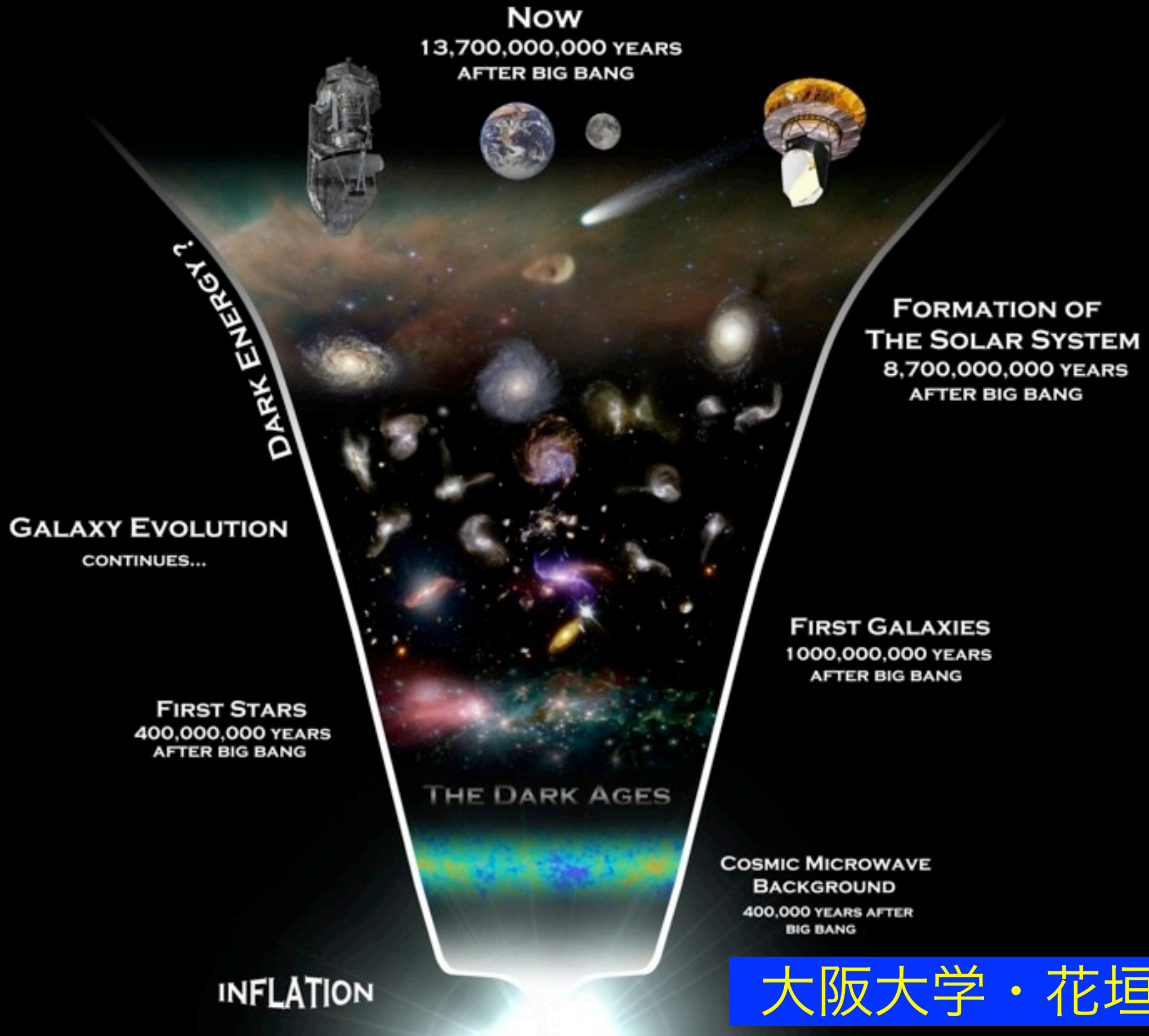


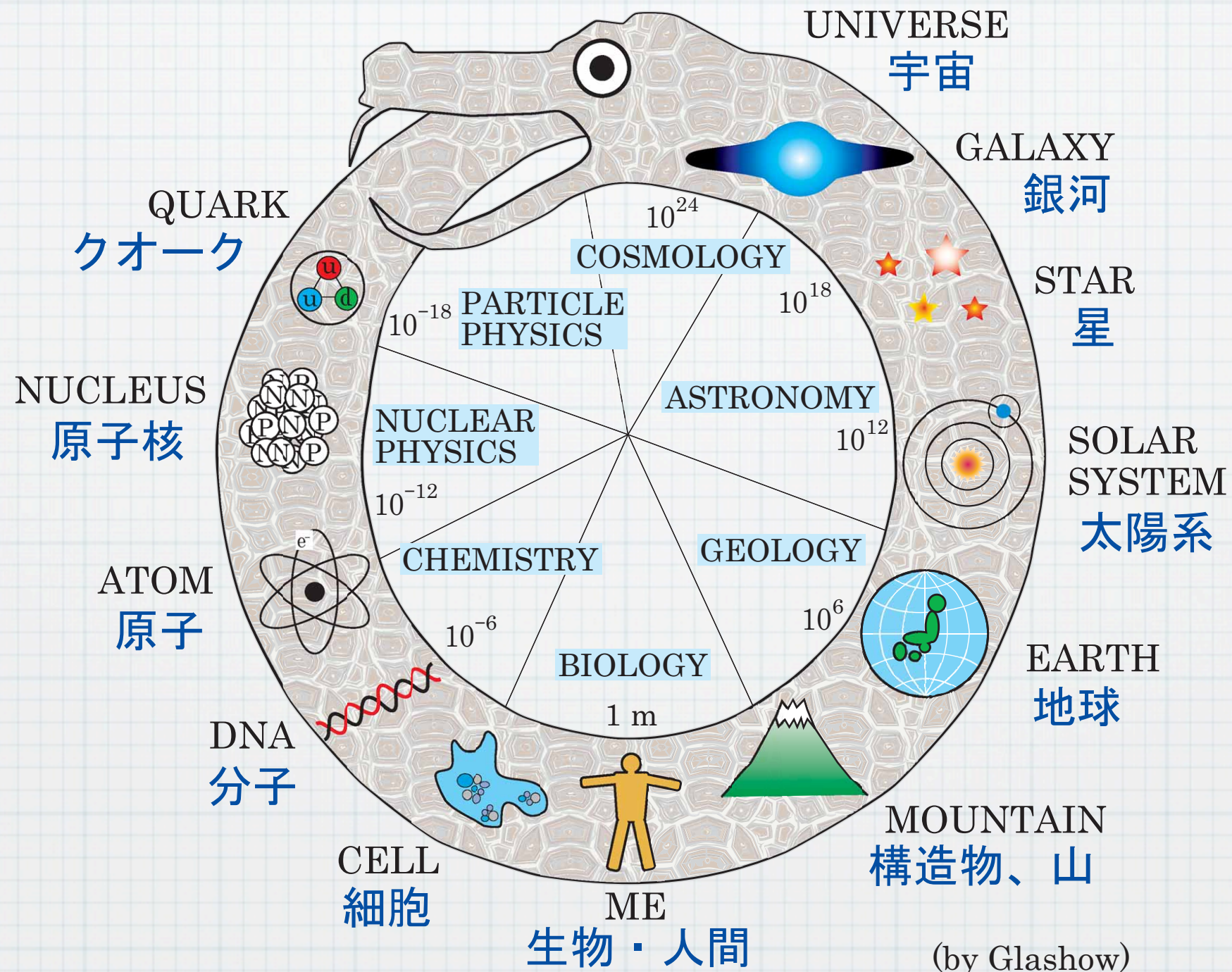
巨大加速器で探る初期宇宙



ATLAS-Intro_hi.mv

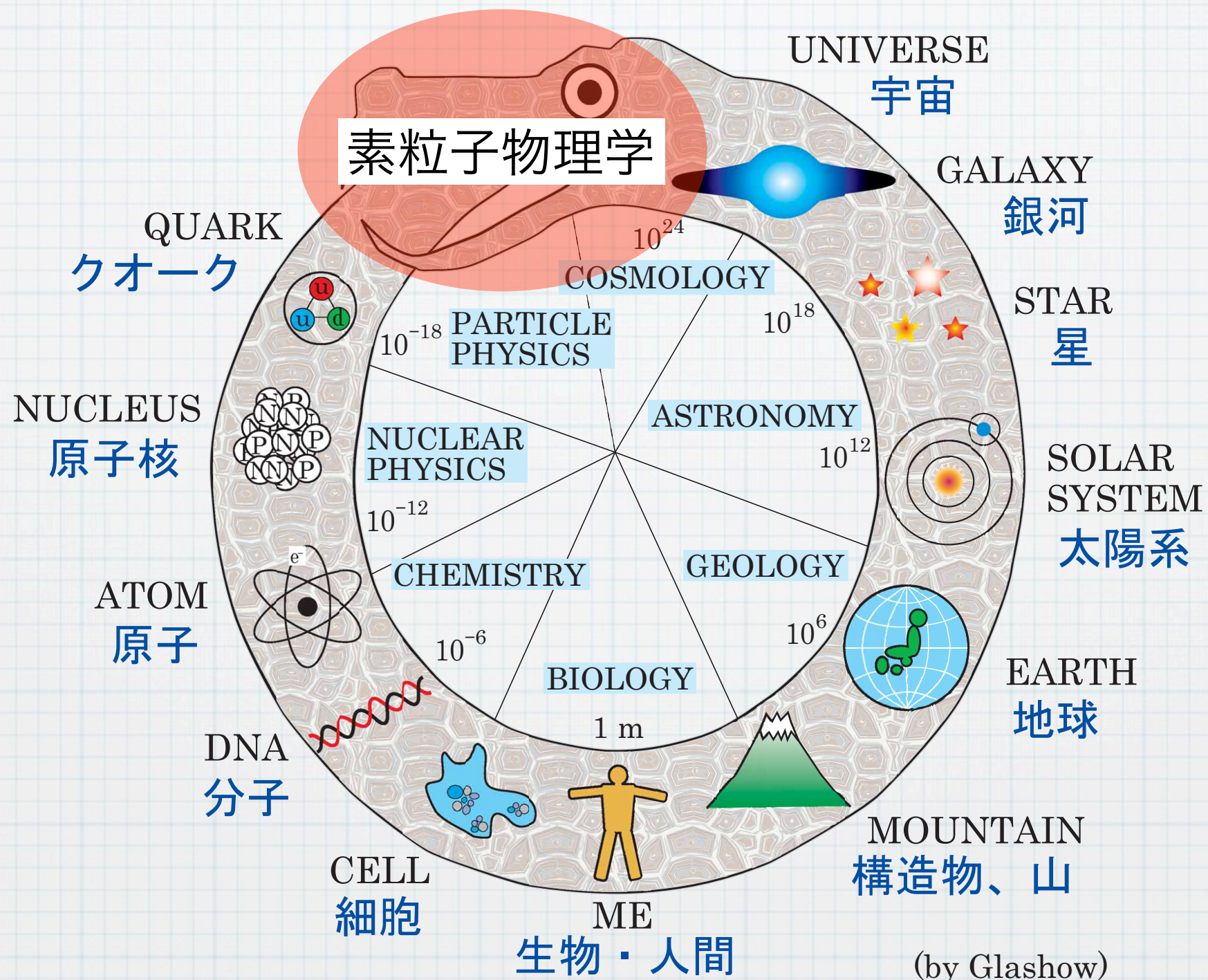
素粒子物理学とは

自然の階層性（ウロボロスの蛇）



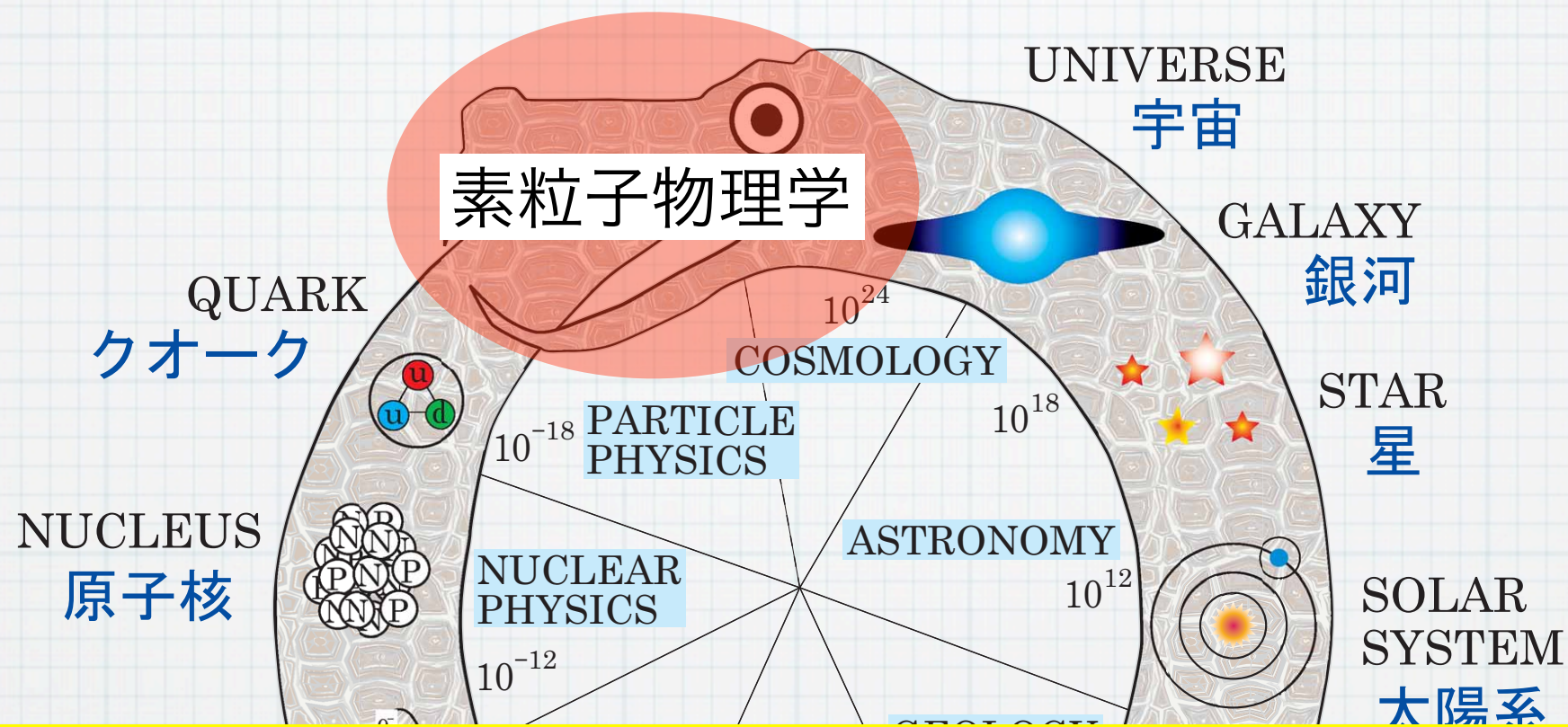
素粒子物理学とは

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
 - ▶ 素粒子物理学の最新テーマの紹介
- ❖ LHC実験

知っていること

力と物質の究極構造

物質は何から できているのだろう？

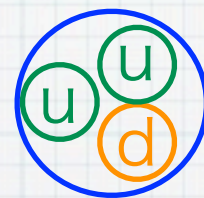
分子

原子

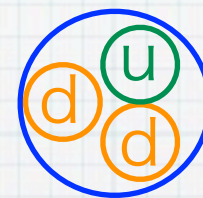
原子核

陽子と
中性子

クォーク
と電子



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

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？

⇒ クォークとレプトン

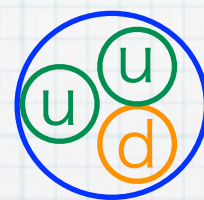
分子

原子

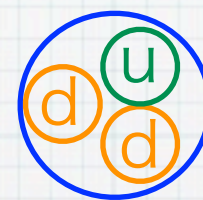
原子核

陽子と
中性子

クォーク
と電子



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

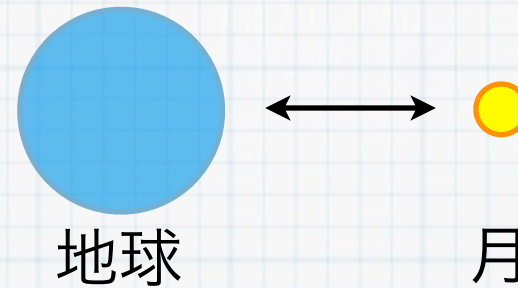
クォーク

レプトン

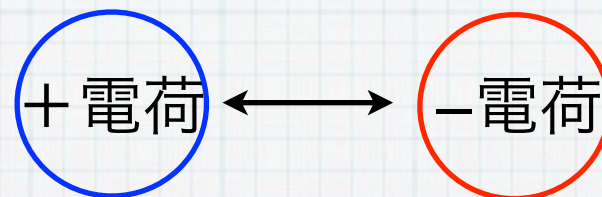
-1/3	2/3	電荷	-1	0
b	t		τ	ν_τ
s	c		μ	ν_μ
d	u		e	ν_e

どういう力があるのだろう？

❖ 重力



❖ 電磁気力



❖ 弱い相互作用



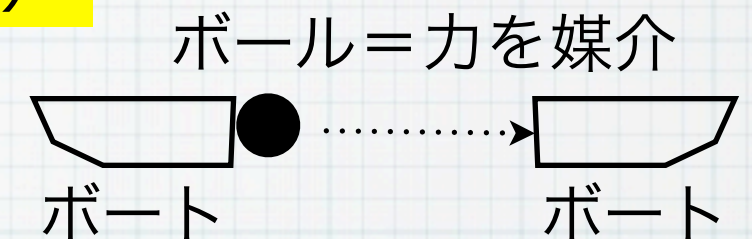
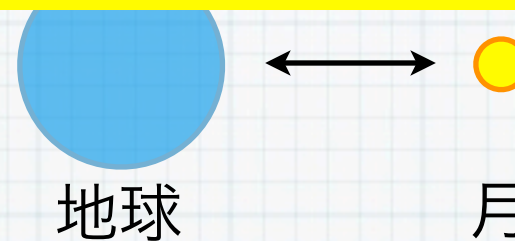
❖ 強い相互作用



力を媒介する粒子

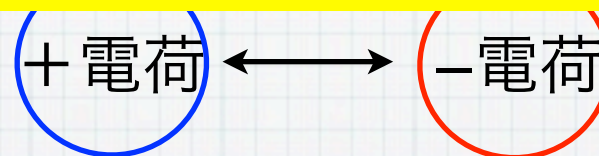
❖ 重力

グラビトン（未発見）



❖ 電磁気力

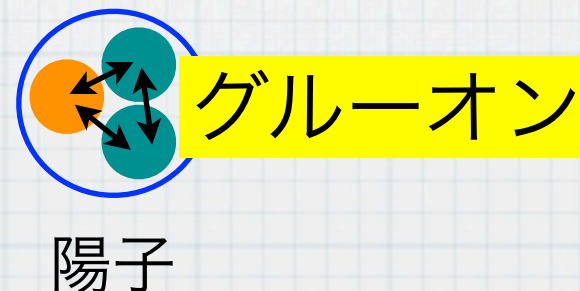
フォトン（光子）



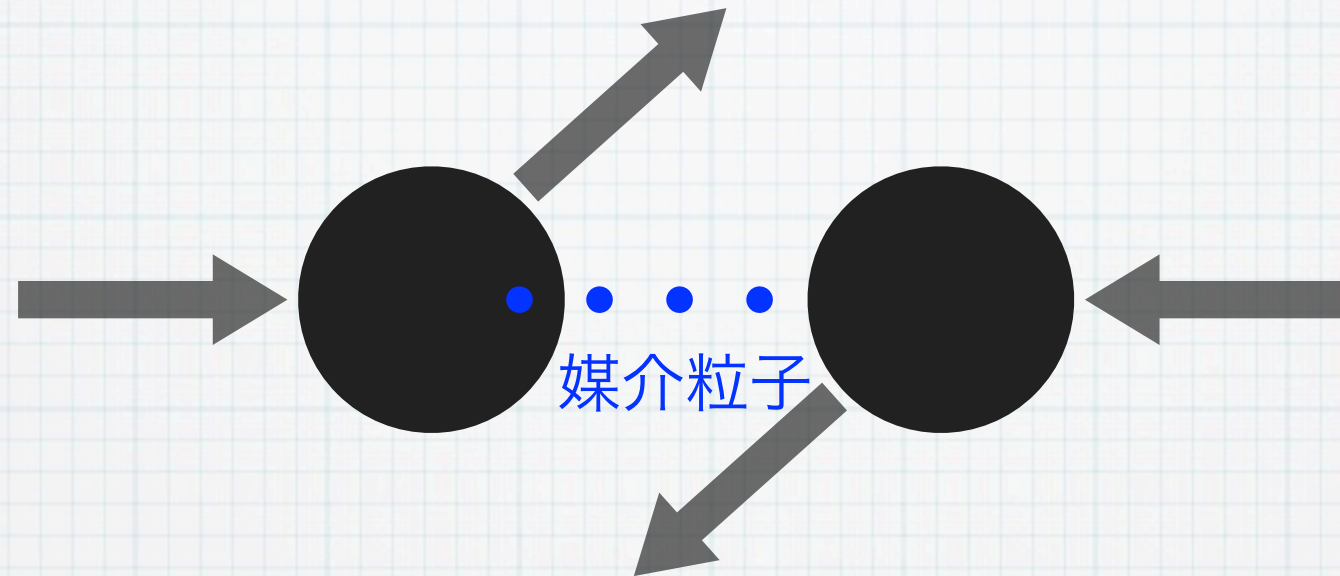
❖ 弱い相互作用



❖ 強い相互作用



衝突？



❖ より激しい（高いエネルギーの）衝突
= 粒子同士がより接近

$$\Delta x \cdot \Delta p \gtrsim \hbar$$

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

❖ 力を媒介する粒子

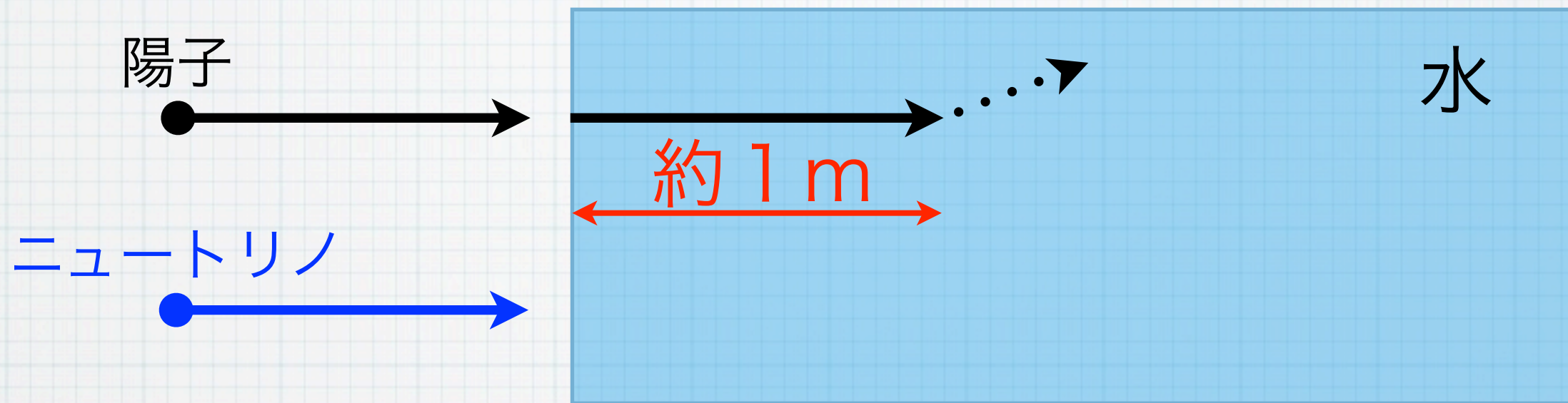
❖ もう 1 種類（未発見）

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

強い相互作用

弱い相互作用

力の強さの違い



❖ ニュートリノは？

A. 10km

B. 地球1個（地球の直径～10,000km）

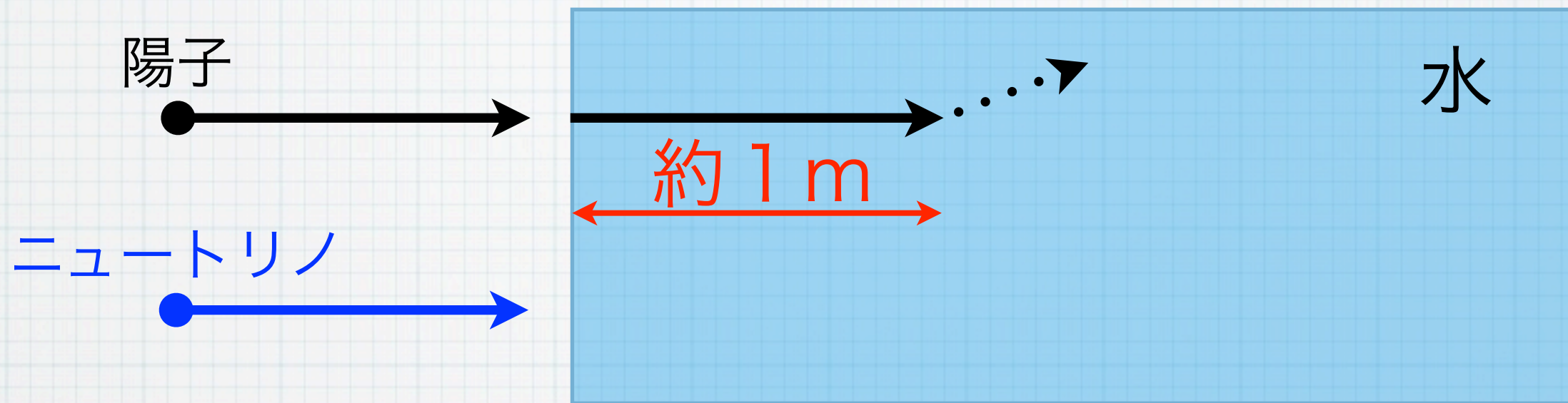
C. 地球1000個

D. 地球10万個

E. 地球1億個

地球も水みたいなもの
だと思ってください

力の強さの違い



❖ ニュートリノは？

A. 10km

B. 地球1個（地球の直径～10,000km）

C. 地球1000個

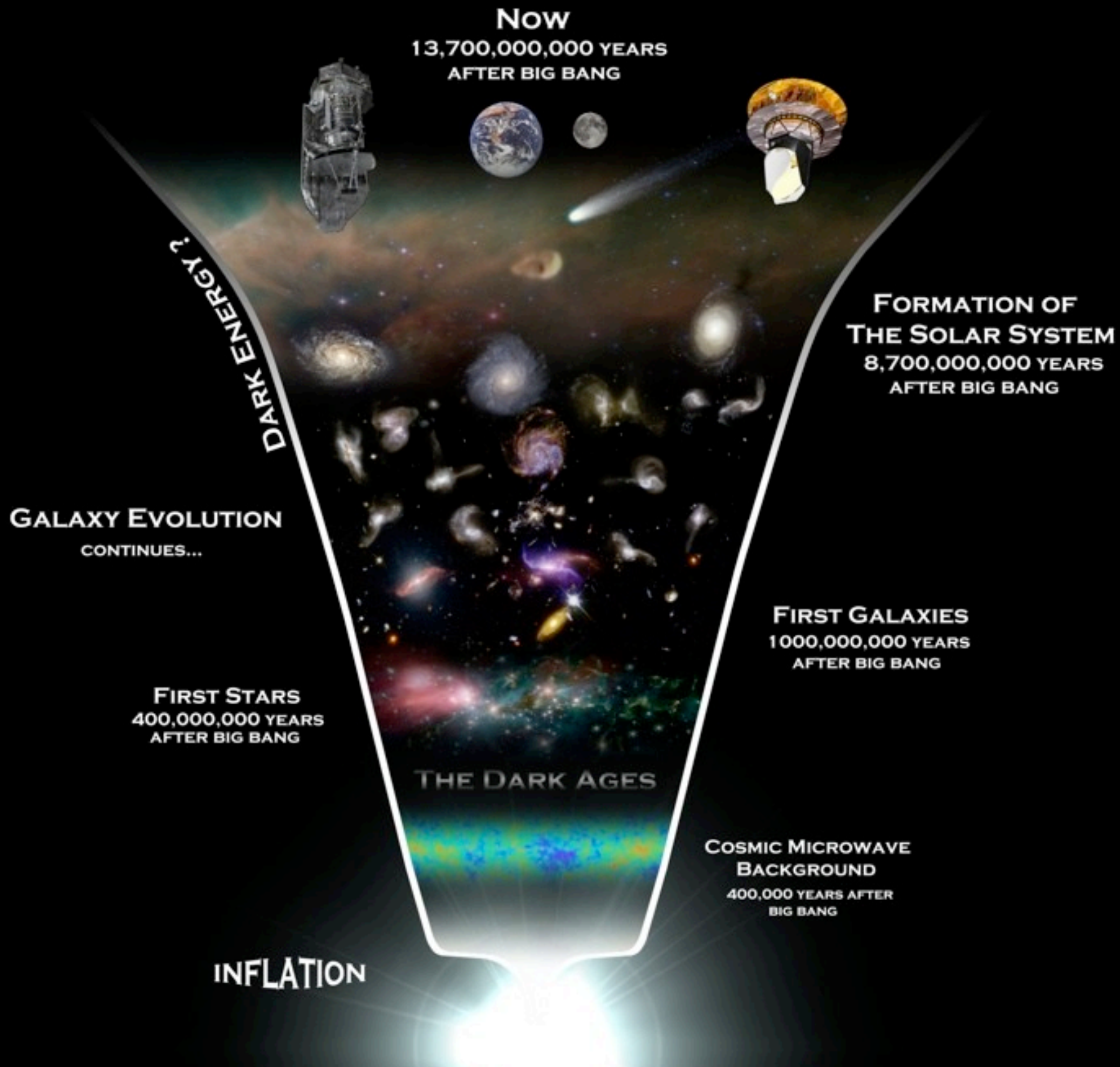
D. 地球10万个

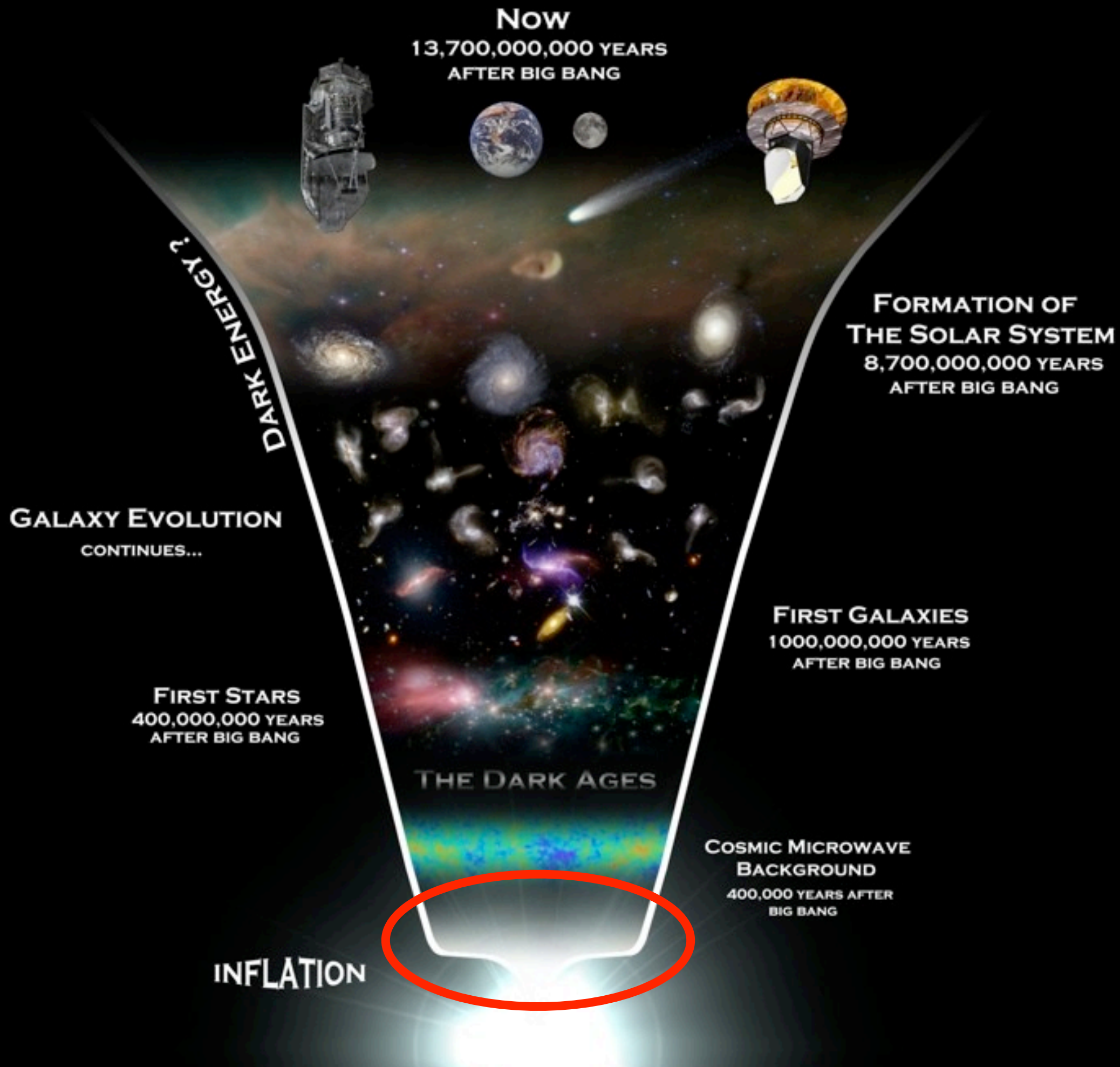
E. 地球1億個

地球も水みたいなもの
だと思ってください

知っていること

極大の世界 ～ 宇宙



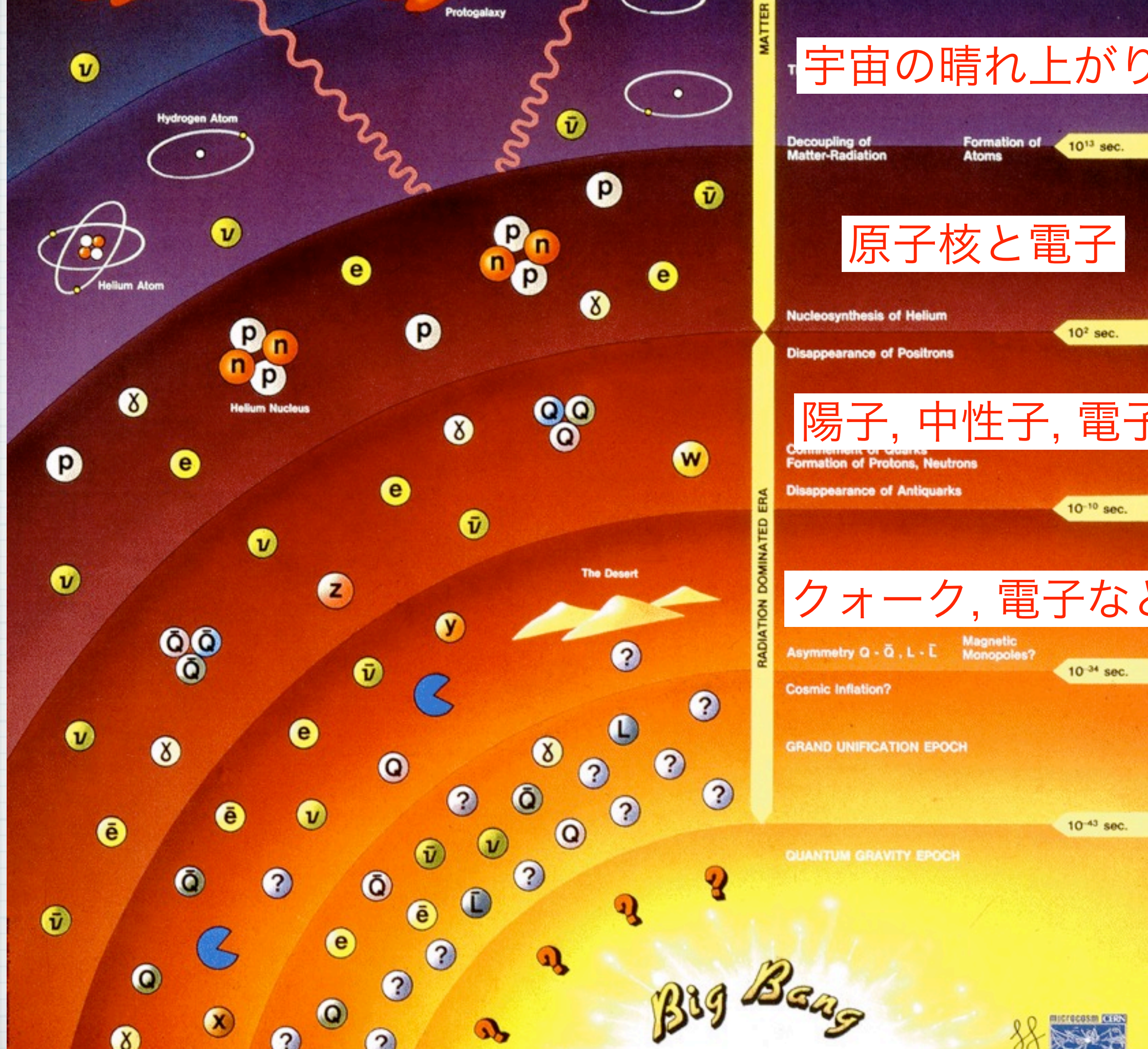


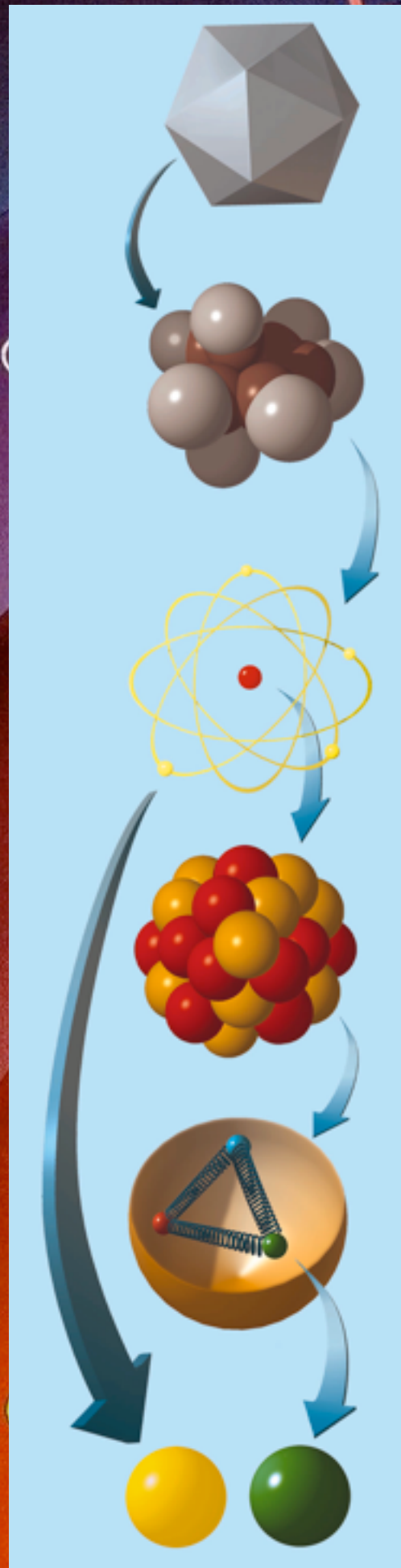
宇宙の晴れ上がり

原子核と電子

陽子, 中性子, 電子

クォーク, 電子など



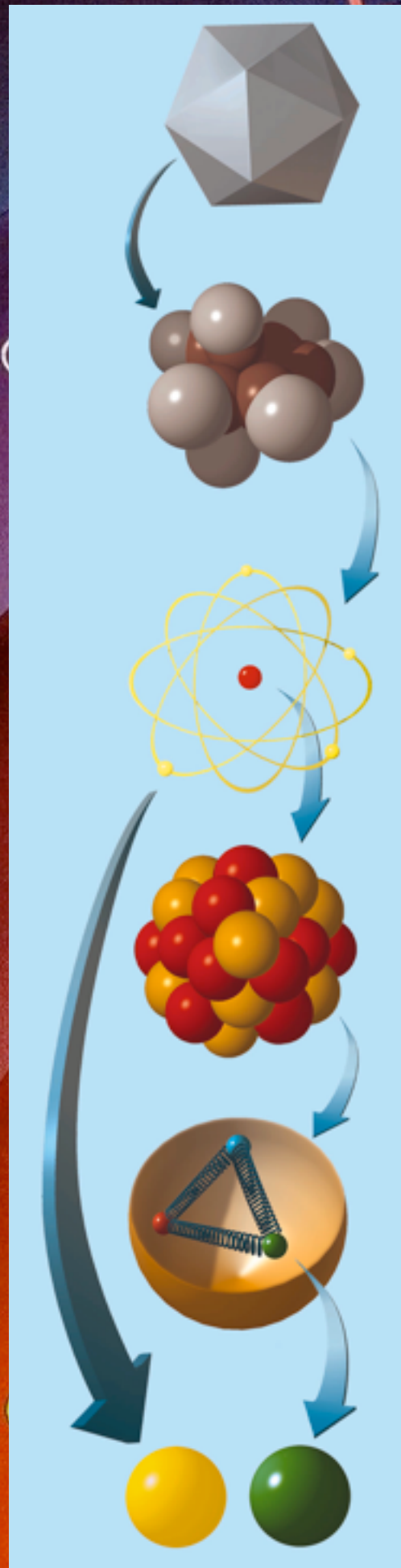


宇宙の晴れ上がり

原子核と電子

陽子, 中性子, 電子

クォーク, 電子など



宇宙の晴れ上がり

原子核と電子

陽子, 中性子, 電子

クォーク, 電子など

加速器

眺める

加速器で再現する
高温状態は、
望遠鏡では見ることの
できない最古の宇宙の姿

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
最古の星							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
最古の星							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

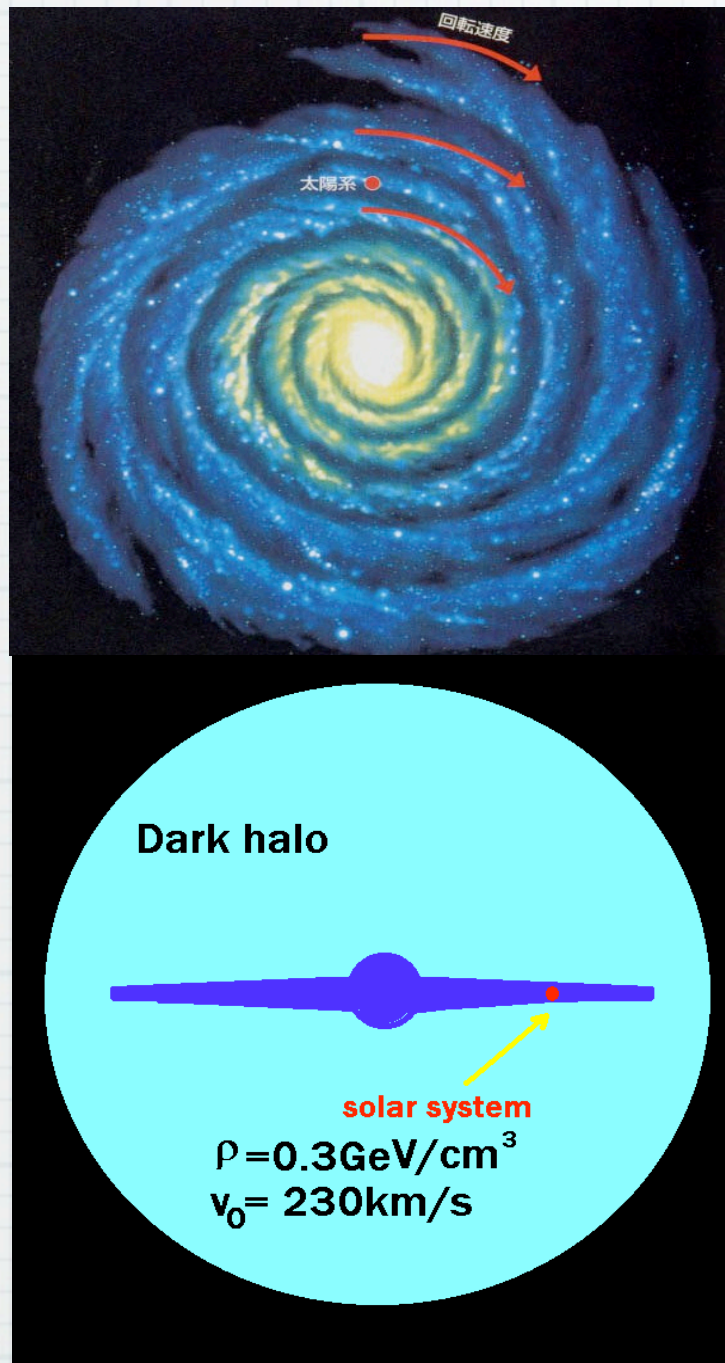
宇宙カレンダー

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
最古の星							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								

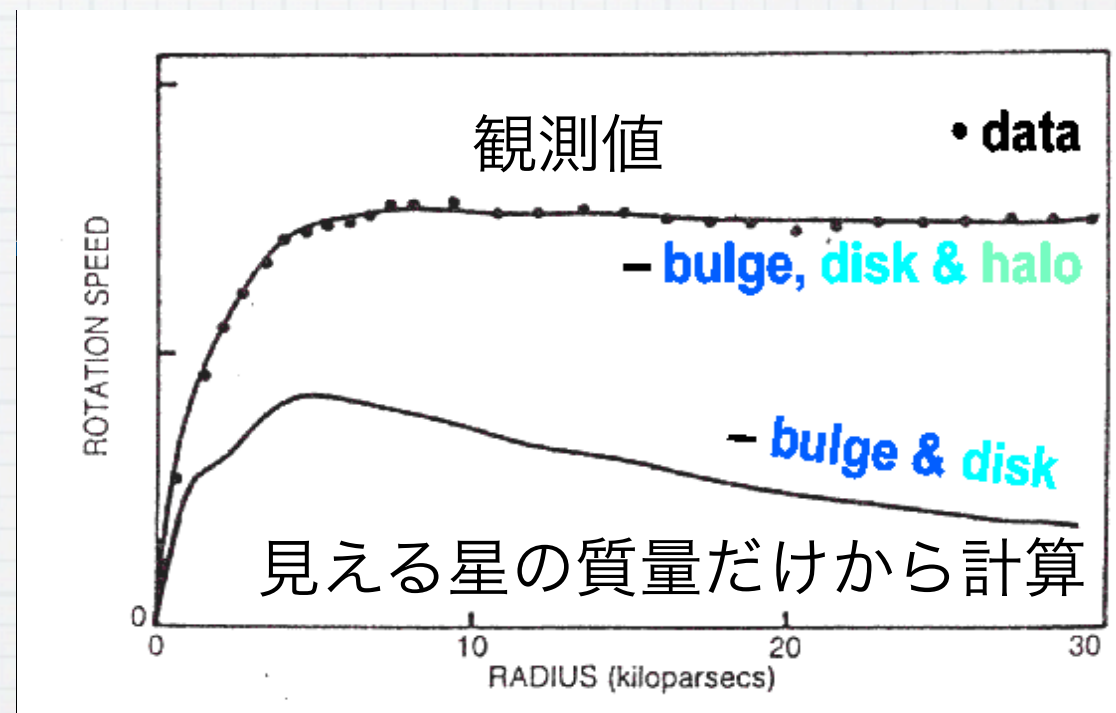
素粒子物理学が研究
してるのはここ
(ある意味考古学?)

137億年前

宇宙の重さ

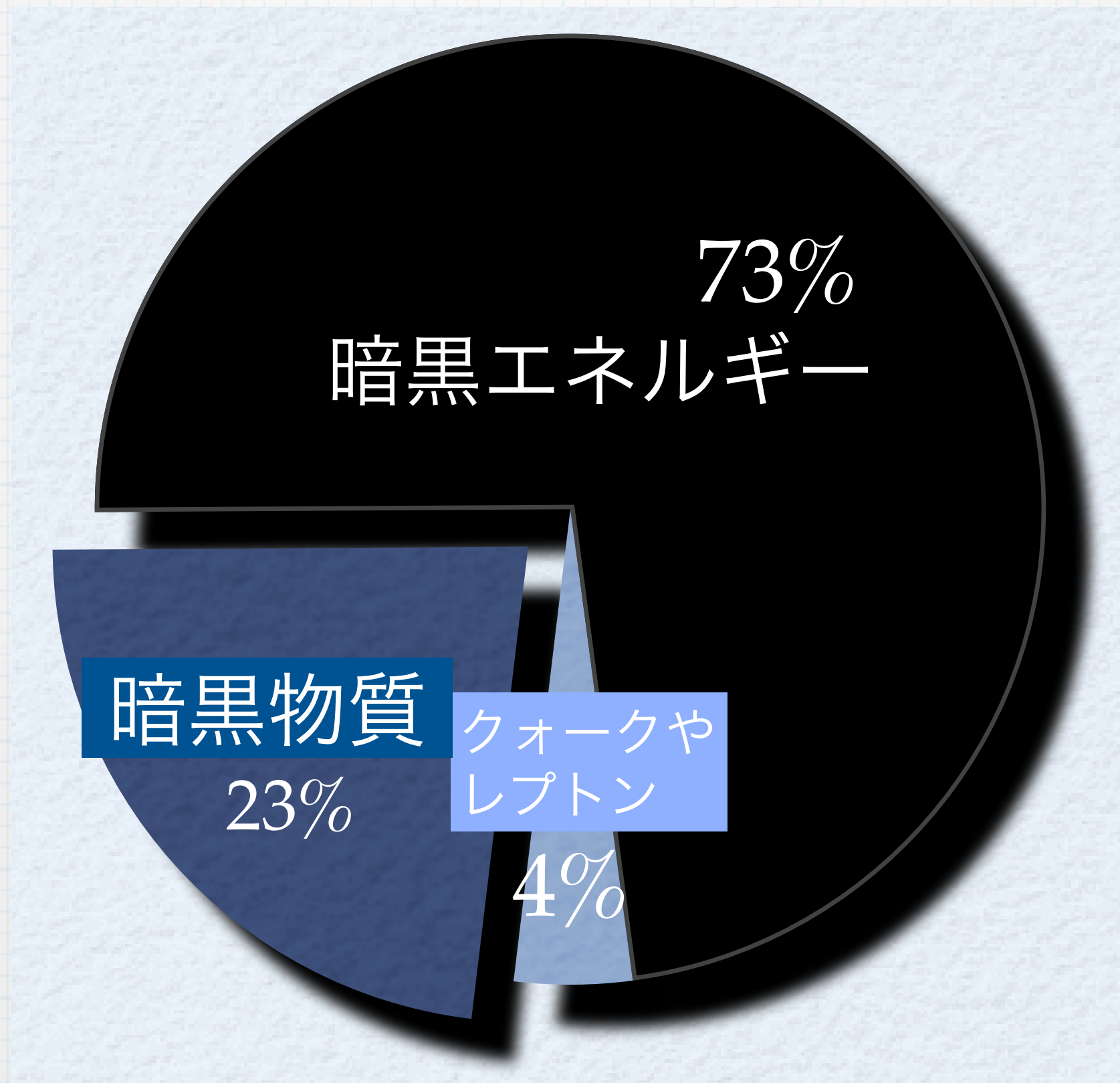


$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{r^2} \quad v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



“見えない”質量源！？

宇宙は何からできているか



知らないこと

質量の起源

質量の謎

❖ なぜ、粒子が質量を持っているのか？

質量の謎

❖ なぜ、粒子が質量を持っているのか？

⇒ 宇宙はヒッグス粒子の海

質量の謎

❖ なぜ、粒子が質量を持っているのか？

⇒ 宇宙はヒッグス粒子の海（たぶん？）

質量の謎

❖ なぜ、粒子が質量を持っているのか？

⇒ 宇宙はヒッグス粒子の海（たぶん？）



質量の謎

❖ なぜ、粒子が質量を持っているのか？

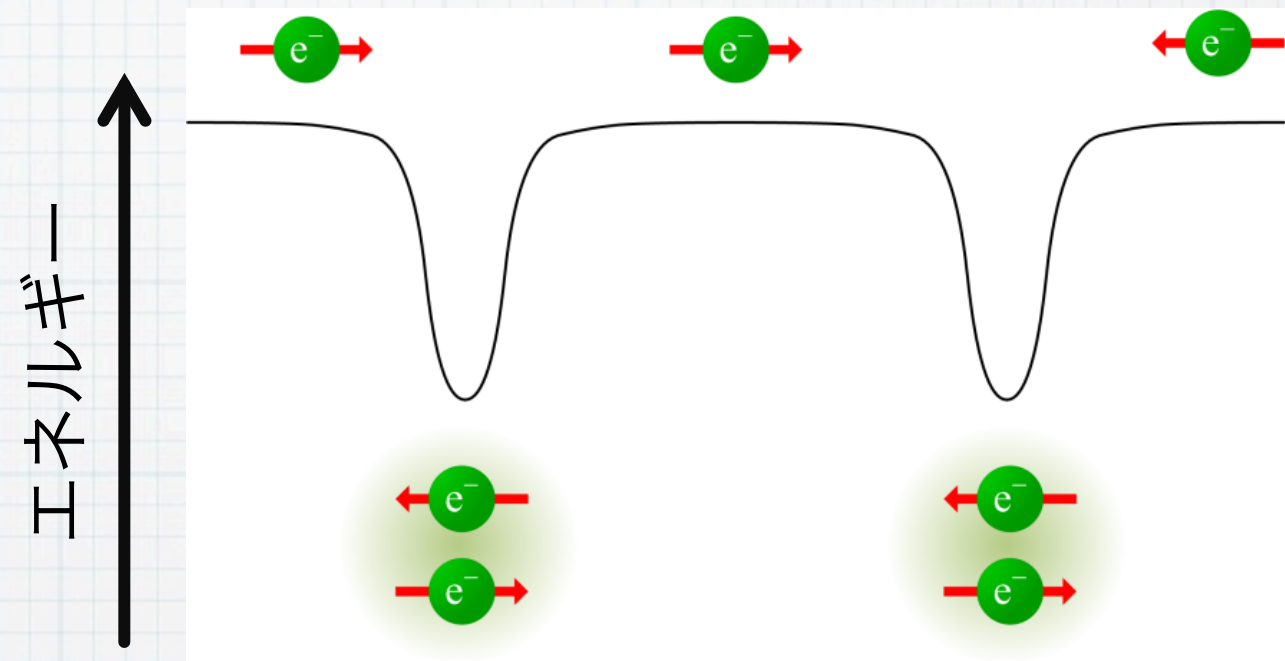
⇒ 宇宙はヒッグス粒子の海（たぶん？）



質量は人気者かどうかのバロメータ

もうちょっと詳しく言うと

❖ 局在する電子（ペア）により



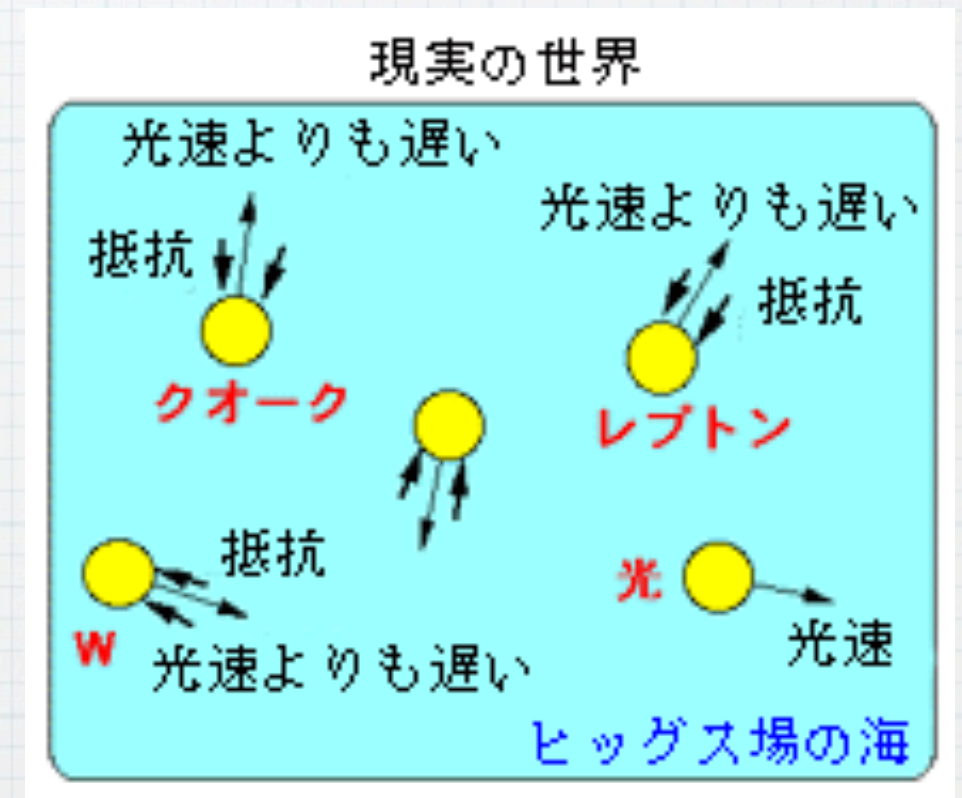
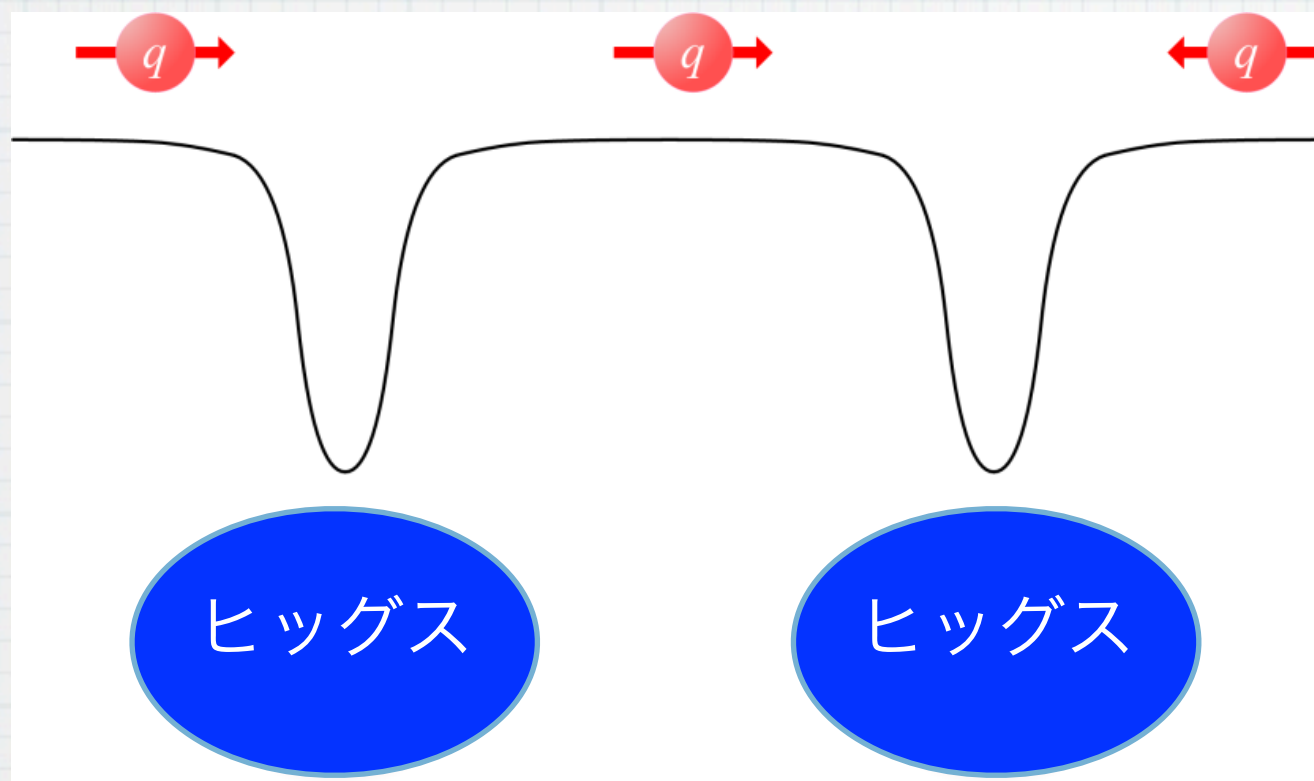
❖ ペアになっていない電子が通ると

▶ 捕まってなかなか進まない

電子が重くなる（ように見える）物質がある

ヒッグスの海

- ❖ 局在する電子の代わりにスピン0の何か
 - ▶ 何か = ヒッグス



質量の謎

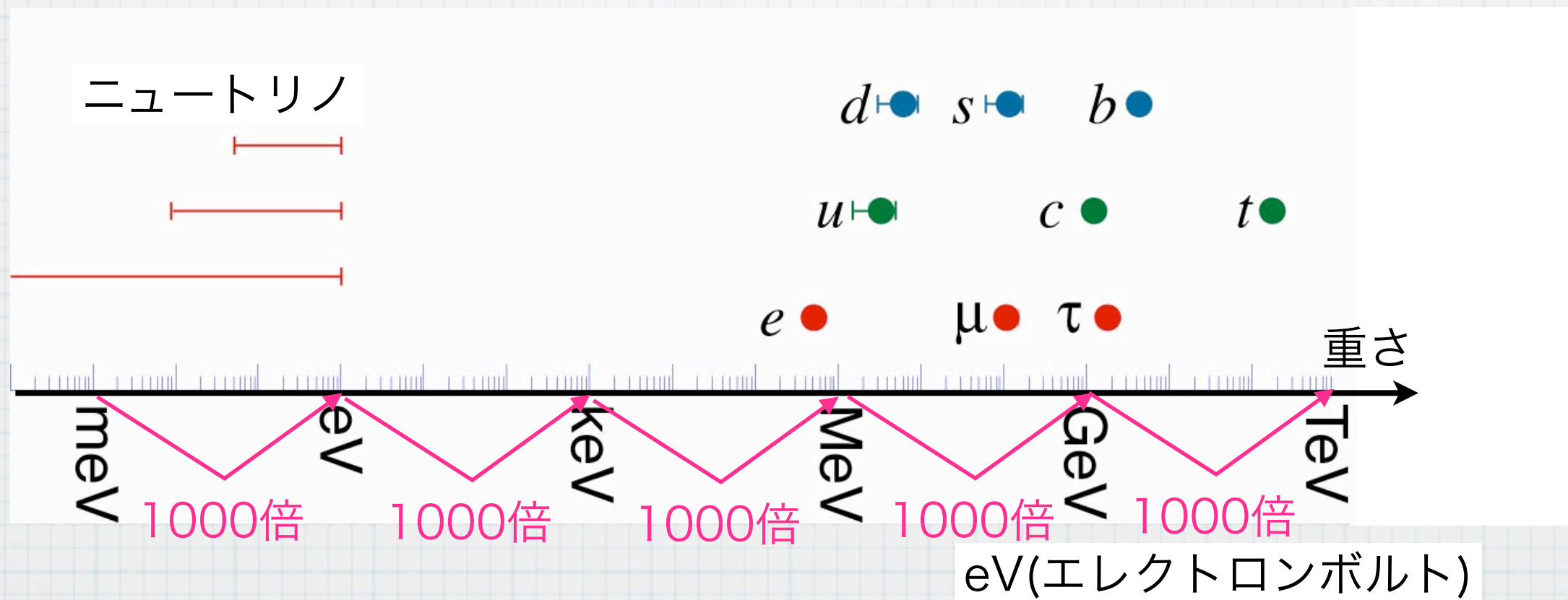
❖ 質量の違い

- ▶ 虫 0.7g vs 人間 70kg vs 象 7t
= 1 : 100,000 : 10,000,000 (1千万)
- ▶ 素粒子は

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)
- ▶ 素粒子は

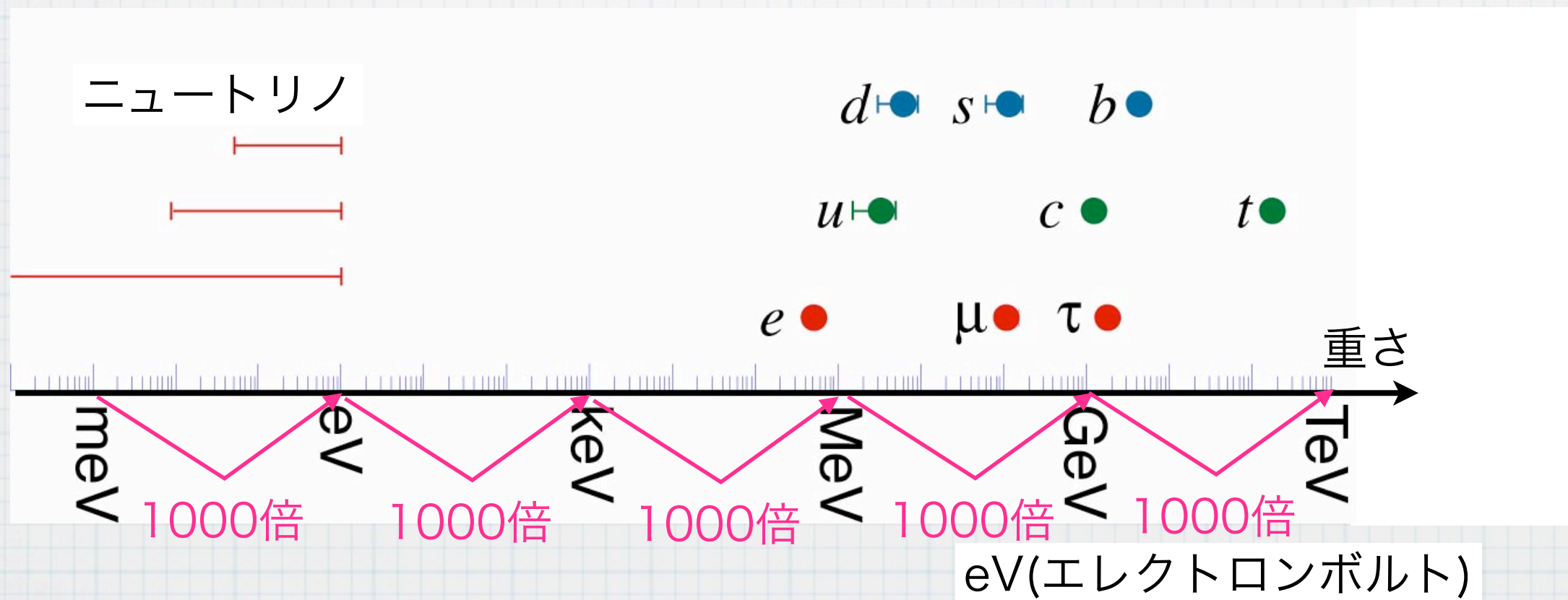


質量の謎

❖ 質量の違い

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

▶ 素粒子は



エネルギーと温度

❖ 素粒子の世界で使うエネルギー（質量）の単位

▶ eV （電子ボルト） = $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

❖ $E = k_B T$

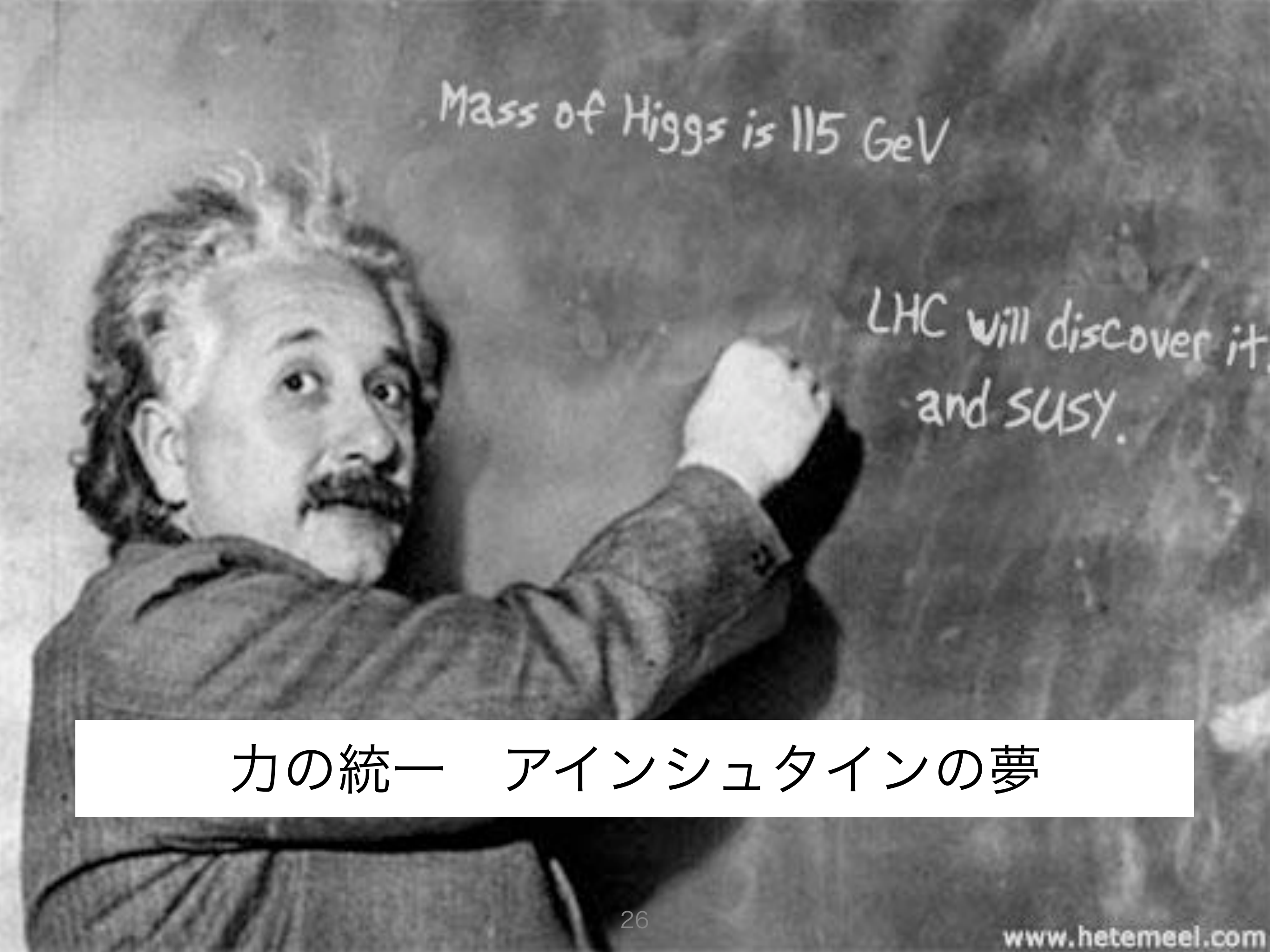
▶ 1eVは…

◎ $T = E/k_B = 1.6 \times 10^{-19} / (1.4 \times 10^{-23})$
 $\cong 10,000 \text{ 度}$

知らないこと

4つの力は

もともと1つだったのか？



Mass of Higgs is 115 GeV

LHC will discover it
and SUSY.

力の統一 アインシュタインの夢

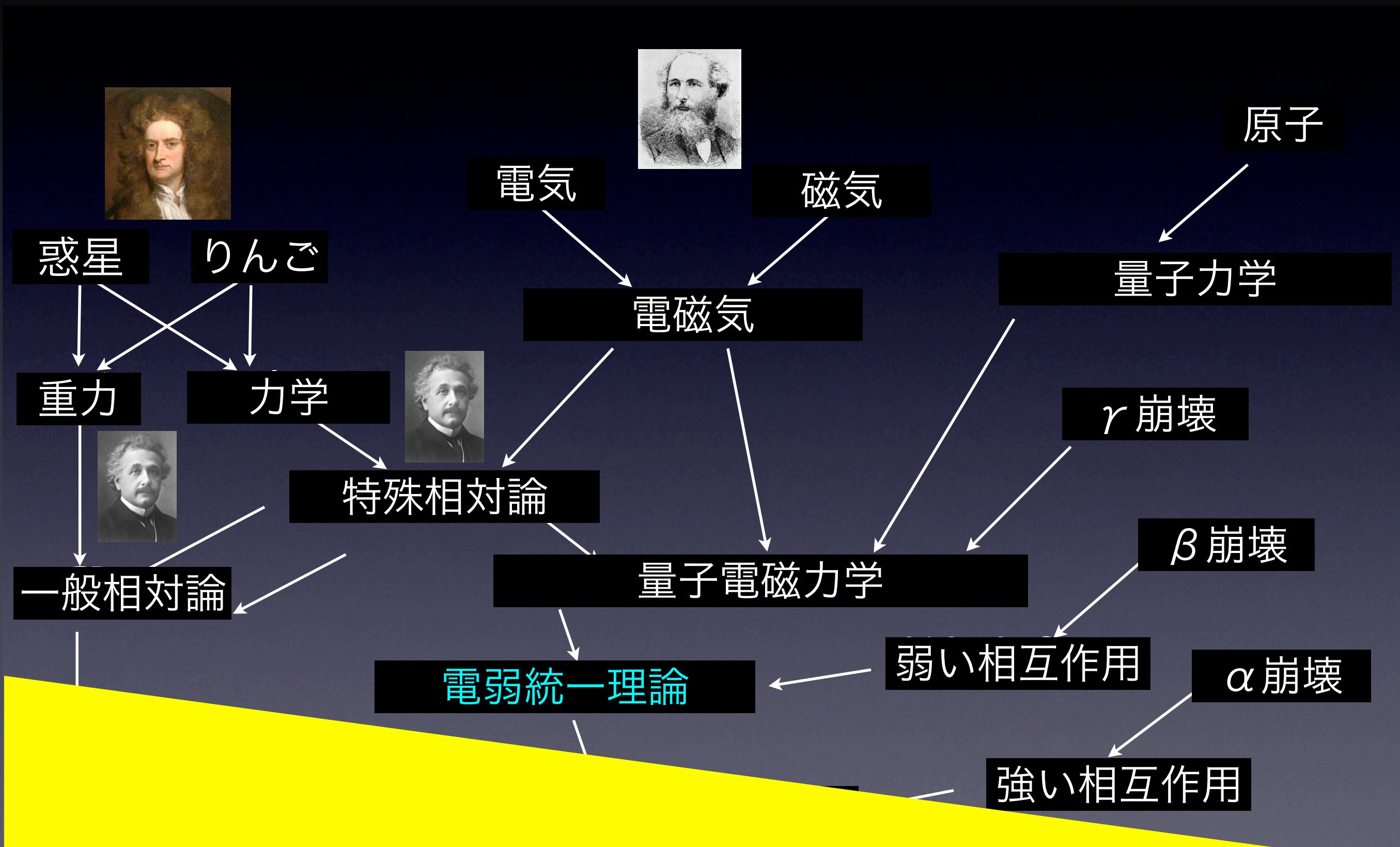
Mass of Higgs is 115 GeV

LHC will discover it
and SUSY.

力の統一 素粒子物理学者の夢

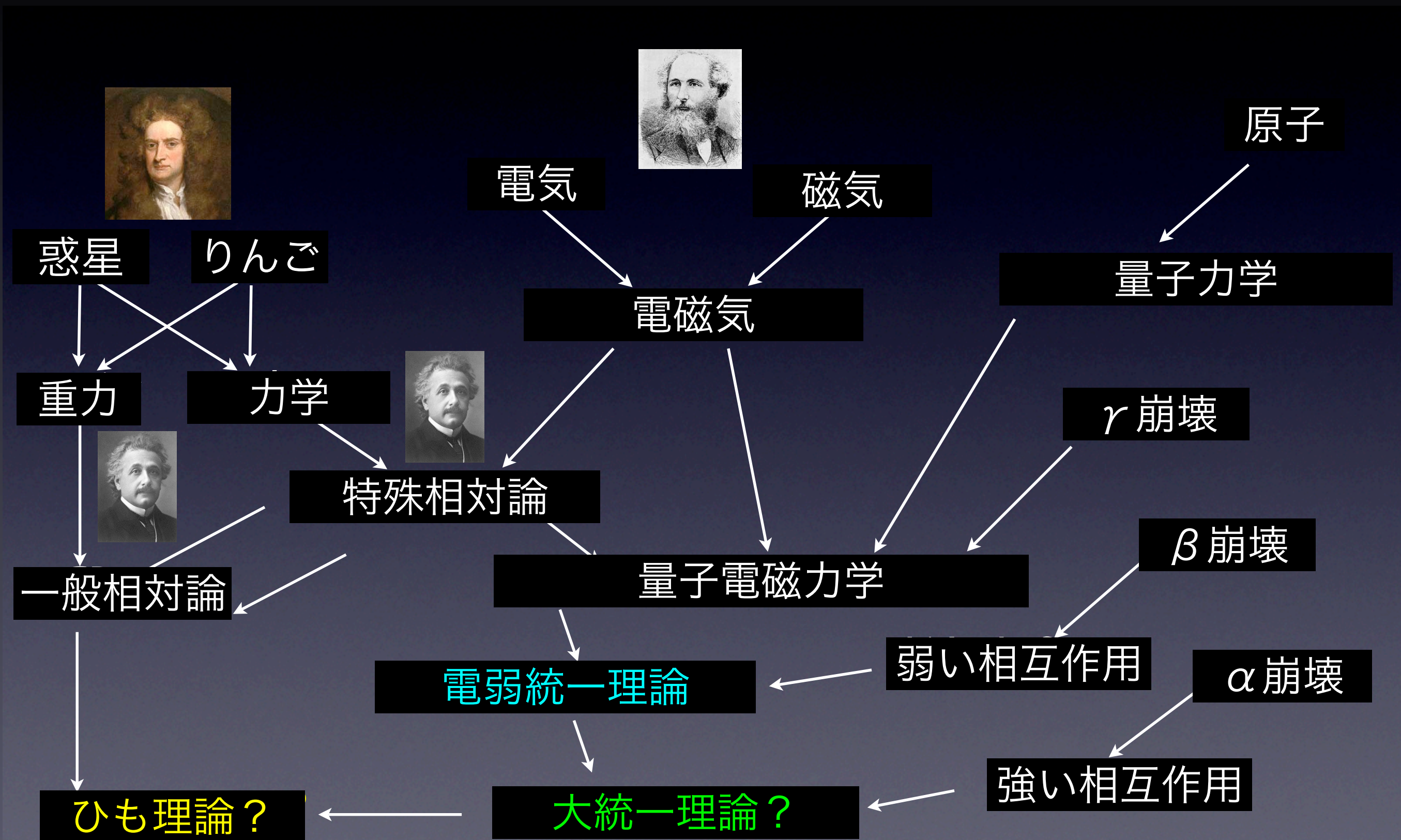
History of Unification

歴史は繰り返す



History of Unification

歴史は繰り返す

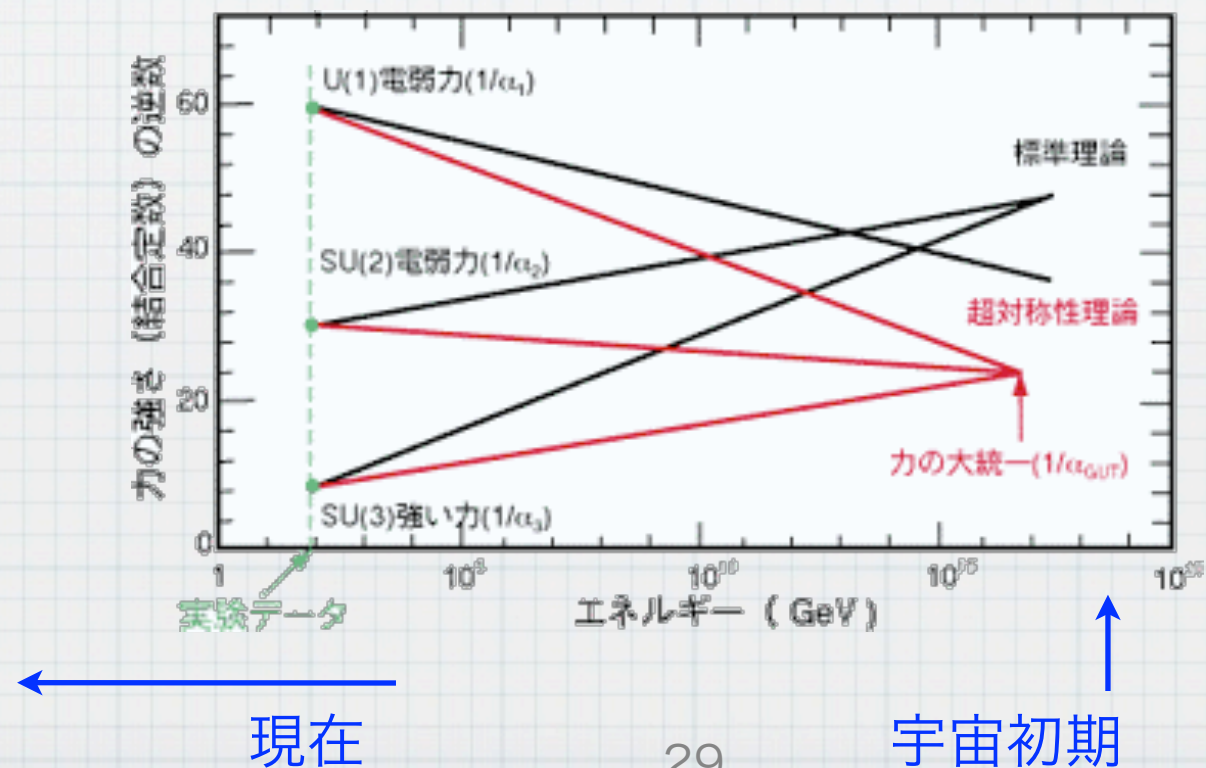
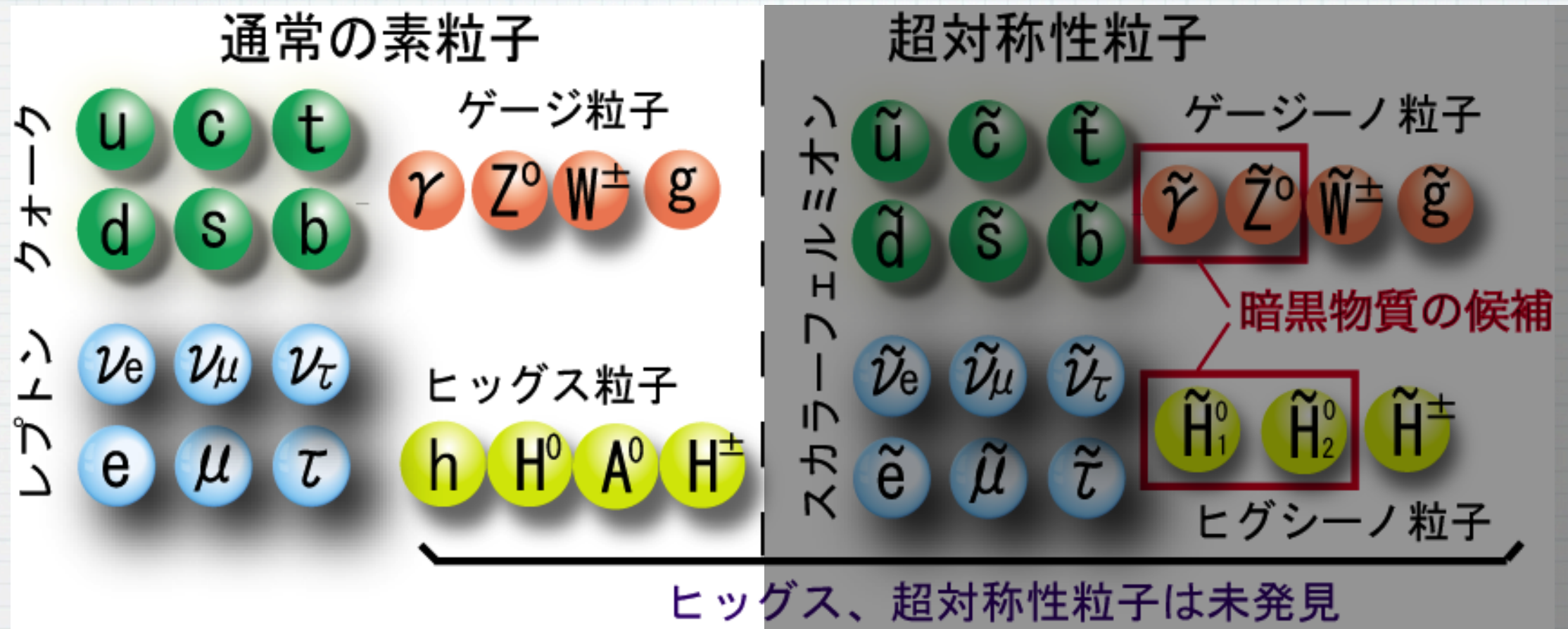


超対称性 (Supersymmetry; SUSY)

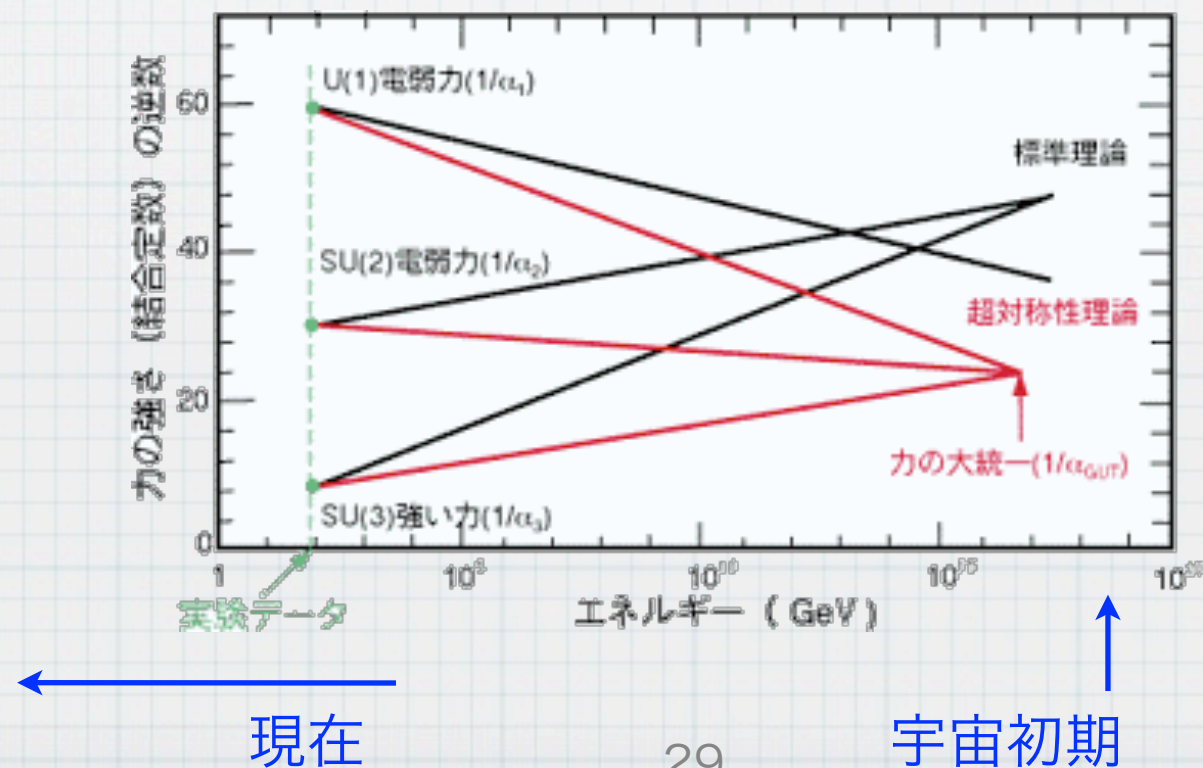
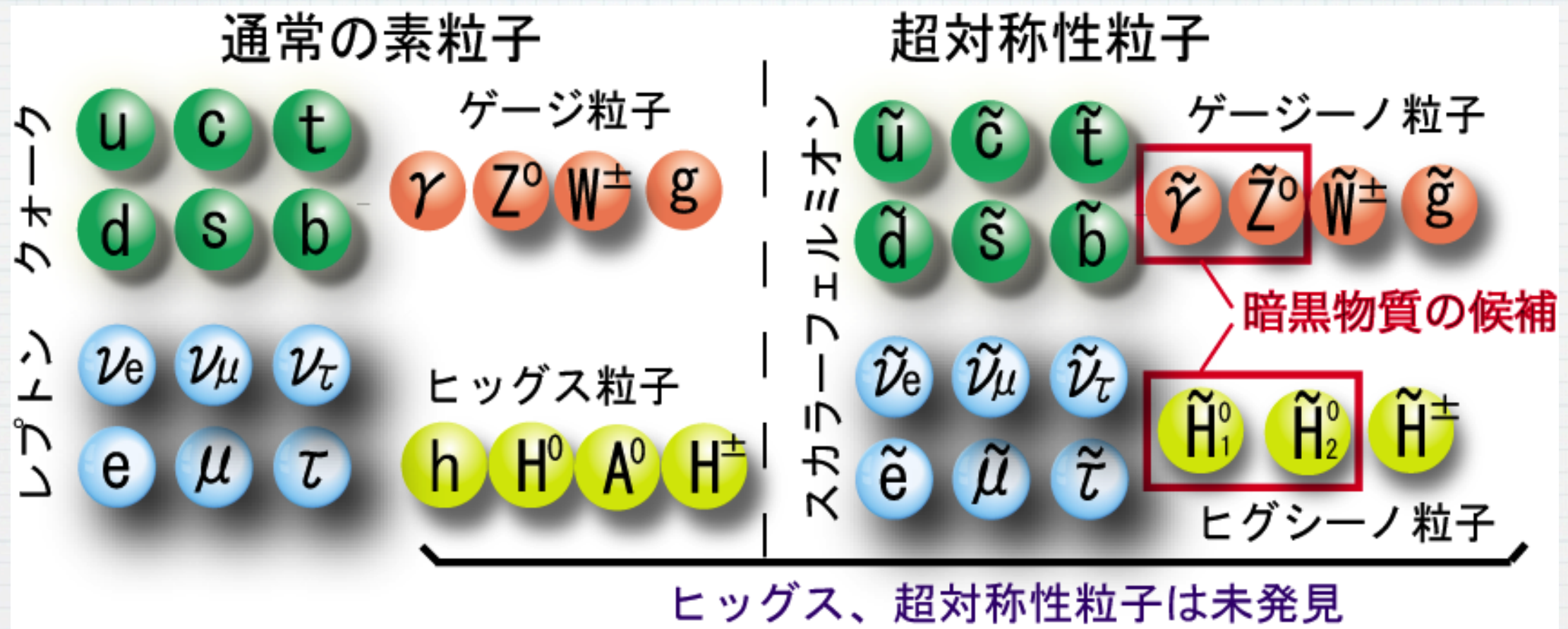
- ❖ 電弱相互作用と強い力の統一（大統一）
- ❖ 重力をも含めた力の統一（超大統一）の可能性
- ❖ 暗黒物質（ダークマター）

超対称性理論の検証をしたい

SUSY



SUSY



知らないこと

この世は3次元空間？

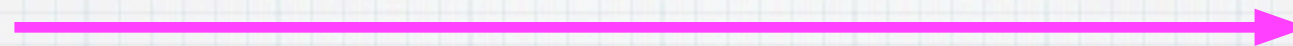
ブラックホールは
生成されるのか？

4次元時空

❖ 空間は何次元？（＋時間）

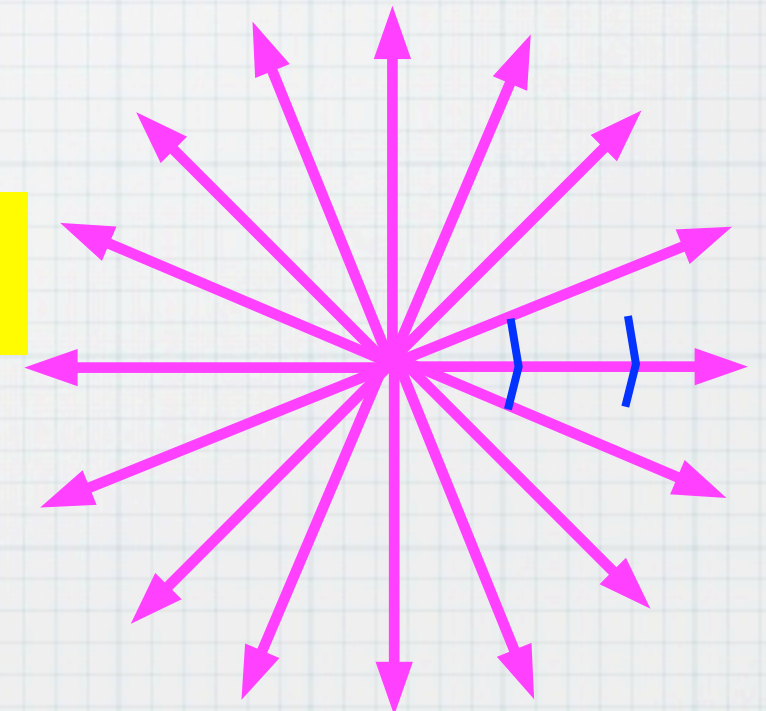
▶ 距離 r 離れたところの光の強さ

◎ 1次元なら $1/r^0$ に比例（距離によらない）



◎ 2次元なら $1/r^1$ 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 $1/(2\pi r)$

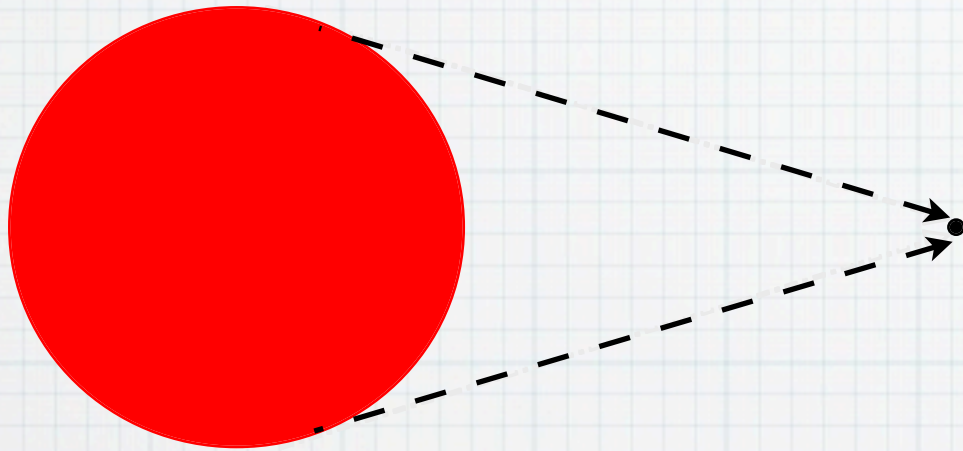


◎ 実際には $1/r^2$ に比例

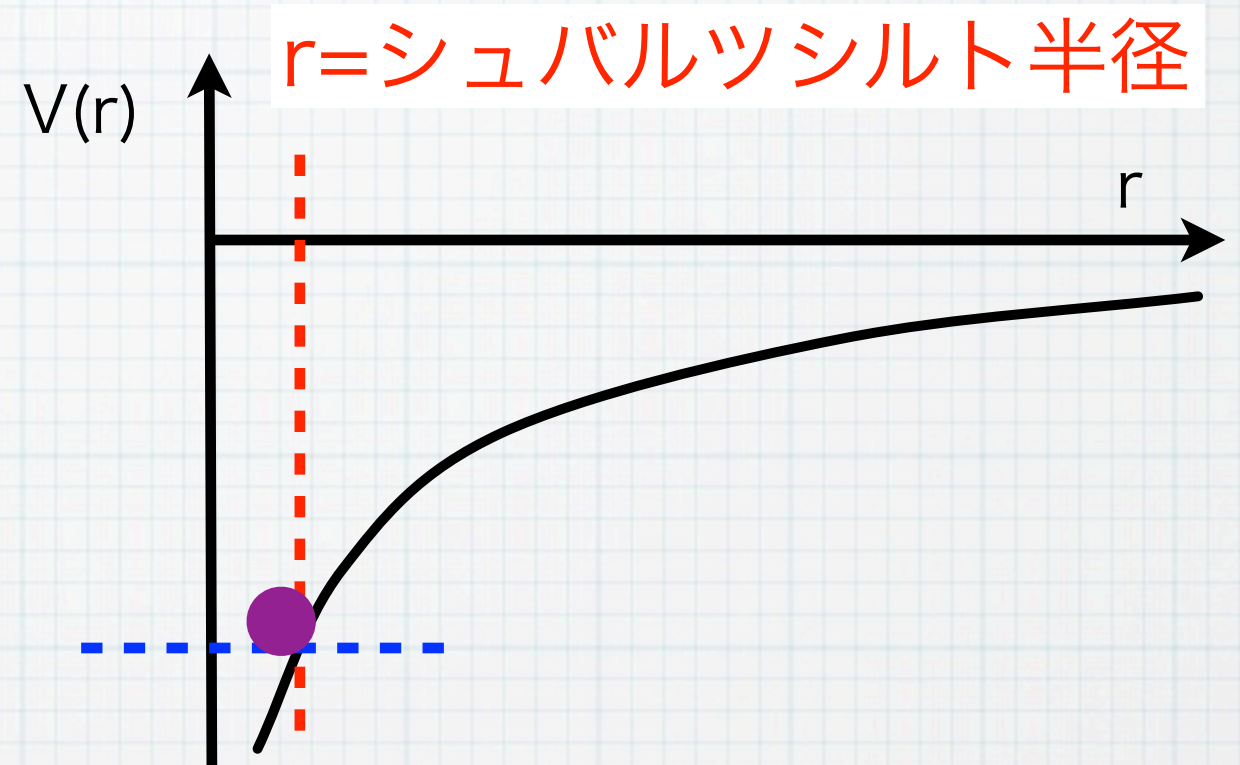
⇒ 空間は3次元

単位面積当たり受けとる光
の本数は全体の $1/(4\pi r^2)$

ブラックホール



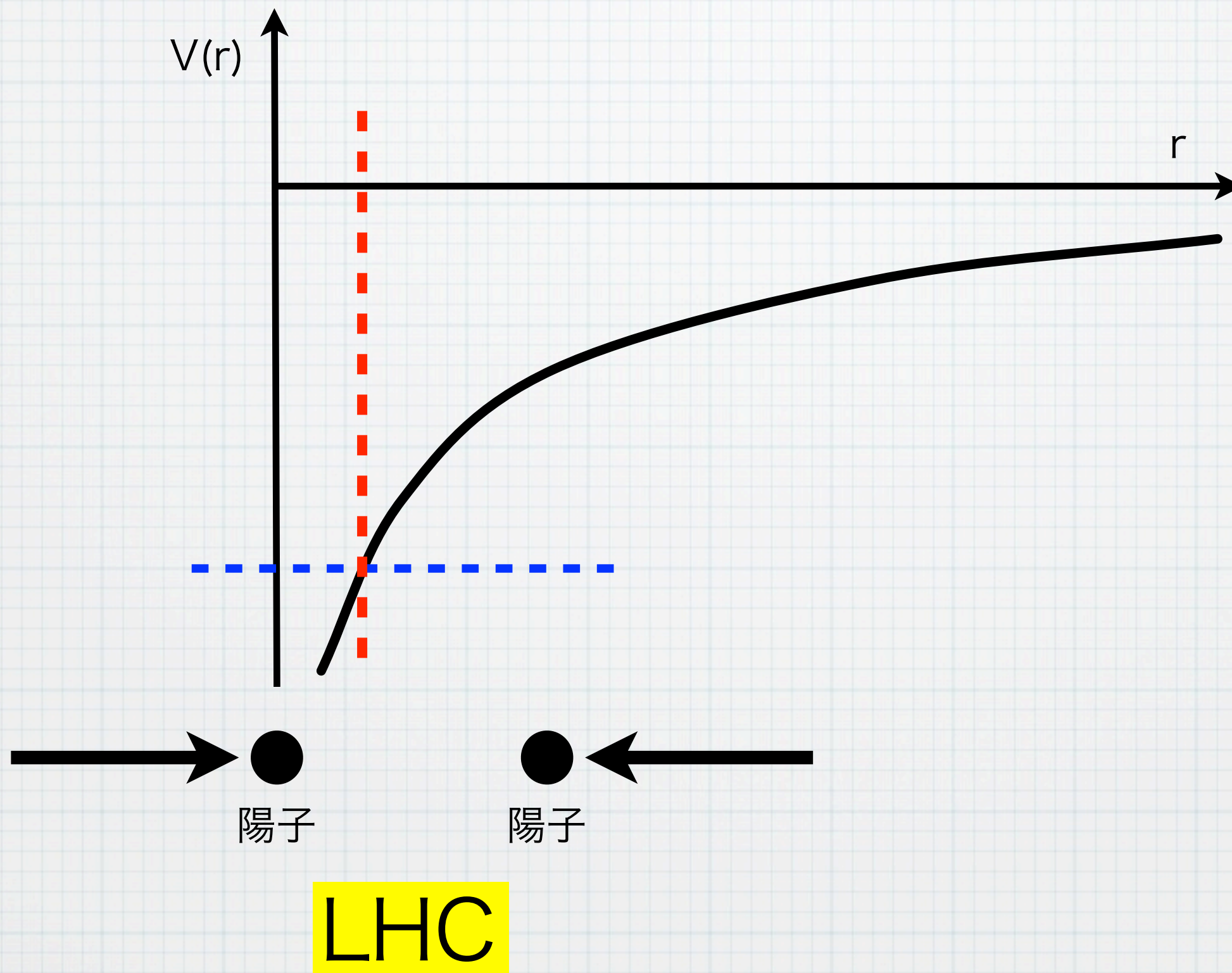
太陽(半径700,000km)
を3kmに潰せばよい



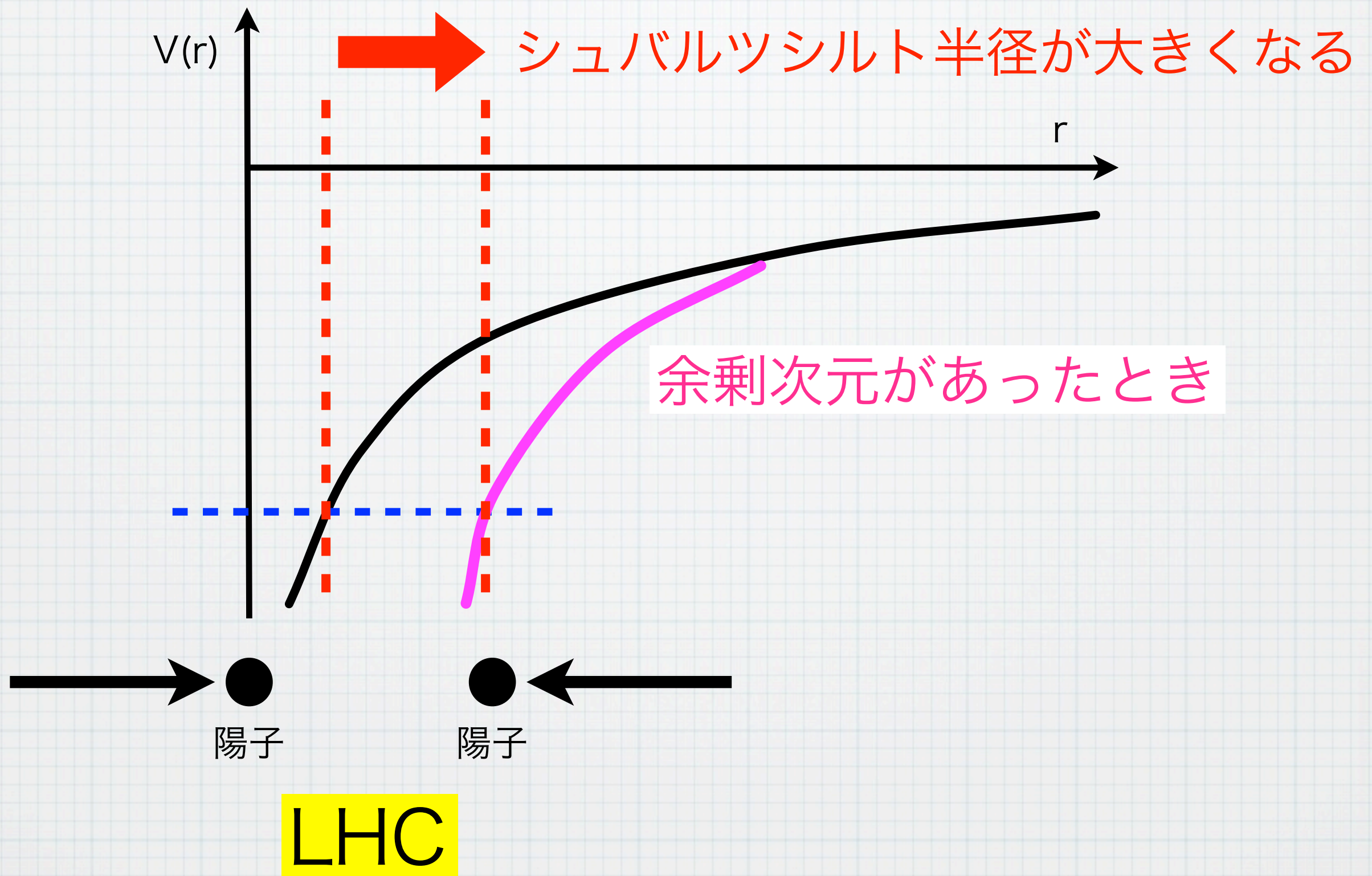
光速での運動エネルギー
＜ 重力による位置エネルギー

速度＜光速
(特殊相対性理論)

ミニブラックホール生成



ミニブラックホール生成

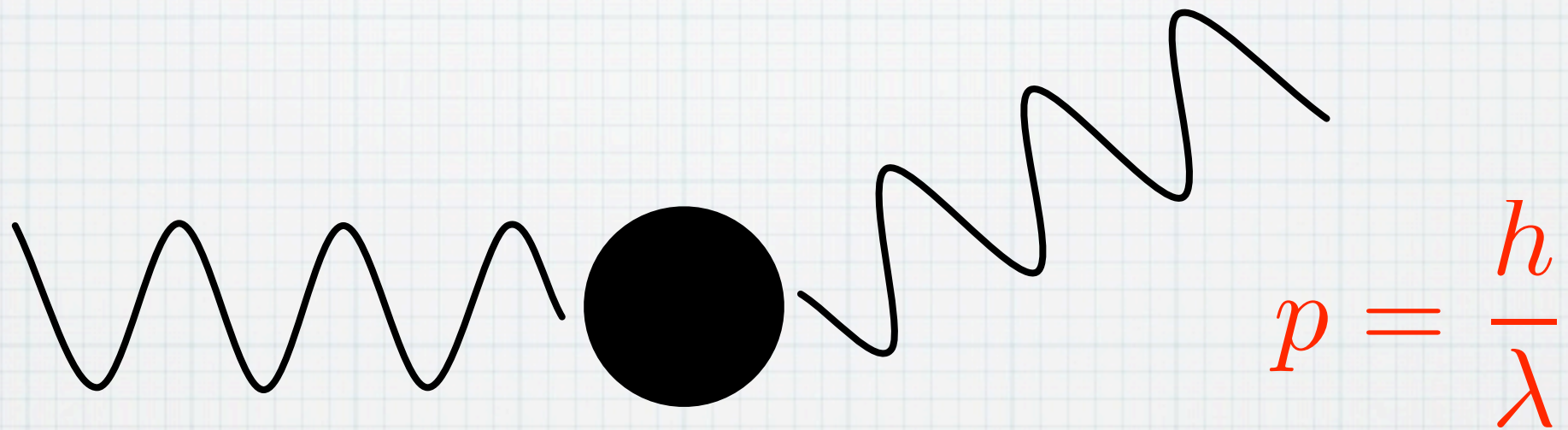


LHC実験

加速器 = 巨大顕微鏡

❖ より小さい物を”見たい”

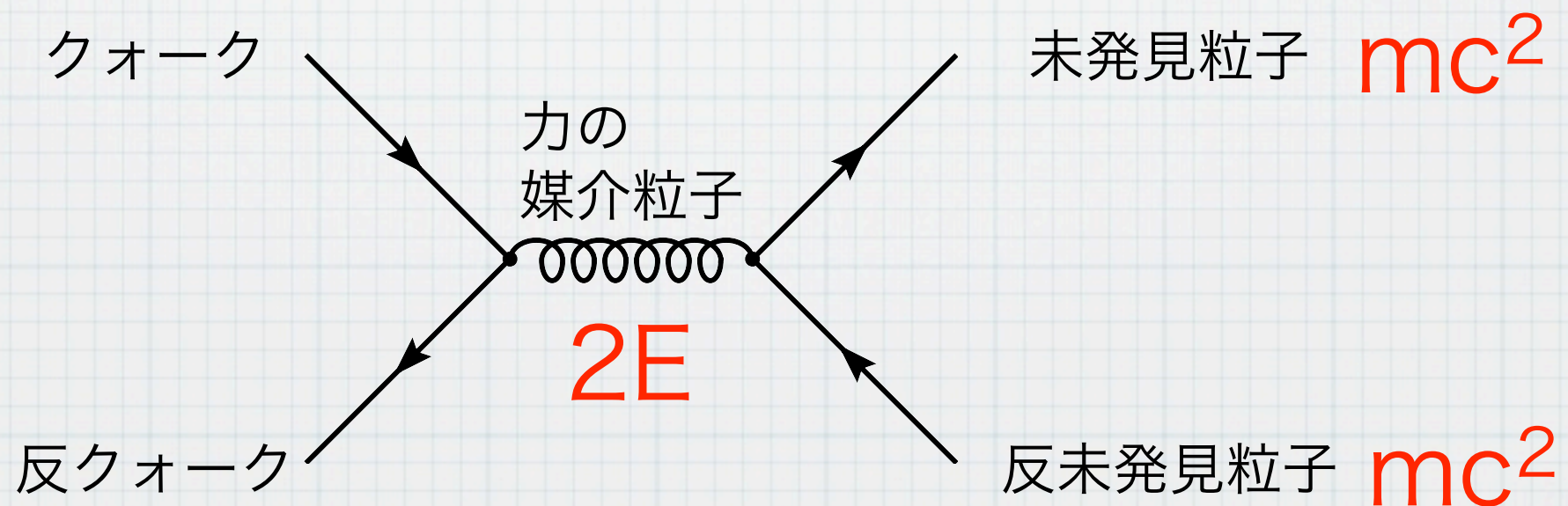
▶ ”見える”大きさは試験粒子（光）の波長程度



より小さな物を”見る”には
より短い波長 = より高い運動量
が必要

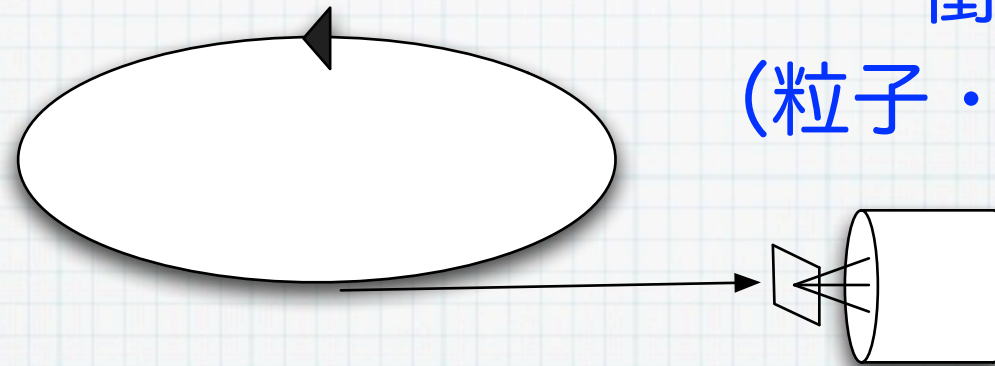
加速器 = 巨大エネルギー源

- ❖ ヒッグスや超対称性粒子は重い $E=mc^2$
 - ▶ 今までの加速器のエネルギーでは生成できなかった（と考えられる）
 - ⇒ より大きな加速器で重い粒子を作ろう
 - ⇒ LHC



素粒子実験で使われる加速器

❖ 固定標的型 (fixed target)



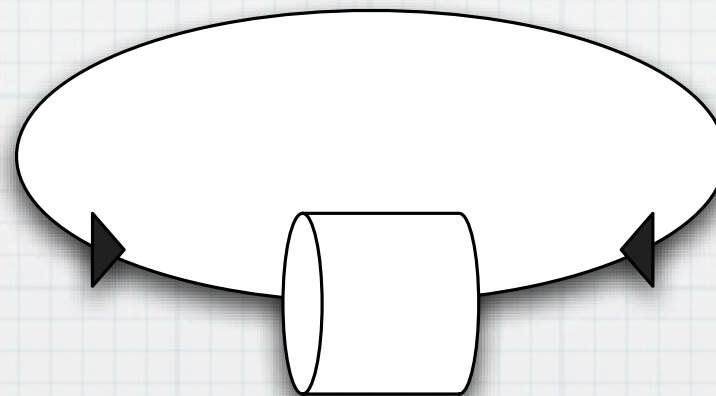
衝突の頻度が高い
(粒子・物質 vs 粒子・粒子)

◆ 重心系衝突エネルギー $\sqrt{2mE}$

❖ 衝突型 (コライダー collider)

▶ 円形蓄積型

▶ 線形



エネルギーを有効利用
重い粒子の探索に有利

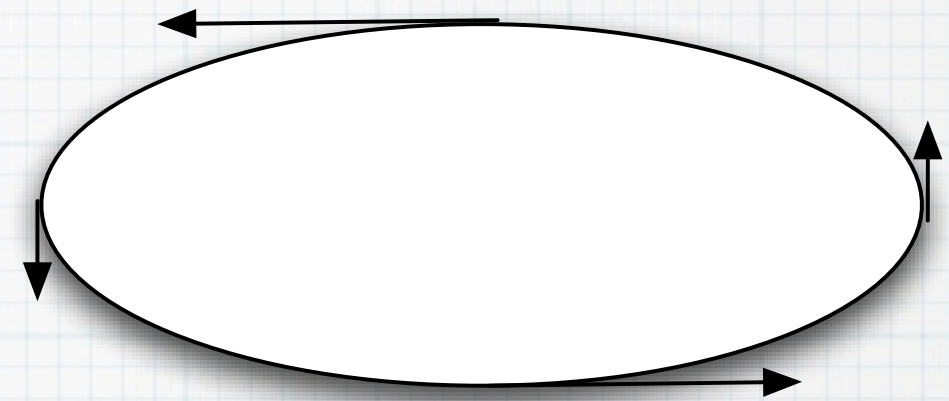
◆ 重心系衝突エネルギー $2E$

円形コライダー

❖ 電子は曲がると放射光を出してエネルギーを失う

▶ 1周で失うエネルギー

$$\Delta E \propto \frac{(E/m)^4}{R}$$



E: 粒子のエネルギー
m: 粒子の質量
R: 半径

▶ 一定の速さで回転させるだけでも、対応するエネルギー（=電力）が必要

▶ より高エネルギーに加速するには

◎ 重い粒子

◎ 大きなR ($R \rightarrow \infty$ が線形衝突型 linear collider)

電子 vs 陽子

❖ 同じ大きさの加速器の比較

▶ $R=2800\text{m}$, 直線 9km , 曲線 18km

◎ 電子・陽電子衝突型

★ ビームエネルギー 104.5 GeV

★ 1周でのエネルギー損失 3.8 GeV ($=3.6\%$)

★ 曲げるための磁場 $B = p/(0.3R) \sim 0.1\text{ T}$

◎ 陽子・（反）陽子衝突型

★ ビームエネルギー 7000 GeV

★ 1周でのエネルギー損失 7keV ($=10^{-9}$)

★ 曲げるための磁場 $B = p/(0.3R) \sim 8.3\text{ T}$

電子 vs 陽子

❖ 同じ大きさの加速器の比較

▶ $R=2800\text{m}$, 直線 9km , 曲線 18km

◎ 電子・陽電子衝突型

★ ビームエネルギー 1045 GeV

★ 1周で **いかに加速するか** 3.6% ($=3.6\%$)

★ 曲げるための磁場 $B = p/(0.3R) \sim 0.1\text{ T}$

◎ 陽子・（反）陽子衝突型

★ ビームエネルギー 7000 GeV

★ 1周でのエネルギー損失 7keV ($=10^{-9}$)

★ 曲げるための磁場 $B = p/(0.3R) \sim 8.3\text{ T}$

電子 vs 陽子

❖ 同じ大きさの加速器の比較

▶ $R=2800\text{m}$, 直線 9km , 曲線 18km

◎ 電子・陽電子衝突型

★ ビームエネルギー 1045 GeV

★ 1周で **いかに加速するか** $\sim 3.6\%$ ($=3.6\%$)

★ 曲げるための磁場 $B = p/(0.3R) \sim 0.1\text{ T}$

◎ 陽子・（反）陽子衝突型

★ ビームエネルギー 7000 GeV

★ 1周での **いかに曲げるか** $\sim 10^{-9}$ ($=10^{-9}$)

★ 曲げるための磁場 $B = p/(0.3R) \sim 8.3\text{ T}$

LHC実験

- ❖ CERN研究所にある大型陽子陽子衝突型加速器
(=Large Hadron Collider; LHC)
 - ▶ ジュネーブ近郊、スイス・フランス国境
 - ▶ 4つの大きな実験グループ
 - ◎ その一つがATLAS実験
 - ★ 3000人近い物理学者による国際共同実験
 - ▶ 7TeVと7TeVの陽子を正面衝突させる
 - ◎ $7\text{TeV} = 7 \times 10^{12} \text{ eV} \sim 7\text{京度}$

ちょっとだけ特殊相対論

❖ いかなる物質・情報も光速以下

- ▶ 粒子を光速近くまで加速するのは大変

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

m_0 : 静止している時の質量
 v : 粒子の速度
 c : 光速

❖ LHCが設計通りに動いた場合 (7TeV+7TeV)

- ▶ 陽子の速度 = 0.99999999991 x 光速

❖ これまでの世界最高 (米国フェルミ研究所)

- ▶ 陽子の速度 = 0.9999999560 x 光速

ちょっとだけ特殊相対論

❖ いかなる物質・情報も光速以下

- ▶ 粒子を光速近くまで加速するのは大変

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

m_0 : 静止している時の質量
 v : 粒子の速度
 c : 光速

❖ LHCが設計通りに動いた場合 (7TeV+7TeV)

- ▶ 陽子の速度 = 0.99999999991 x 光速
= 光速 - 10km/h

❖ これまでの世界最高 (米国フェルミ研究所)

- ▶ 陽子の速度 = 0.9999999560 x 光速

ちょっとだけ特殊相対論

❖ いかなる物質・情報も光速以下

- ▶ 粒子を光速近くまで加速するのは大変

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

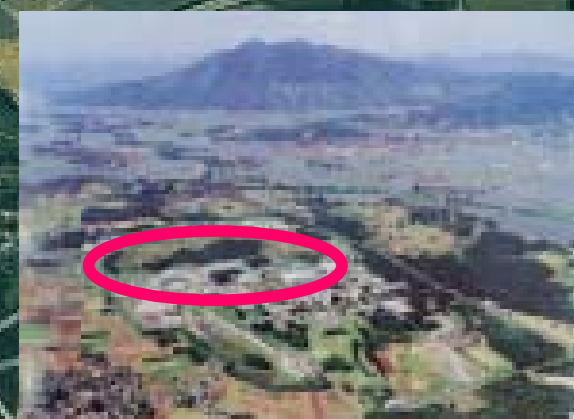
m_0 : 静止している時の質量
 v : 粒子の速度
 c : 光速

❖ LHCが設計通りに動いた場合 (7TeV+7TeV)

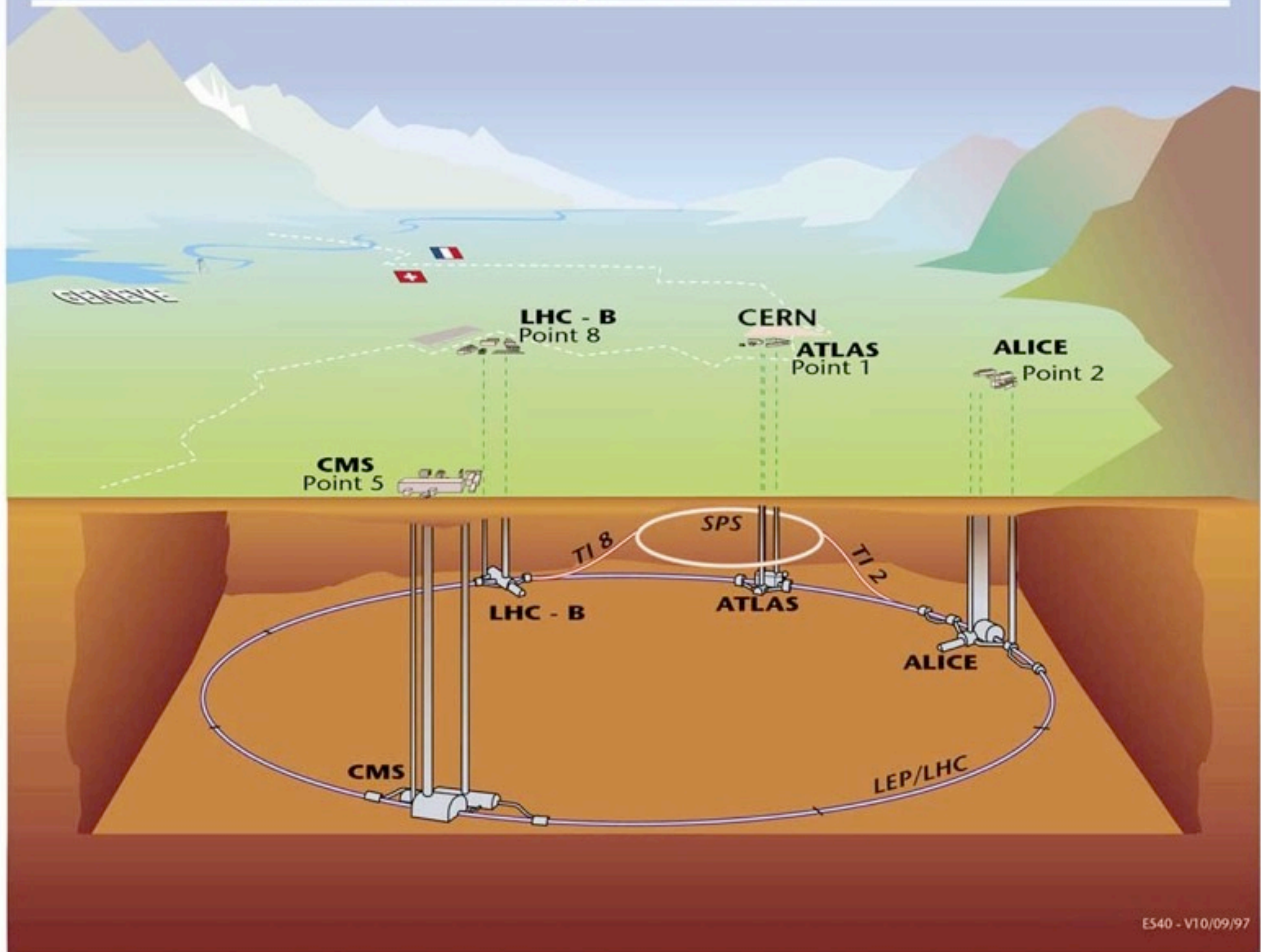
- ▶ 陽子の速度 = 0.99999999991 x 光速
= 光速 - 10km/h

❖ これまでの世界最高 (米国フェルミ研究所)

- ▶ 陽子の速度 = 0.9999999560 x 光速
= 光速 - 475km/h



Overall view of the LHC experiments.

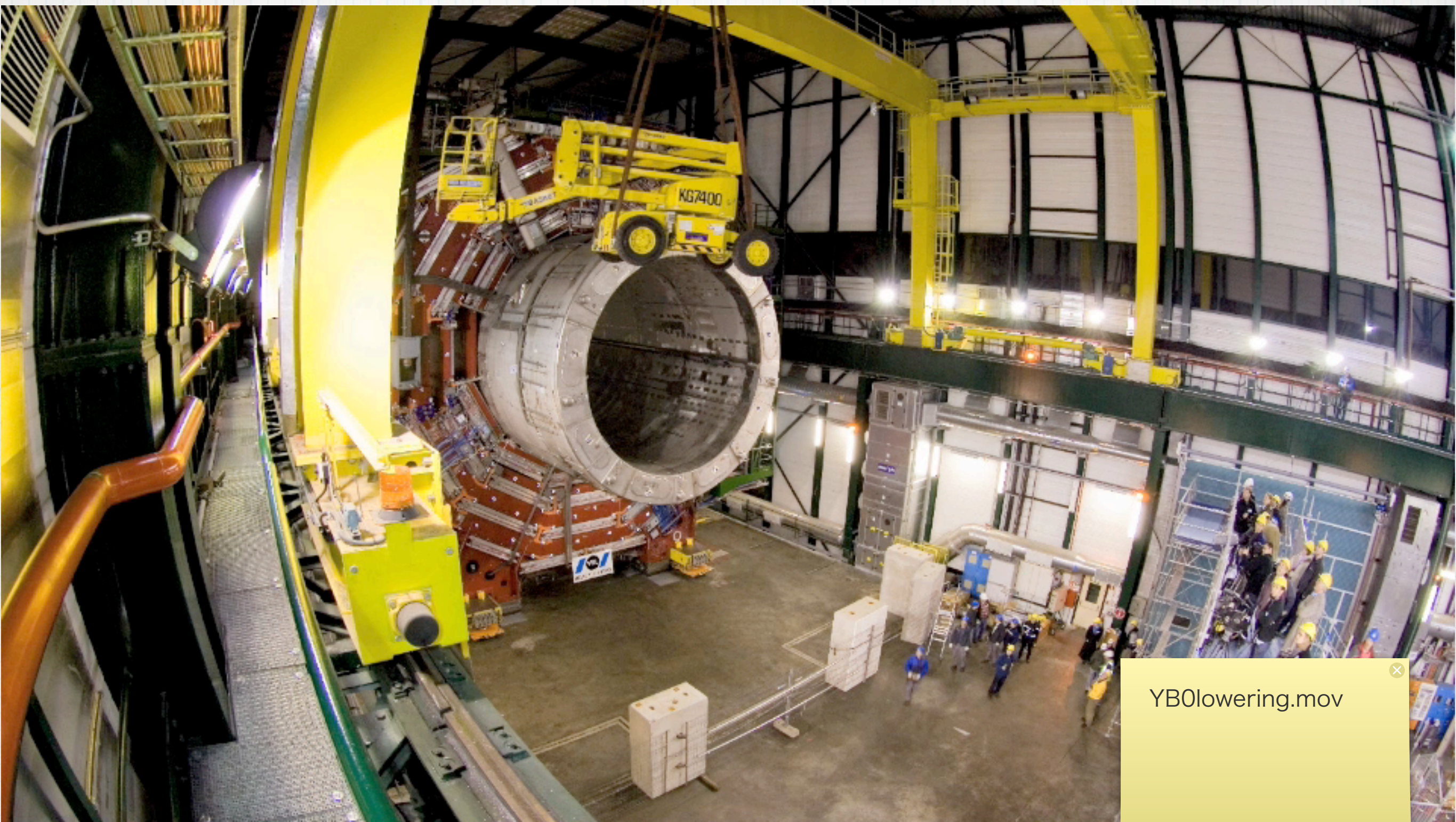


Overall view of the LHC experiments.



地下100m
全長27km
温度 -271°C

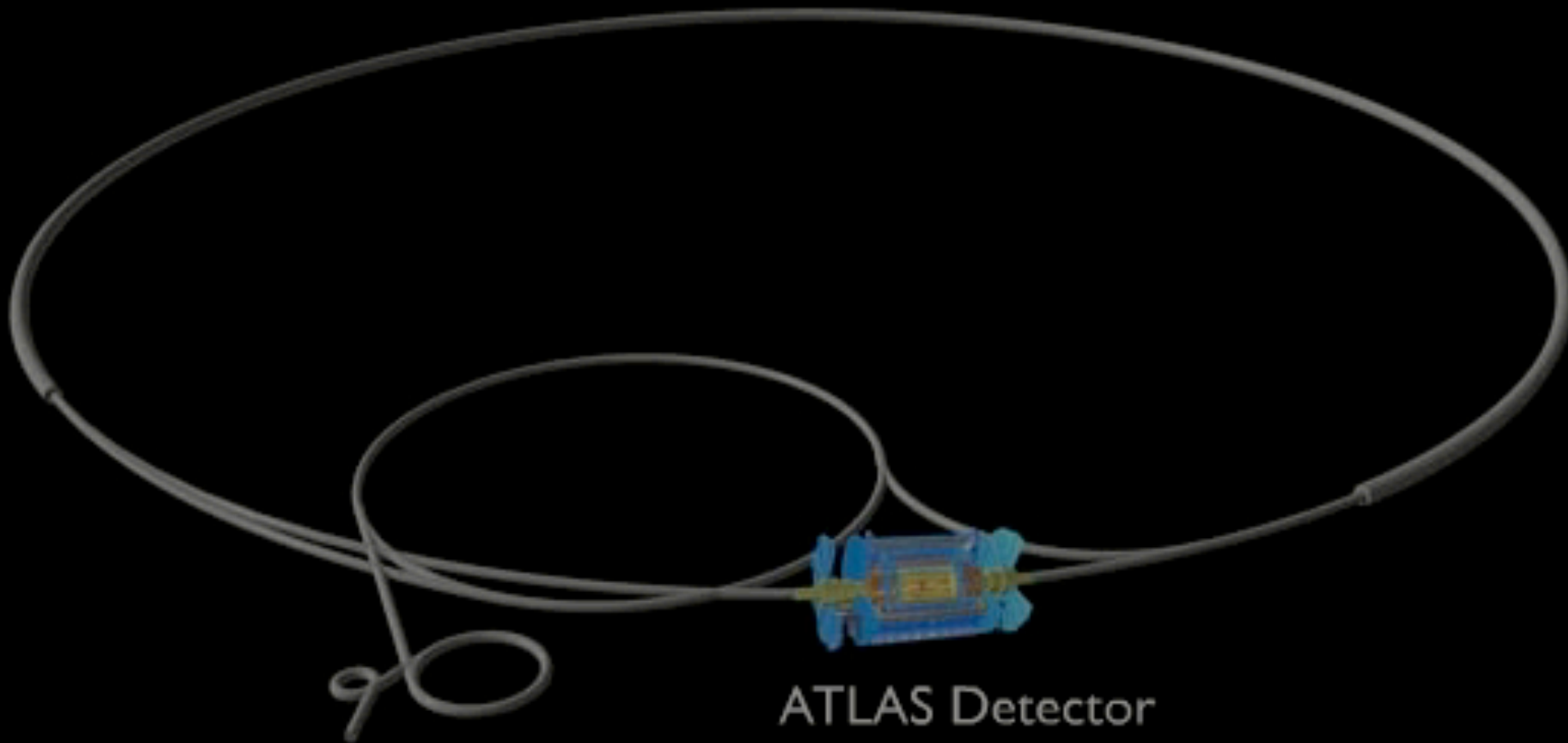
Built-in-1 minute.mov



YB0lowering.mov

PLAY ▶

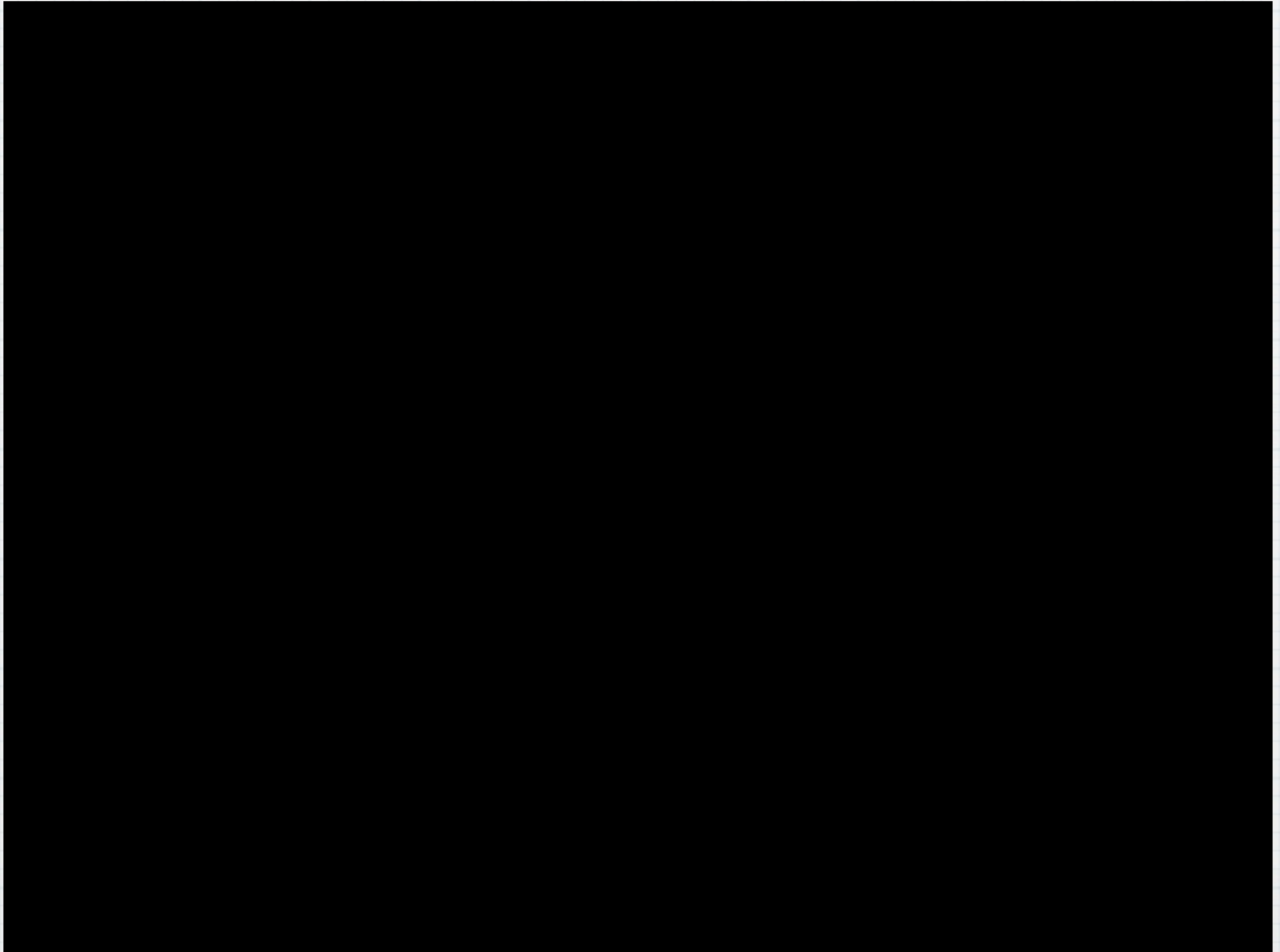
Large Hadron Collider



ATLAS Detector

LHC-event.mov

実際の3.5TeV+3.5TeVの衝突の様子



まとめ

