

令和3年度

第1種放射線取扱主任者試験

問題と解答例

物理学

解答例は公益社団法人日本アイソトープ協会放射線安全取扱部会が解答の一案として作成したものです。

(令和3年度) 第1種物理学

次の問1から問30について、5つの選択肢のうち適切な答えを1つだけ選び、また、問31、問32の文章の□の部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

問1 次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 エネルギー E の光子の運動量は、 E を光速の2乗で除したものである。
- 2 質量 m の粒子の運動量は、 m に粒子の速度の2乗を乗じたものである。
- 3 光子のエネルギーはその波長に比例する。
- 4 電荷 q の粒子が電場によって受ける力の大きさは、 q に電場の強さの2乗を乗じたものである。
- 5 荷電粒子が磁場によって受ける力の大きさは、粒子の速度に比例する。

〔解答〕5

〔解説〕

- 1: 誤 エネルギー E の光子の運動量は、光速 c を用いて、 E/c となる。
- 2: 誤 質量 m の粒子の運動量は、速度 v を使うと、 mv となる。
- 3: 誤 光子のエネルギー E は振動数 $\nu = c/\lambda$ をつかうとプランク定数 h と光子の波長 λ から $E = hc/\lambda$ となる。
- 4: 誤 電荷 q の粒子が電場 E から受ける力の大きさは、 qE となる。
- 5: 正 荷電粒子の電荷を q 、速さを v とし、磁場の磁束密度の大きさを B とすると、磁場によって受ける力の大きさ F は、 $F = qvB$ となり、この力の大きさは、粒子の速度に比例する。

問2 1原子質量単位[u]を質量[kg]で表したとき、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 1.661×10^{-27}
- 2 1.672×10^{-27}
- 3 1.674×10^{-27}
- 4 1.993×10^{-26}
- 5 1.602×10^{-19}

〔解答〕1

〔解説〕原子質量単位の定義は、 ^{12}C 原子の重さの $1/12$ なので、1 mol の ^{12}C の質量は 0.012 kg、この中に 6.02×10^{23} 個の ^{12}C 原子があるので、1 原子質量単位 [u] を質量 [kg] で表すと、

$$1 \text{ u} = \frac{0.012}{(6.02 \times 10^{23}) \times 12} = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

となる。

問3 $2,200\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の速度を持つ熱中性子のド・ブローイ波長[m]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、プランク定数は $6.6\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ 、中性子の質量は $1.7\times 10^{-27}\text{kg}$ とする。

- 1 1.8×10^{-11} 2 2.5×10^{-11} 3 5.6×10^{-11} 4 1.8×10^{-10} 5 2.5×10^{-10}

〔解答〕 4

〔解説〕 ド・ブローイ波長 λ は、プランク定数を h 、中性子の速度を v 、質量を m とすると、

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{(1.7 \times 10^{-27}) \times 2,200} = 1.76 \dots \times 10^{-10} \approx 1.8 \times 10^{-10}$$

となる。

問4 水素原子の大きさ(直径)に最も近い値は、次のうちどれか。ただし単位は m とする。

- 1 8.0×10^{-13}
2 4.0×10^{-12}
3 2.0×10^{-11}
4 1.0×10^{-10}
5 5.0×10^{-10}

〔解答〕 4

〔解説〕 水素原子の周りをまわる電子は、原子核からの距離が Bohr 半径 ($5.3 \times 10^{-11}\text{m}$) のとき存在確率が高い。したがって、水素原子の直径は、 $2 \times 5.3 \times 10^{-11} \approx 1.0 \times 10^{-10}\text{m}$ となる。

問5 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 原子核の核子当たりの結合エネルギーは原子番号とともに増加し続ける。
B 安定同位体の質量数 A と原子番号 Z の比 A/Z はすべて 1.0 から 2.0 の間にある。
C 中性子は物質中で直接クーロン力を介した電離を起こさない。
D 軌道電子は原子核近傍にも存在確率がある。

- 1 A と C 2 A と D 3 B と C 4 B と D 5 C と D

〔解答〕 5

〔解説〕

A：誤 原子核の核子当たりの結合エネルギーは、 ^{56}Fe で最大となる。

B：誤 原子核は、陽子と中性子の数が等しいとき ($A/Z = 2.0$) 安定になる性質をもつが、陽子の数が増えると陽子同士のクーロン反発力のため、中性子の数が陽子の数より大きくなる ($A/Z > 2.0$)。

C : 正 中性子は電荷を持たないため、クーロン力を介して電子とは反応しない。

D : 正 軌道電子は原子核近傍にも存在確率があるため、軌道電子と原子核が相互作用する内部転換や EC 壊変が起こる。

問6 放射性壊変に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A α 壊変ではニュートリノは放出されない。

B α 壊変と β^- 壊変は同一核種では起きない。

C β^+ 壊変が起きる核種では競合して EC 壊変が起きる。

D β^- 壊変と β^+ 壊変は同一核種では起きない。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

[解答] 2

[解説]

A : 正 α 壊変では α 粒子のみ放出される。このため、 α 粒子のエネルギーは線スペクトルとなる。

B : 誤 質量数が 200 を超える核種の中には、 α 壊変と β^- 壊変が競合する核種がある。
(例 : ^{212}Bi)

C : 正 β^+ 壊変が起きる核種では競合して EC 壊変が起きる (質量数が大きくなるにつれ EC 壊変の方が起こりやすくなる)。

D : 誤 β^- 壊変と β^+ 壊変が競合する核種がある。(例 : ^{40}K)

問7 陽電子に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 陽電子の物質中における阻止能は、陰電子とほぼ同じである。

B 陽電子はエネルギーが低いほど物質中で消滅しやすい。

C 陽電子の消滅は物質中の原子核との結合による。

D 陽電子の消滅では、エネルギー保存則は成立するが、運動量保存則は成立しない。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

[解答] 1

[解説]

A : 正 荷電粒子は物質中で、原子を励起やイオン化したり、制動放射線を出したりして運動エネルギーを失う。阻止能は単位長さあたりの荷電粒子のエネルギー損失のことをいう。このようなエネルギーの損失過程が議論できるエネルギー範囲 (100 eV 以上) では、陽電子と原子の散乱断面積は、陰電子と原子の散乱断面積とほぼ同じであるため、物質中の阻止能もほぼ同じとなる。

- B：正 物質中に入射した陽電子は、速度が大きい（運動エネルギーが高い）うちは物質中の電子と消滅する確率は低い、速度が小さく（運動エネルギーが低い）になると、陽電子は正電荷を持つため物質中の電子を引き寄せようになり、消滅する確率が高くなる。したがって、陽電子はエネルギーが低いほど物質中で消滅しやすい。
- C：誤 陽電子は電子と対消滅し、原子核とはクーロン反発により結合できない。
- D：誤 陽電子の消滅では、陽電子と電子が消滅して、2個以上の光子が生成する。陽電子と電子の質量エネルギーと運動エネルギーの和が全て光子のエネルギーに変換され、陽電子と電子の運動量の和は光子の運動量の和と等しい。したがって、エネルギーと運動量の両方とも保存される。

問 8 次の線源について、放出割合が最も高い γ 線のエネルギーを低い順から並べたとき、正しいものはどれか。

- 1 $^{57}\text{Co} < ^{241}\text{Am} < ^{137}\text{Cs} < ^{60}\text{Co}$
- 2 $^{241}\text{Am} < ^{57}\text{Co} < ^{60}\text{Co} < ^{137}\text{Cs}$
- 3 $^{57}\text{Co} < ^{241}\text{Am} < ^{60}\text{Co} < ^{137}\text{Cs}$
- 4 $^{241}\text{Am} < ^{137}\text{Cs} < ^{60}\text{Co} < ^{57}\text{Co}$
- 5 $^{241}\text{Am} < ^{57}\text{Co} < ^{137}\text{Cs} < ^{60}\text{Co}$

〔解答〕 5

〔解説〕 ^{57}Co 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am が放出する主な γ 線の [エネルギー, 放出割合] は、
 ^{57}Co [14 keV (9%), 122 keV (86%), 136 keV (11%)], ^{60}Co [1173 keV (99.9%), 1332 keV (100.0%)], ^{137}Cs [662 keV (85%)], ^{241}Am [26 keV (2%), 60 keV (36%)]
となり、題意の順に並べると
 ^{241}Am [60 keV (36%)], ^{57}Co [122 keV(86%)], ^{137}Cs [662 keV (85%)], ^{60}Co [1332 keV (100.0%)]
となる。

問 9 内部転換に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 原子核から遠い軌道の電子の方が、内部転換電子として放出されやすい。
- B 内部転換は軽い核よりも重い核に多く見られる。
- C 内部転換係数は、内部転換電子の放出確率 X と γ 線の放出確率 Y の比 X/Y をいう。
- D 内部転換は β 線源では観測されない。

- 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

〔解答〕 3

〔解説〕 原子核の励起状態が脱励起する際の余剰エネルギーを γ 線として放出する代わりに、余

剰エネルギーを軌道電子に与え、この軌道電子が原子の外に内部転換電子として放出される現象を内部転換という。

- A: 誤 軌道電子が、核からエネルギーを受け取るためには、軌道電子は原子核と相互作用する必要がある、原子核から近い軌道の電子の方が内部転換電子として放出されやすい。
- B: 正 内殻の軌道電子半径は原子番号が大きくなるにつれ小さくなるため、内部転換は重い核の方が起こりやすい。
- C: 正 X/Y は「内部転換係数」と呼ばれる。
- D: 誤 β^- 壊変で生じる娘核は励起状態となる場合があり、このとき内部転換もおこる。

問10 次の加速器のうち、陽子の加速に適しているものの組合せはどれか。

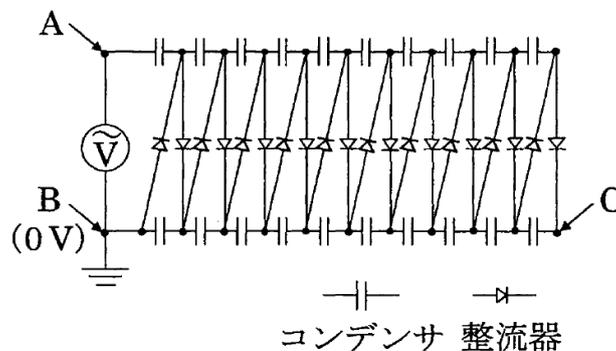
- A リニアック(直線加速器)
- B サイクロトロン
- C コッククロフト・ワルトン型加速器
- D ファン・デ・グラーフ型加速器

- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 5

〔解説〕 リニアック、コッククロフト・ワルトン型加速器、ファン・デ・グラーフ型加速器は電子またはイオンを、サイクロトロンはイオンを加速することができるため、全て陽子の加速に適している。

問11 図に示す回路を用いて、荷電粒子の加速に用いる高電圧を発生させるとき、C点の電位[V]として最も近い値は次のうちどれか。ただし、A点とB点の間に振幅 ± 200 Vの交流電圧を印加し、B点の電位を0 Vとする。また、コンデンサ及び整流器は漏れ電流の発生や電圧降下等がないものとする。



- 1 200 2 400 3 2,000 4 4,000 5 20,000

〔解答〕 4

〔解説〕 図に示された回路は、10段のコッククロフト・ワルトン回路である。入力電圧のピーク値を V_{IN} 、段数を N とすると、コッククロフト・ワルトン回路の出力電圧 V_0 は、

$$V_0 = 2NV_{IN}$$

よって、C点の電位は、

$$2 \times 200[V] \times 10 = 4,000[V]$$

問12 中性子の核反応に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ${}^1\text{H}(n,n){}^1\text{H}$ 反応では、運動エネルギーが保存される。
- B ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ 反応は、熱中性子では起きない。
- C ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ 反応では、放出される γ 線のエネルギーは 2.2 MeV である。
- D ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応は、吸熱反応である。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 2

〔解説〕

- A：正 ${}^1\text{H}(n,n){}^1\text{H}$ 反応は中性子と陽子との弾性散乱であり、運動エネルギーが保存される。
- B：誤 熱中性子による ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ 反応の反応断面積は 1.81barn であり、核反応は発生する。なお、 ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ 反応は、自然界において上空大気中で宇宙線により生じる中性子と空気中の ${}^{14}\text{N}$ で発生し、 ${}^{14}\text{C}$ が生成されている。
- C：正 熱中性子は陽子との弾性散乱のほか、 ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ 反応も起こす。 ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ 反応の際、結合エネルギーに相当する 2.2 MeV の γ 線が放出される。
- D：誤 ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応は発熱エネルギー 0.764 MeV の発熱反応である。

問13 励起状態の ${}^7\text{Li}$ 原子核から 0.48 MeV の γ 線が放出されるときに原子核が受ける反跳エネルギー[eV]として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、反跳前の ${}^7\text{Li}$ 原子核は静止しているものとする。

- 1 1.8 2 1.8×10 3 1.8×10^2 4 1.8×10^3 5 1.8×10^4

〔解答〕 2

〔解説〕 光子のエネルギーを E_g 、光の速度を c とすると、運動量 P_g は、 $P_g = E_g/c$ である。反跳原子核の質量を m 、速度を v とすると、その運動量は $P_n = mv$ である。運動量保存則より $P_g = P_n$ であり、 $E_g/c = mv$ となることから、 $v = E_g/mc$ である。したがって反跳原子核の運動エネルギー E_n は、

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{E_g^2}{2mc^2} = \frac{E_g^2}{2 \times 7u \cdot c^2} = \frac{0.48^2}{2 \times 7 \times 931.5} = 1.8 \times 10^{-5} [\text{MeV}] = 1.8 \times 10 [\text{eV}]$$

ここで、 u は原子質量単位であり、 $1u = 1.66 \times 10^{-27} [\text{kg}] = 931.5 [\text{MeV}]$ (エネルギー相当)

問 14 次の核反応のうち、発熱反応であるものの組合せはどれか。

- A ${}^2\text{H}(\text{d},\text{n}){}^3\text{He}$
- B ${}^3\text{H}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$
- C ${}^{12}\text{C}(\text{d},\text{n}){}^{13}\text{N}$
- D ${}^{16}\text{O}(\text{d},\text{n}){}^{17}\text{F}$

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 1

〔解説〕

A：正 ${}^2\text{H}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^3\text{He}+\text{n}+3.27\text{MeV}$ であり、発熱反応である。この核反応は核融合反応の1つであり、D-D反応と呼ばれる。

B：正 ${}^2\text{H}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^4\text{He}+\text{n}+17.6\text{MeV}$ であり、発熱反応である。この核反応も核融合反応の1つであり、D-T反応と呼ばれる。

C：誤 ${}^{12}\text{C}(\text{d},\text{n}){}^{13}\text{N}$ は吸熱反応である。

D：誤 ${}^{16}\text{O}(\text{d},\text{n}){}^{17}\text{F}$ は吸熱反応である。

A、Bの核融合反応が発熱反応であることから、解答1が導かれる。

問 15 制動放射線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 制動放射線のエネルギースペクトルは連続スペクトルである。
- B 制動放射線は、電子が原子と衝突するとき原子核から放出される。
- C 同じエネルギーの電子と陽子とでは、電子の方が制動放射線を放出しやすい。
- D 制動放射線は γ 線より波長が長い。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 2

〔解説〕

A：正 制動放射線のエネルギーは、0から入射荷電粒子の全運動エネルギーを放出する場合までの連続的なエネルギー分布となる

B：誤 制動放射線は、荷電粒子が原子核の近くを通過するとき、核のクーロン力によって進路を曲げられた際に発生する X 線である。

C：正 放射損失は荷電粒子の質量の2乗に反比例するので、陽子よりも電子の方が放射損失

による制動放射線を放出しやすい。

D: 誤 制動放射線の最大エネルギーは入射した電子の持つ運動エネルギーに等しく、 γ 線よりもエネルギーが低い(波長が長い)とは限らない。

問16 5.3 MeVの α 線の空気中の飛程は3.9 cmである。この α 線のシリコン中での飛程[μm]に最も近い値は次のうちどれか。ただし、空気の密度を $1.3 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、シリコンの密度を $2.3 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ とする。

- 1 2.5 2 10 3 25 4 50 5 100

[解答] 3

[解説] α 線の飛程は $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ の単位で表す(飛程に物質の密度を乗じた値)と物質によらずほぼ一定になる。空気中での飛程が3.9 cmであるので、シリコン中の飛程を R とすると

$$R = (3.9 \times 1.3 \times 10^{-3}) \div 2.3 = 2.2 \times 10^{-3} [\text{cm}] = 22 [\mu\text{m}]$$

よって解答3が最も近い値である。

問17 真空中で鉛の原子核(原子番号82)に5.0 MeVの α 粒子が向かうとき、 α 粒子がクーロン力に逆らって鉛の原子核に最接近する距離[fm]として最も近い値は次のうちどれか。ここで、真空中の誘電率を $8.9 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ とする。

- 1 12 2 24 3 48 4 96 5 192

[解答] 3

[解説] α 粒子の運動エネルギーが、接近する原子核との間のクーロン力(斥力)による位置エネルギーと等しくなるとき、 α 粒子は原子核に最接近する。すなわち、真空中の誘電率を ϵ_0 、電気素量を e 、最接近距離を r_{\min} とすると、

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2e \cdot 82e}{r_{\min}} = 5 [\text{MeV}]$$

したがって、

$$r_{\min} = \frac{1}{4 \times 3.14 \times 8.9 \times 10^{-12}} \cdot \frac{2 \times 82 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{5 \times 1.6 \times 10^{-13}} = 4.7 \times 10^{-14} [\text{m}] = 47 [\text{fm}]$$

よって解答3が最も近い値である。

問18 光子と物質との相互作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

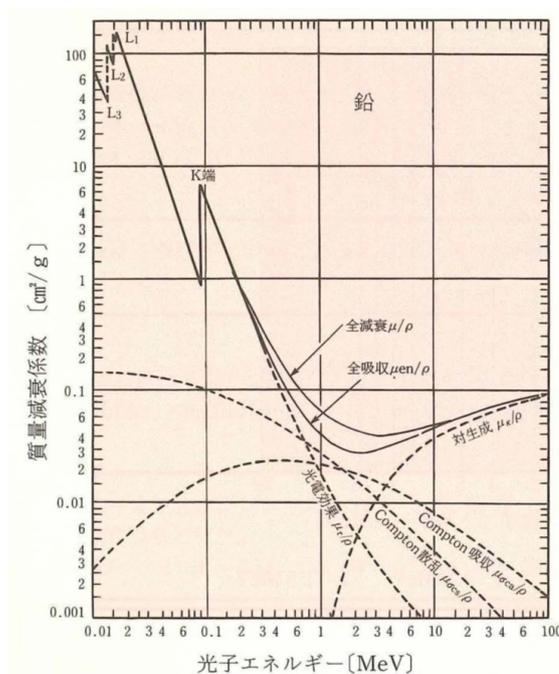
- A 光電効果は、光子のエネルギーがK吸収端に対応するエネルギーより高いときに起こる。
- B コンプトン散乱は、光子と原子核との衝突で起こる。
- C 100 keVの光子が水に入射したときは、主にコンプトン効果が起こる。
- D 10 MeVの光子が鉛に入射したときは、主に電子対生成が起こる。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

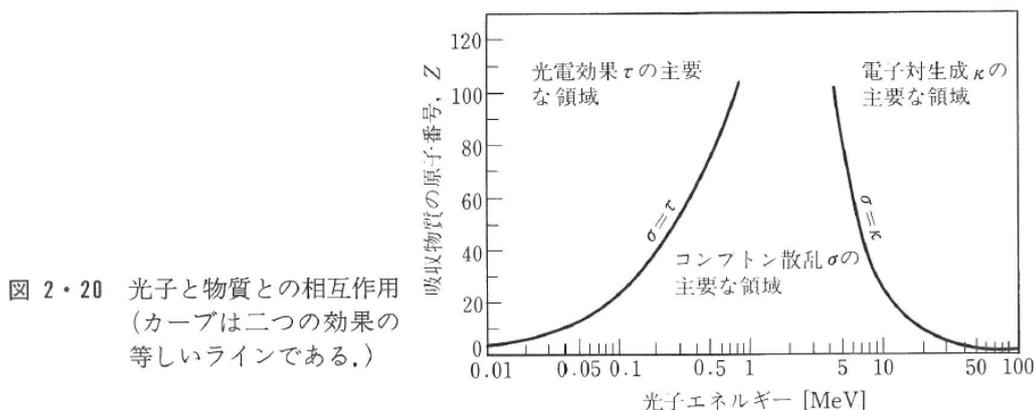
〔解答〕 5

〔解説〕

- A：誤 光子のエネルギーがK吸収端より低くても、K殻の電子軌道よりも結合エネルギーが低いL殻の軌道電子に対して光電効果が発生する。
- B：誤 コンプトン散乱は、光子が軌道電子に衝突した際に、電子にエネルギーの一部を与えて弾き飛ばし、光子自身はその分だけエネルギーを失って（波長が長くなって）別の方向に散乱される現象である。
- C：正 水を構成する水素及び酸素は原子番号がそれぞれ1及び8であり、100keVの光子に対する相互作用はいずれも主にコンプトン効果である。
- D：正 鉛の原子番号は82であり、10MeVの光子に対する相互作用は主に電子対生成である。



鉛に対する光子の質量減衰係数
(「9版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会)より)



「図 光子と物質の相互作用」

(「放射線・アイソトープ 講義と実習」(日本アイソトープ協会) より)

問 19 次の光子と物質の相互作用のうち、光子エネルギーのすべてが軌道電子の解放及びその運動エネルギーに消費されるものはどれか。

- 1 電子対生成
- 2 光核反応
- 3 レイリー散乱
- 4 コンプトン散乱
- 5 光電効果

〔解答〕 5

〔解説〕

- 1: 誤 電子対生成は、光子が原子核近傍の電場により吸収されて電子と陽電子を発生する反応であり、軌道電子が放出される現象ではない。
- 2: 誤 光核反応とは原子核に高エネルギーの光子が入射した際に起こる核反応であり、軌道電子が放出される現象ではない。
- 3: 誤 レイリー散乱は、光子がそのエネルギーを失うことなく散乱する弾性散乱であり、軌道電子が放出される現象ではない。
- 4: 誤 コンプトン散乱は、光子が軌道電子に衝突した際に、電子にエネルギーの一部を与えて弾き飛ばし、光子自身はその分だけエネルギーを失って(波長が長くなって)別の方向に散乱される現象である。
- 5: 正 光電効果は、光子が軌道電子にエネルギーをすべて与え、軌道電子が原子から放出される現象である。

問 20 次の相互作用に関する記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 光電効果では、発生確率は光子エネルギーに対して単調に減少する。
- 2 光核反応では、発生確率は光子エネルギーとともに増大する。

- 3 電子対生成では、発生確率は光子エネルギーとともに減少する。
- 4 光電効果では、発生確率は物質の原子番号とともに増大する。
- 5 光電効果が起こると、内殻軌道が空軌道になり内部転換電子が放出されることがある。

〔解答〕 4

〔解説〕

- 1：誤 光子のエネルギーがL殻やK殻の軌道電子の結合エネルギーのところで光電効果の断面積はジャンプし（これらをK吸収端，L吸収端という），単調には減少しない。
- 2：誤 光核反応における吸収断面積は20～30MeVでピークをもち，それ以上のエネルギーでは増加しない。
- 3：誤 電子対生成の原子断面積は，エネルギーが高くなるほど増加する。
- 4：正 光電効果の原子断面積は原子番号 Z と入射光子のエネルギー E_γ に依存し，およそ $\tau \propto Z^5 E_\gamma^{-3.5}$ という関係があり，原子番号とともに増加する。
- 5：誤 内部転換電子は，励起状態の原子核がエネルギーの低い状態へ転移するとき，光子の代りに軌道から放出される電子であり，光電効果に伴い発生するものではない。

問21 1.02 MeVの γ 線が物質でコンプトン効果を起こした場合、散乱光子と反跳電子のエネルギーが同じであった。この場合、散乱角として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 30° 2 45° 3 60° 4 75° 5 90°

〔解答〕 3

〔解説〕 コンプトン散乱の波長の変化は以下の式で表せる。

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) \quad (1)$$

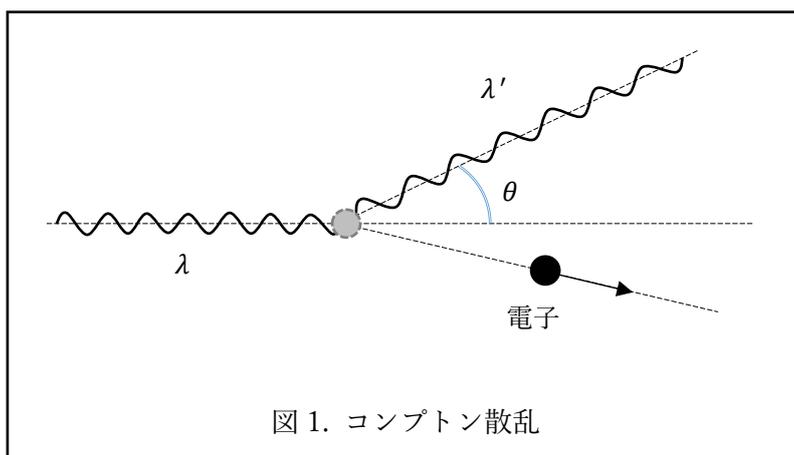
ここで、 λ および λ' はそれぞれ入射光子および散乱光子の波長、 h はプランク定数、 m は静止質量、 c は真空中における光速、 θ は入射光子と散乱光子がなす角である。問題文より散乱光子のエネルギーは入射光子のエネルギーの1/2であるため、その波長は2倍になる。それをを用いて(1)式を変形すると、

$$\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

$$\lambda \frac{mc}{h} = (1 - \cos \theta)$$

$$\frac{\lambda}{hc} mc^2 = (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

問題文より入射光子のエネルギー $hc/\lambda = 1.02 \text{ MeV} = 2mc^2$ なので(2)式に代入して、 θ は60°と求められる。よって3が正しい。



問 22 中性子に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 陽子より軽い。
- B 単独では不安定で β -壊変する。
- C 磁気モーメントを持たない。
- D $1/2$ のスピンを持つ。

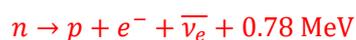
1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 4

〔解説〕

A：誤 陽子の質量は 938.27 MeV、中性子の質量は 939.57 MeV で中性子の方がやや重い。

B：正 中性子は単独で存在する場合、以下のとおり壊変する。



C：誤 中性子は電気的には中性であるが、磁気モーメントを持っている。

D：正 中性子も陽子も $1/2$ のスピンを持っている。

問 23 2.0 MeV の中性子が陽子(${}^1\text{H}$)との弾性衝突で失う平均エネルギーを A、炭素原子核(${}^{12}\text{C}$)との弾性衝突で失う平均エネルギーを B としたとき、A/B として最も近い値は次のうちどれか。

1 0.9 2 1.7 3 3.5 4 7.0 5 14

〔解答〕 3

〔解説〕 弾性衝突のため、中性子が失うエネルギーと原子核の反跳エネルギーは等しい。また、原子核の平均反跳エネルギーは最大反跳エネルギーのおおよそ半分であることを利用する。弾性散乱後の原子核の反跳エネルギー E_M は以下の式で表せる。

$$E_M = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos \theta) E_n$$

ここで、 E_n は入射中性子のエネルギー、 m および M はそれぞれ中性子および原子核の質量、 θ は入射中性子および散乱中性子がなす角である。 E_M が最大になるときは $\theta = 180^\circ$ であることは明らかである。陽子と炭素原子核の質量を上式に代入して計算すると、

$$E_{1max} = E_n$$

$$E_{12max} = \frac{48}{169} E_n = \frac{48}{169} E_{1max}$$

となる。ここで E_{1max} 、 E_{12max} は陽子および炭素原子核が受ける最大反跳エネルギーである。最大反跳エネルギーを原子核の平均反跳エネルギーや中性子が失う平均エネルギーで置き換えても同じ関係になるため、

$$\frac{A}{B} = \frac{E_{1max}}{E_{12max}} = \frac{169}{48} \cong 3.5$$

であり、3 が正しい。

問 24 次の量と単位の関係のうち、正しいものの組合せはどれか。

- | | | |
|--------------|---|--|
| A 線エネルギー付与 | — | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| B 照射線量 | — | $\text{A} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}$ |
| C 衝突断面積 | — | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| D 線エネルギー吸収係数 | — | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ |

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 1

〔解説〕

- A：正 線エネルギー付与（LET）は荷電粒子が飛跡に沿って物質中に付与する単位長さあたりのエネルギーで、単位は J/m ($= \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$) で与えられる。
- B：正 照射線量は X 線または γ 線で単位質量の空気を照射して生じた電荷の量であり、単位は C/kg ($= \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) で与えられる。
- C：誤 断面積は相互作用の確率を示す指標であり、単位は面積の次元 m^2 で与えられる。
- D：誤 線エネルギー吸収係数は入射光子が物質と相互作用して失われるエネルギーのうち、2 次電子のエネルギーとして与えられる割合から制動放射によって失われる割合を差し引いたもので、単位は m^{-1} で与えられる。

問 25 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 吸収線量は、放射線の種類を問わず定義される。

- B 照射線量は、電荷を持たない放射線に対して定義される。
- C カーマは、電荷を持つ放射線に対して定義される。
- D 吸収線量とカーマでは、同じ単位が用いられる。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

[解答] 3

[解説]

- A：正 吸収線量は単位質量あたりの物質に与えられるエネルギーで、単位は Gy(= J/kg)で与えられる。放射線の種類を問わないため A は正しい。
- B：誤 照射線量は X 線または γ 線で単位質量の空気を照射して生じた電荷の量であり、単位は C/kg で与えられる。光子と同じく電荷を持たない中性子線に対しては定義されないため B は誤り。
- C：誤 カーマは単位質量あたりの物質に、光子や非荷電粒子による電離作用によって、電子などの荷電粒子に最初に与えられたエネルギーの総和で、単位は Gy(= J/kg)で与えられる。電荷を持たない放射線に定義されている量なので C は誤り。
- D：正 吸収線量もカーマも、単位は Gy(= J/kg)で与えられる D は正しい。

問 26 バックグラウンド計数率が $140 \pm 8 \text{ min}^{-1}$ の測定器を用いて試料を測定したときの計数率は $1,540 \text{ min}^{-1}$ であった。試料の正味の計数率を誤差(相対標準偏差)2.0%で測定するために必要な試料の測定時間[min]として最も近い値は、次のうちどれか。

1 2.2 2 3.3 3 4.4 4 5.5 5 6.6

[解答] 1

[解説] 試料の計数率を測定したときの誤差を $x \text{ [min}^{-1}]$ とする。問題文より、正味の計数率は $(1540 - 140) = 1400 \text{ [min}^{-1}]$ であり、その相対標準偏差 2.0% は $28 \text{ [min}^{-1}]$ となる。すなわち、 $(1540 \pm x) - (140 \pm 8) = 1400 \pm 28 \text{ [min}^{-1}]$ となる。誤差付きの数値 $A \pm a$ 、 $B \pm b$ の差 $A - B$ の誤差 σ_{a-b} は以下の式で表せる。

$$\sigma_{a-b} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

これを用いて、 x を計算すると、

$$\begin{aligned} 28 &= \sqrt{x^2 + 8^2} \\ \therefore x &= \sqrt{720} \end{aligned}$$

となる。求める試料の測定時間を $t \text{ [min]}$ とすると、計数率の誤差について以下の式が成り立つ。

$$\frac{\sqrt{1540t}}{t} = \sqrt{720}$$

$$\therefore t = \frac{1540}{720} = 2.1 \dots$$

よって、選択肢1が最も近い。

問27 中心軸に陽極線がある円筒型比例計数管の特性に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 陽極線の太さが不均一であってもエネルギー分解能に影響を与えない。
- B 陽極線の両端付近の電界のゆがみを小さくするために、フィールドチューブを用いる。
- C 印加電圧が変動しても、パルス波高に影響を与えない。
- D 充填ガスとしてアルゴンを使用するとき、少量のエチレンを加えるとエネルギー分解能が向上する。

- 1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕5

〔解説〕比例計数管はガス検出器の一種であり、印加電圧によるガス増幅で生成する二次イオン対の数が、一次イオン対の数に比例するため、放射線のエネルギーを測定することができる。ガス増幅率はガスの種類や圧力、電極の構造や印加電圧によって変化する。

- A：誤 陽極線や陰極の半径は電場が変わる要因となるため、エネルギー分解能に影響を与える。
- B：正 フィールドチューブは陽極線より大きい半径の導電性の管で、その部分でガス増幅を起こさないようにする。計数管の端部近傍では電界が歪むため、その影響を小さくするために使用する。
- C：誤 印加電圧によりガス増幅率は変化するため、パルス波高に影響を与える。
- D：正 比例計数管に有機ガスを消滅ガスとして加えることで可視光や紫外光が関与する望まない電離現象を抑制することができ、エネルギー分解能が向上する。

問28 次の半導体検出器のうち室温で動作するものの組合せはどれか。

- A 表面障壁型 Si 半導体検出器
- B 高純度 Ge 半導体検出器
- C リチウムドリフト型 Ge 半導体検出器
- D CdTe 化合物半導体検出器

- 1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕3

〔解説〕半導体検出器で、バンドギャップが小さいものは分解能が良い反面、熱励起による雑音

が大きく、冷却を必要とする。選択肢の中では高純度 Ge 半導体検出器とリチウムドリフト型 Ge 半導体検出器は液体窒素等で冷却する必要がある、他の検出器は室温で動作させることが可能である。よって3が正しい。

問29 次のシンチレータのうち、一般的な使用状態で自己放射能による計数があるものの組合せはどれか。

- A BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
- B CsI:Tl
- C LSO($\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$)
- D LaBr($\text{LaBr}_3:\text{Ce}$)
- E ZnS:Ag

- 1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

〔解答〕4

〔解説〕シンチレータの構成元素で天然放射性核種が含まれるものは自己放射能による計数が観測される。この中ではランタンとルテチウムにそれぞれ ^{138}La (半減期 1.1×10^{11} 年) と ^{176}Lu (半減期 3.8×10^{10} 年) が含まれるため4が正しい (^{209}Bi も半減期 1.9×10^{19} 年で α 壊変するが半減期が長く、通常の使用では問題とならない)。

問30 次のシンチレータのうち、 ^{137}Cs 線源からの γ 線に対して得られるエネルギー分解能が良好なもの(相対エネルギー分解能の値が小さいもの)から順に並べたものはどれか。

- A NaI:Tl
- B LaBr($\text{LaBr}_3:\text{Ce}$)
- C CeBr₃
- D BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)

- 1 A、B、C、D
2 B、C、A、D
3 B、C、D、A
4 C、B、D、A
5 C、D、B、A

〔解答〕2

〔解説〕シンチレータに関する問題では、NaI:Tl、LaBr、BGOに関する情報が比較的良好に出題される。光子に対するエネルギー分解能が比較的良好なのは NaI:Tl、LaBr であり、特に LaBr は優れている (NaI:Tl の約2倍)。また、BGO はこれらの検出器よりもエネルギー分

解能が劣る。すなわち B, A, D の順であり 2 が正しい (CeBr₃ は LaBr よりエネルギー分解能は劣るが、天然放射性核種のバックグラウンドがない検出器として有用である)。

問 31 次の文章の の部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 1 つだけ選べ。

放射線物理学は、1895 年の A による X 線の発見に始まり、その発展には線源としての天然放射性物質が不可欠であった。天然放射性物質(ウラン塩)は B によって発見され(1896 年)、1898 年には C らによってラジウム及び ア が発見された。天然放射性物質の多くは α 線、 β 線、 γ 線を放出する。 D はウラン塩からの放射線には物質に吸収されやすいものと、透過性の強いものの 2 種類あることを見出し、前者を α 線、後者を β 線と呼んだ。 β 線の実体は B の行った電荷測定から電子であることは明らかになったが、 E は、 D が分類した β 線の中には、磁場に作用されない透過力の極めて強い放射線があることを見出した。 D はこれを γ 線と命名し、後年その波長測定に成功した。また、 F は、 α 線を磁場や電場で曲げることが β 線に比べより困難であることや、その質量/電荷比の測定から α 線の実体が イ であることを見出した。

当時のほとんどの放射線検出器は ウ を利用していたので、電荷のない中性子の直接検証は困難だった。1930 年に G らはベリリウムに α 線を当てると原子核反応により未知の放射線が放出されることを発見し、ベリリウム線と名付けた。この放射線は、電場や磁場を直進し、非常に大きな透過力を持っていたため、 H らはこの放射線を γ 線と考えた。この放射線で水素を多く含む物質(パラフィン)を照射すると、陽子が最大 5 MeV のエネルギーをもってたたき出されることを エ を用いて観測し、 γ 線のエネルギー E を推定した。運動量は光速度を c として オ と表される。陽子の質量を M_p 、衝突後の陽子の運動エネルギーを K 、衝突後の γ 線の運動量を P' とすると、運動量保存則は

$$\text{オ} = \text{カ}$$

となる。エネルギー保存則を用いて E を求めると、

$$E = \text{キ}$$

を得る。陽子との弾性衝突で 5.0 MeV のエネルギーを陽子に与えるためには、 E は ク MeV となる。ただし、陽子の質量は 1,000 MeV に相当するとした。

I はこの反応を ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{13}\text{ケ} + \gamma$ と考え、原子核の質量から γ 線のエネルギーを計算したが、14 MeV にしかならず先に見積もられたような大きな値にはならなかった。そこで、ベリリウム線が γ 線ではなく、質量 m を持つ電的に中性な粒子であると考え、水素ばかりでなく窒素にも照射して反跳する陽子及び窒素原子核の最大速度を測定した。粒子(質量 m)が速度 v で静止している原子核(質量 M)と弾性衝突するとき、反跳された原子核の速度 V は コ と表される。窒素原子核の質量は陽子の 14 倍であるとする、反跳窒素原子核の最大速度を V_N 、反跳陽子の最大速度を V_p として、中性粒子の質量 m と陽子の質量 M_p の比 (m/M_p) は、 サ と表される。 I は、 エ を用いてこれらの反跳粒子の速度を測定し、ここから m/M_p としてほぼ 1 に近い値を得た。こうして、陽子とほぼ等しい質量を持ち電荷を持たない中性子の存在

が検証された。すなわち、 α 線とベリリウムの核反応は中性子を n として、 ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{ケ} + n$ と表されることが分かった。無電荷の中性子はすぐに核構造を調べる新たな手段として使われ、中性子照射による新たな放射性同位元素の生成や中性子によるウランの核分裂などの発見に至った。ウランの同位体 ${}^{235}\text{U}$ が遅い中性子を吸収して起こる核分裂反応 ${}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}^{95}\text{Sr} + {}^{139}\text{Xe} + 2n$ において、1個のウラン原子核から解放されるエネルギーは「シ」と計算される。ただし、中性子、及びストロンチウム、キセノン、ウランの各原子1個の質量を、それぞれ、 $1.67 \times 10^{-27}\text{kg}$ 、 $157.60 \times 10^{-27}\text{kg}$ 、 $230.66 \times 10^{-27}\text{kg}$ 、 $390.29 \times 10^{-27}\text{kg}$ とした。核分裂の発見は原子炉や核兵器の製造へとつながった。

<ABCの解答群>

A	B	C
1 トムソン	ベクレル	デベール
2 レントゲン	マリー・キュリー	ベクレル
3 レントゲン	ベクレル	マリー・キュリー
4 ラザフォード	マリー・キュリー	ベクレル
5 ラザフォード	ベクレル	マリー・キュリー
6 トムソン	ヴィラール	マリー・キュリー

<ア～ウの解答群>

- | | | | |
|---------|----------|-----------|----------|
| 1 ポロニウム | 2 アクチニウム | 3 トリウム | 4 ラドン |
| 5 プロトン | 6 トリトン | 7 ヘリウム原子核 | 8 ニュートリノ |
| 9 ミューオン | 10 蛍光作用 | 11 写真感光作用 | 12 電離作用 |
| 13 化学反応 | 14 熱力学作用 | | |

<DEFの解答群>

A	B	C
1 レントゲン	ベクレル	デベール
2 ラザフォード	ヴィラール	ラザフォード
3 レントゲン	ベクレル	マリー・キュリー
4 ラザフォード	マリー・キュリー	ヴィラール
5 トムソン	ヴィラール	マリー・キュリー
6 ラザフォード	マリー・キュリー	チャドウィック

<GHIの解答群>

G	H	I
1 レントゲン	ベクレル	デベール
2 ラザフォード	マリー・キュリー	チャドウィック
3 ボーテ	ラザフォード	パウリ
4 ラザフォード	マリー・キュリー	ヴィラール
5 ボーテ	イレーヌ・キュリー	チャドウィック
6 トムソン	ヴィラール	マリー・キュリー

<エの解答群>

- | | | |
|---------------|-------------------|-------------------|
| 1 泡箱 | 2 ZnS (Ag) シンチレータ | 3 NaI (Tl) シンチレータ |
| 4 霧箱 | 5 写真乾板 | 6 電離箱 |
| 7 ガイガーミュラー計数管 | 8 比例計数管 | |

<オ、カの解答群>

- | | | |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 Ec | 2 Ec^2 | 3 $\frac{E}{c}$ |
| 4 $\frac{E}{c}$ | 5 c^2 | 6 $\frac{c}{E}$ |
| 7 $\frac{c^2}{E}$ | 8 $P' + \sqrt{M_P K}$ | 9 $P' + M_P K$ |
| 10 $P' + \sqrt{2M_P K}$ | 11 $P' + 2M_P K$ | 12 $-P' + \sqrt{M_P K}$ |
| 13 $-P' + M_P K$ | 14 $-P' + \sqrt{2M_P K}$ | 15 $-P' + 2M_P K$ |

<キの解答群>

- | | | |
|------------------------------------|---|--|
| 1 $\frac{1}{2} \sqrt{M_P c^2 K}$ | 2 $\sqrt{M_P c^2 K}$ | 3 $\frac{1}{2} (\sqrt{M_P c^2 K} + K)$ |
| 4 $\sqrt{M_P c^2 K + \frac{K}{2}}$ | 5 $\sqrt{M_P c^2 K + K}$ | 6 $\frac{1}{2} \sqrt{2M_P c^2 K}$ |
| 7 $\sqrt{2M_P c^2 K}$ | 8 $\frac{1}{2} (\sqrt{2M_P c^2 K} + K)$ | 9 $\sqrt{2M_P c^2 K + \frac{K}{2}}$ |
| 10 $\sqrt{2M_P c^2 K + K}$ | 11 $2\sqrt{M_P c^2 K}$ | 12 $2\sqrt{M_P c^2 K + \frac{K}{2}}$ |
| 13 $2\sqrt{M_P c^2 K + K}$ | | |

<クの解答群>

- | | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 1 20 | 2 26 | 3 33 | 4 43 | 5 53 |
| 6 63 | 7 73 | 8 83 | 9 93 | |

<ケの解答群>

- 1 N 2 C 3 B 4 F 5 O
6 Li

<コの解答群>

- 1 $\frac{mv}{m+M}$ 2 $\frac{Mv}{m+M}$ 3 $\frac{2mv}{m+M}$ 4 $\frac{2Mv}{m+M}$
5 $\frac{v(M-m)}{m+M}$ 6 $\frac{2v(M-m)}{m+M}$ 7 $\frac{mv}{M-m}$ 8 $\frac{Mv}{M-m}$
9 $\frac{2mv}{M-m}$ 10 $\frac{2Mv}{M-m}$

<サの解答群>

- 1 $\frac{14V_N}{V_P+V_N}$ 2 $\frac{14V_N-V_P}{V_P+V_N}$ 3 $\frac{V_P}{V_P+V_N}$ 4 $\frac{14V_N}{V_P-V_N}$
5 $\frac{14V_N-V_P}{V_P-V_N}$ 6 $\frac{V_P}{V_P-V_N}$ 7 $\frac{14V_P-V_N}{V_P+V_N}$ 8 $\frac{14(V_P-V_N)}{V_P-V_N}$

<シの解答群>

- 1 3.2×10^{-12} 2 6.2×10^{-12} 3 9.2×10^{-12} 4 3.2×10^{-11} 5 6.2×10^{-11}
6 9.2×10^{-11} 7 3.2×10^{-10} 8 6.2×10^{-10} 9 9.2×10^{-10}

[解答] ABC-3 ア-1 イ-7 ウ-12 DEF-2 GHI-5 エ-4 オ-3 カ-14 キ-8
ク-5 ケ-2 コ-3 サ-5 シ-4

[解説]

カ：

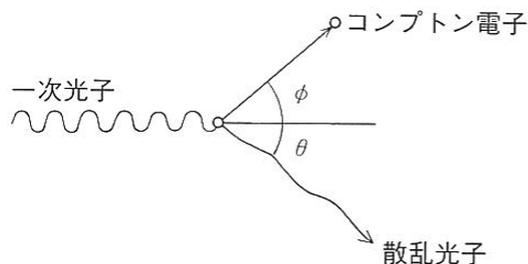


図 6.8 コンプトン散乱

「図 コンプトン散乱」(「9 版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会)より)

今、上図のようなコンプトン散乱の場合の電子を陽子に置き換えて考えれば、運動量保存則やエネルギー保存則などの式において、コンプトン散乱の場合の式と同じ式で考えることができる。衝突後の陽子のエネルギー K はコンプトン散乱の場合と同様に考えて、

$$K = \frac{E}{1 + M_p c^2 (1 - \cos \theta)}$$

と与えられるので、衝突後の陽子が最大のエネルギーをもってたたき出されるのは、入射した γ 線が $\theta = 180^\circ$ の後方へ散乱されたときである（このとき $\phi = 0^\circ$ ）。

衝突後の陽子の速度を v_p とすると、

$$K = \frac{1}{2} M_p v_p^2$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2K}{M_p}}$$

となり、衝突後の陽子の運動量は、

$$M_p v_p = \sqrt{2M_p K}$$

となる。

運動量保存則は、 γ 線が $\theta = 180^\circ$ の後方へ散乱される（ $\phi = 0^\circ$ ）から γ 線の進行方向のみを考えれば良いので、

$$\frac{E}{c} = -P' + \sqrt{2M_p K}$$

と与えられる。

キ：カの解説より、

$$P' = \sqrt{2M_p K} - \frac{E}{c}$$

であるから、エネルギー保存則より、

$$E = P'c + K = \left(\sqrt{2M_p K} - \frac{E}{c} \right) c + K = \sqrt{2M_p c^2 K} - E + K$$

よって、

$$E = \frac{1}{2} \left(\sqrt{2M_p c^2 K} + K \right)$$

ク：キの式において、 $K = 5.0$ [MeV]、 $M_p c^2 = 1000$ [MeV]とすると、

$$E = \frac{1}{2} (\sqrt{2 \times 1000 \times 5.0} + 5.0) \cong 53$$
[MeV]

ケ：この反応で生成される原子核の質量数および原子番号は、それぞれ ${}^9\text{Be}$ と ${}^4\text{He}$ （すなわち α 粒子）の質量数および原子番号の和となるから、13および6となる。

コ：弾性衝突の場合、反跳された原子核の反跳エネルギーを E_N 、入射粒子の入射エネルギーを E 、重心系での入射粒子の散乱角を φ とおくと、

$$E_N = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos \varphi) E$$

と与えられることから、反跳エネルギーが最大となるのは $\varphi = 180^\circ$ 、すなわち正面衝突の場合である。この場合、弾性衝突後の入射粒子の速度を v' とおくと、運動量保存則より、

$$mv = MV - mv'$$

またエネルギー保存則より、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}mv'^2$$

となる。したがって、

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv^2 &= \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}m\left(\frac{M}{m}V - v\right)^2 \\ \frac{1}{2}mv^2 &= \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}m\left(\frac{M}{m}\right)^2 V^2 - MvV + \frac{1}{2}mv^2 \\ \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}m\left(\frac{M}{m}\right)^2 V^2 &= MvV \\ V + \frac{M}{m}V &= 2v \\ V &= \frac{2v}{1 + \frac{M}{m}} = \frac{2mv}{m + M} \end{aligned}$$

サ：今、コの解説における反跳される原子核を、窒素原子核あるいは陽子とした場合を考えれば良いので、窒素原子核の質量を M_N とすると、 $M_N = 14M_p$ であるから、

$$V_N = \frac{2mv}{m + M_N} = \frac{2mv}{m + 14M_p}$$

また、

$$V_p = \frac{2mv}{m + M_p}$$

これらの式より、

$$\begin{aligned} \frac{V_p}{V_N} &= \frac{m + 14M_p}{m + M_p} \\ V_p \left(\frac{m}{M_p} + 1\right) &= V_N \left(\frac{m}{M_p} + 14\right) \\ \frac{m}{M_p}(V_p - V_N) &= 14V_N - V_p \end{aligned}$$

$$\frac{m}{M_p} = \frac{14V_N - V_p}{V_p - V_N}$$

シ：1個の ^{235}U が遅い中性子を吸収して起こる核分裂反応で解放されるエネルギーの値は、反応の前後の質量差をエネルギーに換算した値である。その質量差は、

$$(390.29 + 1.67 - 157.60 - 230.66 - 2 \times 1.67) \times 10^{-27} = 0.36 \times 10^{-27} [\text{kg}]$$

である。光速度は $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ であるから、質量差をエネルギーに換算すると、

$$(0.36 \times 10^{-27}) \times (3.0 \times 10^8)^2 \approx 3.2 \times 10^{-11} [\text{J}]$$

となる。

問32 光子と物質の相互作用に関する次のI、IIの文章の□の部分について、解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

I 細い線束(ビーム)の光子が一様で単一の物質に入射した場合、物質との相互作用により光子フルエンス ϕ は減衰する。相互作用の数の期待値は、物質中の標的となる原子数密度 N と入射した光子フルエンス ϕ に比例する。標的原子1個当たりに単位フルエンスの光子が入射したときの相互作用の確率は、□A□ σ と呼ばれる。このとき、物質中で厚さ x を透過した光子フルエンス ϕ の減衰は次式で表される。

$$-\frac{d\phi}{dx} = \sigma N \phi$$

ここで、 $\mu = \delta N$ 、物質に入射する光子のフルエンスを ϕ_0 とすると、 ϕ は次式で表される。

$$\phi = \text{□ア□}$$

μ は□B□と呼ばれ、その□C□に対応する値は光子が物質中を相互作用せずに通過できる距離の期待値である□D□を表す。また、 μ を密度 ρ で除したものを□E□という。

多くの物質では、数百 keV から数 MeV の光子エネルギー領域で□F□が主要な相互作用となる。□F□は入射光子と□G□との相互作用であり、このエネルギー領域において、このときの σ は物質の原子番号に比例する。一方、物質の密度は原子量 A と原子数密度 N の積であることから、物質の原子番号を Z とすると□E□は、□イ□に比例する。水素を除いて、□イ□は物質の種類によってあまり変化しないことから、□F□が主要な相互作用となるエネルギー領域では、□E□は物質の種類にあまり依存しないことが分かる。

<Aの解答群>

- | | | | |
|------------|---------|--------|--------|
| 1 線エネルギー付与 | 2 質量阻止能 | 3 断面積 | 4 体積 |
| 5 密度 | 6 分散 | 7 不確かさ | 8 標準偏差 |

<アの解答群>

- 1 $\mu \frac{\phi_0}{x^2}$ 2 $\mu \frac{\phi_0}{x}$ 3 $\frac{\phi_0}{x^2} e^{-\mu}$ 4 $\phi_0 e^{-\frac{\mu}{x}}$ 5 $\phi_0 e^{-\mu x}$
- 6 $\phi_0 e^{-\mu x^2}$ 7 $\phi_0 e^{-\mu^2 x}$ 8 $\phi_0 e^{-\frac{\mu}{x^2}}$ 9 $\phi_0 e^{-\frac{x}{\mu}}$

<B~Eの解答群>

- 1 自由度 2 標準偏差 3 平均値 4 平方根
- 5 線エネルギー付与 6 質量阻止能 7 線減弱係数 8 質量減弱係数
- 9 平均エネルギー 10 平均自由行程 11 逆2乗 12 逆数
- 13 1乗 14 2乗 15 3乗

<F、Gの解答群>

- 1 光電効果 2 電子対生成 3 核分裂反応 4 核融合反応
- 5 光核反応 6 コンプトン散乱 7 原子核 8 中性子
- 9 陽子 10 光子 11 軌道電子

<イの解答群>

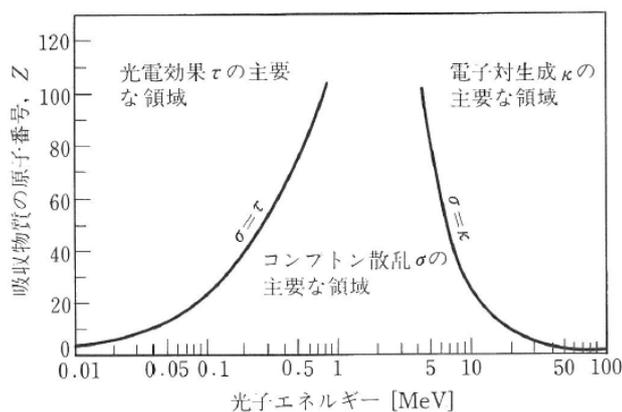
- 1 $\frac{N}{Z}$ 2 $\frac{Z}{N}$ 3 NZ 4 $\frac{N}{A}$ 5 $\frac{A}{N}$
- 6 AN 7 $\frac{A}{Z}$ 8 $\frac{Z}{A}$ 9 AZ

[解答] I A-3 ア-5 B-7 C-12 D-10 E-8 F-6 G-11 イ-8

[解説]

F: 図を参照のこと。

図 2・20 光子と物質との相互作用
(カーブは二つの効果の等しいラインである.)



「図 光子と物質の相互作用」

(「放射線・アイソトープ 講義と実習」(日本アイソトープ協会) より)

イ: コンプトン散乱による線減弱係数は $\mu = \sigma N$ 、物質の密度は $\rho = AN$ であるから、コンプトン散乱による質量減弱係数は、

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{A}$$

ここで、 $\sigma \propto Z$ であるから、

$$\frac{\mu}{\rho} \propto \frac{Z}{A}$$

II 平行ビームの光子をある物質に照射して透過させたときに、光子の強度を $\boxed{\text{H}}$ にするのに必要な物質の厚さを半価層(第一半価層)と呼ぶ。例えば、250 keV の光子に対する銅の半価層は、表の $\boxed{\text{E}}$ を利用して $\boxed{\text{ウ}}$ mm と計算できる。ここで、ビルドアップの影響は無視し、銅の密度は $8.96\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ とする。第一半価層を通過した光子の強度をさらにその $\boxed{\text{H}}$ にするのに必要な物質の厚さを第二半価層と呼び、これらの値は X 線の線質を表すために用いられる。

連続エネルギースペクトルを持つ X 線ビームの場合、第一半価層(HVL₁)と第二半価層(HVL₂)の関係は、散乱線の寄与を無視すると一般に $\boxed{\text{エ}}$ となる。これは、第一半価層を透過した X 線ビームは、 $\boxed{\text{I}}$ エネルギー成分の割合が少なくなるためである。第一半価層を第二半価層で除した値を均等度と呼び、X 線のエネルギーの均等性を表す指標として用いられる。

連続エネルギースペクトルを持つ X 線の第一半価層と同じ半価層の値を持つ単色光子のエネルギーを $\boxed{\text{J}}$ エネルギーと呼ぶ。また $\boxed{\text{J}}$ エネルギー E_1 を X 線の最大エネルギー E_{max} で除した比 E_1/E_{max} は、X 線のエネルギースペクトルを評価するための指標として用いられ、線質指標 QI と呼ばれる。

150 kV の高電圧で電子を加速し、タングステンターゲットに照射することにより X 線を発生させる装置について考える。銅、スズ及び鉛で構成されたフィルタを透過した X 線の銅に対する半価層を測定した結果、2.42mm と評価された。この X 線に対する前述の線質指標 QI を計算すると $\boxed{\text{オ}}$ となる。

表 光子エネルギー E [keV]と銅の $\frac{\mu}{\rho}$ [$\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]の関係

E	$\frac{\mu}{\rho}$	E	$\frac{\mu}{\rho}$	E	$\frac{\mu}{\rho}$
10	216	110	0.377	210	0.149
20	33.8	120	0.320	220	0.142
30	10.9	130	0.278	230	0.137
40	4.86	140	0.246	240	0.132
50	2.61	150	0.222	250	0.128
60	1.59	160	0.203		
70	1.06	170	0.187		
80	0.763	180	0.175		
90	0.578	190	0.165		
100	0.459	200	0.156		

<Hの解答群>

- 1 $\frac{2}{3}$ 2 $\frac{1}{2.7}$ 3 $\frac{1}{\ln 2}$ 4 $\frac{1}{2}$ 5 $\frac{1}{4}$
 6 $\frac{1}{5}$ 7 $\frac{1}{10}$

<ウの解答群>

- 1 0.11 2 0.17 3 0.60 4 1.1 5 1.7
 6 6.0 7 11 8 17 9 60

<エの解答群>

- 1 $HVL_1 > HVL_2$ 2 $4HVL_1 = HVL_2$ 3 $2HVL_1 = HVL_2$ 4 $HVL_1 = 2HVL_2$
 5 $HVL_1 = 4HVL_2$ 6 $HVL_1 < HVL_2$

<I、Jの解答群>

- 1 平均 2 高 3 熱 4 低 5 最大
 6 実効 7 吸収 8 位置 9 単一 10 連続

<オの解答群>

- 1 0.10 2 0.20 3 0.30 4 0.40 5 0.50
 6 0.60 7 0.70 8 0.80 9 0.90 10 1.0
 11 1.1 12 1.2 13 1.3 14 1.4 15 1.5

〔解答〕 II H-4 ウ-6 エ-6 I-4 J-6 オ-8

〔解説〕

ウ：250keVの光子に対する銅の質量減弱係数 μ/ρ は問題の表より $0.128 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、銅の密度 ρ は $8.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であるから、250keVの光子に対する銅の線減弱係数 μ は、

$$\mu = \frac{\mu}{\rho} \rho = 0.128 \times 8.96 = 1.15 [\text{cm}^{-1}]$$

よって銅の半価層 $x_{1/2}$ は、

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{1.15} \approx 0.60[\text{cm}] = 6.0[\text{mm}]$$

I:

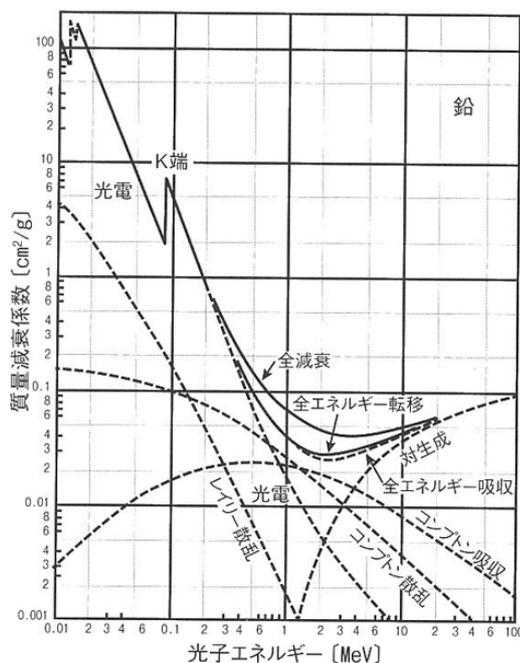


図 6.7
鉛に対する光子の質量減衰係数

「図 鉛に対する光子の質量減弱係数」

(「9 版 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会) より)

多くの物質の場合、数百 keV から数 MeV のエネルギーの光子との相互作用はコンプトン散乱が主要となるが、それより低い光子エネルギー領域では光電効果が主要の相互作用になってくる。この光子エネルギー領域では図のように光子エネルギーが低くなると質量減弱係数が大きくなる傾向にあるため、連続したエネルギースペクトルを持つ X 線ビームが第一半価層を透過した際に低エネルギー成分の割合が少なくなる。

オ: X 線の銅に対する半価層 $x_{1/2}$ は 0.242cm、銅の密度 ρ は $8.96\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であるから、X 線に対する銅の質量減弱係数 μ/ρ は、

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln 2}{x_{1/2}\rho} = \frac{0.693}{0.242 \times 8.96} \approx 0.320[\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$$

となり、問題の表より実効エネルギー E_1 は 120keV であることがわかる。X 線の最大エネルギー E_{max} は 150keV であるから、線質指標 QI の値は、

$$\frac{E_1}{E_{max}} = \frac{120}{150} = 0.80$$

となる。