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

ビッグバンの直後はHとHeのみ．その後，恒星での核融合や超新星爆発，中性子星の融合の際に他の元素が誕生

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変化

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，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

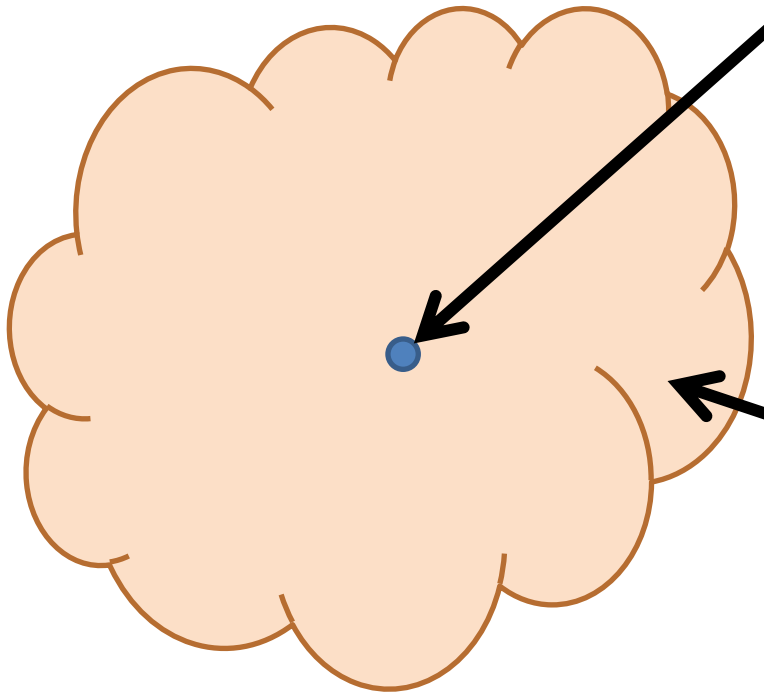
という説が対立（しかも初期は後者が優勢）．
（わりと最近の）1900年頃にようやく原子説が広く認められるように．

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世紀の初頭にようやく存在が実験的に認められた原子.
科学の発達により，現在では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）

- 原子よりだいぶ小さく，ほとんど点.
  （原子サイズの1/10万程度）
- 原子番号と同じ数の陽子
  ＋ 陽子と同じぐらいの数の中性子
- 重さは重い（原子の重さとほぼ同じ）
  （質量数＝陽子数 ＋ 中性子数）

電子（負電荷を持つ）

（電気的に中性なら）陽子と同数
重さは相当軽い（陽子の1/1840程度）
もやっと広がる（≒原子の大きさ）

まずは，この原子モデル成立の流れを見ていく

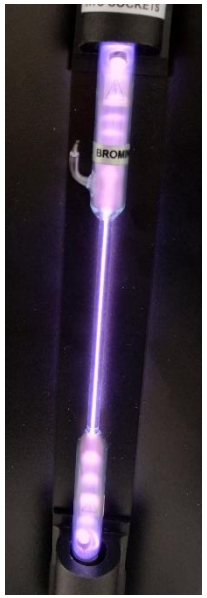
電子の発見：物質から飛び出してくる軽い粒子（電子）が先に発見される

19世紀：産業革命 → 鉱山向けにポンプ（≒真空技術）が発達

→　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」が出てくる

→　磁場で曲がることを発見（1875頃，クルックス）

電流が磁場から受ける力と同様だが，向きが逆.

→「何か」は負に帯電した粒子では？

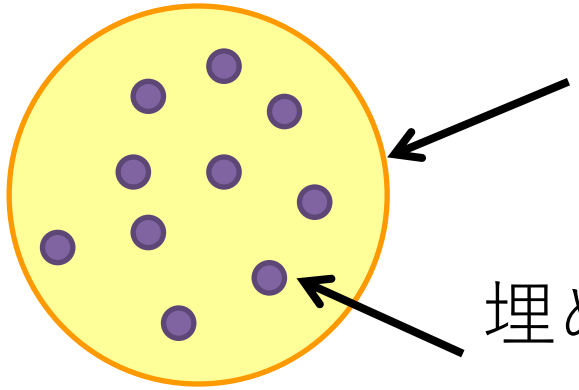
→　精密測定に成功（1897年頃，J. J. トムソン他）

「何か」は水素原子の1/1000以下の重さの，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）

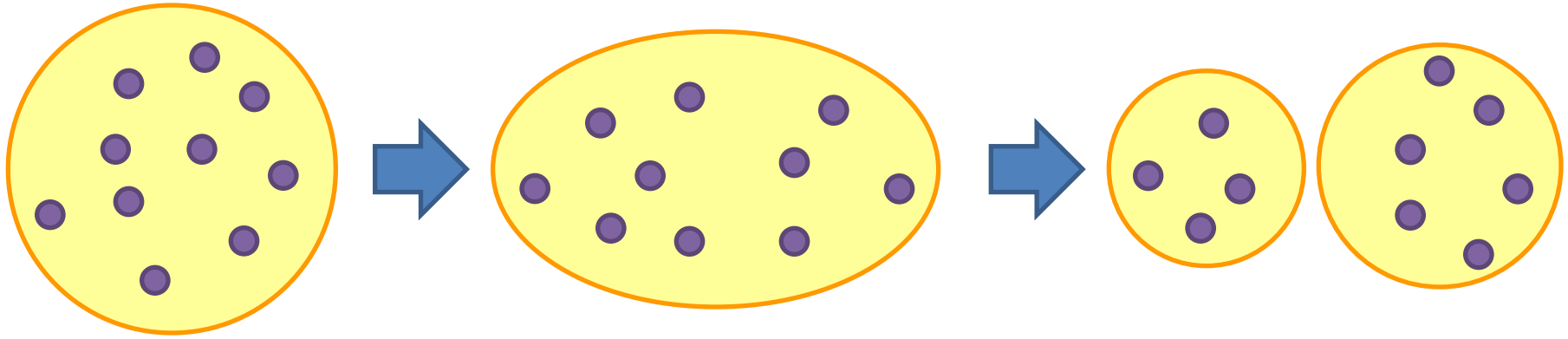
当時有力な原子モデル（J. J. トムソンら）：プディングモデル（間違い）



正体はよくわからないけど,
大きく広がった正電荷

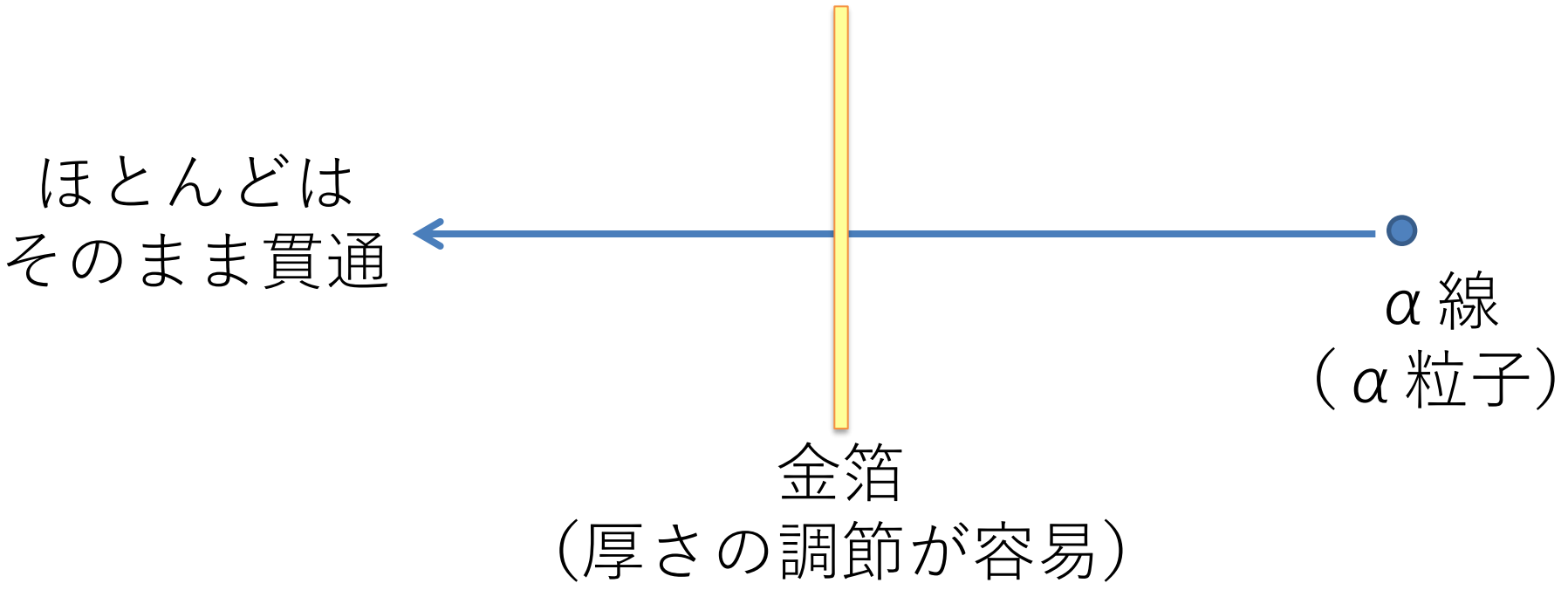
埋め込まれた多数（数百～数千）の電子

プディングモデルによる核分裂の解釈



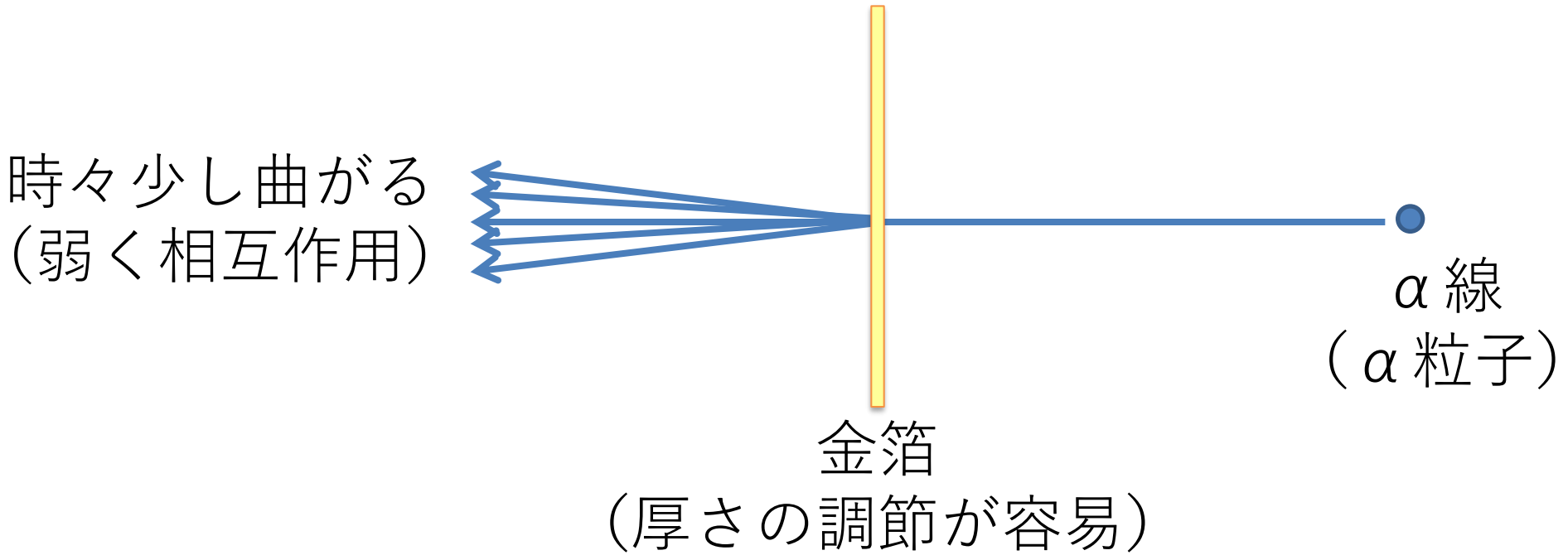
ラザフォード，マースデン，ガイガーらによる，α線の研究実験

α線：当時はまだ正体不明（^{4}Heの原子核と推測はされていた）．
電子より貫通力が強く（＝重い），+2価の電荷をもつ



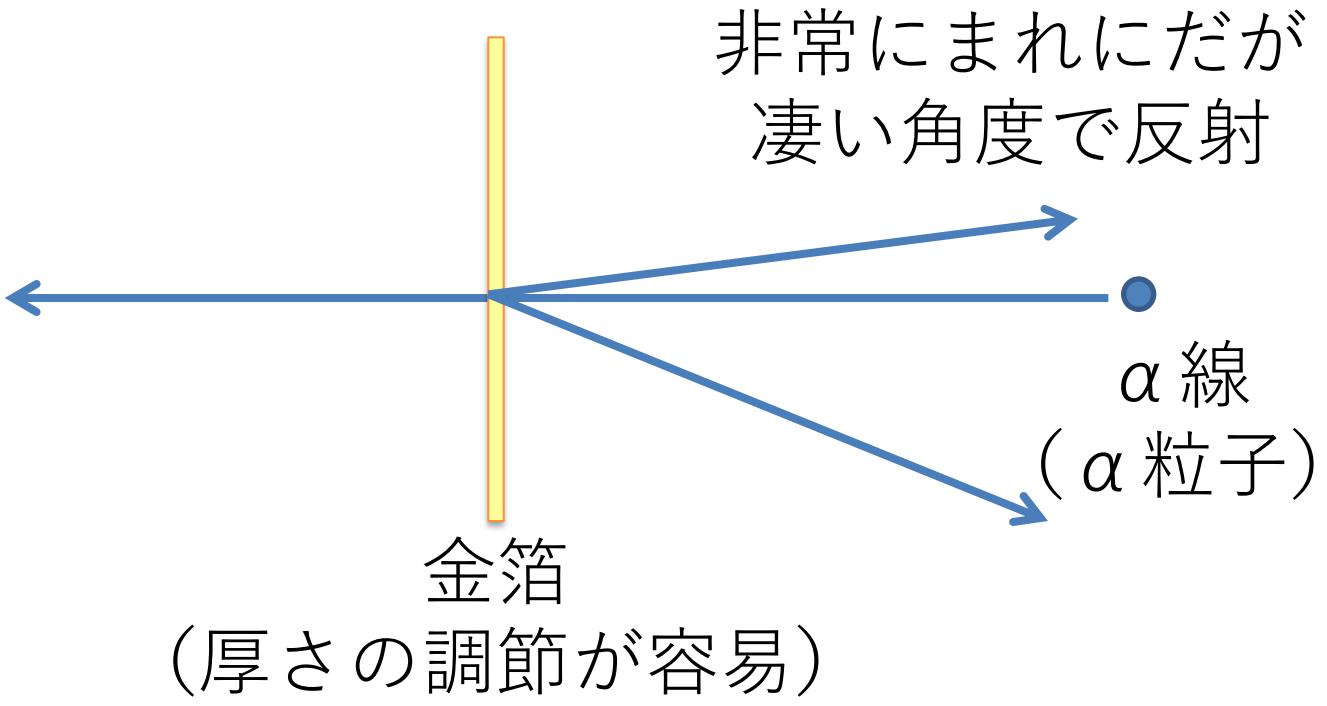
ラザフォード，マースデン，ガイガーらによる，α線の研究実験

α線：当時はまだ正体不明（^{4}Heの原子核と推測はされていた）．
電子より貫通力が強く（＝重い），+2価の電荷をもつ



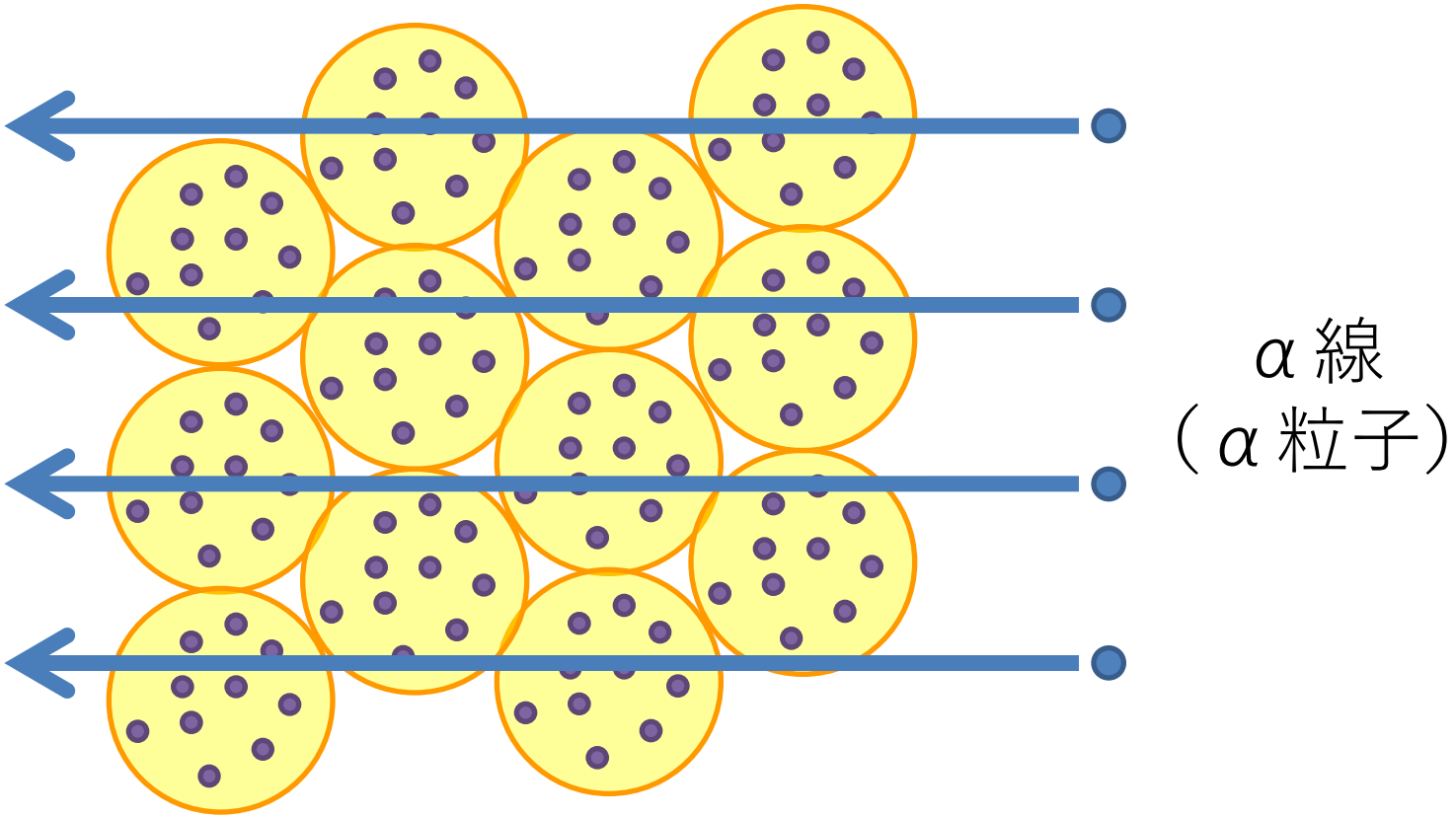
ラザフォード，マースデン，ガイガーらによる，α線の研究実験

α線：当時はまだ正体不明（^{4}Heの原子核と推測はされていた）．
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

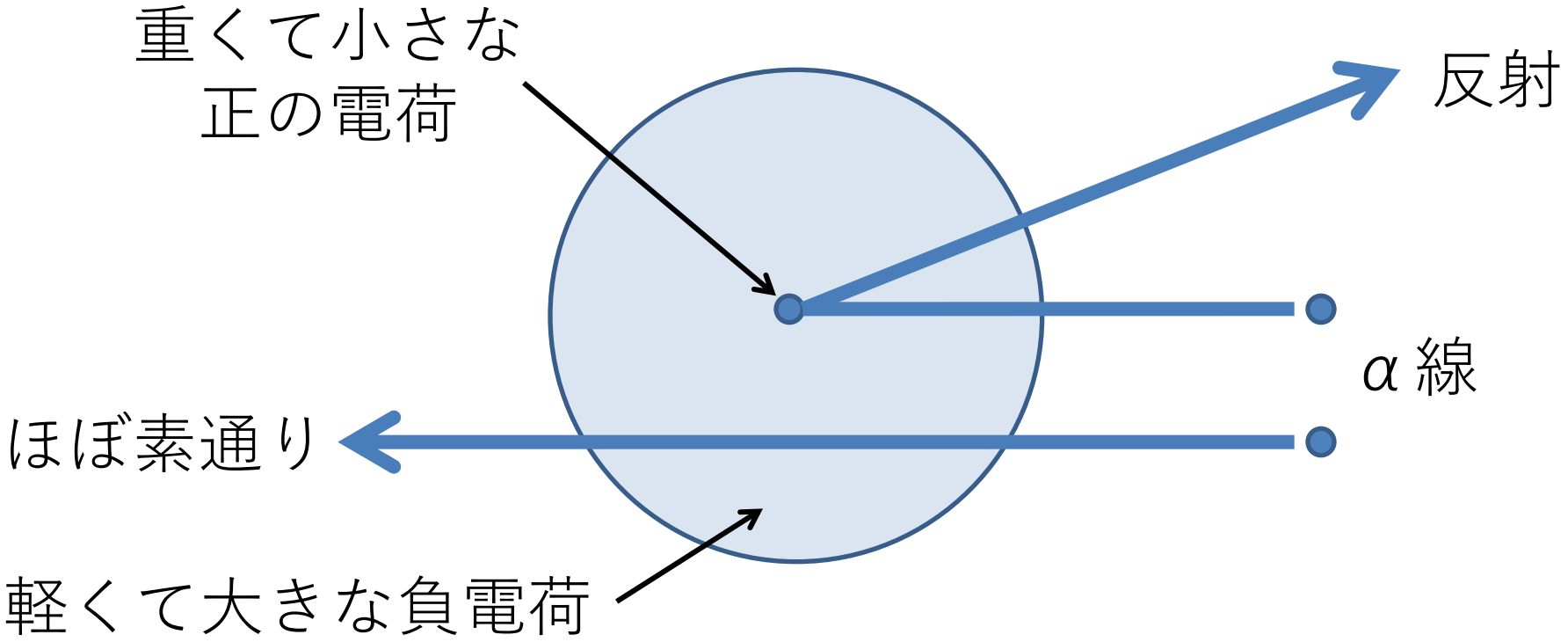


α線がどこを通っても，受ける影響に大きな差が無い
（たまに大きく反射されることを説明できない）

正に帯電したα粒子を打ち返す
→　正に帯電した何かがいる.

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（重くて速い）α粒子が勢いよく反射される
→　重くて小さな正電荷（軽いと弾き飛ばされるのでダメ）



こうして,

「小さくて正の電荷を持つ重い原子核」

と

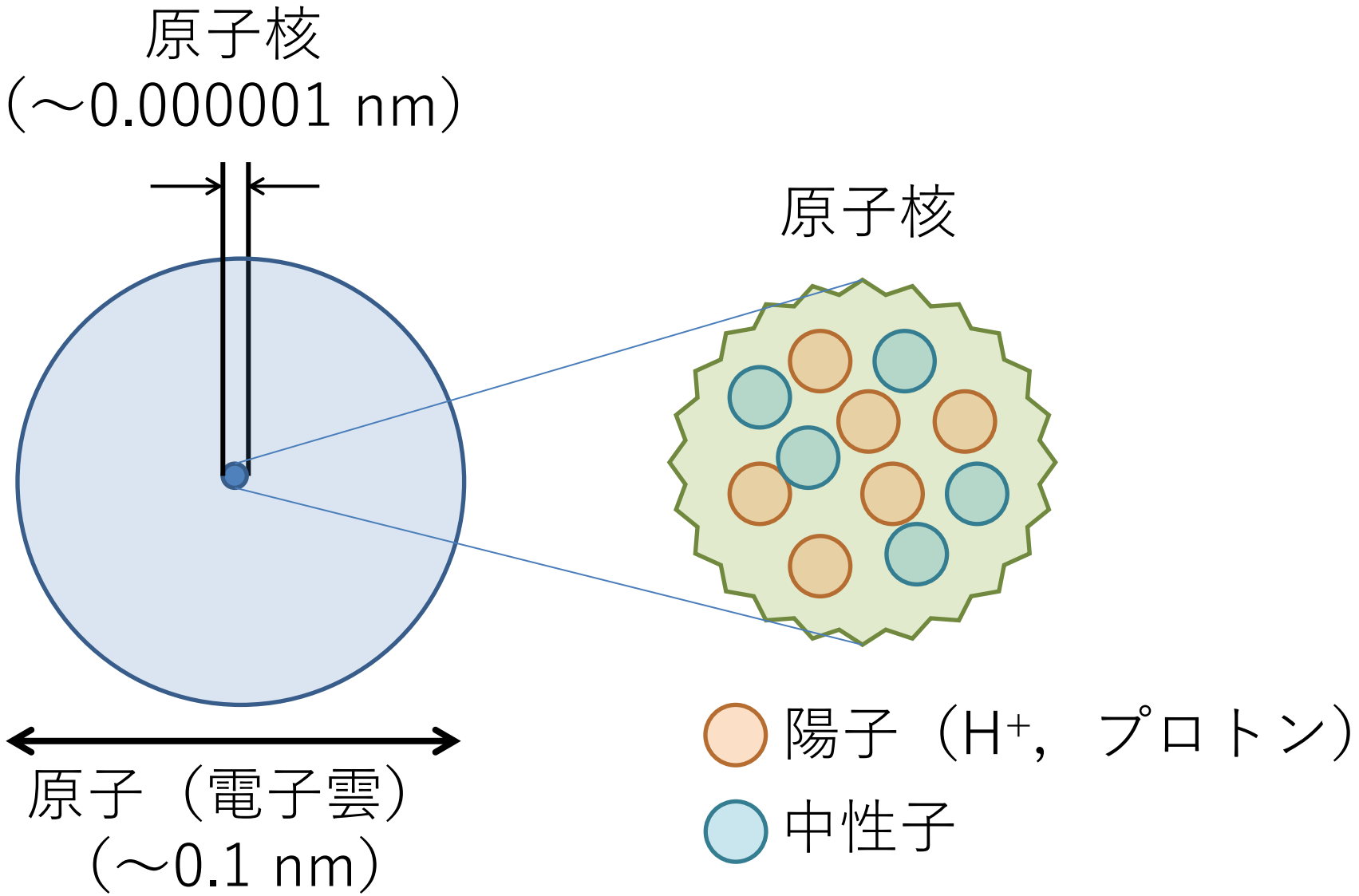
「その周りの広い範囲にある軽い電子」

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，新たな放射線が発見され,
それが原子から飛び出した電荷を持たない粒子であることを1932年に
チャドウィックが発見.

→　中性子の発見（原子の中には中性の粒子もいた）

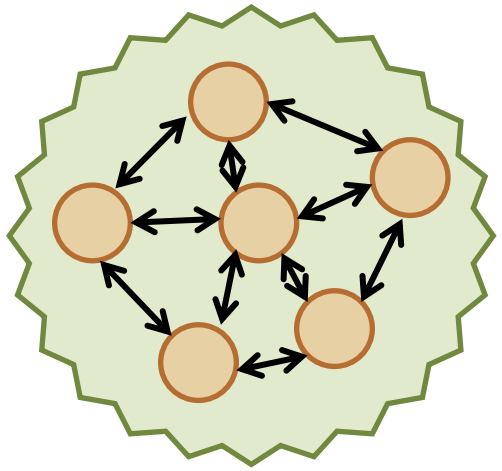
最終的な原子の模型



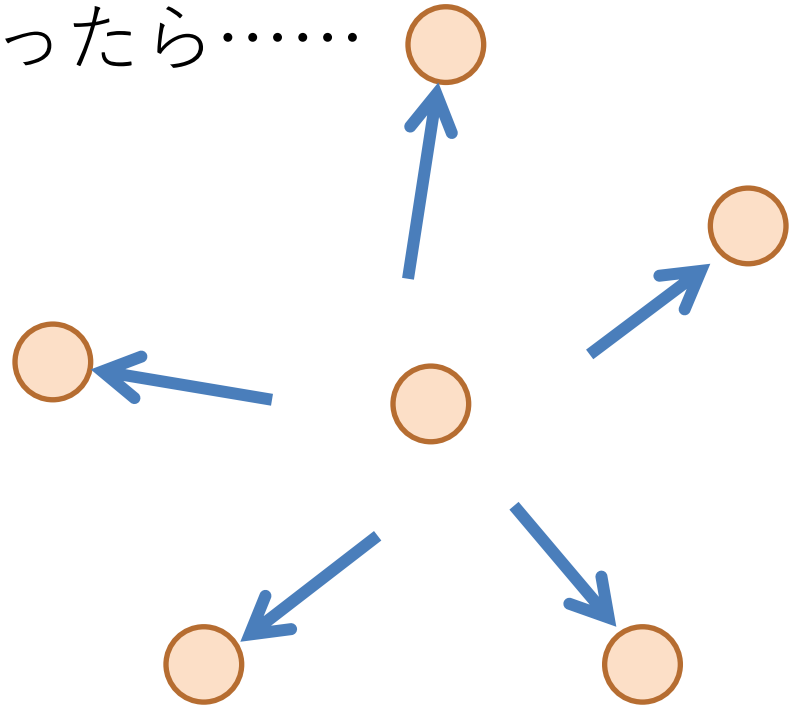
※中性子の重さ≒陽子の重さ >> 電子の重さ

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……



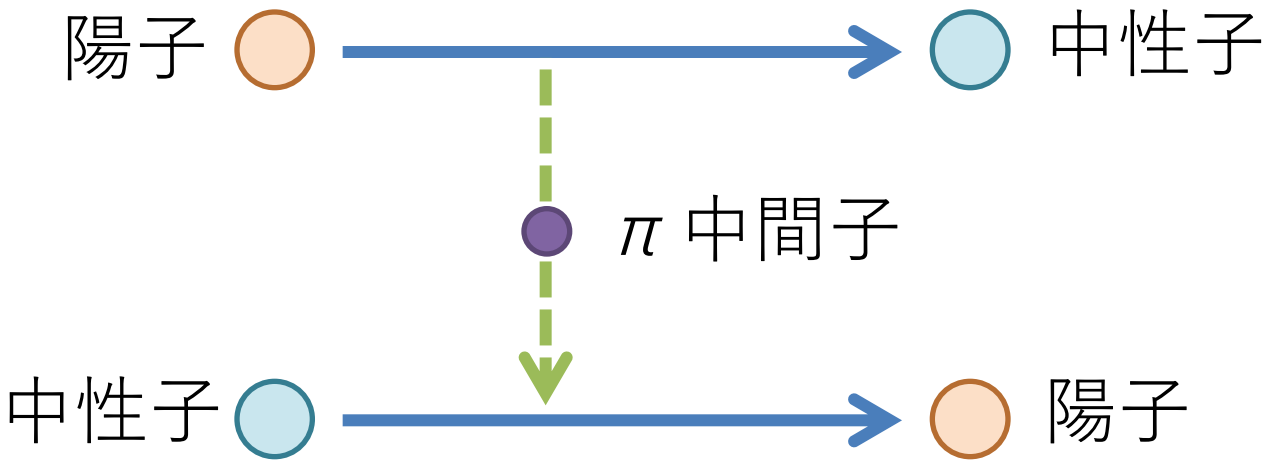
陽子（正に帯電）同士の
強いクーロン反発



あっという間に
原子核はバラバラに

中性子がある場合

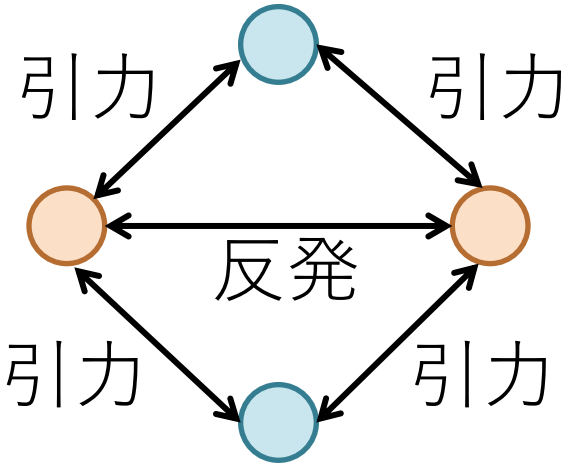
中性子と陽子は，互いに変換出来る



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（中性子が少ない）：陽子間の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，別な核（もっと原子番号の少ない核）へと崩壊しやすい．

中性子過剰核（中性子が多い）：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，原子核は安定する傾向がある．
※なお，重原子では陽子が多く反発が強いため，中性子がもっと多く必要．

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＋

$^{12}_{6}C^{2+}$

原子番号　（＝ 陽子の数）

※元素記号でわかるので，核反応
以外では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，^{2}Hや^{3}H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，同位体を区別しないごちゃまぜの原子
（自然界に存在する同位体が混ざったもの）を意味する

こういった「原子」は，この宇宙で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}Heに(p+p+n+n)
※一部は重水素^{2}H（p+n）やヘリウム3 ^{3}He（p+p+n）
に変化

この結果，宇宙には

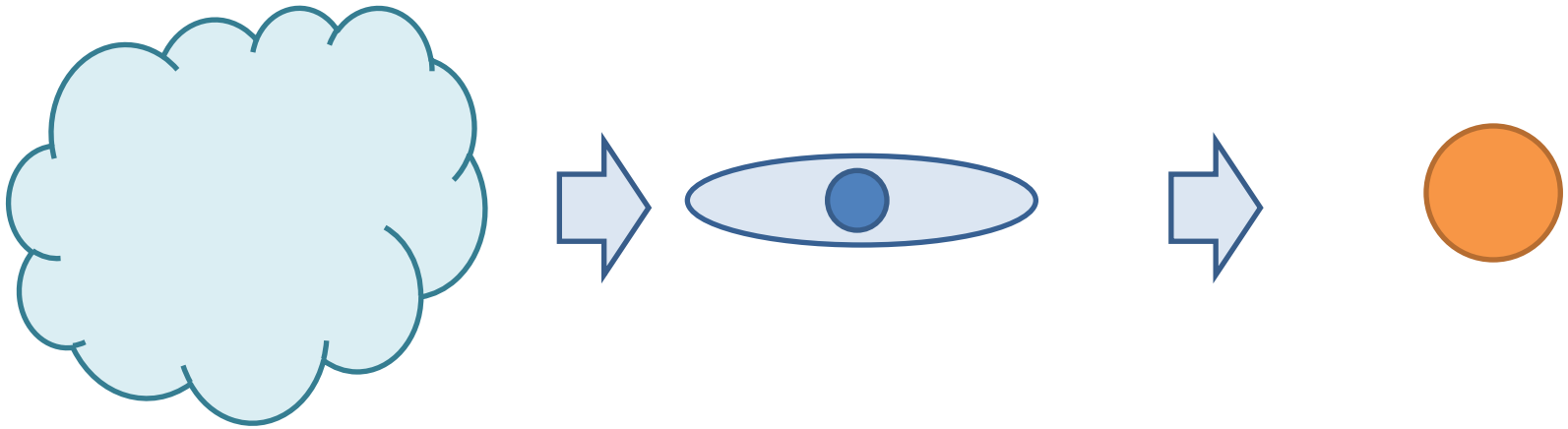
・陽子（水素原子核）
・ヘリウム原子核
・電子

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

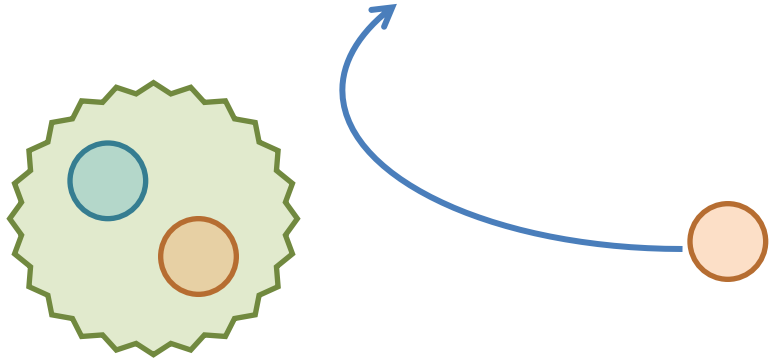
重さ（重力）で
次第に凝集

高温・高圧になり
核融合が始まる

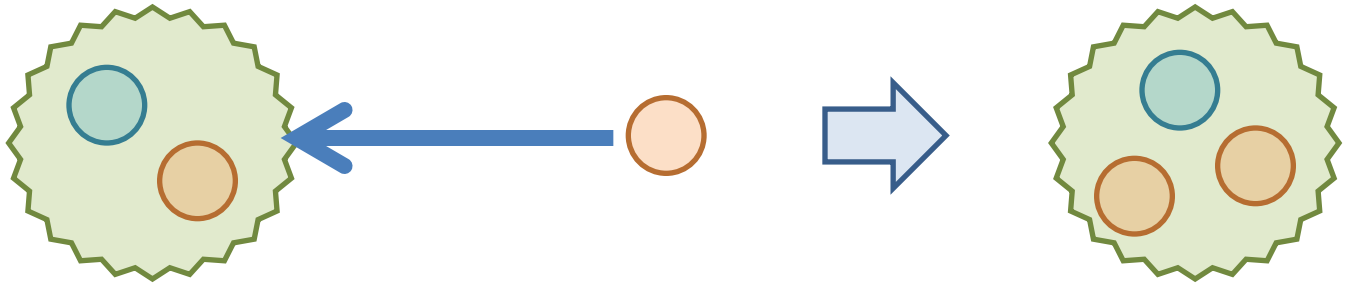


星間ガス　　ガス円盤　　恒星

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エネルギーが下がって安定になる．
しかし陽子同士には反発が働くので，その反発を乗り越えて
原子核内にもっと陽子を詰め込むのは難しい．

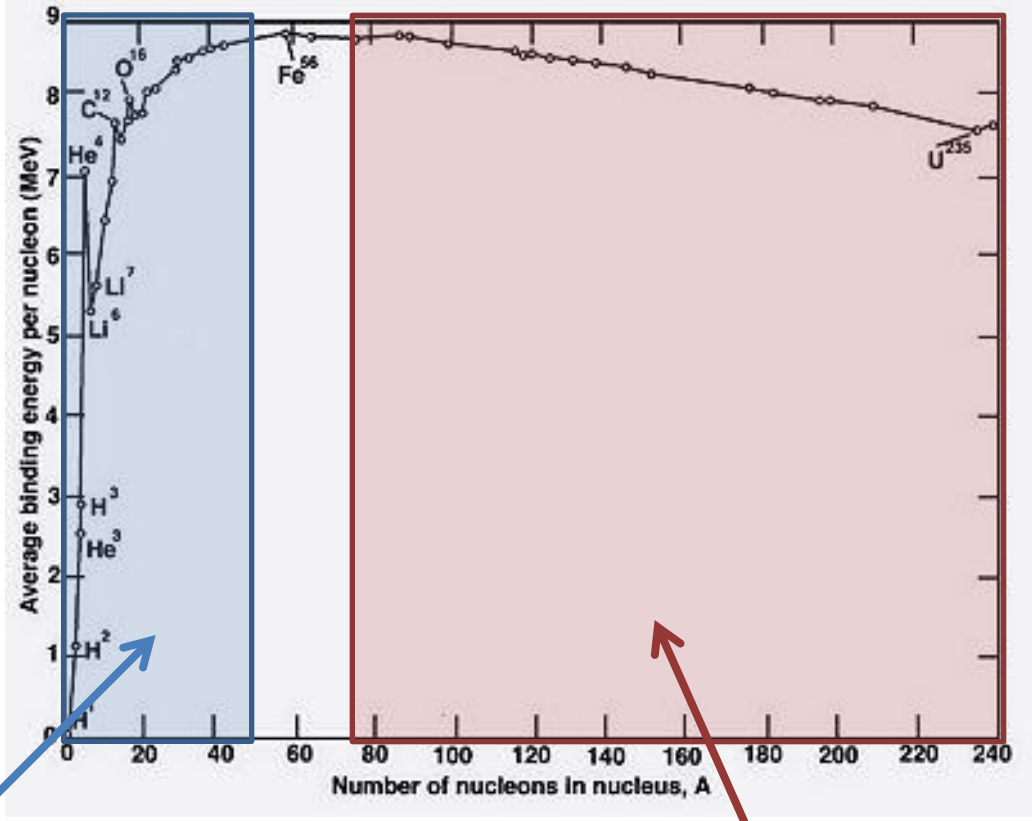


温度・密度が上がると，速い速度で衝突する陽子が増え，
クーロン反発に負けずに衝突（＝核融合）を起こせる．



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．

中性子を吸収する過程には，恒星内部でゆっくり（slowに）中性子を吸収する「s過程」と，急速（rapid）に中性子を詰め込む「r過程」という2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過程とは何か？

原子核に多量の中性子を押し込むと，中性子過剰核に．

^{57}Fe ⇨ ^{58}Fe ⇨ ^{59}Fe ⇨ ^{60}Fe ⇨ ^{61}Fe ⇨ ^{62}Fe……

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，適当に書いたものです．

中性子過剰核は不安定　→　β^-崩壊して原子番号が増える

^{62}Fe ⇨ ^{62}Co ⇨ ^{62}Ni ⇨ ……

陽子26	陽子27	陽子28
中性子36	中性子35	中性子34

※β^-崩壊：中性子が電子を出し陽子に変化

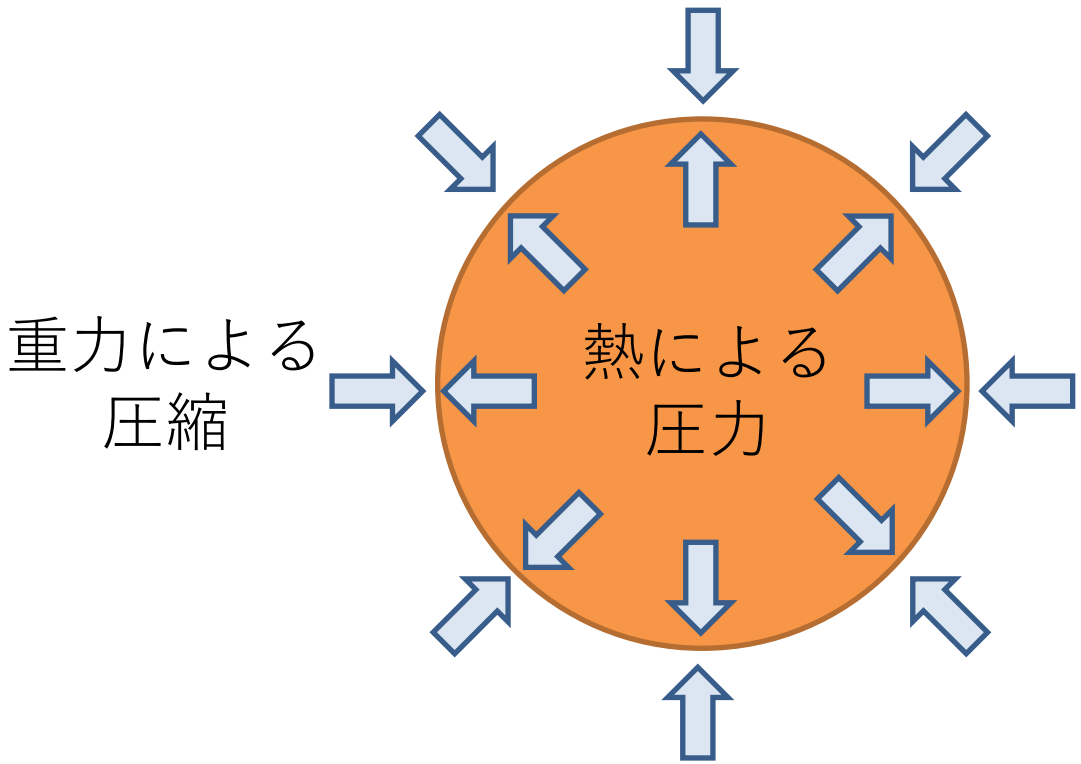
この過程（r過程）が起こるには

「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.
そんなに高密度に中性子が飛び交っている場所があるのだろうか?

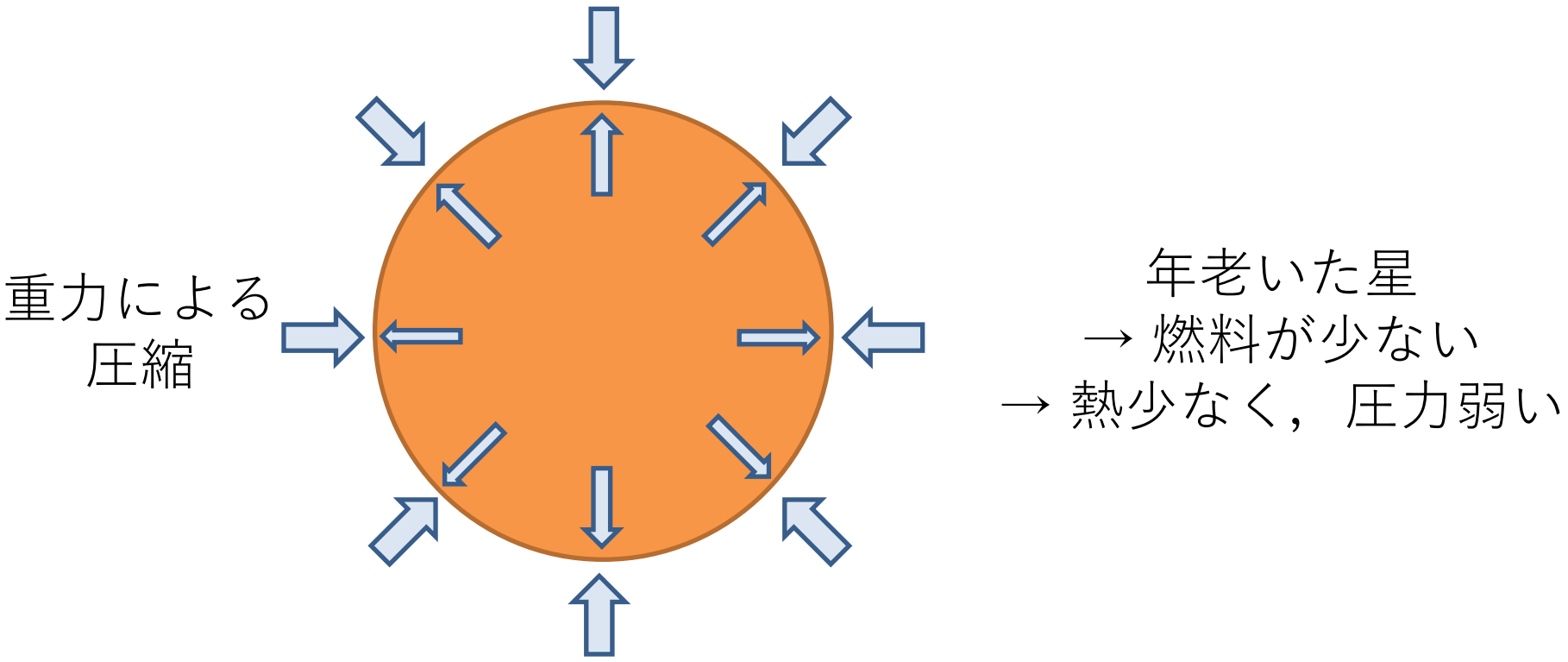
最近の研究から，r過程により生み出される重元素の多くは「中性子星の合体」によって生み出されているらしいことがわかってきた.

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．

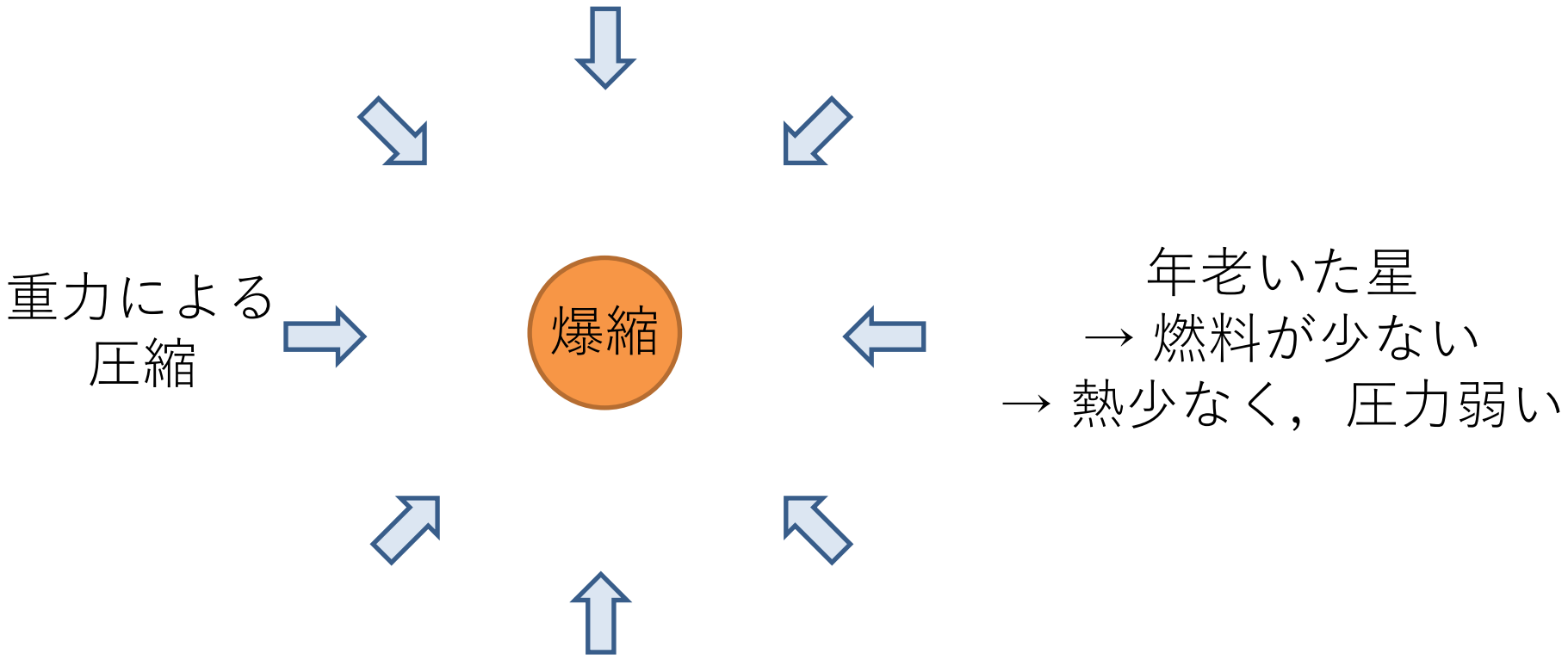


※この爆縮のときにも，ある程度の重原子は作られる．

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．



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．

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原子の陽子と電子は重力で強引に押しつけられ，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＆異常に大量の中性子をもつ巨大原子核」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．
そういった連星は公転のたびに重力波を発し運動エネルギーを失い，
徐々に近づいて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の表面 ＝ 少量の原子と超大量の中性子が放出され中性子過剰各を生成，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世代の恒星の超新星爆発，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．
（原子の個数で比較した場合）
その他の原子は誤差程度の微量にしか存在しない．

原子の分類と周期表

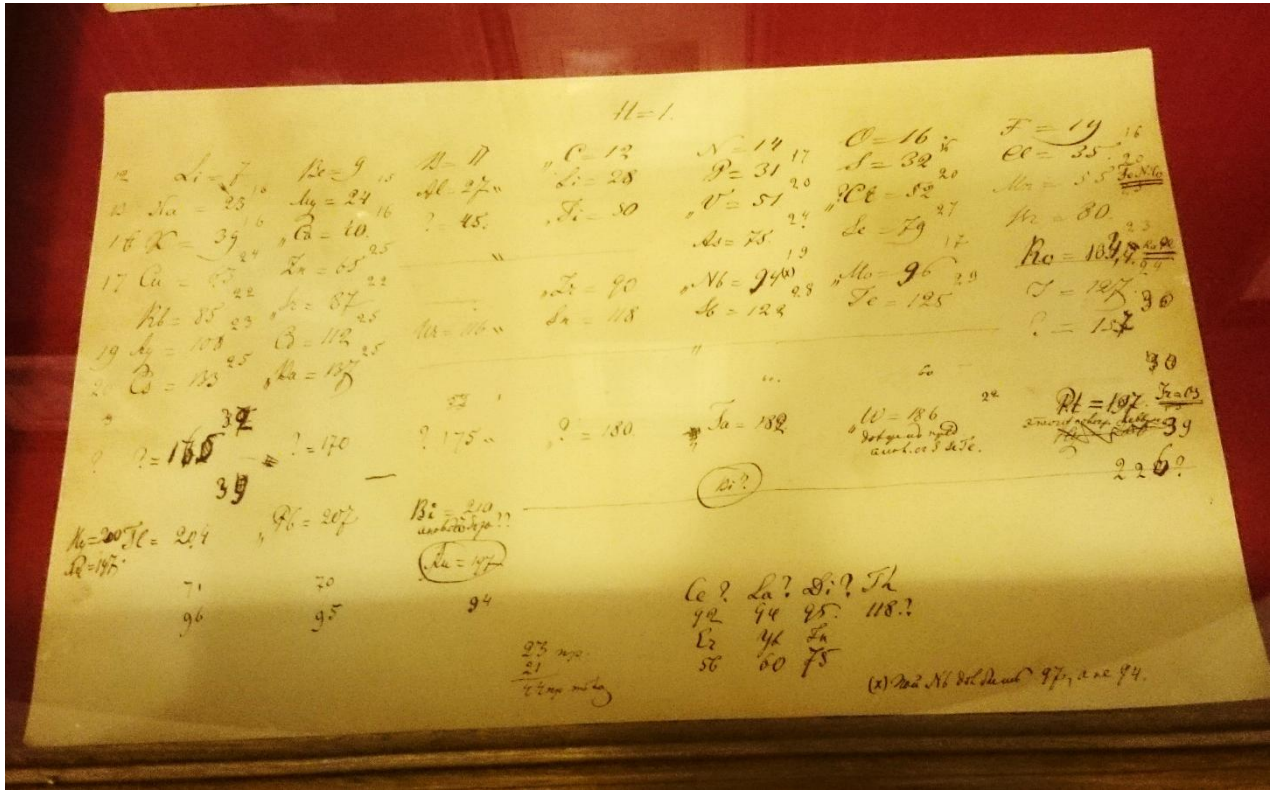
メンデレーエフによる「周期表」の発表（1869）

「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

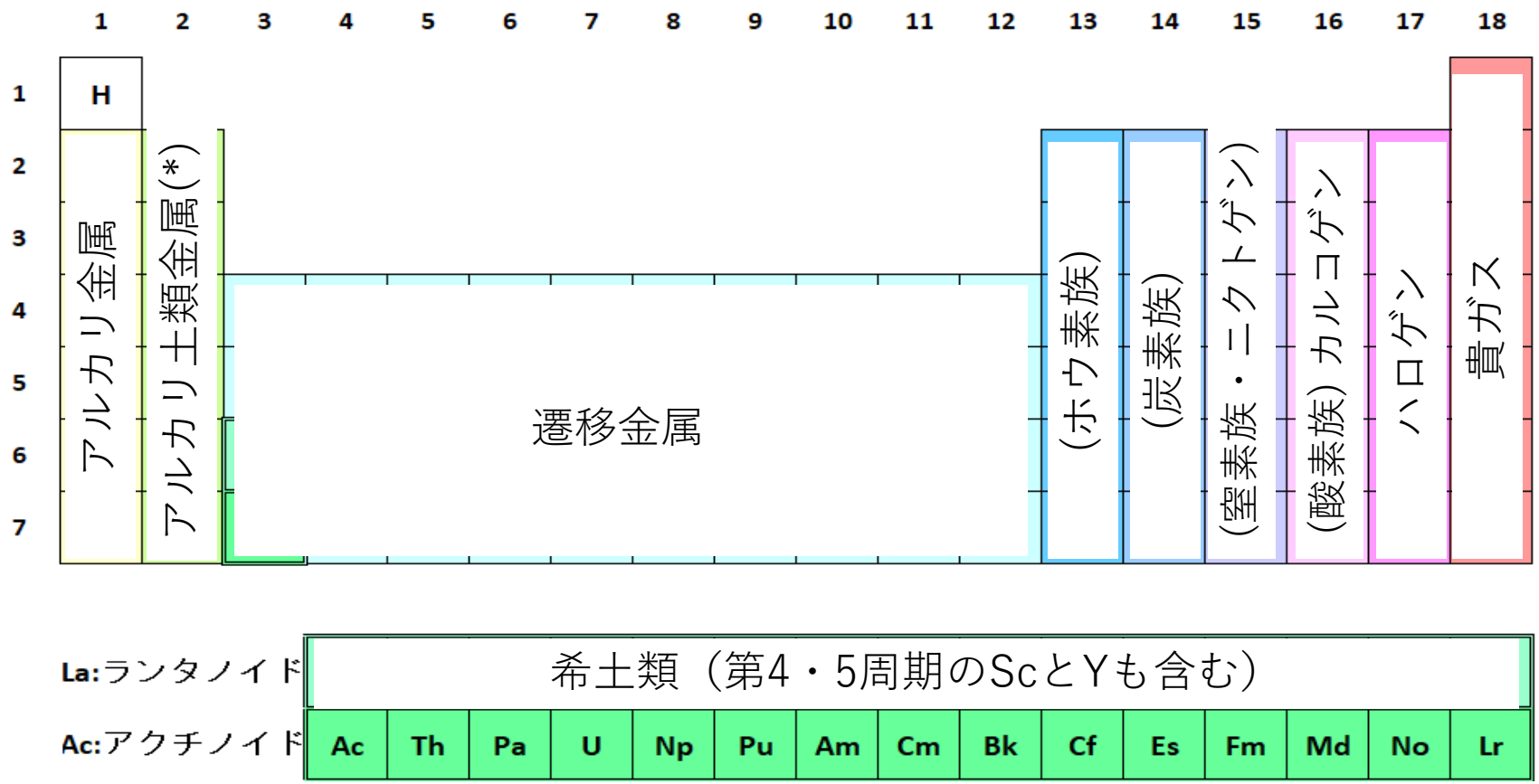
に特徴があり，元素の性質を簡潔に表現している．



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



→ 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Red Bookの定義によれば遷移元素に分類されるが，人によっては「不完全に埋まったd軌道を持つのが遷移元素」という定義によって第12族を遷移元素に含めないこともある（以前は含まなかったこともあるので）．

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（本来同じ意味の用語なのだが，片方にだけ亜鉛等を含めて呼び分ける人がいる），など混乱がある．

少なくともこの講義では，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

原子大きい
電子出しやすい

	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

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

典型元素

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

遷移元素
※第12族は典型元素とする事も

補足：「典型元素」も微妙で，現在のIUPACの勧告(Red Book)では，
昔ながらの「典型元素」という枠組みとは異なっている．

	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

昔ながらの「典型元素」

	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

IUPAC 「main group Element」

	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

IUPAC 「Typical Element」

Main Group Element：
水素含まず
Typical Element：
水素も貴ガスも含まず，
第2～3周期のみ

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

ビッグバンの直後はHとHeのみ．その後，恒星での核融合や超新星爆発，中性子星の融合の際に他の元素が誕生

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変化

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）