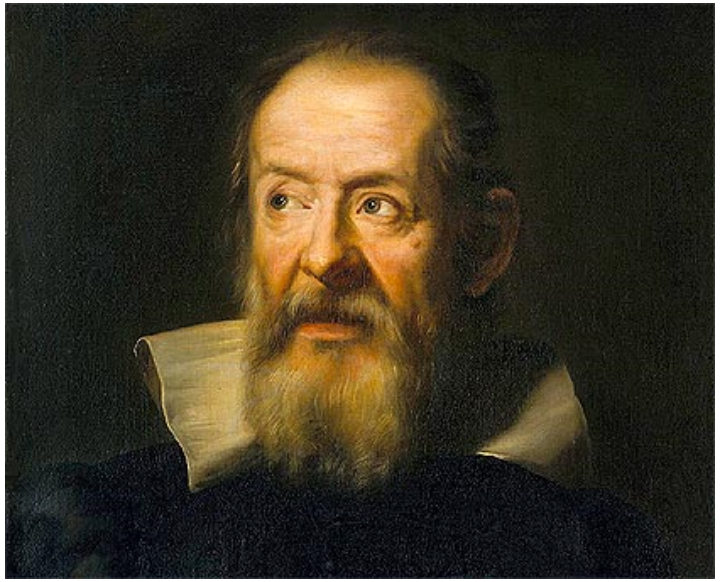
重力と量子論の融合
～新しい時空概念の探求～

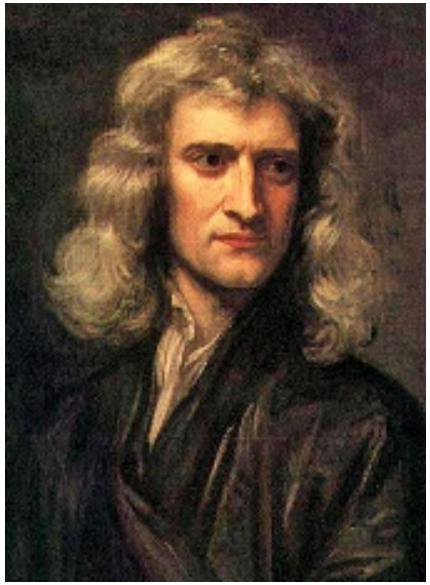
静岡大学理学部物理学科
土屋麻人

サイエンスカフェ in 静岡　於　B-nest 静岡市産学交流センター
2018年11月15日

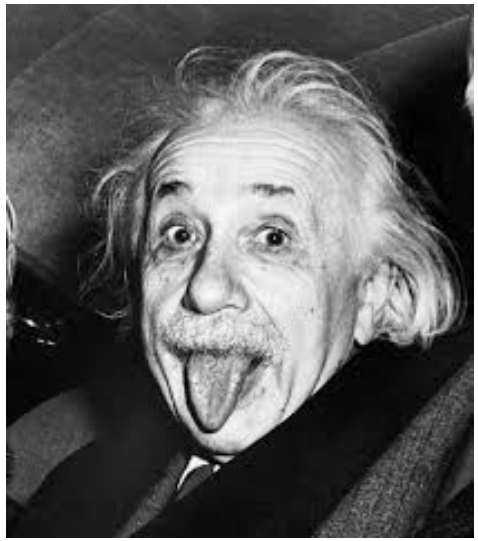
クイズ　人物当て



ガリレオ・ガリレイ
（1564～1642）

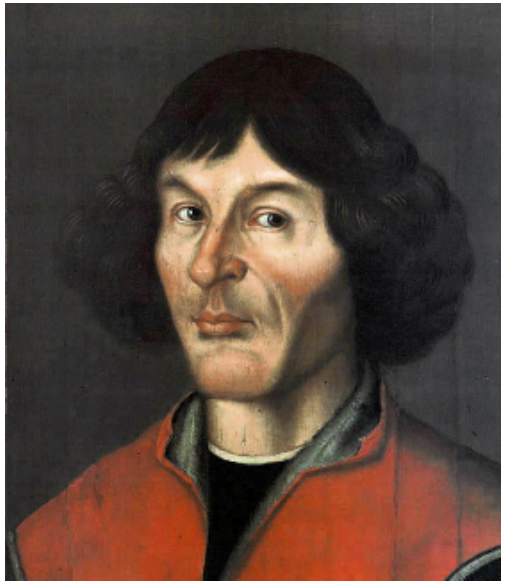


アイザック・ニュートン
（1643～1727）



アルベルト・アインシュタイン
（1879～1955）

クイズ　人物当て



ニコラウス・コペルニクス
（1473～1543）

ヨハネス・ケプラー
（1571～1630）

クラウディオス・プトレマイオス
（83頃～168頃）

クイズ　人物当て

理論系

湯川秀樹
1949年

朝永振一郎
1965年

南部陽一郎
2008年

小林誠
2008年

益川敏英
2008年

実験系

小柴昌俊
2002年

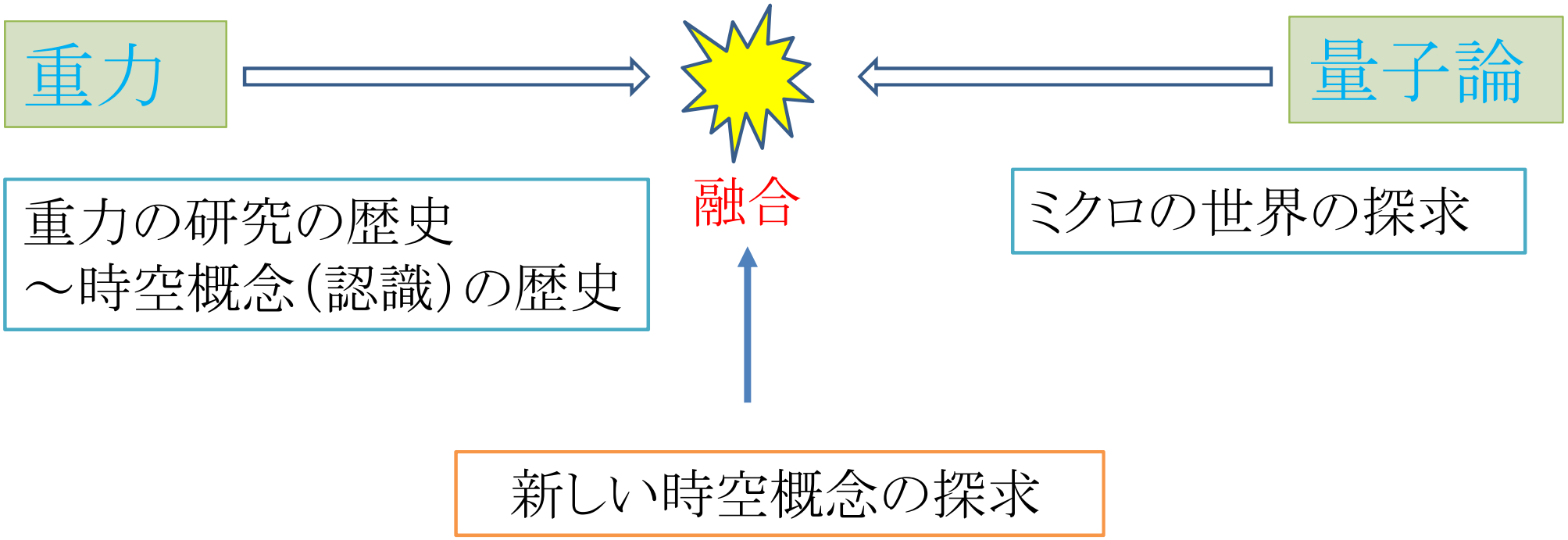
梶田隆章
2015年

日本人ノーベル物理学賞
素粒子物理学分野受賞者

理論物理学

紙　と　鉛筆　　と　コンピュータ

今日のお話



目次

第1章　はじめに

第2章　重力

第3章　量子論

第4章　重力と量子論の融合
　　新しい時空概念の探求

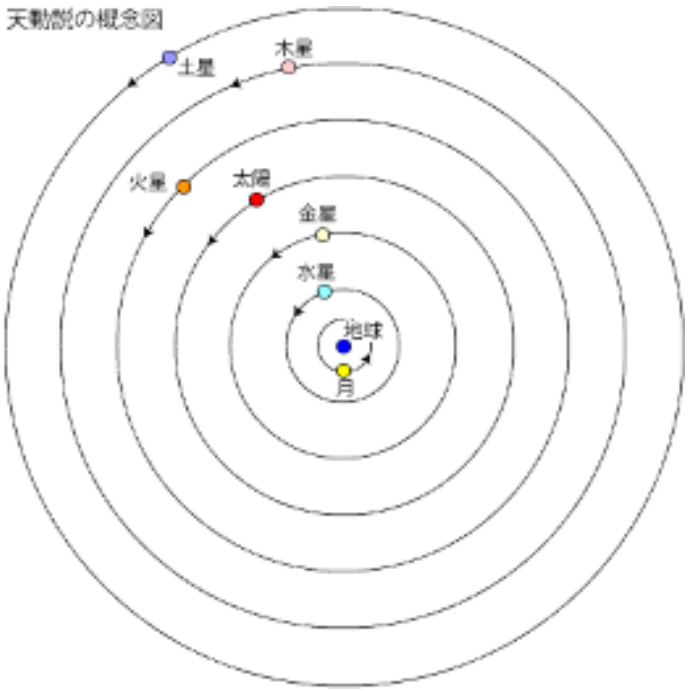
第5章　まとめと展望

重力

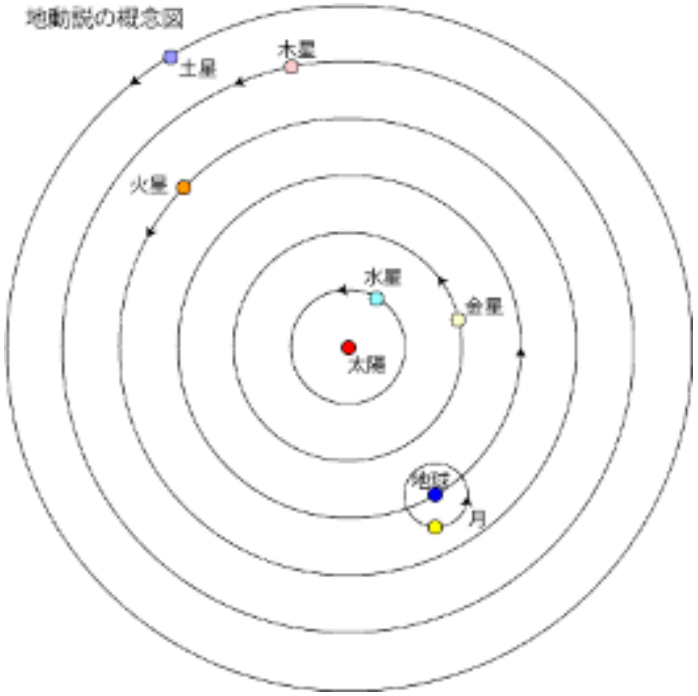
天動説　地球中心の宇宙（世界）観

古代ギリシャ　：　地球が丸いことは把握　　（船、月食）

地球中心　（先入観大）



太陽中心　　アリスタルコス

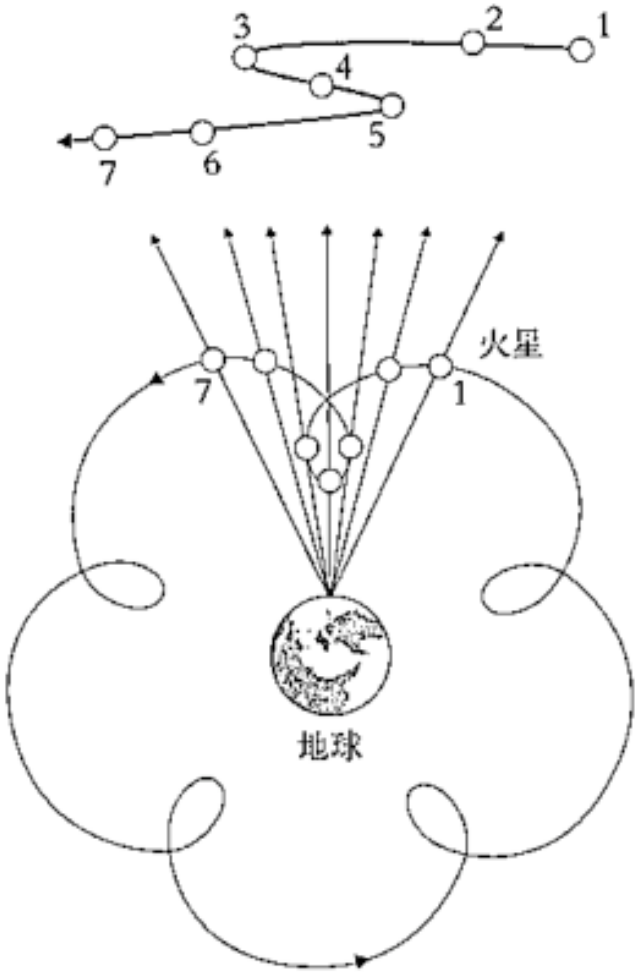


地球の中心　＝　宇宙の中心

国立天文台暦計算室

重力観～すべてのものは宇宙の中心に引き寄せられる

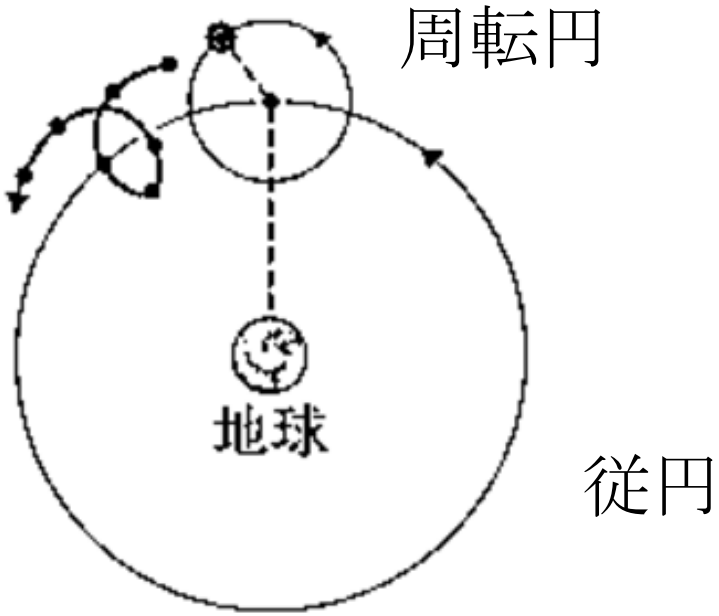
惑星の逆行



「ビッグバン宇宙論」新潮社より

惑星（planet） ⟵ ギリシャ語：プラネーテース　放浪者

円に円を重ねる



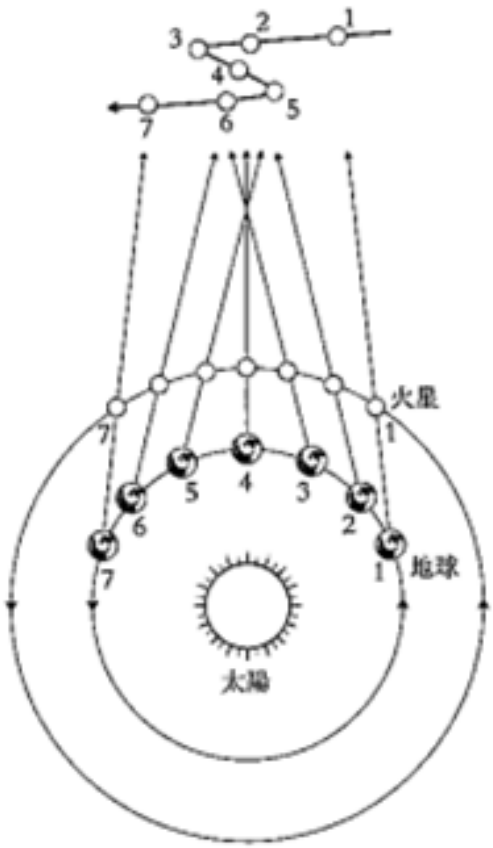
プトレマイオス

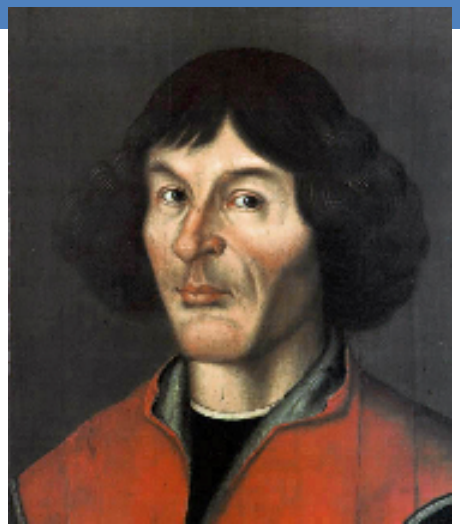
「ビッグバン宇宙論」新潮社より

円は完全な形で天は完全な領域なので、
天体は円軌道を運行　～　プラトン、アリストテレス

惑星の運動を精度よく説明

地動説　太陽中心の宇宙観





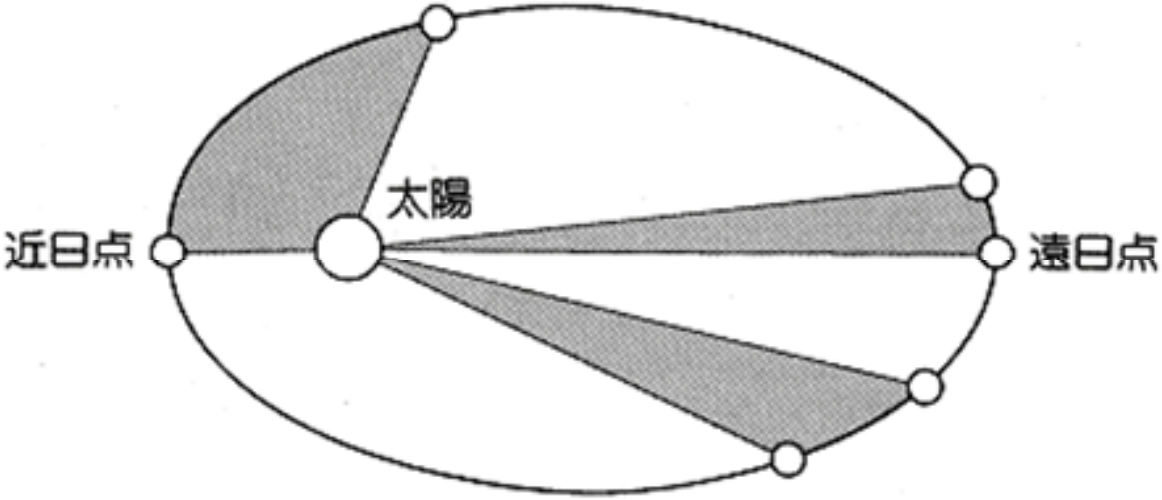
コペルニクス

「ビッグバン宇宙論」新潮社より

地球中心の世界観からの脱却　～　コペルニクス的転回

精度ではまだ地球中心モデルに劣る

ケプラーの法則



第1法則　惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を運行する

第2法則　太陽から1つの惑星に引いた動径ベクトルは、等しい時間内に等しい面積を描く

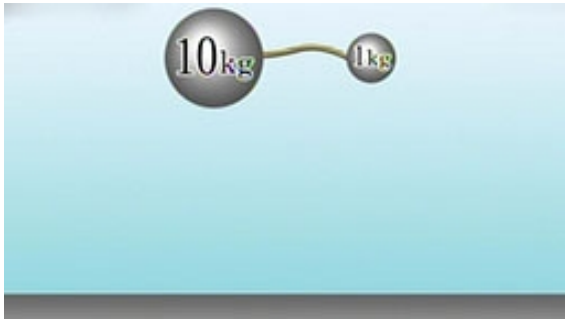
第3法則　軌道の長半径の3乗は周期の2乗に比例する

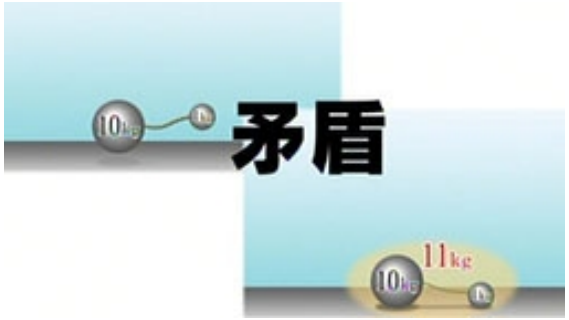
円からの脱却　　地動説の確立 ← ガリレオ

金星の満ち欠け

落体の法則

アリストテレス
重い物体は軽い物体より早く落ちる



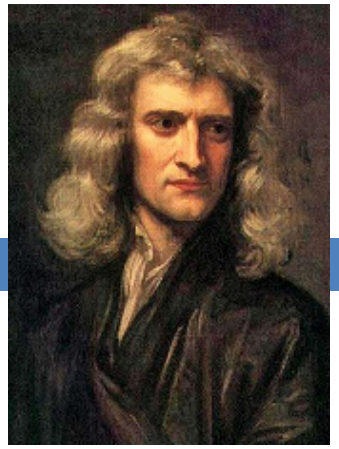


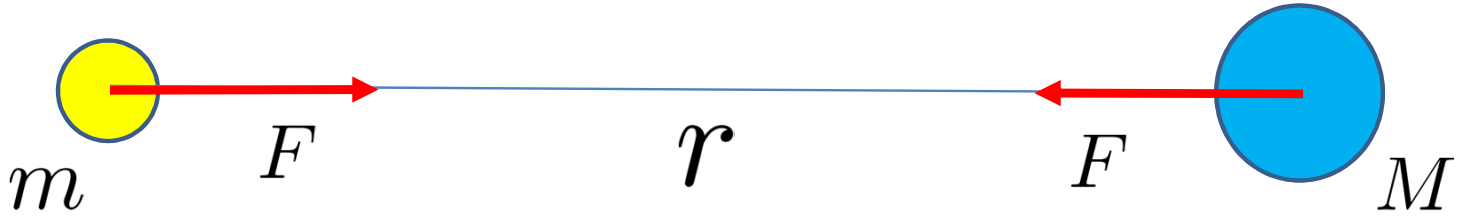
ガリレオ
真空中では、重さに関係なく、すべての物体は同時に落ちる

ピサの斜塔　（作り話）

→ 等価原理　（アインシュタイン）
～　一般相対性理論の基礎

万有引力の法則



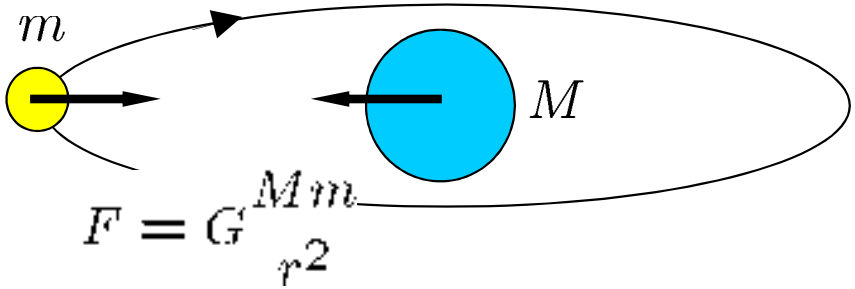


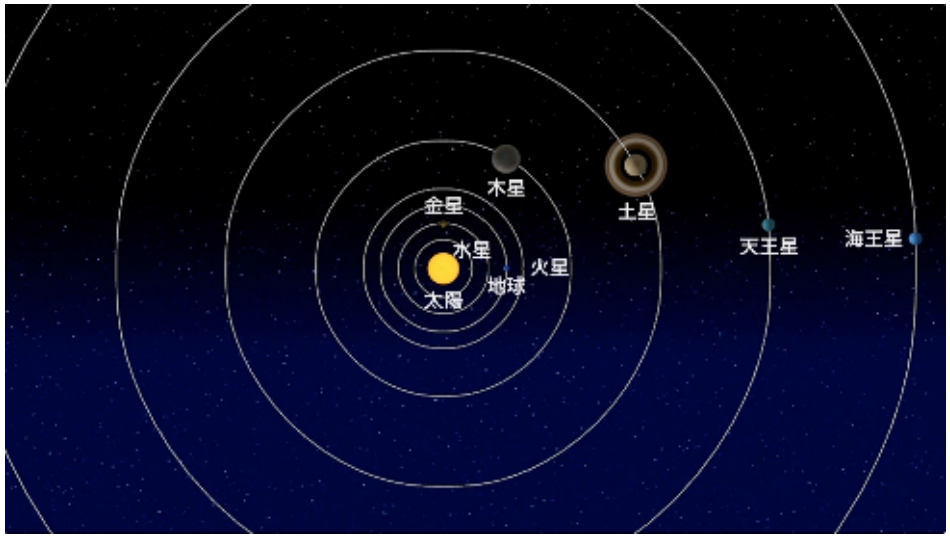
$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

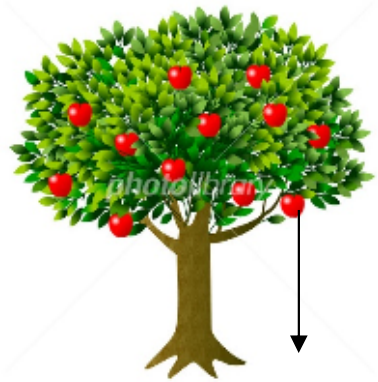
G ：万有引力定数

$6.67408 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$

万有引力の法則

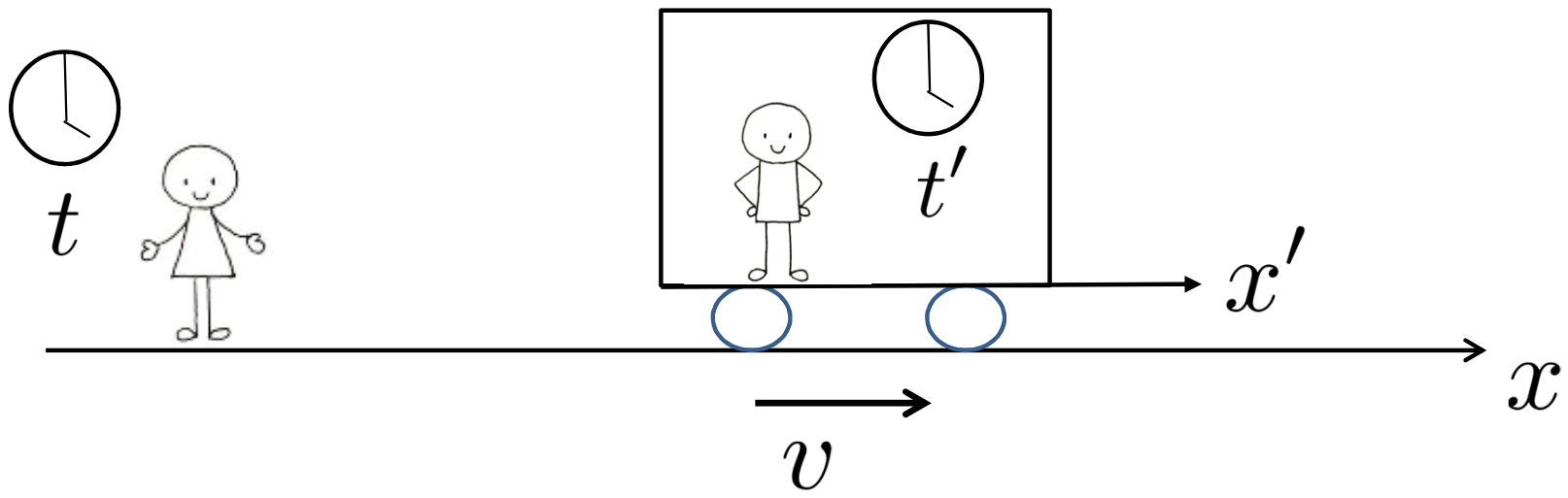






惑星の運行から
りんごの木からの落下まで
普遍性

ガリレイ変換



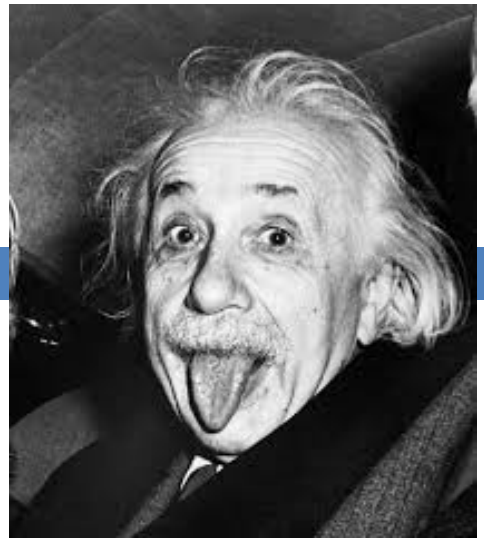
ガリレイ変換

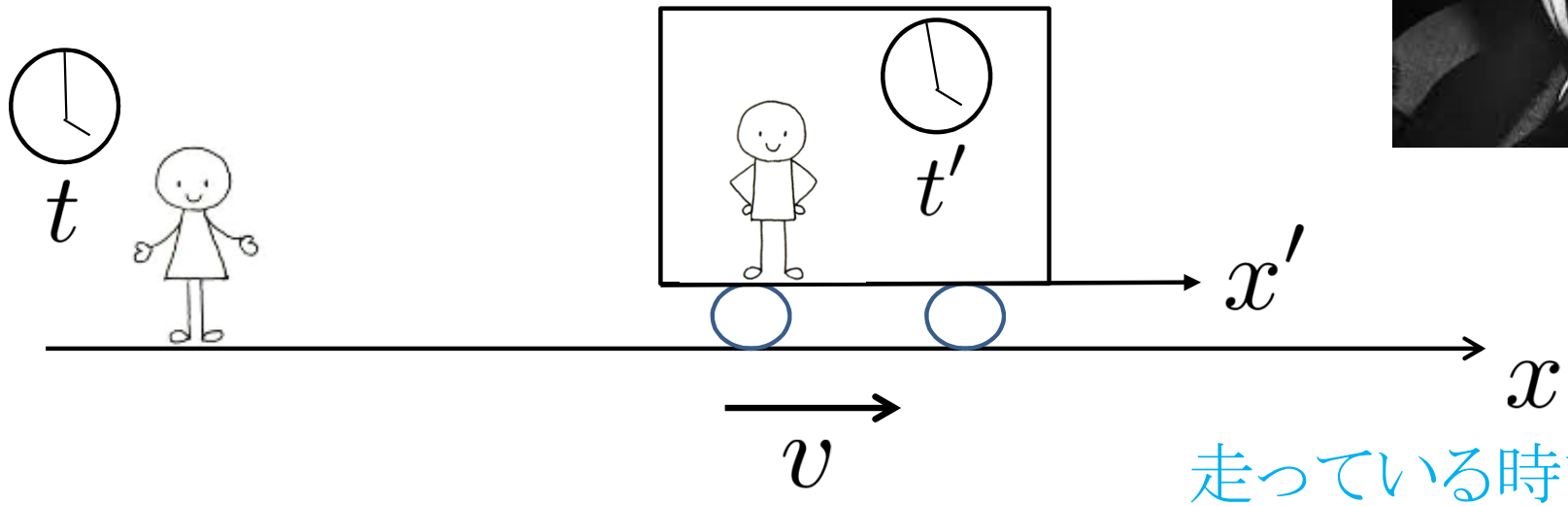
$$t' = t$$

絶対時間

$$x' = x - vt$$

特殊相対性理論





走っている時計の遅れ

ガリレイ変換

$$t' = t$$

$$x' = x - vt$$

ローレンツ変換

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

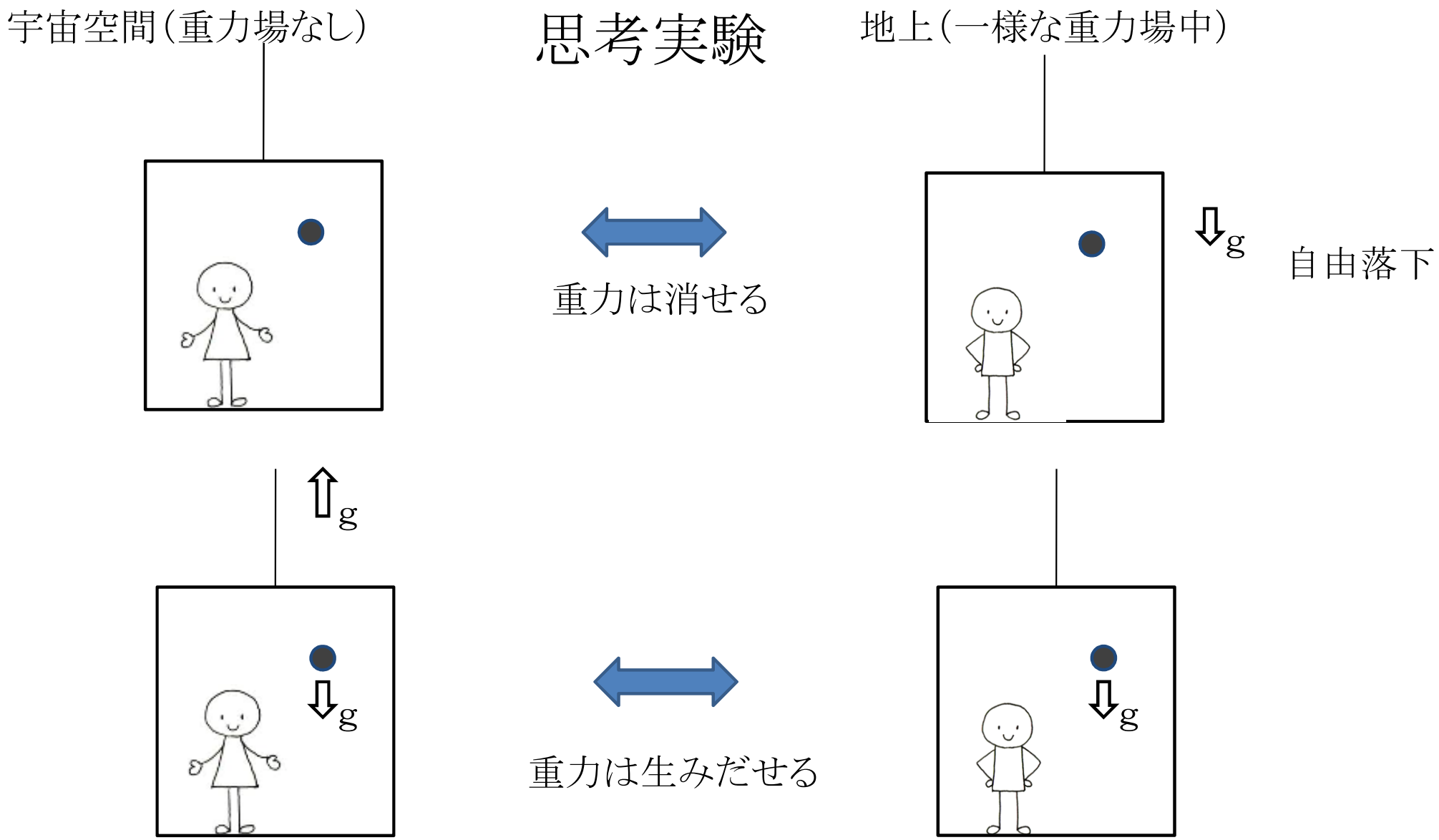
c :光速度

絶対時間の否定

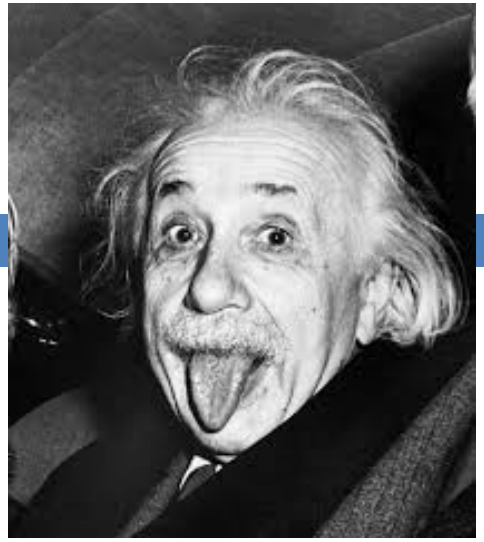
時間と空間の統一

～ 時空

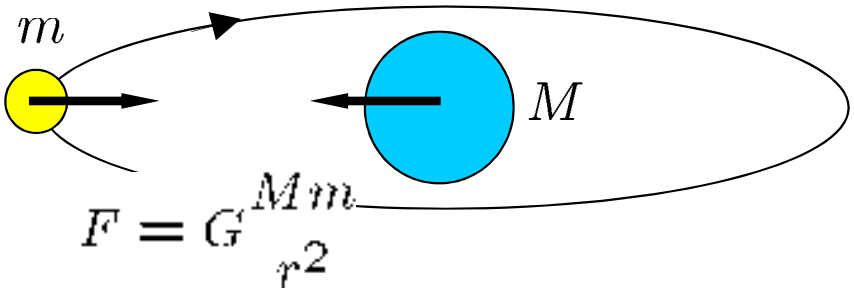
等価原理

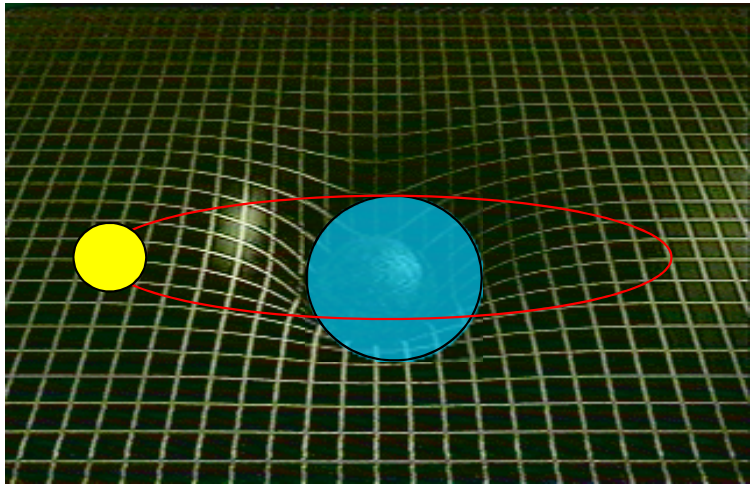


一般相対性理論



ニュートンの万有引力の法則





アインシュタイン　1915年

重力を時空のゆがみとして記述

時空と力（重力）の統一

アインシュタイン方程式

アインシュタイン方程式

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R}_{\text{時空のゆがみ}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{物質（エネルギー）}}$$

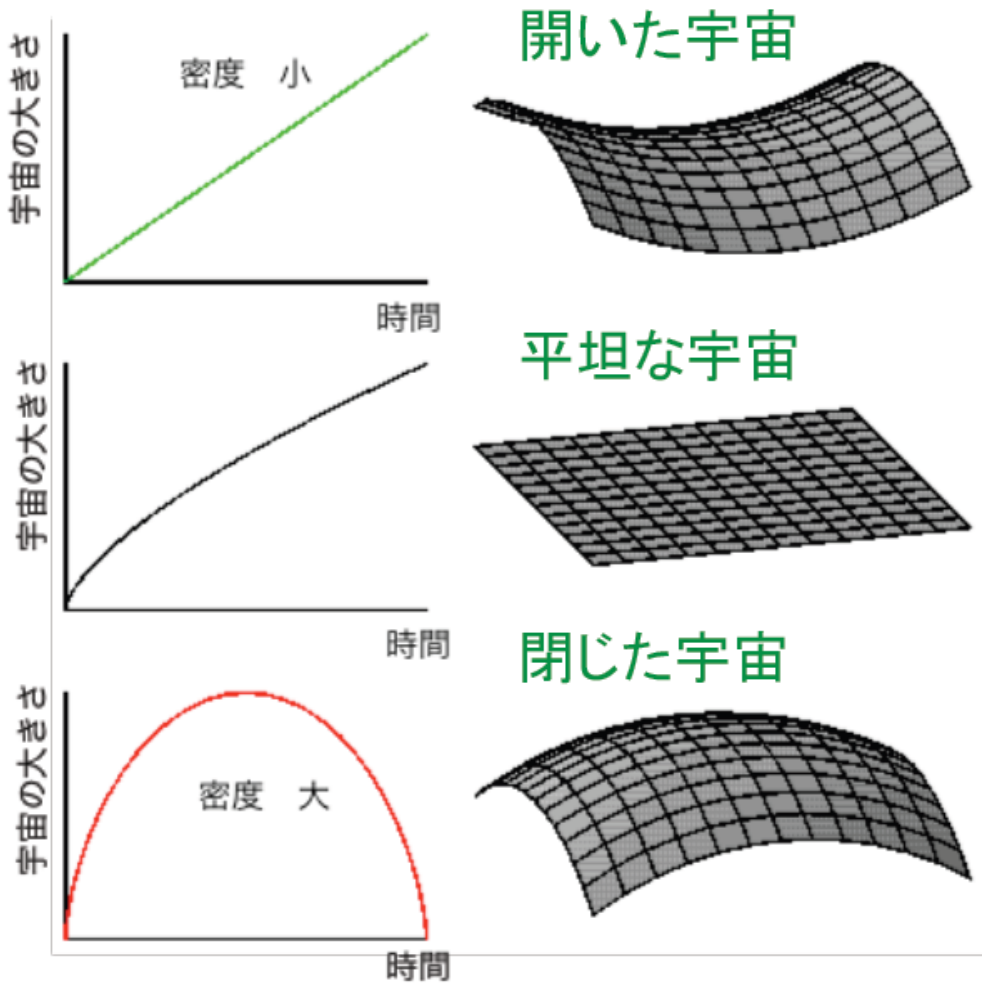
物質分布が時空を決定し、時空によって物質分布が決まる

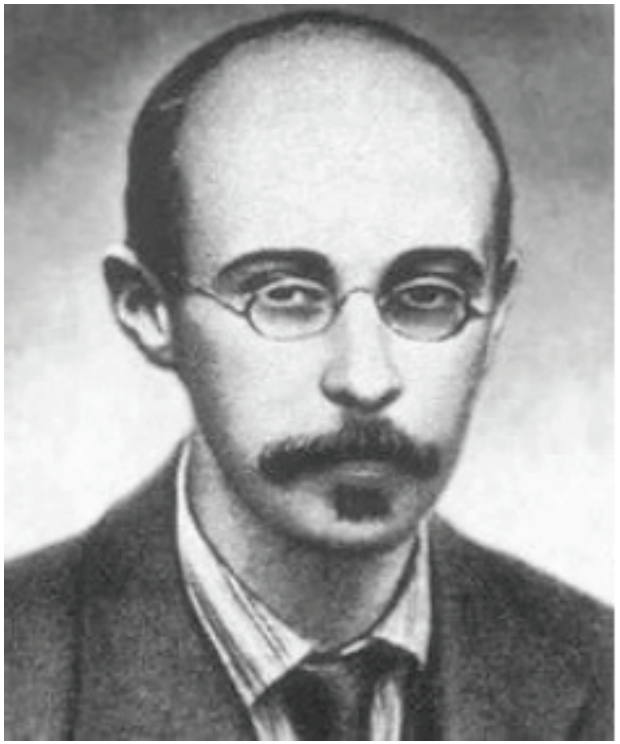
時空はもはや入れ物ではない 「運動」するもの

アインシュタイン方程式の解としての膨張宇宙

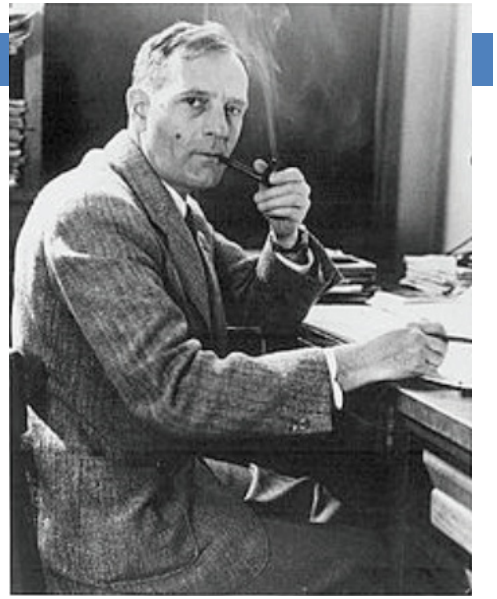
太陽系から全宇宙への興味の拡大

Friedmann解　　一様等方性を仮定

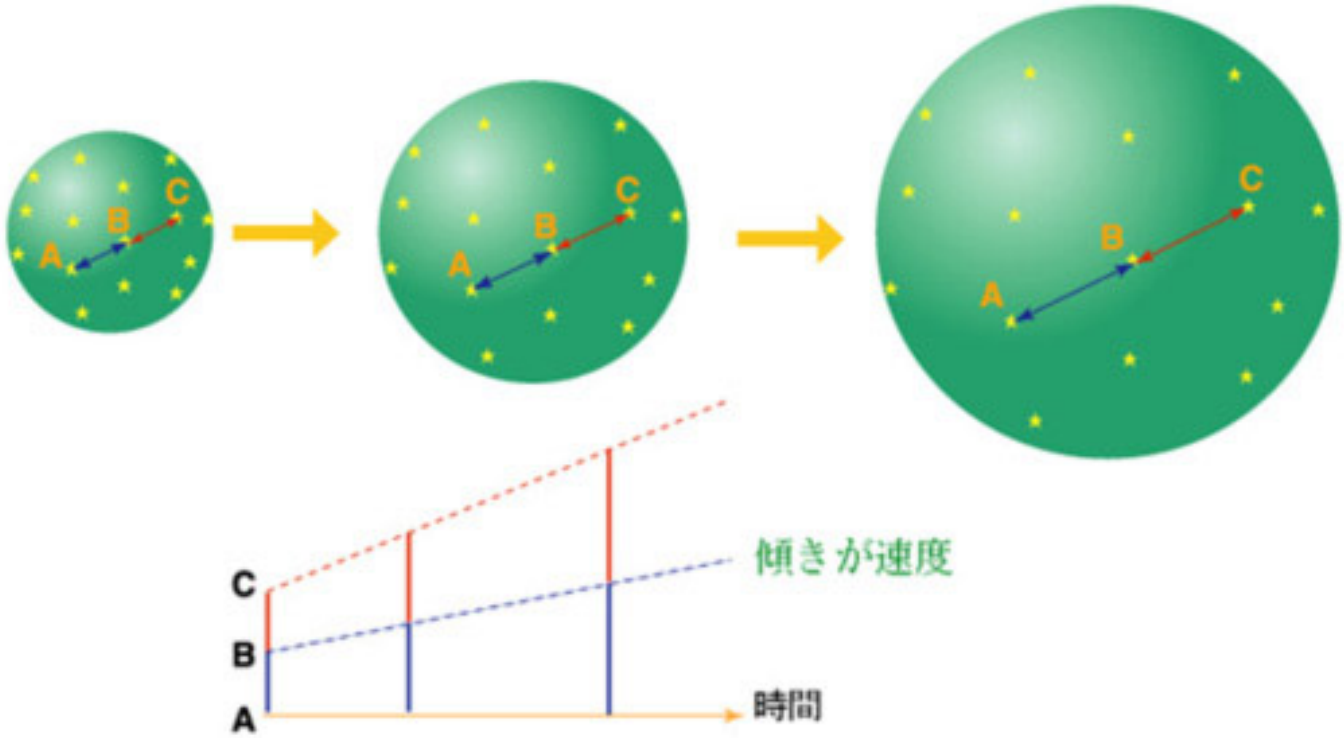




宇宙膨張　　Hubbleの発見



2次元宇宙の例

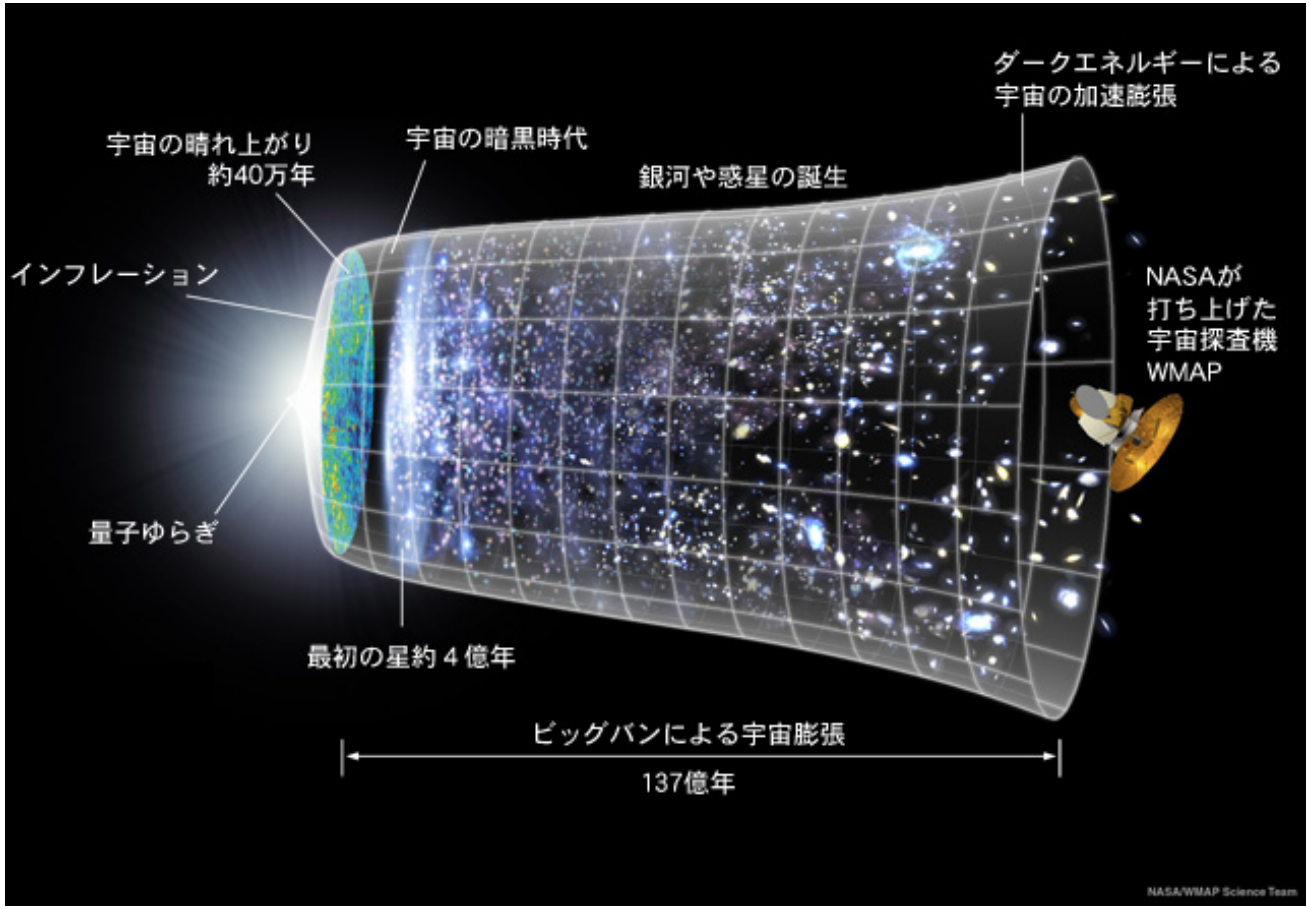


銀河の後退速度は銀河までの距離に比例する

現代の宇宙像：ビッグバン理論

永遠不変な宇宙像からの脱却

ビッグバン
ホイル（定常宇宙論者）の揶揄の言葉



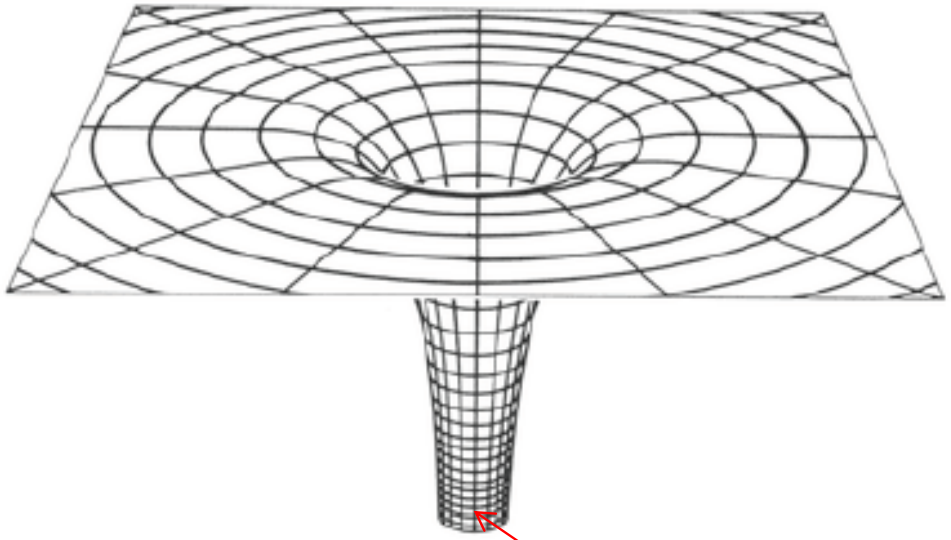
137億年前
小さな火の玉
から始まる

最近の宇宙観測により明らかにされた宇宙の歴史　（イメージ図）

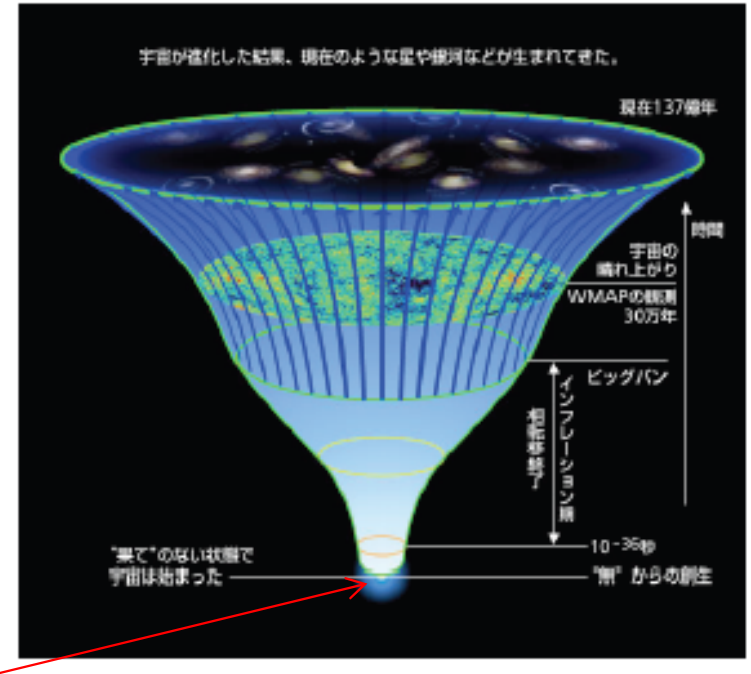
NASA / WMAP Science Team

特異点（時空のゆがみが発散）

ブラックホール



ビッグバン



特異点（曲率半径がゼロ）

一般相対性理論が破綻

（重力の量子効果が無視できなくなるため）

重力の量子効果が重要になるスケール

３つの基本物理定数

h	（プランク定数）	量子論
c	（光速）	相対性理論
G	（ニュートンの重力定数）	重力

長さ、時間、質量の単位を組み合わせて書けている

プランク長さ　$L_{\rm pl} = \left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2} \sim 10^{-33}{\rm cm}$

時空の曲率半径がプランク長さくらいになってきたら、
重力の古典論（一般相対性理論）は使えない。

⇒ 重力の量子論（超弦理論）

量子論

物質の階層構造

コップ1杯(180ml)の水　＝10 mol
＝水分子　H_2O　6×10^{24}個

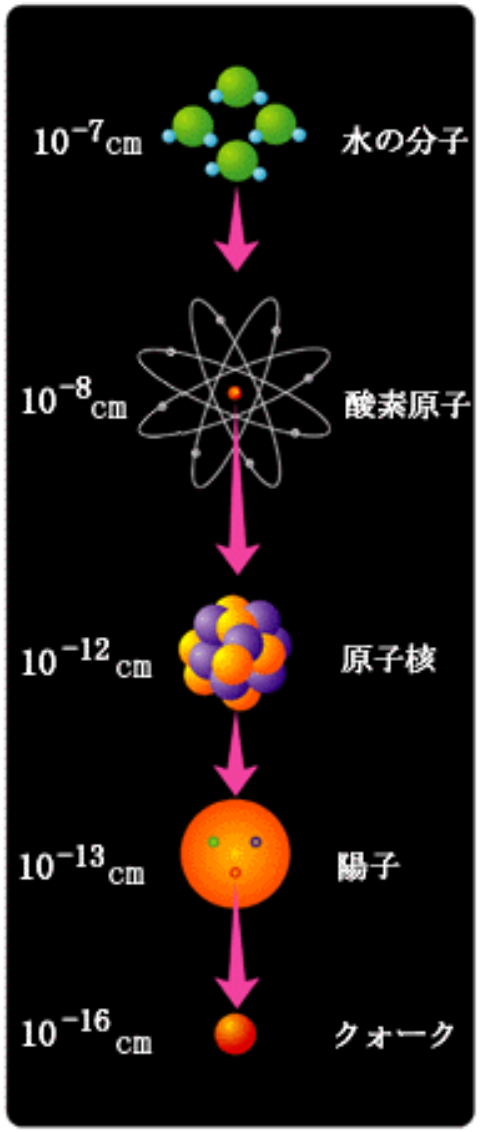
水分子＝水素原子2個＋酸素原子1個

酸素原子＝原子核＋電子8個

酸素の原子核＝陽子8個＋中性子8個

陽子＝uクオーク2個＋dクオーク1個

電子、クオーク　　現在“素”



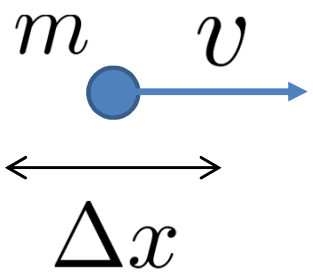
電磁気力

強い力

KEK homepageより

不確定性原理

ミクロの世界



運動量

$$p = mv$$

位置と運動量の不確定性

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

h : プランク定数

$6.626\,070 \times 10^{-34}$ J s

$$\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar$$

位置と運動量は交換しない

エネルギーと時間の不確定性 $\Delta E \Delta t \geq \hbar$

場の量子論

素粒子の世界を記述

場の量子論　＝　特殊相対性理論　＋　量子論

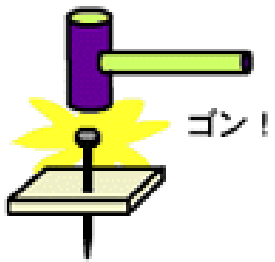
素粒子は点として扱われる

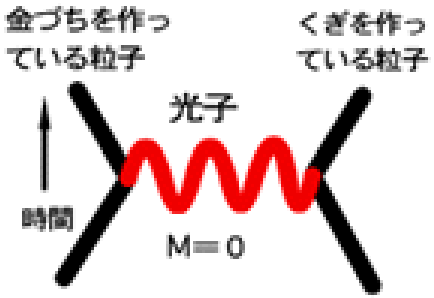
力を伝える粒子

力は粒子を交換することによって伝わる

～ 場の量子論

電磁気力 ― 光子の交換





KEK homepageより

核力 ～ 中間子の交換

中間子論

重力が量子化されたら

重力 ― 重力子の交換

4つの力

- 強い力　核子やクオークを結びつける力
- 電磁気力　電気と磁気
- 弱い力　ベータ崩壊などを起こさせる力

} 場の量子論

- 重力　ニュートンの万有引力

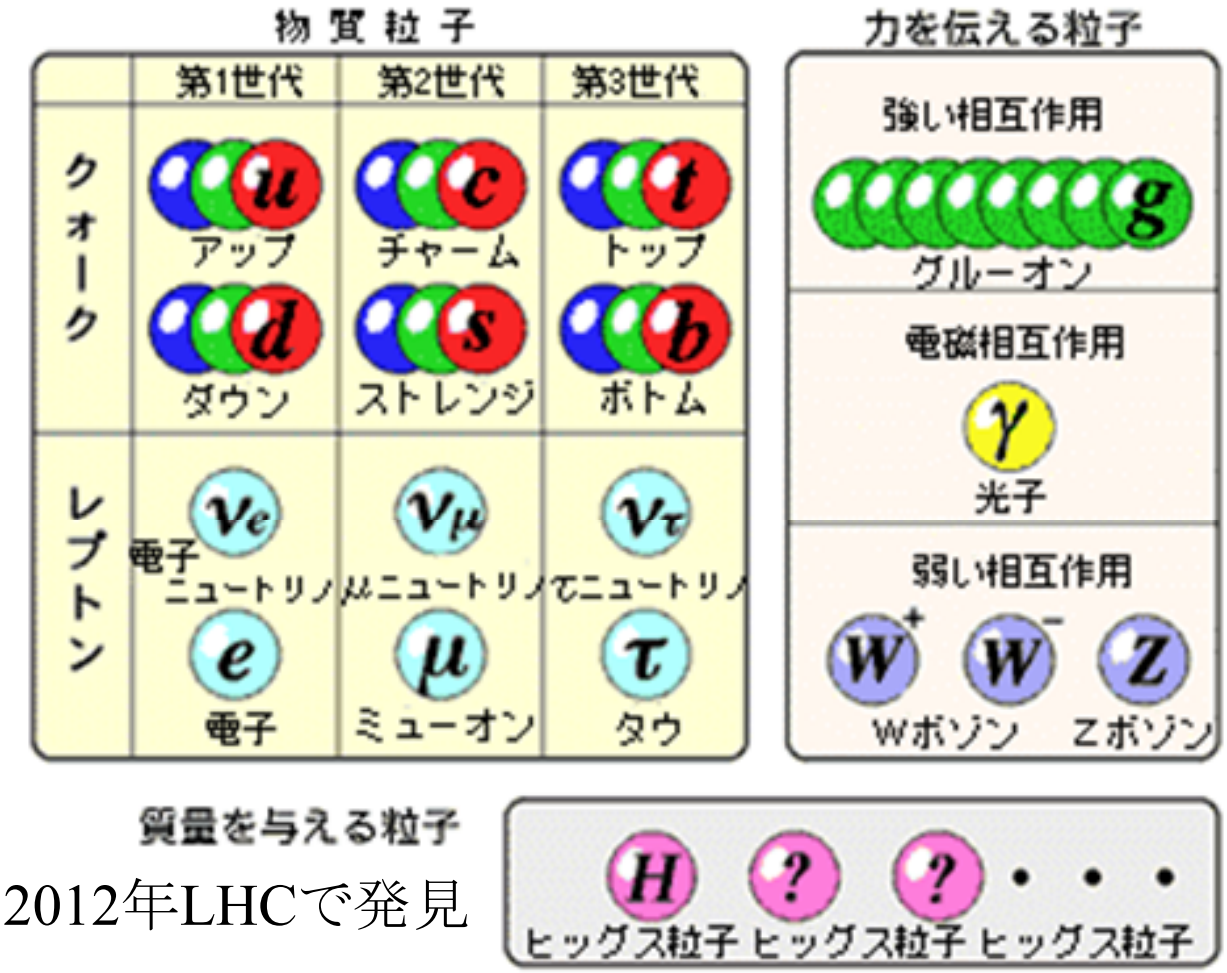
→ アインシュタインの一般相対性理論
ビッグバン宇宙論の基礎

重力の謎

量子論はわかっていない

宇宙の始まりを理解し、特異点の問題を解決するためには重力の量子論が必要

現在の素粒子



2012年LHCで発見

図1　現在の素粒子像「標準模型」の世界

KEK homepageより

小林・益川理論

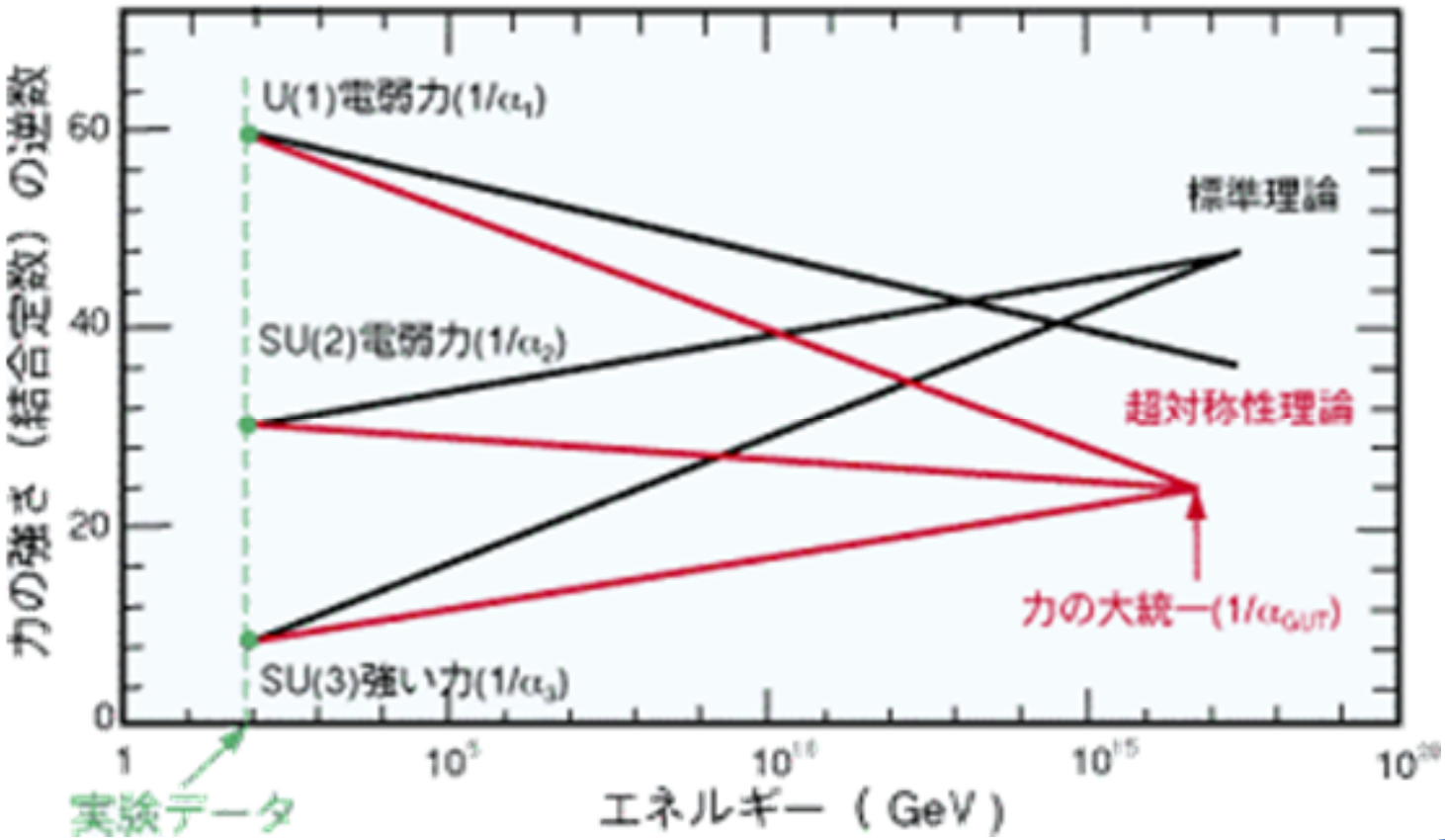
クォークが6種類(以上)あることを予言

ニュートリノ振動

スーパーカミオカンデ

カミオカンデ

力の統一



KEK homepageより

大統一のスケール

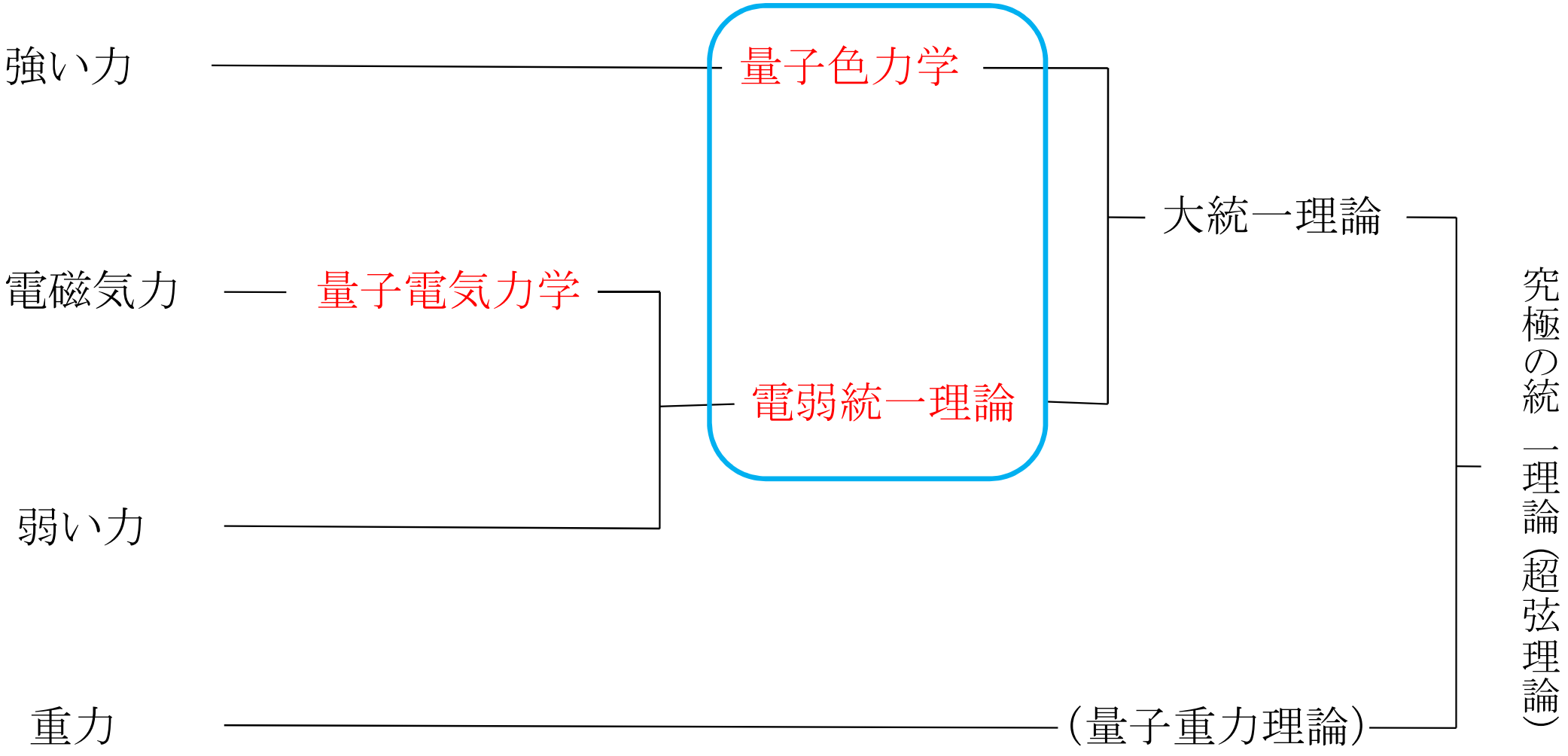
$10^{-30\sim31}$cm

現在実験で到達している
スケール　10^{-17}cm

重力の量子効果が
重要になるスケール

10^{-33}cm

現在の素粒子理論と統一への道



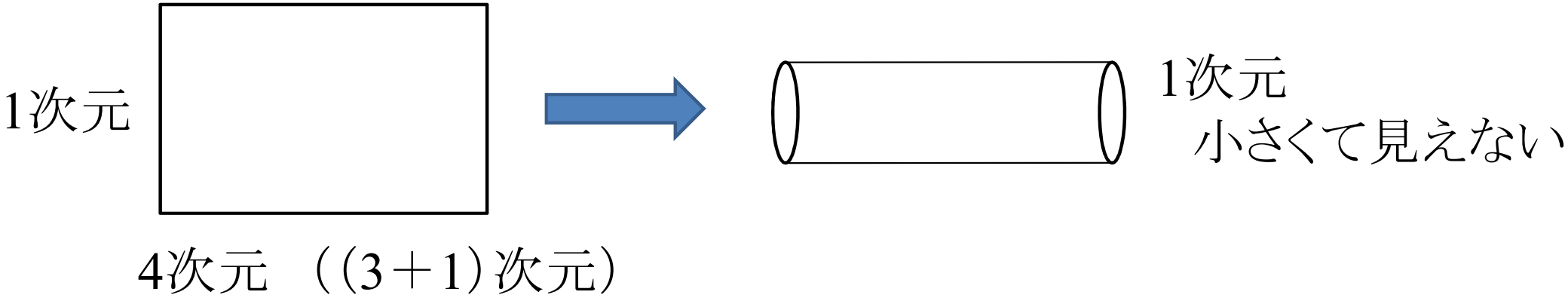
重力の量子論

- 宇宙の始まりの特異点を解決し、宇宙の始まりを理解するために必要
- 統一理論からの必然
- しかし、他の3つの力と違って、場の量子論では難しい
- 超弦理論は重力の量子論を含む4つの力の統一理論の最有力候補
- 場の量子論では素粒子は点として扱われるが、超弦理論ではものの最小単位は「弦（ひも）」

カルツァ・クライン理論

1921年

5次元理論　～　重力と電磁気力の統一



電磁気力は5次元目の空間のゆがみ
～　時空と力(重力＋電磁気力)の統一

時空は4次元とは限らない　～　高次元理論

量子論は依然できないが、超弦理論へとアイデアは引き継がれる

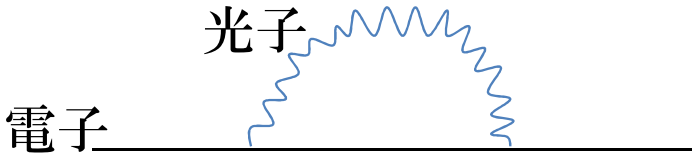
重力と量子論の融合

何故「弦」なのか？

重力以外の３つの力（電磁気力、強い力、弱い力）の場合

場の量子論

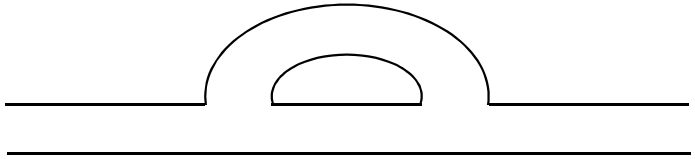
素粒子を大きさのない“点”として記述



計算過程で生じる発散の問題
繰り込み理論（朝永振一郎ら）で処理

重力の場合

発散の度合いがひどく、「繰り込み」で処理しきれない



点ではなく拡がりをもった弦（ひも）を考えれば、有限になる

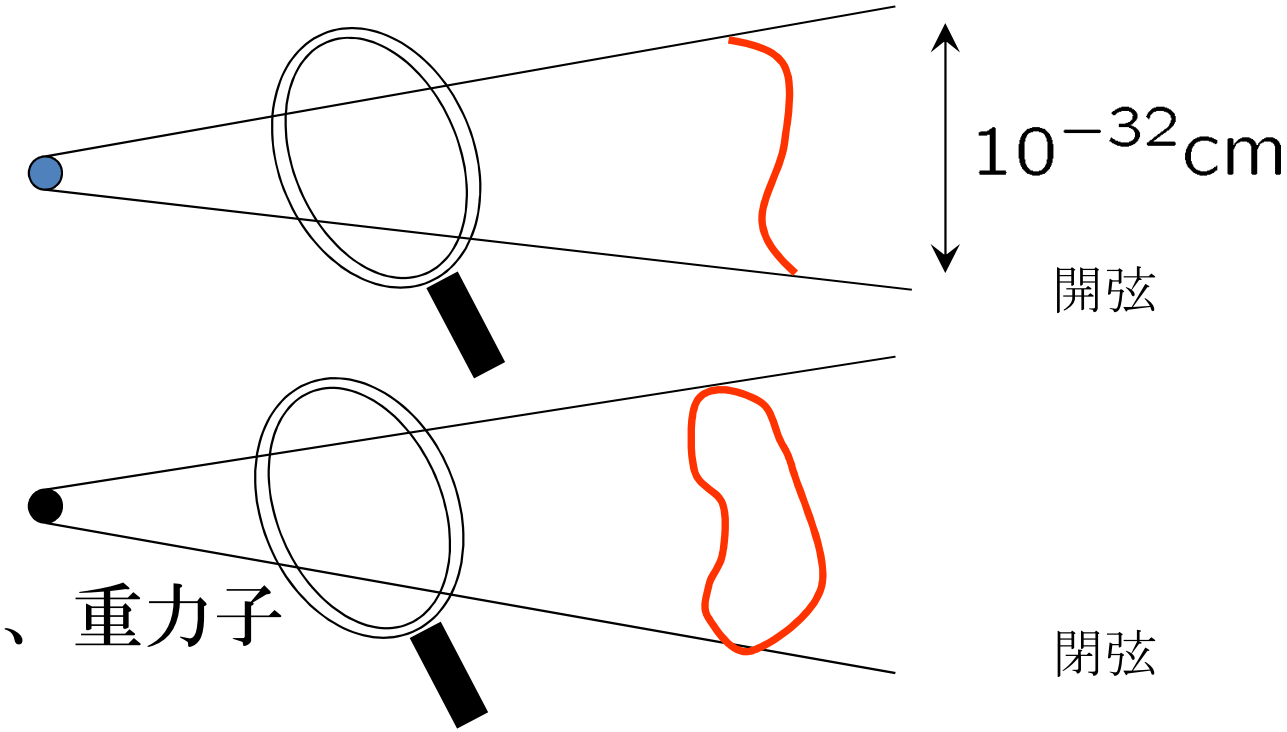
→ 超弦理論

超弦理論

1974 Sherk-Schwarz, Yoneya
1984 Green-Schwarz

弦の振動の仕方で様々な粒子を表す

光子
グルオン
$W^{\pm}$, Z
クォーク
など



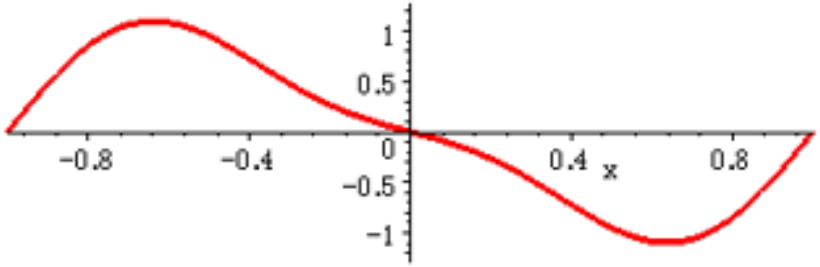
特に、重力子

重力を含めて、4つの力を統一的に記述

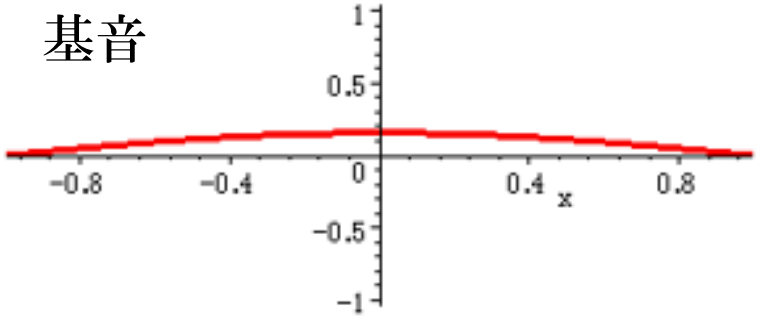
時空と力と物質の統一

究極の統一理論

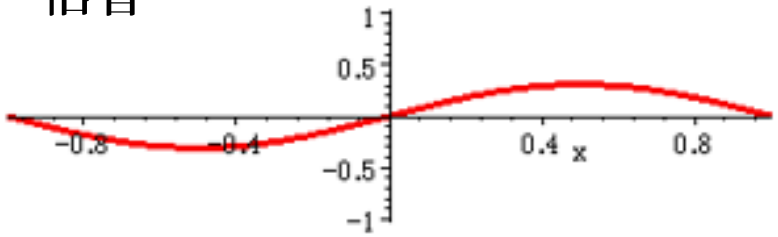
弦の振動の例



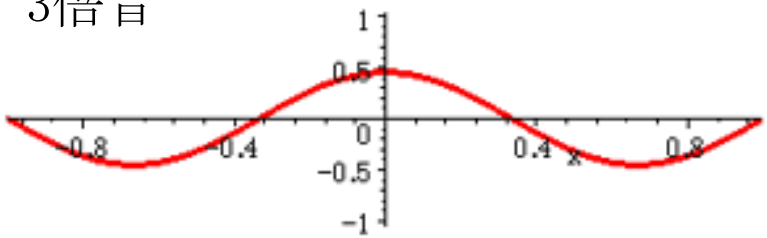
基音



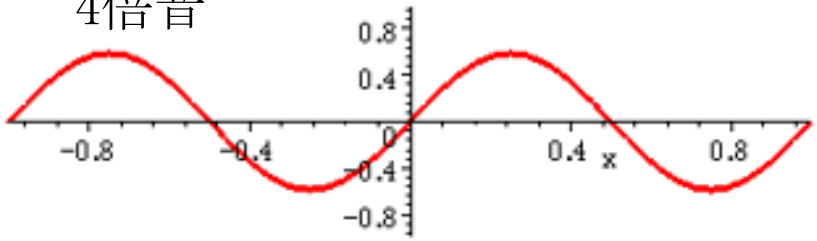
倍音



3倍音



4倍音



異なる
粒子

従来の超弦理論の研究方法

1985～

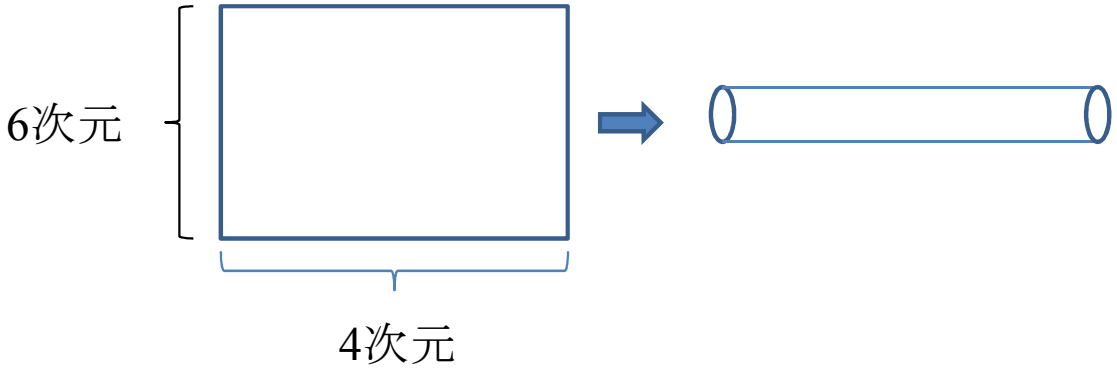
弦の相互作用が弱い場合にのみ適用可能

10次元時空　：　現実世界（4次元）と矛盾

時間1＋空間9　　時間1＋空間3

高次元時空

⇒ 6次元分、手で丸める　（コンパクト化）



ランドスケープ

様々な丸め方 → 違う物理を予言

4次元でなくてもよい

「我々の宇宙は、実現しうる無数の宇宙の一つにすぎない」
（ランドスケープ）という考え方も出現
しかし、いずれにせよ宇宙の始まりの特異点を解消できない

弦の相互作用が強い場合にも通用する新しい方法が必要

時空の不確定性と非可換時空

Yoneya ('87)

弦

T： 弦の張力

$$\left.\begin{aligned}\Delta E &= T\Delta x \\ \Delta E\Delta t &\geq \hbar\end{aligned}\right\} \quad \Delta t\Delta x \geq \frac{\hbar}{T}$$

時空の不確定性

↓

非可換時空 → 重力の量子論の一般的性質

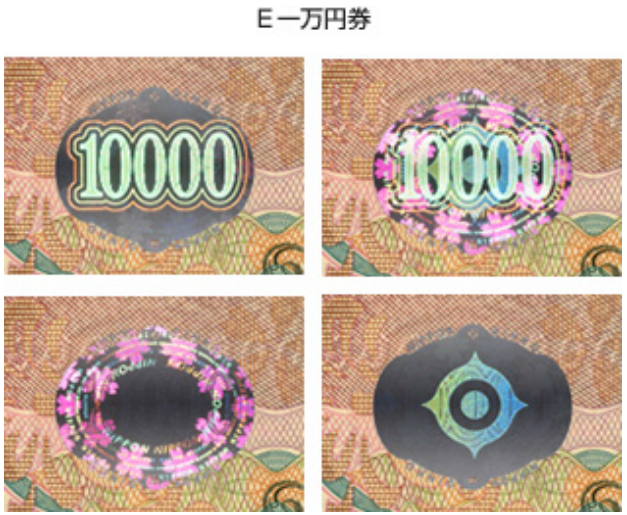
$$\hat{t}\hat{x} - \hat{x}\hat{t} = \frac{i\hbar}{T}$$

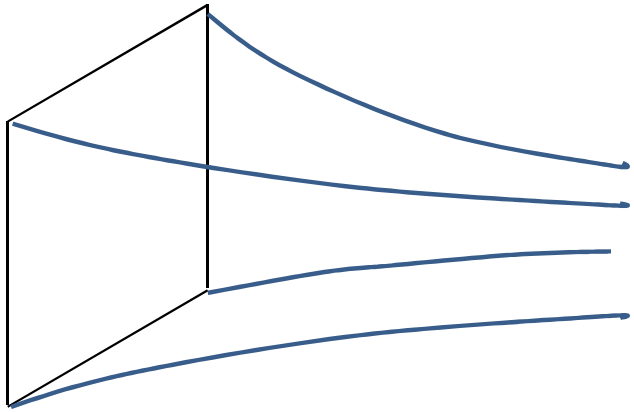
時間と空間は交換しない
(空間と空間)

ホログラフィー原理

’t Hooft (’93), Susskind (’95), Maldacena (’98)

ホログラフィー:3次元の立体像を平面に記録・再生する技術





量子重力理論は空間の境界で定義される別の理論で記述される　～　空間の創発(出現)

行列

2行2列の行列

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$$

$$AB = \begin{pmatrix} 1\times 3 + 2\times 2 & 1\times 2 + 2\times 4 \\ 2\times 3 + 1\times 2 & 2\times 2 + 1\times 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & 10 \\ 8 & 8 \end{pmatrix}$$

$$BA = \begin{pmatrix} 7 & 8 \\ 10 & 8 \end{pmatrix}$$

3行3列の行列

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 2 & 2 & 3 \\ 5 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

N行N列の行列
も考えられる

行列の積は一般には非可換　$AB \neq BA$　cf.) $\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar$

IIB行列模型 （IKKT模型）

Ishibashi-Kawai-Kitazawa-Tsuchiya ('96)

弦の相互作用が強い場合にも通用する新しい方法

N行N列の行列の各成分が基本的自由度

行列のサイズNを大きくする極限をとる

この極限で弦の描像が現れる

行列は非可換時空を自然に実現

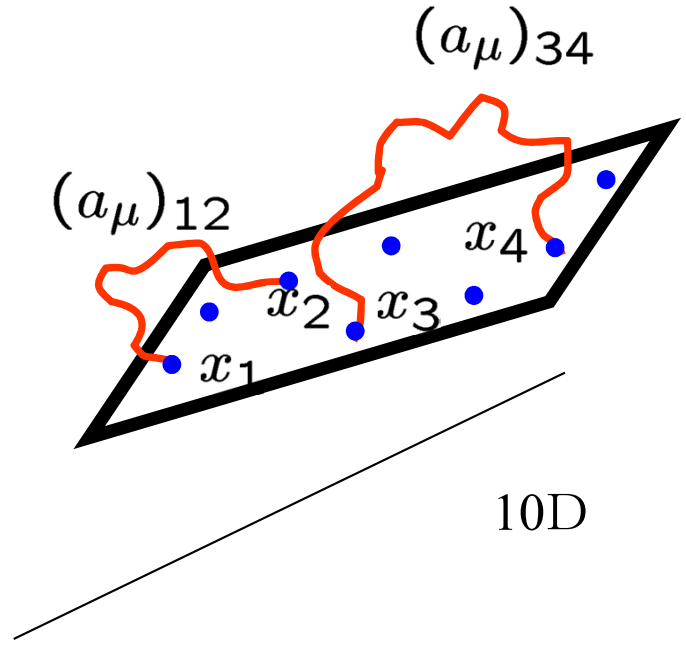
IIB行列模型における時空像

10個のN行N列行列　　$A_\mu \quad (\mu = 0, 1, \ldots, 9)$

$N = 8$ の例

$$A_\mu = \begin{pmatrix} (x_1)_\mu & (a_\mu)_{12} & (a_\mu)_{13} & (a_\mu)_{14} & (a_\mu)_{15} & (a_\mu)_{16} & (a_\mu)_{17} & (a_\mu)_{18} \\ (a_\mu)_{21} & (x_2)_\mu & (a_\mu)_{23} & (a_\mu)_{24} & (a_\mu)_{25} & (a_\mu)_{26} & (a_\mu)_{27} & (a_\mu)_{28} \\ (a_\mu)_{31} & (a_\mu)_{32} & (x_3)_\mu & (a_\mu)_{34} & (a_\mu)_{35} & (a_\mu)_{36} & (a_\mu)_{37} & (a_\mu)_{38} \\ (a_\mu)_{41} & (a_\mu)_{42} & (a_\mu)_{43} & (x_4)_\mu & (a_\mu)_{45} & (a_\mu)_{46} & (a_\mu)_{47} & (a_\mu)_{48} \\ (a_\mu)_{51} & (a_\mu)_{52} & (a_\mu)_{53} & (a_\mu)_{54} & (x_5)_\mu & (a_\mu)_{56} & (a_\mu)_{57} & (a_\mu)_{58} \\ (a_\mu)_{61} & (a_\mu)_{62} & (a_\mu)_{63} & (a_\mu)_{64} & (a_\mu)_{65} & (x_6)_\mu & (a_\mu)_{67} & (a_\mu)_{68} \\ (a_\mu)_{71} & (a_\mu)_{72} & (a_\mu)_{73} & (a_\mu)_{74} & (a_\mu)_{75} & (a_\mu)_{76} & (x_7)_\mu & (a_\mu)_{78} \\ (a_\mu)_{81} & (a_\mu)_{82} & (a_\mu)_{83} & (a_\mu)_{84} & (a_\mu)_{85} & (a_\mu)_{86} & (a_\mu)_{87} & (x_8)_\mu \end{pmatrix}$$

4D



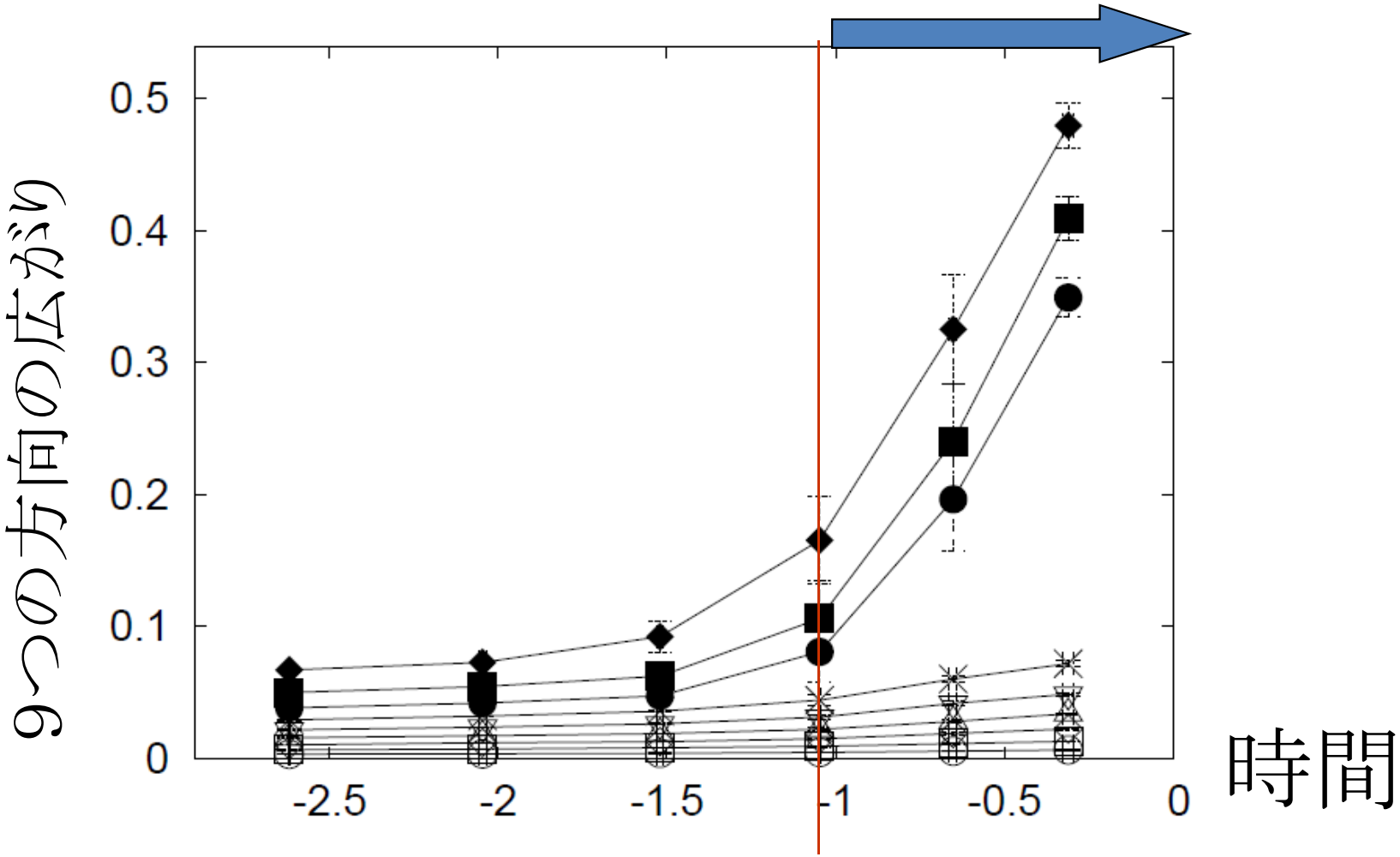
我々の住む4次元の時空が現れるか？

時空の創発（出現）

3次元膨張宇宙の出現

Kim-Nishimura-Tsuchiya (2012)

9次元回転対称性の自発的破れ



我々の空間がなぜ3次元かを説明
宇宙のはじまりの特異点の問題なし

従来の方法の問題点を克服

自発的対称性の破れ

南部陽一郎　質量の起源の解明で2008年ノーベル物理学賞受賞
量子色力学におけるカイラル対称性の自発的破れ

まとめと展望

まとめ　時空概念の変遷　～　重力研究の歴史

- 天動説から地動説へ　地球中心からの脱却
- 時間と空間の統一　～　特殊相対性理論
- 時空と力（重力）の統一
  時空はもはや入れ物ではない　～　一般相対性理論
- 太陽系から全宇宙へ
- 永遠不変な宇宙からの脱却　～　ビッグバン宇宙論
- 重力の量子論
  ～　宇宙のはじまりの特異点の解消
  4つの力の統一理論
- 超弦理論　時空と力と物質の統一　高次元時空
- 時空の不確定性と非可換時空
- ホログラフィー原理
- 創発（出現）する時空　～　行列模型

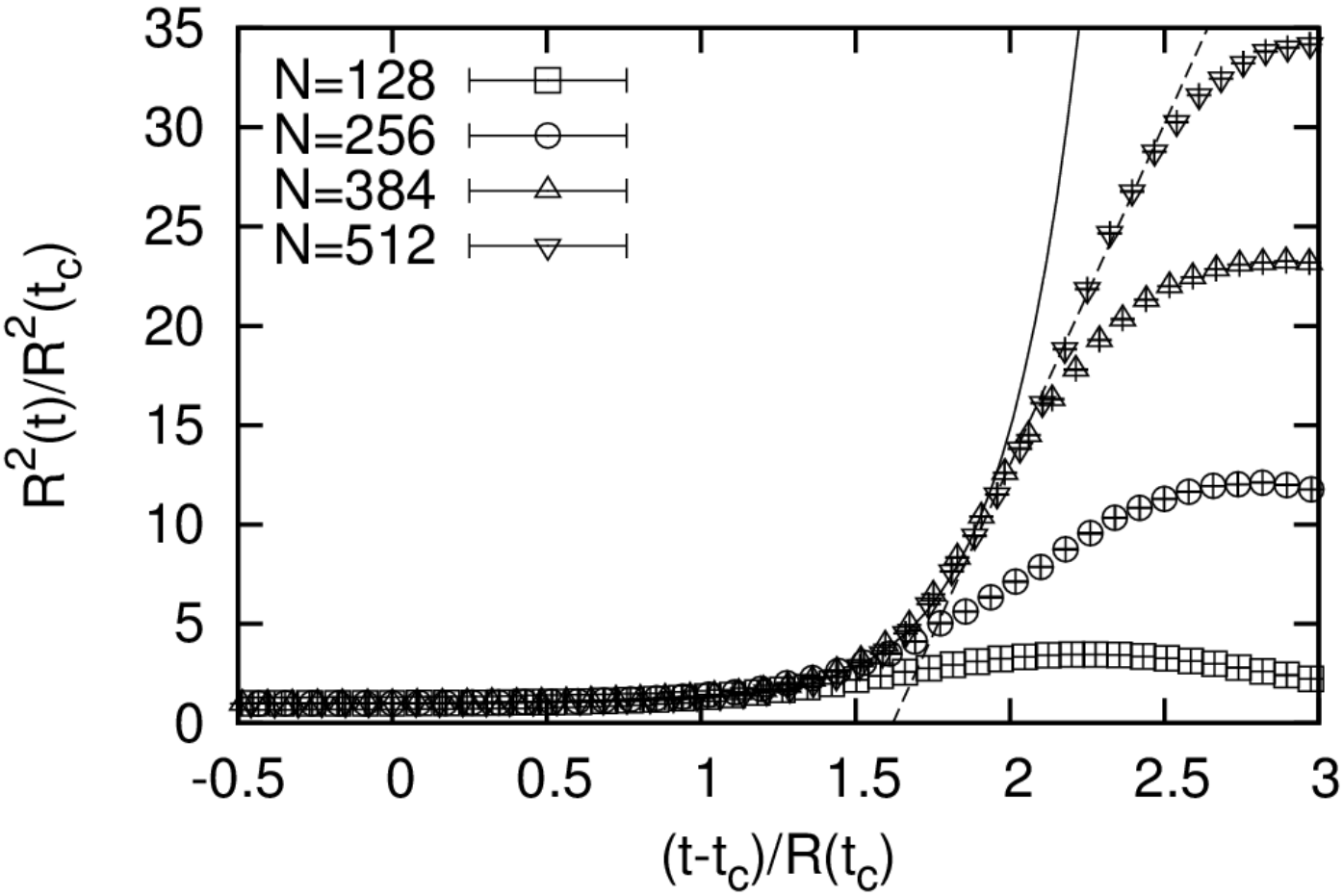
スパコンの利用

スーパーコンピュータを使った大規模数値シミュレーション

例）　スーパーコンピュータ「京」

京を用いた計算結果

Ito-Nishimura-Tsuchiya ('15)



ポスト京

ポスト「京」重点課題（9）
「宇宙の基本法則と進化の解明」のメンバー

展望

- コンピュータ上に宇宙の歴史を再現できるか？
- 現在、観測される素粒子（標準模型）が現れるか？

- 時空とは何か？

  新しい時空概念の探求

  高次元、非可換、

  創発（重力の量子論では自然？）、、、、、、

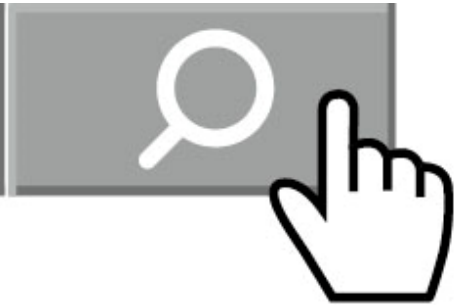
参考書

サイエンス社
2014年3月発行

今日の話の最後の部分
の話の背景を解説

ウェブページ

土屋　素粒子論



https://wwp.shizuoka.ac.jp/tsuchiya/