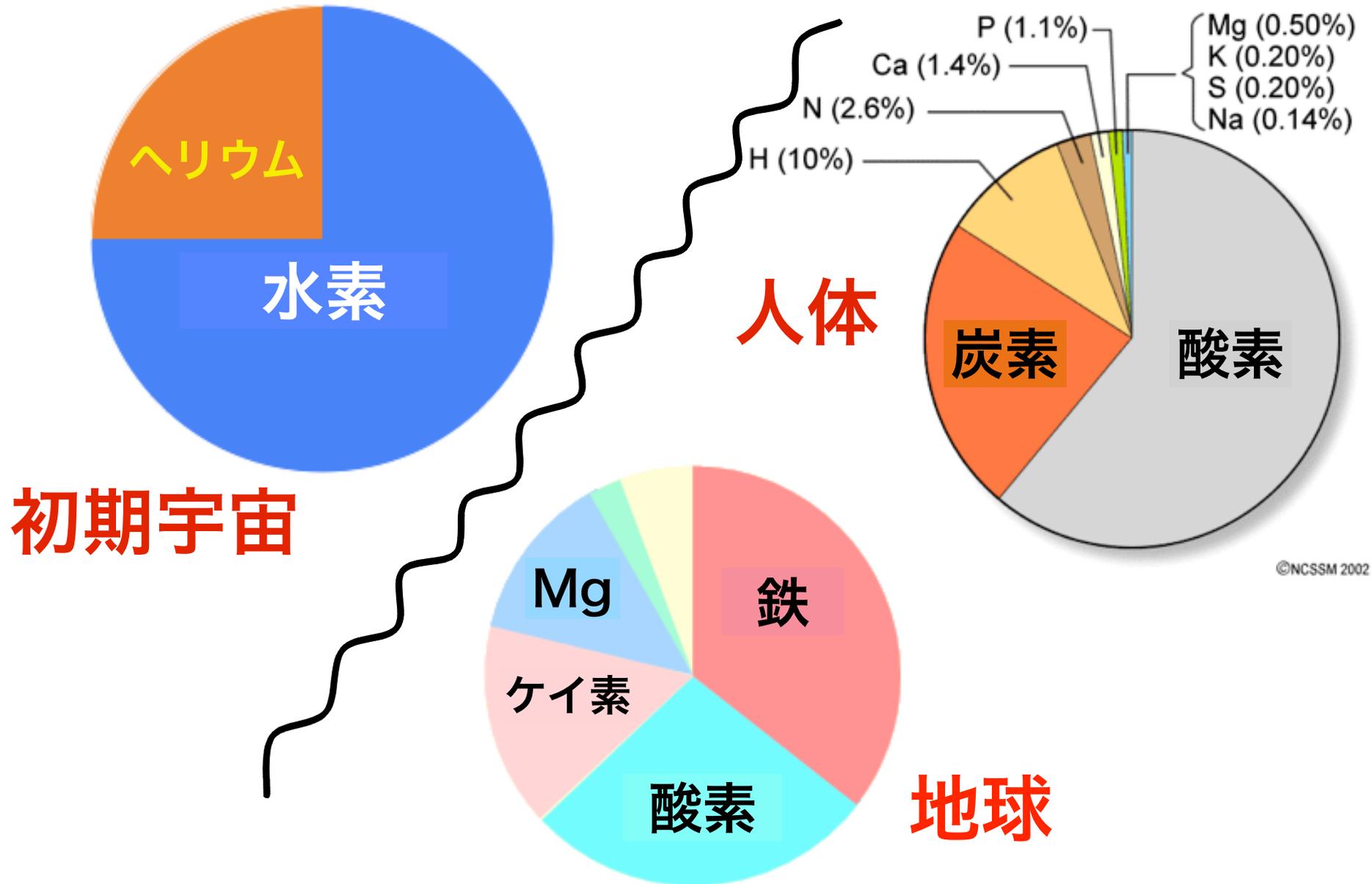


# 元素の起源

# 遠くの元素、近くの元素



# 謎

1. 宇宙初期には水素、ヘリウムとほんのわずかな軽元素しかなかった
2. 地球や我々の体は、炭素、酸素、ケイ素などの重元素を多く含む

# 光輝く銀河宇宙



ハッブル宇宙望遠鏡により撮影

# 宇宙の光の源

恒星はみずから**光輝く**

恒星の内部では核融合反応がおこり、  
そのエネルギーによって自重を支えている

星は**軽い元素から重い元素を合成する**

*It is the stars, the stars above us, govern our conditions.  
- King Lear, Act 4, Scene 3.*

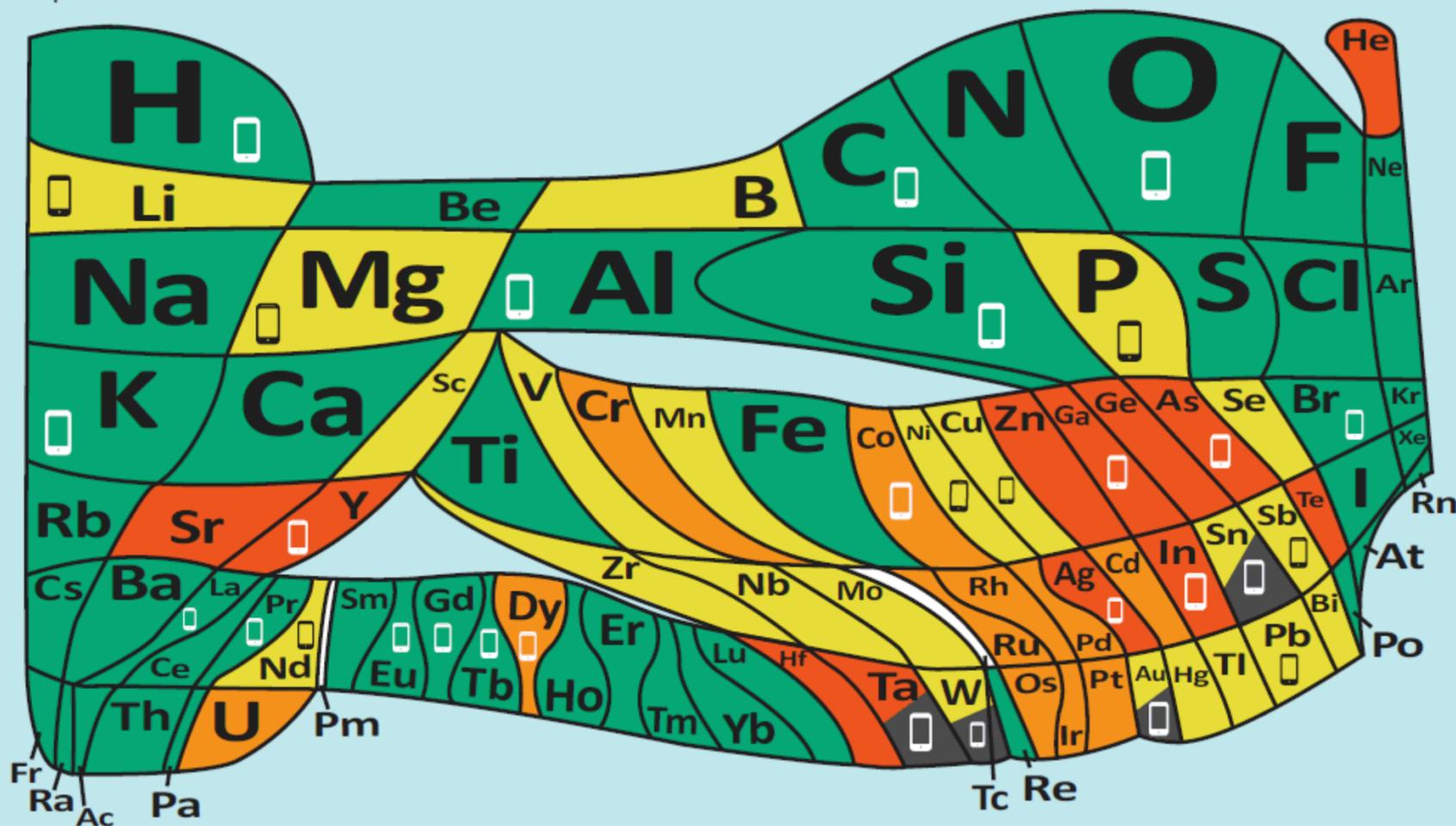


United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



2019  
International Year  
of the Periodic Table  
of Chemical Elements

# すべてのものを構成する天然元素90 どれだけあるだろう？ 十分だろうか？



- 今後100年以内に深刻な枯渇が懸念される
- 使用量が増えると枯渇が懸念される
- 入手が限られており、将来の供給に不安がある
- 十分な供給がある
- 合成元素
- 紛争を引き起こした鉱物
- スマートフォンに用いられている元素

もっと読もう、ビデオゲームをしよう <http://bit.ly/euchems-pt>



この作品はCreative Commons Attribution-NoDerivs CC-BY-NDにライセンスされています

# 新元素 日本の発見認定

## 113番、理研が命名権獲得

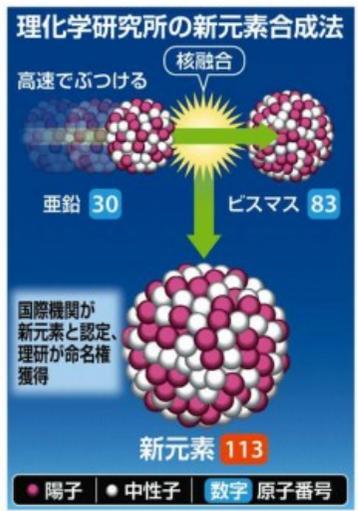
理化学研究所は31日、理研が合成した原子番号113番の元素が新元素と国際的に認定され、命名権を獲得したと正式に発表した。日本が発見した元素の名前が周期表に初めて刻まれる歴史的な快挙が確定した。理研本部（埼玉県和光市）で会見した研究チームの森田浩介グループディレクターは「うれしかった。森田氏は「うれしかった。ことに感慨深いものを感じる」と喜びを語った。新元素の名称と元素記号を提案する権利は発見チームに与えられる。113番の発見を争ったロシアと米国の共同研究チームを退けての権利獲得で、日本の科学史に残る大きな成果となった。名称は未定だが、日本にちなむ「ジャポニウム」が有力とみられる。森田氏は「これからチームで話し合っ

て候補を決める」と述べた。元素は物質を構成する基本的な粒子である原子の種類のこと、118番まで見つかっている。その発見は国家の科学技術力の象徴とされ、米露欧が激しく競って来た。アジアによる新元素の発見は初めて。理研は平成16年9月、森田氏が加速器を使って30番の亜鉛を83番のビスマスに高速で衝突させ、核融合

反応により113番の元素合成に成功したと発表。24年までに計3個の合成を高い信頼性で確認した。露米チームは2004年2月以降、露ドブナ合同原子核研究所で別の手法により合成したと発表。個数は数十個と多かったが、113番元素であることの確かさで理研の国際評価が上回ったもようだ。115番、117番、118番は露米が命名権を獲得した。（30面に関連記事）



原子番号113番の新元素の命名権を獲得し、周期表に記載される位置を示す理化学研究所の森田浩介グループディレクター。31日午後、埼玉県和光市（福島範和撮影）



●陽子		●中性子		数字	原子番号	
Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po
Ds	Rg	Cn	113	Fl	115	Lv
Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm

# 新元素 ニホニウム

113番元素が理研から出た理由

1. 世界に誇れる最先端の装置  
国の長期的な支援による大型加速器装置の開発と施設維持
2. じっくり取り組める体制  
短期成果主義ではない主任研究員の下での定年制研究員システム  
→これらは今後の国立研究開発法人の特徴のひとつである
3. 研究者の超人的な粘り、忍耐力、努力

森田浩介博士スライドより

# 元素はどこで作られたか

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U											

Graphic created by Jennifer Johnson

# BIG BANG

1  
H

big bang fusion



2  
He

3  
Li

# + 大質量星

1 H	big bang fusion 																2 He
3 Li	4 Be	exploding massive stars 										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	exploding white dwarfs 										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr														

# + 中性子星の合体

1 H	big bang fusion 																2 He					
3 Li	merging neutron stars 										exploding massive stars 					6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 										exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe					
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra																					
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu						
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																	



# ヘリウムの起源

宇宙論の本や教科書を読むと

「水素やヘリウムなどの軽い元素は宇宙初期のビッグバンとともに合成された」という感じで何の問いもなく書かれてあり、「ああ、そうですか」と単なる知識を得るだけになってしまう。

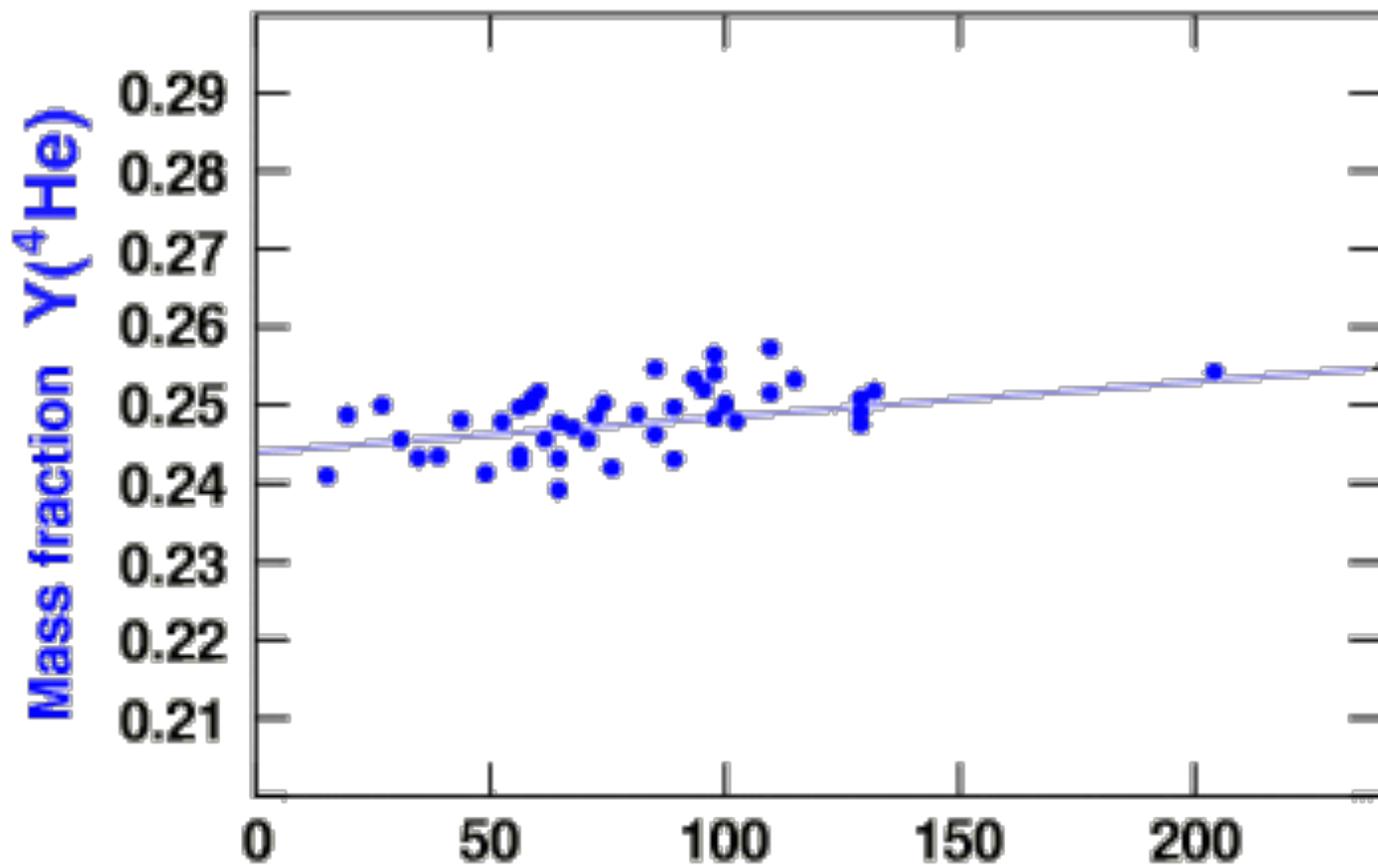
歴史的にはもちろんそうではなかった。

「もっとも軽い水素原子核(陽子)は基本要素として宇宙初期からあったかもしれないが、それ以外の元素は全て星で合成された」と考えられていた。

…が、上手くいかなかった。

# 宇宙のヘリウムの量

若い星まわりの電離領域からの輝線を観測し、  
ヘリウムの量と酸素（重元素の代表）の量を比較



酸素原子の数 (水素原子核 100万個あたり)

# 星はヘリウム工場ではなかった

ヘリウムが星で合成されたとすると計算が合わない。

典型的な銀河の明るさを  $L \sim 10^{11} L_{\text{sun}}$  としよう。

おおよその宇宙年齢（銀河年齢）100億年の間に、

銀河からは  $7.5 \times 10^{73} \text{ eV}$  のエネルギーが放射される。

一方、銀河の中の星の総質量も  $10^{11} M_{\text{sun}}$  程度で、

銀河には  $2 \times 10^{68}$  個の陽子がある。陽子1個あたり

0.3 MeV のエネルギー放出。水素燃焼では陽子一つを

燃焼すれば 7MeV のエネルギーを生成するはず。

つまり、銀河（星）は明るいけど、質量割合にして4分の1ものヘリウムを作るほど輝いていたわけではない。

どこかに別のヘリウム工場がなくてはならない。

一方、ビッグバンでは炭素は\_できない\_

重元素合成（核融合）には高温高密度が必要。

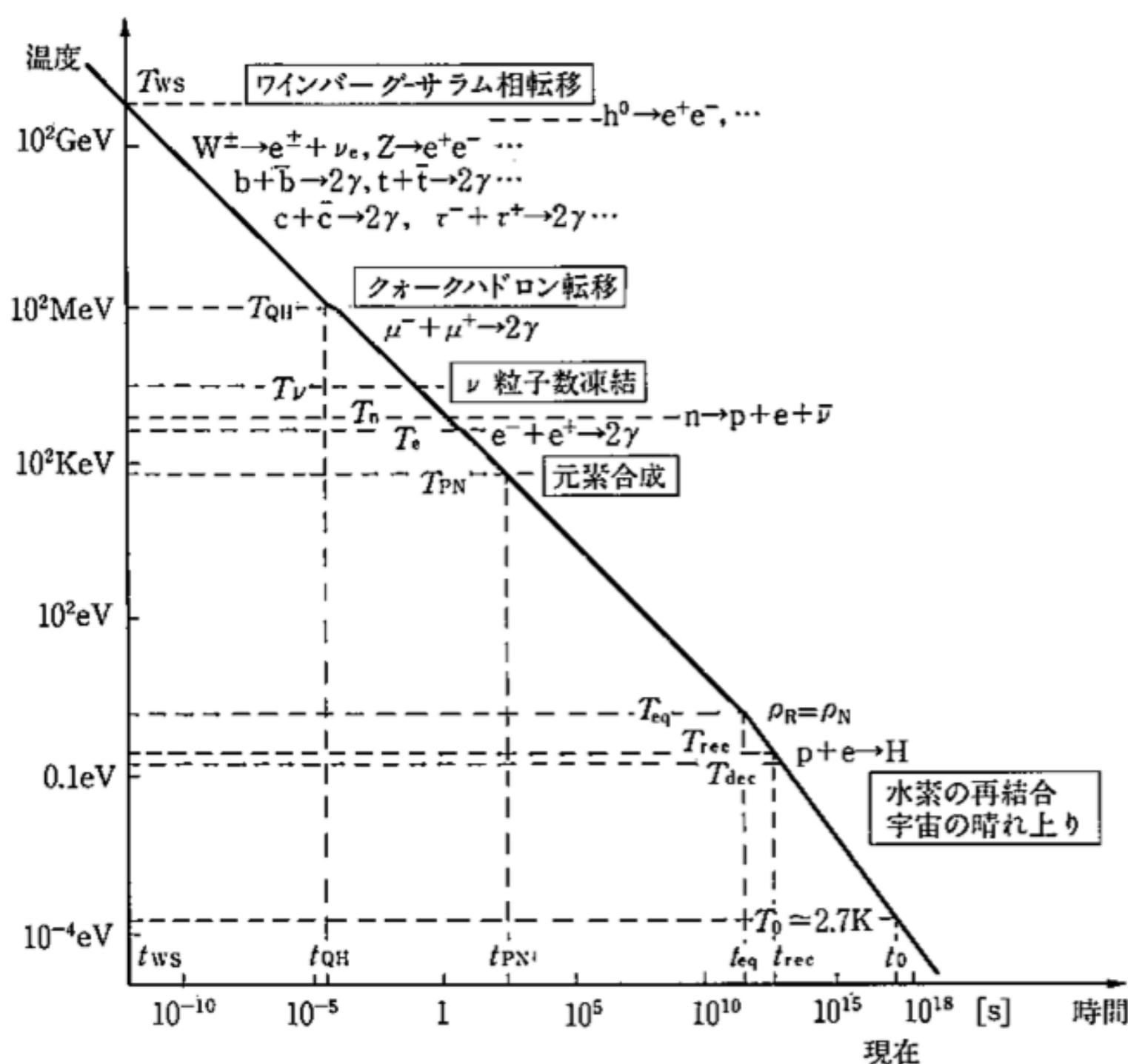
ビッグバンで始まった宇宙初期は高温高密度で  
重元素合成に適しているように思えるが.....



諸般の事情により水素ヘリウムしか

生成されなかった。

↓  
明るすぎた初期宇宙



# 林忠四郎博士の発見

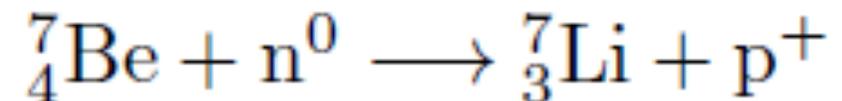
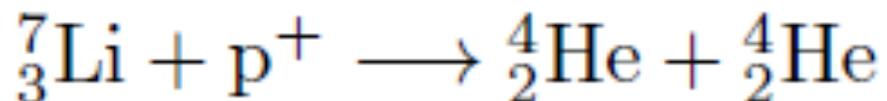
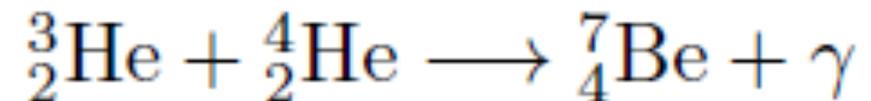
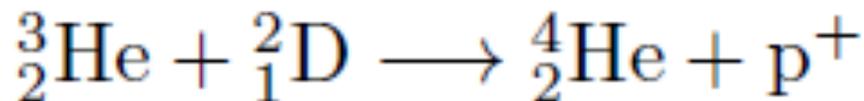
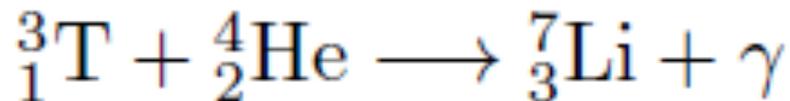
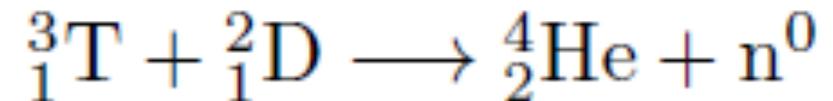
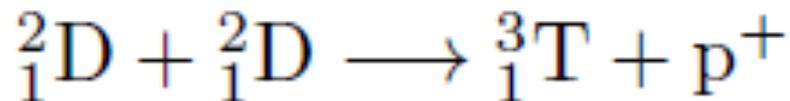
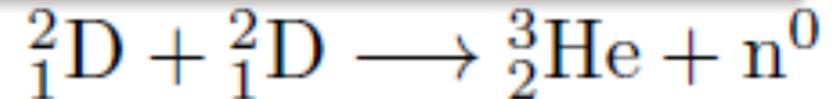
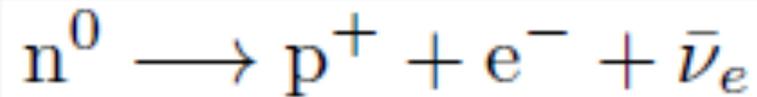


(自叙伝から)

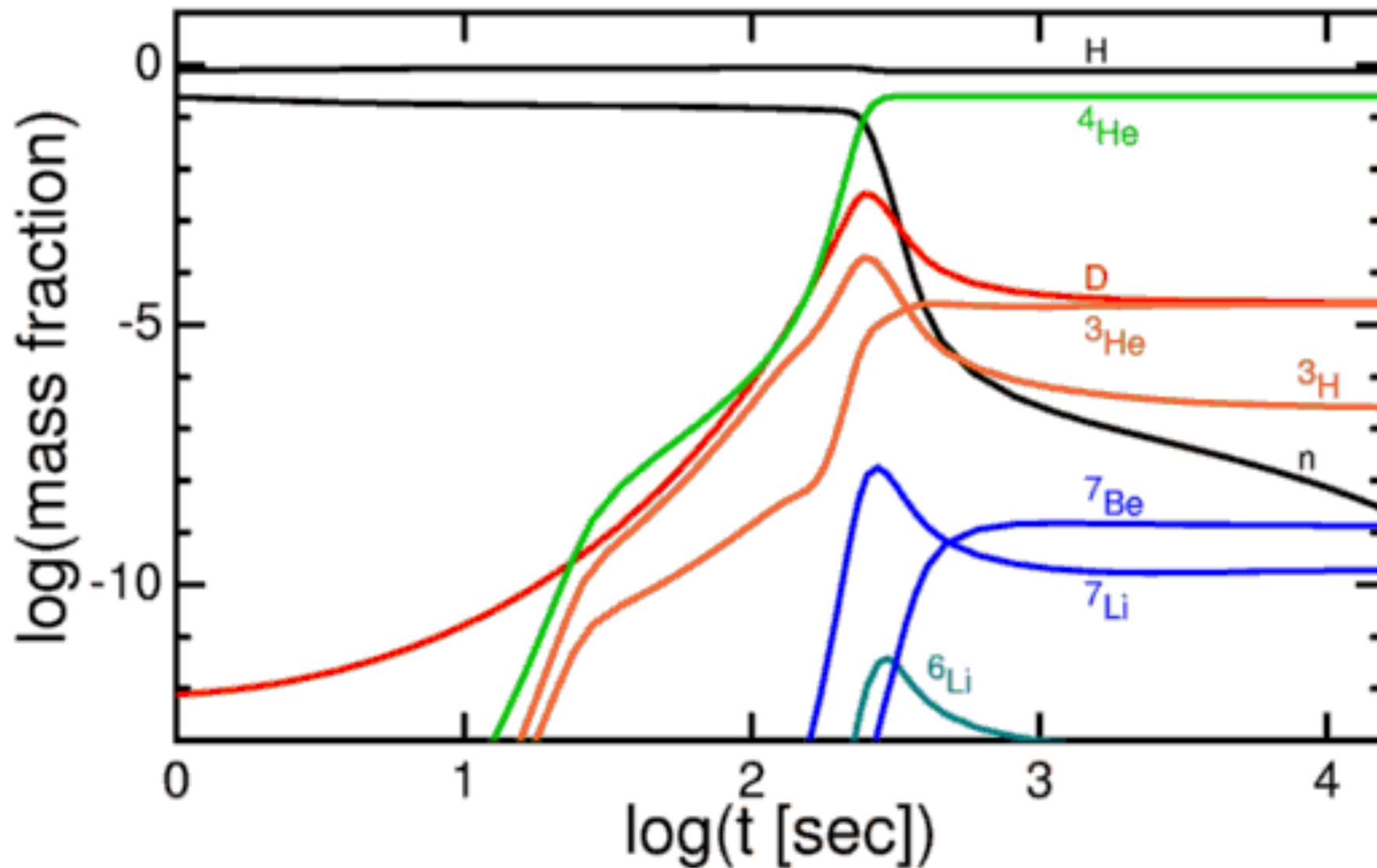
私は膨張宇宙の温度降下に際して、中性子・陽子・電子・陽電子・ニュウトリノ・反ニュウトリノの間の、フェルミの弱い相互作用が非平衡的に起こる場合（反応と逆反応が釣り合っていない場合）に、中性子と陽子の存在比が時間的にどのように変化するかを計算した。この変化は、相互作用の反応率を係数とする非線形の微分方程式で記述されるが、電子・陽電子・ニュウトリノ・反ニュウトリノの夫々の数は中性子・陽子の数に比べて圧倒的に多いので、結局は、線形の方程式に帰着する。温度の関数としての反応率を数値計算し、これをもちいて、中性子と陽子の存在比の時間変化の方程式を数値積分したのである。ところで、線形の方程式の解が比較的簡単な式で表わされることは、三高同級生の桑垣君の注意があって、このとき思い出すことができた。

さて、宇宙の温度が一億度の程度に下がると重陽子（存在量は小さい）を經由してヘリウムがつくられる。中性子の半減期の当時の観測値を用いると、最後に残った水素とヘリウムの重量比はほぼ3対2であって、これは当時の星の表面の観測値とほぼ一致した。正確な半減期の値を用いると、水素とヘリウムの重量比は3対1の程度で、星の観測値との一致はさらに良くなる。この論文は1950年の「プロGRESS」に掲載された。私はこの結果をガモフに手紙で詳しく報告した。当時コウネル大学に滞在しておられた菊池正士先生は、私の仕事を引用したガモフの講演を聞かれた由である。ずっと後の1977年に、S. ワインバーグが「最初の3分間（宇宙起源の現代観）」（邦訳あり）という本を書いたが、この中に私の仕事が引用されている。

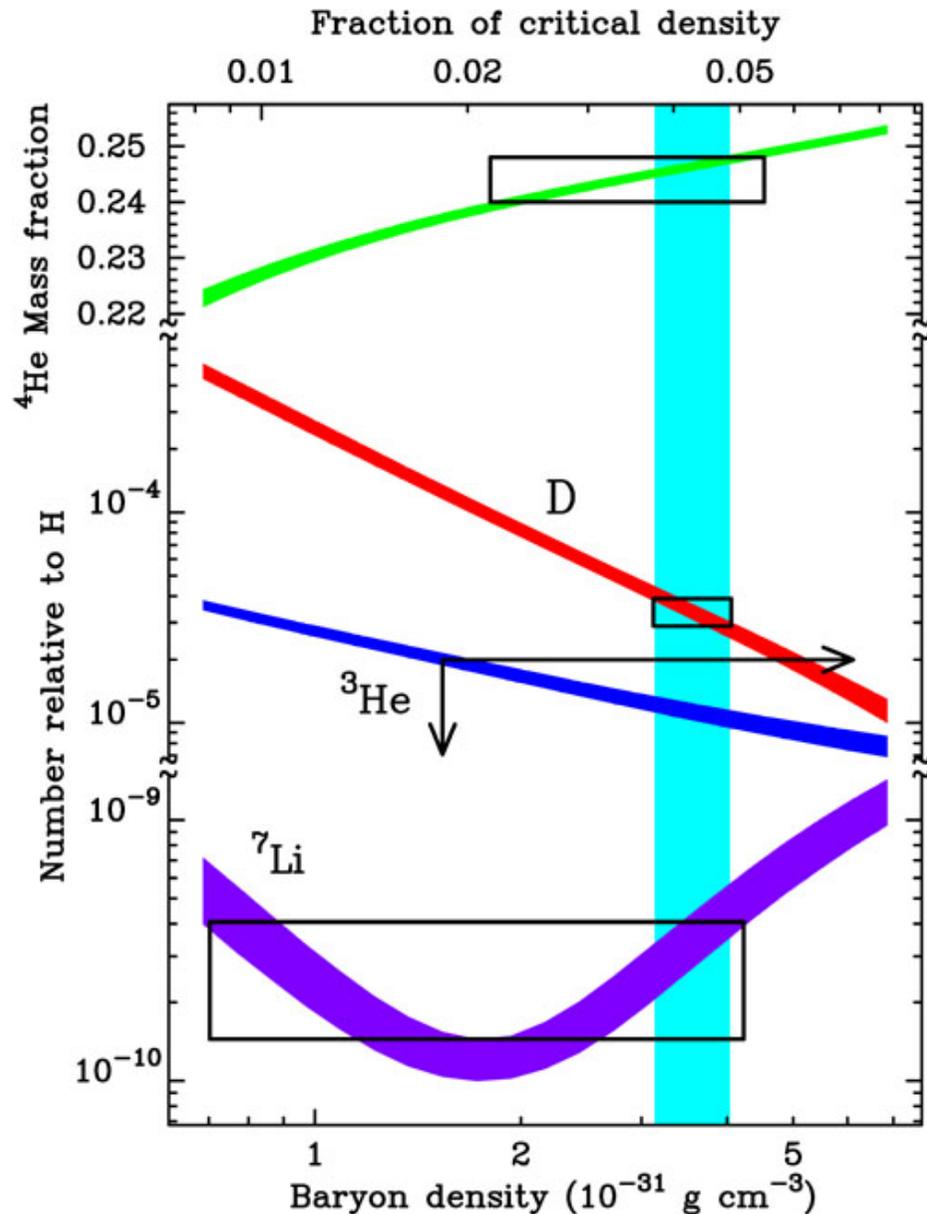
# 宇宙初期の原子核反応



# 詳細な計算の結果



# ビッグバン元素合成



合成されるヘリウムの量は  
宇宙の物質密度に大きく依存  
リチウムの量も星の分光観測  
から調べることができるの  
だが...

# まとめ: 元素の起源について

もっともシンプルに考えると、宇宙初期には水素だけがあり、その後なんらかの過程で他の重元素が合成されたのだろう。

ところが3つの謎がある。

1. 星の内部での核融合によって合成されたとする、少なくともヘリウムの存在量を説明することはできなさそうだ。
2. 高温高密度の宇宙初期にいろんな元素をつくろうとしても、その最初のステップとなる重水素合成  $p + n \rightarrow d + \gamma$  が進まない。炭素以上はやはりどこかで作らなくてはならない。
3. 元素の中でもとても重いもの、中性子をたくさん含むものはどこでできたのだろうか。