

無機化学 I a

2018年10月～2019年2月

10月5日 第1回

ガイダンス

1. 原子構造と周期律

担当教員:

1回～8回

福井大学学術研究院工学系部門生物応用化学講座

前田史郎

E-mail: smaeda@u-fukui.ac.jp

9回～16回

福井大学産学官連携本部

米沢 晋

教科書: 基礎無機化学 下井 守著、東京化学同人

休講通知: 10月26日(木)は学会参加のため休講とします。補講については後で掲示します。

この授業の前半ではカードリーダーによる出席を取ります。各自学生証をカードリーダーに通してから、着席すること。学生証を忘れた人は、当日の授業終了時まで申し出た人だけ出席扱いとします。後日出席の申し出は受け付けません。

授業概要

無機化合物の構造と結合、そしてその物理的・化学的性質を合理的に理解するために、原子の構造と周期律、化学結合を系統的に学んでいきます。

到達目標

1. 原子の構造を理解し、周期表を理論的に説明できる。
2. 無機化合物の構造や結合を量子化学に基づいて理論的に説明できる。
3. 無機化合物の構造と物理的および化学的性質との関係を理解している。

授業内容

無機化学に関する基礎的な内容を中心とした講義です。各章終了後に小テストを行いますので、その内容の理解度を確認して、理解していないところは復習して下さい。

全体の授業計画は下記の通りです。

第1～3回：第1章 原子構造と周期律

第4～5回：第2章 分子の構造と結合

第6～7回：第3章 無機物質の結晶構造と結合

第8回：中間試験

第9～10回：第4章 無機物質の反応

第11～13回：第5章 典型元素の単体と化合物の性質

第13～15回：第6章 遷移元素の単体と化合物の性質

第16回：期末試験

準備学習(予習・復習)等

授業内容をプリントして配布しますが、事前にWeb上に公開しますので、授業前に予習をしてください。各章終了後に小テストを行いますので、その内容の理解度を確認して、理解していないところは復習して下さい。

授業形式

Power pointおよび黒板による講義。授業内容はプリントとして渡します。各章後に小テストを行い、その内容の復習と本人の理解度を確認します。

成績評価の方法・基準

中間試験と期末試験：100点満点で60点以上で合格とする。5回以上欠席すると単位を取得できない。

教科書・参考書等

下井 守著、「基礎無機化学」、東京化学同人(2009)

前半部分の担当教員連絡先と授業資料

担当教員:福井大学学術研究院工学系部門生物応用化学講座
前田史郎

E-mail: smaeda@u-fukui.ac.jp

<http://acbio2.acbio.u-fukui.ac.jp/phychem/maeda/kougi>

1. 原子構造と周期律

1・1 原子核と電子

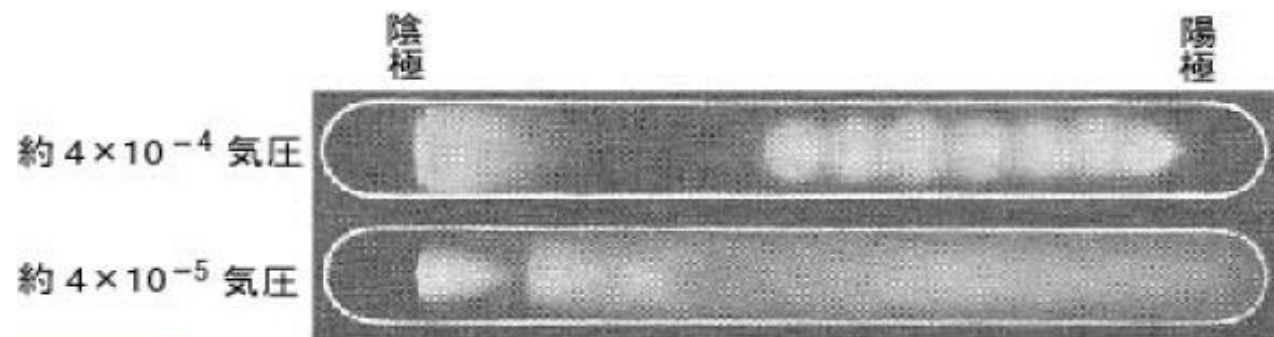
1897年	電子	トムソン
1911年	原子核	ラザフォード
1918年	陽子	ラザフォード
1932年	中性子	チャドウィック

表1・1 陽子、中性子、電子の質量と電荷

素粒子	質量/kg	質量(電子に 対する相対質量)	電荷/C	電荷(陽子の電荷に 対する相対比)
陽子	1.6726×10^{-27}	1836	$+1.602 \times 10^{-19}$	+1
中性子	1.6750×10^{-27}	1839	0	0
電子	9.1094×10^{-31}	1	-1.602×10^{-19}	-1

「真空放電, 陰極線」

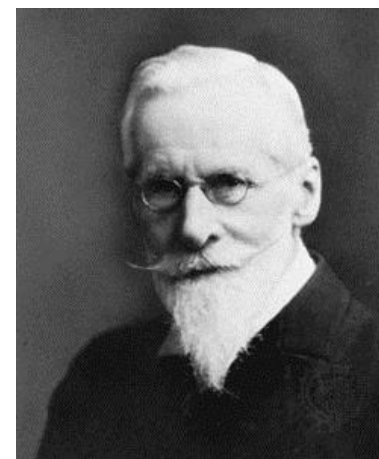
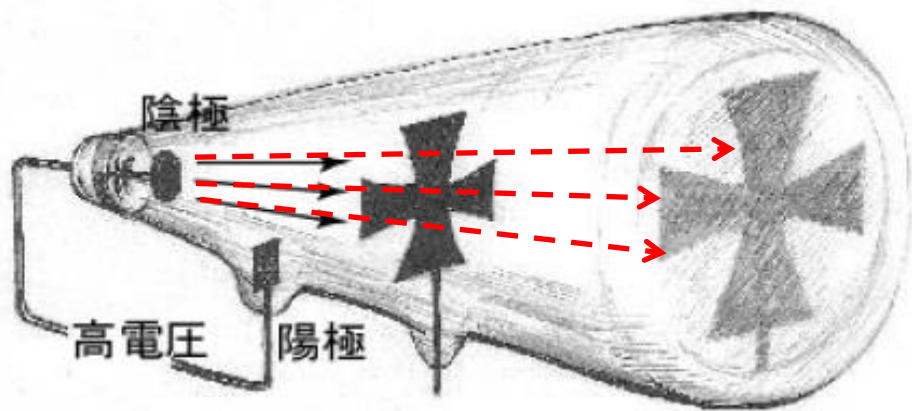
ガラス管の中に1対の電極を入れ, その間に数 kVの高電圧をかける. 管内の気体が低圧 (0.1 気圧以下) になると放電が起こる. これを真空放電という. このとき管内には下図のように縞模様が見られる.



圧力が 0.000001 (10^{-6}) 気圧くらいになると, 縞模様が消えて, 管内が暗くなるが, 放電が止まったわけではなく, 電流は依然として流れている. つまり電極間に何かが流れていることになる.

この放電管内を流れている何物かが**陰極線**と呼ばれるものである。
この陰極線をつくる装置を、その発明者クルックス(イギリス: 1832-
1919)にちなんで、クルックス管という。

陰極線の性質を調べるため、下図のように、クルックス管の中に十字の板を置き、管の反対側に蛍光物質のスクリーンを張っておくと、その上に影ができる。このことから、陰極線は陰極から陽極へ向かって発射され、直進する性質があることが分かった。

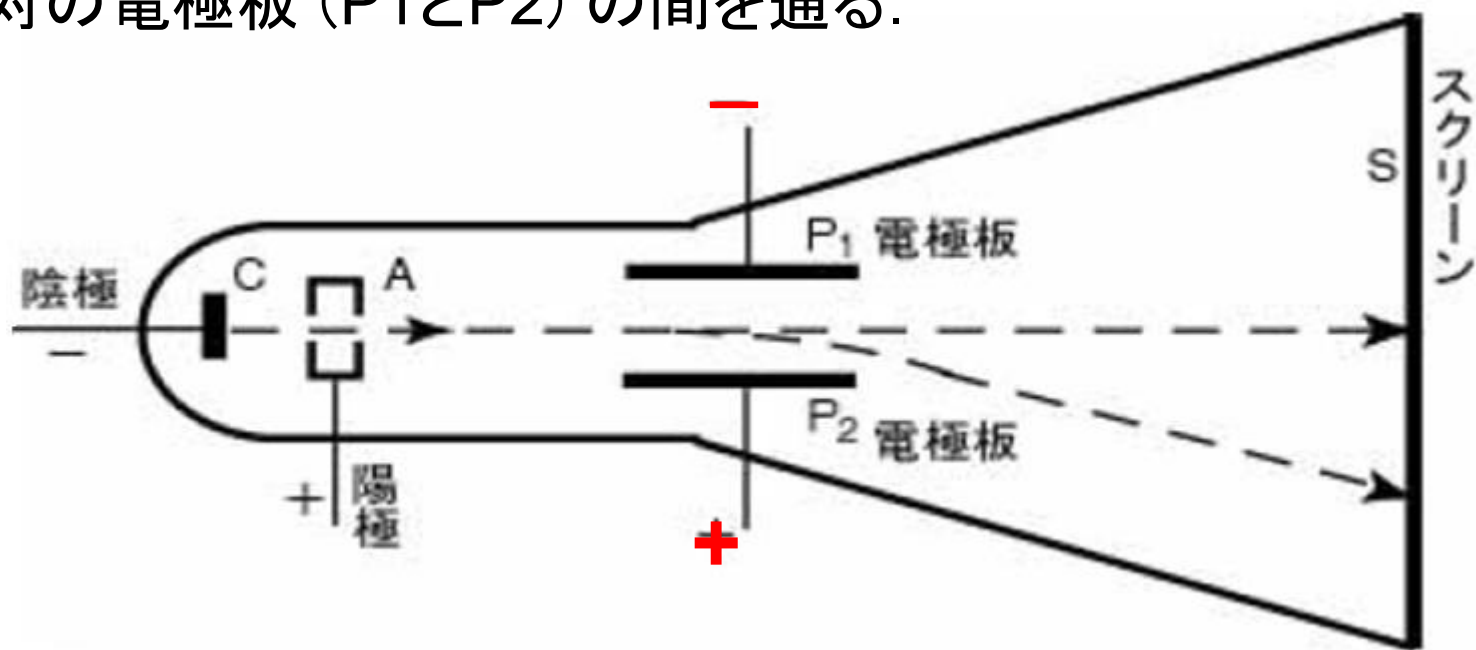


William Crookes
(June 17, 1832-
April 4, 1919)

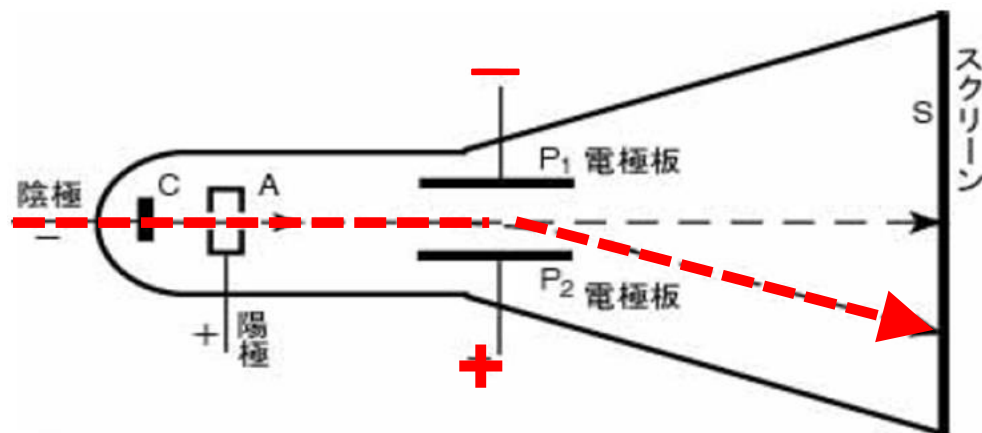
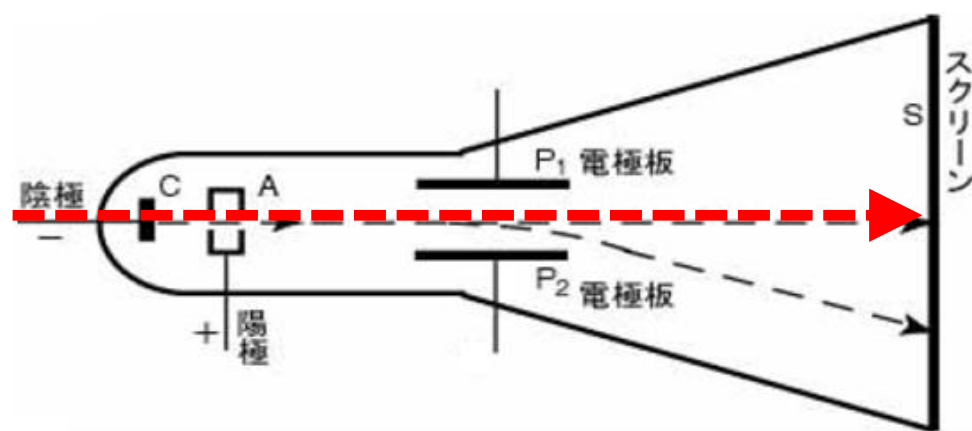
<https://www.britannica.com/>

「陰極線の正体」

陰極線の正体が何であるか、J.J. トムソン（イギリス: 1856 ~ 1940）によって研究された(1897). J.J. トムソンが用いた実験装置の概要は下図のように、基本的にはクルックス管と同じ原理である。トムソンは、陰極から発射される陰極線はマイナスの電荷を帯びた同一粒子の集まり（粒子の束）ではないか、と推定した。陰極から出たこの「粒子」は陽極に引っ張られて加速し、陽極の中央に開けられた孔を通して直進し、1対の電極板（P1とP2）の間を通る。



電極板P1とP2に間に電圧がかかっていなければ,「粒子」はそのまま直進し, 蛍光物質を塗布したスクリーンSにあたって中心点に 小さなスポットを作る. 上側の電極板P1がマイナス, 下側の電極板P2がプラスになるように電圧をかけると,「粒子」は下に曲げられて, スポットは下方へ動く. しかし, スポットは大きく広がったり, ボケたりはしない. 陰極線がマイナスの電荷を持ち, 同一粒子からなるというトムソンの推定は正しかった.



電極板に電圧がかかっていないとき

電極板に電圧がかかっているとき

「陰極線の比電荷」

トムソンは陰極線の実験装置で、陰極線の中の「粒子」の比電荷 e/m を測定した (e は「粒子」の電荷, m は質量). 電極板間に電場を加えることによって陰極線は下に曲がる(図A). そこで, 図Bのように, さらに磁場を加えることによって, 陰極線を上方に曲げて電場と磁場の効果が相殺する条件を探して, 電場がかかっていないときにスポットができる中心点に到達するようにした.

図 (A) 電場の効果

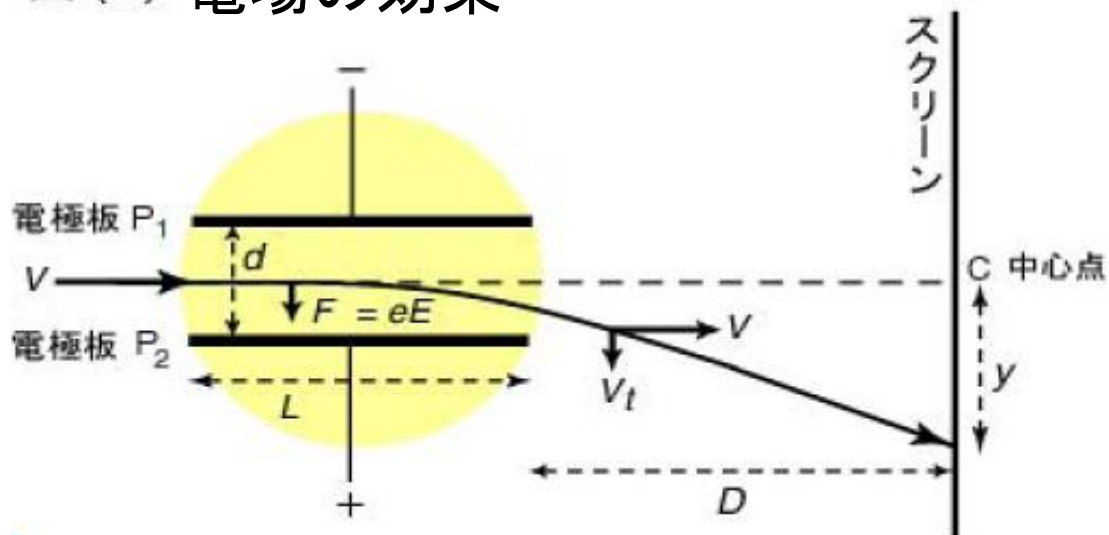
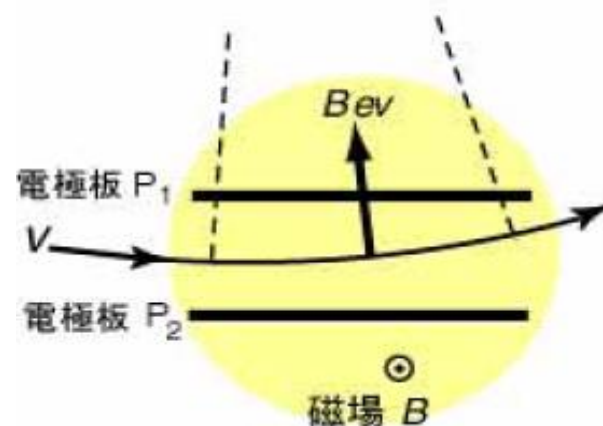


図 (B) 磁場の効果



電場と磁場の効果が相殺する条件から比電荷 e/m を求めることができる。トムソンは、陰極線中の「粒子」の比電荷を測定し、 $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ という値を得た。さまざまな条件のもとで、いつもほぼ一定の比電荷が得られることから、陰極線は同一粒子の集まりであることが分かった。

「陰極線の本性, 電子の発見」

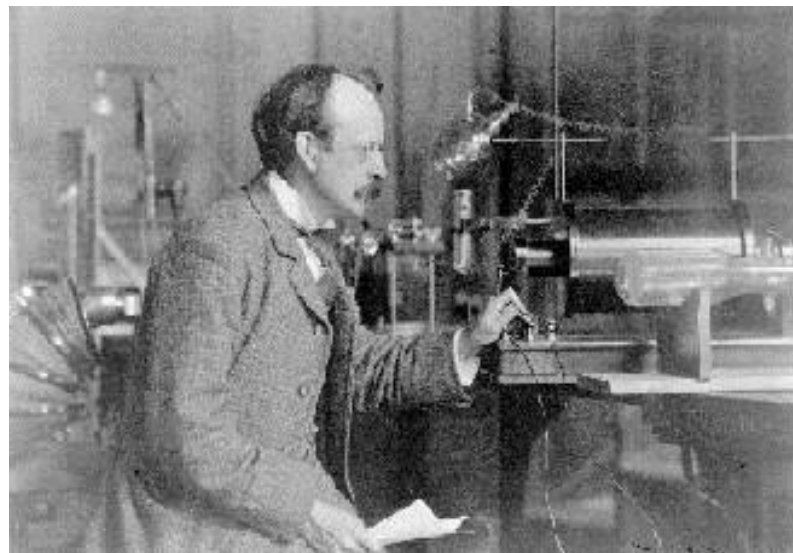
上で得られた陰極線中の「粒子」の比電荷の測定値を,ファラデーの電気分解の法則から求められた水素イオンの比電荷と比べてみる。水素イオンの比電荷は約 $9.65 \times 10^7 \text{ C/kg}$ である。

$$\begin{aligned} & (\text{陰極線の比電荷}(e/m)) \div (\text{水素イオンの比電荷}) \\ &= (1.76 \times 10^{11}) \div (9.65 \times 10^7) \doteq 1800 \end{aligned}$$

となる。水素イオンの原子量はほぼ1であるから、陰極線中の

「粒子」の質量が極めて軽く水素原子に比べて約 $1/1800$ であるか、あるいは陰極線の「粒子」が水素イオンより1800 倍も多くの荷電を運ぶことができることを意味する. J.J. トムソンは、後者はありそうにもないので、前者の考えを取り、陰極線の「粒子」は 最も軽い元素である水素より、さらに約 $1/1800$ 軽い微小な粒子であると考え、これを電子 (electron) と名付けた.

J.J. Thomson
(December 12,
1856-August
30, 1940)



© copyright the Cavendish Laboratory.

Thomson giving a lecture demonstration in 1909. The glass discharge tube on the right was presented to Thomson by C.F. Braun, the inventor of the cathode-ray tube.

<https://www.phy.cam.ac.uk/history/electron/photos>

「電子は原子の共通の構成要素」

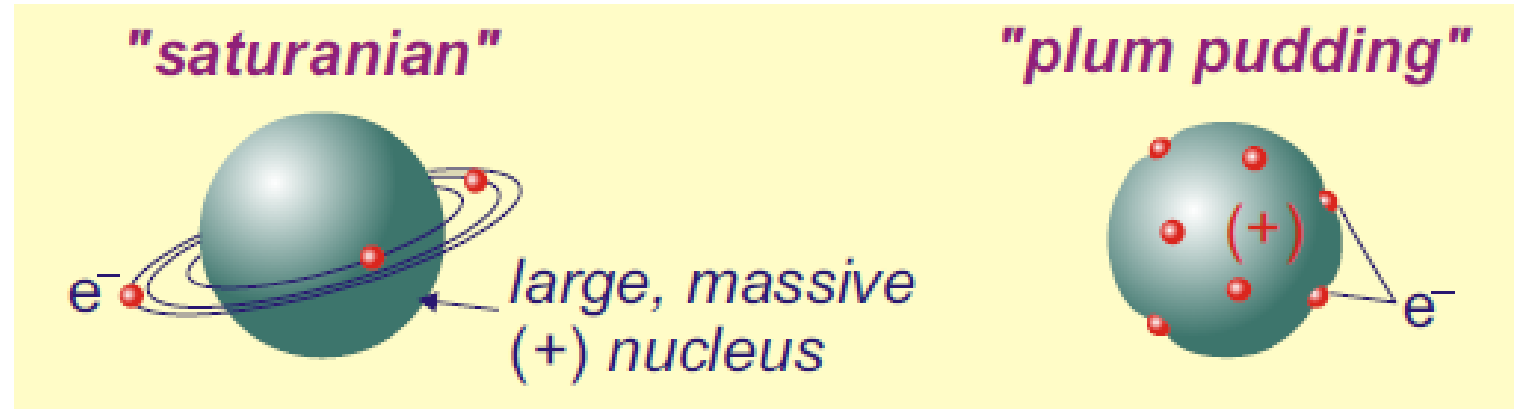
さまざまな実験の結果、陰極線の性質は放電管の中のガスの種類によらないことが分かった。また、金属を2000°C近くまで熱すると、おびただしい数の電子が放出されることも分かった。これは熱電子と呼ばれている。リチャードソン（イギリス: 1879-1959）はこの熱電子の詳しい研究をして、原子の中の電子が高熱によって激しく運動して原子から飛び出してくるのだと考え、電子が全ての原子に共通の構成要素の1つであることを確かめた。

「ミクロの世界」—その1, その2—

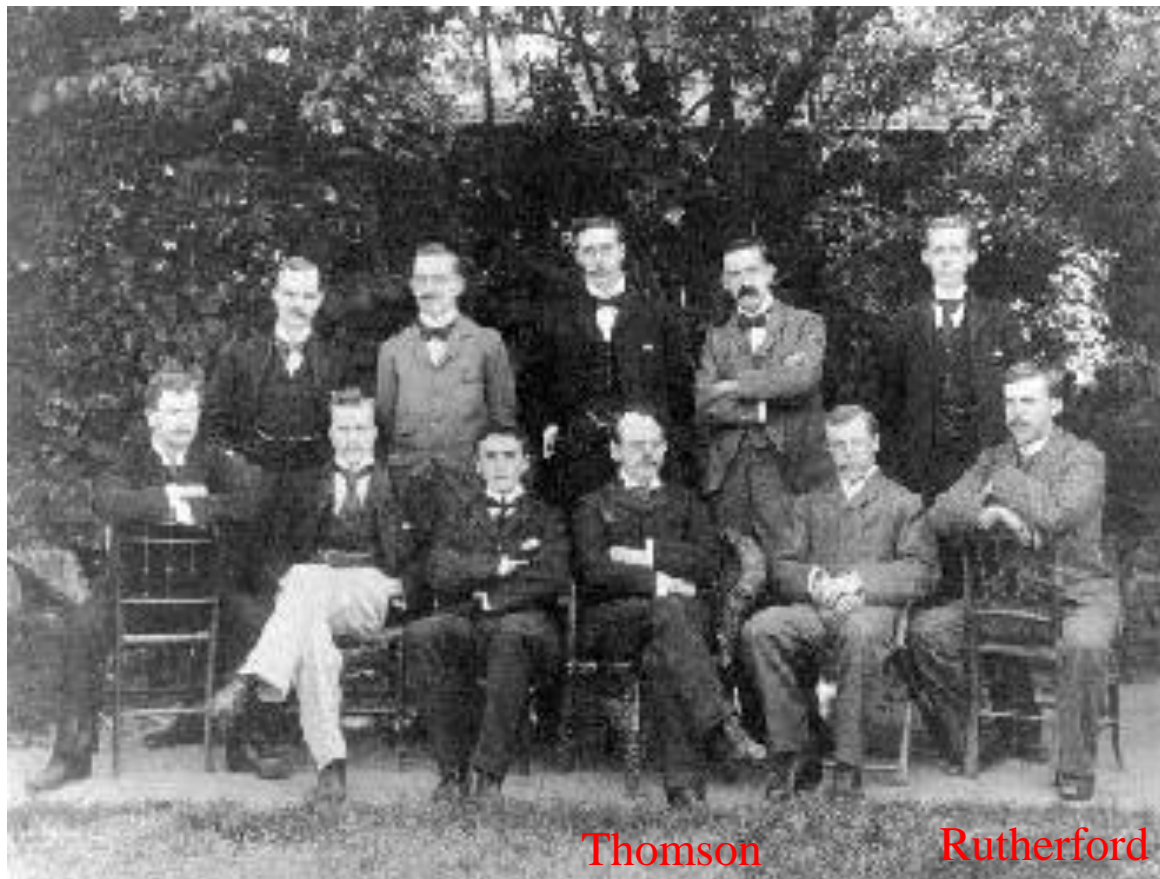
<http://www2.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/MicroWorld.html>

（九州大学名誉教授 高田健次郎）

Two models had been put forth prior to Rutherford's experiments. Which do you now think is "correct"?



原子の中に電子が存在することが分かった. しかし, 原子の構造については, トムソンらのプディングモデルか, ラザフォード・長岡半太郎らの惑星モデルのどちらが正しいのかという議論があったが, ラザフォードの散乱実験の結果, 惑星モデルが正しいことが証明された.



The research students of the Cavendish Laboratory in June 1897. Thomson is fourth from the left in the front row, Rutherford is at the right-hand end of the row.

<https://www.phy.cam.ac.uk/history/electron/photos>

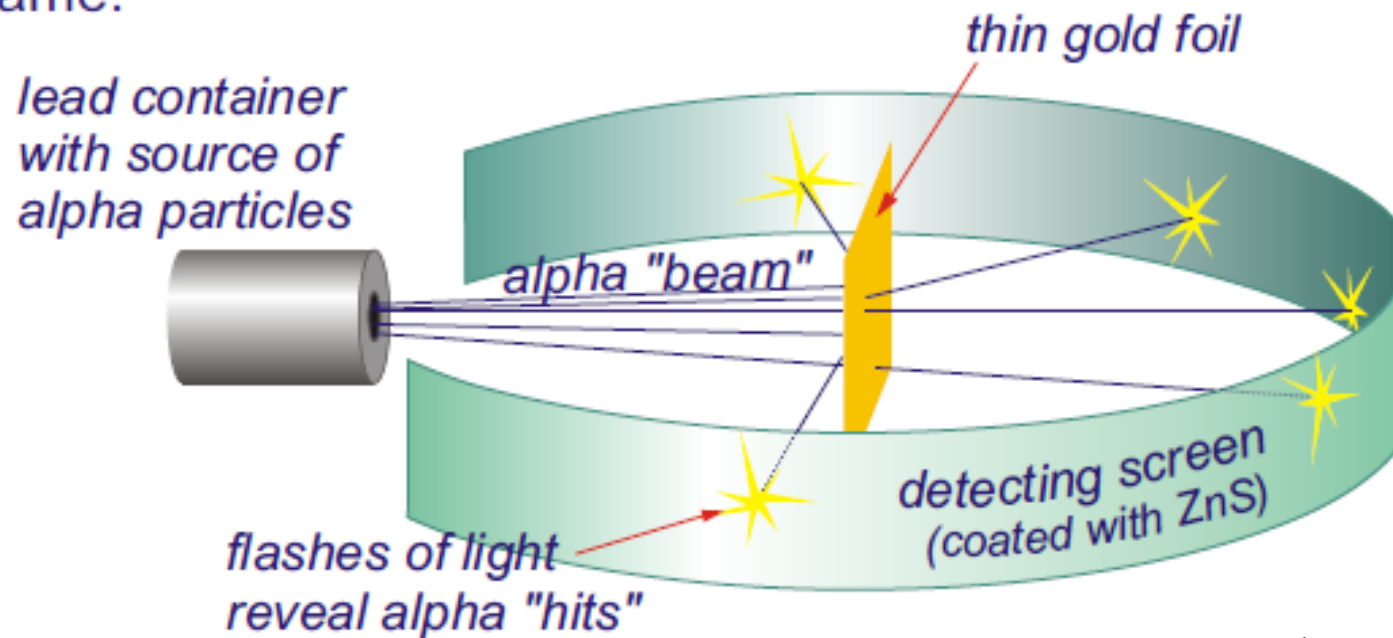
Joseph John Thomson (December 12, 1856-August 30, 1940)

Ernest Rutherford (August 30, 1871-October 19, 1937)

ラザフォードの実験

α 粒子(ヘリウム原子核 He^{2+})を薄い金箔に照射すると、ほとんどは真っ直ぐ進むが、直角あるいはそれ以上の角度に散乱される α 粒子もあることが分かった。

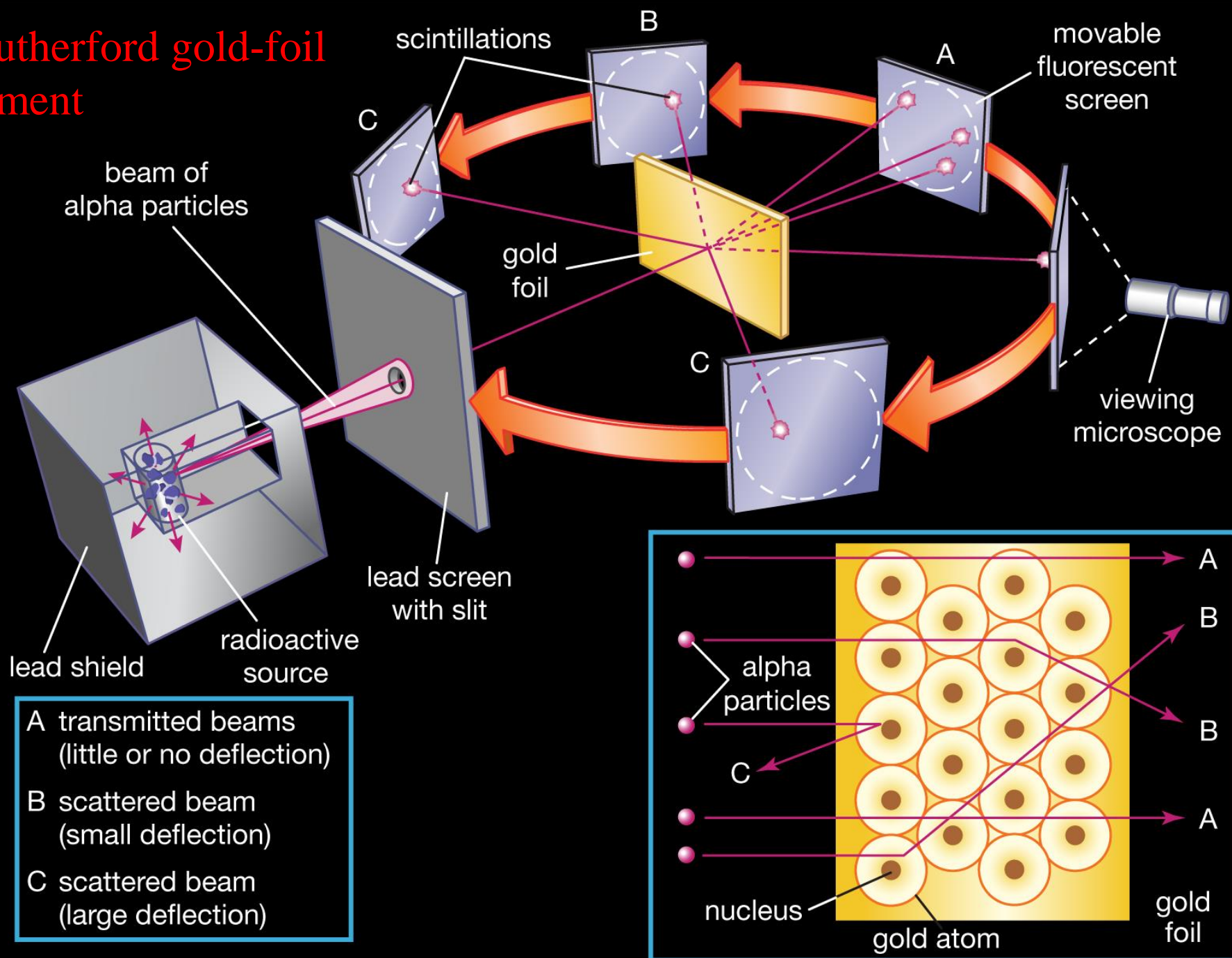
Rutherford's experiment a little more sophisticated, but the principle is the same:

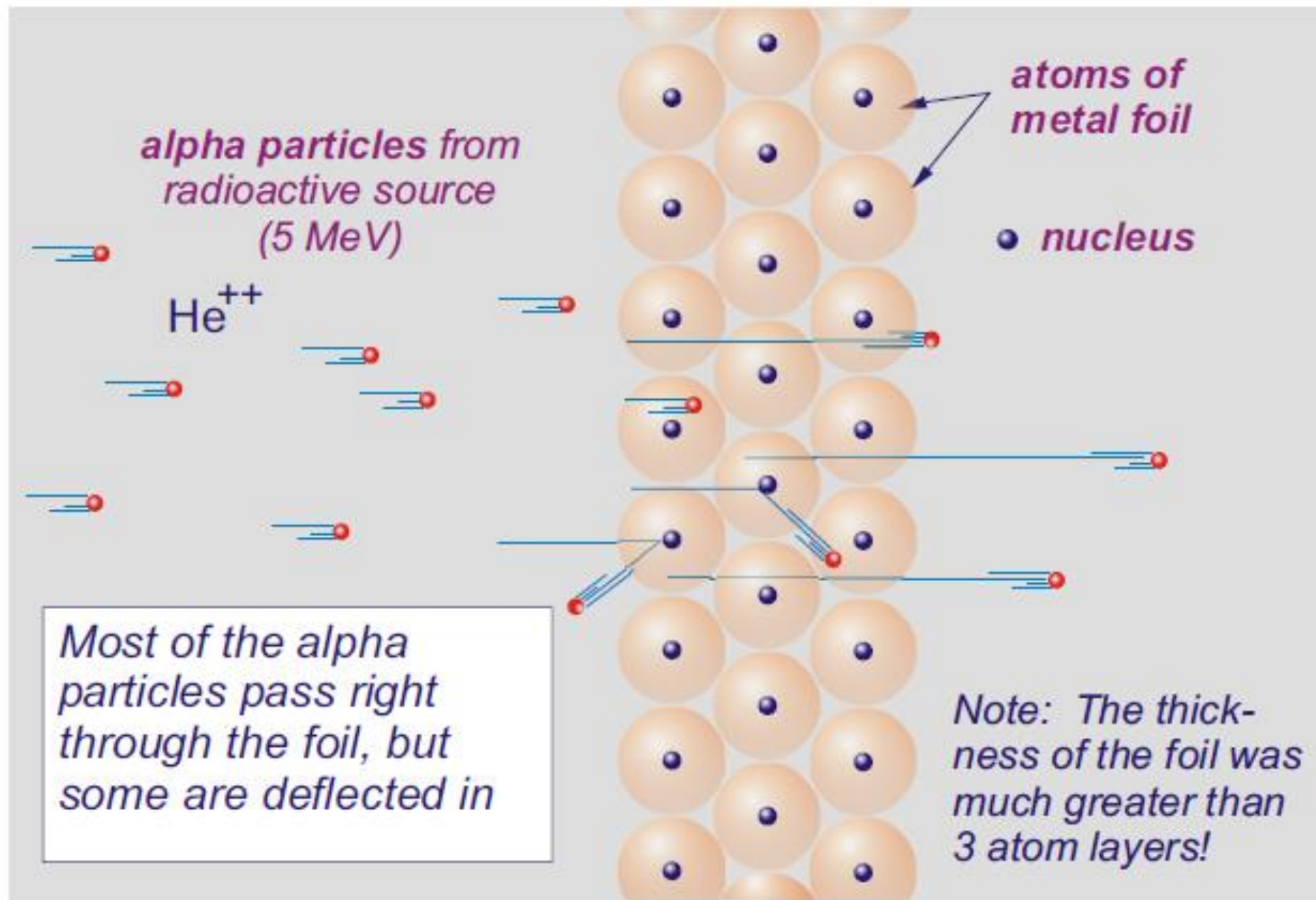


Ernest Rutherford
(August 30, 1871-
October 19, 1937)

<https://www.nobelprize.org>

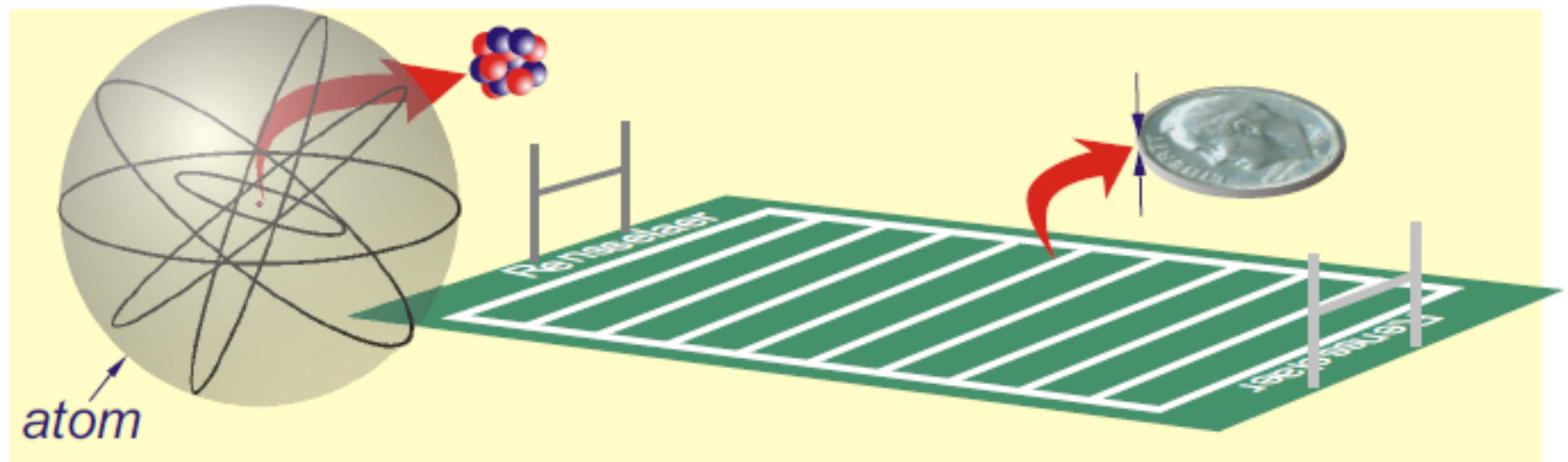
The Rutherford gold-foil experiment





ラザフォードモデルによる説明

On the basis of his alpha-scattering results, Rutherford concluded that the nucleus is tiny in comparison with the overall size of the atom: the size difference is about the same as that between the thickness of a dime and a football field (a factor of 100,000)!...So, in a way, the atom is mostly empty space. It has a tiny but very massive nucleus at its center in which almost all of the mass of the atom is concentrated.



ラザフォードは、散乱実験の結果から、原子核は原子の大きさと比べると非常に小さいと結論した。原子核の大きさを10セント硬貨の厚さだとすると、原子の大きさはフットボール場の広さくらい大きさである。つまり、原子はほとんど空の空間である。

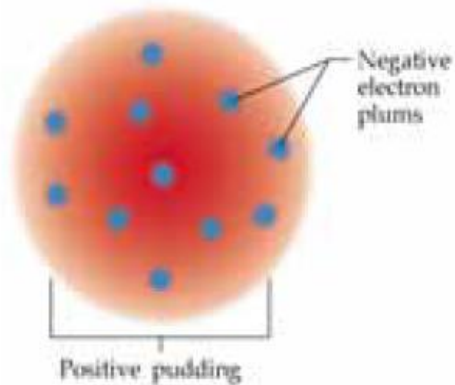
原子モデルの発展

トムソンの
プディングモデル

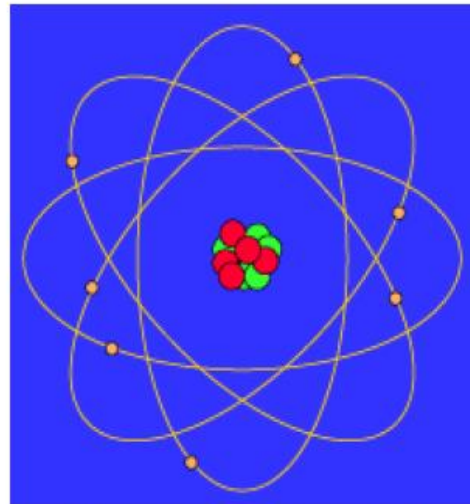
ラザフォードの
惑星モデル

ボーアの
量子論モデル

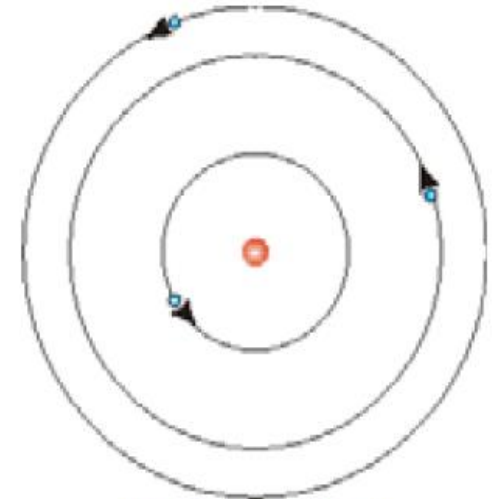
Thompson plum pudding
model of the atom



Plum-pudding model
(Thomson)



Planetary model
(Rutherford)



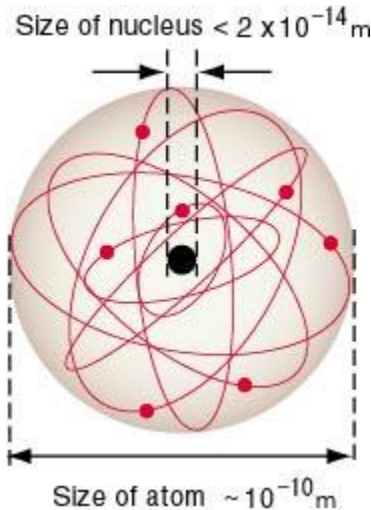
Bohr model

ラザフォードの惑星型モデルとボーアモデルは、どこが違うのか。

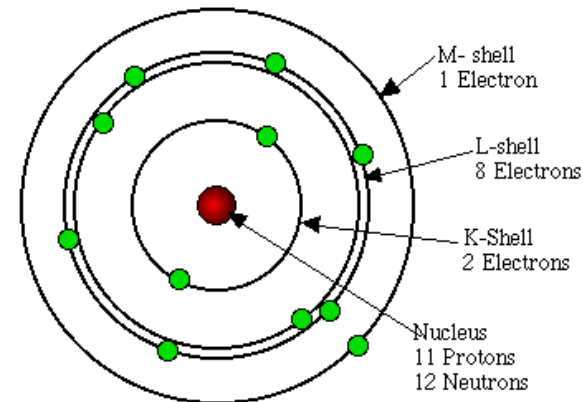
ラザフォードモデルでは、

(1) 原子核からの半径 r の値を規定する条件がないので任意の値を取ることができる。

(2) 古典電磁気学にしたがうと電子は電磁波を放射しながらエネルギーを失って行き原子核に落ち込んでしまうはずである。原子が安定に存在できることを保証していない。



原子のラザフォードモデル



The Bohr Picture of the Sodium (Na 11) Atom

Na原子のボーアモデル

ボーアは、プランクの量子仮説にしたがって、次の(1)量子条件と定常状態の仮説、(2)振動数条件、(3)対応原理の仮説、を取り入れた。

(1)原子は古典物理学で信じられていたように連続的にあらゆる値のエネルギーを取りうるのではなく、原子に特有のとびとびのエネルギーだけをとることが許される。そして、この状態で原子は光の射出を行わない。

電子の角運動量 $L=mvrl$ はプランク定数 h の $n/2\pi$ 倍でなければならない。

$$mvr = n h / 2\pi = n\hbar$$

(2)エネルギー E_m の軌道から E_n の軌道($E_m > E_n$)へ遷移する際にエネルギー差と同じエネルギー $h\nu$ を持つ振動数 ν の電磁波を放出する。

$$h\nu = E_m - E_n$$

(3)定常状態において電子は古典力学の法則にしたがって行動する。

1・2 核種と同位体

原子核中の陽子数と中性子数で原子核の種類が決定され、これを**核種**という。

同じ数の陽子を持つ複数の核種をまとめて**元素**という。原子核の陽子数を**原子番号** Z という。陽子数 Z と中性子数 N の和で核種の質量を指定でき、これを**質量数** A という。

$$A = Z + N$$

核種 ${}^A_Z E$ 水素の同位体: ${}^1H, {}^2H, {}^3H$
(水素, 重水素, トリチウム)

同一の元素で異なる質量数を持つ核種を**同位体**という。元素の同位体は、**安定同位体**と**放射性同位体**に分類できる。

原子量

元素の相対的質量を用いて原子量を定義する。 ^{12}C の原子1個の質量の1/12を原子質量単位(atomic mass unit, $1.660\ 538\ 86 \times 10^{-27}\text{kg}$, u)という。

^{12}C 12 u

^{13}C 13.003 35 u

天然の炭素は ^{12}C と ^{13}C の混合物であるため、その同位体比によって炭素の平均相対質量は12.011となる。これを炭素の原子量という。

質量の単位について

SI と併用される単位

物理量	単位の名称	記号	SI 単位による表現
質量 mass	ダルトン ^{a)} dalton	Da	1.66054×10^{-27} kg
	統一原子質量単位 unified atomic mass unit	u	1u = 1Da

^{a)}Da は2006 年から正式に承認されている。それまで使われていたu と同一の単位であり、「静止して基底状態にある自由な炭素原子¹²C の質量の1/12 に等しい質量」の記号である。高分子の質量を表すときにはkDa, MDa など、原子あるいは分子の微小な質量差を表すときにはnDa, pDa などのように、SI 接頭語と組み合わせた単位を使うことができる。

2013 日本化学会 単位・記号専門委員会

<http://www.chemistry.or.jp/activity/unit2013.pdf>

質量欠損

原子の質量は，構成する中性子，陽子，電子の質量の和よりも小さい。

この質量差を質量欠損 Δm という。

2個の陽子の質量 m_p ，2個の中性子の質量 m_n ，2個の電子の質量 m_e の和
 $2 m_p + 2 m_n + 2 m_e = 6.697 \times 10^{-27} \text{ kg}$

${}^4\text{He}$ の質量 m_{He}

$$m_{\text{He}} = 6.646 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_{\text{He}} < 2 m_p + 2 m_n + 2 m_e$$

質量欠損 Δm

$$\Delta m = 0.051 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

質量欠損は核を形成する際の結合エネルギーとして放出される。

質量Mの原子核がZ個の陽子とN個の中性子から成っているとす。陽子と中性子の質量を M_p 、 M_n 、原子核の質量をMとすると、質量欠損 Δm は常に正である($\Delta m > 0$)。

$$\Delta m = Z \cdot M_p + N \cdot M_n - M$$

質量mとエネルギー ΔE との間には

$$E = mc^2 \quad c \text{は光速}$$

の関係がある。すなわち、ばらばらに存在する陽子と中性子が原子核になるとき Δm に相当する $E = \Delta mc^2$ のエネルギーを放出し、核子はこのエネルギーによって結合し原子核を形成する。これを原子核の結合エネルギーという。Eを質量数Aで除した E/A は核子一個当りの平均結合エネルギーとなる。

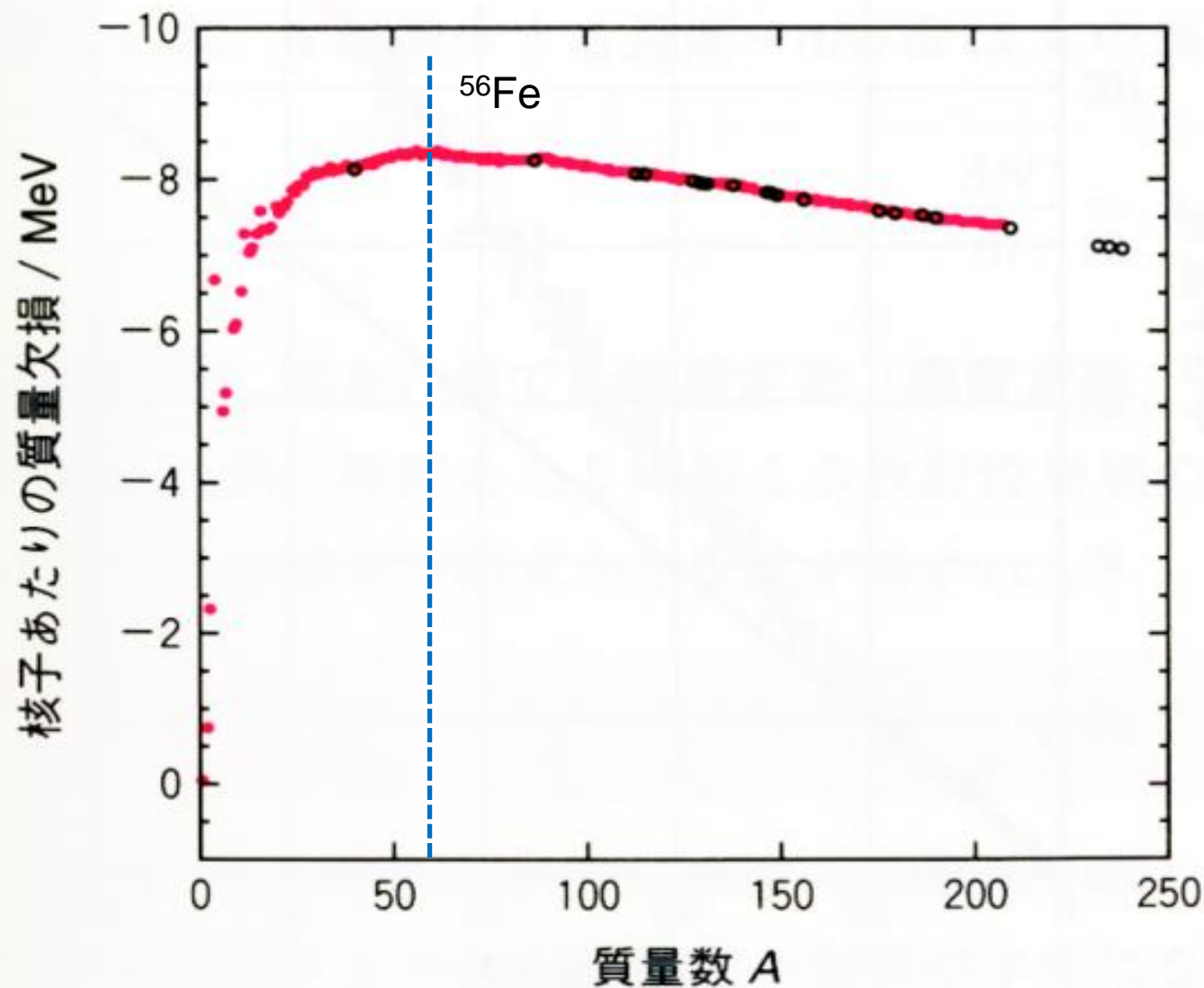
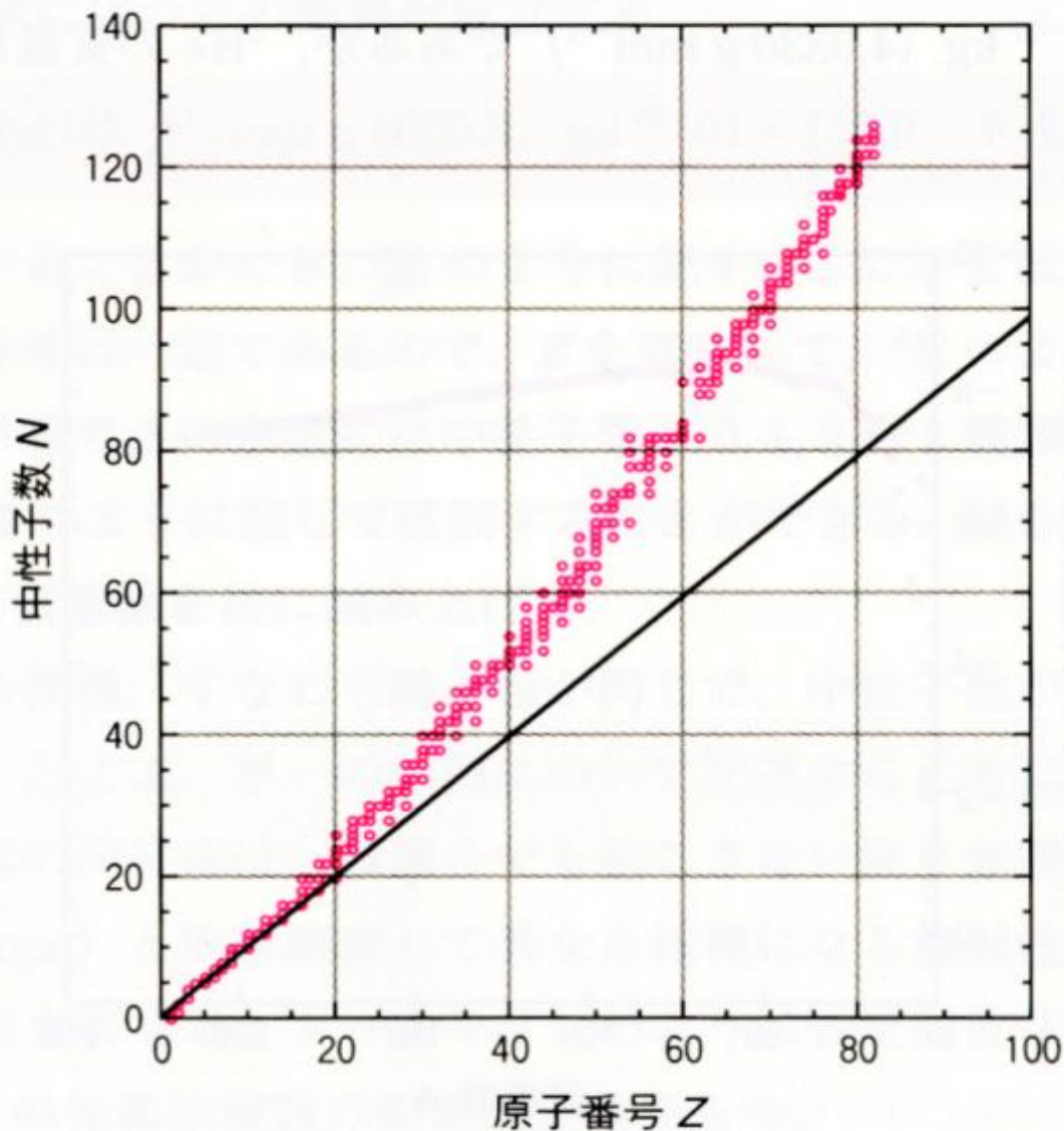


図1・1 核子あたりの質量欠損(●は安定核種、○は放射性核種を示す) 核子1つ当たりの質量欠損は ^{56}Fe が最大であり、最も安定な核種である。

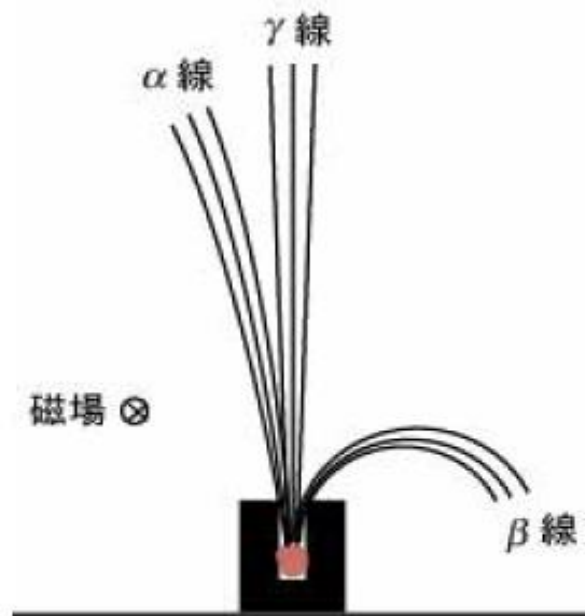


- ①原子番号が大きくなると、中性子数が陽子数より多くなる。
- ②原子番号が偶数のものは多くの同位体を持つが、奇数のものは同位体の数が少ない。
- ③中性子数が偶数の核種の方が奇数の核種より多い。

原子核を形成する力は核力とよばれるが、原子核の安定化に中性子が欠かせないことが分かる。

図1・2 安定核種の陽子数 Z と中性子数 N の関係。直線は $Z=N$ を表す。

1. 3 放射性核種と放射性壊変(崩壊)



放射性壊変には, α 壊変, β 壊変, γ 壊変の3種類があり, それぞれ α 線(α 粒子), β 線(電子線), γ 線(波長の短い電磁波)を放出する.

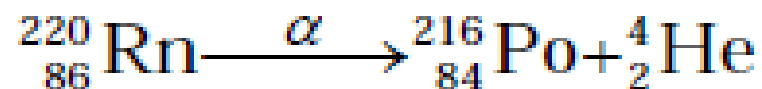
α 粒子は, ヘリウムの原子核であり, 陽子2つと中性子2つとからなる重粒子である.

[高田健次郎九大名誉教授 ミクロの世界 - その1 - (原子の世界の謎)]

http://www2.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld2/2Part1/2P17/alpha_decay.htm

(1) α 壊変(崩壊)

質量数Aが大きい核種の多くのは過剰の質量を α 粒子の形で放射しようとする傾向がある。



親核種	Z	N	A
娘核種	Z - 2	N - 2	A - 4
α 粒子	2	2	4

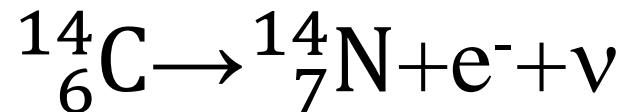
放射性核種Aが放射性壊変をして核種Bに変化したとき、Aを親核種、Bを娘核種という。

(2) β 壊変

陽子数 Z に比べて中性子数 N が過大な核では、原子核内で中性子 n が陽子 p に変わり、それに伴い電子 e^- とニュートリノ ν が核外に放射される。



例： ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{40}\text{K}$



(3) γ 壊変

原子核が励起状態から基底状態へ遷移するとき、エネルギーを γ 粒子(光子)として放射する。 α 壊変、 β 壊変においても、多くの場合親核種からの遷移は娘核種の基底状態とともに励起状態へも起こる。したがって α および β 壊変でも同時に γ 粒子の放射があることが普通である。

励起状態がしばらく存続し核異性体として分離できることがある。核異性体がより安定な状態へ変わることを核異性体転移(IT)という。

核異性体が γ 粒子放射の代わりに壊変のエネルギーを軌道電子に与えてこの電子が放射されることがある。このことを内部転換といい、放射される電子を内部転換電子という。

壊変	放出されるもの	Z	N	A
α 壊変	α 粒子	Z-2	N-2	A-4
β 壊変	電子	Z+1	N-1	A
γ 壊変	電磁波	Z	N	A

(注) α 粒子は、陽子2個と中性子2個からなるヘリウムの原子核である。

放射性壊変の速度

放射性壊変はランダムに起こる現象であって、特定の原子に注目するときそれがいつ壊変するかは予言できず、ただある時間間隔 Δt に壊変する確率 p を知り得るのみである。多数(N 個)の原子があった場合には Δt に壊変する原子数 $-\Delta N$ は、

$$-\Delta N = Np$$

と期待できる。 Δt が小であれば p は Δt に比例すると考えられる。比例定数を λ として、

$$p = \lambda \Delta t.$$

したがって、

$$-\Delta N = Np = N\lambda \Delta t$$

$$\Delta N / \Delta t = -\lambda N.$$

Δt を十分小さいとすると、

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

放射性壊変の速度は存在する原子の数のみに比例する。比例定数 λ を壊変定数という。

減少の速度が、常にそのときの量に比例する場合、減少の過程は必ず指数関数となる。放射壊変はランダムに起こる現象であって、放射壊変の速度は存在する原子数のみに比例するから、比例定数を λ として、

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

となる。 λ を壊変定数という。積分すると、

$$\log N = -\lambda t + C.$$

初期条件を $t=0$ のとき $N = N_0$ とすると

$$\log N_0 = C.$$

$$\log (N/N_0) = -\lambda t$$

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

指数関数の性質として、ある時間に N だったのが N/n に減少するのに要する時間間隔は N によらず常に等しい。特に半分になるのに要する時間 T を半減期という。

$$\text{半減期 } T = \frac{\log 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

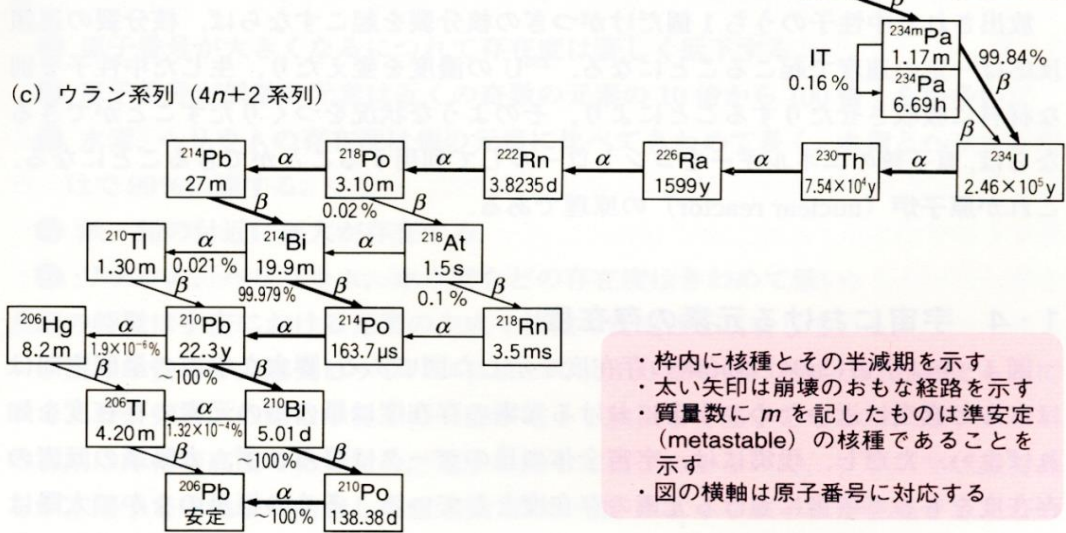
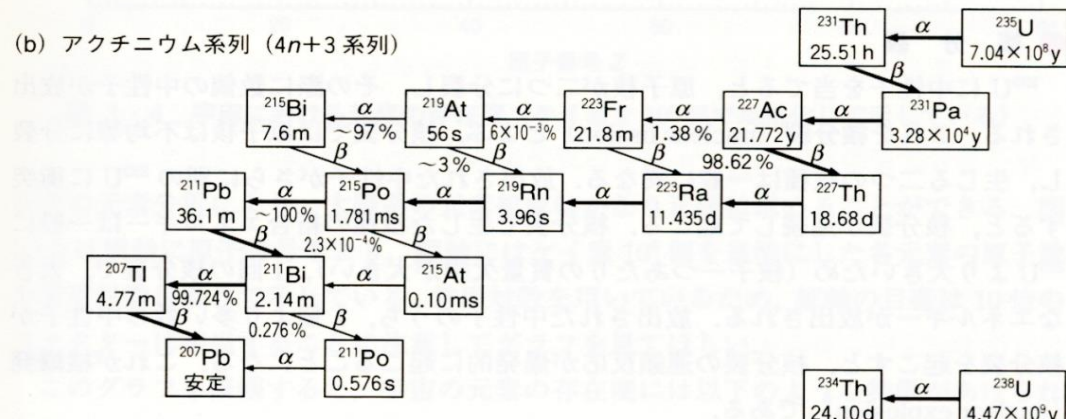
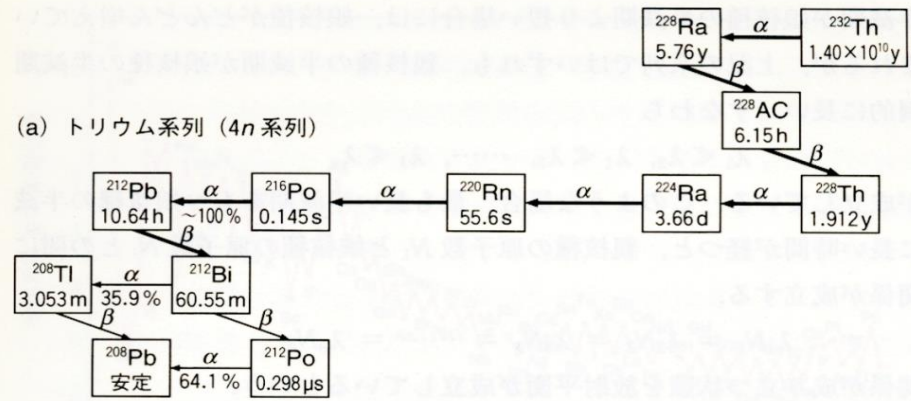
$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$\log 2 = \lambda T$$

放射性壊変系列

放射性壊変して生成した核種が不安定な核種で、さらに壊変する場合がある。

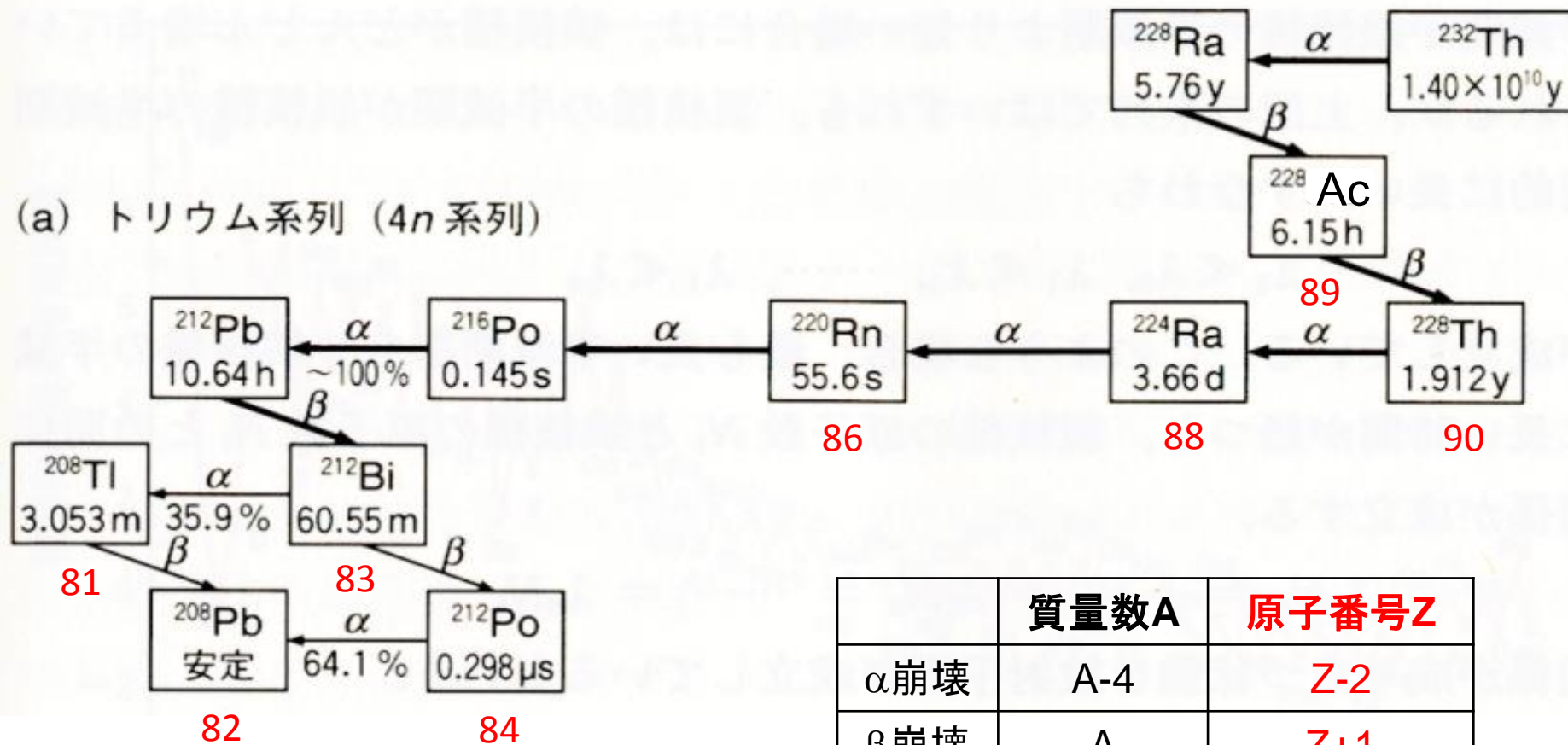
天然に存在する ^{232}Th 、 ^{235}U 、 ^{238}U は α 壊変と β 壊変を繰り返して、最終的にそれぞれ、 ^{208}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb になる。それぞれの壊変でできる核種の質量数は $4n$ 、 $4n+3$ 、 $4n+2$ になり、それぞれ、トリウム系列、アクチニウム系列、ウラン系列と呼ばれる。



- ・枠内に核種とその半減期を示す
- ・太い矢印は崩壊のおもな経路を示す
- ・質量数に m を記したものは準安定 (metastable) の核種であることを示す
- ・図の横軸は原子番号に対応する

図1.3 放射性壊変系列

(a) トリウム系列 (4n 系列)

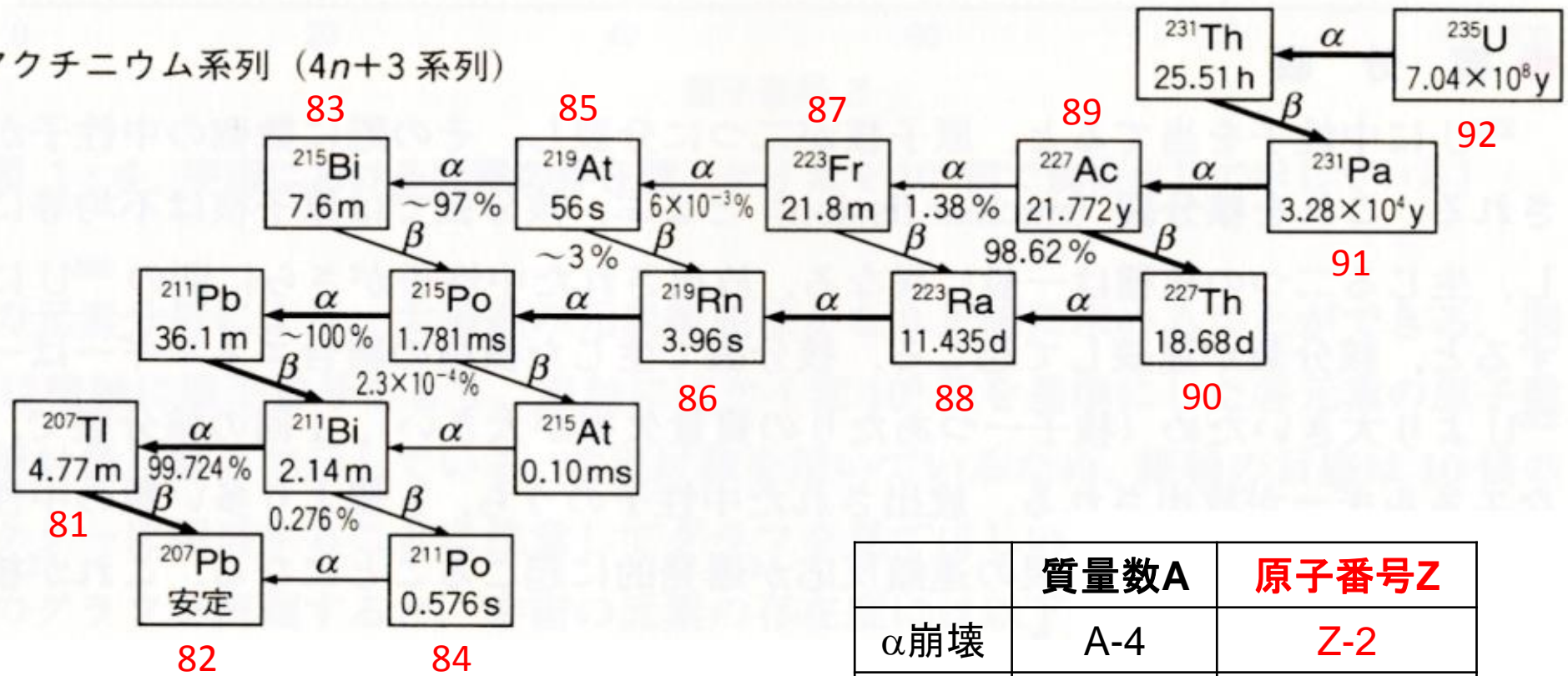


	質量数A	原子番号Z
α崩壊	A-4	Z-2
β崩壊	A	Z+1

α崩壊すると、原子番号は2小さくなり、質量数は4減る。

β崩壊すると、原子番号は1大きくなり、質量数は変わらない。

(b) アクチニウム系列 (4n+3 系列)

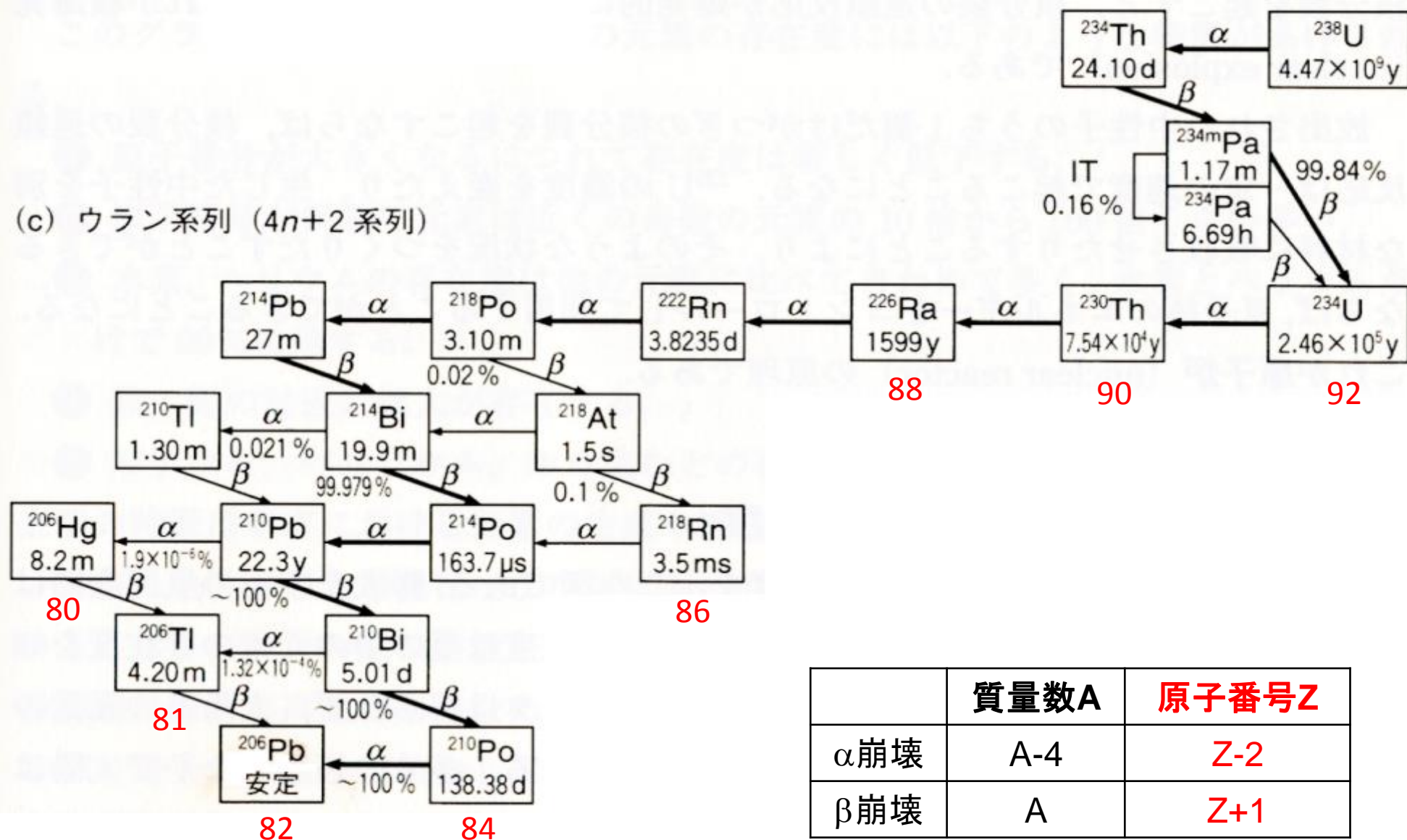


	質量数A	原子番号Z
α崩壊	A-4	Z-2
β崩壊	A	Z+1

α崩壊すると、原子番号は2小さくなり、質量数は4減る。

β崩壊すると、原子番号は1大きくなり、質量数は変わらない。

(c) ウラン系列 (4n+2 系列)

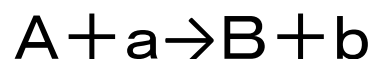


α 崩壊すると、原子番号は2小さくなり、質量数は4減る。

β 崩壊すると、原子番号は1大きくなり、質量数は変わらない。

原子核反応

原子核とほかの粒子との衝突によって起こる現象を核反応という。
特に、原子核の転換を伴う場合をいう。



A: 標的核

B: 生成核

a: 入射粒子

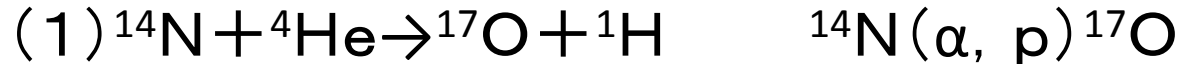
b: 放出粒子

反応の前後では、

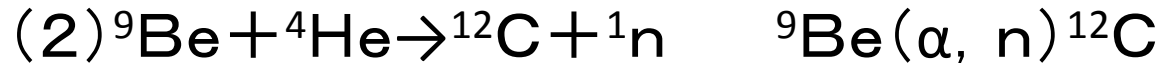
(1) 電荷の和は一定。

(2) 粒子の総数は一定。ただし、陽子、中性子のそれぞれの数は、その核反応に中間子が関与している場合は変わることもある。

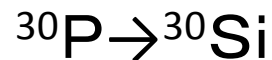
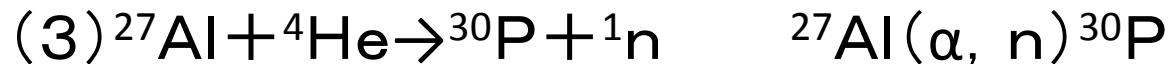
核反応の例



1919年ラザフォードが発見した反応で、初めて元素を人工変換した。



1932年チャドウィックが中性子を発見した反応である。



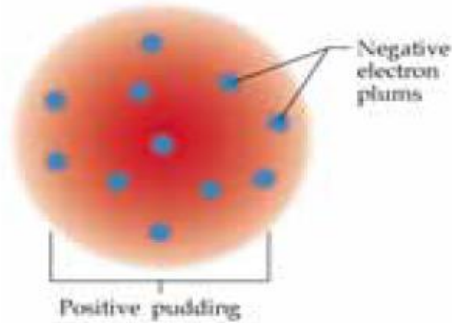
1934年F. ジョリオとI. ジョリオ＝キュリーが発見した反応であり、初めて人工放射性核種をつくった。

原子モデルの発展

トムソンの
プディングモデル

1904年

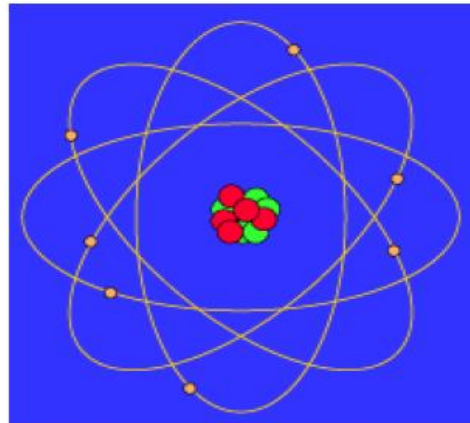
Thompson plum pudding
model of the atom



Plum-pudding model
(Thomson)

ラザフォードの
惑星モデル

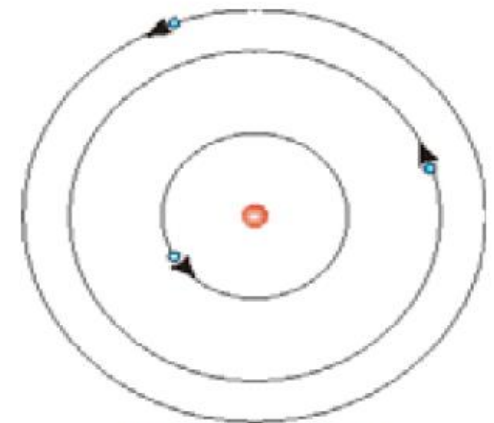
1911年



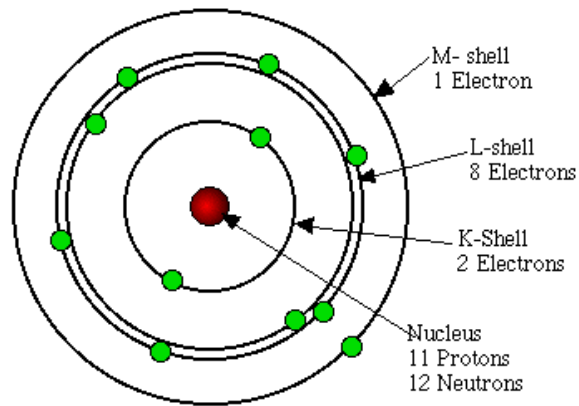
Planetary model
(Rutherford)

ボーアの
前期量子論モデル

1913年



Bohr model



The Bohr Picture of the Sodium (Na 11) Atom

Na原子のボーアモデル

ラザフォードの惑星型モデルとボーアモデルは同じように見えるが、どこが違うのか。

(1)ラザフォードモデルでは、原子核からの半径 r の値を規定する条件がないので任意の値を取ることができる。

(2)古典電磁気学にしたがうと電子は電磁波を放射しながらエネルギーを失って行き原子核に落ち込んでしまうはずである。原子が安定に存在できることを保証してない。

ボーアは、プランクの量子仮説にしたがって、2つの条件、(1)量子条件、(2)振動数条件、(3)定常状態の仮定(対応原理)、を取り入れた。

(1)電子の角運動量 $L = mvr$ はプランク定数 h の $n/2\pi$ 倍でなければならない。

$$mvr = n h / 2\pi = n\hbar \quad n=1,2,3,\dots$$

(2)エネルギー E_m の軌道から E_n の軌道($E_m > E_n$)へ遷移する際にエネルギー差と同じエネルギー $h\nu$ を持つ振動数 ν の電磁波を放出する。

$$h\nu = E_m - E_n$$

1・5 ボーアの水素原子モデル

量子力学的原子モデルへの発展

量子論

(プランク, 1900)

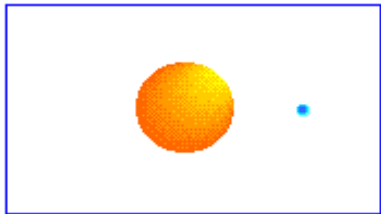
物質波(ド・ブロイ, 1924)

量子力学的波動方程式

(シュレディンガー, 1926)

古典力学的
惑星モデル

(ラザフォード, 1911)



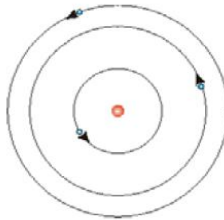
黒体放射

原子スペクトル

熱容量

ボーアモデル

(ボーア, 1913)

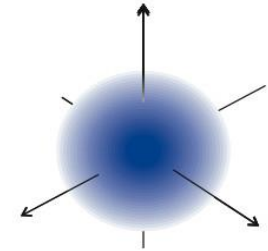


電子線回折

(デヴィソン・ガーマー, 1928)

量子力学的

波動力学モデル



10月5日 学生番号 氏名

(1)原子が、質量が小さく負電荷をもつ電子と、小さくて質量の大きな正電荷をもつ原子核から構成されることがどのような実験結果から導かれたか説明しなさい。

(2)本日の授業について、疑問、質問、意見等を書いてください。