

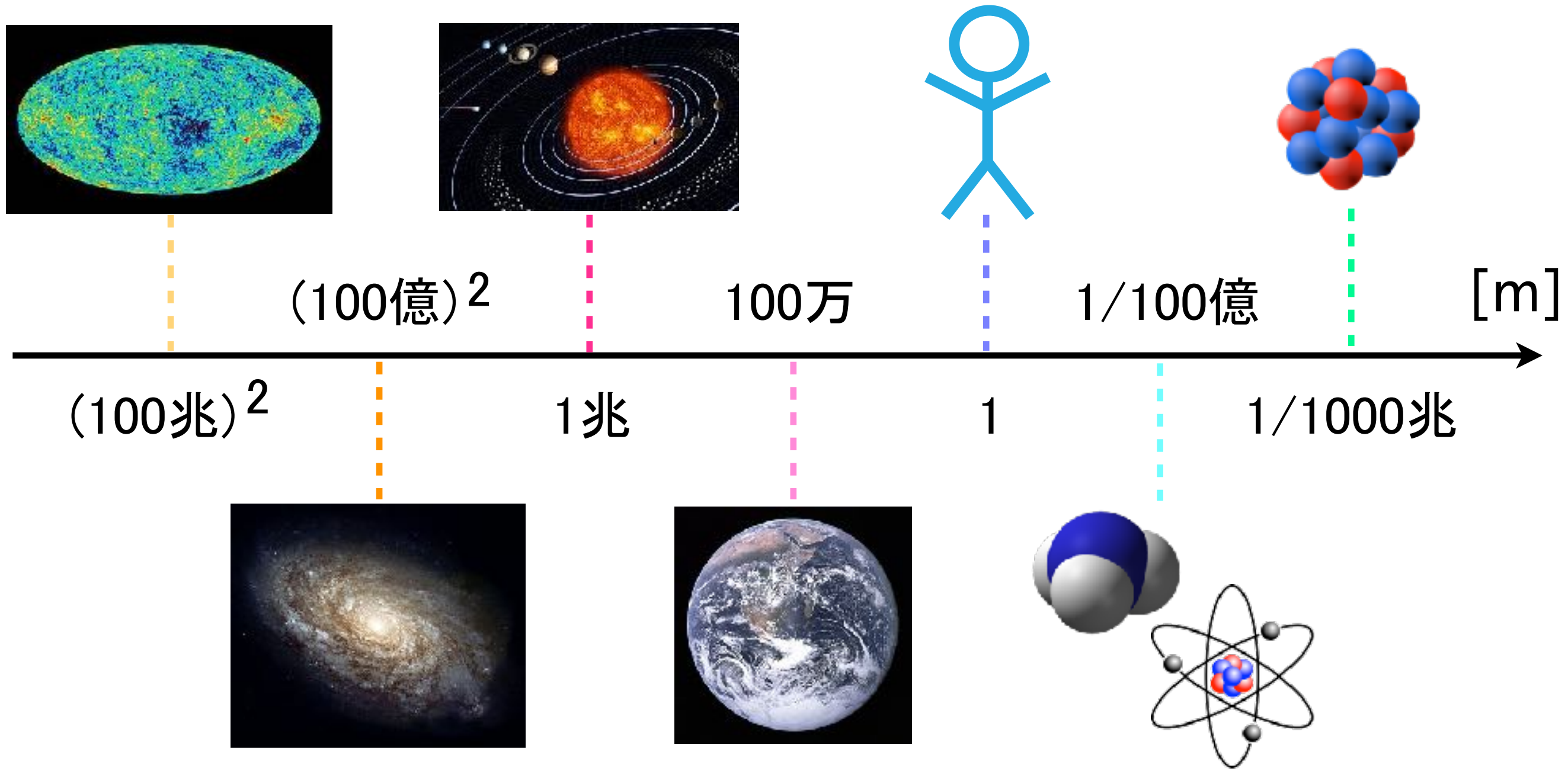
素粒子物理学

—自然界の最も基本的な成り立ちについて—

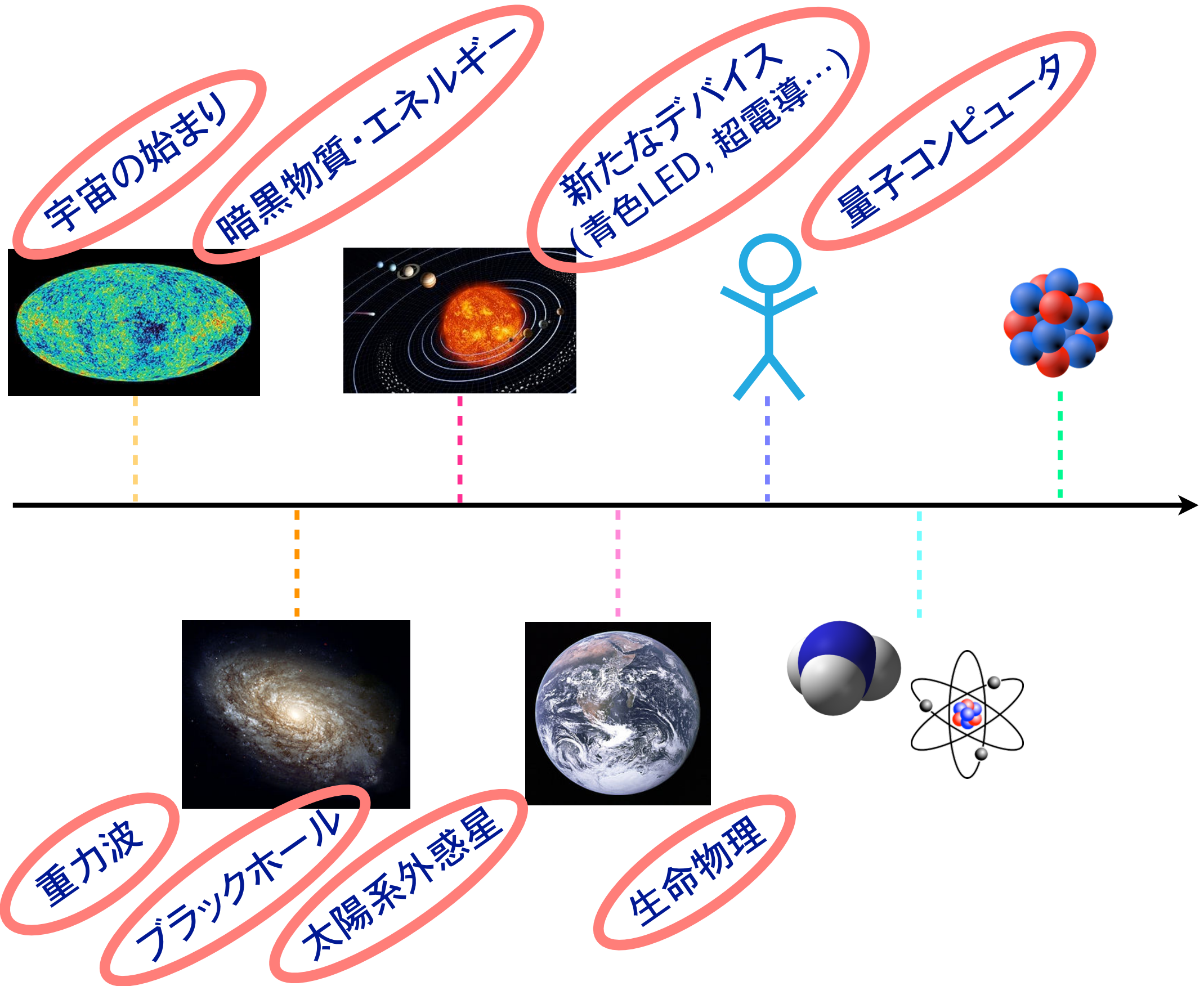
佐藤 勇二

(福井大学)

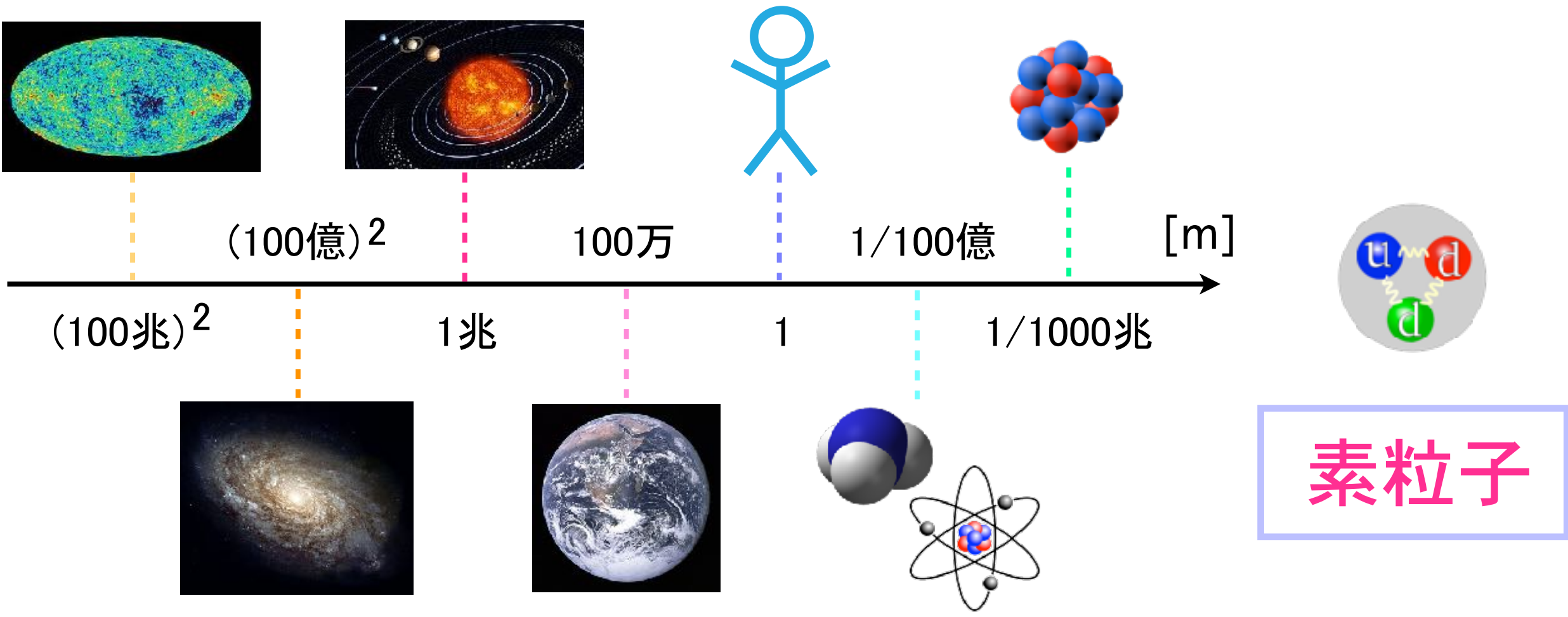
自然界 (大きな世界から小さな世界まで)



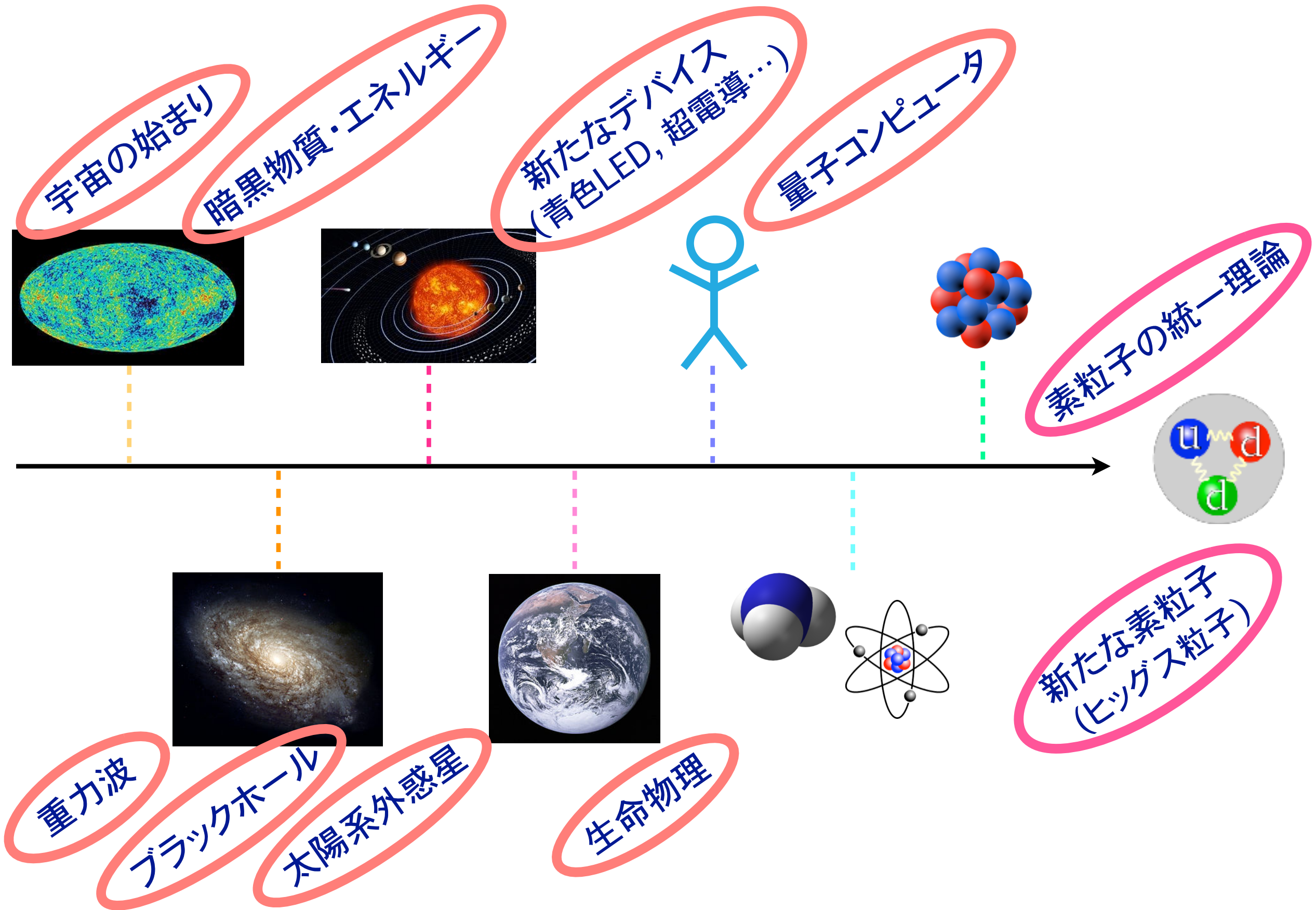
興味深い新たな物理



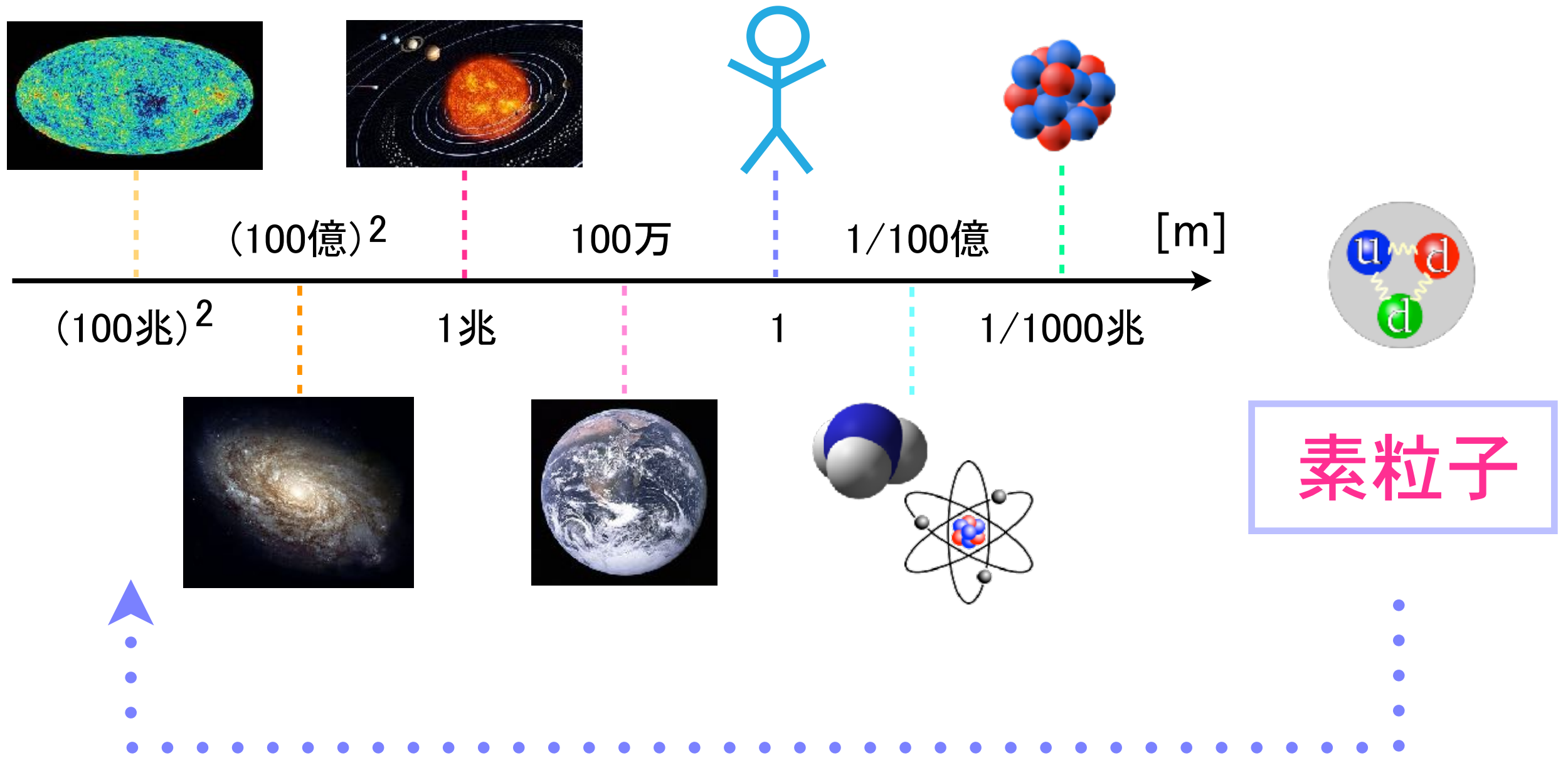
どんどん小さな世界を見ていくと ...



興味深い新たな物理



大きな世界と小さな世界はつながっている



宇宙の成り立ちを知る上でも重要

話の予定

1. 素粒子とは？

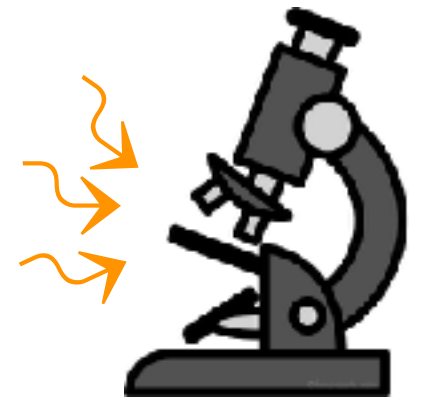
- ☆ 素粒子を“見る”
- ☆ どのような素粒子があるのか
- ☆ 素粒子に働く力

2. 素粒子物理学の研究

素粒子を“見る”

どのように素粒子を“見る”か

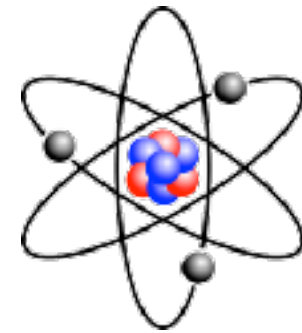
- (光学)顕微鏡：光を当てて反応をキャッチ



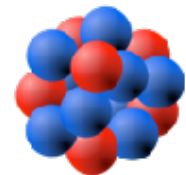
www.fancyparts.com

- 原子, 原子核の大きさ $\approx 10^{-10}, 10^{-15}$ m

cf. 地球-太陽： 10^{12} m



- 素粒子は大きさを持たない(と考えられている)

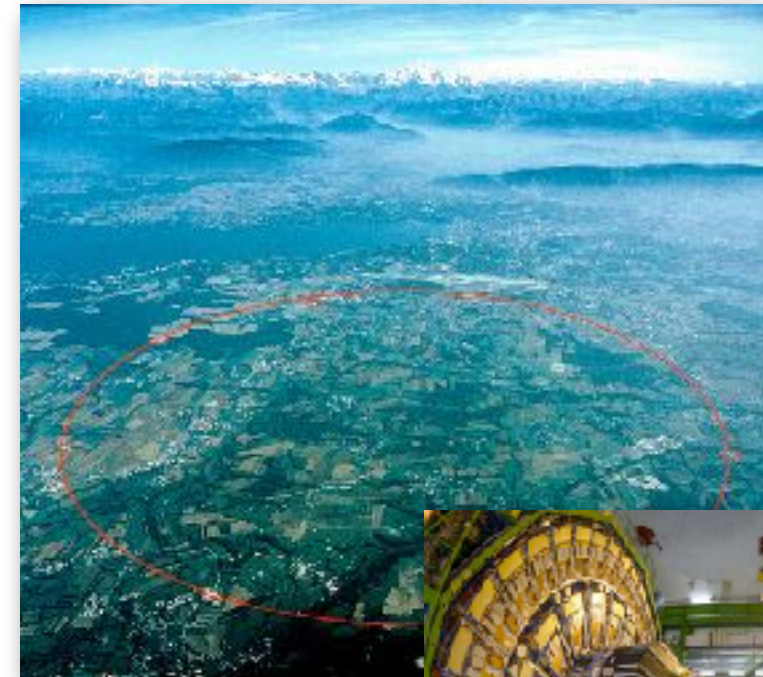


⇒ “加速器”：高エネルギーの粒子をぶつけた反応を解析
= 超高性能の“顕微鏡”

どのように素粒子を“見る”か

- LHC (Large Hadron Collider)
CERN, ジュネーブ, スイス
陽子を光速の99.999999%まで加速
円周27km (山手線は34.5km)

cf. Web の誕生 '90



www.physics.ucla.edu/lhc



phys.org

- KEKB

KEK, つくば市
電子を光速の99.9999997% まで加速
円周約3km



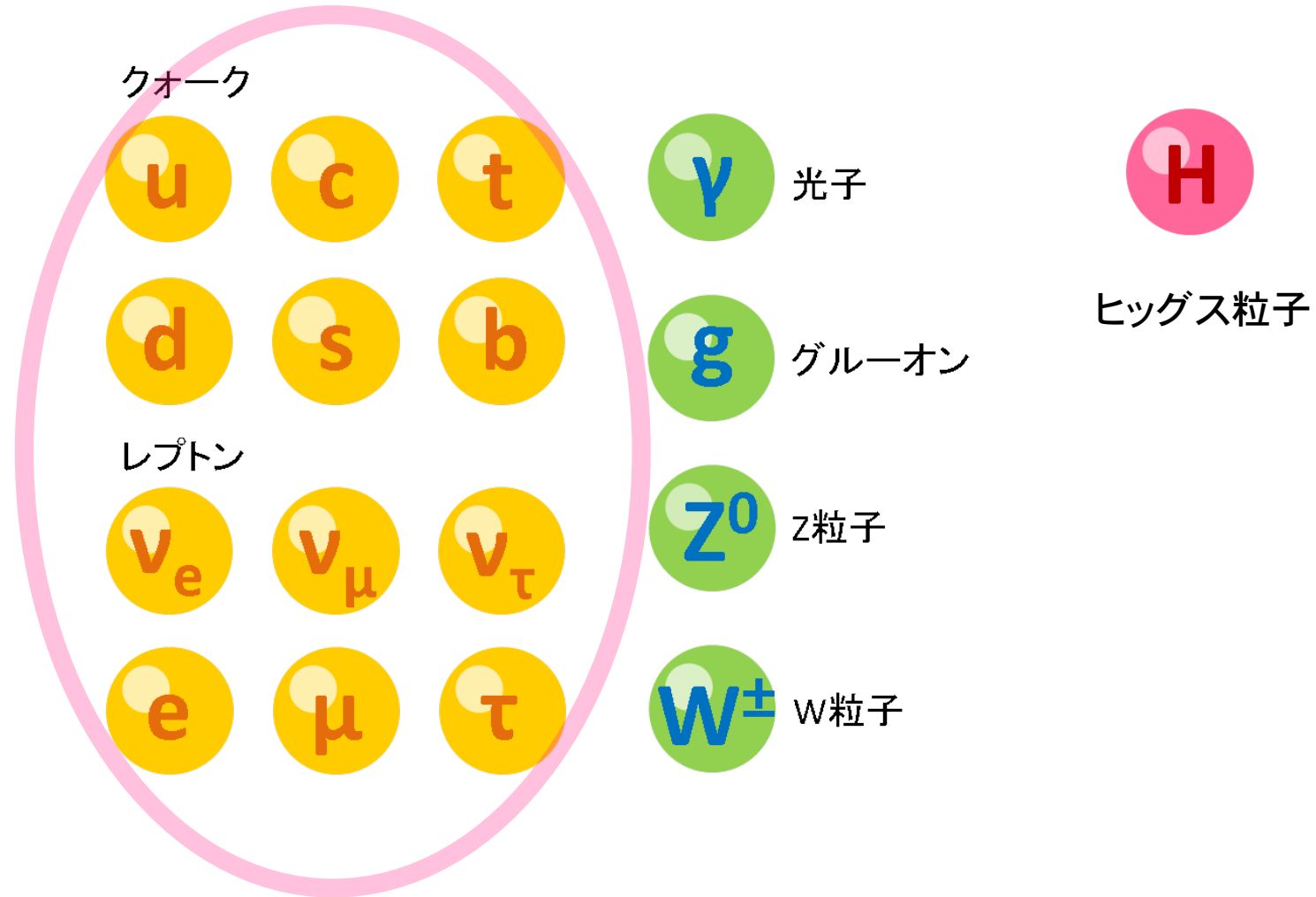
www2.kek.jp/accl/introKEKB/

どのような素粒子があるのか

現在知られている素粒子

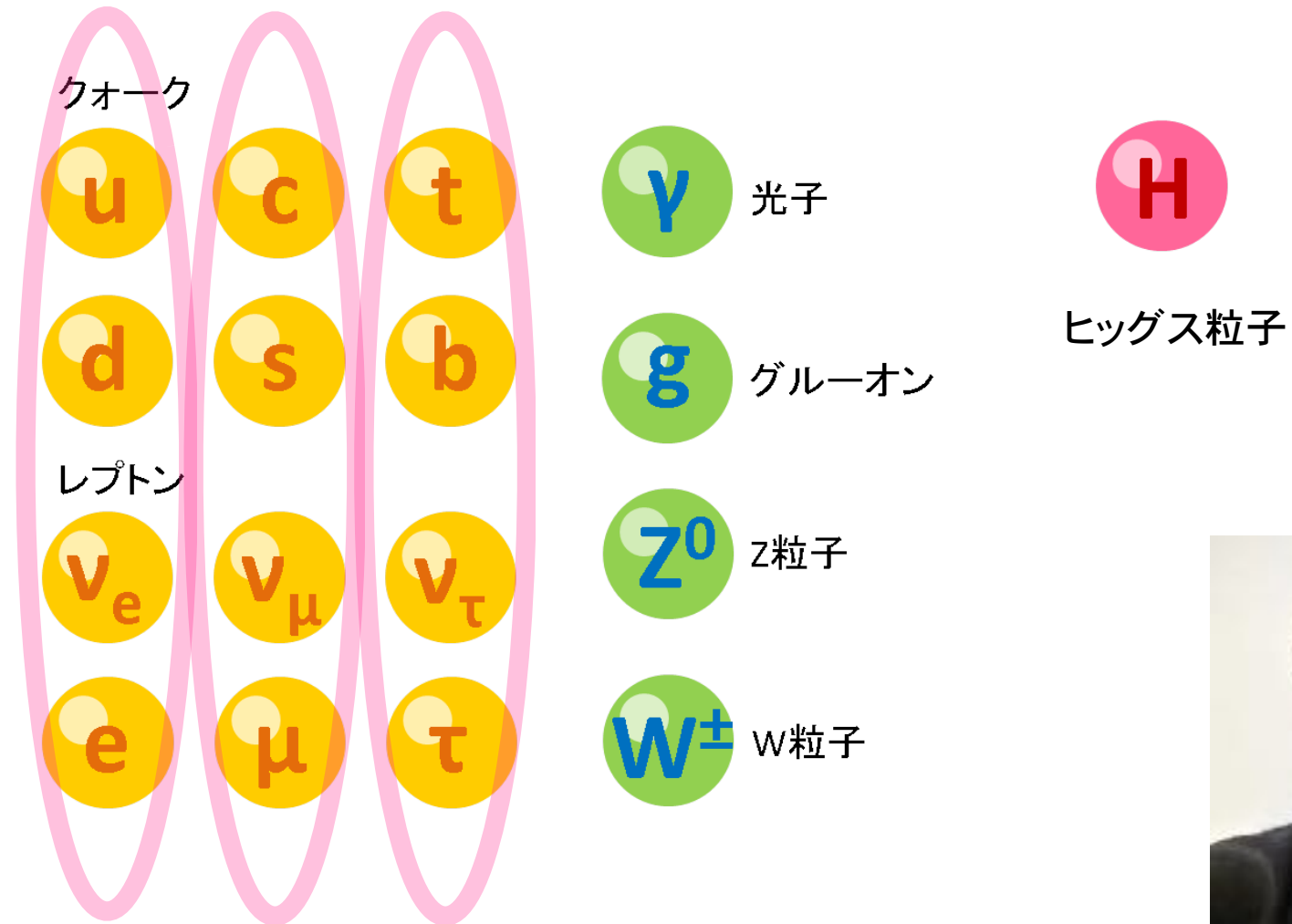


素粒子



物質をつくる粒子

素粒子



- “同じ構造”が3つ：3世代 [小林-益川]

素粒子

クォーク



クォーク



レプトン



光子



グルーオン



Z粒子



W粒子

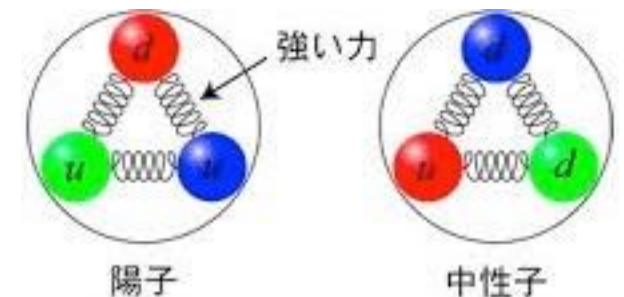


ヒッグス粒子



Wikipedia より

- 例えば、陽子は uud , 中性子は udd
- “カラー(R,G,B)”の自由度有り [南部]



<http://kai-kuu.jugem.jp>

素粒子



- 電子の仲間

素粒子

クォーク



レプトン



光子



グルーオン



Z粒子



W粒子



ヒッグス粒子

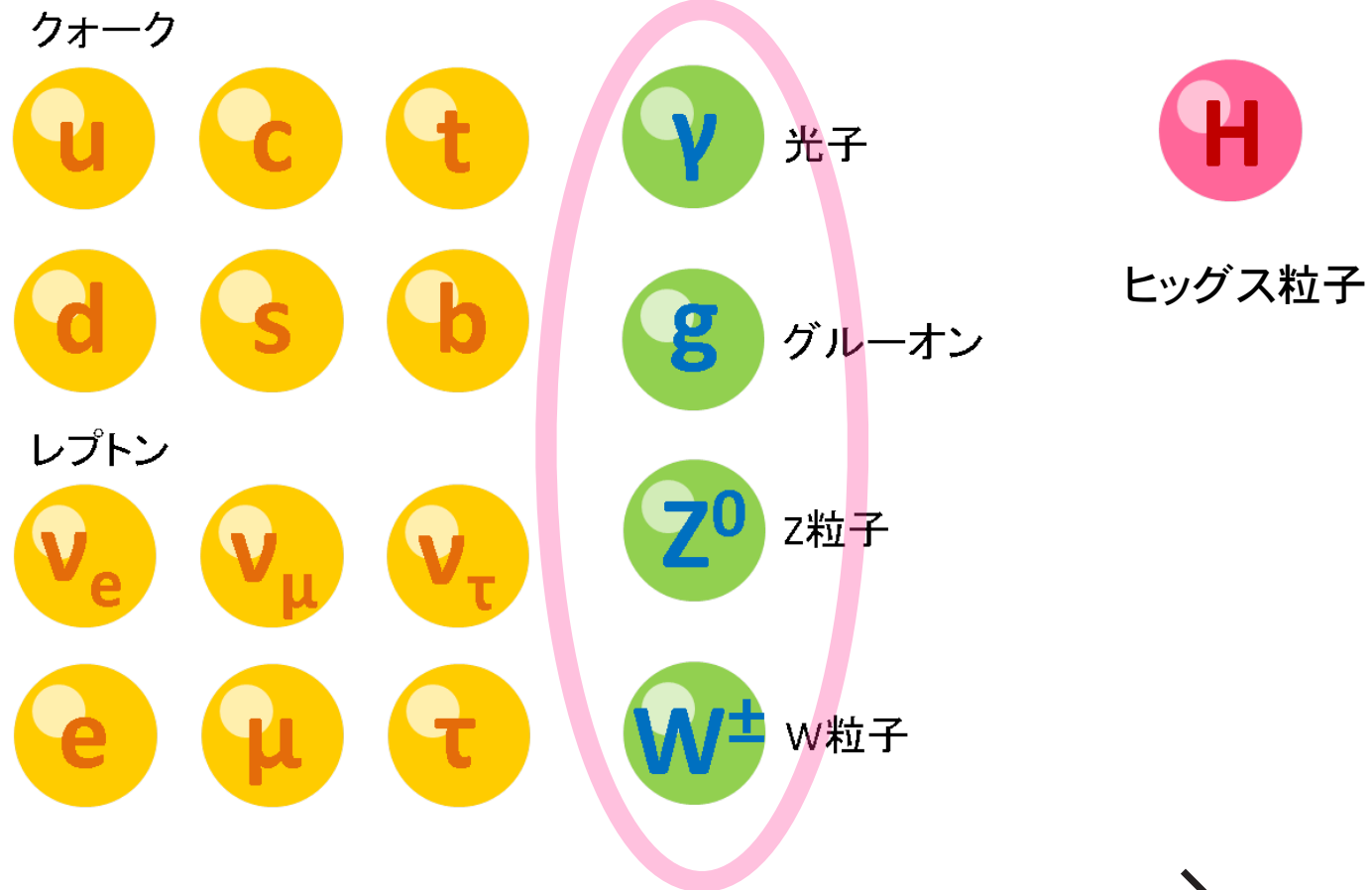
ニュートリノ



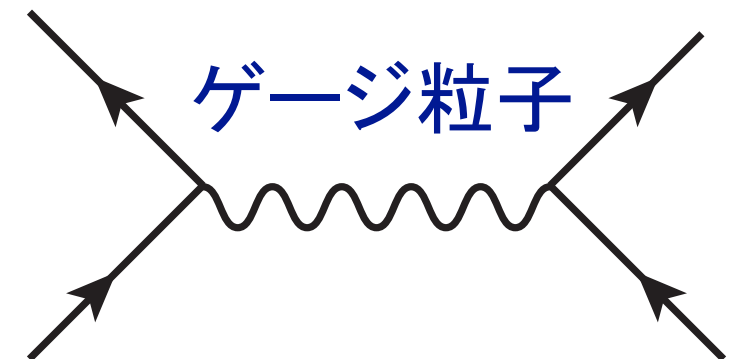
www.yomiuri.co.jp, Wikipediaより

- 超新星爆発時に放出 [ニュートリノ天文学:小柴...]
- 質量有 ・ ニュートリノ振動 [スーパーカミオカンデ... ; 戸塚、梶田, ...]

素粒子



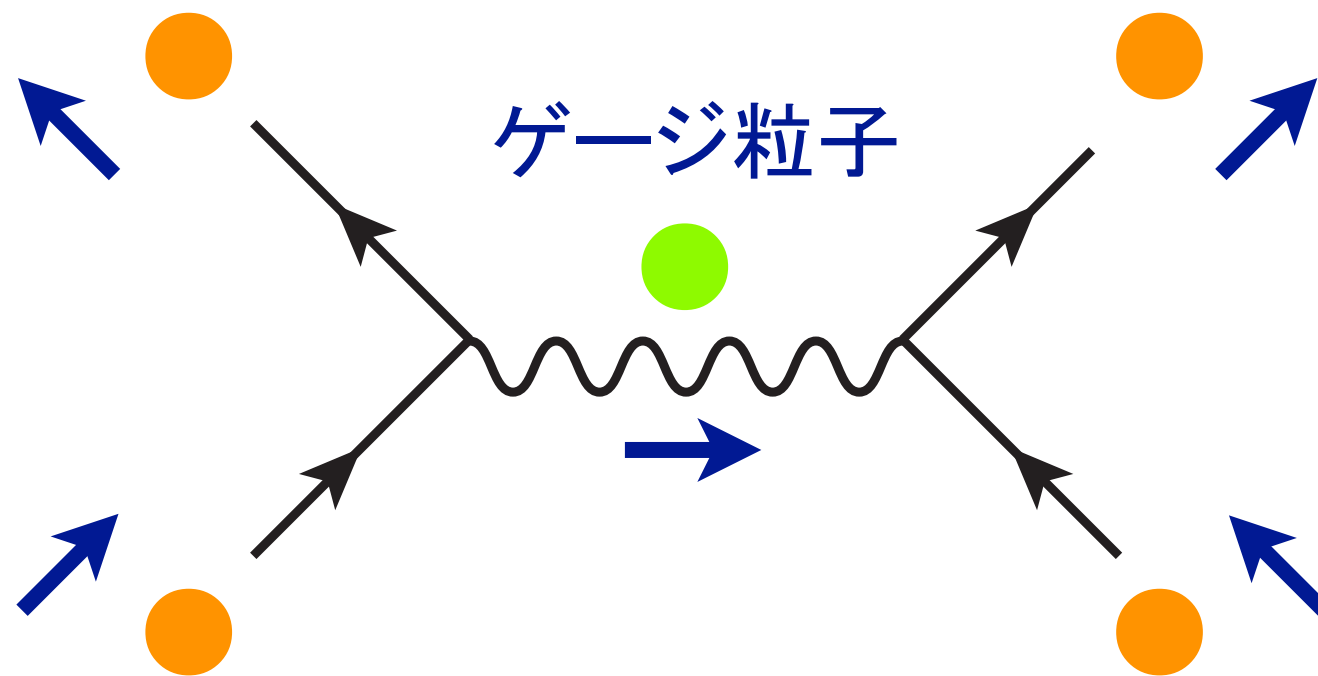
ゲージ粒子



- 力を伝える

力が働くとは？

⇒ 力を媒介する粒子を通して、素粒子どうしがエネルギー・運動量を交換すること



[湯川]

Wikipedia より

素粒子

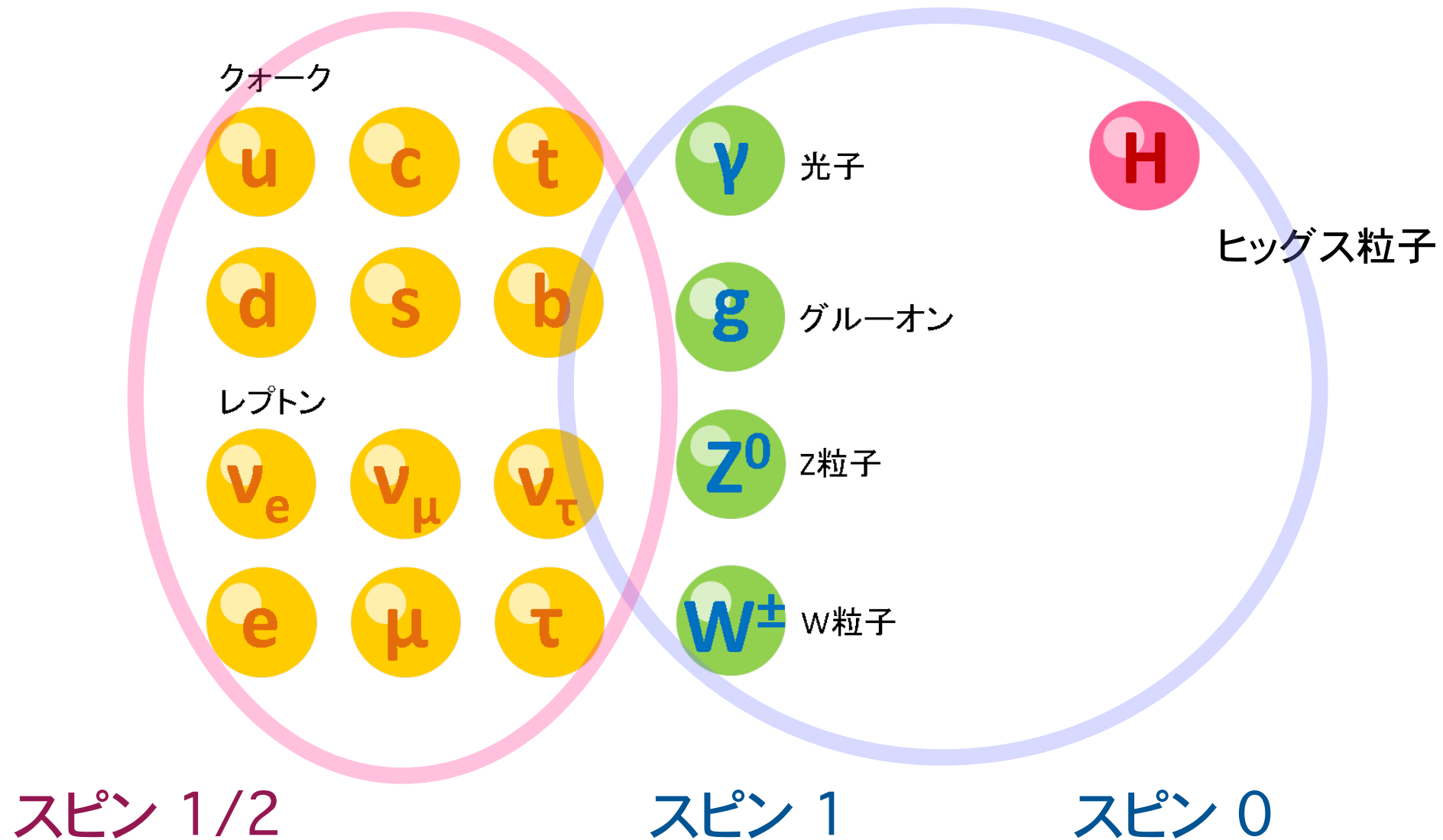
ヒッグス粒子



www.telegraph.co.uk

- 物質の質量の起源
- 2012-2013 にかけて発見
- “自発的対称性の破れ” (cf. 水 \Rightarrow 氷) \Rightarrow ヒッグス機構
[南部] [Englert, Higgs, Kibble, Guralnik, Hagen]

素粒子



フェルミ粒子 : スピン(内部角運動量)が半整数

ボース粒子 : スピンが整数

現代物理学

— 相対論と量子論 —

物理学

現象

宇宙・天体

物質

生命

原子・素粒子

古典物理学

力学

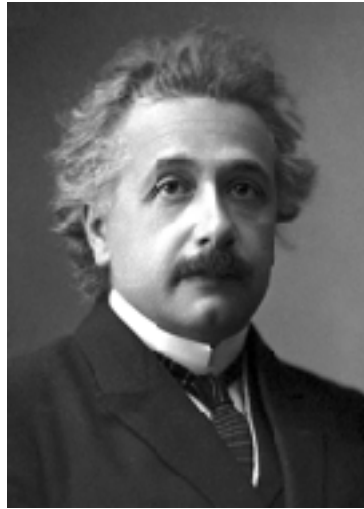
熱・統計力学

電磁気学

現代物理学

相対性理論

量子力学



[Einstein] Wikipedia より

現代物理学: 相対性理論

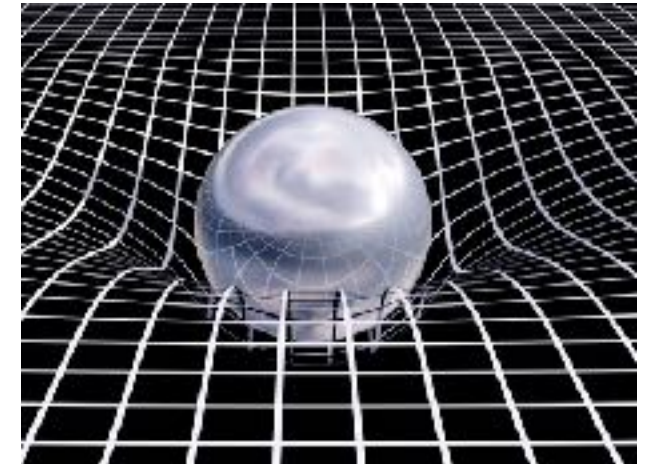
— 時間と空間の物理学 —

- 時間と空間は一体 (“混ざる”)

質量 m とエネルギー E は等価 $E = mc^2$ (光速)

エネルギー \Rightarrow 時空の歪み = 重力

- 時空のダイナミクス・宇宙論, GPS ...



<http://discovermagazine.com/2015/april/12-putting-relativity-to-the-test>



<http://www.rutasandando.es/como-funciona-sistema-posicionamiento-gps/>



<http://lon-don.xyz/topic/914/>

現代物理学: 量子力学

— ミクロな世界の物理学 —



[Heisenberg, Schroedinger]

Wikipedia より

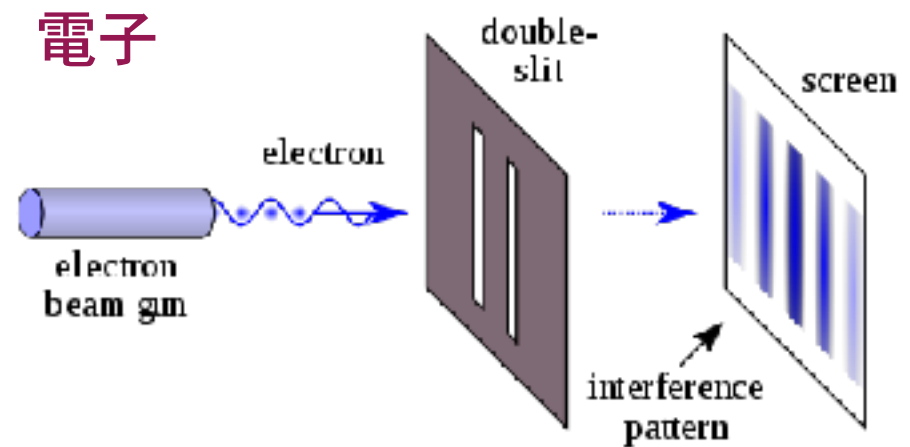
- 粒子と波動の二重性

状態は重ね合わせ可能

各状態は確率的に実現される

二重スリット

スクリーン

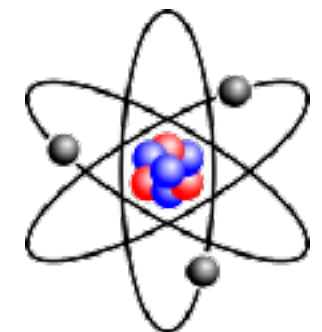


https://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment#/media/File:Double-slit.svg

- 半導体、原子、素粒子…



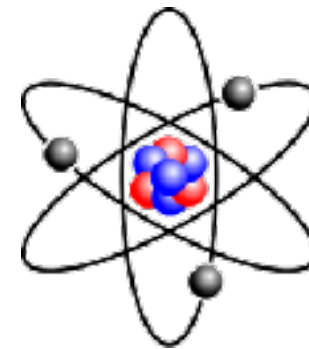
<http://bryantarchway.com/semiconductor-warfare/>



- 我々の直感と一見反するようなこともおこる
我々の直感はまだまだ“古典物理的”
- 素朴な疑問も実は現代物理学で初めて答えられる
 - なぜ原子はつぶれないか？
 - なぜ太陽は輝いているのか？
 - なぜ夜空は暗いのか？
 - …



<http://01.gatag.net/>



「はらべこあおむし」エリック・カール 偕成社

素粒子物理(高エネルギー、ミクロ)は
相対論・量子論に基づいて理解される

素粒子に働く力

—4つの力—

自然界の4つの力

- 自然界には4つ(だけ)の力がある
- 全ての(素粒子に関わる)現象はこれらによって引き起こされる

☆ 重力：



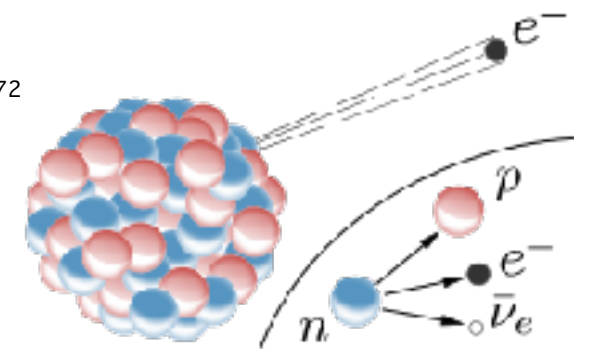
http://www.irasutoya.com/2015/10/blog-post_105.html

☆ 電磁気力：



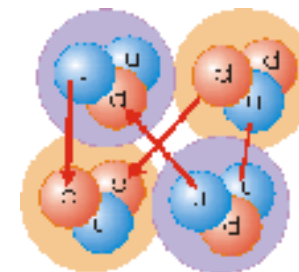
<https://www.flickr.com/photos/amse/2965017272>

☆ 弱い力：ベータ崩壊(中性子 → 陽子)など



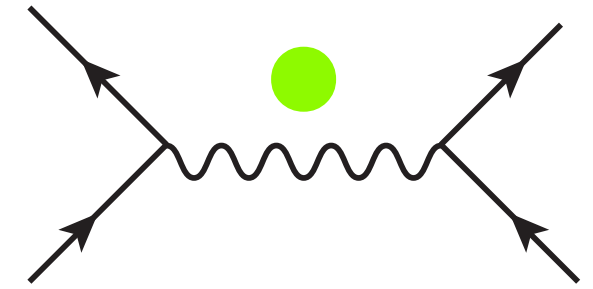
https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay

☆ 強い力：原子核内の核力など



<http://milesmathis.com>

自然界の4つの力



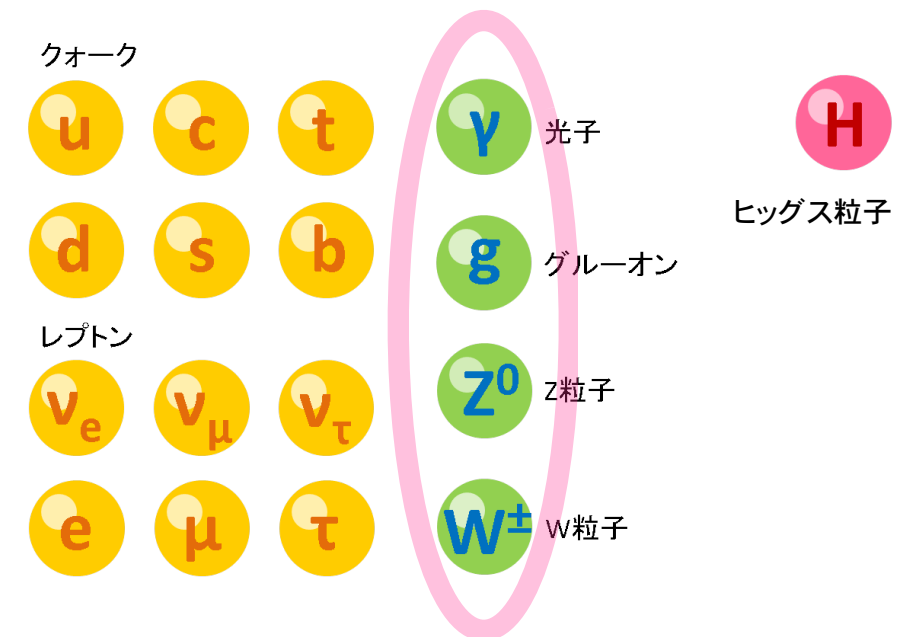
☆ 電磁気力： 光子が媒介
(電磁波)

☆ 弱い力： W, Z粒子が媒介

☆ 強い力： グルーオンが媒介

☆ 重力： 重力子(グラビトン; 未発見)が媒介

重力波直接観測 2015



重力波の直接観測 [2017年ノーベル賞]

- 2015年9月14日: 2つのブラックホールが合体する時に放出された重力波を観測

$$36M_{\odot} + 29M_{\odot} \rightarrow 62M_{\odot} + 3M_{\odot}$$

[太陽質量]

[重力波放出]



<http://www.argyllfreepress.com/wp-content/uploads/2015/04/Black-Hole-Mergers.jpg>

- 相対論では質量 M はエネルギー $E = Mc^2$ と等価
cf. 出力100万kWの(大きな)発電所が1時間に出すエネルギー
= 100万kW時 $\approx 4 \times 10^{-8}$ kg

- 重力波を通して新たな対象・現象を“見る”ことができる

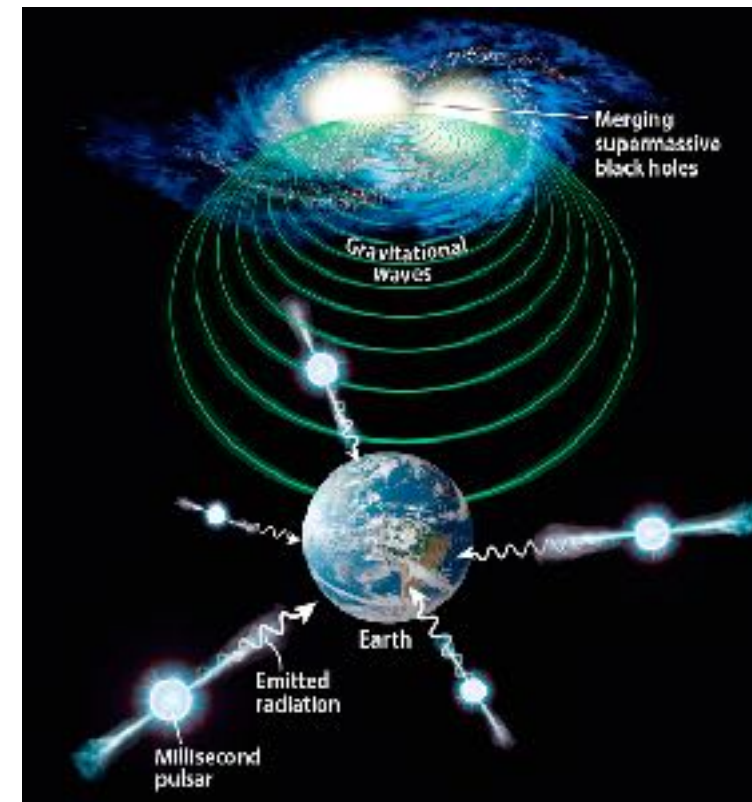
⇒ “重力波天文学”

元素の起源

ブラックホールの“形”

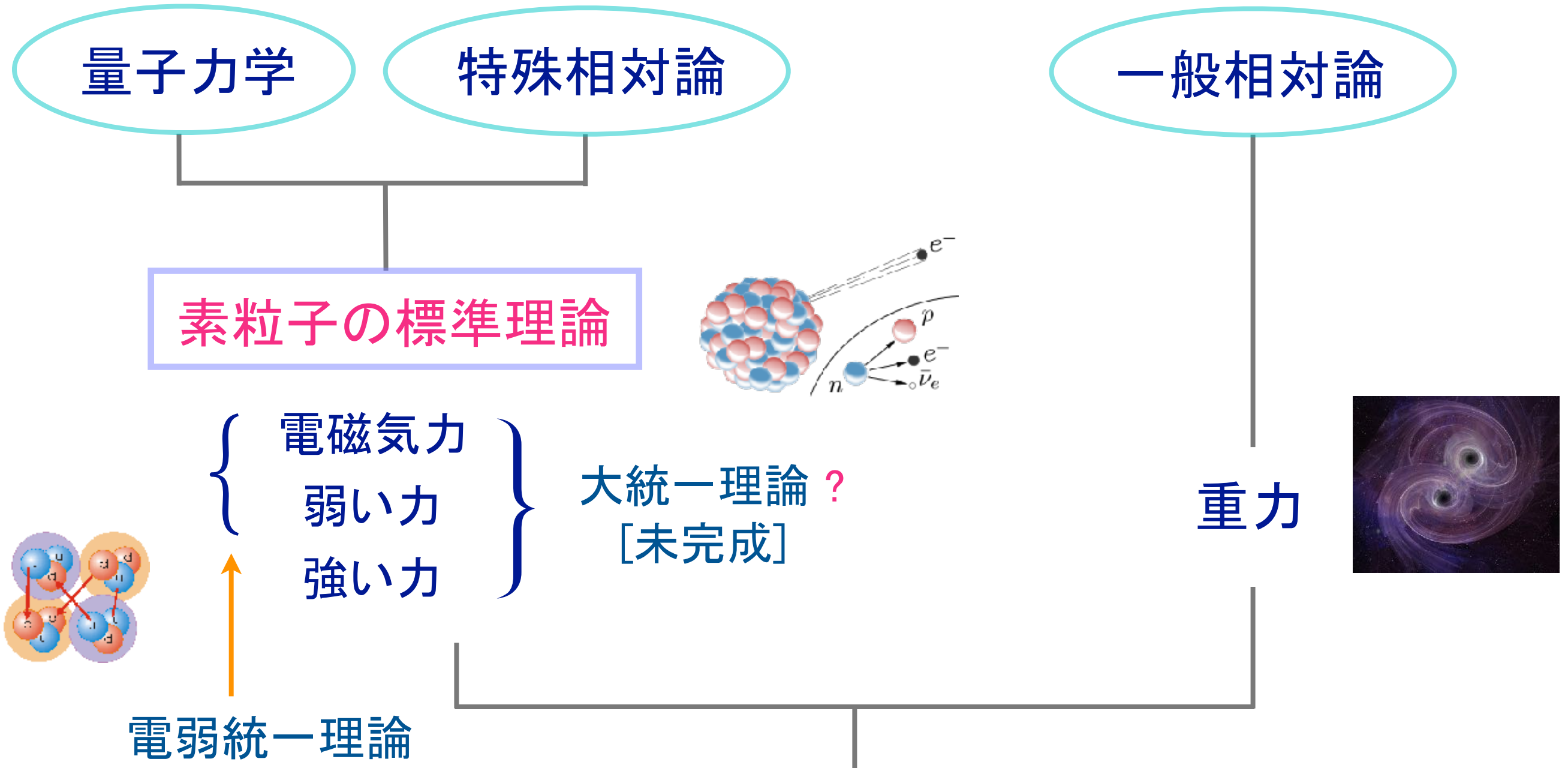
重力の量子効果？

⋮

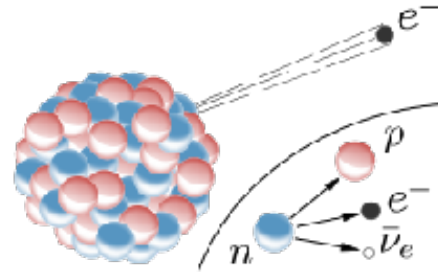


<http://astronomy.com/bonus/gravity>

自然界の4つの力



素粒子の標準理論



電磁気力
弱い力
強い力

大統一理論?
[未完成]

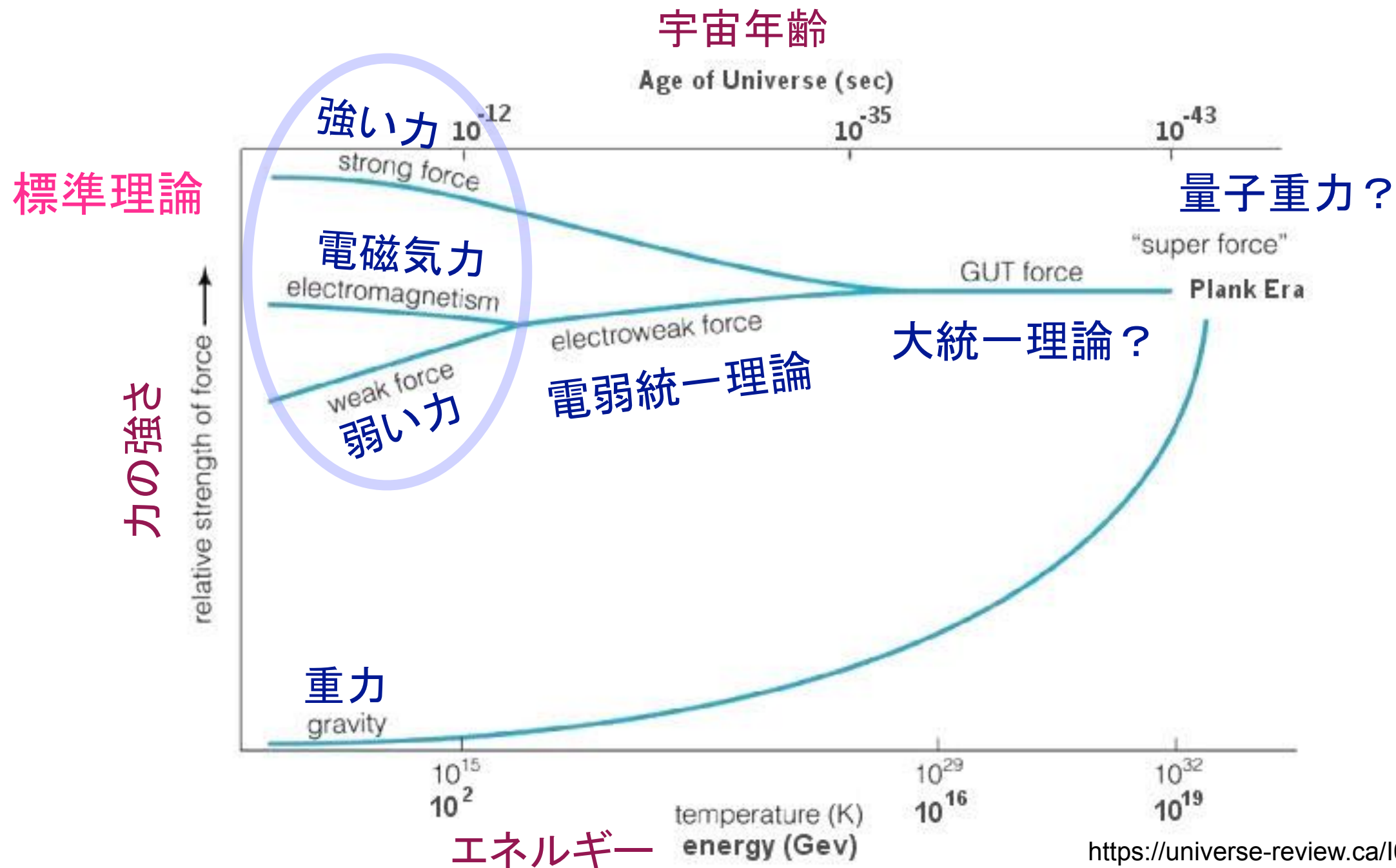
重力



電弱統一理論

(量子) 重力を含む素粒子の統一理論??

宇宙の歴史を遡る



⇒ (量子) 重力を含む素粒子の統一理論 ??

素粒子物理学の研究

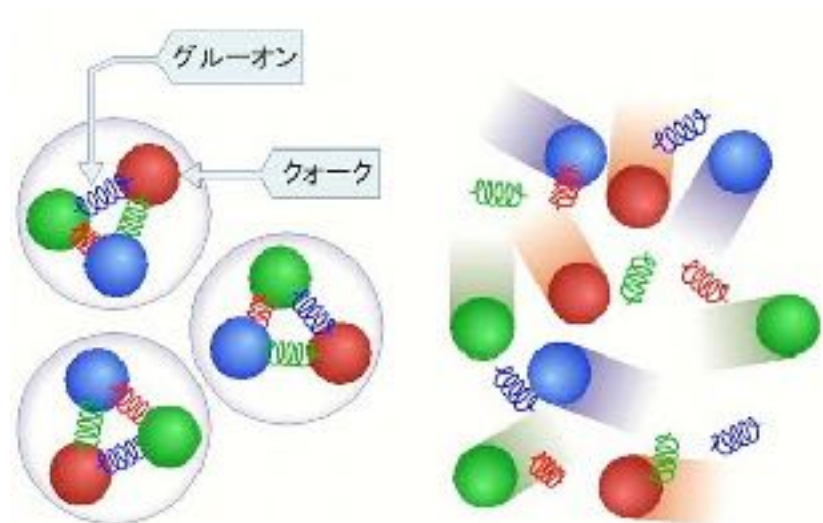
素粒子物理学の研究

- 自然界の最も基本的な成り立ちを探求

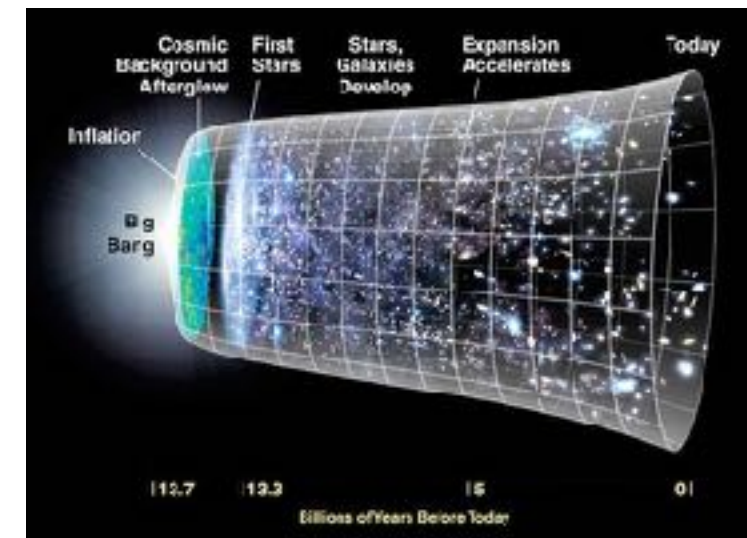
素粒子とは? 時空とは? “真空”とは? …

☆ 標準理論からどのような物理が実際に導かれるのか?

- 宇宙の始まりは非常に小さい ⇒ 宇宙の成り立ち
- ハドロン（クォークから成る粒子）の世界



<http://kakudan.rcnp.osaka-u.ac.jp/jp/overview/world/QGP.html>



素粒子物理学の研究

- 自然界の最も基本的な成り立ちを探求
素粒子とは? 時空とは? “真空”とは? ...

☆ 標準理論を超える新たな基本法則は?

- 暗黒物質・エネルギー
- 余剰次元 (世界は4次元?)
[Arkani-Hamed et al; Randall-Sundrum]
- 超対称性
(ボソン \leftrightarrow フェルミオンで世界は同等?)

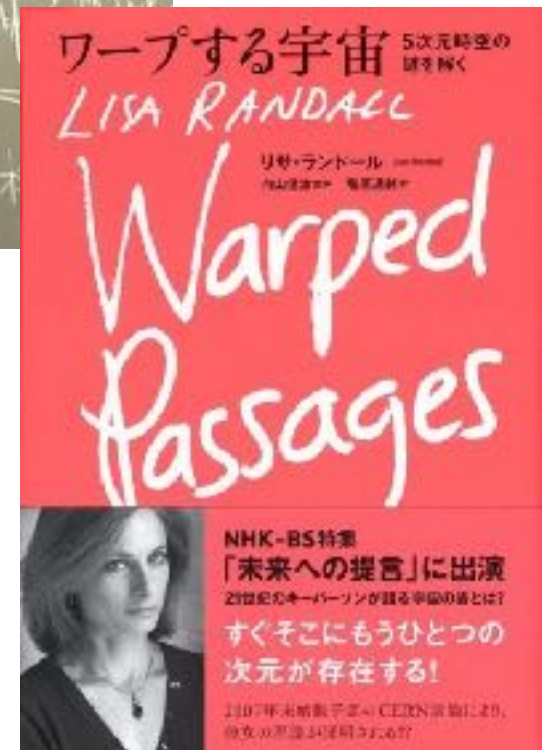
力を媒介する粒子 物質を作る粒子
ヒッグス粒子



<https://prod5.agileticketing.net/>



<https://www.thecrimson.com/>



「ワープする宇宙 5次元時空の謎を解く」NHK出版

素粒子物理学の研究

- 自然界の最も基本的な成り立ちを探求

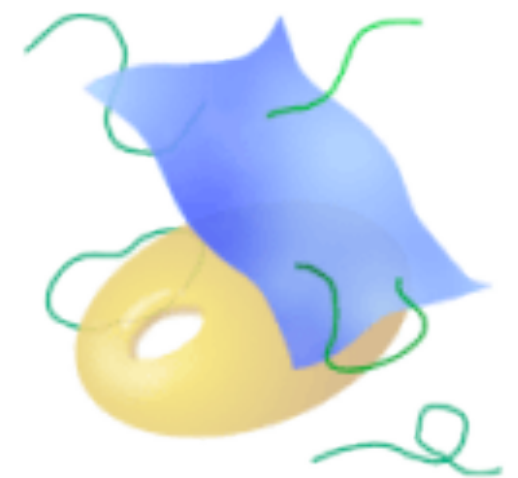
素粒子とは? 時空とは? “真空”とは? …

☆ 重力を含む統一的な理解は可能か?

- 非常に小さい時空では量子効果も重要 ⇒ 量子重力

- 素粒子の統一理論

[アインシュタイン以来の物理学の基本問題]



素粒子物理学の研究

- 自然界の最も基本的な成り立ちを探求

素粒子とは？ 時空とは？ “真空”とは？ …

☆ 標準理論からどのような物理が実際に導かれるのか？

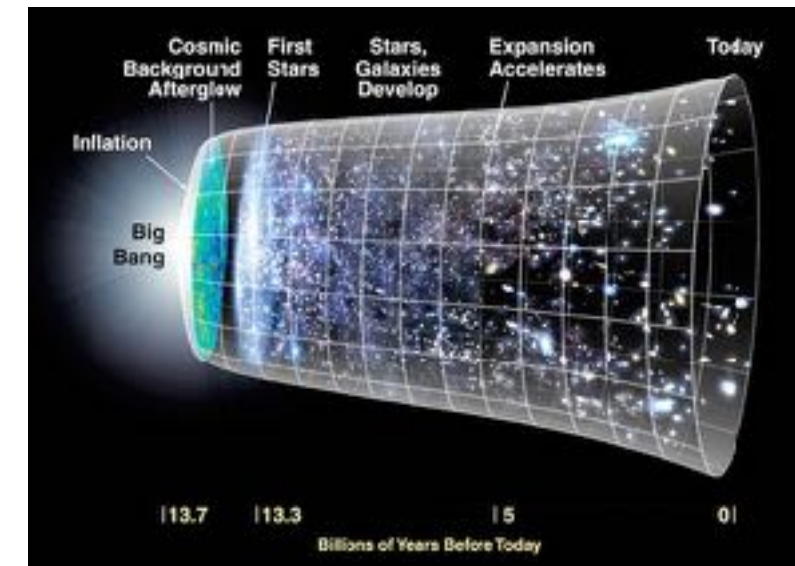
- 宇宙の成り立ち
- ハドロン（クォークから成る粒子）の世界

☆ 標準理論を超える新たな基本法則は？

- 暗黒物質・エネルギー
- 余剰次元（世界は4次元？）

☆ 重力を含む統一的理解は可能か？

⋮

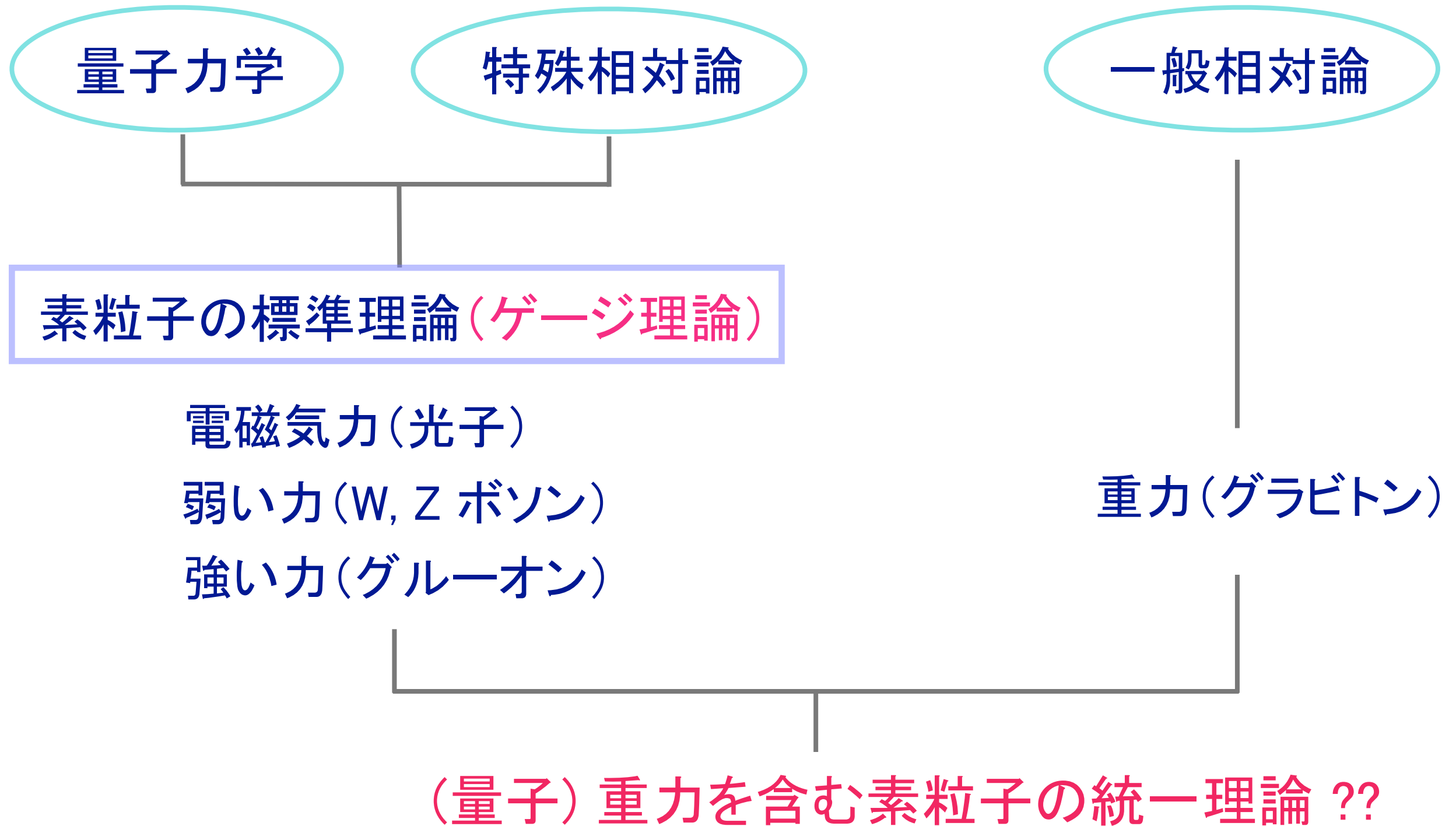


Wikipedia より

弦理論

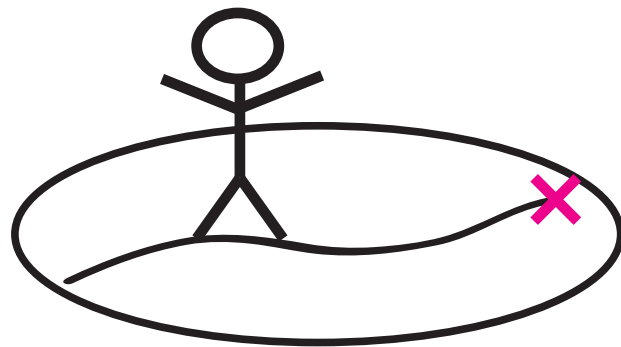
— 量子重力を含む素粒子の統一理論に向けて —

自然界の4つの力



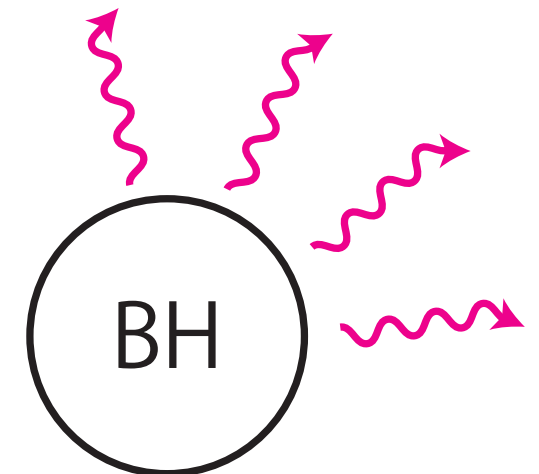
量子重力理論?

- 実験・観測からの要請?
- 特異点の問題 (一般相対性論)
 - まっとうな条件の下で、時空は“特異点”を持つ



“世界の終わり”?
ブラックホール; ビッグバン

- 半古典論 [時空は古典論、物質は量子論]
 - ⇒ ブラックホールの蒸発 (ホーキング放射)
 - ⇒ 量子力学の破綻??



(超)弦理論

— 重力の量子論を含む素粒子の統一理論 —

- 重力を量子化 (グラビトン)
⇒ 物理量が ∞ cf. ゲージ理論: “繰り込み”
[朝永, ...]
- ∞ の原因は“点”粒子
- 粒子から弦 (ひも) へ ⇒ **弦理論** [南部, ...]

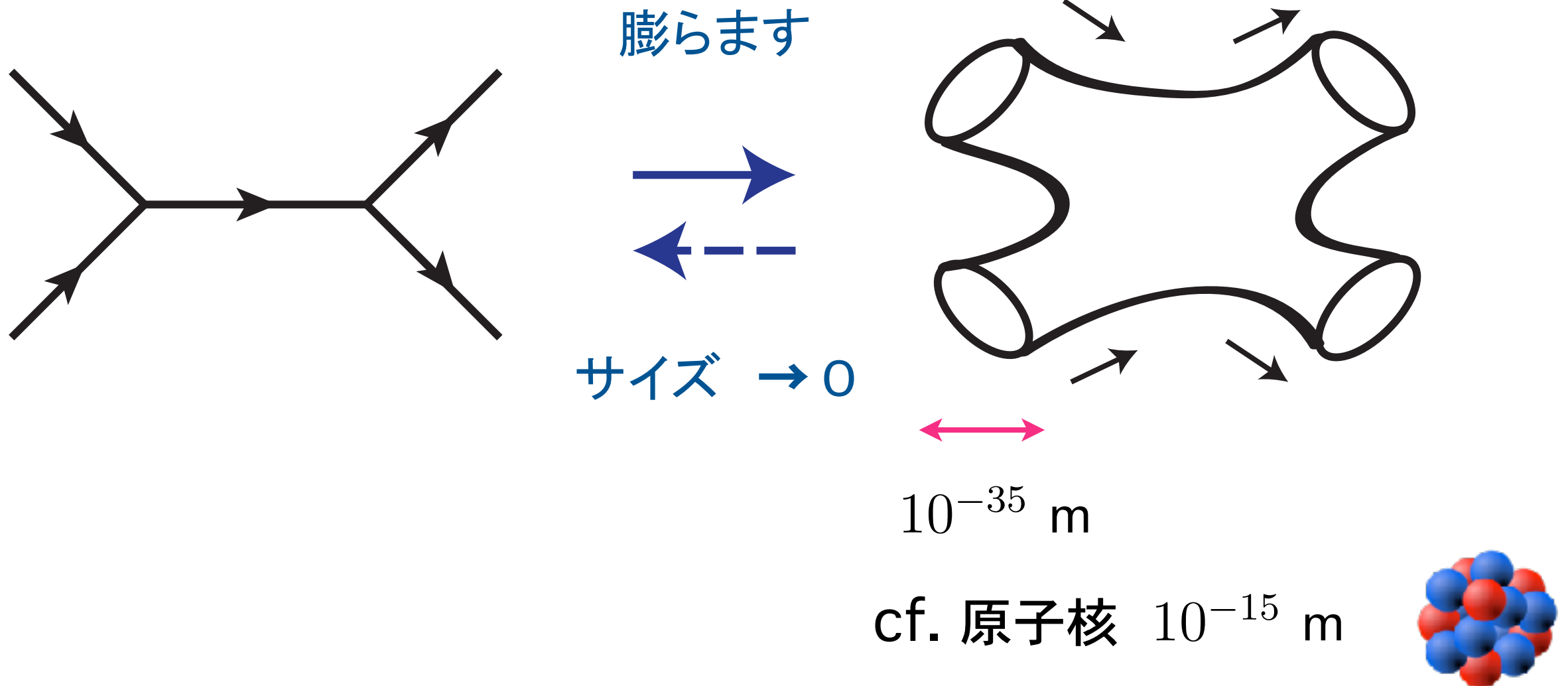


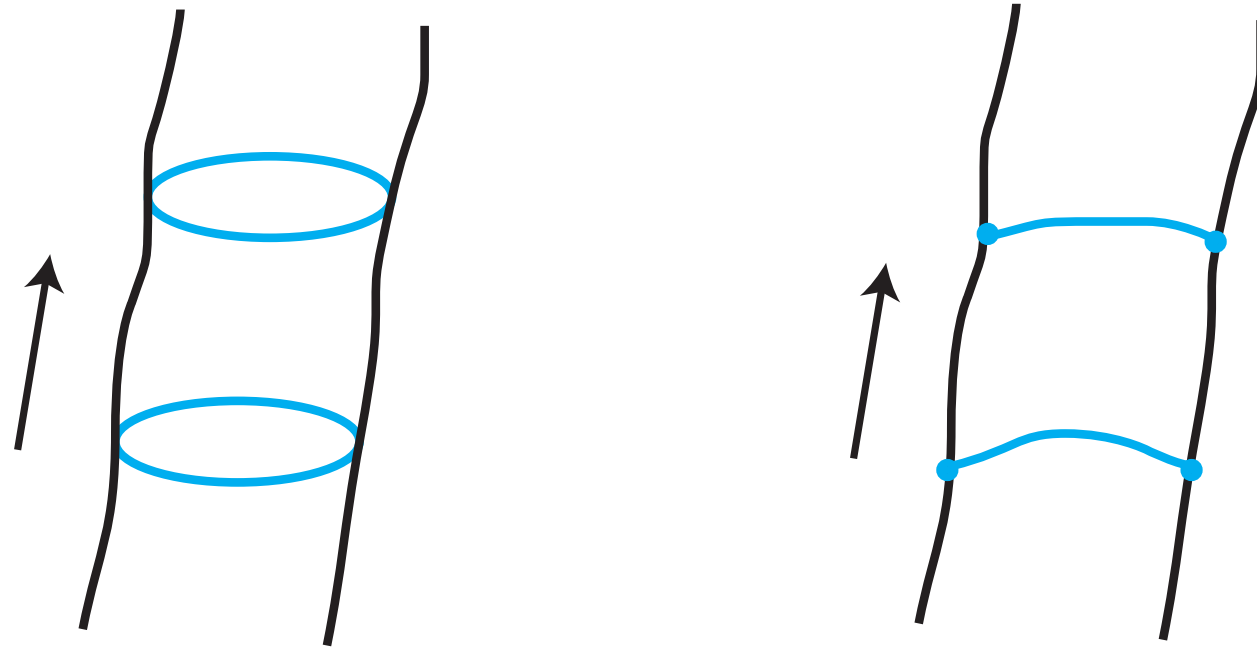
Wikipedia より



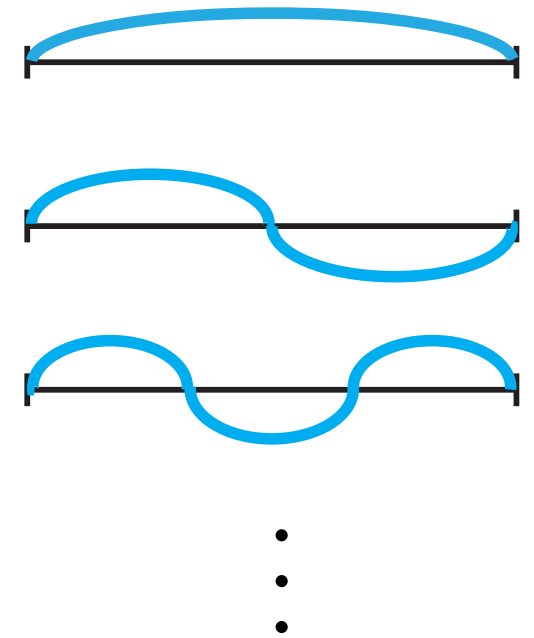
弦理論

- 弦の大きさが十分小さいと
遠距離からは点粒子と区別できない





Wikipedia より



- 閉弦 : グラビトン (重力), ... [米谷, ...]
- 開弦 : ゲージ粒子, ...

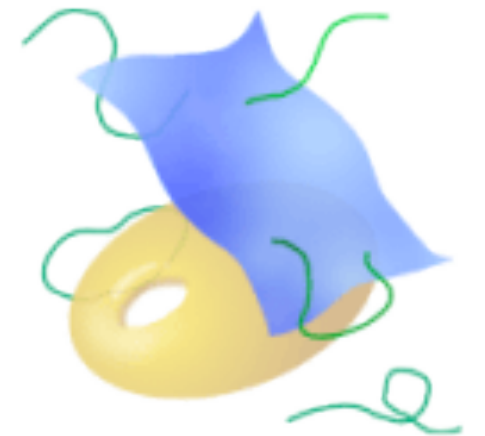
- 無限個の振動モード \approx 無限個の種類の子
 ⇒ 重力を含む統一理論

- 現実的なモデルには超対称性 (ボソン \leftrightarrow フェルミオン)が必要
 ⇒ 超弦理論

(超)弦理論

— 重力の量子論を含む素粒子の統一理論 —

- 弦理論は量子重力を含む
素粒子の統一理論の有望な候補
- 宇宙の始まり、“素粒子”の成り立ちを明らかにすると期待
- 世界の主要研究機関で活発な研究が続いている

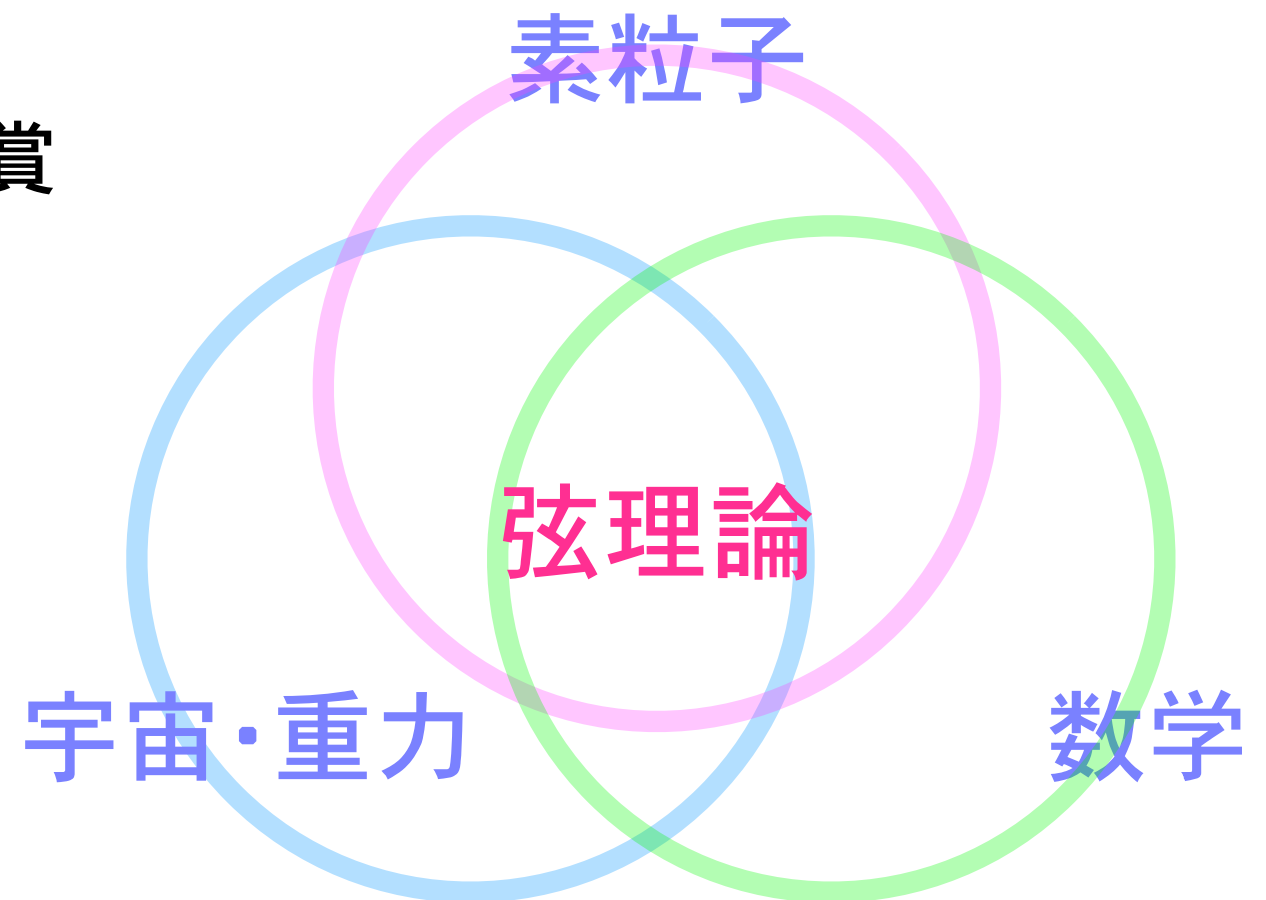


弦理論の周辺

- 関連する分野に新鮮なアイデアを提供
[余剰次元を持つ素粒子模型、ブレーン宇宙論、…]
- 数学とも密接に関連
cf. E. Witten: 1990 フィールズ賞



<https://www.aps.org/>



まとめ

まとめ

- 素粒子：
現在知られている自然界の最も基本的な構成要素
- 素粒子物理学：
自然界の最も基本的な成り立ちを探求
時空全体、宇宙の成り立ちを知る上でも大切

cf. 古代の人々の素朴な疑問

