

相対性理論の世界

ブラックホール・タイムマシンの可能性



真貝寿明 Hisaaki Shinkai
(大阪工業大学 情報科学部)

特殊相対性理論

準光速ロケットからみえる風景

一般相対性理論

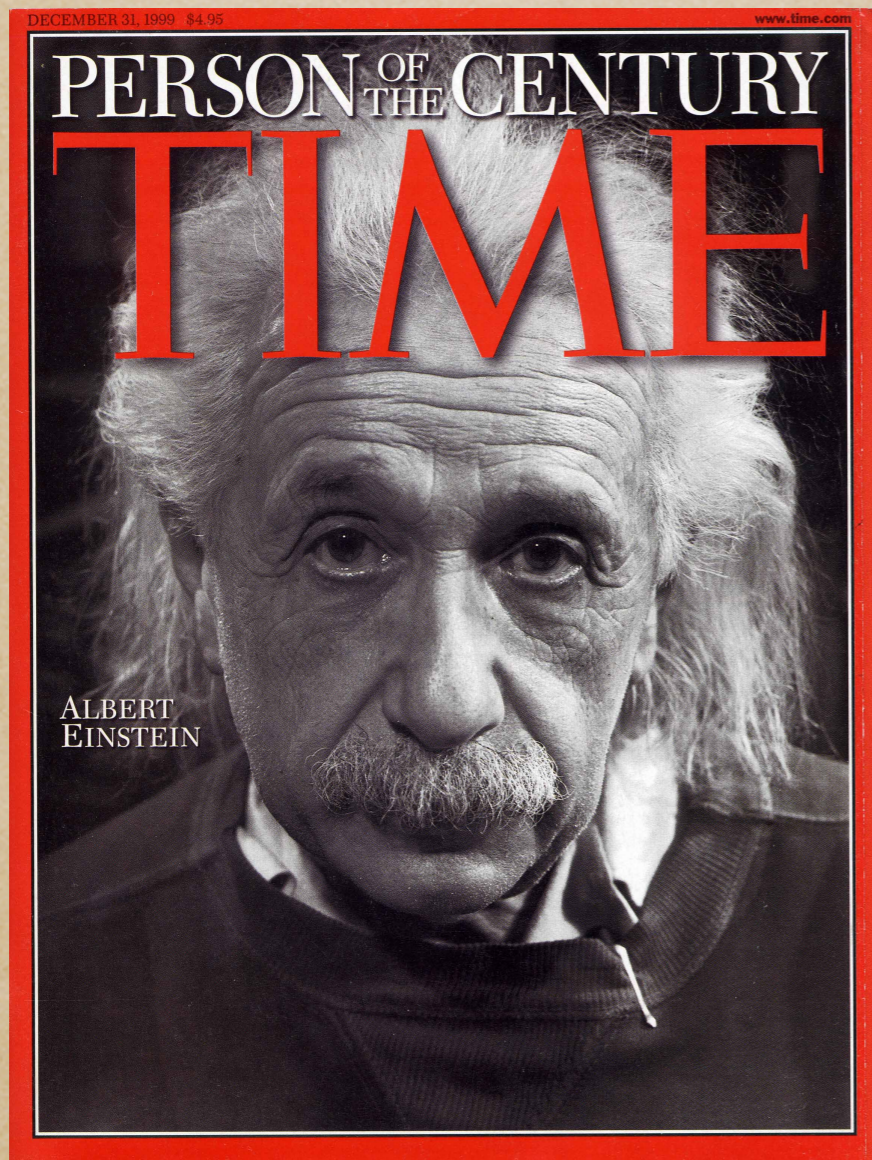
ブラックホール

ワームホール

重力波



アインシュタイン



アルベルト・アインシュタイン
1879 (明治12)/3/14
~1955 (昭和30)/4/18

Time
1999/12/31

アインシュタイン



科学の重要性と、自然や
宇宙に対する真理探究の
重要性を訴える1年間



26歳のアインシュタイン

国際物理年2005

1905年は奇跡の年 (1)

光電効果の理論

A. Einstein, *Annalen der Physik (Germany)*, 17, 132-148 (1905).
『光の発生と変換に関する一つの発見的な見地について』
(1905年3月18日投稿)

ブラウン運動の理論

A. Einstein, *Annalen der Physik (Germany)*, 17, 549-560 (1905).
『熱の分子論から要求される静止液体中の懸濁粒子の運動について』
(1905年5月11日投稿)

(特殊) 相対性理論

A. Einstein, *Annalen der Physik (Germany)*, 17, 891-921 (1905).
『動いている物体の電気力学』
(1905年6月30日投稿)

1905年は奇跡の年 (2)

光電効果の理論

光や電子が「波でもあり、粒子でもある」と考えれば、金属に光を当てたときに電子が飛び出す現象が説明できる。

⇒ 「量子力学」の基礎を与えた。

ブラウン運動の理論

「ブラウン運動をする粒子の運動を測定すれば、原子（分子）の存在が結論づけられる」と予言した。

⇒ 「確率過程論」の基礎を与えた。

(特殊) 相対性理論

時間の流れが、観測者によって異なることを主張。

$E=mc^2$ の公式を得た。原爆・水爆・原子力発電へ応用。

⇒ 「時間と空間の概念」を変えた。

近代物理学の進展

1600

1700

1800

1900

1905

天文学

ガリレイ
ケプラー

電磁気学

ファラデー
マクスウェル

熱学

光学

流体力学

力学

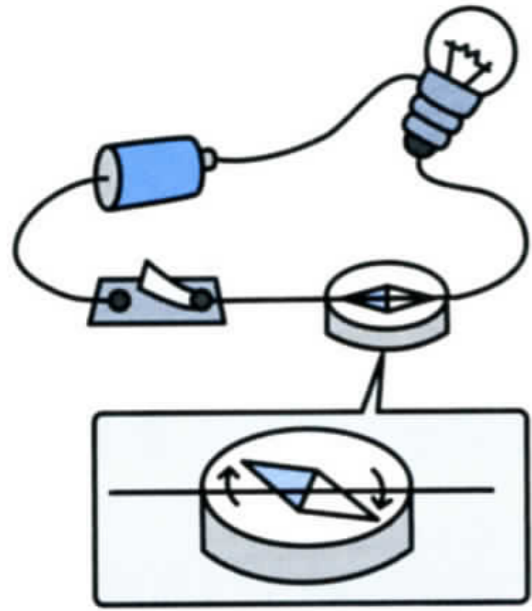
解析力学

ニュートン

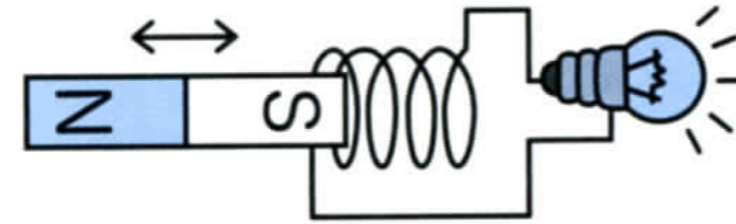
ラグランジュ
ハミルトン

物理学完成!?

電磁気学の進展



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



ファラデー

コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

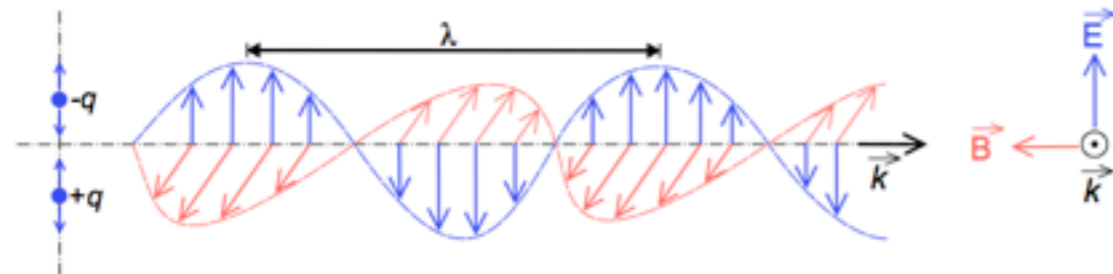
電磁誘導現象の発見 (1831年)

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ (1864年)、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



マクスウェル



ヘルツ

電磁波は確かに光の速さで伝わっていた。

電磁波 (電波) の受発信に成功し、光の電磁波説を実証する (1888年)

近代物理学の進展

1600

1700

1800

1900

1905

天文学

ガリレイ
ケプラー

電磁気学

ファラデー
マクスウェル

熱学

光学

流体力学

力学

解析力学

ニュートン

ラグランジュ
ハミルトン

物理学完成!?

現代物理学の発展

1905

1916

1925

1960s

1980s

一般相対性理論

特殊相対性理論

ブラウン運動

光電効果

統計力学

量子力学

物理化学

物性物理

原子核理論

場の理論

経済物理

生物物理

複雑系

素粒子論



電磁気学の完成 (Maxwell, 1864)

電磁気学の基本方程式 (1864)

次の4本の方程式から成り立つ。 E は電場ベクトル, B は磁場ベクトル, ρ は電荷密度, j は電流ベクトル, c は光速とする。また, ∇ は微分演算子とする。

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

具体的には, 各ベクトルは

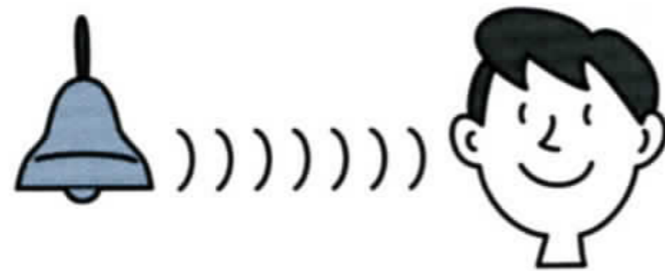
$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}, \quad \nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

などと書け, \cdot と \times はベクトルの内積と外積を表す。したがって, 具体的には

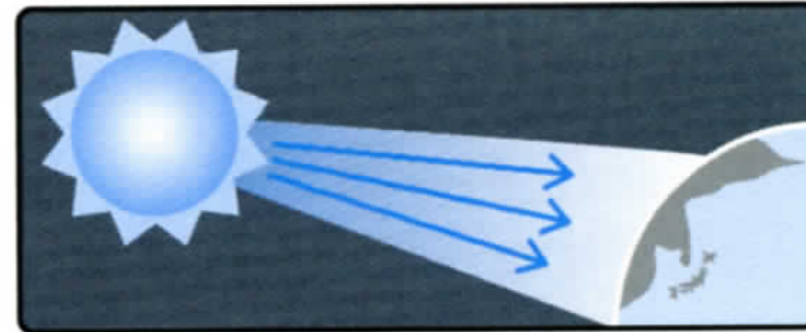
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

電磁気学で生じた疑問

疑問1 電磁波を伝えるもの(媒質)は何か?



音波は空気中の分子の振動が伝える。



電磁波(光)は真空中を満たす未知の媒質エーテルが伝える?

疑問2 電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか?



時速140km



時速120km

車中の人からはパトカーの速度は時速20kmに見える。
(速度は相対的なもの)

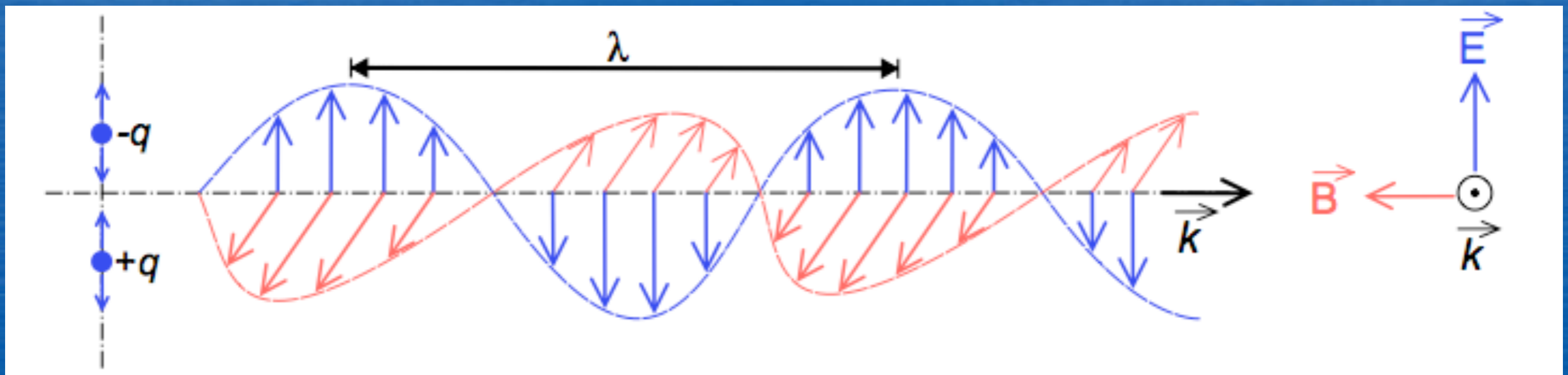
特殊相対性理論 【概略】

- 電磁気学の方程式に、光速 c が登場した。
どの座標系で見たかを議論していないのに……

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{E} = 0, \quad \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{B} = 0, \quad \text{where } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

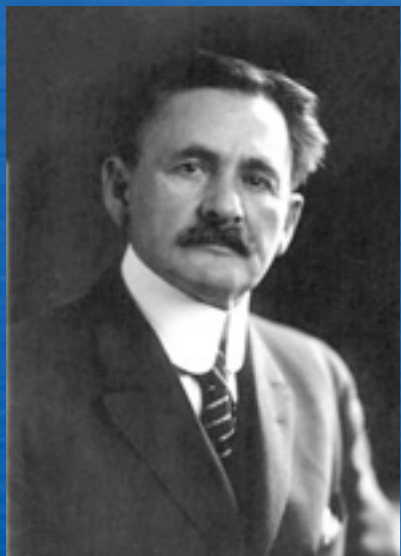
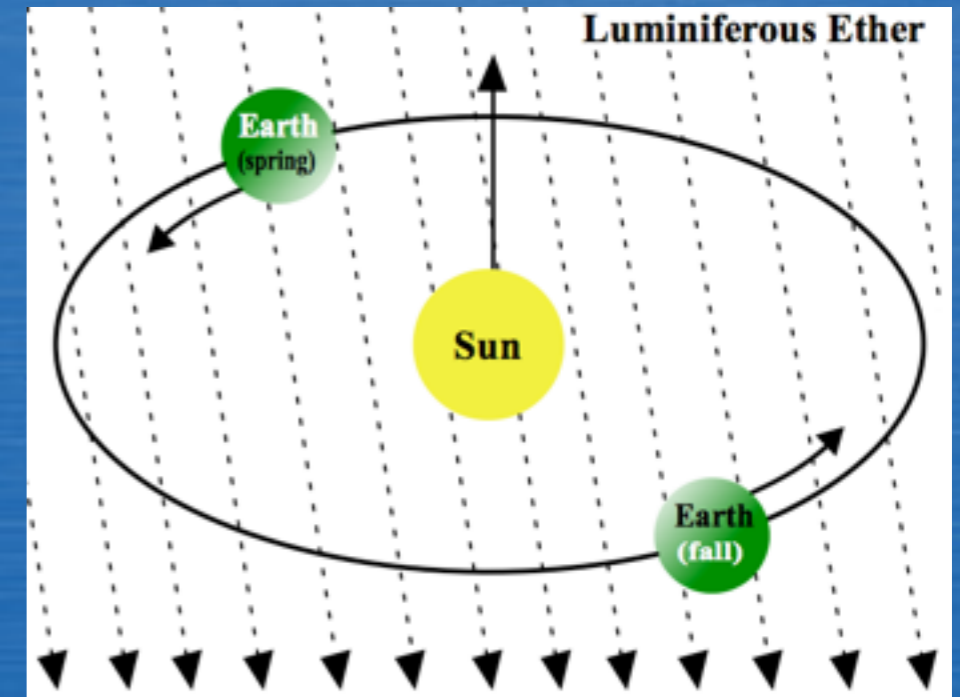
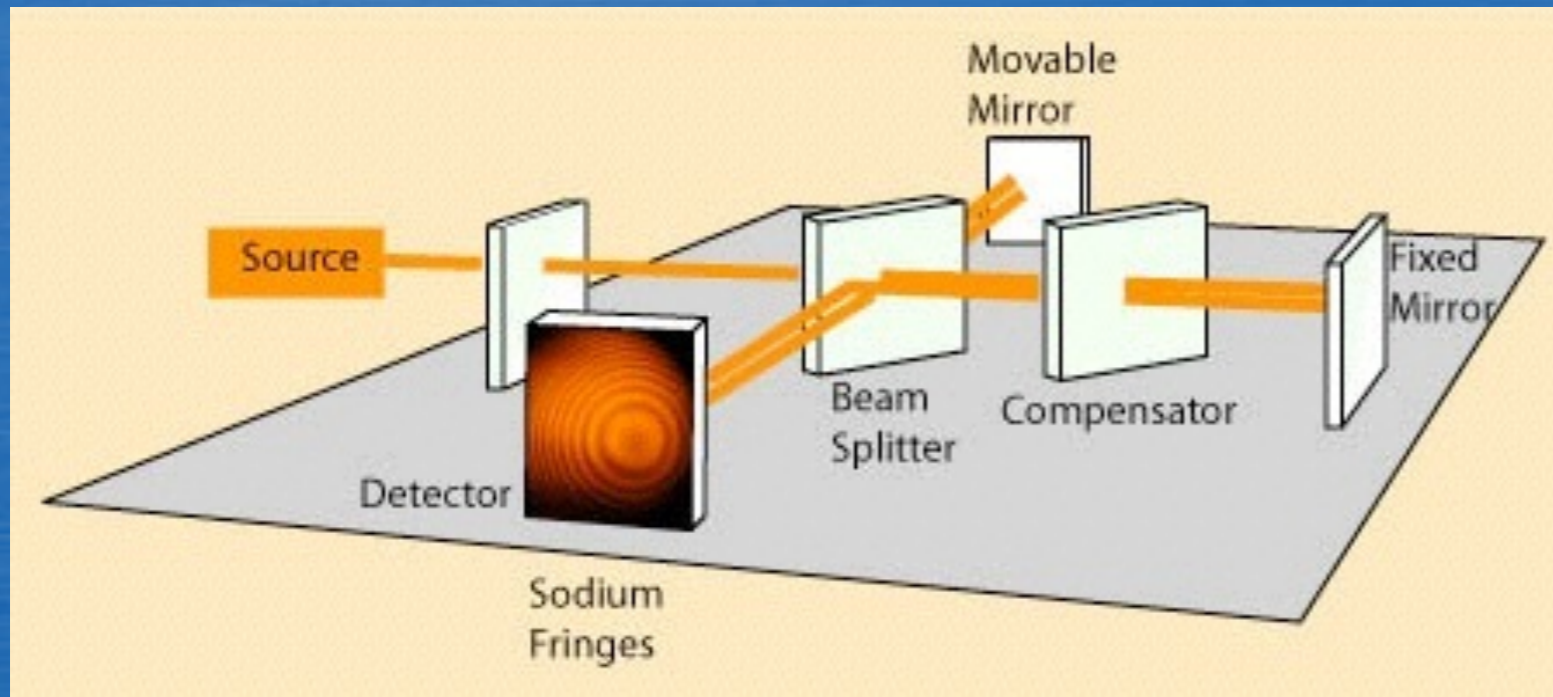
- 特別な慣性系の存在？ 光を伝える媒質の存在？

= 「エーテル」



マイケルソン・モーリーの実験

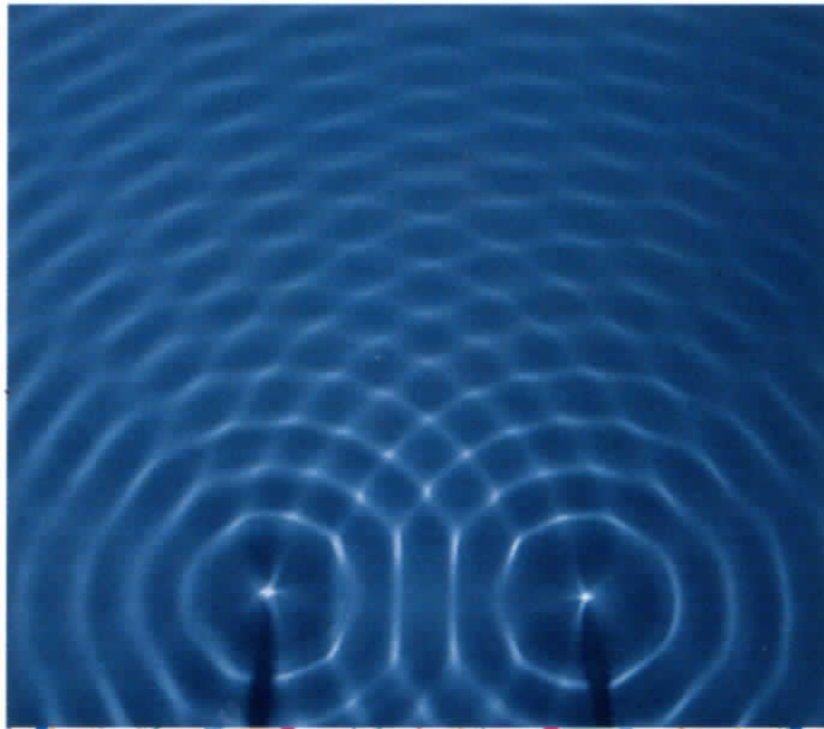
Michelson-Morley experiment 1887



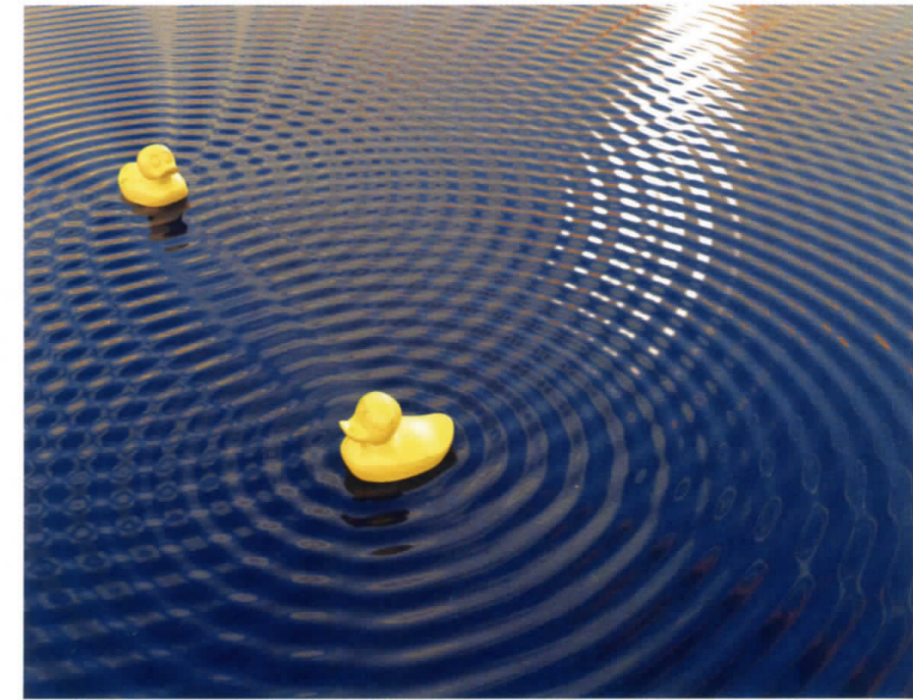
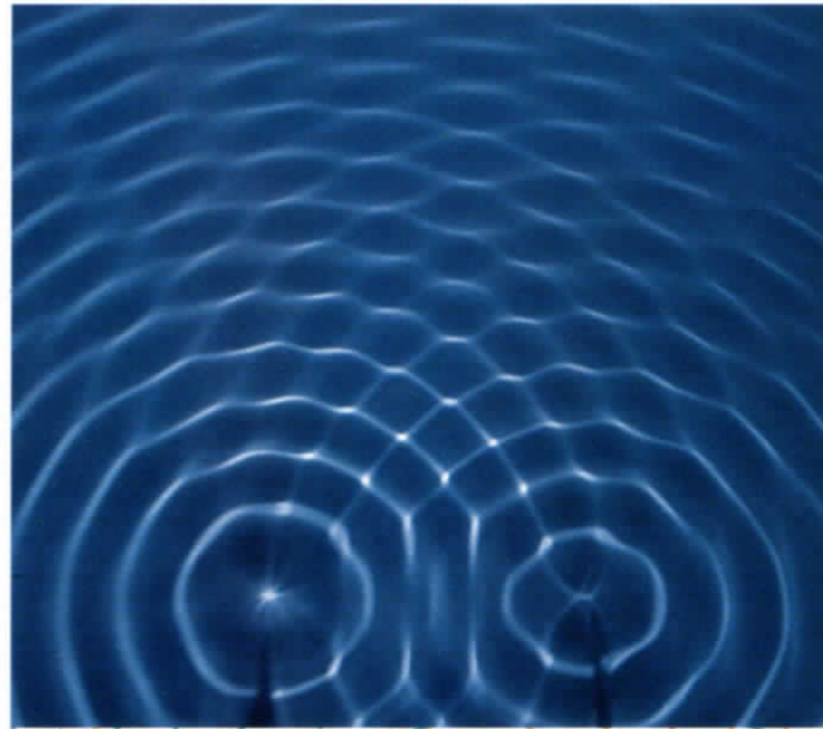
エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

波の干渉 = 強めあったり弱めあったりする現象

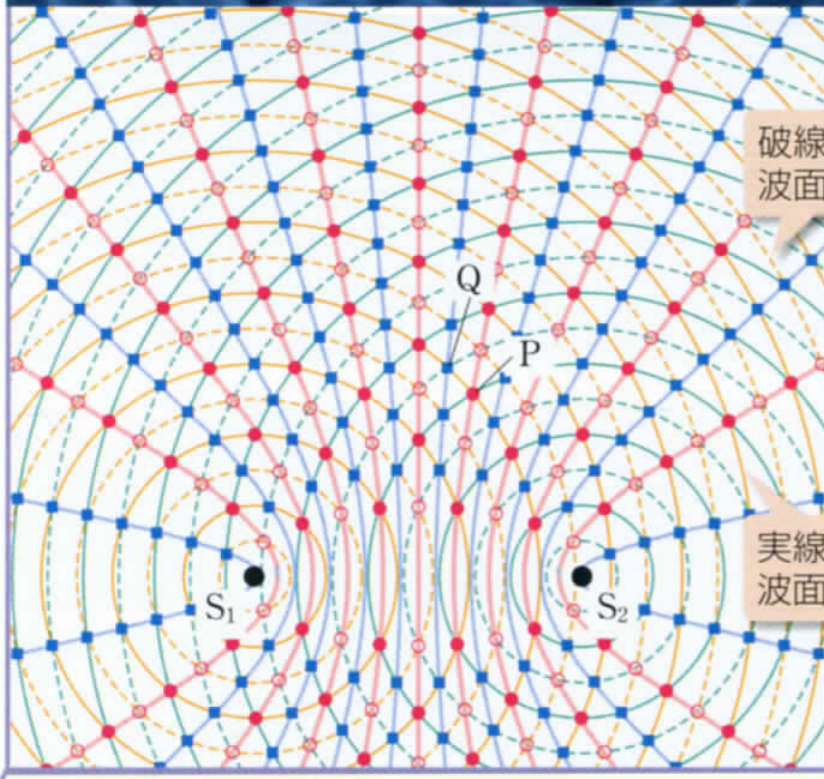
● 同位相で振動する 2 つの波源の場合



● 逆位相で振動する 2 つの波源の場合

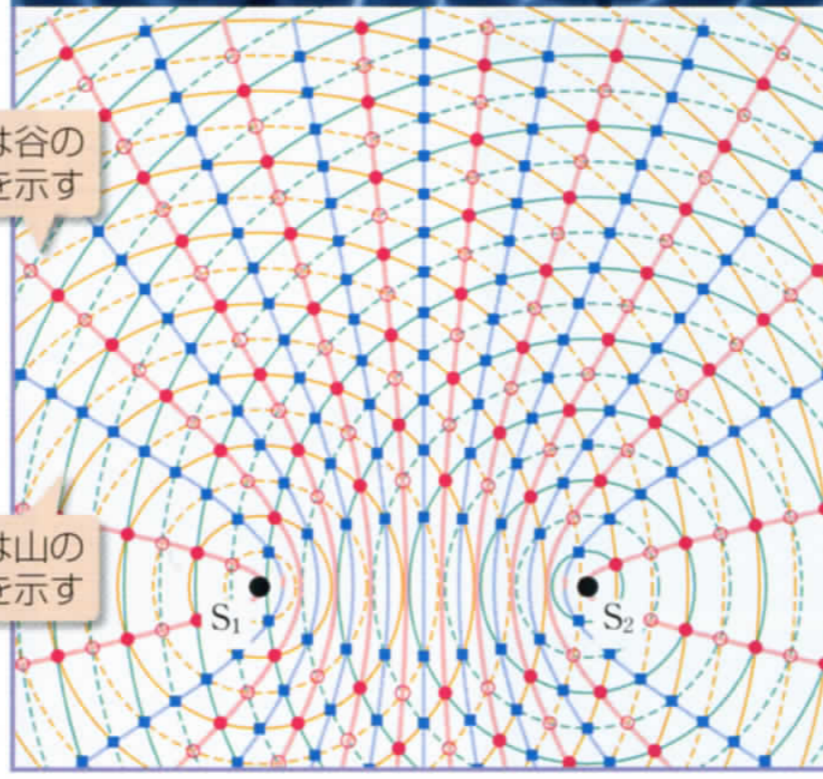


Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.



破線は谷の波面を示す

実線は山の波面を示す

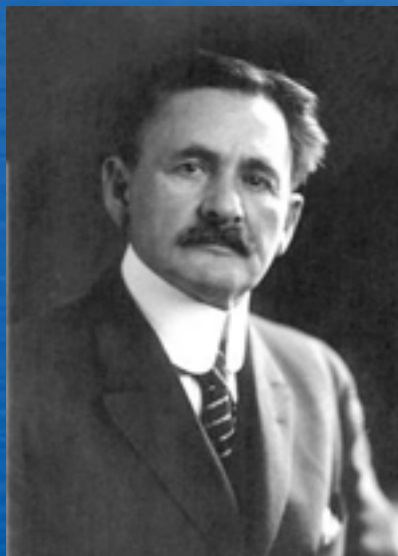
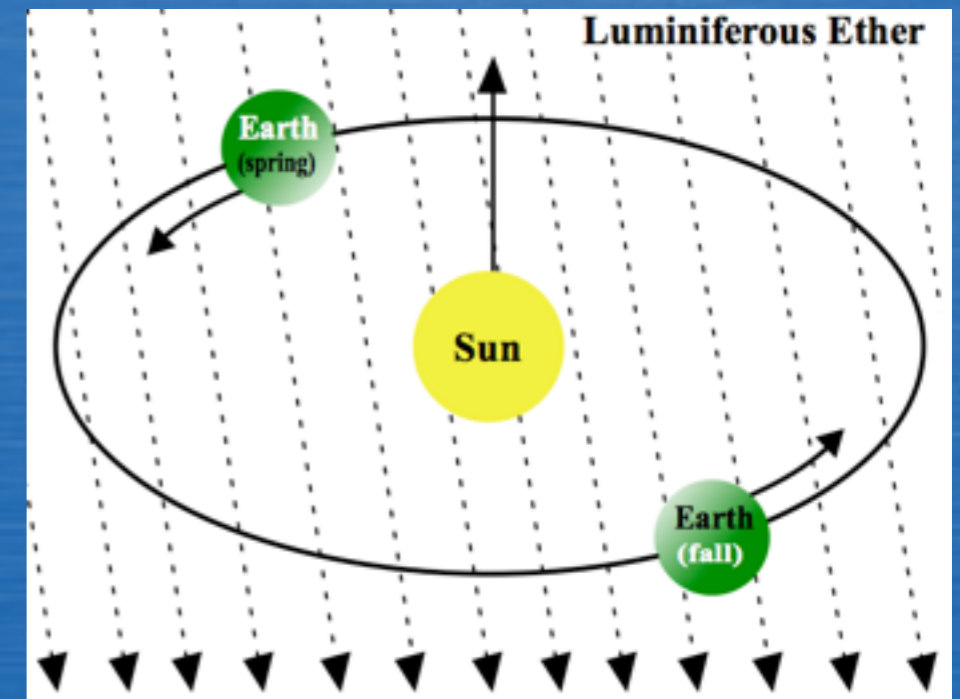
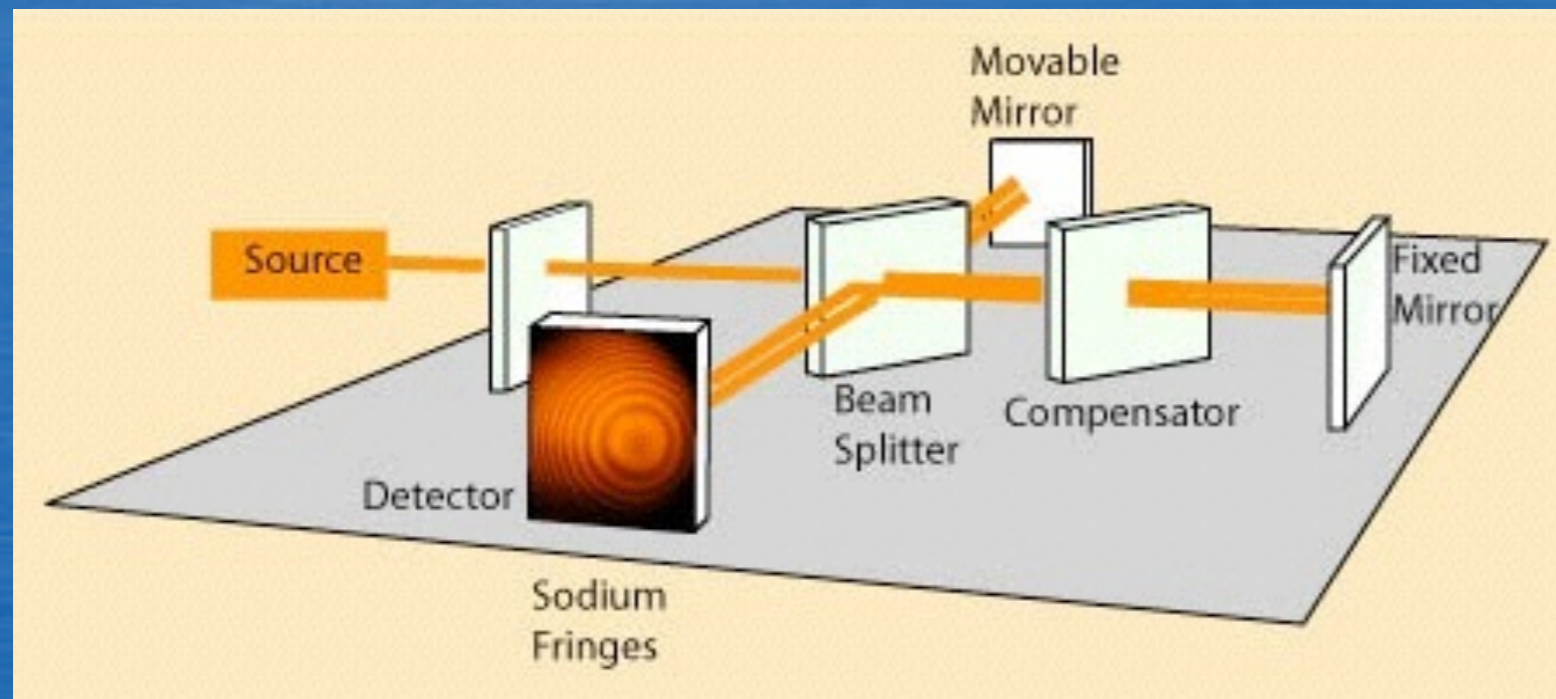


赤色で示した曲線(双曲線) ——— は強めあう点を連ねて得られる曲線で、●(山と山)や○(谷と谷)の状態が移動していく経路を表している。

青色で示した曲線(双曲線) ——— は、打ち消しあう点(■(山と谷))を連ねて得られる曲線であり、節線という。

マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

→エーテルの検出に「失敗」

特殊相対性理論 【概略】

- 電磁気学の方程式に、光速 c が登場した。
どの座標系で見たかを議論していないのに……

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{E} = 0, \quad \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{B} = 0, \quad \text{where } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

- ~~特別な慣性系~~の存在？ ~~光~~を伝える~~媒質~~の存在？



相対性原理

「すべての自然法則は、あらゆる慣性系で同じである」

光速不変の原理

「相互作用は有限の速度で伝わる。最大値が光速である」

光速はどの座標系から見ても一定である。

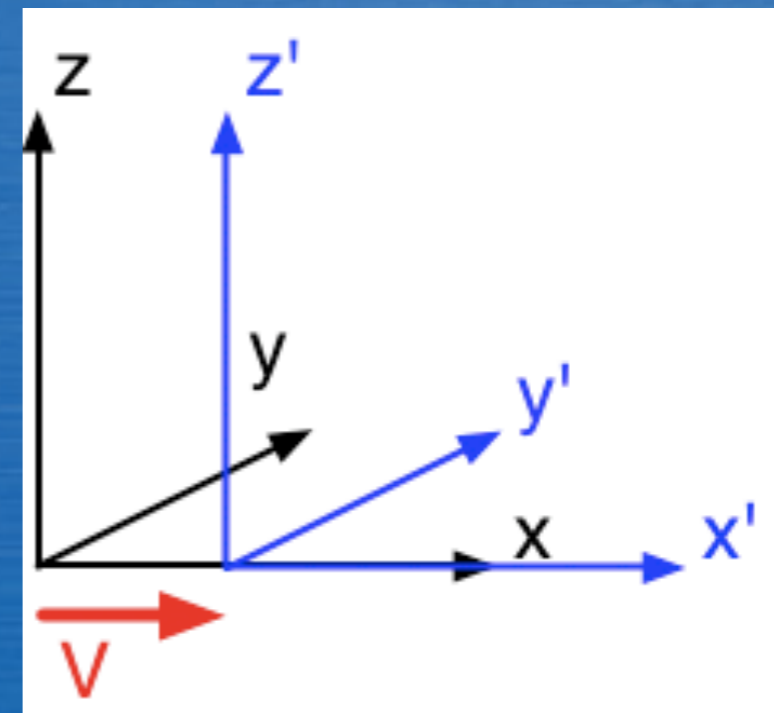
＝時間の進み方は、絶対的なものではない。

特殊相対性理論 【時間の相対性】

- 動いている座標と静止している座標との変換則（ローレンツ変換）

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma v/c^2 & 0 & 0 \\ -\gamma v & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

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



- 時間の進み方だけを考えて、

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

動いている人の時間の進み方は、静止している人よりも遅い。

特殊相対性理論 【速度の合成】

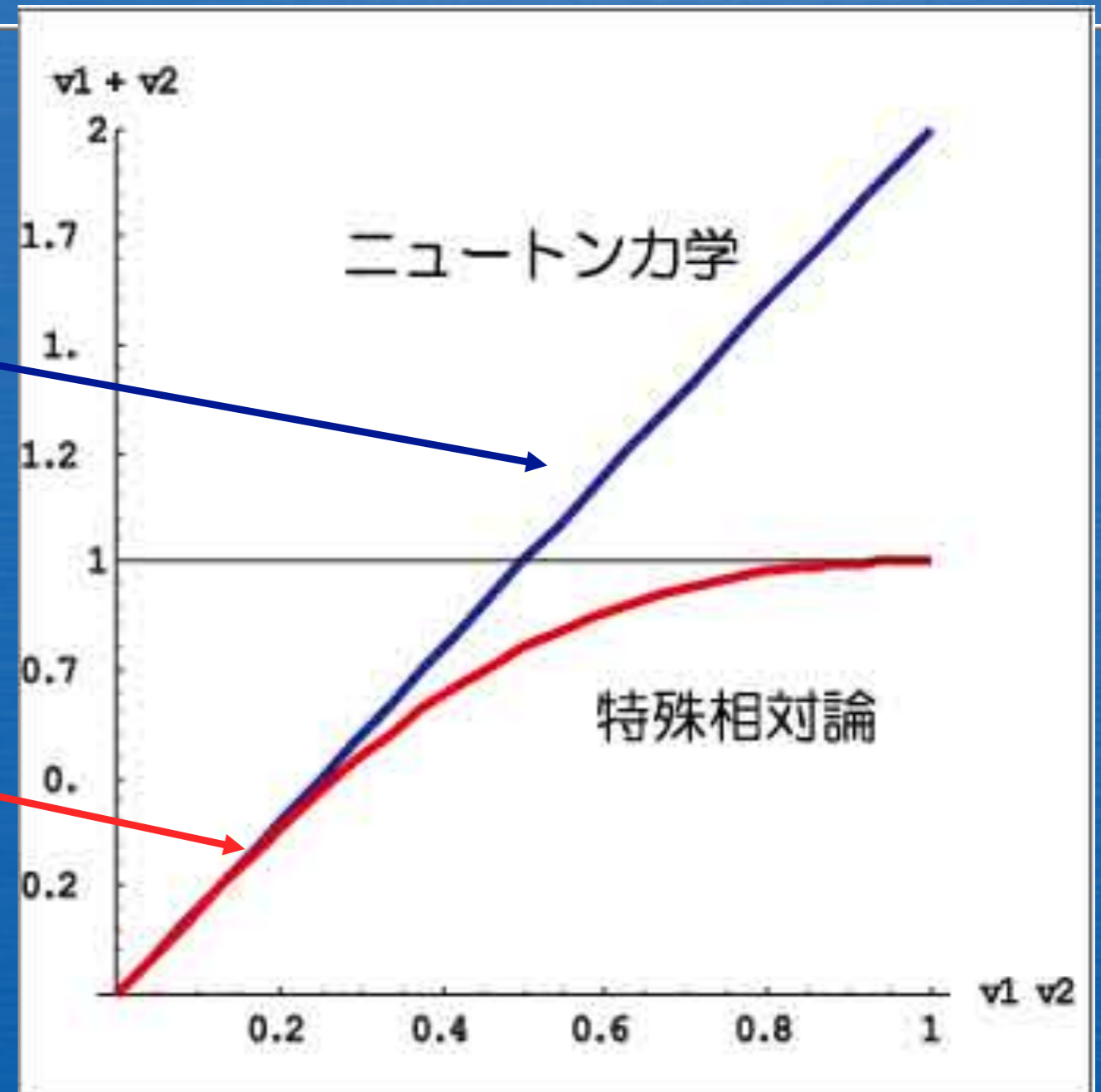
速度の足し算 (ニュートン力学)

$$V = V_1 + V_2$$

速度の足し算 (特殊相対性理論)

$$V = \frac{V_1 + V_2}{1 + (V_1 V_2 / c^2)}$$

光速 + 光速 = 光速



光速 + 光速 = 光速

特殊相対性理論では，速度の足し算は $v_1 + v_2$ ではなく，

$$\frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 v_2 / c^2)}$$

v_1	v_2	$v_1 + v_2$
光速の 0.1%	光速の 0.1%	光速の 0.19999998%
光速の 10%	光速の 10%	光速の 19.802%
光速の 90%	光速の 90%	光速の 99.448%
光速	光速	光速

不思議の国のトムキンス

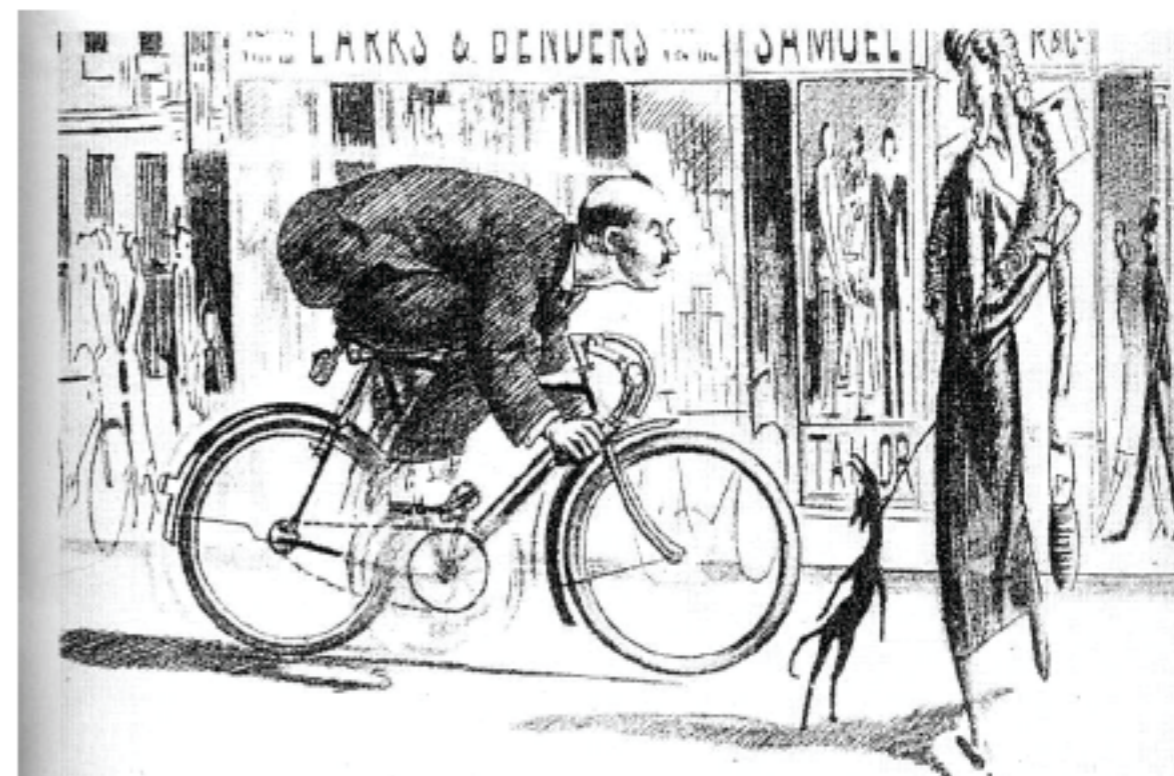
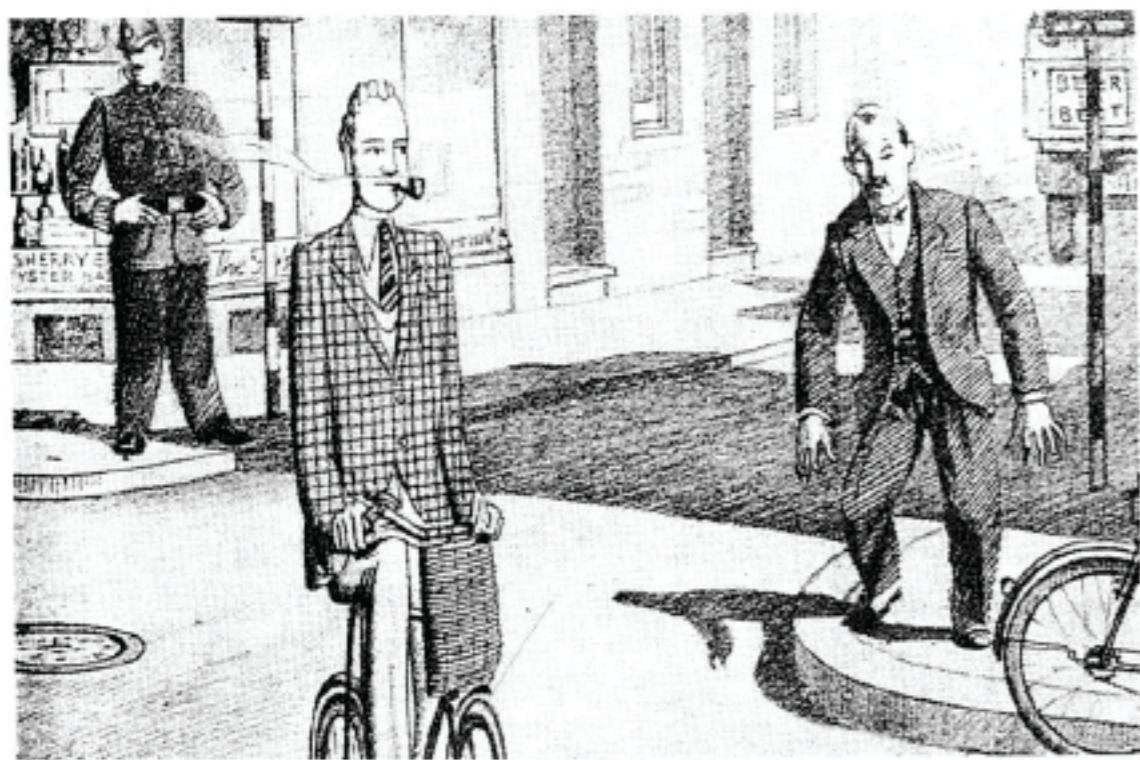


図4 ガモフ著『不思議の国のトムキンス』の挿絵。最高速度が時速 30 km/s の世界では、自転車で移動する人からみると世界が歪んで見え、止まっている人から自転車の人を見ると平たく見える。

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来

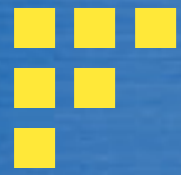
準光速ロケットからの眺め (1) 光のドップラー効果



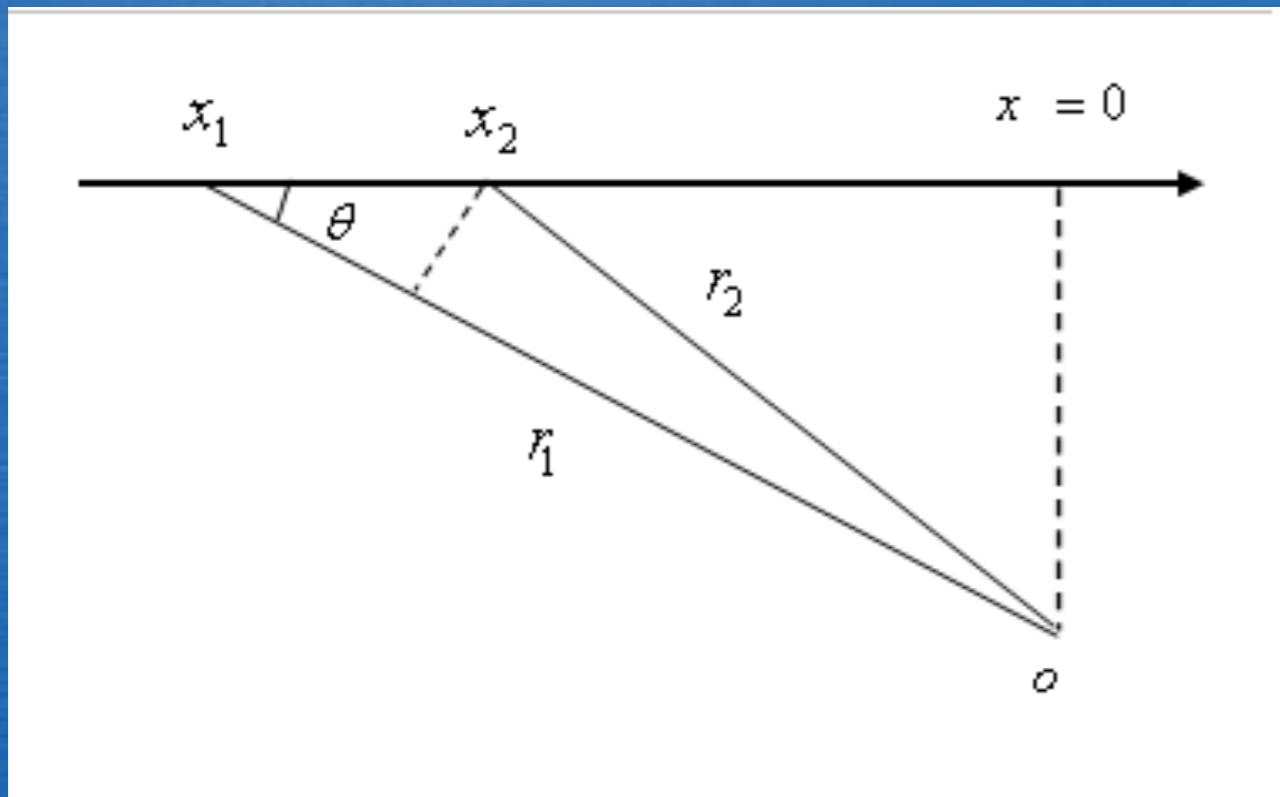
$$f_N = \frac{c + v_{source}}{c - v_{obs}} f_{source}$$

$$f_{SR} = \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right)^{1/2} f_{source}, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来



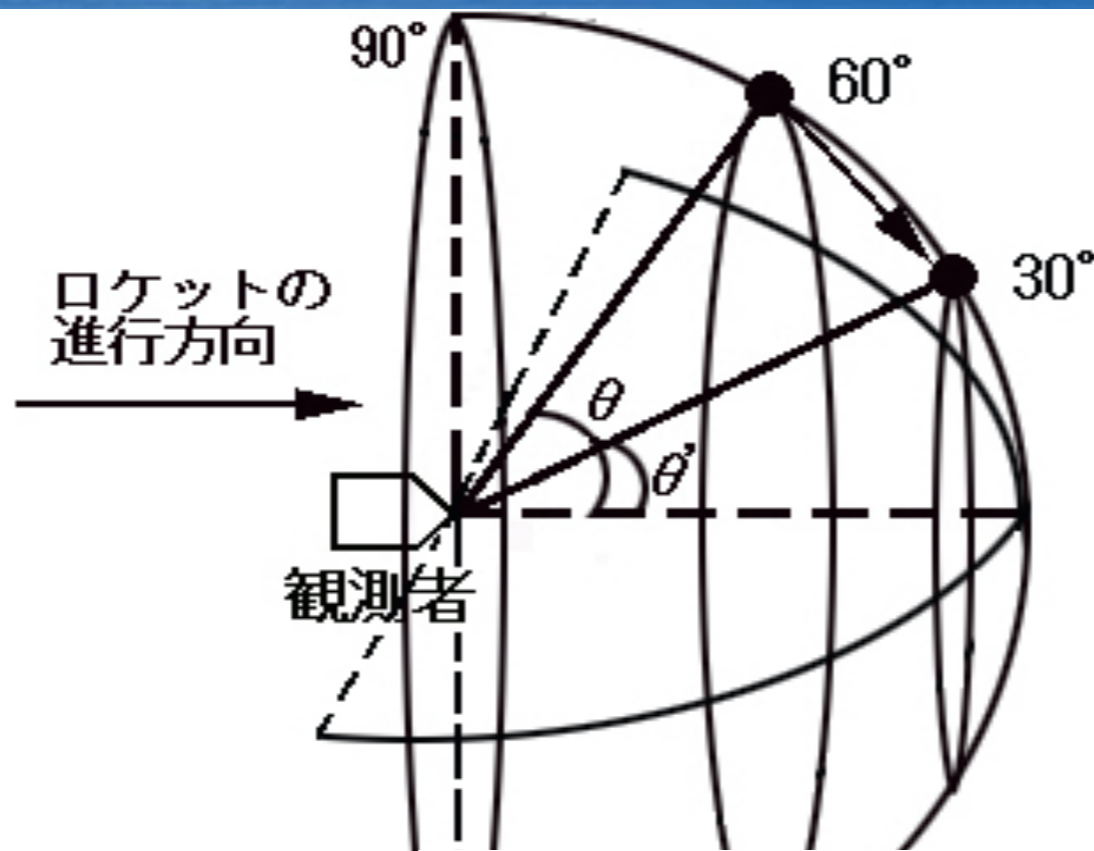
準光速ロケットからの眺め (2) 光の横ドップラー効果



$$f_{SR} = \frac{(1 - \beta^2)^{1/2}}{1 - \beta \cos \theta} f_{source}, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来

準光速ロケットからの眺め (3) 光行差現象



$$\tan \theta' = \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\cos \theta + \beta} \sin \theta, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

準光速ロケットから見える世界(1)

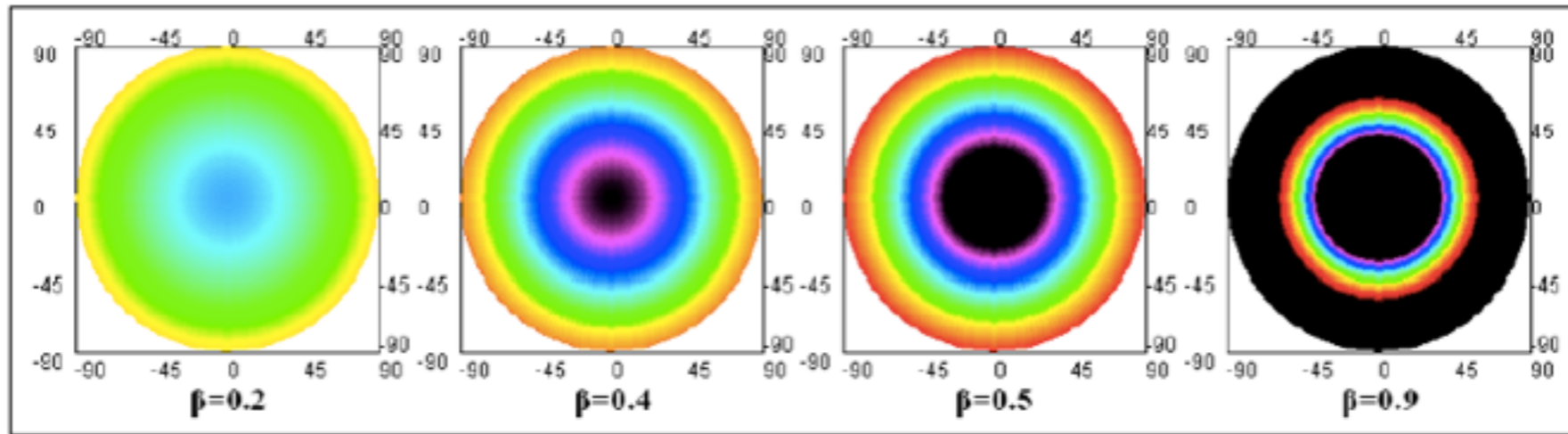


図 13: ドップラー効果のみを考えた前方の景色

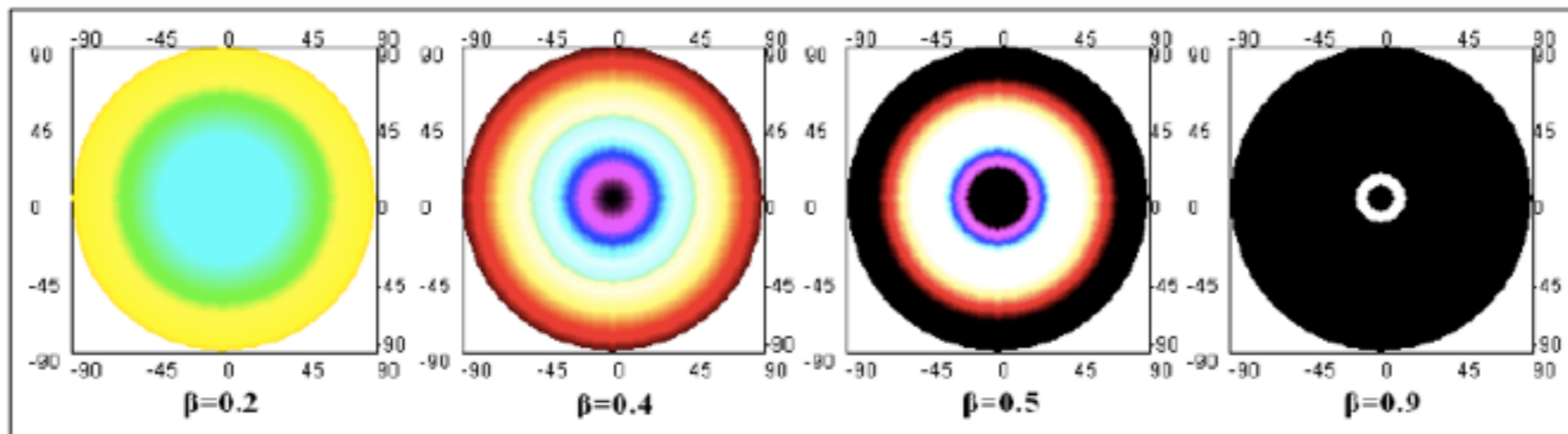
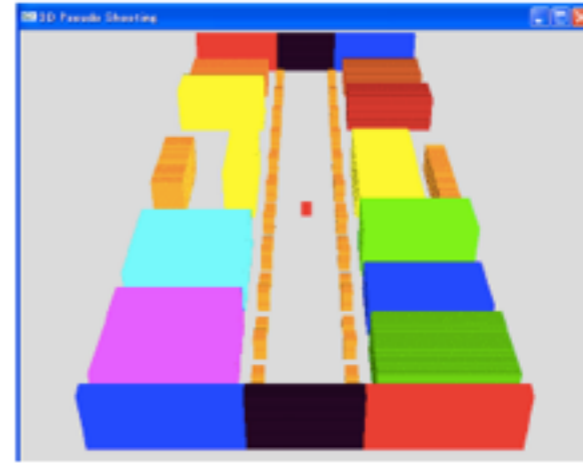


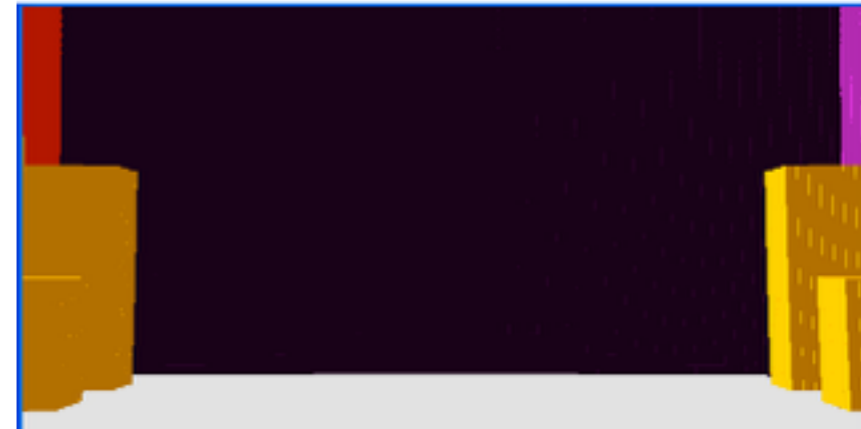
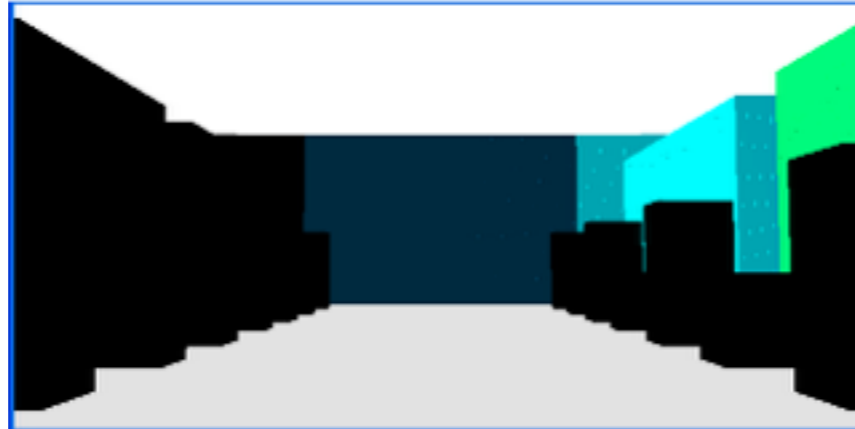
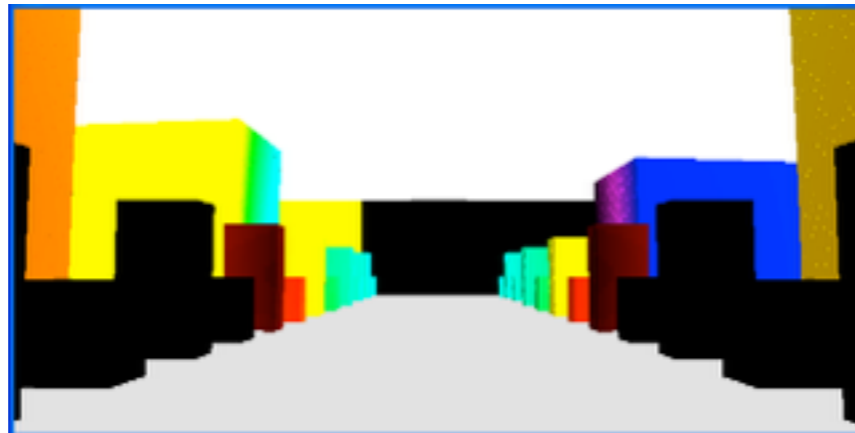
図 14: 図 13 に光行差及び明るさ変化を取り入れた前方の景色

準光速ロケットから見える世界(2)

$v=0$



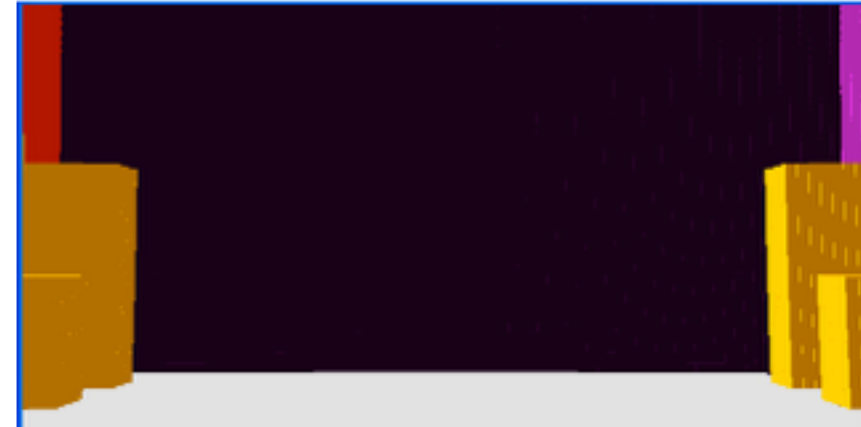
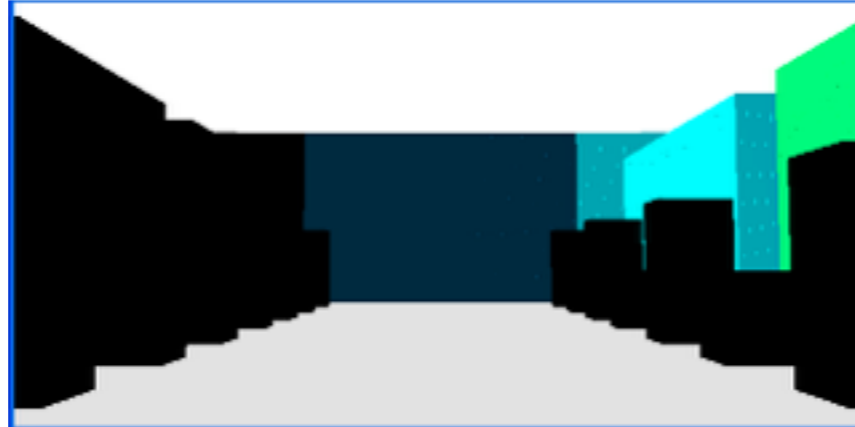
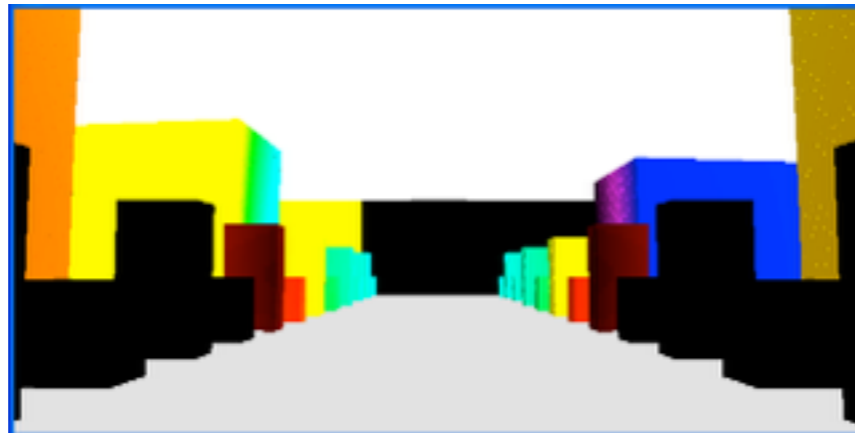
$v=0.8c$



準光速ロケットから見える世界(3)

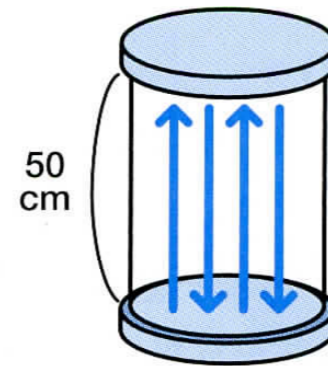


$v=0.8c$



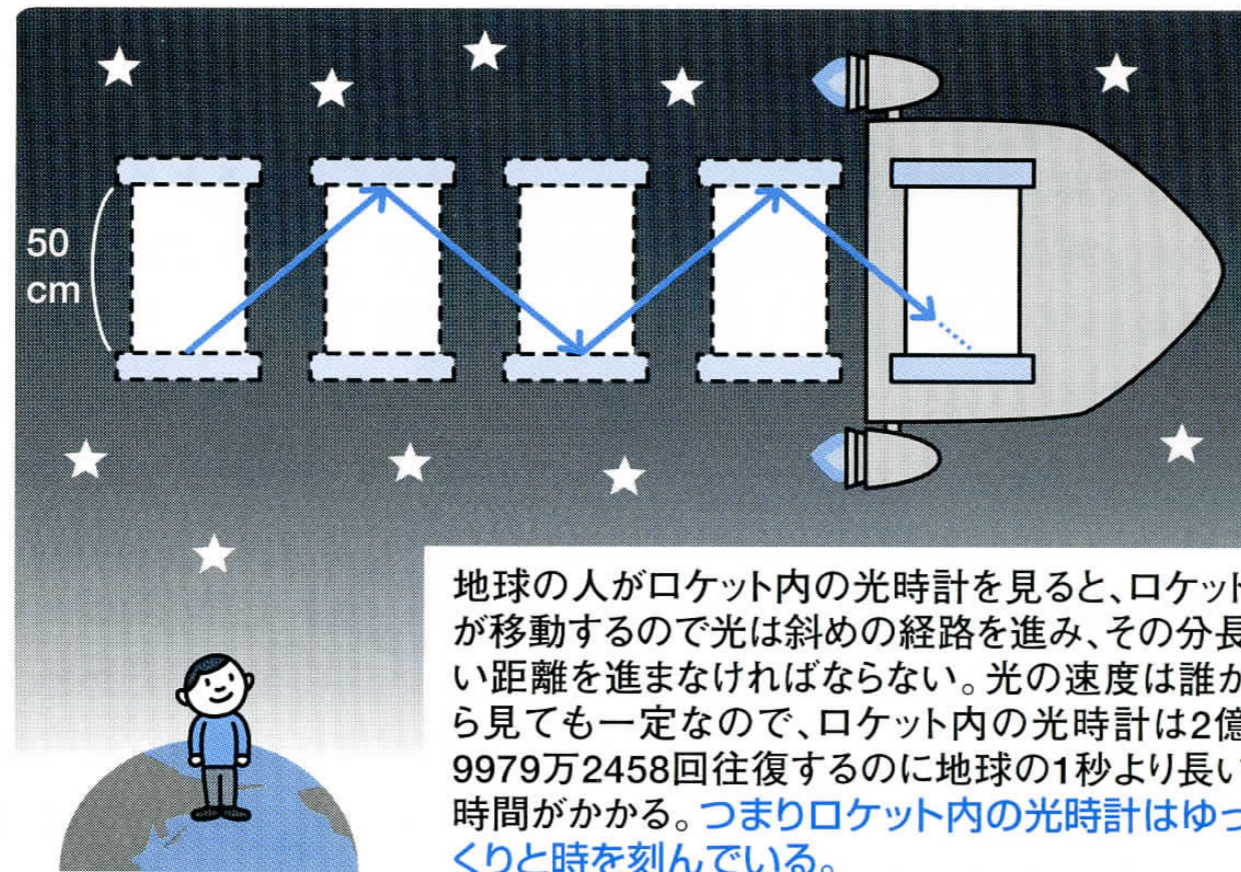
時間の進み方は相対的

光時計の 思考実験



光時計

光が2億9979万2458回往復すると「1秒」を刻む時計



地球の人がロケット内の光時計を見ると、ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み、その分長い距離を進まなければならない。光の速度は誰から見ても一定なので、ロケット内の光時計は2億9979万2458回往復するのに地球の1秒より長い時間がかかる。つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる。

動いている人の時間の進み方は、静止している人よりも遅い

特殊相対性理論 【ウラシマ効果】

- 動いている人の時間の進み方は、静止している人よりも遅い。

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

- 「水の江の浦の島子を詠める一首」（万葉集 巻九 1740-41）
……家ゆ出でて 三歳の中に 垣もなく 家滅せめやと……

3年間竜宮城にいる間に、300年も経っていた。

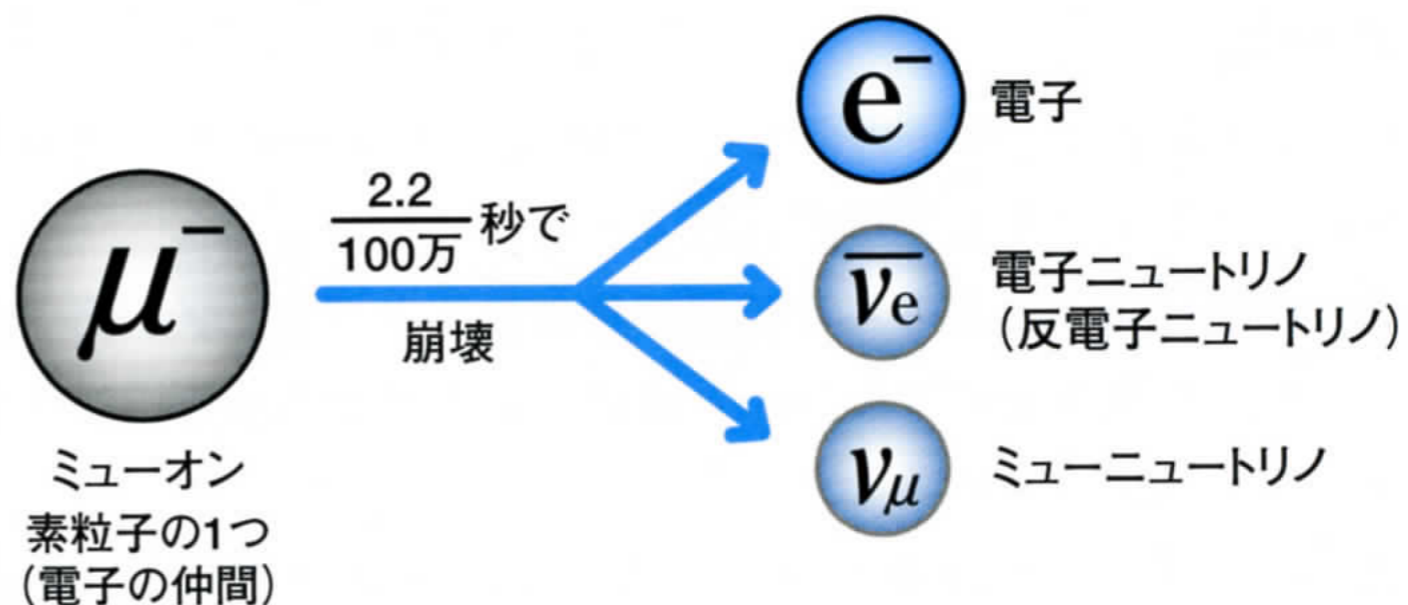
$$300 \text{ year} = \int_0^{3 \text{ year}} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt \implies v = 0.9999499c$$

竜宮城は光速の99.995%で動いていた。

未来へ行くタイムマシンは実現可能！

2. 特殊相対性理論：光速に近いときの力学

素粒子の寿命は確かに延びている！



宇宙線が大気と衝突すると
ミューオンができる。

ミューオンは100万分の
2.2秒で崩壊するので
600mほどしか進めない
はずだが……

しかし光速度近くで飛行す
るミューオンは寿命が50倍
程度に伸びるので、20km
ある大気圏を通り抜けて地
表まで到達できる。

光円錐と因果律

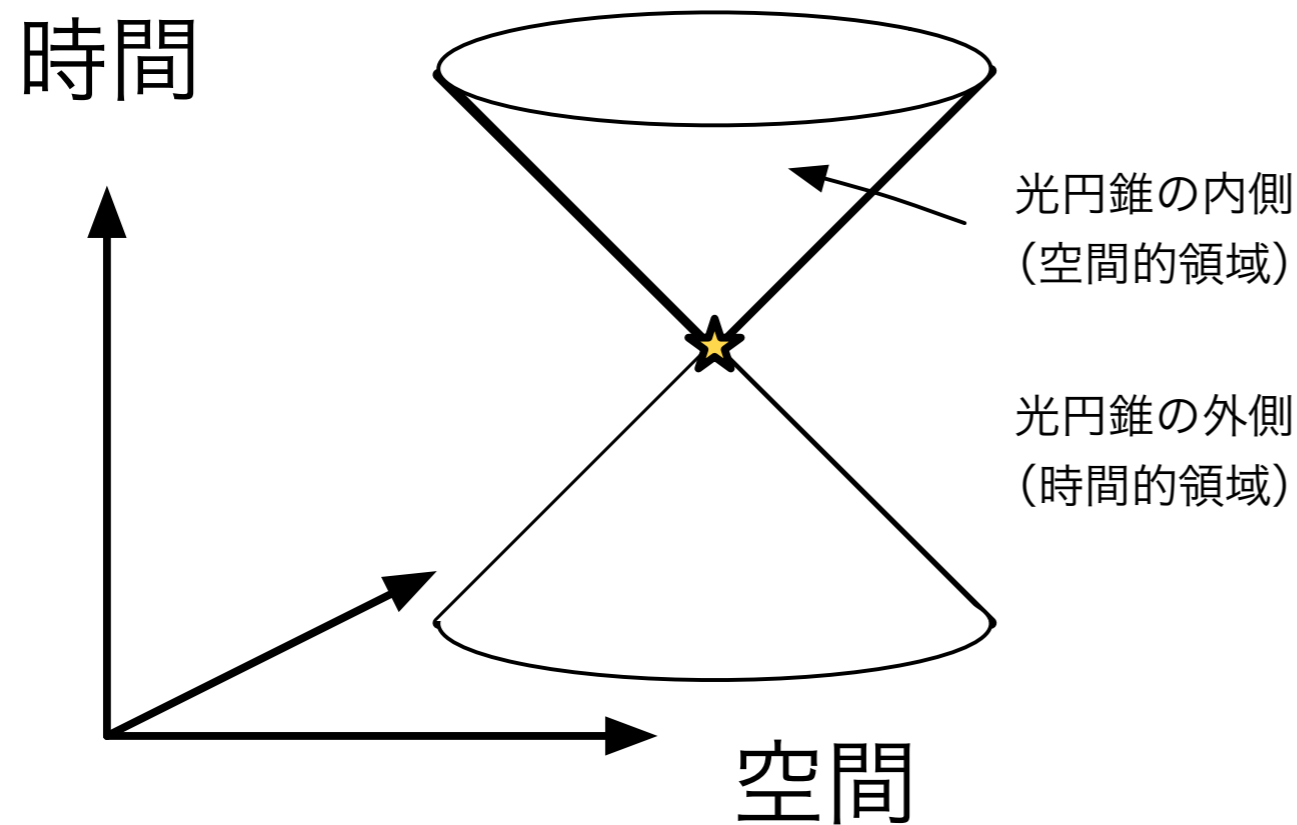


図 3.8 (左) 4次元時空は図にすることが難しいので、空間を2次元、時間を1次元にして図を描く。時間軸が縦である。光の伝わる経路はある点から円錐状に広がる。この円錐内であれば、情報が伝達可能な領域（因果関係があり得る空間的領域）、円錐より外側は情報伝達があり得ない領域（時間的領域）である。図を過去に向かって見れば、ある1点に過去からの情報がどこまで影響しているかも同様にわかる。(右) 世界物理年(2005年)のロゴは、ミンコフスキー時空の光円錐の図だった。

いよいよ

一般相対性理論 General Relativity

一般相対性理論は、重力の理論。
重い天体は、時空を曲げる。

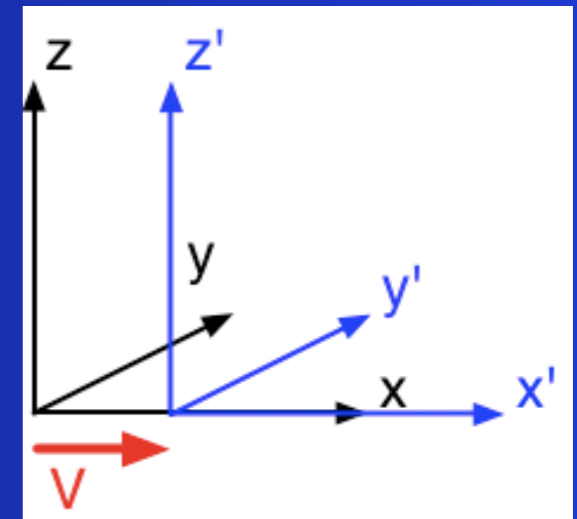
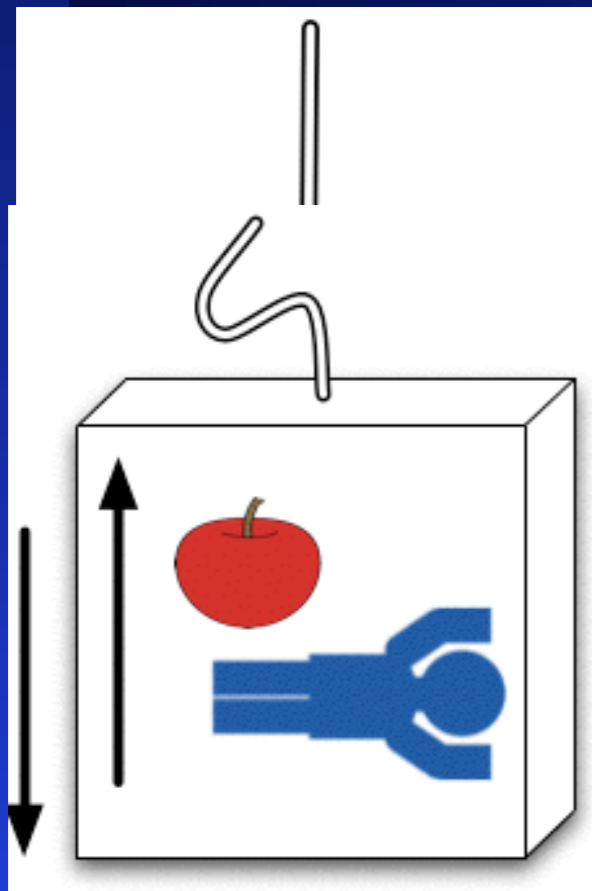
一般相対性理論【等価原理】

★ 特殊相対性理論は、加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった。

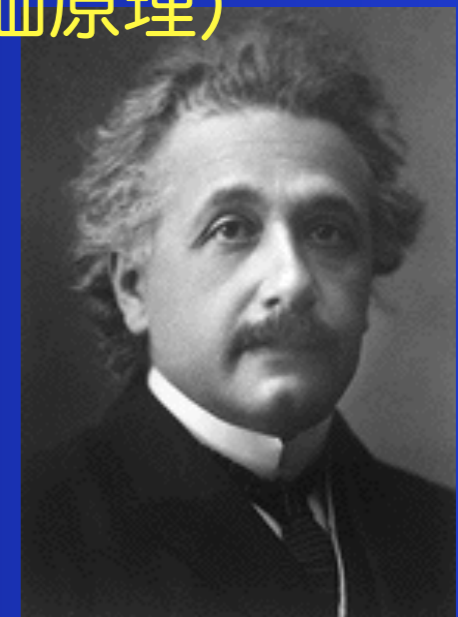
★ 加速度とは何か？

エレベータの思考実験

「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺されてしまう」
= 加速度は局所的に消去可能（等価原理）

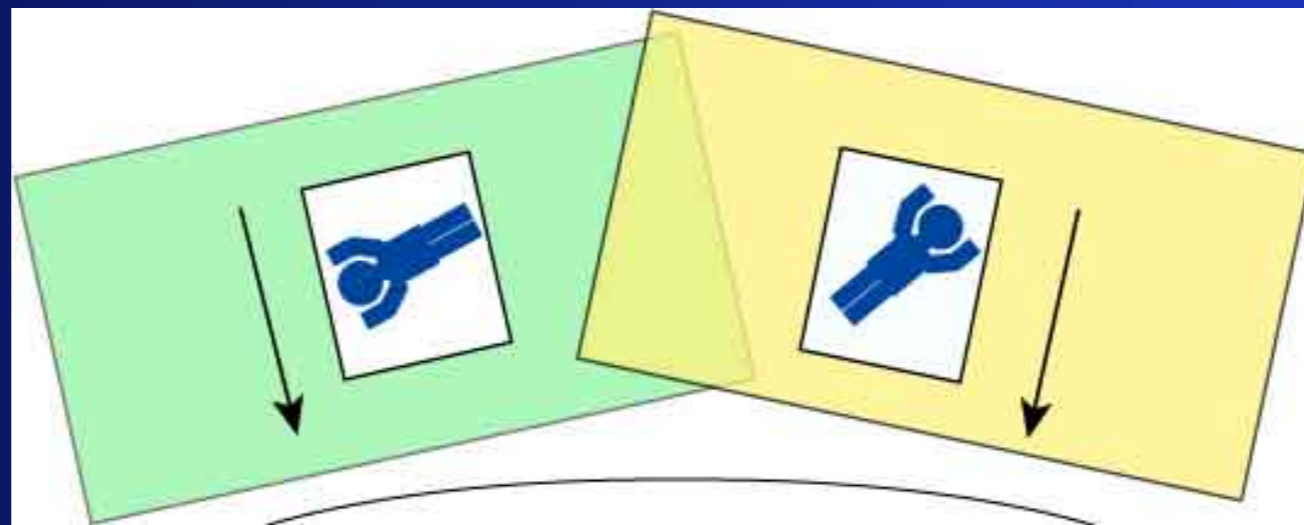


「生涯で最もすばらしいアイデア」



一般相対性理論【重力の正体】

「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺する」
= 加速度は局所的に消去可能（等価原理）



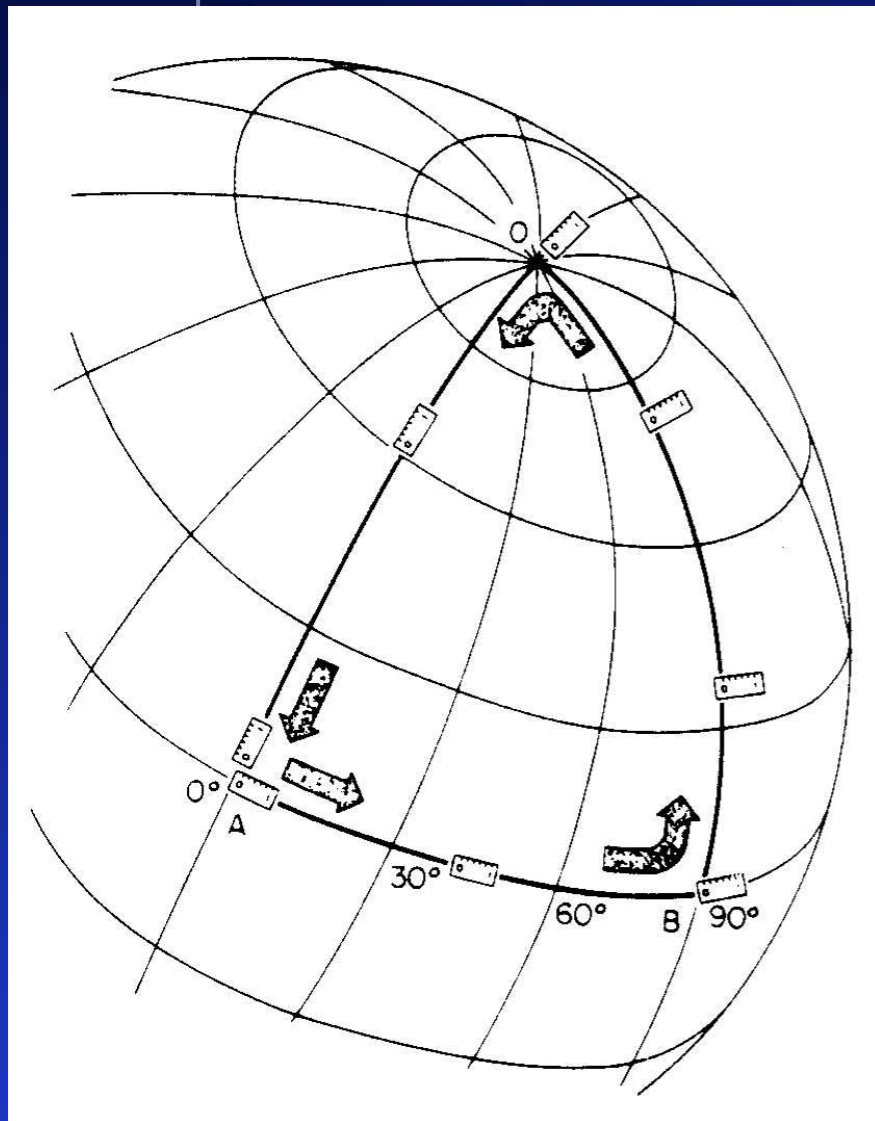
= 重力は、大局的には消去できない。
= 重力の正体は、時空のもつ曲がり具合である。

曲がった時空の幾何学 = 「一般相対性理論」

一般相対性理論【計量 metric】

曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.



$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ sym. & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

平らな時空(flat spacetime)では,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \end{aligned}$$

一般相対性理論【計量 metric】

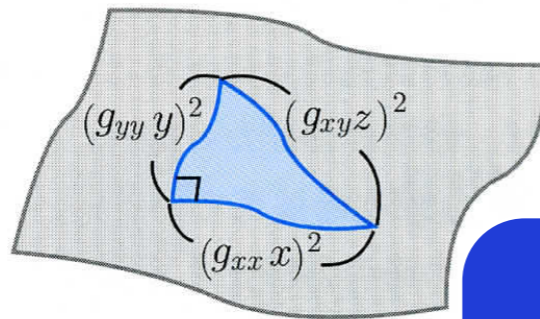
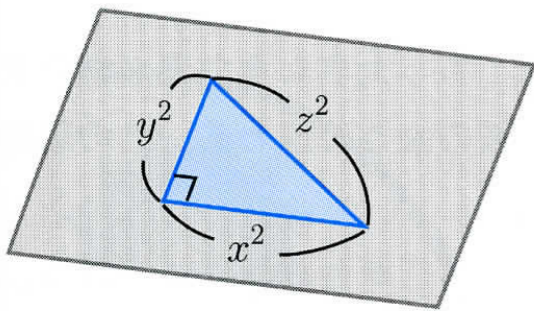
曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.

時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

$$(g_{xx}x)^2 + (g_{yy}y)^2 - (g_{xyz})^2$$

このように、曲がり具合は関数 $g_{\mu\nu}$ に押し付けて表すことができる。アインシュタイン方程式は、3次元空間+時間の4次元の曲がり $g_{\mu\nu}$ を解く方程式である。

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$\begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

物理学者は、リーマン幾何学に深入りしないほうがいいよ。

(time)では,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \end{aligned}$$



Marcel Grossmann

一般相対性理論【Einstein方程式】

重力場の方程式 (1916)

空間の曲がりかモノの運動を決める \Leftrightarrow モノがあると空間が曲がる

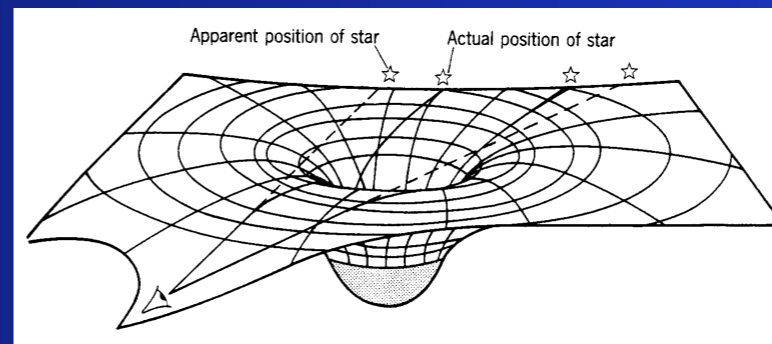
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

アインシュタイン曲率テンソル
<空間の歪み>

$$\begin{aligned}\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} &\equiv \frac{1}{2}g^{\alpha\beta}(\partial_{\nu}g_{\beta\mu} + \partial_{\mu}g_{\beta\nu} - \partial_{\beta}g_{\mu\nu}) \\ R^{\mu}_{\nu\alpha\beta} &\equiv \partial_{\alpha}\Gamma_{\nu\beta}^{\mu} - \partial_{\beta}\Gamma_{\nu\alpha}^{\mu} + \Gamma_{\sigma\alpha}^{\mu}\Gamma_{\nu\beta}^{\sigma} - \Gamma_{\sigma\beta}^{\mu}\Gamma_{\nu\alpha}^{\sigma} \\ R_{ab} &\equiv R^{\mu}_{a\mu b} \equiv \partial_{\mu}\Gamma_{ab}^{\mu} - \partial_b\Gamma_{a\mu}^{\mu} + \Gamma_{\nu\mu}^{\mu}\Gamma_{ab}^{\nu} - \Gamma_{\nu b}^{\mu}\Gamma_{a\mu}^{\nu} \\ R &= g^{ab}R_{ab}\end{aligned}$$

エネルギー運動量テンソル
<モノの分布>

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu}$$



一般相対性理論の予言【水星の軌道】

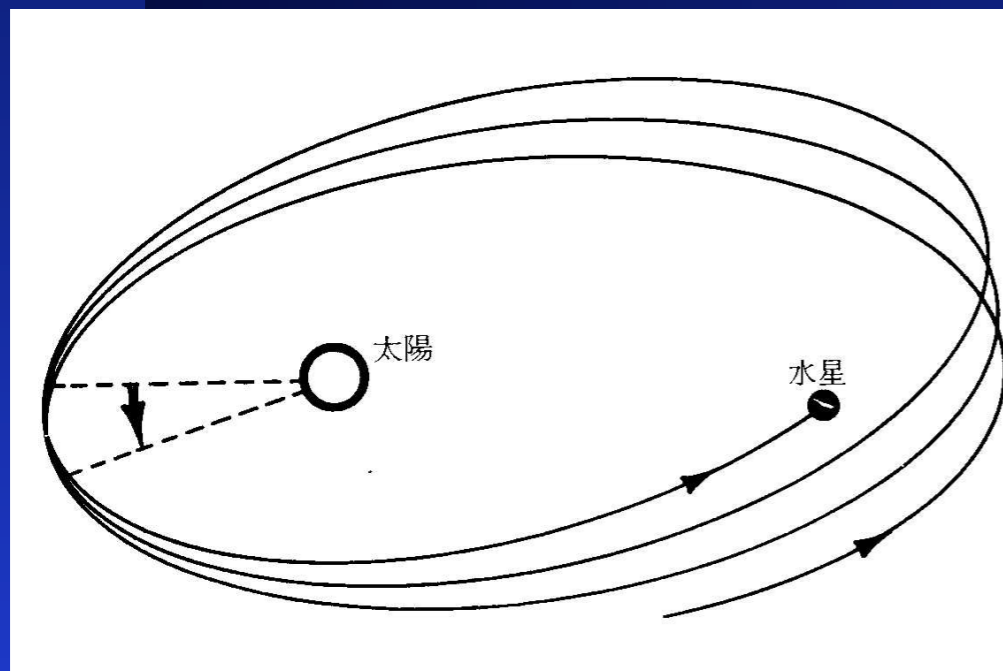
近日点移動

水星の近日点移動の問題（ルベリエ，1854）

100年で574秒ずれる。2250世紀で完全な「ばら模様」。

→→金星の影響で277秒，木星で153秒，地球で90秒，
その他の惑星で10秒分の説明が可能。

残りの43秒は？？？



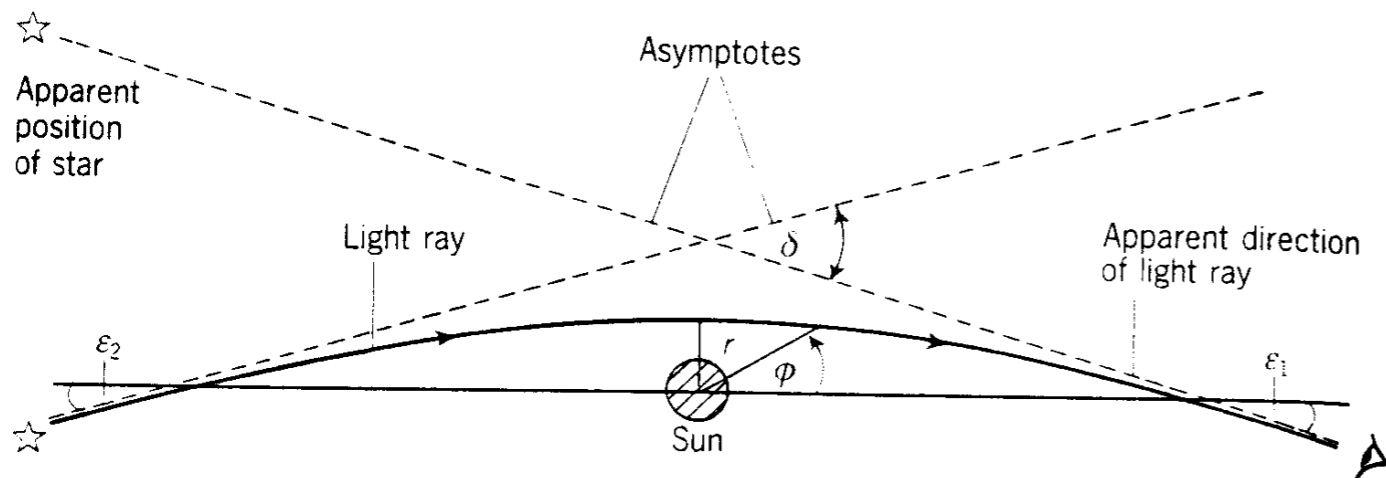
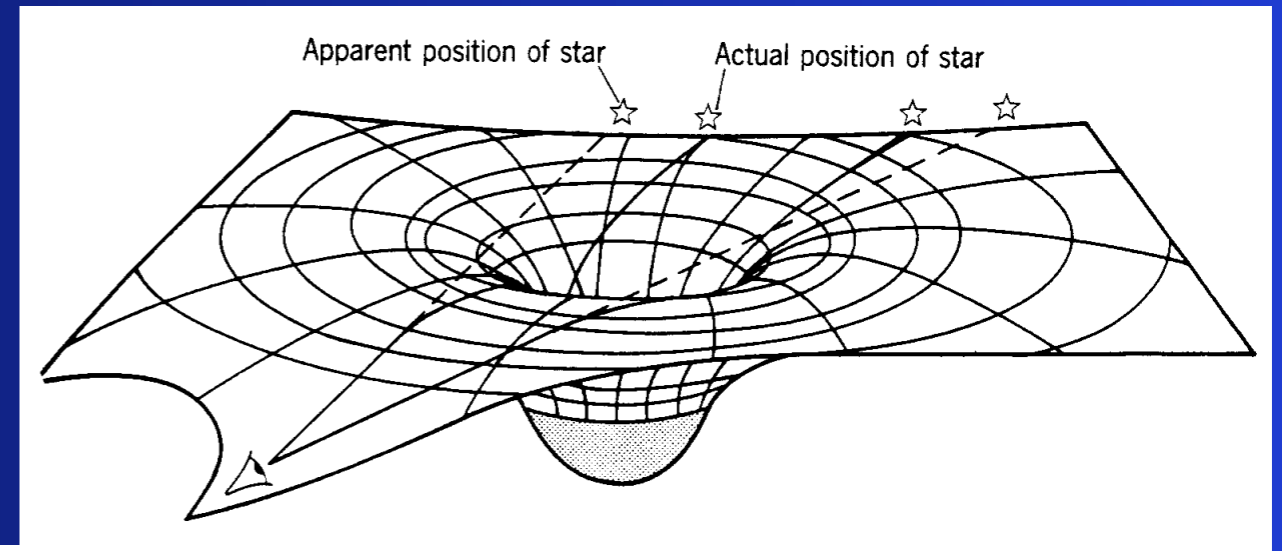
1915年，アインシュタインが，できたばかりの一般相対性理論を適用すると，「43秒の歳差運動」が出てきた。

「2-3日間，興奮のため，我を忘れてしまった」

一般相対性理論は正しい

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

光は時空を直進するが、重い天体の周りでは、時空の歪みにより、曲がって進むことになる。



1919年、エディントンが、皆既日食を利用して、光の曲がりを確認（0.875秒角）

一般相対性理論は正しい

Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.

Coverage in the (more excitable) New York Times.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

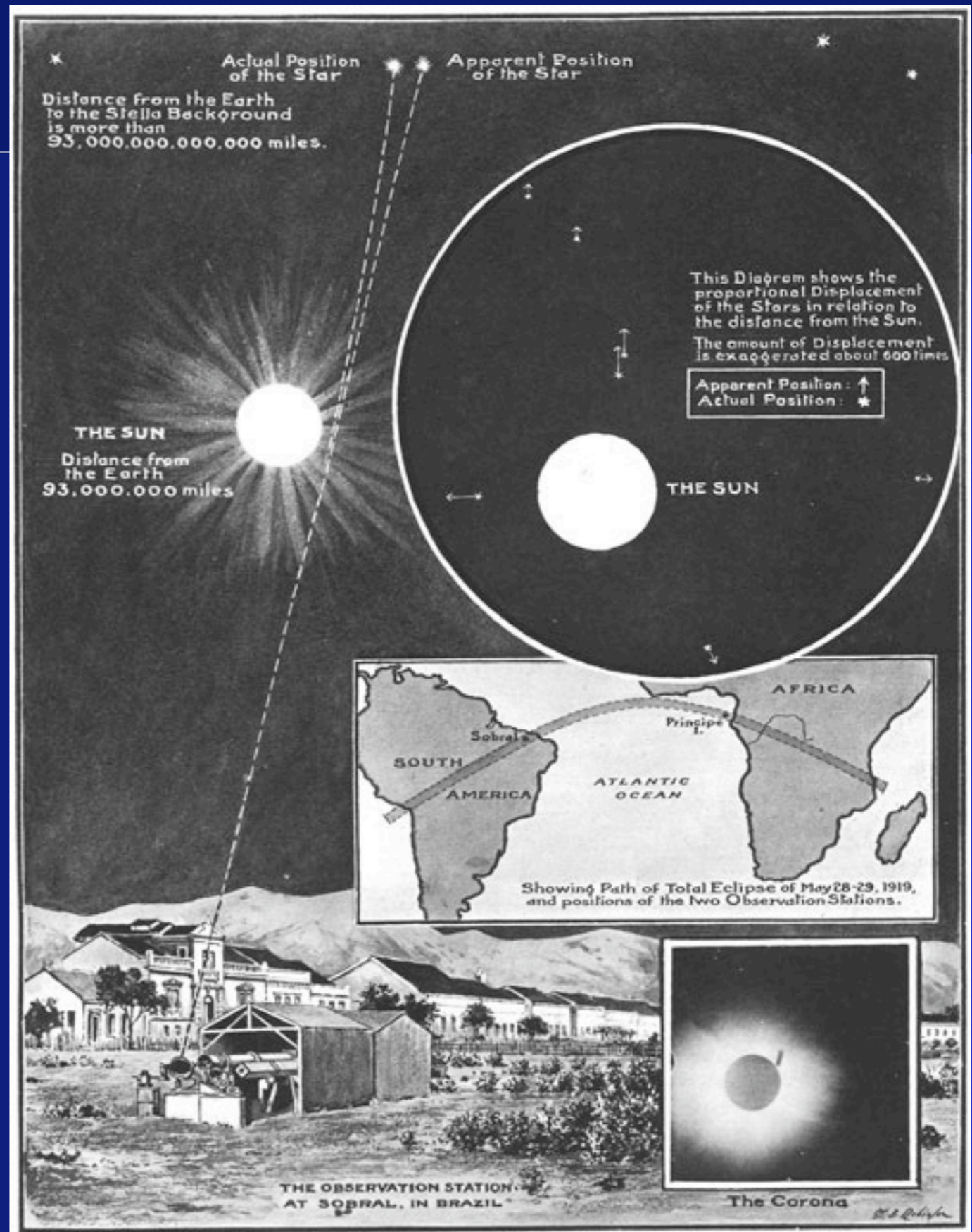
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.



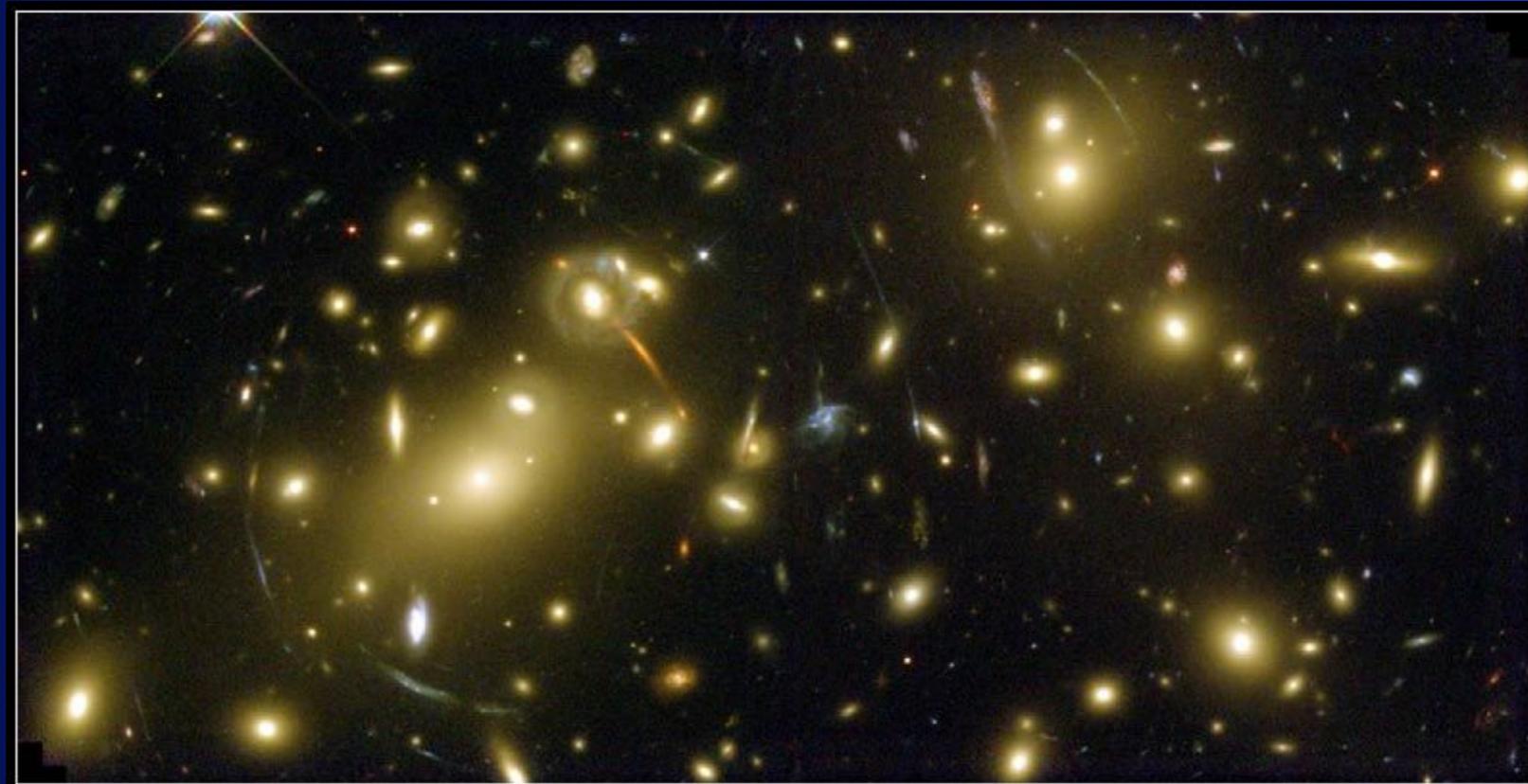


Arthur Stanley Eddington
(1882–1944)

He was an early advocate of Einstein's General Relativity, and an interesting anecdote well illustrates his humour and personal intellectual investment: Ludwig Silberstein, a physicist who thought of himself as an expert on relativity, approached Eddington at the Royal Society's (6 November) 1919 meeting where he had defended Einstein's Relativity with his Brazil-Principe Solar Eclipse calculations with some degree of scepticism and ruefully charged Arthur as one who claimed to be one of three men who actually understood the theory (Silberstein, of course, was including himself and Einstein as the other two). When Eddington refrained from replying, he insisted Arthur not be "so shy", whereupon Eddington replied, **"Oh, no! I was wondering who the third one might be!"**

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

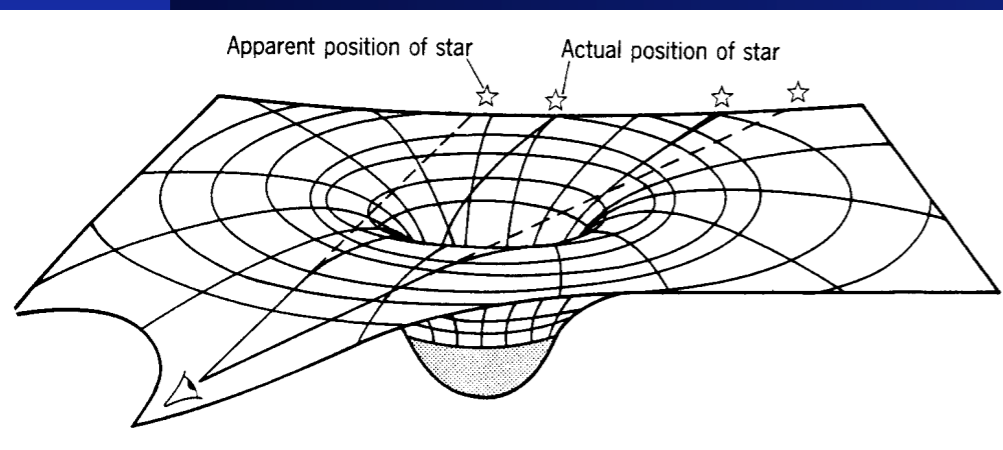
重力レンズ



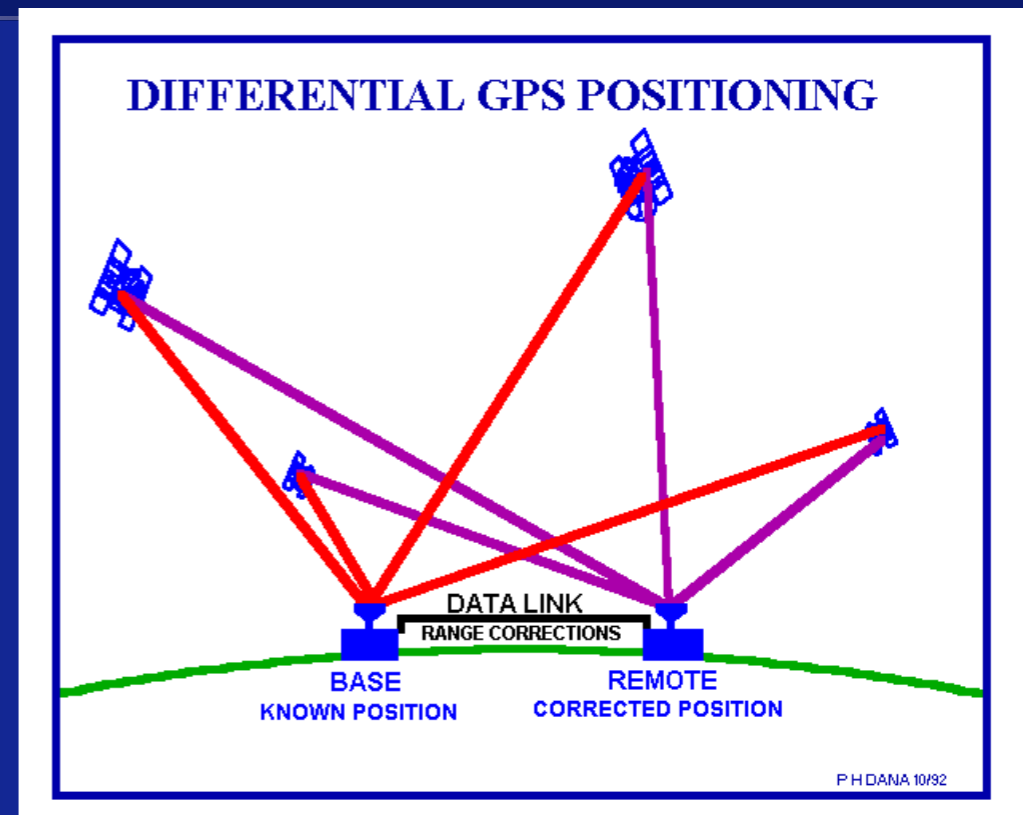
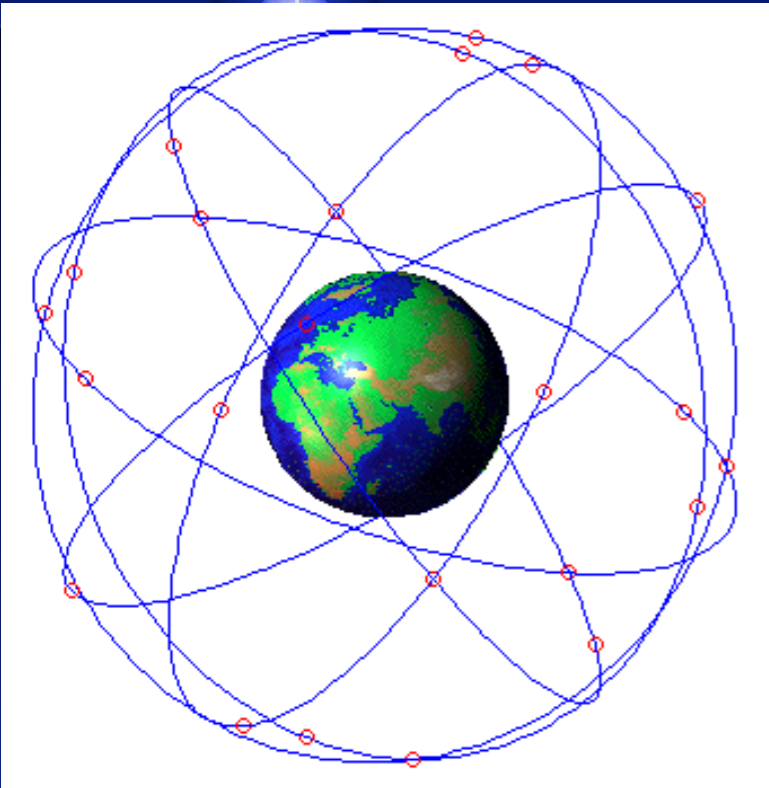
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



一般相対性理論の予言【GPS】



正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で、

3角測量→精度±15m

高速飛行の**特殊相対論効果**と

地球重力の**一般相対論効果**

⇒1日につき、 38×10^{-6} 秒ずつ衛星の

時計を遅らせる必要あり



一般相対性理論は正しい

相対性理論の描く世界

特殊相対性理論

時間の遅れ, $E=mc^2$, GPS

一般相対性理論

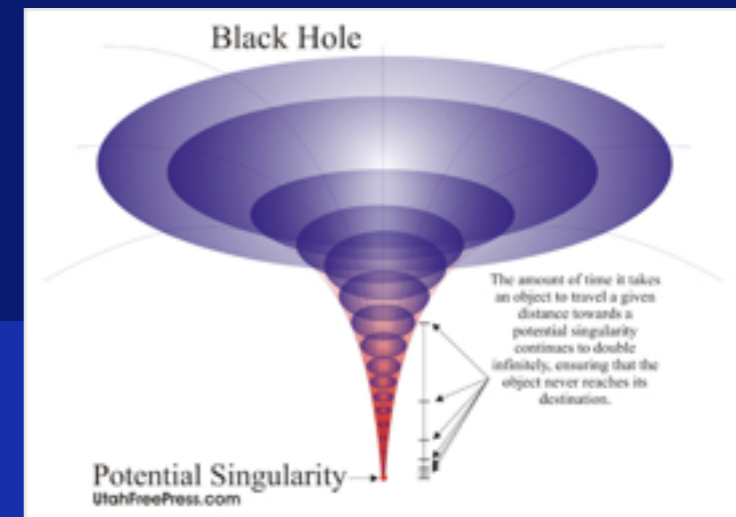
空間の歪み, 重力レンズ

ブラックホール, ワームホール, 重力波

GPS

膨張宇宙, 高次元宇宙

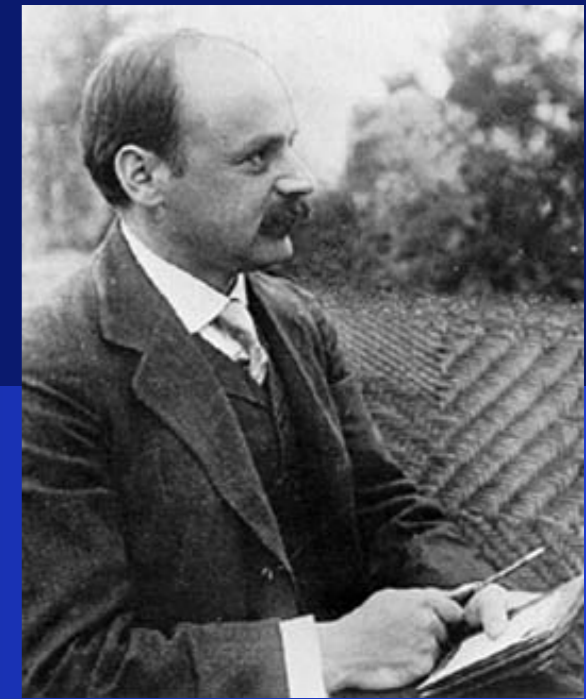
ブラックホール Black-hole



まず、方程式を解いたのは、シュバルツシルドだった。

アインシュタインは信じなかったが、
この答えは、ブラックホールを意味していた。

アインシュタイン方程式の解 【シュワルツシルド解】



Schwarzschild (1916)
球対称, 真空での方程式の厳密解

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

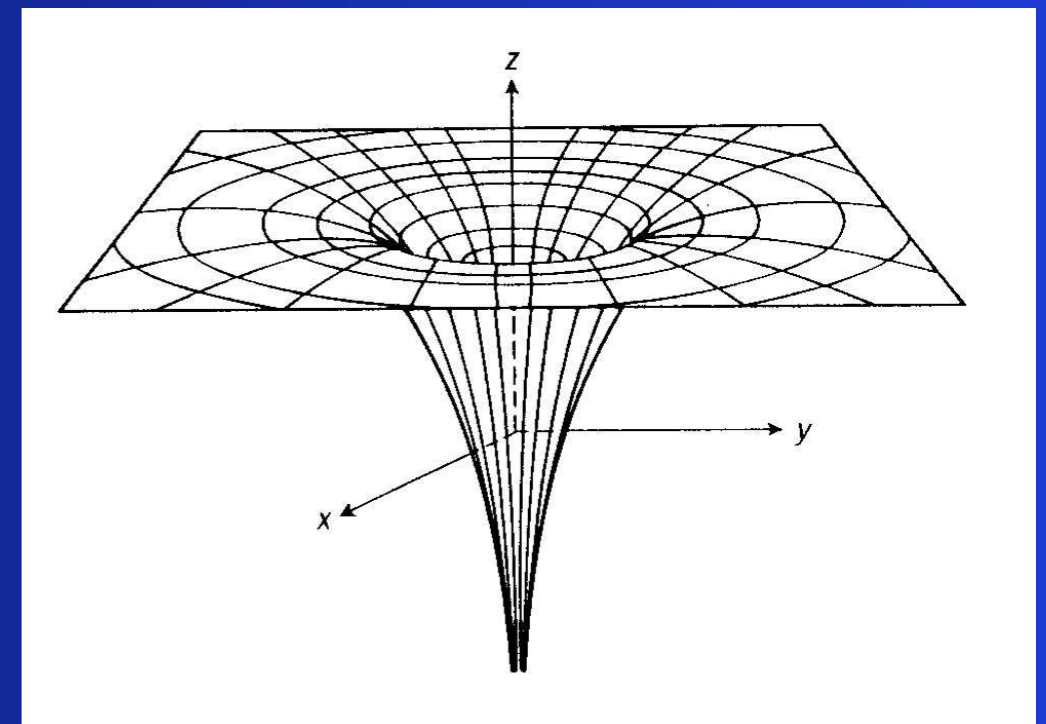
困ったことに, ……

$r=0$ で特異点

⇒ 今でも困ってる

$r=2GM/c^2$ でも特異点

⇒ ブラックホールの境界

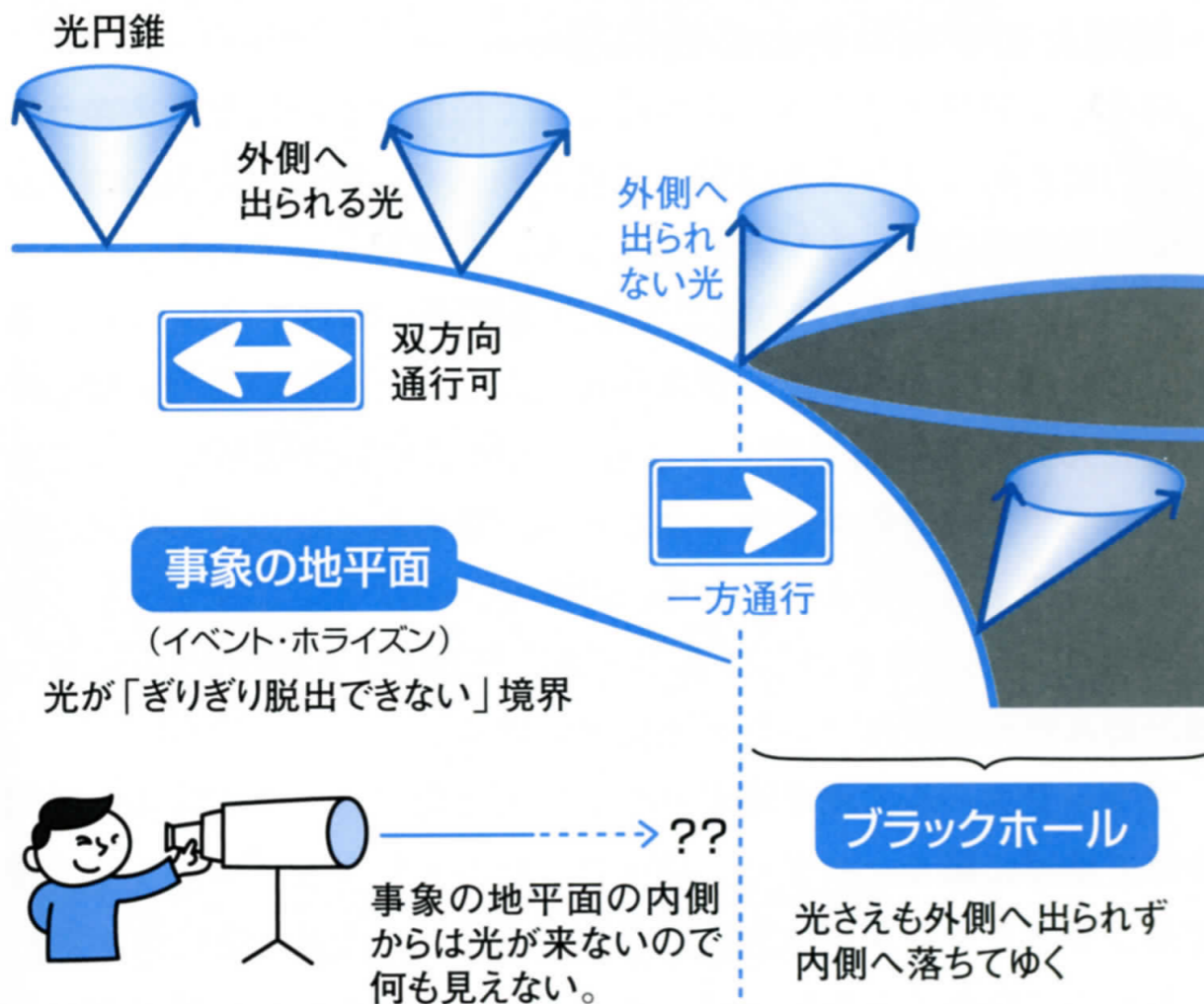


ブラックホール

= 重力が強すぎて、光さえも出られない天体

= 因果的に隔離される領域 **境界 = 地平面 (ホライズン)**

ブラックホールの事象の地平面



Newton力学でも偶然同じ値が出てくる

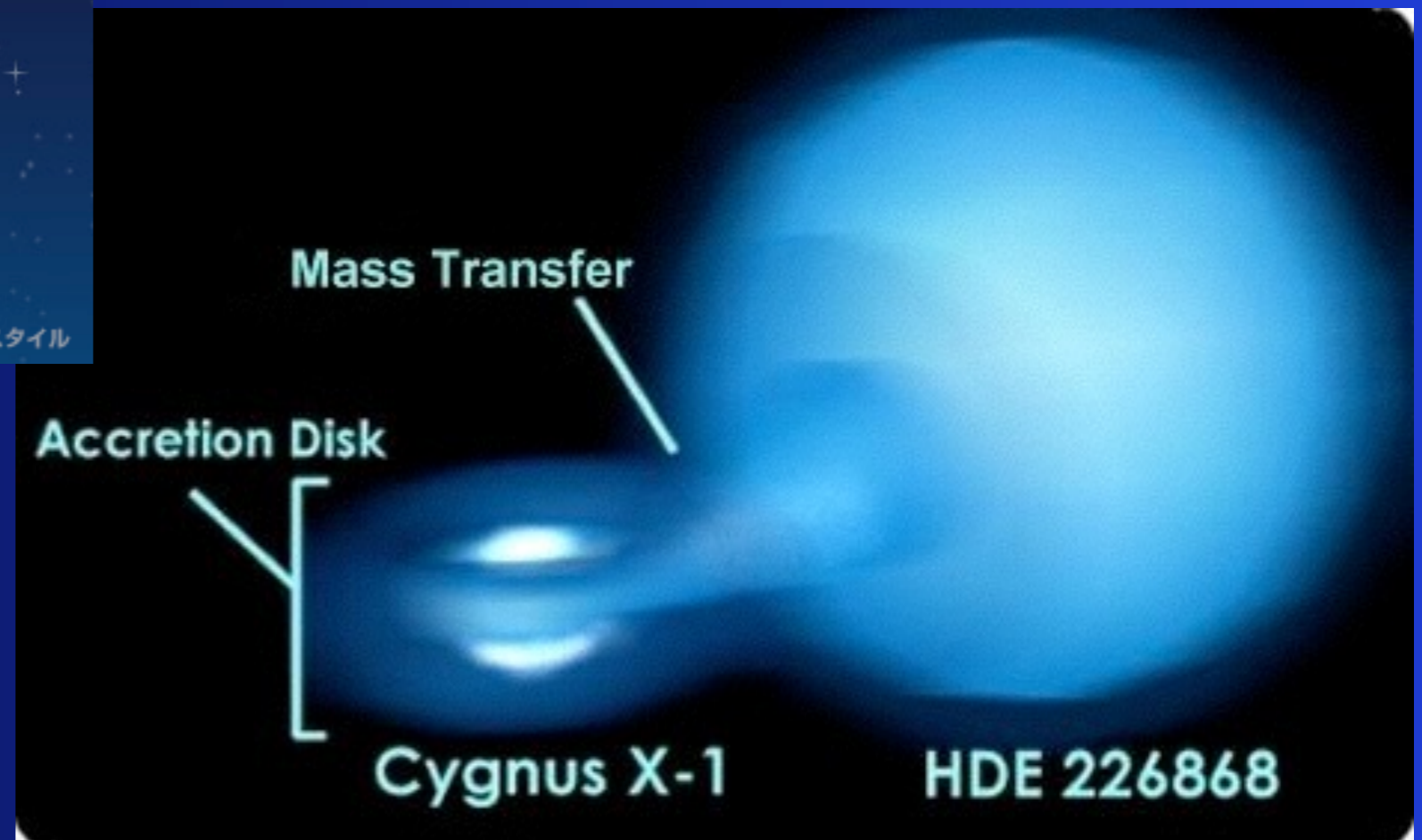
$$-\frac{GMm}{R} + \frac{1}{2}mc^2 = -\frac{GMm}{\infty} + \frac{1}{2}mv^2 > 0$$

$$R < \frac{2GM}{c^2}$$

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

太陽なら2Km, 地球なら0.9cm

はくちょう座 X-1はブラックホール



銀河系の中心にも巨大ブラックホール

THE MILKY WAY

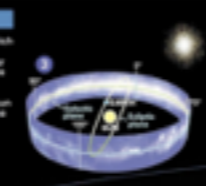


How galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode or shed their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



GUIDE TO THE GALAXY

- For beyond the galactic disk, yet drawn by its gravity, lone stars and globular clusters swirl in the galaxy's halo. Regions of dark matter—regions that pass through the dust to reveal the galaxy's structure—can be seen through the dust to reveal the galaxy's structure.
- Earth's orbit around the sun lies at a severe angle to the galactic plane.



A TURBULENT HEART

A graph based on a radio survey reveals the whirlwind structure of molecular gas in the inner part of our galaxy. The swirling gas is seen from Earth through the dust that obscures it. This turbulent gas appears as a bright, chaotic pattern of white, red, and blue.

Electrons that race along magnetic field lines, illuminating the heart of our galaxy, produce a radio image that reveals a complex of hot gas that is swirling toward our galaxy for a black hole some 2.6 million times as massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way—our perspective of a 3-D model newly compiled for National Geographic—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulas.

- Galactic star cluster
- Interstellar gas and dust
- Galactic bulge
- Galactic disk
- Galactic halo
- Galactic plane
- Galactic bulge or center
- Galactic halo

Reference numbers for galaxies, nebulas, and star clusters

NGC (New General Catalog)

Deep-Space system—central star and planets

PLANETARY NEBULA NGC 8

Small, hot stars, which will cool and fade over time, are the source of the energy that creates the colorful, glowing shells of gas and dust that surround them. The Helix Planetary Nebula, created by the Helix Star, is a beautiful example of a planetary nebula. The bright light from the star heats the gas and dust, causing it to glow. The gas is ionized, and the light from the star is scattered, creating the colorful patterns we see.

LAGOON NEBULA

The Lagoon Nebula is a large, colorful nebula in the constellation Sagittarius. It is a star-forming region, where new stars are being born. The nebula is composed of gas and dust, which is being heated and ionized by the ultraviolet light from the young stars. This creates the vibrant colors we see in the image.

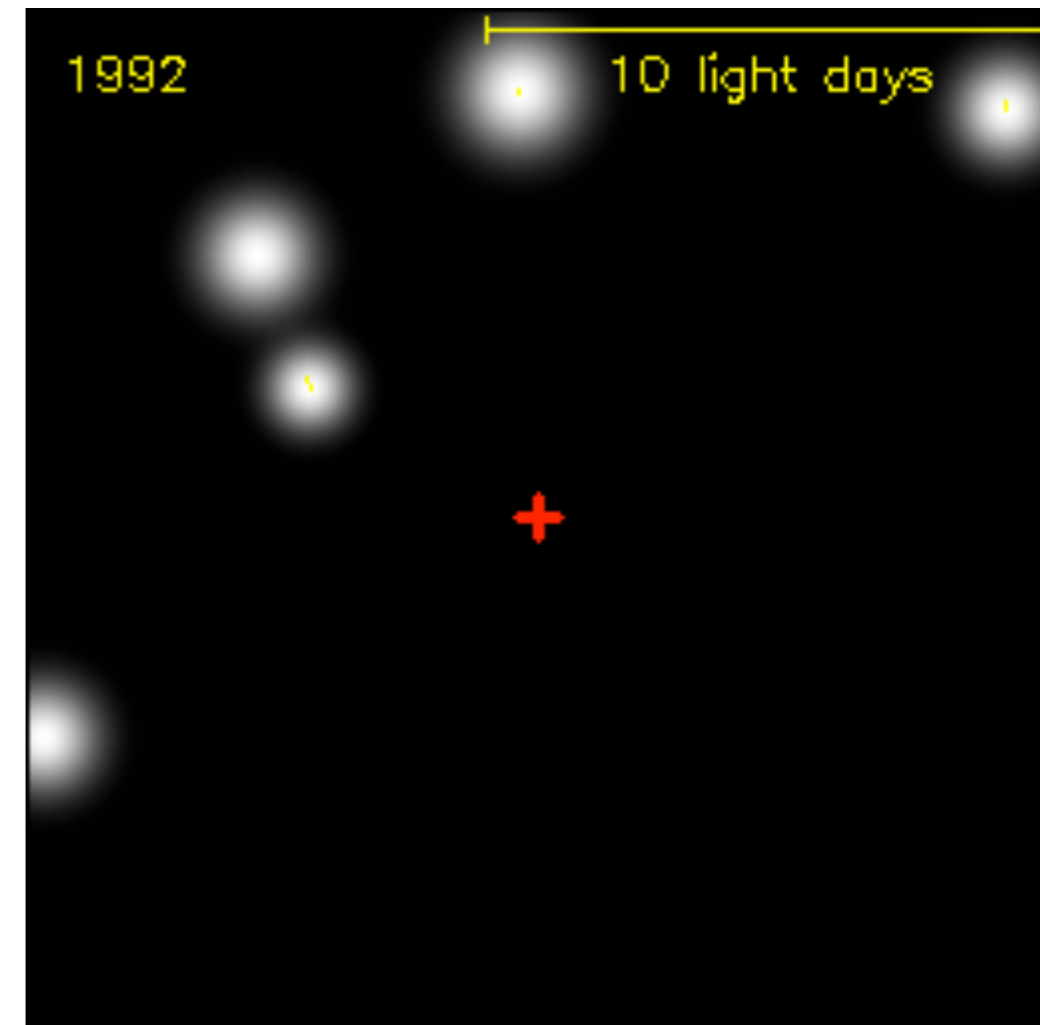
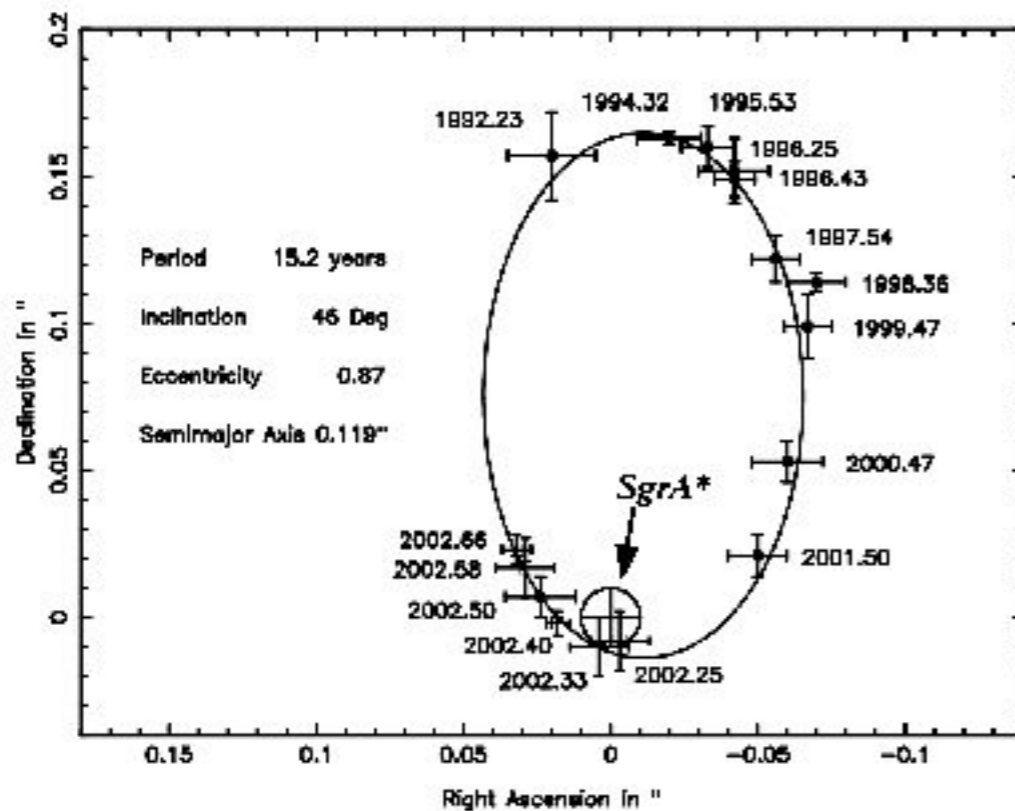
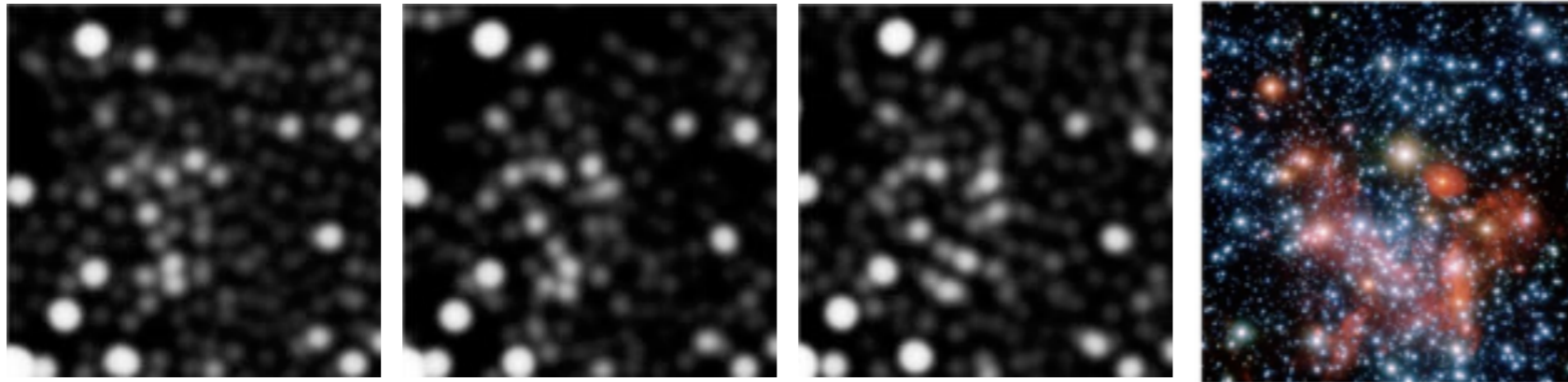
WE ARE HERE

Our solar system is located in the Orion Arm, a minor spiral arm of the Milky Way. We are approximately 26,000 light-years from the galactic center. The diagram shows the overall structure of the galaxy, with the Sun and Earth marked as a tiny speck in the vast expanse of the spiral arms.

THE GALACTIC CENTER

The center of the Milky Way is a region of intense activity. It contains a supermassive black hole, known as Sagittarius A*, which is about 4 million times the mass of the Sun. The center is surrounded by a dense concentration of stars and gas, creating a bright, chaotic region. The image shows the complex structure of the galactic core, with bright spots and dark regions.

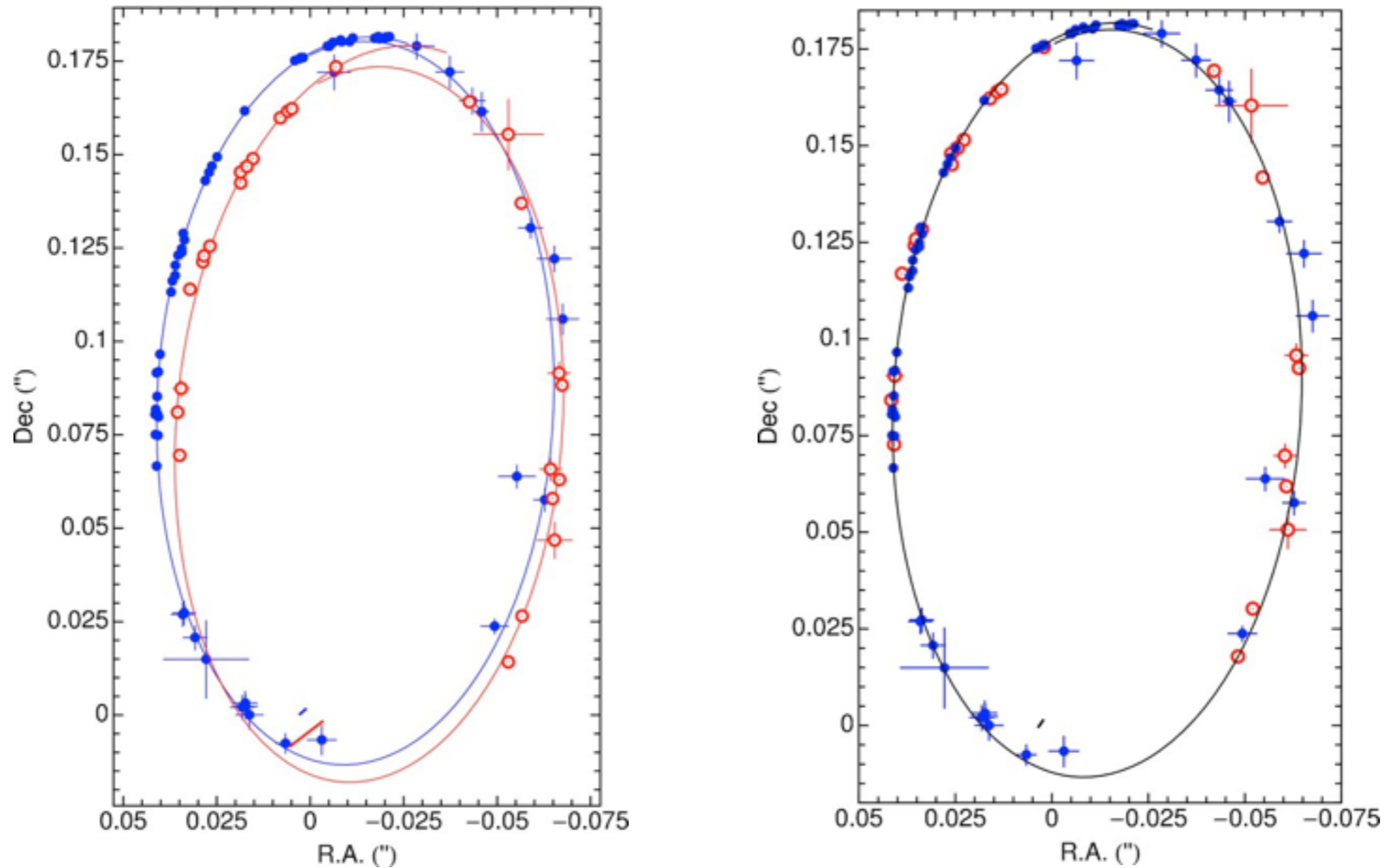
S2 orbit around Sgr A*



<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>

<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

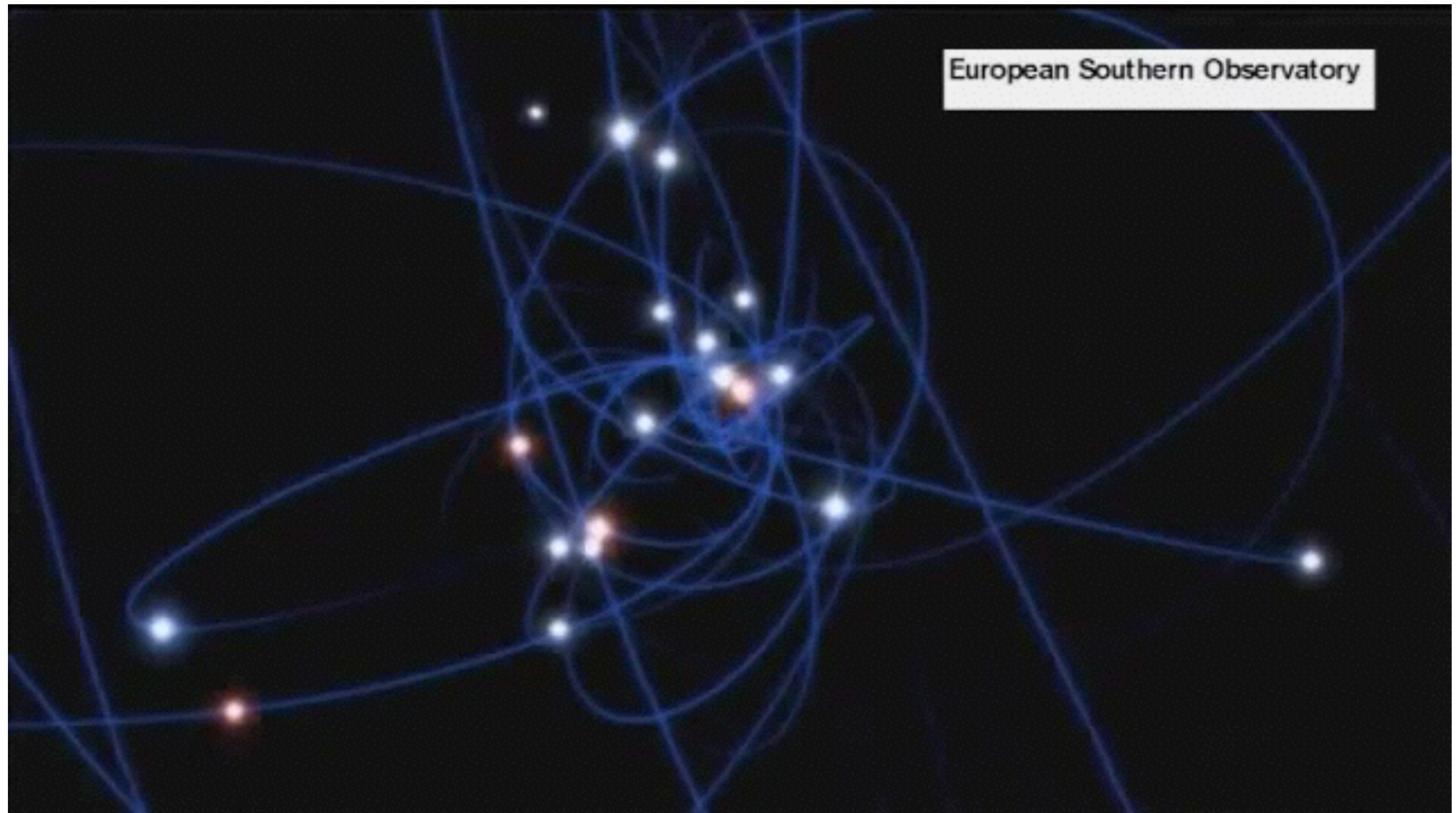
S2 orbit around Sgr A*



Astrometric data for the star S2. Blue: NTT/VLT measurements. Red: Keck measurements. The lines show the Keplerian orbit fits for the respective data set, which do not yield closed ellipses in this figure due to the motion of the point mass with respect to the chosen coordinate systems. The small lines close to the origin indicate the position of the center of mass as a function of time.

Result of the combined orbit fit for the star S2. Blue: NTT/VLT measurements. Red: Keck measurements. The black line shows the Keplerian fit (row 1 in Table 2).
http://iopscience.iop.org/1538-4357/707/2/L114/fulltext/apjl_707_2_114.figures.html

2013年, ガス雲が銀河中心ブラックホールに落下か？

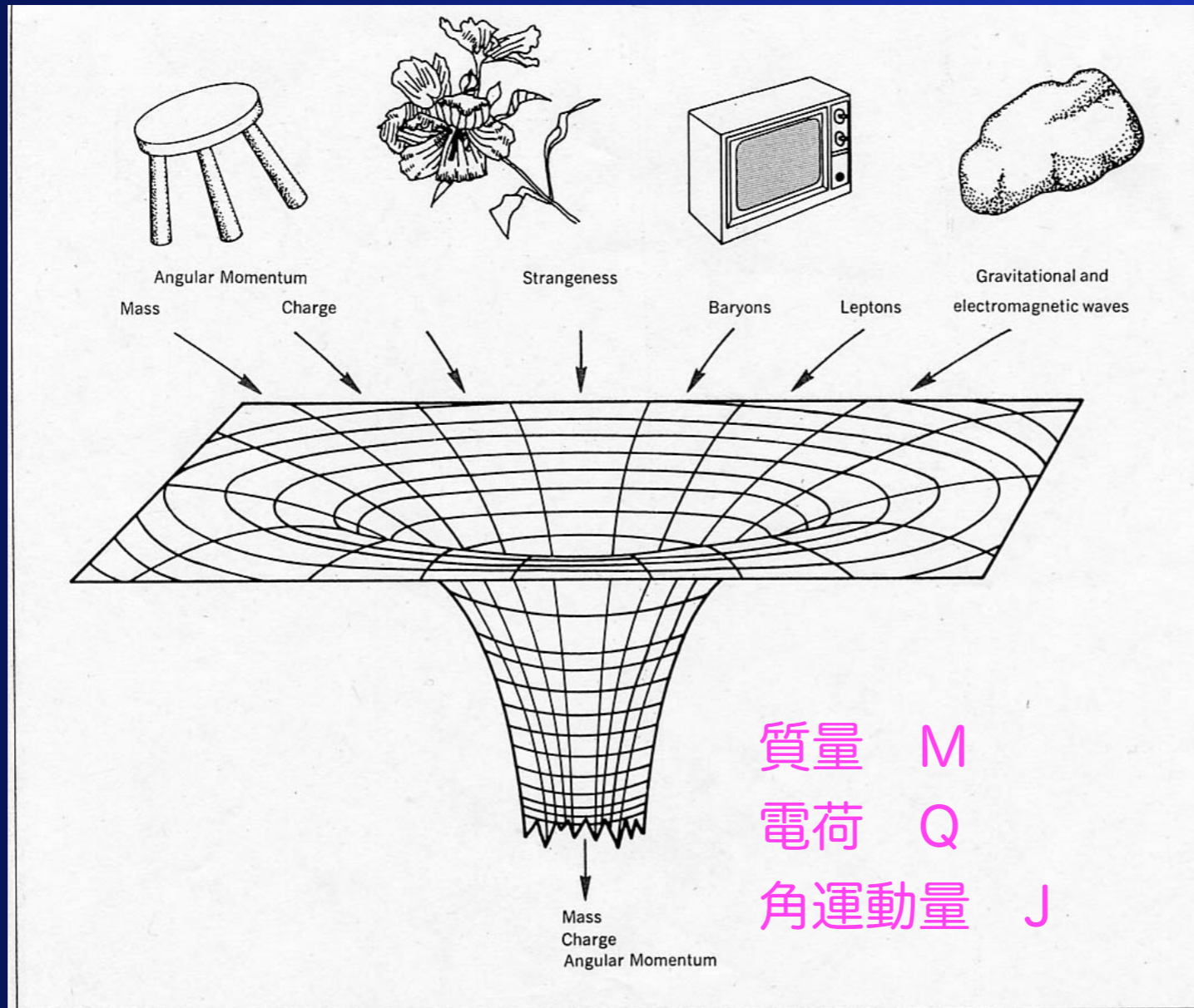


Gas Cloud Set To Collide With Supermassive Black Hole At Milky Way's Core

<http://www.youtube.com/watch?v=HMJOlwf5hrs>

ブラックホール脱毛定理

black-hole no-hair theorem



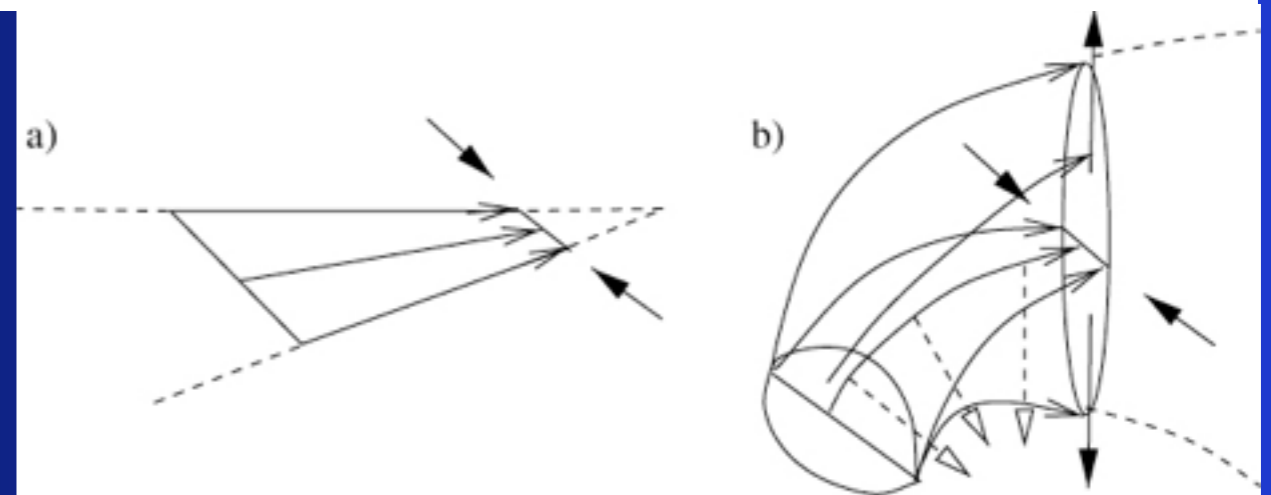
Figurative representation of a black hole in action. All details of the infalling matter are washed out. The final configuration is believed to be uniquely determined by mass, electric charge, and angular momentum. Figure 1



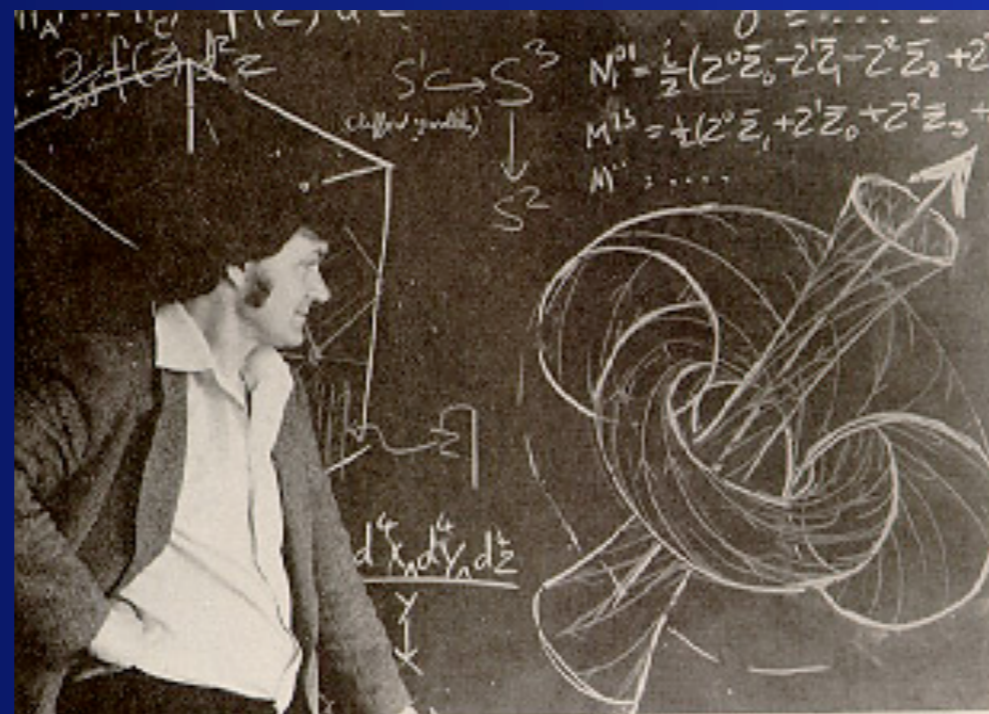
特異点定理

特異点定理 (singularity theorem)

一般相対性理論の方程式の解には、真空や普通の物質を考える限り、必ず特異点が存在する



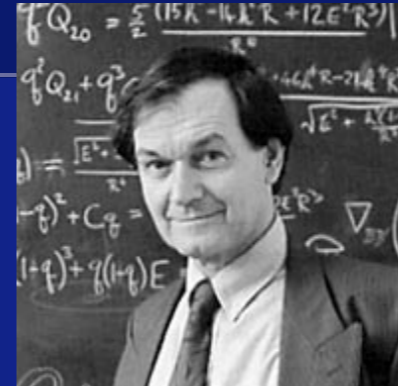
<http://iopscience.iop.org/1475-7516/2005/10/017>



裸の特異点 と 宇宙検閲官仮説

naked singularity vs cosmic censorship conjecture

弱い宇宙検閲仮説 R. Penrose (1969)



「漸近的に平坦な時空で、物理的に適当な初期条件から出発し、物理的に適当な物質および輻射の重力崩壊によって発生するすべての特異点は、ブラックホールの中に隠され、遠方の観測者はそれを見ることができない。」

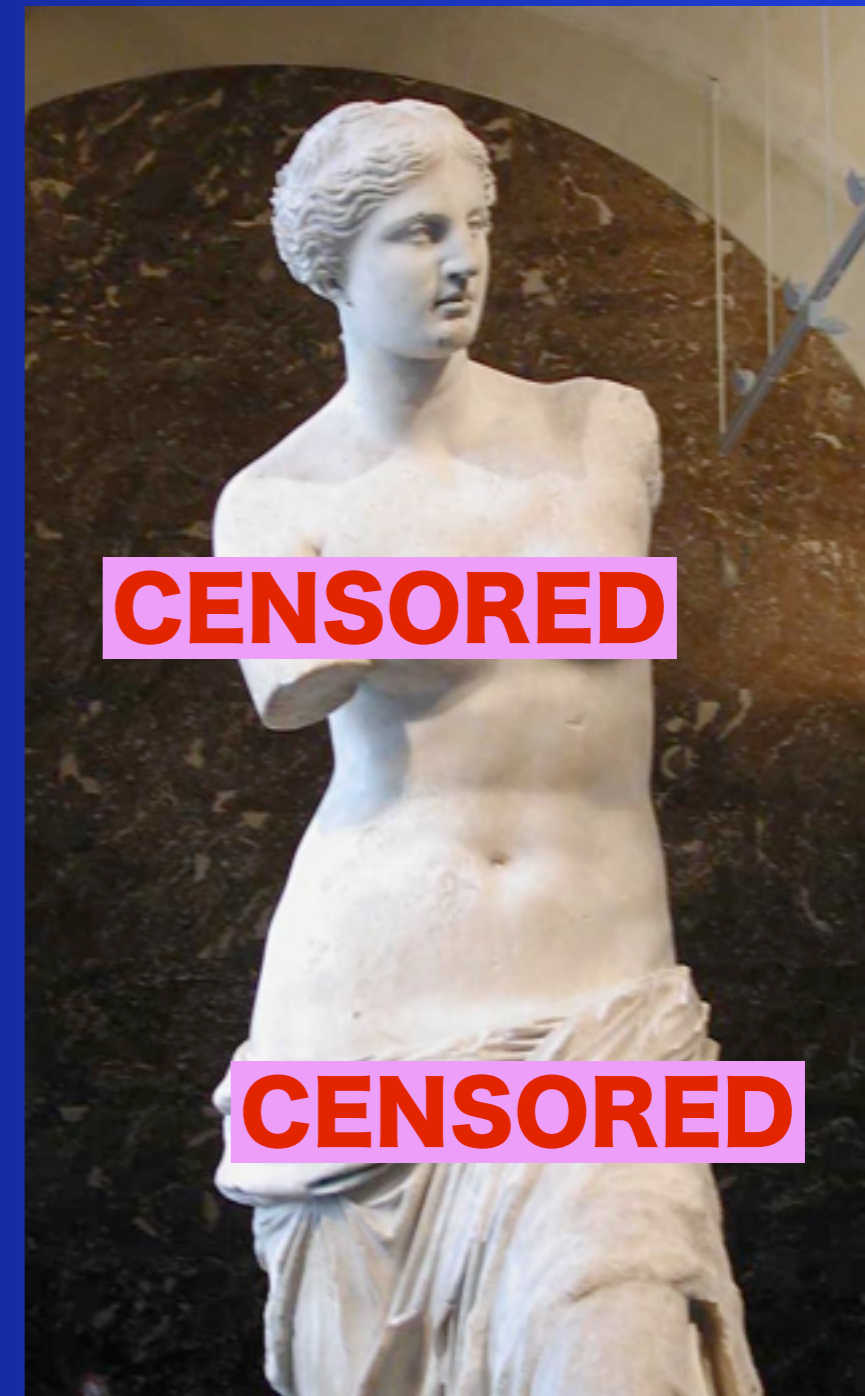
「裸の特異点は、見えてはならない」

強い宇宙検閲仮説 R. Penrose (1979)

「物理的にもっともらしいすべての時空には、初期特異点以外に観測可能な特異点は存在しない。」

「特異点は、遠方の観測者のみならず、ブラックホールに落ちた観測者からも、見えてはならない」

「裸の特異点は、存在しない」

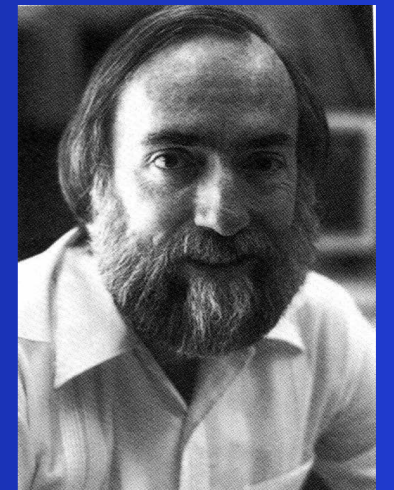


ホーキングとソーンの賭け



ホーキング

「裸の特異点は物理法則によって
禁止されている」



ソーン, プレスキル
「あり得る」

敗者は裸体を覆う着物を勝者に
与えること

Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds sterling to 50 pounds sterling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.



John P. Preskill Kip S. Thorne

Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

1991年9月24日

Formation of Naked Singularities: The Violation of Cosmic Censorship

Stuart L. Shapiro and Saul A. Teukolsky

*Center for Radiophysics and Space Research and Departments of Astronomy and Physics,
Cornell University, Ithaca, New York 14853*

(Received 7 September 1990)

We use a new numerical code to evolve collisionless gas spheroids in full general relativity. In all cases the spheroids collapse to singularities. When the spheroids are sufficiently compact, the singularities are hidden inside black holes. However, when the spheroids are sufficiently large, there are no apparent horizons. These results lend support to the hoop conjecture and appear to demonstrate that naked singularities can form in asymptotically flat spacetimes.

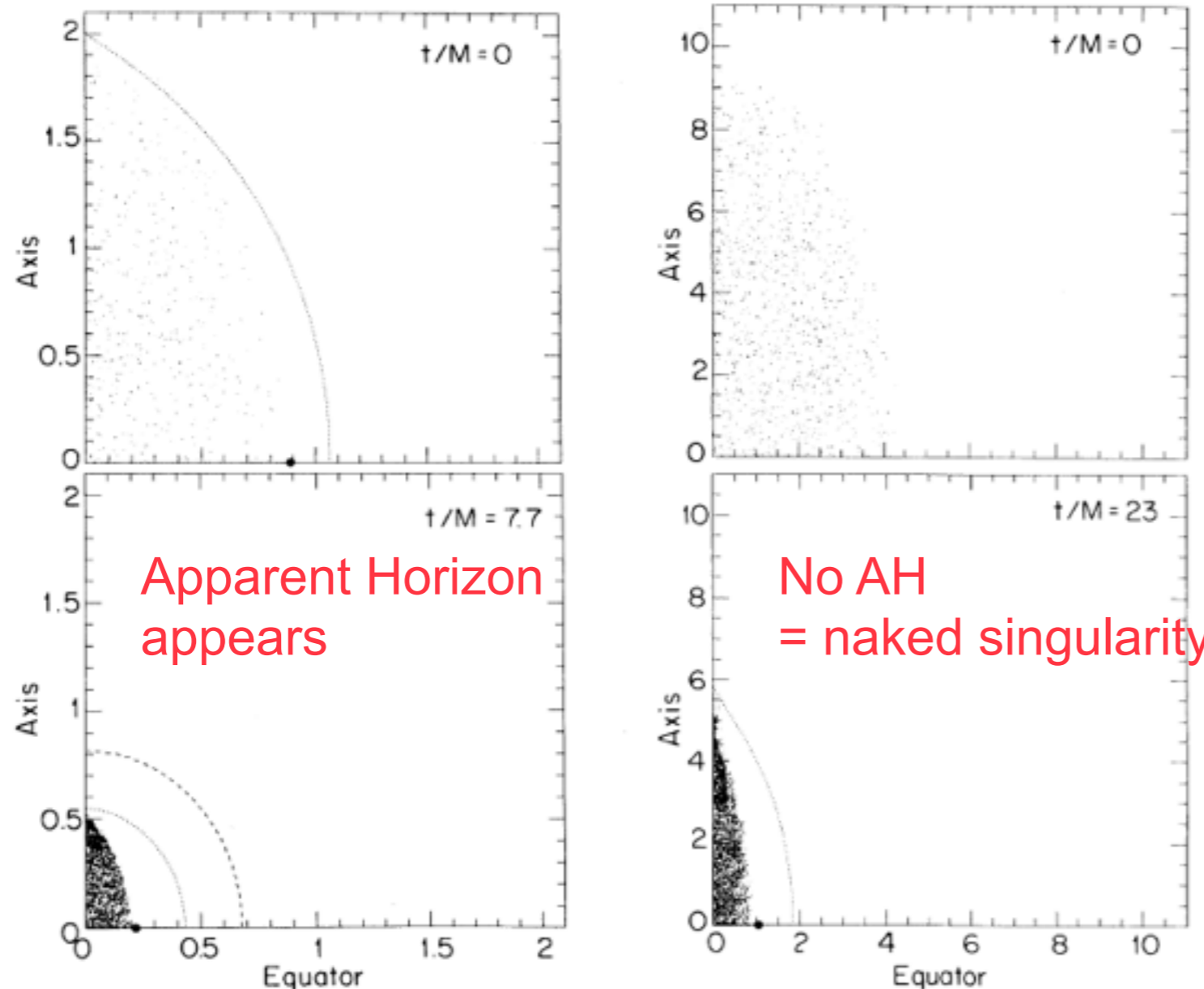


FIG. 1. Snapshots of the particle positions at initial and late times for prolate collapse. The positions (in units of M) are projected onto a meridional plane. Initially the semimajor axis of the spheroid is $2M$ and the eccentricity is 0.9 . The collapse proceeds nonhomologously and terminates with the formation of a spindle singularity on the axis. However, an apparent horizon (dashed line) forms to cover the singularity. At $t/M = 7.7$ its area is $\mathcal{A}/16\pi M^2 = 0.98$, close to the asymptotic theoretical limit of 1 . Its polar and equatorial circumferences at that time are $\mathcal{C}_{\text{pole}}^{\text{AH}}/4\pi M = 1.03$ and $\mathcal{C}_{\text{eq}}^{\text{AH}}/4\pi M = 0.91$. At later times these circumferences become equal and approach the expected theoretical value 1 . The minimum exterior polar circumference is shown by a dotted line when it does not coincide with the matter surface. Likewise, the minimum equatorial circumference, which is a circle, is indicated by a solid dot. Here $\mathcal{C}_{\text{eq}}^{\text{min}}/4\pi M = 0.59$ and $\mathcal{C}_{\text{pole}}^{\text{min}}/4\pi M = 0.99$. The formation of a black hole is thus consistent with the hoop conjecture.

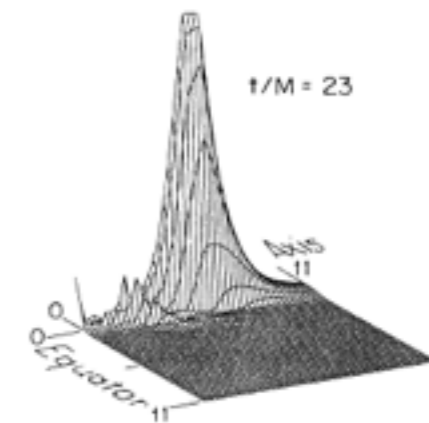


FIG. 4. Profile of I in a meridional plane for the collapse shown in Fig. 2. For the case of 32 angular zones shown here, the peak value of I is $24/M^4$ and occurs on the axis just outside the matter.

Formation of naked singularities in five-dimensional space-time

Yuta Yamada^{1,*} and Hisa-aki Shinkai^{1,2,†}

¹*Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology,
1-79-1 Kitayama, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan*

²*Computational Astrophysics Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN),
Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

(Received 18 December 2010; published 4 March 2011)

We numerically investigate the gravitational collapse of collisionless particles in spheroidal configurations both in four- and five-dimensional (5D) space-time. We repeat the simulation performed by Shapiro and Teukolsky (1991) that announced an appearance of a naked singularity, and also find similar results in the 5D version. That is, in a collapse of a highly prolate spindle, the Kretschmann invariant blows up outside the matter and no apparent horizon forms. We also find that the collapses in 5D proceed more rapidly than in 4D, and the critical prolateness for the appearance of an apparent horizon in 5D is loosened, compared to 4D cases. We also show how collapses differ with spatial symmetries comparing 5D evolutions in single-axisymmetry, $SO(3)$, and those in double-axisymmetry, $U(1) \times U(1)$.

DOI: 10.1103/PhysRevD.83.064006

PACS numbers: 04.20.Dw, 04.20.Ex, 04.25.dc, 04.50.Gh

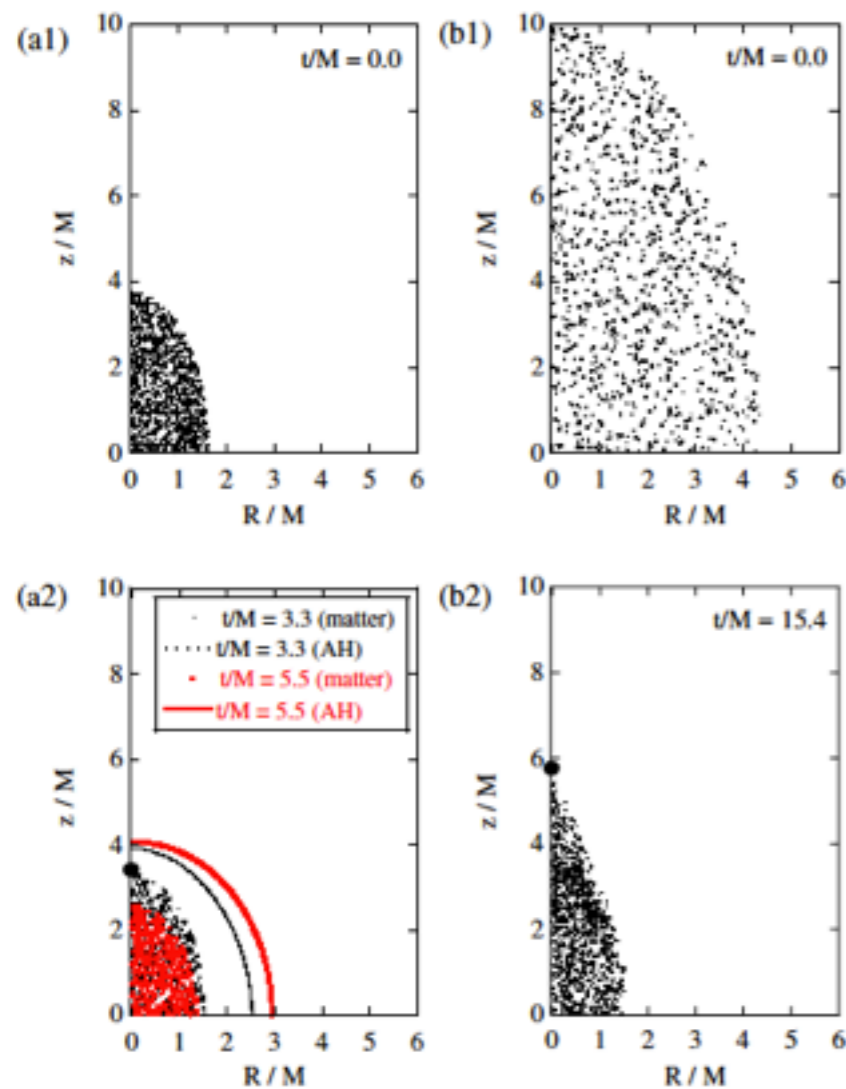


FIG. 2 (color online). Snapshots of 5D axisymmetric evolution with the initial matter distribution of $b/M = 4$ [(a1) and (a2); model 5DS β in Table I] and 10 [(b1) and (b2); model 5DS δ]. We see the apparent horizon (AH) is formed at the coordinate time $t/M = 3.3$ for the former model and the area of AH increases, while AH is not observed for the latter model up to the time $t/M = 15.4$, when our code stops due to the large curvature. The big circle indicates the location of the maximum Kretschmann invariant I_{\max} at the final time at each evolution. Number of particles are reduced to 1/10 for figures.

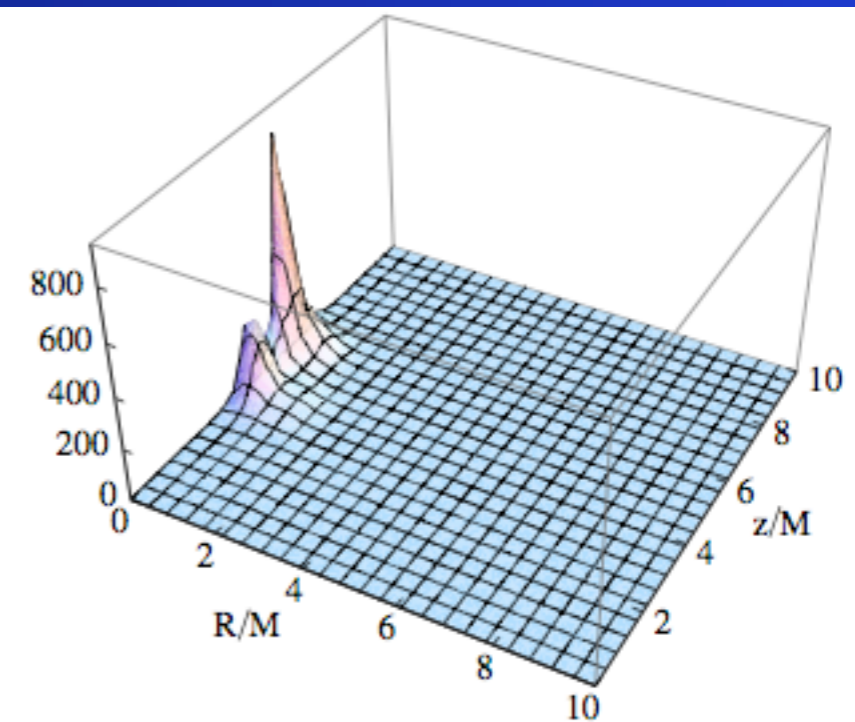


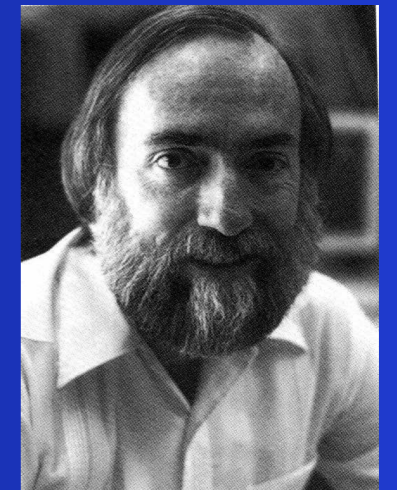
FIG. 3 (color online). Kretschmann invariant I for model 5DS δ at $t/M = 15.4$. The maximum is $O(1000)$, and its location is on z -axis, just outside of the matter.

ホーキングとソーンの賭け 2



ホーキング

「一般的な初期条件では、裸の特異点は発生しない」



ソーン, プレスキル
「あり得る」

敗者は裸体を覆う着物を勝者に与え、その着物には敗北を認める文章を入れること。

1997年2月5日

Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then

A dynamical evolution from generic initial conditions (i.e., from an open set of initial data) can never produce a naked singularity (a past-incomplete null geodesic from \mathcal{I}_+).

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

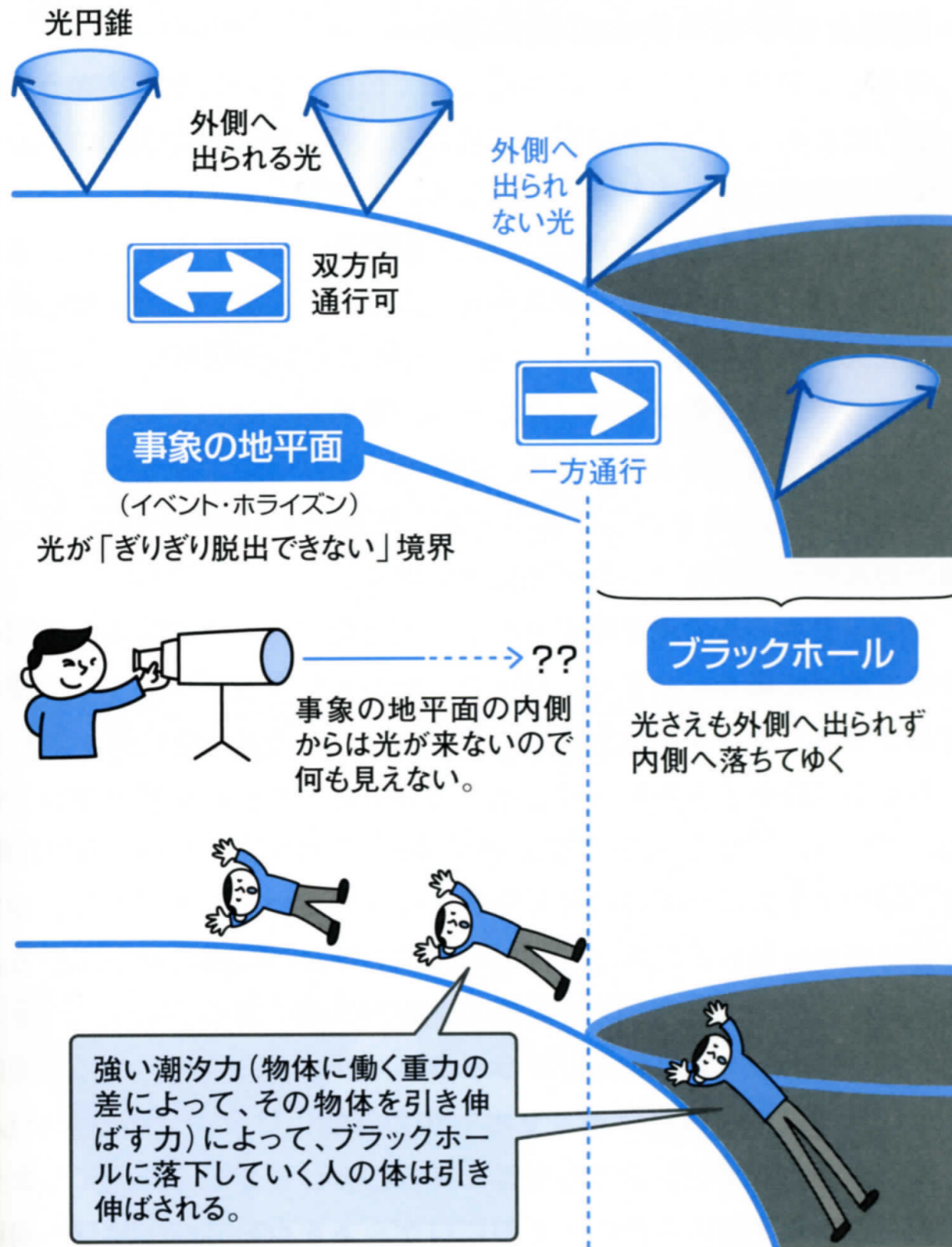

Stephen W. Hawking


John P. Preskill & Kip S. Thorne

Pasadena, California, 5 February 1997

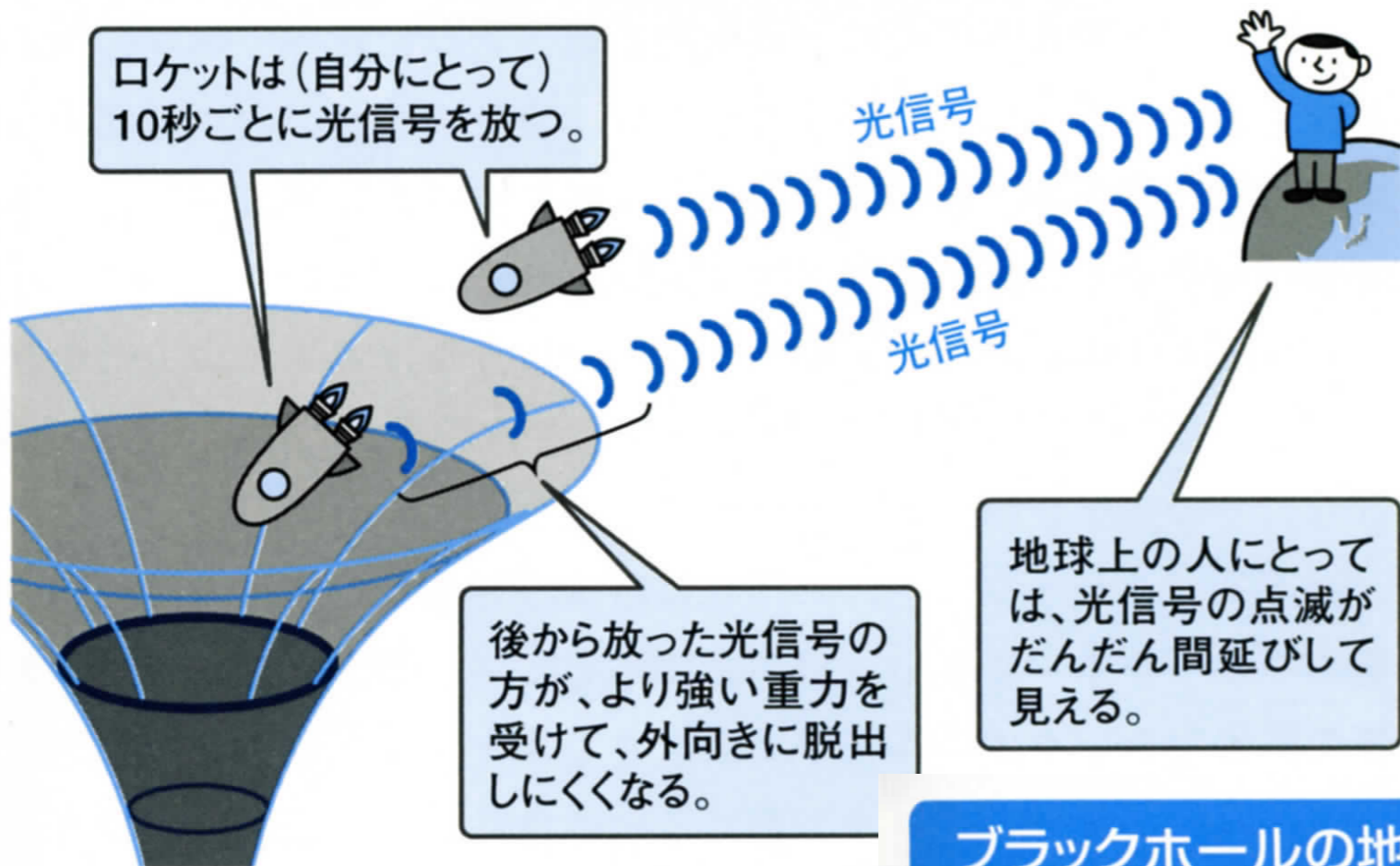
ブラックホールで 未来へ行く(1)

ブラックホールの事象の地平面



ブラックホールに近づくロケットが放つ光信号

ロケットは(自分にとって)10秒ごとに光信号を放つ。



後から放った光信号の方が、より強い重力を受けて、外向きに脱出しにくくなる。

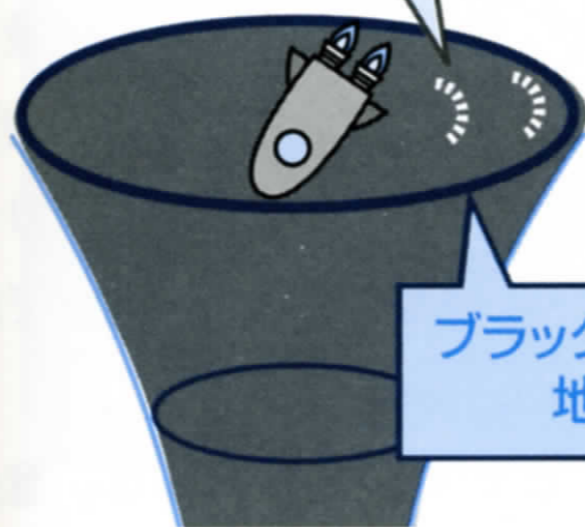
地球上の人にとっては、光信号の点滅がだんだん間延びして見える。

ブラックホールで未来へ行く(2)

ブラックホールの地平面から放つ光信号

地平面から放った光信号は外向きに進めない。

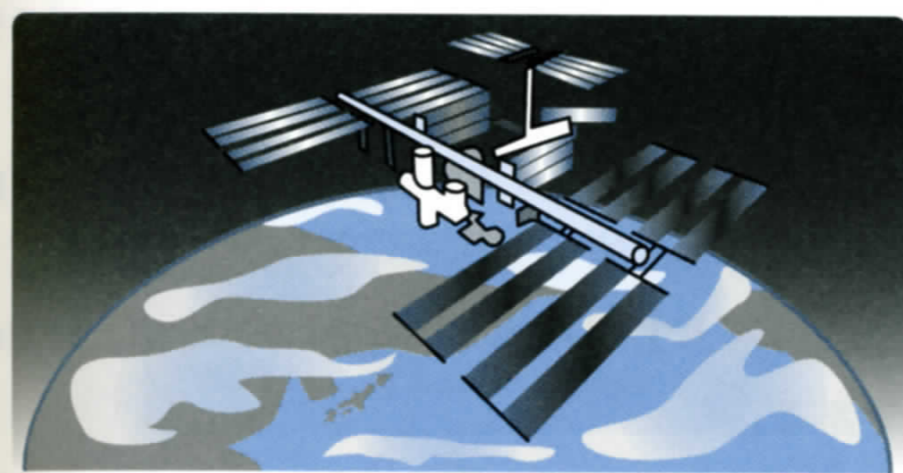
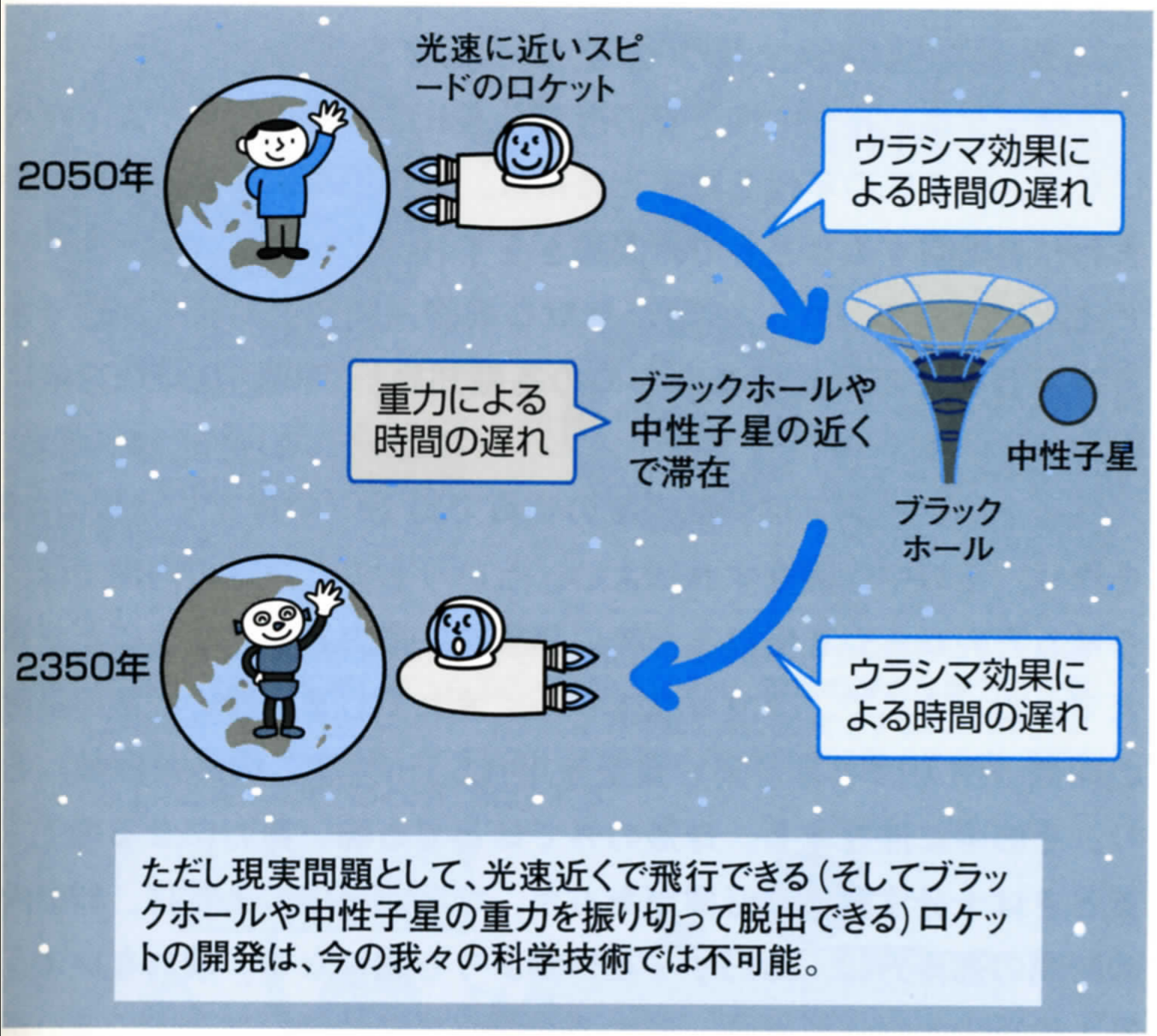
光信号は無限に長く引き伸ばされる(つまり地球には届かない)ので、地球上の人にとっては、ロケット内の時間は止まってしまう、ロケットはいつまで経ってもブラックホールに到達できないように見える*。



ブラックホールの地平面

*ロケットは“実際には”猛スピードでブラックホールの地平面内に落下していくが、地球の人が「ロケットは永遠にブラックホールに到達しない」と見ることは誤りではなく、「時間の相対性」に基づくものである。

ブラックホールで 未来へ行く(3)



国際宇宙ステーション (ISS) に2年間滞在すると、地球上にいた人よりも50分の1秒だけ「未来」に行けることになる。

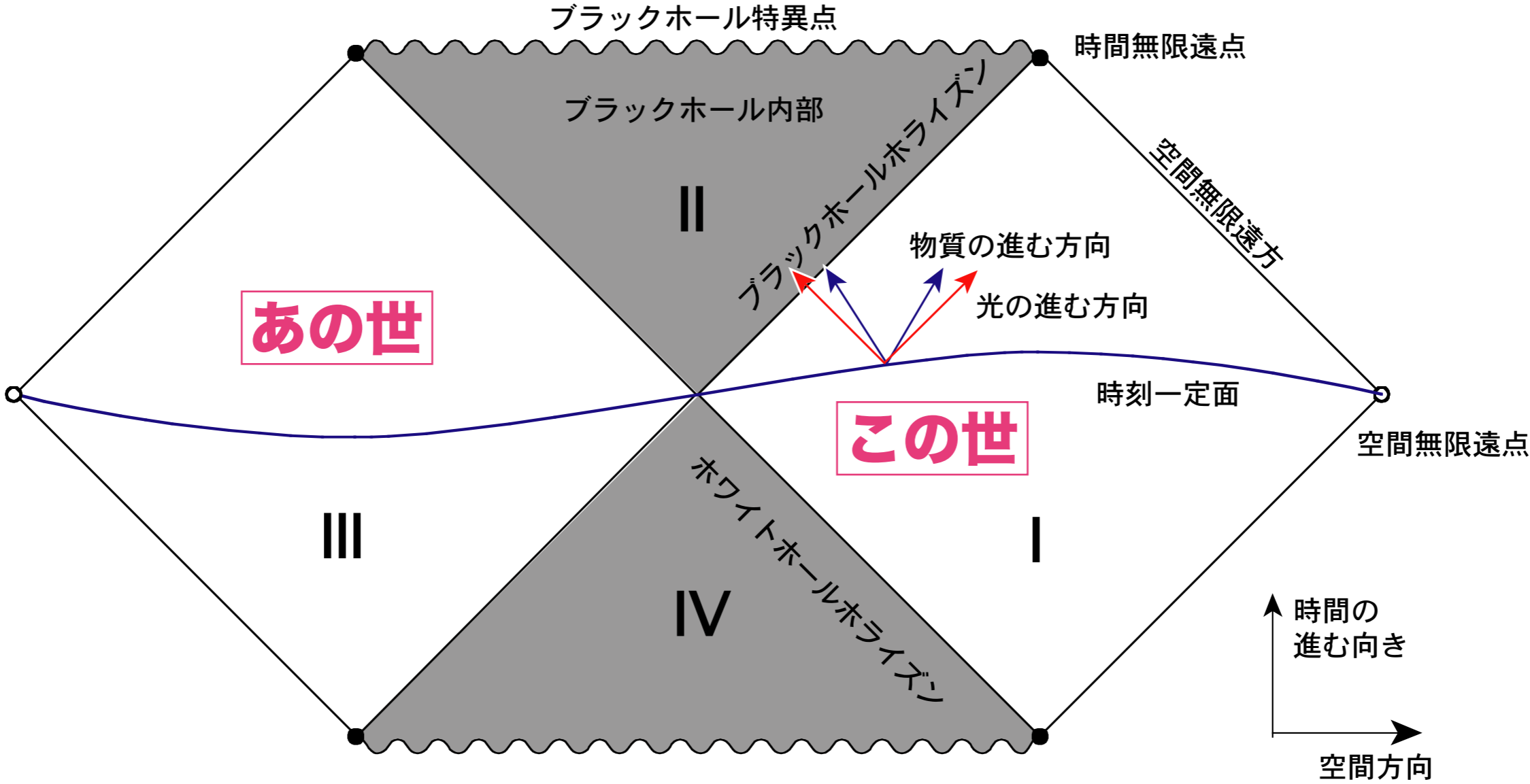
ワームホール wormhole

本当にあるのかどうか誰も知らないが、

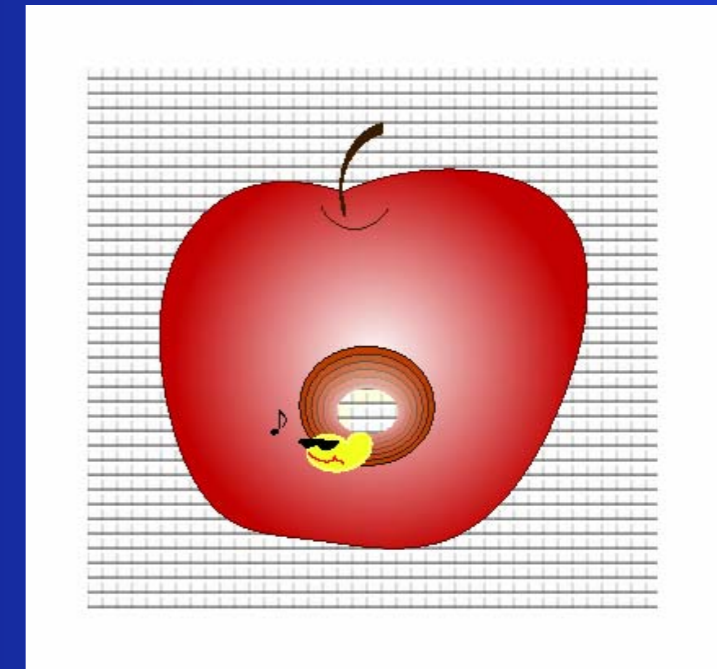
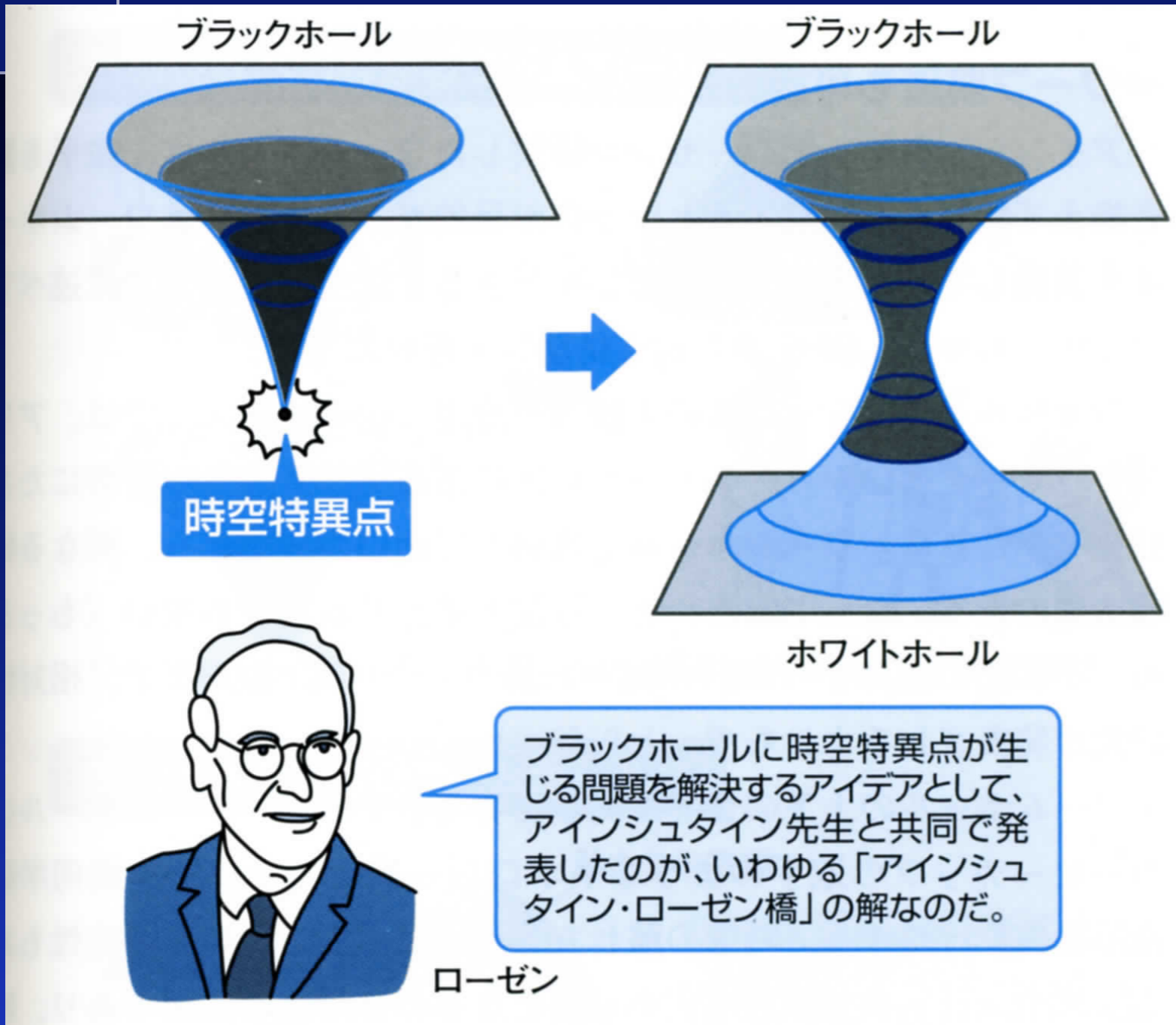
もしxxxで、さらにxxxで、さらにxxxで、さらにxxxで、
さらにxxxで、さらにxxxならば、タイムマシンができる

現在の、一般相対性理論研究の**非**中心的問題。

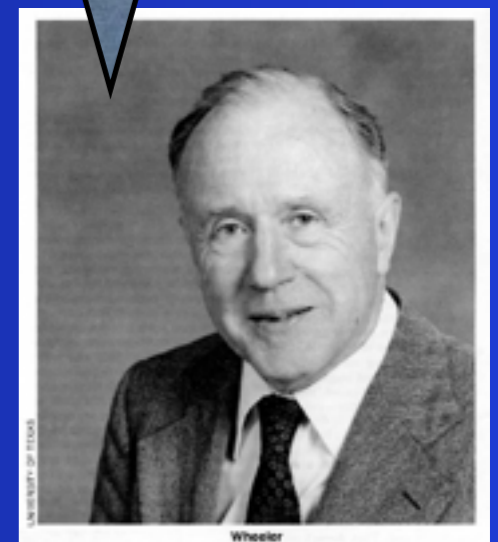
Schwarzschild Black HoleのPenrose図



アインシュタイン・ローゼンブリッジ



ワームホール
と呼ぼう



ホイーラー

ワームホール?

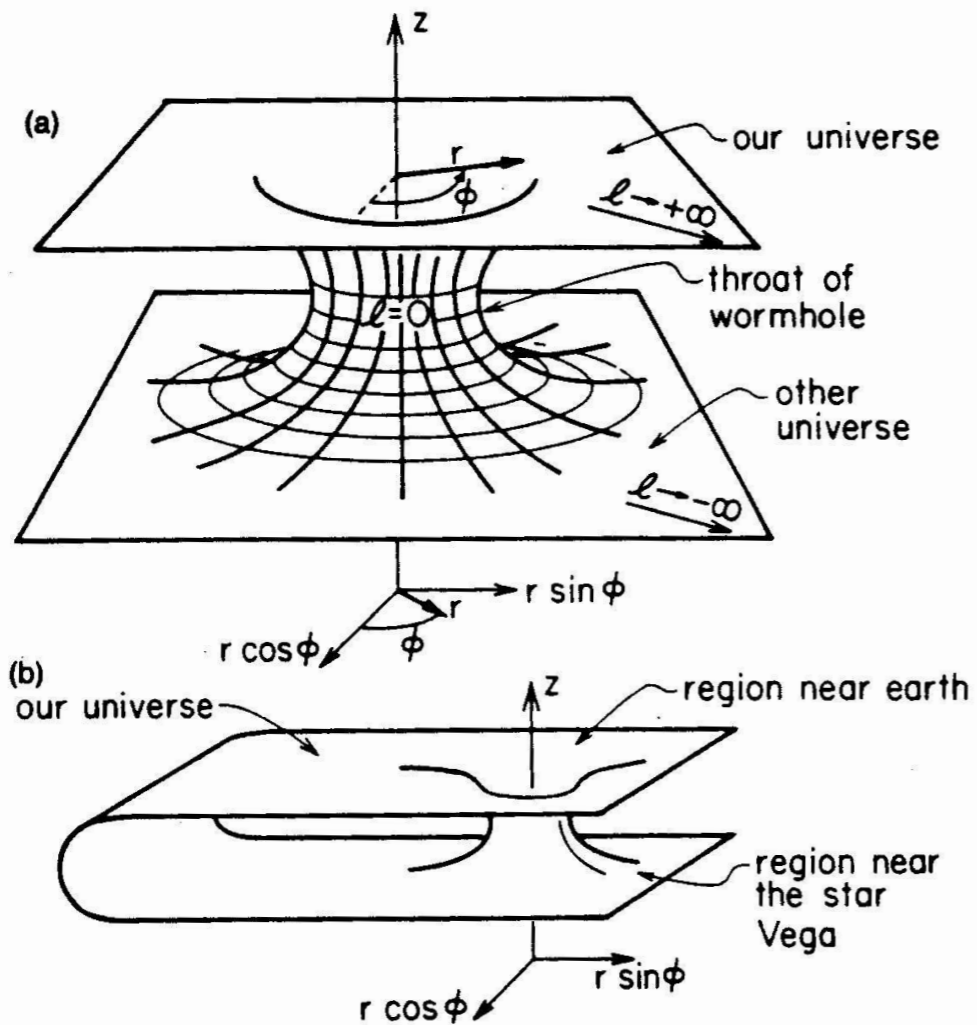
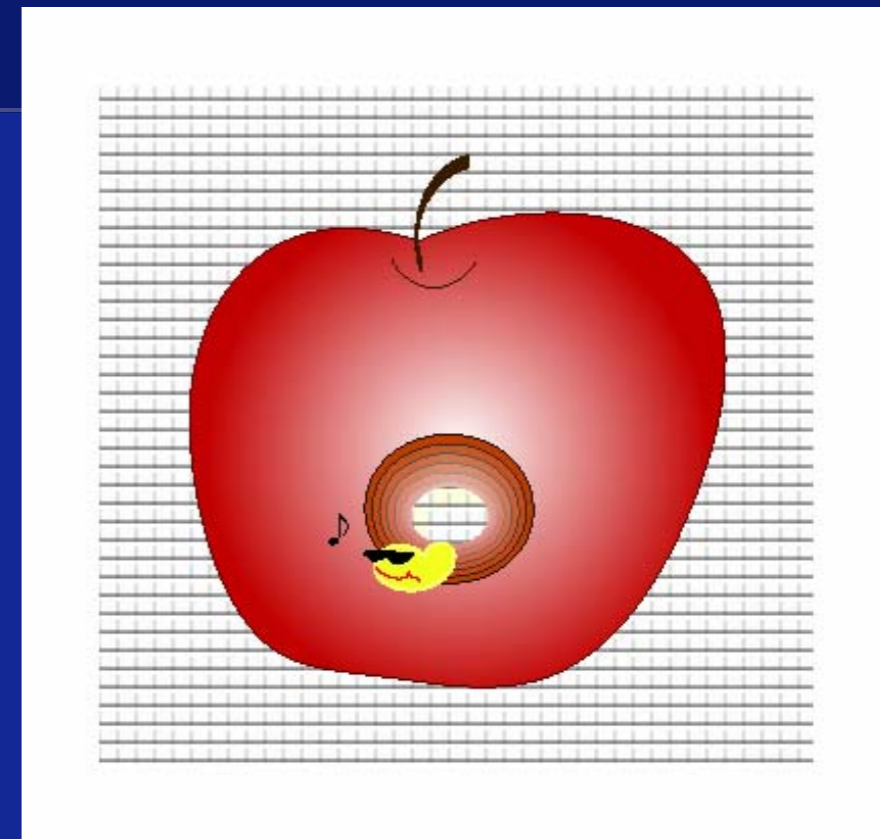


Fig. 1. (a) Embedding diagram for a wormhole that connects two different universes. (b) Embedding diagram for a wormhole that connects two distant regions of our own universe. Each diagram depicts the geometry of an equatorial ($\theta = \pi/2$) slice through space at a specific moment of time ($t = \text{const}$). These embedding diagrams are derived quickly in item (b) of Box 2, and—in a more leisurely fashion—in Sec. III C, where they are also discussed. This figure is adapted from Ref. 1, Fig. 31.5.



物理科学雑誌

parity

パリテイ 2003 05

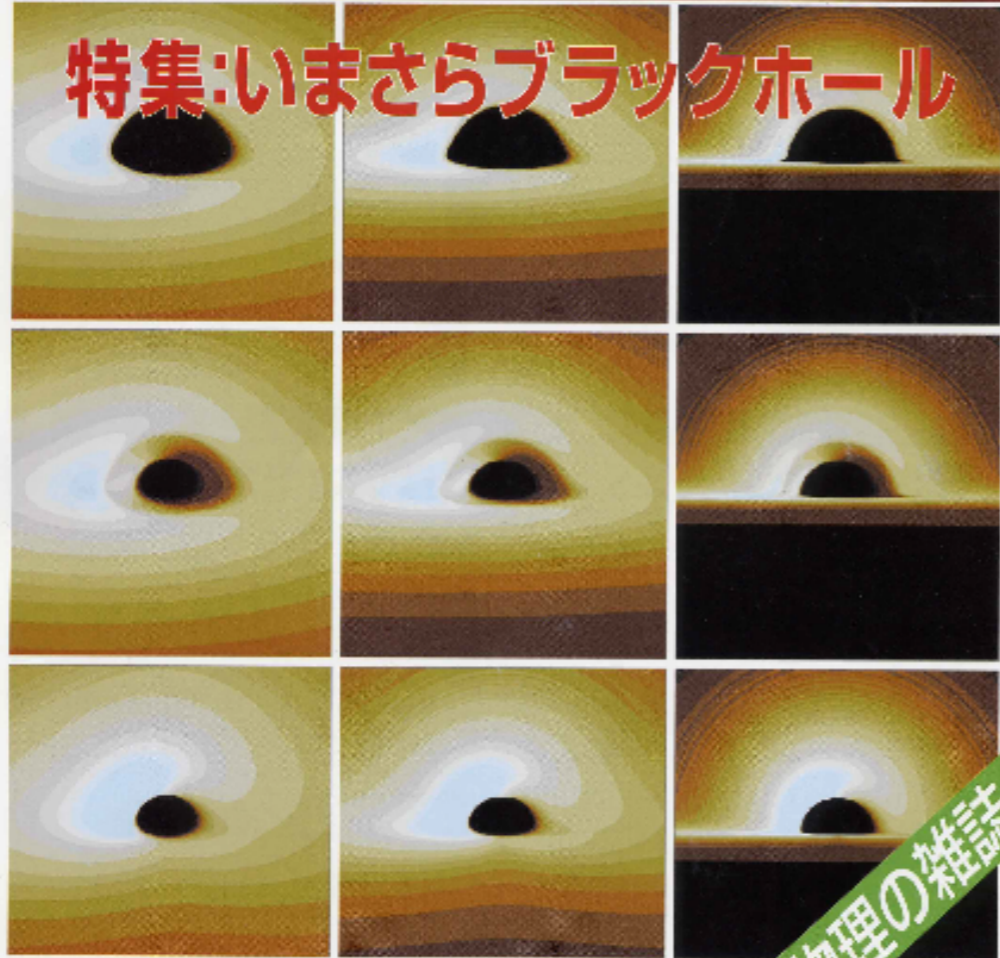
創刊号 1972年10月号
発行所 株式会社朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1
電話 03-5561-1111
FAX 03-5561-1112
E-MAIL info@parity.jp
ISSN 1349-8993
PHYSICS TODAY 掲載

ブラックホールの誕生に迫る | ブラックホールは黒いのか

ブラックホールはどう見えるか | 明るく輝く黒い穴

ワームホールは、通過可能か? | いまこそブラックホール? | ホワイトホールの死?

特集:いまさらブラックホール



MARUZEN

物理の雑誌

物理科学雑誌

parity

パリテイ 2003 05

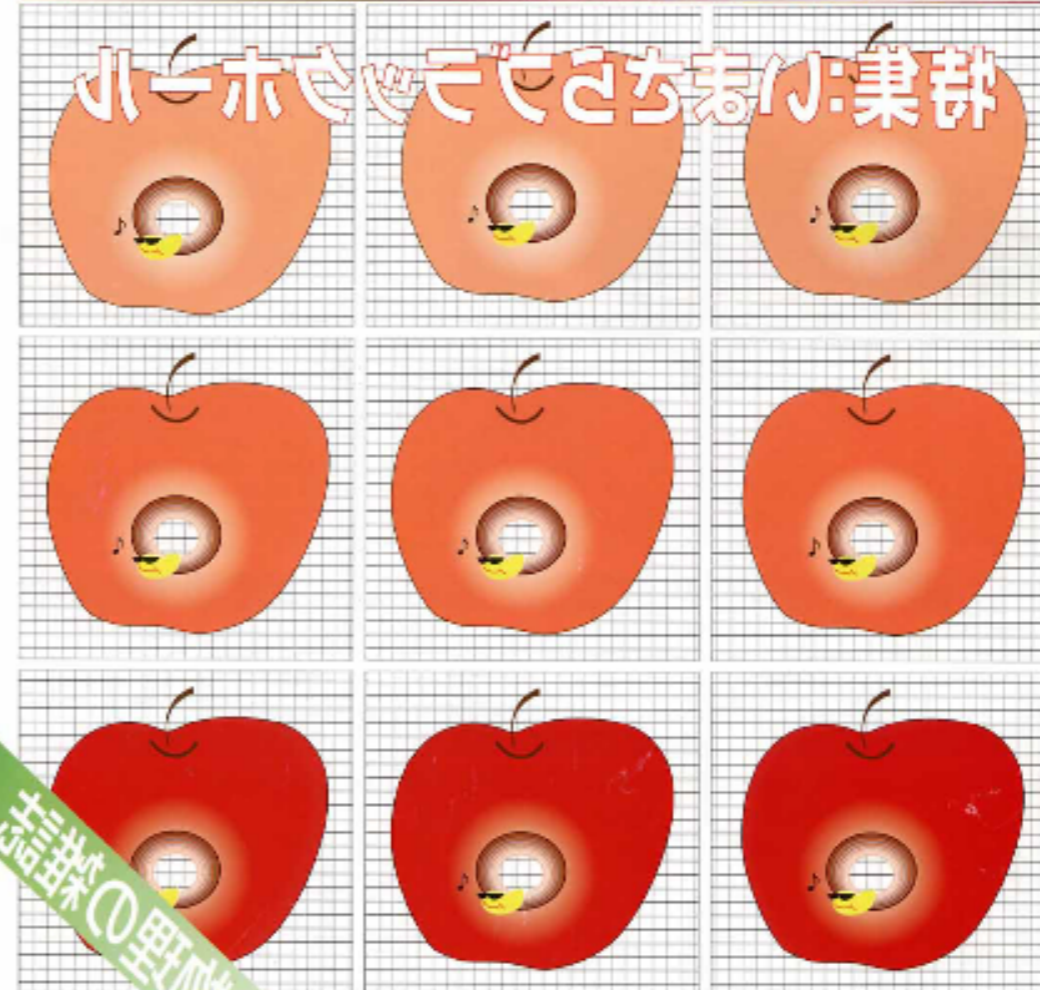
創刊号 1972年10月号
発行所 株式会社朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1
電話 03-5561-1111
FAX 03-5561-1112
E-MAIL info@parity.jp
ISSN 1349-8993
PHYSICS TODAY 掲載

ブラックホールの誕生に迫る | ブラックホールは黒いのか

ブラックホールはどう見えるか | 明るく輝く黒い穴

ワームホールは、通過可能か? | いまこそブラックホール? | ホワイトホールの死?

特集:いまさらブラックホール



物理の雑誌

physical science magazine
Physics Today 掲載

パリテイ

parity
Volume No. 05

朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1
電話 03-5561-1111
FAX 03-5561-1112
E-MAIL info@parity.jp

編集人 大橋 隆
村田 誠吾

印刷所 朝倉書店
〒100-0001 東京都千代田区千代田1-1-1

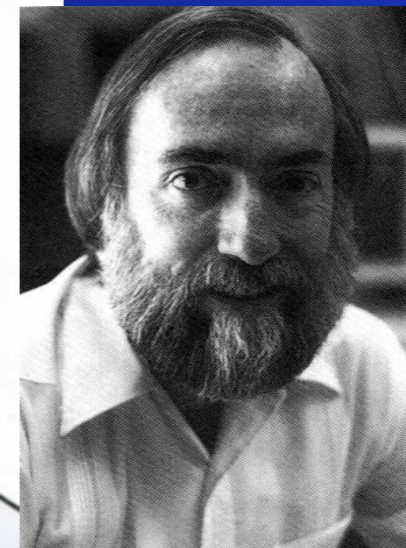
発行 | 朝倉書店 | 00000

通過可能なワームホール？



『コンタクト』

幼い頃から宇宙に興味をもっていた天文学者エリー。彼女はある日、宇宙からの謎の電波をキャッチする。電波の発信源は、26光年先の恒星ベガ付近。電波を解読すると、恒星間移動装置の設計図が隠されていた——。ジョディ・フォスター主演で映画化もされて、話題となった。



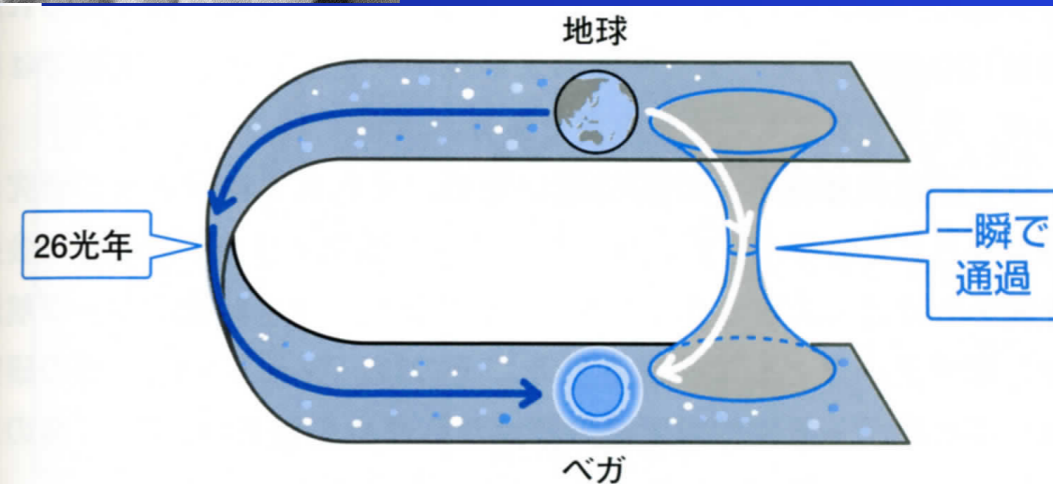
ソーン

ブラックホールを使って移動する小説を書いたけど、正しいかな？

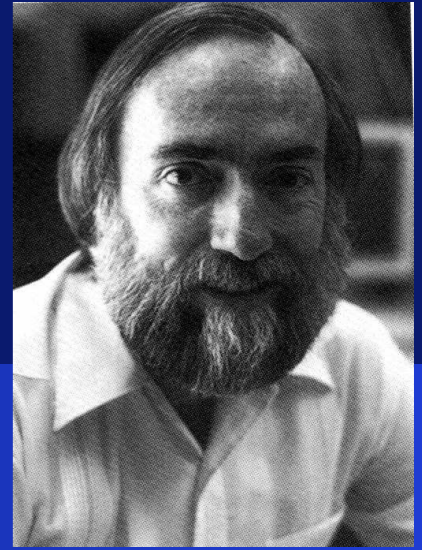
ワームホールにしたほうが現実性が増すよ。

では、そうしよう。

セーガン

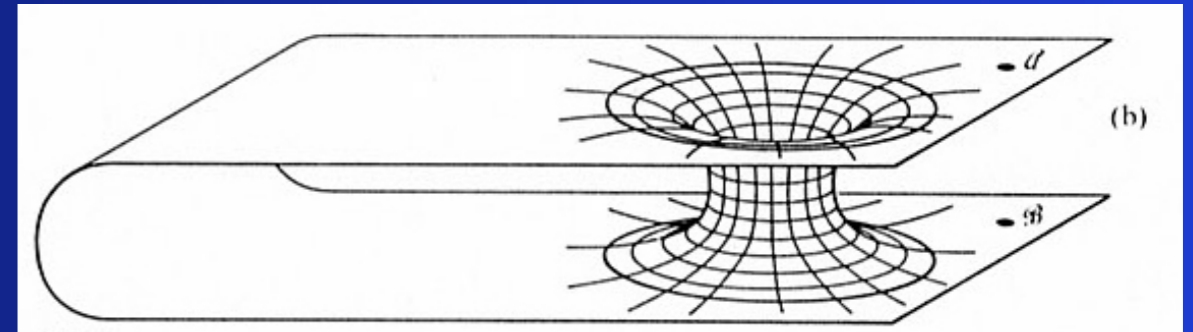


通過できるワームホールは 不可能ではない

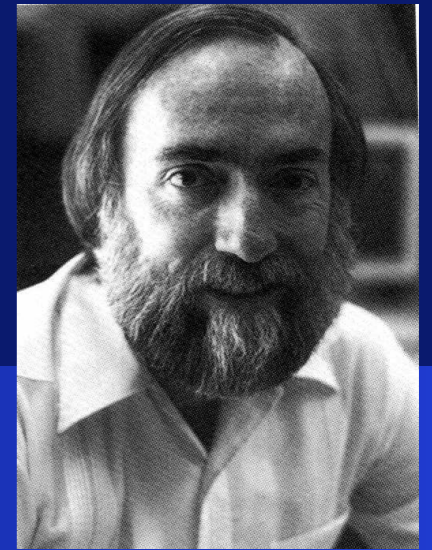


Morris, Thorne, Am. J. Phys 56 (1988) 395

「球対称で静的，一般相対性理論，漸近的平坦，潮汐力が人間に耐えられる大きさ，有限時間に通過可能」なワームホールは，**負のエネルギー**を考えれば不可能ではない。



通過できるワームホールは 不可能ではない

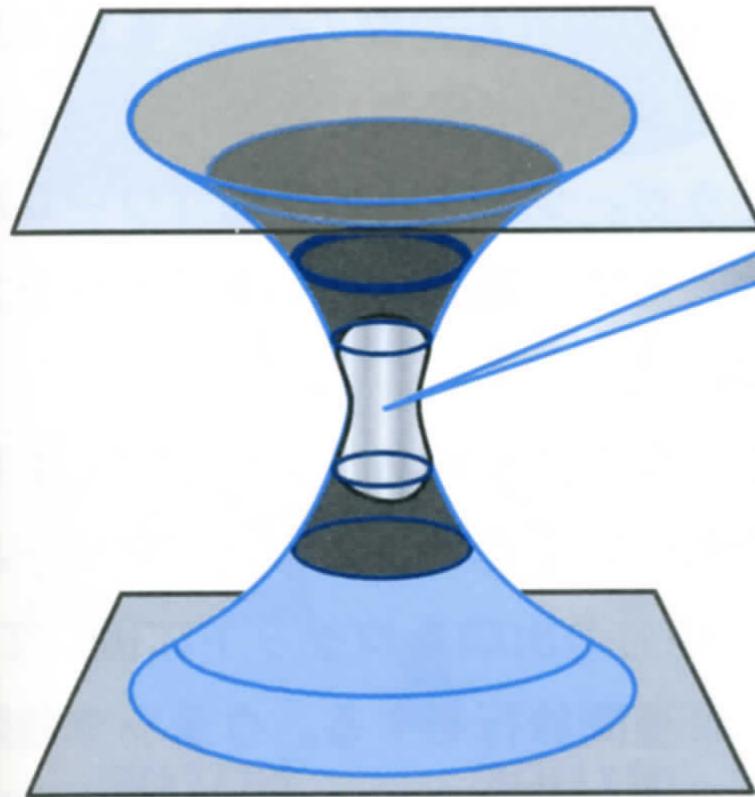


斥力を及ぼす「負のエネルギー」



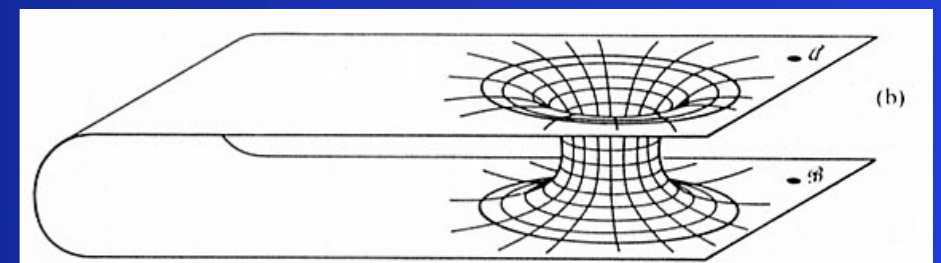
ソーン

ワームホールは、モノが入るとすぐ潰れてしまう。ワームホールを通過するには……。
そうだ、重力に逆らって、ワームホールを支える物質があればいいぞ!

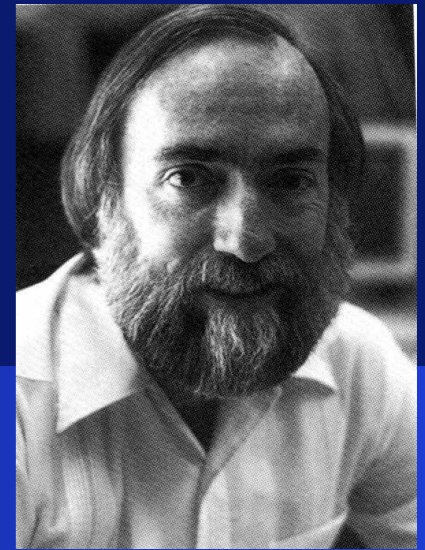


「エキゾチック」な物質
負のエネルギーを持ち、
周囲に万有斥力(反発力)
をもたらす。これをワーム
ホール内に満たせば、通
行可能になる。

万有斥力を考えるのは「禁じ手」とされていたけど、偉いソーン先生が言い出したので、解禁されたんだ。



過去へ行くタイムマシンもできる！



VOLUME 61, NUMBER 13

PHYSICAL REVIEW LETTERS

26 SEPTEMBER 1988

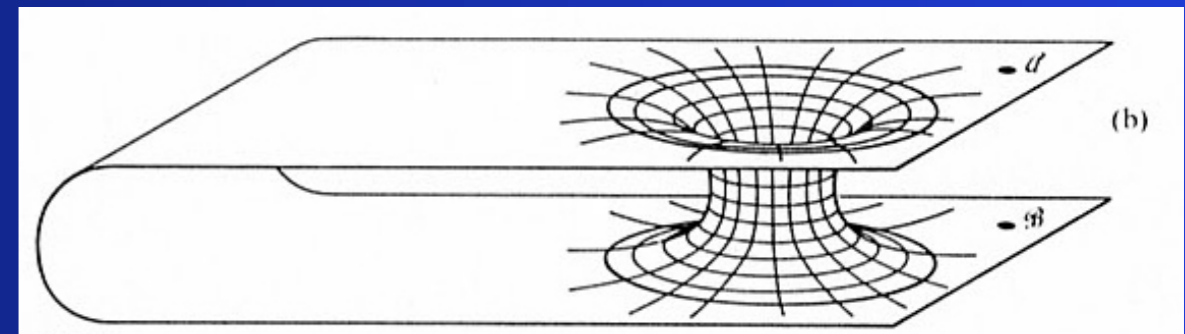
Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition

Michael S. Morris, Kip S. Thorne, and Ulvi Yurtsever

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

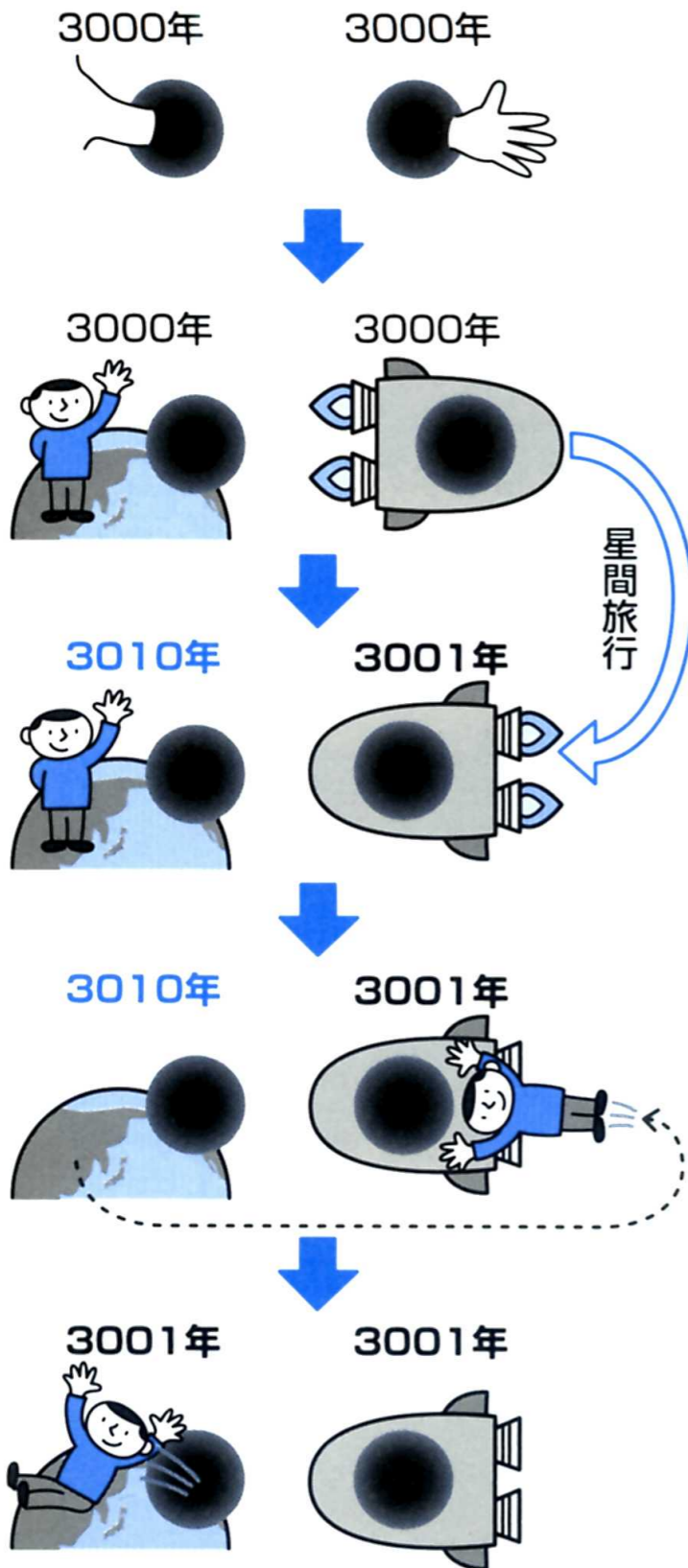
(Received 21 June 1988)

It is argued that, if the laws of physics permit an advanced civilization to create and maintain a wormhole in space for interstellar travel, then that wormhole can be converted into a time machine with which causality might be violatable. Whether wormholes can be created and maintained entails deep, ill-understood issues about cosmic censorship, quantum gravity, and quantum field theory, including the question of whether field theory enforces an averaged version of the weak energy condition.



Morris, Thorne, Yurtsever, PRL 61 (1988) 3182
片方の出口を光速近くまでに加速することができれば、
旅行者の時間は遅れるので、過去へ旅することができる。

ワームホールを使った過去への旅

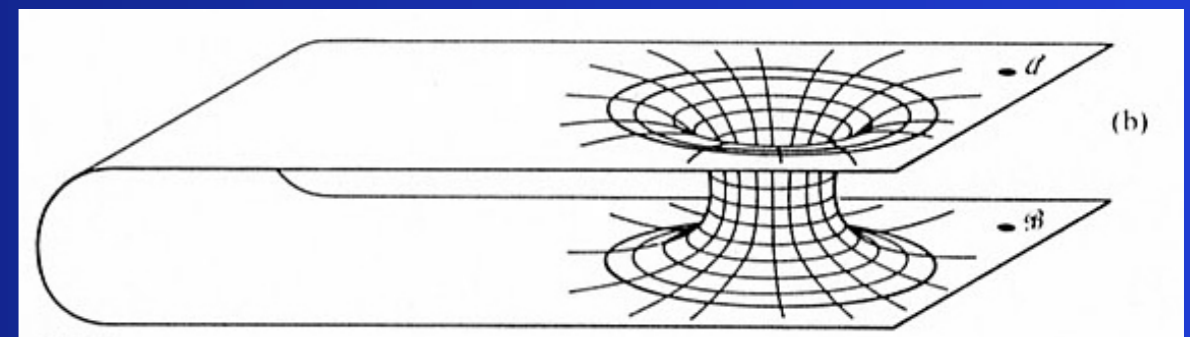
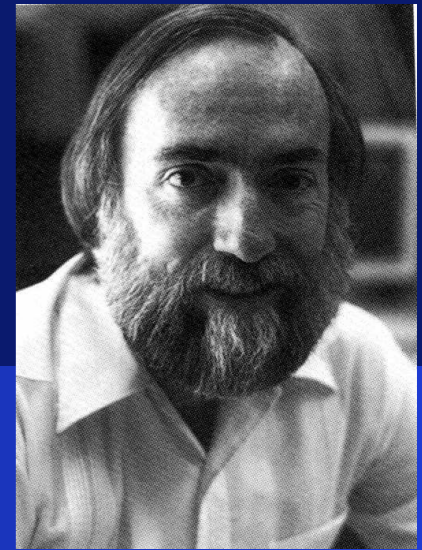


西暦3000年、ワームホールを使ったタイムマシンが完成。一方から手を入れると瞬間的に(時間ゼロで)もう一方から出てくる。

ワームホールの一方の口を地球に置き、もう一方の口をロケットに置く。そしてロケットで光速に近い速さで星間旅行をする。ロケットが地球に帰還した時、ワームホールの2つの口の間には時間差ができています。

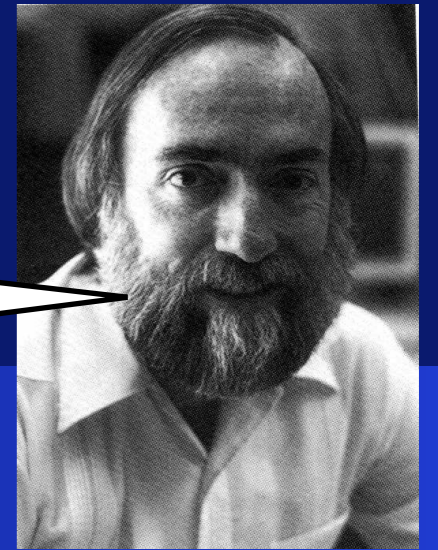
3010年の地球の人が3001年のロケットの口に行き、中に飛び込む。

「3001年」のロケットの口に入ったので、「3001年」の地球に出る。つまり過去への旅をしたことになる。



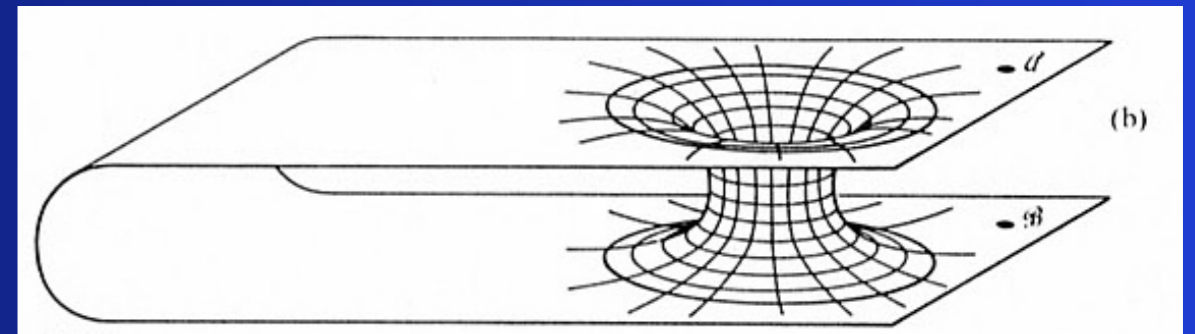
本当に？

タイムマシンはできる！



Morris, Thorne, Am. J. Phys 56 (1988) 395

「球対称で静的，一般相対性理論，漸近的平坦，潮汐力が人間に耐えられる大きさ，有限時間に通過可能」なワームホールは，**負のエネルギー**を考えれば不可能ではない。

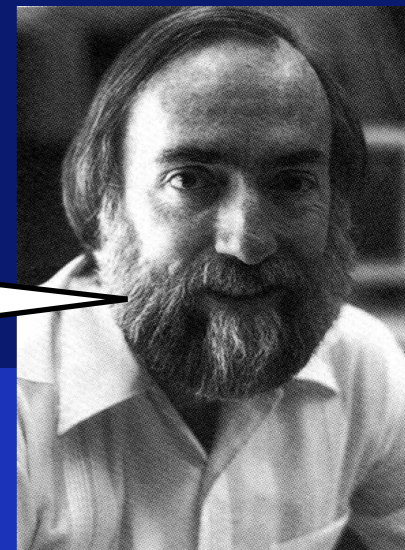


Morris, Thorne, Yurtserver, PRL 61 (1988) 3182

片方の出口を光速近くまでに加速することができれば，**旅行者の時間は遅れる**ので，**過去へ旅**することができる。

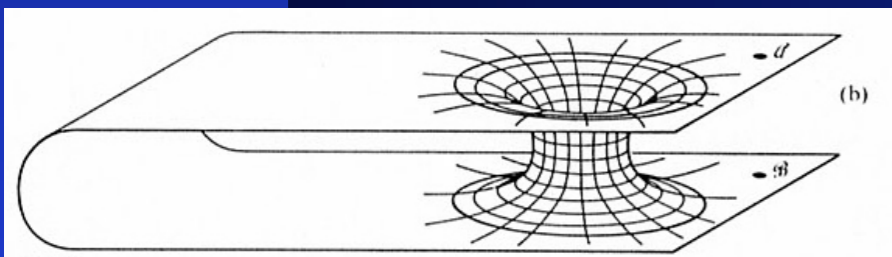
本当に？

タイムマシンはできる！



- もしワームホールが存在して、
- さらにもし負のエネルギーが安定に存在して、
- さらにもしワームホールが通過可能で、
- さらにもし人類が通過可能な技術を持ち、
- さらにもし出口を光速近くで動かすことができるならば、
- さらにもし旅行者が別ルートで同じ場所に戻れば、

タイムマシンに成り得る



No !

時間順序保護仮説を提案



そもそもワームホールは安定なのか？

PHYSICAL REVIEW D 66, 044005 (2002)

Fate of the first traversible wormhole: Black-hole collapse or inflationary expansion

Hisa-aki Shinkai*

Computational Science Division, Institute of Physical & Chemical Research (RIKEN), Hirosawa 2-1, Wako, Saitama, 351-0198, Japan

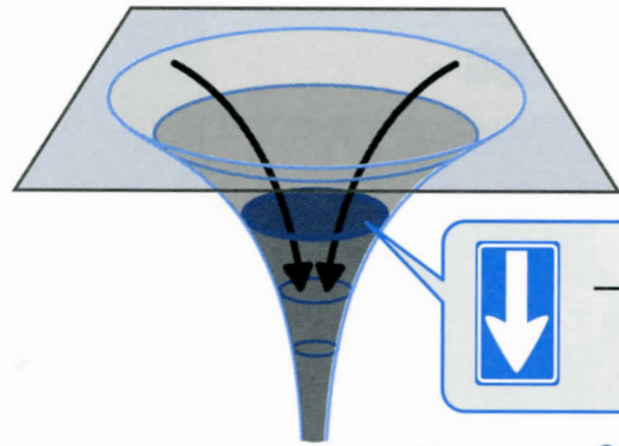
Sean A. Hayward[†]

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

(Received 10 May 2002; published 16 August 2002)

We study numerically the stability of the first Morris-Thorne traversible wormhole, shown previously by Ellis to be a solution for a massless ghost Klein-Gordon field. Our code uses a dual-null formulation for spherically symmetric space-time integration, and the numerical range covers both universes connected by the wormhole. We observe that the wormhole is unstable against Gaussian pulses in either exotic or normal massless Klein-Gordon fields. The wormhole throat suffers a bifurcation of horizons and either explodes to form an inflationary universe or collapses to a black hole if the total input energy, is, respectively, negative or positive. As the perturbations become small in total energy, there is evidence for critical solutions with a certain black-hole mass or Hubble constant. The collapse time is related to the initial energy with an apparently universal critical exponent. For normal matter, such as a traveller traversing the wormhole, collapse to a black hole always results. However, carefully balanced additional ghost radiation can maintain the wormhole for a limited time. The black-hole formation from a traversible wormhole confirms the recently proposed duality between them. The inflationary case provides a mechanism for inflating, to macroscopic size, a Planck-sized wormhole formed in space-time foam.

一方通行か、双方向可能か



ブラックホールの境界面は一方通行のみ許される。



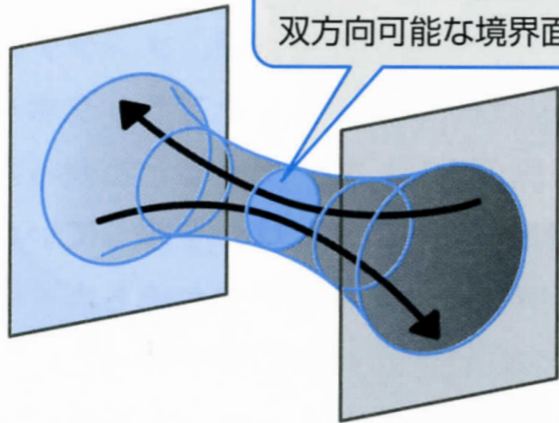
一方通行の境界面

重力崩壊では境界面が一方通行になる。

ブラックホールの蒸発現象(7章で説明)では境界面が双方向可能に変化する。



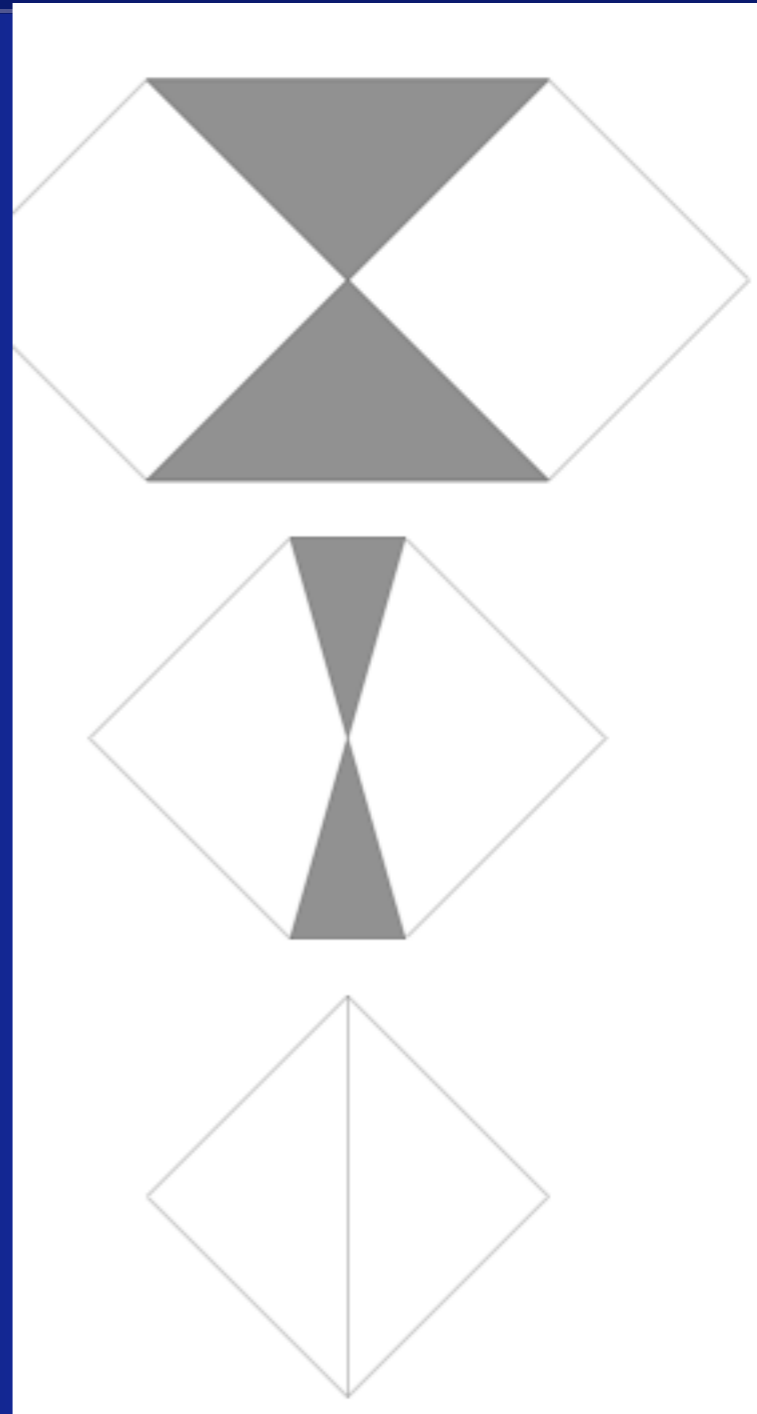
双方向可能な境界面



ワームホールの境界面は双方向通行が可能である(はず)。



ホライズン(境界面)をキーワードにして、ブラックホールとワームホールを同じように扱えるのではないかな?



ワームホールは ブラックホールか膨張宇宙に変化する！

Bifurcation of the horizons – go to a Black Hole or Inflationary expansion

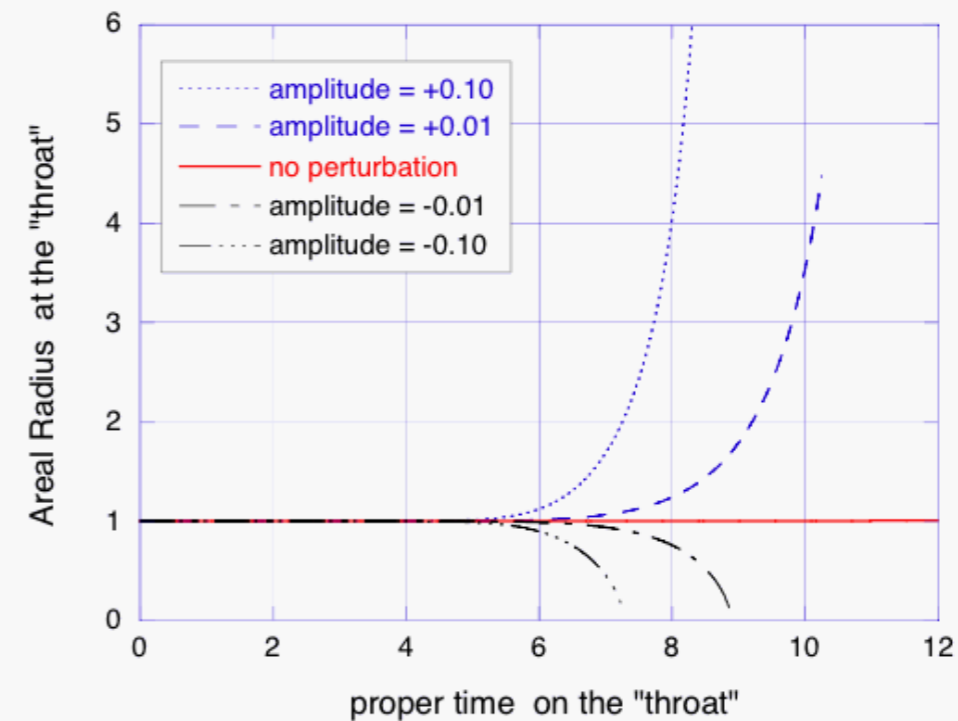
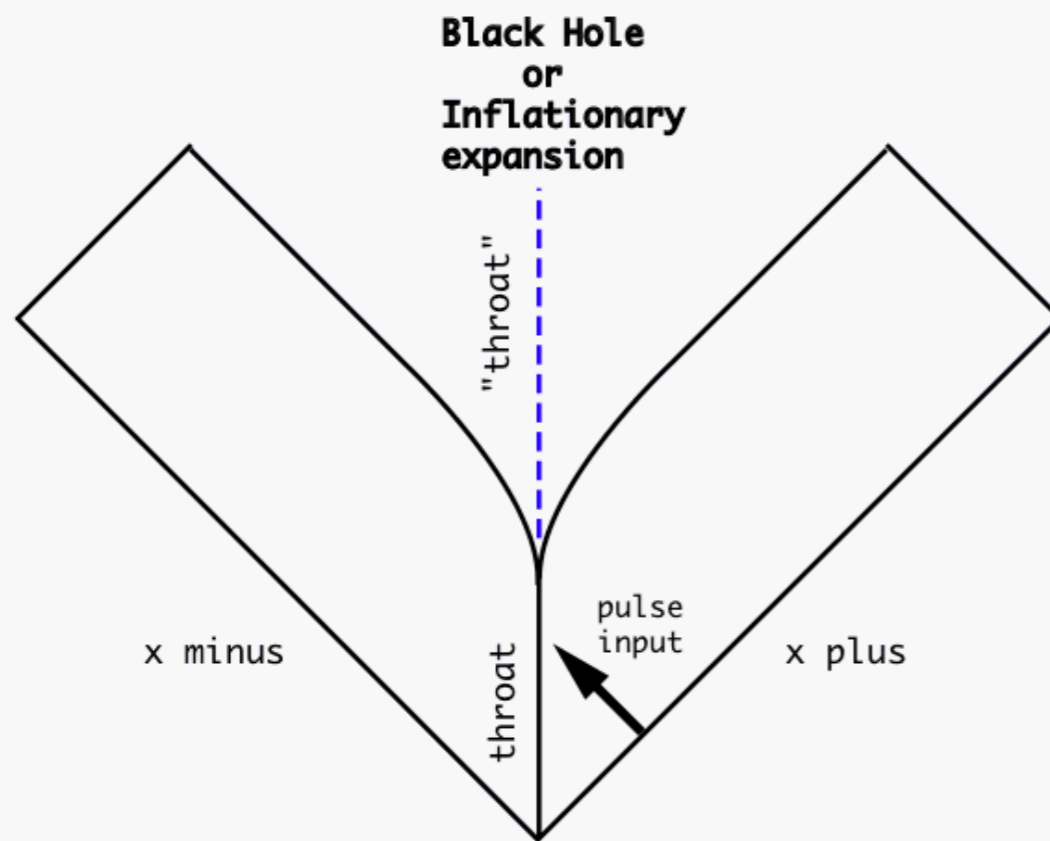


Figure 4: Partial Penrose diagram of the evolved space-time.

Figure 6: Areal radius r of the "throat" $x^+ = x^-$, plotted as a function of proper time. Additional negative energy causes inflationary expansion, while reduced negative energy causes collapse to a black hole and central singularity.

ワームホールを維持しながら通過可能

Travel through a Wormhole
-- with Maintenance Operations!

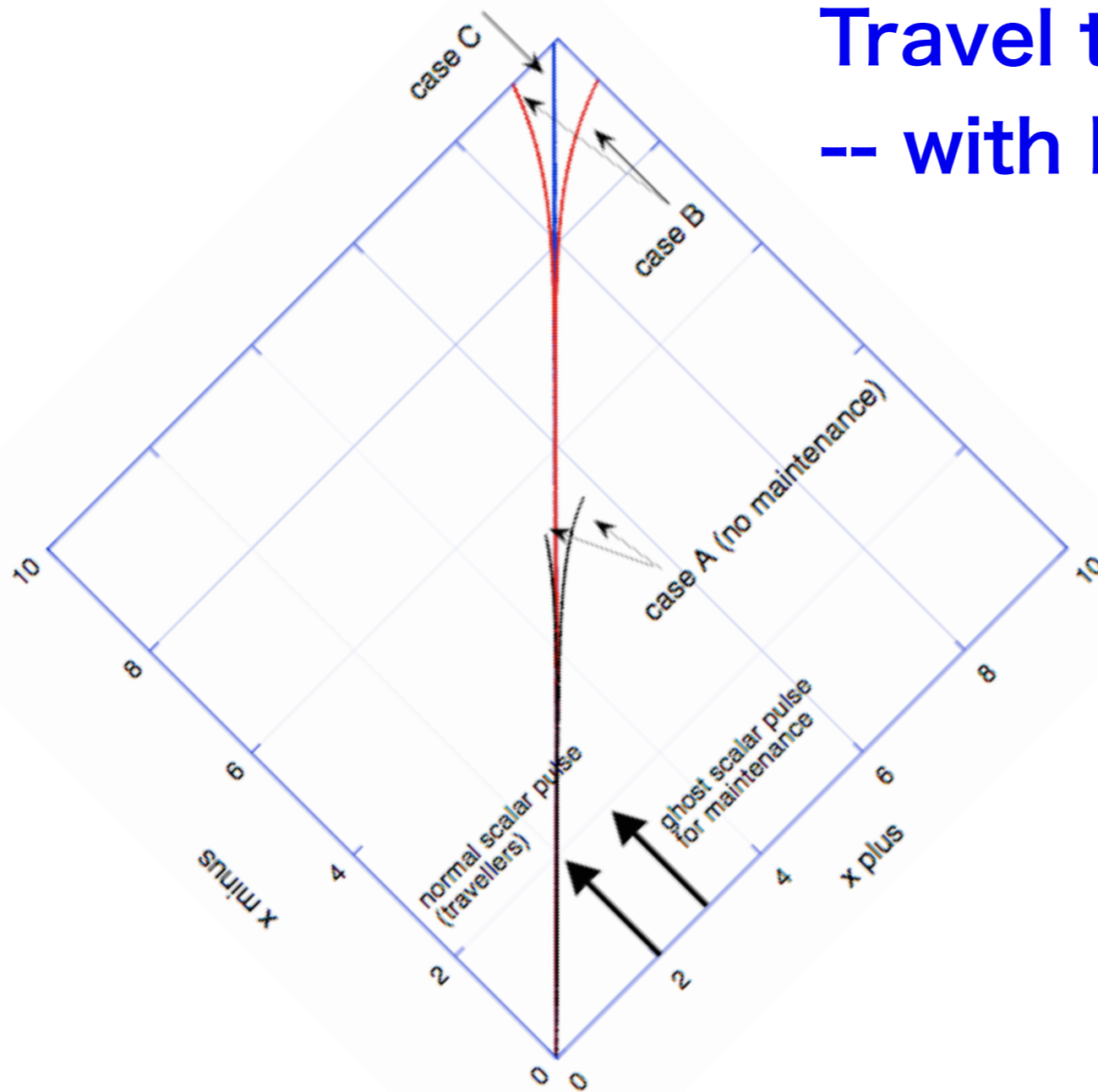
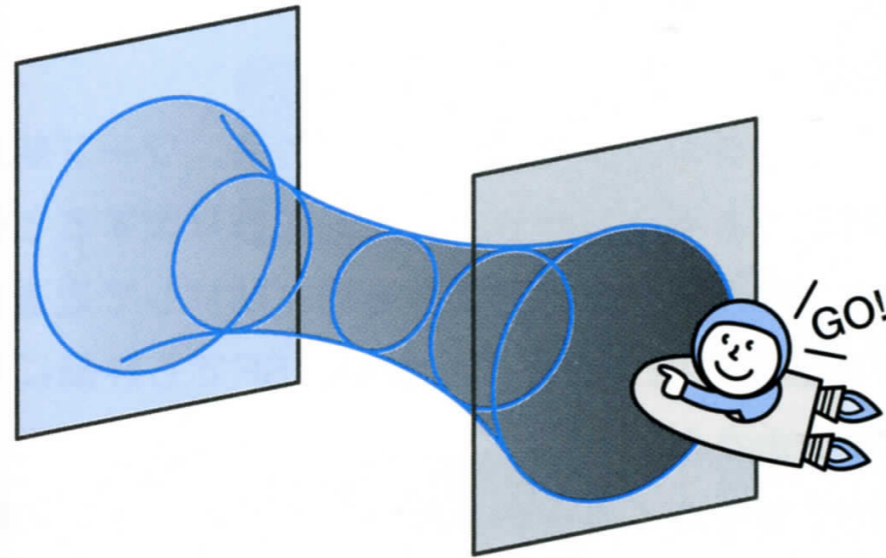
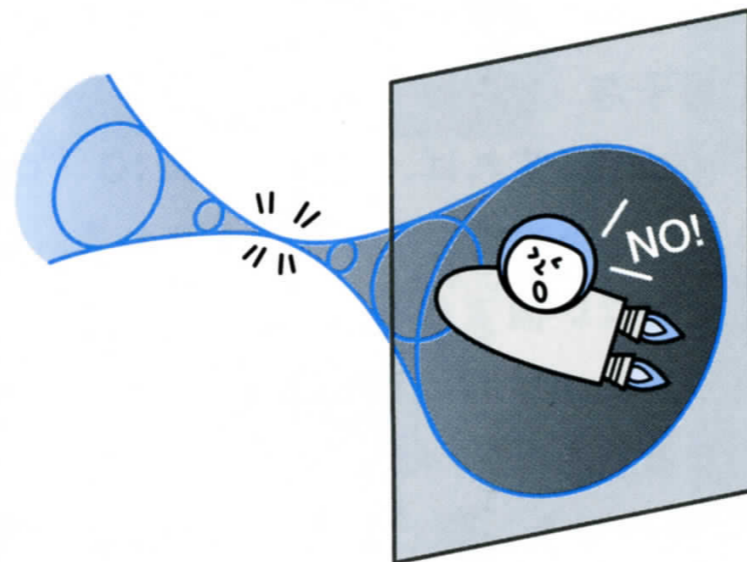


Figure 11: A trial of wormhole maintenance. After a normal scalar pulse, we signalled a ghost scalar pulse to extend the life of wormhole throat. The travellers pulse are commonly expressed with a normal scalar field pulse, $(\tilde{c}_a, \tilde{c}_b, \tilde{c}_c) = (+0.1, 6.0, 2.0)$. Horizon locations $\vartheta_+ = 0$ are plotted for three cases:
(A) no maintenance case (results in a black hole),
(B) with maintenance pulse of $(c_a, c_b, c_c) = (0.02390, 6.0, 3.0)$ (results in an inflationary expansion),
(C) with maintenance pulse of $(c_a, c_b, c_c) = (0.02385, 6.0, 3.0)$ (keep stationary structure upto the end of this range).

ワームホールを通過できるか

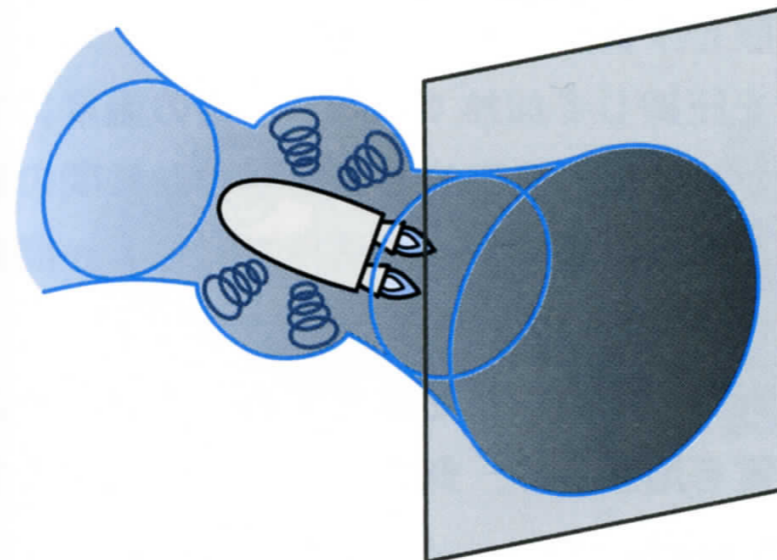


負のエネルギーで支えられているワームホールの中に、正のエネルギーの人間とロケットが入るとどうなる？



結論1

何もしないと、ワームホールは潰れてブラックホールになってしまう。



結論2

負のエネルギービームをうまく与えると、ワームホールを潰さずに通過することも可能である。

NewScientist

25 MAY 2002 No2344 WEEKLY £2.30 US\$3.95

Quantum foot in the door

ALL around us are tiny doors that lead to the rest of the Universe. Predicted by Einstein's equations, these quantum wormholes offer a faster-than-light short cut to the rest of the cosmos—at least in principle. Now physicists believe they could open these doors wide enough to allow someone to travel through.

Quantum wormholes are thought to be much smaller than even protons and electrons, and until now no one has modelled what happens when something passes through one. So Sean Hayward at Ewha Womans University in Korea and Hisa-aki Shinkai at the Riken Institute of Physical and Chemical Research in Japan decided to do the sums.

They have found that any matter travelling through adds positive energy to the wormhole. That unexpectedly collapses it into a black hole, a supermassive region with a gravitational pull so strong not even light can escape.

But there's a way to stop any would-be traveller being crushed into oblivion. And it lies with a strange energy field nicknamed "ghost radiation". Predicted by quantum theory, ghost radiation is a negative energy field that dampens normal positive energy. Similar effects have been shown experimentally to exist.

Ghost radiation could therefore be used to offset the positive energy of the travelling matter, the researchers have found. Add just the right amount and it should be possible to prevent the wormhole collapsing—a lot more and the wormhole could be widened just enough for someone to pass through.

It would be a delicate operation, however. Add too much negative energy, the scientists discovered, and the wormhole will briefly explode into a new universe that expands at the speed of light, much as astrophysicists say ours did immediately after the big bang.

For now, such space travel remains in the realm of thought experiments. The CERN Large Hadron Collider in Switzerland is expected to generate one mini-black hole per second, a potential source of wormholes through which physicists could try to send quantum-sized particles. But sending a person would be another thing. To keep the wormhole open wide enough would take a negative field equivalent to the energy that would be liberated by converting the mass of Jupiter.

Charles Choi

More at: www.arxiv.org/abs/gr-qc/0205041

そもそもワームホールは安定なのか？

PHYSICAL REVIEW D **88**, 064027 (2013)

Wormholes in higher dimensional space-time: Exact solutions and their linear stability analysis

Takashi Torii^{1,*} and Hisa-aki Shinkai^{2,3,†}

¹*Department of General Education, Osaka Institute of Technology, Asahi-ku, Osaka 535-8585, Japan*

²*Department of Information Systems, Osaka Institute of Technology, Kitayama, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan*

³*Computational Astrophysics Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN),
Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

(Received 6 August 2013; published 13 September 2013)

We derive the simplest traversable wormhole solutions in n -dimensional general relativity, assuming static and spherically symmetric space-time with a ghost scalar field. This is the generalization of the Ellis solution (or the so-called Morris-Thorne's traversable wormhole) into a higher dimension. We also study their stability using linear perturbation analysis. We obtain the master equation for the perturbed gauge-invariant variable and search their eigenvalues. Our analysis shows that all higher dimensional wormholes have an unstable mode against the perturbations with which the throat radius is changed. The instability is consistent with the earlier numerical analysis in the four-dimensional solution.

DOI: [10.1103/PhysRevD.88.064027](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.064027)

PACS numbers: 04.20.-q, 04.40.-b, 04.50.-h

万有引力の法則

ニュートンが、リンゴが落ちることから重力の原因が「万有引力である」と気づいた話は実話らしい。

万有引力の法則

すべての物体は引力で引き合う。質量 M と m の物体が距離 r だけ離れているとき、万有引力の大きさ F は

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.5)$$

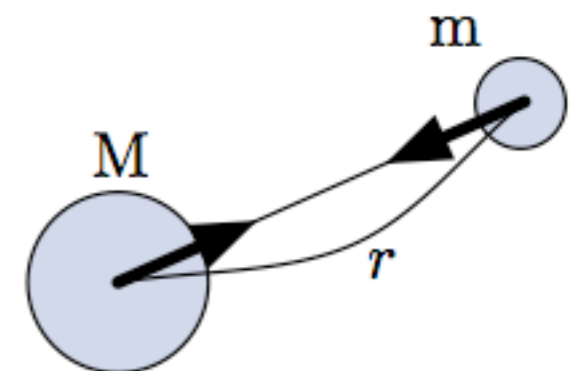
である。 G は定数で、 $G = 6.67 \times 10^{-11} [\text{Nm}^2/\text{kg}^2]$ である。

地球表面での重力

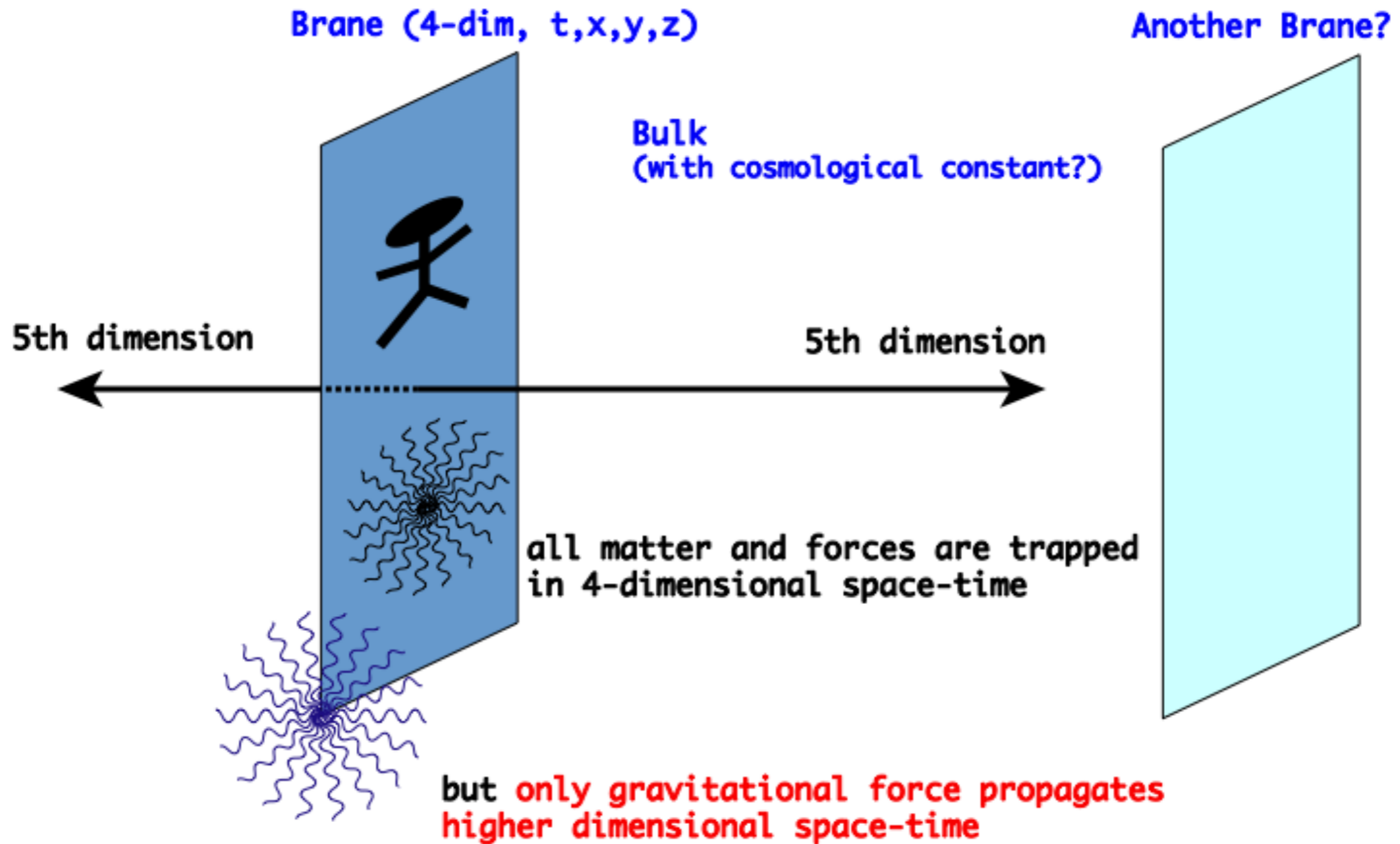
地球の表面での万有引力の大きさはほぼ一定で、質量 m の物体に対して

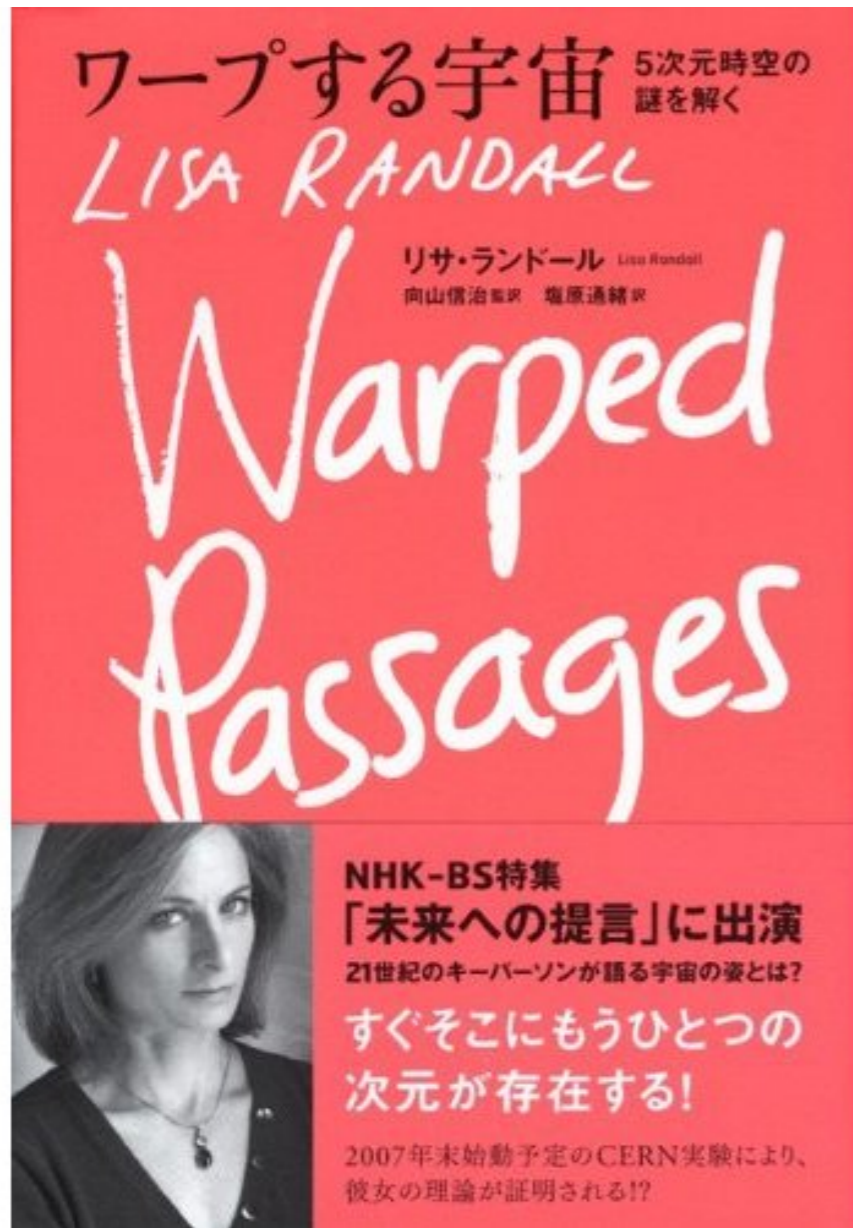
$$F = mg \quad (2.6)$$

である。 g は重力加速度と呼ばれ、 $g = 9.8 [\text{m}/\text{s}^2]$ である。

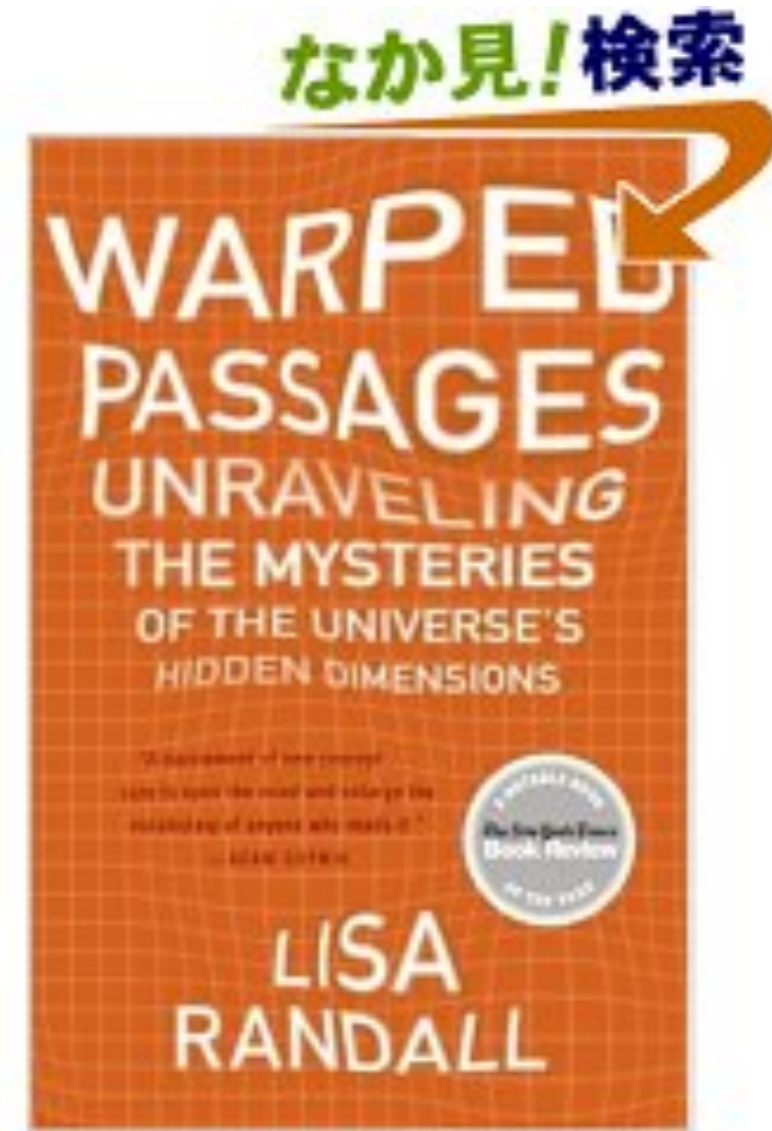


Brane-World model



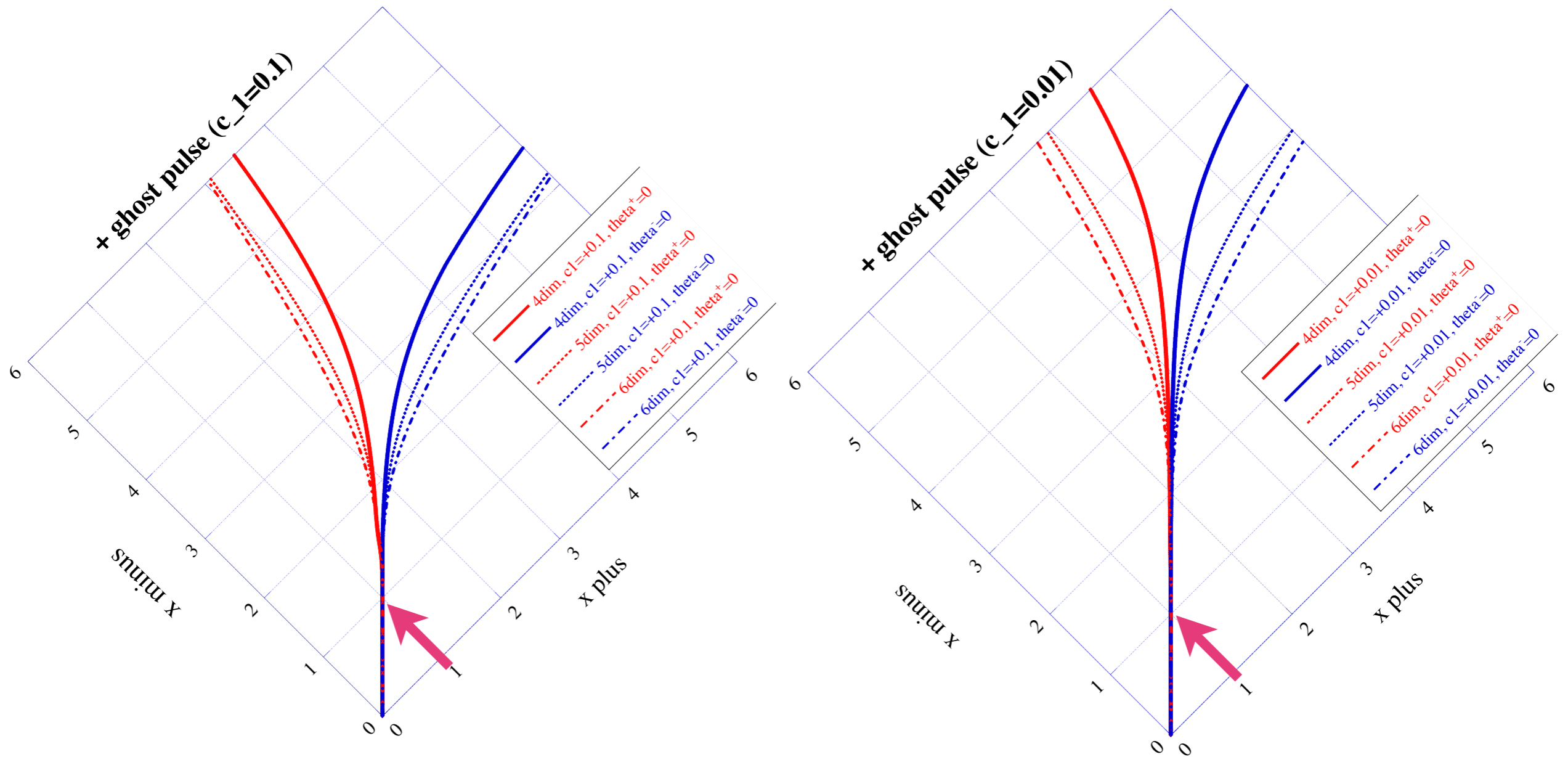


*フアン・ガルシア・ベリド、アンドリュー・シャンブリン、ロベルト・エンパラン、ルース・グレゴリー、ステイブ・ホーキング、ゲーリー・T・ホロヴィッツ、ネマニャ・カロパー、ロバート・C・マイヤーズ、ハーヴェイ・S・リオール、真貝寿明、白水徹也、トビー・ワイズマンなど。

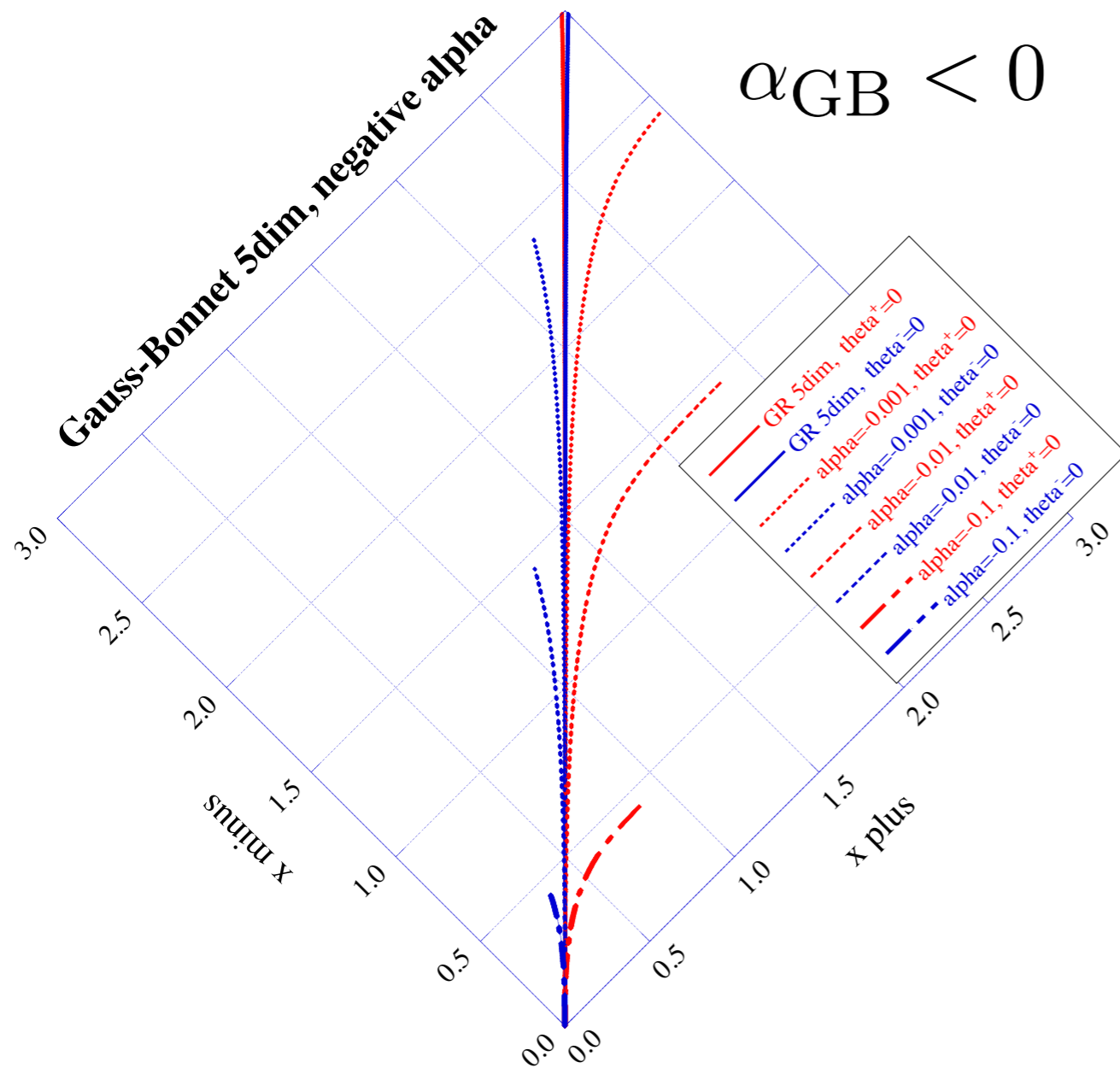


*They include Juan Garcia-Bellido, Andrew Chamblin, Roberto Emparan, Ruth Gregory, Stephen Hawking, Gary T. Horowitz, Nemanja Kaloper, Robert C. Myers, Harvey S. Reall, Hisa-aki Shinkai, Tetsuya Shiromizu, and Toby Wiseman.

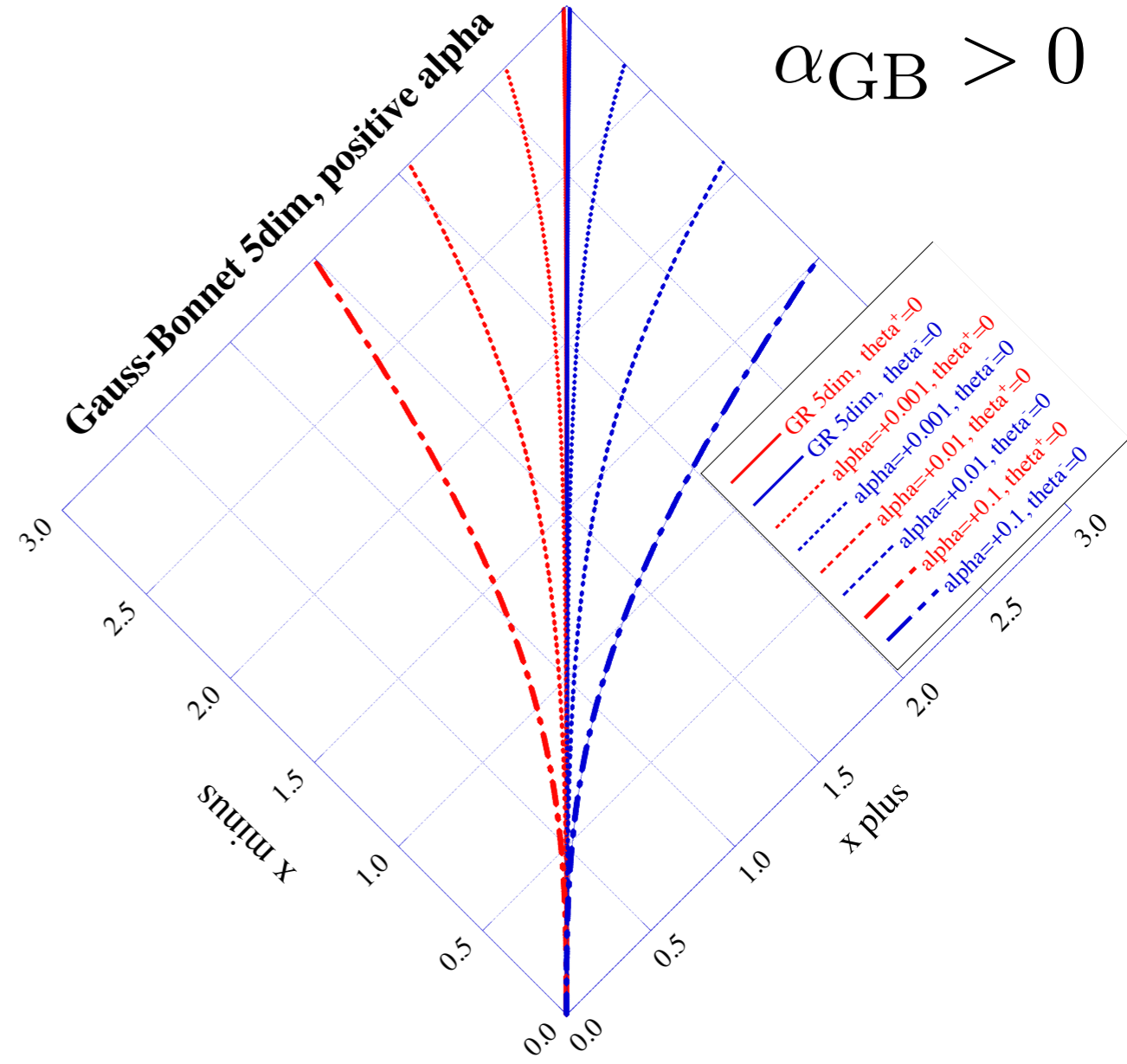
ghost pulse (positive amp.) input



negative energy input \rightarrow throat inflates



BH formation



throat inflates

$$S = \int_{\mathcal{M}} d^{N+1}x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2\kappa^2} \{ \alpha_1 \mathcal{R} + \alpha_2 \mathcal{L}_{\text{GB}} \} + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right]$$

where $\mathcal{L}_{\text{GB}} = \mathcal{R}^2 - 4\mathcal{R}_{\mu\nu}\mathcal{R}^{\mu\nu} + \mathcal{R}_{\mu\nu\rho\sigma}\mathcal{R}^{\mu\nu\rho\sigma}$

ドラえもんの世界を、学問してみれば。

各界の第一人者が講師となって、タイムトラベル論、デザイン論、コミュニティ論を誌上講義。「ドラえもん」を題材に、わかりやすく解説します。

タイムトラベル論 講師

眞貝寿明 Masaki Shinkai 大阪工業大学情報科学部教授

1966年東京都生まれ。早稲田大学理学部物理学科、同大学大学院修士課程理学部物理学専攻、ワシントン大学ペンシルバニア州立大学理学部物理学専攻を経て、2006年より大阪工業大学専門は、一般相対性理論、宇宙論。

過去や未来へ行くことは、果たして可能なのか？

タイムマシンが可能かどうかを議論する学問は、物理学です。アインシュタインがくりあげた「相対性理論」と、ミクロの世界を扱う量子物理学の、両方に絡む問題です。

浦島太郎が竜宮城から帰ってきたら、知り合いは一人もおらず、自分だけ未来に着きました。このようないわゆる「ウラシマ効果」の話は世界中にありますが、現代物理学の理論上、未来へのタイムトラベルは実際に可能です。

光速に近いロケットを作って、そのロケットに10年間乗り、地球に戻ってきたら100年後になる、という話を聞いたことがあるでしょう。時間の進み方は状況によって異なる、というのが相対性理論の結論の1つです。ロケットの中の時間の進み方と、地球の時間の進み方が違うので、地球に戻ってきたら、100年後の未来だったというウラシマ効果がおきるのです。実験でも証明されています。素粒子を光速に近いスピードまで加速すると、崩壊するまでの寿命が延びるのです。過去に行く話はどうかでしょうか。下

ルは、矛盾なくOKです。未来に行っても、こうなっていたのか、と知るだけで、情報が過去に戻ってくるわけではないからです。一方、過去へ行くタイムトラベルでは、さまざまなパラドックスが考えられます。「ドラえもん」を題材に、どのようなパラドックスが生じるか、紹介しましょう。

過去へのタイムトラベルと、さまざまなパラドックス

まず、過去を変えてしまったら、現在の自分も消えてしまうかもしれません。「プロポーズ作戦」では、パパとママがきちんと結婚するように、のび太とドラえもんがタイムマシンで12年前のプロポーズの日に戻ります。この話に、いわゆる「親殺しのパラドックス」と呼ばれる矛盾が登場します。タイムマシンで過去に行って親を殺してしまおうと、自分が存在しなくなる問題を、ソフトに変えていますね。

「あやうしライオン仮面」では、ドラえもんがタイムマシンで来月号の漫画雑誌を買ってきて、それを元に締め切りを迫られた漫画家が描く話ですが、ここには「作者不明のパラドックス」が提示されています。未来から持ち帰った自分の漫画を本人が描き写したから、その作品は誰がはじめに描いたものか、という問題ですね。情報は無から生じない。何もなしどころから、意味のある情報が発生したとなると、因果律に反したことになります。

このようなパラドックスがあると、過去へのタイムトラベルは否定されるのでしょうか。いえいえ、物理学者は解決策も考えています。その1つが、

「プロポーズ作戦」(てんとう虫コミックス1巻)

12回目の結婚記念日の夜、パパとママが、どちらがプロポーズしたかで、大ゲンカ。のび太とドラえもんが、真相を確かめるべく12年前にタイムマシンで戻ってみると……



親殺しのパラドックス&事後選択モデル

過去に行って親を殺すと自分が存在しなくなるパラドックスと、未来で矛盾となる出来事はあらかじめ除外されるという考え方。

「あやうしライオン仮面」(てんとう虫コミックス3巻)

フニャコフニャ夫の人気連載漫画「ライオン仮面」の来月号を読みたくなったドラえもんは、1か月後の未来へ、締め切りを迫られた先生は、ドラえもんから来月号をもらって……



作者不明のパラドックス

フニャコフニャ夫のように、未来から持ち帰った自分の漫画を描き写した場合、その作品の本当の作者は、いったい誰になるのか。

「のび太も天才になれる?」(てんとう虫コミックス32巻)

ママに説教され、家出しようとして宇宙船ポートでワープしたら、自分が住む町とそっくりなところに到着。学校では問題が簡単すぎて満点はばり。天才になったとはしゃぐが……



パラレルワールド

パラレルワールドの存在を肯定すれば、いくつもある並行世界の中で、その中のひとつを選択しながら生きていくことになる。

ラえもん」は未来から過去へ来たわけですが、過去へのタイムトラベルが可能かどうかは現時点では未解決です。

空間も時間もジャンプする、ワームホールという存在。

キップ・ソーンというアメリカの物理学者が、1988年に「ワームホール」を使ったタイムトラベルの方法を発表しました。ワームホールは、空間も時間もジャンプできる「虫食い」のようなものです。相対性理論は、時間と空間の物理学ですが、ワームホールのような時空のトンネル構造が方程式の解として存在します。ソーンは、ワームホール型タイムマシンを使えば、理論的には、過去へのタイムトラベルが可能である、という論文を発表し、我々に夢と希望を与えてくれました。

ところで、タイムマシンが実現可能だとすると、いろいろ矛盾が生じます。物事には順序があり、原因が先にあって結果が後にあるという因果律を基本とする物理学では、矛盾があつては許されません。未来へ行くタイムトラベ

エヴェレットによる多世界解釈です。量子論の確率解釈をマクロな世界に拡張したうえで、我々の世界は、多くの同じような世界(パラレルワールド)から1つ1つを選択することで実現しているという考え方です。

「のび太も天才になれる?」は、ある惑星では、いまの世界ののび太が天才になっていた、という一種のパラレルワールドものです。「あべこべ惑星」も、すべてがあべこべだけど、一種のパラレルワールドといえるでしょう。

ドイツでは、親殺しのパラドックスを多世界解釈で解決することを提案しました。タイムマシンで過去に行つて親を殺した時点で、その世界は、自分が存在しない未来へ分岐する。自分自身は、パラレルワールドを移動しただけ、と考えれば、因果関係に矛盾は生じません。ただ、過去を変えて世界を変えたといつても、変わっていない世界が、常に存在することになります。

最近、パラドックスの解決策として「事後選択モデル」という考え方が提案されました。「未来でパラドックスになりそうな出来事は、あらかじめ除外される(ような作用はたらく)」という考え方です。パラドックスが起らない場合のみ、過去の改変が許されるということですね。先ほどの「プロポーズ作戦」では、のび太とドラえもんの活躍で、パパとママが元のサヤにおさまります。のび太が生まれるためには無矛盾ですから、この話はまさに「事後選択モデル」といえるでしょう。「ドラえもん」には、タイムトラベル論の要素が、矛盾する問題点を含めてきちんと描かれています。

1 相対性理論

アインシュタインによって発表された特殊相対性理論と一般相対性理論。2次元の空間に時間を含めると、3次元の空間になる。1905年に、特殊相対性理論を発表した。特殊相対性理論は、光速を一定とする。特殊相対性理論は、光速を一定とする。特殊相対性理論は、光速を一定とする。

2 ウラシマ効果

地球を離れた遠征隊が竜宮城から帰ってきたら、知り合いは一人もおらず、自分だけ未来に着きました。このようないわゆる「ウラシマ効果」の話は世界中にありますが、現代物理学の理論上、未来へのタイムトラベルは実際に可能です。

3 光速

光の速さのこと。1秒間で約30万キロメートル進む。地球の周囲が約4万キロメートルなので、1秒間で地球を7.5周するスピードだ。



4 キングソーン

アメリカの物理学者、カリフォルニア工科大学教授、1988年に「ワームホール」を使ったタイムトラベルの方法を発表しました。ワームホールは、空間も時間もジャンプできる「虫食い」のようなものです。相対性理論は、時間と空間の物理学ですが、ワームホールのような時空のトンネル構造が方程式の解として存在します。

5 ワームホール

虫がワームをくりぬいて進もうとするように、時空の歪みを利用して進むことができる。ワームホールは、空間も時間もジャンプできる「虫食い」のようなものです。相対性理論は、時間と空間の物理学ですが、ワームホールのような時空のトンネル構造が方程式の解として存在します。



6 エヴェレット

ヒュー・エヴェレットは、1957年、プリンストン大学の大学院生時代に多世界解釈を提唱した。

7 あべこべ惑星

左右が逆、西から太陽が昇り、左が右、右が左、さらに性別も逆になる。ドラえもんが未来から来たのび太と会ったとき、のび太は「あべこべ惑星」から来たのだと説明した。

8 ドイツチェニ

イギリスの物理学者、量子計算機論のバイオニク、エヴェレットの多世界解釈の支持者。

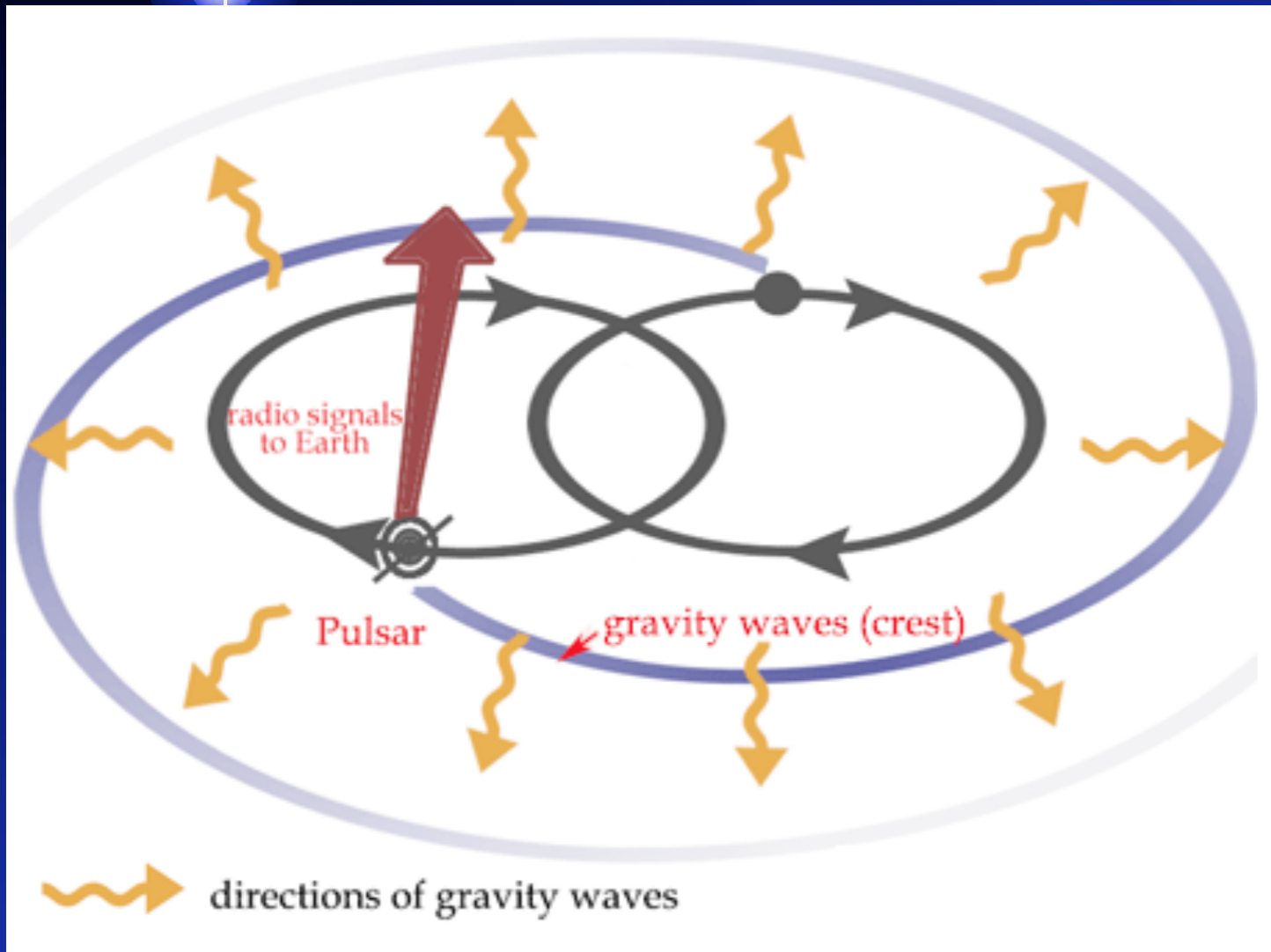
重力波

gravitational wave

重力を伝える波が存在するはず。

現在の、一般相対性理論研究の中心課題。

一般相対性理論の予言【連星パルサー】



Russell A. Hulse



Joseph H. Taylor Jr.

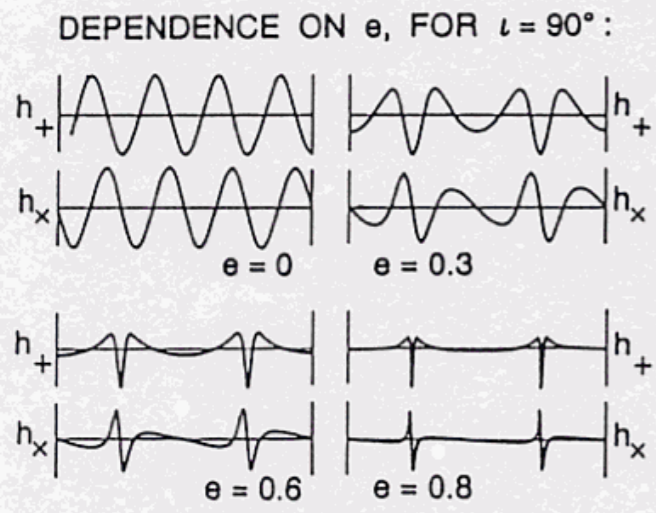
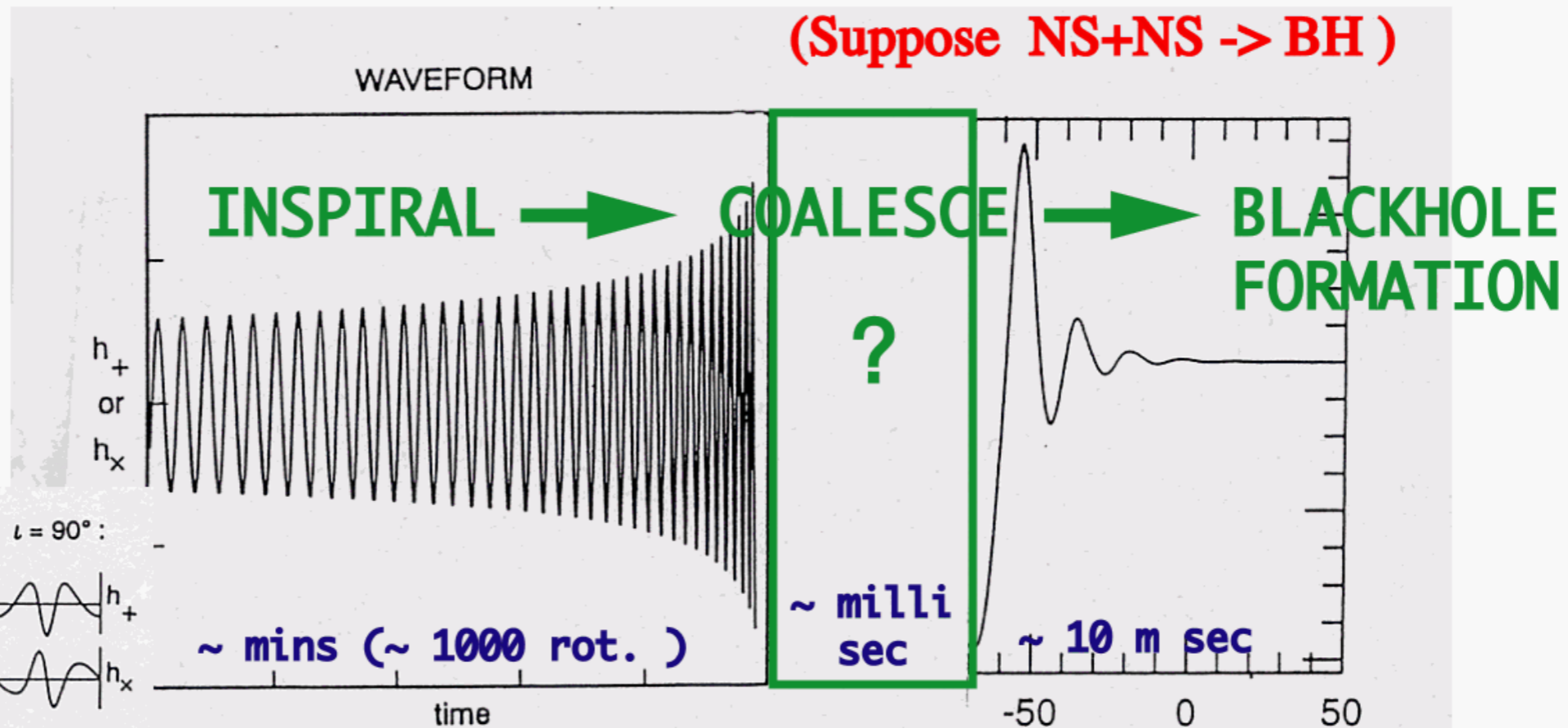
1974年
パルスの間隔から、連星であることがわかった。



図 36: 連星パルサーを拾っている電波のデータ。

What can we learn from gravitational waveform?

(Suppose NS+NS → BH)



DEPENDENCE ON ι , FOR $e = 0$:

$$\frac{\text{Amp}(h_x)}{\text{Amp}(h_+)} = \frac{2 \cos \iota}{1 + \cos^2 \iota}$$

Post Newtonian Approx.

Numerical Relativity

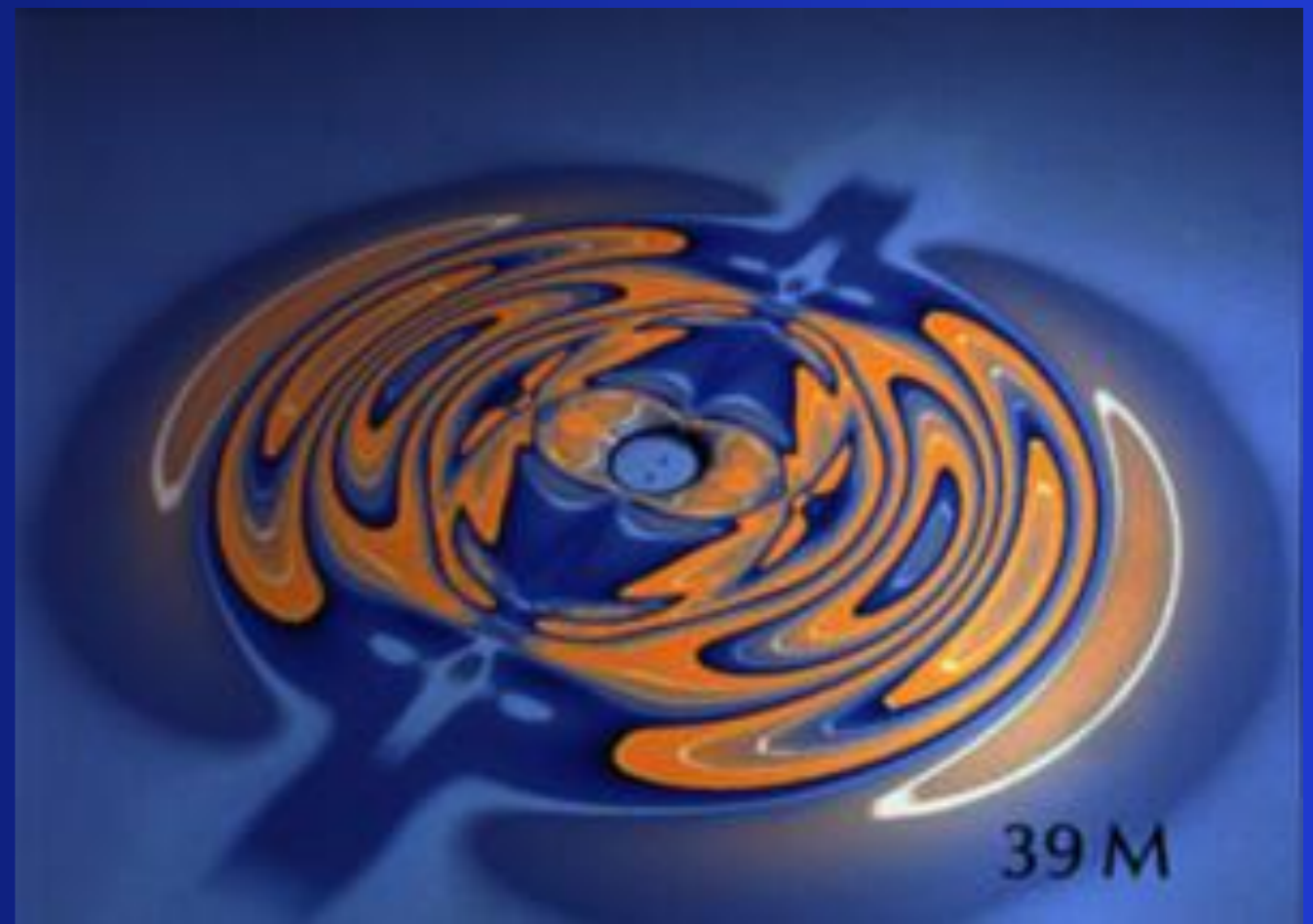
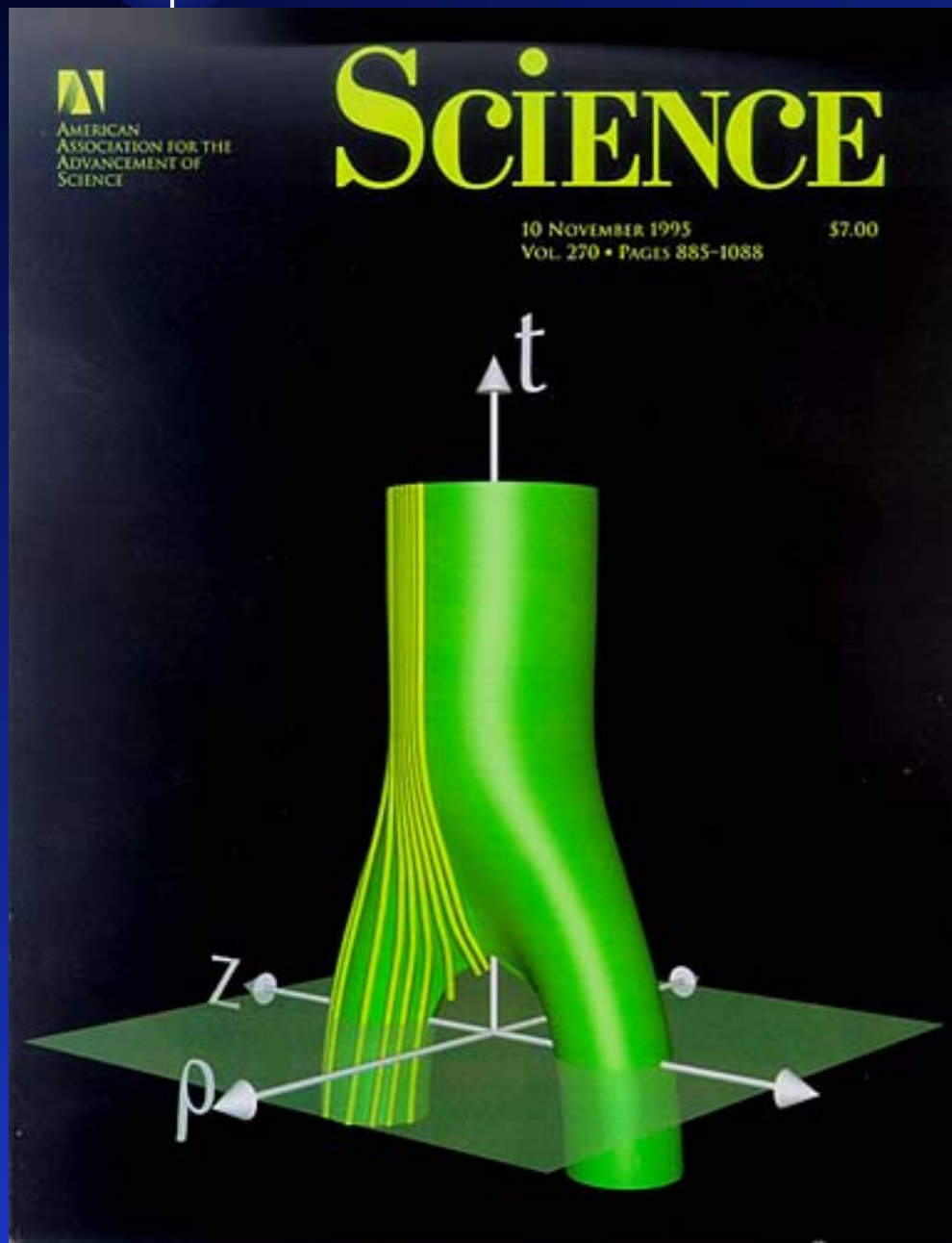
BH. Perturbation

ISCO freq ⇒ EoS of NS,
 waveform ⇒ Formation of BH or NS,
 BH mass,
 BH angular momentum, ...

"chirps" df/dt ⇒ chirp mass, $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$
 amplitude up ⇒ M_c , distance
 amplitude h_+/h_x ⇒ inclination
 waveform ⇒ eccentricity
 modulation ⇒ spin, ...

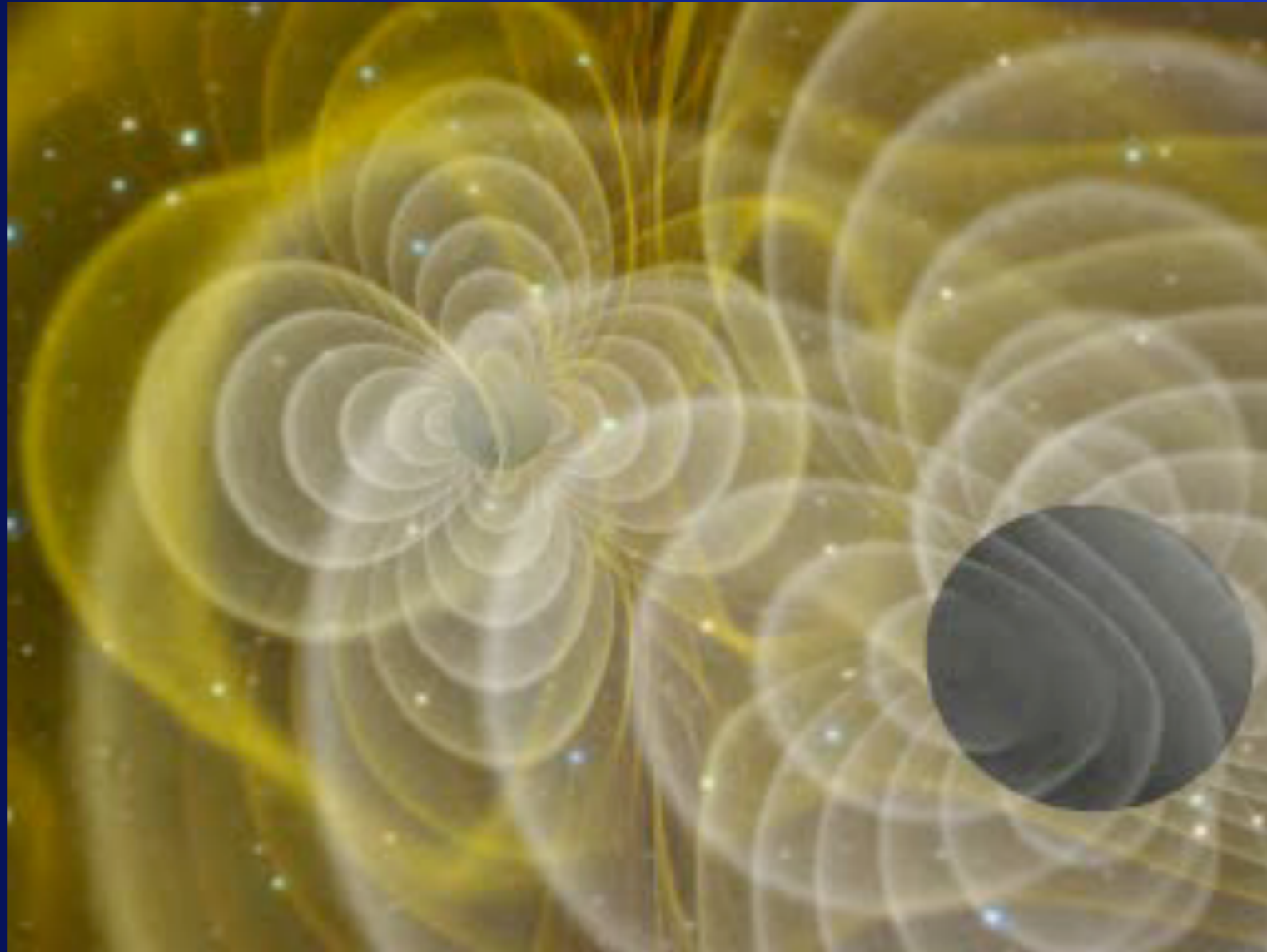
statistics ⇒ cosmological parameters

ブラックホールの合体シミュレーション



2つのブラックホールの合体と重力波放出
(90年代, NCSAグループ)

ブラックホールの合体シミュレーション



Louisiana Univ. Cactus team

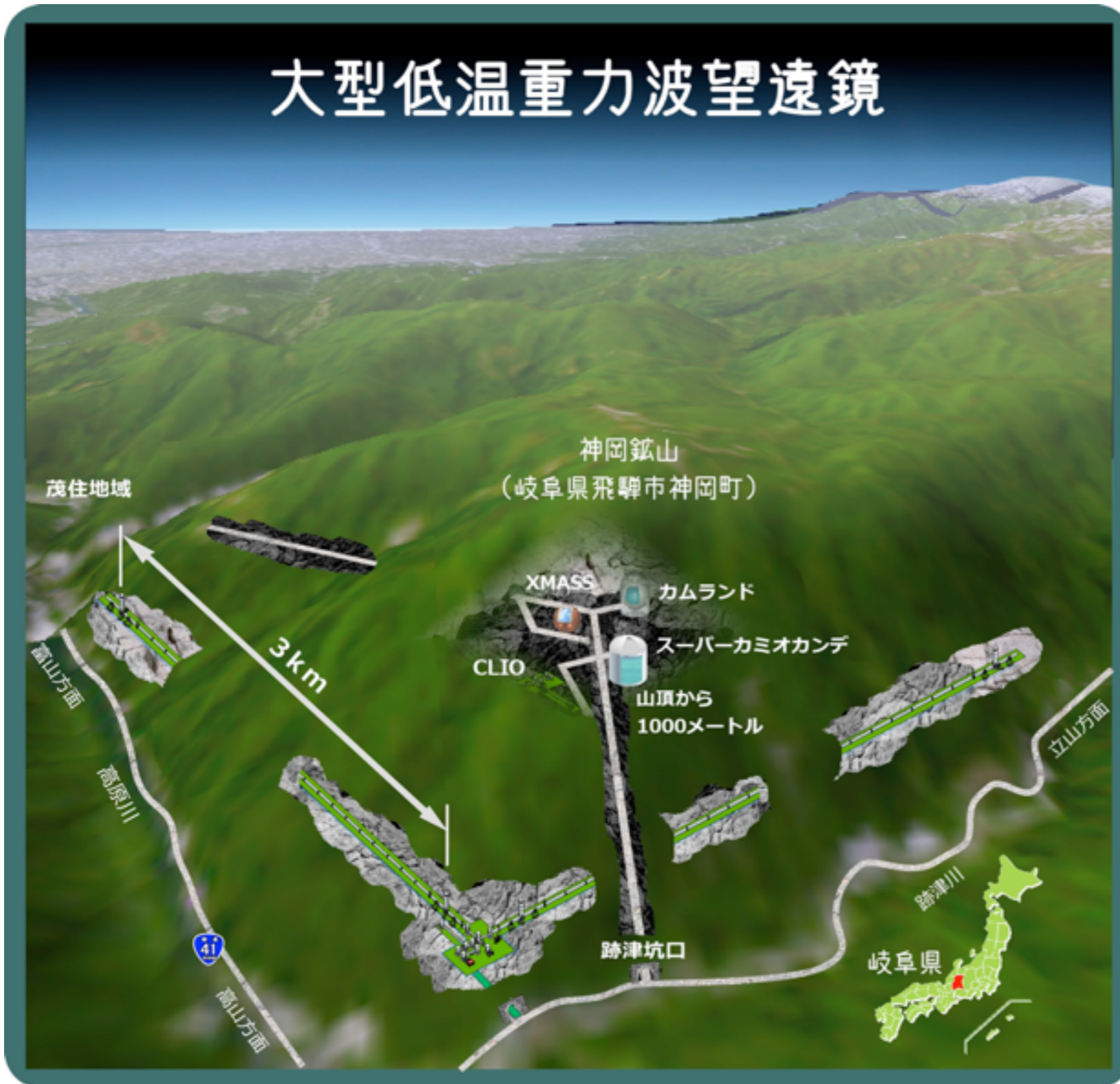
世界の重力波干渉計



KAGRA (大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

大型低温重力波望遠鏡



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設
地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

相対性理論の描く世界

特殊相対性理論

時間の遅れ, $E=mc^2$, GPS

一般相対性理論

空間の歪み, 重力レンズ, GPS

ブラックホール, ワームホール, 重力波

膨張宇宙, 高次元宇宙



まだまだ未解決の問題がたくさんあります。
若い方, どんどんこの分野へも参入してください。