

放射線を測る

集合場所：基礎教育実験棟 物理学実験室(201 号室)

放射線と放射能

物質は原子によってできており、さらに原子は原子核とそのまわりの電子により構成されている。原子のもつ陽子の数が原子番号であり、同じ原子番号の原子のみで構成される物質が元素とよばれる。同じ原子番号の原子でも、中性子の数が違うものを同位体とよぶ。たとえば、塩素Clの原子番号は 17 であるが、天然の塩素の原子量は 35.453 である。これは、中性子を 18 個もつ $^{35}_{17}\text{Cl}$ と中性子 20 個をもつ $^{37}_{17}\text{Cl}$ がおよそ 3:1 の比率で存在するからである。同位体のなかには不安定で、壊れて電荷を持った粒子を放出し、原子番号を変える、すなわち核種を変えてゆくものがある。このことを原子が壊変するという。壊変のときにでる粒子（や電磁波）が放射線である。放射線を出す同位体のことを、放射性同位体(RI: ラジオアイソトープ **R**adio **I**sotope) とよぶ。放射性同位体は天然に存在し、あるいは加速器等によって人工的にも作られる。また原子核の壊変ではなく、地球の外側から降ってくる宇宙線とよばれる放射線も存在する。

放射性同位体が放射線を出す性質のことを放射能という。放射性同位体のひとつひとつの原子は、ある寿命がくると確率的に壊変する。多くの同位体があつまった物質は、決まった時間内により多くの放射線を発生する。つまり放射能を測るには壊変の頻度を用いる。放射能の単位は Bq (ベクレル) であり、1Bq はその物質が 1 秒間に 1 回の壊変をおこすという意味である。また放射線の強さは、決ま

った物質質量あたりにどれだけのエネルギーを落とすかで測ることができる。これを吸収線量とよび、放射線の電離（イオン化）作用（後述）によって 1kg あたり 1J のエネルギーを落とすとき 1 Gy (グレイ) という単位で表す。 $1\text{Gy} = 1\text{J}/\text{kg} = 1\text{m}^2/\text{s}^2$ である。さらに生体については、放射線の種類による効果を考えた因子を Gy に掛けて、線量等量 Sv (シーベルト) という単位を用いる。¹

放射性同位体がなぜ壊変をおこすかというと、別の核種になることにより、より安定するからである。陽子 2 つは単独で存在するよりも、結合して原子核になったほうが質量が軽くなる（質量欠損）。軽くなった分は結合のエネルギーになっている。質量とエネルギーが等価であることは、アインシュタインが特殊相対性理論で $E = mc^2$ としてあきらかにし

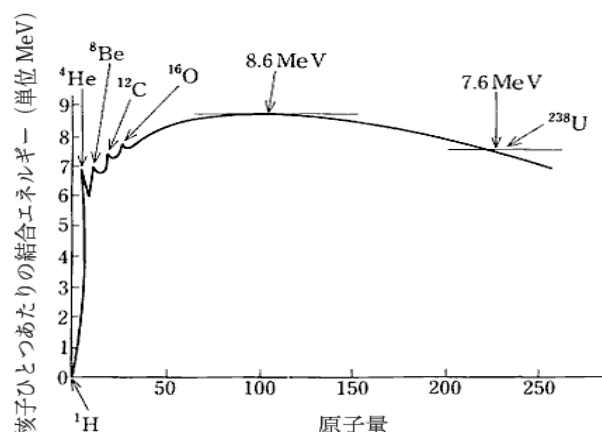


図 1：原子の結合エネルギー
(「基礎物理学コース II」学術図書より引用)

¹ これらは SI 単位。以前は、Ci (キュリー)、rad (ラド)、rem (レム) といった単位が使われた。

た。図1に、核子（陽子や中性子）ひとつあたりの結合エネルギーを示す。

放射線のエネルギーは、その粒子が発生するときの原子核の壊変によって解放される結合エネルギーによって得られる。このエネルギーを測るのに eV（電子ボルト）という単位がよく用いられる。

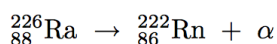
$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{C} \times 1\text{V} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ であり、 $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$ のことである。

放射線の種類と物質への作用

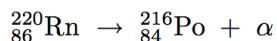
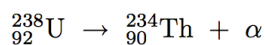
放射線は以下の3種に大別することができる。²

α （アルファ）線

α 線は、陽子2つと中性子2つが結合したもので、これはヘリウム He 原子核と同じである。陽子の約4倍の重さで、素電荷³の2倍の正の電荷をもつ荷電粒子である。原子核が α 壊変（ α 崩壊ともよぶ）を起こすと、アルファ線を放出して原子番号が2つ減り、質量数は4つ減る。たとえばラジウム $^{226}_{88}\text{Ra}$ はアルファ線をだしてラドン $^{222}_{86}\text{Rn}$ へ壊変する。



ほかにも、



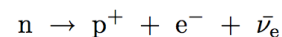
など多くのものが存在する。

α 線のように正の電荷をもった粒子が物質中を通過すると、付近にある原子の電子をはぎ取り、通り道にそってイオンをつくる。これが放射線による電離（イオン化）作用である。

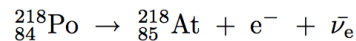
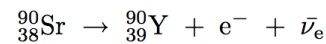
原子を電離させるにはエネルギーが必要で、放射線はその分のエネルギーを失い、最後には止まってしまう。いいかえれば、電離という形で放射線はエネルギーを物質中に落として行く。半分の放射線が止まってしまうまでの距離を飛程とよぶ。飛程はもともとの放射線がもっているエネルギーが高いほど長くなるが、 α 線は電荷を2つも持ち、かつ重いために、同じ距離を進んでも β 線（後述）よりも多くのエネルギーを物質中に落とす。そのため、あまり遠くまで飛ぶことはできず、空気中での飛程は10cm以下である。

β （ベータ）線

β 線はじつは電子であり、原子核中の中性子 n が β 崩壊して陽子 p^+ と電子 e^- とニュートリノ $\bar{\nu}_e$ になり、そのとき放出したものである。



すなわち原子核の β 壊変では、原子量はそのまま、原子番号が一つ増える。たとえば、



などがある。

β 線は α 線の約1/7000の質量しかなく、電荷も負の素電荷1である。 β 線もやはり物質中では電離作用をおこなうが、軽いために、 α 線よりも飛程は長く（アルミニウム中で数mm）、また衝突によって経路を複雑に散乱される。

γ （ガンマ）線、X（エックス）線

これらは電荷を持つ粒子ではなく、非常に波長の短い高エネルギーの電磁波（エネルギーが1 MeV のとき波長は $\sim 10^{-14}\text{m}$ ）である。そして粒子的な性質をあらわにしており、光子として考えるべきものである。 γ 線は、エ

² 広義では、ニュートリノやミュー粒子などの素粒子もまた放射線である。ここでは放射性同位元素の壊変でてくる代表的な放射線を説明する。

³ 素電荷 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$

エネルギー的に励起された原子核が、低いエネルギー状態に落ちるときに放出するもので、 α 壊変や β 壊変と同時(直後)に発生することが多い。また電子準位の遷移により放出される光子を X 線とよぶが、加速器で得られる光子などもあり、近年はエネルギーで区別することが多くなってきている。

γ 線は光子(電磁波)なので、物質中に入射しても直接に電離を起こすことはできず、光電効果や電子の散乱(コンプトン散乱、レーリー散乱)によってエネルギーを失ってゆく。またエネルギーが高ければ、電子と陽子の組を対生成する。物質との相互作用があるところまで進んで止まるというものではないので飛程は定義できない。かわりに、一定の割合まで光子数が減るまでの長さをもちいて表す。 N_0 個の光子が、 N_0/e 個(=最初の約37%)⁴になる物質の厚さを減衰距離(attenuation length)とよぶ。物質の減衰距離が L [m] のとき、 N_0 個の γ 線は x [m]先では、

$$N(x) = N_0 e^{-x/L} \text{ [個]}$$

となる。

半減期と統計的性質

もし、放射性同位体のあるひとつの原子に着目し、じっと眺め続けていたとしても、その原子がいつ壊変を起こすかを確定的に予言することはできない。ある原子が壊変を起こすかどうかは確率的な振る舞いをし、 N 個の放射性同位体原子は、ある決まった時間までに半分の $N/2$ 個が壊変を起こす、というのみが予言できる。この半分になるまでの時間を半減期とよぶ。ある放射性同位体原子核

の半減期を T [s] とすると、最初に N_0 個あった原子核は、時刻 t [s] 経過すると、

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} \text{ [個]}$$

になる。

半減期は放射性同位体の種類によってことなり、ほんの一瞬のものから数10億年のものまで様々である。例えば、 ^{226}Ra : 1.6×10^3 年、 ^{238}U : 4.468×10^9 年、 ^{137}Cs : 30.17年、 ^{45}Ca : 165日、 ^{32}P : 14.28日。

壊変が確率的に起きるので、放射線を計数すると、とても興味深い統計的性質があらわれる。例えば 10 Bq の α 線源は1秒間に平均10回の壊変をおこす。しかしある1秒間で測ってみると、3回だったり15回だったりして、かならずしも10回起きるわけではない。1秒間の計数を何百回もやると、平均が10回になるのである。1秒間あたり平均 μ 回の壊変が起きるような線源で、1秒間の計数で k 回の壊変が観測される確率 $P(k)$ は、

$$P(k) = \frac{e^{-\mu} \mu^k}{k!} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

のように与えられる(図2)。この分布のこ

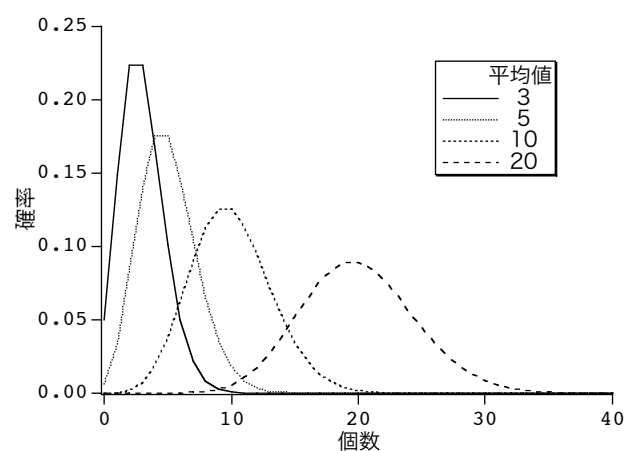


図2：ポアソン分布

⁴ 自然対数 $e = 2.718281828\dots$

とをポアソン(Poisson)分布とよぶ。

平均値 μ が1にくらべてずっと大きくなると、ポアソン分布は正規分布（ガウス(Gauss)分布)に近づいて行く。

放射線の生体への作用

物質に原子単位で作用する放射線は、当然のことながら生体へも作用する。放射線を浴びる（被曝する）ことにより、生体を構成する分子や組織が破壊される。地球上の生体は天然の放射線（後述）を常にうけており、ある程度は自己修復できるが、許容量を超えた線量を一度にあるいは累積して被曝すると障害を受ける。

一度に多量の被曝をした場合は、白血球やリンパ球の減少、皮膚壊死などの急性障害を受けることがある。人間の場合、1 Sv を超えると嘔吐や宿酔などが始まり、4 Sv では 50 日以内に半数が死亡、7 Sv では死亡率は 100% という調査がある。さらに急性症状以外にも、白内障、白血病、悪性腫瘍といった晩期症状も発生する。また遺伝子や生殖組織が傷つけられることにより発生する遺伝的障害もみすごすことはできない。

一度に浴びずに、少量ずつ被曝した場合はどうかだろうか。この場合は急性症状はおこらないが、例えば遺伝的障害は、（被曝線量に異存はするが）確率的に発生する。また累積的な被曝量が、ある一定の値を超えると発症する非確率的な障害も存在する。たとえば累積して 15 Sv を超えると白内障になる。

また生体の場合、外部からの被曝とはべつに、摂取した食物などによる被曝も考慮されなければならない。生体の器官は、ある種の元素や化合物を集中的にあつめることがあり、

表 1：自然放射線

通常のバックグラウンドの地域における自然放射線源からの一人あたりの年実効線量の推定値

線 源	年実効線量当量 [μ Sv]		
	対外照射	体内照射	合 計
宇宙線	300		300
電離性成分 中性子成分	55		55
宇宙線生成核種		15	15
^{40}K ^{87}Rb	150	180 6	330
^{238}U 系列	100	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$	1340
^{230}Th		5	
^{226}Ra		7	
$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po}$		7	
$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Po}$		1100	
^{232}Th 系列	160	^{232}Th	340
$^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{228}\text{Ra}$		3	
$^{228}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$		13	
合計(概数)	800	1600	2400

UNSCEAR(国連科学委員会)1988年報告による。

(国立天文台編 理科年表 丸善 より引用)

その元素の同位体による被曝が問題となる。たとえば沃素 I は成長期の甲状腺に集まりやすい。また生体の器官により、同じ線量の放射線でも影響がことなる。生殖器官や造血細胞はダメージを受けやすい。従って、被曝部位を考慮した線量等量 (Sv) が用いられる。

天然の放射線

放射性同位元素は天然にも存在し、宇宙線のような地球外起因の放射線も存在する。表 1 に自然放射線の実効線量を示す。また人間の場合は、食物を通じての内部からの被曝が 0.35 mSv/年程度である。

地上での宇宙線は、大気の厚さ（高度）により異なるが、海拔 0m ではおよそ 10cm 四方に毎秒 1.7 個のミュー粒子が到来する。ミュー粒子は電荷 1 の荷電粒子である。またこれ以外に、電子、 γ 線、ニュートリノ、 π 中間子などのハドロンもある。

放射線の測定装置

今回の実験で使用する測定装置は、以下の2種である。

GM (ガイガー=ミュラー) 計数管

GM 計数管は、図3のようにガスを閉じ込めたものである。管の中心には細いワイヤーが張っており、これを陽極として高電圧を印可する。荷電粒子が管内に入射すると、経路に沿ってガス分子を電離させる。陽極には電離でできた電子が引き寄せられ、強い電場勾配で加速されて途中のガス分子と衝突して多数の二次電子を発生し、管内に放電が起きる。この放電の電気信号をとらえることにより、放射線を感知することができる。

拡散型霧箱

霧箱は、密閉した箱内にアルコールやエー

テル等の揮発性のガスの蒸気を発生させている。放射線が入射して電離のエネルギーをおとすと、放射線の経路にそってガスの液滴化が起こり、飛行機雲のように軌跡が観察できる。液滴化するには、温度や圧力をコントロールしてガス蒸気の過飽和の状態をつくる。

拡散型では箱内に温度勾配をつくることにより過飽和層を形成させる。またポンプによる一時的な減圧で過飽和状態をつくるウイルキンソン型などもある。

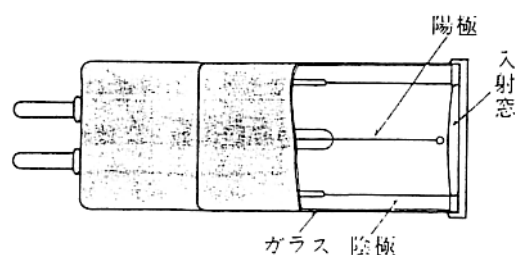


図3：GM 計数管

(三浦 巧「放射線計測学」裳華房より引用)

実験

1. GM (ガイガー=ミュラー) 計数管により、 β 線、 γ 線の計数実験を行い、

- ポアソン分布の確認
 - 物質の透過 (吸収) 係数の測定
- を行う。

2. 拡散型霧箱で放射線の軌跡を観察し、

- α 線、 β 線の飛程
 - 自然放射線 (おおむね宇宙線のミュオン粒子)
- を確かめる。