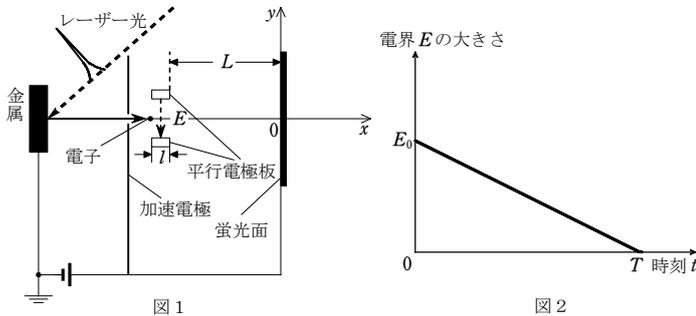


1 [2001 早稲田大]

金属表面にレーザー光を照射して、光電効果により取り出した光電子を加速し、さらに電界(電場)によって進行方向を変えることができるような装置を考える(図1)。この図中の平行電極板間に、図2のように時間とともに変化する電界がかかっている。次の問いに答えよ。ただし、必要に応じて以下の物理定数、単位換算等の数値を用いて計算せよ。

プランク定数:  $6.6 \times 10^{-34}$  J·s, 光の速さ:  $3.0 \times 10^8$  m/s  
 電子の質量:  $9.1 \times 10^{-31}$  kg, 電子の電荷:  $-1.6 \times 10^{-19}$  C,  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$  J



- レーザー光が照射される金属表面の仕事関数が  $4\text{eV}$  であるとき、この金属から光電効果によって電子を取り出すためにレーザー光の波長  $\lambda$  が満たさなければならない条件を書け。
- この金属に、光電効果を起こすことのできるぎりぎりの波長のレーザー光を照射し、電子を発生させる。ここで発生した電子に  $182\text{V}$  の電位を加速電極によって進行方向に加え、電子を加速する。加速後の電子の速度はいくらか。
- 図1に示すような小さな平行電極板間のすきまの中央に、この電子(速度を  $v_0$  [m/s] とする)を入射させる。この方向を  $x$  軸にとり、垂直方向に  $y$  軸を図のように選ぶ。電子が平行電極板の出口に到達したときの  $y$  方向の速度(単位は [m/s]) はどのように表されるか。

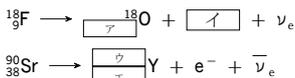
ただし、平行電極板内の電界の向きを  $y$  軸の負の向きとし、電子の質量を  $m$  [kg]、電荷を  $-e$  [C] とする。また、平行電極板の長さを  $l$  [m] とし、 $x$  軸方向の速度  $v_0$  [m/s] の電子が電極内を通過中に感じる電界の変化は無視できるものとし、通過中の電界の大きさを、電子が電極に入射したときの値  $E_1$  [V/m] で近似して考えよ。

- 平行電極板間の電界で速度の変化を受けた電子が、その後、電極の出口から  $L$  [m] 離れた位置におかれた蛍光面に到達する。(3)と同様、平行電極板に入射したときの電子の  $x$  軸方向の速度を  $v_0$ 、平行電極板に電子が入射したときの電界の大きさを  $E_1$  [V/m] と書くこととする。このとき、電子が蛍光面上に到達したときの位置  $y$  [m] を表す式を書け。ただし、 $y=0$  は、図1に示すように電子が平行電極板に入射したときの位置とする。
- きわめて短いパルス状の光を続けて2回発生させられるレーザー装置からの光と光電効果を利用して、電子を2回発生させる。はじめの電子がある時刻  $t_1$  に電極板間に入射し、 $t_1$  から  $\Delta t$  秒経過した時刻に次の電子が電極板間に入射した。このとき、2番目の電子が最初の電子より  $1.6\text{cm}$  下方で蛍光面を光らせた。 $T = 1 \times 10^{-7}$  (s),  $L = 1$  (m),  $l = 1$  (cm),  $v_0 = 1 \times 10^7$  (m/s) とし、これら2つの電子の入射時刻が  $0$  と  $T$  の間にあるとしたとき、 $\Delta t$  はどのような値となるか。  
 $t=0$  における電界の大きさ  $E_0$  は  $9.1 \times 10^3$  V/m であったとする。

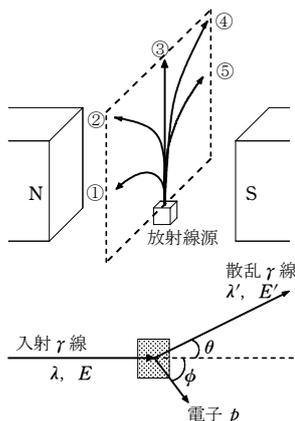
2 [2014 慶応義塾大]

放射線に関する次の問いに答えよ。

- 以下の核反応式における空欄 [ア] ~ [エ] を埋めよ。



- 図のように放射線源と磁石を真空中に設置した。以下の(a)~(d)の各放射線は鉛直上向きに飛びだし、①~⑤のいずれかの異なる進路を通った。このとき、各放射線の進路を①~⑤の記号で答えよ。



- $\alpha$  線
- $\beta^+$  線
- $\beta^-$  線
- $\gamma$  線

- $\gamma$  線が物質中に入射し、コンプトン効果により電子が散乱された。図のように入射  $\gamma$  線と散乱  $\gamma$  線の波長をそれぞれ、 $\lambda, \lambda'$ 、エネルギーを  $E, E'$  とし、散乱された電子の質量を  $m$ 、運動量を  $p$  とする。また、入射  $\gamma$  線に対する散乱角を  $\gamma$  線と電子

でそれぞれ、 $\theta, \phi$  とし、プランク定数を  $h$ 、光の速さを  $c$  とする。

- $\gamma$  線の入射方向とそれに直角な方向について運動量保存の法則を適用すると以下のようになる。 $\lambda, \lambda', h$  を使って、空欄を埋めよ。

$$\text{[ア]} = \text{[イ]} \cos \theta + p \cos \phi$$

$$0 = \text{[イ]} \sin \theta - p \sin \phi$$

- 散乱  $\gamma$  線のエネルギーは、

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{mc^2}(1 - \cos \theta)}$$

によって与えられる。このとき、物質中で散乱された電子のエネルギーが最大になる角度  $\theta$  を求めよ。

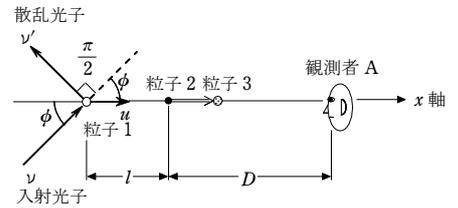
- ${}^{137}\text{Cs}$  から発生する  $\gamma$  線のエネルギーは  $662\text{keV}$  である。(b)の条件の場合、電子に与えられるエネルギーを  $\text{keV}$  単位を使って有効数字2桁で求めよ。ここで、 $mc^2 = 511\text{keV}$  とする。

3 [2003 京都市]

次の文を読んで、文中の [ ] に適した式または数値を記せ。

[ ] はすでに [ ] で与えられたものと同じものを表す。ただし、プランク定数を  $h$ 、光の速さを  $c$  とする。

振動数  $\nu$  の光子のエネルギーは [ア]、運動量は [イ] である。真空中で、振動数  $\nu$  のガンマ線の光子が、原点に静止している質量  $m$  の粒子1によって散乱されて、光子の振動数は  $\nu'$



になり、粒子1は一定の速度  $u$  で動き始めた。このとき、粒子1の内部エネルギーに変化はなかった。速度  $u$  の方向を  $x$  軸の正の方向にとると、図に示すように、入射光子の方向と散乱光子の方向のなす角度は  $\frac{\pi}{2}$  であり、入射光子の方向と粒子1の速度  $u$  のなす角度は  $\phi$  であった。ここで  $\phi$  は  $\frac{\pi}{4}$  より少し小さい角度とする。入射光子の方向の運動量の保存則から [イ] = [ウ] となる。また、散乱光子の方向の運動量の保存則から同様の式が得られ、エネルギー保存則も成り立つ。その結果、粒子1の速度  $u$ 、入射光子の振動数  $\nu$  と散乱光子の振動数  $\nu'$  は、 $\phi, m, c$  と  $h$  を用いて表すと、それぞれ、 $u = \text{[エ]}$ 、 $\nu = \text{[オ]}$ 、 $\nu' = \text{[カ]}$  と書けることがわかる。

以下の問題で粒子1の速度が必要になったときは  $u$  のままでよい。図に示すように  $x=l$  に質量  $m$  の粒子2が静止していた。時刻  $t_c$  に粒子1は粒子2と衝突して、両粒子は合体して動き出した。合体した粒子を粒子3とよぶ。粒子3の速度は粒子1の速度  $u$  を使って表すと [キ] であり、衝突の結果、内部エネルギー [ク] が発生した。粒子3は時刻  $t_c$  から一定の速度で動きながら、この内部エネルギーを使って、赤外線を大量に四方八方に連続的に放射し始めた。この放射は時刻  $t_c + T$  には完全に停止した。図に示すように、地点  $x=l+D$  で静止していた観測者Aが、粒子3からの放射を計測していた。時刻  $t_c$  と時刻  $t_c + T$  に粒子3からAに向けて放射された赤外線は、それぞれ時刻 [ケ] と時刻 [コ] にAに達する。したがって、観測者Aが粒子3からの赤外線の放射を受光していた時間間隔は [サ] となる。

なお、赤外線は電磁波の一種であり、放射体の速度によらず、真空中を光の速さ  $c$  で進む。また粒子3は、原点と観測者Aの間にあるとする。

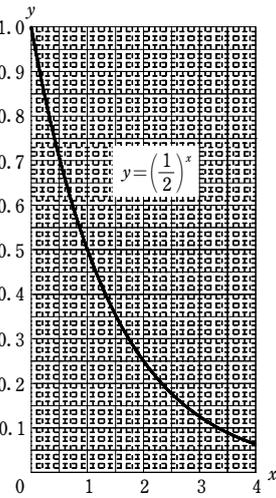
4 [1995 東京大]

炭素の原子番号は6であるが、自然界には質量数が12の $^{12}\text{C}$ と質量数が13の $^{13}\text{C}$ の2種類の安定な同位体が存在する。このほかに質量数14の $^{14}\text{C}$ がごく微量あるが、これは放射性的同位体で半減期5730年で $\beta$ 崩壊をする。 $^{14}\text{C}$ は宇宙線によってつくられるが、つくられる量と $\beta$ 崩壊によって失われる量がつりあっていて、大気中に場所によらず一定の割合で含まれている。この割合は全炭素原子核数の $10^{-12}$ 程度であり、大気中の炭素1g当たり毎分15.3個の $\beta$ 崩壊が起こる量に相当する。この割合は昔も今も同じであると考えられている。生きている植物は光合成により大気からつねに炭素を取りこんでいる。この炭素は食物連鎖によって動物にも取りこまれる。したがって、 $^{14}\text{C}$ は生きている生物体にも大気中と同じ割合でつねに存在することになる。生物が死ぬと、その時点から $^{14}\text{C}$ を新しく取りこめなくなるので、生物体内における $^{14}\text{C}$ の割合は $^{14}\text{C}$ の半減期にしたがって減少する。以下の設問に答えよ。

- (1)  $^{14}\text{C}$ が $\beta$ 崩壊してできる原子核の原子番号と質量数はそれぞれいくらか。
- (2) ある古い生物の死体に含まれる炭素を調べてみると、炭素1g当たり毎分1.7個の $^{14}\text{C}$ の $\beta$ 崩壊が起きている。この生物死体中の総炭素原子核数に占める $^{14}\text{C}$ の数の割合は、大気中での割合と比べて何%になっているか。
- (3) この生物はおよそ何年前に死んだものか。

図1に関数 $y = \left(\frac{1}{2}\right)^x$ のグラフを示す。  
このグラフから必要に応じて数値を読み取ってよい。

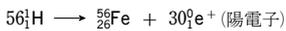
- (4) 半減期を単位にしてはかったある時間(たとえば半減期の10万分の1)の間に崩壊する原子核数をはかり始めの原子核数で割った割合は、どのような放射性的同位体でも半減期と無関係に一定であることを示せ。
- (5) 1秒間に崩壊する原子核の数を放射能の強さという。三重水素 $^3\text{H}$ も放射性的同位体でやはり $\beta$ 崩壊をする。いま、 $^{14}\text{C}$  1.0gと、 $^3\text{H}$  0.46mgの放射能の強さを比べたら、互いに同じであった。 $^3\text{H}$ の半減期を求めよ。 $^3\text{H}$ の質量を3.0u、 $^{14}\text{C}$ の質量を14uとせよ。



5 [2004 東京工業大]

太陽とほぼ同じ質量をもちながら半径は10kmほどしかない高密度の星(中性子星)には、普通の恒星(伴星とよぶ)と万有引力で引きあいながらきわめて近い距離で周回運動するものがある。伴星からこの中性子星に降り積もった水素やヘリウムが核融合反応を起こして爆発することがある。この現象を考察する。

- (1) 伴星から流れ出した物質が中性子星に落下する。水素原子が無遠慮から中性子星に落下すると考えて、表面に達したときの運動エネルギーを求めよ。ただし、水素原子は無遠慮では静止していたとする。また、中性子星の半径を $R$ 、中性子星の質量を $M$ 、水素原子の質量を $m_{\text{H}}$ 、万有引力定数を $G$ とする。
- (2) 中性子星の表面にたまった水素はX線を放射して運動エネルギーを失う。その水素が核融合反応を起こして爆発した。燃料の水素原子1個あたりどれだけのエネルギーが発生するか。実際の反応は複雑だが、ここではたまった水素の原子核( $^1\text{H}$ )はすべて



という核反応で鉄の原子核に変わり、生成される陽電子はすべて電子と衝突してエネルギーに変わるものとする。水素原子の質量を $m_{\text{H}}$ 、鉄原子の物質を $m_{\text{Fe}}$ 、光の速さを $c$ とする。

- (3) 上の設問(2)において、生成された鉄は単原子の気体になり、爆発で発生したエネルギーは熱となって、生成されたすべての鉄原子に等しく分配されると仮定する。この鉄原子が到達できる中性子星表面からの高さの上限を求めよ。

- (4) 核融合によって水素が鉄になって発生したエネルギーは鉄原子の熱運動から電磁波の放射に変換され、爆発的なX線放射(X線バースト)として地球周辺の人工衛星から観測される。また、設問(1)で求めた伴星から水素が降り積もることによって発生するエネルギーは定常的なX線放射として観測される(図1参照)。核融合爆発によって放射されたエネルギー $E_1$ と前の爆発からこの爆発までの間に定常的に放射されたエネルギー $E_2$ との比 $\frac{E_1}{E_2}$ を有効数字1桁で求めよ。ただし、中性子星の質量 $M$ を $3.0 \times 10^{30}$ kg、中性子星の半径 $R$ を $1.0 \times 10^4$ mとする。必要に応じて原子核の結合エネルギーのグラフ(図2)および以下の物理定数値を用いよ。

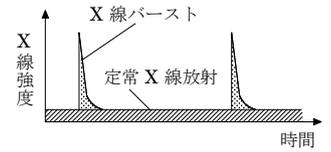


図1 核融合爆発を起こしている中性子星からのX線放射の時間的変化

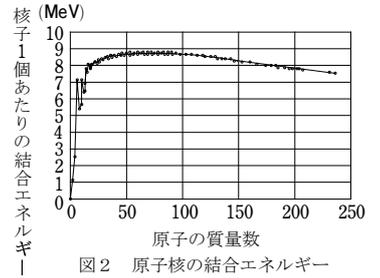


図2 原子核の結合エネルギー

- 電気素量  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C
- 万有引力定数  $G = 6.7 \times 10^{-11}$  N·m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>
- 光の速さ  $c = 3.0 \times 10^8$  m/s
- 水素原子の質量  $m_{\text{H}} = 1.7 \times 10^{-27}$  kg
- 電子の質量  $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$  kg
- 中性子と陽子の質量の差  $m_n - m_p = 2.3 \times 10^{-30}$  kg

- (5) 太陽とほぼ同じ質量をもちながら地球とほぼ同じ半径をもつ高密度の恒星(白色わい星)の表面でも、伴星から降り積もった水素ガスが突然に核融合反応を起こして、大爆発が起きることがある。このとき、遠方に向かって物質が放出されることが観測されている。しかし、中性子星上の爆発では物質の放出現象はほとんど観測されない。この違いが生じる理由を簡潔に説明せよ。