

Avant-propos

La physique nucléaire a pour objet l'étude des propriétés des noyaux atomiques visant à comprendre les propriétés des *nucléons*, les mécanismes des *réactions nucléaires* (spontanées, provoquées) dans le but de décrire les différents processus d'*interactions élastiques et inélastiques* noyaux/noyaux.

Les radionucléides sont utiles dans divers secteurs de la vie quotidienne : archéologie, biologie, agronomie, secteur médical, secteur industriel, etc. Parmi les plus spectaculaires, citons les applications en radiochronométrie (datation d'objets archéologiques, de sédiments et de sols pour la détection de polluants anthropiques, etc.), en médecine nucléaire (radiopharmaceutiques utilisés en imagerie de médecine nucléaire, en radiothérapie, etc.). La production d'énergie électrique dans les centrales nucléaires exploite les propriétés des réactions de fission nucléaire. De plus, l'étude de la physique nucléaire permet de comprendre de nombreux phénomènes astrophysiques tels que les processus de nucléosynthèse (primordiale, stellaire, explosive) dans le cadre du modèle du *big bang*. L'étude de ces processus permet de comprendre l'origine des éléments chimiques et de modéliser l'évolution des étoiles depuis leur naissance jusqu'à leur fin explosive, par exemple en supernovae et en étoiles à neutrons [SAK 22].

Cet ouvrage, intitulé *Physique nucléaire 2 : radiochronomètres et radiopharmaceutiques*, est constitué de quatre chapitres.

Le [chapitre 1](#) est consacré à une description du modèle du big bang permettant de comprendre l'origine de tous les éléments chimiques connus à partir des réactions de nucléosynthèse. Le chapitre débute par la présentation de la théorie de Christian Doppler (1804-1853) ayant conduit à son hypothèse sur le phénomène physique connu sous le nom d'*effet Doppler* dans le cas des *ondes sonores*. Par la suite, est décrite l'expérience historique de Christoph Buys Ballot (1817-1890) ayant confirmée l'effet Doppler. Ensuite, l'étude est consacrée à la théorie d'Armand Hippolyte Fizeau (1819-1896) sur

l'effet Doppler qui se manifeste dans le cas des ondes lumineuses. Cette étude permet d'établir la formule de l'effet Doppler-Fizeau à partir des lois de transformation du *quadrivecteur d'onde*. Ensuite sont étudiés les phénomènes des effets Doppler longitudinal et transversal dans l'approximation classique pour des mouvements faiblement relativistes et pour en déduire la formule de l'effet Doppler-Fizeau utilisée pour l'interprétation du phénomène de *décalage vers le rouge* des sources lumineuses en mouvement relatif et pour le calcul de la vitesse radiale d'une étoile ou d'une galaxie. De plus, est étudié dans l'approximation classique le lien entre le signe du décalage Doppler et le mouvement relatif d'une source lumineuse pour mettre en évidence le phénomène de décalage vers le rouge du spectre des étoiles et des galaxies principalement. Suite à ces développements, le principe de mesure du décalage vers le rouge est illustré schématiquement à l'aide du spectre de la galaxie baptisée NGC 3627 (NGC : *New General Catalogue*). Après cette étude sur le décalage vers le rouge interprété par l'effet Doppler-Fizeau, le déroulement du chapitre porte sur les faits théoriques et expérimentaux ayant permis de valider le modèle du big bang depuis l'observation du décalage vers le rouge à la découverte du fond diffus cosmologique. Ce survol historique débute par les premières observations du phénomène de décalage vers le rouge des raies spectrales des galaxies par Vesto Melvin Slipher (1875-1969). Ensuite, sont mentionnés les travaux d'Alexandre Friedmann (1888-1925), qui publia le premier une théorie de l'expansion de l'Univers. Les travaux de Georges Lemaître (1894-1966) reliant l'expansion de l'univers et les observations sur la vitesse de fuite des nébuleuses extragalactiques et sa formulation de l'hypothèse de « l'atome primitif » pour expliquer l'origine de l'Univers en y introduisant la notion d'instant zéro figurent en bonne place dans ce rappel historique. La présentation de ces travaux est suivie des observations décisives d'Edwin Hubble (1889-1953) montrant que la variation de la vitesse avec la distance est linéaire, relation connue sous le nom loi de Lemaître-Hubble. Les différentes tentatives d'estimation de la constante de Hubble notée H_0 sont discutées. La découverte du *fond diffus cosmologique* (FDC), qui constitua l'argument décisif en faveur de la théorie du big bang, met fin à ce rappel historique. Ensuite, le développement porte sur une description succincte de la chronologie relative à l'évolution de l'Univers après le big bang. C'est ainsi que sont étudiées les différentes ères caractéristiques de la chronologie de l'Univers que sont l'ère de Planck, l'ère de la grande unification, l'ère d'inflation, l'ère de la baryogenèse, à la nucléosynthèse primordiale, l'ère de la formation du plasma quarks/gluons, l'ère de la nucléosynthèse, l'âge sombre de l'Univers, désignant l'ère débutant avec le *découplage rayonnement/matière*, l'ère radiative et enfin l'ère de la formation des étoiles et des galaxies. Le chapitre est parsemé d'exercices d'application corrigés.

Le chapitre 2 est réservé à l'étude des différents processus de nucléosynthèse ayant commencé près de 1 s après le big bang et pendant environ 3 min. le chapitre débute par une vue d'ensemble sur la notion d'élément chimique au nombre de 118 connus, dont 90 existent à l'état naturel sur Terre. Par la suite, sont étudiés en détail les processus de

nucléosynthèse primordiale, stellaire et explosive. L'étude de la nucléosynthèse primordiale permet de décrire la formation des éléments légers tels que l'hydrogène, le deutérium, l'hélium 3, l'hélium 4, le lithium 6 et le lithium 7 dans les premiers instants de l'Univers. L'étude de la nucléosynthèse stellaire permet de comprendre l'origine du carbone 12, de l'oxygène 16 du néon 20, du sodium 23, du magnésium 24, du silicium 28 et 30, du soufre 31 et du phosphore 30 et 31 ainsi que celle de tous les noyaux jusqu'au fer 56. Puis est étudiée la formation de tous les éléments plus lourds que le fer et des isotopes synthétisés *via* les processus *s* (*slow*) et le processus *r* (*rapid*) lors de la nucléosynthèse explosive. Cette étude permet de décrire le processus de capture de neutrons « lente » *via* le processus *s* ainsi que le processus rapide de captures radiatives de neutrons suivies de désintégrations fournissant environ la moitié de l'abondance des éléments au-delà du fer jusqu'à l'uranium. De plus, sont traités dans ce chapitre le processus de spallation, correspondant à la formation ou à la destruction de gros noyaux par des particules de très haute énergie (comme la nucléosynthèse du Li, Be et B dans le milieu interstellaire), ainsi que le processus de photodésintégration, traduisant la destruction de noyaux par des photons. Ensuite, l'étude est focalisée sur la description de processus importants de formation des noyaux tels que la réaction triple alpha, désignant un ensemble de réactions de fusion nucléaire transformant simultanément trois particules α (noyaux d'hélium 4) en noyau de carbone 12 *via* le noyau de béryllium 8 (instable) ainsi que le processus de formation des noyaux composés dans le cas particulièrement de la réaction $^{14}\text{N} (p, \gamma)^{15}\text{O}$ intervenant dans le cycle CNO (*Carbon-Nitrogen-Oxygen*) ou cycle de Bethe-Weizsäcker étudié en astrophysique. Enfin, le déroulement du chapitre porte sur la classification des radionucléides naturels et artificiels dans l'environnement. Le chapitre est de même parsemé d'exercices d'application corrigés.

Le chapitre 3 est dédié à l'étude des **radiochronomètres appliqués à la datation**. Il débute par une étude portant sur le principe de la datation par la méthode du carbone 14 permettant d'introduire les notions d'isotopes cosmogoniques, de rayonnement cosmique et d'âge calendaire. De même sont introduites les notions d'effet « bombe » et d'effet « Suess », participant à modifier la concentration de radiocarbone dans l'atmosphère, et la notion d'effet réservoir, traduisant le fait que les concentrations océaniques et atmosphériques en ^{14}C radioactif ne sont pas homogènes. Ensuite, l'étude porte sur le principe de la datation par la méthode du potassium-argon (K-Ar), permettant d'établir l'équation d'âge d'une éruption volcanique en ne tenant compte que de l' ^{40}Ar provenant de la décroissance du ^{40}K présent dans la lave (cet argon 40 est souvent noté $^{40}\text{Ar}^*$). Après, le déroulement porte sur la correction de l'équation d'âge en tenant compte de l' ^{40}Ar atmosphérique en vue d'une bonne exploitation des résultats obtenus à l'aide de l'horloge K-Ar. Par la suite, est décrit le principe de la datation des sols ou des sédiments par les radiochronomètres plomb 210, césium 137 et béryllium 7. La description du principe de datation par le plomb 210 permet d'expliquer les origines du plomb 210 supporté ($^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$) et du plomb 210 en excès ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) dans les sédiments. Ensuite, sont

décrits les modèles CFCS (*Constant Flux and Constant Sedimentation*), CRS (*Constant Rate of Supply*) et CIC (*Constant Initial Concentration*), permettant de déterminer expérimentalement l'âge d'un sédiment. L'étude des essais nucléaires atmosphériques effectués entre 1945 et 1980 et de l'accident de Tchernobyl survenu en 1986, constituant la deuxième source de présence du césium 137 dans l'atmosphère, figure en bonne place dans ce chapitre. Par la suite, le déroulement porte sur le principe de la datation à l'aide du radiochronomètre ^{137}Cs par la réalisation de carottages au niveau du sédiment considéré et sur l'interprétation du profil de l'activité du ^{137}Cs selon la date de l'échantillonnage. Ensuite est décrit le principe de la datation à l'aide du cosmonucléide ^7Be se formant dans la troposphère par spallation nucléaire. Le principe de la datation par le radiochronomètre uranium-thorium pour la détermination de l'âge de certaines formations carbonatées d'origine animale ou sédimentaire ainsi que le principe de la datation à l'aide des radiochronomètres uranium-thorium et uranium-protactinium utilisés dans la datation des coraux bouclent le déroulement du chapitre. Comme pour les chapitres précédents, des exercices d'application corrigés sont proposés à divers endroits du chapitre.

Le chapitre 4 est consacré à des [généralités sur les radiopharmaceutiques utilisés en imagerie de médecine nucléaire](#). Le chapitre débute par la définition de la médecine nucléaire ainsi que par les objectifs visés à travers cette discipline. Ensuite sont précisés les différents domaines d'application de la médecine nucléaire. Par la suite, l'étude porte sur un bref survol de la naissance de la médecine nucléaire depuis la *première* utilisation des radio-isotopes comme traceurs en biologie végétale en 1913 jusqu'à la mise au point de la tomographie par émission de positons (TEP) en 1975. Après cette genèse, les différents types de maladies diagnostiquées en médecine nucléaire sont étudiés. Il s'agit notamment des maladies cardio-vasculaires, des cancers ainsi que des affections neuro-dégénératives telles que les maladies d'Alzheimer, de Parkinson, la démence à corps de Lewis, etc. Ensuite, l'étude est focalisée sur des généralités sur le cancer portant sur l'organisation cellulaire dans l'organisme et sur l'évolution des cellules cancéreuses conduisant à la notion de tumeur et à la formation des métastases. Ce développement permet d'introduire les notions de cancérogenèse (ou carcinogenèse ou encore oncogenèse). Ensuite, l'étude porte sur la description des processus d'angiogenèse normale et tumorale, permettant d'introduire le facteur de croissance de l'endothélium vasculaire (en anglais : *Vascular Endothelial Growth Factor* (VEGF)), facteur biologique jouant un rôle essentiel lors des processus de vasculogenèse et d'angiogenèse normale et pathologique. Suite à cette description, le développement porte sur les données globales d'épidémiologie des cancers dans le monde entre 2018 et 2023 ainsi sur les recommandations des organismes de lutte contre le cancer. Ensuite, sont étudiées les propriétés spécifiques des radiopharmaceutiques, notamment le procédé de synthèse des médicaments radiopharmaceutiques, le contrôle de qualité des radiopharmaceutiques, permettant d'introduire les notions de pureté radiochimique, de pureté radionucléidique et de test de

toxicité anormale. Ensuite, sont décrites les différentes méthodes de déterminations expérimentales de la pureté radiochimique telles que la chromatographie couche mince (CCM), la chromatographie sur colonne (CSC) et la chromatographie liquide haute performance (HPLC). Suite à ce développement, sont décrits les principes de la tomographie par émission de positons (TEP) et de la tomographie par émission monophotonique (TEMP). Ensuite, l'étude porte sur la présentation des différents radio-isotopes utilisés en imagerie de médecine nucléaire ainsi que sur la description et le déroulement du *PET-scan* ou *TEP-scan* (tomographie par émission de positons couplée à un scanner). Enfin, le chapitre est bouclé par la présentation des principales scintigraphies et de leurs utilisations en médecine nucléaire.

À la suite des quatre chapitres, sont placées trois annexes (voir sections 4.5.1, 4.5.2 et 4.5.3) consacrées à une étude sur les maladies démentielles neurodégénératives en rapport avec le contenu de la section 4.6 du chapitre 4, où sont étudiées les propriétés du radiopharmaceutique ^{123}I -ioflupane, utilisé pour poser un diagnostic différentiel entre les tremblements essentiels et les maladies neurodégénératives telles que la maladie de Parkinson, la démence à corps de Lewy et la maladie d'Alzheimer. C'est ainsi que sont étudiés en détail les causes et effets, les facteurs de risque et le diagnostic de la maladie d'Alzheimer (annexe 1, voir section 4.5.1), responsable de troubles cognitifs et comportementaux pour 35 millions de malades selon des études de 2022, de la démence à corps de Lewy (annexe 2, voir section 4.5.2), très fréquente et qui représente environ 20 % des cas de démence, et de la maladie de Parkinson (annexe 3, voir section 4.5.3), avec une prévalence supérieure à 2 % après 65 ans selon des études en date de 2020. Ces annexes sont suivies d'une riche bibliographie permettant au lecteur d'approfondir les connaissances enseignées dans l'ouvrage, parachevé par un index.

Nous exprimons toute notre gratitude au Pr Maurice Ndeye, directeur de recherche titulaire, chef du laboratoire Carbone 14 de l'Institut fondamental d'Afrique noire de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, pour ses précieuses notes de relecture sur la datation par le radiocarbonate 14. De même, nous adressons nos chaleureux remerciements au Dr Frédéric Thévenin, astrophysicien à l'Observatoire de la Côte d'Azur, Nice, France, pour ses précieuses corrections et remarques sur les processus de nucléosynthèse.

Cet ouvrage est rédigé à l'intention des élèves, des professeurs de sciences physiques, des étudiants, des enseignants-chercheurs et des professionnels travaillant dans le domaine de l'astrophysique, des sciences de l'environnement en rapport avec la datation et de la médecine nucléaire.

Cet ouvrage est écrit dans un langage clair et concis avec une structure typographique analogue à celle du volume 1. Chaque chapitre débute ainsi par une présentation de

l'objectif général, des objectifs spécifiques visés et des prérequis nécessaires pour la compréhension du chapitre à étudier. De plus, chaque chapitre est parsemé d'exercices d'application simples pour une bonne compréhension des propriétés des radioéléments étudiés.

Cet ouvrage ne fait pas le pari d'étudier tous les aspects liés à l'étude de l'origine des radioéléments et de leurs applications en radiochronométrie ainsi qu'à la dualité médecine nucléaire/radiopharmaceutiques. L'œuvre humaine étant perfectible, nous restons à l'écoute de nos lecteurs pour toute suggestion, remarque ou critique qui pourrait servir à améliorer la qualité scientifique du présent ouvrage.