

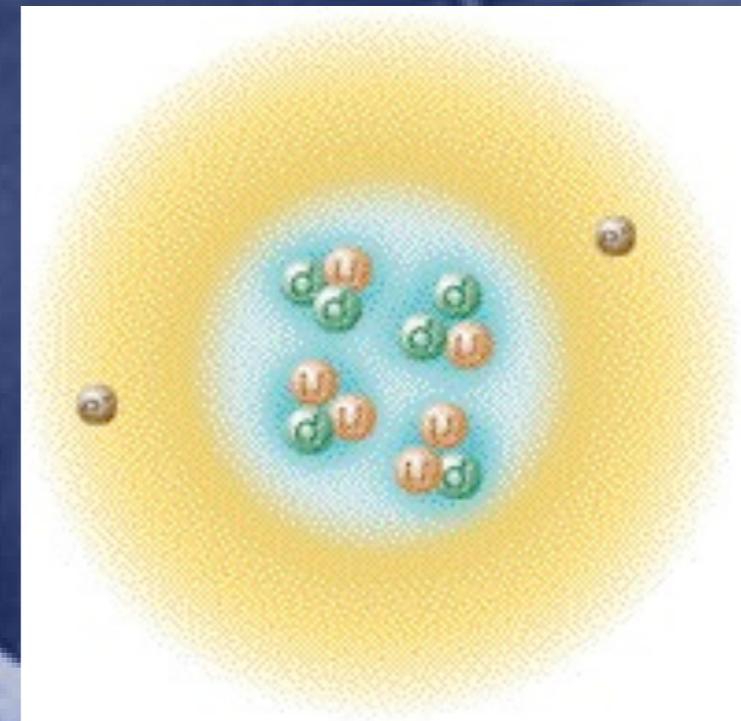


テラスケールの地平を切り拓く
LHC
- 素粒子物理学の最先端 -

花垣和則 / 大阪大学大学院理学研究科

素粒子物理学とは

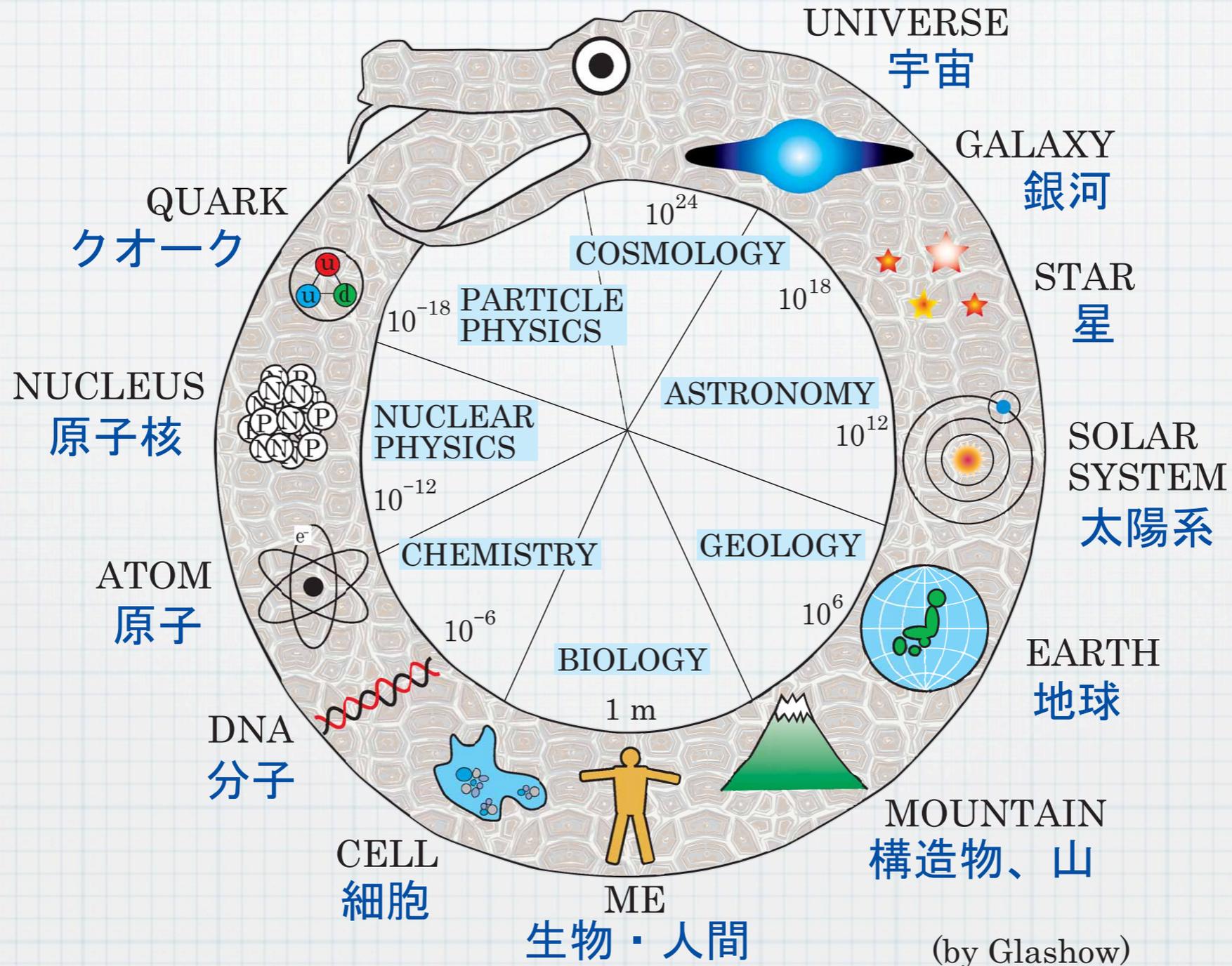
- 有史以来の問いかけ
 - ❖ 宇宙の成り立ち
 - ❖ 我々は、どこから来てどこへ行くのか？
- 人類に共通な知への欲求



昔は哲学 ➡ 自然科学として理解したい

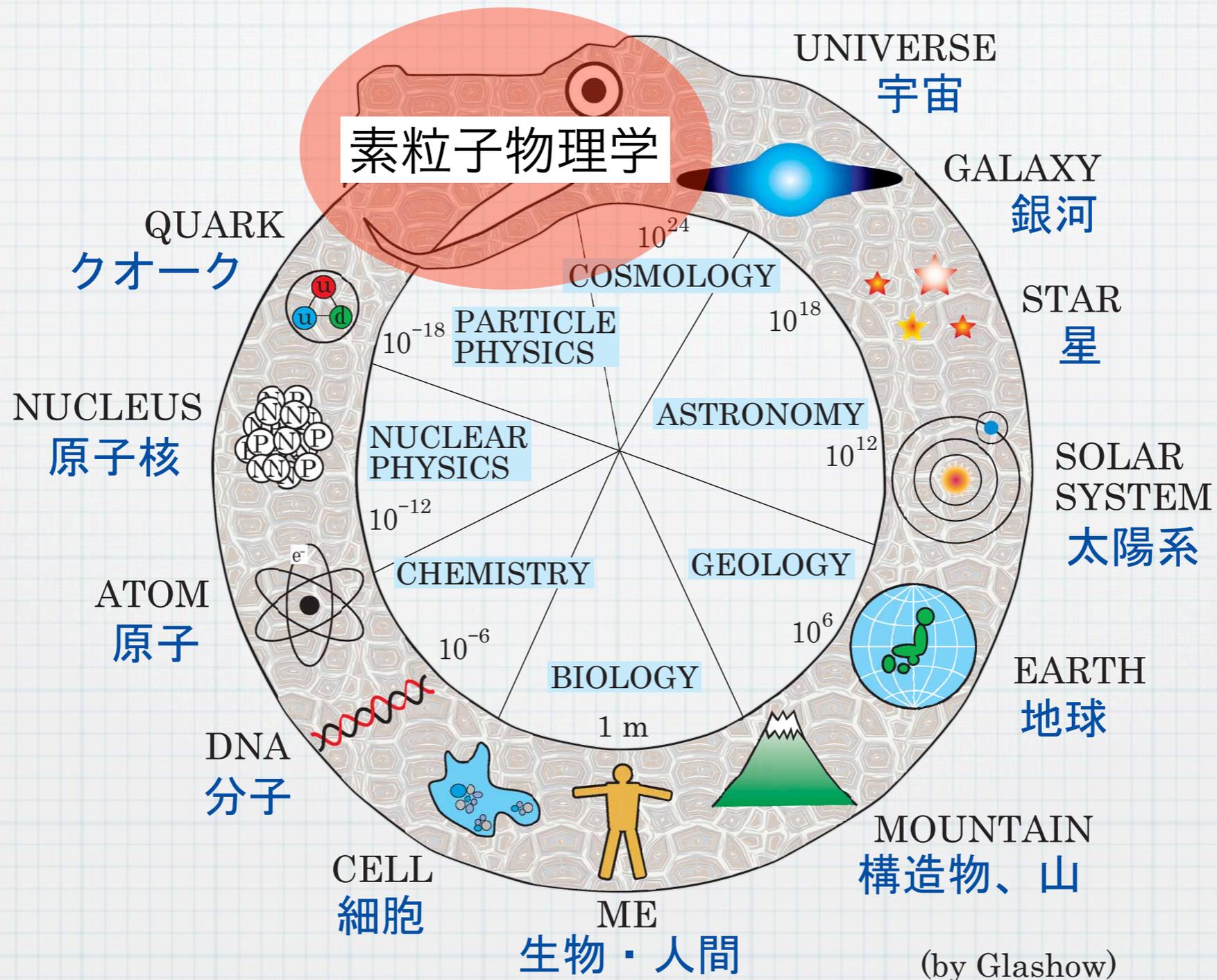
素粒子物理学とは

自然の階層性（ウロボロスの蛇）



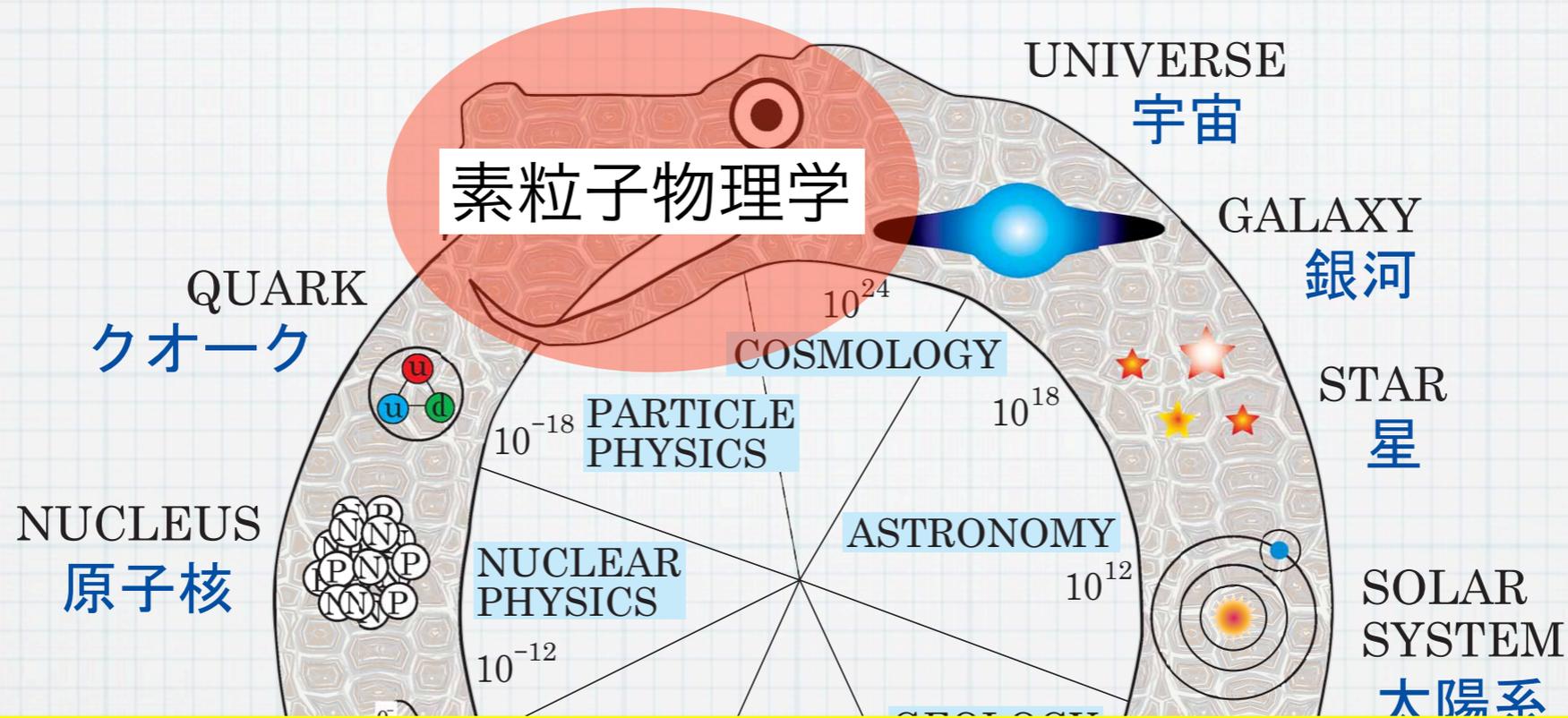
素粒子物理学とは

自然の階層性（ウロボロスの蛇）



素粒子物理学とは

自然の階層性（ウロボロスの蛇）



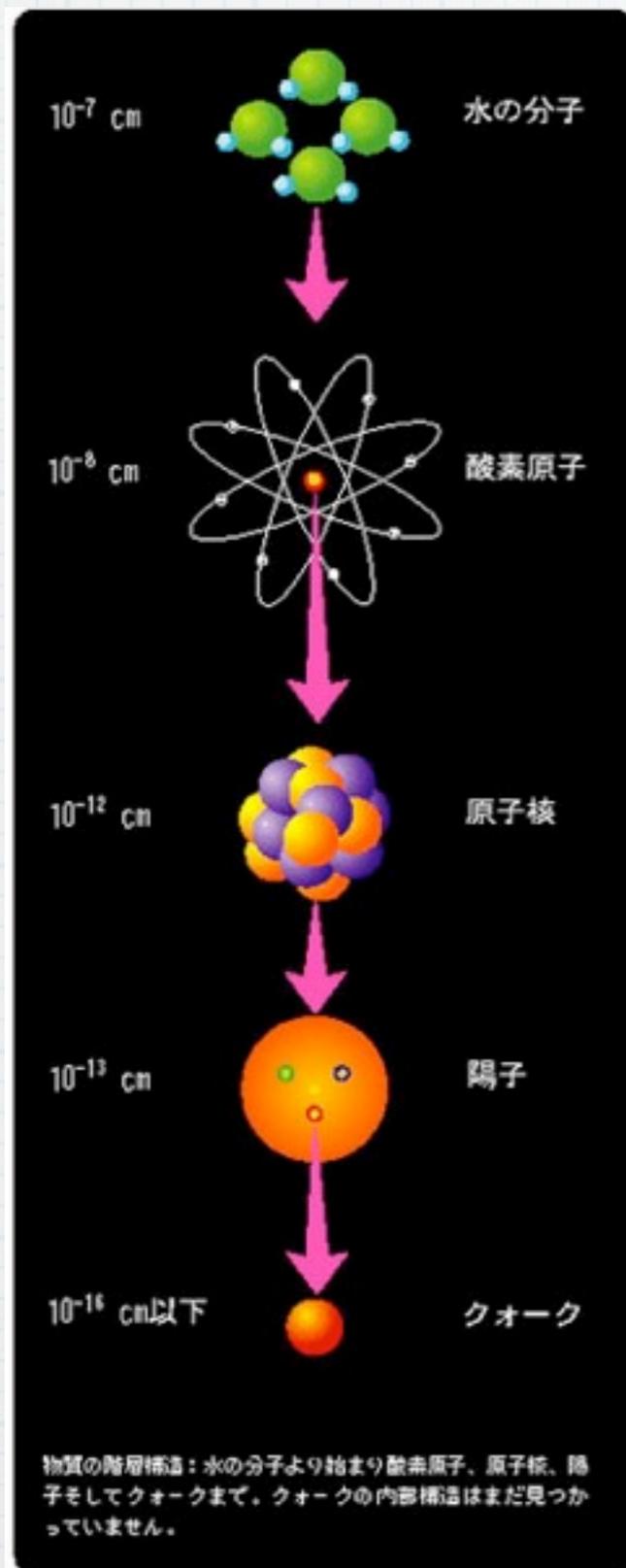
物質の究極の姿・性質を研究し、
宇宙の始まり、その誕生の秘密に迫る

目次

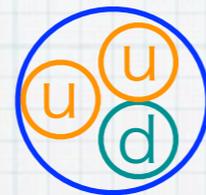
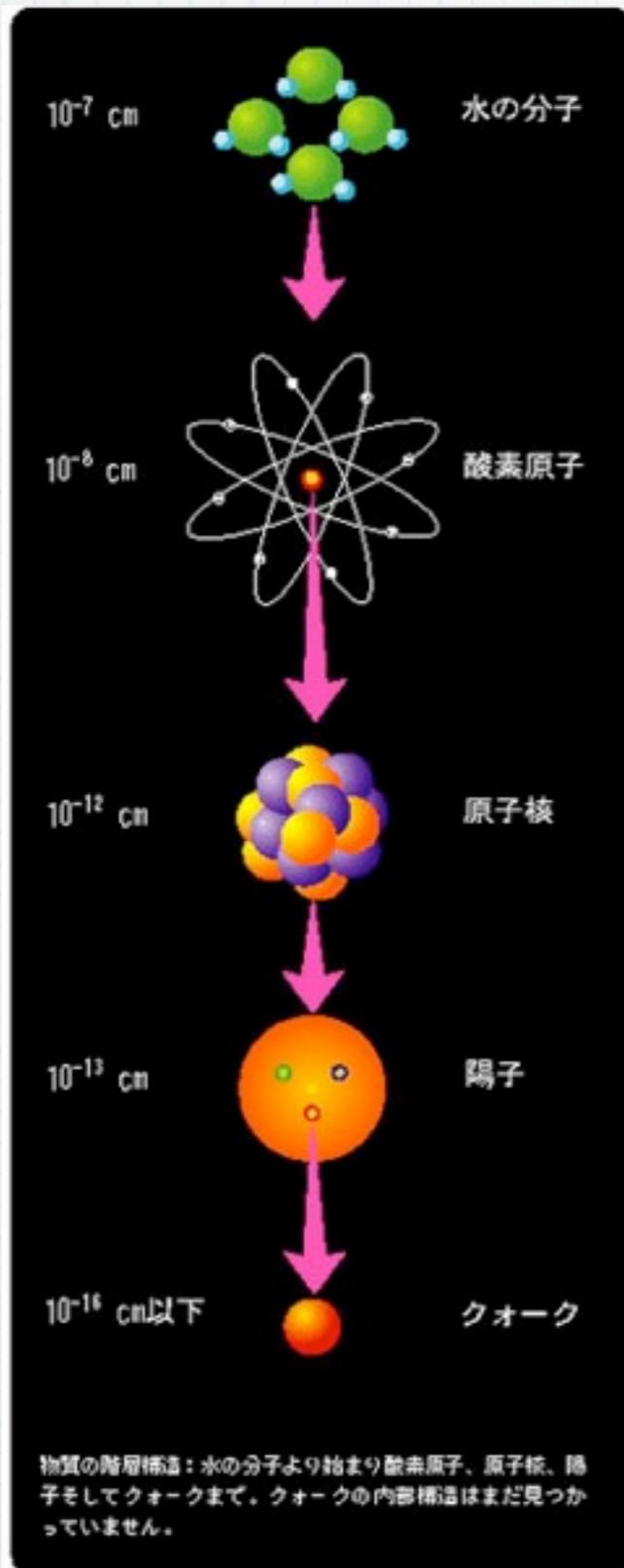
- ❖ 私たちの知っていること
- ❖ 私たちの知らないこと
 - ▶ 素粒子物理学の（LHCに関連する）最新テーマの紹介

知っていること

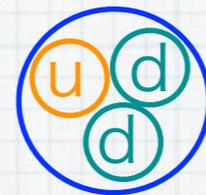
物質は何からできているのだろうか？



物質は何からできているのだろうか？



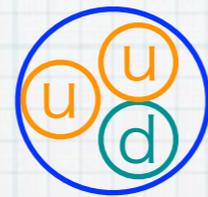
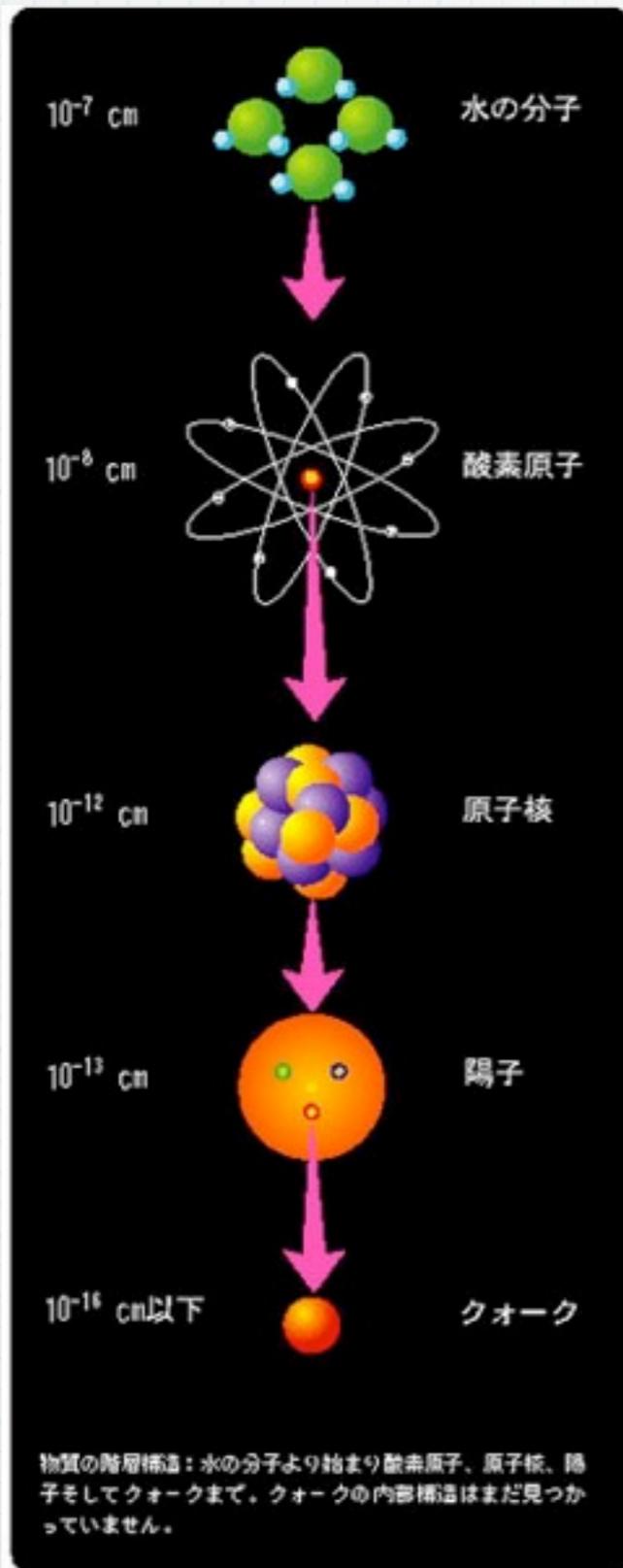
陽子
電荷 + 1



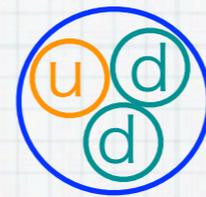
中性子
電荷 0

	電荷
uクォーク	+2/3
dクォーク	-1/3
電子	-1

物質は何からできているのだろうか？

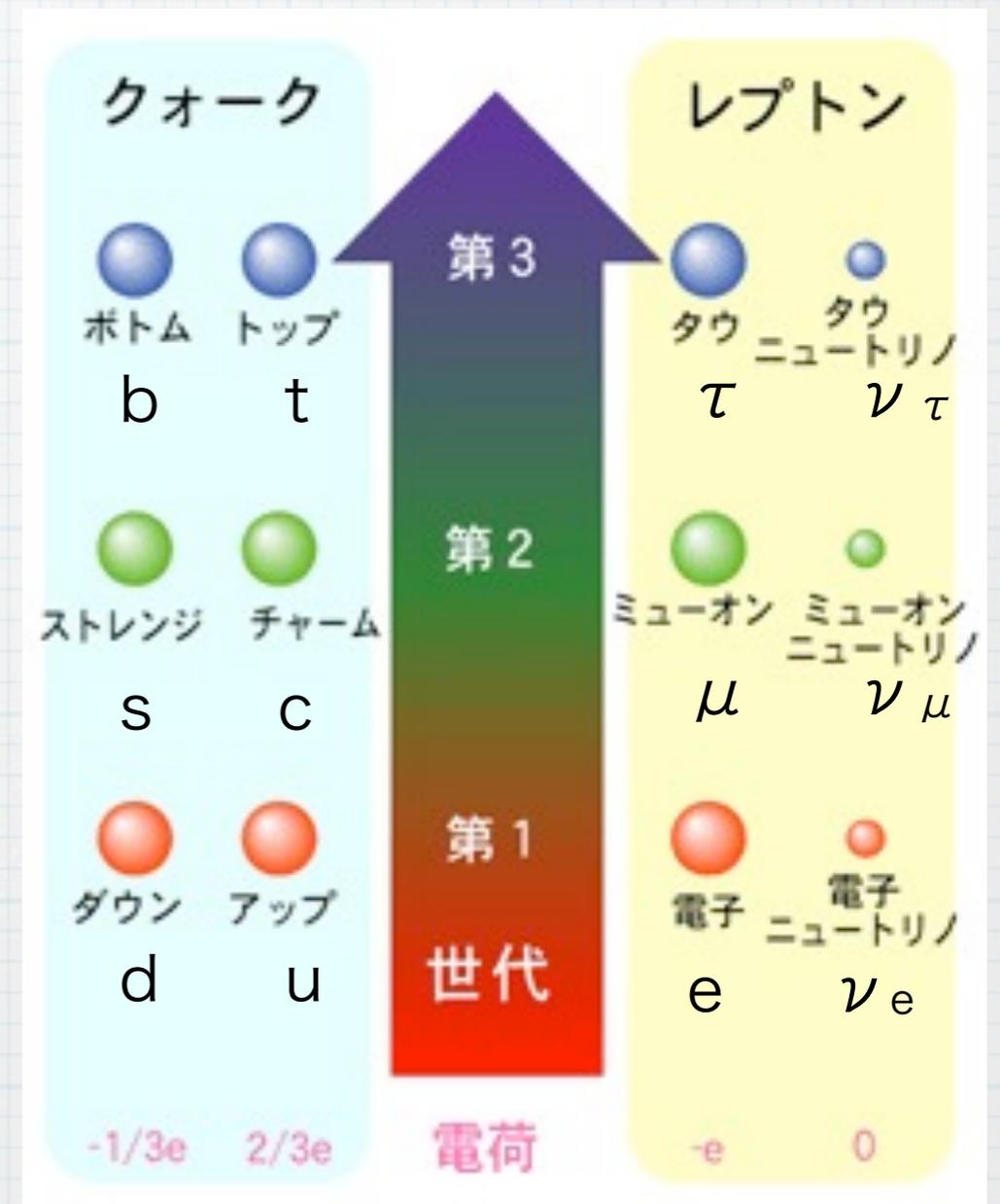


陽子
電荷 +1

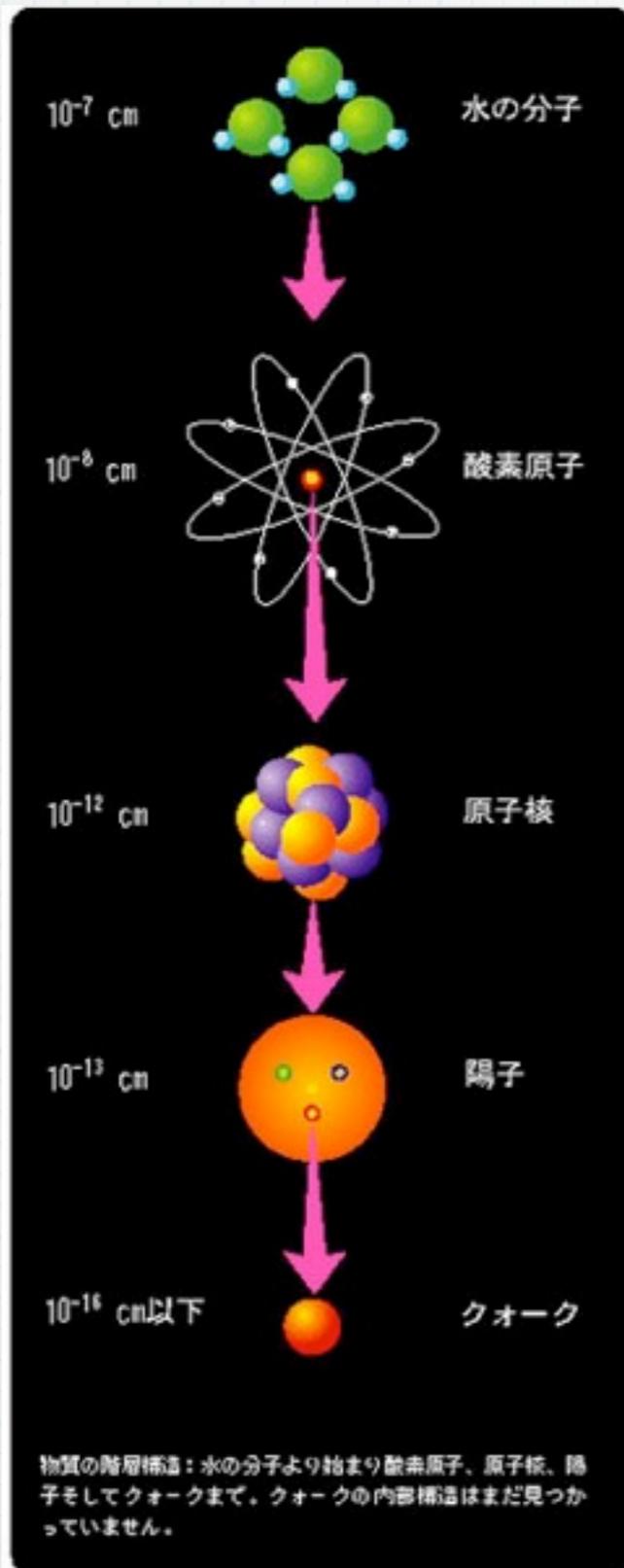


中性子
電荷 0

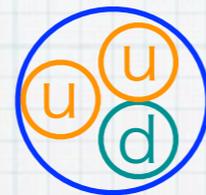
電荷
uクォーク +2/3
dクォーク -1/3
電子 -1



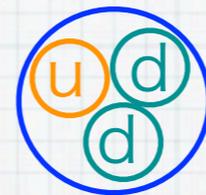
物質は何からできているのだろうか？



❖ クォークと電子の仲間（レプトン）から全ての物質ができています

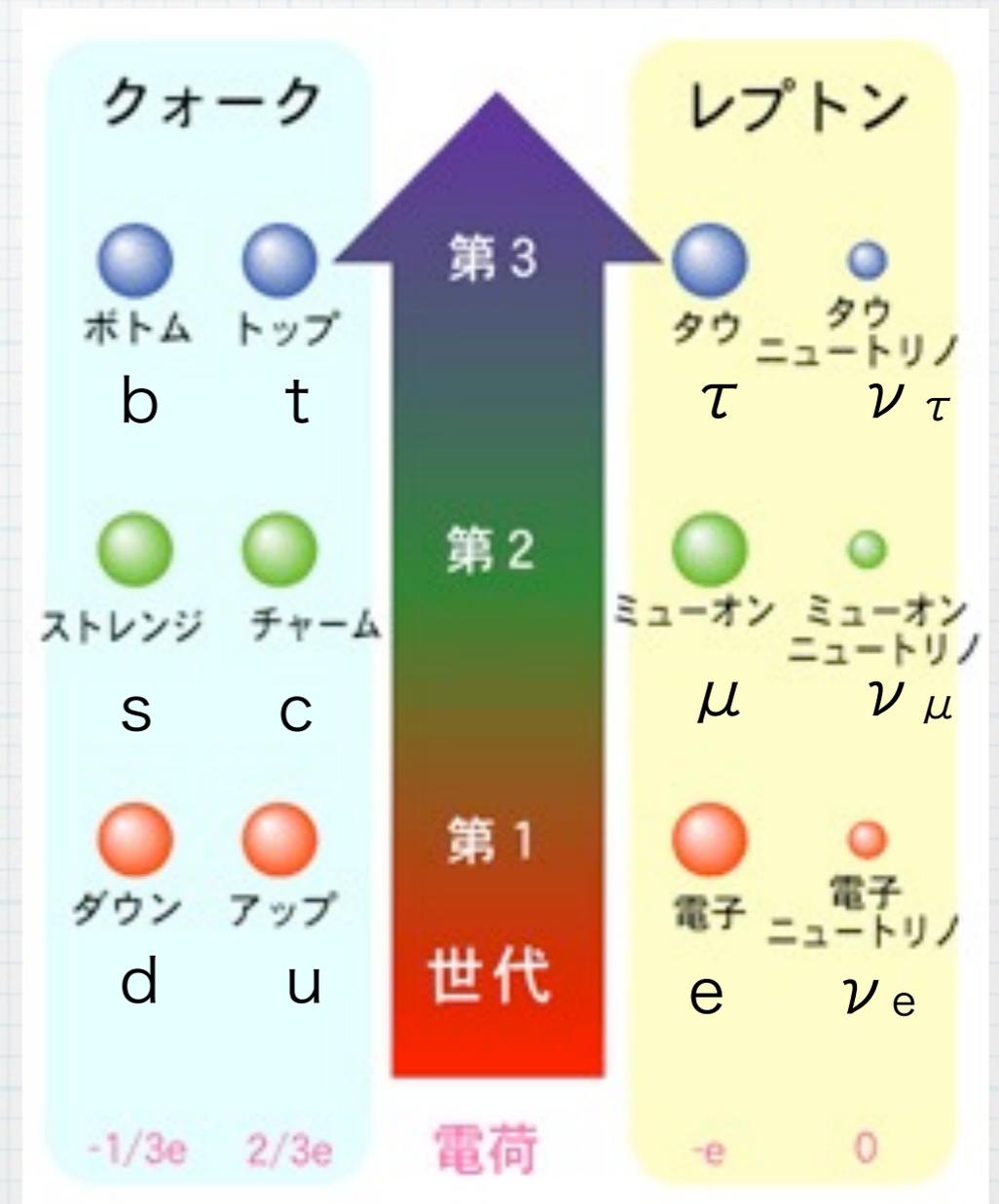


陽子
電荷 +1



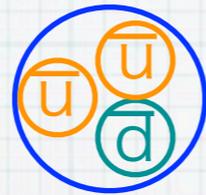
中性子
電荷 0

電荷
uクォーク +2/3
dクォーク -1/3
電子 -1

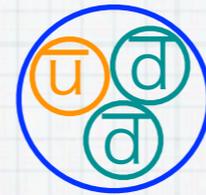


物質は何からできているのだろうか？

- ❖ 全ての粒子にはペアとなる反粒子がある
 - ▶ 反クォークや反レプトン
 - ◎ 重さは同じだが、電荷は反対



反陽子
電荷-1

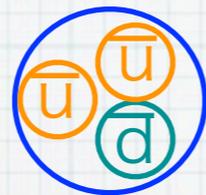


反中性子
電荷0

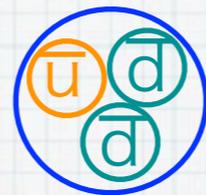
	電荷
\bar{u} クォーク	-2/3
\bar{d} クォーク	+1/3
陽電子	+1

物質は何からできているのだろうか？

- ❖ 全ての粒子にはペアとなる反粒子がある
 - ▶ 反クォークや反レプトン
 - ◎ 重さは同じだが、電荷は反対



反陽子
電荷-1



反中性子
電荷0

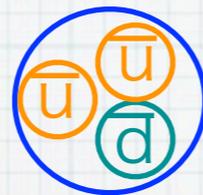
	電荷
\bar{u} クォーク	-2/3
\bar{d} クォーク	+1/3
陽電子	+1

クォーク			レプトン	
-1/3	2/3	電荷	-1	0
b	t		τ	ν_τ
s	c		μ	ν_μ
d	u		e	ν_e

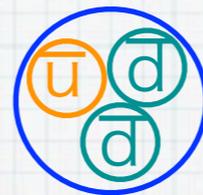
物質は何からできているのだろうか？

- ❖ 全ての粒子にはペアとなる反粒子がある
 - ▶ 反クォークや反レプトン
 - ◎ 重さは同じだが、電荷は反対

反クォーク		反レプトン		
$1/3$	$-2/3$	電荷	$+1$	0
\bar{b}	\bar{t}		$\bar{\tau}$	$\bar{\nu}_{\tau}$
\bar{s}	\bar{c}		$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}_{\mu}$
\bar{d}	\bar{u}		\bar{e}	$\bar{\nu}_e$



反陽子
電荷 -1



反中性子
電荷 0

電荷
 \bar{u} クォーク $-2/3$
 \bar{d} クォーク $+1/3$
 陽電子 $+1$

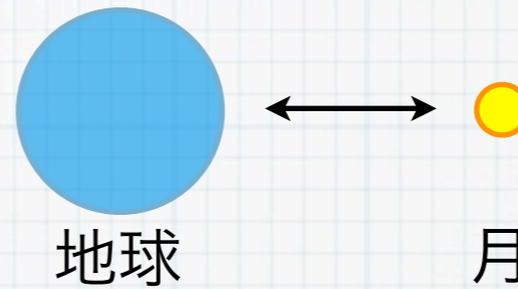
クォーク		レプトン		
$-1/3$	$2/3$	電荷	-1	0
b	t		τ	ν_{τ}
s	c		μ	ν_{μ}
d	u		e	ν_e

物質は何からできているのだろうか？

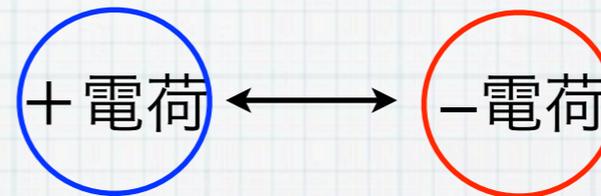
- ❖ 素粒子=それ以上切り刻むことができない物質を構成する最小単位（「点状粒子」と呼びます）
 - ▶ レプトン（電子の仲間、ニュートリノの仲間）
 - ▶ クォーク（u, d, c, s, t, b）
- ❖ ですが…
 - ▶ 人間が観測するのはクォークの複合物とレプトン
 - ◎ 例えば…
 - ★ クォーク3つ：陽子[uud]、中性子[udd]
 - ★ 反クォーク3つ：反陽子[$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$]、反中性子[$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$]
 - ★ クォークと反クォーク： π^+ （パイ）[$u\bar{d}$]、 K^+ [$u\bar{s}$]
 - ◎ などなど、クォークを組み合わせることで色々な粒子

どういう力があるのだろうか？

❖ 重力



❖ 電磁気力



❖ 弱い相互作用

- ▶ 粒子を他の粒子に変えてしまう (=崩壊を引き起こす)



❖ 強い相互作用

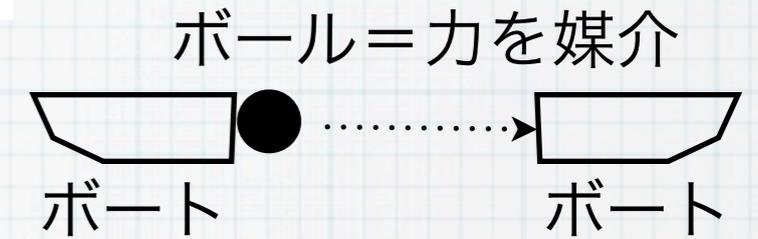
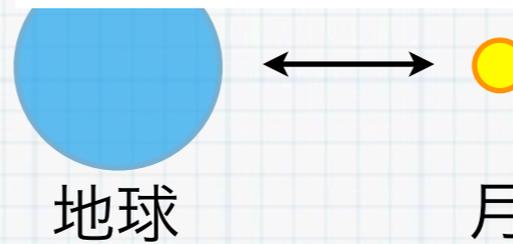
- ▶ クォーク同士に働く
- ▶ 核融合 (分裂) など



力を媒介する粒子

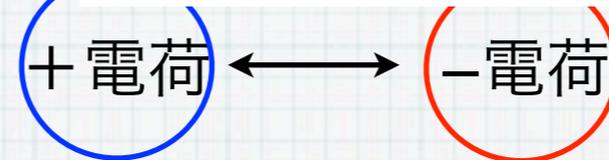
❖ 重力

グラビトン (未発見)



❖ 電磁気力

フォトン (光子)



❖ 弱い相互作用

W, Z



❖ 強い相互作用



宇宙に存在する（と思われる）粒子

❖ 物質を作っているクォークやレプトン

クォーク		電荷	レプトン	
-1/3	2/3		-1	0
b	t		τ	ν_τ
s	c		μ	ν_μ
d	u		e	ν_e

電磁気力

❖ 力を媒介する粒子

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.39	-1			
W⁺	80.39	+1			
W bosons					
Z⁰	91.188	0			
Z boson					

強い相互作用

弱い相互作用

❖ もう1種類あると考えられています（未発見）

弱い相互作用しかしないニュートリノ

- ❖ 強い相互作用をする陽子や中性子などは平均して水中を約 1 m進むと水分子と衝突

- ❖ では弱い相互作用しかしないニュートリノはどれくらい進むと物質と衝突するだろう？
 - A. 10m
 - B. 10km
 - C. 地球1個 (地球の直径~10,000km)
 - D. 地球1000個
 - E. 地球10万個
 - F. 地球1億個

地球も水みたいなもの
だと思ってください

弱い相互作用しかしないニュートリノ

- ❖ 強い相互作用をする陽子や中性子などは平均して水中を約 1 m進むと水分子と衝突
- ❖ では弱い相互作用しかしないニュートリノはどれくらい進むと物質と衝突するだろう？
 - A. 10m
 - B. 10km
 - C. 地球1個 (地球の直径~10,000km)
 - D. 地球1000個
 - E. 地球10万個
 - F. 地球1億個

地球も水みたいなもの
だと思ってください

知らないこと

実はわからないことだらけです…

- ❖ 素粒子に質量があるのはなぜか？
- ❖ 力は統一できるのか、もともと一つのカだったのか？
- ❖ 暗黒物質（ダークマター）、暗黒エネルギー（ダークエネルギー）の正体は？
- ❖ 私たちの住む世界は空間3次元＋時間1次元なのだろうか？
- ❖ などなど、他にもたくさん

質量の謎

- ❖ 全ての粒子の質量は本来ゼロ
 - ▶ 宇宙誕生（ビッグバン）直後は粒子の質量はゼロだった
 - ▶ なぜ、粒子が質量を持ったのだろうか？

質量の謎

- ❖ 全ての粒子の質量は本来ゼロ
 - ▶ 宇宙誕生（ビッグバン）直後は粒子の質量はゼロだった
 - ▶ なぜ、粒子が質量を持ったのだろうか？

⇒ 宇宙はヒッグス粒子で満たされている

質量の謎

❖ 全ての粒子の質量は本来ゼロ

- ▶ 宇宙誕生（ビッグバン）直後は粒子の質量はゼロだった
- ▶ なぜ、粒子が質量を持ったのだろうか？

⇒ 宇宙はヒッグス粒子で満たされている（はず？）

質量の謎

- ❖ 全ての粒子の質量は本来ゼロ
 - ▶ 宇宙誕生（ビッグバン）直後は粒子の質量はゼロだった
 - ▶ なぜ、粒子が質量を持ったのだろうか？

⇒ 宇宙はヒッグス粒子で満たされている（はず？）



質量の謎

- ❖ 全ての粒子の質量は本来ゼロ
 - ▶ 宇宙誕生（ビッグバン）直後は粒子の質量はゼロだった
 - ▶ なぜ、粒子が質量を持ったのだろうか？

⇒ 宇宙はヒッグス粒子で満たされている（はず？）



質量は人気者かどうかのバロメータ

質量の謎

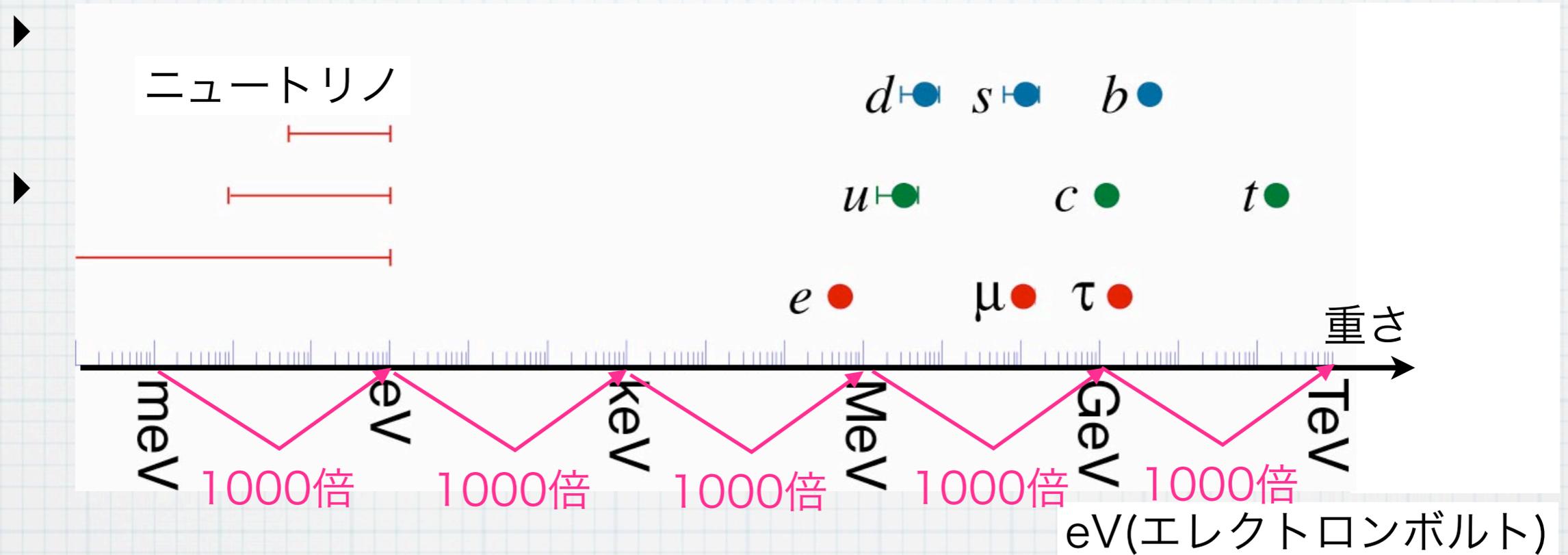
❖ 質量の違い？

- ▶ 虫 0.7g vs 人間 70kg vs 象 7t
= 1 : 100,000 : 10,000,000 (1千万)
- ▶ では、一番重い素粒子 (トップクォーク) の質量はニュートリノの質量の何倍以上でしょうか？

- ◎ A. 1,000倍
- ◎ B. 1,000,000倍 (100万)
- ◎ C. 1,000,000,000倍 (10億)
- ◎ D. 1,000,000,000,000倍 (1兆)
- ◎ E. 1,000,000,000,000,000倍 (1000兆)

質量の謎

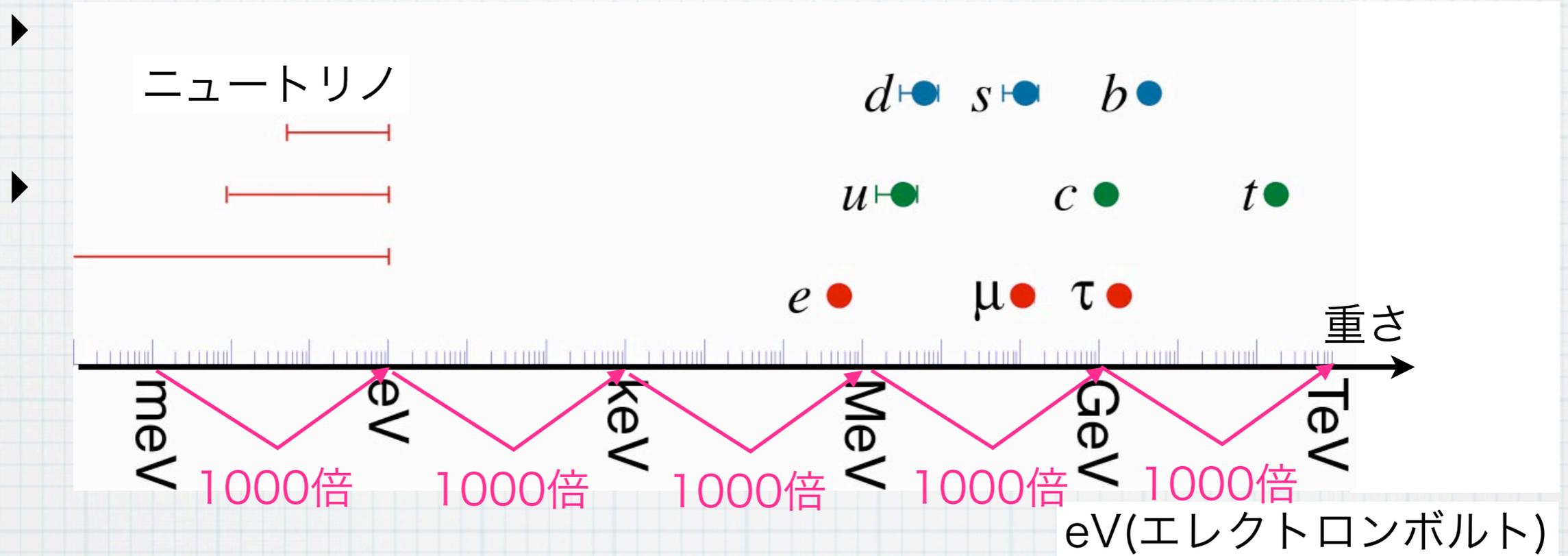
❖ 質量の違い？



- A. 1,000倍
- B. 1,000,000倍 (100万)
- C. 1,000,000,000倍 (10億)
- D. 1,000,000,000,000倍 (1兆)
- E. 1,000,000,000,000,000倍 (1000兆)

質量の謎

❖ 質量の違い？



● A 1,000倍

● ヒッグスを発見し素粒子が

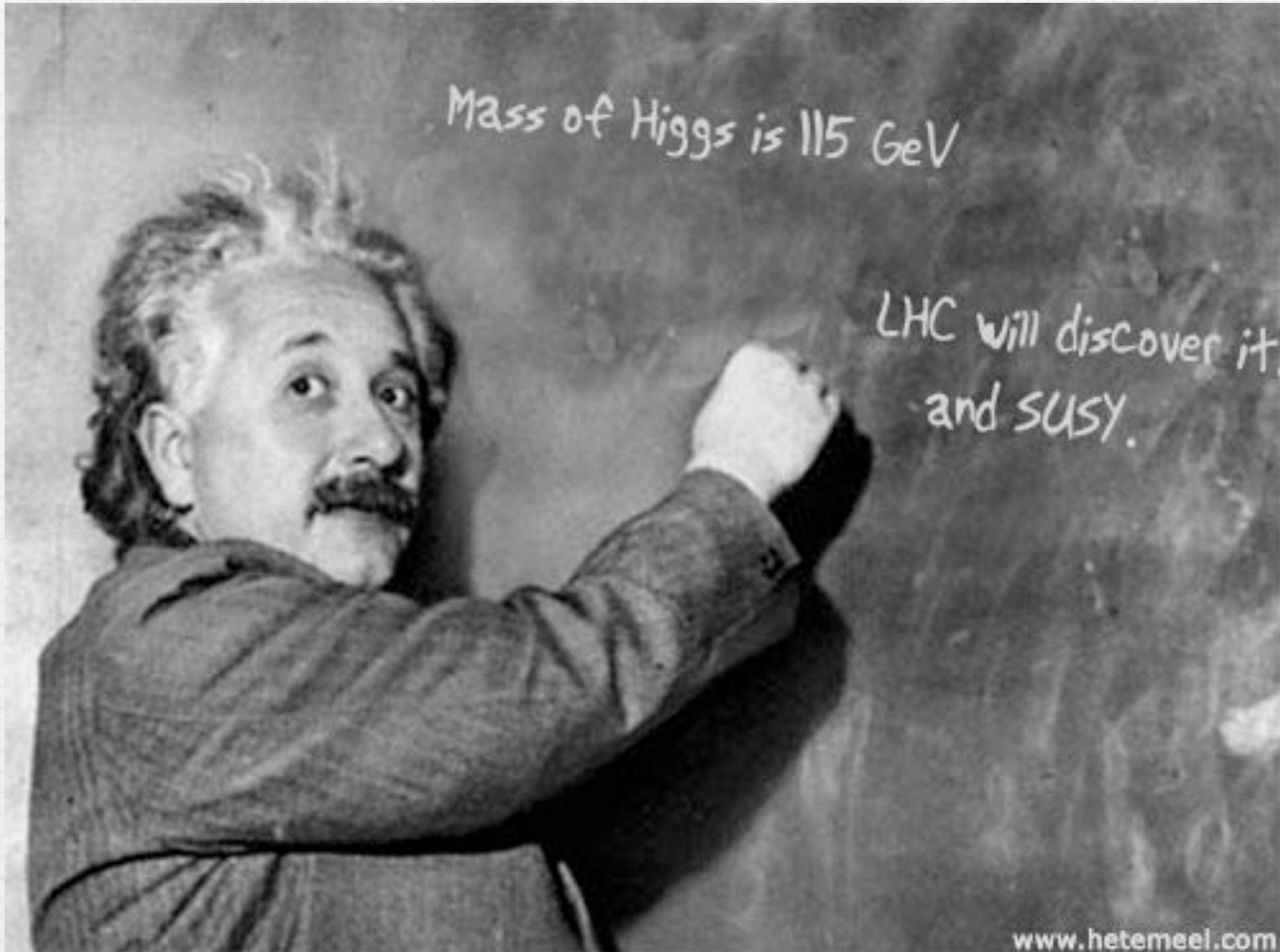
● 質量を持つ仕組みを解明し

● たい

● E: 1,000,000,000,000,000,000,000,000 (1000倍)

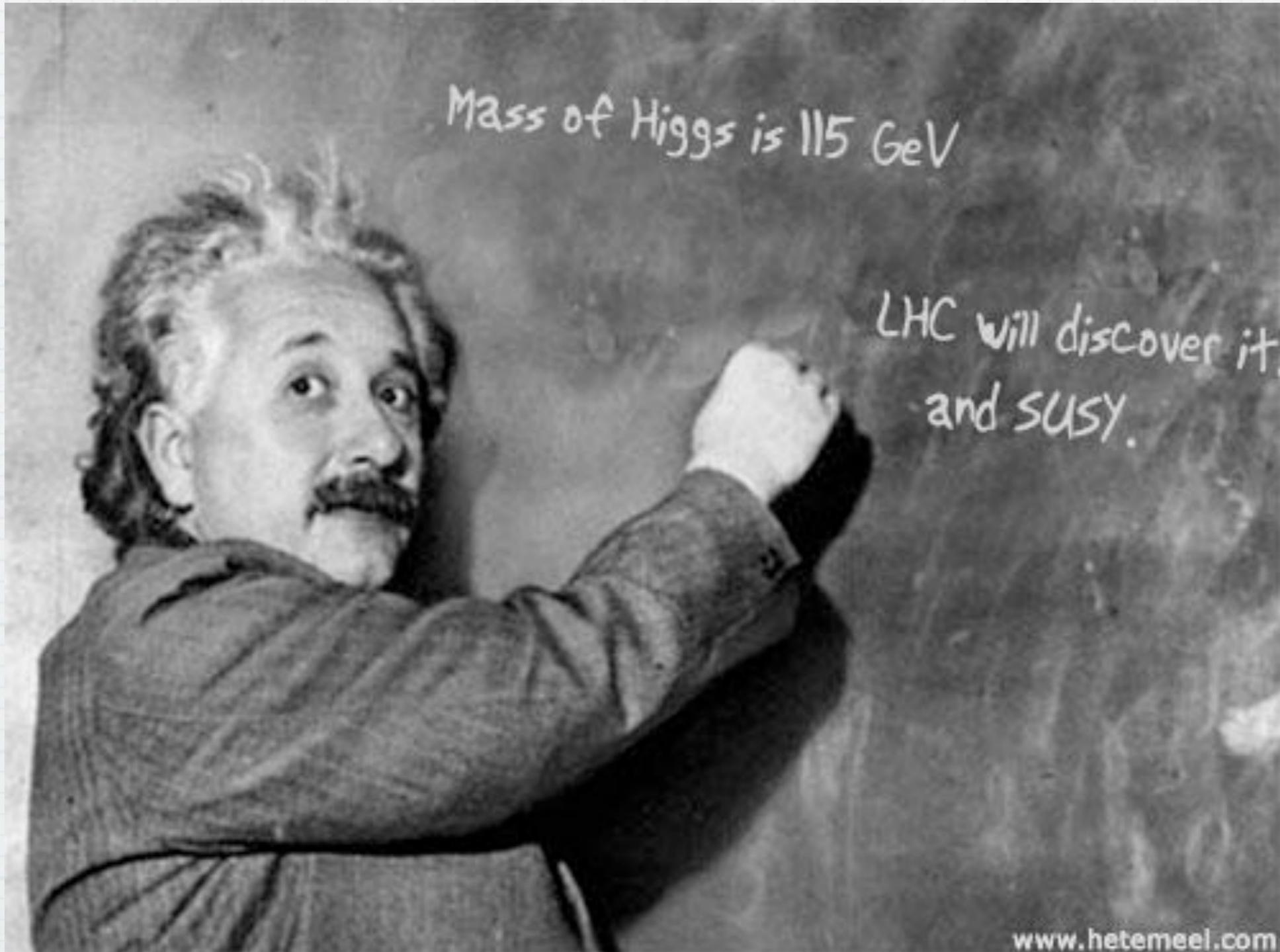
力の統一

❖ アインシュタインの夢



力の統一

- ❖ アインシュタインの夢 ⇒ 素粒子物理学者の夢



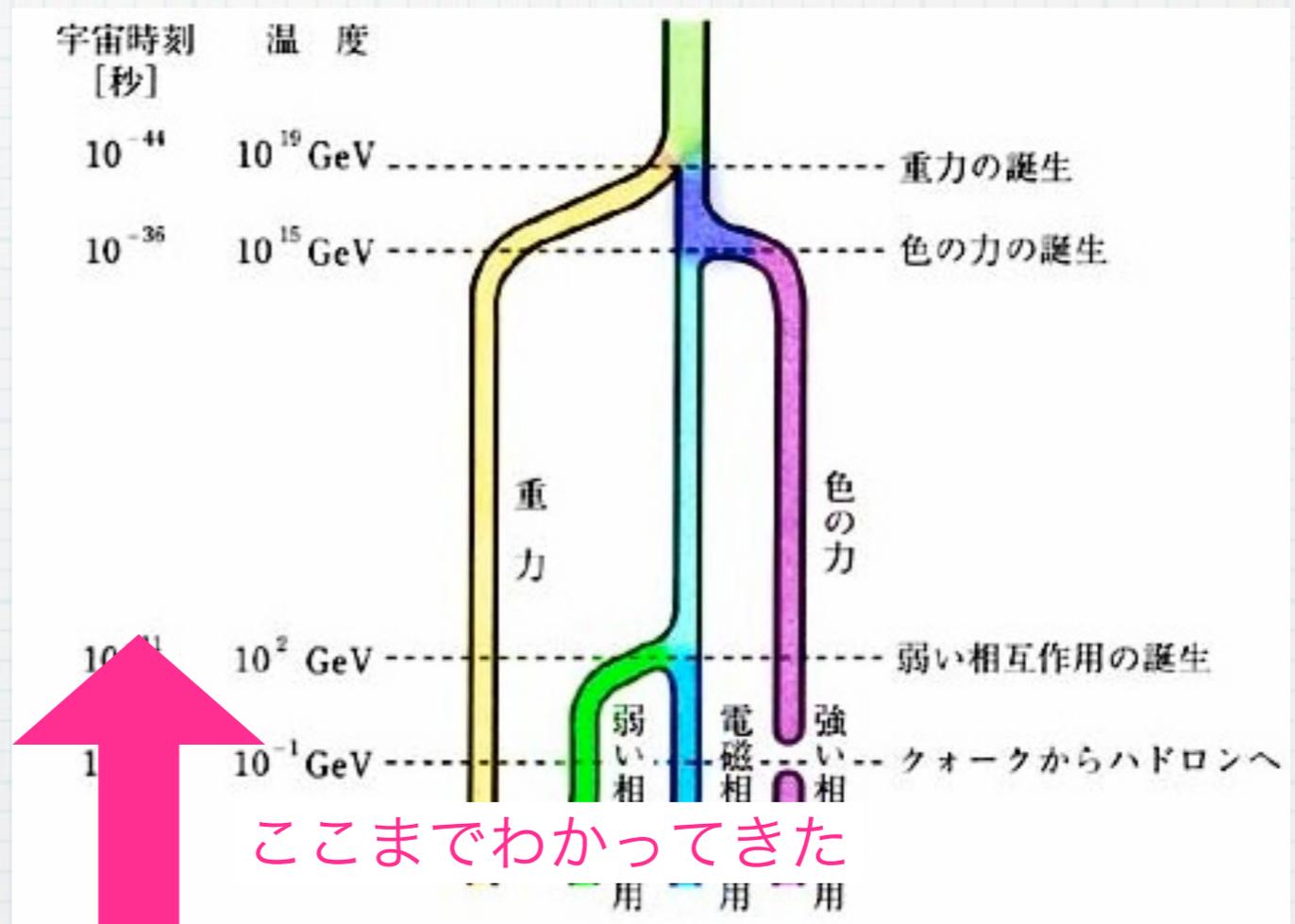
力の統一

- ❖ アインシュタインの夢 ⇒ 素粒子物理学者の夢
 - ▶ 力は元々 1 種類（宇宙誕生直後）だったと信じている
 - ▶ 時間が経つと徐々に分かれていった

宇宙誕生
0.000000000000000000000000000000
0000000000000000000000000000001秒後
0.000000000000000000000000000000
0000000000000000000000000000001秒後

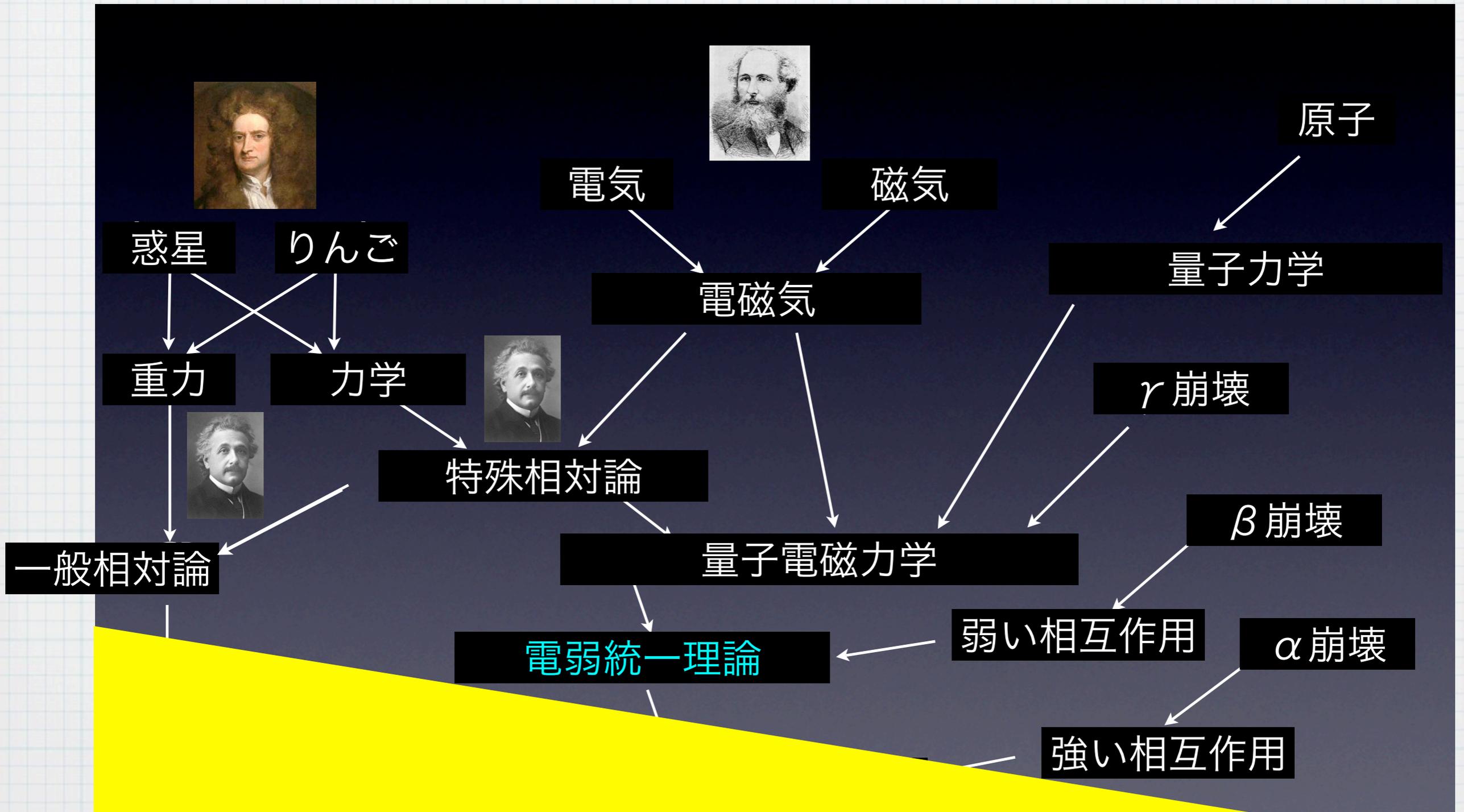
0.00000000000001秒後
0.0001秒後

現在



歴史は繰り返す

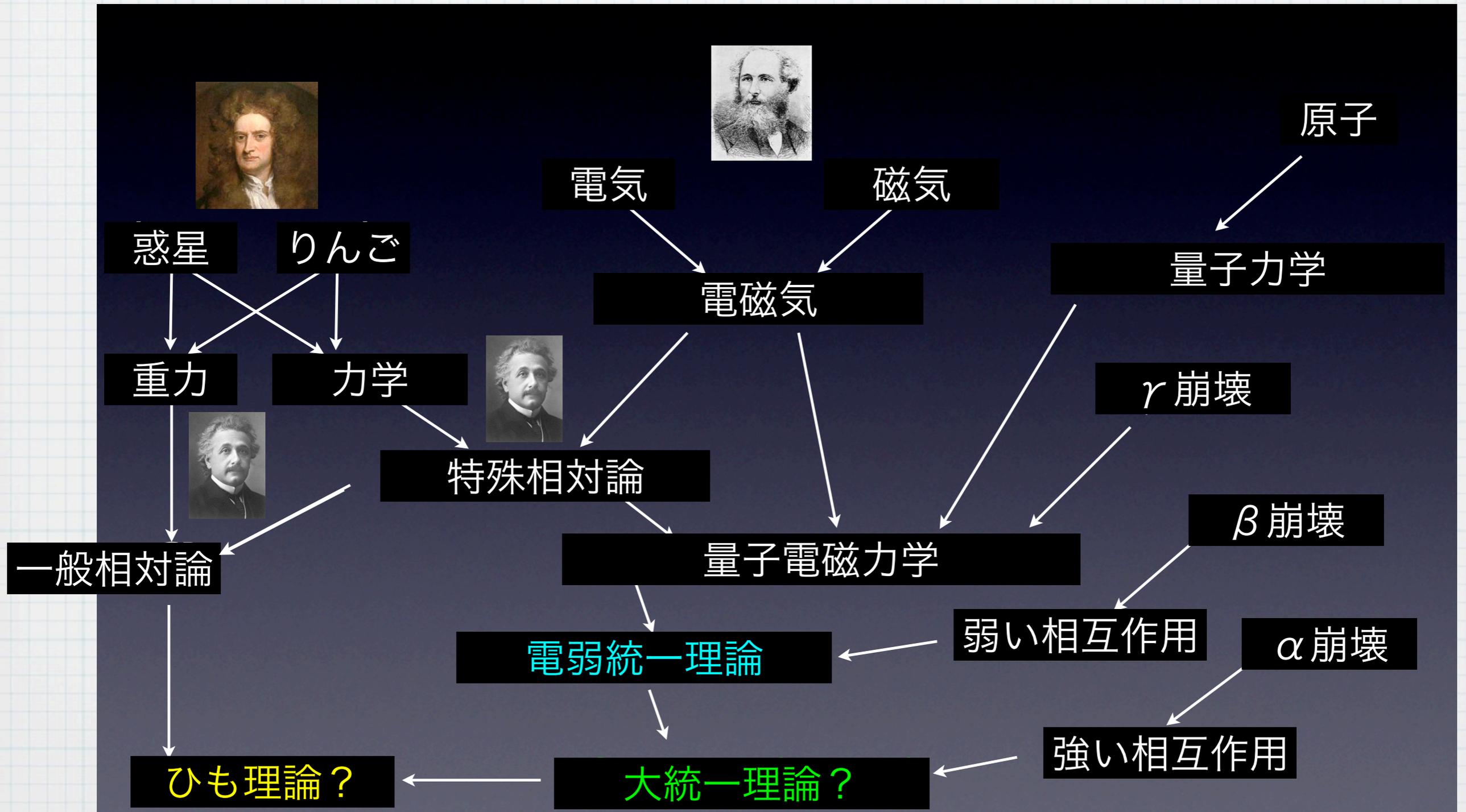
❖ 物理学の歴史は力の統一の歴史



村山斉さんのスライドを修正

歴史は繰り返す

❖ 物理学の歴史は力の統一の歴史



村山齊さんのスライドを修正

宇宙の歴史の探求

テラ・エレクトロンボルト (TeV)
 $T(\text{テラ})=10^{12}$
 エネルギーの単位

加速器を使い到達

BIG BANG
 宇宙が誕生してからの時間

宇宙論
 素粒子物理学
 原子核物理学
 天文学、地学
 化学、生物

クォークや電子など
 陽子や中性子など
 原子核
 原子

Key:

q quark	W, Z bosons	meson	photon
g gluon	meson	star	galaxy
e electron	baryon	ion	black hole
m muon	ion	atom	
t tau	atom		
n neutrino			

Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

宇宙カレンダー

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
元日 Big Ban							太陽系	原始生命		多細胞 生物

12月						
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18 プランクトン	19 魚と脊椎動物	20 植物が陸地へ	21 昆虫
22 両生類	23 爬虫類と木	24 恐竜	25 ほ乳類の祖先	26	27 鳥	28 花
29 恐竜の絶滅	30	31 22:30 最初の人類 23:46 人類が初めて火を使う 23:59:37 縄文時代 23:59:52 ピラミッド建設 23:59:56 キリストの誕生 23:59:59 江戸幕府 24:00:00 (新年) 現在				

宇宙カレンダー

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
元日 Big Ban							太陽系	原始生命		多細胞 生物

12月						
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18 プランクトン	19 魚と脊椎動物	20 植物が陸地へ	21 昆虫
22 両生類	23 爬虫類と木	24 恐竜	25 ほ乳類の祖先	26	27 鳥	28 花
29 恐竜の絶滅	30	31 22:30 最初の人類 23:46 人類が初めて火を使う 23:59:37 縄文時代 23:59:52 ピラミッド建設 23:59:56 キリストの誕生 23:59:59 江戸幕府 24:00:00 (新年) 現在				

137億年前



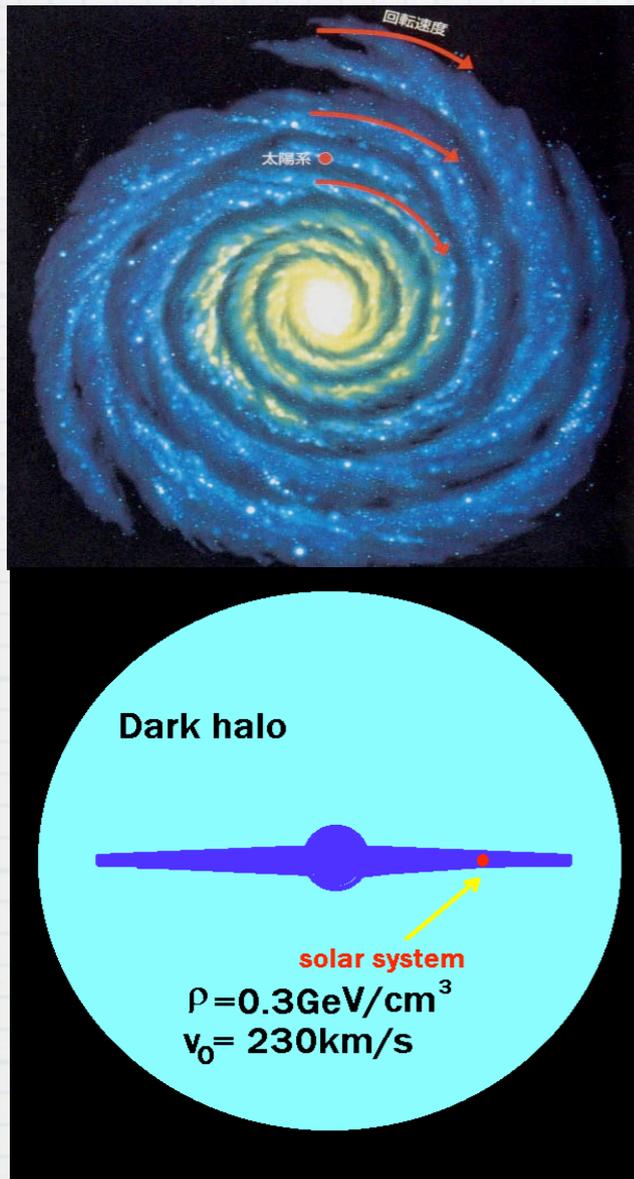
宇宙カレンダー

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
元日 Big Bang							太陽系	原始生命		多細胞生物
1	2							6		7
8	9							13		14
15	16	17	18 プランクトン	19 魚と脊椎動物	20 植物が陸地へ	21 昆虫				
22 両生類	23 爬虫類と木	24 恐竜	25 ほ乳類の祖先	26	27 鳥	28 花				
29 恐竜の絶滅	30	31 22:30 最初の人類 23:46 人類が初めて火を使う 23:59:37 縄文時代 23:59:52 ピラミッド建設 23:59:56 キリストの誕生 23:59:59 江戸幕府 24:00:00 (新年) 現在								

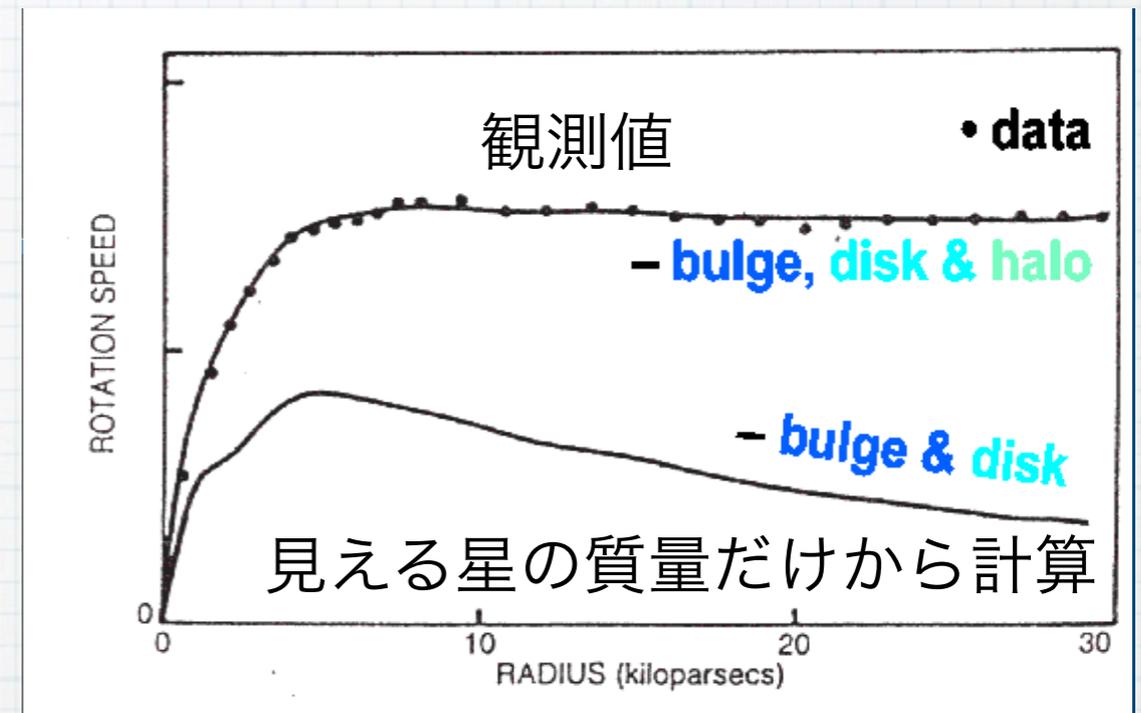
素粒子物理学が研究
してるのはここ
(ある意味考古学?)

137億年前

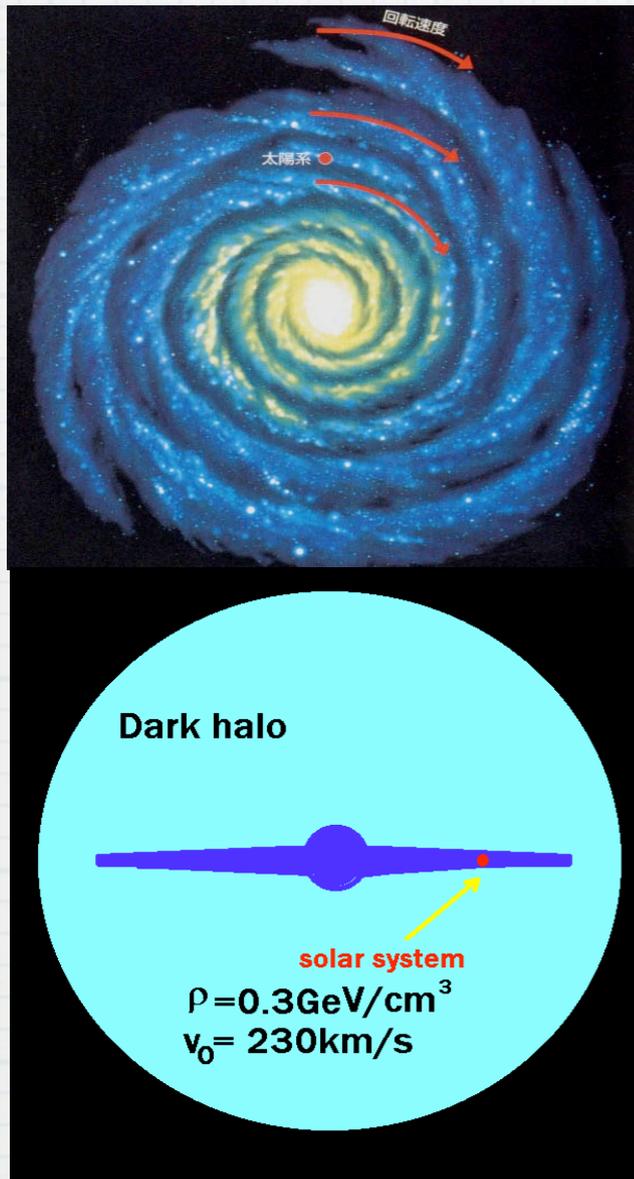
宇宙は何からできているか



$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM}{r^2}$$
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

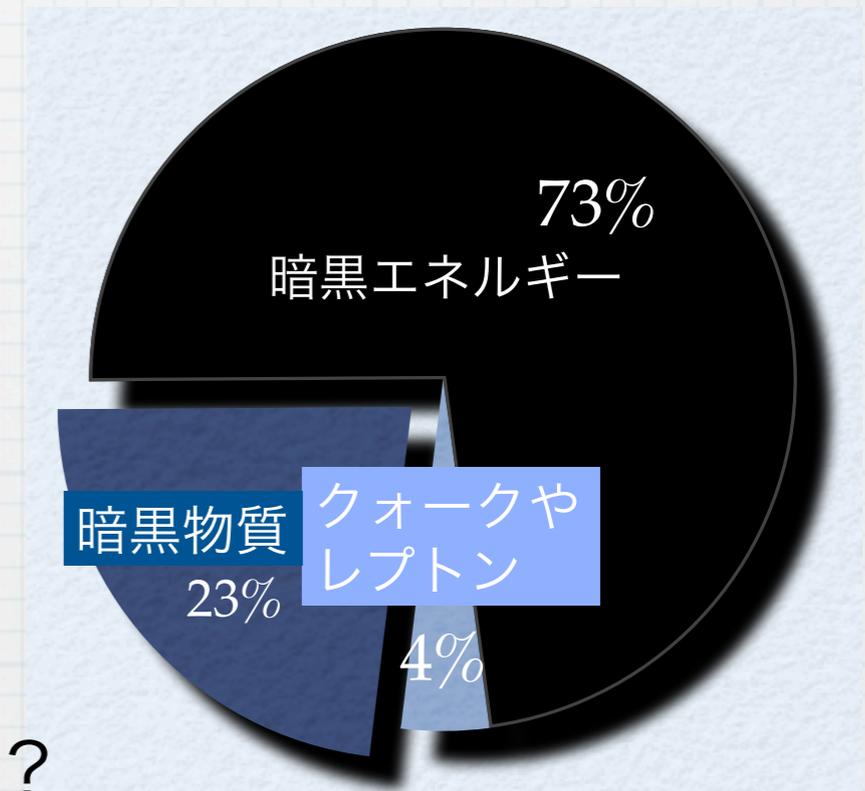
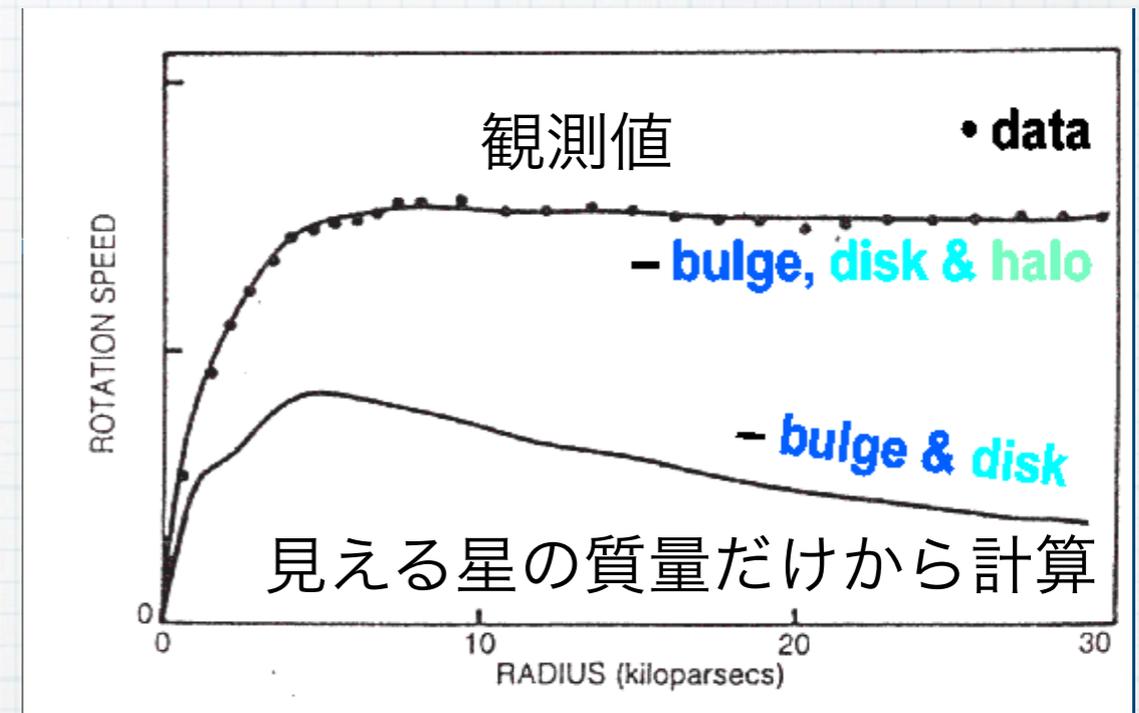


宇宙は何からできているか



$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



- ❖ 既知の粒子は全宇宙の質量のわずか4%!!
- ❖ 暗黒物質 (ダークマター) ??
- ❖ 暗黒エネルギー (ダークエネルギー) ???

超対称性 (Supersymmetry; SUSY)

- ❖ 超対称性が正しい理論なら…
 - ▶ 電弱相互作用と強い力の統一 (大統一)
 - ▶ 重力をも含めた全ての力の統一 (超大統一) の可能性
 - ▶ ダークマターが超対称性の予言する未知の粒子の可能性大

超対称性 (Supersymmetry; SUSY)

- ❖ 超対称性が正しい理論なら…
 - ▶ 電弱相互作用と強い力の統一（大統一）
 - ▶ 重力をも含めた全ての力の統一（超大統一）の可能性
 - ▶ ダークマターが超対称性の予言する未知の粒子の可能性大

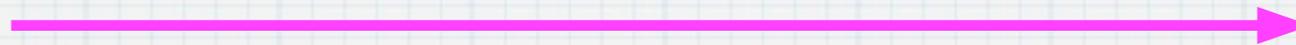
超対称性理論の検証をしたい

余剰次元とブラックホール

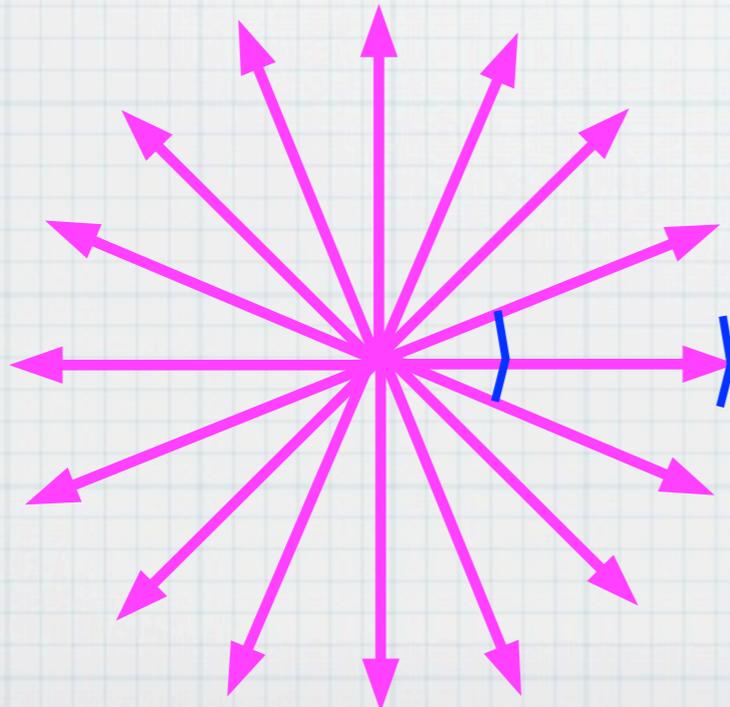
❖ 私たちの住む世界は 空間3次元+時間1次元 と考えられている

▶ 重力（光の強さをイメージしてください）の強さは $1/r^2$ に比例
⇒ 空間は3次元

▶ 空間が1次元なら光の強さは距離に依らない。 $1/r^0$ に比例



▶ 空間が2次元なら光の強さは $1/r^1$ に比例

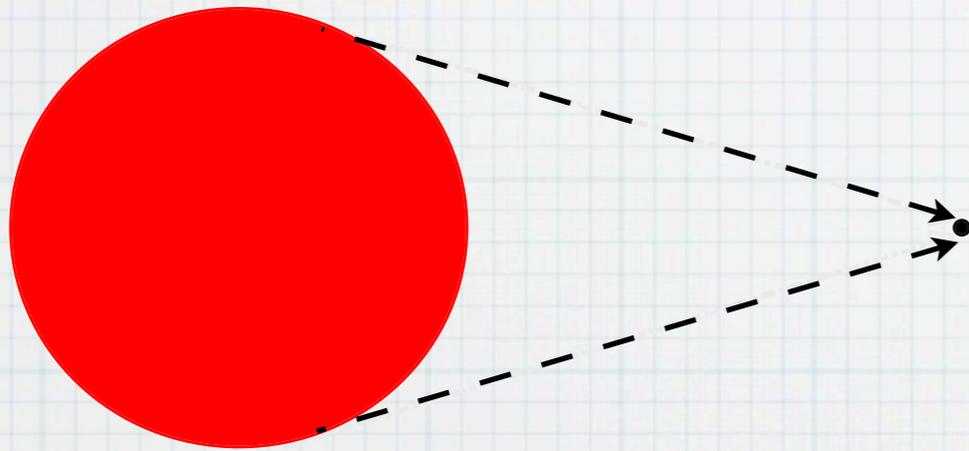


光源から r 離れた地点で
単位長さ当たり受けとる光
の本数は全体の $1/(2\pi r)$

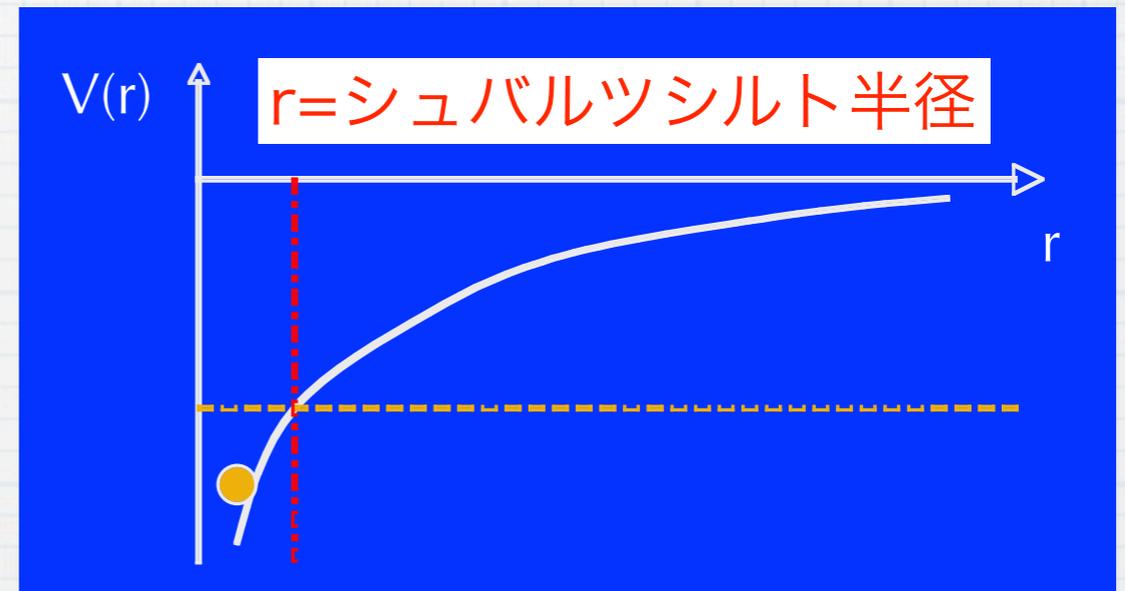
3次元なら：
光源から r 離れた地点で
単位面積当たり受けとる光
の本数は全体の $1/(4\pi r^2)$

余剰次元とブラックホール

- ❖ 私たちの住む世界は 空間3次元+時間1次元 と考えられている
 - ▶ さらに別の次元（余剰次元）が存在するかもしれない
 - ◎ もし余剰次元があるとLHCでブラックホールが生成される可能性



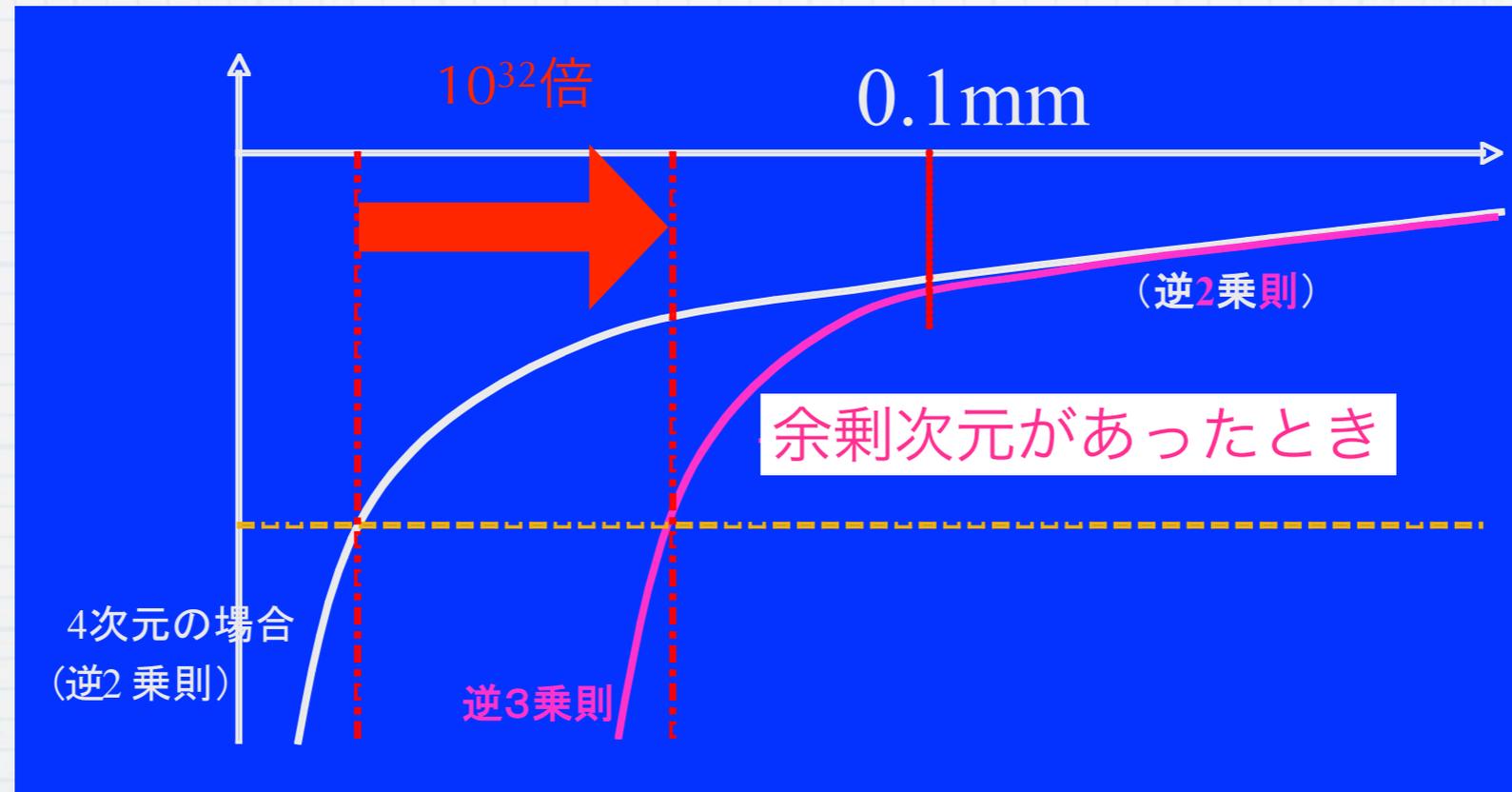
太陽(半径700000km)を3kmに潰すとブラックホールになる



光速での運動エネルギー
< 重力による位置エネルギー

$$\frac{1}{2}mc^2 < G\frac{Mm}{r} \quad \therefore r < \frac{2GM}{c^2}$$

ブラックホール生成



- ❖ 余剰次元があると重力の強さが逆2乗則→逆3 (4, 5, ...)乗則
⇒ シュバルツシルト半径が劇的に大きくなる
⇒ LHCで陽子同士を衝突させると、陽子間の距離がシュバルツシルト半径よりも小さくなる
⇒ ブラックホール生成

まとめ

- ❖ 素粒子物理学とは物質の究極の姿、性質を研究する学問
- ❖ 素粒子の性質や相互作用を調べることは、誕生直後 (0.000000000001秒後) の宇宙の姿を探ること
 - ▶ なぜ宇宙が今ある宇宙になったのか
- ❖ 実はわからないことだらけです
 - ▶ (全ての学問に共通だと思いますが) やればやるほどわからないことが増えてきます
- ❖ 質量の謎やダークマター (超対称性) については次の講演
- ❖ LHC実験についてはさらにその次の講演

おまけ (2008年度ノーベル物理学賞)

❖ 南部さん

- ▶ 凄い業績が山ほど
- ▶ 粒子の質量を説明する理論の基礎を確立
← LHCで検証したい

❖ 小林・益川さん

- ▶ 粒子・反粒子の性質の違い
← 茨城県つくば市
高エネルギー加速器研究機構のKEKB-Belle
実験が大きく貢献

Physics

The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: SCANPIX

Yoichiro Nambu

🕒 1/2 of the prize

USA

Enrico Fermi Institute,
University of Chicago
Chicago, IL, USA

b. 1921



Photo: Kyodo/Reuters

Makoto Kobayashi

🕒 1/4 of the prize

Japan

High Energy Accelerator
Research Organization
(KEK)
Tsukuba, Japan

b. 1944



Photo: Kyoto University

Toshihide Maskawa

🕒 1/4 of the prize

Japan

Kyoto Sangyo University;
Yukawa Institute for
Theoretical Physics
(YITP), Kyoto University
Kyoto, Japan

b. 1940

Titles, data and places given above refer to the time of the award.

さらにおまけ（日本人ノーベル賞受賞者）

❖ 物理学賞

- ▶ 湯川秀樹、朝永振一郎、江崎玲於奈、小柴昌俊、南部陽一郎（アメリカ人ですが…）、小林誠、益川敏英

❖ 化学賞

- ▶ 福井謙一、白川英樹、野依良治、田中耕一、下村脩

❖ 生理学・医学賞

- ▶ 利根川進

❖ 文学賞

- ▶ 川端康成、大江健三郎

❖ 平和賞

- ▶ 佐藤栄作

❖ 経済学賞

- ▶ なし

7/16が物理
6/7が素粒子物理