


IF.1204 - Sciences du numérique

QCM du 18 juin 2019

Les questions nécessitant en principe l'usage d'une calculatrice sont marquées avec le symbole .

A noter que, dans certains cas, le calcul peut se faire sans calculatrice en posant simplement les équations.

Il est conseillé de traiter d'abord les questions ne nécessitant pas de calculs.

Dans ce QCM, on prendra comme valeur de la constante universelle $c : 3 \cdot 10^8$ m/s.

Physique galiléo-newtonienne

Question 1 L'ascenseur en chute libre

Vous êtes dans un ascenseur au 2^{ème} étage (donc à 5 mètres de hauteur). On suppose que l'ascenseur tombe en chute libre (ses câbles sont coupés). Si vous sautez au bon moment (juste avant le choc), vous pouvez espérer sauter à 3 m/s. De combien en % votre énergie cinétique sera-t-elle réduite (si vous réussissez votre saut) ?

- A. 11%
- B. 41%
- C. 51%**
- D. 91%

La distance parcourue en chute libre dans le vide est donnée par $x = \frac{1}{2}gt^2$, avec g voisin de 10 m/s^2 . Le temps que met l'ascenseur à atteindre le sol est donc donné par $t = \sqrt{\frac{2x}{g}} \cong \sqrt{\frac{x}{5}} = 1$ seconde.

La vitesse au sol est $v = gt = 10 \text{ m/s}$.

Si vous sautez juste au bon moment, la vitesse sera réduite de 3 m/s, donc vaudra 7 m/s.

L'énergie cinétique est en v^2 . Donc elle passera de 100 à 49, ce qui donne une réduction de 51%.

Question 2 Le jongleur sur le toit d'un train

Vous êtes sur le toit d'un train qui roule tout droit à 10 km/h et vous lancez vers le haut verticalement une balle à 10 m/s depuis une hauteur de $1,20 \text{ m}$ (votre main) par rapport au toit. On néglige les effets dus au vent et à la résistance de l'air. Indiquer quelles sont les affirmations correctes.

- A. La balle revient dans votre main au bout d'une seconde.
- B. La balle revient dans votre main au bout de deux secondes.**
- C. La balle monte de 5 mètres (au-dessus de votre main) avant de redescendre.**
- D. La balle ne revient pas dans votre main car entretemps le train s'est déplacé.

Le mouvement de la balle (vu du toit du train) ne dépend pas de la vitesse du train (principe de relativité) puisqu'on néglige la résistance de l'air. La balle n'est soumise qu'à la seule force de gravitation, donc l'équation « accélération = g » s'applique (avec g voisin de 10 m/s^2). En intégrant, la vitesse de la balle lancée vers le haut est donnée par $v = gt - v_0$, avec $v_0 = 10 \text{ m/s}$.

La balle s'immobilise pour $t = v_0/g = 1$ seconde. Elle atteint une hauteur par rapport à la main de $x = \frac{1}{2}gt^2 - v_0t$, ce qui donne une hauteur de 5 mètres. La balle met donc $t = \sqrt{\frac{x}{5}} = 1$ seconde pour redescendre. Entre son lancer et son retour, le temps écoulé est en conséquence de 2 secondes. La hauteur de $1,20$ mètre ne joue aucun rôle dans le raisonnement.

Si l'on tient compte de la résistance de l'air, la balle peut ne pas revenir dans la main : ce serait certainement le cas pour une vitesse par exemple de 100 km/h car la balle subirait la résistance de l'air tandis que le train maintiendrait par sa force motrice une vitesse constante.

Question 3 L'accéléromètre du smartphone

Vous prenez l'ascenseur pour monter jusqu'au cinquième étage d'un immeuble en posant votre smartphone à plat sur le plancher de l'ascenseur. Entre votre entrée et votre sortie de l'ascenseur, l'accéléromètre du smartphone mesure pour l'axe vertical les valeurs successives suivantes :

- A. Au départ 0 g, puis durant un court instant une valeur positive < 1 g, ensuite 0 g durant la montée, puis durant un court instant une valeur négative, enfin retour à 0 g
- B. Au départ 0 g, puis durant un court instant une valeur négative, ensuite 0 g durant la montée, puis durant un court instant une valeur positive > 1 g, enfin retour à 0 g
- C. Au départ 1 g, puis durant un court instant une valeur > 1 g, ensuite 1 g durant la montée, puis durant un court instant une valeur < 1 g, enfin retour à 1 g
- D. Au départ 1 g, puis durant un court instant une valeur < 1 g, ensuite 1 g durant la montée, puis durant un court instant une valeur > 1 g, enfin retour à 1 g

Nous avons vu plusieurs exemples en cours. Le cas où l'accéléromètre ne « ressent » rien (valeur 0 sur chacun des axes) correspond à la chute libre. Avec la force de réaction du sol, l'accélération mesurée pour l'axe vertical est 1 g au départ et à l'arrivée. Il y a une accélération au démarrage de l'ascenseur qui peut durer plus ou moins longtemps selon l'ascenseur, suivie d'une vitesse constante, avec avant l'arrêt une décélération. Vous pouvez faire l'expérience avec votre smartphone (en le posant sur le plancher de l'ascenseur) avec l'application vue en cours.

Question 4 La chute libre depuis la coupole du Panthéon

Vous lâchez des billes d'acier du haut de la coupole du Panthéon (qui se trouve à une hauteur de 68 mètres). Les billes parviennent au sol :

- A. sans aucune déviation ni vers l'est ni vers l'ouest
- B. en étant légèrement déviées vers l'ouest (de l'ordre du centimètre)
- C. en étant légèrement déviées vers l'est (de l'ordre du centimètre)
- D. en étant assez fortement déviées vers l'ouest (de l'ordre du mètre)

Pour la chute libre, nous avons vu en cours qu'il y a aussi une force de Coriolis à prendre en compte (sauf au pôle où elle est nulle puisque l'axe de rotation de la Terre est aligné avec celui de la chute). L'effet est maximal à l'équateur.

Voir l'article Bibnum d'Anders Persson :

<http://www.bibnum.education.fr/physique/mecanique/sur-le-mouvement-d-un-corps-qui-tombe-d-une-grande-hauteur>

La force de Coriolis est donc responsable d'une légère déviation vers l'est. Les aristotéliens qui ne connaissaient pas la loi d'inertie imaginaient que si la Terre était en mouvement, les billes seraient fortement déviées vers l'ouest, puisque entre le lâcher de la bille et son arrivée au sol, la Terre se serait déplacée. Ils en concluaient que la Terre devait être immobile.

L'ironie de l'histoire est donc qu'il y a bien une déviation (légère) dans la chute libre mais dans le sens opposé à celui auquel croyaient les anciens.

L'expérience depuis la coupole du Panthéon a été réalisée par Camille Flammarion en 1903.

Question 5 Le cafard

Lorsque vous marchez sur un cafard, le cafard exerce sur votre pied une force égale et opposée à celle que votre pied exerce sur le cafard.

- A. Vrai
- B. Faux

Ce n'est que la traduction de la troisième loi de Newton. Attention, l'effet de la force sur l'un ou l'autre corps n'est pas le même car ils ont une masse (inerte) différente.

Question 6 La force de réaction du sol

L'attraction gravitationnelle à la surface de la Terre engendre une force qui vous attire vers le bas et qu'on appelle le poids. La raison pour laquelle vous n'accélérez pas vers le bas est que le sol exerce sur vous une force égale et opposée dirigée vers le haut et qui compense le poids. Cette force exercée par le sol est-elle celle décrite par la Troisième Loi de Newton ?

- A. Oui
- B. Non**

C'est une idée fausse de croire qu'il s'agirait ici de l'application de la troisième loi de Newton. Nous sommes en présence dans cet exemple de deux forces qui s'équilibrent. La troisième loi de Newton nous parle toujours de deux corps différents qui exercent chacun une force sur l'autre. Ici nous ne parlons que d'un seul corps qui se trouve soumis à deux forces égales en intensité et opposées en direction.

Question 7 L'astronaute en perdition

Un astronaute s'éloignant très lentement de la Station spatiale internationale peut revenir vers la Station en lançant un outil de 5 kg dans la direction opposée à la Station (c'est à dire dans la direction initiale de son mouvement).

- A. Vrai**
- B. Faux

Comme nous l'avons vu en cours, il s'agit bien ici d'un exemple d'application de la troisième loi de Newton.

Question 8 Vitesse et forces

Appliquer une somme de forces non nulle sur un objet modifie systématiquement la norme de la vitesse de cet objet.

- A. Vrai
- B. Faux**

La deuxième loi de Newton nous dit qu'une somme de forces non nulle sur un objet modifie systématiquement le vecteur vitesse de cet objet, donc soit la norme, soit la direction (ou bien les deux). Le mouvement circulaire uniforme est un exemple de somme de forces non nulle qui modifie le vecteur vitesse mais pas sa norme.

Ondes électromagnétiques

Question 9 L'énergie du rayonnement électromagnétique

Quel type d'onde électromagnétique transporte le moins d'énergie ?

- A. Les micro-ondes
- B. L'infrarouge
- C. Les ondes radio
- D. La lumière visible

L'énergie d'un photon est donnée par $h\nu$, donc elle est d'autant plus grande que la fréquence est plus grande. Les ondes radio correspondent aux longueurs d'onde les plus grandes, donc à l'énergie la plus faible.

Domaines du spectre électromagnétique			
Nom	Longueur d'onde (m)	Fréquence (Hz)	Énergie du photon (eV)
Rayon gamma	< 10 pm	> 30 EHz	> 124 keV
Rayon X	10 pm – 10 nm	30 EHz – 30 PHz	124 keV – 124 eV
Ultraviolet	10 nm – 390 nm	30 PHz – 750 THz	124 eV – 3,2 eV
Visible	390 nm – 750 nm	770 THz – 400 THz	3,2 eV – 1,7 eV
Infrarouge	750 nm – 0,1 mm	400 THz – 3 THz	1,7 eV – 12,4 meV
Térahertz / submillimétrique	0,1 mm - 1 mm	3 THz - 300 GHz	12,4 meV - 1,24 meV
Micro-ondes	1 mm - 1 m	300 GHz - 300 MHz	1,24 meV - 1,24 µeV
Ondes radio	1 m – 100 000 km	300 MHz – 3 Hz	1,24 µeV – 12,4 feV

Extrait de https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_électromagnétique

Question 10 L'appli SHAZAM

L'application pour smartphone SHAZAM utilise deux types d'ondes, l'onde sonore et l'onde électromagnétique.

Indiquer quelles sont les affirmations correctes. Indice : une seule réponse est incorrecte.

- A. L'onde sonore a besoin d'un milieu matériel pour se propager contrairement à l'onde électromagnétique.
- B. La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique ne dépend pas de celle de la source contrairement à l'onde sonore.
- C. L'onde électromagnétique ne peut pas se comprendre en dehors de la relativité contrairement à l'onde sonore.
- D. L'onde électromagnétique se propage dans l'air environ un million de fois plus vite que l'onde sonore.

Nous avons eu l'occasion en cours de préciser l'originalité de l'onde électromagnétique par rapport aux ondes mécaniques. Les deux aspects principaux sont l'absence de milieu de propagation pour l'onde électromagnétique et le fait que l'onde électromagnétique se propage dans le vide à la vitesse limite c . Ce dernier aspect ne peut se comprendre que dans le cadre de la relativité (puisque'il implique l'existence d'une vitesse limite).

La réponse B est fausse car l'indépendance de la vitesse de propagation vis-à-vis de la vitesse de la source est une propriété commune à toutes les ondes : elle est aussi valable pour la lumière que pour le son.

Question 11 Le contrôle radar

On rappelle que la formule de l'effet Doppler classique est $\frac{f_{\text{réception}}}{f_{\text{émission}}} = 1 + \frac{v}{c}$.

Un radar routier émet une onde électromagnétique de fréquence $f_{\text{émission}} = 24 \text{ GHz}$. Quel est l'écart en fréquence $\Delta f = f_{\text{réception}} - f_{\text{émission}}$ quand l'appareil contrôle un véhicule se dirigeant vers lui à $v = 130 \text{ km/h}$?

- A. -29 kHz
- B. 2,9 kHz
- C. 5,8 kHz**
- D. 29 kHz

On a $(f_{\text{réception}} - f_{\text{émission}}) = f_{\text{émission}} \times \frac{2v}{c}$

La subtilité ici est qu'il y a un facteur 2 devant la vitesse. En effet, on a un effet Doppler double car l'onde électromagnétique fait un aller-retour : il y a effet Doppler au moment où elle atteint le véhicule et il y a à nouveau effet Doppler lorsque l'onde réfléchie revient à l'émetteur (radar).

$v = 130 \text{ km/h} = (130 \cdot 10^3 / 3600) \text{ m/s} = 36 \text{ m/s}$

$v/c = 12 \cdot 10^{-8}$ et $f_{\text{émission}} = 24 \cdot 10^9 \text{ Hz}$, donc $(f_{\text{réception}} - f_{\text{émission}})$ vaut environ 5,8 kHz.

Question 12 Le feu rouge

On rappelle que l'effet Doppler relativiste se déduit de l'effet Doppler classique en multipliant par le facteur de

Lorentz $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

A quelle vitesse (en arrondissant) vous faudrait-il rouler en voiture pour qu'un feu rouge vous apparaisse vert ? On prendra pour longueur d'onde du rouge $\lambda_r = 650 \text{ nm}$ et pour celle du vert $\lambda_v = 550 \text{ nm}$.

- A. 45 000 km/s
- B. 50 000 km/s**
- C. 55 000 km/s
- D. 250 000 km/s

L'effet Doppler relativiste est donné par $R = \frac{f_{\text{réception}}}{f_{\text{émission}}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c}} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$, avec $\beta = v/c$

On en déduit : $\beta = \frac{R^2 - 1}{R^2 + 1}$

$R^2 = (650/550)^2 = 1,3966$, d'où $\beta = 0,1654$, ce qui donne (en arrondissant) : v voisine de 50 000 km/s

Relativité

Question 13 La désynchronisation des horloges parfaites

Indiquer les affirmations qui sont vraies, selon la théorie de la relativité, pour des horloges parfaites au rythme identique. **Indice : une seule réponse est incorrecte.**

- A. Une horloge à bord de la Station spatiale internationale retarde par rapport à une horloge fixe au sol.
- B. Une horloge à bord d'un satellite Galileo retarde par rapport à une horloge fixe au sol.
- C. Une horloge à bord d'un satellite géostationnaire avance par rapport à une horloge fixe au sol.
- D. Une horloge à bord d'un avion de ligne voyageant à vitesse de croisière de Paris à New York avance par rapport à une horloge fixe au sol.

Comme nous l'avons vu abondamment en cours, deux effets relativistes de désynchronisation jouent en sens contraire : l'effet cinématique (dû à la vitesse) et l'effet gravitationnel (altitude). Pour les altitudes basses, c'est l'effet cinématique qui l'emporte, donc les horloges embarquées retardent par rapport aux horloges au sol. Pour les horloges à bord des satellites GPS ou Galileo ou pour les satellites géostationnaires (36 000 km d'altitude), c'est l'effet gravitationnel qui l'emporte, donc les horloges embarquées avancent par rapport aux horloges au sol.

Question 14 Les mouvements accélérés

La relativité restreinte ne permet pas d'étudier précisément le point de vue d'observateurs accélérés.

- A. Vrai
- B. Faux

Contrairement à une idée fausse très répandue, nous avons vu en cours que la relativité restreinte est parfaitement capable d'étudier en détail le point de vue d'observateurs accélérés. La relativité générale intervient lorsqu'il faut prendre en compte des effets gravitationnels.

Question 15 L'équivalence masse-énergie

Vous raisonnez dans le cadre de la relativité (restreinte ou générale). Dans l'équation $E_0 = mc^2$, c désigne (plusieurs choix possibles) :

- A. La vitesse de propagation de la lumière dans le vide
- B. Une constante structurelle de l'espace-temps
- C. La vitesse maximale de propagation de l'information dans l'Univers
- D. La vitesse des particules de masse nulle (comme le photon) dans le vide

Comme vu en cours, c désigne avant tout une constante structurelle de l'espace-temps (facteur de conversion entre espace et temps dans la métrique à quatre dimensions). Cette constante correspond à la vitesse maximale de propagation de l'information dans l'Univers. Les deux autres désignations sont peut-être les plus fréquentes mais sont incorrectes. Nous savons que les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse c , donc la réponse A est beaucoup trop restrictive. En plus, il n'est pas totalement exclu (quoique très improbable) que la masse du photon soit non nulle et dans ce cas, la réponse A serait encore plus inexacte. La réponse D ne convient pas non plus car, par exemple, si le graviton (boson médiateur hypothétique de l'interaction gravitationnelle) n'existe pas (ce qui ne serait pas un problème pour la relativité générale), elle serait bien trop restrictive. La désynchronisation relativiste des horloges parfaites dépend de c et n'a rien à avoir avec l'onde électromagnétique ou les particules de masse nulle, ce qui montre encore plus à quel point les réponses A et D sont inadéquates. La définition officielle de la constante c est reliée à la vitesse de propagation la lumière mais c'est une erreur dont il faut prendre conscience.

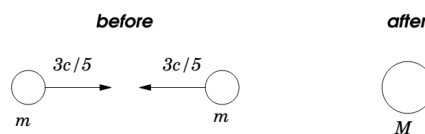
Question 16 L'histoire de la relativité

Le premier humain à prédire l'effet relativiste de désynchronisation cinématique des horloges parfaites fut :

- A. Henri Poincaré
- B. Albert Einstein
- C. Hermann Minkowski
- D. Hendrik Lorentz

C'est à Albert Einstein que l'on doit la révolution conceptuelle autour du temps (1905). Personne avant lui n'a anticipé l'effet relativiste de désynchronisation cinématique des horloges parfaites. On trouve dans la littérature beaucoup d'affirmations erronées quant à ce sujet, notamment sur Poincaré. Einstein est le premier à comprendre qu'il faut changer les relations entre l'espace et le temps en général, donc réviser la cinématique universelle. Poincaré par exemple raisonnait toujours dans le cadre ancien, même s'il a mis au jour une grande partie de la structure mathématique du futur espace-temps. Minkowski réussira (1908) en partant des résultats de Poincaré à formaliser la théorie physique établie par Einstein en 1905 sous la forme d'une théorie métrique, une étape qui s'avérera cruciale pour la relativité générale. Les travaux de Lorentz ont joué un rôle important dans les réflexions d'Einstein qui le menèrent à la relativité restreinte, mais Lorentz est toujours resté réticent à l'idée d'une vitesse limite et il n'attribuait pas un véritable sens physique au temps t' qui apparaît dans les transformations de coordonnées qui portent son nom. Les travaux de Poincaré n'étaient très probablement pas connus d'Einstein et, de toute façon, la démarche d'Einstein était radicalement différente de celle Poincaré (qui cherchait à réviser la dynamique sans changer la cinématique universelle).

Question 17 Collision-adhésion de deux particules de même masse



Deux particules de masse identique m subissent une collision frontale à la vitesse $3c/5$ (dans le référentiel du laboratoire) et forment une particule composite de masse M . Que vaut le rapport M/m ?

- A. 2
- B. 2,5
- C. 3
- D. 3,5

La conservation de l'énergie nous permet d'écrire $2\gamma mc^2 = Mc^2$, avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

Avec $v/c = 3/5$, cela donne $\gamma = 5/4$ et on en déduit $M = 2,5 m$.

Question 18 L'effet Einstein (décalage spectral gravitationnel)

Le physicien Léon Brillouin écrit à propos de l'effet Einstein en pages 83-84 de son livre « Relativity reexamined » publié en 1970 :

« Toutes les horloges au repos dans notre référentiel inertiel garderont la même fréquence avec ou sans potentiel gravitationnel.

Le redshift gravitationnel est uniquement dû au mouvement des photons. »

- A. La première phrase est vraie mais la deuxième phrase est fausse.
- B. La première phrase est fausse mais la deuxième phrase est vraie.
- C. Les deux phrases sont vraies.
- D. Les deux phrases sont fausses.

La fréquence propre d'une horloge parfaite ne change pas lorsqu'elle se désynchronise façon relativiste. Localement, rien ne se passe de spécial puisque l'effet est métrique. La première phrase est donc vraie.

En revanche, le décalage spectral (ou de fréquence) est la conséquence de la différence des temps propres aux points de réception et d'émission. Ce qui se passe entre les deux points ne joue aucun rôle dans l'effet Einstein.

L'idée tenace (newtonienne) selon laquelle l'effet Einstein proviendrait du fait que le photon perdrait ou gagnerait de l'énergie pour aller d'un point A à un point B est gravement erronée.

Il suffit de faire le calcul (très simple) par la relativité générale (via la métrique de Schwarzschild) pour s'en rendre compte. La seconde phrase est donc fausse.

Léon Brillouin a succombé à l'idée fausse largement répandue et qui traduit une incompréhension profonde de la relativité générale.

Question 19 L'effet Shapiro

Indiquer quelle est l'affirmation correcte.

- A. L'effet Shapiro est un retard dans le temps de propagation de la lumière causé uniquement par la déflexion de la lumière en présence de gravitation
- B. L'effet Shapiro est un retard dans le temps de propagation de la lumière causé uniquement par la courbure de l'espace-temps
- C. L'effet Shapiro est un retard dans le temps de propagation de la lumière dû uniquement au fait que la vitesse de propagation de la lumière est diminuée en présence de gravitation
- D. L'effet Shapiro est une avance dans le temps de propagation de la lumière causée par la gravitation.

L'effet Shapiro est le retard dû à la propagation de la lumière dans un espace-temps courbe. La déflexion dans le plan équatorial ne suffit pas à expliquer l'effet. Le retard est dû au parcours de la lumière le long de géodésiques d'une toile à quatre dimensions. La lumière se propage de proche en proche dans le vide toujours à la vitesse c (la vitesse de la lumière mesurée localement, pas à distance, est égale à c en toutes circonstances).

Question 20 La définition du trou noir

Indiquer les affirmations qui sont correctes. Indice : une seule réponse est incorrecte.

Dans le cadre de la relativité générale :

- A. Un trou noir est un champ de gravitation autonome sans aucune matière associée
- B. Un trou noir est une bulle d'espace-temps
- C. Un trou noir est un corps extrêmement dense
- D. Un trou noir est une région de l'espace-temps dotée d'un horizon des événements

L'idée selon laquelle le trou noir serait en fait une étoile noire telle que l'imaginaient certains physiciens du XVIII^e siècle est fausse. Le trou noir est une solution du vide de l'équation d'Einstein. Hormis pour le point correspondant à la singularité, la relativité générale prédit la courbure de l'espace-temps partout dans l'espace-temps vide de matière.

Le trou noir se forme naturellement par implosion de matière. Ce n'est donc pas un corps et la notion de densité est impropre. La réponse C est fausse mais les trois autres définitions sont correctes. Il est regrettable que la réponse C continue à être propagée par nombre de vulgarisateurs, y compris dans les planétariums. L'appellation « trou noir » est plutôt appropriée car elle a le mérite de casser le lien avec l'étoile noire (qui n'est qu'un astre théorique invisible à une certaine distance). Le trou noir a des propriétés beaucoup plus étranges : pas de matière du tout (bulle d'espace-temps), intérieur du trou noir déconnecté causalement du reste de l'Univers, temps à proximité de l'horizon qui se fige pour un observateur extérieur (en conséquence effet Einstein très marqué)...

Effet Sagnac

Question 21 Interprétation de l'effet Sagnac

Indiquer quelle est l'affirmation correcte.

- A. L'effet Sagnac est un phénomène purement ondulatoire.
- B. L'effet Sagnac optique est dû à la différence entre les vitesses de propagation de la lumière selon le sens de parcours.
- C. L'effet Sagnac est purement relativiste.
- D. L'effet Sagnac ne peut pas être prédit rigoureusement en dehors de la relativité générale.

Malgré les apparences, l'effet Sagnac est purement relativiste, ce qui signifie que, si l'on prend en compte les conditions de l'expérience correctement, l'effet prédit par la physique non relativiste est nul. Voir mon cours pour plus de détails.

Question 22 Applications de l'effet Sagnac

Indiquer les affirmations qui sont correctes. Indice : une seule réponse est incorrecte.

- A. L'effet Sagnac doit être pris en compte en général pour le transfert de temps.
- B. L'effet Sagnac doit être pris en compte en général pour le transfert de fréquence.
- C. L'effet Sagnac intervient dans certains projets de détecteurs d'ondes gravitationnelles.
- D. L'effet Sagnac est utilisé dans la majorité des centrales inertielles qui équipent les avions de ligne.

Comme vu en cours, les deux principales applications de l'effet Sagnac sont le transfert de temps et le gyromètre (capteur de vitesse angulaire).

Le transfert de temps consiste à synchroniser deux horloges distantes tandis que le transfert de fréquence consiste à les syntoniser (c'est-à-dire à accorder leurs fréquences). Pour le transfert de temps, il faut estimer le temps de propagation du signal et les deux effets relativistes à prendre en compte sont l'effet Sagnac et l'effet Shapiro.

Question 23 Effet Sagnac et désynchronisation des horloges parfaites

L'expérience de Hafele et Keating (1971) a prouvé l'origine purement relativiste de l'effet Sagnac.

- A. Vrai
- B. Faux

L'effet Sagnac dans le cas général (c'est-à-dire avec des objets quelconques) s'explique par la désynchronisation cinématique des horloges parfaites et le fait que la désynchronisation dépende du sens du parcours. Or l'asymétrie selon le sens du voyage a été démontrée par l'expérience de Hafele et Keating. Ils n'ont pas directement mesuré l'effet Sagnac mais ont démontré son origine purement relativiste.

Question 24 La preuve de la rotation de la Terre par l'effet Sagnac



Michelson, Gale et Pearson mesurent en 1925 l'effet Sagnac dû à la rotation de la Terre autour d'elle-même. Ils utilisent comme interféromètre de Sagnac optique un rectangle de 613 m sur 339 m (surface $S \simeq 0.21 \text{ km}^2$) et une lumière de longueur d'onde 570 nm. On rappelle que le déphasage entre les deux ondes à contresens s'obtient en multipliant le délai Sagnac $\frac{4\omega S}{c^2}$ par $2\pi \times$ fréquence de l'onde.

On prendra pour vitesse angulaire ω de la Terre la valeur : $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$.

Quel déphasage (grossièrement) s'attendent-ils à mesurer comme conséquence de la rotation de la Terre ?

- A. 0.5 radian
- B. 1 radian
- C. 2 radians
- D. 4 radians

En remarquant que $\lambda = cT$, le déphasage Sagnac est égal à $\frac{8\pi\omega S}{\lambda c}$, ce qui donne environ 2 radians.

Géolocalisation par satellites

Question 25 La stabilité des horloges embarquées



Si l'on veut obtenir une précision d'au moins 2 mètres dans l'estimation de la position et que les horloges des satellites ne sont recalées que deux fois par jour, les horloges des satellites doivent avoir :

- A. une stabilité en fréquence meilleure (en relatif) que $1,5 \cdot 10^{-13}$
- B. une stabilité en fréquence meilleure (en relatif) que $3 \cdot 10^{-12}$
- C. une stabilité en fréquence meilleure (en relatif) que $1,5 \cdot 10^{-12}$
- D. une stabilité en fréquence meilleure (en relatif) que $3 \cdot 10^{-12}$

L'erreur dans l'estimation de la position vaut $c\Delta t$. Au bout d'une demi-journée, si l'on ne veut pas faire une erreur supérieure à 2 mètres, il faut que l'inégalité suivante soit satisfaite :

$(\Delta f/f \times 12 \times 3600) \times c < 2 \text{ mètres}$.

Cela donne $\Delta f/f < 1,5 \cdot 10^{-13}$

Question 26 L'ICD du GPS

Selon l'ICD (Interface Control Document) du GPS (2016), la fréquence des horloges embarquées à bord des satellites est censée être diminuée avant le lancement pour compenser la désynchronisation relativiste une fois en orbite.

- A. Vrai
- B. Faux

L'extrait de l'ICD a été donné en cours et confirme que la réponse A est vraie.

Question 27 Une orbite sans désynchronisation ?

Il existe une altitude du satellite pour laquelle l'horloge (supposée parfaite) embarquée à bord du satellite reste synchronisée par rapport aux horloges fixes à la surface de la Terre.

- A. Vrai
- B. Faux

Comme nous l'avons vu en cours, deux effets relativistes de désynchronisation jouent en sens contraire : l'effet cinématique (dû à la vitesse) et l'effet gravitationnel (altitude). Pour les altitudes basses, c'est l'effet cinématique qui l'emporte, donc les horloges embarquées retardent par rapport aux horloges au sol. Il existe une altitude où les deux effets se compensent exactement (environ 3000 km).

Question 28 La désynchronisation relativiste des horloges à bord des satellites Galileo



Les satellites Galileo orbitent à une altitude moyenne de 23 222 km. On prendra : constante gravitationnelle $G \approx 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ et masse de la Terre $M \approx 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$.

On rappelle que le décalage relativiste d'une horloge embarquée par rapport à une horloge fixe au sol est égal à :

$$\left\{ \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{r_{\text{sol}}} - \frac{1}{r_{\text{sat}}} \right) + \frac{V_{\text{sol}}^2 - V_{\text{sat}}^2}{2c^2} \right\} \times \Delta t_{\text{sol}}$$

On rappelle également que la vitesse du satellite est $V_{\text{sat}} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$.

La vitesse angulaire ω de la Terre est environ $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$.

Au bout d'une journée, si elle n'est pas recalée, une horloge embarquée à bord d'un satellite Galileo avancerait (en la supposant parfaite) par rapport aux horloges fixes au niveau de l'équateur ($r = 6378 \text{ km}$) de :

- A. 35 microsecondes.
- B. 38 microsecondes.
- C. 41 microsecondes
- D. 44 microsecondes

Ce n'est que de l'application numérique, en remarquant que $V_{\text{sol}} = r\omega$ (avec $r = 6378 \text{ km}$) et que $r_{\text{SAT}} = 23222 + 6378 = 29600 \text{ km}$. On en déduit que la réponse C est la bonne réponse.

Ondes gravitationnelles

Question 29 La vitesse de propagation de l'onde gravitationnelle

Selon la relativité générale, l'onde gravitationnelle se propage à la vitesse limite c car le graviton (boson médiateur de l'interaction gravitationnelle) a une masse nulle (comme le photon).

A. Vrai

B. Faux

Comme vu en cours, le graviton ne peut pas être l'explication en relativité générale puisqu'il n'y joue aucun rôle. La vitesse de propagation (qui correspond à une « déformation » de l'espace-temps) est c parce qu'il s'agit de la vitesse limite dans notre univers (constante structurelle de l'espace-temps), tout ceci en cohérence avec le principe de relativité et le principe d'équivalence locale entre accélération et gravitation.

Question 30 Les sources des ondes gravitationnelles

Une onde gravitationnelle est produite à chaque fois que des masses sont accélérées.

A. Vrai

B. Faux

Il ne suffit pas qu'une masse soit accélérée : il faut qu'il n'y ait dans le mouvement ni symétrie sphérique ni symétrie cylindrique. Une configuration en dipôle ne génèrera pas d'onde gravitationnelle (cela tient au principe d'équivalence). Les binaires spirantes sont par contre d'excellents candidats.

Question 31 Ondes gravitationnelles et détecteurs

Indiquer les affirmations qui sont correctes. **Indice : une seule réponse est incorrecte.**

A. Les détecteurs LIGO/VIRGO sont capables de détecter des binaires spirantes à rapport de masse extrême.

B. Les ondes gravitationnelles détectées par LIGO/VIRGO ont une durée courte (jusqu'ici moins de 100 secondes) car les détecteurs terrestres sont insensibles aux basses fréquences.

C. Les ondes gravitationnelles à basse fréquence correspondent en général à une masse plus élevée pour la binaire spirante.

D. L'onde gravitationnelle est une onde d'espace-temps, donc elle peut en principe produire des différences de temps propres entre horloges distantes suite à son passage.

Les binaires spirantes à rapport de masse extrême (par exemple un petit trou noir en orbite autour d'un trou noir supermassif) seront détectables par l'interféromètre spatial LISA. La fréquence de l'onde gravitationnelle est trop basse pour être détectable par les interféromètres terrestres. Si elle est basse, c'est parce que les périodes de rotation sont plus grandes en général pour des masses plus importantes (pour le trou noir, le rayon est proportionnel à la masse). La réponse D est correcte même si la détection de tels effets est très difficile car il faut que l'onde à son passage ne fasse pas fluctuer de la même façon les temps propres de deux horloges distantes pour qu'il y ait désynchronisation entre les deux horloges après le passage de l'onde.

Question 32 L'événement GW170817



Grâce à l'événement multi-messagers GW170817, on a pu détecter pour la même source (une binaire d'étoiles à neutrons) un sursaut gamma (onde électromagnétique) et une onde gravitationnelle. Le sursaut gamma a été reçu sur Terre 1,7 seconde plus tard que le pic de l'onde gravitationnelle et la source se trouve à 130 millions d'années-lumière de la Terre. On rappelle qu'une année-lumière vaut environ 10 000 milliards de kilomètres. Si l'on suppose que le sursaut gamma a été émis depuis la source au moment du pic de l'onde gravitationnelle, quel est l'écart relatif en valeur absolue $\frac{\Delta v}{c}$ entre la vitesse de propagation de l'onde gravitationnelle et celle de la lumière ?

- A. De l'ordre de 10^{-12}
- B. De l'ordre de 10^{-14}
- C. De l'ordre de 10^{-16}
- D. De l'ordre de 10^{-18}

L'écart de temps à l'arrivée pour les deux ondes est $\Delta t = \frac{d}{c} - \frac{d}{c + \Delta v} = \frac{d}{c} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta v}{c}}\right) \cong \frac{d \Delta v}{c^2}$

On en déduit la quantité que l'on cherche :

$$\frac{\Delta v}{c} \cong \frac{c \Delta t}{d} = \frac{3 \cdot 10^8 \times 1,7}{130 \cdot 10^6 \times 10^4 \times 10^9 \times 10^3} \cong 4 \cdot 10^{-16}$$

Physique quantique

Question 33 Les inégalités de Heisenberg



Dans nos poumons, il existe des poches minuscules appelées alvéoles. Le diamètre moyen de ces poches est 0.25 mm. Supposons qu'une molécule d'oxygène de masse $5.3 \cdot 10^{-26}$ kg se trouve à l'intérieur d'une alvéole. Quelle est la meilleure précision en m/s que l'on puisse atteindre sur l'estimation de la vitesse de la molécule ?

- A. De l'ordre de 10^{-6}
- B. De l'ordre de 10^{-8}
- C. De l'ordre de 10^{-10}
- D. De l'ordre de 10^{-12}

L'inégalité de Heisenberg position – impulsion s'écrit : $m \Delta v \times \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \cong 5 \cdot 10^{-35}$

La meilleure précision Δv atteignable est donc de l'ordre de 10^{-6} .

Question 34 L'intrication quantique

Indiquer les affirmations qui sont correctes. Indice : il y a deux affirmations correctes.

- A. L'intrication quantique est une propriété suivant laquelle l'état de deux objets ne peut être décrit que globalement, sans pouvoir séparer un objet de l'autre, bien qu'ils puissent être spatialement séparés.
- B. L'intrication quantique est une propriété dont l'originalité réside dans le fait que la mesure réalisée sur une particule permet de connaître instantanément l'état d'une autre particule, quelle que soit la distance entre les deux particules.
- C. L'intrication quantique est un effet physique qui a été vérifié pour des distances supérieures au kilomètre.
- D. L'existence de l'intrication quantique prouve que la notion de localité doit être abandonnée en physique.

La réponse B ne convient pas parce que, classiquement, on peut sans problème reproduire la situation décrite. Supposons que j'aie au départ deux boules numérotées 1 et 2 et dont les numéros sont masqués par un cache. J'emporte l'une des boules à 100 km et j'enlève le cache. Si je constate que le numéro est 2, alors je sais instantanément que le numéro de l'autre boule distante est 1. Il n'y a là rien de quantique. En physique quantique (au niveau microphysique), les numéros des deux boules ne sont pas fixés au départ mais au moment où l'on enlève le cache, ce qui est plus troublant.

La réponse D est fausse car il existe encore des échappatoires qui peuvent sauver la localité. En plus, il est plus juste de parler de non-séparabilité que de non-localité pour la physique quantique puisque la non-localité implique l'existence d'interactions se propageant plus vite que la vitesse limite c (ce que la physique quantique ne suppose pas).

Question 35 La nature du photon

Le photon est dénombrable comme une particule classique mais spatialement étendu comme une onde classique.

- A. Vrai
- B. Faux

C'est une affirmation qui traduit bien l'étrangeté des particules quantiques que révèle d'ailleurs très bien l'expérience des fentes d'Young, lorsqu'on la réalise avec des particules envoyées une à une.

Question 36 Le muon cosmique



Le muon est une particule quantique dont la durée de vie moyenne est 2,2 microsecondes. La meilleure précision que l'on puisse atteindre sur l'estimation de la masse en kg de cette particule est de l'ordre de :

- A. 10^{-8}
- B. 10^{-27}
- C. 10^{-46}
- D. 10^{-65}

L'inégalité de Heisenberg temps – énergie s'écrit :

$$\Delta m c^2 \times \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \cong 5 \cdot 10^{-35}$$

La meilleure précision Δm atteignable est donc de l'ordre de 10^{-46} .

Thermodynamique

Question 37 Les gifles d'Obélix



Imaginez qu'Obélix vous gifle. Vous ressentez une rougeur à la joue. La température de la région touchée a varié de 1,8 degré Celsius. On suppose que la masse de la main qui vous atteint est de 1,2 kg et que la masse de la peau rougie est de 150 g. On prend comme valeur de la capacité thermique massique de la peau de la joue : $C_{\text{joue}} = 3,8 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

La vitesse de la main juste avant l'impact vaut environ :

- A. 5 km/h
- B. 50 km/h
- C. 100 km/h
- D. 150 km/h

De façon analogue à l'expérience de Joule, le transfert entre énergie mécanique et énergie thermique s'écrit :

$$\frac{1}{2} m_{\text{main}} v_{\text{main}}^2 = m_{\text{joue}} C_{\text{joue}} \Delta T \quad \text{d'où} \quad v_{\text{main}} = \sqrt{\frac{2 m_{\text{joue}} C_{\text{joue}} \Delta T}{m_{\text{main}}}}$$

L'application numérique donne environ 41 m/s, soit environ 150 km/h.

Question 38 Le théorème de Noether (1918)

Selon le théorème de Noether, la conservation de l'énergie (premier principe de la thermodynamique) va de pair avec :

- A. L'invariance des lois physiques par rotation dans l'espace
- B. L'invariance des lois physiques par translation dans l'espace
- C. L'invariance des lois physiques par translation dans le temps
- D. L'invariance des lois physiques dans les référentiels inertiels

Le théorème de Noether, l'un des résultats mathématiques les plus importants pour la physique théorique, établit qu'à chaque invariance des lois physiques (via des transfos de coordonnées) correspond une quantité physique qui se conserve.

L'énergie est la quantité physique qui se conserve pour des lois physiques invariantes par translation dans le temps.

Question 39 Le second principe de la thermodynamique

Indiquer quelle est l'affirmation correcte.

- A. Lorsqu'une transformation quelconque se produit, l'entropie de l'Univers diminue.
- B. Un processus irréversible (spontané) correspond à une entropie de l'Univers qui augmente.
- C. Une transformation impossible correspond à une entropie de l'Univers qui augmente.

L'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter. La réponse B traduit bien le second principe de la thermodynamique.

Question 40 La température du trou noir supermassif M87*



La température d'un trou noir de masse M est donnée par la formule de Hawking :

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}$$

On prendra pour les constantes les valeurs approchées suivantes :

$$\hbar = h/2\pi \simeq 10^{-34} \text{ (SI)}$$

$$k_B \simeq 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$G \simeq 6 \times 10^{-11} \text{ (SI)}$$

La masse du trou noir M87* dont la première image a été publiée le 10 avril 2019 vaut environ 6,5 milliards de masses solaires. Que vaut la température de Hawking pour ce trou noir supermassif ?

- A. De l'ordre de 10^{-11} K
- B. De l'ordre de 10^{-13} K
- C. De l'ordre de 10^{-15} K
- D. De l'ordre de 10^{-17} K

Il n'y a ici qu'à faire le calcul (la formule est à utiliser telle quelle). On trouve que la température est de l'ordre de 10^{-17} K.

Cryptographie quantique et ordinateur quantique

Attention : Pour les questions 41 à 60, une seule réponse correcte parmi les quatre possibles.

Question 41

La limite de Shannon désigne :

- A. Une clé de chiffrement d'un message parfaitement sécurisée
- B. La capacité maximale de la transmission dans un canal bruité
- C. Le maximum d'entropie d'un signal
- D. L'échantillonnage maximal d'un signal

C'est l'un des théorèmes principaux de son ouvrage « théorie de l'information » en 1948. Il énonce sans préciser comment y arriver la limitation maximale d'un canal de transmission en fonction de la bande passante et du rapport signal à bruit.

Question 42

Claude Shannon a théorisé ce que doit être un codage sécurisé :

- A. La clé ne doit être utilisée qu'une seule fois
- B. La clé doit être deux fois plus longue que le message
- C. La clé doit être définie à partir du message
- D. La clé doit avoir la plus petite entropie

C'est l'une des conditions posées par Shannon dans son célèbre mémoire établi à la fin de la guerre mais rendu public beaucoup plus tard, la clé doit être aussi longue que le message (pas deux fois plus), parfaitement aléatoire et utilisée une seule fois.

Question 43

La transformée de Fourier quantique mis au point par Peter Shor dans son algorithme permet de :

- A. Factoriser un nombre premier très grand
- B. Trouver la période d'une fonction
- C. Casser tous les codes de chiffrement symétriques
- D. De trouver une valeur particulière dans une liste

Les réponses A, C et D sont incorrectes car :

Un nombre premier ne peut pas être factorisé sauf par 1 ou lui-même.

L'algorithme de Shor ne permet pas de casser les codes symétriques.

Trouver une valeur dans une liste est la fonction de l'algorithme de Grover.

La réponse B est correcte car extraire la période d'une fonction d'exponentiation modulo est en effet le cœur de l'algorithme de Shor : une fois la période extraite avec la transformée de Fourier quantique, il devient possible de trouver les facteurs premiers d'un nombre très grand en un temps polynomial.

Question 44

En cryptographie quantique :

- A. Le message est intriqué avec la clé
- B. Le message est superposé avec la clé
- C. La génération de clé utilise les lois de la physique quantique
- D. L'interception du message par un tiers est détectée statistiquement

C'est une génération de clé qui utilise des protocoles dépendant des lois de la physique quantique. Le codage du message est lui tout à fait classique par ou exclusif avec la clé. Le message peut être intercepté mais il est crypté donc cela n'a pas d'importance, c'est la clé qui ne doit pas être interceptée et si c'est le cas les statistiques liées au protocole l'indiquent. Le protocole le plus utilisé aujourd'hui est le BB84.

Question 45

L'algorithme quantique de Peter Shor permet

- A. De casser le code RSA en un temps polynomial
- B. De casser la cryptographie quantique en un temps polynomial
- C. De casser les codages à clé symétrique en un temps polynomial
- D. De factoriser un nombre premier très grand de plusieurs centaines de chiffres en un temps polynomial

La réponse D est à exclure puisqu'on ne peut factoriser un nombre premier par définition. Pour casser des codages symétriques on peut utiliser l'algorithme de Grover réponses B et C mais pas Shor. La réponse A est la caractéristique fondamentale de l'algorithme de Shor qui permet de factoriser un nombre qui peut être très grand en un temps polynomial et c'est ce qui a lancé toutes les recherches autour de l'ordinateur quantique.

Question 46

La cryptographie quantique

- A. Peut être utilisée dans des fibres optiques sur des distances de plusieurs milliers de km en utilisant des répéteurs
- B. Ne peut être utilisée en air libre
- C. Peut être utilisée seulement dans des fibres optiques sur des distances de plusieurs dizaines de km.
- D. Peut être utilisée dans des conducteurs sur de petites distances

Les transmissions quantiques sont utilisables aujourd'hui sur quelques dizaines de km car le signal s'affaiblit et l'utilisation de répéteurs fait perdre les caractéristiques quantiques du canal. La transmission en air libre est possible sous certaines conditions. Enfin on ne peut transmettre des photons dans des conducteurs.

Question 47

Dans le protocole de cryptage quantique :

- A. Le message est chiffré par intrication
- B. Le message est en superposition avec la clé
- C. La clé est obtenue par un choix de base de mesure
- D. La clé est obtenue par téléportation quantique

C'est la caractéristique du protocole, les choix d'une base de mesure sont effectués aléatoirement par Alice et Bob et quand ces choix concordent, la polarisation des photons est utilisable pour former la clé. Ici encore le message est chiffré de manière classique par clé secrète symétrique. Il n'y a pas d'intrication ni superposition ni téléportation du message.

Question 48

Le système RSA utilise :

- A. Deux clés aléatoires de la longueur du message à chiffrer
- B. Deux clé générées par un protocole quantique
- C. Deux clés constituées chacune par deux entiers
- D. Une clé utilisant le produit de deux nombres entiers très grands

Le système RSA est un système à clé asymétrique, il y a donc deux clés. Il utilise les lois de groupe modulo et une fonction mathématique à sens unique qui est le produit de deux nombres entiers difficilement à factoriser. Ce produit est l'un des deux chiffres entiers qui permet de coder et décoder le message. Mais ce nombre est associé avec un autre nombre calculé par exponentiation modulo pour le

codage qui est la clé public et un autre nombre associé au produit est utilisé en tant que clé secrète pour le décodage. C'est donc la réponse C.

Question 49

La somme des portes quantiques à un qubit X+Z est égale à :

- A. 1
- B. $\sqrt{2}$ H
- C. H
- D. XHZ

C'est un calcul simple de matrice $X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ $Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ la somme est égale à $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ qui est la fonction de Hadamard multipliée par $\sqrt{2}$.

Question 50

Le produit de la porte X par elle-même X^2 est égale à :

- A. HXH
- B. HZH
- C. 1
- D. XHX

C'est un calcul de matrice simple mais si on applique la définition des portes quantiques cette opération ne demande pas de calcul car les portes étant inversibles par définition le produit d'une porte par elle-même donne l'opération unité.

Question 51

La porte à deux qubits Cnot :

- A. Inverse l'état du qubit cible si l'état du qubit de contrôle est égal à 0
- B. Inverse l'état du qubit cible si l'état du qubit de contrôle est égal à 1
- C. Inverse les états des qubits d'entrée
- D. Permute les états d'entrée et de sortie

La porte Cnot par définition permute le qubit cible si le qubit de contrôle est à un. Les autres réponses se réfèrent à d'autres portes.

Question 52

La porte de Hadamard en calcul quantique effectue

- A. L'intrication de deux états
- B. Le ou exclusif de deux qubits
- C. L'inversion de du vecteur d'état
- D. La superposition de deux états

La porte de Hadamard $H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ réalise la superposition des états de la base. L'inversion est obtenue avec une porte X et l'intrication fait intervenir au moins une porte à deux qubits.

Question 53

En calcul quantique la réduction du vecteur d'état intervient

- A. Quand on fait une mesure
- B. Quand on réalise l'intrication de deux qubits
- C. Quand on effectue la superposition de deux qubits
- D. Après être passé par une porte Swap

La réponse A est une conséquence de l'un des postulats de la physique quantique sur ce qu'on appelle la réduction du paquet d'onde quand on effectue une mesure. Toute mesure fait disparaître la superposition et donc interrompt le calcul quantique.

Question 54

Le système RSA inventé par Rivest, Shamir et Adleman est :

- A. Un système à clé symétrique
- B. Un système à clé quantique
- C. Un système à clé publique et privée
- D. Un système à clé aléatoire

Le RSA est un système à clés asymétriques, une publique qui sert à coder et une privée qui sert à décoder. Ce n'est donc ni un système à clé symétrique ni à clé quantique et les clés RSA sont obtenues par un calcul dit à sens unique.

Question 55

Dans un système de chiffrement à clé symétrique

- A. Le calcul du message chiffré se fait avec une exponentiation modulaire
- B. Le calcul du message chiffré s'effectue à l'aide d'un ou exclusif
- C. Le calcul du message chiffré se fait avec une inversion modulaire
- D. Le calcul du message chiffré se fait à partir du produit de deux nombres entiers.

C'est le codage le plus simple, la clé sert à coder et décoder par une opération réversible comme le ou exclusif. Pour préserver le message elle doit donc être secrète et aléatoire. Les autres affirmations se réfèrent au système RSA.

Question 56

L'intrication de deux qubits s'effectue en calcul quantique avec

- A. Deux portes X sur les qubits d'entrée suivies par une porte Cnot
- B. Deux portes de Hadamard sur les qubits d'entrée suivies d'une porte Swap
- C. Une porte Cnot suivie par deux portes Z sur les qubits de sortie
- D. Deux portes de Hadamard sur les qubits d'entrée suivies par une porte Cnot

L'intrication par définition mélange deux états superposés, elle fait donc intervenir au moins une porte à deux qubits comme la porte Cnot et deux portes qui réalisent sur chacun des qubits d'entrée une superposition et cela est réalisé par une porte de Hadamard. Toute autre affirmation réalise d'autres fonctions.

Question 57

La téléportation quantique

- A. Téléporte une particule dans un état de superposition quantique
- B. Téléporte un état quantique à distance
- C. Téléporte deux particules ayant interagi
- D. Téléporte deux particules intriquées

La téléportation quantique contrairement à ce qu'on lit parfois ne transporte pas de particule (réponse A,C,D) mais un état qu'on ne connaît pas à distance. Cela est rendu possible grâce à une intrication.

Question 58

En informatique quantique, les représentations matérielles des états logiques sont assurées par

- A. L'énergie des particules
- B. La vitesse des particules
- C. La polarisation des particules
- D. La position des particules

L'informatique quantique pour effectuer des opérations logiques utilise une grandeur quantique à deux dimensions qui est le spin assimilable à la polarisation.

Question 59

Dans un système à clé symétrique

- A. C'est l'inverse modulo 2 qui sert à décoder le message codé
- B. La clé présente une symétrie temporelle
- C. Le message chiffré est codé deux fois de manière symétrique
- D. C'est la même clé qui sert à coder et à décoder

Par définition la clé symétrique sert à coder et décoder grâce à l'opération inversible ou exclusif. Tout autre affirmation est fausse.

Question 60

En informatique quantique, on dit que l'on effectue une transformation unitaire si :

- A. L'opération conserve la norme
- B. L'opération requiert une seule itération
- C. L'opération est réversible
- D. L'opération inverse l'entrée

C'est la conséquence de l'utilisation de vecteurs de l'espace de Hilbert comme support des calculs, ces vecteurs sont normés à un. Par définition du calcul quantique, toutes les opérations sont réversibles contrairement aux opérations en logique classique (NAND est non réversible) et par conséquent préservent la norme du vecteur et pour cette raison sont appelées transformations unitaires. Les réponses C et D sont des conséquences mais ne sont pas la définition. La réponse B est hors sujet.