

京都精華大学 2015年前期

自然科学論

担当教員：磯部洋明

京都大学大学院総合生存学館 准教授

京都精華大学・非常勤講師

第2回「相対性理論、宇宙の始まりと終わり」

2015年4月21日

今日の内容

- わたしたちの宇宙はどんなところ？
- 宇宙はどのようにして始まったか？
- 終わりはあるのか？

アルベルト・アインシュタイン

Albert Einstein, 1879-1955

ドイツ生まれのユダヤ人。イタリア、スイスを経て、ナチス政権の迫害を逃れてアメリカへ。

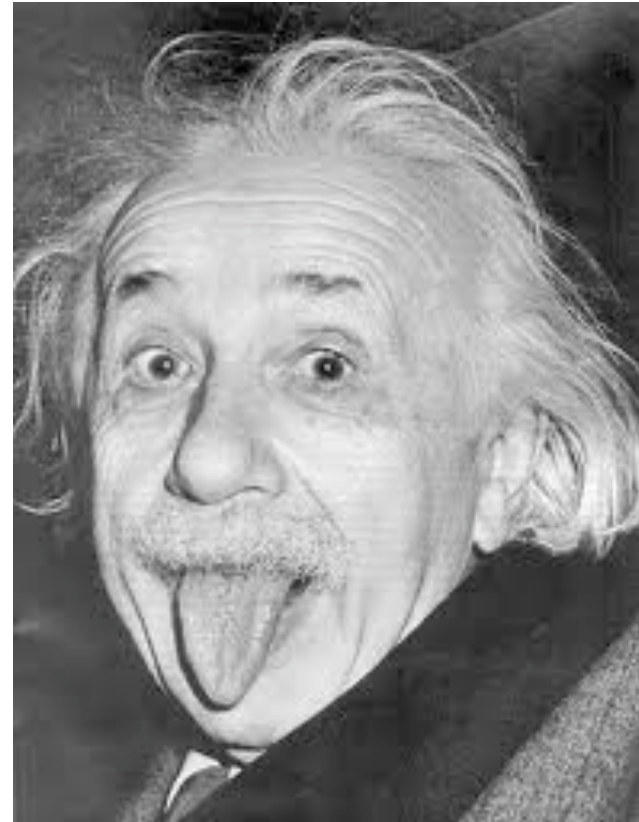
「奇跡の年」1905年に、光電効果、ブラウン運動、特殊相対性理論の論文を発表。この時は特許局の職員だった。

1916年、一般相対性理論を発表

1921年、「光電効果の発見」によりノーベル物理学賞受賞

平和主義者だったが、第二次世界大戦中は当時のルーズベルト米大統領に、ナチスが先に原爆を製造してしまうことを懸念する手紙に署名した。

後年、廃絶・科学技術の平和利用を訴えたラッセル・アインシュタイン宣言を発表。



ラッセル・アインシュタイン宣言(1955年、ロンドン)

....私たち(宣言署名者)は、人類として、人類に向かって訴える—あなたがたの人間性を思い出しそしてその他のことを忘れなさい、と。もしそれができるならば、道は新しい樂園へむかって開けている。もしできないならば、あなたがたのまえには全面的な死(全体的破滅)の危険が横たわっている...

将来の世界戦争においてはかならず核兵器が使用されるであろうし、そしてそのような兵器が人類の存続をおびやかしているという事実からみて、私たちは世界の諸政府に、彼らの目的が世界戦争によっては促進されないことを自覚し、このことを公然とみとめるよう勧告する。したがってまた、私たちは彼らに、彼らのあいだのあらゆる紛争問題の解決のための平和的な手段をみいだすよう勧告する。

署名者:

- M. ボルン教授(ノーベル物理学賞)、P. W. ブリッジマン教授(ノーベル物理学賞)
- A. アインシュタイン教授(ノーベル物理学賞)、L. インフェルト教授
- F. ジョリオ・キュリー教授(ノーベル化学賞)、H. J. ムラー教授(ノーベル生理学・医学賞)
- L. ポーリング教授(ノーベル化学賞)、C. F. パウエル教授(ノーベル物理学賞)
- J. ロートブラット教授、B. ラッセル卿(ノーベル文学賞)、湯川秀樹教授(ノーベル物理学賞)

特殊相対性理論 (A. Einstein, 1905)

- 1905年にアインシュタインが発表した、「動いている物体の電気力学」に関する理論
 - 普通に相対性理論というと、通常この特殊相対性理論をさす
 - 特殊相対性理論を重力のある状況に一般化したのが一般相対性理論。1916年発表。
- 基本となる原理は2つ
 - 光の速度は光源の速度によらず一定(光速度不変の原理)
 - お互いに「等速度で」動いている人にとって、物理法則は同じ。

注:「原理」とは、「世界はそういうものである」として、理論を考える時の前提に立つもの。「なぜそうなるのか」ということは分からない。(というより、「なぜそうなるのか」を考えるためには、より根源的な「原理」を探す必要がある)

「相対性」の意味

止まっている



動いている



区別できない



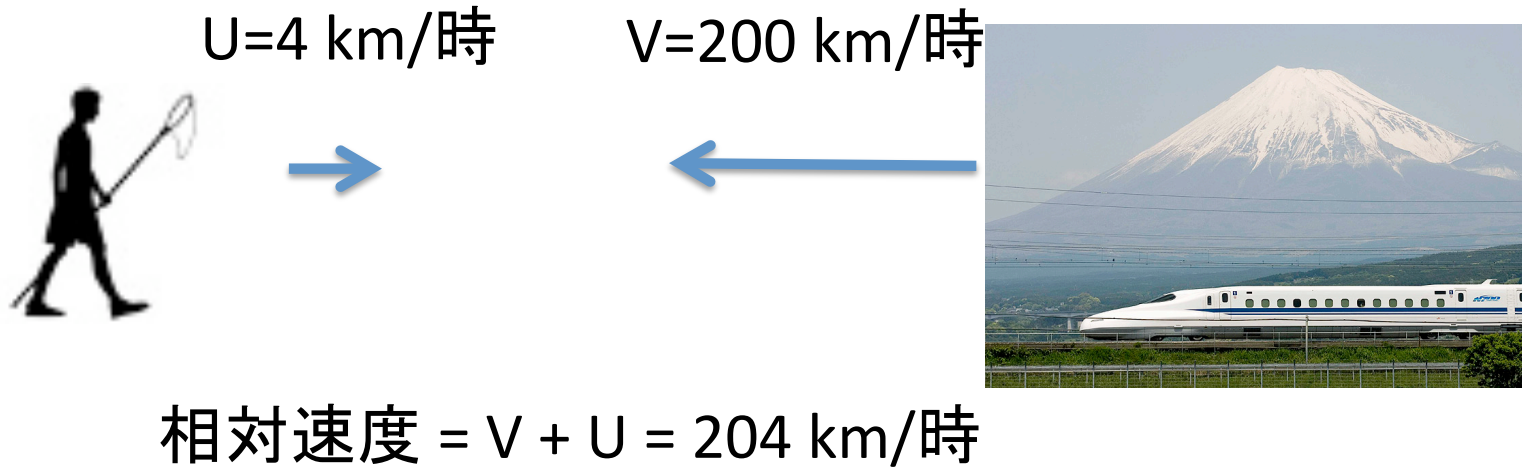
動いている



止まっている



日常感覚の世界



時速4kmで歩く人から、時速200kmで向かってくる新幹線を見たら、204km/時で向かってくるように見える。

これは本当は正しくない

本当はこうなっている

U=4 km/時 V=200 km/時


$$\text{相対速度} = \frac{V + U}{1 + \frac{VU}{C^2}} \approx 203.99999999999986 \text{ km/時}$$

時速4kmで歩く人から、時速200kmで向かってくる新幹線を見たら、約203.99999999999986km/時で向かってくるように見える。

ただし、 $C \approx 30\text{万km/秒} \approx 10\text{億km/時} \approx 1\text{秒間に地球を7週半}$

光の場合



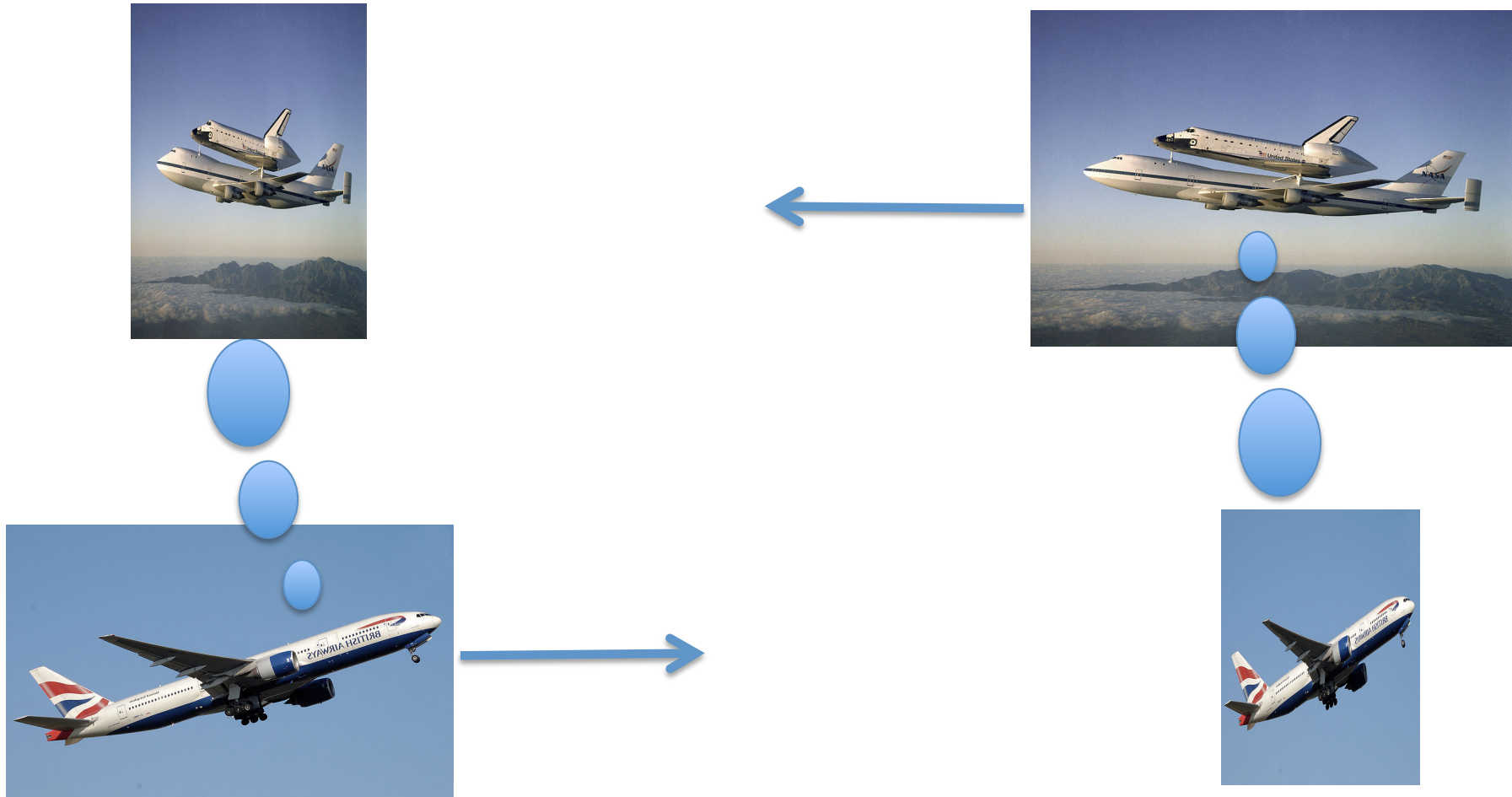
右に進む光から左に進む光を見たら、 $30万+30万=60万$ km/秒で近づいてみえる？ **=>間違い**

正しい相対速度は、 $\frac{V+U}{1+\frac{VU}{C^2}}$ で計算する。

この場合、 V も U も $C=30万$ km/秒とすると、相対速度は $\frac{C+C}{1+\frac{CC}{C^2}} = \frac{2C}{2} = C$

つまり、光の速度は光源が速度 C で動いていてもやはり C になる。
(光の速度不変の原理)

特殊相対性理論の帰結
光の速度に近い速度で運動しているものは縮んで見える



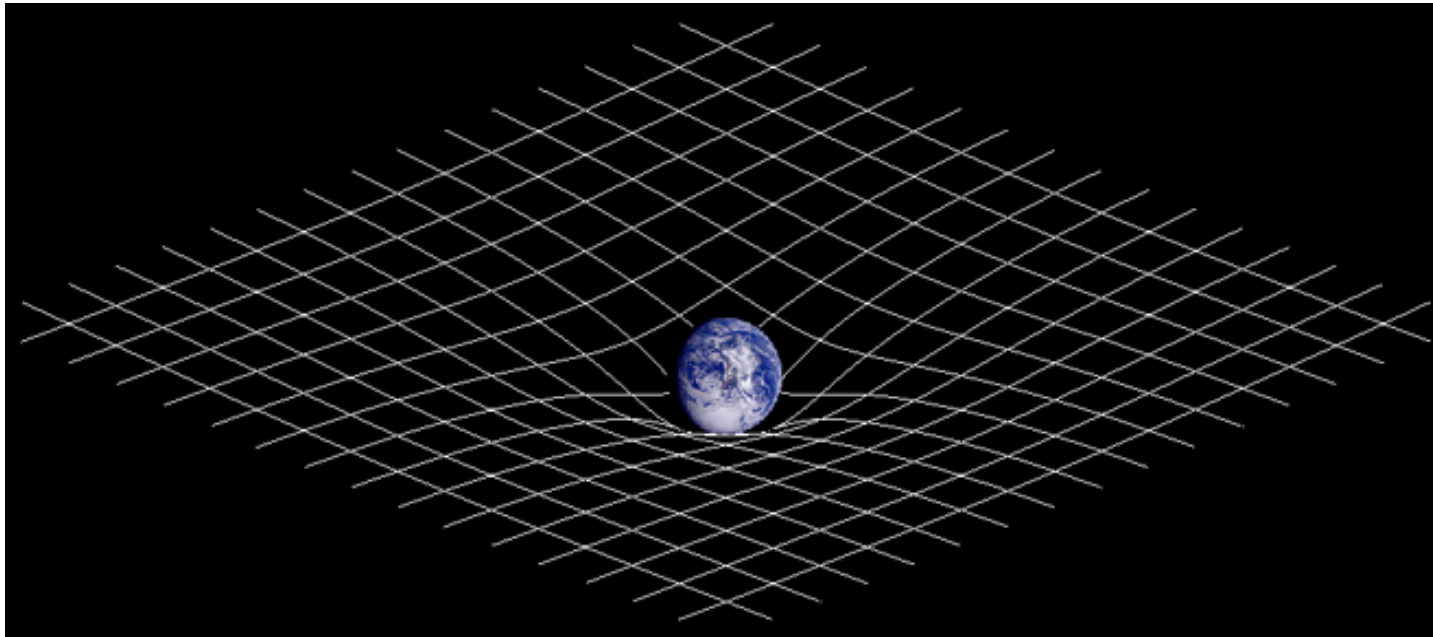
注：運動する他人が縮んで「見える」のであって、動いている本人にとっては同じ。
時間もゆっくり進んで見える（双子のパラドックス）

アインシュタインの一般相対性理論 (A. Einstein, 1916)

アインシュタイン方程式＝時空のゆがみ具合を表す方程式

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

空間のゆがみ具合 = 宇宙の物質(エネルギー)の分布



From Wikipedia Commons

一般相対性理論は時空と重力の理論。時空がゆがんでいる⇒重力を感じる

一般相対性理論の予言：宇宙は静止してない？

- アインシュタイン方程式は、天体の周りの重力の性質を非常によく説明する=>だから多分正しいはず！
- ところが、アインシュタイン方程式を宇宙全体に当てはめてみると、宇宙全体が膨張しているか縮んでいるかしかあり得ない、ということになる。
- 宇宙は時間的に変化しない、というのが当時の宇宙観。アインシュタインでさえも、「変動する宇宙」という描像を当初受け入れられなかった。

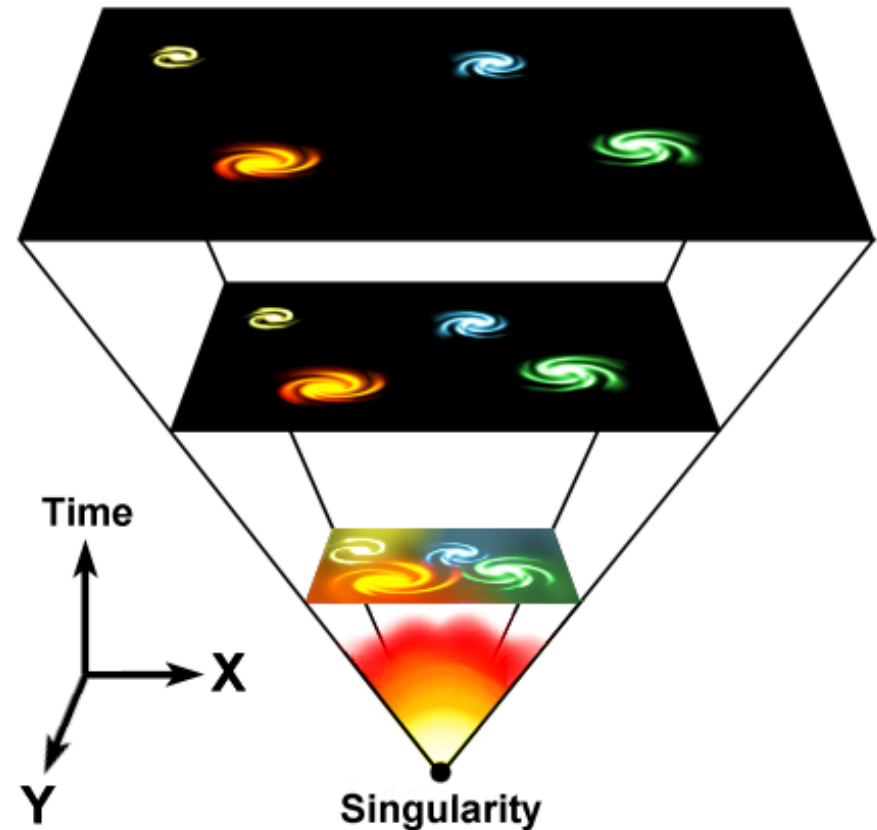
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

宇宙項

- アインシュタインは宇宙をなんとか「静止」させるため、収縮させる引力につりあうような反発力の項(宇宙項)を方程式に付け足した。
- 宇宙が実際には静止しておらず、アインシュタインは後に「人生最大の誤りだった」と述べた

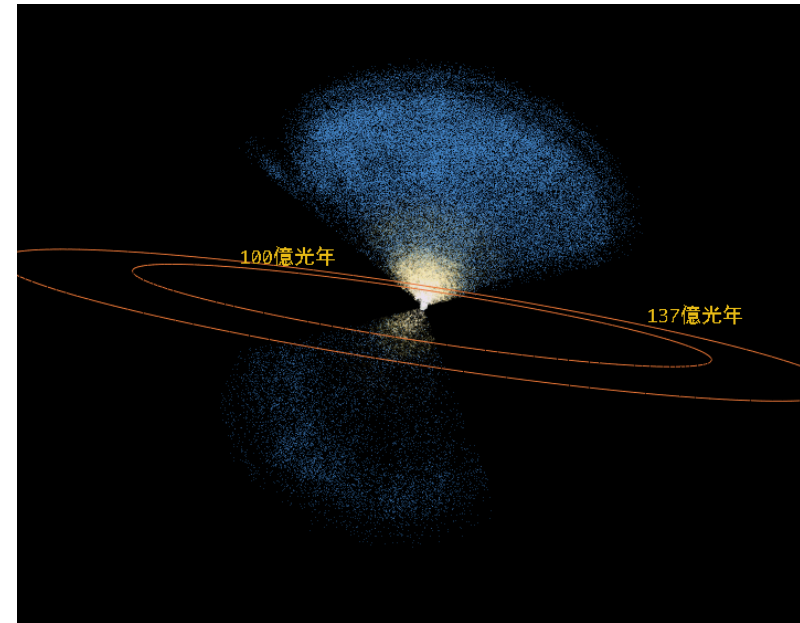
宇宙は膨張している！？

- 観測的発見：遠くの銀河ほど（太陽系から）速く遠ざかっている(E. Hubble, 1920年代)
- ということは昔は今より小さかった
- => 宇宙には始まりがあった！



From Wikipedia Commons

宇宙に端はある？



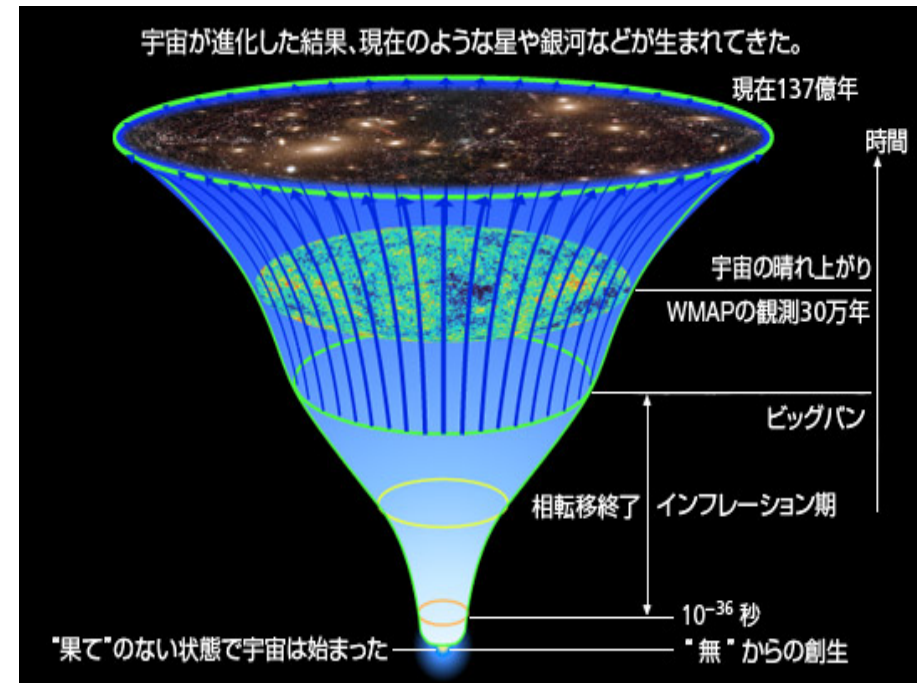
- 全てのモノ、情報は、光の速度を超えられない。
- 一つだけ光の速度を超えられるのは、「空間が広がる速さ」。
- 地球から遠い場所ほど、地球から速く遠ざかっている。
- ある地点から先は、地球から光の速さより速く遠ざかっているため、我々は決してそこへ行けないし、そこで起きている情報を得ることはできない。
- その距離を地球からみた「観測可能な宇宙」の果てということ是可以する
- その先に何があるかは、「原理的に」見ることができない。
- 決して見ることのできない、お互いに影響を与えることができない領域を「存在している」と言えるか？物理学と哲学の境界の問題。

ビッグバン宇宙論

- 現在宇宙は膨張している
- つまり昔の宇宙は今より小さかった。
- ずっとさかのぼるとほとんど一点になる。宇宙は超高温高圧の状態から生まれた... **ビッグバン** (ジョージ・ガモフ 1948)
- 膨張速度が分かれば、逆算すれば宇宙の年齢がわかる。
- 最新の観測結果では、宇宙の年齢は約137億年

宇宙はどのように生まれたのか？～現在の理解

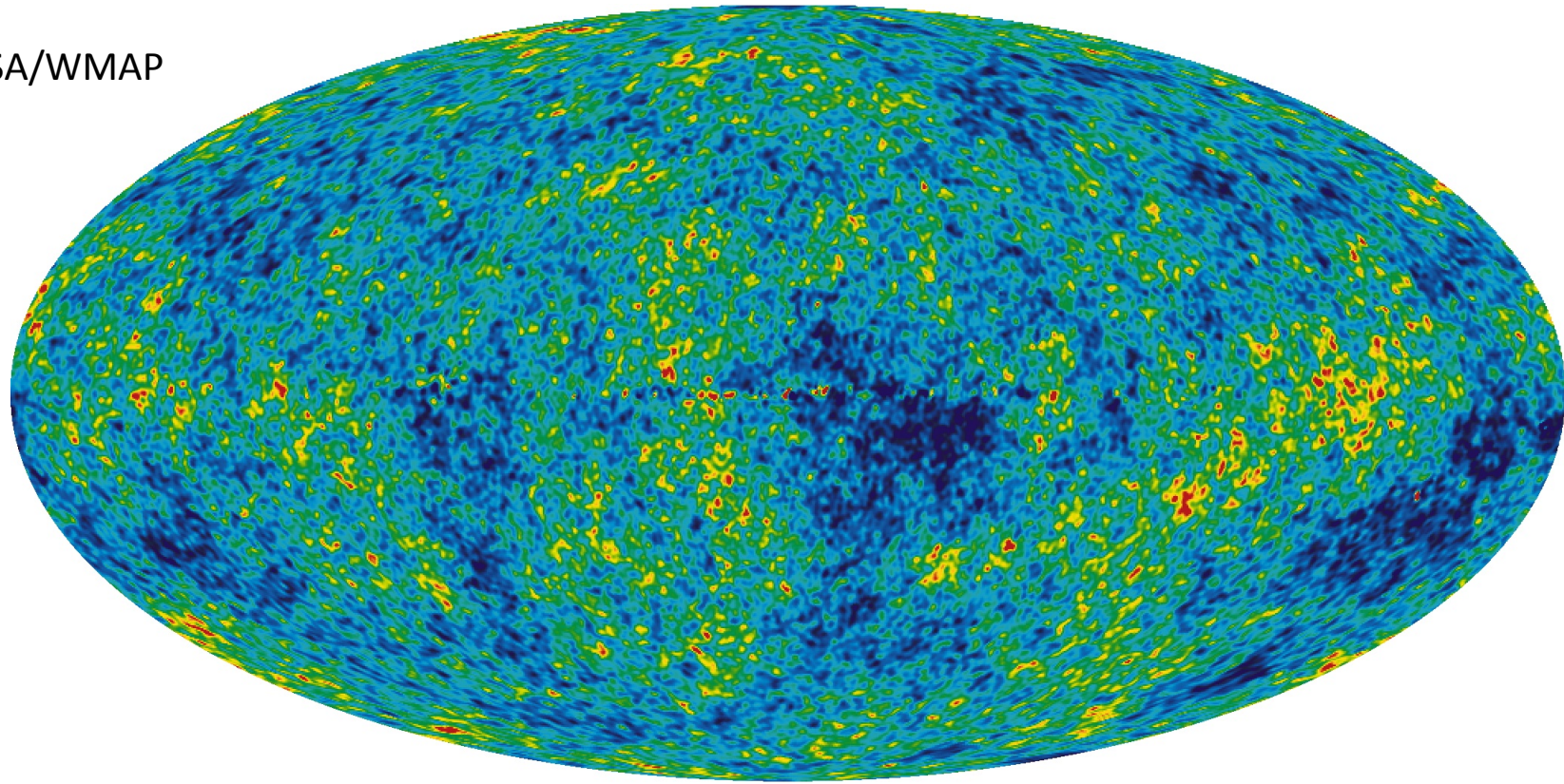
- 宇宙は「無」から生まれた
- 「無」のゆらぎが、ある時「真空の相転移」を起こし、急激に広がった（インフレーション）
- 「真空の相転移」が起きて潜熱が解放されて云々...（難解）



佐藤勝彦先生のHPより
<http://utaprc4.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~sato/>

ビッグバンの名残：宇宙背景放射

NASA/WMAP



-200 $T(\mu\text{K})$ +200 WMAP 5-year

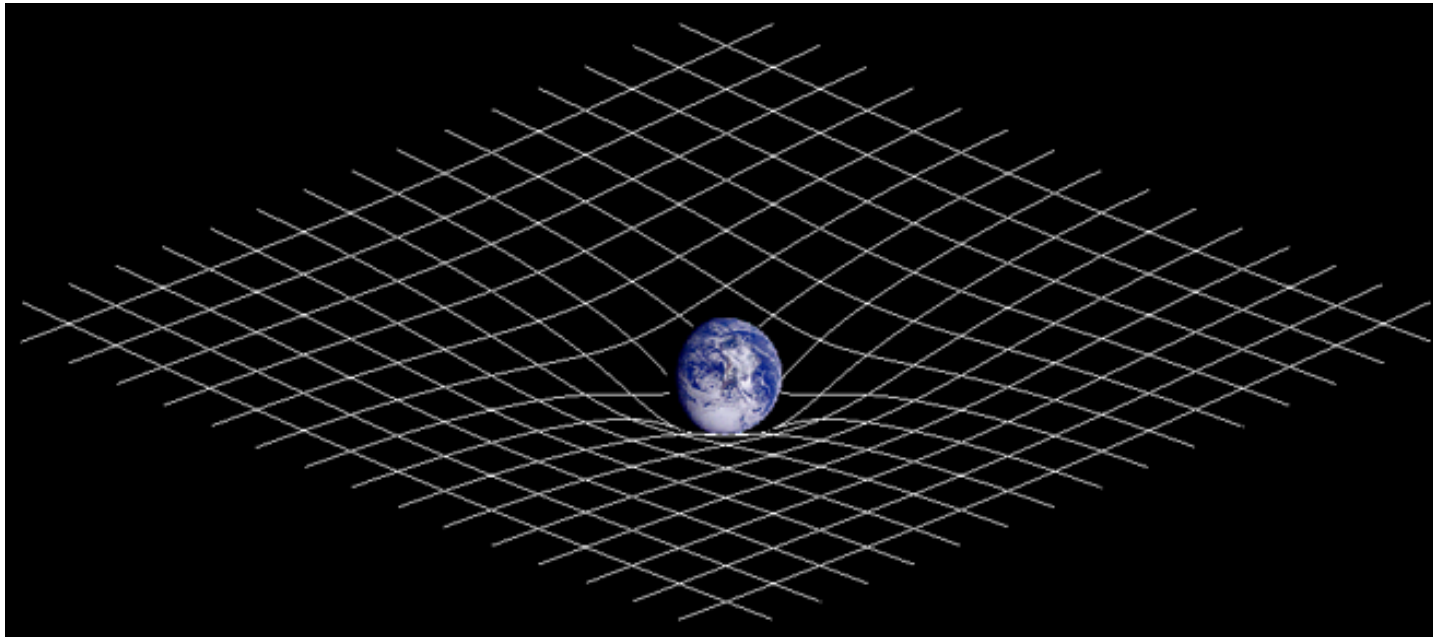
- 絶対温度で約2.7度(約マイナス270度)に相当する電波が宇宙空間に満ちている
- 超高温のビッグバンから膨張によって冷えたなごり

アインシュタインの一般相対性理論 (A. Einstein, 1916)

アインシュタイン方程式＝時空のゆがみ具合を表す方程式

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

空間のゆがみ具合 = 宇宙の物質(エネルギー)の分布



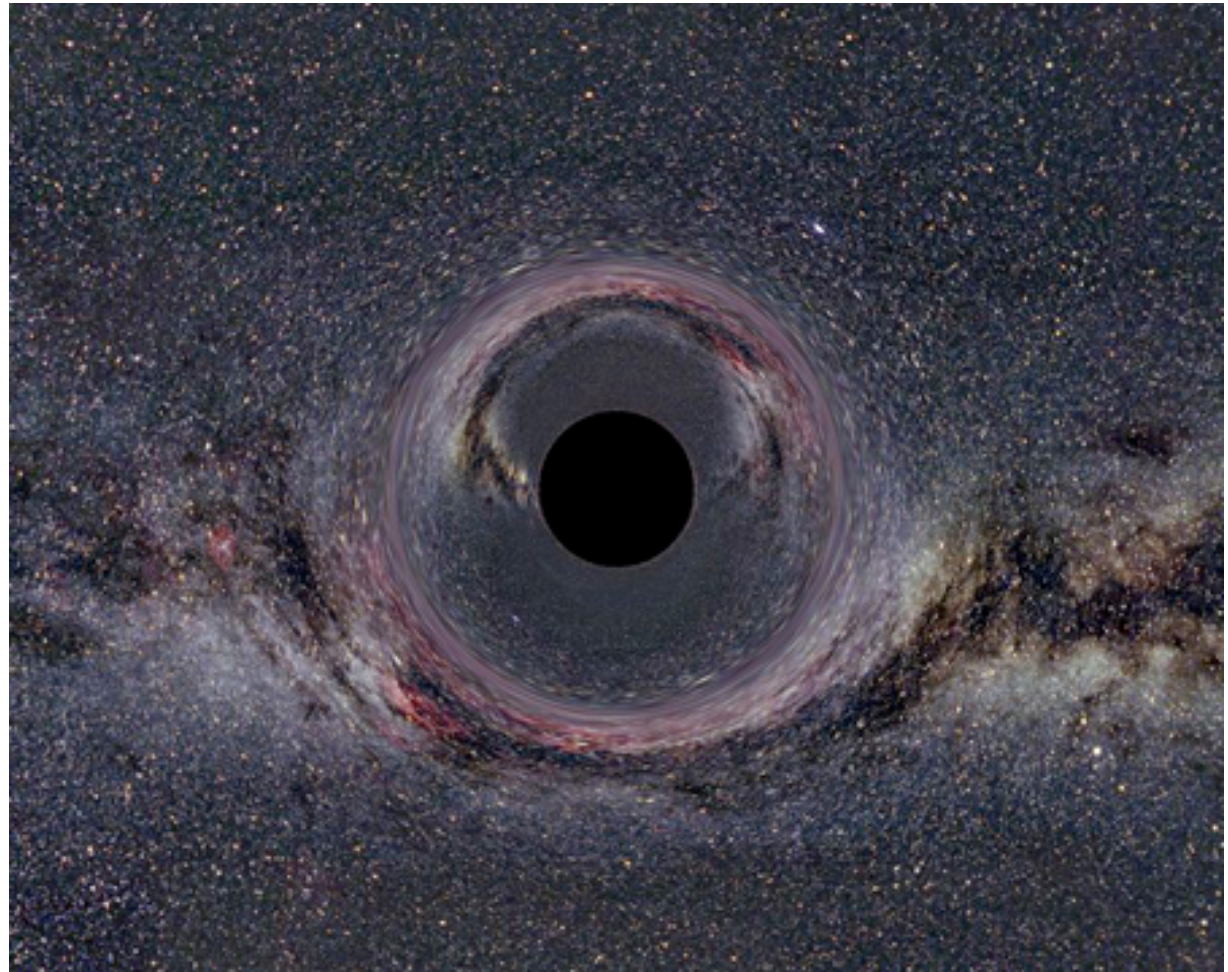
From Wikipedia Commons

一般相対性理論は時空と重力の理論。時空がゆがんでいる⇒重力を感じる

一般相対性理論の予言：ブラックホール

- 重力が強く、光さえも抜け出せない領域

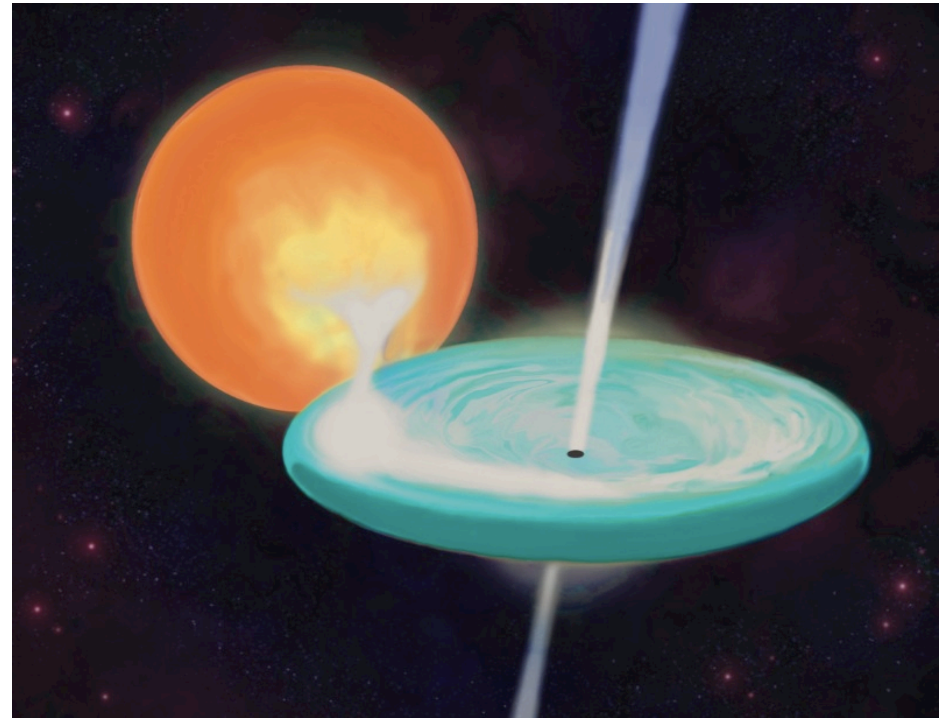
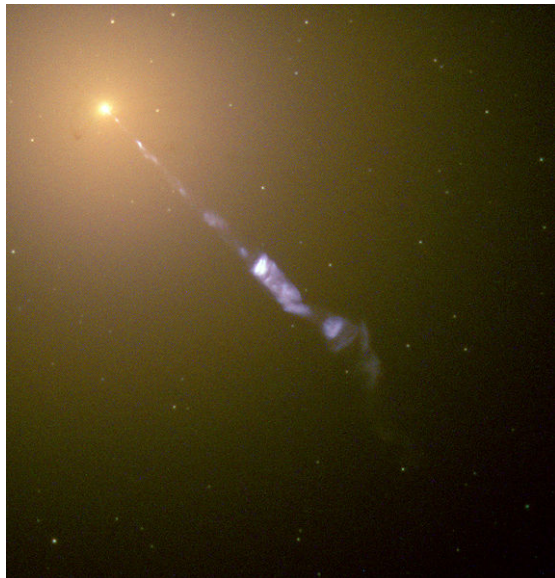
最初は理論的に「ありえる」というだけで実際には存在しないと思われていたが、今ではたくさん見つかっている。



ブラックホールをどうやって見つける？

ブラックホールその物はみえない。

- ・周囲の天体の動き
=> すごく強い重力がある
=> ブラックホール
- ・ブラックホールに落ち込むガスが
明るく光ったり、ジェットのようにガスを
放出したりする



M87銀河...中心の巨大ブラックホールから
ジェットが吹き出している

ホワイトホールって？

- ブラックホールの反対のようなもの。光の速度で突っ込んでいっても、決して中に入れない。
- もともとブラックホールは、一般相対性理論から理論的に「存在しうる」ことが示されたもので、初めは実際には存在しないと思われていた。
- ホワイトホールも、一般相対性理論的には「あってもよい」。が、まだ現実に見つかってはいない。

SPACE OUTSIDE WORMHOLE

ワームホール

MOUTH

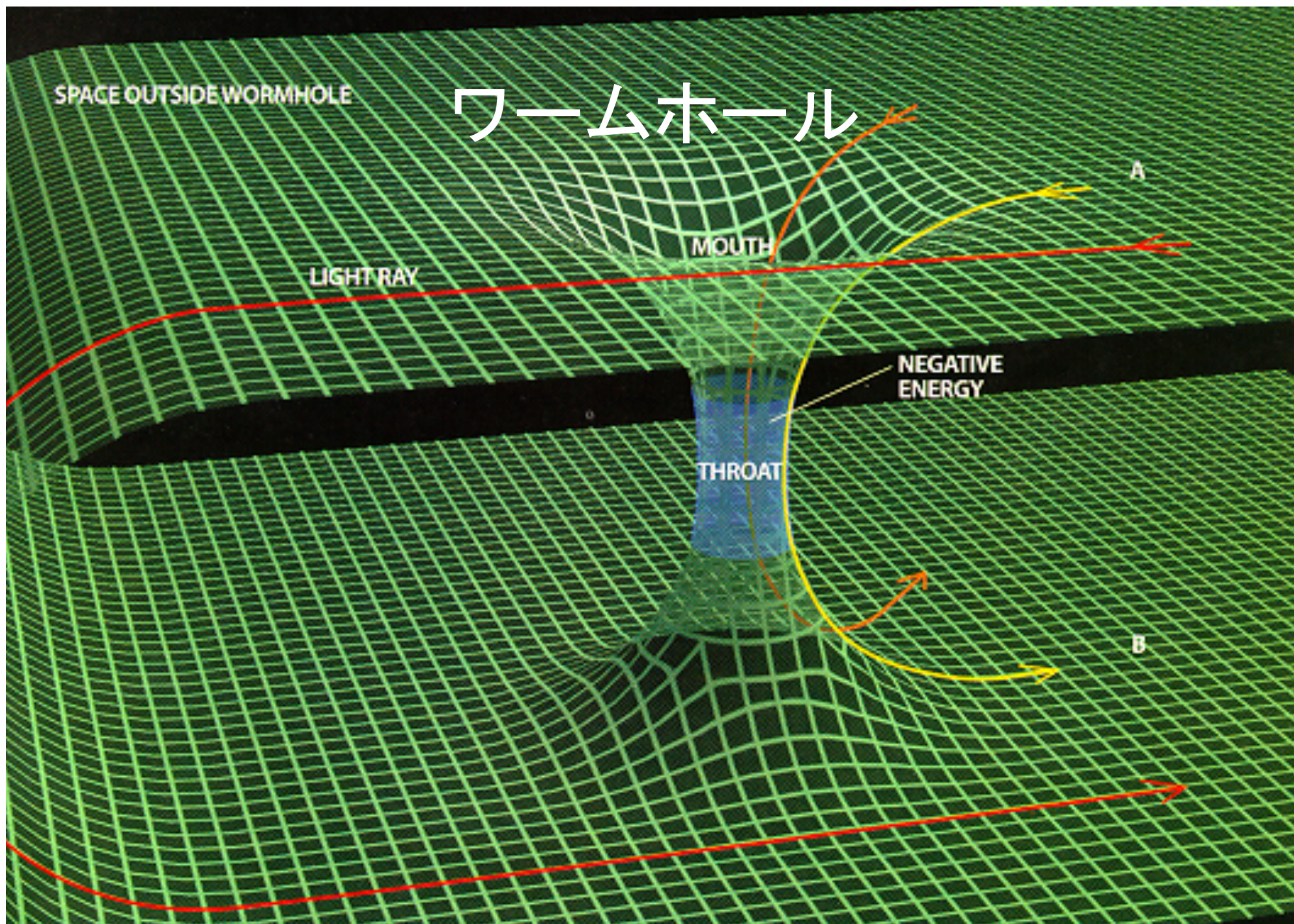
LIGHT RAY

NEGATIVE
ENERGY

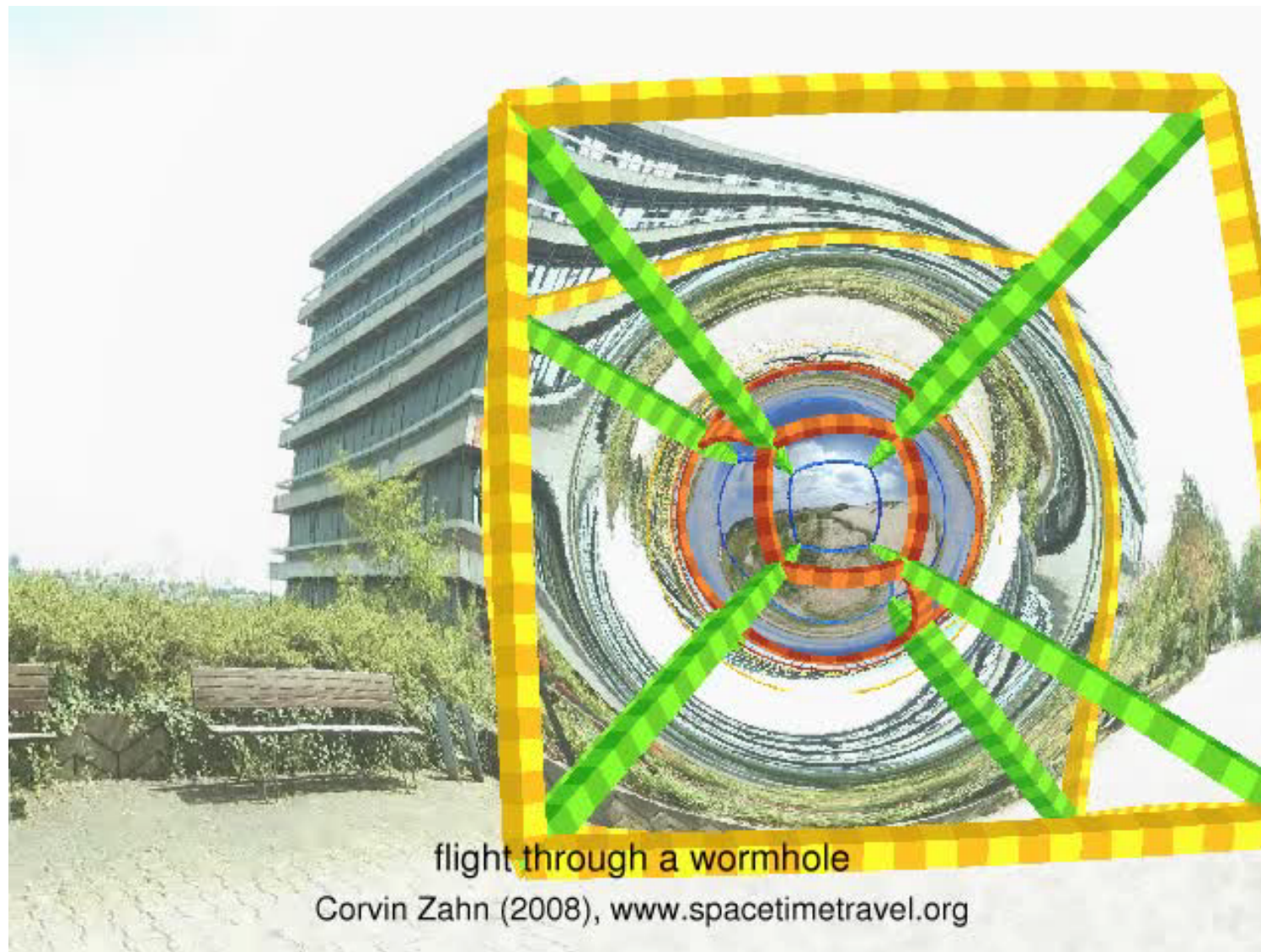
THROAT

A

B



アインシュタイン方程式にもとづいて、もしワームホールを通り抜けられたらどのように見えるかを計算した動画。



<http://www.spacetime travel.org/wurmlochflug/wurmlochflug.html>
から動画ファイルをダウンロードできます

- ワームホールも一般相対性理論(時空の歪みを表すアインシュタイン方程式)の解(式を解いた結果)の一種で、ブラックホールとホワイトホールをつなぐもの。
- ワームホールを通ると、遠くはなれた時空の違う場所に出る(=一種のワープ)
- 人間が通れるようなワームホールが存在できるかどうかは理論的にもよくわかっていない

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad \text{アインシュタイン方程式}$$

VOLUME 61, NUMBER 13

PHYSICAL REVIEW LETTERS

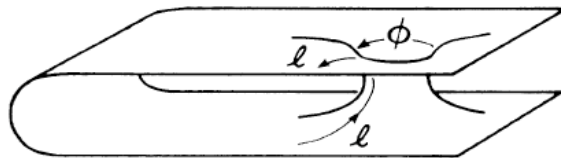
26 SEPTEMBER 1988

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)



ワームホールの存在を予言した
物理学の論文より

FIG. 1. A wormhole and the external universe at a specific moment of time, embedded in a fictitious higher-dimensional space.

ワープ

- ワープ＝光の速さを越える速度で空間を移動すること(この授業での定義)
- 光速度不変の原理より、空間を移動する速さは光の速度を越えられない
- 考えられる可能性は2つ。
- 1. ワームホールを使って近道をする
- 2. 空間を膨張させてその膨張に乗ってサーフィンのように進む(ワープ航法)
 - 空間中を進む速度は光速を越えられないが、空間自体を膨張させる速さは光速を越えてもよいという事実を使う

ワープ航法

Class. Quantum Grav. **11** (1994) L73–L77. Printed in the UK

LETTER TO THE EDITOR

The warp drive: hyper-fast travel within general relativity

Miguel Alcubierre

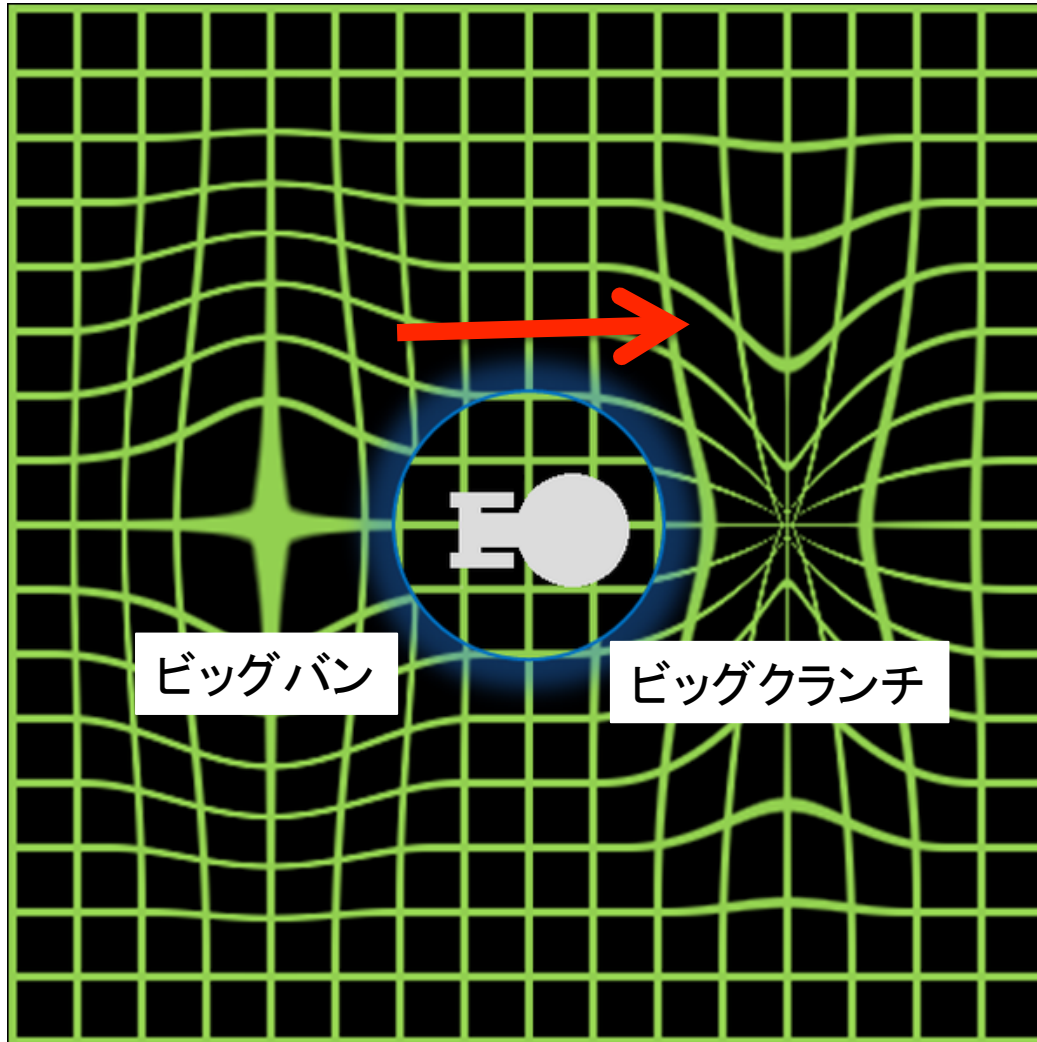
Department of Physics and Astronomy, University of Wales,
College of Cardiff, PO Box 913, Cardiff CF1 3YB, UK

Received 19 January 1994, in final form 24 February 1994

Abstract. It is shown how, within the framework of general relativity and without the introduction of wormholes, it is possible to modify a spacetime in a way that allows a spaceship to travel with an arbitrarily large speed. By a purely local expansion of spacetime behind the spaceship and an opposite contraction in front of it, motion faster than the speed of light as seen by observers outside the disturbed region is possible. The resulting distortion is reminiscent of the ‘warp drive’ of science fiction. However, just as happens with wormholes, exotic matter will be needed in order to generate a distortion of spacetime like the one discussed here.

PACS numbers: 0420, 0490

ワープ航法の原理



- 宇宙船の前方で「ミニビッグバン」を起こして空間を膨張させ、

- 宇宙船の後方で「ミニビッグクラッチ」を起こして空間を収縮させる

- 空間の膨張の上をサーフィンするように移動する

- ビッグバンやビッグクラッチをどのように起こすかは考えられていない。非現実的に巨大なエネルギーを必要とするので、今のところ実現可能だと考えている人は少ない。

宇宙の未来は？

Galaxy Cluster SDSS J1004+4112: "Quintuple Quasar"  HUBBLESITE.org

宇宙の膨張はいつか止まる？

- ボールを上に出るといつか落ちてくる
- もっと速い速度で出ると、より高くまで上がって、やがて落ちてくる
- ある速度を超えると、地球の引力を振り切って落ちてこない
- 宇宙の膨張もこれと同じ。宇宙の中の物質が持つ引力と、膨張の勢いのバランスで未来が決まる

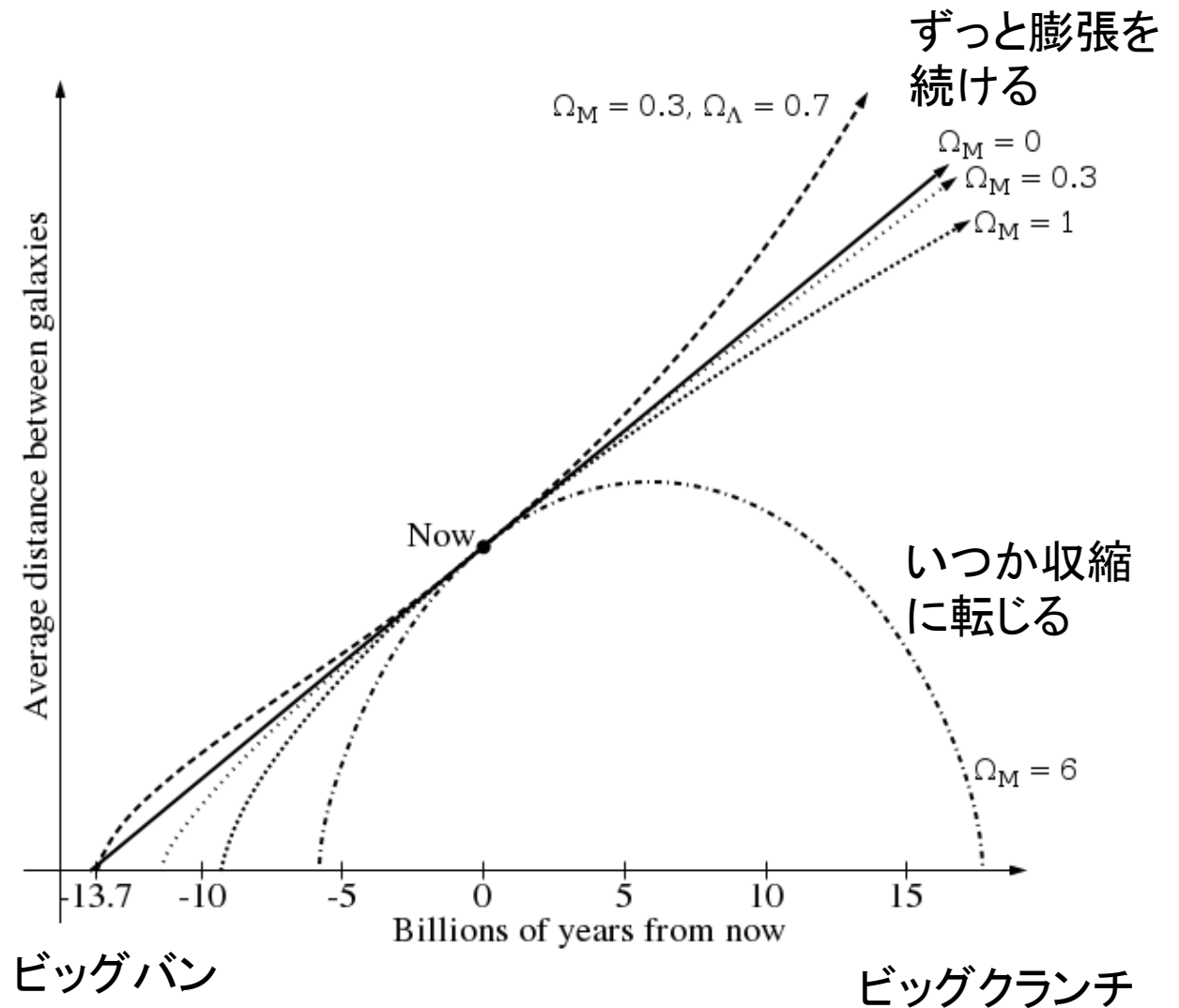
宇宙の運命を予言する アインシュタイン方程式の解

宇宙の中にある物質の
引力が膨張の勢いに勝
てば、宇宙はいつか収
縮に転じて、最後はつぶ
れてしまう

=ビッグクランチ

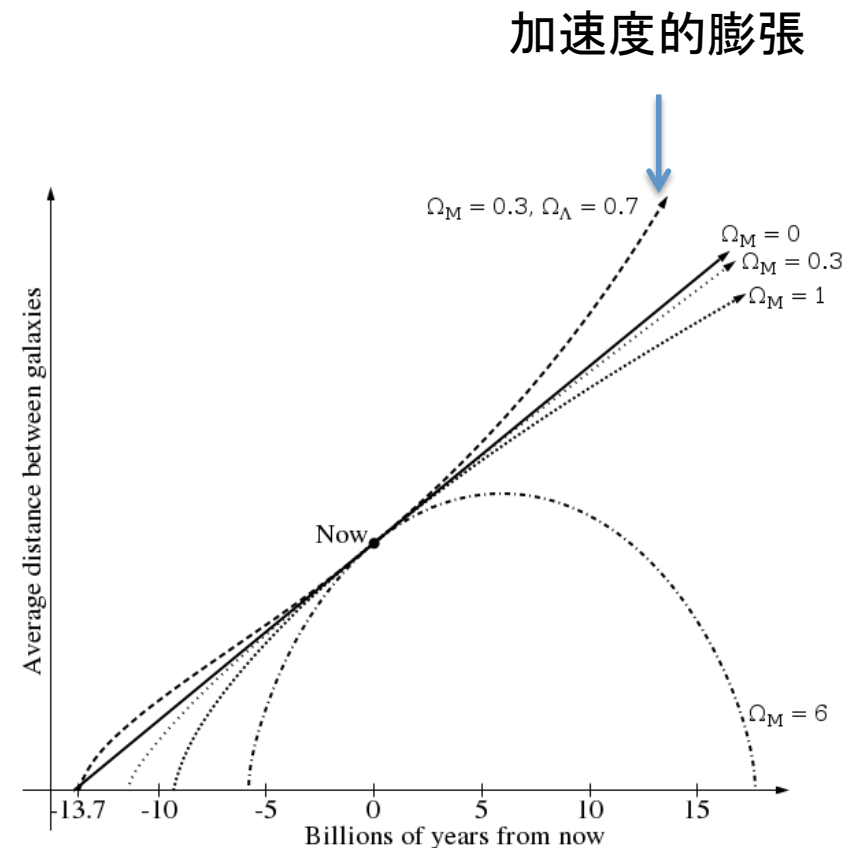
引力の方が弱ければ、
段々減速しつつも永久に
膨張を続ける

このどちらかと思われて
いたが...

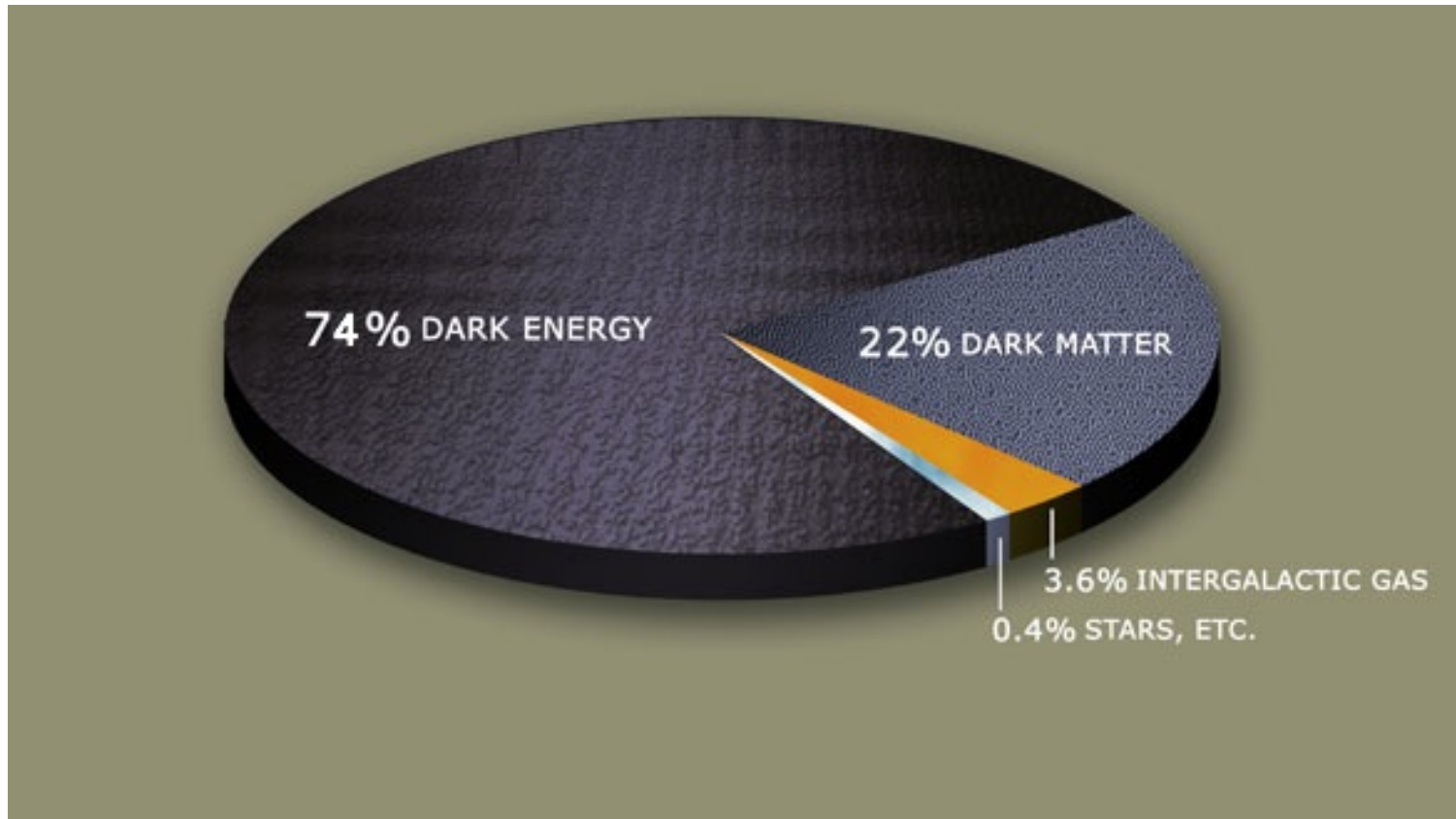


宇宙は加速度的に膨張していた！

- 最新の観測では、宇宙の膨張する速度はどんどん速くなっているらしい(2011年のノーベル物理学賞)
- 膨張を加速させる力(反発力)がある！(これはアインシュタインが「生涯最大の誤り」と言った宇宙項に他ならない)
- 正体がよくわからないので「ダークエネルギー」と呼ぶ



宇宙は何からできているか



- 見えている物質（星、星間ガスなど）は宇宙全体の物質の4%
- 22%がダークマター。引力をもつ。
- 残りは全てダークエネルギー。反発力をもつ。

ダークマター・ダークエネルギーの正体

- ダークマターの正体
 - 候補1: 普通の物質だが暗くて見えないモノ。ほとんど光らない星、チリなど。
 - 候補2: ある種の素粒子(未知のものかも)
- ダークエネルギーの正体 ???
- 宇宙のほとんどは「なんだかよくわからないもの」からできている

他の星へ逃げて、その先は？

- 全ての星はいずれ寿命を迎える
- 新しい星が生まれるためのガスや塵も、やがて尽きる
- やがてブラックホールと光子だけの宇宙になる（ブラックホールもやがて蒸発してしまう）？
- 宇宙の膨張はどんどん加速し、やがてすべてがバラバラに（ビッグリップ）？
- ほんとのところどうなるかはまだ分かっていない....

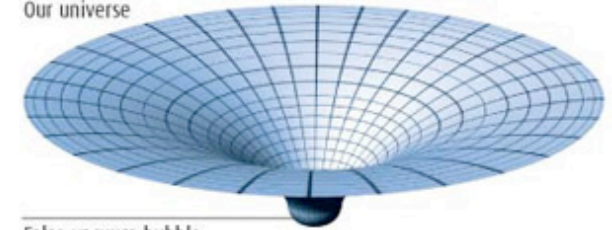
子宇宙／孫宇宙が生まれるかも？

- 宇宙のある場所から、突然別の宇宙が生まれて膨張を始めるかも？
- もしかしたら、我々の宇宙が生命が住めなくなる前に、子宇宙・孫宇宙に移り住めるかも？
- もしかしたら我々の宇宙も、別の宇宙から生まれたのかも？
- でも新しく生まれた宇宙は、我々の宇宙とは似ても似つかないかも？
- 研究はされているが、まだまだ分からない事だらけ...

CREATE YOUR OWN UNIVERSE

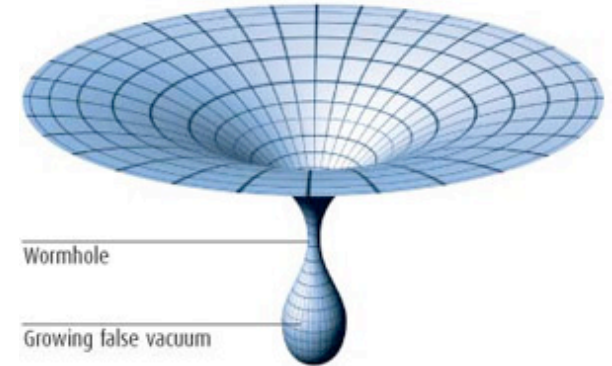
First, concentrate a large amount of mass in a way that distorts the space-time of our universe, creating a region of "false vacuum"

Our universe



False vacuum bubble

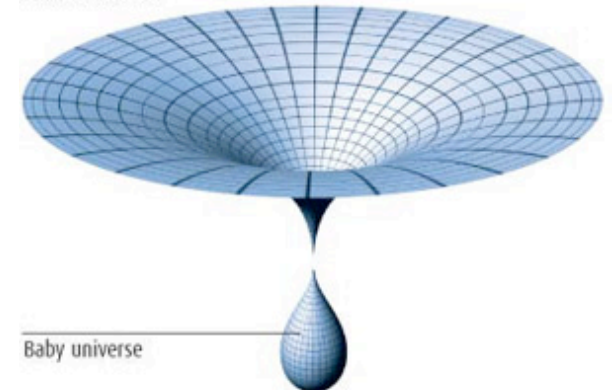
As the false vacuum grows, its connection to our universe narrows into a wormhole



Wormhole

Growing false vacuum

Eventually, the wormhole pinches off and a new baby universe is born



Baby universe

多元宇宙 (multiverse)

- uni(一つの)-verseに対して
multi(複数の)-verse
- 我々の宇宙と同じような(又はかなり違った)宇宙が他にもたくさんある？
- 理論的にはあり得る。しかし外の宇宙の情報は「原理的に」知り得ない
- 決して知覚できないものを存在していると言えるか？ 哲学的問題。

