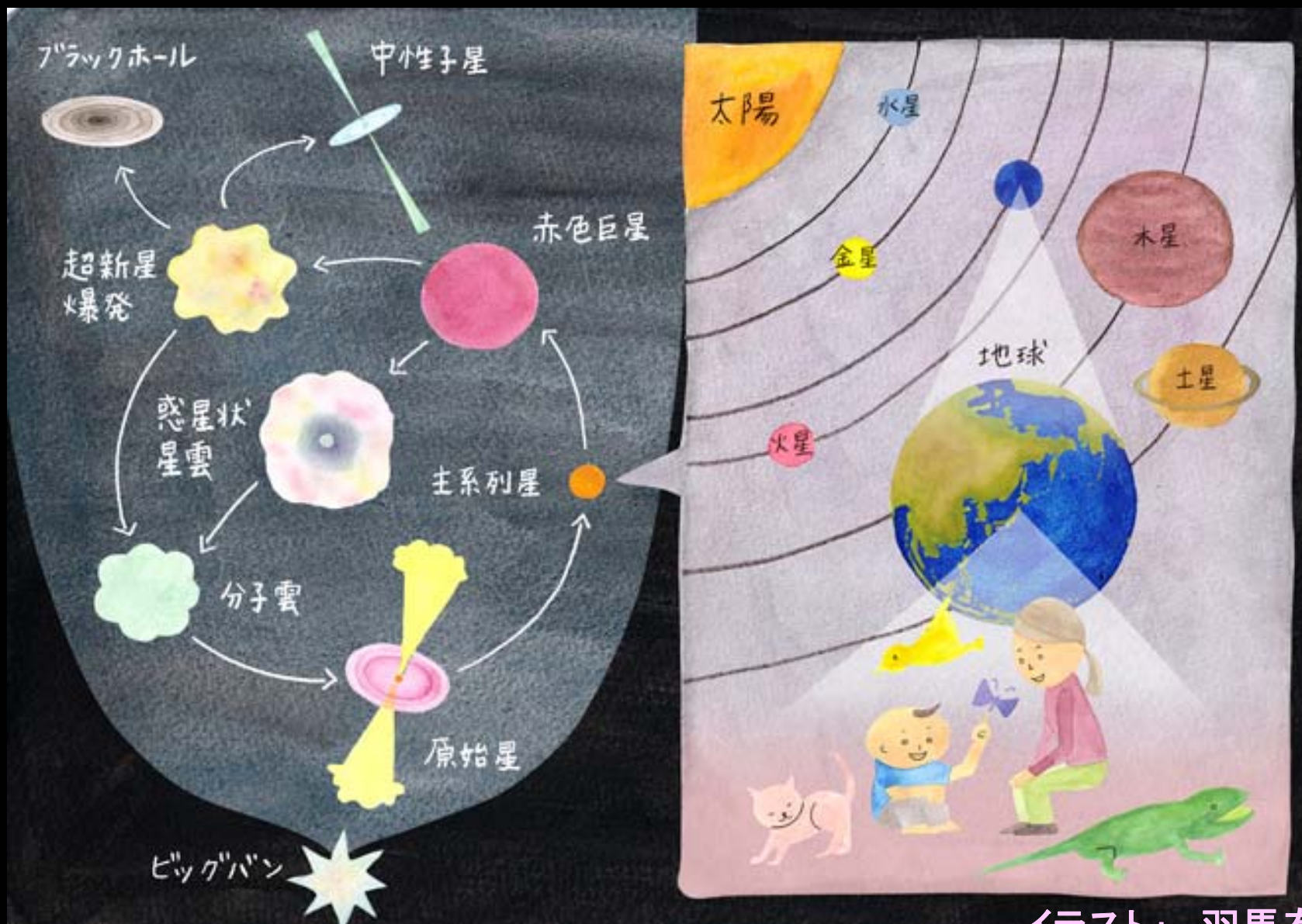


# 目次

- 10/14 ① 物理屋の世界観
- ② 我々は何も知らなかった
- 10/21 ③ 宇宙の組成と物質の起源
- ④ 太陽系外惑星の世界
- 10/28 ⑤ 宇宙における偶然と必然
- ⑥ 科学は世界をどこまで記述できるか

# ③ 宇宙の組成と物質の起源

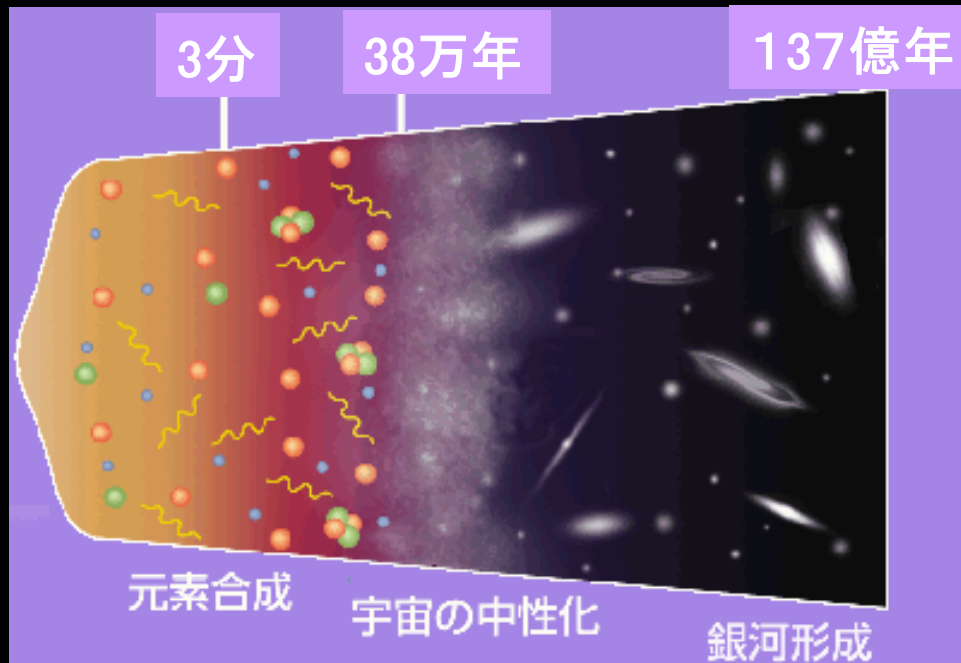


イラスト：羽馬有紗

# ビッグバン宇宙論： 宇宙膨張と物質世界の進化

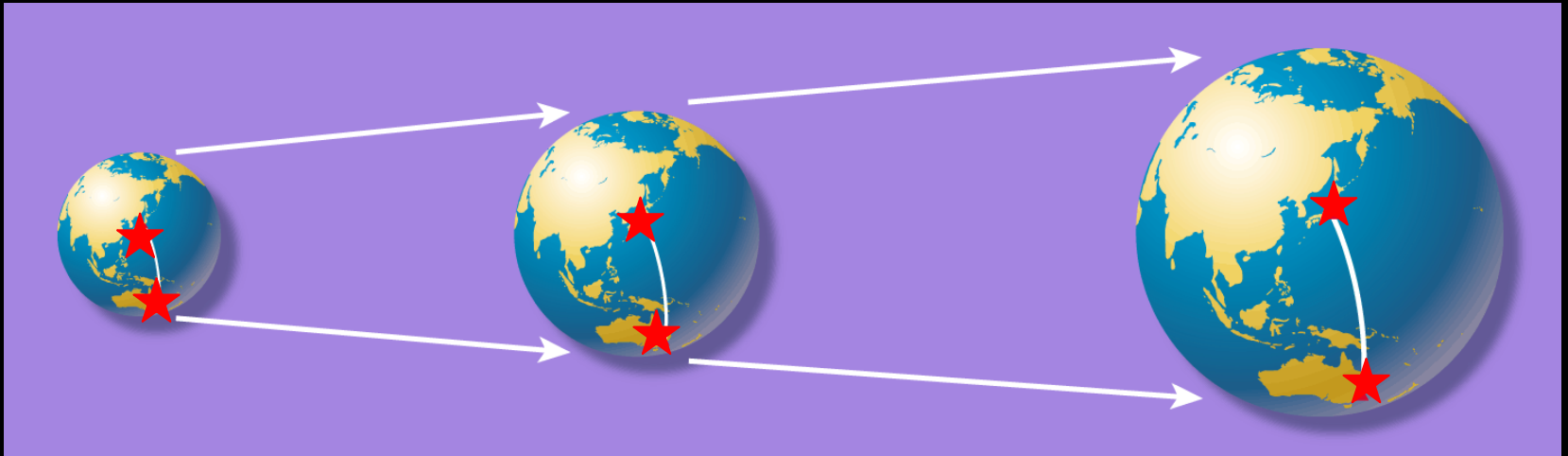
- 宇宙膨張によって密度と温度が下がる
  - 光が支配する宇宙から物質が支配する宇宙へ
- $t \doteq 3$ 分：軽元素(ヘリウム)合成
- $t \doteq 38$ 万年：電離した宇宙が中性化（陽子+電子 から 水素原子）
- $t \doteq 4$ 億年：第一世代天体の誕生
- $t \doteq 10$ 億年 ~ 137億年：星形成(重元素合成)、銀河・銀河団形成

宇宙の誕生



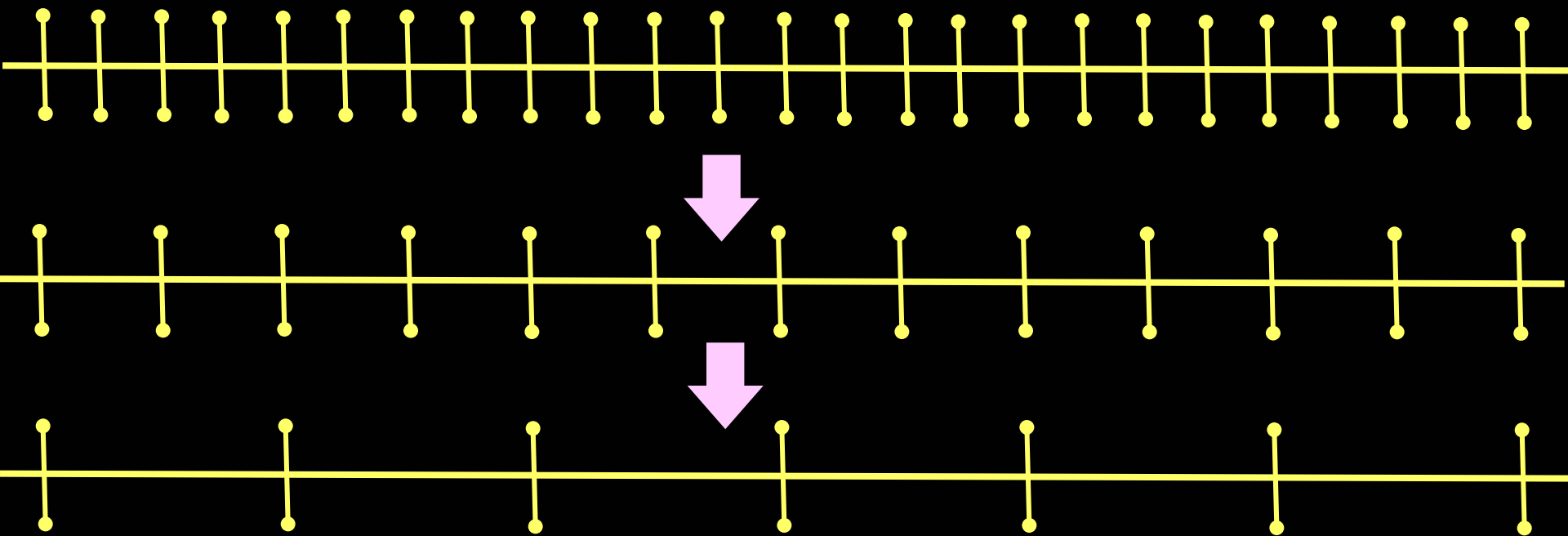
# ハッブルの法則と宇宙膨張

- **ハッブルの法則  $v=H_0d$  ( $H_0$ :ハッブル定数)**
  - 遠方銀河は我々に対して遠ざかっている
  - 後退速度 $v$ と銀河までの距離 $d$ が比例
  - **我々の銀河系に対してだけではなく宇宙のどこでも成り立つ**
  - 個々の銀河の運動ではなく、宇宙そのものが全体として一様等方に膨張していることを示している



# 何に対して膨張している？

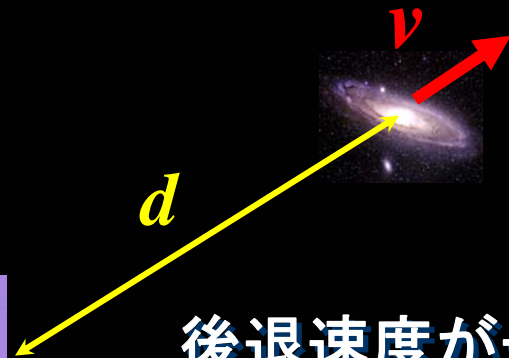
- すべての場所を中心に膨張していると言ってもよいが、中心があるわけではないし、何に対してでもない。あらゆる場所が等しく相似的に膨張している。
- 風船の表面の例がかえって混乱させてるらしい。むしろ、無限に伸びた一本のゴムひもを例として考えるほうが誤解が少ないかもしれない。端がないことも重要。



# ハッブルの法則と宇宙年齢

- ハッブル定数の逆数は宇宙年齢の目安

$$H_0 = 100h \text{ km/s/Mpc}$$
$$\approx 1/(100h^{-1} \text{ 億年})$$



後退速度が一定ならば、 $d/v$ だけ過去に遡れば宇宙全体が一点に集まる

$$t_H = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0} \approx 100h^{-1} \text{ 億年}$$

$$h = 0.71 \text{ の場合 } t_H \approx 140 \text{ 億年}$$



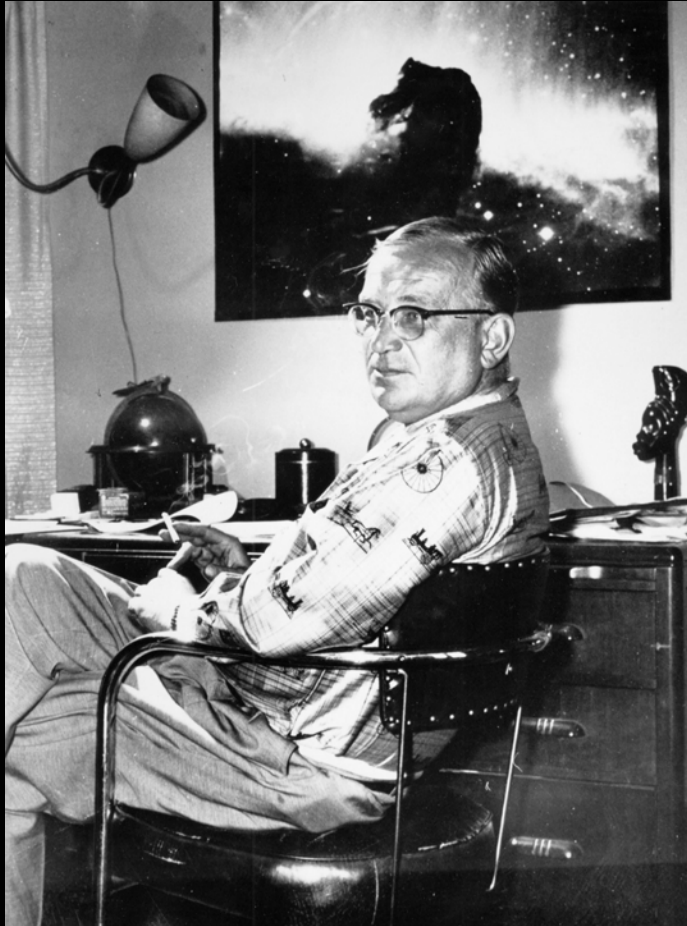
宇宙には始まりがある！進化する！



# 宇宙・物質史 (主に物理法則から予想・推定)

| 宇宙年齢                           | 現在からの時間  | 出来事                                                                      |
|--------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------|
| 0                              | 137億年前   | 宇宙の誕生                                                                    |
| $10^{-43}$ 秒<br>~ $10^{-30}$ 秒 | 137億年前   | 宇宙の指数関数的膨張(インフレーション)と、それ<br>にともなう宇宙の熱化(ビッグバン宇宙)                          |
| $10^{-6}$ 秒                    | 137億年前   | 陽子と反陽子の対消滅                                                               |
| 1秒                             | 137億年前   | 電子と陽電子の対消滅                                                               |
| 3分                             | 137億年前   | ヘリウムの合成(ビッグバン軽元素合成)                                                      |
| 38万年                           | 137億年前   | 宇宙の中性化(陽子と電子が結合して荷電中性の<br>水素原子になる)                                       |
| ~4億年?                          | ~133億年前? | 最初の星の誕生、それ以降現在まで星の中心で<br>炭素、酸素、、、鉄などの重元素が合成され、星の<br>最期に星間空間にばら撒かれる(元素循環) |
| 8億年                            | 129億年前   | 現在知られている最古の銀河、<br>中性化した宇宙が再び電離                                           |
| 71億年                           | 66億年前    | ダークエネルギーが宇宙を支配し、それ以降、宇<br>宙膨張が減速から加速に転ずる                                 |

# ジョージ・ガモフ

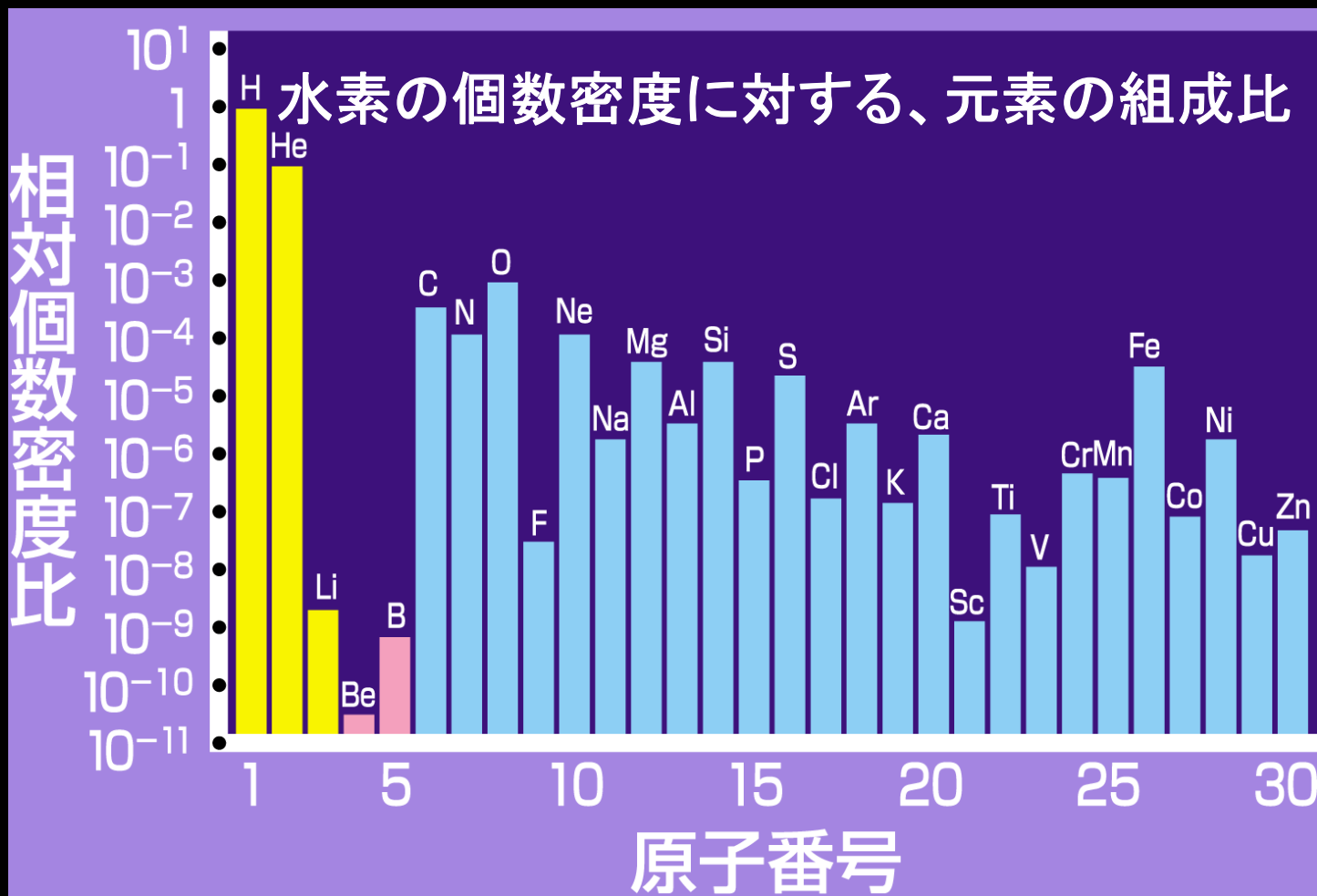


- ビッグバン理論の提唱者
- その帰結として、宇宙マイクロ波背景輻射の存在を予言
- 原子核物理、宇宙論、分子生物学等の多岐の分野にわたり、極めて独創的なアイデアを発表するとともに、優れた啓蒙書を著した



# 宇宙における元素の存在量

- 宇宙には大量のヘリウムが存在(実は自明ではない)



ヘリウムが全元素に占める割合は個数にして10%、質量にして25%

**原子核反応は高温・高密度が必要**  
⇒ **元素の起源は宇宙初期？それとも星の内部？**

# 元素の起源： $\alpha$ $\beta$ $\gamma$ 理論(1948)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 7

APRIL 1, 1948

## Letters to the Editor

**P**UBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

### The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER\*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,  
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

*Cornell University, Ithaca, New York*

AND

G. GAMOW

*The George Washington University, Washington, D. C.*

February 18, 1948

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,<sup>2</sup> the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances<sup>3</sup> it is necessary to assume the integral of  $\rho_0 dt$  during the building-up period is equal to  $5 \times 10^4$  g sec./cm<sup>3</sup>.

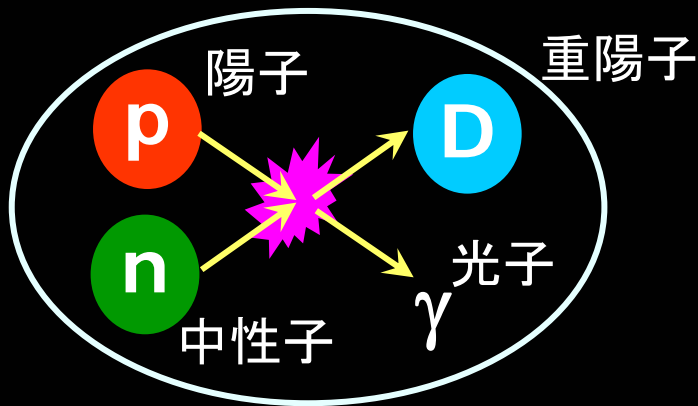
On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe<sup>4</sup> the density dependence on time is given by  $\rho \cong 10^6/t^3$ . Since the integral of this expression diverges at  $t=0$ , it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time  $t_0$ , satisfying the relation:

アルファー、(ベーテ)、ガモフの共著論文 1948年4月1日発表

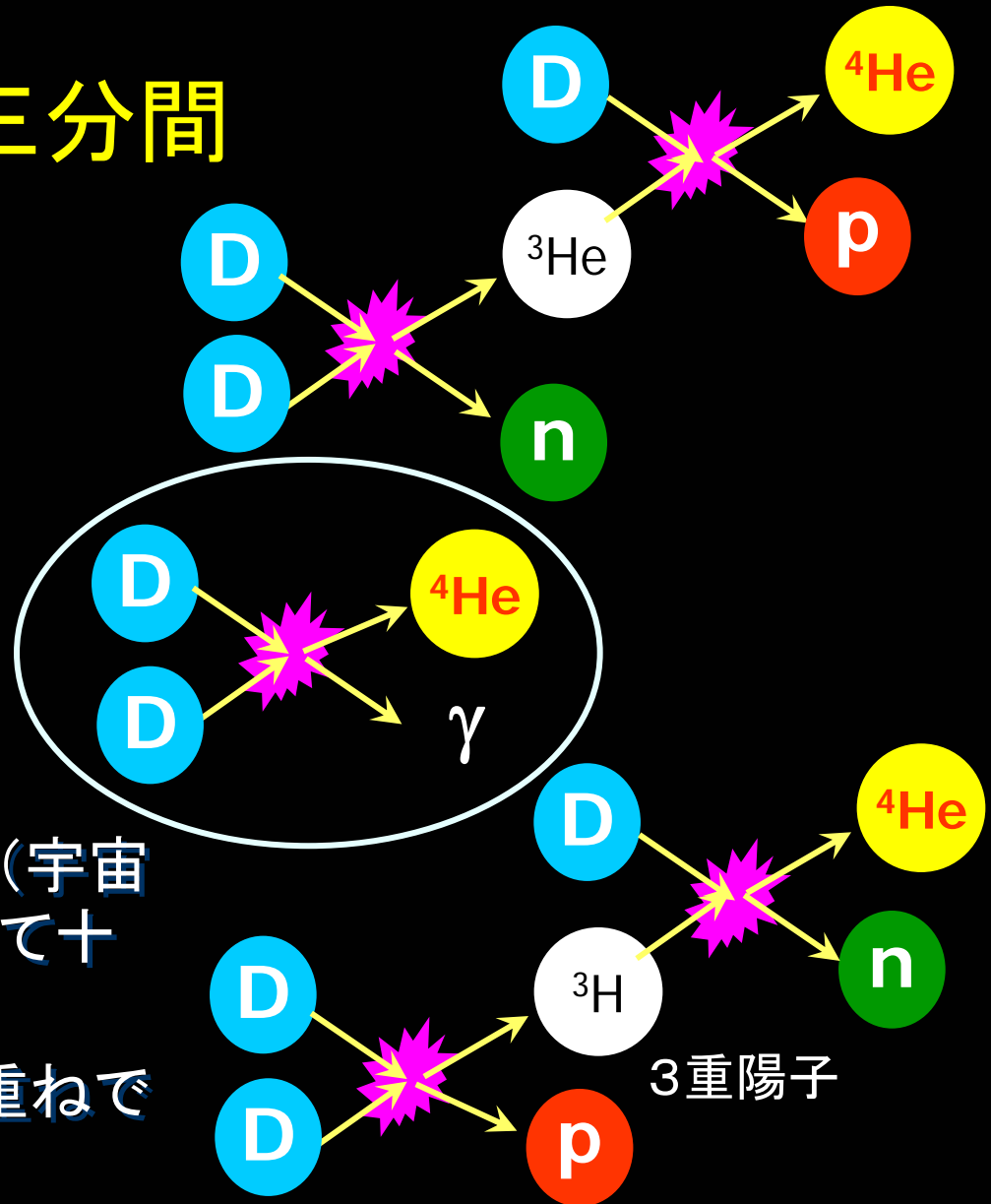
# ビッグバン元素合成反応

## ■ 宇宙誕生最初の三分間

重水素合成が第一ステップ

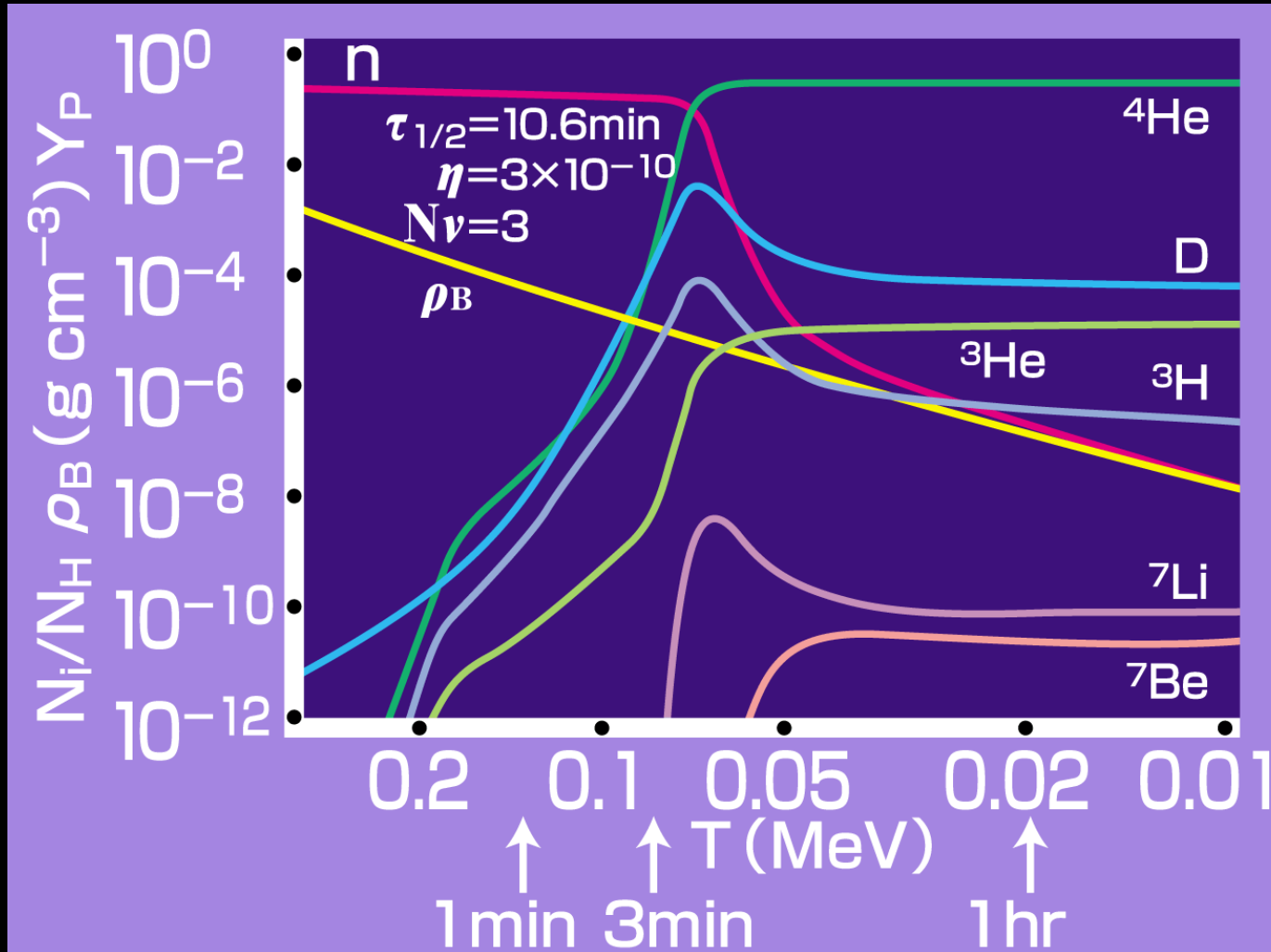


- 重陽子は壊れやすい
- 宇宙の温度が一億度以下(宇宙誕生後約3分後)となって初めて十分な重陽子が生成
- その後、二体反応の積み重ねでヘリウムが合成



# 初期宇宙の軽元素量進化

- ヘリウムの質量存在比 25%が自然に説明される



物理法則によって誕生後  
1分の宇宙が記述できる

# ヘリウムより重い元素の合成は難しい

| p | 1                        | 2                         |                           |                           |                          |                          |                 |                 |                 |                  |                  |
|---|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| n | H                        | He                        | 3                         | 4                         |                          |                          |                 |                 |                 |                  |                  |
| 0 | <sup>1</sup> H           | <sup>2</sup> He           | Li                        | Be                        | 5                        | 6                        |                 |                 |                 |                  |                  |
| 1 | <sup>2</sup> D           | <sup>3</sup> He           | <sup>4</sup> Li           | <del><sup>5</sup>He</del> | B                        | C                        | 7               |                 |                 |                  |                  |
| 2 | <sup>3</sup> T           | <sup>4</sup> He           | <del><sup>5</sup>Li</del> | <sup>6</sup> Be           | <del><sup>7</sup>B</del> | <del><sup>8</sup>C</del> | N               | 8               |                 |                  |                  |
| 3 | <sup>4</sup> H           | <del><sup>5</sup>He</del> | <sup>6</sup> Li           | <sup>7</sup> Be           | <del><sup>8</sup>B</del> | <sup>9</sup> C           | <sup>10</sup> N | 9               | 10              |                  |                  |
| 4 | <del><sup>5</sup>H</del> | <sup>6</sup> He           | <sup>7</sup> Li           | <del><sup>8</sup>Be</del> | <sup>9</sup> B           | <sup>10</sup> C          | <sup>11</sup> N | <sup>12</sup> O | F               | Ne               |                  |
| 5 | <sup>6</sup> H           | <sup>7</sup> He           | <del><sup>8</sup>Li</del> | <sup>9</sup> Be           | <sup>10</sup> B          | <sup>11</sup> C          | <sup>12</sup> N | <sup>13</sup> O | <sup>14</sup> F | <sup>15</sup> Ne | 11               |
| 6 | <sup>7</sup> H           | <del><sup>8</sup>He</del> | <sup>9</sup> Li           | <sup>10</sup> Be          | <sup>11</sup> B          | <sup>12</sup> C          | <sup>13</sup> N | <sup>14</sup> O | <sup>15</sup> F | <sup>16</sup> Ne | Na               |
|   | 7                        | <sup>9</sup> He           | <sup>10</sup> Li          | <sup>11</sup> Be          | <sup>12</sup> B          | <sup>13</sup> C          | <sup>14</sup> N | <sup>15</sup> O | <sup>16</sup> F | <sup>17</sup> Ne | <sup>18</sup> Na |
|   | 8                        | <sup>10</sup> He          | <sup>11</sup> Li          | <sup>12</sup> Be          | <sup>13</sup> B          | <sup>14</sup> C          | <sup>15</sup> N | <sup>16</sup> O | <sup>17</sup> F | <sup>18</sup> Ne | <sup>19</sup> Na |

■ 質量数5と8の安定元素がない！

■ He+p, He+n, He+Heなどの反応は起こらない

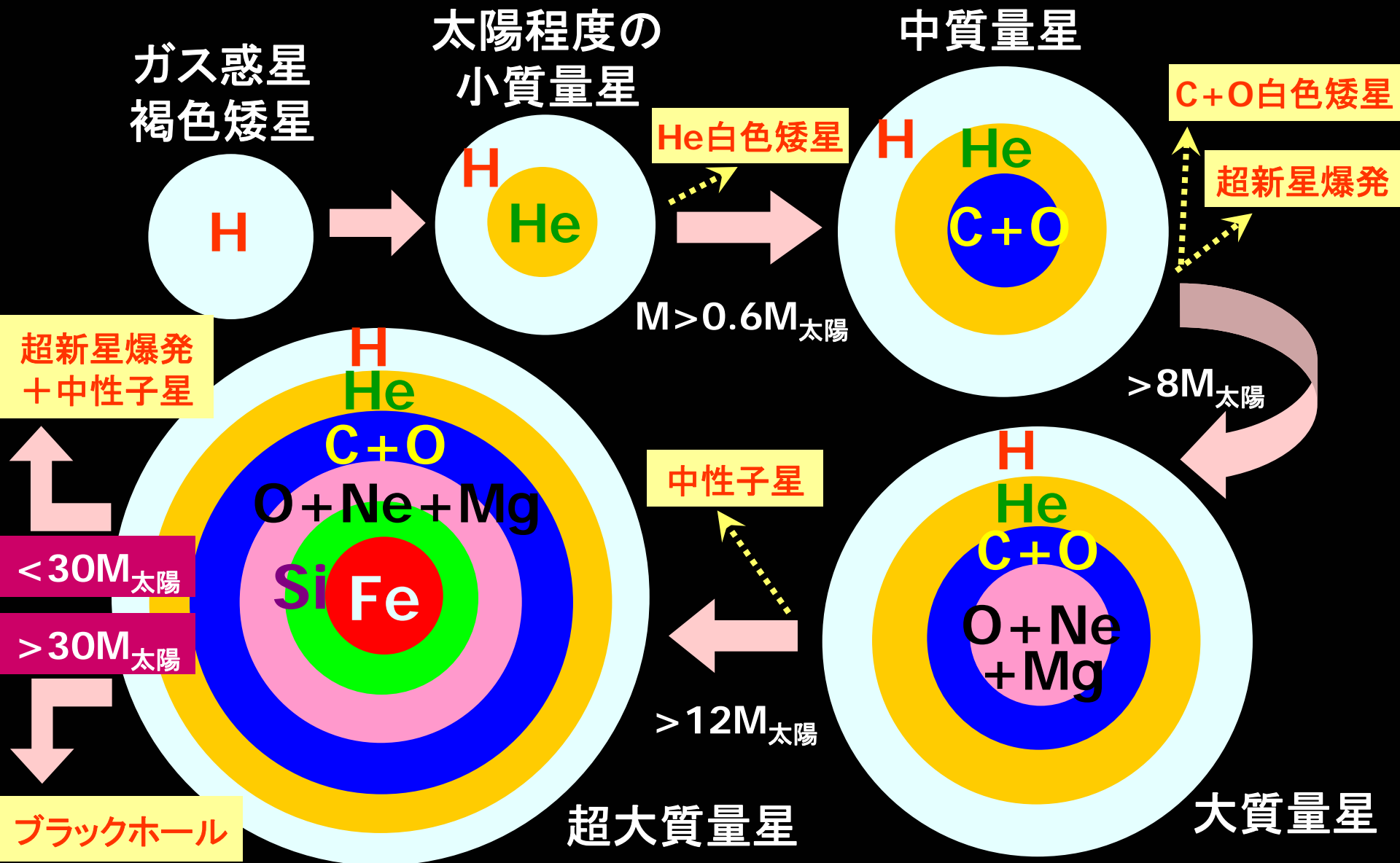
|                    |
|--------------------|
| 不安定                |
| 半減期<br>10~<br>100日 |
| 天然<br>放射性          |
| 安定                 |

# 2つの元素合成理論の比較

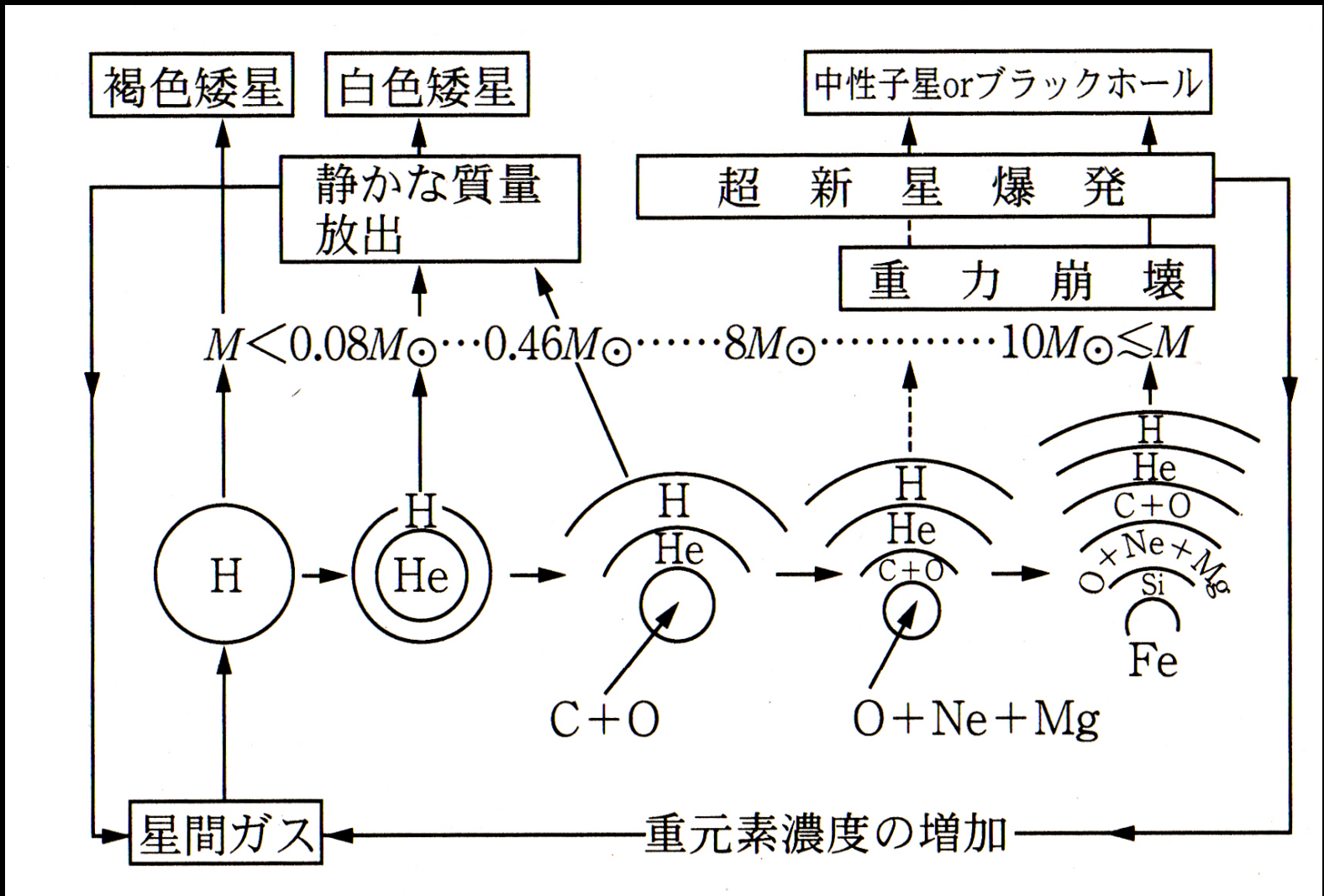
|         | ビッグバン元素合成                  | 星元素合成                       |
|---------|----------------------------|-----------------------------|
| 場所      | 初期宇宙                       | 星の内部                        |
| 時間スケール  | 分                          | 億年                          |
| 温度      | 10億度<br>時間とともに<br>急速に下がる   | 1000万度<br>時間とともに<br>ゆっくりと上昇 |
| 物質密度    | 0.00001 g/cc               | 100 g/cc                    |
| 光子バリオン比 | $10^9$                     | 1以下                         |
| 生成元素    | 軽元素<br>(ヘリウム、重水素、<br>リチウム) | 重元素<br>(炭素、窒素、酸素、<br>など)    |



# 星の内部のたまねぎ構造



# 星の進化＝元素合成＋元素の循環



# 惑星状星雲

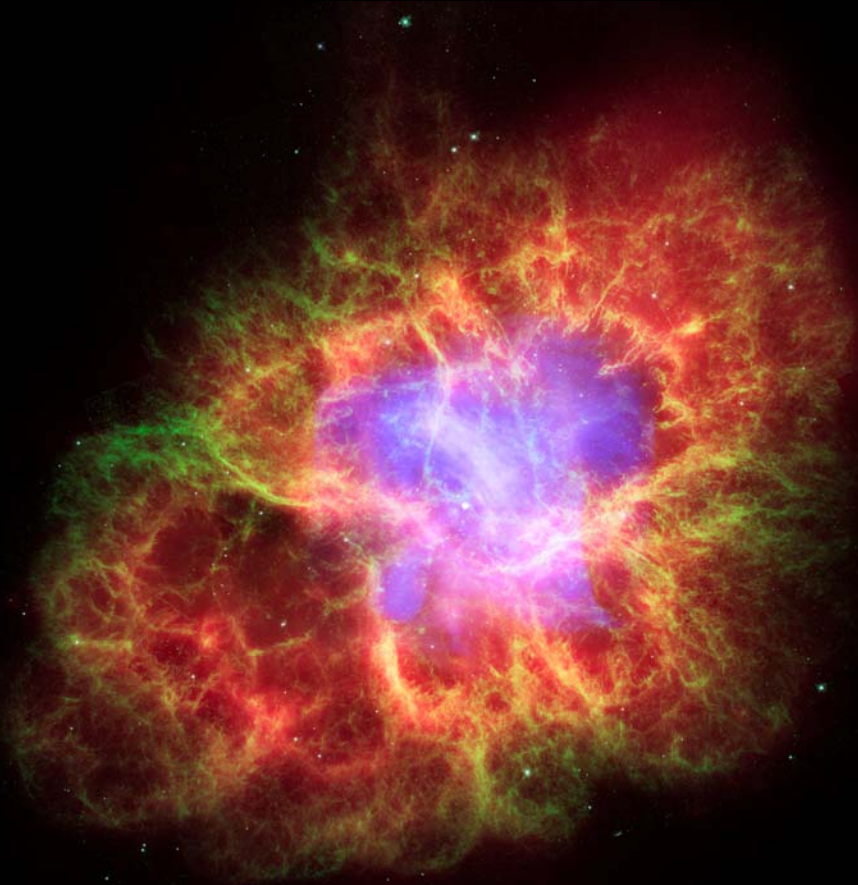
- 赤色巨星の最期に放出されたガスが中心の白色矮星からの紫外線をうけて輝く



**Helix Nebula**  
**HST画像**

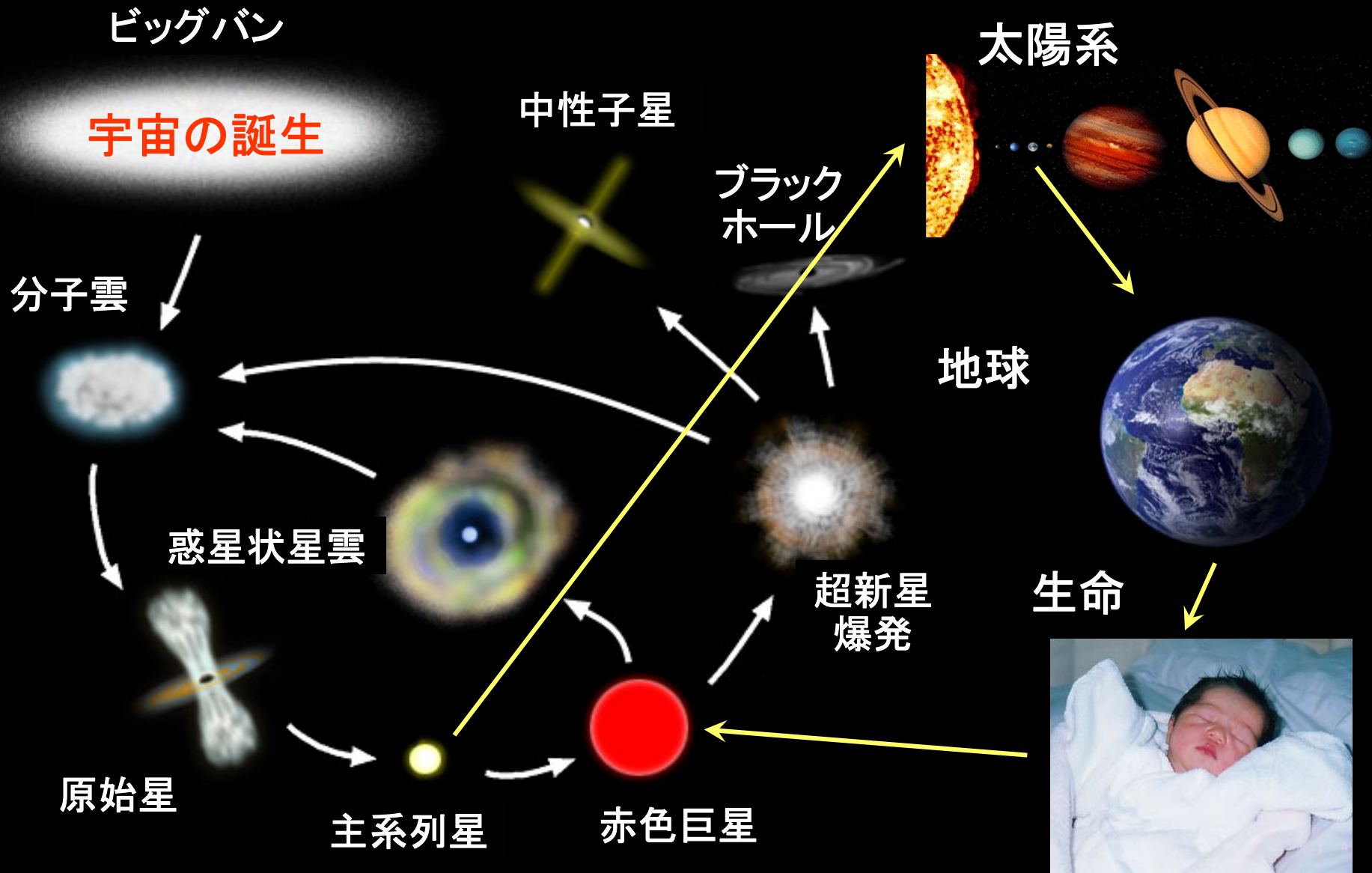
# 超新星爆発

- 太陽の8倍以上の質量の星の終末



**かに星雲**  
1054年に起  
こった超新星  
爆発の残骸  
X線 Chandra  
可視光 HST  
赤外 Spitzer  
の合成画像

# 宇宙・天体・物質・生命の共進化



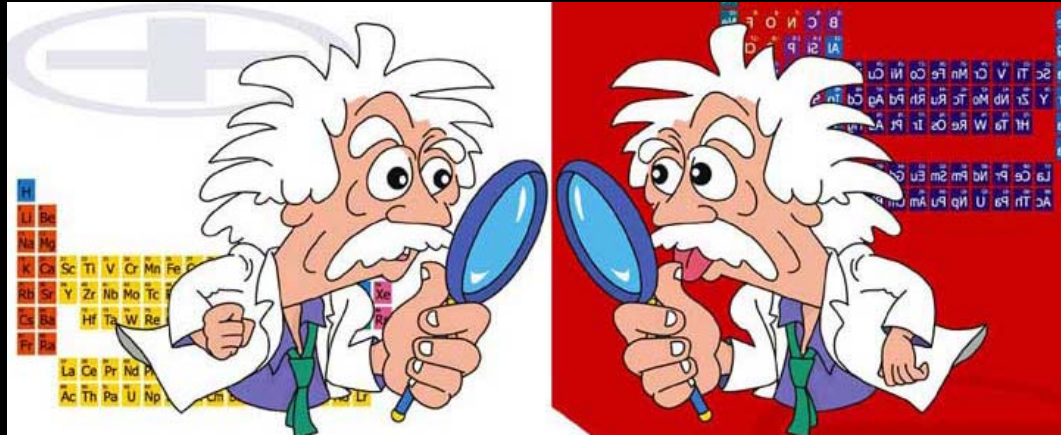


# 我々は星の子供：宇宙の元素循環

- ビッグバン後、最初の3分間で合成された軽元素から、数億年後に**第一世代の星**が誕生
- **星の内部で重元素が合成**され、それが星の進化の最終段階で宇宙にばらまかれる
- それを材料として**次の世代の天体**が誕生
- この過程の繰り返しが宇宙での元素循環
- **我々は、かつて宇宙のどこかで生まれた星の内部で合成された重元素、さらには宇宙最初の3分間で合成されたヘリウムを材料としている！**



# 宇宙は元素だけでできているか？

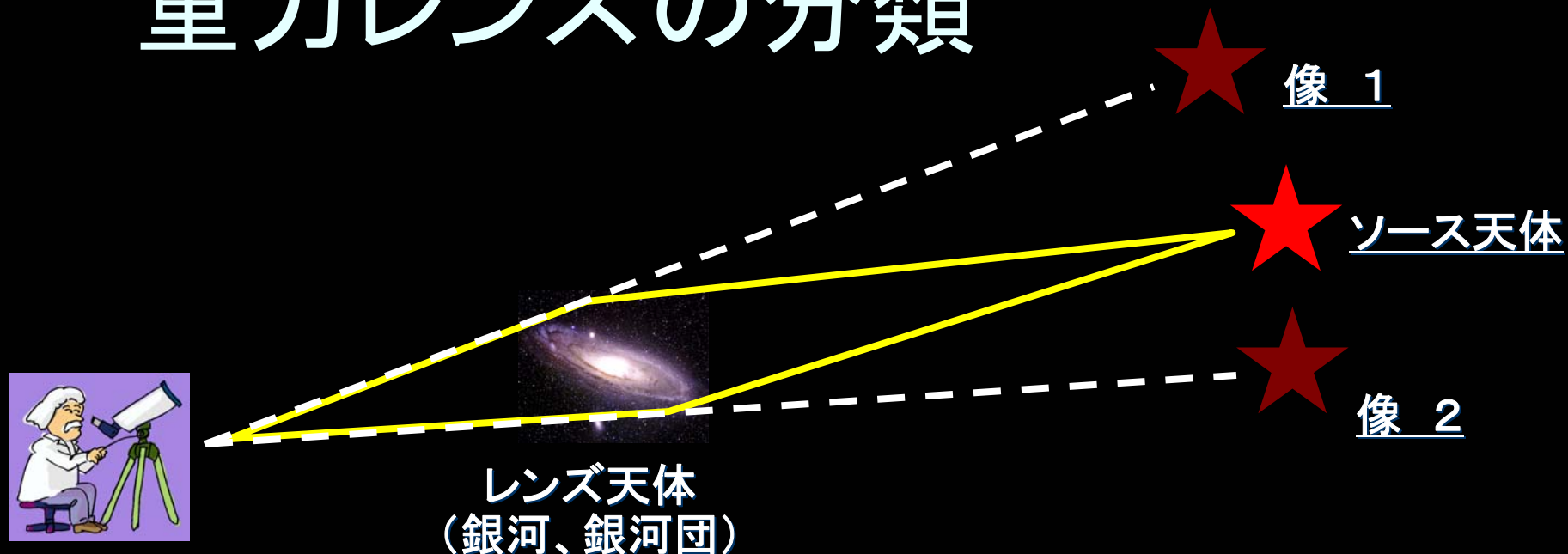


- 宇宙論における最も基本的質問の一つ
- 20世紀天文学観測の予想外の大発見
  - 宇宙には大量のダークマターが存在
  - 実はさらに大量のダークエネルギーが存在
- 宇宙はダーク成分に支配されている

# 宇宙のダークマター

- 実は、光り輝く天体の周りには光ることのないダークマターが満ちている
- **ダークマターの存在は、その周囲を通過する光の軌道を変化させる**
  - アインシュタインの一般相対論にもとづく重力レンズ効果によって実証されている
- その正体は、未発見の素粒子であると考えられている(天文学による微視的世界の発見)

# 重力レンズの分類



- 光線は重力場によって曲げられる
  - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
  - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
  - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)



# 100億光年先からの一般相対論的蟹気楼 (SDSS J1004+4112)



2003年に東京大学の稲田直久と大栗真宗がSDSSで発見、すばるで確認  
Inada et al. Nature 426(2003)810

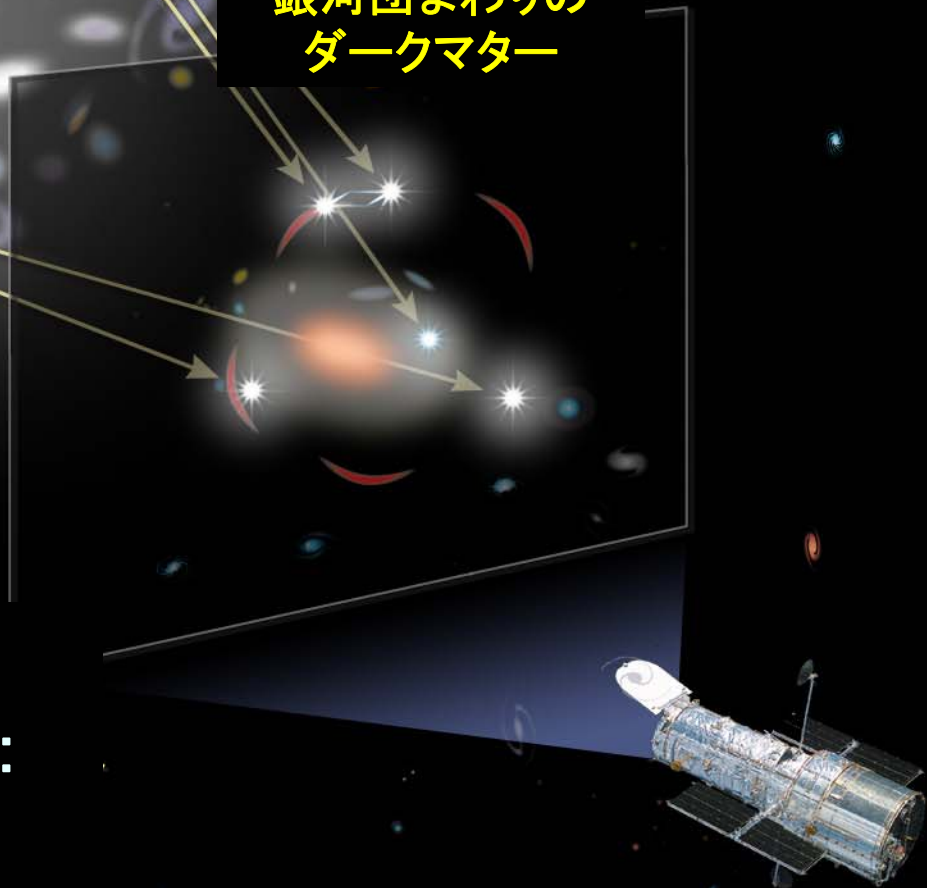
銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、  
みかけ上5つの異なる天体をつくる  
(ダークマターの存在)

98億光年先にある  
クエーサー(中心に  
ブラックホール)

62億光年先にある  
銀河団まわりの  
ダークマター



重カレンズ天体  
SDSS J1004+4112 :  
一般相対論的蜃気楼









# 宇宙のダークエネルギー

- 宇宙のあらゆる空間を一様に満たしているものは存在するか
  - 仮にあるとしてもそのようなものは観測可能か
  - 「真空」には本当に何も無いのか
  - 相対的でない測定はあり得るか
- ダークエネルギーは、空間的には一様分布していてもその密度は時々刻々変化する
  - 宇宙膨張は宇宙の密度の絶対的な値（何かとの差ではなく）によって決まる
  - 宇宙膨張の時間依存性を測定する
  - 時間軸に沿った相対的な測定は可能

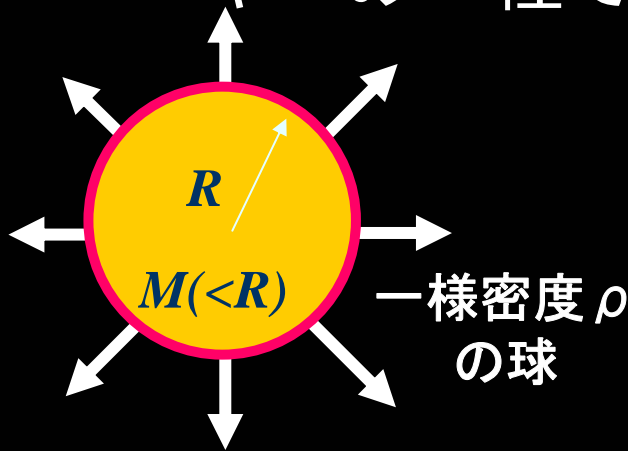
# 宇宙膨張の方程式

## ■ ニュートン力学による運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(< R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left( \frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

## ■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度  $\rho$  のみならず圧力  $p$  もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」( $\Lambda$ : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

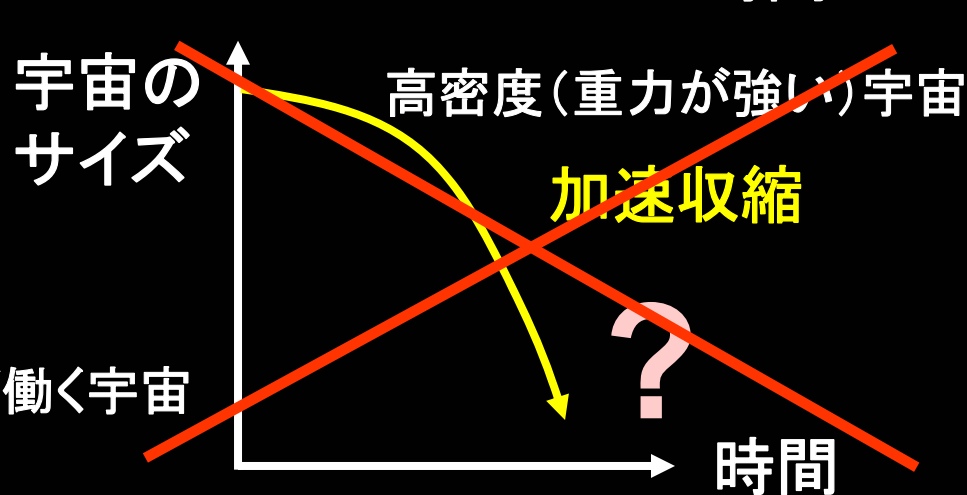
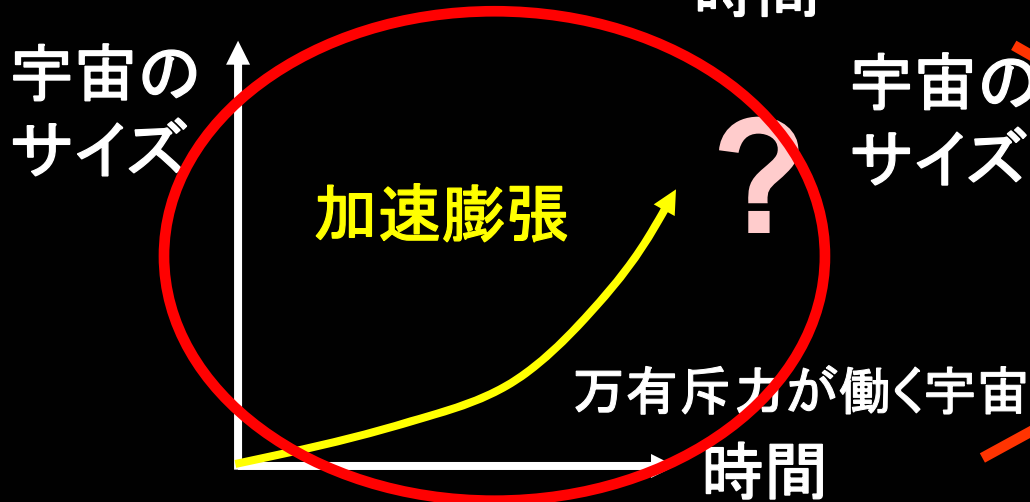
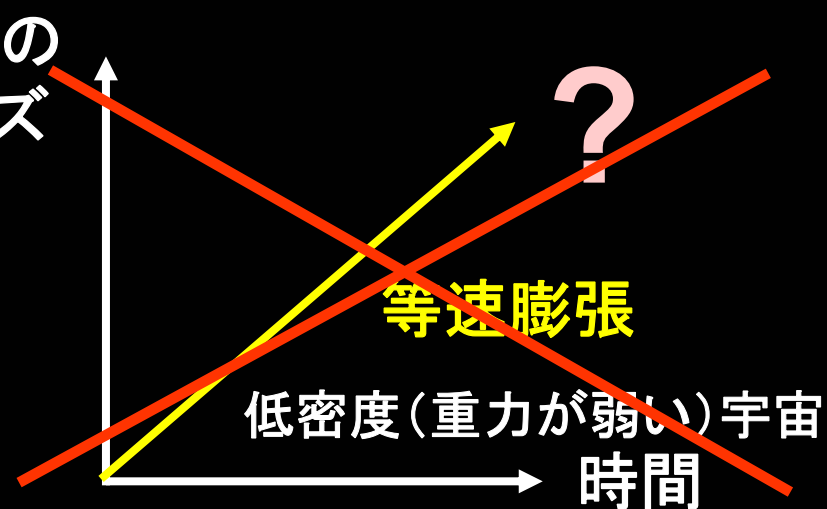
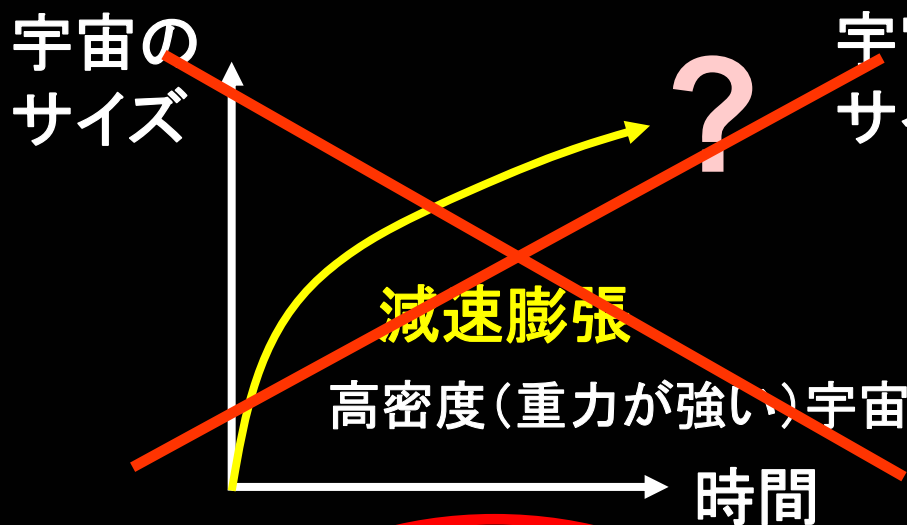


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

一般相対論的宇宙の運動方程式

# 宇宙の組成と宇宙膨張の未来

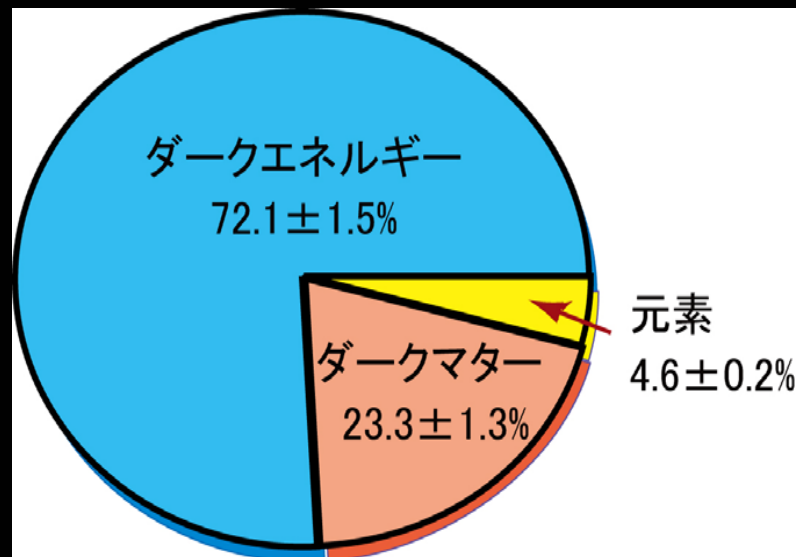
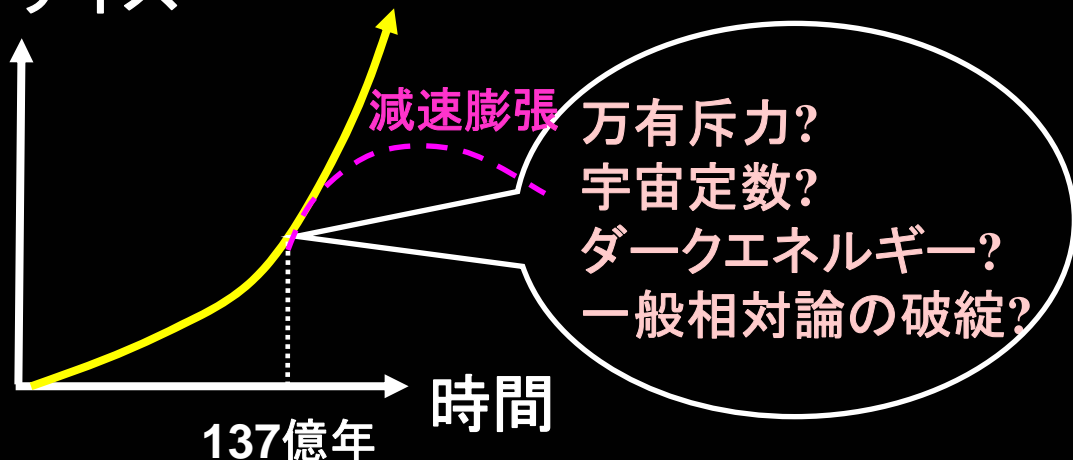
- 宇宙膨張の進化の観測を通じて、宇宙を一様に満たしている成分の存在が検出できる



# 宇宙の95%以上が正体不明

宇宙の  
サイズ

宇宙の加速膨張



## ■ ダークエネルギーの正体は何か？

- 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
  - アインシュタインの宇宙定数 (1917年)?
  - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
- 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻

## ■ 我々は何も知らなかった

# 宇宙の未来

日経サイエンス  
2008年6月号

The End of Cosmology ?  
L.M.Krauss & R.J.Scherrer



**現在** 夜空に伸びるぼんやりした光の帯は、天の川銀河の銀河円盤。アンドロメダ銀河やマゼラン雲など、いくつかの近傍銀河は肉眼で見える。望遠鏡を使えば数十億個もの銀河が見える。



**50億年後** アンドロメダ銀河が近づいてきた結果、夜空いっぱいに見える。太陽は赤色巨星に膨れあがった後に燃え尽き、地球は酷寒の世界となる。

- 50億年前 宇宙の加速膨張始まる
- 50億年後 太陽が一生を終え、地球を飲み込む  
天の川銀河とアンドロメダ銀河が衝突
- 1000億年後 超銀河形成、他の銀河は視界から消える
- 100兆年後 恒星が燃料を使い果たして消失
- $10^{37}$ 年後 物質を構成している陽子が崩壊

**1000億年後** 天の川銀河は球状の超銀河になり、地球はその外縁部を“見捨てられた天体”として浮遊しているかもしれない。他の銀河はすでに視界から消え去った。

**100兆年後** 消灯の時。最後の恒星が燃え尽きる。ぼんやりと光るブラックホールと、どこかの文明がともした人工照明を除き、宇宙は暗闇となる。最後に、銀河が崩壊してブラックホールとなる。



# 宇宙の組成観の変化

