

教員養成系学部初年次における放射線物理教育の実践

Teaching radiation physics to first-year undergraduates in a faculty of education

岸本 功^{1,2}, 八木 洋文²

Isao Kishimoto, Hirofumi Yagi

¹ 新潟大学教育学部

² 新潟大学大学院教育学研究科

概要

2014年度、2015年度の第1学期に、新潟大学教育学部理科1年生向の大学学習法の講義において、放射線物理学に関する学習を、実際のガンマ線測定実験も含めて行った。ここでは、その実践内容に関してまとめるとともに、将来、小学校・中学校・高等学校の教員を志望している学生に対する大学初年次教育という観点からも議論する。

1 はじめに

放射線は、昔から自然界においてもありふれて存在するものであるが、その正体が科学的に明らかになってきたのは、前世紀に量子論が発展してきた後であり、理論的に正しく理解するには物理学の専門的な知識が必要である。今世紀に入り、2011年3月の東日本大震災の際に起きた福島第一原子力発電所事故による放射性物質の放出による汚染が社会的に問題になってからは、物理の専門家に限らず、一般の人も放射線に関する関心が高まってきた。このような状況下において、文部科学省は、小学校・中学校・高等学校用に放射線等に関する副読本を作成・配布しており、児童・生徒たちの放射線に関する知識は、かつてより増えてきていると思われる。さらに、2013年度までは、文科省委託事業として、簡易放射線測定器および実験セットが各学校向けに無償で貸し出されており、授業等で放射線を実際に測定する機会も増えたと思われる。

また、高等学校新課程の物理基礎・物理の教科書をみると、放射線に関連して原子核・素粒子に関する事項も記述されており、これらをきちんと学んでいけば、やや専門的なところまで理解できるはずである。^{*1}このような状況において、今後、小学校・中学校・高等学校で理科を教える教員になろうとする人は、従来以上に、放射線に関する知識を正しく身につけておくことが望ましいだろう。そこで、我々は2014年度・2015年度の第1学期の新潟大学教育学部理科1年生向の大学学習法の講義「スタディ・スキルズI」で、まず放射線物理学の基礎の学習を行い、その後、ガンマ線測定実験を実施した。^{*2}講義の最終回には、各班(6~8人)毎に実験レポートにまとめて、提出させた。

本稿ではまず、2014年度、2015年度の講義で行った放射線物理学の基本事項の学習内容について、簡単にまとめる。次に、実際に行った放射線測定実験について、2014年度の実験(2つのシンチレーションカウンターののみを用いたもの)と2015年度の実験(学生一人に一台のシンチレーションカウンターを用いたもの)について、それぞれ述べる。最後に、今回の講義を通じて得られた知見や、今後の見通しについて、教員養成課程の学生を教育するという視点にたって議論する。

2 放射線物理に関する基本事項の学習

本講義では、主に文献[1],[2],[3]等を参考にしつつ、時間の都合上、放射線物理学に関して最小限の内容に絞った解説を行った。この節に関する内容は、2014年度と2015年度でほぼ同じである。

^{*1} しかしながら、何人かの学生や現場の高校物理教員、他大学の物理教員等の話を聞くと、多くの高校物理の授業において、教科書の原子核・素粒子のページの解説に割かれる時間はごくわずかであるのが、現状のようにも思える。

^{*2} 実際は、全15回の「スタディ・スキルズI」の講義のうち、著者の一人(I.K.)がその半分を担当し、その中で本稿で述べる放射線物理学関連の講義・実験を実施した。著者のもう一人(H.Y.)は、ティーチング・アシスタントとして本講義を担当した。

2.1 高校物理の補足

■特殊相対論 電場 \vec{E} 、磁場 (磁束密度) \vec{B} 中における電荷 q 、質量 m をもつ荷電粒子の相対論的な運動方程式は、ローレンツ力を考慮すると

$$\frac{d}{dt} \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-(|\vec{v}|/c)^2}} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad \frac{d}{dt} \frac{mc^2}{\sqrt{1-(|\vec{v}|/c)^2}} = q\vec{E} \cdot \vec{v} \quad (1)$$

($\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt}$ は粒子の速度, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s は真空中の光速) で与えられる。第 2 式は第 1 式の両辺で \vec{v} と内積をとることで得られ, これは相対論的全エネルギー (静止質量エネルギー mc^2 と運動エネルギー T の和) $E = mc^2 + T = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(|\vec{v}|/c)^2}}$ が電場 \vec{E} により仕事を受けて, エネルギーが変化することを示している。特に電場が静電場, つまり, $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$ (V は静電ポテンシャル) で表される場合, エネルギーの変化 ΔE は (1) の第 2 式を時間 t で積分することで

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} q\vec{E} \cdot \frac{d\vec{x}}{dt} dt = - \int_{\vec{x}_1}^{\vec{x}_2} q\vec{\nabla}V \cdot d\vec{x} = -q\Delta V \quad (2)$$

を得る。これにより, 電位差 ΔV がある電極間において, 荷電粒子が加速される場合に, 増加する (相対論的) 全エネルギーを計算できる。特に, 静止した電子が, 電位差 ΔV のもとで加速された場合の速さは,

$$\frac{m_e c^2}{\sqrt{1-(|\vec{v}|/c)^2}} - m_e c^2 = e\Delta V \quad \Rightarrow \quad |\vec{v}| = c \sqrt{1 - \left(1 + \frac{e\Delta V}{m_e c^2}\right)^{-2}} \quad (3)$$

($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C は素電荷) のように求められる。電子は静止質量エネルギーが $m_e c^2 = 511$ keV であり小さいので, 例えば, $\Delta V = 511 \times 10^3$ V の電位差をかけておくと, $|\vec{v}| = \frac{\sqrt{3}}{2}c$, つまり, 光速の 87% まで加速されることがわかる。この場合, 非相対論的な運動エネルギーの式 $\frac{1}{2}m_e|\vec{v}|^2$ を使って, 高校物理の範囲で同様な計算をすると, $|\vec{v}| = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m_e}} = \sqrt{2}c$ となり, 光速を超える結果になってしまうことから, 相対論的な式を使うことが必須になってくることに注意する。ちなみに, 同じ電位差で, 陽子の場合 $m_p c^2 = 938$ MeV $\gg m_e c^2$ なので, 非相対論的式でも近似はよい。

なお, 放射線物理や原子核・素粒子物理の分野では, エネルギーの単位として eV (電子ボルト) を用いることが多い。SI 単位系との関係は $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{C} \cdot \text{V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ の関係がある。つまり, 素電荷をもつ荷電粒子が 1V の電位差で加速したとき増加するエネルギーが 1eV である。

■量子力学 水素原子のもつエネルギーを考えよう。水素の原子核 (陽子) がつくるクーロンポテンシャル $\frac{k_0 e}{r}$ の周りを電子が運動する, という状況で電子のディラック方程式を解くと, そのエネルギー固有値は

$$E = m_e c^2 \left[1 + \frac{\alpha^2}{\left\{ n - j - \frac{1}{2} + \sqrt{\left(j + \frac{1}{2} \right)^2 - \alpha^2} \right\}^2} \right]^{-1/2} = m_e c^2 - \frac{m_e c^2 \alpha^2}{2n^2} + O(\alpha^4) \quad (4)$$

($n = 1, 2, 3, \dots$: 主量子数, $j = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$: 全角運動量) のように離散的な値になる。最右辺の第 2 項は, 非相対論的量子力学のシュレディンガー方程式を解くことで得られるエネルギー準位であり, 高校物理の教科書にも記載されている式である。ここで $\alpha = \frac{k_0 e^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$ は微細構造定数である。(真空の誘電率 ϵ_0 を用いると $k_0 = 1/(4\pi\epsilon_0)$ と書ける。また $\hbar = h/(2\pi) = 1.05 \times 10^{-34}$ Js は換算プランク定数。高校物理ではプランク定数 h を用いることが多いが, 大学で学習する量子力学では \hbar を用いて記述することが多い。) $-\frac{m_e c^2 \alpha^2}{2} \simeq -13.6$ eV であることから, 特に基底状態では 13.6 eV の結合エネルギーをもつ。逆に, この程度のエネルギーを与えれば, 原子を電離させることが可能であることがわかる。これは, 大体, 化学反応におけるエネルギーのオーダー (eV) である。後で扱うガンマ線のエネルギーは, ずっと大きくて, 原子核反応のエネルギーのオーダー (MeV) であることに注意しよう。

2.2 放射線とその発生源

■放射線の種類 放射線とは、直接または間接的に、物質を電離する能力をもつ、電磁波または粒子線である。その代表的なものとしては α 線、 β 線、 γ 線がある。 α 線はヘリウム原子核 ${}^4_2\text{He}^{2+}$ (α 粒子とも呼ばれる) からなる。これは電荷 $+2e$ をもつ。 β 線は電子 e^- (電荷 $-e$) からなる。ただし、陽電子 e^+ (電荷 $+e$) からなる場合もあるので、区別するには、前者を β^- 、後者を β^+ などと呼ぶ。 γ 線は光子 γ からなる。 α 、 β^- 、 β^+ 線を構成する粒子の電荷と(1)の第1式をみると外部磁場 \vec{B} がある状態で、これらの放射線の曲がる向きや曲率半径がわかる。一方、光子は電荷をもたないことより γ 線はまっすぐ進む。 α 線、 β 線、 γ 線の他にも、放射線としてX線、中性子線、中間子線、陽子線、重イオン線などがある。

■放射能量 1秒間に1個の原子核が壊変(崩壊, decay)する放射能量を1Bq(ベクレル)という。単位だけみれば、 $\text{Bq} \sim \text{s}^{-1}$ である。ただし、この壊変は確率的に起こるものである。時刻 t における原子核の個数を $N(t)$ とし、単位時間当たり壊変する確率(壊変率)を λ とすると $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$ という関係が成り立つ。これは t を変数とする、 $N(t)$ に関する微分方程式の一つである。これは、高校数学IIIの教科書が一番最後にも書いてあることだが、変数分離法により $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$ と式変形して両辺を積分すれば解ける。結果は $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ となる。ここで時刻 $t = 0$ での原子核の個数を N_0 として、積分定数を決めた。これらを使うと時刻 t における放射能量は $\lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$ と表せる。なお、原子核の数が半分になるのに要する時間が半減期 $T_{1/2}$ なので、 $\frac{N(T_{1/2})}{N_0} = e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2}$ より、 $T_{1/2} = \frac{\log 2}{\lambda}$ という関係式が成立する。以上のことを使うと、例えば、ラジウム ${}^{226}\text{Ra}$ (半減期1600年)1gの放射能量は

$$\lambda N = \frac{\log 2}{T_{1/2}} N = \frac{\log 2}{1600 \cdot 365 \cdot 60^2 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ g} \cdot 6.022 \times 10^{23} / \text{mol}}{226 \text{ g/mol}} = 37 \text{ GBq} \quad (5)$$

となる。実は、これを1Ci(キュリー)と定義している。つまり $1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$ という単位換算になる。

■壊変(崩壊)の一般式 $\alpha, \beta^\pm, \gamma$ 壊変が起こる際の原子核反応は、原子核の元素記号を一般に M, M' として、それぞれ、 ${}^A_Z M \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} M' + {}^4_2 \text{He}$, ${}^A_Z M \rightarrow {}^A_{Z+1} M' + e^- + \bar{\nu}_e$, ${}^A_Z M \rightarrow {}^A_{Z-1} M' + e^+ + \nu_e$, ${}^A_Z M^* \rightarrow {}^A_Z M + \gamma$ のように表せる。 β 壊変では、電子(陽電子) $e^-(e^+)$ にともなって、反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ (電子ニュートリノ ν_e)も現れている。また γ 壊変における M^* は原子核の励起状態を表している。(量子力学によると、原子核のエネルギーも、水素原子の場合と同様に離散的なエネルギー準位をもち、光子 γ を出して、よりエネルギーの低い安定な状態へと遷移する。)これらの原子核反応を表す図として、図1, 2 [4]のような壊変図式(崩壊図式)が用いられる。横方向は原子番号 Z 、縦方向はエネルギー準位にそれぞれ対応する。

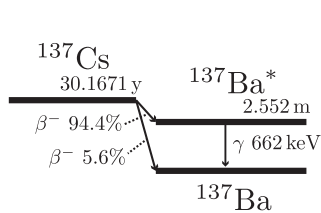


図1 ${}^{137}\text{Cs}$ の壊変図式

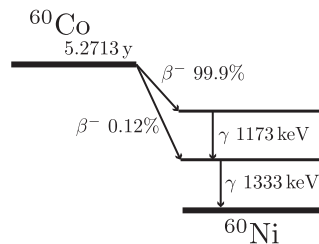


図2 ${}^{60}\text{Co}$ の壊変図式

素粒子の基本的相互作用の観点からみると、 α 壊変は核力、したがって中間子が媒介されて起こるもので、強い相互作用 (strong interaction), あるいは Quantum chromodynamics (QCD), で記述される。 β^- 壊変は、核子に着目すると、中性子 n が陽子 p に壊れ、 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ が起きており、さらにクォークレベルでみると、ダウソク d がアップクォーク u に変わる: $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ 。これは、 W ボソンを媒介とする反応であり、弱い相互作用 (weak interaction) で記述される。 β^+ 壊変も同様である。 γ 壊変は光子を媒

介とするものなので、電磁相互作用 (electromagnetic interaction), あるいは Quantum electrodynamics (QED), で記述される。strong, weak, electromagnetic の相互作用を合わせて記述するのが素粒子の標準模型 (standard model) である。ちなみに、日常生活で体験している重力は、理論的にはこれとは別の枠組み (古典的には一般相対論) で記述される。

2.3 放射線計測の原理

α , β , γ 線を比較した場合、物質を電離作用の大きさは $\alpha > \beta > \gamma$ であるが、逆に物質の透過性は $\alpha < \beta < \gamma$ となる。 α 線は物質中を通過する際に、強く電離させる (相互作用する) ため、エネルギーをすぐに失ってしまい、止まりやすい (透過しにくい)。逆に、 γ 線は物質中を通過する際、電離作用 (相互作用) が弱く、なかなか止められない。後の実際の実験でも確かめるように、 γ 線を遮蔽するには鉛や厚い鉄板などを用いる必要がある。一般に、放射線を測定するには、放射線と測定器とが相互作用する必要がある。相互作用がなければ、放射線が測定器を通りぬけるだけであり、測定できない。

後の実験で用いるのは、 γ 線を測定することができるシンチレーションカウンタ (検出器) なので、その測定原理について簡単に述べる。大ざっぱには次のような流れで測定 (計測) される。

- (a) 飛んできた γ 線 (光子) と検出器内の物質が相互作用する。
 - (b) 相互作用により高速電子 e^- が発生する。
 - (c) 検出器内のシンチレータ (CsI(Tl) の結晶) を励起する (エネルギーの高い状態にする)。
 - (d) 励起状態から安定な基底状態に移る際、シンチレーション光 (可視光程度の波長) が発生する。
 - (e) その光をシリコンフォトダイオードで検出する (光が当たると電流が流れ、それを電気信号に変える)。
- 特に (a) の段階の光子 γ と物質の相互作用としては、(1) 光電効果, (2) コンプトン散乱, (3) 電子・陽電子対生成, があるが、これらについて、順に説明する。

■光電効果 γ と (主に K 殻の) 軌道電子 e^- の相互作用であり、光子が吸収され、持っていたエネルギーにより電子が飛び出す現象である。このとき電子が得る運動エネルギー T_e は $T_e = h\nu - I$ で表される。 ω は飛んできた光子 γ の角振動数であり、 I は電離エネルギーである。水素原子の場合で、電離エネルギーは 13.6 eV 程度であるのに対し、シンチレーションカウンタで検出する際のエネルギー $h\nu$ は MeV のオーダーであるので、一般に、この T_e は $h\nu$ より、ほんの少し小さいだけである。

■コンプトン効果 光子 γ が物質中の電子 e^- を跳ね飛ばすもので、コンプトン散乱と呼ばれる。この現象を定量的に調べてみよう。電子は自由電子とみなし、光子と電子が弾性散乱を起こすものとする。散乱前の光子のエネルギーを $h\nu$, 運動量を \vec{p}_γ とし、最初電子が静止していたとする。(光子の振動数 ν を用いると $h\nu = h\nu$ である。) 散乱後、光子のエネルギー、運動量がそれぞれ $h\nu'$, \vec{p}'_γ になったとし、電子の全エネルギー、運動量がそれぞれ E , \vec{p} になったとする。このとき、散乱前後でのエネルギー・運動量保存則より

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + E, \quad \vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p} \quad (6)$$

が成り立つ。第 1 式から $E = h\nu + m_e c^2 - h\nu'$, 第 2 式から $\vec{p} = \vec{p}'_\gamma - \vec{p}'_\gamma$ となり、これらを電子の相対論的質量殻条件 $E^2 = m^2 c^4 + c^2 |\vec{p}|^2$ に代入して整理すると、

$$h\nu' = h\nu \left\{ 1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \right\}^{-1} \quad (7)$$

を得る。ここで光子の質量殻条件 $h\nu = c|\vec{p}_\gamma|$, $h\nu' = c|\vec{p}'_\gamma|$ を用いており、 θ は $\vec{p}_\gamma \cdot \vec{p}'_\gamma = |\vec{p}_\gamma||\vec{p}'_\gamma| \cos \theta$ で決まる角度で、光子 γ の進む向きが散乱によりどれだけずれたかを表している。(7) より $h\nu' \leq h\nu$ が成り立つことに注意しよう。つまり γ 線はコンプトン散乱によりエネルギーが増えることはない。(7) を光子の波長の関係で表すと $\lambda = 2\pi c/\omega$, $\lambda' = 2\pi c/\omega'$ から $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$ が得られ*3, これはコンプトン

*3 高校物理の教科書では、ある「近似」を用いて非相対論的に同じ公式を導いているが、ここでの計算は相対論的であり、そのような近似をしていないことに注意する。

散乱により光子の波長がのびることを示している。なお、この式で出てくる $\frac{h}{m_e c}$ はコンプトン波長と呼ばれる。一方、跳ね飛ばされる電子(反跳電子)の運動エネルギー T_e は、(7) から、

$$T_e = E - m_e c^2 = \hbar\omega - \hbar\omega' = \hbar\omega \left[1 - \left\{ 1 + \frac{\hbar\omega}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \right\}^{-1} \right] \quad (8)$$

となり、角度 θ に依存する。特に $\theta = \pi$ のとき、この T_e は最大値: $\hbar\omega - \frac{\hbar\omega m_e c^2}{m_e c^2 + 2\hbar\omega}$ をとる。この値はコンプトンエッジと呼ばれている。コンプトン散乱の反跳電子の運動エネルギーは、ゼロ ($\theta = 0$ に対応) からコンプトンエッジ ($\theta = \pi$) まで、連続的に値を取り得る。

■電子・陽電子対生成 物質中で光子が消滅し、電子 e^- と陽電子 e^+ が同時に生じる現象である。飛んできた光子のエネルギーを $\hbar\omega$ とし、生成した電子・陽電子の運動量をそれぞれ \vec{p}_{e^-} 、 \vec{p}_{e^+} とすると、エネルギー保存則から $\hbar\omega = \sqrt{m_e^2 c^4 + c^2 |\vec{p}_{e^-}|^2} + \sqrt{m_e^2 c^4 + c^2 |\vec{p}_{e^+}|^2}$ が得られる。この式からわかるように、電子・陽電子対生成が生じるためには $\hbar\omega \geq 2m_e c^2$ でなければならない。生成された電子・陽電子対のもつ運動エネルギーの和は $T_{e^-} + T_{e^+} = \hbar\omega - 2m_e c^2$ となる。

以上まとめると、 γ 線スペクトル測定時の検出器の応答は、横軸をエネルギー、縦軸を検出強度とすると、大体図3のようになる。より正確には、それぞれの現象が起こる確率も議論しなくてはならない。

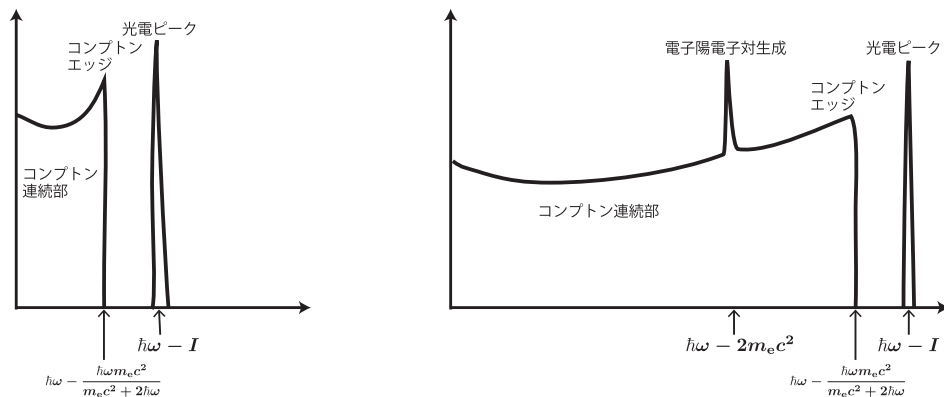


図3 一定のエネルギー $\hbar\omega$ をもつ γ 線が入射したときの、検出器の応答の模式図 [3]。横軸はエネルギー、縦軸は検出強度を表す。左図は $\hbar\omega < 2m_e c^2$ の場合で、右図は $\hbar\omega > 2m_e c^2$ の場合である。

なお、実験に入る前の段階の講義中に、次のような、具体的に数値を計算させる問いを出題した。

- (Q1) 陽子の場合、 0.51×10^6 V の電位差で加速すると速さはどうなるか？
- (Q2) ^{131}I (半減期 8 日), ^{137}Cs (半減期 30 年), ^{235}U (半減期 7 億年), それぞれ 1g は何 Bq か？
- (Q3) 図 1 を参照し, ^{137}Cs が壊変するときのコンプトンエッジ (反跳電子の最大運動エネルギー) を求めよ。

3 シンチレーションカウンターによるガンマ線測定実験

この節では、2014 年度の講義の後半に行った演示実験と 2015 年度の講義の後半に行った学生実験について、それぞれの方法や結果について具体的に述べる。実際に用いたものは、 γ 線を測定できるシンチレーションカウンターであるが、簡易放射線測定器であるため、放射線のエネルギースペクトルの情報を得ることはできない。表示される数値は $\mu\text{Sv/h}$ (マイクロシーベルト毎時) の単位をもつものだけである。ここで、 Sv (シーベルト) 単位で表されるものは、線量当量 (dose equivalent) であり、大雑把には、吸収線量に生物学的効果の補正をしたものである。吸収線量とは、物質 (ここでは検出器) が単位質量当たり吸収した放射線のエネルギーであり、 Gy (グレイ) = J/kg の単位で表される。物理的に直接的な値は Gy 単位のも

のであるが、簡易放射線測定器で用いられているのは、それを換算した Sv 単位のほうであることに注意する。また、別に定義されている等価線量 (equivalent dose) も Sv 単位で表されるので、数値を定量的に比較するときは、混同しないようにしなければならない。

3.1 ^{60}Co 線源を用いた (演示) 実験

使用したシンチレーションカウンター: HORIBA PA-1100 2 台 (図 4), 使用した放射線源: ^{60}Co 1.10×10^6 Bq (2003/10/27) 1 個。この線源は直径 25mm, 高さ 7mm の円筒形のプラスチック容器に密封されている (図 5)。PA-1100 は、データを自動的に通信する機能があるため、10 秒ごとの測定値 (単位時間当りの線量当量) を簡単にエクセルファイルに記録できる。予算の都合上、2 台しか用意できなかったため、3 回の講義中に、著者らが講義室前方の机で演示実験をし、自動記録されたエクセルファイルのデータを受講生全員に共有し、それを各班で解析しレポートにまとめてもらう、という方針で進めた。共有したデータは、次の (1)–(8) のエクセルファイルである。

実験 1 日目について :

- (1) 講義室のバックグラウンドの放射線の測定値 (図 7)
- (2) ^{60}Co 線源から 14 cm 離れた場所での測定値 (遮蔽なし, および, プラケース, すり鉢, 厚い鉄の輪による遮蔽あり)(図 4, 6)
- (3) ^{60}Co 線源から 390 cm 離れた場所での測定値 (もう一つの測定器で (2) と同時測定)

実験 2 日目について :

- (4) ^{60}Co 線源から距離を変えて測定 (遮蔽なし) 7 cm, 21 cm, 28 cm, 35 cm, 14 cm (図 8)
 - (5) ^{60}Co 線源から距離を変えて測定 (もう一つの測定器で (4) と同時測定) 200 cm, 250 cm
- 以上は遮蔽と距離の効果をみるものである。

実験 3 日目は、補足的な実験を行った :

- (6) ^{60}Co 線源から距離を変えて測定 (遮蔽なし) 5 cm, 10 cm
- (7) ^{60}Co 線源から距離を変えて測定 (すり鉢で遮蔽) 6.5 cm, 18 cm
- (8) ^{60}Co 線源から 7 cm 離れたところで測定 (炊飯器の窯, フライパン, グラタン皿 (ストーンウェア), ガラス皿, アルミホイル, による遮蔽)

なお, (8) は興味をもった一部の受講生による測定実験である。(事前に, 受講生に遮蔽効果を試したいものを持参するよう指示していた。)



図 4 下の 2 台が PA-1100 であり, 左上がプラケース, 右上がすり鉢 (内側) と厚い鉄の輪 (外側)。



図 5 使用した放射線源 ^{60}Co (と大きさ比較用のものさし)

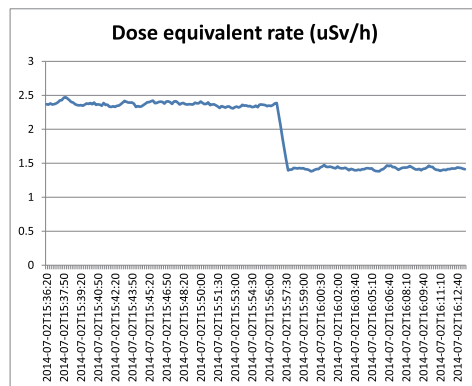


図 6 ^{60}Co 線源から 14 cm 離れた場所での測定データを折れ線グラフにしたもの。右側の, 値が下がっているところが厚い鉄の輪による遮蔽によるもの。その左側の値はプラケースやすり鉢をかぶせた結果であるが, 遮蔽の効果はほとんどないことがわかる。

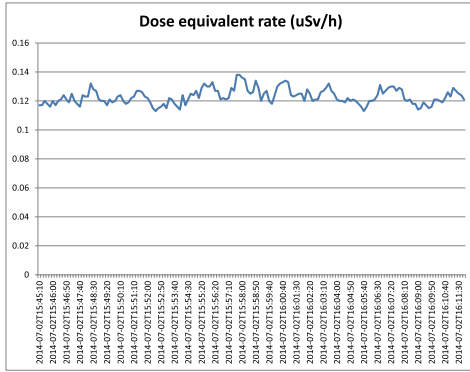


図7 実験を行った講義室のバックグラウンドの測定値。横軸の数値は測定時刻であり、平均値： $0.123\mu\text{Sv/h}$ 、標準偏差： $0.0053\mu\text{Sv/h}$ である。

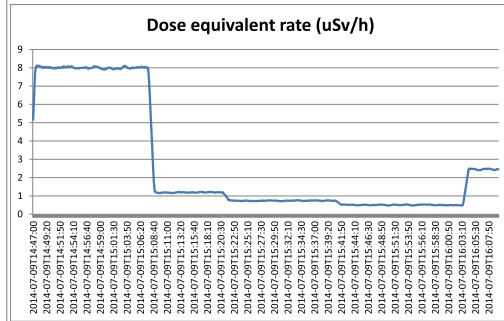


図8 図7と同じ講義室で、 ^{60}Co 線源からの距離を順に7 cm, 21 cm, 28 cm, 35 cm, 14 cmと変えて、測定。PA-1100の通信機能により自動記録されたデータ(受講生への配布エクセルファイル)をそのまま折れ線グラフにしたもの。

なお、実験に関連して理解を深めるために、講義中(講義室前方の机で測定データをためている間)、次のような問いを出題した：

- (ア) ^{60}Co の半減期は5.2713年である。この線源の放射エネルギーは今(2014/7/2)、何Bqか？
- (イ) 真空中で線源(点とみなす)から γ 線が出るとき、放射線強度(単位時間、単位面積当たり)に検出器に入射する放射線のエネルギー量、単位は $\text{J}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ とする)は、距離の2乗に反比例することを説明せよ。
- (ウ) ^{60}Co の壊変図式は図2のようになっている。今回使っている ^{60}Co を点の線源とみなすとき、今日、 $r = 14\text{ cm}$ 離れたところでは(間に吸収・散乱などなければ)放射線の強さ $I[\text{J}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)]$ はいくらか？

次の図9, 10は、受講生に与えたデータ(図7, 8)を用いて、著者ら自身が解析してみた結果である。受講生のレポートでは、このようなものを作成してもらうことを期待していた。特に図10のフィットした直線の傾き -1.87 は -2 に近いので、点とみなせる線源からの距離 r における放射線の強さが、 r^{-2} にほぼ比例することを示唆している。

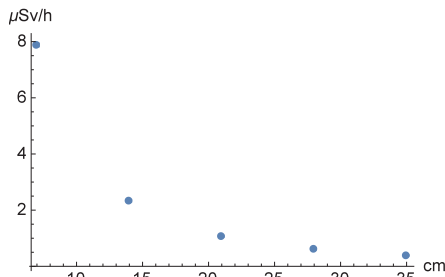


図9 図8の元データから、線源からの距離7 cm, 14 cm, 21 cm, 28 cm, 35 cmの場合の測定値の平均値をプロットしたもの。誤差が、標準偏差程度だとすると、この図では見えない程度である。

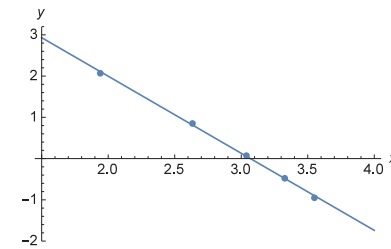


図10 図9の距離(横軸の値)と測定値(縦軸の値)に対しそれぞれlogをとったものを、 x 軸、 y 軸にしてプロットした5点。さらに、この5点のデータに対し、直線でフィットしたグラフ： $y = 5.73 - 1.87x$ を重ねた。

3.2 身近に存在する線源を用いた実験

もとは文科省委託事業で貸し出されていた、シンチレーションカウンター：はかるくん CP-100 32台(図13)と特性実験セット(線源と遮蔽器具)8つ(図12)を新潟県立教育センターより借りて、受講生自身に実

験をさせる方針で進めた。(図 13) 既存の特性実験セット用ワークシート*4 を配布し、これを参考にして、1 班 (6 名または 7 名) 当り、はかるくん (最大) 8 台・特性実験セット 2 つを用いて、講義 2 回分 (90 分 × 2) で放射線測定実験をし、その結果を各班でレポートにまとめるよう指示した。全員に簡易放射線測定器の使用を体験させるため、受講生 1 人にははかるくん 1 台を占有して使用させた。なお、特性実験セットは、図 13 のように、はかるくん 4 台を同時に使用することが想定されているため、1 人で 2 台操作した班もある。



図 11 簡易放射線測定器はかるくん CP-100 (シンチレーションカウンター)。本体には「文部科学省」と書かれている。文科省に問い合わせたところ、これに相当する市販されている機種はクリアバルス Mr.Gamma A2700 である。



図 12 特性実験セット。円筒形の容器内に船底資料・湯の花・カリ肥料・塩が入っている。花崗岩は四角柱形。左下は遮蔽ブロック大・小。



図 13 受講生が、特性実験セットと CP-100(4 台)を用いて、普通教室の机上で実際に測定している様子。真ん中の円筒形のものは測定用試料。写真のように付属の台紙を用いると、試料からの距離が簡単に設定できる。(机上の周りの紙はワークシート。)

なお、配布したワークシートには

1. 自然放射線 (バックグラウンド) の測定
2. 測定試料 (船底塗料, 湯の花, 花崗岩, カリ肥料, 塩) を使った放射線の測定
3. 距離の実験: はかるくん専用台紙で簡単に試料からの距離 (5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm) を設定できる
4. 遮蔽の実験: 材質 (鉛, ステンレス, アルミ, アクリル) による違い
5. 遮蔽の実験: 厚さ (大・小の遮蔽ブロック) による違い

について、それぞれの具体的な手順やデータの記録方法の例などが記載されている。実験 2 日目には、はかるくんを用いた実験について記述されている文献として、例えば [5], [6] が参考になる、ということ伝えた。実験およびレポート作成の際に、受講生が自分たちで考えたり、議論したりすることが少なくなるのではないかと思ひ、これらの文献の存在を明らかにすることを実験 1 日目では躊躇したのであるが、学術的には先行研究を把握することは大切であるので、敢えて伝えた。ただし、実験後のレポート作成の際に、これら他人の文献等から丸写しをすること (盗作・剽窃) など無いようにし、引用する際には引用元を明記することを十分に注意した。

4 今回の授業実践について

4.1 受講生の様子

受講生には、高校の時に物理 I, 物理 II や物理基礎, 物理を全く履修しなかった人が数人含まれていた。高校で物理を履修し、「原子」分野もきちんと勉強した受講生にとっては、本講義は比較的なじみのある内容であると思われるが、§2 で述べた講義の前半 (放射線物理学の基本事項の学習) では、特に、相対論的扱い等について、高校物理との違いに注意した。講義の途中で出題した問い (Q1), (Q2), (Q3) は、いずれも具体的に単位付きの数値を求めさせるものであり、講義で紹介した式を正しく使って代入すれば容易に答えられるはずだと考えていた。実際に解かせてみると、数値の計算で各自の電卓 (アプリ) 等を用いてもよい

*4 四国電力のサイトにアップしてあった「特性実験セット (ワークシート)」:

http://www.yonden.co.jp/life/kids/teacher/seminar/pdf/matsuyama_kakefu.pdf

としているにもかかわらず、間違える人もかなり多かった。また、物理の単位を間違えてしまう人も散見された。放射線物理学の分野では、エネルギーの単位としては通常、ジュールではなく電子ボルトを使用するのであるが、keV、MeV、GeVなどの10の乗数を間違えている人もいた。

また、講義の後半の実験に関連して、放射線強度の距離依存性に関する逆自乗則の理由を答えさせる問い (§3.1の最後) (イ) について、正答できた受講生が少なかった。これは予想外の結果であった。間違いが多かった理由としては、放射線源と測定器の位置関係において、問題文にある「単位面積当たり」がどこのどの向きの面積を指しているのかを誤解している人が多いためのようであった。

■2014年度の実験について 基本的には著者らによる演示実験による測定のみだったので、受講生はやや無関心になりがちであった。実は、それを避けるために演示実験用の測定器 PA-1100 2台以外に、(エクセルファイルへの自動記録ができない、より簡易な)シンチレーションカウンターを2台用意して、興味のある受講生は使ってよいとしたが、誰も試そうとしなかった。(このことを踏まえて2015年度では受講生1人1台を割り当て、強制的に使用させた。) データ自体はエクセルファイルにあらかじめ書き込んであるので、グラフ作成や統計処理等は受講生の各班いずれも、少なくとも見た目は整っている程度にできていたようだった。紙媒体で提出させたレポートは、図・グラフ・数式を含め、どの班もワード・エクセルを利用して書かれており、手書きのものはなかった。見た目はきれいなのであるが、実験・測定の様子を説明した図については、(実験・測定を再現できない程に)簡素化されすぎているのが気になった。

ある班は、「理論値」と測定値の値そのものを比較するために、放射線強度(単位: $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$)とシンチレーションカウンターの表示値である単位時間あたりの線量当量(単位: $\mu\text{Sv}/\text{h}$)の換算をしようと試みて、いろいろ自主的に文献を調べて議論していた。空気による減衰や、遮蔽物の化学組成の違いの影響についても、文献を引用しながらコメントしており、受講生たちのわかる範囲内で測定値の説明を試みていた。

■2015年度の実験について 実験前に受講生(26人)に聞いてみたところ、「はかるくん」をこれまでに使用したことがある人はいなかった。2013年度までは学校向けにはかるくんの無料貸出事業が行われていたとはいえ、実際に授業や講習などで使用していたのは、一部の限られた人たちのみだったのかもしれない。2015年度の実験は、§3.2のような方法で進めたので、受講生1人1台、はかるくん CP-100 を責任もって使用し、データ記録をしていたようだった。

なお、実験の時間の間、余裕のある班は、特性実験セットに入っている測定用試料(5種類)に加えて、さらに「放射能銻物標本」1セットを用いて測定実験をしてもよい、と伝えたのであるが、どの班も利用しようとはしなかった。特性実験セットのワークシートに書かれている測定方法に従って、各自が測定・記録するだけでも、多くの受講生にとっては、手一杯であるように見えた。ワークシートは実験当日に、予告なしに配布したため、その場で読んで理解しながら実験を時間内に進める、という作業が必要であった。余裕をもって自由な発想のもとで実験・測定をさせるためには、資料はなるべく事前に配布したほうがよかったかもしれない。ただし、ある班は、この測定用試料(5種類)以外に、より身近に存在しているチョーク、消しゴム、携帯電話、清涼飲料水からの放射線も測定していた。その中でも、特に携帯電話(iPhone)からは、有意に高い線量の放射線が出ていた、という結果を得ている。この班のレポートの考察では「iPhoneの内部のバッテリーなどから発せられる放射線と思われる」と記述している。これを受けて、後日、2台の測定器 PA-1100 と著者(I. K.)のiPhone 5sを用いて検証実験したところ、バックグラウンドの放射線量の値と特に違いはみられなかった。

4.2 まとめと展望

2014年度、2015年度ともに、新潟大学教育学部理科1年生向けの大学学習法「スタディ・スキルズI」において、放射線物理学の基礎の学習とシンチレーションカウンターによる γ 線測定実験を行った。受講生の様子と提出されたレポートをみると、受講生(の少なくとも一部)は、放射線について関心を深めることができたと思われる。具体的にMeV、Bq、 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ という単位をもつ物理量の数値を計算したり、実際に測定したりしたことで、これらの数値のオーダーが「普通」はどれくらいなのか、理解できたはずである。より詳

細なところまで理解するには、大学(院)レベルの物理学を専門的に深く勉強する必要があるが、(特に 2015 年度の)各受講生が放射線を測定した経験がある、ということは、大学卒業後、小・中・高の教員等になって放射線関連の授業・講習を行う場面に遭遇したときの自信につながると期待している。

2011 年 3 月に発生した原発事故以降、放射線に関するニュースが一般の人々向けにも(定量的なデータまで含めて)多くなったが、それらの数値が何を意味するのか、今回の講義実践を通して、受講生(および著者ら)は、以前よりも科学的に考察できるようになったと思われる。特に、通常の普通教室における自然放射線(バックグラウンド)が大体何 $\mu\text{Sv/h}$ 程度なのか、実測することで印象付けることができ、また、その数値が時々刻々とどれくらい変化するものなのか、つまり、平常の状態の数値がどの程度ゆらぐものなのか、ということについても理解できたものと思われる。

放射線物理教育において、霧箱を用いた観察実験がよく実施されている。これは、目に見えない放射線を可視化できるため印象的であるが、それを定量的なデータとして処理するのは簡単ではないように思われる。逆に、今回行った、簡易放射線測定器を用いた測定実験は、可視化はされないものの、数値データとしてあられ、統計的に処理・解析できる、という長所がある。小・中学校ではなく高校や大学において行う実験としては、定量的な結果も得られる今回のような測定実験も望ましいと思われる。

2014 年度に用いた放射線測定器 HORIBA PA-1100 は、本来は環境放射線モニタとして販売されているものである。当初は、野外も含めた測定実験を行うことを考えた。しかし、少し試した程度では、測定値の違いがそのゆらぎに埋もれてしまうように見えたので、通常環境における自然放射線と比較して、より強い放射線源である ^{60}Co を用いることとした。環境放射線を定量的に扱うには、長期にわたって測定データをためる必要があり、数回の講義内の実験で受講生に測定実験を体験させるのは難しいだろう。2015 年度のはかるくん CP-100 を用いた実験でも、特性実験セットに入っていた船底塗料なしでは、放射線の距離依存性、遮蔽効果を測定するのは困難だったように思える。

また、いくつかの放射線源を用意し、図 3 に示したような放射線のエネルギースペクトルを実測し解析することは物理実験としては興味深い。エネルギー分解能をもつ測定器を利用しなければならないため、理学部等の専門的研究室以外では、そのような実験は難しいであろう。2015 年度に実施した、「はかるくん」を借りて受講生全員に測定・解析させるようなことが現時点で教員養成系学部でできる放射線物理教育の現実的などころではなからうか。今後も、基本事項の学習内容や実験の測定・解析方法を工夫していきたい。

謝辞

2014 年度スタディ・スキルズ I の講義の実施に関連して、大変有意義な、専門的コメントをいただいた川崎健夫氏に感謝します。2015 年度スタディ・スキルズ I の講義の実践に際して、簡易放射線測定器はかるくんおよび特性実験セットを多数貸して下さった新潟県立教育センターに感謝します。簡易放射線測定器や自然放射線源による授業実践についてコメントいただいた土佐幸子氏、興治文子氏に感謝します。

References

- [1] 多田順一郎, “わかりやすい放射線物理学(改訂 2 版),” オーム社(2008).
- [2] 大塚徳勝, 西谷源展, “Q&A 放射線物理(改訂新版/改訂 2 版),” 共立出版(2007/2015).
- [3] Glenn F. Knoll (著), 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次(共訳), “放射線計測ハンドブック(第 4 版),” オーム社(2013)
- [4] 日本アイソトープ協会, “アイソトープ手帳 11 版,” 丸善出版(2011)
- [5] 内田由美子, 重松宏武, “中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究 I,” 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要第 33 号(2012).
- [6] 内田由美子, 松永武, 西山桂, 重松宏武, “中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究 II,” 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要第 33 号(2012).