

令和5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5年度 第1種放射線取扱主任者試験 物理学の表記ミスについて」の内容（問18 選択肢Cの表記ミス）は修正済みです。

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 ヘリウム-3と熱中性子との発熱反応における反応前後に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

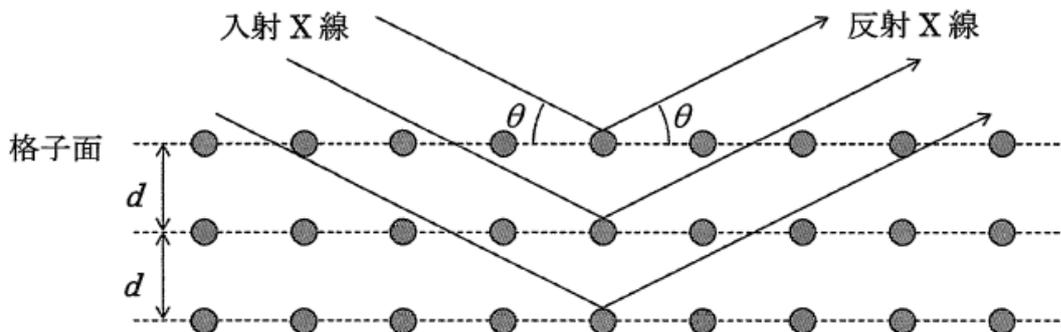
- A 質量は保存されていない。
- B 運動エネルギーは保存されている。
- C 運動量は保存されている。
- D 全エネルギーは保存されている。
- E 電荷保存則が成立していない。

- 1 ABEのみ 2 ACDのみ 3 ADEのみ 4 BCDのみ 5 BCEのみ

〔解答〕2

〔解説〕ヘリウム-3と熱中性子の発熱反応は ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ と書ける。質量とエネルギーは相互の転換が起こり、質量とエネルギーは独立には保存しない。電荷は反応前後で保存している。

問2 図に示す格子面が等間隔 d で積み重なった結晶におけるX線のブラッグ反射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 物質の構造解析に利用されるX線の粒子性に基づく現象である。
- B 結晶の同一格子面からの反射波の位相は等しくなる。
- C 隣り合う格子面同士の行路差が波長の整数倍のときに反射波が強くなる。
- D 格子面への入射角が θ のとき、隣り合う格子面からの行路差は $2d \sin \theta$ となる。

- 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〕ブラッグ反射はX線の波動性に基づく現象である。隣り合う格子面からの行路差は $2d \sin \theta$ である。

問3 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 壊変と β^- 壊変は同一核種では起きない。
- B α 壊変ではニュートリノが放出されない。
- C EC 壊変ではニュートリノが放出されない。
- D β^+ 壊変が起きる核種では、競合して EC 壊変が起きる。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 4

〔解説〕 α 壊変と β^- 壊変は同一核種で競合することができる。例えば ^{218}Po はアルファ壊変が 99.8%、 β^- 壊変は 0.02% の割合で起こる。 α 壊変ではクーロン障壁をトンネル効果で α 粒子が放出され、ニュートリノは放出されない。質量数 A 、原子番号 Z の原子核を ${}^A_Z E$ と書くと、EC 壊変は ${}^A_Z E + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} E + \nu$ と表せ、ニュートリノが放出される。EC 壊変は β^+ 壊変に比べてエネルギー的に有利であり、 β^+ 壊変が起きる核種には必ず EC 壊変を伴う。

問4 ^{226}Ra の放射能が 3.7×10^{10} Bq であるとき、永続平衡にある ^{222}Rn の原子数に最も近い値は次のうちどれか。ただし、 ^{222}Rn の半減期を 3.8 日とする。

- 1 5.5×10^{15} 2 9.5×10^{15} 3 1.2×10^{16} 4 1.5×10^{16} 5 1.8×10^{16}

〔解答〕 5

〔解説〕 永続平衡にある核種の放射能は等しいので、 ^{222}Rn の放射能も 3.7×10^{10} Bq である。

放射能を A 、半減期を $T_{1/2}$ 、原子の数を N とすると $A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N$ より

$$N = 3.7 \times 10^{10} \times 3.8 \times 24 \times 3600 \times \frac{1}{0.69315} = 1.75 \times 10^{16}$$

問5 次のうち、 β^- 壊変だけをする核種として、正しいものの組合せはどれか。

- A ^{14}C
- B ^{32}P
- C ^{40}K
- D ^{57}Co

- 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〕 ^{14}C は半減期 5700 年で β^- 壊変のみを起こす。 ^{32}P は半減期 14 日で β^- 壊変のみを起こし、最大エネルギー 1.71 MeV の β^- 線を放出する。 ^{40}K は β^- 壊変、EC 壊変、 β^+ 壊変を起こす。 ^{57}Co は半減期 272 日で 100% EC 壊変を起こす。

問6 サイクロトロンにおいて、磁束密度 B の磁場に垂直な平面内を非相対論的速度で運動する粒子(質量 M 、電荷 Ze) が円軌道を1周するのにかかる時間を表す式として、正しいものは次のうちどれか。

1 $\frac{MZe}{2\pi B}$

2 $\frac{2\pi BM}{Ze}$

3 $\frac{Ze}{2\pi BM}$

4 $\frac{2\pi M}{BZe}$

5 $\frac{B}{2\pi MZe}$

〔解答〕 4

〔解説〕 磁束密度 B の磁場に垂直な平面内を、速さ v で円運動する粒子の向心力は $vBZe$ なので、円運動の半径を r とすると

$$vBZe = \frac{Mv^2}{r}$$

1周するのにかかる時間は

$$\frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi M}{BZe}$$

問7 電子を加速するのに適していない加速器はどれか。

- 1 コッククロフト・ワルトン型加速器
- 2 ファン・デ・グラーフ型加速器
- 3 サイクロトロン
- 4 シンクロトロン
- 5 線形加速器

〔解答〕 3

〔解説〕 サイクロトロンは電子の加速に適さない。なお、1~5のいずれの加速器も陽子やイオンの加速に用いられる。

問8 次のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 1 MeV の中性子が水素原子核との衝突で熱中性子になるまでの平均衝突回数は約 25 である。
- B ^{252}Cf 線源と ^{241}Am -Be 線源を比較すると、放出される中性子の平均エネルギーは ^{252}Cf 線源の方が高い。
- C D-D 反応で発生する中性子のエネルギーは約 14 MeV である。
- D ^3He が熱中性子を吸収した時に起こる反応は(n, p)反応である。

- 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〕 中性子が水素原子核との衝突で毎回半分のエネルギーを失うとすると、25 回の衝突で $10^6 \times 2^{-25} = 0.03 \text{ eV}$ となり、熱中性子 (0.025 eV) 程度である。 ^{252}Cf が放出する中性子の平均エネルギーは約 2 MeV、 ^{241}Am -Be 線源では ^{241}Am の α 線によって $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 反応を起こして約 5.7 MeV の中性子を発生させる。D-D 反応で発生する中性子は 2.45 MeV である。 ^3He は $^3\text{He}(\text{n}, \text{p})^3\text{H}$ によってトリチウムを生成する。

問9 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 $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$
- B $^{28}\text{Si}(\text{n}, \alpha)^{25}\text{Mg}$
- C $^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})^{32}\text{P}$
- D $^{113}\text{Cd}(\text{n}, \gamma)^{114}\text{Cd}$
- E $^{197}\text{Au}(\text{n}, \gamma)^{198}\text{Au}$

- 1 ABE のみ 2 ACD のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ 5 BCE のみ

〔解答〕 3

〔解説〕 (n, γ) 反応は発熱反応である。(n, p) や (n, α) は軽い標的核を除くと多くの場合吸熱反応である。

問10 高エネルギー加速器施設の鉄筋コンクリートの放射化で生成される可能性がある放射性核種の組合せは、次のうちどれか。

- A ^{54}Mn
- B ^{60}Co
- C ^{134}Cs
- D ^{152}Eu

- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕 5

〔解説〕 コンクリートの放射化では、 $^{151}\text{Eu}(\text{n}, \gamma)^{152}\text{Eu}$ や $^{59}\text{Co}(\text{n}, \gamma)^{60}\text{Co}$ によって生じる半減期の長い

(令和5年度) 第1種物理学

^{152}Eu (半減期 13.5 年)、 ^{60}Co (半減期 5.2 年) が問題になるが、このほかにも、 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ や $^{133}\text{Cs}(n,\gamma)^{134}\text{Cs}$ によって放射性核種が生じうる。

問 11 チェレンコフ効果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 荷電粒子が誘電体を通過する際に起こりうる。
- B 荷電粒子の速度が物質中における光の伝播速度より遅いときに観察される。
- C チェレンコフ光は荷電粒子の進行方向に対し円錐形状に前方へ放射される。
- D 荷電粒子が物質中を進むにつれ、チェレンコフ光の強度が増大する。

- 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〕 チェレンコフ効果は、高速の荷電粒子が物質中を通過する際、荷電粒子のつくる電場により物質中に分極がおり、粒子が通過し分極が消滅する際に光が放出される現象である。この現象では、物質が誘電体である必要があるため、A は正しい。また、荷電粒子の速度がその物質中の光の伝播速度を超える必要があるため、B は正しくない。チェレンコフ光は、粒子の進行方向と角度 θ をなす方向に放出される。 θ は、 c を光速、 n を屈折率とすると、 $\cos\theta = \frac{c}{nv}$ と与えられる。多くの場合 v が物質中の光の伝播速度 c/n より僅かに大きいので $\theta \approx 0$ となり、チェレンコフ光は前方に放出される。 c/n は v より遅いので、チェレンコフ光の波面は粒子を頂点とする円錐形状となる。したがって C は正しい。チェレンコフ光の強度(光子数) I は $1 - \left(\frac{c}{nv}\right)^2$ に比例する。物質中を進むにつれ荷電粒子がエネルギーを失い減速すると、 $1 - \left(\frac{c}{nv}\right)^2$ が小さくなり、チェレンコフ光の強度は減少する。D は正しくない。

問 12 それぞれ電荷 z_1 、 z_2 及び質量 M_1 、 M_2 をもつ 2 種の等速の粒子が同じ物質中で止まり、それぞ

れの飛程が R_1 、 R_2 とすると、次の関係式のうち正しい式はどれか。

1 $R_1 = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) R_2$

2 $R_1 = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) R_2$

3 $R_1 = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 \left(\frac{M_2}{M_1}\right) R_2$

4 $R_1 = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 \left(\frac{M_2}{M_1}\right) R_2$

5 $R_1 = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 R_2$

〔解答〕 1

〔解説〕 電荷 z_1 、 z_2 をもつ粒子は、重荷電粒子であると判断できる。したがって、粒子の速度を v として、2つの重荷電粒子の飛程 R_1 、 R_2 は、

$$R_1 \propto \frac{M_1}{z_1^2} v^2, \quad R_2 \propto \frac{M_2}{z_2^2} v^2$$

となる。 R_1 と R_2 の比をとると、

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{M_1}{z_1^2}\right) \left(\frac{M_2}{z_2^2}\right)^{-1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)$$

したがって、1の式が正しい。

問 13 鉛に入射する 20 MeV 電子のエネルギー損失に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 放射阻止能のみである。
- 2 衝突阻止能のみである。
- 3 放射阻止能と衝突阻止能が同程度で、原子核との散乱による損失は無視できる。
- 4 原子核との散乱による損失並びに放射阻止能も無視できないが、衝突阻止能が主である。
- 5 放射阻止能が衝突阻止能よりも大きく、原子核との散乱による損失は無視できる。

〔解答〕 5

〔解説〕 E [MeV] のエネルギーをもつ電子の物質中での放射阻止能 (S_{rad}) と衝突阻止能 (S_{col}) の比は、

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} \approx \frac{(E + mc^2)Z}{1600mc^2}$$

と与えられる。 mc^2 は電子の質量エネルギー、 Z は物質中の元素の原子番号である。 E に 20 MeV、 mc^2 に 0.51 MeV、 Z に 82 を代入すると、 $S_{\text{rad}}/S_{\text{col}} = 2.1$ なので、放射阻止能が衝突阻止能よりも

大きい。したがって、5が正しい。なお、5の後半にある「原子核との散乱による損失」が、制動放射線放出以外のエネルギー損失を指すとすると、電子と原子核の非弾性散乱が考えられるが、20 MeVの電子が原子核と非弾性散乱を起こす確率は小さく、原子核との散乱によるエネルギー損失は無視できる。

問14 1.0 MeVのエネルギーを持つ電子の密度 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ の水中における飛程[cm]に最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 0.1 2 0.2 3 0.4 4 0.8 5 1.2

〔解答〕 3

〔解説〕 電子の飛程(R)を g cm^{-2} の単位で表すと、 R は物質に依存せず、エネルギーが0.8 MeV以上では、

$$R = 0.542E - 0.133$$

と与えられる。 E に1.0 MeVを代入すると、 $R = 0.409 \text{ g cm}^{-2}$ 、これを水の密度で除してcmの単位に変換すると、0.409 cmが得られる。最も近い値は3の0.4ある。

問15 コリメートされた単色光子線が厚さ1.20 mmの鋼板を通過したとき、透過率は12.5%であった。この光子線に対する鋼板の線減弱係数[mm^{-1}]として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、ビルドアップ効果は無視する。

- 1 1.33 2 1.47 3 1.60 4 1.73 5 1.87

〔解答〕 4

〔解説〕 線減弱係数を ν [mm^{-1}]とする。単色光子線が厚さ1.20 mmの鋼板を通過したとき、透過率が12.5% (= 1/8)であったので、

$$e^{-\nu \times 1.20} = 1/8$$

両辺に対して自然対数(ln)をとると、

$$-\nu \times 1.20 = -3 \ln 2$$

ここで、 $\ln(1/8) = \ln(2)^{-3} = -3 \ln 2$ を使った。さらに整理すると、

$$\nu = 2.5 \ln 2 \approx 2.5 \times 0.69 = 1.725$$

したがって、最も近い値は4の1.73である。

問16 光電効果に関する記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 光子の粒子性を示すものである。
- 2 光電子の数は光子のエネルギーに比例しない。
- 3 光電子の運動エネルギーは光子のエネルギーよりも放出された軌道電子の電離エネルギー分だけ小さい。
- 4 相互作用の結果、光子は消失する。

5 光電子の放出角度分布は光子のエネルギーに依存しない。

〔解答〕 5

〔解説〕 光電効果は光の波動性で説明することは困難であるが、光が粒子性を持つという光量子仮説により説明されるため、1は正しい。光電効果では光子は全てのエネルギーを軌道電子に与え消滅し、軌道電子は原子の束縛を外れ光電子となって原子の外に飛び出す。光子のエネルギーは軌道電子が原子の束縛から離れるために使われ、残りが光電子の運動エネルギーとなる。したがって、光子のエネルギーが増えると光電子の運動エネルギーは増えるが光電子の数は変化しないので、2は正しい。ここで、軌道電子が原子の束縛から離れるために必要なエネルギーは軌道電子の電離エネルギーと等しいと言えるので、3は正しい。また、4も正しい。光電効果では、上記のエネルギー保存則とともに運動量保存則が成り立つ。光子と軌道電子の運動量は原子核と光電子に与えられる。運動量はベクトル量なので光電子は放出角度分布をもち、光子の運動量は光子のエネルギーに比例するため、光電子の放出角度分布は光子のエネルギーに依存する。5は正しくない。

問 17 オーজে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 オージェ電子放出と制動 X 線放出は競合して起こる。
- B オージェ電子のエネルギーは線スペクトルを示す。
- C 原子番号が大きい核種ほどオージェ収率（オージェ電子放出の割合）が大きくなる。
- D 内部転換後にオージェ電子が放出されることがある。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕 4

〔解説〕 励起状態にある原子がもつ余剰のエネルギーを X 線として放出する代わりに、余剰エネルギーにより軌道電子がオージェ電子として放出される。一方、制動 X 線放出は荷電粒子が電場の中で急に減速されたり進路を曲げられたりした際に放出される現象であり、励起状態にある原子とは関係しないので、A は正しくない。励起状態にある原子がもつ余剰のエネルギーは飛び飛びの決まった値となるため、B は正しい。原子番号が大きくなるにつれ特性 X 線のエネルギーは大きくなり放出率も大きくなる。逆に、エネルギーが大きくなるとオージェ電子の放出率は小さくなる。したがって、C は正しくない。内部転換では軌道電子がガンマ線の代わりに放出される。内殻の軌道電子に対して内部転換が起こると、内殻の空孔を埋める際に X 線またはオージェ電子が放出されるので、D は正しい。

問 18 1 MeV 光子の物質中での減弱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 線減弱係数は物質の原子数密度に比例する。
- B 線減弱係数の逆数は平均自由行程である。
- C 質量減弱係数は線減弱係数を物質の密度で除した値である。
- D 質量減弱係数は物質の種類にあまり依存しない。

- 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 5 ※表記ミス修正後の解答になります

〔解説〕 物質に入射された光子数は、光子と物質中の原子との散乱により物質中で減衰するため、線減弱係数は物質の原子数密度に比例する。Aは正しい。物質の原子数密度を N 、光子と原子の反応断面積を σ とすると、線減弱係数 μ は、 $\mu = \sigma N$ と表される。一方、平均自由行程は、 $(\sigma N)^{-1}$ なので、Bは正しい。質量減弱係数は線減弱係数を物質の密度で除した値であるので、Cは正しい。1 MeV 光子の物質中での減衰は主にコンプトン効果である。コンプトン散乱の断面積は原子番号 (Z) に比例する。一方、物質の密度は原子数密度と質量数の積 (NA) に比例する。したがって、質量減弱係数 (μ_m) は次のように概算できる。

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \propto \frac{ZN}{AN} = \frac{Z}{A}$$

ここで、 Z/A は原子番号によってあまり変化しない量なので、質量減弱係数は物質の種類にあまり依存しない値となるので、Dは正しい。

問19 静止している原子核と熱中性子の核反応で、質量 M_A の粒子 A と質量 M_B の粒子 B が放出されるとき、運動エネルギーの比 E_A/E_B を示す式は、次のうちどれか。ここで、A 及び B の運動エネルギーをそれぞれ E_A 及び E_B とする。また、熱中性子の運動エネルギーは、核反応の発熱エネルギーと比べて十分に小さく無視できるものとする。

- 1 M_A/M_B 2 M_B/M_A 3 $\frac{M_A}{M_A + M_B}$
- 4 $\frac{M_B}{M_A + M_B}$ 5 $\frac{M_A \times M_B}{(M_A + M_B)^2}$

〔解答〕 2

〔解説〕 静止している原子核と熱中性子の核反応であるので、反応前の運動量は反応後の運動量と比べて無視して良い。粒子 A と粒子 B の速度を V_A と V_B とすると、

$$E_A = \frac{1}{2} M_A V_A^2, \quad E_B = \frac{1}{2} M_B V_B^2$$

運動量保存則より、

$$0 = M_A V_A + M_B V_B$$

運動エネルギーの比 E_A/E_B は、

$$\frac{E_A}{E_B} = \frac{\frac{1}{2} M_A V_A^2}{\frac{1}{2} M_B V_B^2} = \frac{M_B (M_A V_A)^2}{M_A (M_B V_B)^2} = \frac{M_B}{M_A}$$

(令和5年度) 第1種物理学

問20 吸収線量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 シーベルト [Sv] という特別単位が用いられる。
- B 荷電粒子平衡が成立しているとき衝突カーマと等しくなる。
- C 中性子線には適用できない。
- D 制動放射により系外に逃れるエネルギーは含まれない。

1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕 4

〔解説〕 吸収線量は、放射線を照射により単位体積が吸収するエネルギー量である。その単位は J/kg で Gy と呼ばれる。Sv は吸収線量に線質係数を掛けた線量当量など生体が放射線により受けた影響の大きさを表す単位であるので、A は正しくない。カーマは非荷電粒子が単位質量の物質(系)に与えたエネルギーの総和であり、制動放射により系外に放出したエネルギーを除いたものを衝突カーマという。荷電粒子平衡が成立すると、放射線により生成した荷電粒子が系に持ち込むエネルギーと系から持ち出すエネルギーが等しくなるため、吸収線量は衝突カーマと等しくなる。したがって、B は正しい。吸収線量は物質と相互作用しエネルギーを付与する全ての放射線に適用できるので、C は正しくない。制動放射により系外に逃れるエネルギーは系に吸収されないため、吸収線量には含まれない。D は正しい。

問21 次の量と単位の組合せのうち、正しいものはどれか。

- A 質量阻止能 $J \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$
- B エネルギーフルエンス率 $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
- C 吸収線量 $J \cdot kg^{-1}$
- D LET $J \cdot m^{-1}$

1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 5

〔解説〕

A：正 質量阻止能： $J \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ (阻止能 $J \cdot m^{-1}$ を密度 $kg \cdot m^{-3}$ で除したもの)

B：正 エネルギーフルエンス率： $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (単位面積を通過するエネルギーをエネルギーフルエンス $J \cdot m^{-2}$ といい、単位時間あたりのエネルギーフルエンスをエネルギーフルエンス率という)

C：正 吸収線量： $J \cdot kg^{-1}$ (1 kg の物質が 1 J 吸収するときの吸収線量を 1 グレイ [$Gy = J \cdot kg^{-1}$] という)

D：正 LET (線エネルギー付与)： $J \cdot m^{-1}$ (物質に与える単位長さあたりのエネルギー)

問22 光電子増倍管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 光電陰極では放出される光電子数が入射光子数よりも少ない。

(令和5年度) 第1種物理学

- B 印加電圧が1,000 V以上であれば電子数の増倍率がほぼ一定である。
C 暗電流は温度に依存しない。
D 出力パルス波高はダイノードの段数に依存しない。
E 陽極出力端子では入力光子数に比例する波高の負パルスが生じる。
- 1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

〔解答〕 2

〔解説〕

- A：正 入射光子数に対する光電子数の放出割合は量子効率と呼ばれ一般に20-30%程度である。
B：誤 電子数の増倍率は電圧を上げるほど大きくなる。
C：誤 暗電流の原因の一つとして光電面やダイノードからの熱電子放出があり、冷却により抑制することができる。
D：誤 ダイノードの段数が増えると電子の増倍率（出力パルス波高）もカスケード的に増える。
E：正 陽極（アノード）は増幅された二次電子を収集して電流として取り出す電極であり、入力光子数に比例する波高の負パルスが得られる。

問23 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 熱蛍光線量計は、読み取り操作のために加熱した後は再び使用可能である。
B アルベド型線量計は、人体に入射した高速電子が散乱により体外に出てくる散乱電子を検出する個人線量計である。
C バブル線量計は、過熱状態にある媒質に荷電粒子がエネルギーを付与すると、準安定状態にある媒質の沸とう現象が生じることを利用する。
D ポリカーボネート、アリルジグリコールカーボネートは、プラスチックシンチレータとしてシンチレーション検出器に利用される。
- 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 熱蛍光線量計では放射線により生成する電子・正孔対が熱蛍光物質中の捕獲中心に捕獲され、照射の効果として蓄積される。これを加熱することで再結合させて放出される蛍光を読み取る。読み取り後は最初の状態に戻るため、再び使用可能となる。
B：誤 アルベド線量計は体内で散乱して線量計に達する中性子を検出する。
C：正 バブル線量計は泡箱と同じく、過熱状態の物質に荷電粒子が通ることによって気泡が生じることを利用した検出器である。
D：誤 ポリカーボネートやアリルジグリコールカーボネート（CR-39[®]）は固体飛跡検出器に使われる樹脂である。プラスチックシンチレータとしてはポリスチレンやポリビニルトルエンなどが基材として使われることが多い。

問 24 分解時間 $220 \mu\text{s}$ の GM 計数管を用いて計数したところ、5 秒間で 7.5×10^3 カウントを得た。

このとき真の計数率 [s^{-1}] として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 1,600 2 2,200 3 2,800 4 3,200 5 3,800

〔解答〕 2

〔解説〕 分解時間を τ 、得られた計数率を n とすると真の計数率 n_0 は以下の式で表せる。

$$n_0 = \frac{n}{1 - n\tau}$$

分解時間は $220 \mu\text{s}$ 、得られた計数率は $7.5 \times 10^3 / 5 = 1.5 \times 10^3 \text{ cps}$ なので、

$$\begin{aligned} n_0 &= \frac{1.5 \times 10^3}{1 - 1.5 \times 10^3 \times 220 \times 10^{-6}} \\ &\approx 2200 \end{aligned}$$

よって 2 が正しい。

問 25 トリチウムの放射能の測定に適している検出器として、正しいものの組合せはどれか。

- A ZnS(Ag)シンチレーション検出器
- B 液体シンチレーション検出器
- C BGO シンチレーション検出器
- D 通気型電離箱
- E 表面障壁型 Si 半導体検出器

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

〔解答〕 3

〔解説〕 トリチウムが放出するのは最大エネルギー 18.6 keV の低エネルギー β 線である。このような低エネルギー β 線を測定するには液体シンチレーション検出器や通気型電離箱のように β 線を遮るものがなく高効率に測定できる検出器が適している。よって 3 が正しい。

問 26 次のうち、Ge 半導体検出器におけるエネルギー分解能 [%] ($100 \times \text{FWHM} / E$) を理論的に表す式はどれか。ただし、検出器で吸収される放射線のエネルギーを E 、ゲルマニウムの $W(\epsilon)$ 値を W 、

ファノ因子を F とする。FWHM は半値幅を表す。

1 $235 \times \sqrt{\frac{W \cdot F}{E}}$

2 $235 \times \sqrt{\frac{F}{W \cdot E}}$

3 $235 \times \sqrt{\frac{E \cdot F}{W}}$

4 $100 \times \sqrt{\frac{W}{E \cdot F}}$

5 $100 \times \sqrt{\frac{E \cdot F}{W}}$

[解答] 1

[解説] 求めるエネルギー分解能は、標準偏差を σ とすると $FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2.35\sigma$ の関係より、 $235 \times \sigma/E$ である。実際に測定される分散 σ^2 を統計から予測される分散（ここでは電子-正孔対数なので E/W ）で除したものがファノ因子 F であり、以下の式で関係づけられる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{F \cdot E}{W}}$$

これは電子正孔対数で表されているので、 W を乗じてエネルギーに直すと $\sigma = \sqrt{F \cdot E \cdot W}$ となる。よって求めるエネルギー分解能は

$$235 \times \frac{\sigma}{E} = 235 \times \frac{\sqrt{F \cdot E \cdot W}}{E} = 235 \times \sqrt{\frac{F \cdot W}{E}}$$

となり、1 が正しい。

問 27 次のうち、検出器の使用に関して適切なものの組合せはどれか。

- A ^{210}Po 線源からの α 線スペクトルを測定するため、空乏層厚 $100 \mu\text{m}$ の表面障壁型 Si 半導体検出器を用いた。
- B ^{210}Pb 線源からの α 線及び β 線を分離計数するため、PR ガスをフローガスとした窓無し 2π 比例計数管を用いた。
- C ^{125}I 線源の放射能を測定するため、 $50 \text{ mm } \phi \times 50 \text{ mm}$ の井戸型 NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いた。
- D $^{241}\text{Am-Be}$ 線源からの中性子のエネルギースペクトルを測定するため、 BF_3 比例計数管を用いた。
- E ^{32}P 線源からの β 線のエネルギースペクトルを測定するため、PR ガスを充填した比例計数管を用いた。

(令和5年度) 第1種物理学

- 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACEのみ 4 BDEのみ 5 CDEのみ

〔解答〕 1

〔解説〕 A,B,C は正しい。D の BF_3 比例計数管は $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応で生成する荷電粒子を検出する検出器である。 ^7Li の励起状態を経由する反応や(n,p)反応など副反応も同時に起こる。同じ中性子エネルギーでも反応経路ごとにパルス波高は異なるため、エネルギースペクトルを測定するには不向きである。E の ^{32}P は最大エネルギー1.71 MeV の高エネルギー β 線を放出するため、ガス検出器はエネルギースペクトル測定に不向きである。

問 28 電離箱における電子・イオン対の再結合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 再結合の割合は、線量率に依存する。
B 再結合の割合は、電離箱への印加電圧に依存する。
C 電離電流が同じであれば、 α 線の場合も β 線の場合も再結合の割合は同じである。
D 平均電離電流が同じであっても、連続照射の場合とパルス照射の場合では再結合の割合は異なる。

- 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕 2

〔解説〕 再結合は電子・イオン対の密度が高くなるとその割合は多くなる。

- A：正 線量率が高くなると電子・イオン対の密度が高くなるため正しい。
B：正 印加電圧が低いと電子・イオンが電極に収集される前に再結合する割合が多くなる。
C：誤 α 線はLETが高く、局所的に多数の電子・イオン対を生成するため β 線と比べて再結合する割合が多くなる。
D：正 連続照射とパルス照射では、平均電離電流が同じであっても時間あたりの線量率は異なる。そのため電子・イオン対の密度が異なり、再結合の割合も異なる。

問 29 10 cm^3 の有感体積を有する ^3He 比例計数管で熱中性子を測定したところ、530 cpsの計数率が得られた。この時の熱中性子フルエンス率 $[\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。ここで、温度が 0°C のときの計数ガスの ^3He 圧力を0.20 MPa、 ^3He の熱中性子に対する核反応断面積を5,300 b (バーン)とする。また、計数ガス内での熱中性子フルエンスの吸収による減弱は無視できるものとする。

- 1 95 2 190 3 370 4 740 5 6,800

〔解答〕 2

〔解説〕 測定で得られる計数率を $Y[\text{cps}]$ 、断面積を $\sigma[\text{cm}^{-2}]$ 、熱中性子フルエンス率を $\phi[\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ 、標的核(ここでは ^3He 数)を N_T とすると、以下の式で表せる。

$$Y = \sigma \cdot \phi \cdot N_T$$

ここで N_T は ^3He 圧力が0.20 MPa(=2気圧)、有感体積 10 cm^3 であることから、

$$N_T = \frac{2 \times 10}{22400} \times 6.02 \times 10^{23} \approx \frac{3}{560} \times 10^{23}$$

と求められる。よって

$$\begin{aligned} \phi[\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] &= \frac{Y}{\sigma \cdot N_T} = \frac{530[\text{cps}]}{5300 \times 10^{-24}[\text{cm}^{-2}] \cdot 3/560 \times 10^{23}} \\ &= \frac{560}{3} \approx 190 \end{aligned}$$

となり、2が正しい。

問30 重量 $100 \pm 5\text{ g}$ の試料Xからの放射線を放射線検出器で測定した。バックグラウンドを差し引いて得た計数率は $100 \pm 10\text{ cps}$ であった。放射線検出器の計数効率が 0.10 ± 0.01 である場合、試料Xの放射能濃度 $10\text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ の不確かさ(標準偏差)を示す数値 $[\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、Xに含まれる放射性同位元素からの放射線の放出率を100%とする。

- 1 0.50 2 1.0 3 1.5 4 2.0 5 2.5

〔解答〕3

〔解説〕放射能濃度を $C[\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}]$ 、放射能の重量を $M[\text{g}]$ 、計数率を $Y[\text{cps}]$ 、計数効率を ε とすると、以下の式が成り立つ。

$$C = \frac{Y}{\varepsilon \cdot M}$$

乗算、除算の標準偏差の伝播式は以下で表せる。

$$\begin{aligned} (A \pm \sigma_A) \times (B \pm \sigma_B) &= (A \times B) \pm (A \times B) \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2} \\ (A \pm \sigma_A) / (B \pm \sigma_B) &= (A/B) \pm (A/B) \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2} \end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned} \sigma_C &= \frac{Y}{\varepsilon \cdot M} \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2} \\ &= 10 \times \sqrt{\left(\frac{10}{100}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.10}\right)^2 + \left(\frac{5}{100}\right)^2} \\ &= \frac{150}{100} = 1.5 \end{aligned}$$

となり、3が正しい。

問31 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 原子核の構成要素は、正の電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子という2種類の核子である。原子核の直径は 10^{-15} m 程度で、原子の直径と比べても非常に小さい。陽子と陽子の間にはお互いを反発させる **A** 力が働くが、小さい原子核内では陽子同士の距離が非常に小さくなるため、**A** 力も大きくなり原子核を安定させることができなくなってしまう。一方、核子には非常に短い距離にのみ作用する **B** 力が働き、お互いを強く結びつける。これにより、小さな原子核の内部に多数の陽子を束縛しておくことが可能となり、原子核として存在できる。質量数が小さな安定同位体では、原子核中の陽子と中性子の数はほぼ等しいが、質量数が増すにつれて陽子と中性子の数の比は変化し、原子番号 82 (鉛) の安定同位体では、中性子の数は陽子の数のほぼ **ア** 倍となる。

様々な核子や原子核の質量が精密に測定され、原子核の質量は構成する核子の質量の総和 **C** ことが分かった。原子核を構成する種々の核子の質量の総和と原子核の質量との差 Δm は **D** と呼ばれる。 Δm をエネルギーに換算した ΔE は原子核の **E** エネルギーと呼ばれ、光速度を c とすると、 ΔE は **イ** であらわされる。もし、重水素 ${}^2_1\text{H}$ と三重水素 ${}^3_1\text{H}$ が核融合反応を起こして中性子を放出した場合、反応前後の **E** エネルギーの差に相当する **ウ** MeV のエネルギーが放出される。ここで、質量 1 u は 1.66×10^{-27} kg、核子又は核種の質量は表のとおりとする。

表 核子又は核種とその質量

核子又は核種	質量[u]
中性子	1.0087
${}^1_1\text{H}$	1.0078
${}^2_1\text{H}$	2.0141
${}^3_1\text{H}$	3.0160
${}^3_2\text{He}$	3.0160
${}^4_2\text{He}$	4.0026

<A、Bの解答群>

- | | | |
|--------|-------|-------------|
| 1 重 | 2 核 | 3 ファンデルワールス |
| 4 クーロン | 5 表面張 | 6 ローレンツ |
| 7 復元 | 8 起電 | |

<アの解答群>

- | | | | | |
|--------|---------|--------|--------|---------|
| 1 0.1 | 2 0.2 | 3 0.25 | 4 0.33 | 5 0.5 |
| 6 0.75 | 7 1.0 | 8 1.2 | 9 1.25 | 10 1.33 |
| 11 1.5 | 12 1.75 | 13 2.0 | 14 2.5 | |

<Cの解答群>

(令和5年度) 第1種物理学

- 1 の約半分となる 2 の約 $\frac{2}{3}$ 倍となる 3 より小さい 4 と等しい
5 より大きい 6 のほぼ1.5倍 7 のほぼ2倍となる

<D、Eの解答群>

- 1 位置 2 内部 3 イオン化 4 熱
5 結合 6 静止 7 壊変 8 仕事関数
9 しきい 10 質量保存 11 質量効果 12 質量欠損
13 質量減少 14 質量増加

<イの解答群>

- 1 $\frac{1}{2} \Delta m \cdot c$ 2 $\Delta m \cdot c$ 3 $2\Delta m \cdot c$ 4 $\frac{1}{2} \Delta m \cdot c^2$
5 $\Delta m \cdot c^2$ 6 $2\Delta m \cdot c^2$

<ウの解答群>

- 1 0.511 2 0.662 3 1.02 4 1.17 5 1.33
6 2.20 7 2.50 8 3.27 9 5.49 10 9.40
11 14.1 12 17.6 13 19.2 14 26.2 15 29.1

[解答] I A-4 B-2 ア-11 C-3 D-12 E-5 イ-5 ウ-12

[解説]

ア：鉛の安定同位体で、天然同位体存在度が最も大きい核種は $^{208}_{82}\text{Pb}$ (52.4%)で、その他には $^{206}_{82}\text{Pb}$ (24.1%)、 $^{207}_{82}\text{Pb}$ (22.1%)、 $^{204}_{82}\text{Pb}$ (1.4%)がある。

ウ：重水素 ^2_1H と三重水素 ^3_1H が反応して中性子 n を放出する核融合反応の表式は



で表される。この反応前の質量の総和と反応後の質量の総和との差は表より、

$$(2.0141 + 3.0160) - (4.0026 + 1.0087) = 0.0188 \text{ [u]}$$

である。この質量の差は、反応前の質量欠損の和と反応後の質量欠損の和との差に等しく、これをエネルギーに変換した値が反応前後の結合エネルギーの差に相当する。光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ であるから、この結合エネルギーの差は

$$0.0188 \times (1.66 \times 10^{-27}) \times (3.0 \times 10^8)^2 = 2.81 \times 10^{-12} \text{ [J]}$$

ここで、 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ であるから、

$$\frac{2.81 \times 10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.76 \times 10^7 \text{ [eV]} = 17.6 \text{ [MeV]}$$

II 中性子のエネルギーを精度良く測定する方法の1つとして、中性子が飛行した距離と時間を計測して得られた速度から、中性子のエネルギーを計算する F 法がある。加速器で発生させた極短時間のパルス状の荷電粒子ビームをターゲットに照射して、発生させたパルス状の中性子を線源として利用する場合、F 法によるエネルギー測定が適用できる。

ここで、パルス状の荷電粒子が中性子発生用のターゲットに入射して、中性子と γ 線が同時に放

出され、ターゲットから距離 l の位置にある検出器で観測された γ 線と中性子の時間差が Δt であった場合を考える。ターゲットで発生した γ 線が検出器に到達するまでに要する時間は $\boxed{\text{エ}}$ となり、この時間を考慮すると中性子の速度 v は、

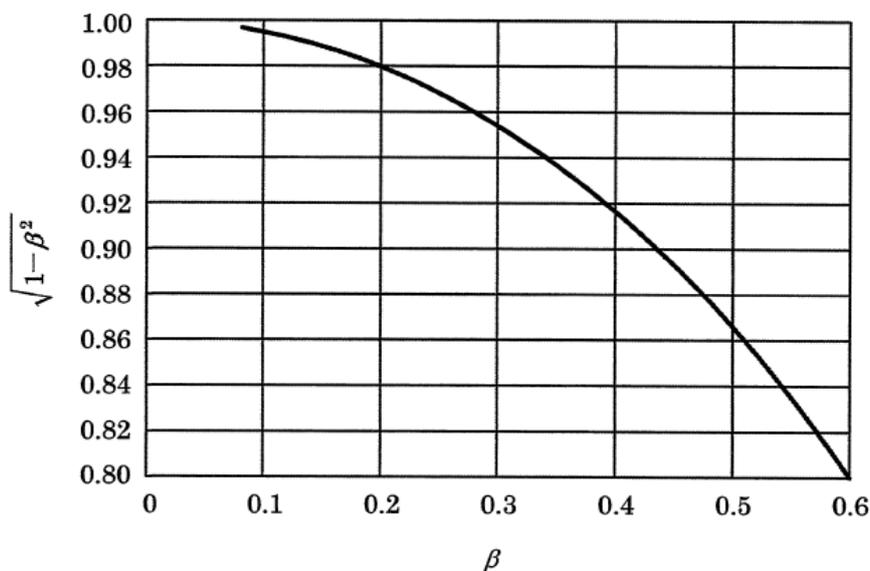
$$v = \boxed{\text{オ}}$$

となる。中性子の質量を m_n 、中性子の全エネルギーを E 、中性子の速度の光速に対する比 v/c を β とすると、相対論的立場から、

$$E = \boxed{\text{カ}}$$

となる。また、中性子の運動エネルギーは、全エネルギー E から中性子の $\boxed{\text{G}}$ エネルギーを差し引くことにより求められる。

ターゲットから検出器までの距離 l が 5.0 m、 γ 線と中性子の時間差 Δt が 67 ns であったとき、 $\sqrt{1-\beta^2}$ は図より $\boxed{\text{キ}}$ となり、中性子の運動エネルギーは、 $\boxed{\text{ク}}$ MeV となる。



図

<Fの解答群>

- | | | | |
|------------|------------------|----------|----------|
| 1 質量分析 | 2 γ 線共鳴吸収 | 3 チェレンコフ | 4 放射化分析 |
| 5 アンチコンプトン | 6 同時計数 | 7 減速時間測定 | 8 飛行時間測定 |
| 9 モンテカルロ | | | |

<エ、オの解答群>

- | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 $\frac{l}{c}$ | 2 $\frac{l}{v}$ | 3 $\frac{l}{\Delta t}$ | 4 $\frac{c}{l}$ |
| 5 $\frac{v}{l}$ | 6 $l \cdot c$ | 7 $l \cdot v$ | 8 $l \cdot \Delta t$ |
| 9 $\frac{l - \frac{l}{c}}{\Delta t}$ | 10 $\frac{l + \frac{l}{c}}{\Delta t}$ | 11 $\frac{l}{\Delta t - l \cdot c}$ | 12 $\frac{l}{\Delta t - \frac{c}{l}}$ |
| 13 $\frac{l}{\Delta t + \frac{c}{l}}$ | 14 $\frac{l}{\Delta t - \frac{l}{c}}$ | 15 $\frac{l}{\Delta t + \frac{l}{c}}$ | |

<カの解答群>

- | | | | |
|---|---------------------------------------|--|--|
| 1 $m_n c^2 \cdot \beta^2$ | 2 $\frac{m_n c^2}{\beta^2}$ | 3 $m_n c^2$ | 4 $\frac{1}{2} m_n v^2$ |
| 5 $\frac{1}{2} m_n v^2 + m_n c^2$ | 6 $\frac{m_n c^2}{2\beta^2}$ | 7 $\frac{m_n c^2}{2\sqrt{1-\beta^2}}$ | 8 $\frac{m_n v^2}{2\sqrt{1-\beta^2}}$ |
| 9 $\frac{m_n c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ | 10 $\frac{m_n v^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ | 11 $\frac{2m_n c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ | 12 $\frac{2m_n v^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ |
| 13 $\frac{1}{2} m_n v^2 \cdot \sqrt{1-\beta^2}$ | 14 $m_n c^2 \cdot \sqrt{1-\beta^2}$ | 15 $\left(\frac{1}{2} m_n v^2 + m_n c^2\right) \cdot \sqrt{1-\beta^2}$ | |

<Gの解答群>

- | | | | | |
|------|------|--------|-------|------|
| 1 位置 | 2 内部 | 3 イオン化 | 4 熱 | 5 結合 |
| 6 静止 | 7 壊変 | 8 仕事関数 | 9 しきい | |

<キの解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 0.80 | 2 0.82 | 3 0.84 | 4 0.86 | 5 0.88 |
| 6 0.90 | 7 0.91 | 8 0.92 | 9 0.93 | 10 0.94 |
| 11 0.95 | 12 0.96 | 13 0.97 | 14 0.98 | 15 0.99 |

<クの解答群>

- | | | | | |
|--------|--------|-------|-------|--------|
| 1 0.51 | 2 0.66 | 3 1.0 | 4 1.2 | 5 1.5 |
| 6 2.2 | 7 2.5 | 8 3.3 | 9 5.5 | 10 9.4 |
| 11 14 | 12 16 | 13 19 | 14 26 | 15 29 |

〔解答〕 II F-8 エ-1 オ-15 カ-9 G-6 キ-14 ク-13

〔解説〕

オ：ターゲットで発生した中性子が検出器に到達するまでに要する時間は $\Delta t + \frac{l}{c}$ であるから、中性子

$$\text{の速度は } v = \frac{l}{\Delta t + \frac{l}{c}}$$

カ：中性子の運動量を p とすると、 $\beta = v/c$ であるから、

$$p = \frac{m_n v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_n \beta c}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

したがって、

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{p^2 c^2 + m_n^2 c^4} \\ &= \sqrt{\frac{m_n^2 \beta^2 c^2}{1 - \beta^2} c^2 + m_n^2 c^4} \\ &= m_n c^2 \sqrt{\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} + 1} \\ &= \frac{m_n c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{aligned}$$

キ：オより、 $v = \frac{l}{\Delta t + \frac{l}{c}}$ であるから、

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{l}{\Delta t \times c + l} = \frac{5.0}{(67 \times 10^{-9}) \times (3.0 \times 10^8) + 5.0} = 0.2$$

よって、図より、 $\sqrt{1 - \beta^2} = 0.98$

ク：中性子の質量が $1.0087u$ で、 $1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$ であることから、中性子の静止エネルギー $m_n c^2$ の値は、

$$m_n c^2 = \frac{1.0087 \times (1.66 \times 10^{-27}) \times (3.0 \times 10^8)^2}{1.6 \times 10^{-19}} = 9.4 \times 10^8 \text{ [eV]}$$

したがって、中性子の運動エネルギーの値は、

$$\begin{aligned} E - m_n c^2 &= \frac{m_n c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_n c^2 \\ &= m_n c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \\ &= (9.4 \times 10^8) \times \left(\frac{1}{0.98} - 1 \right) \\ &= 1.9 \times 10^7 \text{ [eV]} = 19 \text{ [MeV]} \end{aligned}$$

問 32 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 γ 線や X 線が軌道電子と衝突し、長波長側にシフトして散乱される現象を A とよび、光の

Bを示す過程として知られる。この過程は、電子にエネルギーを与えることから、光子の原子系による**C**散乱であるが、一般に軌道電子の結合エネルギーは入射光子エネルギーに比べて無視できるので、光子と自由電子との**D**衝突として扱うことができる。

図1に示すように、エネルギー E_0 の入射光子が位置Oで静止している電子(質量を m とする)に衝突し、入射方向に対して、光子はエネルギー E 、角度 θ で散乱され、電子は運動エネルギー T 、角度 ϕ で反跳される場合を考える。

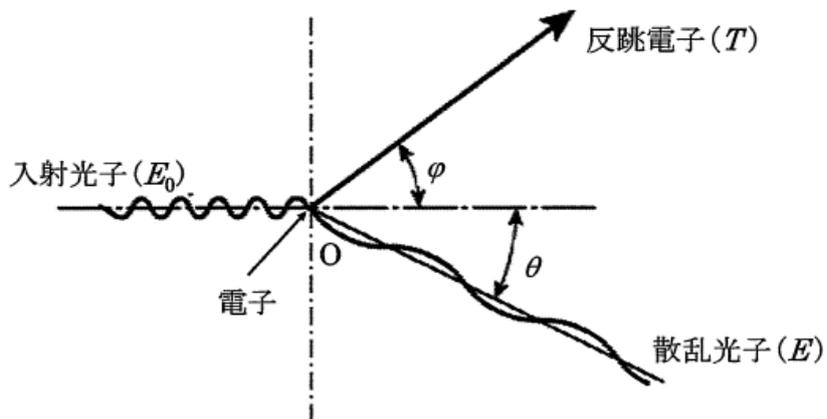


図1

ここで、反跳電子の運動量を p 、光速を c 、プランク定数を h とすると、光子の入射方向及び垂直方向に対する運動量保存則、並びにエネルギー保存則は、

$$\frac{E_0}{c} = \boxed{\text{E}} \quad \dots (1)$$

$$0 = \boxed{\text{F}} \quad \dots (2)$$

$$E_0 = E + T \quad \dots (3)$$

となる。これらの式、並びに $(pc)^2 = T(T + 2mc^2)$ なる関係を用いて次式

$$E = \frac{E_0}{1 + E_0 \boxed{\text{G}} x} \quad \dots (4)$$

を得る。ここで $x = (1 - \cos\theta)$ である。(4)式より散乱光子と入射光子の波長差 $\Delta\lambda$ [m]を求めると、

$$\Delta\lambda = \boxed{\text{H}} x \quad \dots (5)$$

となる。ただし、 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 、 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ とする。

<A~Dの解答群>

- | | | | |
|----------|------------|-----------|----------|
| 1 トムソン散乱 | 2 ラザフォード散乱 | 3 コンプトン効果 | 4 オージェ効果 |
| 5 光電効果 | 6 電子対生成 | 7 波動性 | 8 粒子性 |
| 9 干渉性 | 10 弾性 | 11 非弾性 | 12 共鳴 |

13 線形性

<E、Fの解答群>

1 $-\frac{h}{c}\cos\theta + p\cos\varphi$

2 $\frac{h}{c}\cos\theta + p\cos\varphi$

3 $-\frac{E}{c}\cos\theta + p\cos\varphi$

4 $\frac{E}{c}\cos\theta + p\cos\varphi$

5 $-\frac{E}{c}\sin\theta + p\cos\varphi$

6 $\frac{E}{c}\sin\theta + p\cos\varphi$

7 $-\frac{h}{c}\sin\theta + p\sin\varphi$

8 $\frac{h}{c}\sin\theta + p\sin\varphi$

9 $-\frac{E}{c}\sin\theta + p\sin\varphi$

10 $\frac{E}{c}\sin\theta + p\sin\varphi$

<Gの解答群>

1 $\frac{1}{mc}$

2 $\frac{2}{mc}$

3 $\frac{4}{mc}$

4 $\frac{h}{mc}$

5 $\frac{2h}{(mc)^2}$

6 $\frac{1}{mc^2}$

7 $\frac{2}{mc^2}$

8 $\frac{4}{mc^2}$

9 $\frac{h}{mc^2}$

10 $\frac{2h}{mc^2}$

11 $\frac{1}{2mc}$

12 $\frac{1}{2mc^2}$

13 $\frac{1}{4mc}$

14 $\frac{1}{4mc^2}$

<Hの解答群>

1 2.0×10^{-14}

2 2.4×10^{-14}

3 2.8×10^{-14}

4 3.2×10^{-14}

5 2.0×10^{-12}

6 2.4×10^{-12}

7 2.8×10^{-12}

8 3.2×10^{-12}

9 2.0×10^{-10}

10 2.4×10^{-10}

11 2.8×10^{-10}

12 3.2×10^{-10}

〔解答〕 I A-3 B-8 C-11 D-10 E-4 F-9 G-6 H-6

〔解説〕

G: (1) 式より、 $p\cos\varphi = \frac{E_0}{c} - \frac{E}{c}\cos\theta$

また (2) 式より、 $p\sin\varphi = \frac{E}{c}\sin\theta$ であるから、

$$(p\sin\varphi)^2 + (p\cos\varphi)^2 = \left(\frac{E}{c}\sin\theta\right)^2 + \left(\frac{E_0}{c} - \frac{E}{c}\cos\theta\right)^2$$

$$p^2(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi) = \frac{E^2}{c^2}(\sin^2\theta + \cos^2\theta) - \frac{2E_0E}{c^2}\cos\theta + \frac{E_0^2}{c^2}$$

$$p^2c^2 = E^2 - 2E_0E\cos\theta + E_0^2$$

ここで (3) 式より $T = E_0 - E$ であるから、 $(pc)^2 = T(T + 2mc^2)$ の関係より

$$p^2 c^2 = (E_0 - E)(E_0 - E + 2mc^2)$$

したがって、

$$E^2 - 2E_0 E \cos \theta + E_0^2 = (E_0 - E)(E_0 - E + 2mc^2)$$

$$E^2 - 2E_0 E \cos \theta + E_0^2 = E_0^2 - 2E_0 E + E^2 + 2E_0 mc^2 - 2Emc^2$$

$$2Emc^2 + 2E_0 E - 2E_0 E \cos \theta = 2E_0 mc^2$$

$$Emc^2 + E_0 E(1 - \cos \theta) = E_0 mc^2$$

ここで、 $x = (1 - \cos \theta)$ であるから

$$Emc^2 + E_0 Ex = E_0 mc^2$$

$$E = \frac{E_0 mc^2}{mc^2 + E_0 x} = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0 x}{mc^2}}$$

H: $E = h\nu$ 、 $\lambda = \frac{c}{\nu}$ であるから、

$$\Delta\lambda = \frac{hc}{E} - \frac{hc}{E_0} = hc \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_0} \right)$$

(4) 式より、

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= hc \left(\frac{1 + \frac{E_0 x}{mc^2}}{E_0} - \frac{1}{E_0} \right) \\ &= hc \times \frac{x}{mc^2} \\ &= \frac{h}{mc} x \\ &= \frac{6.6 \times 10^{-34}}{(9.1 \times 10^{-31}) \times (3.0 \times 10^8)} x \\ &= 2.4 \times 10^{-12} x \end{aligned}$$

II ある線源から放出された単色 γ 線が図1の位置 O にある電子によって散乱される時、散乱 γ 線エネルギー [MeV] の逆数 $1/E$ と x の関係をプロットすると図2となった。この結果から、入射 γ 線のエネルギーは ア MeV であり、反跳電子のエネルギーが最大となるのは $\theta =$ I 度 のときで、そのエネルギーは イ MeV である。この入射 γ 線が最初に $\theta = 60$ 度で散乱され、さらに $\theta = 90$ 度で散乱される時、2回散乱された γ 線のエネルギーは ウ MeV となる。

次に、線源をエネルギー 0.84 MeV の単色 γ 線を放出する線源に替えた。このとき、 $\theta = 90$ 度における散乱 γ 線エネルギーは エ MeV となる。 $\theta = 60$ 度における波長差 $\Delta \lambda_1$ に対する $\theta = 90$ 度における波長差 $\Delta \lambda_2$ の比 ($\Delta \lambda_2 / \Delta \lambda_1$) は オ となる。また、 $\theta = 90$ 度 のときの電子の反跳角 ϕ は、三角関数数値表からおおよそ カ 度 となる。

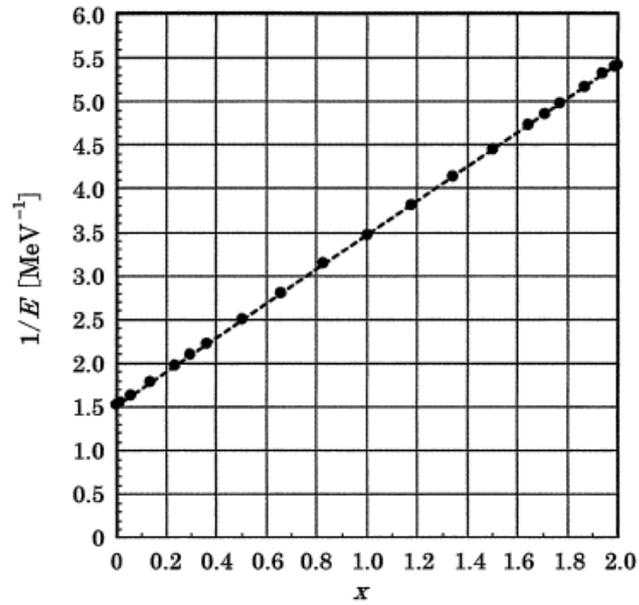


図 2

三角関数数値表

φ [度]	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$
0	0.00	1.00
10	0.17	0.98
20	0.34	0.94
30	0.50	0.87
40	0.64	0.77
45	0.71	0.71
50	0.77	0.64
60	0.87	0.50
70	0.94	0.34
80	0.98	0.17
90	1.00	0.00

<ア～ウの解答群>

1 0.11 2 0.22 3 0.35 4 0.49 5 0.57
 6 0.67 7 0.79 8 0.89 9 1.0 10 1.1
 11 1.2

<Iの解答群>

1 0 2 30 3 45 4 60 5 90
 6 120 7 135 8 150 9 180

(令和5年度) 第1種物理学

<エの解答群>

1 0.15 2 0.24 3 0.32 4 0.44 5 0.55
6 0.65 7 0.75

<オの解答群>

1 0.25 2 0.50 3 0.75 4 1.0 5 1.3
6 1.5 7 1.8 8 2.0 9 2.3 10 2.7

<カの解答群>

1 0 2 10 3 20 4 30 5 40
6 45 7 50 8 60 9 70 10 80

[解答] II ア-6 イ-4 ウ-2 I-9 エ-3 オ-8 カ-3

[解説]

ア：(4) 式で $x = 0$ のとき $E = E_0$ であり、また図2では $x = 0$ のとき $1/E = 1.5$ [MeV^{-1}] であるから、

$$E_0 = \frac{1}{1.5} = 0.67 \text{ [MeV]}$$

I：(3) 式より反跳電子の運動エネルギー T が最大となるのは E が最小、すなわち $1/E$ が最大となるときであり、また図2で $1/E$ が最大となるのは $x = (1 - \cos \theta) = 2.0$ のときある。したがって、 $\cos \theta = -1.0$ であるから $\theta = 180^\circ$ となる。

イ：図2で $x = 2.0$ のとき $1/E = 5.5$ [MeV^{-1}] であるから、(3) 式より

$$T = E_0 - E = 0.67 - \frac{1}{5.5} = 0.49 \text{ [MeV]}$$

ウ：入射 γ 線が最初に $\theta = 60^\circ$ で散乱された後の γ 線のエネルギーを E_1 、さらに $\theta = 90^\circ$ で散乱された後の γ 線のエネルギーを E_2 とする。 $\theta = 60^\circ$ のとき、

$$x = (1 - \cos \theta) = 1 - 0.5 = 0.5$$

このとき図2より $1/E = 2.5$ [MeV^{-1}] であるから、

$$E_1 = \frac{1}{2.5} = 0.4 \text{ [MeV]}$$

$\theta = 90^\circ$ のとき、

$$x = (1 - \cos \theta) = 1 - 0 = 1.0$$

であり、また電子の静止エネルギー $mc^2 = 0.511$ [MeV] であるから、(4) 式より、

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1 x}{mc^2}} = \frac{0.4}{1 + \frac{0.4 \times 1.0}{0.511}} = 0.22 \text{ [MeV]}$$

エ： $\theta = 90^\circ$ のとき $x = 1.0$ であり、また電子の静止エネルギー $mc^2 = 0.511$ [MeV] であるから、(4) 式より、

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0 x}{mc^2}} = \frac{0.67}{1 + \frac{0.67 \times 1.0}{0.511}} = 0.32 \text{ [MeV]}$$

オ：(5) 式より、

$$(\Delta\lambda_2/\Delta\lambda_1) = \frac{1 - \cos 90^\circ}{1 - \cos 60^\circ} = \frac{1 - 0}{1 - 0.5} = 2.0$$

カ: $\theta = 90^\circ$ のとき (1) 式と (2) 式より、

$$\frac{E_0}{c} = \frac{E}{c} \cos 90^\circ + p \cos \varphi = p \cos \varphi$$

$$0 = -\frac{E}{c} \sin 90^\circ + p \sin \varphi = -\frac{E}{c} + p \sin \varphi$$

この2式より、

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{p \sin \varphi}{p \cos \varphi} = \frac{E/c}{E_0/c} = \frac{E}{E_0}$$

ここで、 $E = 0.32$ [MeV]、 $E_0 = 0.84$ [MeV]であるから

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{0.32}{0.84} = 0.38$$

三角関数数値表において $\varphi = 20^\circ$ のとき、

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{0.34}{0.94} = 0.36$$

となり、最も近い値となる。