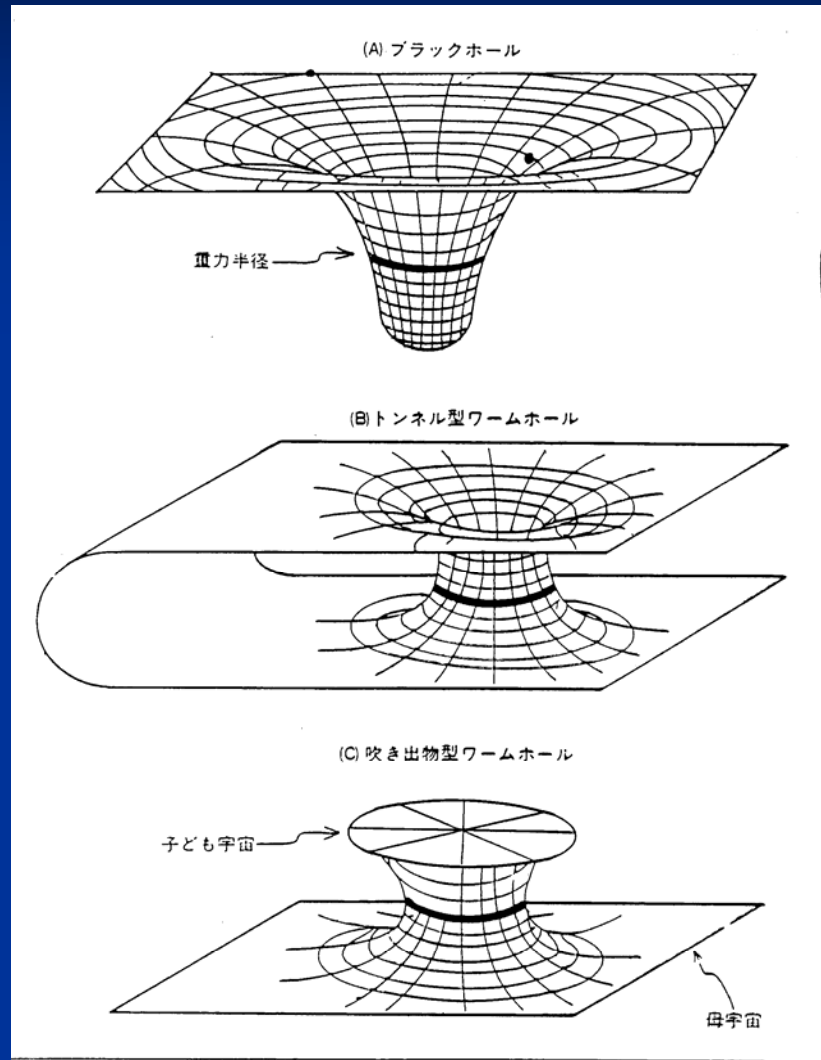
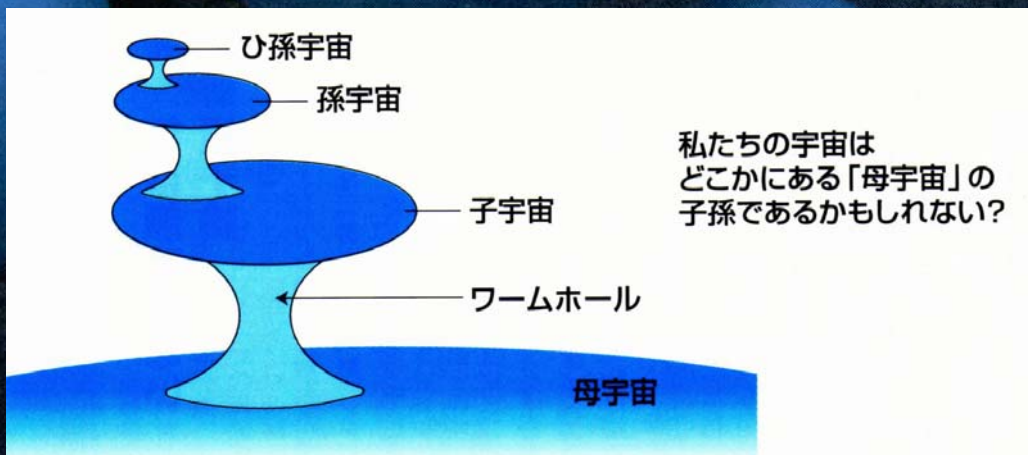


図4 ブラックホールとワームホールの模式図

宇宙の多重発生

Sato, Sasaki, Kodama, Maeda,
(1982)



母宇宙から、吹き出物形ワームホールが生じ、そこから子宇宙が、孫宇宙……が生まれる。

5. タイムマシン 問題

- SFの永遠のテーマ。

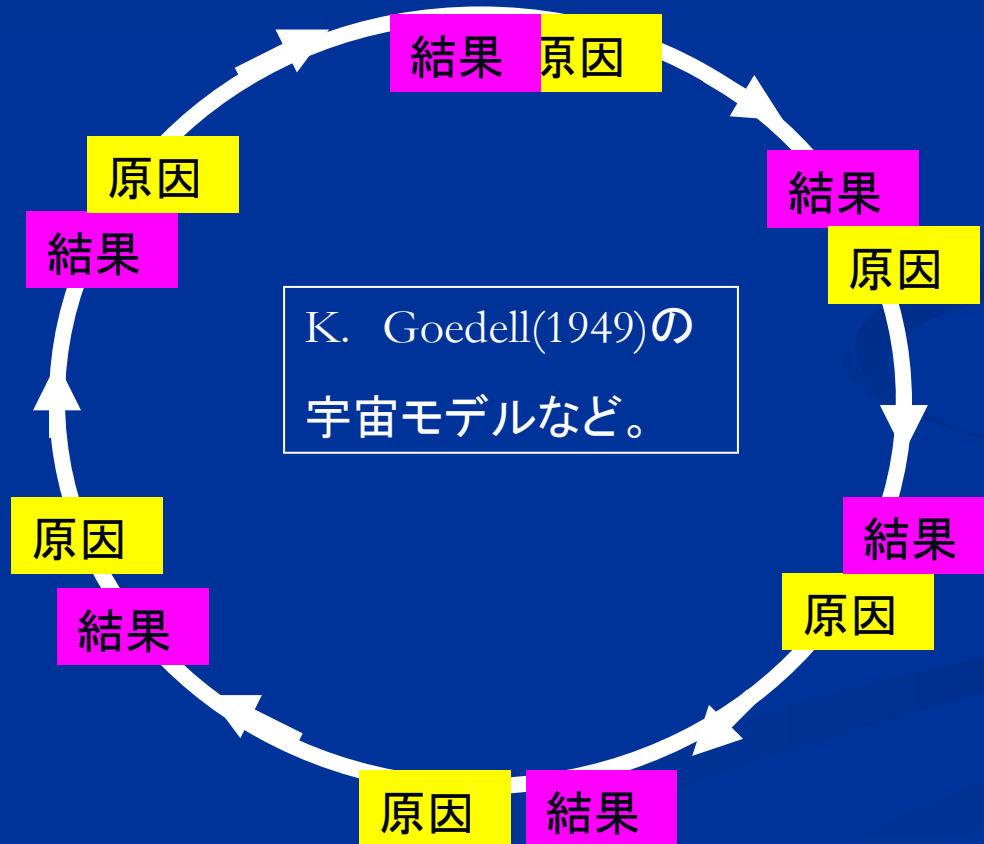
しかし「親殺しのパラドックス」等が生じ論理的矛盾をきたす。

「過去に行って自分を生む前の母親を殺したらどうなるのか？ 母親を殺せる自分は生まれず、従って母親を殺せることもないはずだ。」

- しかし、驚いたことに一般相対論は タイムマシンを禁止していない。

タイムマシン

時間的閉曲線 (CTC: closed timelike curve) は
アインシュタイン方程式の解として存在



アインシュタインは同僚の数学者、ゲーデルがアインシュタイン方程式の解として、時間的閉曲線を含む解を発見したとき、動揺した。

タイムマシン、時間的閉曲線(CTC)問題

- CTCを持つ解、ゲーデルの宇宙解(1949)が発見されたとき、アインシュタインは困惑。
- CTCを持つ解は現実の宇宙では実現されな
いだろうと考えた。
- しかし、K.Thorne (Phys.Rev.Lett.1988)が、ワームホールを用いたタイムマシンの作り方を示した。

K. Thorneの タイムマシン

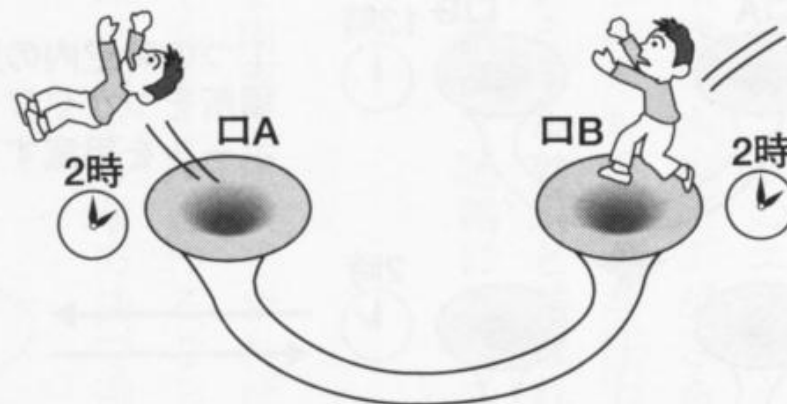
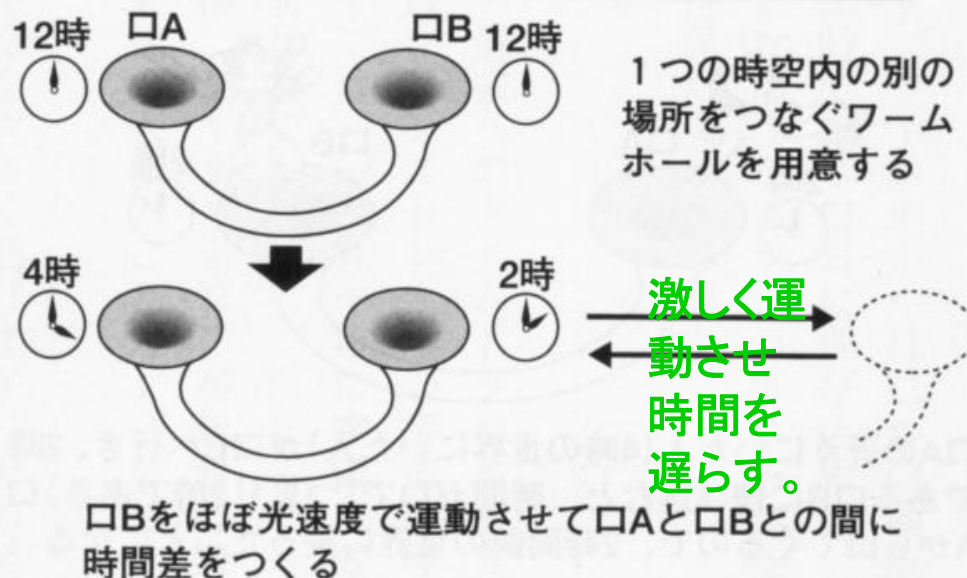
タイムマシンを作った時刻
より昔には帰れない。

ワームホールを通行可能
に保つためには 負のエ
ネルギーを満たさねばなら
ない。

ワームホールは量子的揺
らぎによるミクロのものを
拡大する。

将来の知的生命体の実現
するであろう。

ワームホール・タイムマシン その1



口Aの近くにいた人(4時の世界にいた人)が口Bへ行き、2時である口Bに飛び込むと、時間ゼロで(つまり2時である)口Aから出てくるので、2時間前の世界に戻ったことになる

タイムマシン、時間的閉曲線(CTC)問題

■ 1.すべては定められているのか？

時間が環になっていても因果が無矛盾につながればよいのではないか？

(Principle of Self Consistency)

自由意志を持っていると思っても幻想では？ I. Novikov (1998)

■ 2.時間順序保護仮説

(Chronology Protection Conjecture)

現代物理学の2本の柱である相対論が許しても量子論が許さないのではないか？ ワームホールの量子重力的不安定性。 S. Hawking (1990)

■ 3.多世界解釈により、因果律に反することなくタイムマシンは可能

過去に行って歴史を変えても、その宇宙は別の宇宙。

D.Deutsch、M.Lockwood (1994)

すべては定められているのか？ (Principle of Self Consistency)



豊島園 ループ状の流れる
プールのように、無矛盾に
つながっていれば問題はない
のではないか？

自由意志は幻想か？

レーナ・マリア (1968 -)

「人々は私を障害者といいますが、私はまったく自由です。私を不自由というなら、皆さんだって決して何でもできるわけではなく、可能な範囲のことをしているだけです。」

タイムマシン、時間的閉曲線(CTC)問題

■ 1. すべては定められているのか？

時間が環になっていても因果が無矛盾につながればよいのではないか？

(Principle of Self Consistency)

自由意志を持っていると思っても幻想では？ I. Novikov (1998)

■ 2. 時間順序保護仮説 (Chronology Protection Conjecture)

現代物理学の2本の柱である相対論が許しても量子論が許さないのではないか？ ワームホールの量子重力的不安定性。 S. Hawking (1990)

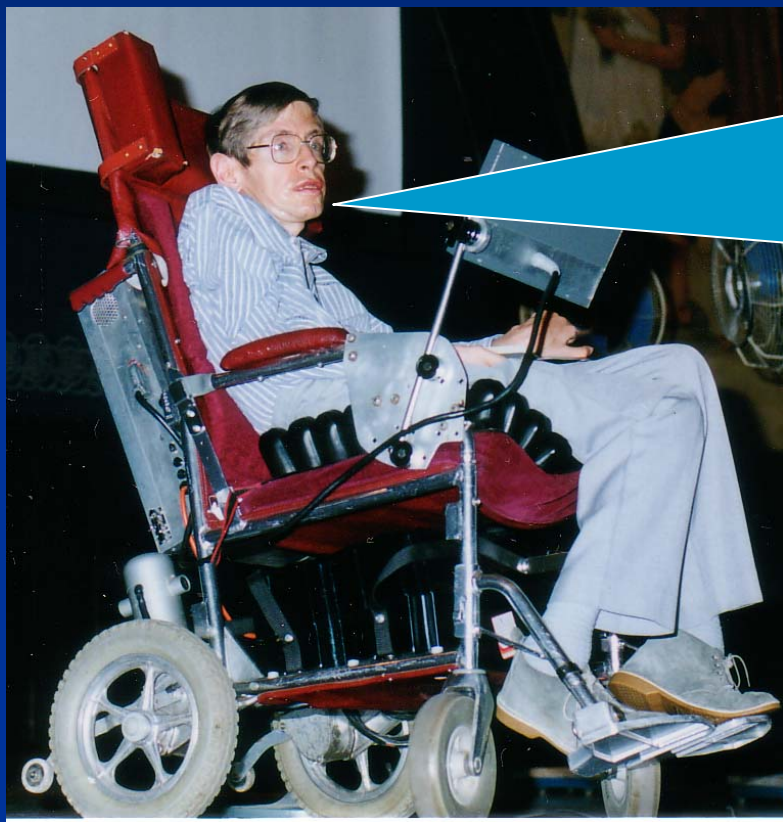
■ 3. 多世界解釈により、因果律に反することなくタイムマシンは可能

過去に行って歴史を変えても、その宇宙は別の宇宙。

D.Deutsch、M.Lockwood (1994)

時間順序保護仮説

S. Hawking (1990)



東大、安田講堂にて。(1990)

タイムマシンが原理的にできるなら、未来からの旅行者で満ちあふれているはずだ。

ワームホールは量子重力的不安定性により壊れ、通行不可能になる。

量子論がタイムパトロールの役割を果たすに違いない。

タイムマシン、時間的閉曲線(CTC)問題

■ 1. すべては定められているのか？

時間が環になっていても因果が無矛盾につながればよいのではないか？

(Principle of Self Consistency)

自由意志を持っていると思っても幻想では？ I. Novikov (1998)

■ 2. 時間順序保護仮説 (Chronology Protection Conjecture)

現代物理学の2本の柱である相対論が許しても量子論が許さないのではないか？ ワームホールの量子重力的不安定性。 S. Hawking (1990)

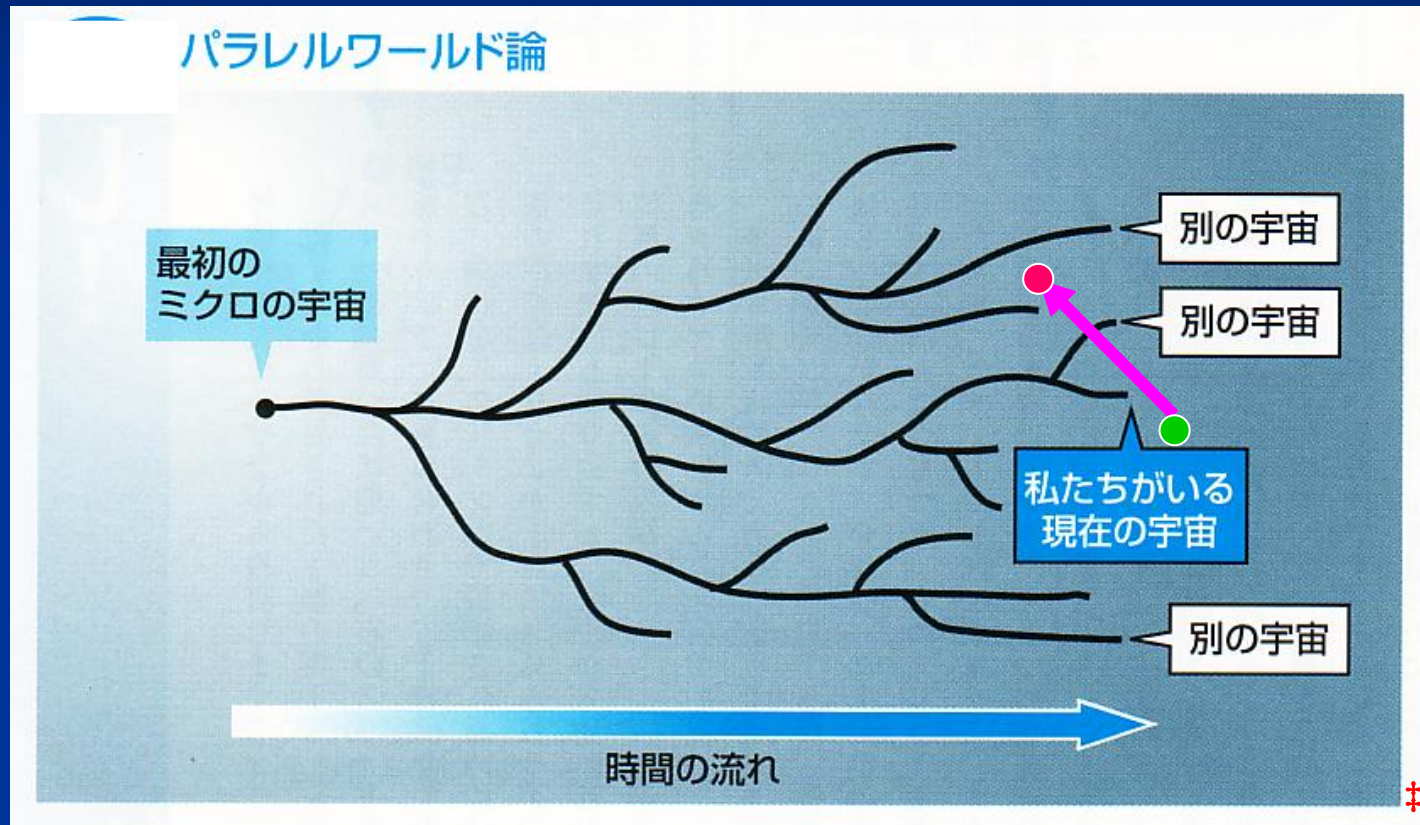
■ 3. 多世界解釈により、因果律に反することなくタイムマシンは可能

過去に行って歴史を変えても、その宇宙は別の宇宙。

D.Deutsch、M.Lockwood (1994)

D. Deutsch等の多世界的タイムマシン解釈

- 世界(宇宙)は量子論に従って無限に分岐を続ける。



佐藤勝彦 2004「量子論がみるみるわかる本」 PHP研究所 p.79

“あなた”が過去にもどって、母親を殺しても、その人は無限に存在する別の宇宙の母親？

ブラックホールの蒸発問題、タイムマシン問題は時空の大きな問題を内包？

- ブラックホールのエントロピーを超ひも理論の立場から導出成功。

$$S_{BH} \equiv \frac{kc^3}{4G\eta} A$$

$$T_{BH} \equiv \frac{\eta c^3}{8\pi GM}$$

- 時間順序保護仮説は仮説だが ワームホール時空の不安定を示唆？
- タイムマシン問題は 量子重力理論の研究者のリクリエーションだ。
S. Hawking

6. 一般相対論は役に立つか？

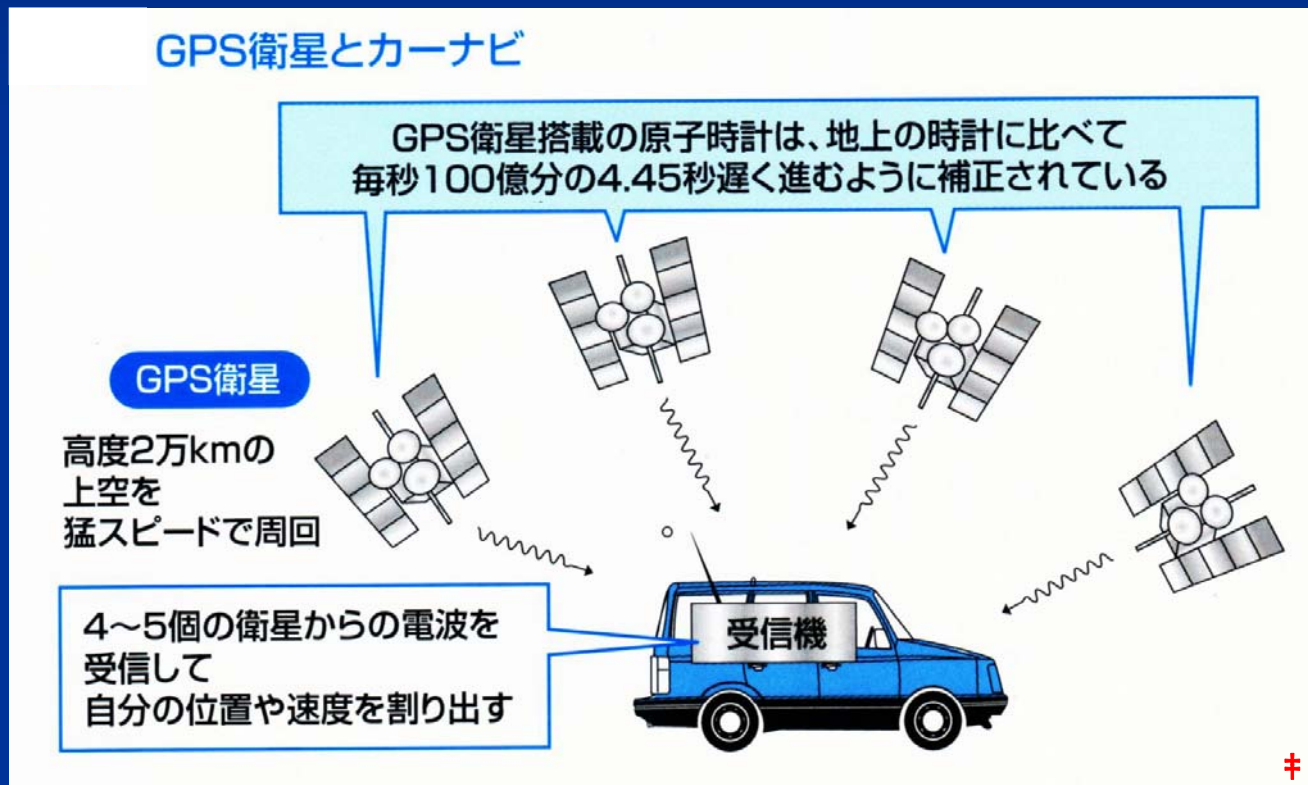
- 理学部物理学科でも 選択科目。 必須でない。
- 時空の物理学を知らずして、この世界は知り得ない。
- たしかに日常の生活には役に立たないが、一つの役立っている具体例がある。

GPS (Global Positioning System)

人工衛星の時間 t_{Satt}

地面の時間 t_{Gro}

$$t_{\text{Satt}} = \left(1 + \frac{\phi_{\text{Satt}} - \phi_{\text{Gro}}}{c^2} - \frac{v_{\text{Satt}}^2 - v_{\text{Gro}}^2}{2c^2}\right)t_{\text{Gro}}$$



佐藤勝彦 2003「相対性理論がみるみるわかる本」 PHP研究所 p.65

正しい位置情報のためには、一般相対論的補正が必要。

まとめ

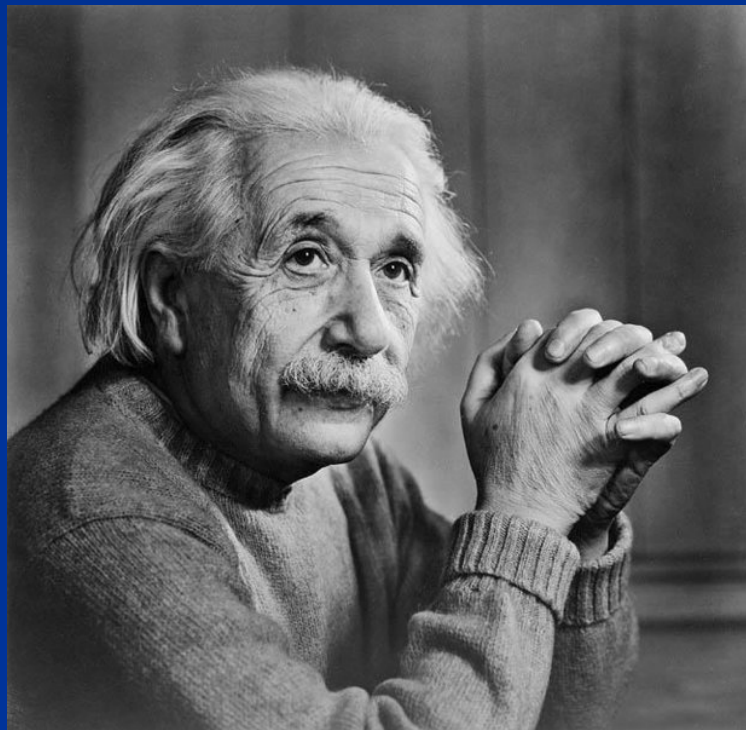
- 時間・空間 は かつて 物質の演舞する確固とした舞台と考えられていた。 物質の入れ物
時空は先験的(カント)
絶対時間、絶対空間 (ニュートン)
- 時空は物質とともに演舞するパートナー である。
- 相対論は量子論と共に現代物理学の体系を支える柱。
- この世界を知り、自らの位置を認識するためにも時空が何であるか知ることが必要。
- 現在量子論と比べると実用面では寄与が少ないが、21世紀末には、多くの技術に必要とされるであろう。

アインシュタインの言葉

これまでの考えでは、物質がこの世界から消えてしまうと、時間と空間が残るとされていました。

しかし相対論の考えでは、物質がなくなると時間も空間もなくなるのです。

アインシュタインの言葉 (2)



Gravitation cannot
held responsible
for people falling
in love.