

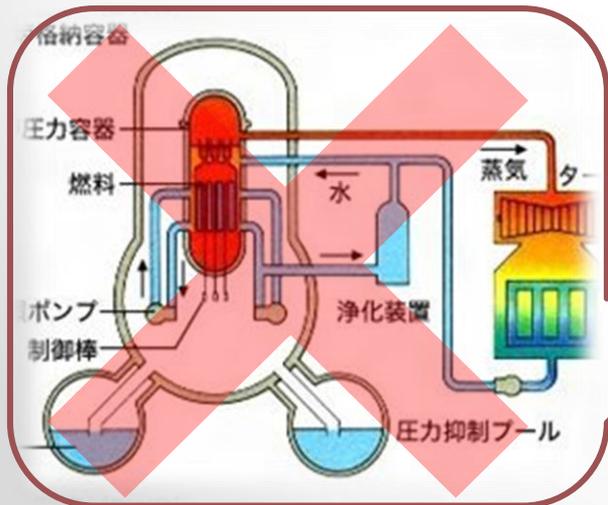
# クォーク・グルオン・プラズマ ビッグバン直後の宇宙の世界

北沢正清

原子核理論研究室



# クォーク・グルオン・プラズマ ビッグバン直後の宇宙の世界



北沢正清  
原子核理論研究室

# 自然界の不思議

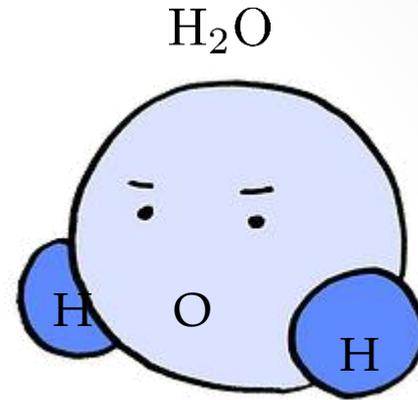
➤ 我々は、何でできているのだろうか？

- 物質を分割していくと、何に辿り着くのか？
- それらは、どのような法則に従って運動するのか？

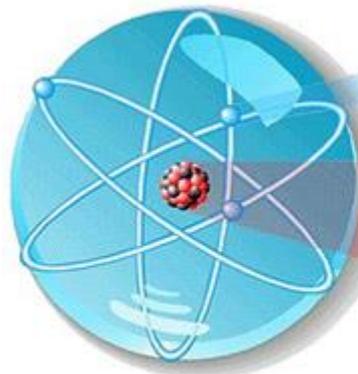
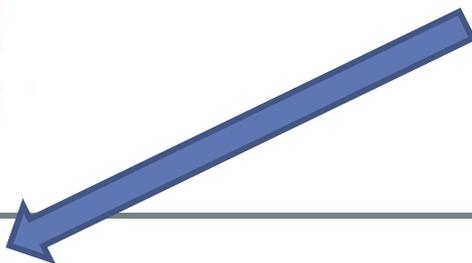
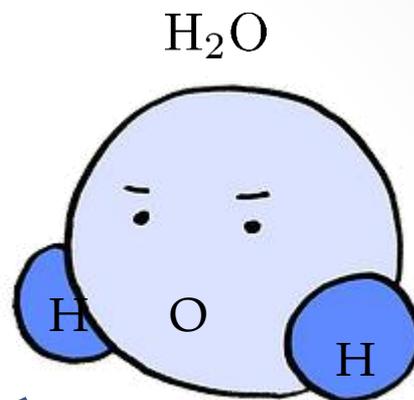
➤ 我々が存在する世界とは、何なのだろうか？

- 時間／空間とは何だろうか？
- 時間に始まりはあるのか？
- 空間に果てはあるのか？

# モノはなにからできている？

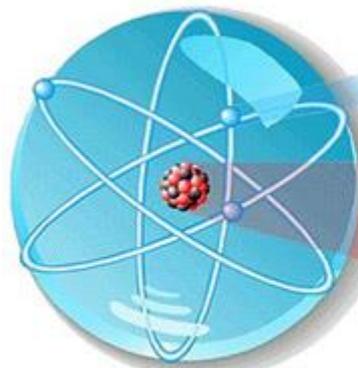
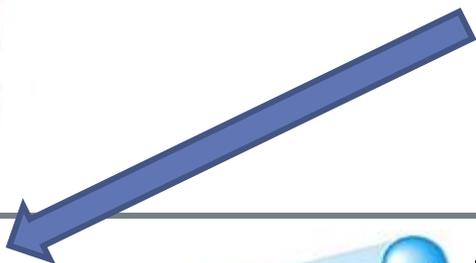
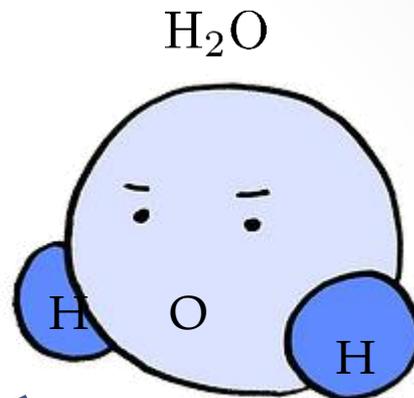


# モノはなにからできている？



原子 $\sim 10^{-8}\text{cm}$

# モノはなにからできている？



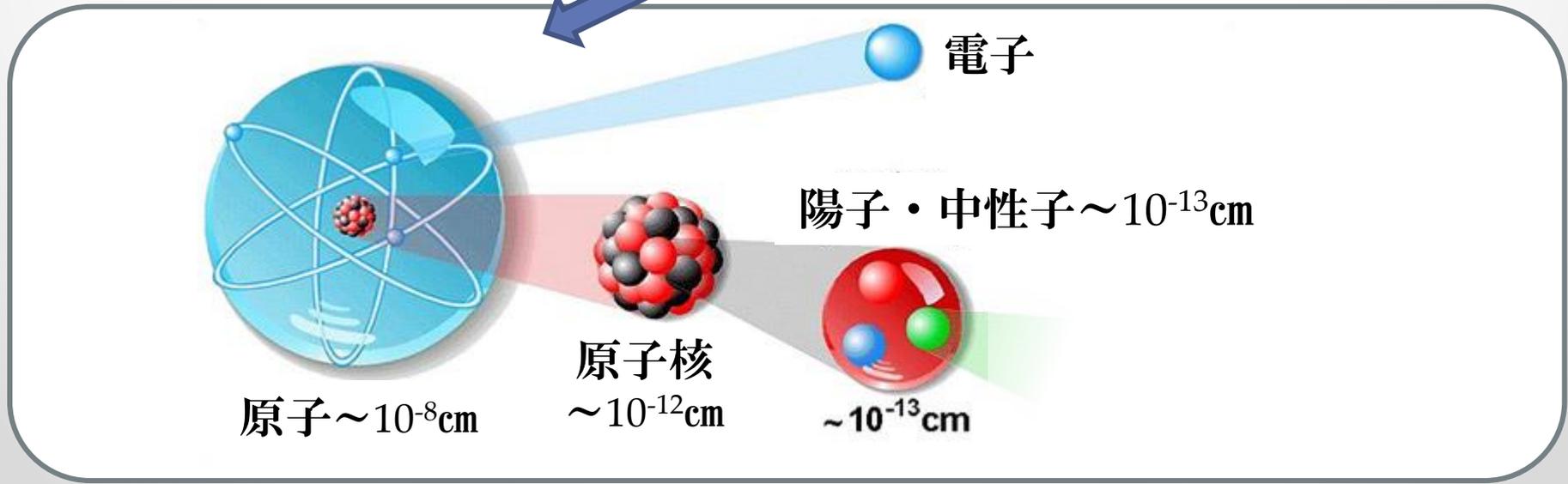
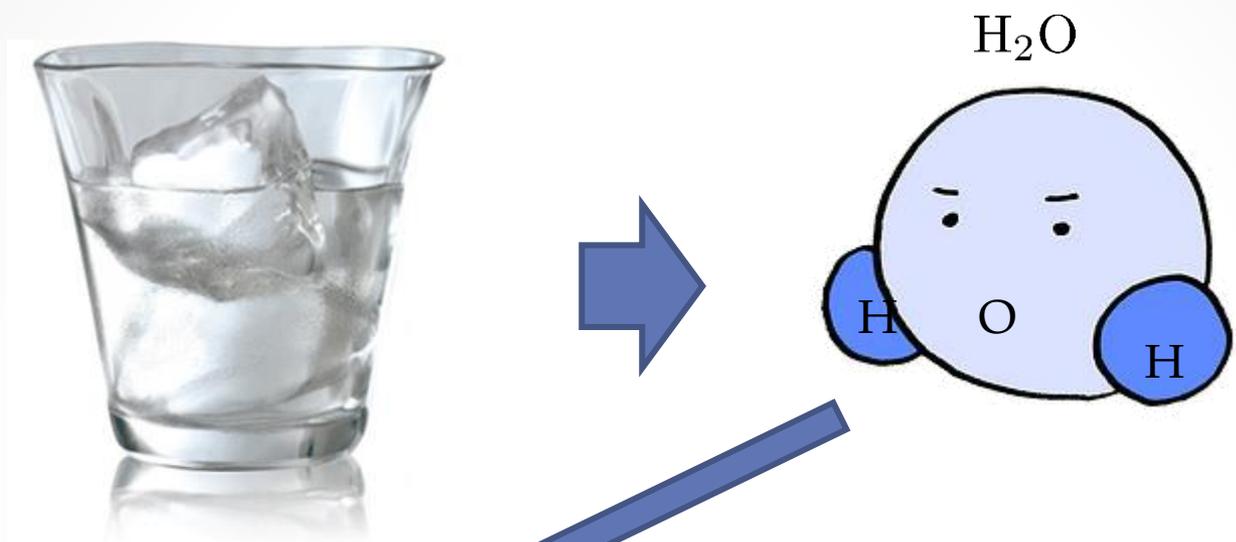
原子  $\sim 10^{-8} \text{cm}$



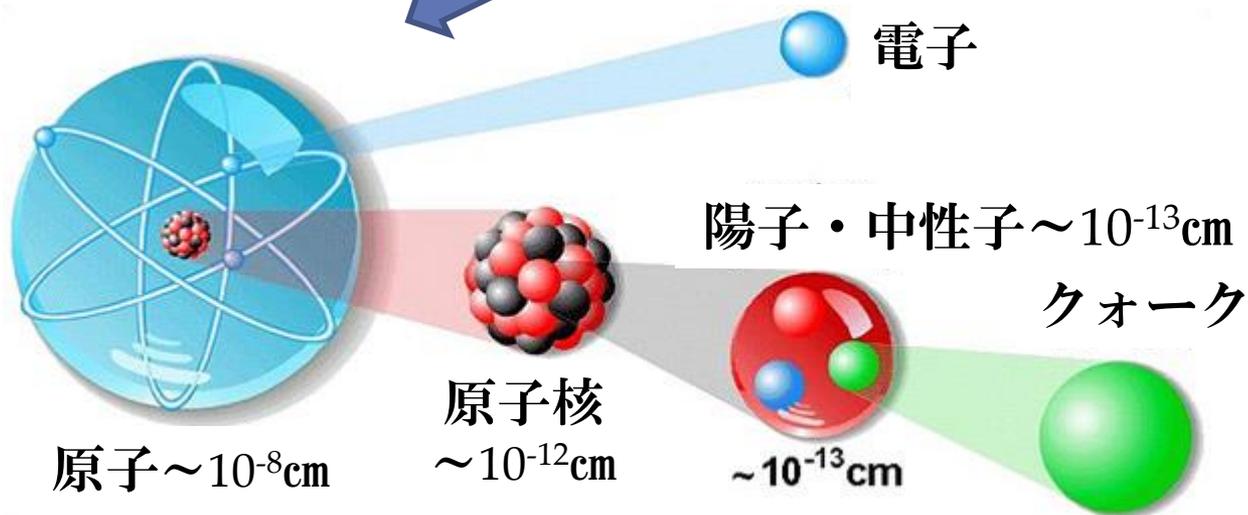
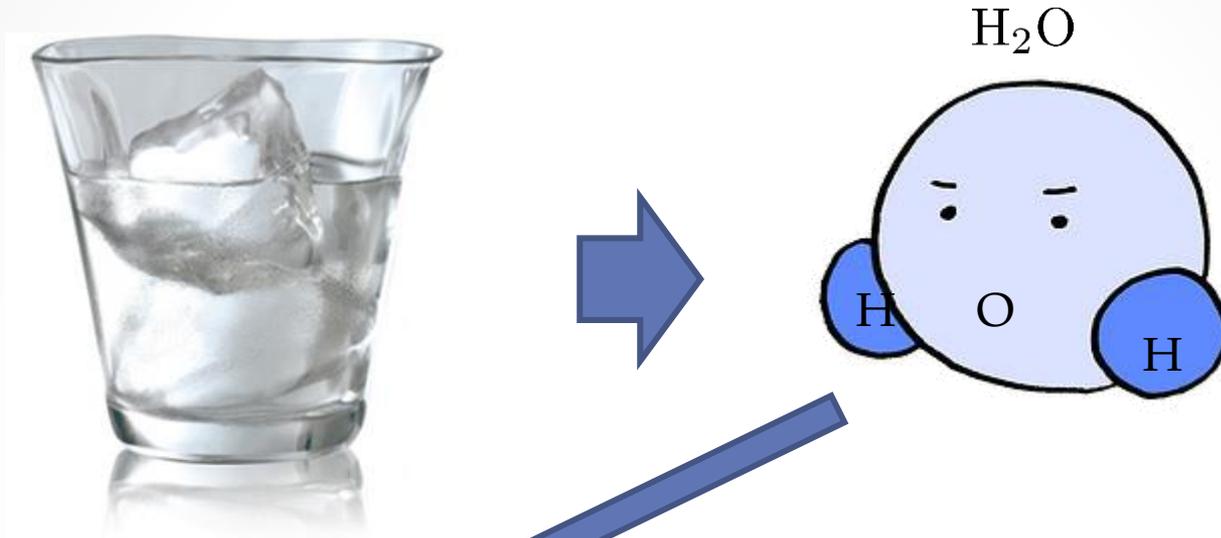
原子核  
 $\sim 10^{-12} \text{cm}$

電子

# モノはなにからできている？



# モノはなにからできている？



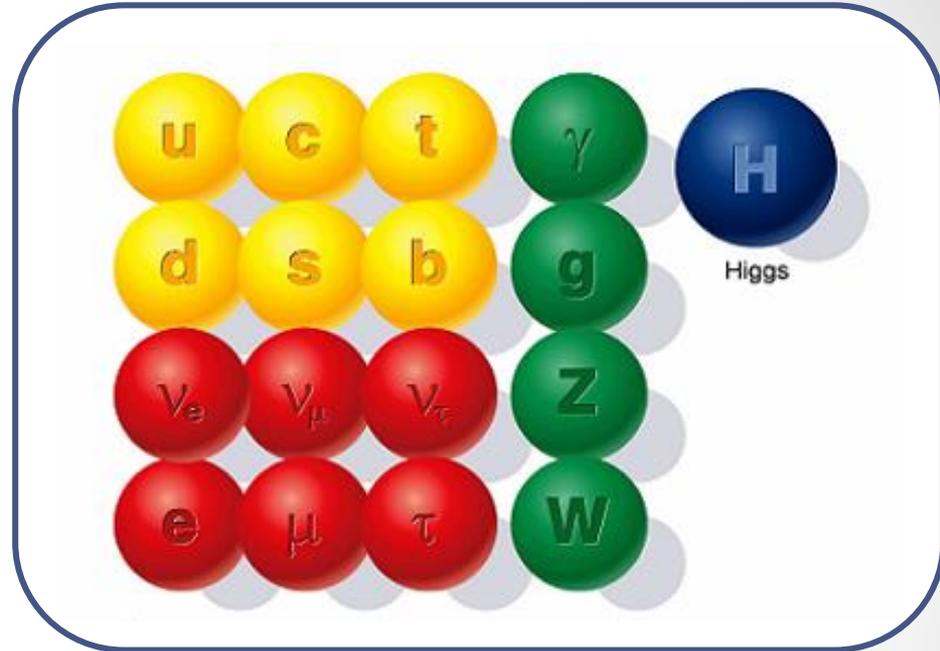
# 標準模型

## ➤ 物質の構成要素

- クォーク (6種類)

- レプトン

- 電子など
- ニュートリノ



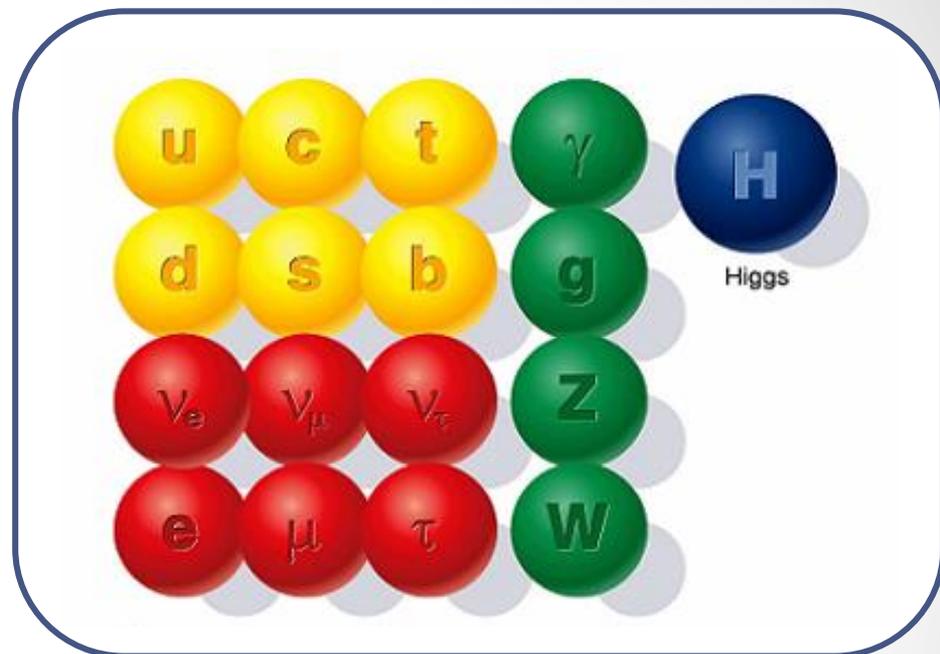
# 標準模型

## ➤ 物質の構成要素

• クォーク (6種類)

• レプトン

- 電子など
- ニュートリノ



## ➤ 物質の相互作用：粒子による媒介

- 電磁相互作用  $\gamma$
- 弱い力  $Z, W$
- 強い力  $g$

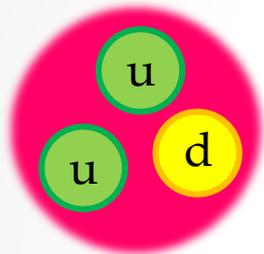
電弱統一理論

量子色力学

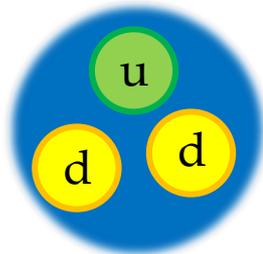
大統一理論?

# クォークの性質

➤ クォークは分数電荷を持つ



陽子  
電荷 + 1

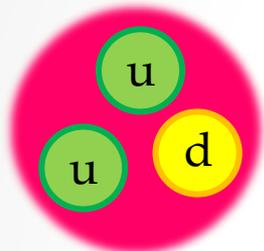


中性子  
電荷 0

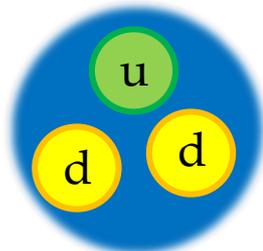


# クォークの性質

- クォークは分数電荷を持つ



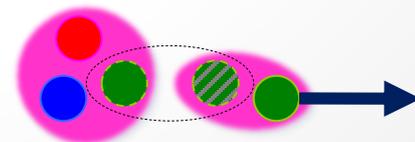
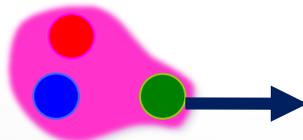
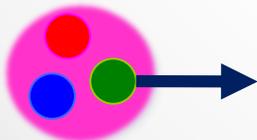
陽子  
電荷 + 1



中性子  
電荷 0



- クォークは、単独では観測できない  
無理矢理引っ張り出そうとすると...



# クォークの基礎理論 ＝量子色力学

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu,a}F_a^{\mu\nu}$$

- ものすごく難しい。
- 最近は、直接解くことをあきらめて  
スパコンで解析する研究が活発。

# 我々とは、何なのだろうか？

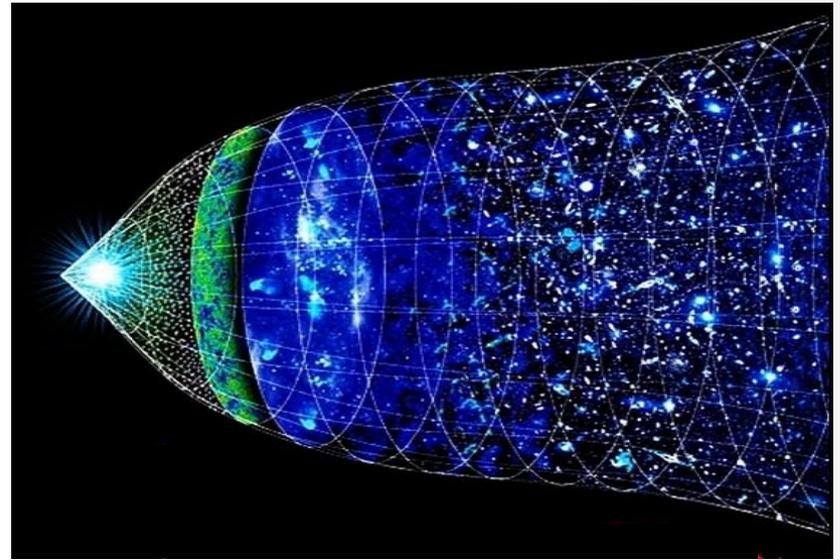
➤ 我々は、何でできているのだろうか？

- 物質を分割していくと、何に辿り着くのか？
- それらは、どのような法則に従って運動するのか？

➤ 我々が存在する世界とは、何なのだろうか？

- 時間／空間とは何だろうか？
- 時間に始まりはあるのか？
- 空間に果てはあるのか？

# 我々の宇宙は、ビッグバンから始まった



時空の構造は、内部の物質と共に変化する  
(アインシュタインの一般相対性理論)

宇宙は超高温状態から開闢した。

初期宇宙の姿は、現代とは全く違うものだった

# なぜそんなことが分かるの？

## ①宇宙は膨張している

遠い星ほど早く遠ざかるーハッブルの法則

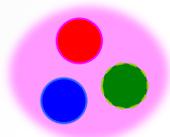
## ②宇宙を構成する元素の比率

水素75%、ヘリウム25%、他ごくわずか

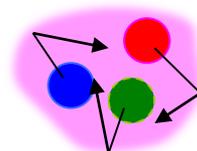
## ③宇宙背景放射

宇宙は2.7Kの黒体放射をしている

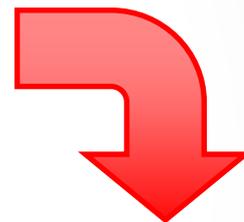
# クォークグルオンプラズマ



核子をどんどん  
熱していくと...



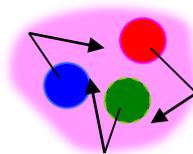
次第に熱運動が  
激しくなり...



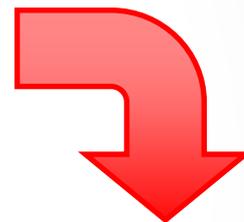
# クォークグルオンプラズマ



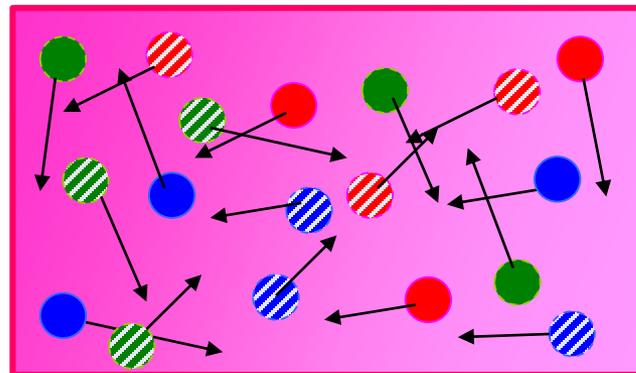
核子をどんどん  
熱していくと...



次第に熱運動が  
激しくなり...



約2兆度に達すると

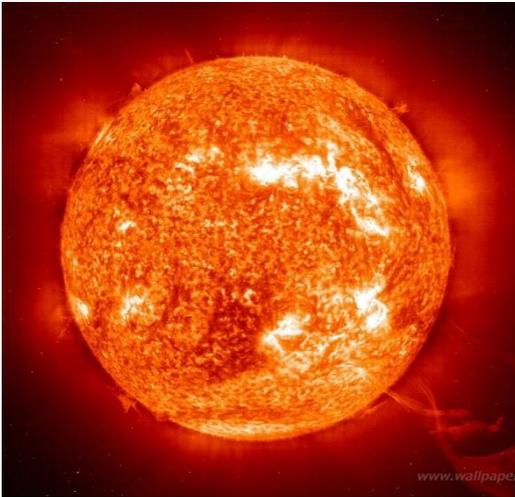


クォークが自由に飛び  
回る世界が実現する！

- QGP状態は、ビッグバン直後 ( $t < 10^{-5}$ 秒) の宇宙の姿
- 宇宙は、進化の過程で相転移を起こした。

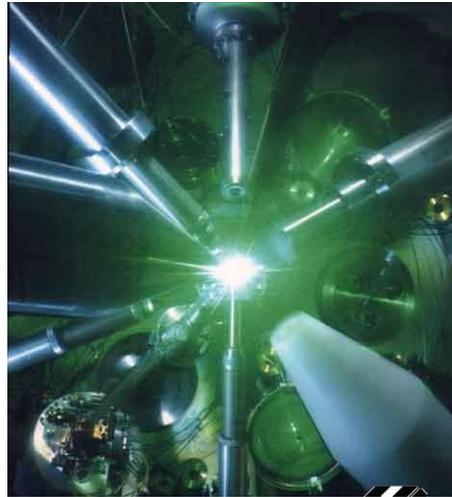
# 高温の物質

太陽



表面：5800K  
中心：1500万K

阪大レーザー研



10億K

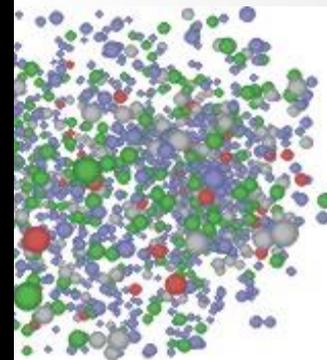
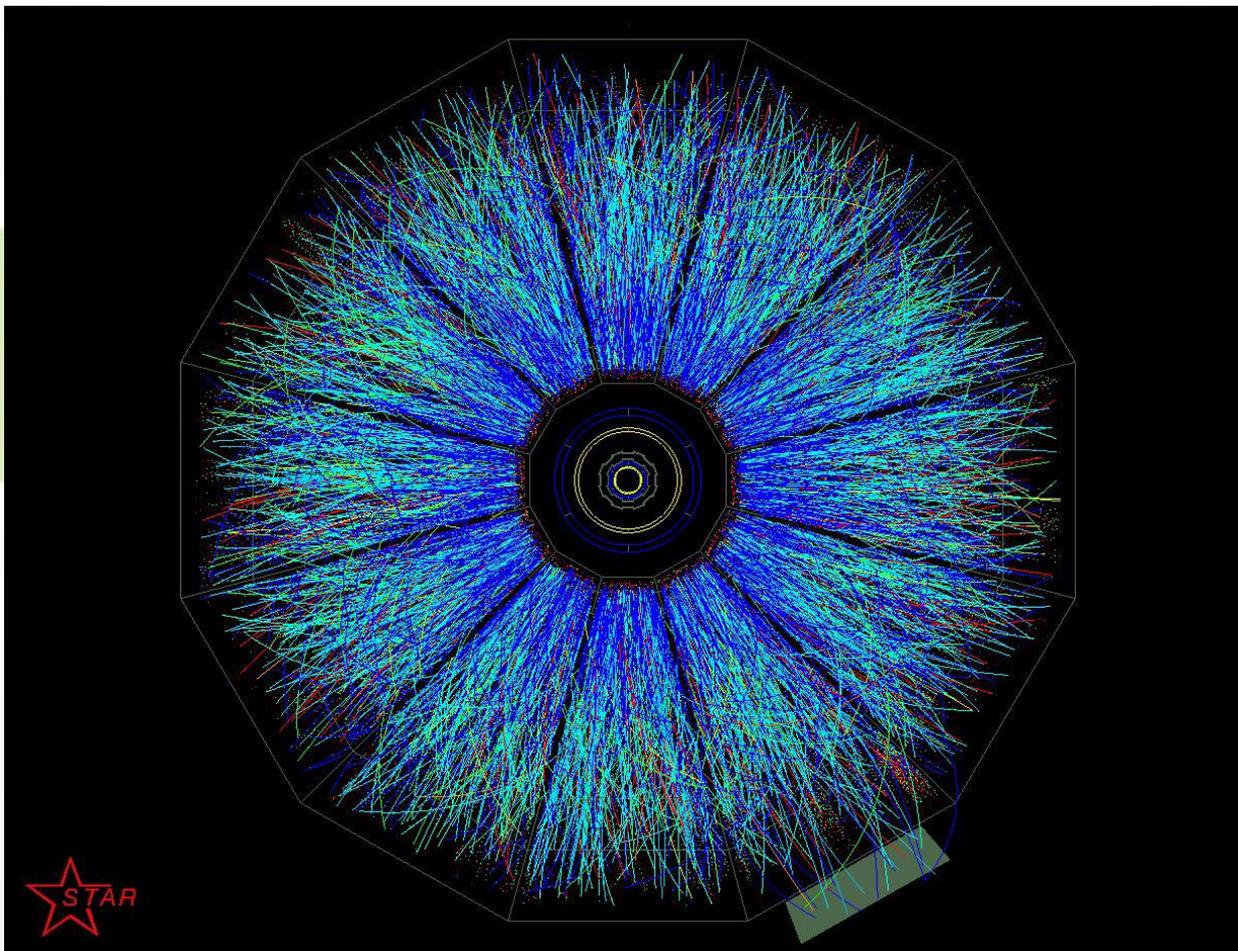
超新星爆発の中心部



1000億K

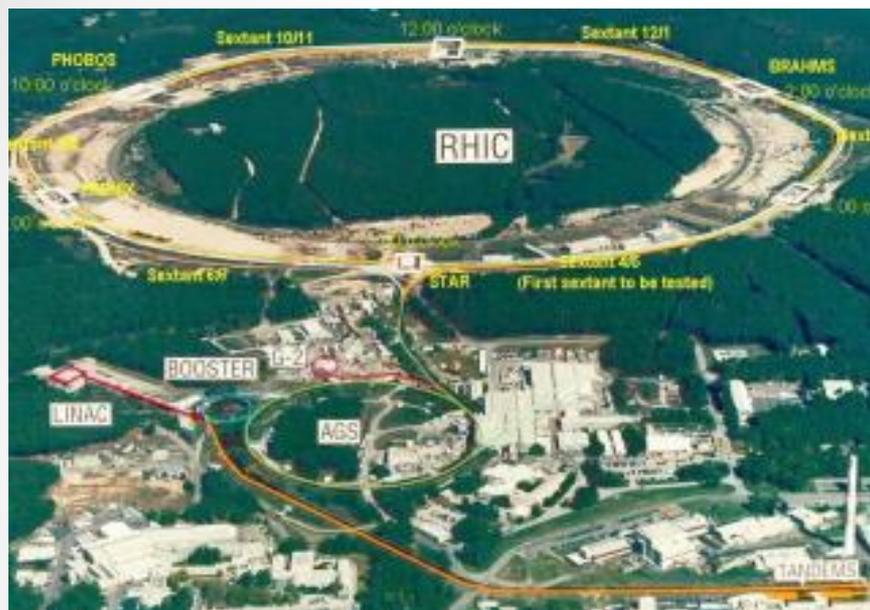
# 初期宇宙を地上で実験する

超高速の原子核を衝突させると初期宇宙が作れる！



小さなビッグバン

# 加速器による原子核衝突実験



RHIC

アメリカ

2000年～

全長6km

光速の99.996%

約4兆度

LHC

スイス・フランス

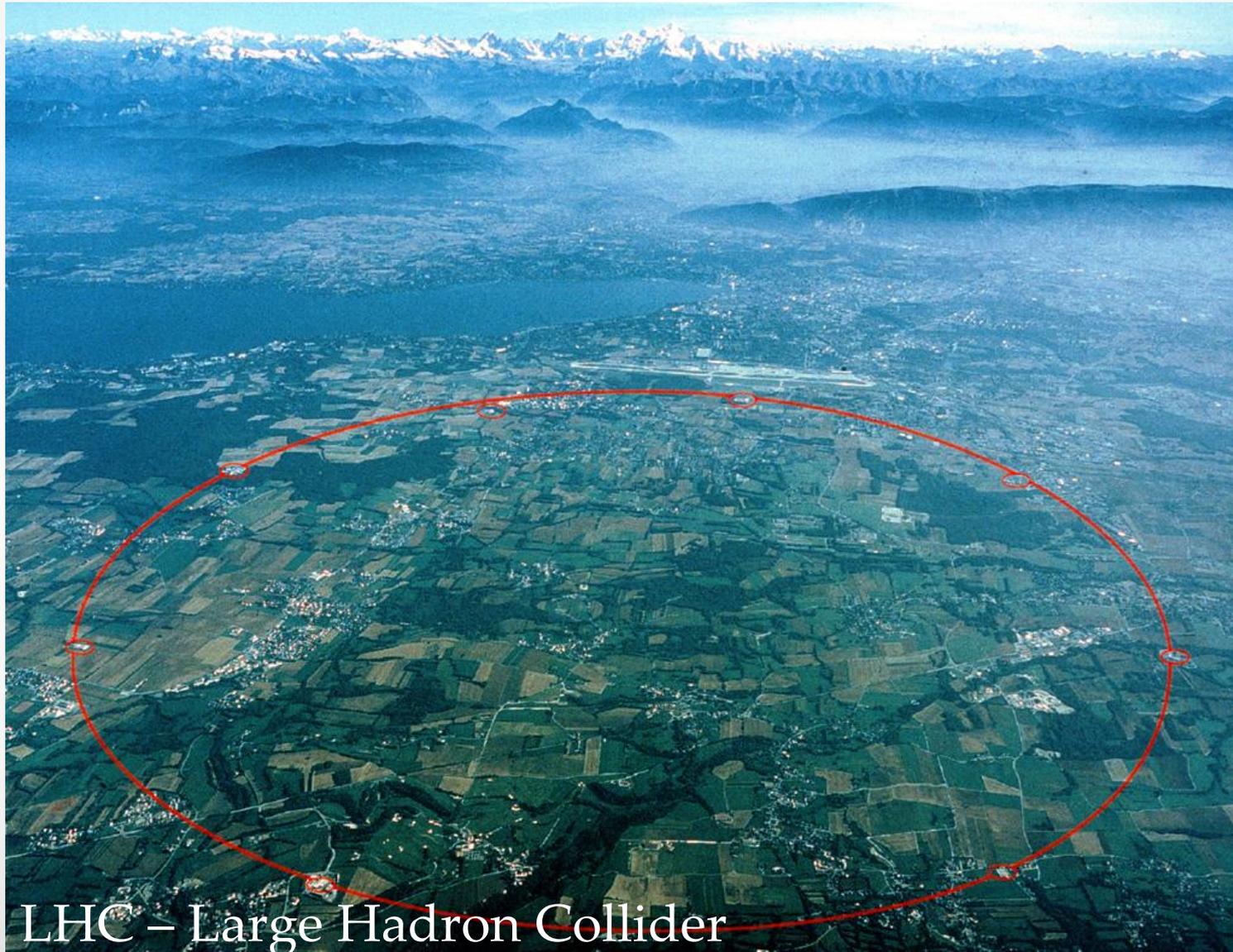
2010年～

全長30km

光速の99.9999%

約6兆度

# 陽子衝突と原子核衝突



LHC – Large Hadron Collider

# 陽子衝突と原子核衝突

## 新粒子探索実験

● → ← ●  
陽子 陽子

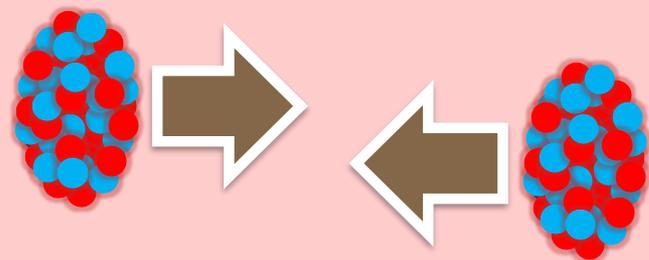
LHC – Large Hadron Collider

# 陽子衝突と原子核衝突

## 新粒子探索実験

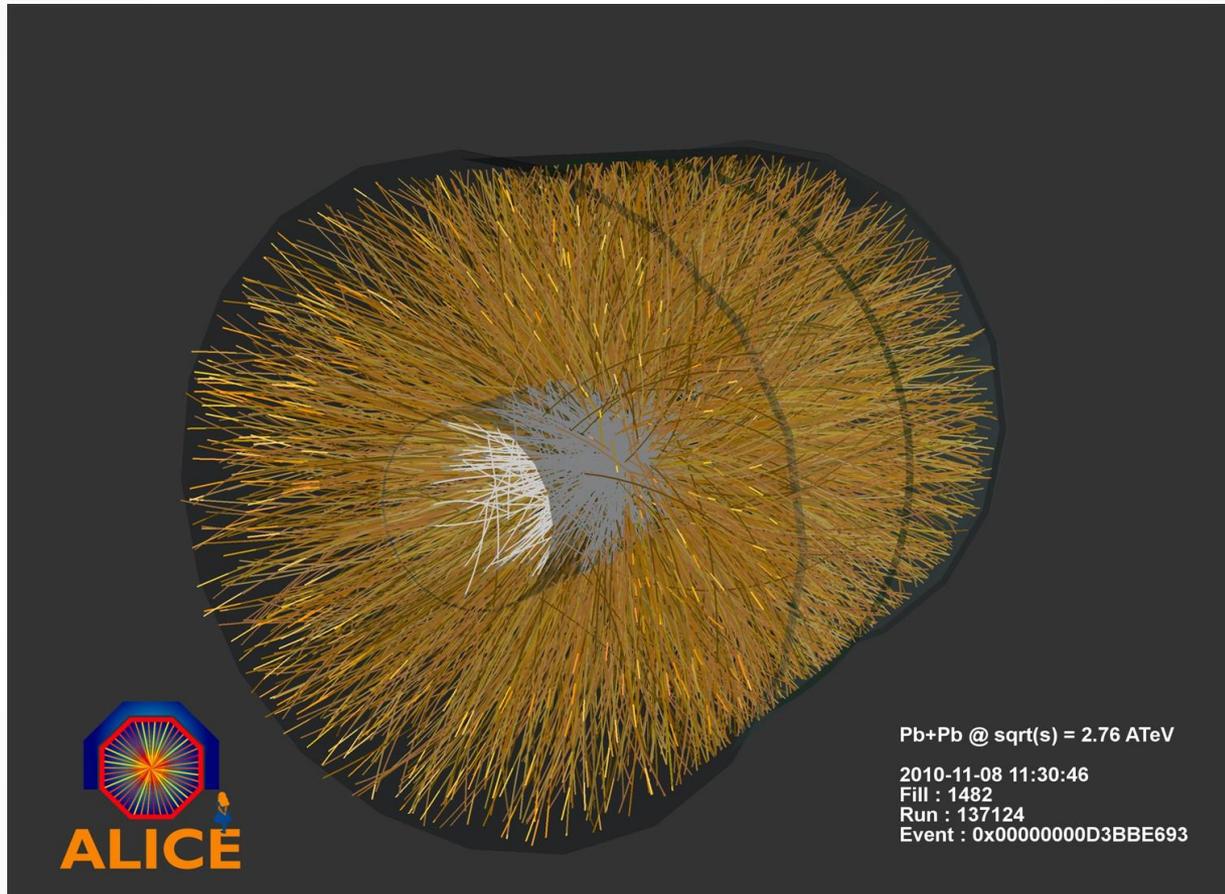


## 高温物質の生成実験



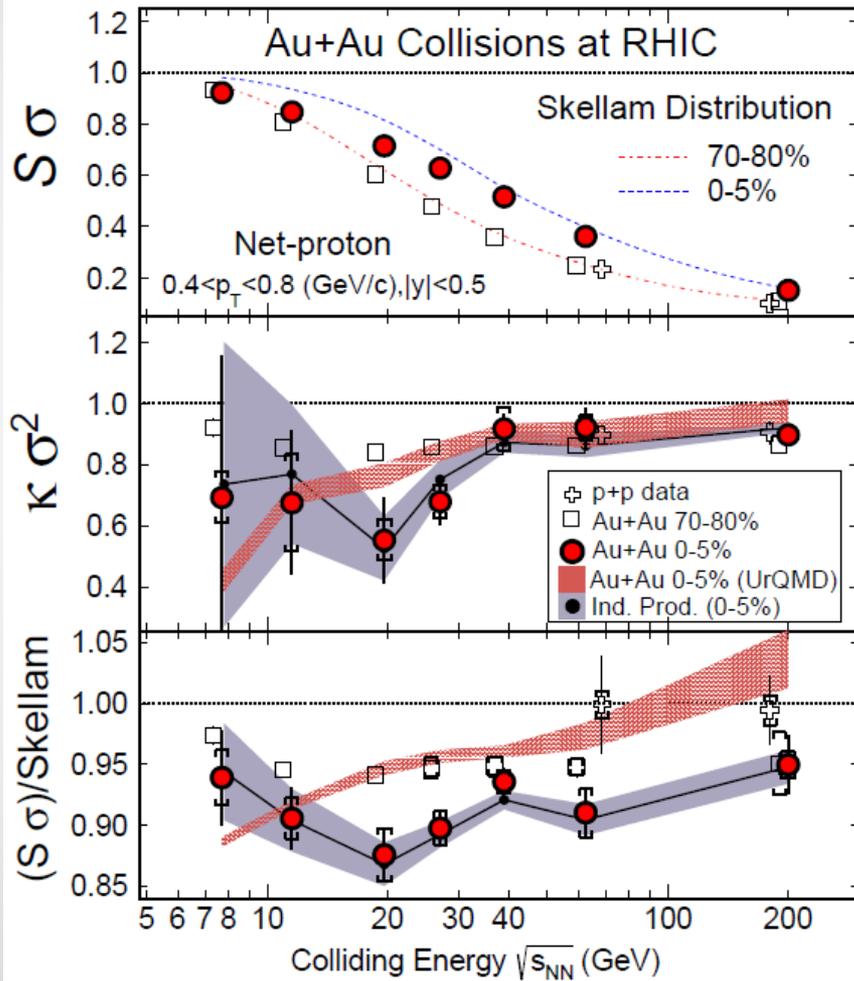
LHC – Large Hadron Collider

# 実験的観測



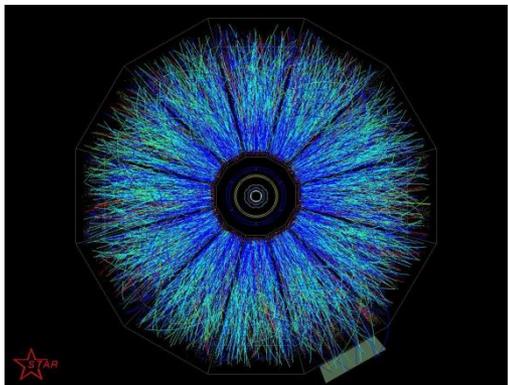
- 4兆度の物質ができるのは、 $10^{-22}$ 秒間。
- 一度の衝突で、10000個くらいの粒子ができる。
- これらの粒子から、数兆度の世界の物質の性質を探る。

# 高次ゆらぎの観測



陽子数キュムラント  
 STAR, PRL(2014)

これらのデータの  
 1からのずれの中に  
 面白い物理がある。



加速器実験による  
実験的情報

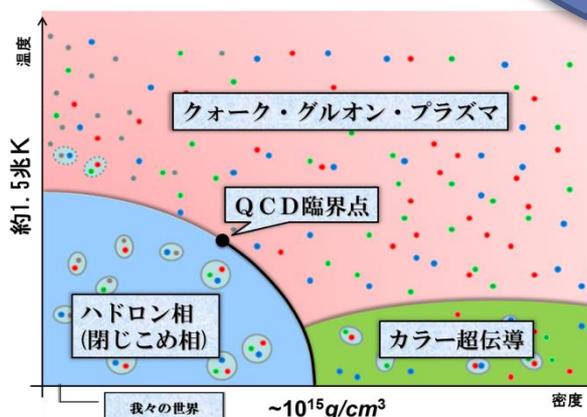
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu,a}F_a^{\mu\nu}$$

QCDに基づく理論的解析

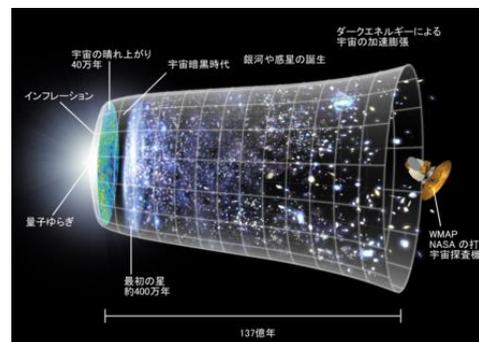
# 極限状態の 物質の探求



大型計算機による  
数値解析



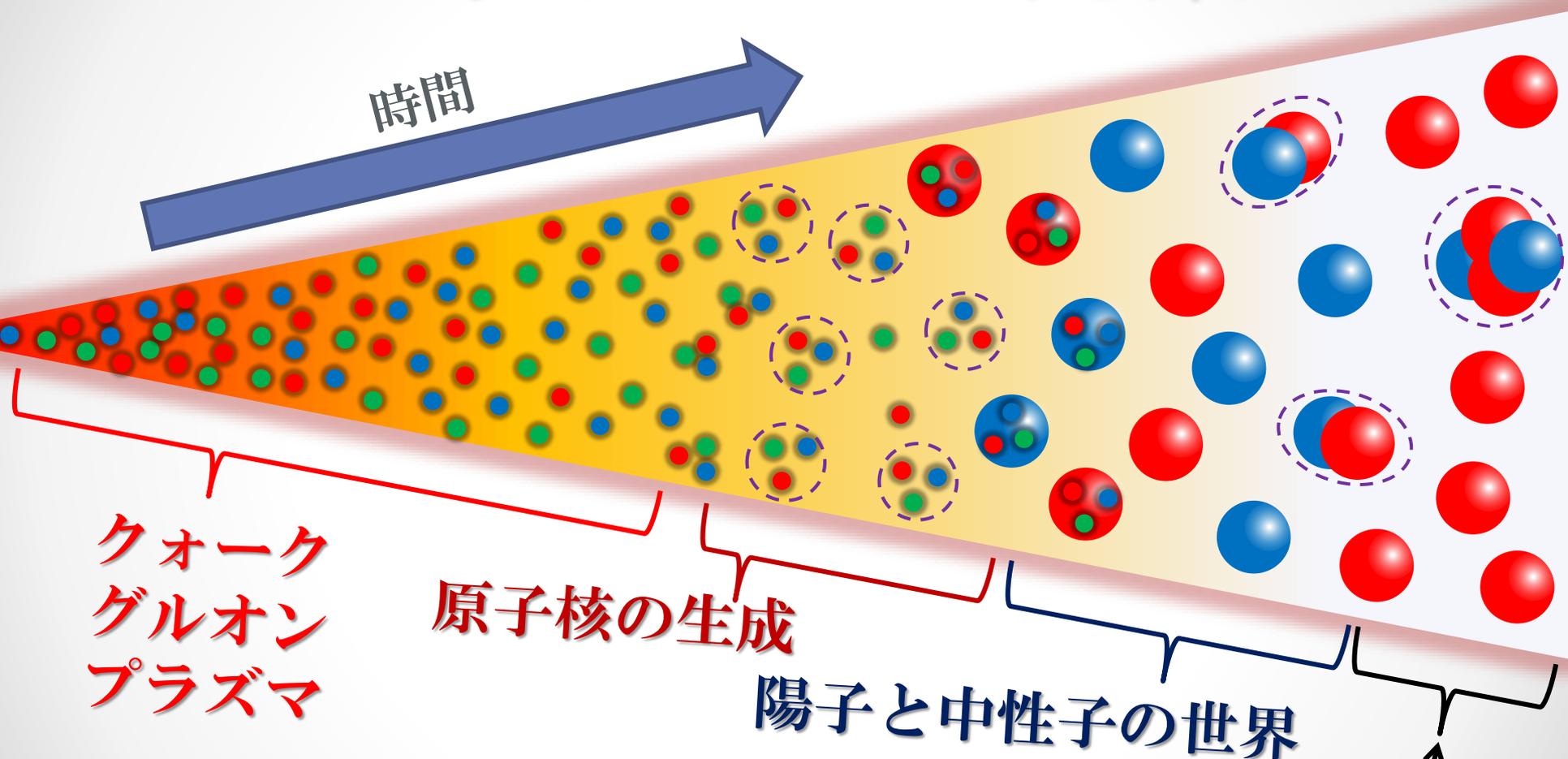
物性論としての素粒子系



初期宇宙の姿の探求

# 宇宙の進化と 元素合成

# ビッグバンと元素



ビッグバン宇宙論は、水素が多い宇宙を自然に説明できる。

重水素・ヘリウムが生成  
中性子は15分で崩壊

# 我々のまわりの元素

元素周期表  
Periodic Table of the Elements  
自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている

The periodic table shows elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og). Red boxes highlight the following elements:

- Calcium (Ca) - Atomic number 20
- Iron (Fe) - Atomic number 26
- Gold (Au) - Atomic number 79
- Uranium (U) - Atomic number 92

**Ca**

骨のおもな成分  
欠乏すると骨粗しょう症  
大理石、石こう、セメントのおもな成分  
しょう乳洞、サンゴ礁

**カルシウム 40.08**  
**20 Calcium**

**Fe**

建物、自動車、船などの構造材料  
磁石にくっつく金属  
Feを含むヘモグロビンは酸素を運ぶ  
磁気テープ、磁気ディスク、チケット

**鉄 55.85**  
**26 Iron**

**Au**

金貨や装飾品  
電子回路用の電極  
ガラスの着色(赤色切り子)  
抗リウマチ剤(Auの化合物)

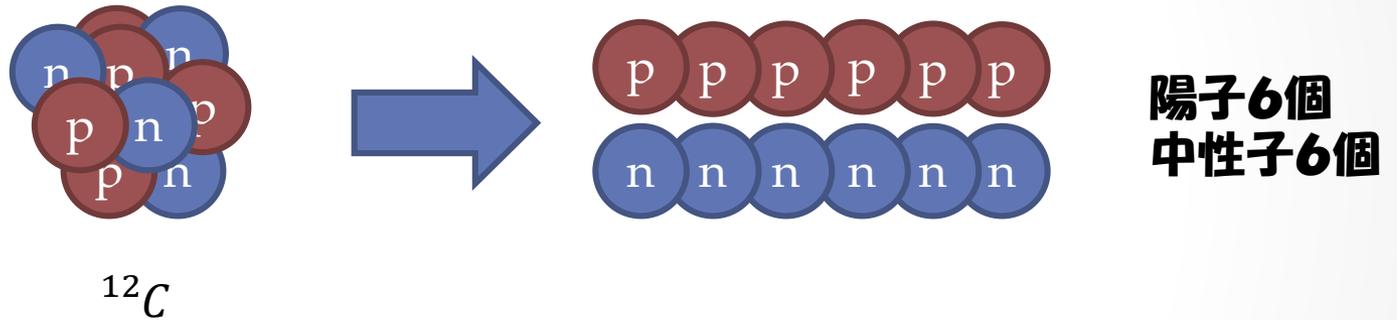
**金 197.0**  
**79 Gold**

**U** 半減期 45億年

濃縮ウラン<sup>235</sup>Uは核分裂連鎖反応を起こす(原子力発電)  
地球年代測定(U-Pb法)、ウランガラス

**ウラン 238.0**  
**92 Uranium**

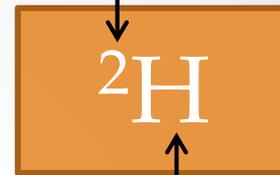
# 原子核



原子核は陽子と中性子でできている

# 原子核の分類

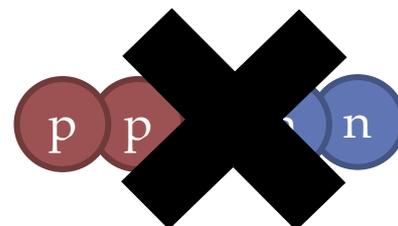
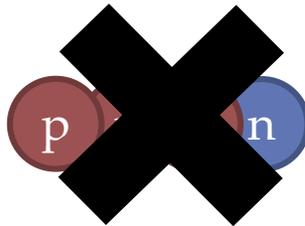
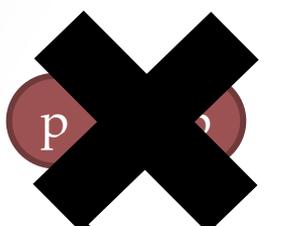
陽子+中性子



元素の種類

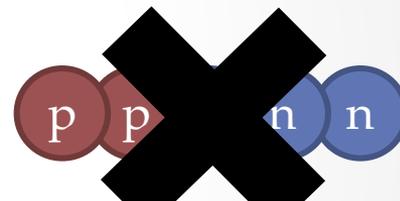
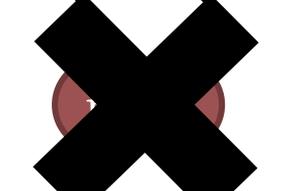
3

Li



2

He

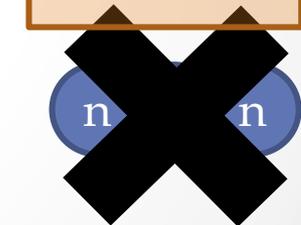
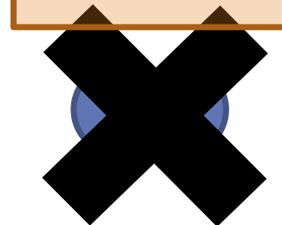


1

H



0



陽子数

中性子数

0

1

2

3

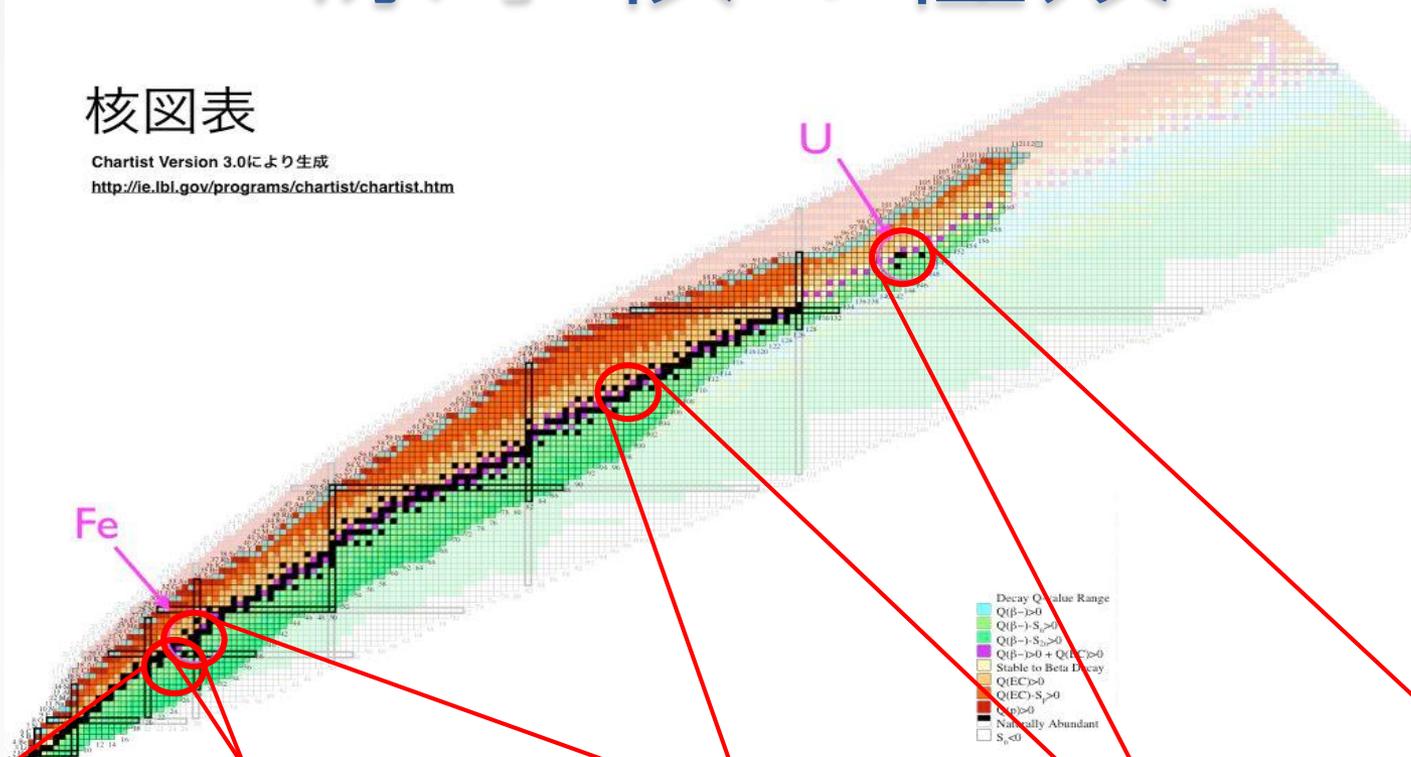


# 原子核の種類

## 核図表

Chartist Version 3.0により生成

<http://ie.lbl.gov/programs/chartist/chartist.htm>



Decay Q value Range  
 $Q(\beta^-) > 0$   
 $Q(\beta^-) - S_p > 0$   
 $Q(\beta^-) - S_n > 0$   
 $Q(\beta^-) > 0 + Q(EC) > 0$   
 Stable to Beta Decay  
 $Q(EC) > 0$   
 $Q(EC) - S_p > 0$   
 $Q(\alpha) > 0$   
 Naturally Abundant  
 $S_p < 0$

**Ca**

骨のおもな成分  
 欠乏すると骨粗しょう症  
 大理石、石こう、セメントのおもな成分  
 しょう乳洞、サンゴ礁

---

**カルシウム** 40.08  
**20 Calcium**

**Fe**

建物、自動車、船などの構造材料  
 磁石にくっつく金属  
 Feを含むヘモグロビンは酸素を運ぶ  
 磁気テープ、磁気ディスク、チケット

---

**鉄** 55.85  
**26 Iron**

**Au**

金貨や装飾品  
 電子回路用の電極  
 ガラスの着色(赤色切り子)  
 抗リウマチ剤(Auの化合物)

---

**金** 197.0  
**79 Gold**

**U** 半減期 45億年

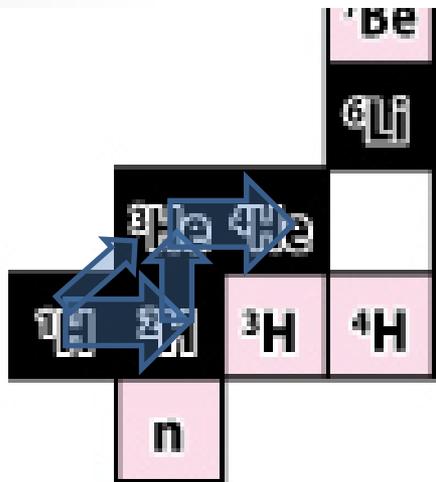
濃縮ウラン  $^{235}\text{U}$  は核分裂連鎖反応を起こす(原子力発電)  
 地球年代測定(U-Pb法)、ウランガラス

---

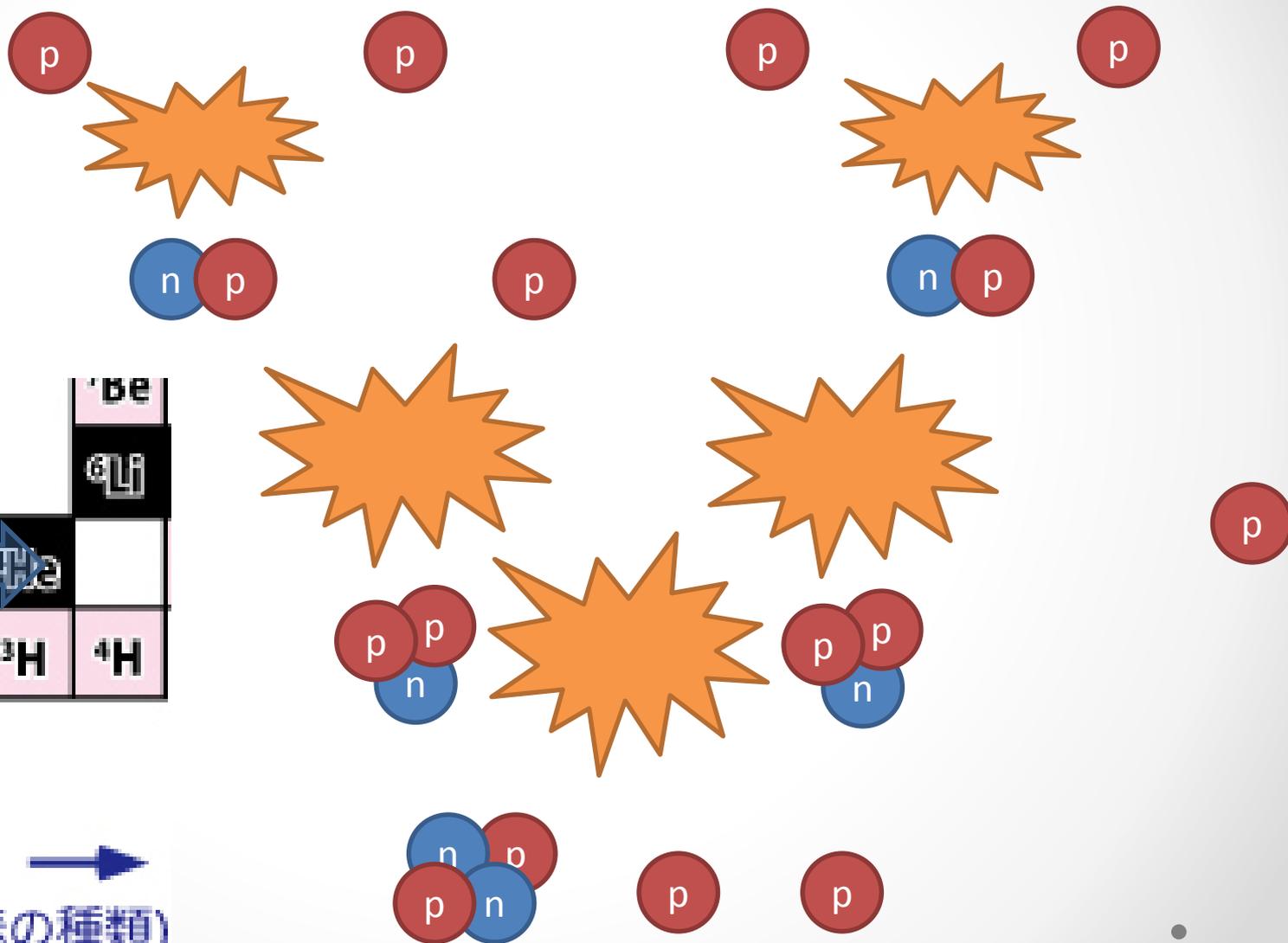
**ウラン** 238.0  
**92 Uranium**

# 宇宙初期や惑星内部の元素合成

↑  
陽子数  
(元素の種類)

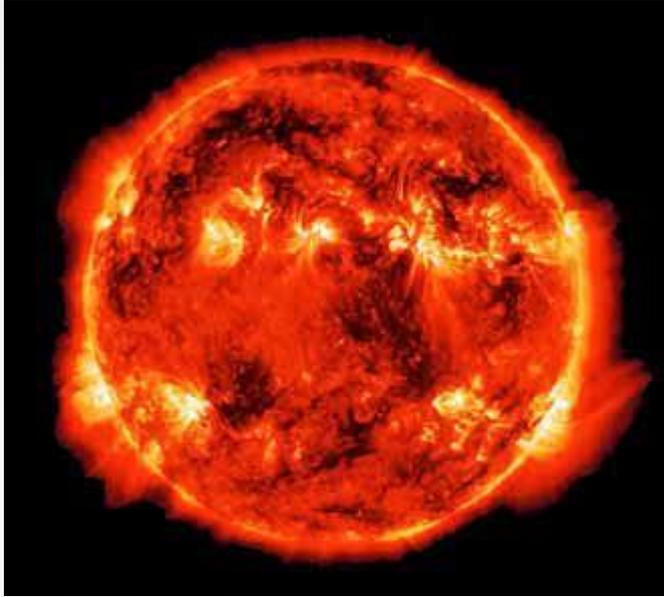


→  
中性子数  
(同位元素の種類)





# 恒星といっても大小様々

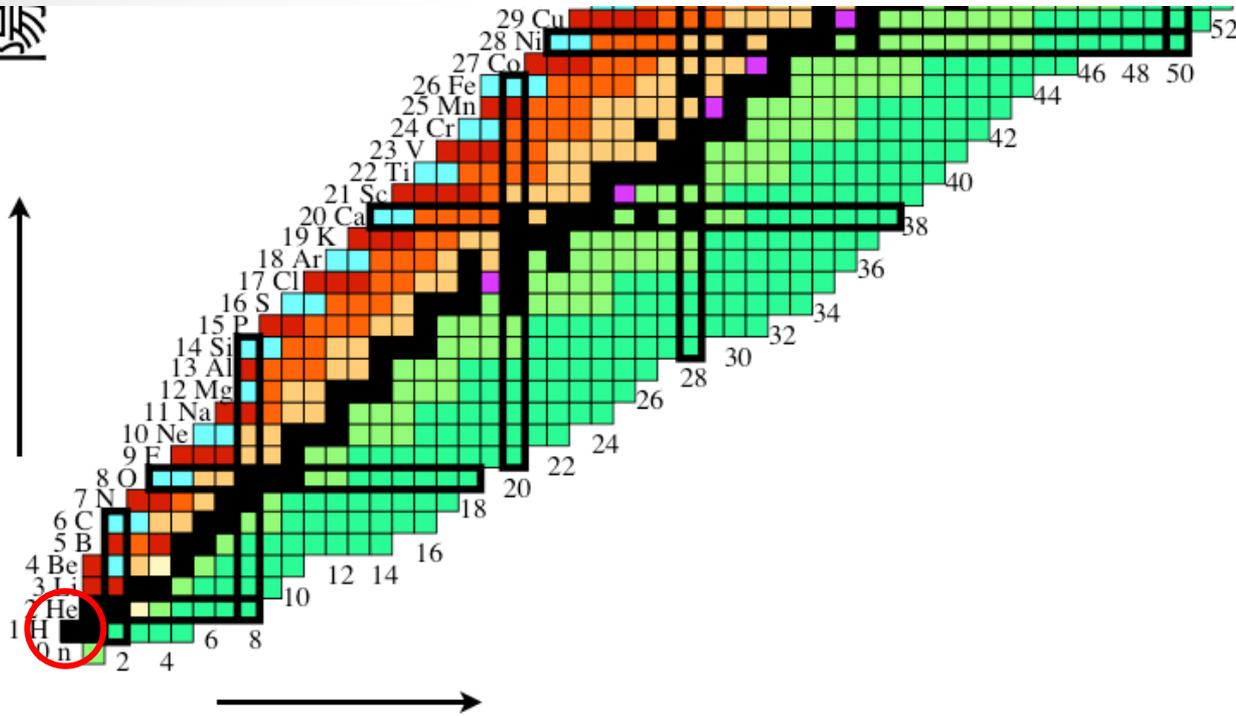


圧力、温度、密度が高いと  
核反応が起こりやすい





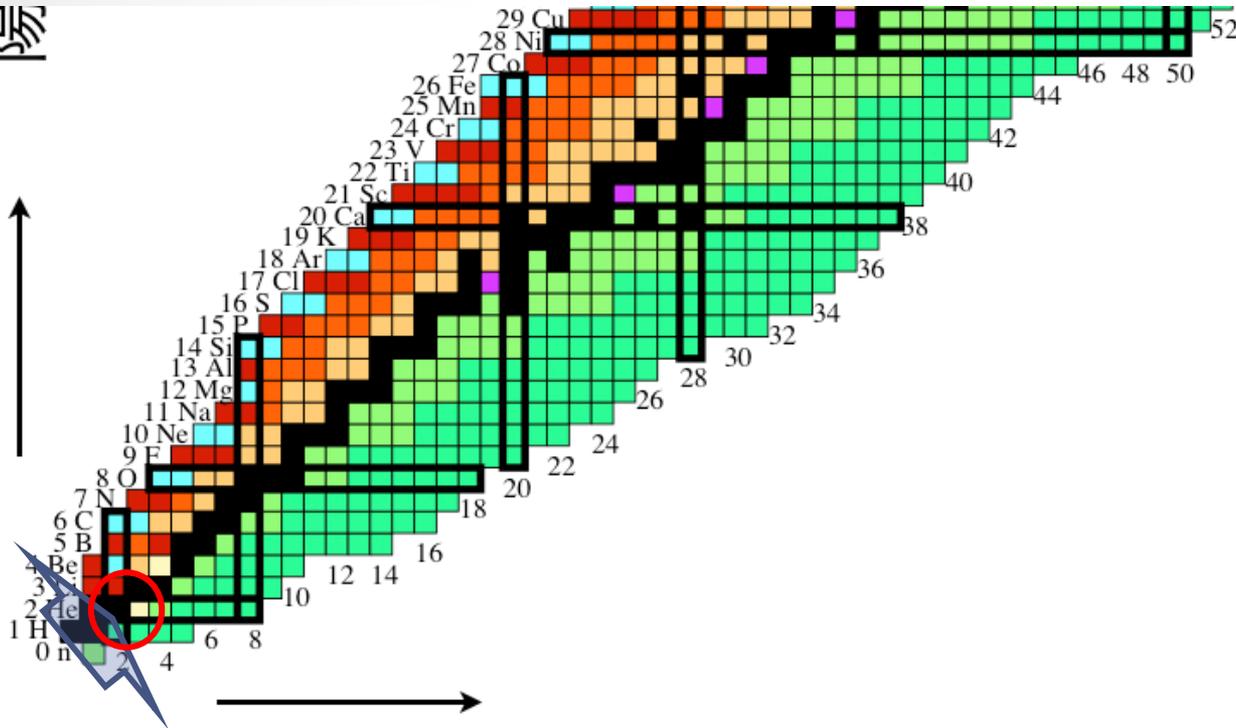
# 恒星内部の元素合成の進み方



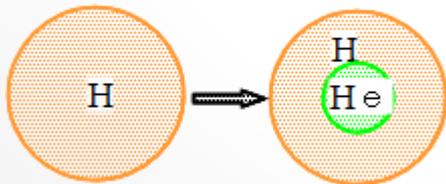
中性子数



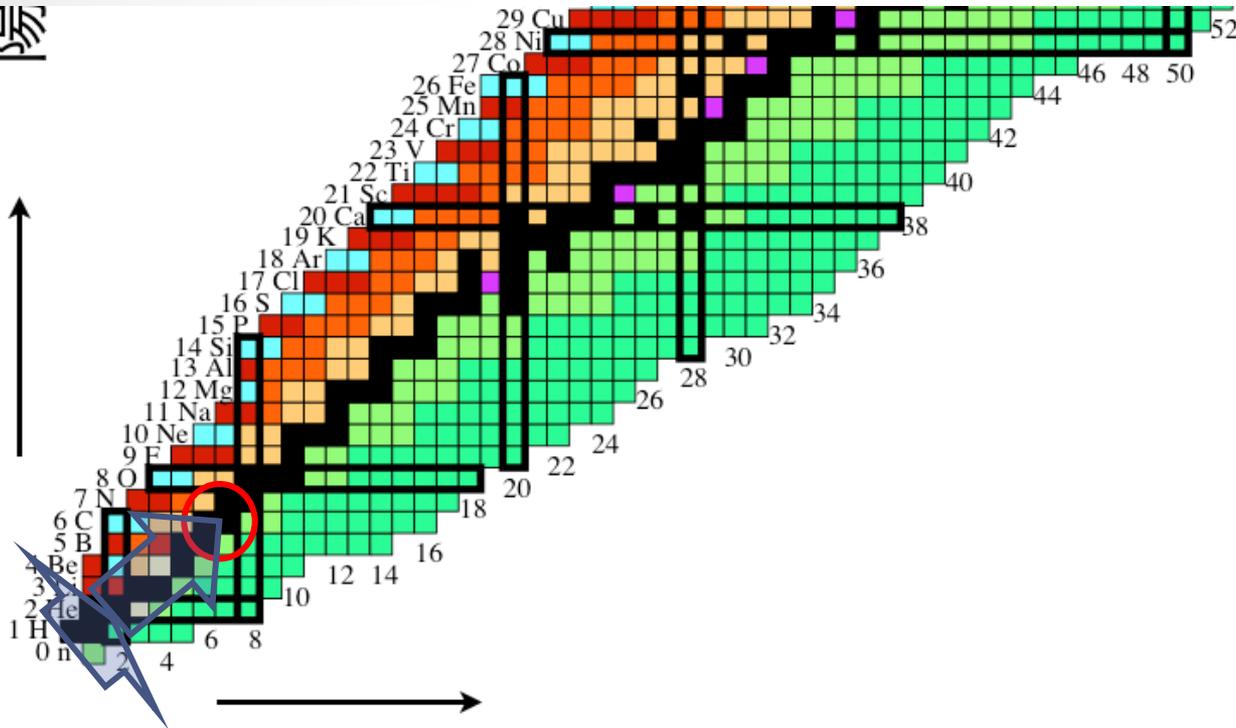
# 恒星内部の元素合成の進み方



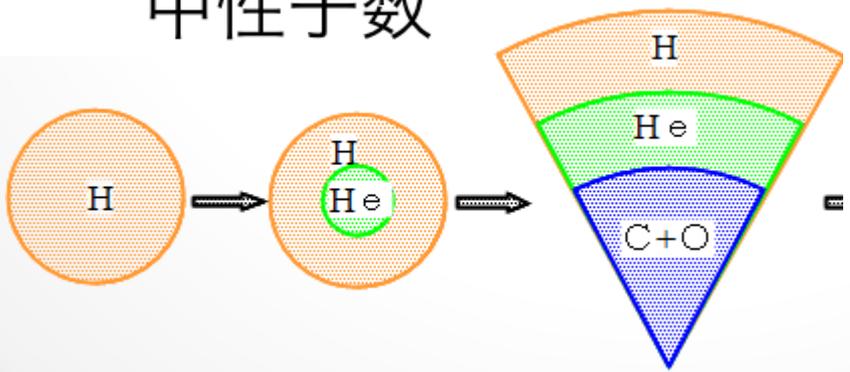
中性子数



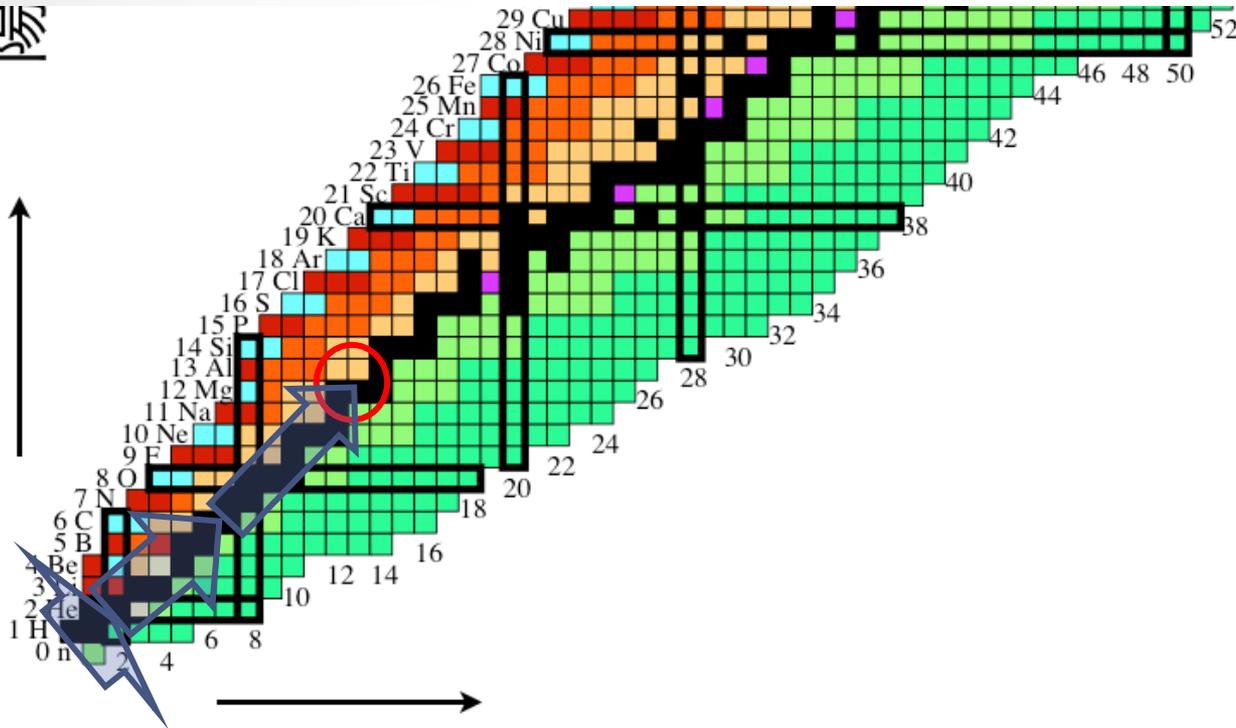
# 恒星内部の元素合成の進み方



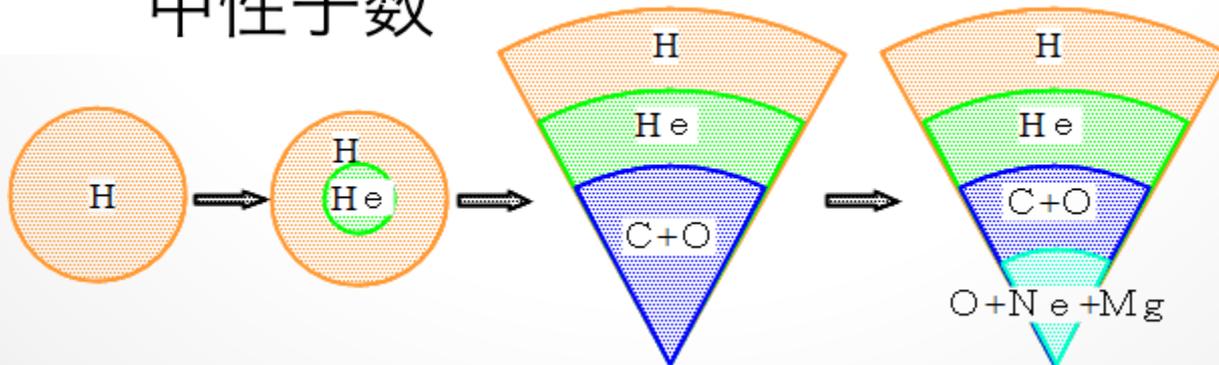
中性子数



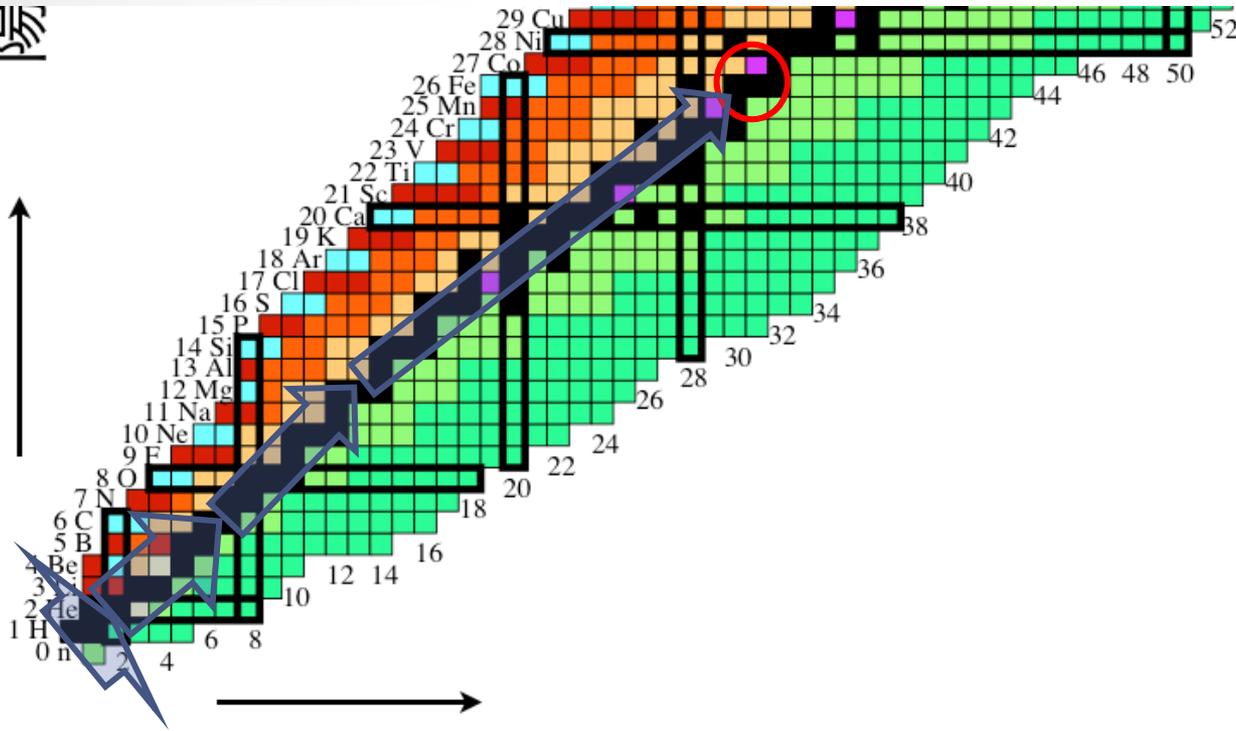
# 恒星内部の元素合成の進み方



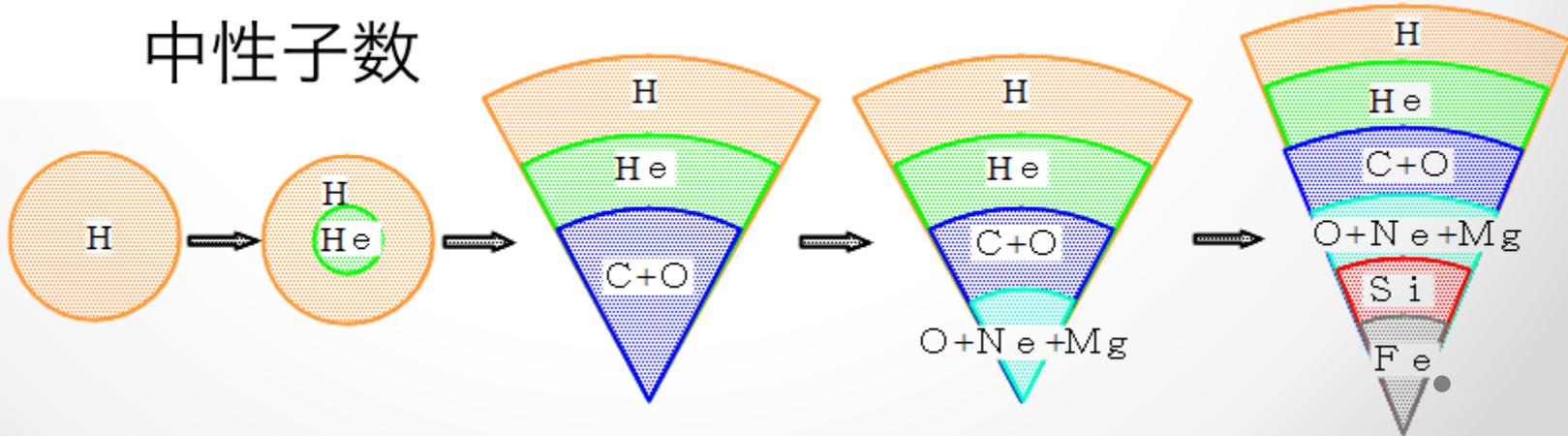
中性子数



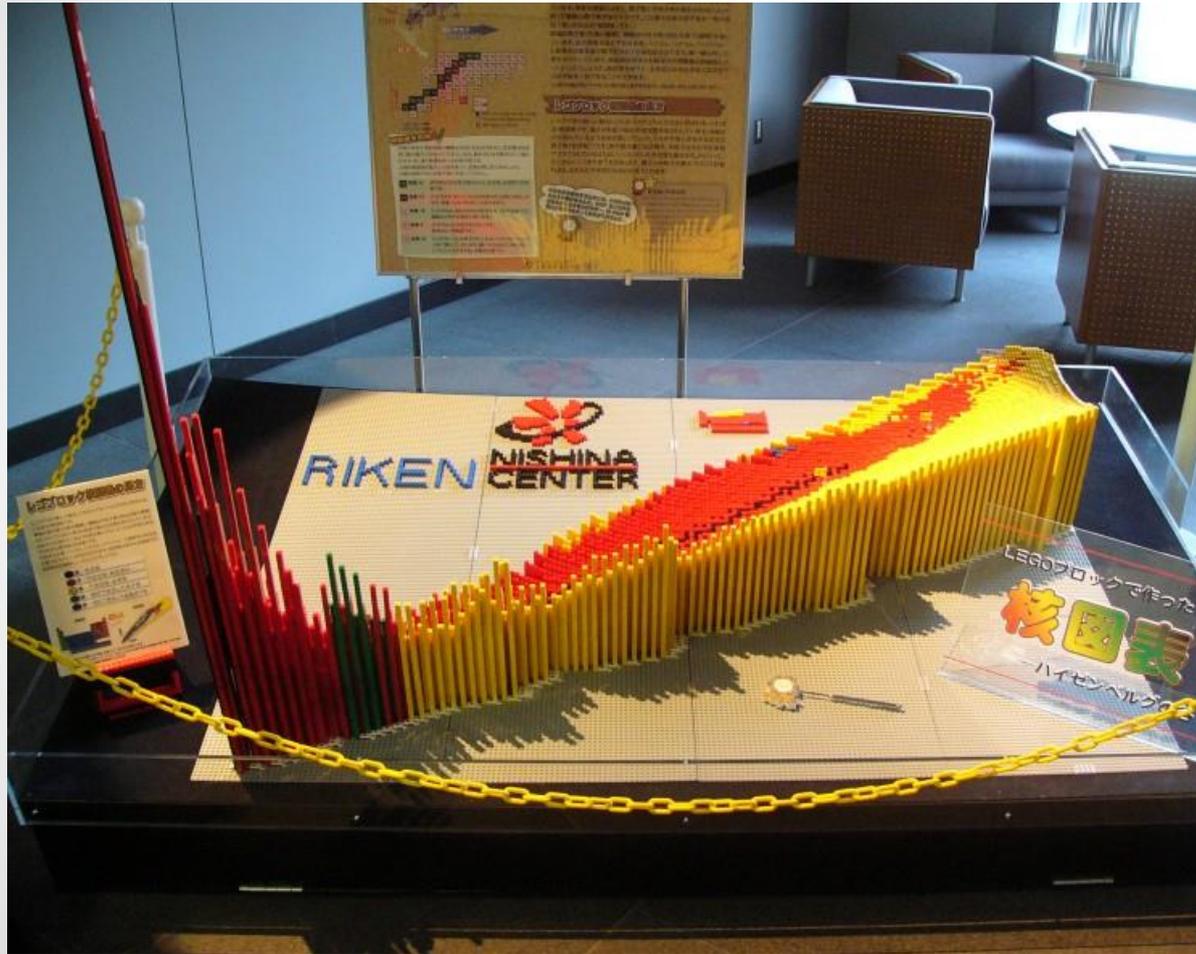
# 恒星内部の元素合成の進み方



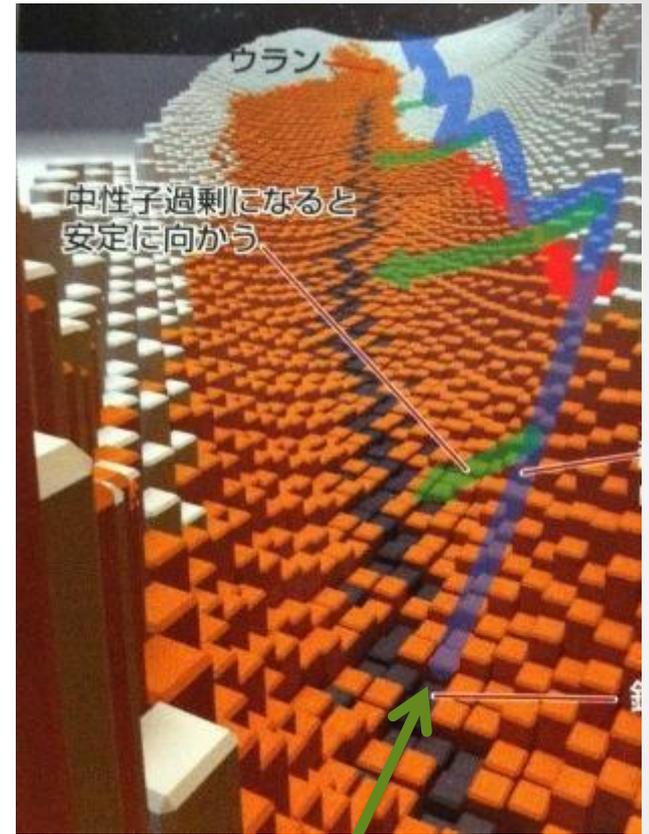
中性子数



# 鉄は最も安定な元素



一核子当たりのエネルギー



ここが鉄

$$E = mc^2$$

# 超新星爆発

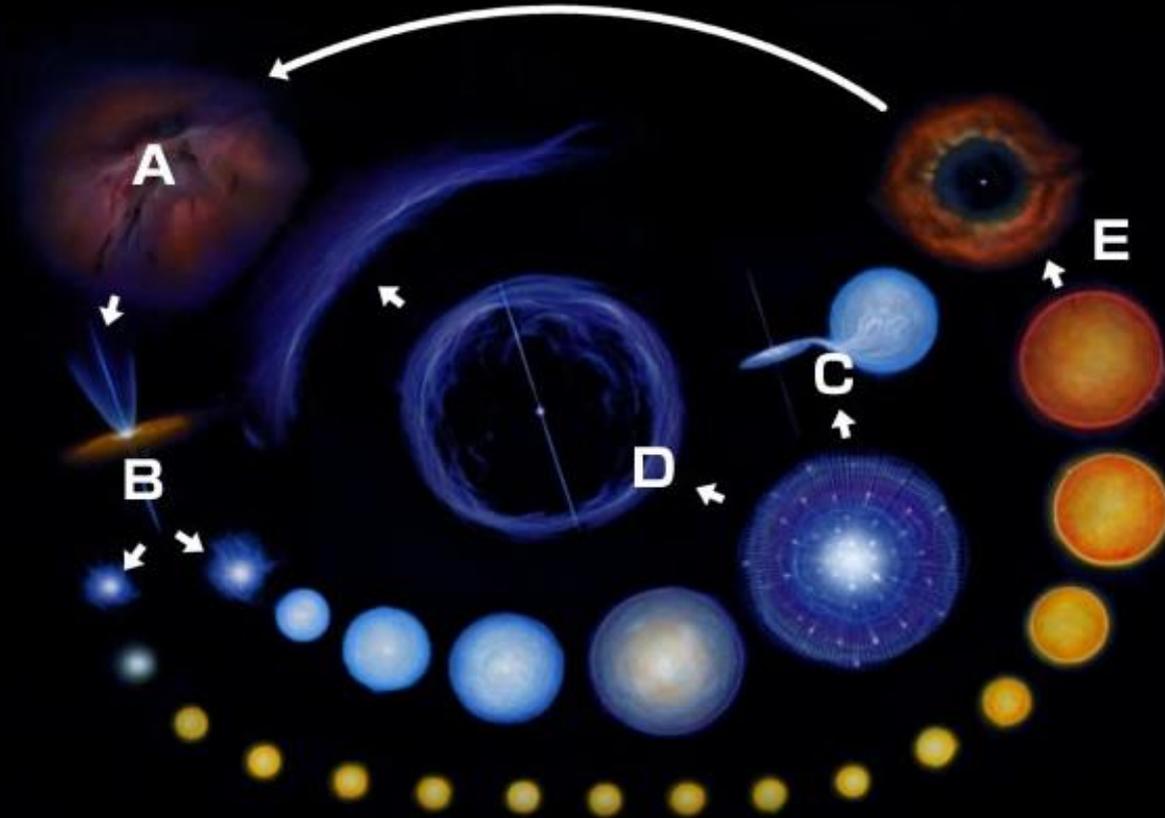


鉄以降の元素合成は超新星爆発  
で行われたといわれている



麒麟座のV848の超新星爆発の残骸

# 星は循環している



私たちを構成する元素は星の中で作られた  
私たちは星のかけらである

# 物理学とは

# 自然は複雑で、難しい

基本法則が分かれば、  
自然を理解したことになる？

→NO

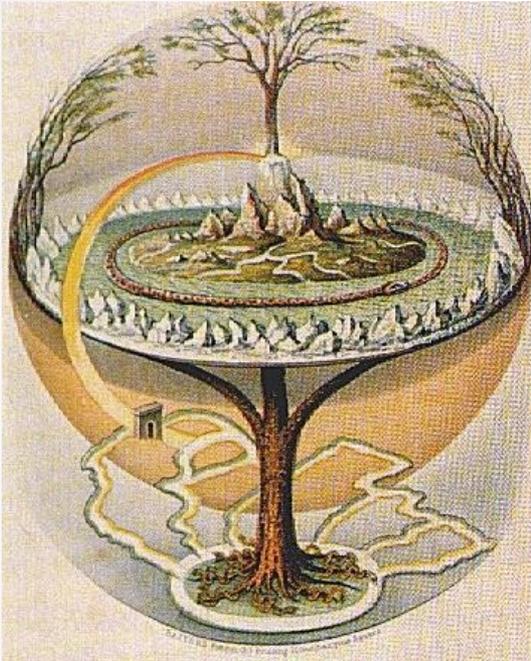


さっぱり  
分かん

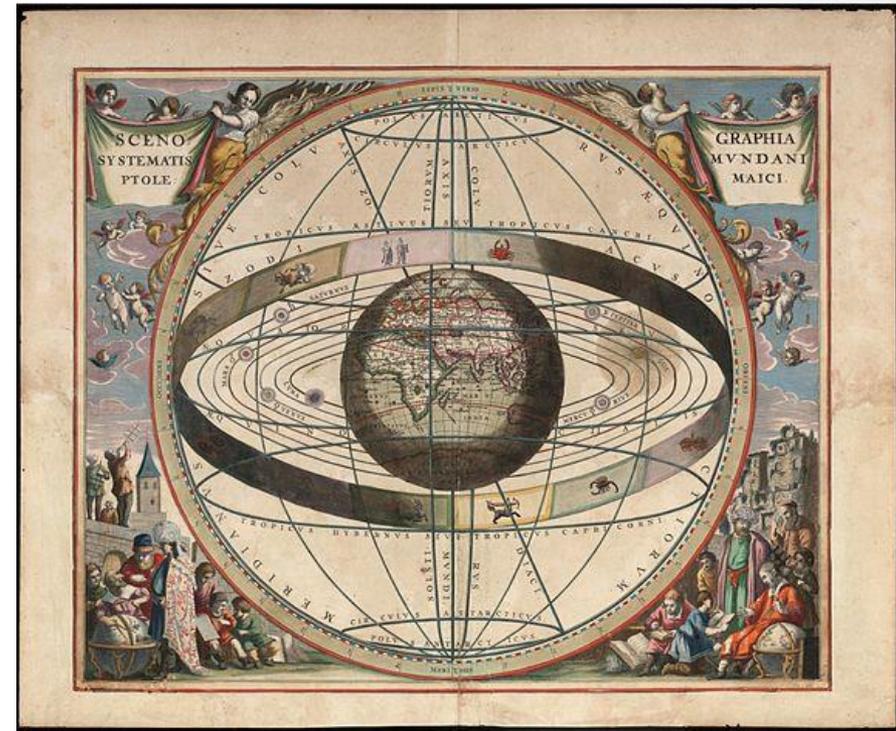
羽生名人

人間の計算能力など、所詮有限である。。。。

# 自然は複雑で、難しい



北欧神話の世界観



プトレマイオスの宇宙観

- 人間の想像力など、所詮有限である。。。。

# 物理学者と詩人

一本の草も涼風宿りけり

小林一茶

1814

一茶はなぜ、涼風を感じる事ができたのだろうか？

# まとめにかえて

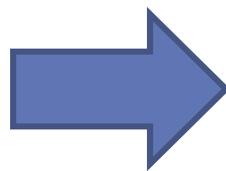
現代科学が描く素粒子論・宇宙論は、様々な自然現象を説明し、遙か過去の出来事を知り、未来を予言することができる。

# まとめにかえて

現代科学が描く素粒子論・宇宙論は、様々な自然現象を説明し、遙か過去の出来事を知り、未来を予言することができる。

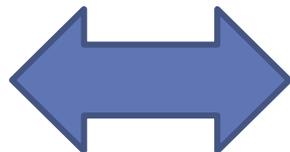
しかし、自然というのは複雑な対象である。

宇宙130億年  
の歴史



現代の私たち

ミクロ



マクロ