

Ministère de l'éducation et de la science de l'Ukraine

Lycée physique et technique de Kherson du conseil municipal de Kherson

LA CRÉATION D'UN MANUEL MÉTHODOLOGIQUE

« INTRODUCTION À LA MÉCANIQUE QUANTIQUE »

Auteur :

Lev Durman

Élève de 9e niveau

Lycée physique et technique de Kherson

Conseil municipal de Kherson

Superviseur scientifique :

Doctorat en physique et en mathématiques,

professeur de physique

Lycée physique et technique de Kherson

Conseil municipal de Kherson

Artem Oliynyk

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
1. POSTULATS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	4
1.1.La fonction d'onde et ses propriétés	4
1.2.Principe de superposition en mécanique quantique	5
2. PARADOXES ET PHÉNOMÈNES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	7
2.1.Rayonnement d'un corps absolument noir	7
2.2.Évaporation des trous noirs	8
2.3. Le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen	9
3. EXEMPLES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE DANS LA VIE	10
3.1.Cryptographie quantique et communication quantique	10
3.2.Informatique quantique	11
3.3.Capteurs quantiques et leur utilisation dans la science, la vie quotidienne et la défense	11
CONCLUSIONS	13
LISTE DE RÉFÉRENCES	14

INTRODUCTION

Pertinence de l'étude. La mécanique quantique représente l'une des disciplines les plus fondamentales et révolutionnaires de la science contemporaine. Malgré le développement actif et le grand nombre d'études menées dans ce domaine, la plupart des non-spécialistes, et particulièrement les élèves, comprennent très peu ou pas du tout ce qu'est la mécanique quantique et quelles sont les lois qui régissent l'interaction au niveau quantique.

Mon intérêt pour ce sujet vient du fait que la première fois que j'ai lu un article sur l'informatique quantique, je ne comprenais pas comment fonctionnaient les ordinateurs quantiques. Au fur et à mesure que je lisais des articles et des ouvrages de vulgarisation sur le sujet et que j'en discutais avec mes pairs et mes aînés, il m'est apparu clairement que la plupart d'entre eux souhaitaient également obtenir des informations sur les interactions dans le monde quantique, mais que presque personne ne voulait approfondir la mécanique quantique.

C'est ce qui a déterminé l'**objectif de l'étude** : créer un manuel de vulgarisation scientifique sur la mécanique quantique pour que les élèves puissent mieux comprendre la physique, la chimie et les mathématiques et voir de nouvelles relations entre les différents phénomènes naturels qui nous entourent.

L'objet de recherche : la mécanique quantique et l'application de ses dispositions dans la science et la pratique modernes.

Sujet de recherche: la littérature populaire et scientifique sur les fondements de la mécanique quantique.

Dans cette étude, nous examinerons des postulats de la mécanique quantique tels que le principe de superposition, la fonction d'onde et ses propriétés. Nous décrirons également certains paradoxes et phénomènes de la mécanique quantique, tels que le rayonnement d'un corps absolument noir et le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen. Enfin, nous examinerons quelques exemples d'applications de la mécanique quantique dans la vie moderne, comme la cryptographie quantique, l'informatique quantique et les capteurs quantiques.

Nous pensons que ce manuel pourra présenter aux étudiants les bases de la mécanique quantique sous une forme accessible et les incitera à entamer leurs propres recherches dans ce domaine et dans d'autres domaines de la science moderne.

1. POSTULATS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

1.1. La fonction d'onde et ses propriétés

Une fonction d'onde correspond à une solution mathématique obtenue à partir de l'équation de Schrödinger. L'équation de Schrödinger en mécanique quantique joue le rôle des lois de Newton et de la conservation de l'énergie en mécanique classique, c'est-à-dire qu'elle prédit le comportement futur d'un système dynamique. Il s'agit d'une équation d'onde en termes de fonction d'onde qui permet de prévoir analytiquement et avec précision la probabilité des événements ou des résultats. Le résultat détaillé n'est pas clairement défini, mais étant donné un grand nombre d'événements, l'équation de Schrödinger prédit la distribution des résultats [1]. L'équation de Schrödinger donne des valeurs quantifiées pour l'énergie du système et la forme de la fonction d'onde, de sorte que d'autres propriétés peuvent être calculées.

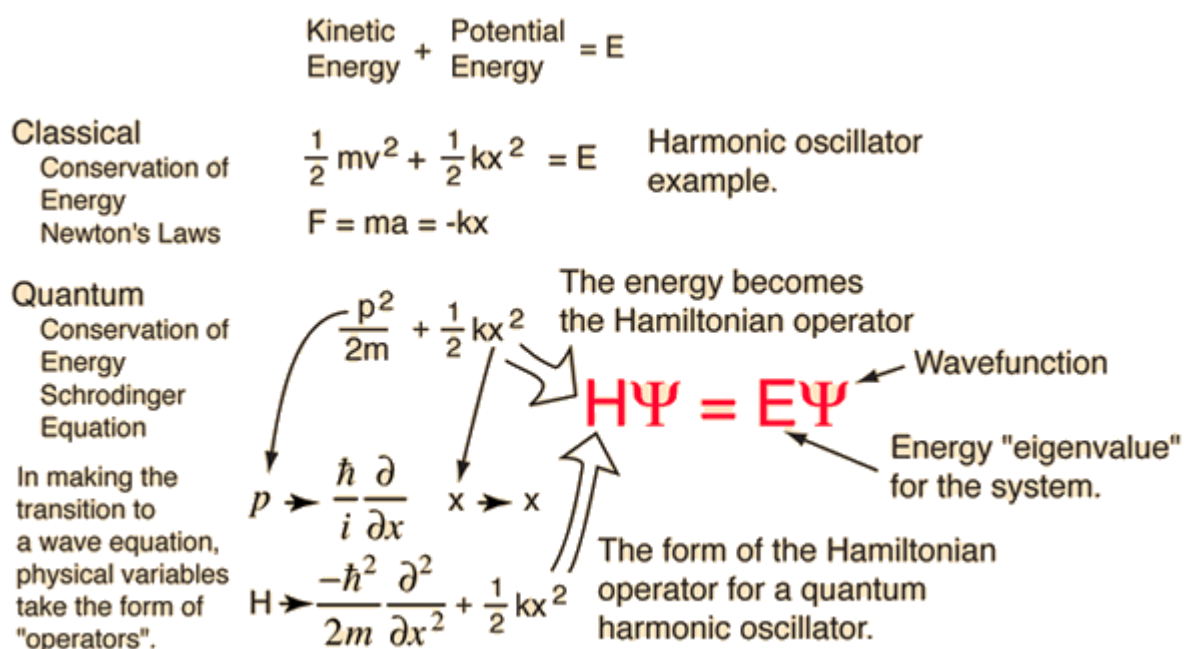


Fig. 1. Comparaison des équations de la mécanique classique et de l'équation de Schrödinger [ibid].

L'équation de Schrödinger ne calcule pas directement le comportement des particules quantiques. Elle doit d'abord être utilisée pour créer la ou les fonctions d'onde. C'est cette fonction d'onde qui décrit réellement le comportement des particules quantiques. Les fonctions d'onde peuvent être utilisées pour calculer et prédire les résultats d'expériences avec des particules élémentaires. Elles sont principalement utilisées pour décrire les électrons, parce qu'elles deviennent imprécises pour les particules se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière. Les particules qui se déplacent plus rapidement, c'est-à-dire celles qui voyagent à plus de quelques pour

cent de la vitesse de la lumière, sont fortement influencées par la relativité restreinte [2].

Voici un exemple du fonctionnement de la fonction d'onde. Supposons qu'un électron se trouve dans une boîte, peut-être stabilisé et piégé par des champs magnétiques. Nous pouvons calculer une fonction d'onde qui nous indique la probabilité que l'électron se trouve dans une position particulière de la boîte - après tout, la mécanique quantique est probabiliste.

Supposons que les champs magnétiques aient la même intensité dans six positions différentes de la boîte. Pour calculer la probabilité qu'un électron se trouve à un endroit particulier de la boîte, vous devez.. :

- introduire l'intensité de ces champs magnétiques, ainsi que d'autres facteurs, dans la fonction d'onde ;
- effectuer des calculs à l'aide de l'équation de Schrödinger ;
- analyser le résultat - la probabilité de trouver un électron dans une position particulière de la boîte.

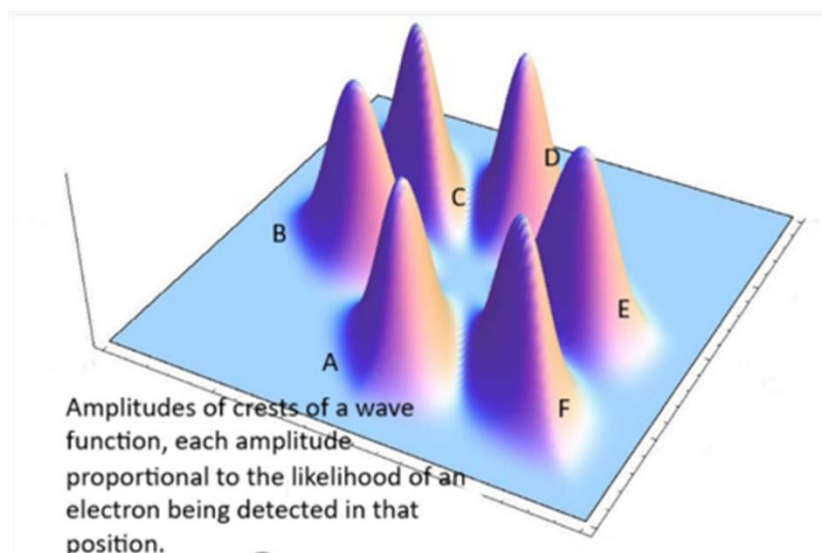


Fig. 2 : Probabilités de détection d'un électron en six endroits [Ibid.].

Notez que le résultat du calcul sera un ensemble de probabilités concernant la position probable dans laquelle nous trouverons l'électron.

1.2. Principe de superposition en mécanique quantique

Le principe de superposition est l'un des fondements de la mécanique quantique. Dans un système composé de deux parties, la probabilité de la coordonnée z_1 de la première partie et la probabilité de la coordonnée z_2 de la seconde partie sont indépendantes, de sorte que la distribution de probabilité du système entier doit être égale au produit des probabilités des parties.

Ce principe de base de la mécanique quantique est un concept ésotérique et est souvent expliqué par les expériences menées par le physicien britannique Thomas Young en 1801. L'expérience de la double fente de Young visait à prouver que la lumière est constituée d'ondes. Aujourd'hui, cette expérience est utilisée pour comprendre comment les électrons agissent comme des ondes et créent des schémas d'interférence [3].

Dans cette expérience, un faisceau de lumière est émis sur une barrière comportant deux fentes verticales. La lumière passe à travers les fentes et sa forme est enregistrée sur une plaque photographique. Lorsque l'une des fentes est fermée, comme prévu, le faisceau lumineux s'aligne sur l'une des fentes. Il est intuitif que si les deux fentes étaient ouvertes, le motif lumineux apparaîtrait comme deux faisceaux lumineux parallèles le long des fentes. Cependant, dans la réalité, la plaque photographique révèle un schéma alterné de bandes lumineuses et sombres.

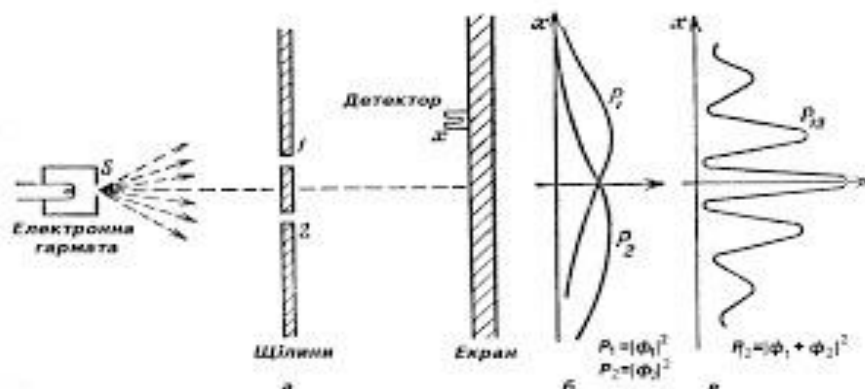


Fig. 3. Le principe de superposition [4]

Ce résultat nous indique qu'il existe deux chemins qui ne se croisent pas entre les ondes passant par les fentes. Les photons ne passent pas seulement par les deux fentes, mais empruntent simultanément tous les chemins possibles pour atteindre la plaque photographique.

Pour confirmer que cela pouvait se produire, d'autres expériences se sont concentrées sur le suivi des trajectoires de photons individuels. De manière surprenante, lorsque les trajectoires des photons étaient perturbées d'une manière ou d'une autre pendant les mesures, les résultats correspondaient exactement aux prévisions de la physique classique. En d'autres termes, deux lignes de lumière sont apparues sur la photoplate, chacune coïncidant avec une brèche dans la barrière. Les scientifiques en ont conclu que la superposition ne peut pas être observée directement, mais que seuls les effets résultant de la perturbation peuvent être observés.

En informatique, le concept de superposition a des implications importantes sur la manière dont les informations seront traitées et stockées à l'avenir. Par exemple, les ordinateurs classiques actuels traitent l'information en bits de 1 ou de 0, comme un interrupteur. Les futurs ordinateurs quantiques traiteront l'information à l'aide de qubits, qui représentent 1, 0 ou une superposition de ces deux états.

2. PARADOXES ET PHÉNOMÈNES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

2.1. Rayonnement d'un corps absolument noir

Un corps noir absolu est un corps sombre qui possède des propriétés de rayonnement thermique parfaites. Nous pouvons fabriquer de nos propres mains un objet presque parfaitement noir. Pour ce faire, fabriquez une boîte en métal ou dans un autre matériau qui rayonne bien la chaleur. Cette boîte doit être complètement fermée de tous les côtés afin qu'aucune lumière extérieure ne puisse y pénétrer. Percez ensuite un petit trou à l'intérieur de la boîte. Le rayonnement provenant de ce dispositif reproduit presque parfaitement les propriétés de rayonnement d'un corps noir idéal par rapport à la température de l'air à l'intérieur de la boîte.

Au début du XX^e siècle, Lord Rayleigh, Planck et d'autres ont utilisé ce dispositif pour étudier le rayonnement du corps noir. Après des recherches approfondies, Planck a pu décrire empiriquement l'intensité de la lumière émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Plus tard, il a pu décrire la dépendance de cette fonction par rapport à la température [5]. Les travaux de Planck sur le rayonnement du corps noir, ainsi que ceux d'autres physiciens, ont constitué la base d'un certain nombre de découvertes scientifiques dans le domaine de la mécanique quantique, que nous ne pouvons malheureusement pas aborder ici en raison de la portée limitée de ce cours.

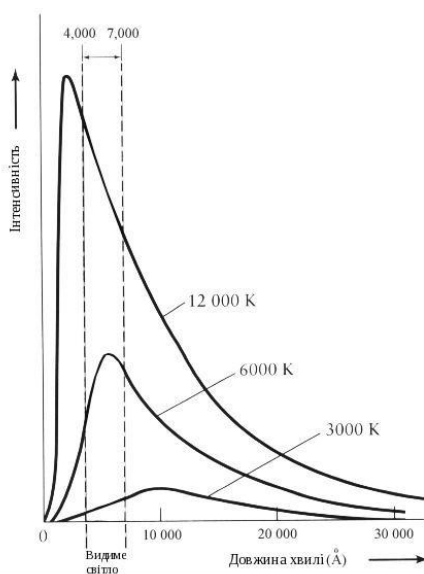


Fig. 4. Dépendance du rayonnement (intensité et longueur d'onde) d'un corps absolument noir en fonction de la température [Ibid.].

Cette figure montre que lorsque la température d'un corps noir augmente, l'intensité du rayonnement lumineux augmente également, et la longueur d'onde du rayonnement maximal se déplace vers la couleur bleue du spectre (voir Fig. 4).

Par exemple, le fer devient rouge jaunâtre à haute température, mais change de couleur spectrale pour devenir bleu ou blanc s'il est chauffé davantage.

En 1893, le physicien allemand Wilhelm Wien a défini comme suit la relation entre la température d'un corps noir et la longueur d'onde maximale du rayonnement :

$$\lambda_{max} * T = 0,29 * K$$

où T est la température en Kelvin.

Selon la loi de Wien, la longueur d'onde correspondant au maximum d'intensité d'un rayonnement est inversement proportionnelle à la température absolue de l'objet. Cela se justifie par le raisonnement logique suivant : plus la longueur d'onde de la lumière est courte (fréquence élevée), plus l'énergie photonique émise par les objets ayant une température élevée est importante.

Par exemple, la température moyenne à la surface du soleil est de 5800 K, la longueur d'onde maximale du rayonnement devrait donc être la même :

$$\lambda_{max} = \frac{0,29\text{cm}}{5800\text{ K}} = 500\text{nm}$$

2.2 Évaporation des trous noirs

L'astronome et physicien Niayesh Afshordi, de l'université de Waterloo au Canada, écrit dans son étude que, selon la théorie générale de la relativité d'Einstein, rien ne peut échapper à la gravité d'un trou noir une fois qu'il a franchi le point de non-retour, connu sous le nom d'horizon des événements. C'est ce que l'on a cru pendant longtemps, jusqu'à ce que Stephen Hawking utilise la mécanique quantique pour émettre l'hypothèse que des particules quantiques pouvaient s'évaporer lentement des trous noirs. Ce processus a été appelé "rayonnement de Hawking" [6].

La propriété la plus connue des trous noirs est leur extraordinaire force gravitationnelle. Elle est si intense que, selon la relativité générale, si quelque chose ou quelqu'un franchit l'horizon des événements, il ne pourra plus échapper à l'attraction du trou noir. Même la chose la plus rapide de l'Univers, le rayonnement électromagnétique, ne peut résister à la gravité. Mais la mécanique quantique nous permet d'expliquer ce que la relativité générale ne peut parfois pas expliquer : ce sont les effets quantiques qui suggèrent qu'en fait, un trou noir doit rayonner continuellement, perdant ainsi son énergie. Cela ressemble au rayonnement d'un corps noir causé par la température du trou noir, qui est inversement proportionnelle à sa masse. Mais dans ce cas particulier, la masse très élevée du trou noir conduit à l'émission d'ondes de très faible énergie.

Selon Afshordi et son collègue, le cosmologiste Jahed Abedi de l'Institut Max Planck de physique gravitationnelle en Allemagne, ils ont réussi à trouver des échos, ce qui signifie qu'ils ont également détecté le rayonnement de Hawking. Leurs résultats sont cohérents avec les échos prédits par les modèles de trous noirs émettant un rayonnement de Hawking [7].

2.3. *Le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen*

Le paradoxe EPR est une expérience physique qui, selon les auteurs, devrait rejeter les fondements de la mécanique quantique, c'est-à-dire l'interprétation (probabiliste) la plus courante de Copenhague.

Le schéma de l'expérience est le suivant : nous prenons deux particules élémentaires avec une quantité de mouvement exactement nulle, suffisamment éloignées l'une de l'autre pour qu'elles ne puissent pas interagir. La quantité de mouvement est ensuite mesurée avec précision pour une particule (c'est-à-dire avec une erreur faible ou nulle) et les coordonnées sont mesurées avec précision pour l'autre particule. La deuxième particule mesurera alors avec précision à la fois la quantité de mouvement et les coordonnées, ce qui n'est pas possible dans la relation de Heisenberg.

Les mesures conduisent donc à de telles contradictions, et c'est précisément là que réside le paradoxe :

1. À la suite de deux mesures différentes effectuées sur le premier système, le second système peut se trouver dans deux états différents décrits par des fonctions d'onde différentes.

2. Pendant la mesure, les systèmes n'interagissent plus et, par conséquent, le second système ne devrait pas subir de changements à la suite des mesures effectuées sur le premier système. Cependant, le processus de réduction de la fonction d'onde du premier système entraîne une réduction instantanée de la fonction d'onde du second système sans impact direct sur celui-ci et, par conséquent, un changement d'état du système, ce qui contredit le principe de localité [8].

Les auteurs de ce paradoxe pensent que ces expériences sont soit incompatibles avec la mécanique quantique, soit que les lois de la causalité ne s'appliquent pas. Actuellement, l'opinion dominante est que la mécanique quantique est une théorie physique intégrale et que la raison du paradoxe est l'illégitimité de l'utilisation directe de concepts classiques pour décrire des objets quantiques.

La solution du paradoxe EPR a prouvé que la "mesure" des paramètres d'objets quantiques peut être effectuée sans impact direct, en mesurant sur un objet corrélé distant. Ce paradoxe a stimulé le développement d'un certain nombre de nouveaux concepts et d'études sur les états quantiques intriqués. Des technologies basées sur des états quantiques corrélés d'objets sont actuellement en cours de développement. Par exemple, en cryptographie quantique, les particules intriquées sont utilisées pour contrôler l'intégrité de la transmission des informations.

3. EXEMPLES D'APPLICATIONS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE DANS LA VIE

3.1. Cryptographie quantique et communication quantique

La cryptographie quantique est une science qui étudie les méthodes de protection des systèmes de communication et repose sur l'inviolabilité fondamentale des lois de la physique quantique, dont les objets assurent la transmission sécurisée des informations entre utilisateurs légitimes. Les grands principes sont le postulat de la mesure (résultat du principe d'incertitude d'Heisenberg) et le théorème d'interdiction du clonage.

Le principe d'incertitude est une inégalité fondamentale (relation d'incertitude), selon laquelle tous les paramètres dynamiques sont divisés en deux groupes (le premier est constitué des coordonnées temporelles et spatiales, le second de la quantité de mouvement et de l'énergie), et il est impossible de mesurer simultanément des paramètres appartenant à différents groupes (par exemple, la localisation et l'énergie d'un objet).

Le théorème d'interdiction du clonage stipule qu'il est impossible de créer des copies exactes (100 %) d'objets quantiques. Ces propriétés ne sont pas inhérentes aux systèmes de communication classiques et garantissent la stabilité absolue et inconditionnelle de la théorie de l'information. Récemment, les systèmes de sécurité de l'information fondés sur la cryptographie quantique ont suscité un intérêt croissant au sein de la communauté scientifique internationale [9]. La distribution quantique de clés (QKD) occupe une place importante, et des domaines tels que la communication directe sécurisée quantique (QDC), le partage quantique de secrets (QSS), le chiffrement quantique de flux (QSC), la signature numérique quantique (QDS) et la stéganographie quantique se distinguent également (Fig. 5).



Fig. 5. Classification des méthodes de cryptographie quantique [Ibid.].

3.2. Informatique quantique

Les ordinateurs quantiques sont des machines qui stockent des données et effectuent des calculs en utilisant les propriétés de la physique quantique. Les ordinateurs traditionnels, y compris les smartphones et les ordinateurs portables, codent l'information sous forme binaire, c'est-à-dire en bits - 0 ou 1 (il y a aussi eu des ordinateurs qui codaient l'information en chiffres de trois ou de huit, etc.) Dans les ordinateurs quantiques, l'unité de base de la mémoire est le qubit ou bit quantique (Qbit).

Un qubit est un système quantique qui possède deux états fondamentaux, $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Toutefois, contrairement à un bit classique, un qubit peut se trouver non seulement dans un état particulier, mais aussi dans un état de superposition :

$$|Q\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle .$$

La différence la plus importante entre un qubit et un bit classique est que l'état dit "mixte" ou état de superposition est possible dans le système de qubits. Dans un tel état, chaque qubit contient simultanément "0" et "1", et donc, un système quantique de N qubits contient simultanément tous les nombres binaires possibles de 0 à N, c'est-à-dire 2^N bits [10].

Les ordinateurs quantiques peuvent résoudre le problème de la congestion dans les villes de plusieurs millions d'habitants ou offrir des options pour la construction d'une meilleure infrastructure urbaine en termes de meilleure coexistence entre l'homme et la nature. Ils peuvent également être utilisés pour la modélisation financière, les prévisions météorologiques ou l'exploration du potentiel de nouvelles ressources énergétiques, etc.

3.3 Capteurs quantiques et leur utilisation dans la science, la vie quotidienne et la défense

Les capteurs quantiques sont basés sur des atomes ou des photons ultra-froids qui sont soigneusement manipulés par superposition ou enchevêtrement ("entanglement") dans des états quantiques spécifiques. En exploitant le fait que les états quantiques sont extrêmement sensibles aux perturbations, les capteurs quantiques sont capables de détecter des variations infimes dans des paramètres tels que la température, l'accélération, la gravité ou le temps..

Les capteurs quantiques ont le potentiel de transformer notre technologie de mesure et de détection en permettant des mesures beaucoup plus précises et sensibles. Pour n'en citer que quelques-uns, les capteurs quantiques pourraient nous permettre de détecter avec précision ce qui se trouve sous nos pieds grâce à la cartographie souterraine, de fournir des systèmes d'alerte précoce pour les éruptions volcaniques, de permettre aux systèmes autonomes de "voir" ce qui se trouve au coin de la rue et d'utiliser des scanners portables pour surveiller l'activité cérébrale humaine [11].

Bien que la technologie quantique puisse sembler relever d'un avenir lointain, les premiers capteurs quantiques sont déjà sur le marché (par exemple, les horloges atomiques et les gravimètres).

Les capteurs quantiques peuvent également avoir des applications militaires très prometteuses. Par exemple, les capteurs quantiques peuvent être utilisés pour détecter les sous-marins et les avions furtifs (radar quantique), et ils peuvent également être utilisés pour la navigation et le chronométrage de précision (NCP) en tant que systèmes de navigation inertielle fiables qui permettent de naviguer sans avoir besoin d'une référence externe à des systèmes tels que le GPS (États-Unis) ou le BD (Chine).

CONCLUSIONS

L'application de la mécanique quantique dans la vie moderne devient de plus en plus importante, et les technologies qui utilisent les effets quantiques sont de plus en plus répandues. Dans l'ensemble, la mécanique quantique est un domaine scientifique important qui ouvre de nouvelles perspectives et crée de nouveaux défis pour les scientifiques et les technologues. Une fois les problèmes scientifiques résolus, un grand nombre de technologies passent des laboratoires scientifiques au domaine appliqué. En voici quelques exemples :

- la cryptographie quantique, qui utilise les principes quantiques pour garantir la sécurité de la transmission des informations ;
- l'informatique quantique, qui permet d'effectuer des calculs plus rapidement que les ordinateurs traditionnels ;
- les capteurs quantiques, qui peuvent être utilisés pour calculer l'heure exacte ou déterminer la position d'objets dans l'espace avec une extrême précision (systèmes NCP et radars quantiques).

Cependant, la mécanique quantique conduit également à des phénomènes paradoxaux et à des paradoxes, tels que le rayonnement d'un corps absolument noir, le rayonnement des trous noirs ou le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen, que les chercheurs tentent encore de démêler et d'expliquer.

Ainsi, l'étude des postulats de la mécanique quantique ouvre la voie à une meilleure compréhension du comportement des particules fondamentales et permet de résoudre des problèmes complexes dans divers domaines scientifiques tels que la physique et la chimie, les mathématiques et l'astronomie. Il est particulièrement intéressant d'expliquer les phénomènes qui se produisent dans les objets superlarges et supermassifs (trous noirs et étoiles) à l'aide de théories liées à des objets ultra-petits et presque sans poids (quanta).

Ainsi, introduire les élèves aux fondements de la mécanique quantique à travers ce manuel leur offrira une meilleure compréhension d'autres disciplines scientifiques et leur permettra d'explorer les interconnexions entre divers phénomènes naturels.

LISTE DE RÉFÉRENCES

-
1. Équation de Schrodinger. HyperPhysics. Université d'État de Géorgie. URL : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/schr.html>.
 2. Fonction d'onde. Encyclopédie de la physique quantique et de la philosophie des sciences. URL : <http://www.quantumphysicslady.org/glossary/wave-function/>.
 3. Borovoy M.O., Olikh O.Y. Fondements physiques de la mécanique quantique. Pour les étudiants sciences naturelles. Partie 1 - K. : 2011. 122 c.
 4. Ostapov S.E., Dobrovolsky Y.G. informatics and quantum computing / S.E. Ostapov. Y.G. Dobrovolsky - Chernivtsi : TCHERNIVTSI, 2021. - 99 c. URL : <https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/2830/QuantumComputing.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
 5. Jasem Mutlaq. Rayonnement du corps noir. Projet AstroInfo. URL : <https://docs.kde.org/trunk5/uk/kstars/kstars/ai-blackbody.html>.
 6. Jahed Abedi et Niayesh Afshordi (2019). Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. Échos de l'abîme : un reste de trou noir à rotation élevée pour la fusion d'étoiles binaires à neutrons GW170817. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2019/11/010>
 7. Les trous noirs s'évaporent-ils ? Les scientifiques pourraient avoir confirmé l'hypothèse de Stephen Hawking. L'espace et l'univers - apprenez tout ! URL : <https://ecotech.news/space/810-chorni-diri-viparovuyutsya-vcheni-mozhlivopiditverdili-gipotezu-stivena-gokinga.html>
 8. Le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen. URL : <http://bit.ly/3JV2Dz5>.
 9. Cryptographie quantique. Encyclopédie de l'Ukraine moderne. URL : <https://esu.com.ua/article-11921>.
 10. Les technologies quantiques dans la défense et la sécurité. REVUE DE L'OTAN. URL : <https://www.nato.int/docu/review/uk/articles/2021/06/03/kvantovtehnolog-v-oboron-bezpets/index.html>.
 11. Les capteurs quantiques pourraient permettre aux voitures autonomes de "voir" autour d'elles. Scientific American. URL : <https://www.scientificamerican.com/article/quantum-sensors-could-let-autonomouscars-see-around-corners/>.