

アインシュタインと重力

一般相対性理論100年

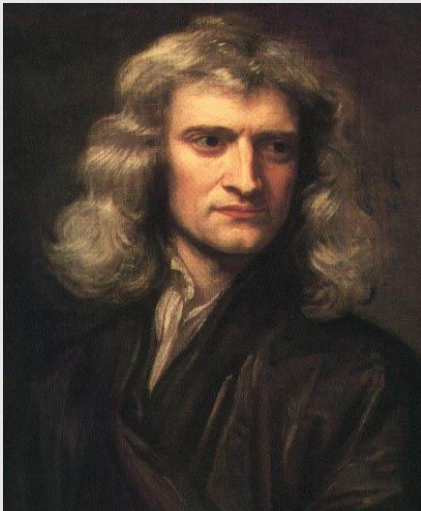
佐々木 節

重力とは何か？

ニュートン重力 (万有引力)

1687年

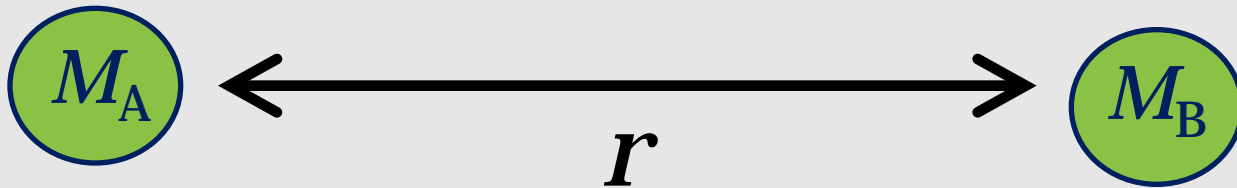
「プリンキピア」



- 天体の運動を支配する
- 地球(惑星)の運動を支配する
- 物体を地球に引きつけておく力

万有引力

すべての物質には、互いに物質の質量の積に比例する逆二乗の引力が働く



$$F = -G \frac{M_A M_B}{r^2}$$

$$G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2 \text{ (重力定数)}$$

等価原理

慣性質量＝重力質量

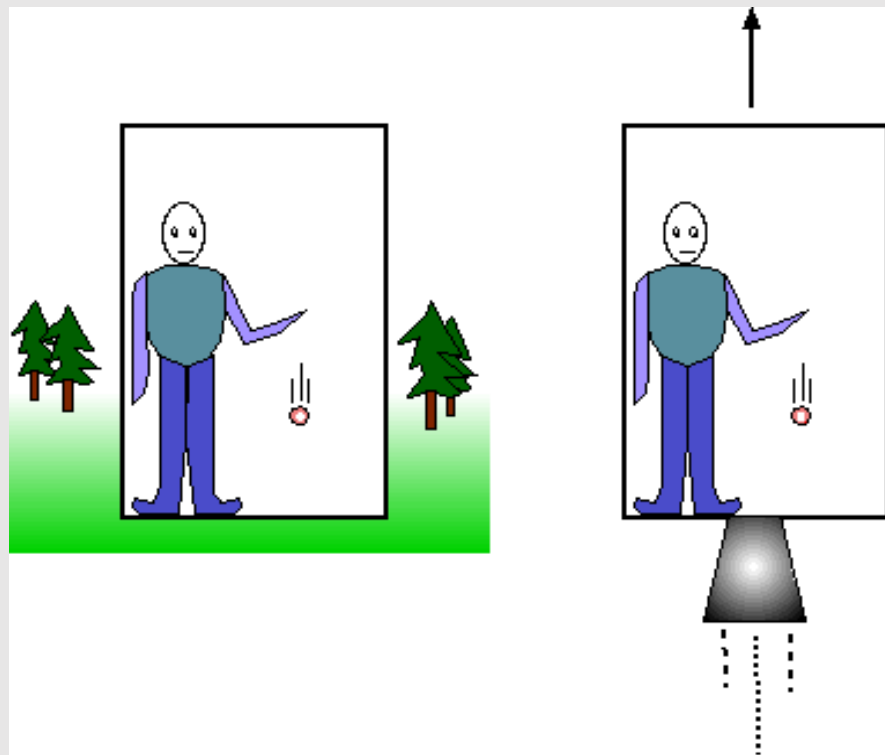
左：地上に静止したロケット内で
ボールを落とす

重力で落下

右：無重量状態の宇宙空間を
動く加速されたロケット内で
ボールを落とす

慣性力で落下

区別がつかない！

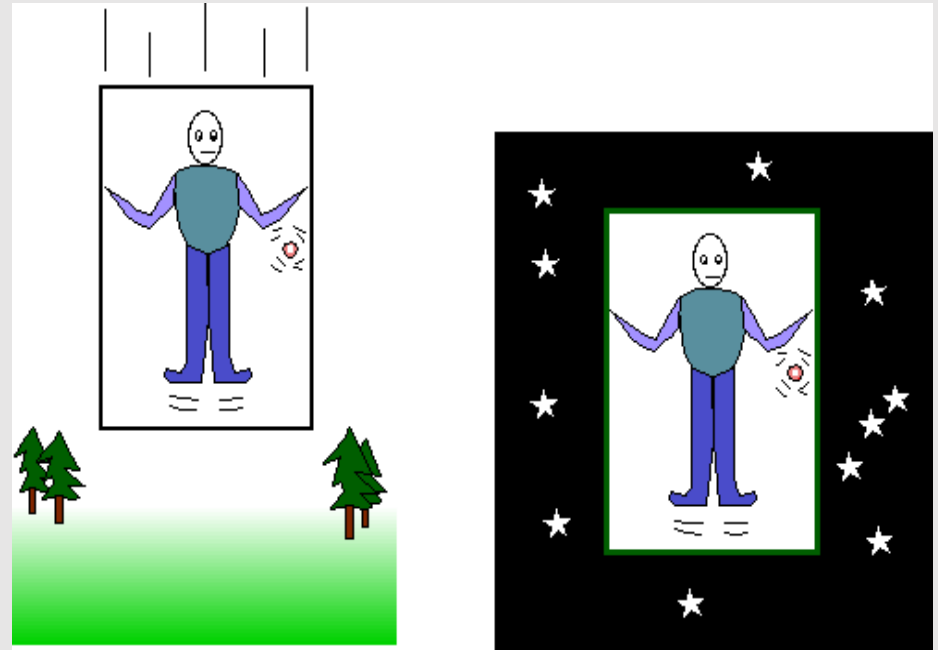


(<http://www.astronomynotes.com/>より転載)

重力＝慣性力（見かけの力）！

左：地上に向かって自由落下するロケット内でボールを手放す

右：無重量状態の宇宙空間を等速運動するロケット内でボールを手放す

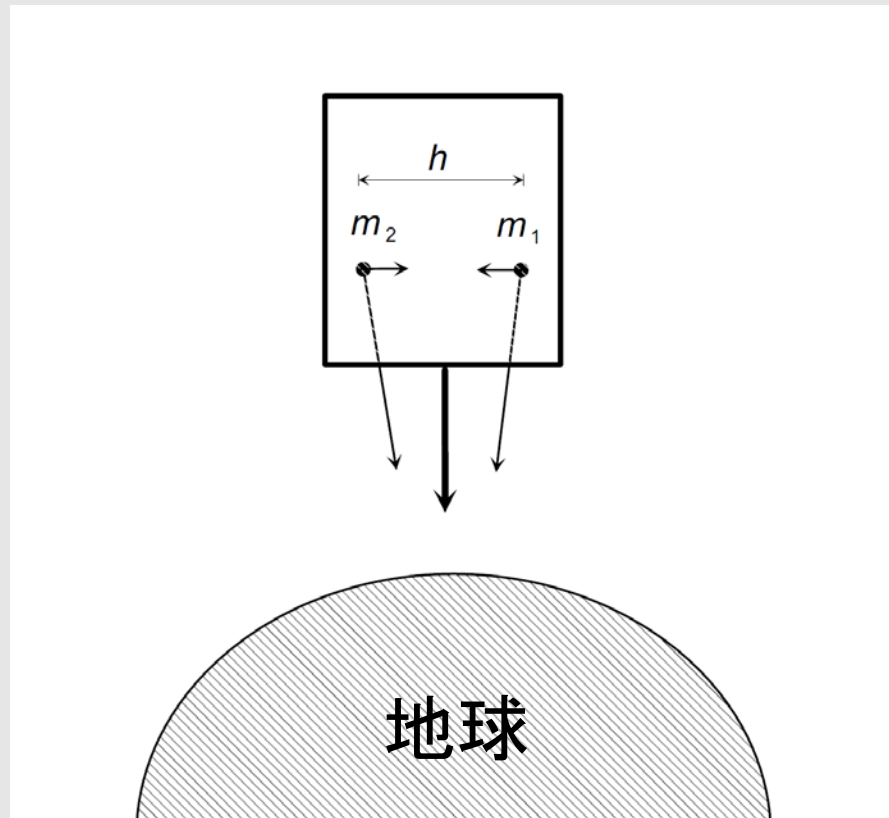


(<http://www.astronomynotes.com/>より転載)

どちらの場合もボールは静止したまま

重力は「局所的」には消せる！

広がりを持つ空間領域では差が出る

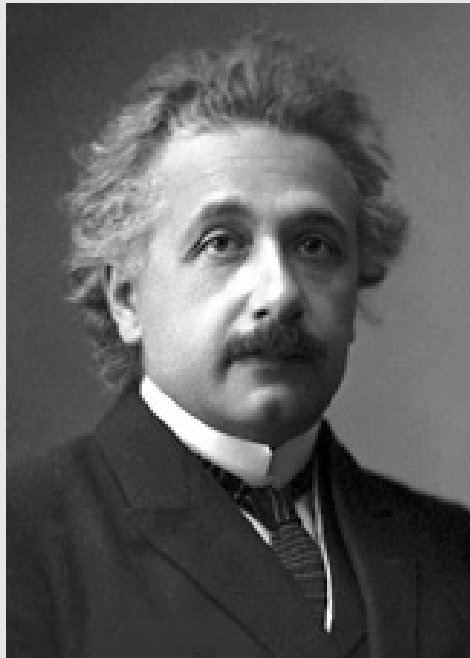


重力＝広がり(空間)の持つ性質？

アインシュタインの一般相対論

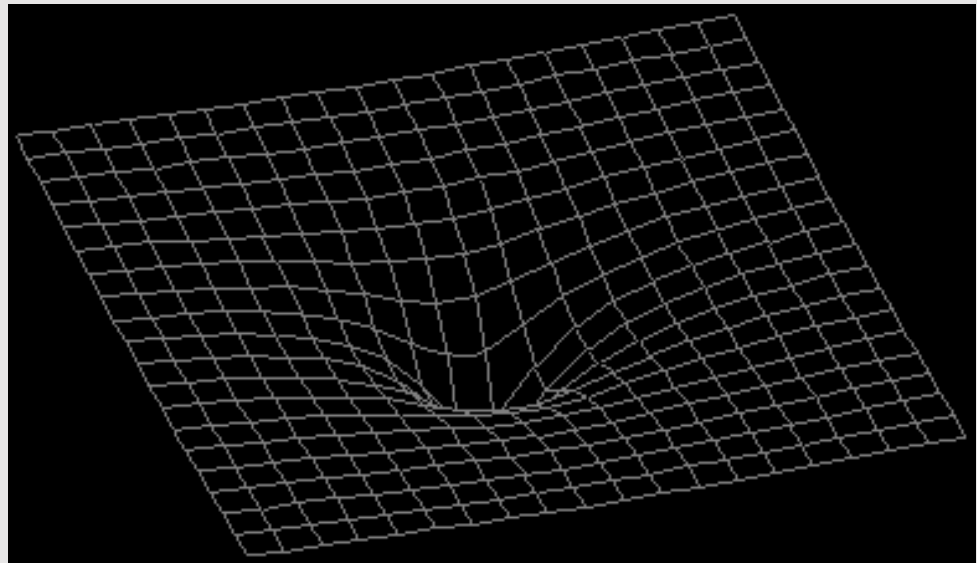
1915年11月25日発表

(今日からちょうど100年前の3日後)



Albert Einstein

空間だけでなく、時間と空間(時空)を
統一的に扱う、**時空の幾何学**としての
重力理論を構築



アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の曲率

物質のエネルギー運動量密度

$$G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

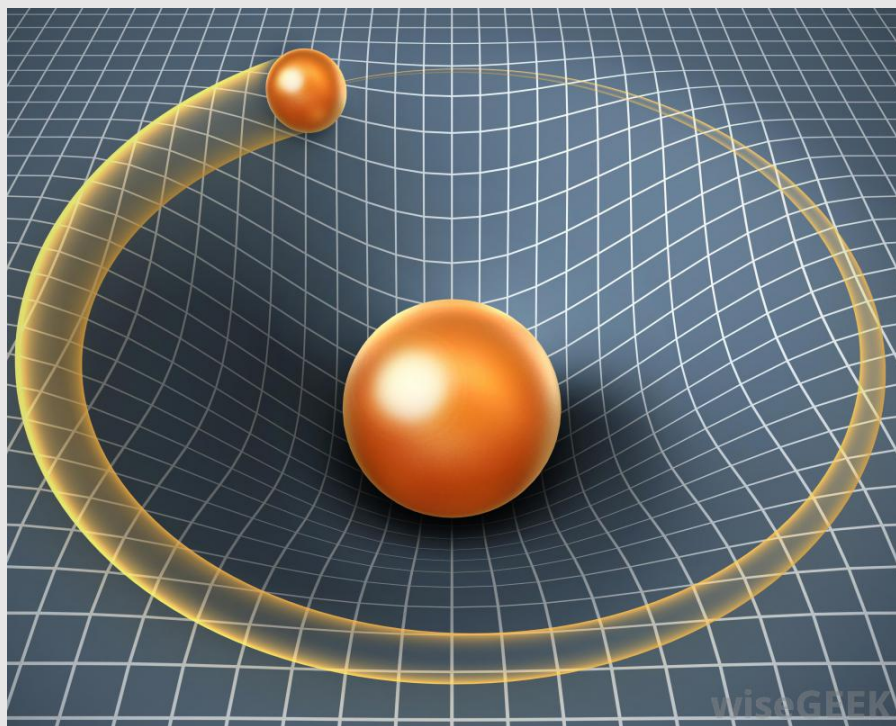
$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec (光速)}$$

略して

ジー・ミュー・ユー・イコール・ティー・ミュー・ニュー

物質のエネルギー(質量)が時空の曲がり具合を決める

太陽と惑星運動の概念図



ニュートン重力

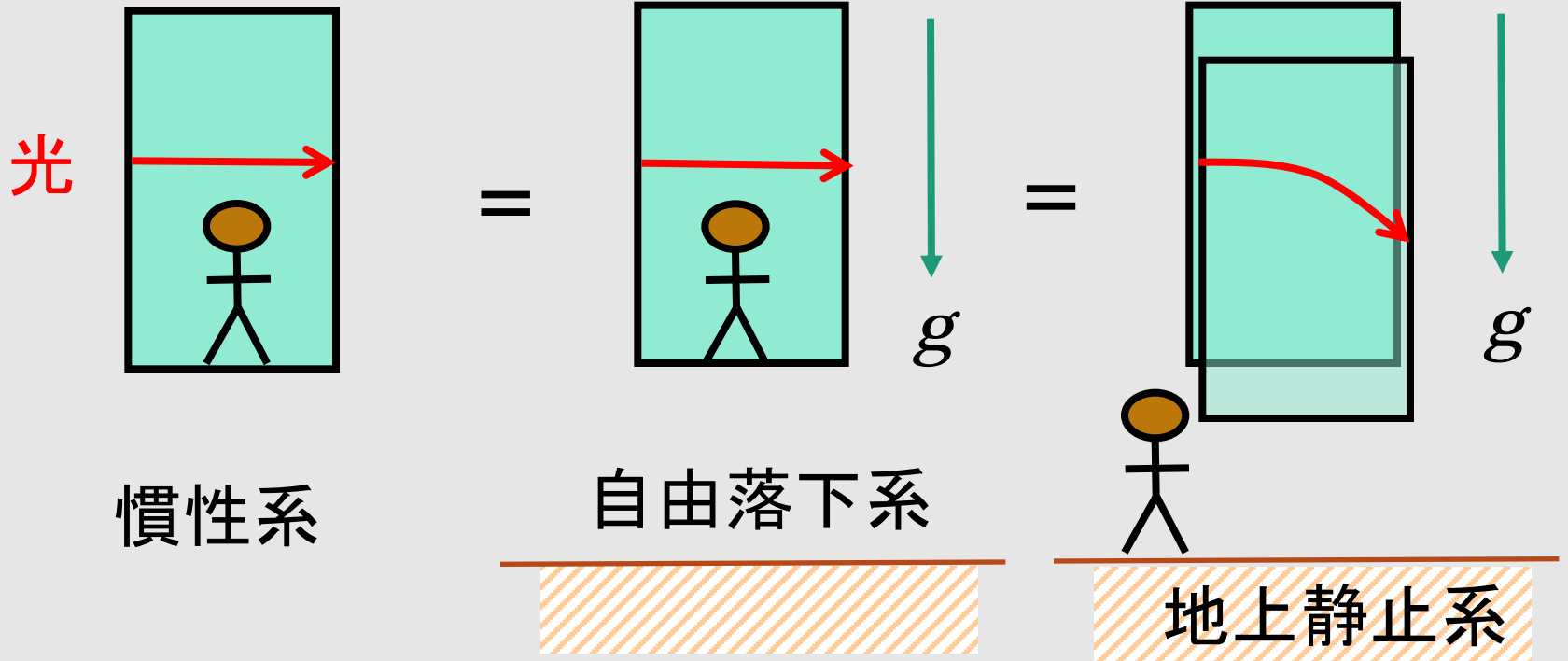
太陽が作る重力場によって惑星は「力」を受け**加速運動**をする



アインシュタイン重力

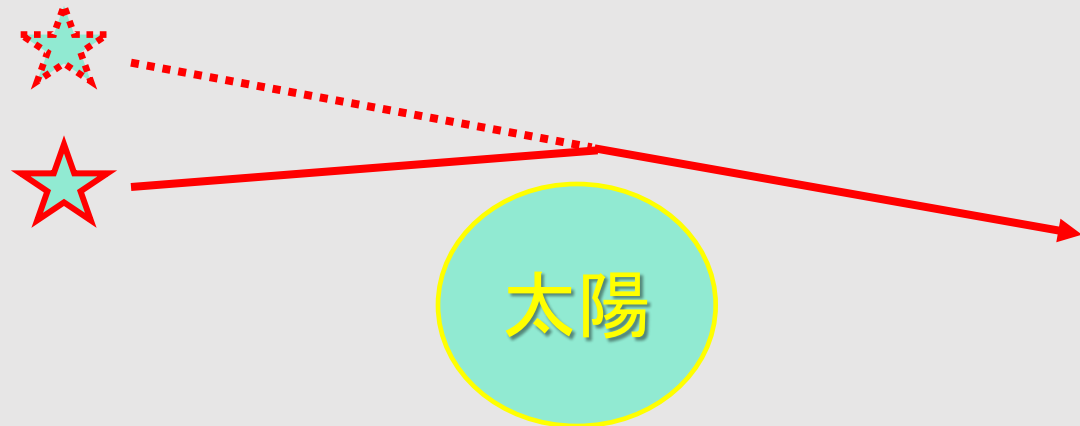
太陽が作る**曲がった時空**の中を惑星は**真っすぐ(慣性)**運動する

重力は光の行路も曲げる



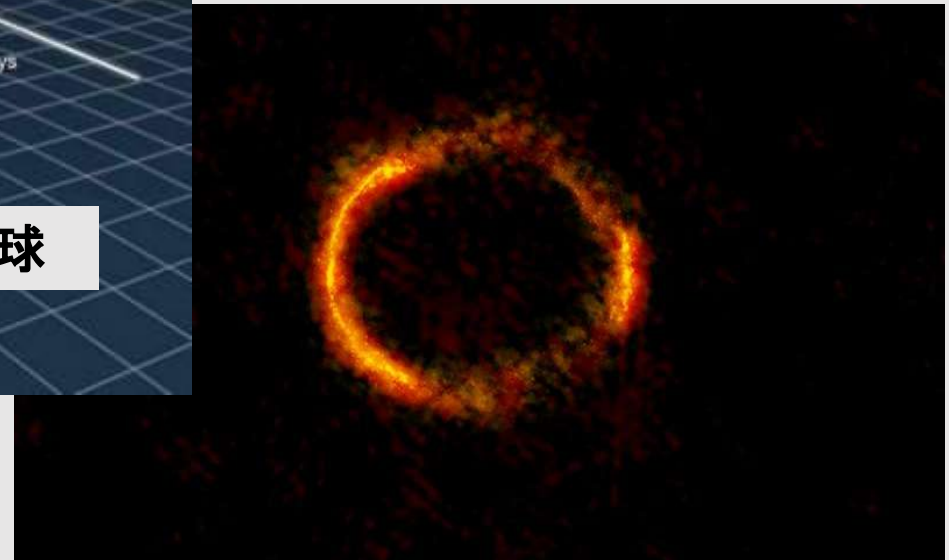
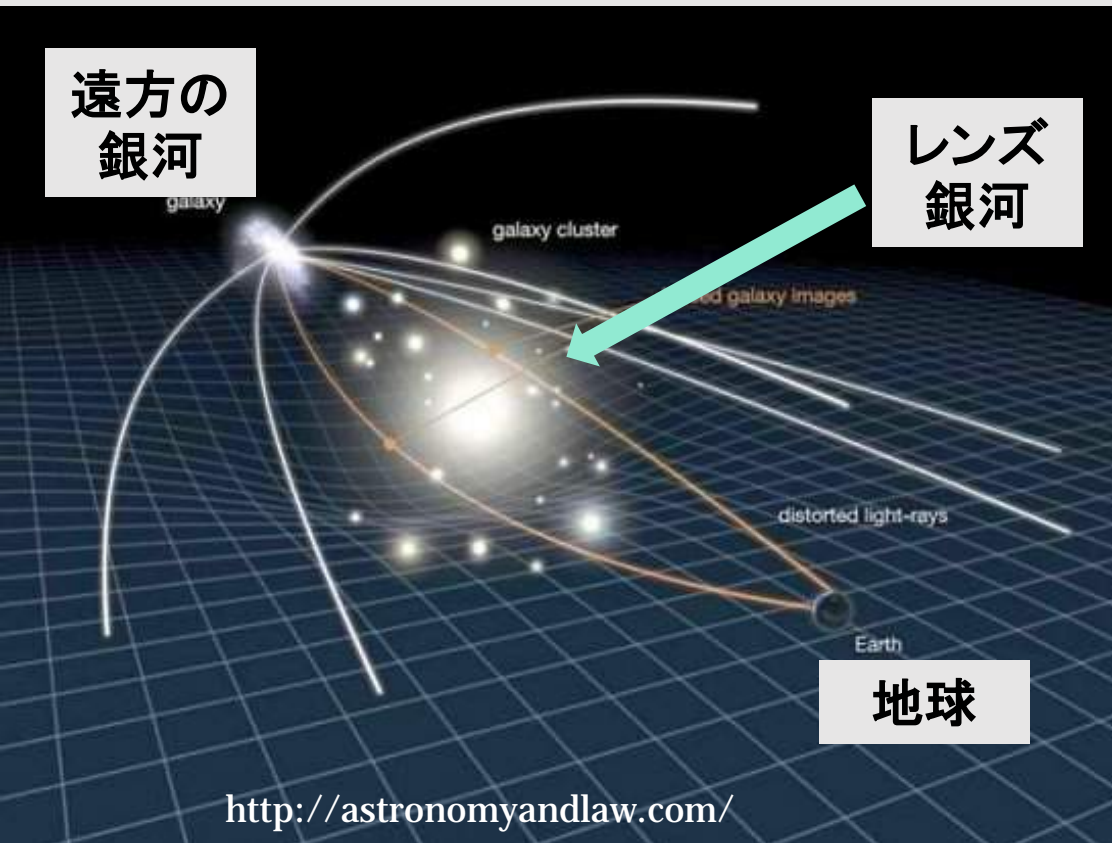
Arthur Eddington

1919年、エディントン隊による日食観測で検証



重力レンズ効果

現代の宇宙物理学にとって不可欠の重要な現象



ALMA image of the gravitationally lensed galaxy SDP.81

一般相対論的宇宙像

宇宙の至る所に物質(エネルギー)は存在

↓
アインシュタイン方程式

宇宙は至る所が一様に曲がる
しかし、空間はあまり曲がっていないようである



「時間方向」が(も)曲がっている



動的膨張宇宙

フリードマン方程式

1922年

アインシュタイン方程式を宇宙全体に適用



Alexander Friedmann

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

宇宙の膨張率
(時間方向の曲率)

空間曲率

物質密度

a : 宇宙の「大きさ」

$K = \pm 1, 0$: 空間の幾何学的性質を表す定数

アインシュタインと宇宙論

アインシュタインの大失敗：その1

宇宙の至る所に物質(エネルギー)は存在

↓ アインシュタイン方程式

宇宙は至る所が一様に曲がる

❖ しかし、宇宙が動的であるはずがない



空間が大きく曲がった静的宇宙のはず

そこで重力(引力)を打ち消す万有斥力項を導入

万有斥力項 = 宇宙項: あらゆる所で一様な斥力を与える

膨張宇宙が発見され、宇宙項を導入したことを
「人生最大の失敗」と言った(らしい)

アインシュタインの失敗：その2

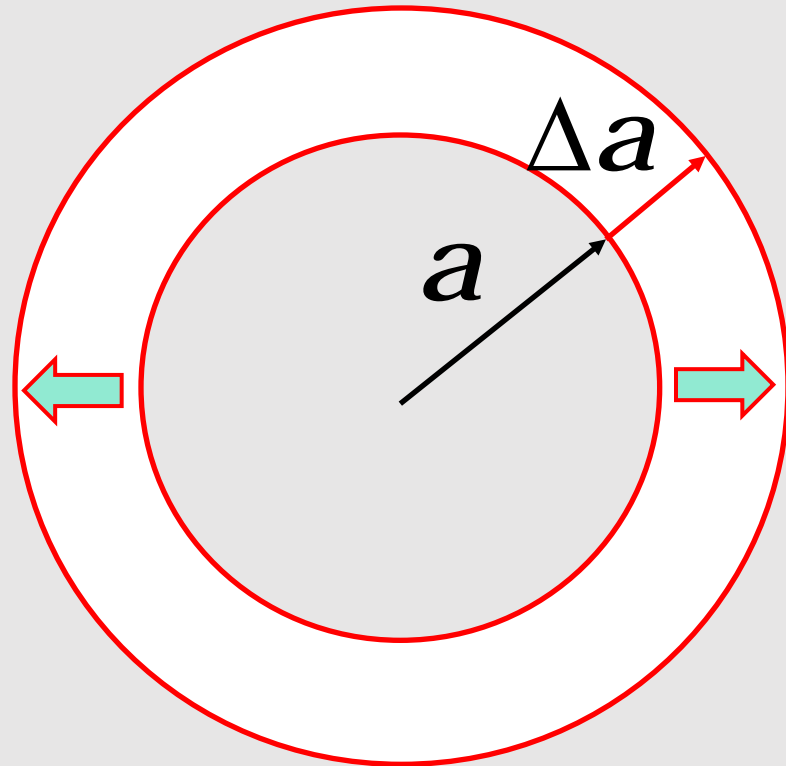
- 現代の宇宙論では「宇宙項」が本質的に重要な役割を果たしている
- アインシュタインの「最大の失敗」は実は全く異なる意味で失敗ではなかった。

宇宙項は真空のエネルギー密度と同等であり
密度は常に一定

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

右辺が一定なら、膨張率は一定
(空間曲率は無視)

インフレーション宇宙と暗黒エネルギー



Δt 時間内に Δa だけ膨張

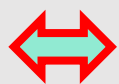
膨張率: $H = \frac{\Delta a}{a \Delta t}$

単位時間当り, どれだけ
膨張したかの割合

膨張率が一定なら宇宙は加速度(指数関数)的に膨張する

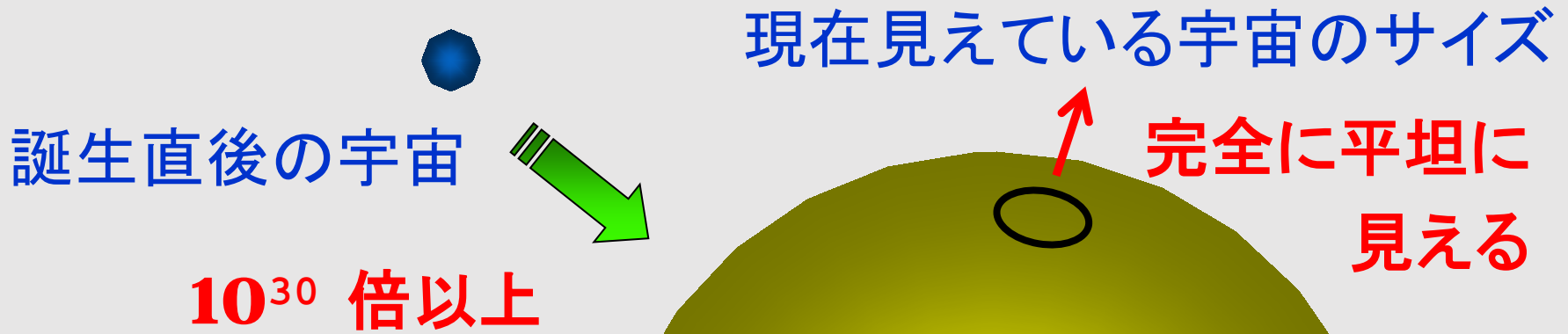


インフレーション宇宙



物価が一定の割合で増大 = インフレーション

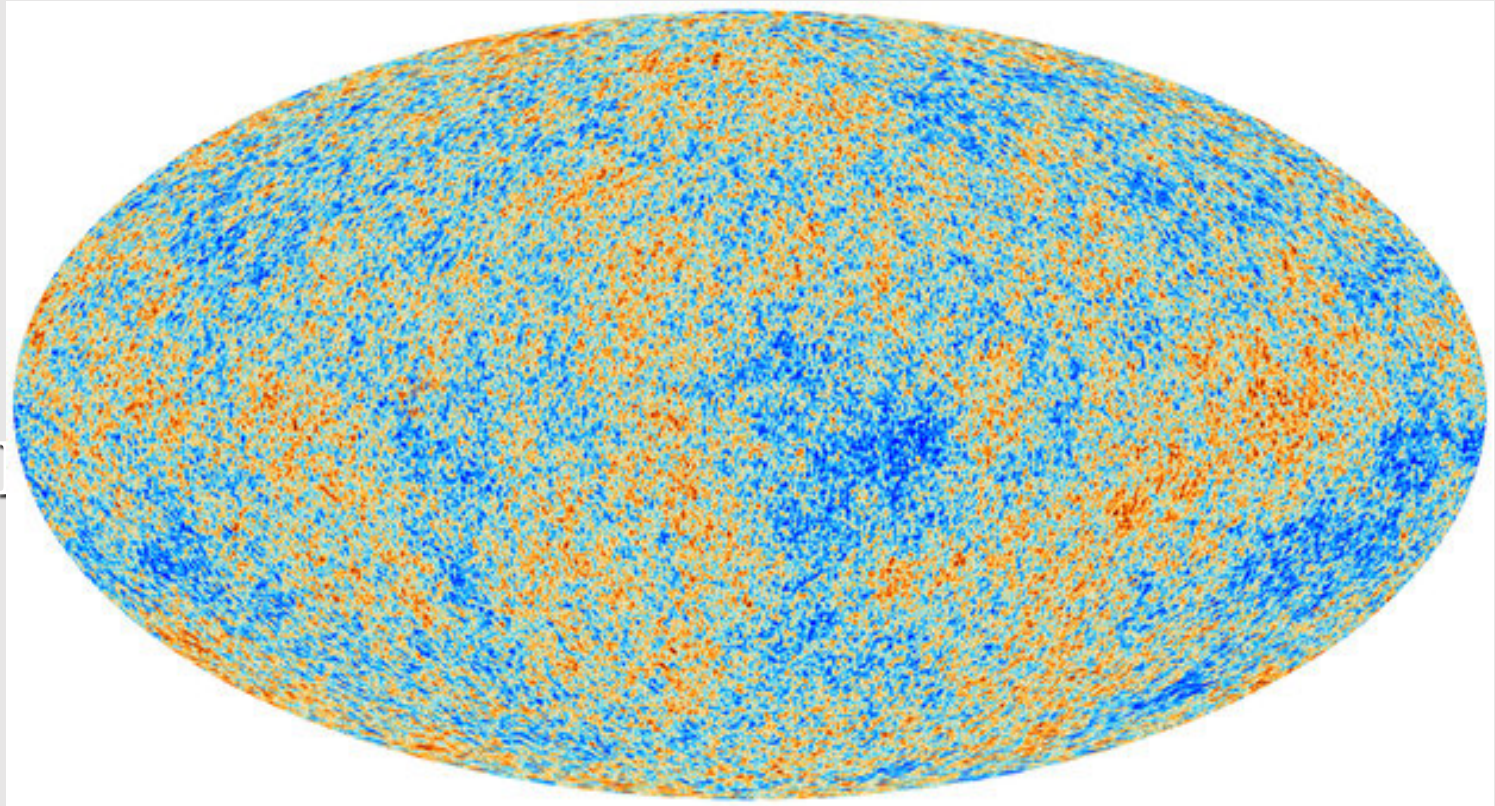
宇宙初期のインフレーション



巨大な宇宙の誕生

真空の量子揺らぎも大きく引き伸ばされて
現在の銀河や銀河団などの種になる

インフレーション宇宙の証拠



現在の宇宙を100歳とすると生後1日目の宇宙

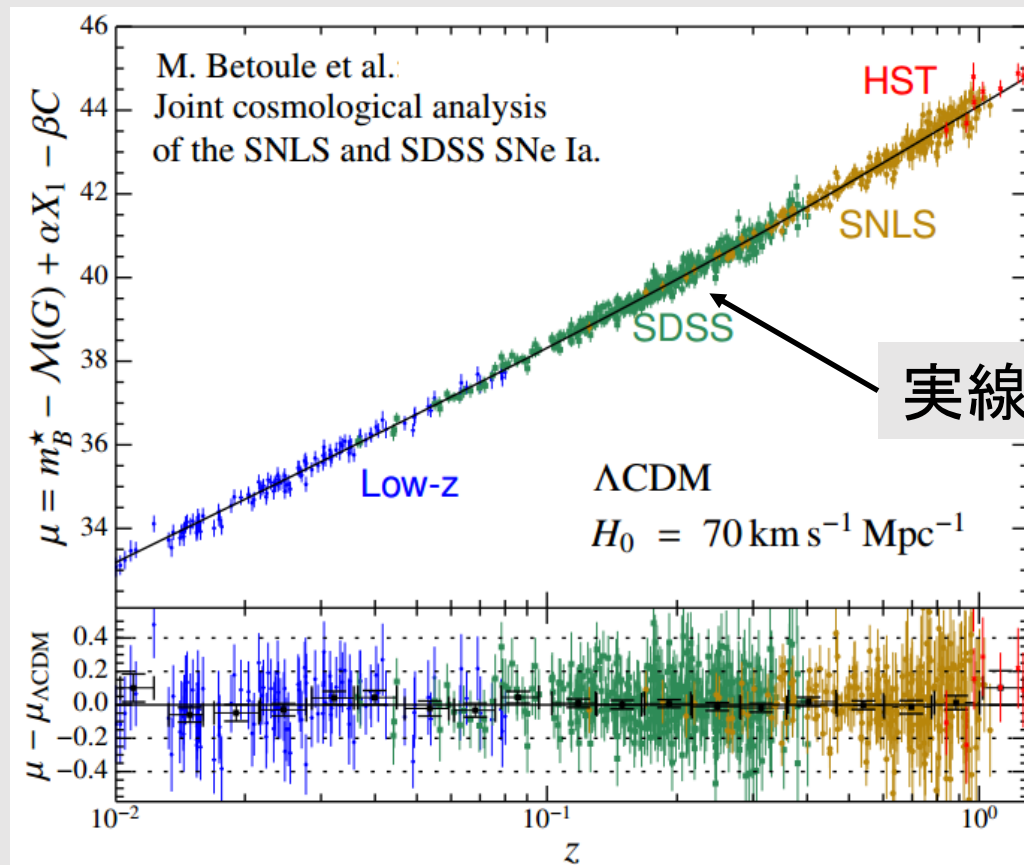
赤い部分は温度がわずかに高く、青い部分はわずかに低い。
青い部分が数十億年かけて銀河や銀河団に成長

揺らぎの性質がインフレーション宇宙の予言と一致

暗黒エネルギー（宇宙項）の存在

宇宙の膨張率の変化の観測

距離
↑



実線: 宇宙項優勢宇宙モデル

現在の宇宙も
インフレーションを
起こしつつある！

~ 遠方銀河の後退速度

まとめ

- アインシュタインは重力を時空の幾何学にした
- 一般相対論は様々なところで検証が進んでいる
- 一般相対論膨張宇宙の理論は観測とよく一致
- アインシュタインが「人生最大の失敗」と言った宇宙項が、現代の宇宙論を支配している

宇宙初期のインフレーションの起源？

現在の宇宙を支配する暗黒エネルギーの正体？

現代宇宙論の最大の謎