

一般相対性理論の世界

ブラックホール・重力波・ワームホール・宇宙論



大阪工業大学 情報科学部 真貝寿明

Einsteinは何をした？

2つの相対性理論

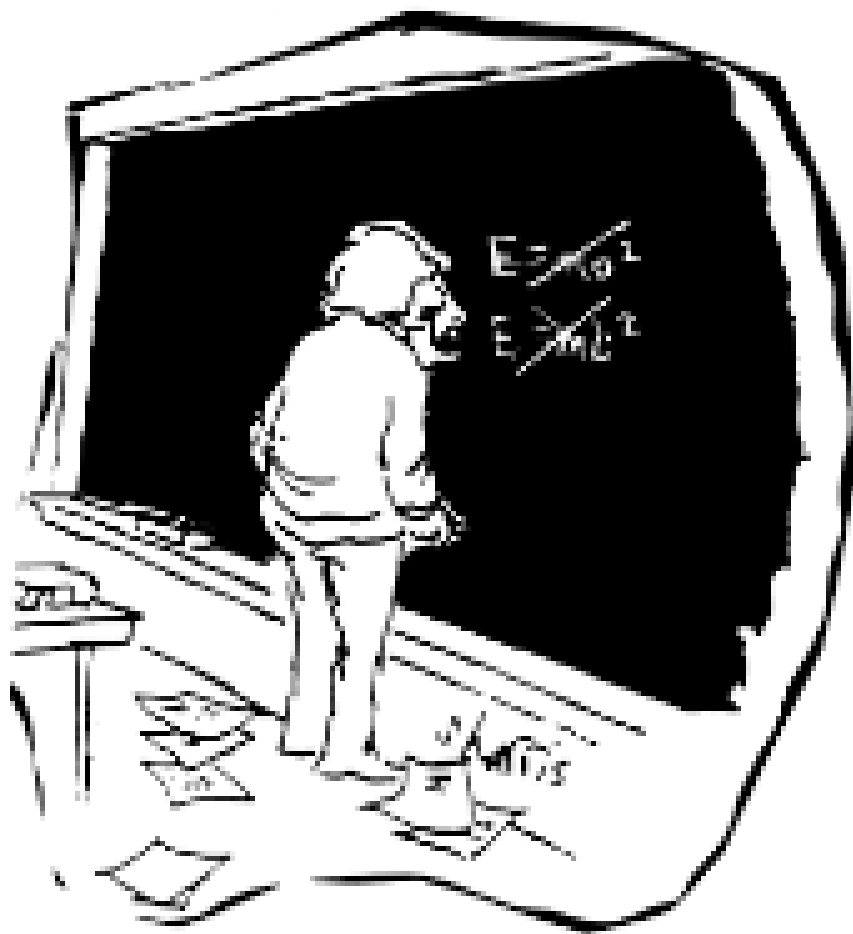
Einsteinもミスをした

相対性理論は正しかった！

相対性理論は正しい？

<http://www.einstein1905.info/>

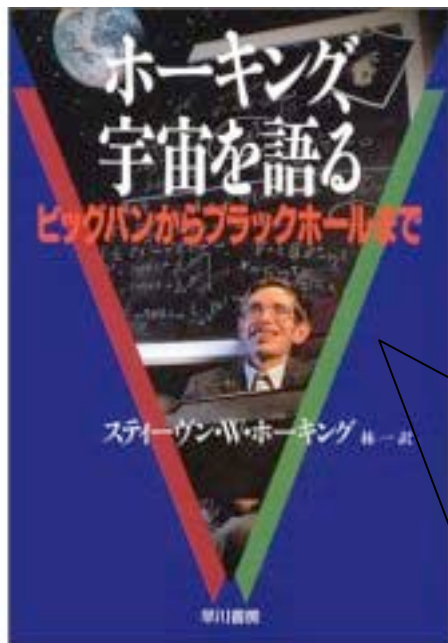
<http://www.is.oit.ac.jp/~shinkai/>



$$E = mv^2$$

$$E = mb^2$$

$$E = mc^2$$

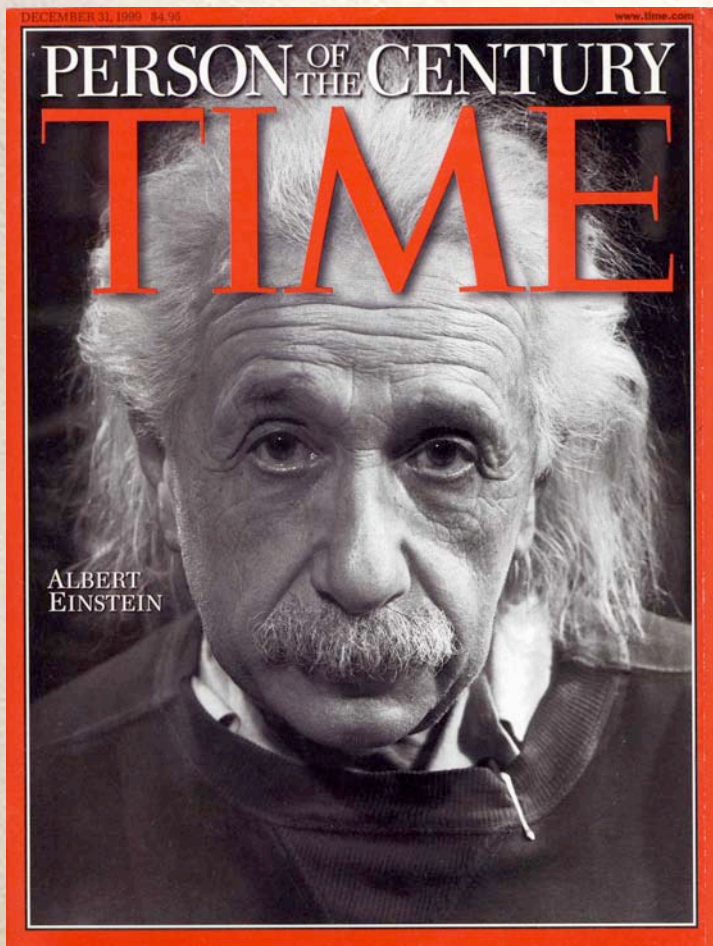


.....本の中に数式を1つ入れるたびに、
売れ行きは半減すると教えてくれた人が
いる。そこで、数式はいっさい入れない
決心をした。しかし、とうとう一つだけ
は入れることになってしまった。アイン
シュタインの有名な式

$$E = mc^2$$

である。この式が私の本の潜在的な読者
をおびえさせ、半分に減らさないことを
願っている。.....

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

2005年は世界物理年



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

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。

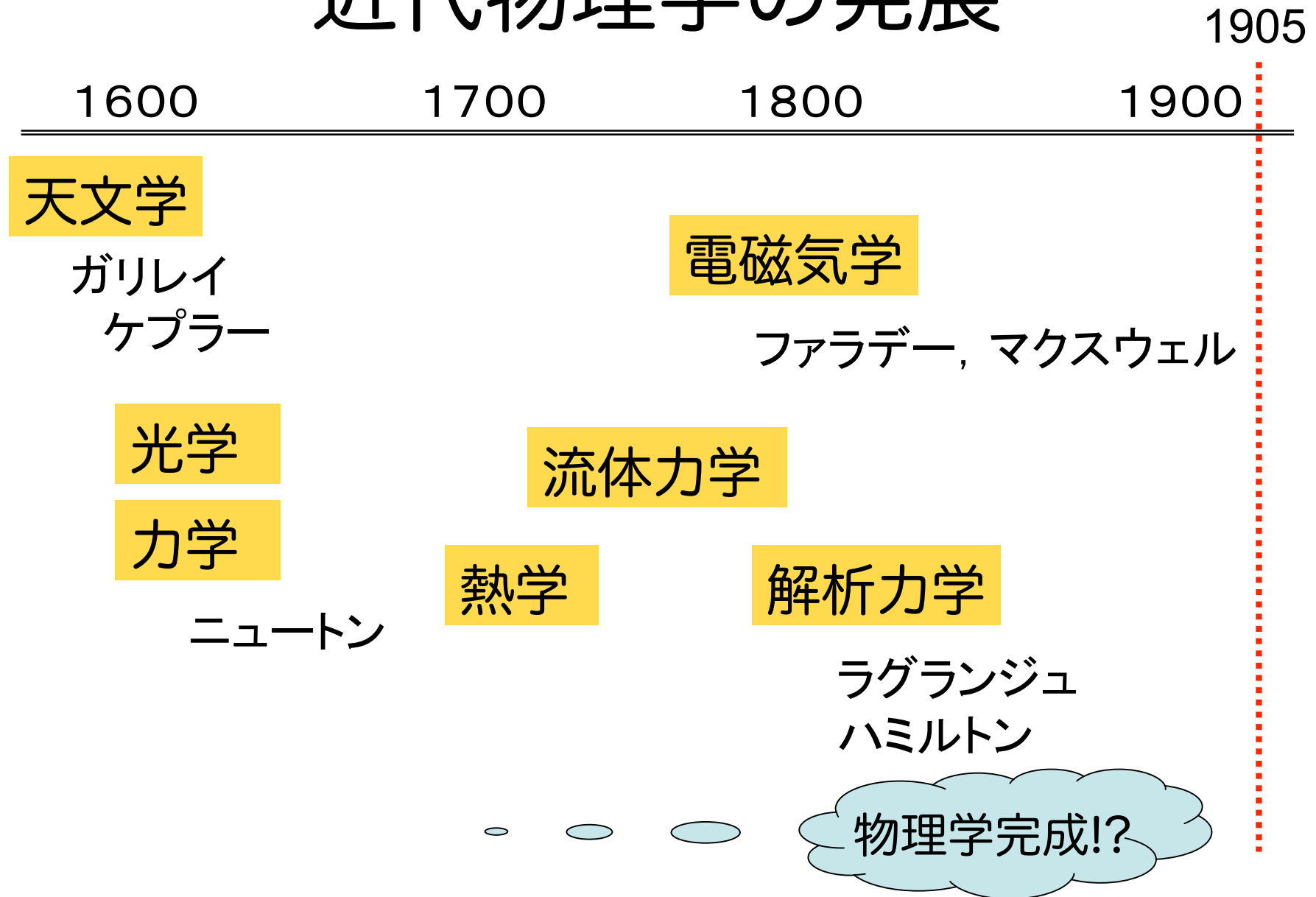
◆（特殊）相対性理論

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。

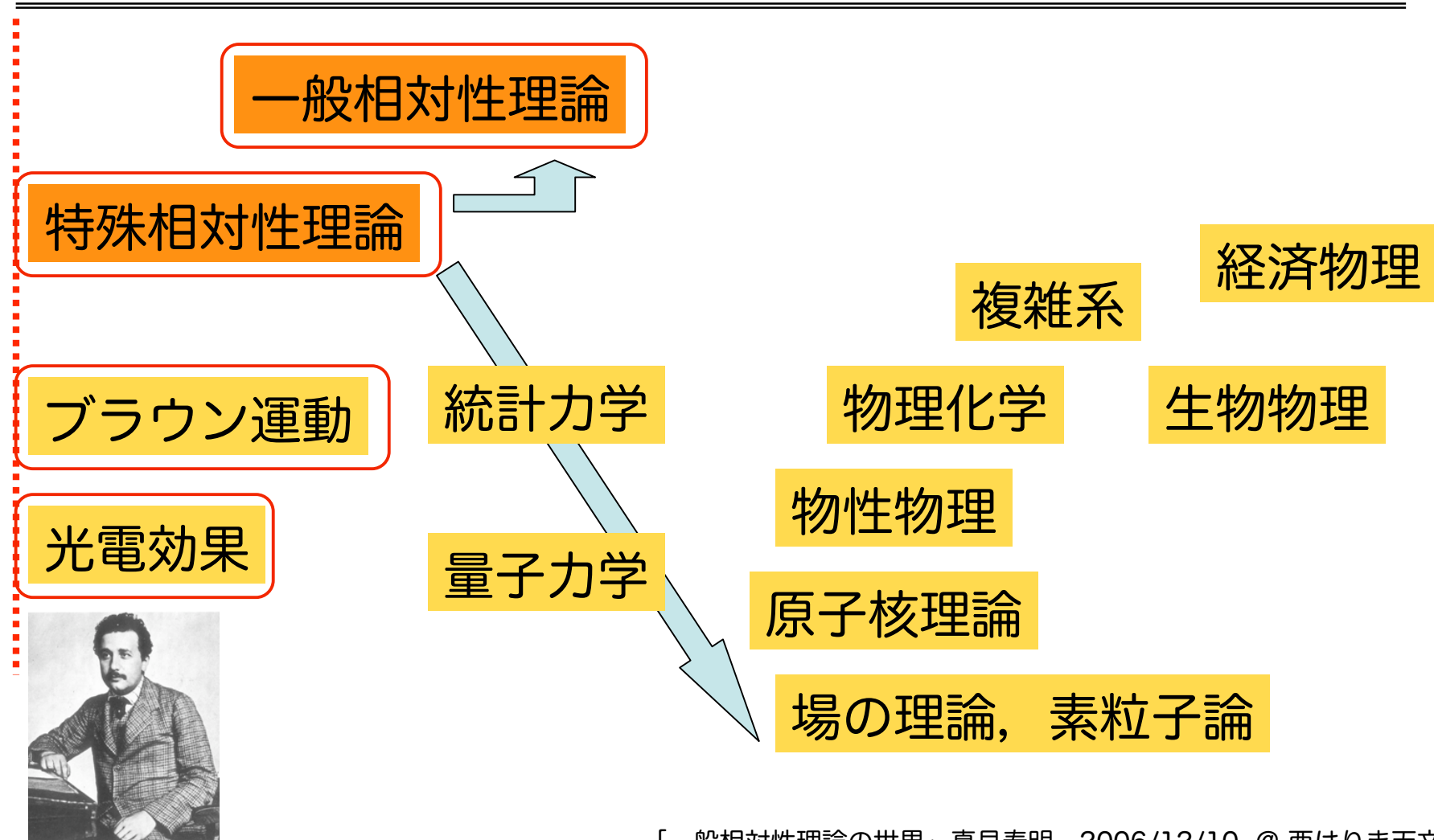
⇒ 「時間と空間の概念」を変えた。

近代物理学の発展



現代物理学の発展

1905 1916 1925 1960s 1980s





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。

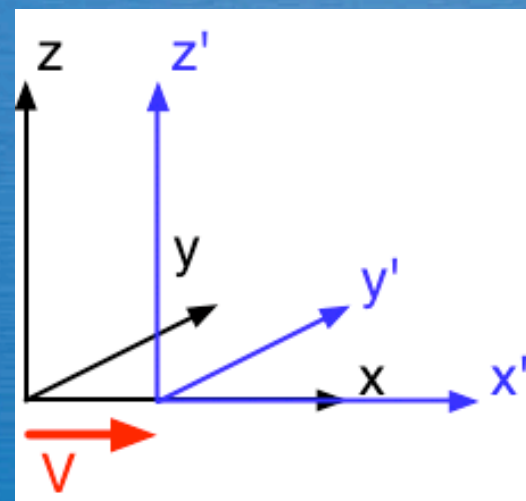


特殊相対性理論 【時間の相対性】

- 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。

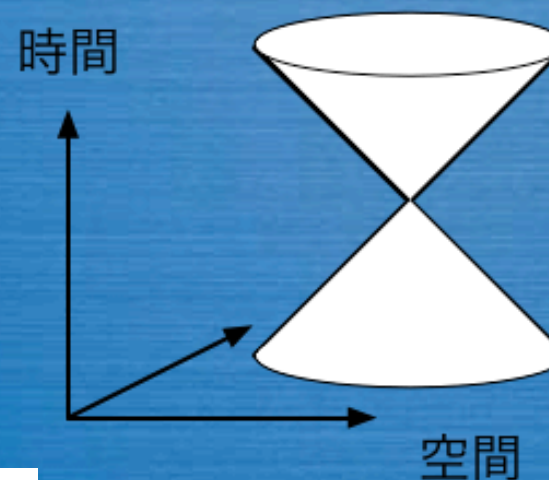


特殊相対性理論 【4次元時空】

- 時間と空間3次元を含めて，4次元の「時空」で考える。

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

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





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！



特殊相対性理論 【速度の合成】

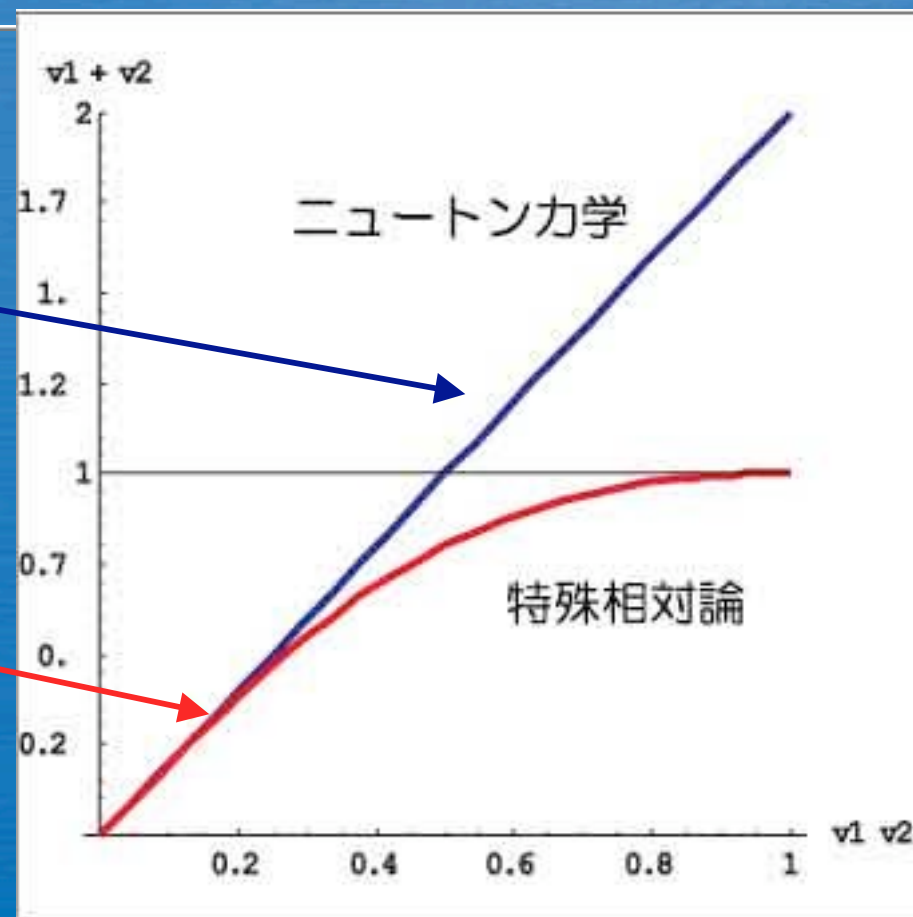
速度の足し算 (ニュートン力学)

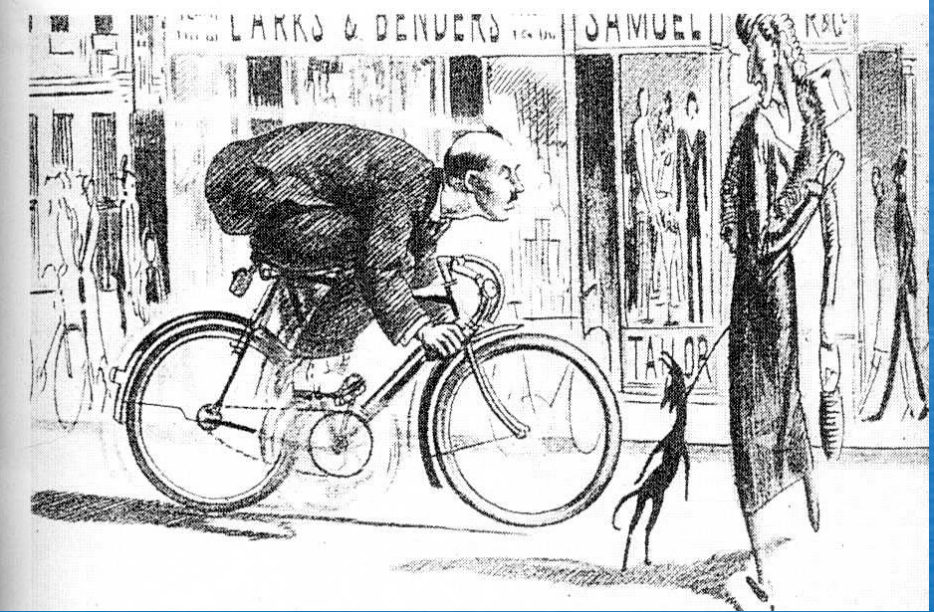
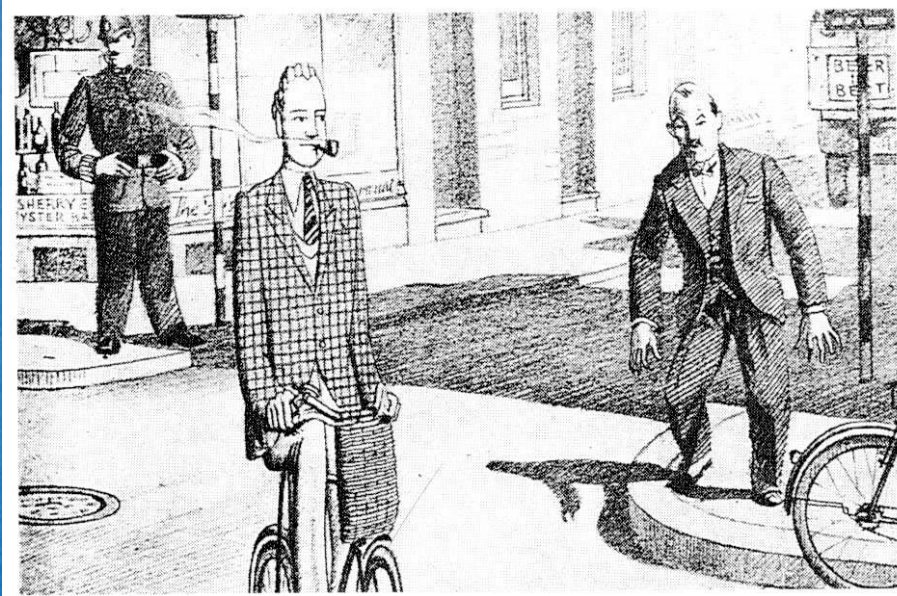
$$V = V_1 + V_2$$

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





ガモフ「不思議の国のトムキンス」



特殊相対性理論 【静止質量エネルギー】

運動方程式（ニュートン力学）

$$\frac{dp^i}{dt} = F^i$$

$(ma = F)$



相対論的運動方程式

$$\frac{dp^i}{d\tau} = f^i$$

相対論的エネルギー—保存則

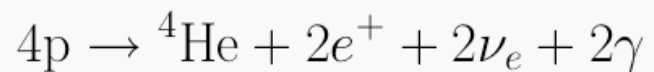
$$E \equiv mc^2 \frac{dt}{d\tau} = m \frac{c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$
$$= mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

質量とエネルギーは、等価である。
質量が欠ければ、莫大なエネルギーが生じる。

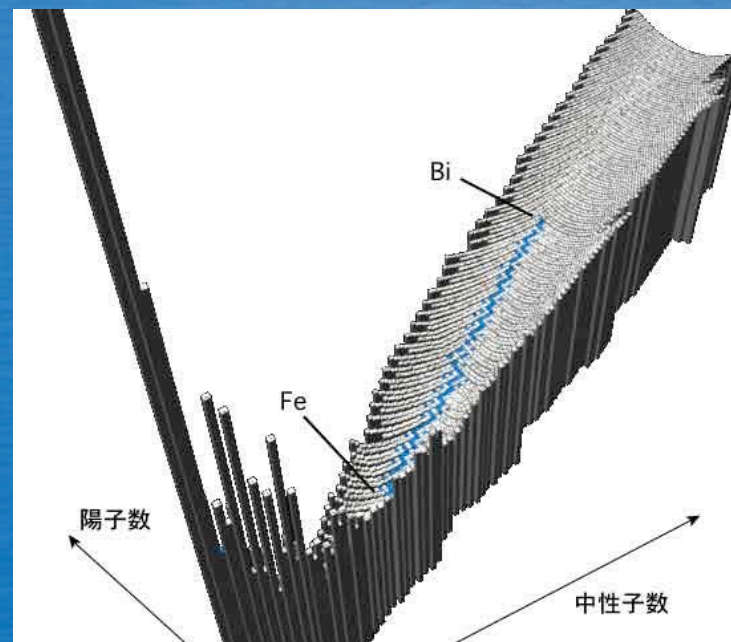
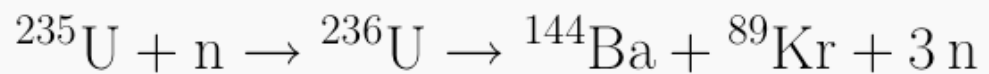


特殊相対性理論 【核反応】

核融合



核分裂



鉄 ${}^{56}\text{Fe}$ の核力が一番安定。
星の中心は、鉄になり、燃え尽きると冷えてゆく。



アインシュタインは業績を横取りしたか？



- ✓ 1904年–1905年に、ポアンカレが「相対性原理が力学以外の物理法則にも拡張して適用されるべきだ」と主張。
- ✓ アインシュタインは、ポアンカレの原稿を引用していない。

アインシュタインの体系だった論理性は、ポアンカレと質的に異なる。アインシュタインは、それまでの物理的な解釈を改めることを明確に主張している。

力学 → 相対性理論

一般相対性理論

強い重力場での時空の力学

「空間が歪むのが重力の正体である」

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学

「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

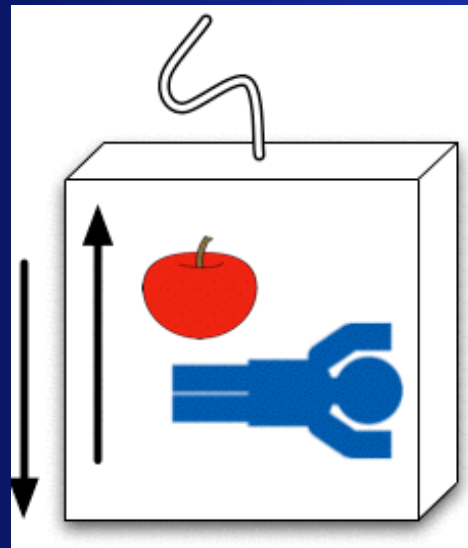
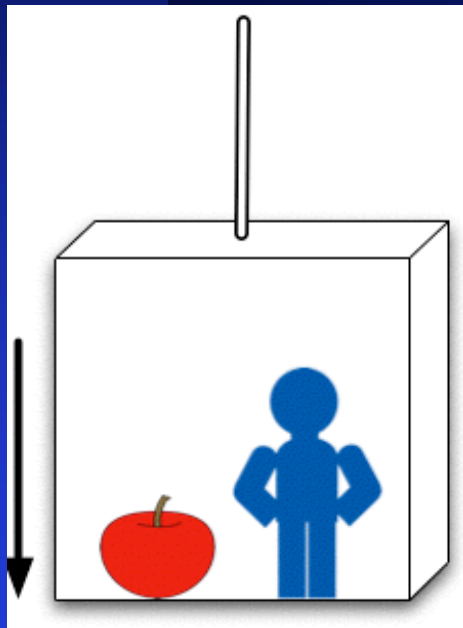
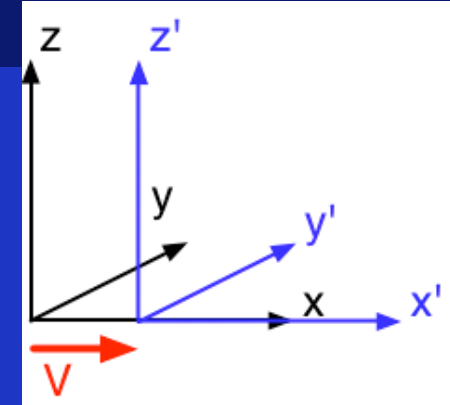
いよいよ

一般相対性理論

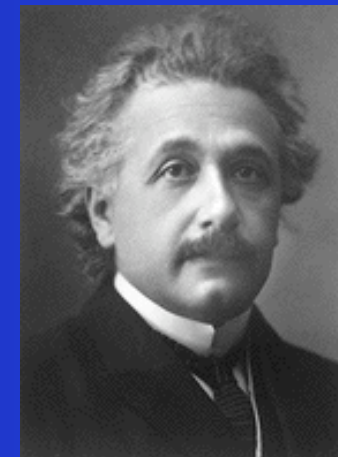
- ◆ 一般相対性理論は、重力の理論。
重い天体は、時空を曲げる。

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？



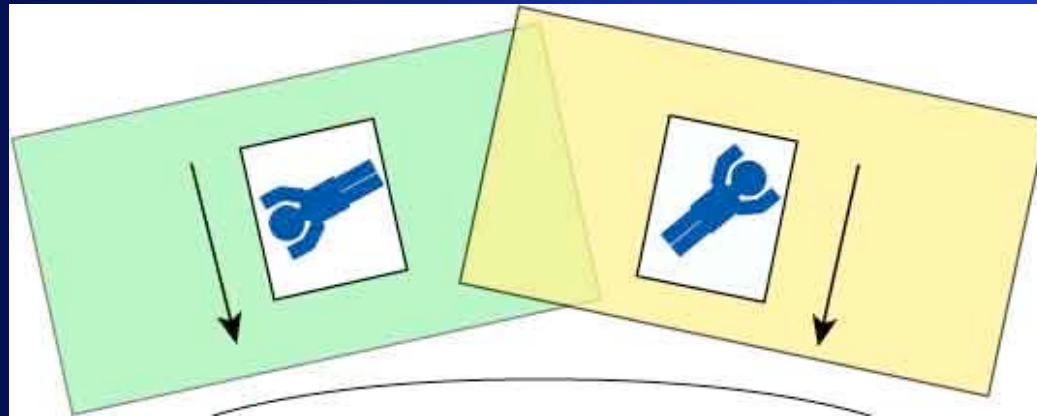
「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺されてしまう」
= 加速度は局所的に消去可能
(等価原理)



「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）

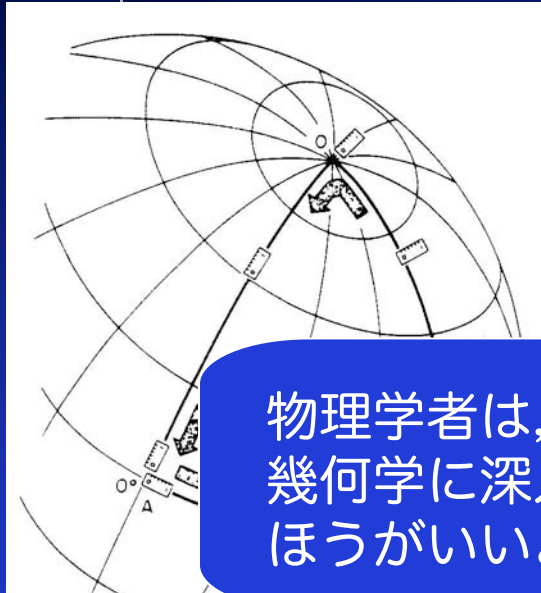


= 重力は、大局的には消去できない。
= 重力の正体は、時空のもつ曲がり具合である。

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



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。

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,

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



Marcel Grossmann

一般相対性理論【アインシュタイン方程式】

重力場の方程式 (1916)

空間の曲がりかモノの運動を決める ⇔ 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〉

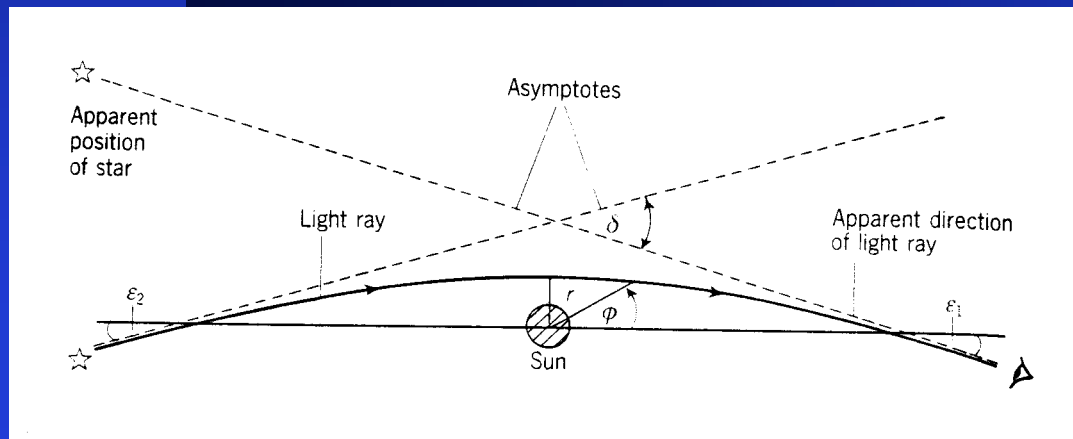
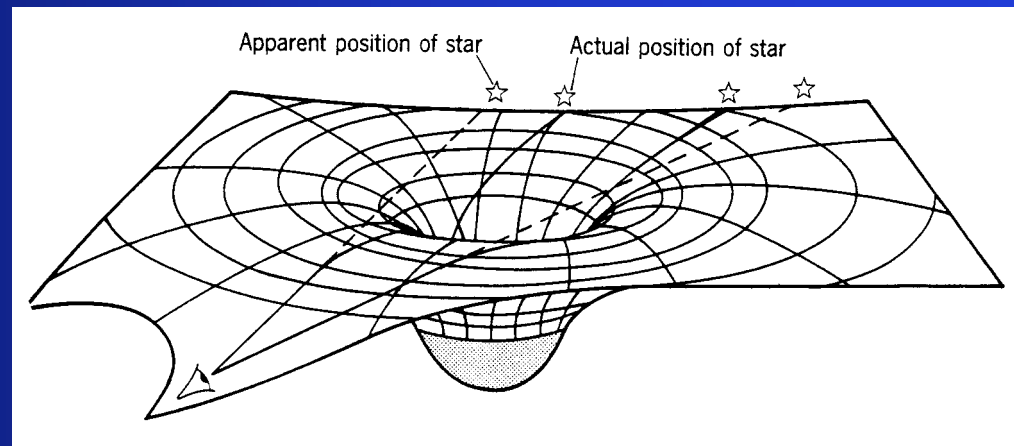
エネルギー運動量テンソル
〈モノの分布〉

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

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

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

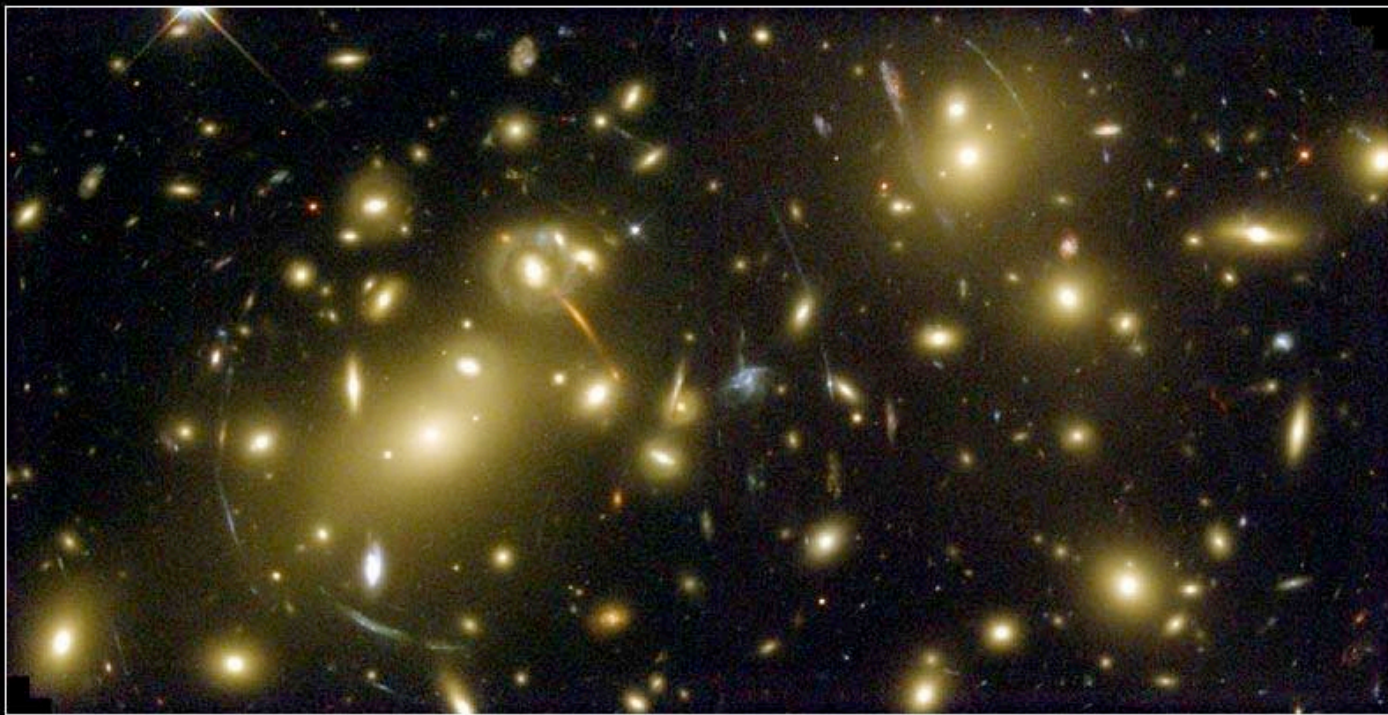
光は時空を直進するが、重い物体の周りでは、時空の歪みにより、曲がって進むことになる。



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

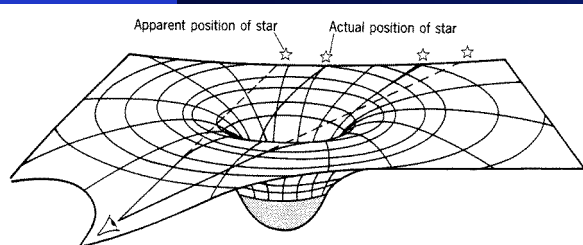
一般相対性理論の予言【重力レンズ】



Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

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



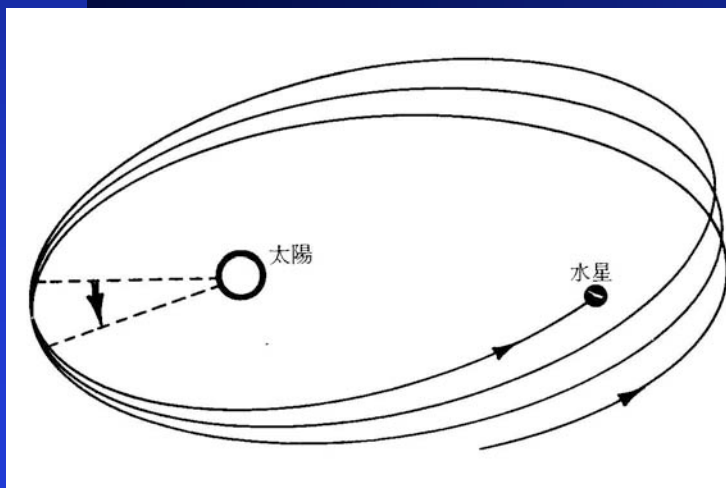
一般相対性理論の予言【水星の軌道】

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

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。

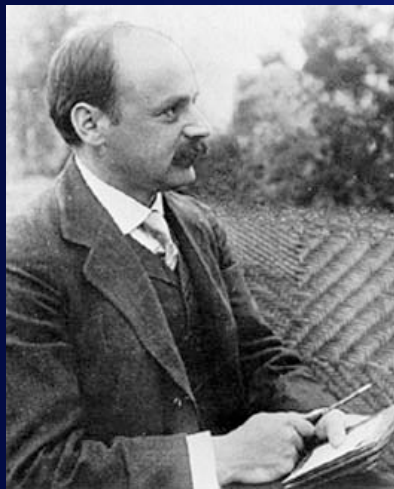
アインシュタインは信じなかったが、
この答えは、ブラックホールを意味していた。

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Einstein方程式の厳密解

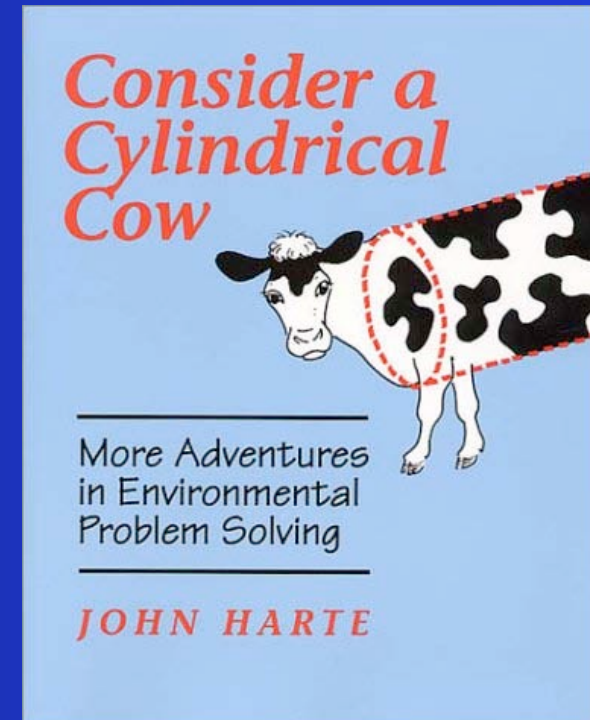
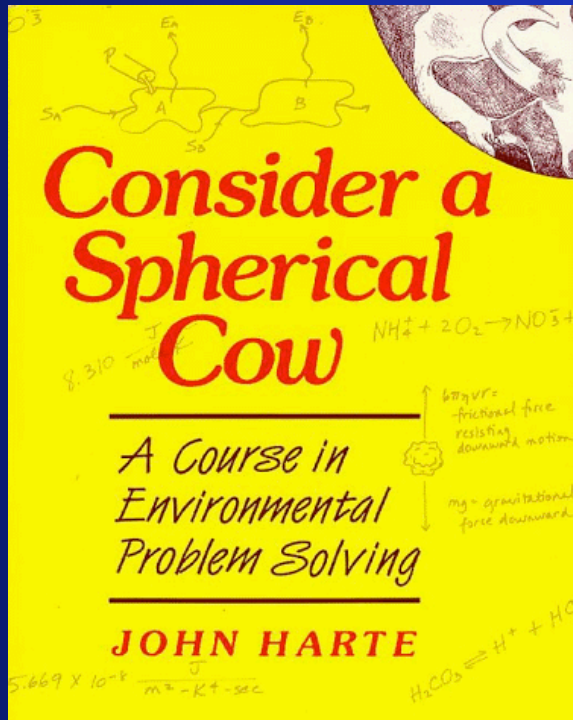
$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$



一般相対性理論【研究者の思考回路】

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」

(物理学者) 「まず、球対称の牛がいた、と考えよう」



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Einstein方程式の厳密解

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

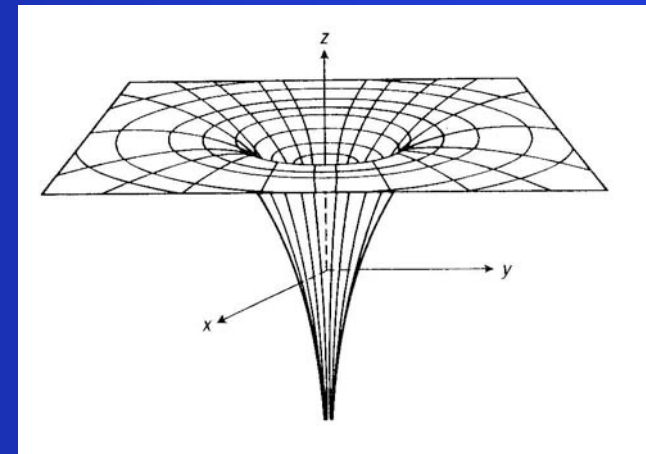
困ったことに, ……

$r=0$ 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



ブラックホールのホライズン

ブラックホール
= 因果的に隔離される領域
境界 = 地平面 (ホライズン)

事象の地平面 (event horizon)
= 光が無限遠方に到達できずに捕捉される領域の端

見かけの地平面 (apparent horizon)
= 外向きの光が外向きに広がることのできない領域の端

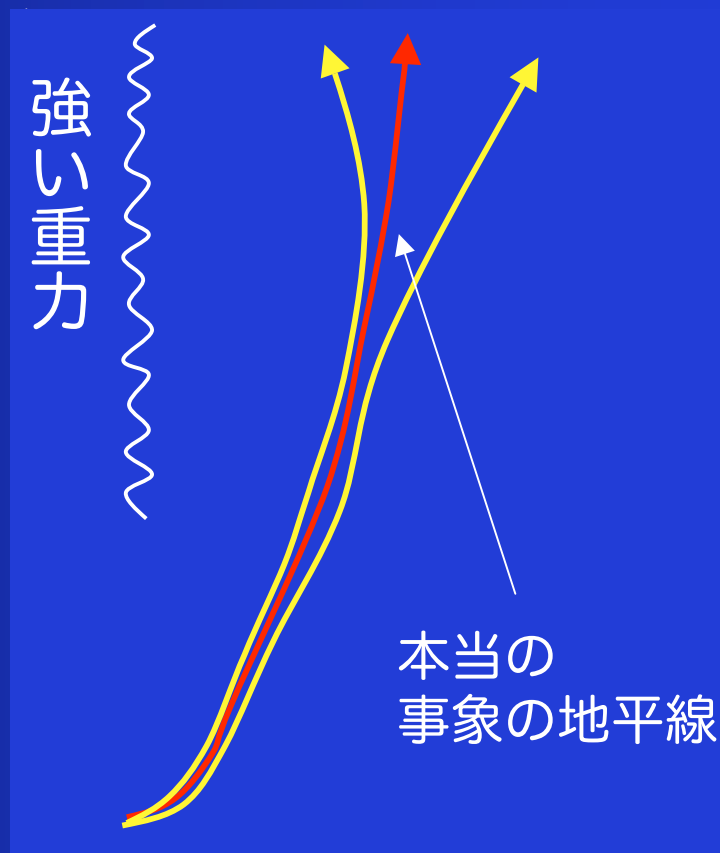
$$r = 2GM/c^2$$

太陽なら2Km, 地球なら0.9cm

特異点 $r=0$

時間

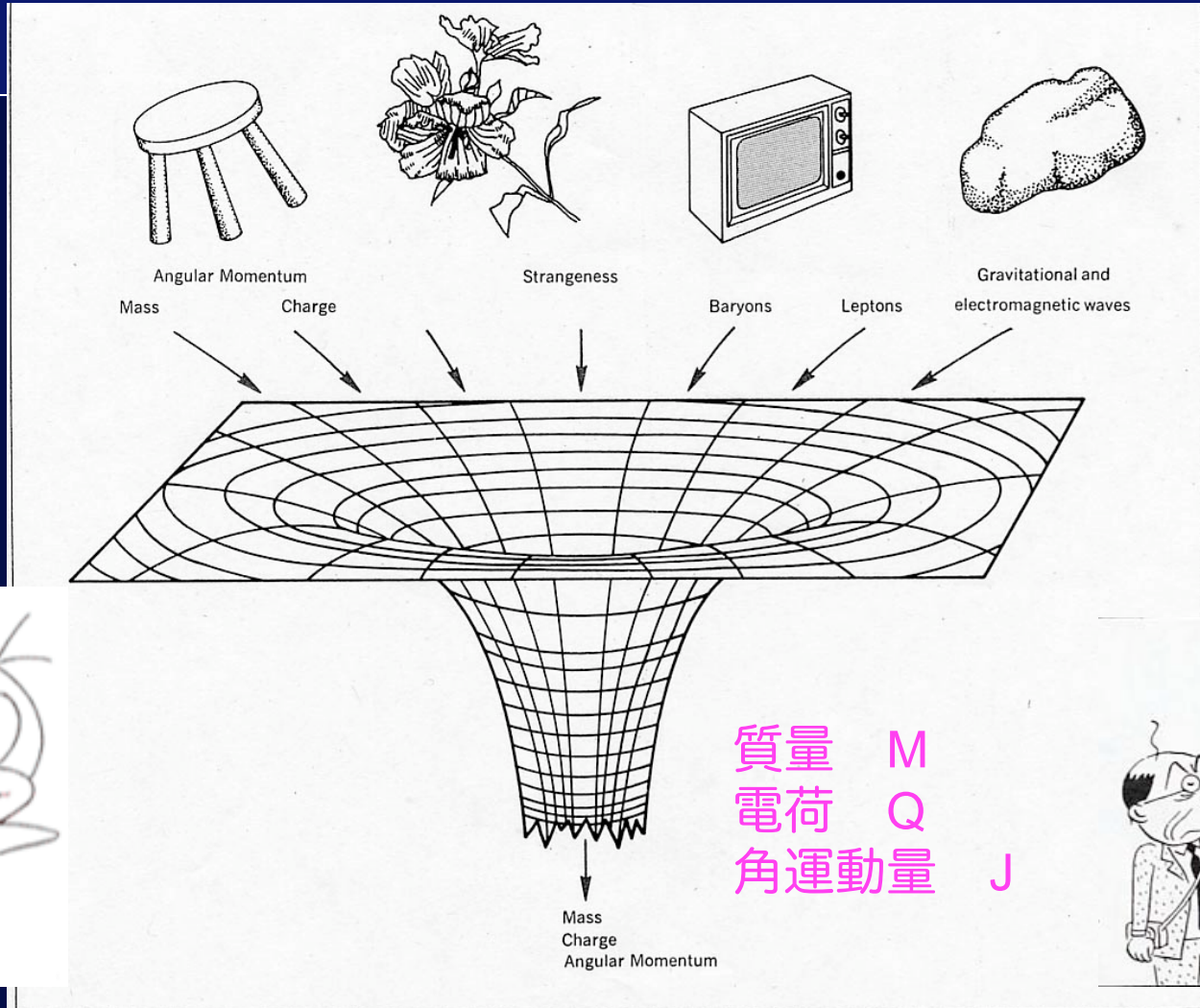
強い重力



本当の
事象の地平線

空間

ブラックホール脱毛定理



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

裸の特異点 と 宇宙検閲官仮説

naked singularity vs cosmic censorship conjecture

弱い宇宙検閲官仮説 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。」

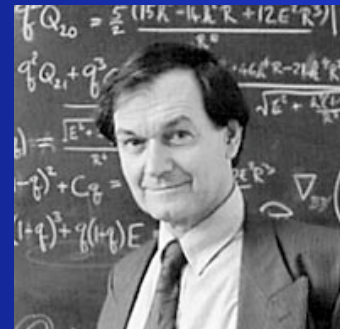
「裸の特異点は、見えてはならない」

強い宇宙検閲官仮説 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

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.



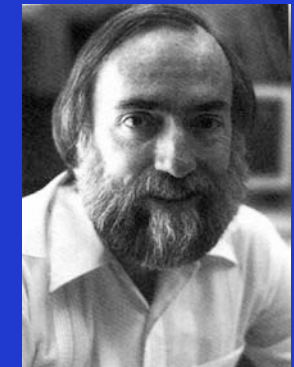
John P. Preskill & Kip S. Thorne

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



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

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.

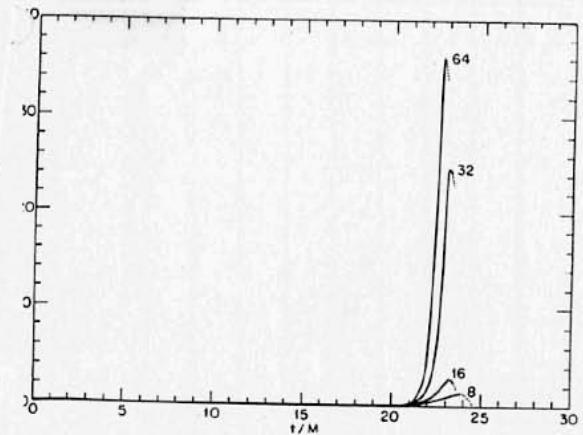
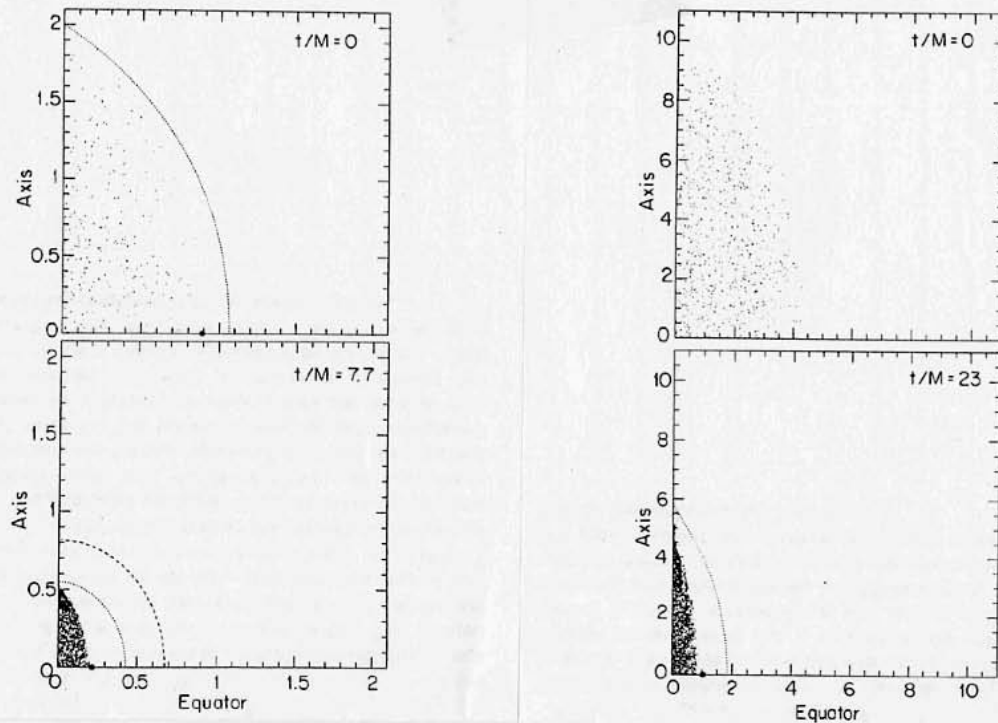


FIG. 3. Growth of the Riemann invariant I (in units of M^{-4}) vs time for the collapse shown in Fig. 2. The simulation was repeated with various angular grid resolutions. Each curve is labeled by the number of angular zones used. We use dots to show where the singularity has caused the code to become inaccurate.

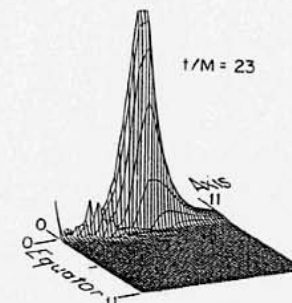


FIG. 4. Profile of I in a meridional plane for the collapse shown in Fig. 2. For the case of 32 angular zones shown here, the peak value of I is $24/M^4$ and occurs on the axis just outside the matter.

ホーキングとソーンの賭け2

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 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

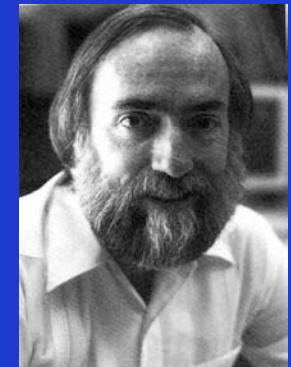

John P. Preskill & Kip S. Thorne

Pasadena, California, 5 February 1997



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」



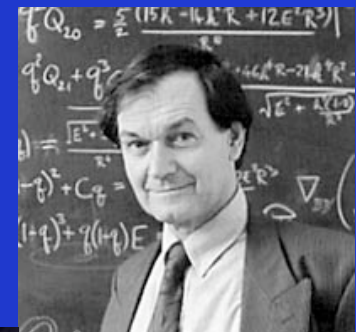
ソーン, プレスキル
「あり得る」

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

ブラックホール研究史

- 1916 シュワルツシルド解【球対称, 真空】
- 1931 チャンドラセカール、白色矮星の質量の上限を示す
⇒「星の構造と進化にとって重要な物理的過程の理論的研究」の功績で
ノーベル物理学賞（1983年）
- 1939 オッペンハイマーとヴォルコフ、中性子星形成の過程で、重力崩壊を予測。
——— 相対性理論の暗黒時代（現実性に疑いを持たれる） ———
- 1960 クルスカル、セケレスにより、シュワルツシルド解の別の座標表現
- 1960年代 パルサーの発見
ブラックホール候補天体の発見
- 1962 ニューマンとペンローズ、光座標表示法を提案
- 1963 カー解【軸対称, 真空】回転するブラックホール解
- 1965- ホーキングとペンローズ、特異点定理発表
- 1967 ホイラーが「ブラックホール」と命名。
- 1972 ホーキング、ブラックホールの蒸発理論を発表



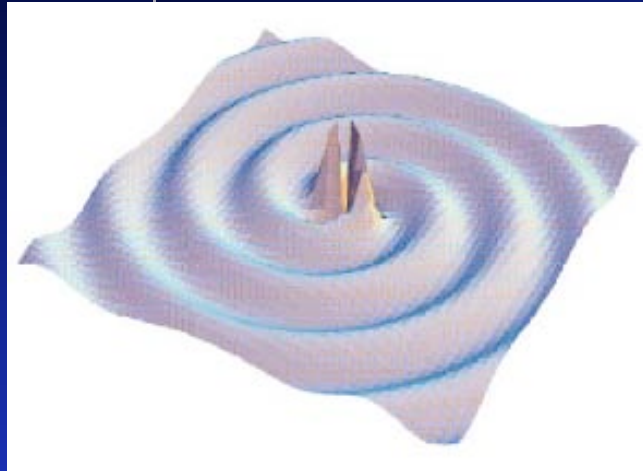
重力波 glavitational wave

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。

重力波の直接観測プロジェクト

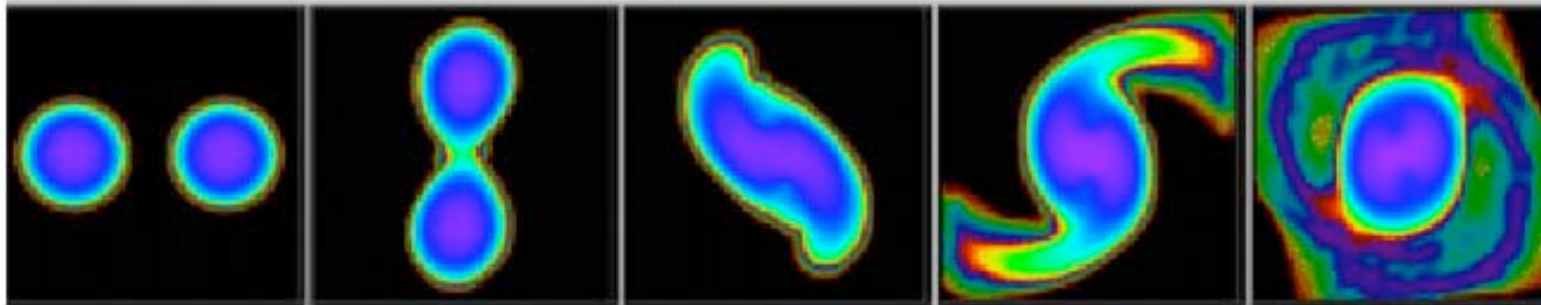
ブラックホールや中性子星の
合体によって生じる重力波



長基線レーザー干渉計

日本	300m	2000年-
アメリカ	4Km/2Km	2002年-
独・英	600m	2002年-
伊・仏	3Km	2003年-

- Neutron star – neutron star (Centrella et al.)



「重力波」研究史

- 1917 アインシュタイン、重力波の存在を予言。
1936 アインシュタイン、重力波の非存在を論文にするが、撤回。

----- 相対性理論の暗黒時代（現実性に疑いを持たれる） -----

1950年代 重力波の物理的な存在について議論が続く

- 1969 ウェーバー、重力波を観測、と発表。大論争になる。
1974 テイラーとハルス、連星パルサー PSR B1913+16 を発見。
⇒⇒ 「重力研究の新しい可能性を開いた新型連星パルサーの発見」の功績で
ノーベル物理学賞（1993年）

- 1990年代 アメリカ・日本・ヨーロッパで重力波観測のレーザー干渉計計画
1990年代 アメリカで「数値相対論グランドチャレンジ」プロジェクト

- 2000 重力波レーザー干渉計「TAMA300」稼働
2002 重力波レーザー干渉計「LIGO」「GEO」稼働

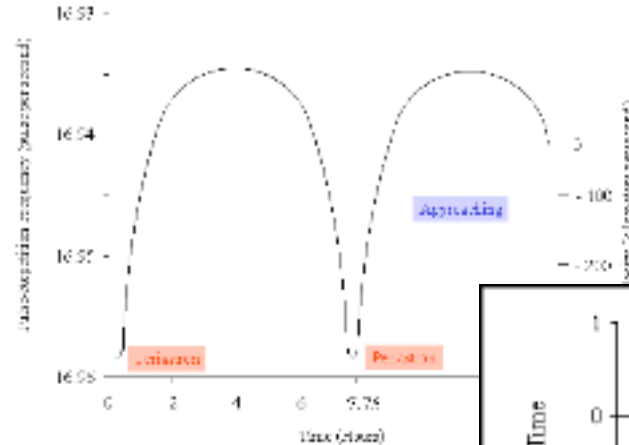
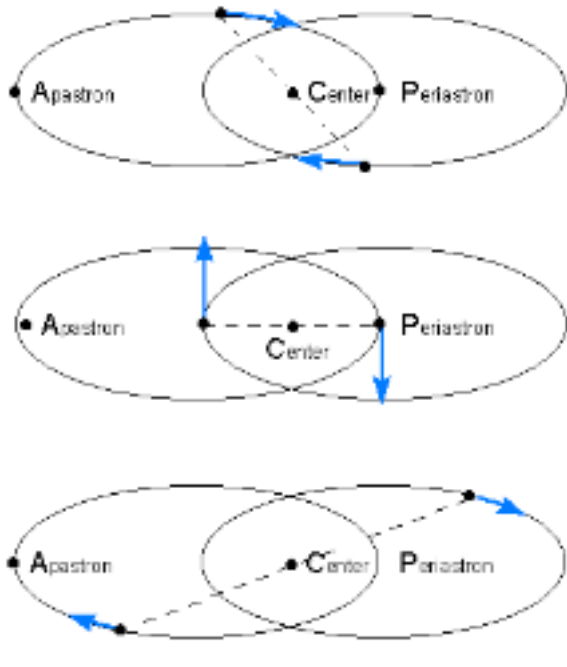
中性子星合体／ブラックホール合体の数値シミュレーション



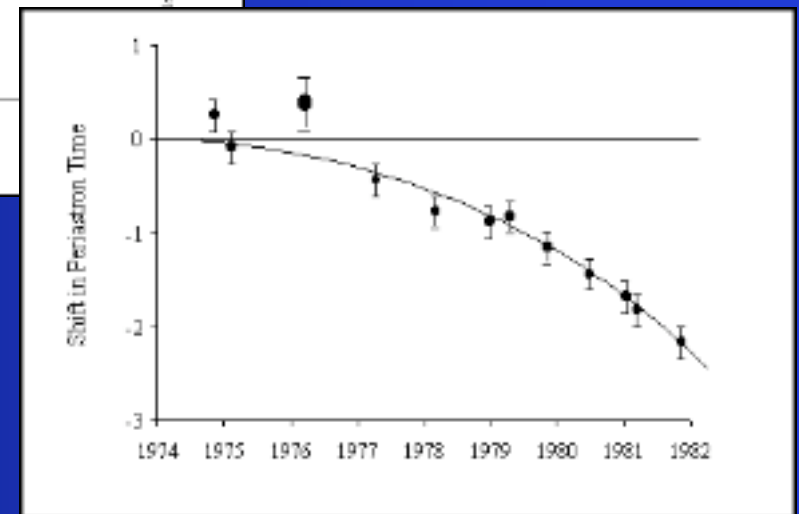
連星中性子星からの重力波

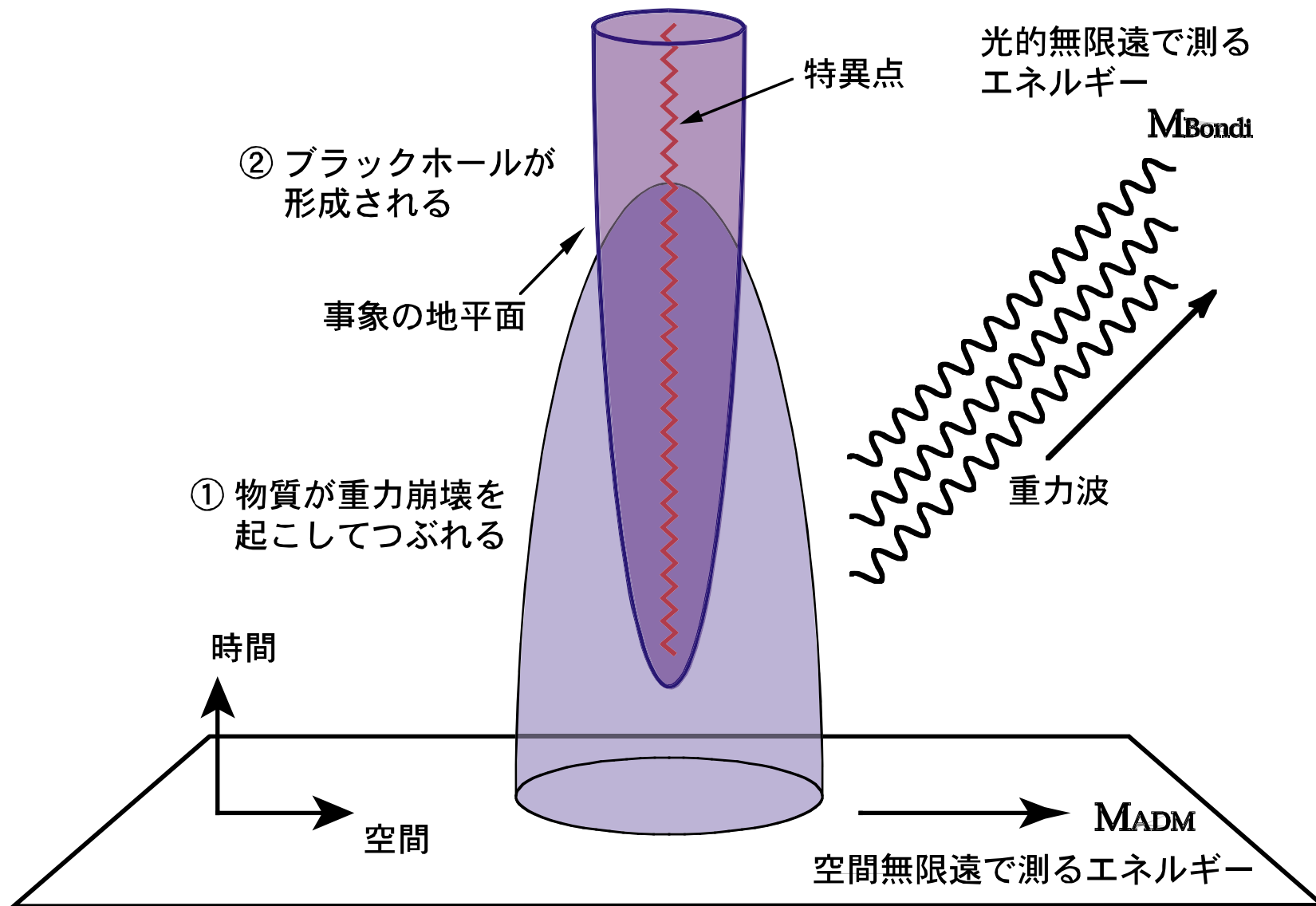
1974, R. Hulse and J. Taylor 電波望遠鏡で発見 ==> 1993 ノーベル賞
重力波によるエネルギーの持ち去り = 軌道の変化

Orbit of a Binary Pulsar



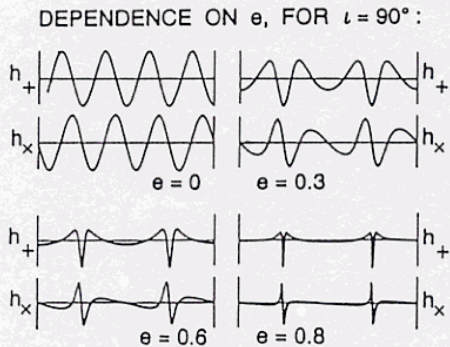
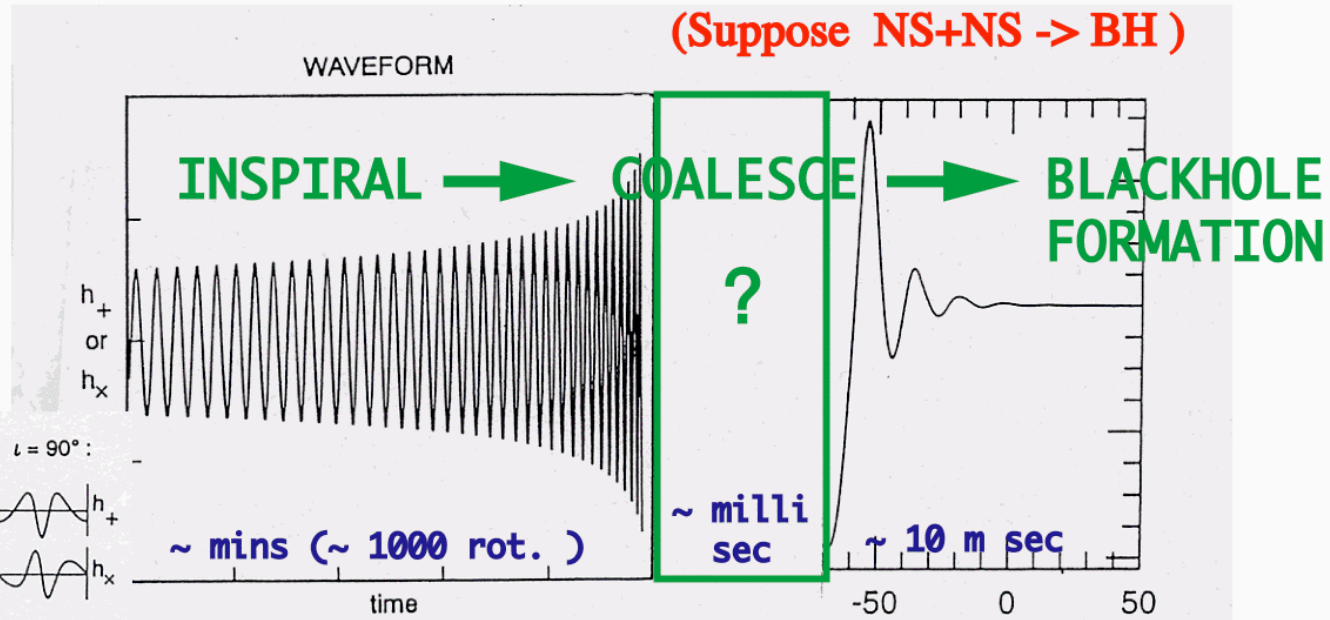
重力波の存在の
間接的な証明!!





What can we learn from gravitational waveform?

(Suppose NS+NS → BH)



DEPENDENCE ON i , FOR $e = 0$:

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

Post Newtonian Approx.

Numerical Relativity

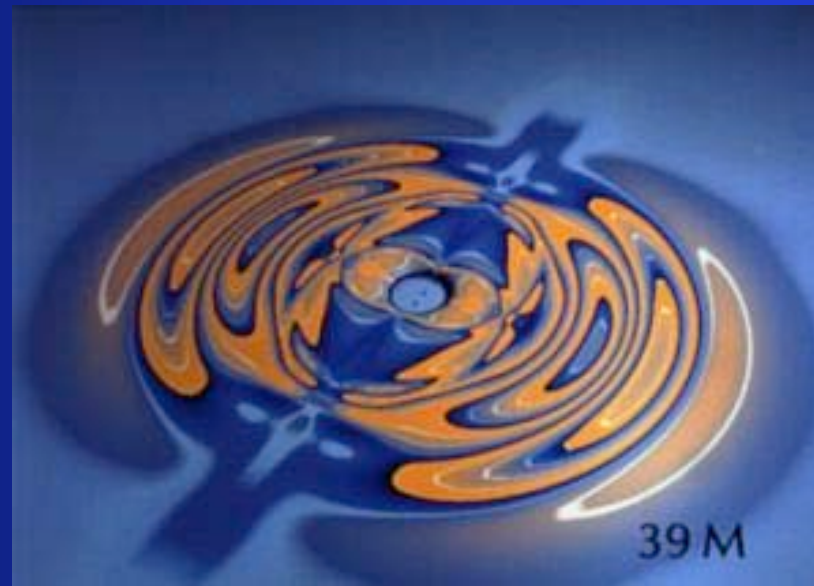
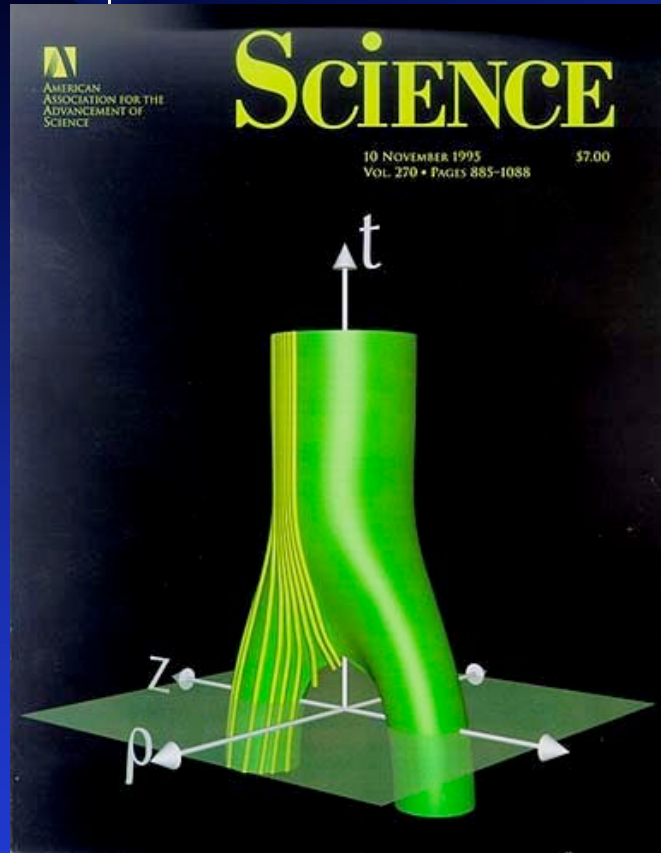
BH. Perturbation

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, ...

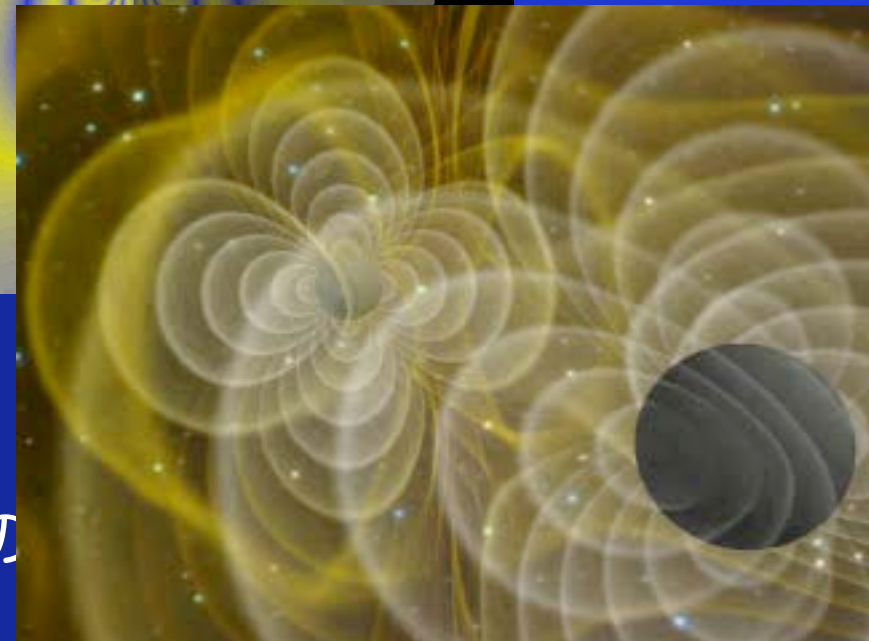
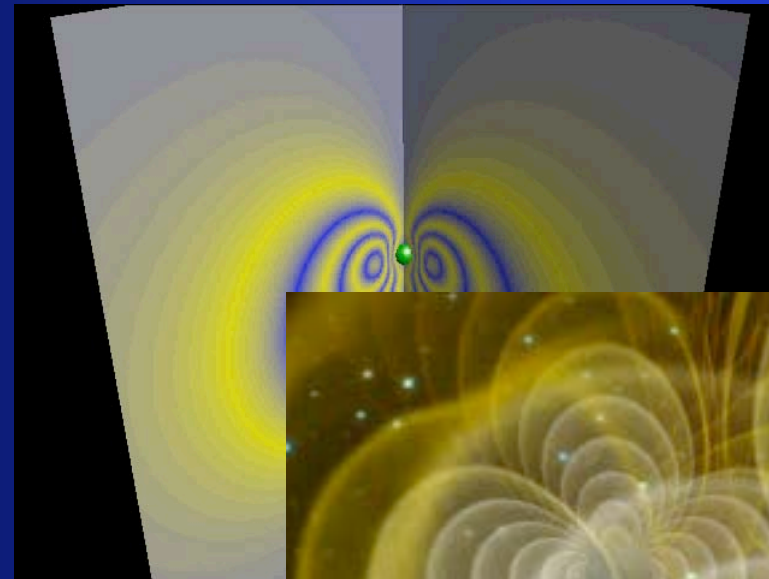
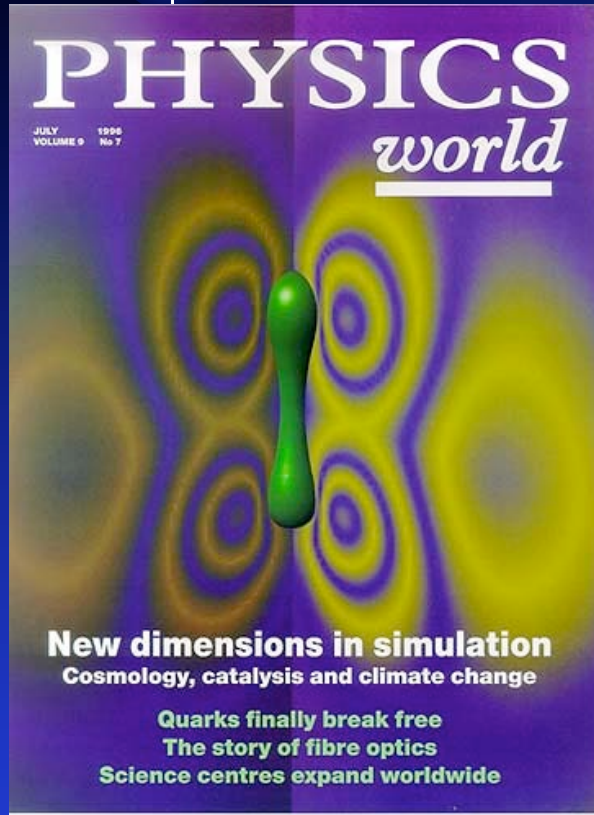
statistics ⇒ cosmological parameters

重力波観測を目的にしたシミュレーション



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)

重力波観測を目的にしたシミュレーション



2つのブラックホールの
(NCSA/AEIグループ)

宇宙論 cosmology

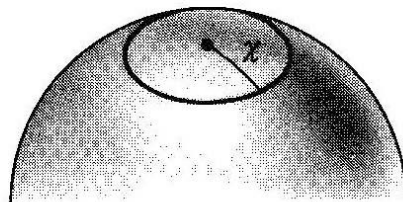
重力の方程式を解くと，膨張する宇宙が解になる。

アインシュタインはこの答えを信じなかった。

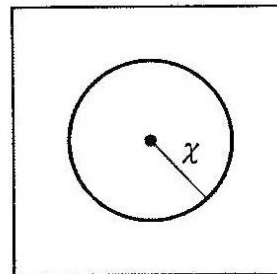
アインシュタイン方程式の解 【フリードマン解, FRW解, LFRW解】

Friedmann, Robertson, Walker, Lemaitre (1920s)
完全流体, 一様等方時空 (球対称) でのEinstein方程式の厳密解

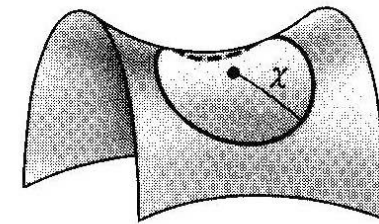
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$



$k=+1$ (曲面)



$k=0$ (曲率ゼロ)



$k=-1$ (曲率負)

アインシュタインは 膨張宇宙を信じなかった

「宇宙は未来永劫不変であるべきだ」

⇒定常的な宇宙モデルをつくるために，方程式を修正（宇宙項，cosmological constant）

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

⇒重力（引力）作用に反対する斥力を導入

ただし，不安定なつり合いの解でしかない。
アインシュタインらしくない。

膨張宇宙モデル

正の宇宙項

宇宙項なし

負の宇宙項

開いた宇宙

平坦な時空

閉じた時空

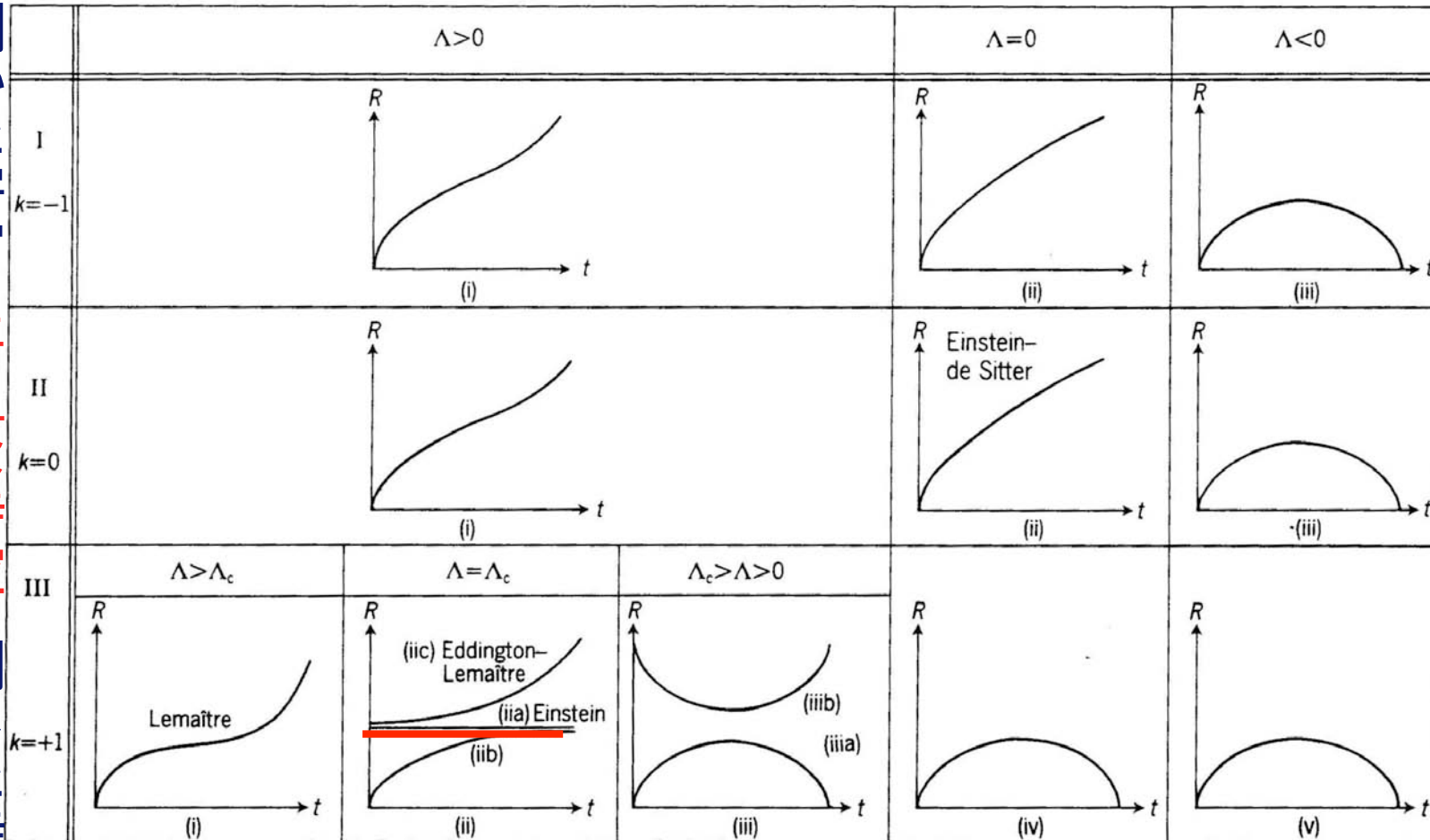


Fig. 23.1 Classification of Friedmann models.

宇宙膨張の発見

1929年

ハッブルが遠方の銀河の赤方
偏移から、宇宙が膨張してい
ることを示す。

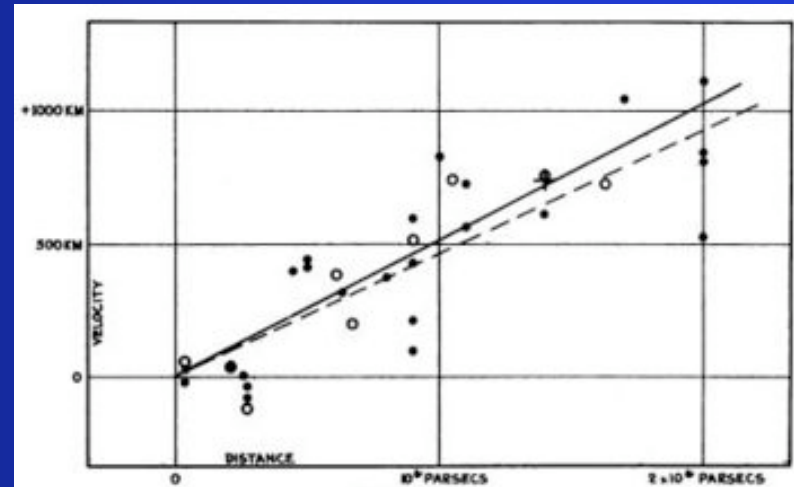


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

後にアインシュタインは宇宙項の導入を取り下げる。

「生涯最大の失敗だった」

(the biggest blunder in my career)

膨張宇宙モデル

正の宇宙項

宇宙項なし

負の宇宙項

開いた宇宙

平坦な時空

閉じた時空

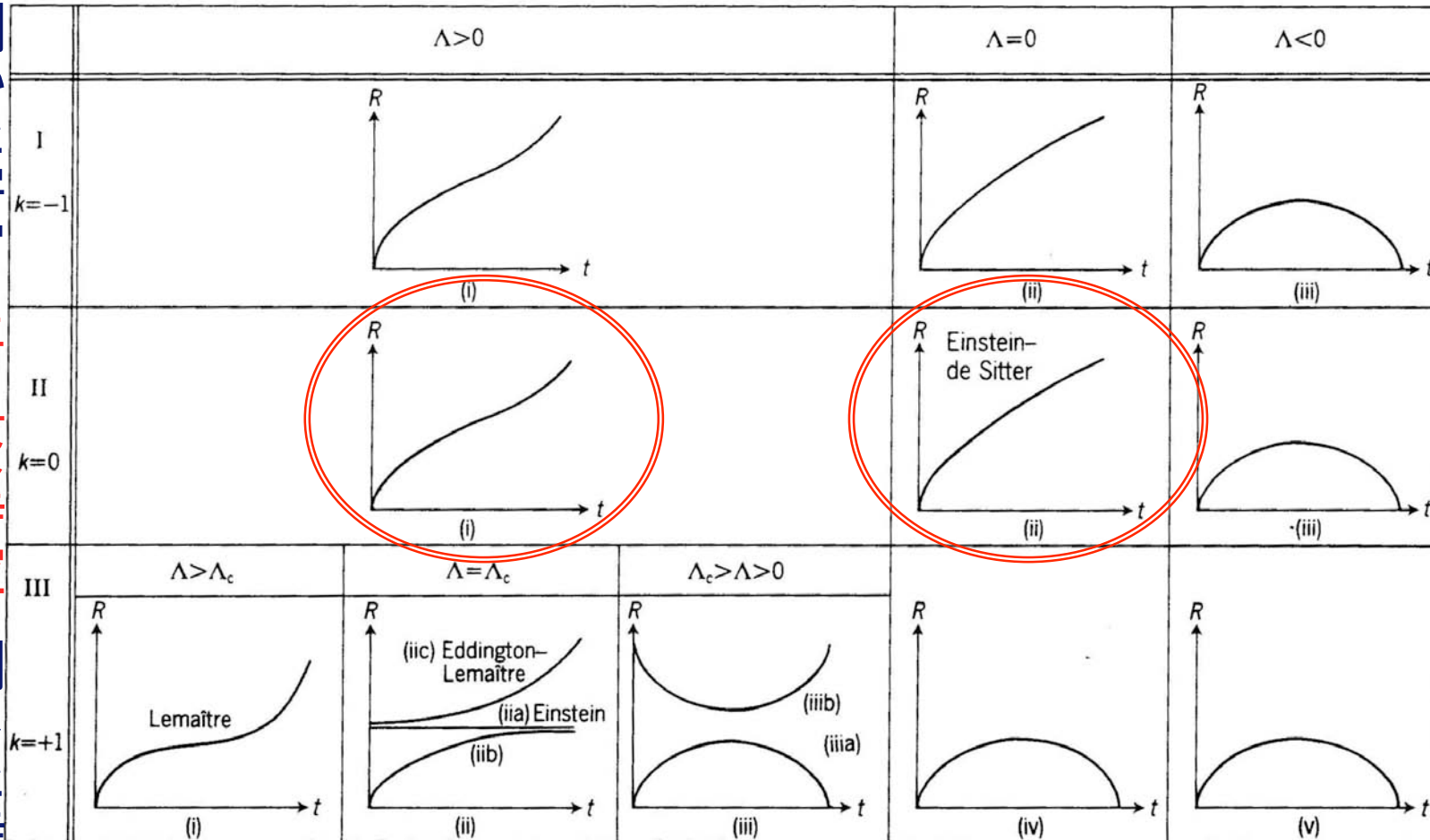


Fig. 23.1 Classification of Friedmann models.

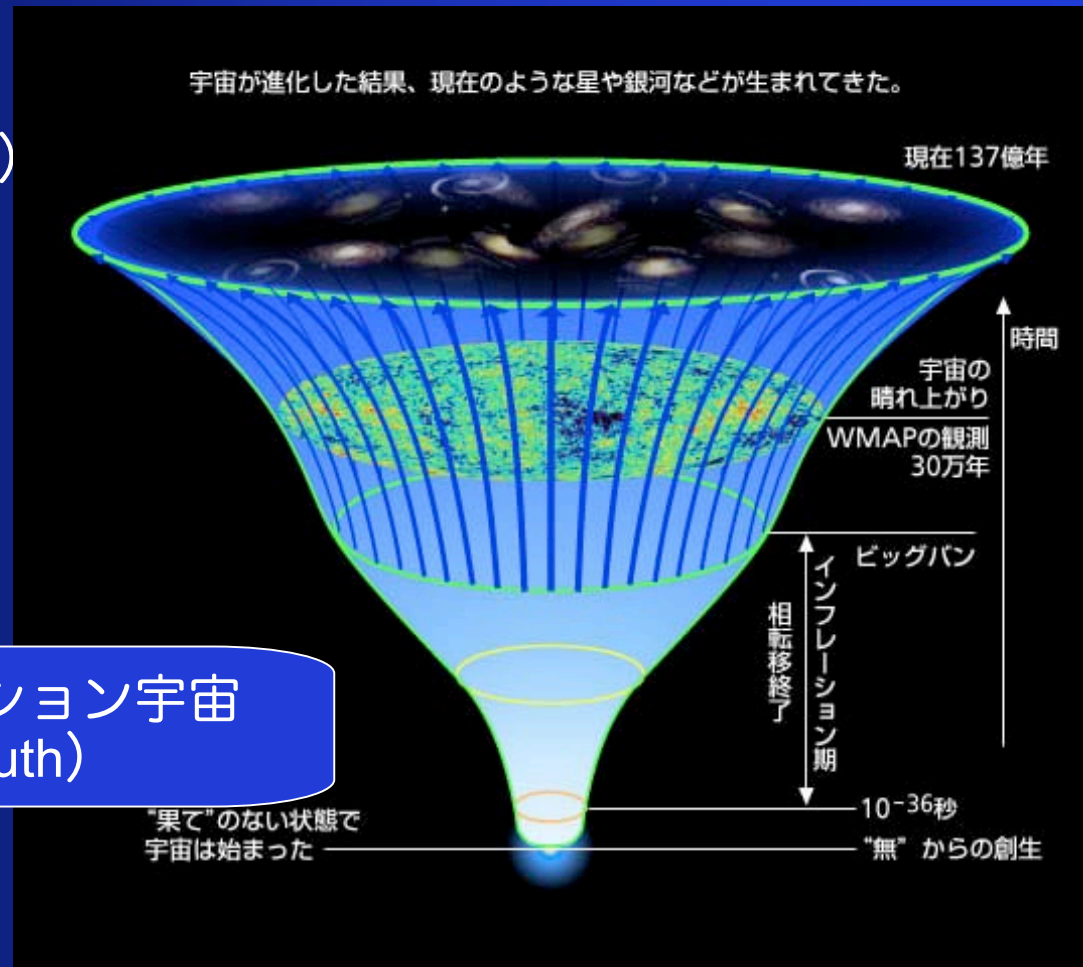
宇宙項の復活【インフレーション宇宙】

1981年
宇宙の初期に急激な膨張
(インフレーション宇宙モデル)



インフレーション宇宙
(A. Guth)

初期の宇宙は指数関数的膨張
(佐藤勝彦)

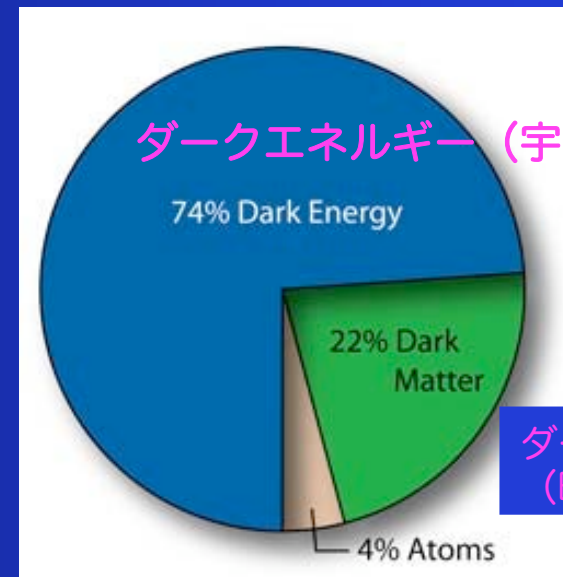
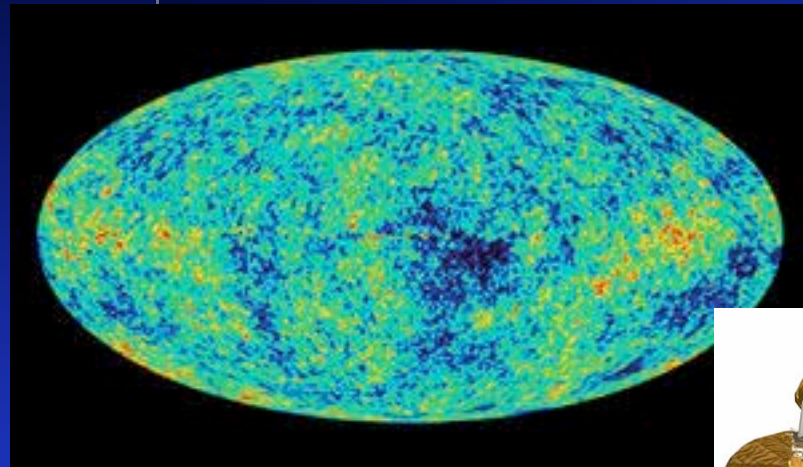


宇宙項の復活【宇宙の加速膨張】

宇宙年齢は 137 ± 1 億年, 平坦なFRW時空

2003年 WMAP衛星

宇宙背景輻射の詳細な観測による宇宙の加速膨張の確定



後にアイシュタインは宇宙項の導入を取り下げる。

「生涯最大の失敗だった」

(the biggest blunder in my career)

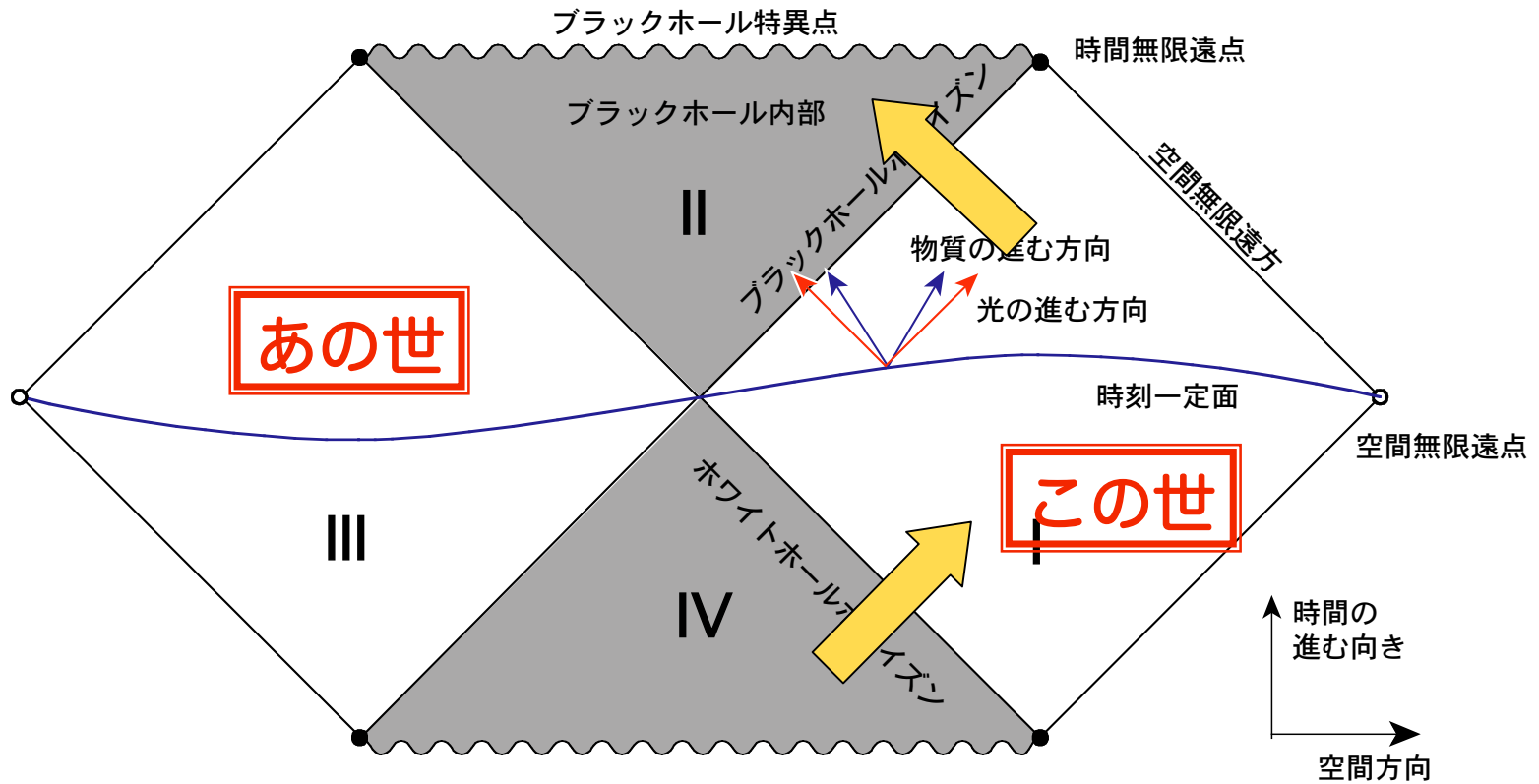
ワームホール wormhole

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



ワームホール？

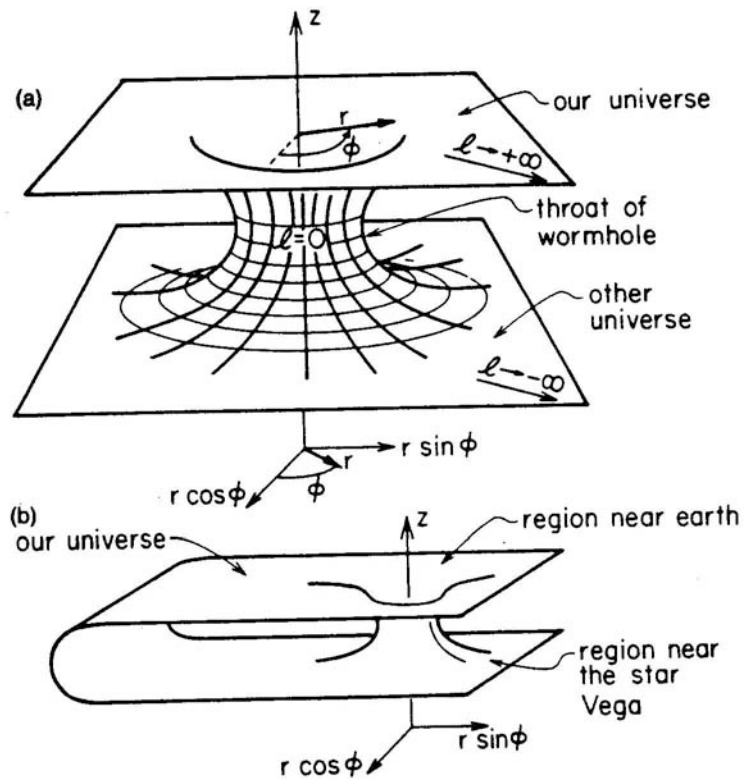
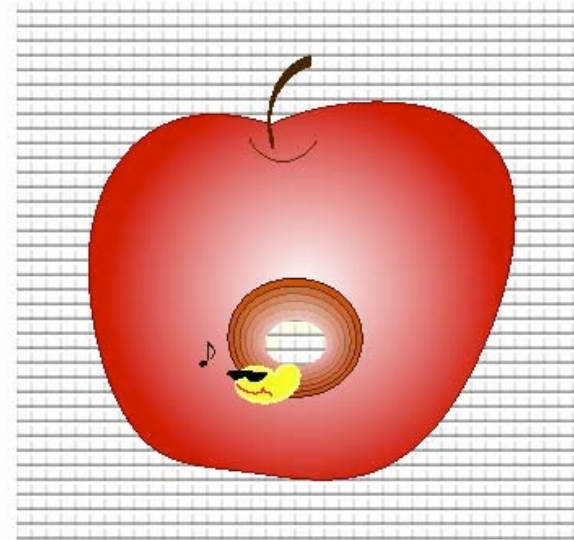
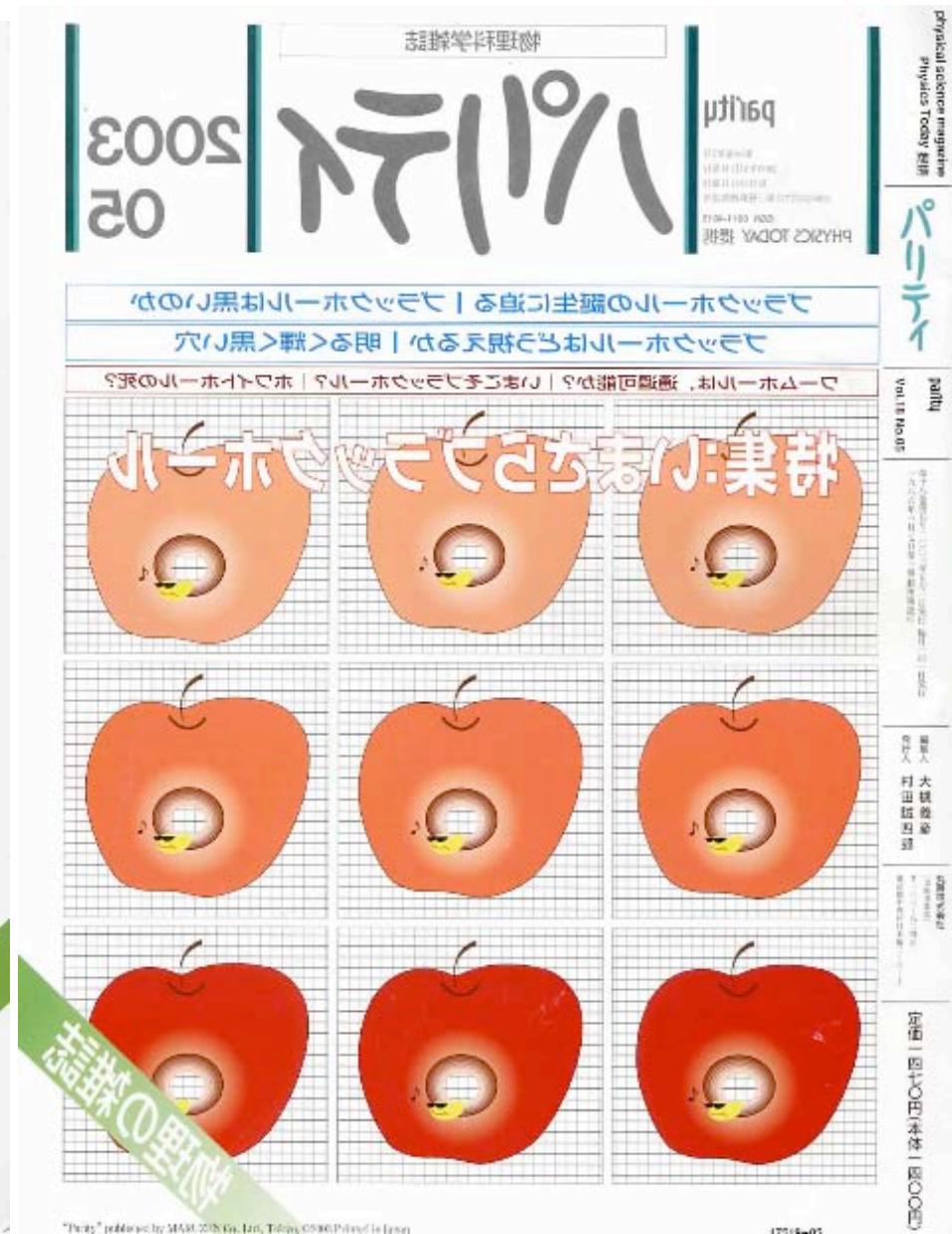


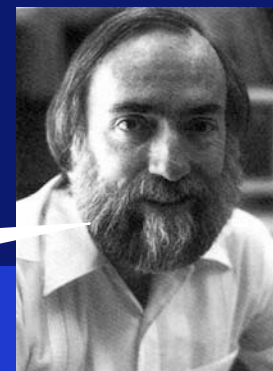
Fig. 1. (a) Embedding diagram for a wormhole that connects two different universes. (b) Embedding diagram for a wormhole that connects two distant regions of our own universe. Each diagram depicts the geometry of an equatorial ($\theta = \pi/2$) slice through space at a specific moment of time ($t = \text{const}$). 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.





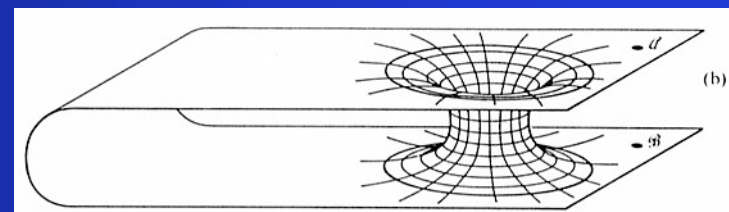
通過可能なワームホール

タイムマシンができる！



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。

Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solutions

J. Richard Gott, III

Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

(Received 18 October 1990)

Exact solutions of Einstein's field equations are presented for the general case of two moving straight cosmic strings that do not intersect. The solutions for parallel cosmic strings moving in opposite directions, each with $\gamma_s > (\sin 4\pi\mu)^{-1}$ in the laboratory frame show closed timelike curves (CTC's) that circle the two strings as they pass, allowing observers to visit their own past. Similar results occur for non-parallel strings, and for masses in (2+1)-dimensional spacetime. For finite string loops the possibility that black-hole formation may prevent the formation of CTC's is discussed.

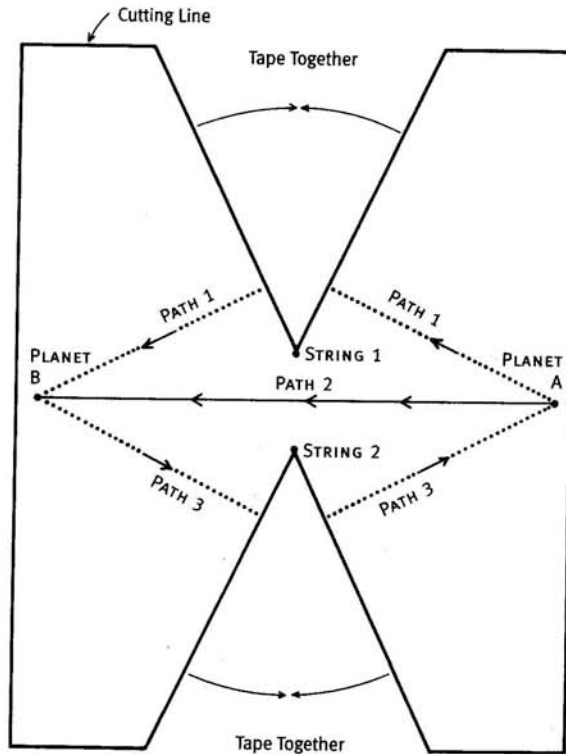


Figure 11. Space Around Two Cosmic Strings

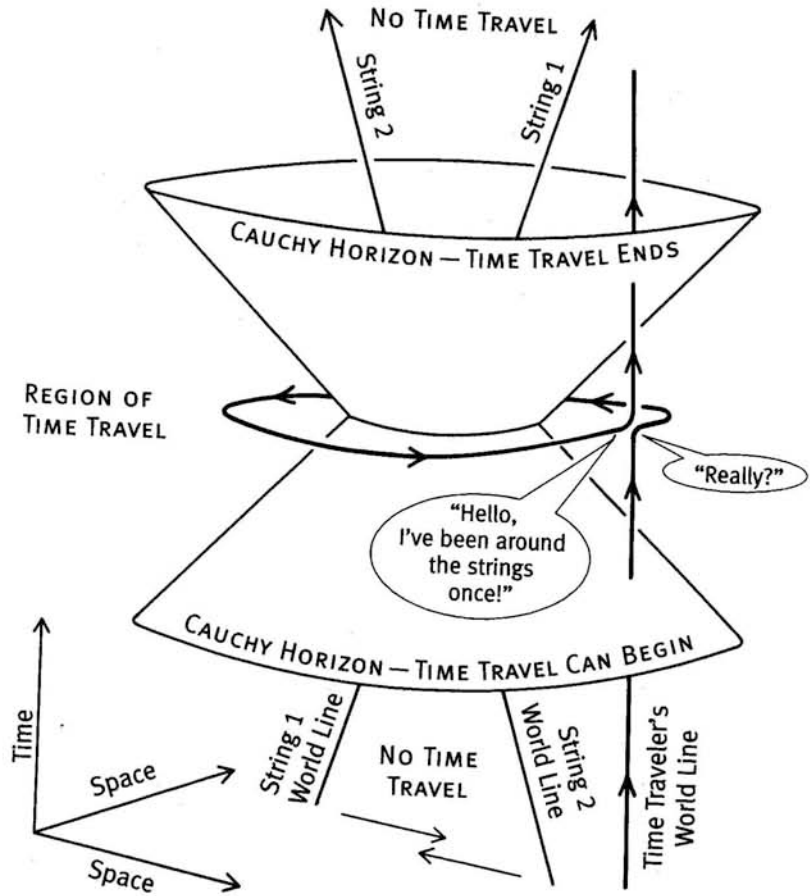
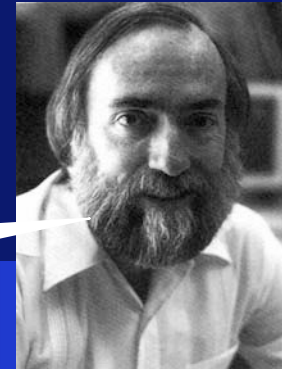


Figure 14. The Region of Time Travel Around Two Cosmic Strings

本当に？

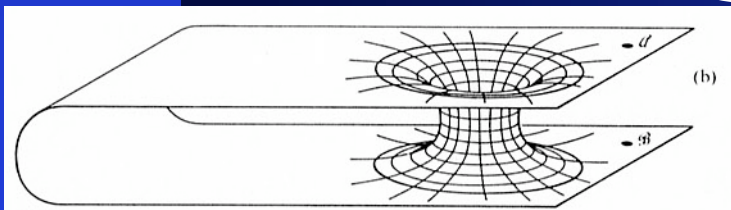
タイムマシンができる！



- 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



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.

正のエネルギー or 負のエネルギー

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

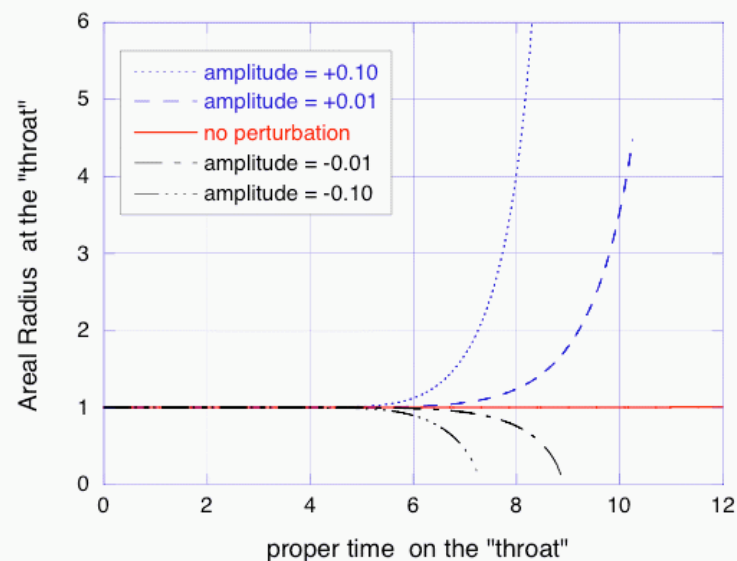
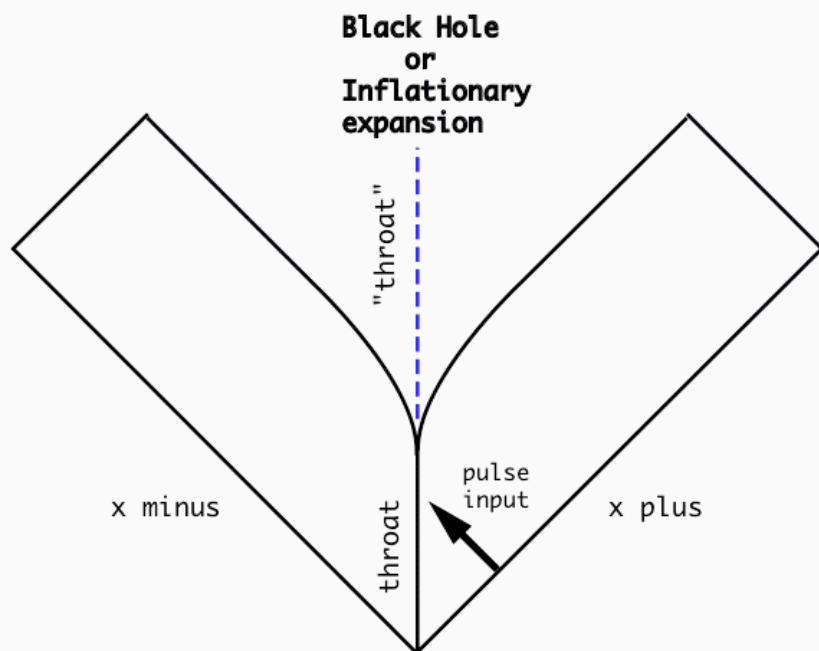


Figure 4: Partial Penrose diagram of the evolved space-time.

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.

Travel through a Wormhole – with Maintenance Operations!

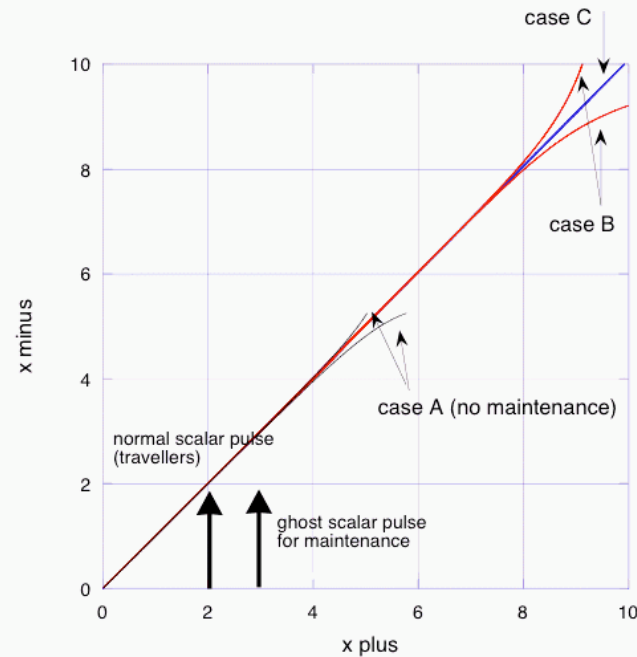


Figure 11: A trial of wormhole maintenance. After a normal scalar pulse, we signalled a ghost scalar pulse to extend the life of wormhole throat. The travellers pulse are commonly expressed with a normal scalar field pulse, $(\tilde{c}_a, \tilde{c}_b, \tilde{c}_c) = (+0.1, 6.0, 2.0)$. Horizon locations $\vartheta_+ = 0$ 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).

ワームホールは不安定だが、
負のエネルギーを銃で出しながら通過することができる！

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

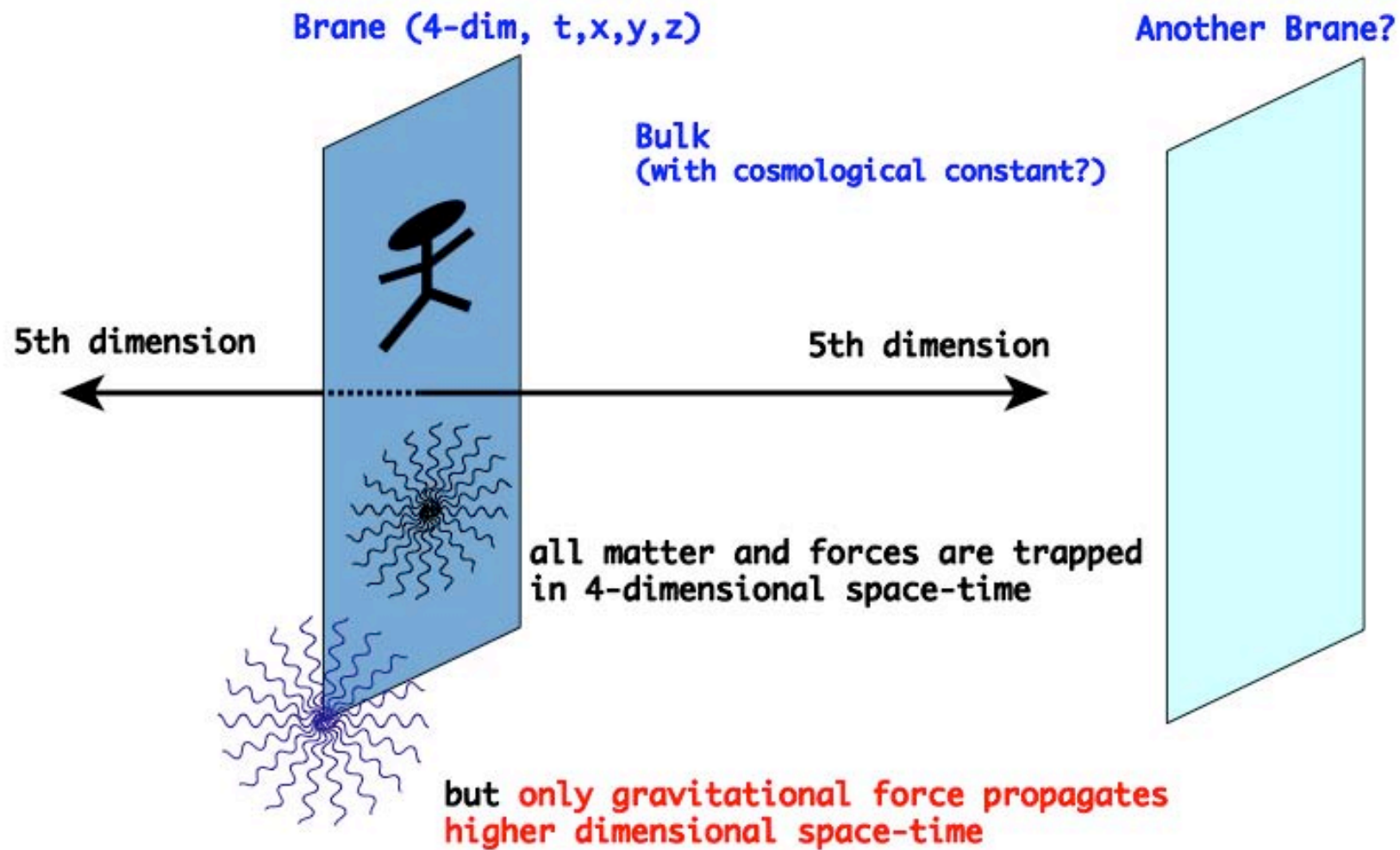
More at: www.arxiv.org/abs/gr-qc/0205041

ブレンワールド brane-world

重力だけ何故弱い？
ひょっとして、我々は5次元の宇宙にいるから??

誰も否定できないので、
現在の、一般相対性理論研究の**流行**.

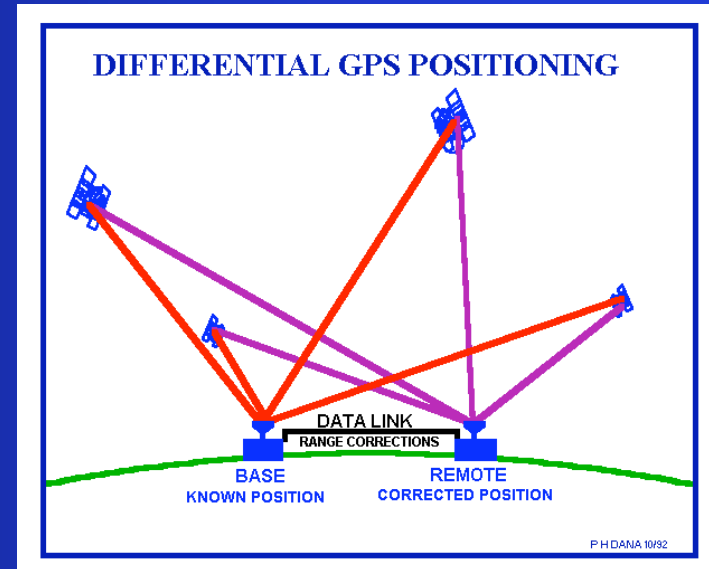
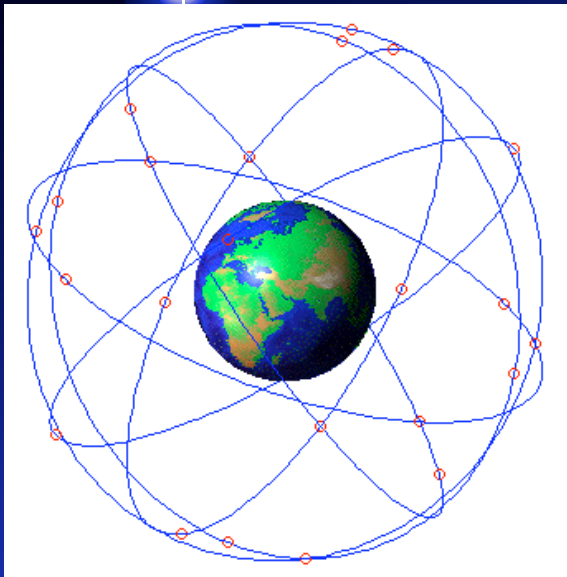
Brane-World model



相対性理論は役に立つ？
Is Relativity worth to study?

もちろん！

GPSにも相対性理論 (Global Positioning System)



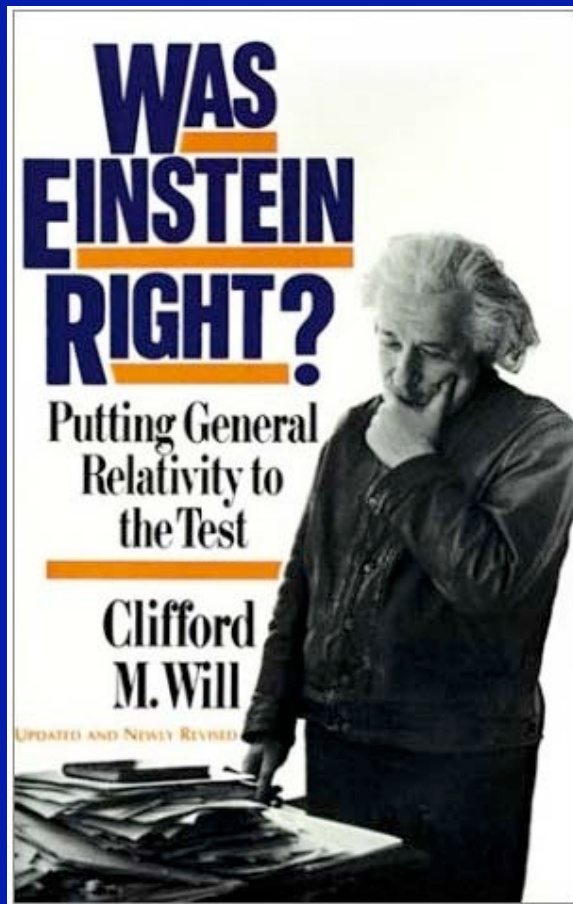
正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で、三角測量→精度±15m

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



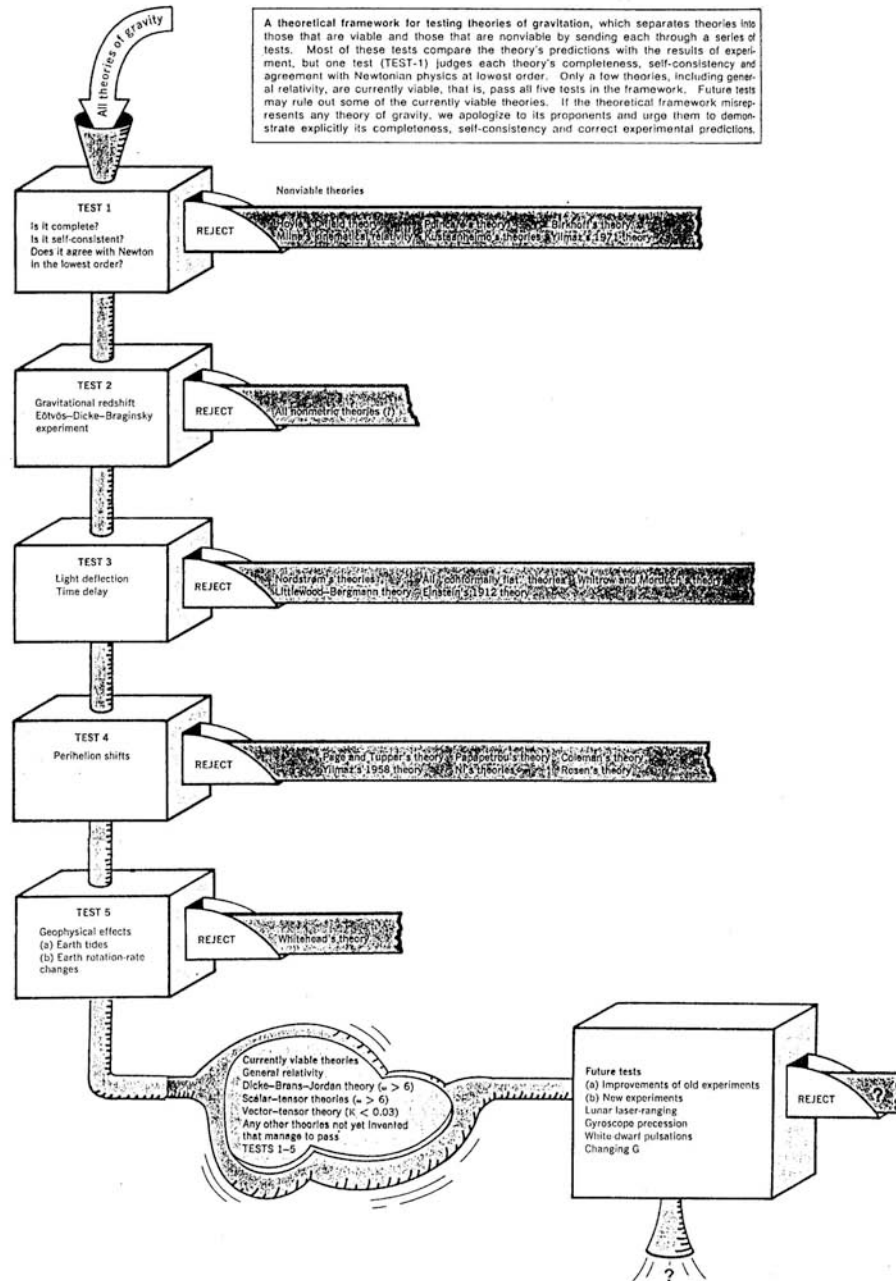
アインシュタインは正しかったか？



- ✓ 等価原理のテスト
- ✓ レーダーエコーの遅れのテスト
- ✓ 連星中性子星の軌道の変化の観測
- ✓ 重力レンズ効果の観測

◆ 一般相対性理論は、
99.9999%
正しい。

他の重力理論？



アインシュタイン以降，多くの重力理論が提案されてきたが，すべて棄却されている。

一般相対性理論が，一番シンプルで，一番実験や観測に合う。

←Will, Physics Today, 1972

相対性理論の世界

特殊相対性理論

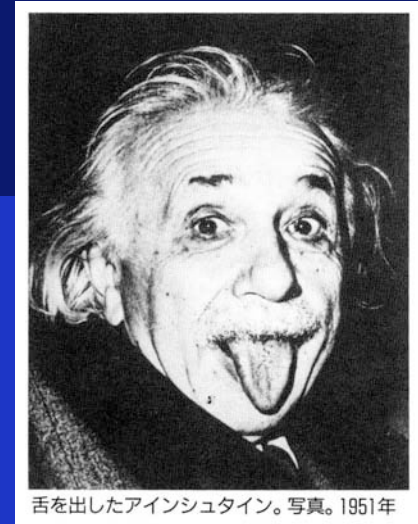
時間の遅れ, $E=mc^2$, GPS

一般相対性理論

空間の歪み, 重力レンズ

ブラックホール, 膨張宇宙, 重力波

ワームホール, 高次元宇宙, GPS



舌を出したアインシュタイン。写真。1951年

「探求を続ければ続けるほど、知らないことが多いことに気がつく。たぶん人間とはそういうもの。」
(アインシュタイン)