

基礎無機化学 第2回
原子の構造, 誕生, 周期表

本日のポイント

原子の構造

電子, 原子核(陽子 + 中性子)

原子の誕生

ビッグバンでHとHeが生じ, 恒星での核融合と超新星爆発・中性子星の融合で他の元素が誕生

周期表

縦方向で似た化学的性質

電子の出しやすさや半径の系統的变化

典型元素(s, pブロック元素)と

遷移元素(d, fブロック元素)

身近な全ての物質は原子から出来ている

(宇宙には原子以外から出来ているものもあるが、身近には存在せず化学の対象外)

昔は、

- ・物質は原子(分割出来ない粒)から出来ている
- ・連続的にどこまでも分割出来る

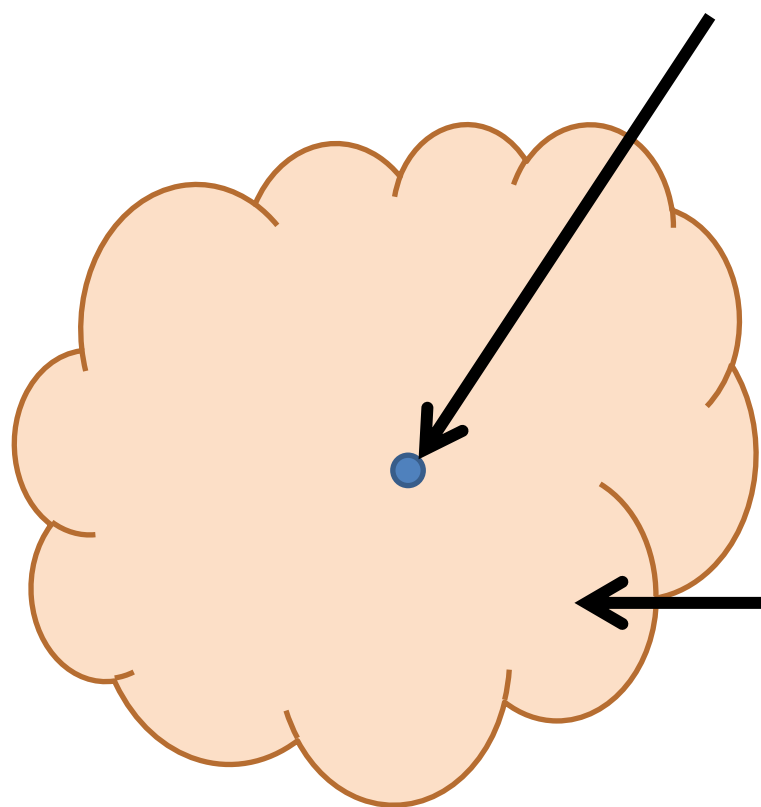
という説が対立していたが(後者が優勢), 1900年頃になりようやく原子説が広く認められるようになった.

原子: 物質の基本であり, 分割不能で, 不変な単位

.....だったのだが, 同時期(1897)に電子が発見されており, 原子が分割可能である事が明らかに. 核分裂の発見もほぼ同時で(1903), 不変では無いことも判明した.

原子の構造

20世紀の初頭によく存在が実験的に認められた原子。
科学の発達により、その内部構造が明らかとなっている。



原子核(正電荷を持つ)

原子番号と同じ数の陽子

同じぐらいの数の中性子

サイズ的にはほとんど点。

(原子サイズの1/10万程度)

原子の質量のほぼ全部

(=陽子の数 + 中性子の数)

電子(負電荷を持つ)

原子番号と同数(中性時)

重さはほとんど無い

もやっと広がっている

まずは、この原子モデル成立の流れを見ていく

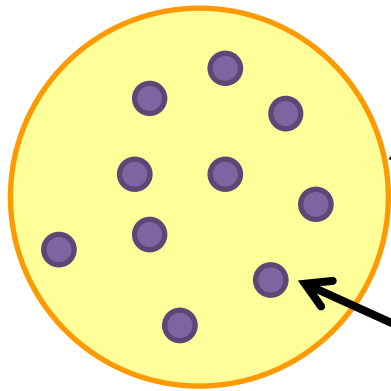
電子の発見

19世紀：真空技術（ポンプ）の発達

- 真空放電管（1855頃，ブリュッカー，ガイスラー）
真空にして高電圧をかけると，空間中を
電流が流れる（真空中を何かが飛んでる？）
- 陰極線の発見（1860年頃，ブリュッカー）
真空中で金属を加熱すると，何か出てくる
- 磁場で曲がることを発見（1875頃，クルックス）
この「何か」は負に帯電した粒子では？
- 精密測定に成功（1897年頃，J. J. トムソン他）
この「何か」は，水素原子の1/1000以下の
重さしか持たない，負に帯電した粒子
原子よりさらに小さい「電子」の発見

原子核:ラザフォードによる発見(1909-13)

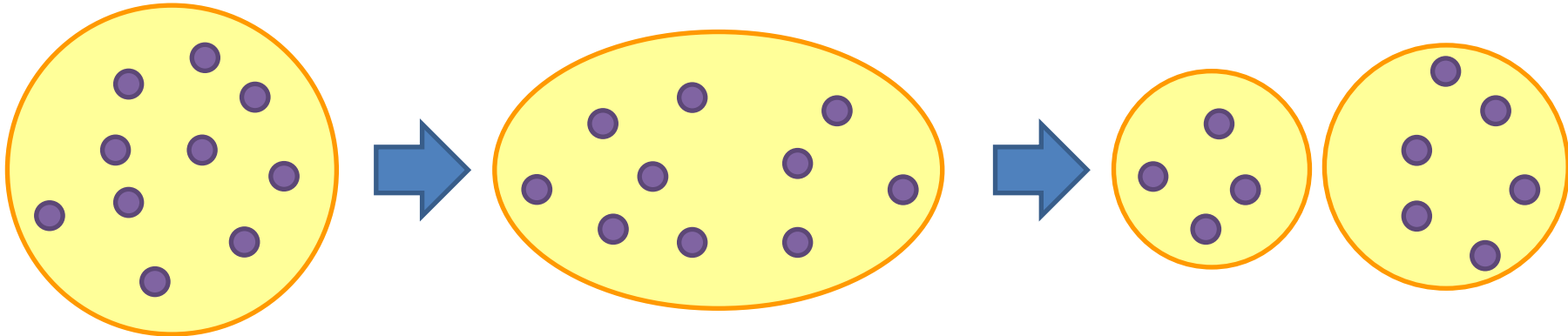
当時の原子のモデル:プディングモデル(間違い)



正体はよくわからないけど、大きく広がった正電荷

埋め込まれた多数(数百~数千)の電子

核分裂の解釈

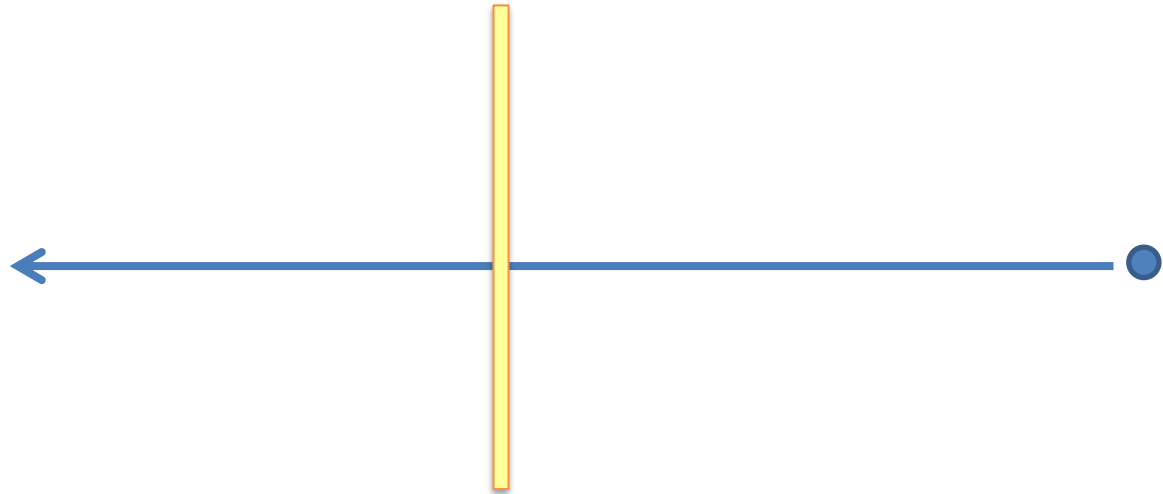


ラザフォードらによる, α 線の研究実験での出来事

α 線: 当時はまだ正体不明(その正体は ${}^4\text{He}$ の原子核).

電子より貫通力が強く(=重い), +2価の電荷をもつ

ほとんどは
そのまま貫通



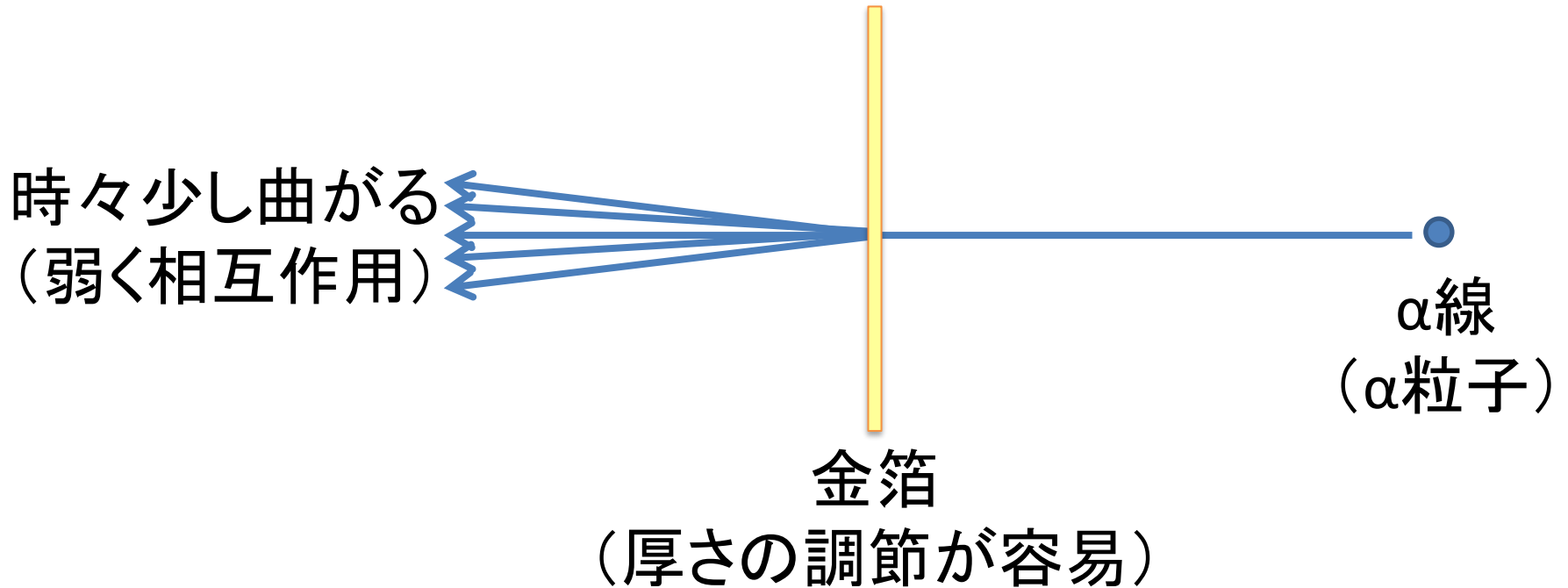
金箔

(厚さの調節が容易)

ラザフォードらによる, α 線の研究実験での出来事

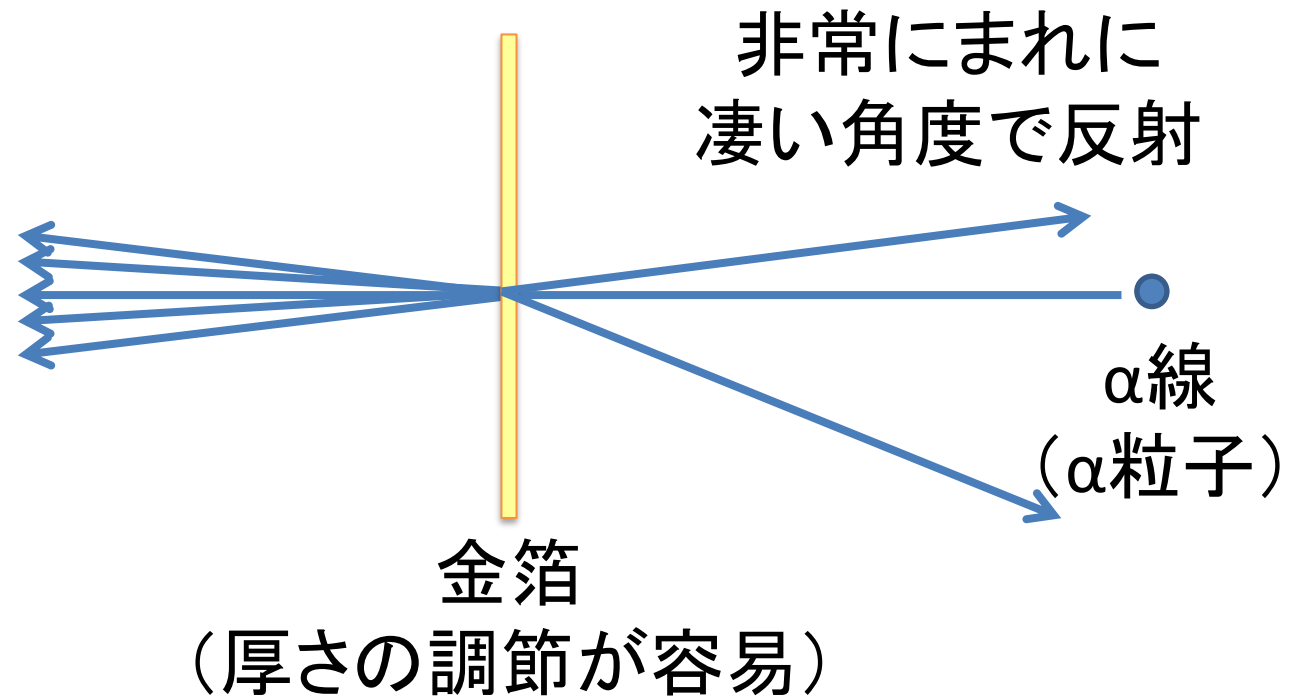
α 線: 当時はまだ正体不明(その正体は ${}^4\text{He}$ の原子核).

電子より貫通力が強く(=重い), +2価の電荷をもつ



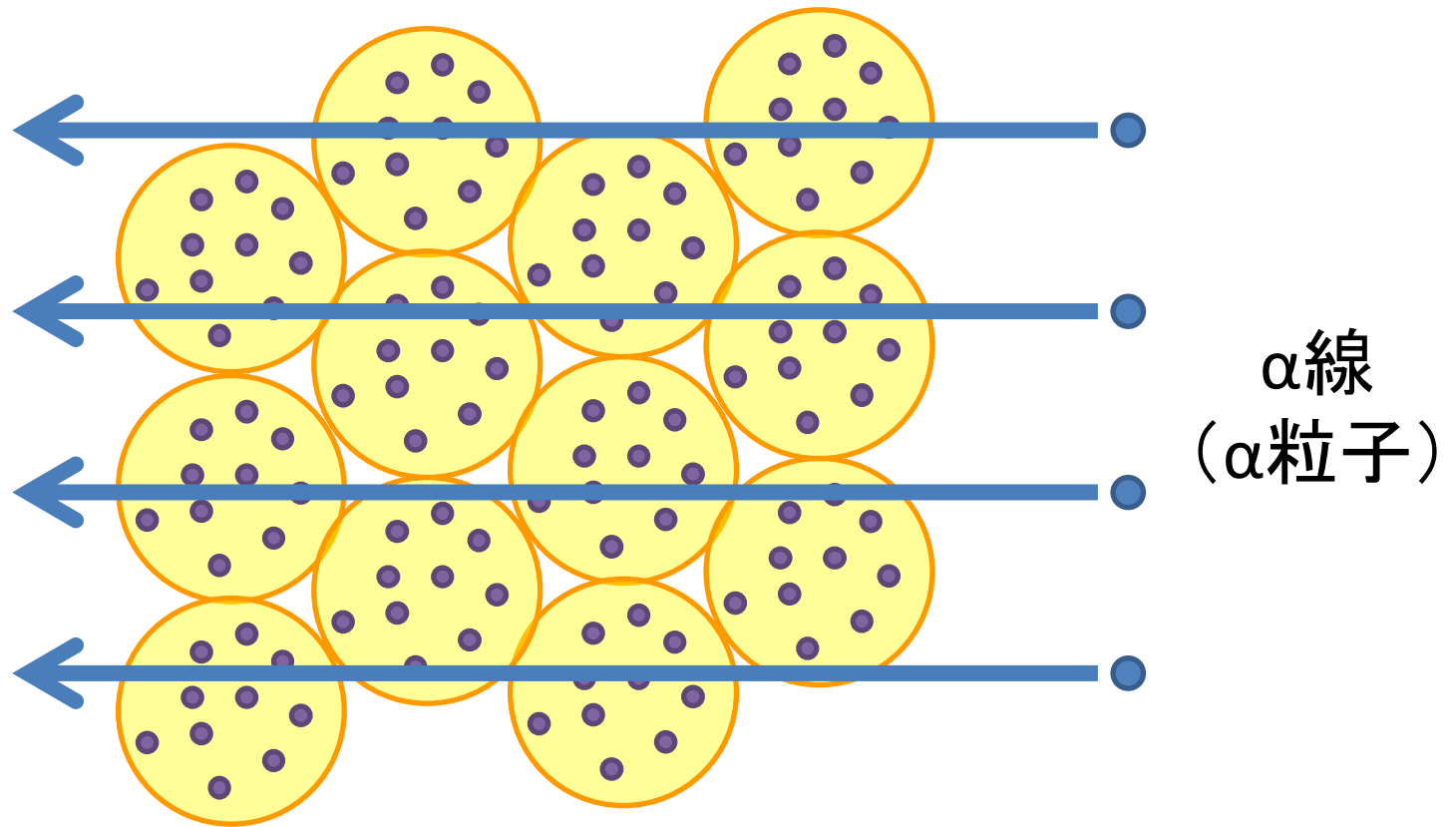
ラザフォードらによる, α 線の研究実験での出来事

α 線: 当時はまだ正体不明(その正体は ${}^4\text{He}$ の原子核).
電子より貫通力が強く(=重い), +2価の電荷をもつ



これはいったいどうやったら説明出来るのか？

当時主流のプディングモデルでは説明出来ない



α 線がどこを通過しても、受ける影響に大きな差が無い
(たまに大きく反射されることを説明できない)

正に帯電した α 粒子を打ち返す

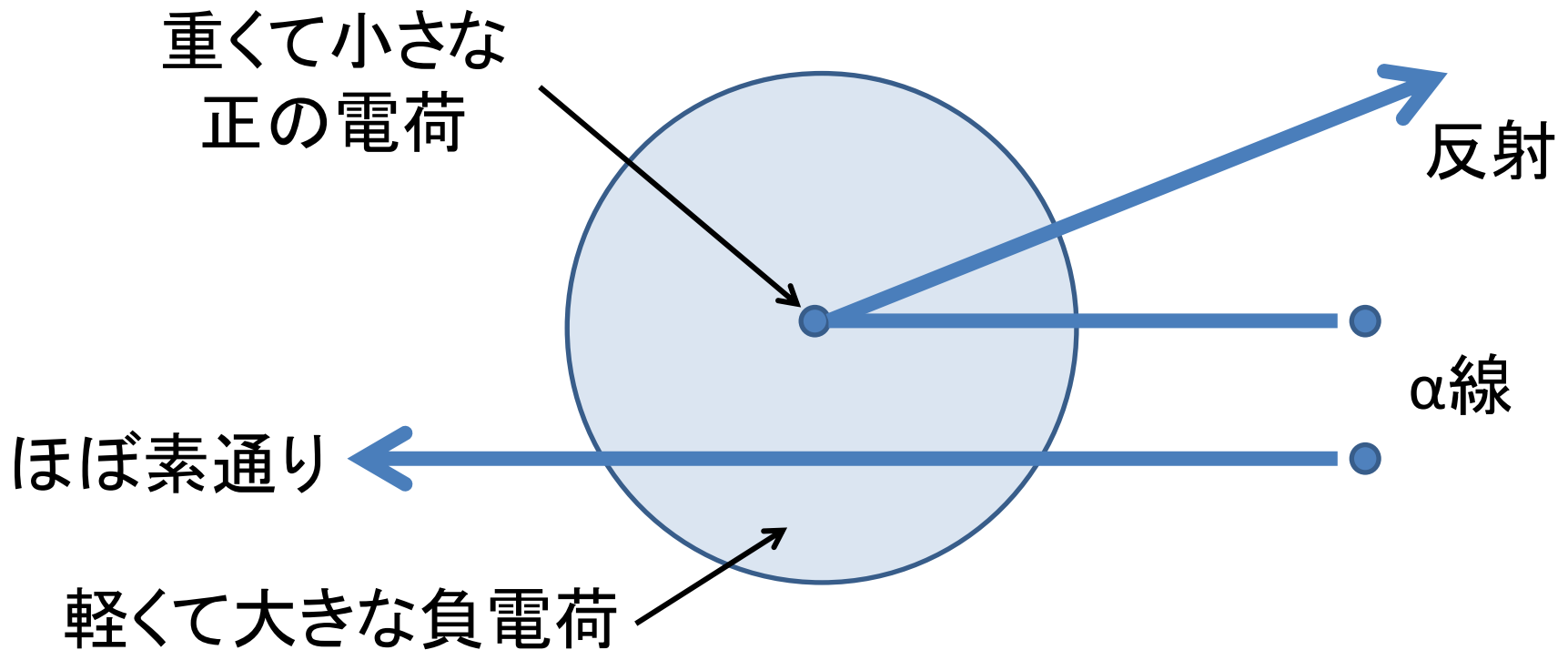
→ 正に帯電した何かがある。

ほとんどの α 粒子はほぼ素通り

→ ほとんどの場所は空っぽ

非常にまれに、勢いよく反射される

→ 重くて小さな正電荷がある



こうして,

「小さくて正の電荷を持つ重い原子核」

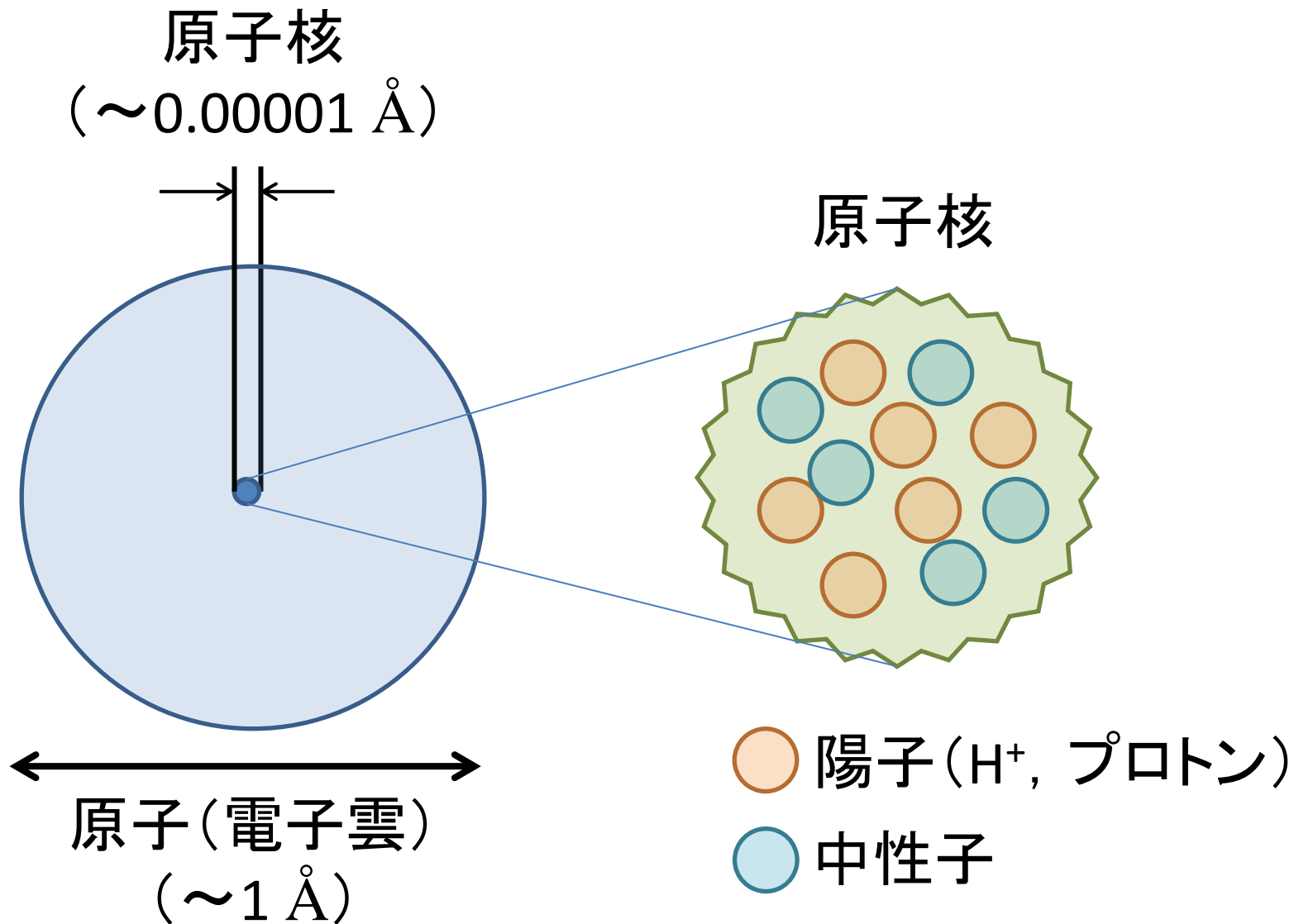
と

「その周りの広い範囲にある軽い電子」

から出来ているという原子模型が成立.

これで原子の構造がわかったかと思いきや, その後原子から電荷を持たない粒子が飛び出すことが発見される.

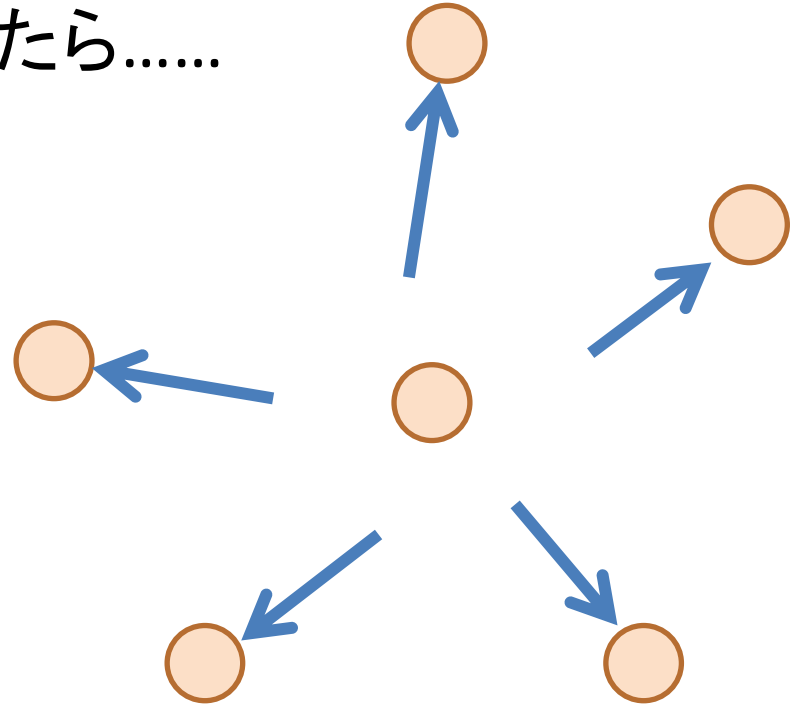
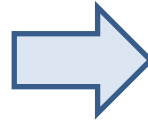
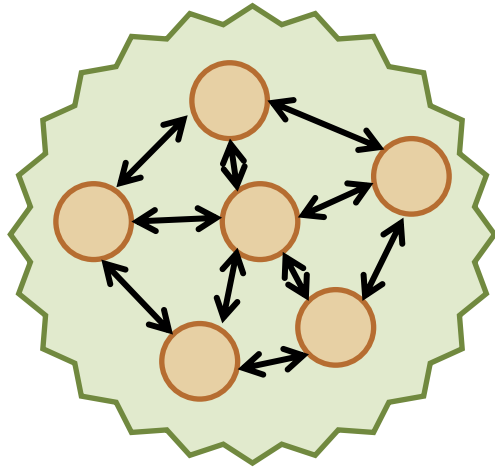
→ 中性子の発見



陽子と中性子の重さはほぼ同じ。
電子はその約1/1840程度の重さ(ほぼ無視できる)。

中性子は、原子核を安定にするのに非常に重要

もし原子核に陽子しかなかったら.....

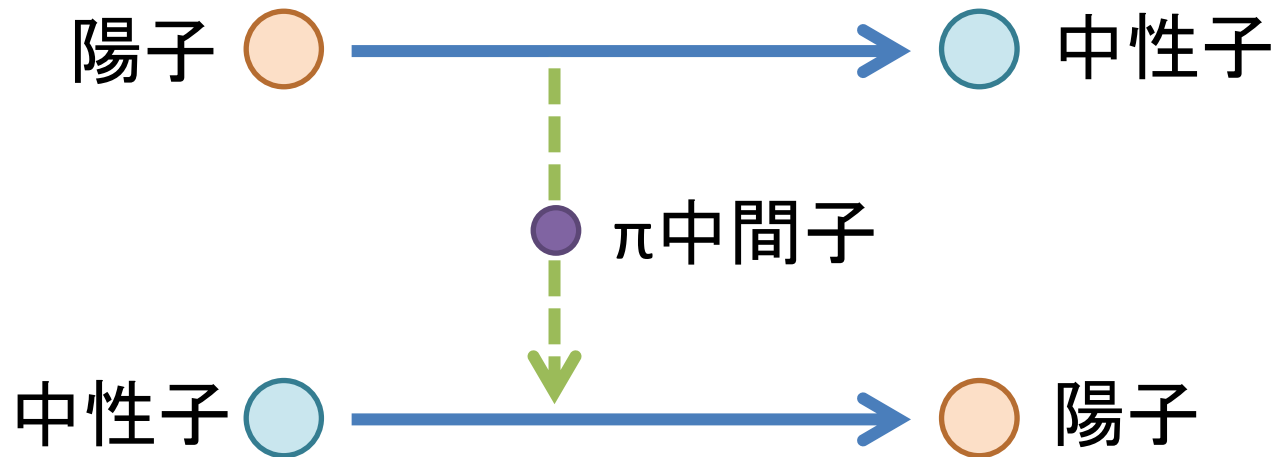


陽子(正に帯電)同士の
強いクーロン反発

あっという間に
原子核はバラバラに

中性子がある場合

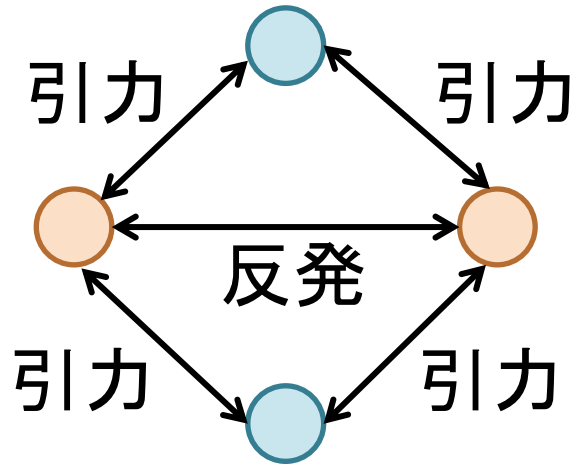
中性子と陽子は、互いに変換出来る



この変換の際に、強い引力が働く

このあたりの話は核物理・素粒子物理になってしまうので、ここでは詳細は省略.

その結果.....



陽子-陽子間の強い反発を,
陽子-中性子間の強い引力で
押さえ込む



原子核が安定に存在出来る

陽子過剰核:クーロン反発が強くて不安定

陽子がこぼれ出たり, β^+ 崩壊によって陽子が中性子に変換されたりといった核崩壊を起こしやすい.

中性子過剰核:元々不安定である中性子が多すぎて不安定

中性子を安定にする引力が足りず, β 崩壊で中性子が陽子に変わる核崩壊を起こしやすい.

そのため, 中性子が陽子と同数かやや多めの時, 原子核は安定.

※重原子では陽子が多く反発が強いため, 中性子がもっと増える

原子の表記

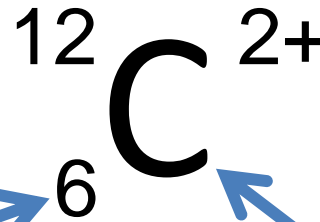
質量数

(=陽子と中性子の数の和)

※両者の重さはほぼ等しい。
電子は軽いので無視

電荷 (=陽子数-電子数)

中性なら書かない
電子が多いと-
電子が少ないと+



原子番号 (=陽子の数)

※元素記号でわかるので、
省略することが多い

元素記号

なお、同位体効果が大きい
水素に関しては、 ^2H や ^3H を
D, Tと書くこともある。

質量数が省略されているときは、自然界での平均値を意味する

こういった「原子」は、どのように生まれたのか？

原子の誕生

そもそもは、ビッグバン(137±1億年前)に遡る

ビッグバン(超高温=超高エネルギーの宇宙)



高エネルギーの光による素粒子の対生成
光子 → クォークや電子等 + その反粒子



宇宙が膨張し、温度(エネルギー密度)が下がる



バラバラだった素粒子が凝集し、
より安定な陽子・中性子を作る

生じた多数の陽子(p)・中性子(n)とその反粒子

 謎の効果(いまだ不明)

反物質の方がちょっと量が少なくなり,
通常物質が少しだけ残る(現在の物質の起源).



不安定な中性子は,

分解して陽子に変化

or

陽子を捕まえヘリウム原子核 ${}^4\text{He}$ に(p+p+n+n)

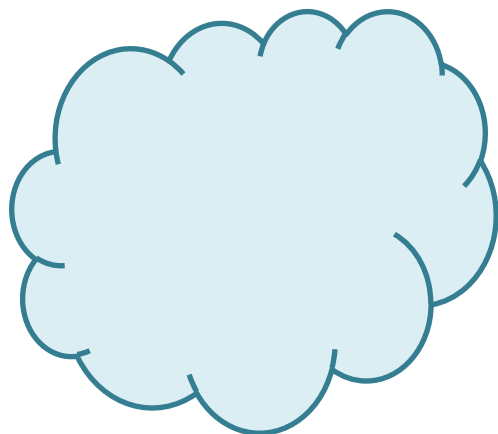
※一部は重水素 ${}^2\text{H}$ (p+n)に変化

この結果、宇宙には

- ・陽子(水素原子核)
- ・ヘリウム原子核
- ・電子

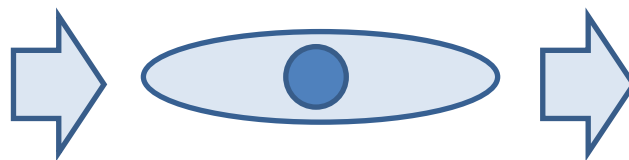
が多量に生成するが、これ以外の元素はほとんど無い。
残りの元素は全て第1世代の恒星が作った。

宇宙を漂う
水素とヘリウム



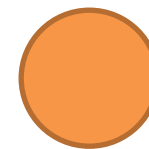
星間ガス

重さ(重力)で
次第に凝集



ガス円盤

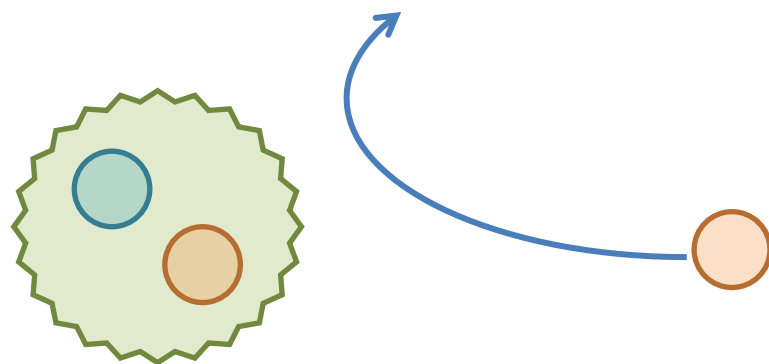
高温・高圧になり
核融合が始まる



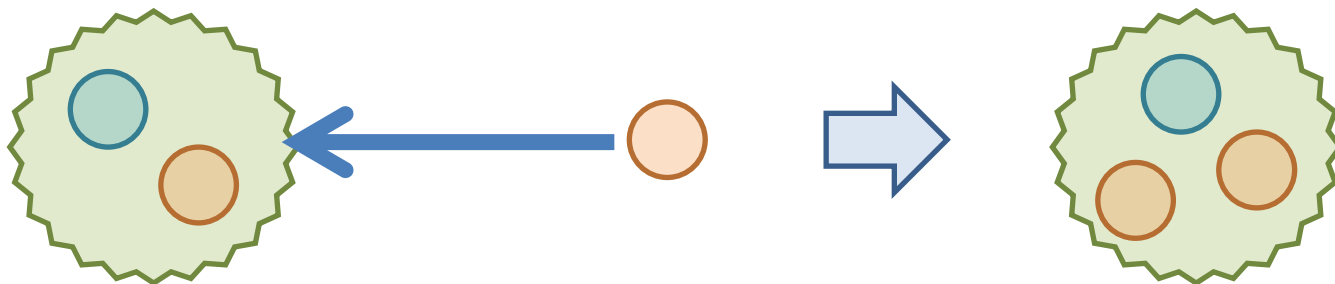
恒星

陽子・中性子がくっついて大きな原子核になると、
結合エネルギー分だけ安定になる。

しかし陽子同士には反発が働くので、
原子核にもっと陽子を詰め込むのは難しい。

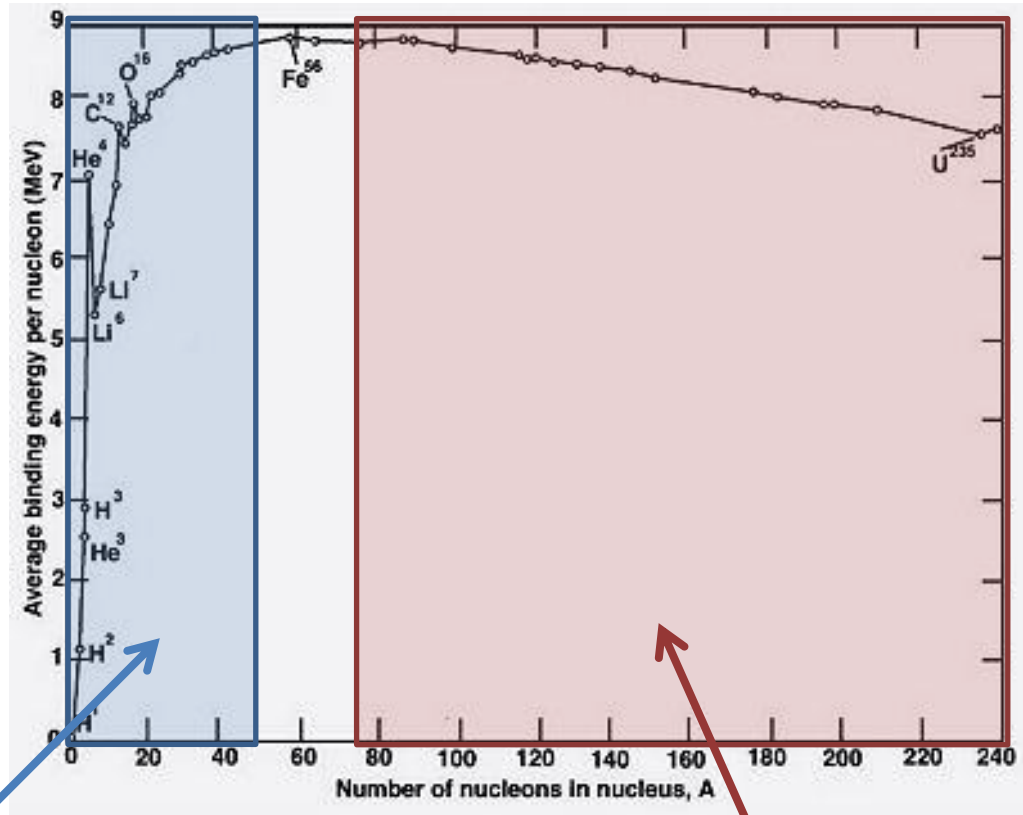


温度・密度が上がると速い速度で衝突する陽子が増え、
クーロン反発に負けずに衝突(=核融合)を起こせる。



このようにして、鉄・ニッケルぐらいまでの元素は恒星中でなんとか合成出来る. しかしそれより重い元素を作るには、エネルギーを投入する必要がある.

核子一つあたりの結合エネルギー



原子番号

核融合して重くなった方が
エネルギーが下がる

核分裂して軽くなった方が
エネルギーが下がる

では、鉄よりも重い原子はどうやれば作れるのか？

→ 中性子を打ち込めば良い

中性子は電荷を持たないので、原子核に容易に入り込む。こうして多くの中性子を吸収した原子核が β -崩壊すると、中性子が陽子(と電子)に崩壊するため、原子番号が大きい原子を作る事が出来る。

この中性子を吸収する過程には、恒星内部でゆっくりゆっくり(slowに)中性子を吸収する「s過程」と、急速(rapid)に大量の中性子を詰め込む「r過程」の二つがあり、それぞれ出来やすい元素が異なっている。

s過程はともかく、一気に大量の中性子を詰め込むr過程とは何なのか？

原子核に大量の中性子を押し込むと、中性子過剰核に.



陽子26	陽子26	陽子26	陽子26	陽子26	陽子26
中性子31	中性子32	中性子33	中性子34	中性子35	中性子36

注:これはイメージで、この通りの反応が起きるわけではない

中性子過剰核は不安定 → β崩壊して原子番号が増える



陽子26	陽子27	陽子28
中性子36	中性子35	中性子34

β崩壊: 中子が電子を出し、陽子に変わる

この過程(r過程)が起こるには

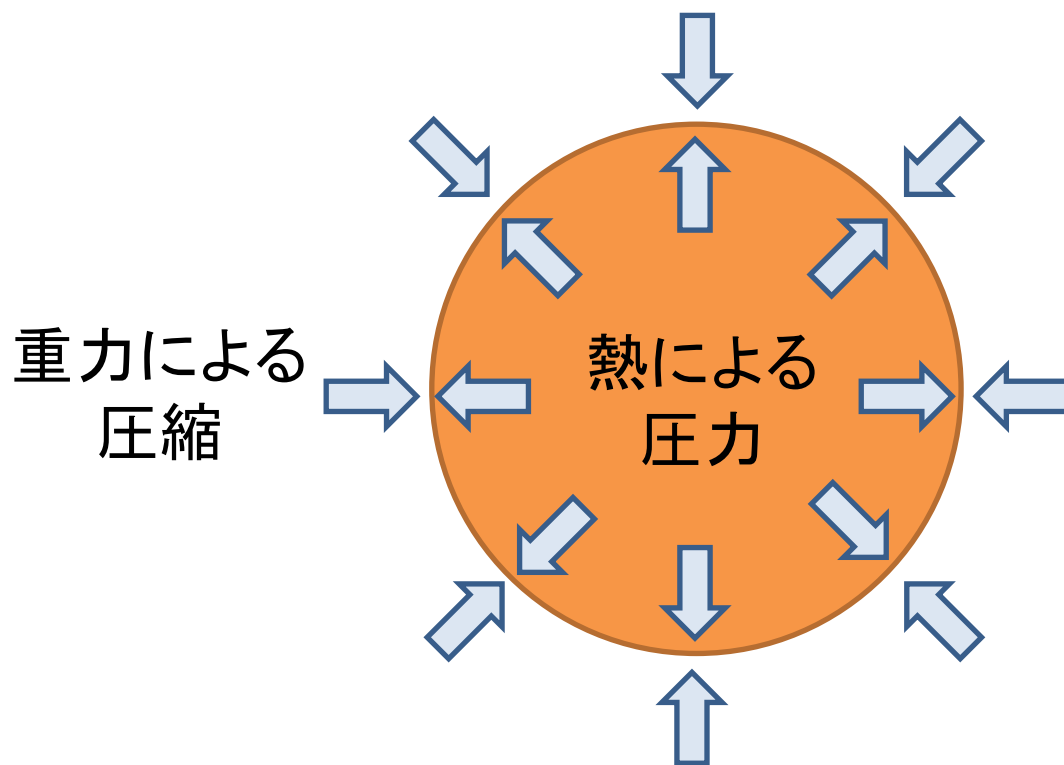
「原子核が崩壊するよりも短時間(1/1000秒以下など)」

の間に、多量の中性子を原子核に打ち込む必要がある。
そんなに高密度の中性子が飛び交っている場所があるの
だろうか?

最近の研究から、r過程により生み出される重元素の多く
は「中性子星の合体」によって生み出されているらしいこと
がわかってきた。

太陽などの恒星はものすごく重い。

このため、非常に強い重力で、圧縮しようとする力が働く。
通常は核融合による熱がこれを支えているが、年老いて燃料が少なくなると重力が勝ち、一気に爆縮・爆発する。

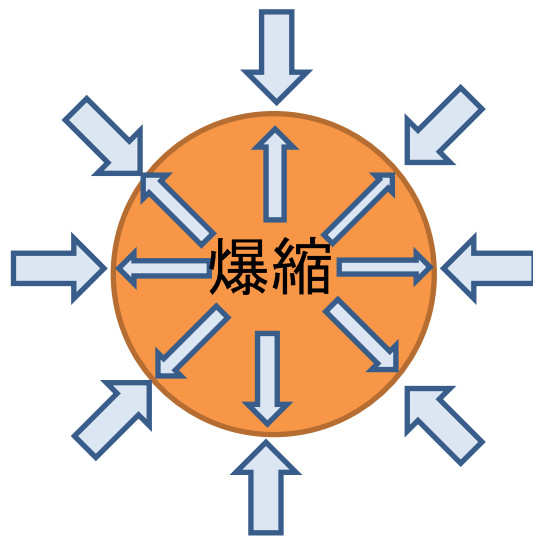


※この爆縮のときにも、ある程度の重原子は作られる。

太陽などの恒星はものすごく重い。

このため、非常に強い重力で、圧縮しようとする力が働く。
通常は核融合による熱がこれを支えているが、年老いて燃料が少なくなると重力が勝ち、一気に爆縮・爆発する。

重力による
圧縮



年老いた星
→ 燃料が少ない

※この爆縮のときにも、ある程度の重原子は作られる。

このとき残されるのが「中性子星」である。

(※重すぎる恒星の場合、ブラックホールになる)

中性子星では、太陽程度(地球の33万倍程度)の物質が直径わずか10~20 km程度(山手線の内側ぐらい)の領域に圧縮されている。このとき恒星を作っていた元素の陽子と電子は重力で強引に押しつけられ、そのほとんどが中性子に変換されてしまう。この結果「直径10 kmの超巨大&超中性子過剰な原子核」のようなものが出来上がる。

宇宙には、このような中性子星が連星となっているものが多数存在する。そういった連星は重力波を発生しながら徐々に近づき、最後には合体しブラックホールになる。

その瞬間、猛烈な爆発により中性子星表面=少量の原子とあり余る中性子が放出され中性子過剰核を生成、そこから重原子が生み出される。

今我々の身近にある重原子の多くは、第1世代の恒星の内部で生み出されたり、それら第1世代の恒星が超新星爆発する時や、なれの果ての中性子星の連星が合体・爆発した際に生み出されたものである。

（太陽は第2世代、つまり第1世代の残骸から生まれた星）

※ただし、現在でも宇宙にある原子の90%は水素原子で、10%がHe原子。その他の原子は誤差程度の微量である。

（原子の個数で比較した場合）

原子の分類と周期表

メンデレーエフによる「周期表」の発表(1869)

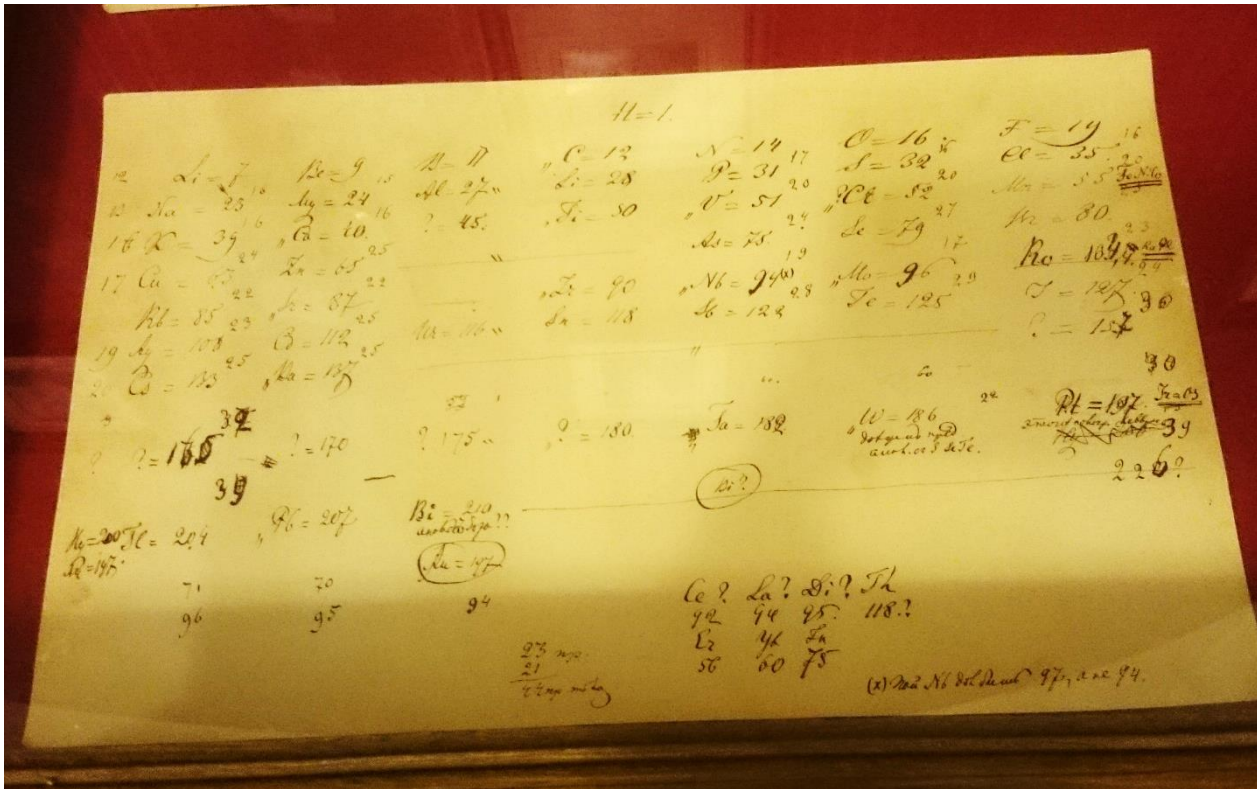
「元素を原子量順*に並べると、
周期的に似た性質の元素が現れる」

*後に原子番号(原子中の陽子の数)順へと変更

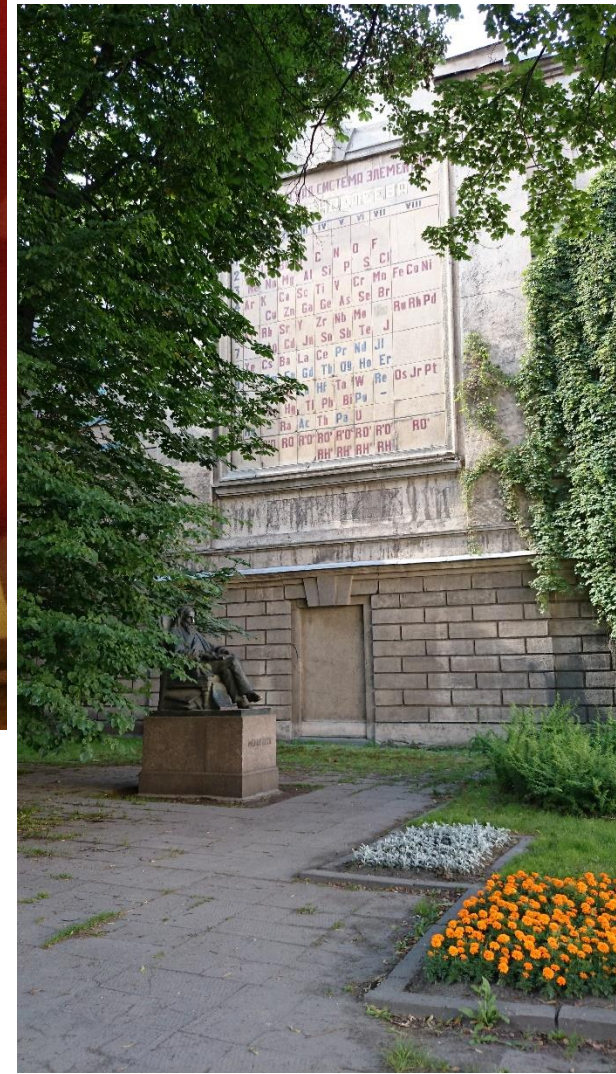
周期表では

- ・表の縦列(族)ごとの化学的に似た性質
- ・表の行(周期)ごとの似た性質
- ・表を左右に移動した際の原子の性質の変化
- ・表を縦に移動した際の原子の性質の変化

に特徴があり、元素の性質を簡潔に表現している。



作成途上の周期表(メンデレーエフ博物館@ Санкт-Петербург)



記念碑とメンデレーエフ像@ Санкт-Петербург)

縦方向で性質が似ている

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	
2																		
3																		
4																		
5													Zn					
6													Cd					
7													Hg					
8													Cn					

縦方向の性質が似ている元素群:

- アルカリ金属 (第1族)
- アルカリ土類金属(*) (第2族)
- 遷移金属 (第3-10族)
- ホウ素族 (第13族)
- 炭素族 (第14族)
- 窒素族・ニクトゲン (第15族)
- 酸素族・カルコゲン (第16族)
- ハロゲン (第17族)
- 希ガス (第18族)

La:ランタノイド	希土類														
Ac:アクチノイド	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

→ 最外殻の電子配置が縦方向で似ているから
(今後の講義で説明)

*以前は第2族元素のうちBeとMgはアルカリ土類金属に含めなかったが、現在のIUPAC命名法ではBeとMgもアルカリ土類金属に分類される。

補足：第12族(Zn, Cd, Hg)は、IUPACの定義(不完全に満たされたd軌道を持つ、またはそのようなイオンを生じる元素)によれば典型元素になるが、人によっては遷移元素に分類することもある。

このあたりは微妙なところがあり、典型元素に分類する人、遷移元素に分類する人、遷移金属と遷移元素という言葉で使い分けをする人(通常は両方とも同じなのだが、人によっては片方にだけ亜鉛等を含める)、など混乱がある。

少なくともこの講義では、その部分の定義をあまり細かくは扱わないが(例えば、レポートなどで亜鉛を遷移元素に含めても典型元素に含めても、どちらでもかまわない)、基本的には亜鉛などは遷移元素扱いとする。

縦・横方向で、原子の性質が徐々に&系統的に変化

電子を放出しやすい
原子半径が大きい

電子を引きつけやすい
原子半径が小さい



原子小さい
電子出しにくい

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac*	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

原子大きい
電子出しやすい

La:ランタノイド

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Ac:アクチノイド

Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

非金属
 半金属
 金属

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac*	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

La:ランタノイド

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Ac:アクチノイド

Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

- sブロック元素: 最外殻の電子がs電子
 - pブロック元素: 最外殻にs電子とp電子を持つ
 - dブロック元素: 内殻のd電子が性質に重要な役割
 - fブロック元素: 内殻のf電子が性質に重要な役割
- } 典型元素
(≒主族元素)
- } 遷移元素
※第12族は典型元素とする事も

本日のポイント

原子の構造

電子, 原子核(陽子 + 中性子)

原子の誕生

ビッグバンでHとHeが生じ, 恒星での核融合と超新星爆発・中性子星の融合で他の元素が誕生

周期表

縦方向で似た化学的性質

電子の出しやすさや半径の系統的变化

典型元素(s, pブロック元素)と

遷移元素(d, fブロック元素)