

Formation aux sciences nucléaires

Le Centre international de physique théorique est un cadre d'échanges pour la physique nucléaire et la physique des réacteurs

par M.K. Mehta et J.J. Schmidt

Le Centre international de physique théorique de Trieste (CIPT) s'occupe depuis longtemps déjà de la formation de scientifiques des pays en développement dans divers domaines de la physique théorique fondamentale et de ses applications à divers secteurs de la technologie. La conception à la base de ses activités est que la technologie s'appuie sur la recherche et la découverte scientifiques. La justesse de cette façon de voir est clairement démontrée pour la technologie nucléaire qui se fonde sur la physique nucléaire.

Il y a cinquante ans, le phénomène physique qu'est la fission nucléaire a été découvert. Ses principales caractéristiques sont les suivantes: la fission des nucléides lourds peut être provoquée par des neutrons thermiques; chaque fission émet plusieurs neutrons et libère une grande quantité d'énergie (environ 200 MeV).

Ces caractéristiques ont rendu possibles les réactions de fission nucléaire en chaîne, entretenues et contrôlables, qui ont conduit, dès 1942, à la construction du premier réacteur nucléaire et à la production d'énergie d'origine nucléaire à des fins pacifiques. Actuellement, plus de 400 réacteurs de puissance totalisant près de 300 000 MWe et plus de 300 réacteurs de recherche exploités par le monde représentent une part importante de la production mondiale totale d'électricité et de la capacité nucléaire de l'industrie et de la recherche scientifique.

Ce sont surtout les pays développés qui ont mis au point des réacteurs de puissance. A noter toutefois que 17 pays en développement ont lancé des programmes nucléaires civils pour combler les lacunes de leurs ressources énergétiques. Deux fois plus nombreux sont les pays en développement qui possèdent des réacteurs conçus pour la recherche et l'enseignement en physique nucléaire fondamentale et appliquée et pour la formation à la conduite des réacteurs de puissance. A l'heure actuelle, près de 80 pays en développement ont recours à des techniques nucléaires dans divers secteurs de la recherche et de l'économie et utilisent des radio-isotopes et des rayonnements en agriculture, médecine, biologie, géologie et recherche environnementale.

Pour avoir la maîtrise de tous les aspects de la technologie nucléaire — conception, fonctionnement, maintenance et sûreté des réacteurs de puissance et de recherche — il faut bien connaître le type, le mécanisme et l'ampleur des réactions nucléaires et des processus de désintégration radioactive qui se produisent dans un réacteur. La physique nucléaire expérimentale et théorique est l'outil fondamental de recherche qui permet de comprendre la nature de ces réactions

nucléaires et d'en déterminer l'importance quantitative. Les constantes nucléaires, qui sont le produit final de la recherche, constituent, une fois réalisées plusieurs étapes intermédiaires d'évaluation et de traitement informatique avec des bases de données appropriées, l'apport essentiel aux calculs de la physique des réacteurs. On a besoin de ces calculs pour savoir quel sera le comportement des neutrons dans un réacteur et pour quantifier les caractéristiques les plus importantes de la conception du fonctionnement et de la sûreté des réacteurs à fission. Les constantes nucléaires sont le lien entre la physique nucléaire fondamentale, la technologie nucléaire et les applications.

Tout programme d'enseignement de la science et de la technologie nucléaires axé sur la physique théorique doit inclure: les méthodes et les modèles de la théorie de base des réactions nucléaires, vérifiés par comparaison avec les résultats de la physique nucléaire expérimentale et les codes informatiques associés pour le calcul des constantes nucléaires; l'évaluation et l'application technologique des constantes nucléaires informatisées; les méthodes de la physique des réacteurs et les codes informatiques associés pour le calcul des caractéristiques de conception, de fonctionnement et de sûreté des réacteurs de puissance et de recherche.

Aperçu historique

La participation du Centre international de physique théorique à la physique nucléaire des faibles énergies a débuté par quatre cours de théorie nucléaire consacrés aux principes essentiels de cette théorie, compte tenu des applications (1966, 1969, 1971 et 1973). Dans les années 70, d'autres pays en développement se sont lancés à leur tour dans la technologie nucléo-électrique et dans l'application des rayonnements et des isotopes dans divers domaines scientifiques. Au cours de ces années est apparu le besoin d'un transfert à grande échelle de la connaissance pratique des méthodes et des techniques nucléaires scientifiques aux pays en développement. Le Centre était ce qu'il est demeuré, c'est-à-dire le seul endroit au monde où peut avoir lieu ce transfert pour ce qui est de la physique théorique fondamentale et appliquée. Cette activité est le complément nécessaire du transfert des connaissances expérimentales et industrielles en technologie des réacteurs de puissance et de recherche qu'assure le programme d'assistance et de coopération techniques de l'AIEA.

Ayant constaté cette évolution et donnant suite à une recommandation du Comité international des constantes nucléaires, l'AIEA, en coopération avec le Centre, a convoqué une réunion de consultants à Trieste, en 1975,

M. Mehta est membre de la Section des constantes nucléaires (Division des sciences physiques et chimiques), dont M. Schmidt est le chef.

qui avait pour mandat d'examiner le rôle et l'utilisation de la théorie nucléaire, des modèles et des codes informatiques dans l'évaluation des constantes nucléaires neutroniques nécessaires à la conception des réacteurs à fission et à fusion, et à d'autres applications nucléaires. Il s'agissait aussi d'élaborer des recommandations pour des réalisations futures, compte tenu particulièrement des besoins, et de l'éventuelle coopération des atomistes des pays en développement.

On estime que cette rencontre d'experts de haut niveau de la physique fondamentale et appliquée a été déterminante pour la définition du rôle du Centre dans le domaine de la théorie nucléaire et de ses applications technologiques. Outre qu'elle a exprimé quels étaient les besoins pour une évolution intrinsèque plus poussée de la théorie fondamentale et appliquée des réactions nucléaires à faible énergie, la réunion a conclu qu'il y avait de grandes possibilités pour les scientifiques des pays en développement d'apporter de précieuses contributions dans les domaines de la théorie nucléaire, de la physique des réacteurs, et du calcul et de l'utilisation des constantes nucléaires. Toutefois, étant éloignés de leurs pairs, ils avaient besoin de mettre à jour leurs connaissances et de se tenir au courant de l'actualité scientifique et de la méthodologie moderne dans ces domaines. La réunion a recommandé l'organisation au Centre d'un cours de plusieurs semaines sur la théorie nucléaire et les codes informatiques de modèles nucléaires aux fins de diverses applications.

La participation de la Division de l'énergie d'origine nucléaire a complété le cours envisagé en y ajoutant les aspects touchant aux réacteurs nucléaires de puissance. Les premiers cours d'hiver sur la physique nucléaire et les réacteurs, qui se sont donnés du 17 janvier au 10 mars 1978, étaient organisés conjointement en deux parties par l'AIEA, le Centre international de physique théorique, et le Centro di Calcolo de Bologne (Italie), dépendance du Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare.

La première partie du cours était consacrée à la «Théorie nucléaire et ses applications» et était conçue pour offrir aux physiciens nucléaires, aux spécialistes des constantes nucléaires et des réacteurs qu'intéressent la théorie nucléaire et les constantes nucléaires — particulièrement ceux des pays en développement qui envisagent l'option nucléo-énergétique — une vue complète de la recherche contemporaine relative à la théorie des réactions nucléaires à faible énergie. Cette première partie du cours comprenait aussi une formation de haut niveau à l'application de cette théorie et des codes informatiques associés aux fins de l'interprétation et de la définition des constantes neutroniques nécessaires au calcul des réacteurs. Les thèmes étudiés étaient les suivants: l'importance des constantes nucléaires pour les applications de la technologie nucléaire, la théorie de l'interprétation des résonances neutroniques, les modèles optiques évolués, la théorie statistique des réactions nucléaires neutroniques, la théorie et les modèles de la désintégration radioactive précédant l'équilibre et la théorie de la fission provoquée par les neutrons. Le cours fut suivi par 91 chercheurs nucléaires venant de 29 pays en développement, 12 scientifiques venant de six pays industrialisés et cinq autres scientifiques de deux organismes de recherche internationaux.

La seconde partie du cours d'hiver de 1978 portait sur la théorie des réacteurs et les réacteurs de puissance; elle était conçue comme une vaste récapitulation de la théorie des réacteurs et de son application à la technologie de la conception et de l'exploitation des réacteurs de puissance. Les thèmes étudiés étaient les suivants: les constantes nucléaires utilisées pour les calculs de réacteurs, les méthodes de pointe en physique des réacteurs utilisées pour la théorie, les calculs et l'expérimentation; la physique des principaux types de réacteurs de puissance à neutrons thermiques; les codes informatiques pour les calculs de la neutronique des réacteurs de puissance. Ont suivi le cours 100 chercheurs nucléaires venant de 27 pays en développement, 16 scientifiques de six pays industrialisés et quatre organismes de recherche internationaux.

Situation actuelle

Plusieurs raisons incitent le Centre et l'AIEA à donner une suite à ces premiers cours en organisant une série de collèges et d'ateliers biennaux. Les raisons sont le grand nombre des participants aux cours d'hiver sur la physique nucléaire et les réacteurs, les échanges et les contacts nombreux entre les participants des pays en développement et les conférenciers et entre les participants eux-mêmes. De nombreuses demandes ont été faites pendant et après les cours, concernant les constantes nucléaires, des documents scientifiques, des modèles nucléaires, la physique des réacteurs et les codes de traitement des constantes. Les collèges et les ateliers ont eu lieu au Centre en 1980, 1982, 1984, 1986 et 1988. Pour les collèges de 1980 et de 1982, on a adopté la même formule qu'en 1978: deux cours ont été donnés successivement; le premier avait pour thème les constantes et la physique nucléaires et le second, les réacteurs nucléaires.

A partir de 1984, une nouvelle structure a été adoptée pour plusieurs raisons. Les trois premiers collèges comprenaient chacun deux parties auxquelles ont assisté essentiellement les mêmes participants. Il s'est avéré que les spécialistes de la physique des réacteurs et les ingénieurs nucléaires ne s'intéressaient pas à la théorie nucléaire et n'en tiraient aucun profit. Les théoriciens nucléaires et les spécialistes des constantes nucléaires, quant à eux, ne portaient aucun intérêt à la théorie des réacteurs. C'est pourquoi il a été décidé de scinder les cours, de continuer à les donner tous les deux ans, mais en alternant les sujets: théorie nucléaire et calcul sur modèle nucléaire des constantes nucléaires aux fins de leur application à la technologie (1984 et 1988); physique des réacteurs et applications des constantes nucléaires (1986 et, en principe, 1990).

A noter aussi que les progrès rapides du matériel informatique a rendu disponibles des micro- et mini-ordinateurs moins coûteux et plus puissants — particulièrement des ordinateurs personnels. Les pays en développement ont pu ainsi en acquérir davantage dans des configurations puissantes qui accroissent fortement leurs capacités d'opérer des calculs complexes à l'aide des codes plus élaborés de modèles nucléaires et de physique des réacteurs. Ultérieurement, le Centre s'est procuré un ordinateur central «Gould» auquel ont été

connectés des ordinateurs personnels de plus en plus nombreux.

Il en est résulté une présentation différente des cours de théorie nucléaire et de physique des réacteurs à partir de 1984. Les premiers de ces cours ont pris surtout la forme de conférences, de séminaires spéciaux et d'ateliers de discussion. Dès lors, les cours sont devenus des ateliers où étaient données des conférences suivies d'exercices sur ordinateur central et ordinateur personnel avec des codes de modèles nucléaires et de physique des réacteurs. Les conférences portaient surtout sur les avancées de la théorie fondamentale et sur la présentation de codes informatiques choisis pour des exercices. La nouvelle formule exigeait une préparation et une performance plus poussée impliquant l'étroite collaboration des conférenciers et des maîtres d'exercices, particulièrement des physiciens et des informaticiens. Ainsi, les codes informatiques ont dû être adaptés à l'ordinateur central et aux ordinateurs personnels du Centre, et les participants devaient beaucoup compter sur l'aide des moniteurs pour utiliser l'équipement informatique et faire les exercices.

A la demande des élèves de cours précédents, les ateliers du Centre ont été prolongés par des périodes de travaux pratiques de une à deux semaines dans des laboratoires des environs. En 1986, un cours pratique d'une semaine sur la physique, la sûreté et le fonctionnement d'un réacteur de recherche a été organisé à l'Institut Jozef Stefan de Ljubljana (Yougoslavie). Un cours analogue a eu lieu à la suite de l'atelier de 1988 aux laboratoires INFN de Legnaro (Italie) sur les expériences types de physique nucléaire fondamentale et appliquée.

Le niveau élevé des conférences, des exercices et des séances de discussion a été maintenu comme prévu, dès le début. C'est pourquoi d'assez hautes qualifications étaient également exigées des participants: études universitaires ou équivalentes ou plusieurs années d'études ou de recherche sur un ou plusieurs sujets des cours, après un premier diplôme scientifique. Pour les trois derniers cours, l'expérience du calcul électronique en modélisation nucléaire et physique des réacteurs et celle de l'emploi des ordinateurs en général étaient une condition préalable.

Les participants aux ateliers de théorie nucléaire étaient choisis parmi des chercheurs en physique nucléaire expérimentale et théorique et des spécialistes des constantes nucléaires, et comptaient aussi plusieurs physiciens des réacteurs de spécialisation plus générale. Pour les ateliers de physique des réacteurs, ce sont surtout des physiciens et des ingénieurs des réacteurs et des spécialistes des constantes nucléaires qui ont été retenus ainsi que des physiciens nucléaires s'intéressant à la physique des réacteurs.

De 70 à 90 participants de pays en développement ont suivi les cours. Depuis 1984, le nombre de participants que l'équipement informatique du Centre permet d'accepter dans chaque cours a pu être constamment maintenu entre 60 et 70. Tandis que les niveaux de connaissances des participants aux premiers cours étaient assez variables (les cours par petits groupes devant être donnés par les participants les plus avancés à ceux qui l'étaient moins), les classes récentes étaient beaucoup plus homogènes, la majorité des participants

Comptes rendus de cours de formation du CIPT

- *Nuclear theory in neutron nuclear data evaluation*, compte rendu d'une réunion de consultants, CIPT-Trieste, 8-11 décembre 1975, AIEA TECDOC, AIEA 180, vols. I et II (1976).
- *Nuclear theory for applications*, compte rendu de la première partie du cours d'hiver sur la physique nucléaire et les réacteurs, CIPT-Trieste, 17 janvier-10 février 1978, IAEA-SMR-43 (1980).
- *Reactor theory and power reactors*, compte rendu de la deuxième partie du cours d'hiver sur la physique nucléaire et les réacteurs, CIPT-Trieste, 13 février-10 mars 1978, IAEA-SMR-44 (1980).
- *Nuclear theory for applications — 1980*, compte rendu du cours interrégional supérieur sur l'application de la théorie nucléaire au calcul de constantes nucléaires pour la conception des réacteurs, CIPT-Trieste, 28 janvier-22 février 1980, IAEA-SMR 68/I (1981).
- *Operational physics of power reactors*, compte rendu du cours sur la physique de l'exploitation des réacteurs de puissance — démarrage, essais et gestion du combustible, CIPT-Trieste, 3-28 mars 1980, IAEA-SMR-68/II, 1982.
- *Nuclear theory for applications — 1982*, compte rendu du cours sur les progrès de la théorie nucléaire et des constantes nucléaires appliquées aux réacteurs, CIPT-Trieste, 25 janvier-19 février 1982, IAEA-SMR-13 (1984).
- *Applications in nuclear data and reactor physics*, compte rendu d'un atelier, CIPT-Trieste, 17 février-21 mars 1986, par D.E. Cullen, R. Muranaka et J.J. Schmidt, publié par World Scientific Publishing Co. Pte/Ltd., Singapour (1986).
- *Applied nuclear theory and nuclear model calculations for nuclear technology applications*, compte rendu d'un atelier, CIPT-Trieste, 15 février-18 mars 1988, publication prévue par World Scientific Publishing Co. Pte/Ltd., Singapour.

ayant des compétences professionnelles et une éducation correspondant au niveau requis pour les ateliers — du diplôme d'études supérieures au professorat.

Résultats

Au cours de la dernière décennie, les cours et les ateliers du Centre ont eu un impact notable sur les progrès de la science et de la technologie nucléaires dans les pays en développement. Diverses statistiques permettent de juger quel a été l'effet immédiat. Plus de 350 scientifiques de 60 pays en développement ont reçu une formation supérieure et moderne en théorie et modélisation nucléaires, évaluation et application des constantes nucléaires, physique des réacteurs et codes informatiques associés. Pendant cette période, plusieurs participants ont obtenu le statut d'associé ou d'affilié en théorie nucléaire appliquée et physique des réacteurs. Parallèlement aux cours, environ 40 séminaires spéciaux ont été organisés par des participants pour faire l'exposé de leurs propres travaux à leurs homologues, ce qu'ils n'auraient pas pu faire dans leur pays. Les comptes rendus des cours ont été publiés et plus de 500 exemplaires en moyenne ont été distribués par le Centre et l'AIEA dans les pays en développement (*voir l'encadré*). Ils sont largement cités dans les publications scientifiques nucléaires et servent de documentation de

base pour la préparation des programmes de physique nucléaire et de physique des réacteurs de diverses universités de pays en développement. Plusieurs participants à des cours antérieurs ont fait une belle carrière: de participants qu'ils étaient aux premiers cours, ils sont devenus conférenciers et maîtres d'exercices aux derniers ateliers.

Les effets à long terme de ces activités ont apporté la preuve de l'impact dans un périmètre plus large que celui des participants. Ainsi, depuis 1980, l'AIEA a vu se multiplier les demandes émanant de scientifiques de pays en développement et portant sur les constantes nucléaires numériques, les codes de traitement des constantes et les documents et rapports scientifiques; de 200 à 300 dans les années 70, elles sont passées à 700 ou 800 dans les années 80. Grâce à l'automatisation, dans le même temps, de la collecte, la vérification et la diffusion des constantes, il a été possible de répondre à ces nombreuses demandes.

Les cours ont fortement stimulé les échanges entre les atomistes des pays en développement et l'AIEA qui n'a cessé de prodiguer ses conseils pour la production, le traitement et l'application des constantes nucléaires aux calculs de physique nucléaire pratique et autres opérations. La participation aux cours a aussi conduit à la création ou à la consolidation de certains groupes ou centres de constantes nucléaires dans plusieurs pays en développement dont l'Argentine, le Brésil, la Chine, l'Inde et la Yougoslavie. Quelques-uns de ces centres, tels celui de São José dos Campos, au Brésil, et le Centre chinois de constantes nucléaires de l'Institut de l'énergie atomique de Beijing (Chine), regroupent la production, l'acquisition, le traitement et la diffusion des constantes nucléaires dans ces pays.

Le transfert aux pays en développement de codes informatiques de modélisation nucléaire et de physique des réacteurs a, lui aussi, augmenté. Ainsi, le récent atelier de 1988 comprenait la formation pratique à 11 codes informatiques de pointe destinés à la modélisation des réactions nucléaires pour le calcul des sections efficaces. A l'issue de l'atelier, 58 participants de huit pays en développement ont demandé le transfert de quelques-uns des codes, transmis par ailleurs à la banque de données de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN/OCDE), qui détache une partie importante de ses services informatiques dans des pays en développement, surtout dans les domaines précités. Au cours des quelques dernières années, l'AEN a aussi organisé des comparaisons entre divers laboratoires portant sur les codes informatiques relatifs à plusieurs aspects de la théorie des réactions nucléaires à faible énergie, tels que le modèle statistique, le modèle optique et la désintégration radioactive précédant l'équilibre.

Le Centre s'est révélé un lieu idéal de rencontre pour les atomistes des pays tant en développement que développés. Une coopération scientifique à titre individuel s'est établie entre chercheurs et des projets pluriannuels ont été élaborés par des participants aux cours.

Un important résultat du cours de 1980 a été le projet interrégional de coopération technique sur les techniques et instruments de mesure des constantes nucléaires dont les objectifs et la teneur ont été mis au point par

40 participants à ce cours. Il s'agissait du premier projet interrégional de coopération technique conçu pour accroître l'aptitude des pays en développement à faire des mesures nucléaires exactes, à l'aide de techniques connues depuis le début de l'ère atomique dans les domaines des constantes nucléaires. Grâce à l'appui complémentaire reçu des projets nationaux de coopération technique, ce projet interrégional a permis à plusieurs laboratoires de pays en développement comme le Maroc, le Pakistan et la Thaïlande d'atteindre le niveau de laboratoires nucléaires d'analyse et de se suffire à eux-mêmes. Ces laboratoires, auxquels d'autres se sont joints, ont participé à des programmes de recherche coordonnée de haut niveau organisés par l'AIEA en vue d'améliorer par la mesure, le calcul et l'analyse la qualité des sections efficaces neutroniques et leurs applications aux réacteurs à fission et à fusion.

Le projet interrégional, auquel ont pris part 28 laboratoires de 25 pays en développement et 14 laboratoires instructeurs de 11 autres pays, a duré de 1982 à 1986. Après une évaluation complète par des experts de l'AIEA des résultats du projet, un second projet interrégional de coopération technique portant sur la formation aux méthodes de mesure des constantes nucléaires a été lancé; il couvre un domaine plus étendu, englobant les principales techniques de mesure et d'analyse nucléaires relevant de projets analogues assistés par l'AIEA dans les pays en développement. Le but en était d'aider les laboratoires participants à obtenir des mesures exactes et fiables en physique nucléaire appliquée. Plus de 40 laboratoires ont manifesté leur intérêt et ont commencé à prendre une part active au projet, qui doit durer cinq ans, de 1987 à 1991.

Les cours ont aussi resserré les liens entre l'AIEA et le Centre. Les scientifiques attachés à l'AIEA ont donné des conférences à ces cours sur divers aspects du programme de l'AIEA, notamment sur les activités des Laboratoires de Seibersdorf, le programme d'énergie nucléaire, les conséquences de l'accident de Tchernobyl, la radioprotection intéressant les installations nucléaires et le programme d'assistance et de coopération techniques. Les conférences ont amené les scientifiques des pays en développement à mieux comprendre les buts, les objectifs et les procédures de l'AIEA et ont contribué à accroître l'efficacité de la coopération entre l'AIEA, en particulier par le biais de son programme d'assistance et de coopération techniques, et les organismes et établissements nucléaires des pays en développement.

Pendant les cours, les organisateurs ont acquis des données d'expérience. Chaque cours posait des problèmes nouveaux et de nombreux participants ont été d'un grand secours en présentant aux séances de synthèse des suggestions tendant à améliorer l'efficacité et l'impact de cours. Grâce à l'expérience et à ces suggestions, l'organisation des cours est constamment améliorée pour qu'ils deviennent un moyen efficace de transfert du savoir aux pays en développement. Les cours forment désormais un ensemble structuré parmi les activités scientifiques du Centre et constituent une filière importante pour le transfert des connaissances actuelles en physique nucléaire et physique des réacteurs à un nombre sans cesse croissant de scientifiques de pays en développement.