

PLAN À LONG TERME POUR
la physique subatomique au Canada

2022
2026

ET PERSPECTIVES JUSQU'EN 2036

RAPPORT

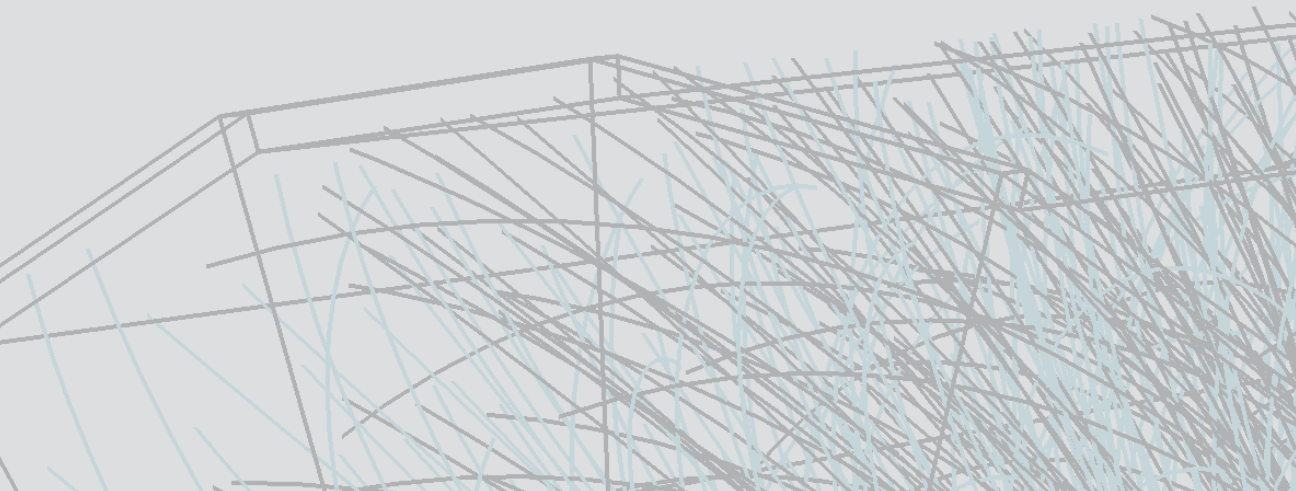


PLAN À LONG TERME POUR
la physique subatomique au Canada

2022 —
2026

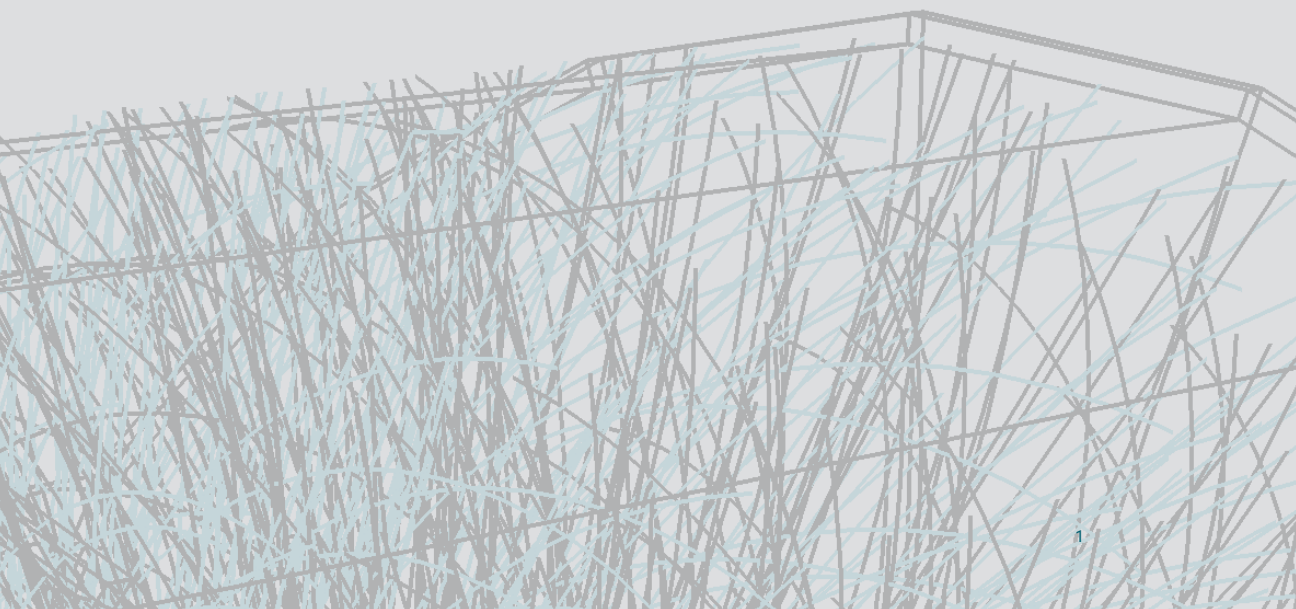
ET PERSPECTIVES JUSQU'EN 2036

RAPPORT



Contents

2	Résumé
16	Introduction
22	Section 1 – Les moteurs scientifiques et l’impact du travail canadien
54	Section 2 – Plan de recherche en physique subatomique au Canada
80	Section 3 – Réaliser le plan de recherche
106	Section 4 – Avantages pour la société
118	Glossaire
128	Processus de planification



Résumé

The background of the page is a solid orange color. It features several abstract, semi-transparent illustrations of particle physics concepts. On the left side, there is a large, starburst-like pattern of thin, radiating lines, resembling a particle detector or a particle collision event. Scattered throughout the page are various geometric shapes, including rectangles and squares, some of which are slightly tilted or rotated, suggesting detector components or particle tracks. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on scientific imagery.

LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE

est une science fondamentale qui vise à comprendre les constituants de base de l'univers ainsi que les lois qui expliquent le comportement de ces constituants.

AU COURS du siècle dernier, la communauté mondiale de la physique subatomique a amélioré les connaissances du domaine, aboutissant à l'élaboration du modèle standard de la physique des particules. Ce cadre théorique unifie l'électromagnétisme, les forces fortes qui lient les protons et les neutrons, et les forces faibles qui régissent les neutrinos et la désintégration nucléaire. Le développement permanent de ce cadre théorique a récemment conduit à la découverte du boson de Higgs en 2012. Même si des progrès remarquables ont été réalisés dans ce domaine, de nombreuses questions essentielles subsistent. Les objectifs à venir comprennent la détermination de la nature de la matière noire et l'origine de la masse des neutrinos, l'explication de la manière dont la structure nucléaire émerge de la théorie des quarks et des gluons, et l'amélioration de notre compréhension de la mécanique quantique et de la relativité en vue de découvrir

des structures de base qui sous-tendent la matière et les forces fondamentales.

Le perfectionnement de nos connaissances collectives en physique subatomique représente un effort de collaboration internationale, qui implique une synergie entre des travaux théoriques avancés, des analyses informatiques de pointe et des expériences qui utilisent certaines des machines les plus sophistiquées jamais conçues, comme le grand collisionneur de hadrons du CERN. Au sein de cette communauté mondiale, la physique subatomique canadienne jouit d'une réputation enviable, grâce à son leadership et à son impact sur bon nombre des projets importants qui ont permis de faire progresser nos connaissances au cours des dernières décennies. Les chercheurs canadiens ont notamment été au premier plan dans des projets expérimentaux liés aux récents prix Nobel pour la découverte du boson de Higgs et du changement de saveur des neutrinos.

Au cours des cinq dernières années, les Canadiens ont joué un rôle important dans des expériences nationales et internationales, notamment avec une participation substantielle à l'expérience ATLAS du LHC ou encore une variété d'efforts stratégiques sur des projets dans des installations canadiennes et internationales de classe mondiale. Ces projets visent à tester les propriétés des neutrinos et rechercher la matière noire, à tester la structure des protons, des neutrons et des noyaux de plus en plus complexes, et à effectuer divers essais de précision des symétries fondamentales et des propriétés de base du modèle standard. Le Canada est également bien placé pour jouer un rôle majeur dans le développement de ce domaine, puisqu'il héberge l'Institut Périphère de physique théorique à Waterloo, en Ontario, et deux installations expérimentales de classe mondiale, le laboratoire souterrain profond SNOLAB à Sudbury, en Ontario, et le centre canadien des accélérateurs de particules TRIUMF à Vancouver, en Colombie-Britannique. La communauté canadienne a conduit des projets dans ces installations nationales et a aussi investi stratégiquement dans des laboratoires internationaux qui offrent des infrastructures complémentaires de premier ordre.

Les investissements dans la recherche en physique subatomique ont des retombées multiples. Non seulement ils approfondissent notre compréhension collective de la nature, mais ce domaine est une source d'inspiration et un terrain de formation riche et unique pour les étudiants et le personnel de recherche. Outre les compétences fondamentales en matière de résolution de problèmes, qui sont

typiques de l'enseignement de la physique, la nature hautement collaborative de la recherche en physique subatomique permet également aux stagiaires d'acquérir de précieuses « compétences non techniques ». En outre, les fortes synergies entre la physique subatomique et d'autres domaines, notamment l'astronomie et la cosmologie, la science des matériaux, les technologies quantiques et le calcul à haute performance, offrent de nombreuses possibilités de recherches interdisciplinaires. Les recherches en physique subatomique sont aussi à l'origine du développement de technologies, dont les retombées sont désormais importantes pour de nombreux domaines tels que les soins de santé, l'énergie et l'informatique.

L'impact de la communauté canadienne de physique subatomique au cours des dernières années a été renforcé par une organisation collective et un effort unifié sur des projets soigneusement déterminés, avec des résultats scientifiques significatifs. En concertation avec la communauté canadienne de la physique subatomique, le Comité de planification à long terme en physique subatomique a élaboré une feuille de route pour maintenir son niveau de succès au cours de la période 2022-2026, avec des perspectives jusqu'en 2036. Le plan de recherche s'appuie sur les mêmes principes directeurs qui ont soutenu les réussites passées :

- ▶ s'attaquer aux problèmes de recherche les plus importants dans le domaine;
- ▶ maximiser l'impact en concentrant les efforts et en assumant des responsabilités de direction dans certains grands projets, tout en s'engageant stratégiquement dans

une série de projets à plus petite échelle offrant un potentiel de récompense élevé;

- ▶ conserver la flexibilité nécessaire pour s'adapter aux nouvelles avancées scientifiques; et
- ▶ faire participer pleinement une population de plus en plus diversifiée d'étudiants et de postdoctorants à tous les aspects de la recherche, et soutenir leur perfectionnement professionnel.

Les moteurs scientifiques de la recherche en physique subatomique, et les occasions qui y sont associées, peuvent être structurés autour de trois grandes orientations scientifiques :

ORIENTATION SCIENTIFIQUE MAJEURE –

Des quarks et des gluons aux noyaux.

Grâce à la mise à niveau de l'Advanced Rare Isotope Laboratory (ARIEL) et la suite associée de cibles et d'expériences utilisant des faisceaux d'isotopes rares, le laboratoire canadien TRIUMF permet au Canada d'assurer son rôle de leader dans la cartographie de la structure et des propriétés nucléaires. En outre, des investissements stratégiques dans des installations nouvelles et complémentaires à l'étranger, notamment aux États-Unis et en Europe, permettront d'élargir les capacités de recherche.

ORIENTATION SCIENTIFIQUE MAJEURE –

La matière dans l'univers faiblement couplé.

La recherche de l'identité de la matière noire dans l'univers et des propriétés sous-jacentes des neutrinos est un

domaine d'intérêt croissant dans le monde entier. Le Canada est très bien placé pour continuer à jouer un rôle central dans cet effort international, avec l'installation souterraine SNOLAB à Sudbury, qui accueille actuellement une variété d'expériences de pointe au niveau mondial et qui pourra être un chef de file dans les recherches de prochaine génération. Le Canada participe aussi activement aux grandes expériences internationales sur les neutrinos.

ORIENTATION SCIENTIFIQUE MAJEURE –

Au-delà de l'échelle électrofaible.

La communauté canadienne est bien placée pour explorer la frontière des hautes énergies grâce à sa participation de longue date à des projets internationaux de collision de particules en Europe et au Japon, et à sa participation stratégique à des expériences de précision à plus petite échelle. De plus, le laboratoire TRIUMF du Canada a la possibilité de se positionner comme une installation de premier plan au niveau mondial pour les futures mesures de haute précision de la physique à la frontière des hautes énergies utilisant des isotopes rares. Le Canada est également destiné à jouer un rôle important dans le développement de la prochaine génération de collisionneurs de particules.

Les travaux théoriques des physiciens subatomiques canadiens sur tous ces sujets sont essentiels aux progrès futurs. Ceci comprend

notamment des travaux étroitement liés à l'analyse et à l'interprétation des expériences, ainsi que la théorie fondamentale qui recherche les nouvelles idées qui expliqueront les énigmes existantes et façonneront notre compréhension de la physique subatomique à l'avenir.

Un certain nombre de sources de financement externes et internes seront requises pour que la communauté de la physique subatomique puisse profiter pleinement de ces possibilités pour le Canada. Des augmentations modérées mais essentielles du financement opérationnel par le biais de l'enveloppe du CRSNG pour la physique subatomique, et un accès continu au financement des immobilisations aux niveaux actuels pour les nouveaux projets expérimentaux par le biais de la FCI, sont nécessaires. Un financement substantiel et stable est de plus impératif pour maximiser l'impact des installations uniques de classe mondiale du Canada : SNOLAB, TRIUMF, et l'Institut Périmètre. Dans ce domaine, les infrastructures informatique et réseautique sont essentielles, et la nouvelle Alliance de recherche numérique du Canada (anciennement NDRIO) et CANARIE sont des composantes vitales de l'écosystème de la recherche en physique subatomique. Les possibilités de financement pour développer des technologies habilitantes et émergentes sont également critiques pour soutenir les futurs projets de recherche. Le maintien du soutien au programme de recherche scientifique de l'Institut de physique des particules (IPP) du Canada est une priorité pour la communauté.

En outre, les initiatives développées et gérées par l'Institut Arthur B McDonald ont apporté une valeur considérable à l'écosystème de la physique subatomique au Canada. Au niveau gouvernemental, les développements scientifiques ultérieurs seront grandement facilités par l'existence de structures nationales de haut niveau qui permettent de coordonner les coûts des projets scientifiques à grande échelle et de favoriser l'engagement international dans des projets multinationaux. Enfin, la création d'une communauté canadienne de physique subatomique plus équitable, plus diversifiée et plus inclusive est essentielle pour garantir l'excellence de la recherche et pour que les avantages sociétaux qui découlent de la recherche en physique subatomique soient répartis équitablement. Les efforts soutenus des personnes et des organisations pour améliorer l'équité, la diversité et l'inclusion doivent englober la formation, le perfectionnement professionnel et la sensibilisation.

La communauté de la physique subatomique au Canada a remporté de grands succès. Elle est très bien placée pour relever les défis à venir et percer les secrets de la physique fondamentale à l'échelle subatomique. Le plan à long terme pour 2022-2026 est décrit en détail dans le présent rapport, avec les principales mesures à prendre, dont quelques-unes ont été mises en évidence ci-dessus. Il exprime une série de recommandations relatives à la science, au financement, à la politique et à la communauté.

Recommandations

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES

1 – INFRASTRUCTURES CANADIENNES

Nous recommandons de tirer pleinement parti des occasions scientifiques uniques offertes par les infrastructures SNOLAB et TRIUMF, ainsi que par l'Institut Périmètre, dans la poursuite des moteurs scientifiques.

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES

2 – PROGRAMMES THÉORIQUES

La masse critique et l'étendue des recherches sont essentielles pour que la communauté théorique au Canada puisse optimiser l'incidence de la recherche à venir en physique subatomique. Nous recommandons de soutenir activement la recherche théorique en physique subatomique au cours de la prochaine décennie, à la fois pour explorer de nouvelles directions purement théoriques, ainsi que pour soutenir l'interaction synergique entre la théorie et l'expérimentation subatomiques.

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES

3 – PROGRAMMES EXPÉRIMENTAUX

Il est nécessaire de mettre en œuvre un vaste programme expérimental pour répondre aux moteurs scientifiques de la recherche en physique subatomique. Nous recommandons la poursuite des orientations scientifiques hautement prioritaires suivantes.

continue sur la prochaine page →

- ▶ *Des quarks et des gluons aux noyaux – Le futur programme doit explorer la structure des hadrons et des noyaux en utilisant des isotopes rares et des installations basées sur des accélérateurs. Il doit inclure l'exploitation complète de TRIUMF, des installations de faisceaux d'électrons et de faisceaux d'isotopes rares (RIB) à l'étranger et un futur collisionneur électron-ion.*
- ▶ *La matière dans l'univers faiblement couplé – Le futur programme doit intégrer la recherche de la matière noire en utilisant des techniques complémentaires directes et indirectes, y compris par la détection directe à l'échelle de plusieurs tonnes. Il doit inclure l'exploration plus poussée des propriétés des neutrinos par le biais d'expériences de double désintégration bêta sans émission de neutrinos, d'expériences à grande distance et d'observatoires de neutrinos.*
- ▶ *Au-delà de l'échelle électrofaible – Le futur programme doit étudier la matière et ses interactions à des échelles d'énergie de plus en plus élevées, y compris l'exploitation d'une future « usine à Higgs » et d'un collisionneur à la frontière des hautes énergies, ainsi que des techniques indirectes de haute précision.*

Ce programme scientifique est actuellement mis en œuvre sous l'impulsion du leadership canadien dans un ensemble de projets phares identifiés en fonction de leurs retombées scientifiques potentielles, de l'expertise canadienne de base, du niveau d'engagement communautaire, des possibilités de formation scientifique et technologique de la prochaine génération et des investissements canadiens à ce jour :

	<i>Projets phares avec des résultats généraux en physique</i>	<i>Projets phares avec des résultats stratégiques en physique</i>
DES QUARKS ET DES GLUONS AUX NOYAUX	Expériences TRIUMF ARIEL-ISAC, EIC	Programme JLab 12 GeV, expériences RIB à l'étranger
LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS FAIBLEMENT COUPLÉ	T2K/HK, IceCube, SNO+	DEAP, PICO-500, SuperCDMS
AU-DELÀ DE L'ÉCHELLE ÉLECTROFAIBLE	ATLAS(LHC/HL-LHC), Belle II	ALPHA/HAICU, MOLLER, TUCAN

*Nous recommandons de soutenir ces projets, ainsi que les initiatives du programme scientifique ayant un fort potentiel d'impact, qui sont en cours de développement ou qui pourraient être développées dans les années à venir. Les projets potentiels, les activités de développement en cours et leurs échéances sont énumérés dans le portefeuille de recherche présenté à la **FIGURE 4**.*

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES

4 – ACTIVITÉS DE R ET D

Nous recommandons de soutenir les activités de R et D pour le développement des accélérateurs de particules et de la technologie des détecteurs, ainsi que la mise au point et l'utilisation des technologies émergentes, notamment les nouveaux outils de calcul et d'analyse.

RECOMMANDATION POUR LA COMMUNAUTÉ

5 – ÉQUITÉ, DIVERSITÉ ET INCLUSION

La communauté canadienne de la physique subatomique manque de diversité, à l'instar de certains autres domaines scientifiques et technologiques. Ce manque de représentation a de nombreuses causes et s'étend à toute la gamme des carrières, des étudiants diplômés aux professeurs chevronnés. Il est largement reconnu que la diversité est précieuse pour la recherche et que le manque de diversité constitue, en soi, un obstacle à l'entrée dans le domaine.

- ▶ *Nous recommandons la poursuite d'autres actions soutenues alignées sur la chartre Dimensions des trois organismes fédéraux de financement de la recherche, y compris la collecte et l'analyse régulières de données, des initiatives ciblées pour améliorer l'équité, la diversité et l'inclusion dans les activités communautaires, et l'utilisation par la communauté de comités formels par le biais des instituts pour soutenir ces efforts ou les coordonner avec les partenaires.*
- ▶ *Nous recommandons à la communauté de la physique subatomique de promouvoir une représentation équilibrée dans les rôles de direction à haute visibilité, car les personnes occupant ces postes sont des modèles importants, tout en reconnaissant que la réalisation d'une représentation adéquate peut augmenter la charge de travail des membres des groupes sous-représentés.*
- ▶ *Nous recommandons que la communauté de la physique subatomique favorise l'inclusion en reconnaissant l'héritage de la colonisation au Canada, par exemple en reconnaissant l'utilisation des terres lors d'événements organisés au Canada, conformément à l'esprit des appels à l'action de la Commission de vérité et de réconciliation du Canada et de la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones.*

RECOMMANDATION POUR LA COMMUNAUTÉ

6 – FORMATION ET PERFECTIONNEMENT PROFESSIONNEL

Pour permettre au personnel hautement qualifié de recevoir une formation fondée sur la structure de collaboration nationale de la recherche en physique subatomique, nous recommandons la coordination et le partage des possibilités de formation entre les centres, les instituts et les universités du Canada.

Pour soutenir le perfectionnement professionnel, nous recommandons que les chercheurs en début de carrière soient encadrés de manière à acquérir rapidement une connaissance de l'écosystème canadien d'aide et de financement de la recherche en physique subatomique, et qu'ils aient la possibilité d'interagir largement avec la communauté.

RECOMMANDATION POUR LA COMMUNAUTÉ

7 – COMMUNICATION ET ENGAGEMENT AVEC LES AGENCES ET LE GOUVERNEMENT

Nous recommandons la formalisation (par ex. par l'ICPN et l'IPP) d'un comité de consultation sur la physique subatomique pour l'engagement et la mobilisation auprès des agences de financement et du gouvernement.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

8 – PROGRAMMES DE LA FCI

Le soutien au développement des infrastructures par la FCI a été déterminant pour le développement de la recherche en physique subatomique au Canada. Nous recommandons de maintenir ces investissements aux niveaux annualisés actuels, ce qui s'avérera indispensable à la réussite du plan canadien de recherche en physique subatomique, y compris les initiatives subséquentes proposées.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

9 – ENVELOPPE DU CRSNG POUR LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE

Pour maximiser l'impact des investissements présents et futurs, et pour tirer parti des possibilités scientifiques à venir, il convient d'accroître l'enveloppe du CRSNG consacrée à la physique subatomique afin d'assurer le soutien opérationnel.

- ▶ *Nous recommandons le maintien de la structure de l'enveloppe de physique subatomique du CRSNG et de ses programmes, qui ont joué un rôle déterminant dans le financement opérationnel de la recherche en physique subatomique.*
- ▶ *Nous recommandons une augmentation de l'enveloppe du CRSNG pour la physique subatomique de 6,2 millions de dollars de 2021 au cours des cinq prochaines années pour assurer la compétitivité du programme canadien sur le plan international. Cette croissance est nécessaire pour plusieurs raisons : permettre la transition des membres du corps professoral de l'Institut McDonald qui ont besoin du soutien du CRSNG; utiliser la pleine capacité de la communauté pour la formation de personnel hautement qualifié et maximiser le rendement des investissements en capital; et assurer une disponibilité de fonds suffisante pour les petits projets d'infrastructure et le développement de nouvelles possibilités scientifiques.*
- ▶ *Nous recommandons un soutien continu pour toutes les catégories de programme disponibles au sein de l'enveloppe de la physique subatomique du CRSNG, y compris le Programme d'appui aux ressources majeures (ARM), qui favorise de manière critique une collaboration efficace de l'utilisation des ressources techniques uniques en matière de développement et de construction de nouveaux instruments, ainsi que le Programme de subventions d'outils et d'instruments de recherche (OIR), qui offre un soutien important pour le développement de détecteur et d'accélérateur.*
- ▶ *Nous recommandons le suivi et la protection de la fraction de l'enveloppe du CRSNG consacrée à la physique subatomique allouée pour financer les chercheurs en théorie. En outre, le seuil minimal d'attribution ne devrait pas être inférieur au niveau de financement requis pour soutenir la formation des diplômés, comme c'est le cas dans d'autres Sections d'évaluation des demandes en physique.*

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

10 – SOUTIEN AUX CENTRES CANADIENS DE RENOMMÉE MONDIALE

Les grands centres canadiens de recherche en physique subatomique ont une stature mondiale et offrent des avantages concurrentiels dans la poursuite de programmes scientifiques hautement prioritaires.

Nous recommandons de maintenir un soutien fort aux centres canadiens (TRIUMF, SNOLAB, Institut Périphère) pour que les activités de recherche restent en tête de peloton dans le monde.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

11 – PROGRAMME DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE DE L'IPP

Le programme de recherche scientifique de l'IPP a eu une incidence majeure sur le leadership et les contributions du Canada aux projets internationaux.

Nous recommandons de maintenir un soutien total au programme scientifique des chercheurs de l'IPP.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

12 – INSTITUT ARTHUR B MCDONALD

L'Institut Arthur B McDonald et ses programmes de soutien à la recherche et de sensibilisation ont ajouté une valeur considérable à la communauté. Cependant, son financement par le programme Apogée Canada touche à sa fin.

Nous recommandons qu'en plus de la croissance de l'enveloppe du CRSNG pour la physique subatomique destinée à soutenir les coûts opérationnels, de nouveaux mécanismes soient établis pour financer et maintenir la continuité des programmes de recherche et de soutien technique fournis par l'Institut.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

13 – L'INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE NUMÉRIQUE DU CANADA

Toutes les composantes de l'infrastructure de recherche numérique (p. ex. Calcul Canada, CANARIE) sont essentielles au succès de la recherche en physique subatomique.

Nous recommandons que CANARIE continue d'être financé par le gouvernement fédéral canadien pour l'exploitation du réseau national de recherche et les liens clés avec nos partenaires internationaux.

continue sur la prochaine page →

De plus, nous recommandons que les infrastructures informatiques critiques qui sont fournies par les organisations informatiques nationales (Calcul Canada et Digital Research Alliance [anciennement NDRIO]) continuent d'être vivement soutenues par les gouvernements fédéral et provinciaux, à un niveau suffisant pour répondre aux besoins de la communauté de recherche en physique subatomique.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

14 – FINANCEMENT DES ACTIVITÉS DE R ET D

Le développement de nouveaux instruments et de nouvelles technologies ouvre de nouvelles possibilités de recherche. Ce développement repose sur la capacité d'explorer les frontières technologiques qui dépassent la portée des expériences individuelles de physique subatomique.

Nous recommandons d'établir des mécanismes appropriés pour financer efficacement des investissements modestes et opportuns dans des activités génériques de R et D, susceptibles d'atteindre les objectifs scientifiques de la recherche en physique subatomique.

RECOMMANDATION STRATÉGIQUE

15 – SOUTIEN AUX PROJETS SCIENTIFIQUES À GRANDE ÉCHELLE

La coordination des coûts d'investissement et du financement opérationnel tout au long du cycle de vie des projets scientifiques et d'infrastructure à grande échelle (> 50 millions de dollars) s'avère difficile dans l'écosystème actuel.

Nous recommandons la création d'une nouvelle structure administrative pour assurer cette coordination (comme le prévoit la recommandation 4.7 de L'Examen du soutien fédéral aux sciences 2017: Investir dans l'avenir du Canada, <http://sciencereview.ca>).

RECOMMANDATION STRATÉGIQUE

16 – BUREAU CANADIEN D'ENGAGEMENT POUR LA RECHERCHE INTERNATIONALE

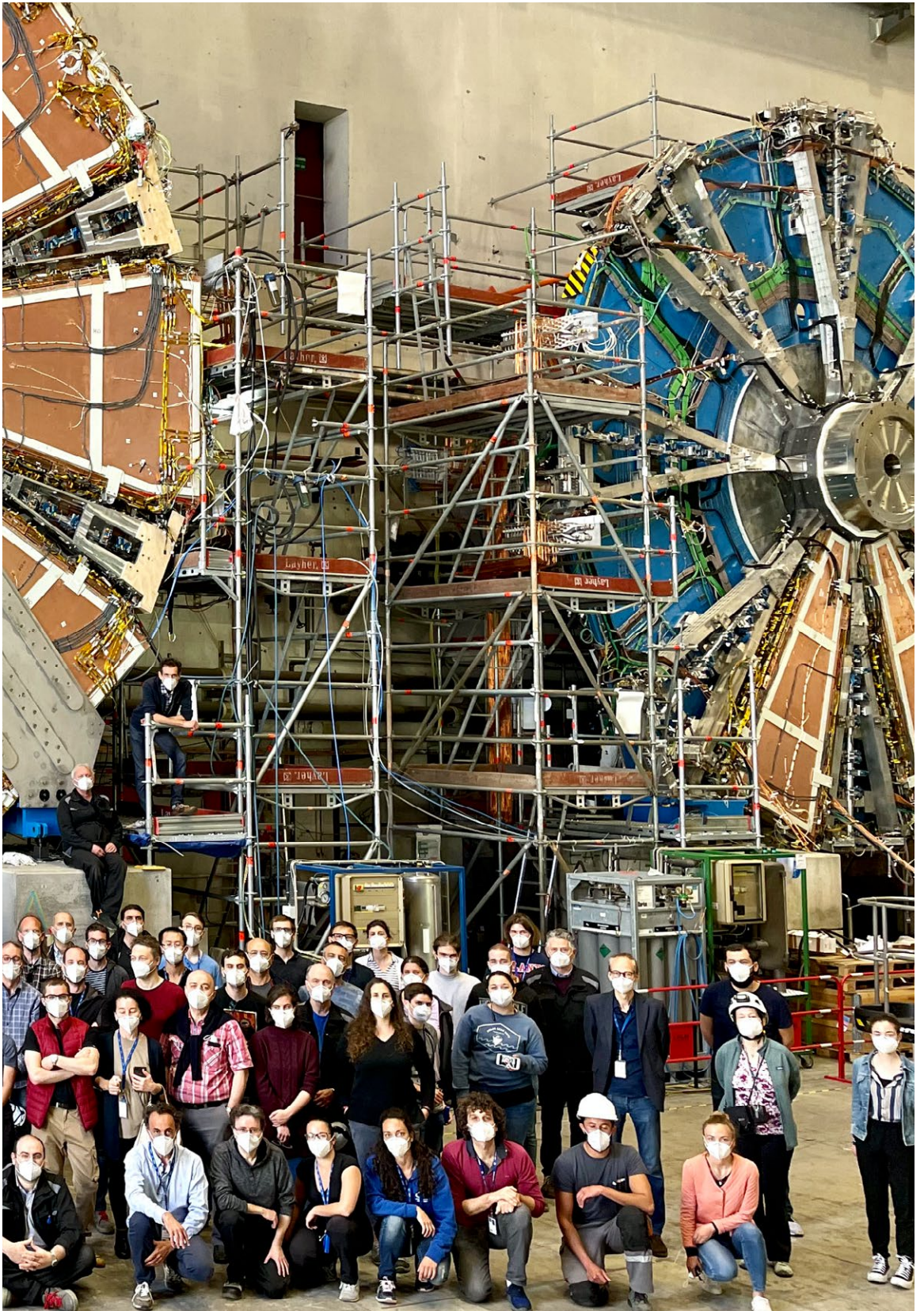
La recherche en physique subatomique, par sa nature, est mondiale et nécessite de plus en plus d'accords multinationaux complexes.

Nous recommandons de désigner un organisme au sein du gouvernement canadien qui serait responsable de négocier avec les instances étrangères et internationales afin de faire progresser les nouvelles initiatives scientifiques majeures.

CETTE PAGE ET LA PAGE SUIVANTE : Des chercheurs célèbrent l'achèvement de la première des deux nouvelles petites roues à muons (NSW) pour la mise à niveau de l'expérience ATLAS au laboratoire du CERN en Suisse.

L'expérience ATLAS permet aux chercheurs d'étudier les résultats des collisions proton-proton à haute énergie produites au Grand collisionneur de hadrons, dans le but d'étudier les propriétés du boson de Higgs, le mécanisme de brisure de symétrie électrofaible, ainsi que de rechercher de nouveaux phénomènes physiques. [Crédit : F. Lanni.]





Introduction

LA PHYSIQUE subatomique vise à comprendre la nature des éléments de base de l'univers et les lois qui expliquent le comportement de ces constituants fondamentaux. Des progrès remarquables ont été réalisés dans ce domaine ces dernières années, notamment avec la découverte du boson de Higgs et l'élucidation des propriétés des neutrinos. Malgré ces réalisations, de nombreuses questions profondes continuent à stimuler de nouveaux axes de recherche.

Les physiciens subatomiques canadiens ont joué un rôle de premier plan sur la scène mondiale, grâce au soutien du gouvernement, des organismes de financement, des universités et de la communauté canadienne, ainsi qu'à une tradition d'auto-organisation efficace pour aborder les grandes questions scientifiques. La recherche en physique subatomique implique une synergie entre les travaux théoriques avancés et l'analyse computationnelle. Les expériences qu'elle met en œuvre sont parmi les plus avancées jamais conçues et construites sur le plan technologique. Ce domaine de recherche est mondial et implique souvent de grandes équipes internationales de chercheurs et de techniciens qualifiés. Il offre ainsi des possibilités de formation uniques pour les étudiants et le personnel de recherche subalterne, dont beaucoup s'orientent vers des domaines de l'économie de la connaissance en pleine expansion.

Ce rapport, le Plan à long terme pour la physique subatomique 2022 (PLT 2022), est le dernier d'une série quinquennale de plans élaborés pour orienter les progrès de la recherche en physique subatomique au Canada. Le présent processus de planification a été commandité conjointement par le CRSNG, l'Institut canadien de physique nucléaire (ICPN) et l'Institut

de physique des particules (IPP). Les instituts communautaires ICPN et IPP représentent les physiciens nucléaires et les physiciens des particules professionnels, au Canada. Les objectifs de ce processus de planification sont exposés dans le mandat (voir l'annexe) et comprennent la détermination des questions scientifiques essentielles dans le domaine avec une perspective de quinze ans, les possibilités connexes pour le Canada, ainsi que les projets hautement prioritaires que la communauté peut réaliser pour atteindre ses objectifs scientifiques. Le processus de planification de la physique subatomique au Canada est axé sur la communauté. Il est caractérisé par une consultation et un engagement communautaire étendus. L'objectif de ce rapport est de présenter une vision réaliste et soutenue par la communauté de la physique subatomique canadienne au cours des années à venir. Le rapport cherche également à articuler le financement et les autres besoins de soutien technique nécessaires pour atteindre les objectifs fixés et à présenter les possibilités pour la communauté d'améliorer ses processus, son inclusivité, sa formation et sa sensibilisation.

Le public principal du PLT 2022 inclut les organismes de financement et les installations canadiennes qui appuient la recherche en physique subatomique au Canada. Cela comprend le ministère fédéral, Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISED), et les organismes associés tels que le CRSNG et la FCI, ainsi que les organisations provinciales et les centres de recherche et les universités qui soutiennent les chercheurs en physique subatomique et leurs étudiants. Le rapport vise à mettre en évidence et à articuler les réussites, les réalisations récentes et les occasions de la communauté de la physique subatomique et,

à ce titre, il s'adresse aussi plus largement aux décideurs gouvernementaux. En outre, la communauté de la physique subatomique elle-même est un public important de ce rapport. Enfin, les composantes de haut niveau du rapport visent à partager, avec le grand public canadien, l'enthousiasme, les connaissances et les autres avantages sociétaux obtenus grâce au soutien public et à l'investissement de l'argent des contribuables dans ce domaine.

Le rapport sur le plan à long terme est structuré de manière à fournir une mise à jour de la situation du domaine de la recherche au Canada, une description du plan de recherche et des soutiens financiers et infrastructurels nécessaires à la mise en œuvre du plan, ainsi qu'une présentation des avantages plus généraux des investissements de la société canadienne dans ce secteur. Un guide de lecture pour les sections suivantes est présenté ci-dessous :

SECTION 1 –

Les moteurs scientifiques et l'impact du travail canadien

Cette section synthétise le contexte mondial de la recherche en physique subatomique, les moteurs d'innovation des sous-domaines spécifiques, et donne des précisions sur les réalisations canadiennes et l'impact scientifique plus large depuis le précédent plan à long terme.

SECTION 2 –

Plan de recherche en physique subatomique au Canada

En tenant compte du paysage scientifique présenté à la section 1, la section 2 décrit les possibilités scientifiques pour le Canada, ainsi que les technologies et les

infrastructures habilitantes. Le plan de recherche est ensuite présenté sous la forme d'un portefeuille multidimensionnel de projets à haute priorité visant à renforcer les moteurs scientifiques.

SECTION 3 –

Réaliser le plan de recherche

Cette section aborde les différentes formes de soutien nécessaires à la réalisation du plan de recherche. Elles sont classées dans les grands domaines suivants : actions communautaires, financement, soutien technique et infrastructurel, et cadre politique général.

SECTION 4 –

Avantages pour la société

Cette dernière section présente une perspective plus large du rendement du capital investi de la recherche en physique subatomique, y compris les possibilités uniques de formation, le développement de nouvelles applications technologiques, les retombées commerciales, l'impact et les possibilités en matière d'environnement, ainsi que les avantages culturels plus larges de la poursuite de cette science fondamentale.

Les annexes contiennent un glossaire des acronymes utilisés dans le rapport, les documents de base de l'exercice de planification, ainsi qu'une description du processus suivi et des nombreuses contributions communautaires reçues par le comité de planification. Un certain nombre d'exemples concrets de l'incidence de la recherche en physique subatomique, et des exemples d'études de cas, sont présentés tout au long du rapport.

TRIUMF, le centre canadien d'accélération des particules, est un laboratoire unique de classe mondiale qui héberge son propre programme national de physique couronné de succès et qui soutient la participation du Canada à la physique subatomique sur la scène internationale.

EN HAUT : Le département de théorie de TRIUMF est unique au Canada en tant qu'équipe théorique intégrée dans un laboratoire d'isotopes rares de classe mondiale. Ce contexte fournit une interface synergique où les travaux théoriques originaux sont éclairés par des technologies et des résultats expérimentaux de pointe, ainsi que guident et inspirent les approches expérimentales. Le Département de théorie est spécialisé dans la théorie de la physique nucléaire et des particules. [Crédit : TRIUMF]

EN BAS : Étudiant de premier cycle et assistant de sensibilisation au public faisant visiter les installations de recherche de TRIUMF. Cela fait partie de la mission principale de TRIUMF de "découvrir et innover, inspirer et éduquer, créer des connaissances et des opportunités pour tous". [Crédit : TRIUMF]

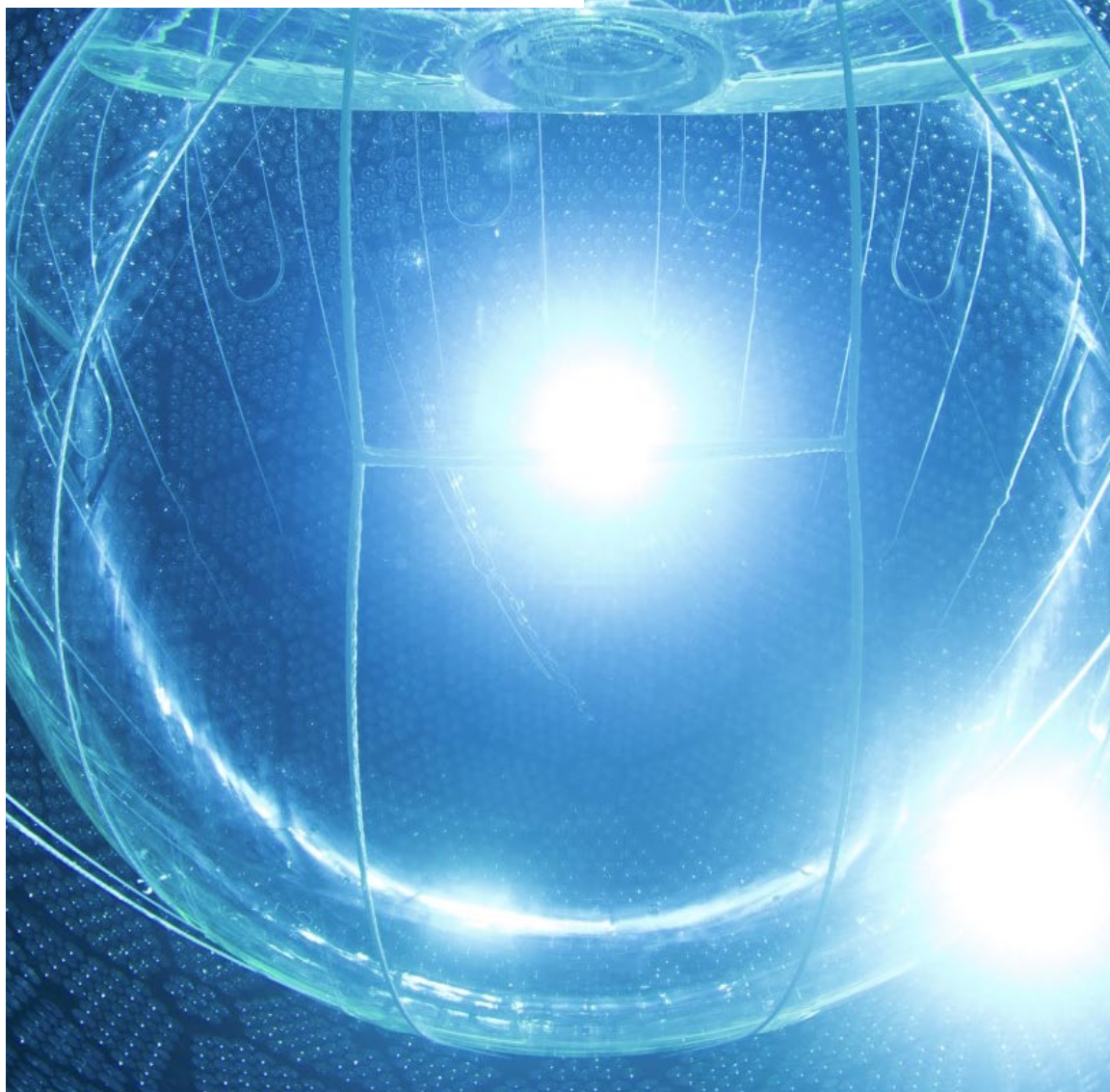
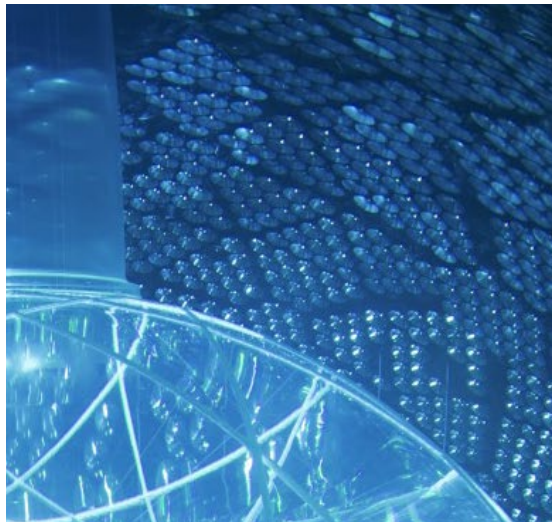


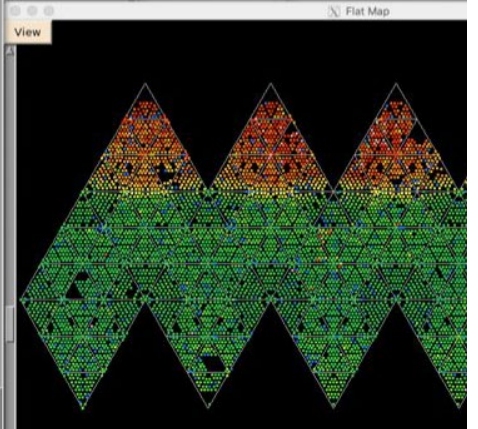
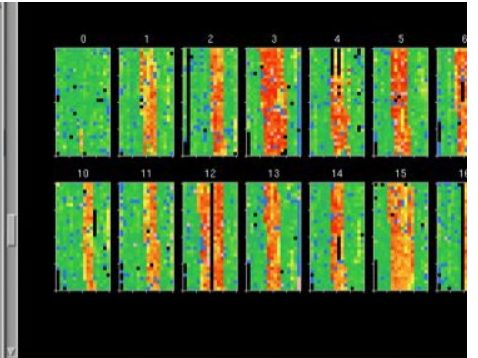
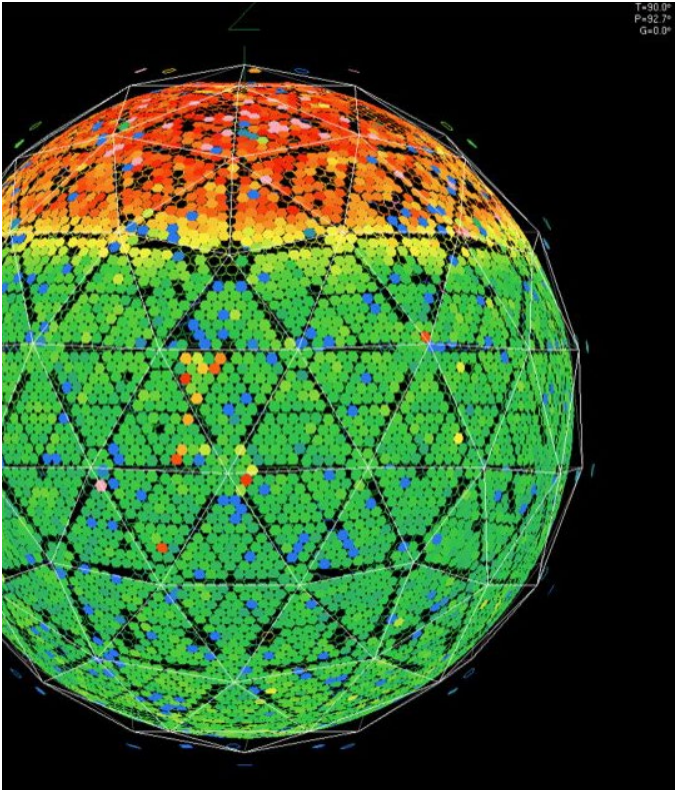
SNOLAB, le laboratoire de recherche souterrain du Canada à Sudbury, en Ontario, est le laboratoire le plus profond et propre au monde. SNOLAB héberge le détecteur SNO+, conçu pour sonder la nature des neutrinos à l'aide d'un détecteur à scintillateur liquide. L'élément chimique tellure sera éventuellement ajouté au scintillateur liquide pour tenter de détecter l'hypothétique réaction de double désintégration bêta sans émission de neutrinos.

CETTE PAGE : L'intérieur du détecteur SNO+ lors du remplissage de la cuve avec un scintillateur liquide. [Crédit : SNOLAB]

PAGE SUIVANTE, EN HAUT : La cavité souterraine du SNOLAB abritant le détecteur SNO+, illustrée lors de travaux de mise à niveau. [Crédit : SNOLAB]

PAGE SUIVANTE, EN BAS : Lecture des données en direct du détecteur SNO+. [Crédit : SNOLAB]





SECTION 1 –

Les moteurs scientifiques et l'impact du travail canadien

L'OBJECTIF PRINCIPAL de la physique subatomique est de repousser les frontières de la connaissance concernant la composition de l'univers jusqu'aux échelles de distance les plus petites. Dans ce cadre, la physique subatomique a pu extraire et traduire les observations des phénomènes naturels en lois universelles exprimées sous forme d'équations mathématiques. L'existence de ce vaste échafaudage théorique est la raison même pour laquelle nous pouvons formuler des questions spécifiques sur l'univers et progresser systématiquement dans l'exploration de l'inconnu.

Le domaine de la recherche en physique subatomique a considérablement progressé au cours des deux dernières décennies, notamment grâce aux avancées technologiques, à la puissance de calcul disponible et aux développements théoriques. À titre d'exemple, la découverte du boson de Higgs en 2012 au LHC a constitué la pierre angulaire du modèle standard de la physique des particules, mais de nombreuses questions restent des « moteurs scientifiques » pour le domaine. En outre, le boson de Higgs est désormais devenu un outil pour faire avancer notre compréhension de la physique subatomique.

Le comité de planification à long terme a identifié huit moteurs scientifiques dans le domaine de la recherche en physique subatomique en 2022, qui englobent un certain nombre de questions sous-jacentes :

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Higgs, la physique à l'échelle électrofaible et au-delà

Quelle est la nature précise du secteur de Higgs et du secteur des saveurs du modèle standard? Quelle est la physique de la rupture de symétrie électrofaible? Qu'y a-t-il au-delà de l'échelle électrofaible?

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Symétries fondamentales et asymétries observées

Quelles sont les symétries fondamentales de la nature et comment expliquer les déséquilibres observés, par exemple la symétrie matière-antimatière dans l'univers?

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Propriétés des neutrinos

Quelle est la nature de la masse des neutrinos, de la hiérarchie des masses et des interactions entre neutrinos?

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Matière noire et secteurs sombres potentiels

Quelle est la nature de la matière sombre dans l'univers et ses interactions? La matière noire fait-elle partie d'un secteur sombre plus étendu?

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Nouveaux principes et nouvelles structures physiques

Un large éventail de questions théoriques, notamment concernant les principes et structures théoriques formels qui soutiennent les forces et la matière dans l'univers.



FIGURE 1. Représentation schématisque des trois grandes orientations scientifiques et des huit moteurs scientifiques pour le domaine de la recherche en physique subatomique.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Propriétés et phases des hadrons

Comment les quarks et les gluons donnent-ils naissance aux propriétés des nucléons et des autres hadrons, ainsi qu’aux phases hadroniques de la matière dans des conditions extrêmes?

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Structure nucléaire

Comment la structure nucléaire émerge-t-elle des forces nucléaires et finalement des quarks et des gluons?

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Formation cosmique des noyaux

Comment les propriétés des noyaux expliquent-elles la formation des éléments dans l’univers?

Ces moteurs scientifiques sont profondément interconnectés. Combinés, ils définissent trois grandes orientations scientifiques en physique subatomique, comme l’illustre la [FIGURE 1](#). Pour répondre à l’ampleur de ces moteurs scientifiques, il faut un programme de recherche diversifié, composé de projets

audacieux avec des objectifs complémentaires, exploitant une variété de techniques différentes. Dans la suite de cette section, ces moteurs scientifiques sont décrits plus en détail, en mettant l’accent sur les progrès scientifiques récents ainsi que sur les activités et les réalisations canadiennes. En effet, la physique subatomique canadienne jouit d’une réputation mondiale enviable, avec un impact sur un certain nombre de grands projets qui ont fait progresser notre compréhension au cours des dernières décennies. Dans son rapport de 2018 intitulé « Rivaliser dans une économie mondiale axée sur l’innovation : l’état actuel de la R et D au Canada », le Conseil des académies canadiennes soulignait l’impact mondial de la recherche canadienne en physique subatomique, tel que mesuré par la moyenne des citations relatives qui est passée de 1,79 à 2,05 par rapport à la moyenne canadienne de 1,43. Compte tenu de son incidence mondiale, mais de la taille relativement restreinte de la communauté, la physique et l’astronomie ont été mises en évidence par ce rapport comme une occasion de recherche pour le Canada, et les opportunités et plans futurs seront décrits à la section 3.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Higgs, la physique à l'échelle électrofaible et au-delà

LA DÉCOUVERTE DU boson de Higgs en 2012 a permis d'identifier le dernier ingrédient manquant du modèle standard de la physique des particules. Elle a également déterminé l'un des principaux agents de la rupture de la symétrie fondamentale électrofaible dans la nature. Pourtant, le secteur électrofaible reste l'un des aspects les plus déroutants du modèle standard. Le boson de Higgs est un type de matière qui n'a jamais été observé auparavant et dont les propriétés doivent encore être étudiées en détail. Sa masse, par exemple, n'est contrainte par aucune symétrie dans le modèle standard, et contrairement à la structure mathématique des autres forces de la nature qui sont entièrement définies sur la base de propriétés de symétrie, l'ajout d'interactions de Higgs conduit à un grand nombre de paramètres indéterminés dans le modèle standard. Ainsi, notre compréhension actuelle du rôle du boson de Higgs dans l'univers est particulièrement ad hoc et incomplète. Elle contraste fortement avec la simplicité structurelle d'autres aspects du modèle standard. En particulier, cela soulève la question fondamentale des principes sous-jacents déterminant les propriétés du boson de Higgs. Cette question motive l'existence possible de nouveaux phénomènes de la nouvelle physique, au-delà de ceux décrits par le

modèle standard, mais elle caractérise également le boson de Higgs comme une sonde unique pour explorer les processus physiques à l'échelle électrofaible et au-delà.

L'exploration des phénomènes physiques à l'échelle électrofaible et au-delà se produit dans les collisions proton-proton au LHC et se poursuivra dans les années à venir au LHC à haute luminosité, à la fois par la mesure des processus électrofaibles connus et par la recherche de signatures de nouveaux phénomènes. Un futur collisionneur électron-positron, tel que celui proposé par l'ILC au Japon ou le FCC-ee en Europe, fonctionnera à titre d'usine à bosons de Higgs, produisant ces particules en quantités énormes dans le but d'en mesurer les propriétés à un niveau de précision sans précédent. De plus, celui-ci permettrait peut-être de découvrir des indices de phénomènes physiques au-delà de ceux prévus par le modèle standard.

Les mesures de précision des processus physiques à plus basses énergies constituent également une fenêtre complémentaire sur la nouvelle physique à l'échelle électrofaible et au-delà. En effet, le degré de précision des mesures et des prédictions du modèle standard est un aspect de la recherche en physique subatomique qui est unique parmi toutes les sciences, et qui peut être utilisé pour

révéler les petites divergences qui émergent de la nouvelle physique. Cette sensibilité peut être obtenue par l'étude de processus rares ou interdits dans le modèle standard, par exemple, dans les désintégrations des leptons tau, des kaons, des hadrons inférieurs et charmés, ou par l'étude de processus bien compris sur le plan théorique, tels que la diffusion électron-électron.

Contributions et réalisations canadiennes

Les chercheurs canadiens ont joué et continuent à jouer un rôle de premier ordre dans les recherches expérimentales sur la physique à l'échelle électrofaible et au-delà. Ils sont le fer de lance de plusieurs projets internationaux complémentaires distincts, à la frontière des hautes énergies et de la précision, dans des installations uniques situées à l'étranger. Les réalisations spécifiques des Canadiens au cours des cinq dernières années sont les suivantes :

- L'expérience ATLAS est conçue pour étudier les résultats des collisions proton-proton produites par le LHC à la plus haute énergie jamais atteinte dans un laboratoire. Les Canadiens ont joué et continuent à jouer un rôle essentiel dans tous les aspects de ce programme de recherche international. Les principales réalisations de ces cinq dernières années sont les suivantes :

- ▶ Les Canadiens ont directement contribué à l'analyse des données ATLAS, ce qui a donné lieu à la publication de 120 articles revus par

comité de lecture portant sur un large éventail de sujets, notamment la mesure des propriétés du boson de Higgs, les études du secteur électrofaible et la recherche d'indices de nouveaux phénomènes physiques.

- ▶ Parallèlement, l'équipe ATLAS-Canada a entrepris la mise au point et la construction de nouveaux éléments de détection aux performances nettement améliorées afin de mettre à niveau le détecteur ATLAS en vue de la prise de données du HL-LHC.
 - L'équipe d'ATLAS-Canada a construit et livré au CERN un quart de tous les éléments requis pour le détecteur de muons. Elle termine désormais leur intégration dans ATLAS. Ces nouveaux éléments de détection de muons donneront à l'expérience ATLAS la capacité d'identifier en temps réel les collisions de protons d'intérêt qui doivent être enregistrées pour une future analyse détaillée des données hors ligne.
 - L'équipe ATLAS-Canada a assumé la responsabilité de la construction d'un nouveau système de suivi des particules à la pointe de la technologie dans le but de reconstituer avec précision la trajectoire de milliers de particules chargées, créées simultanément dans des collisions proton-proton au HL-LHC.
 - L'équipe d'ATLAS-Canada met également au point une nouvelle lecture électronique pour le système calorimétrique d'ATLAS qui améliorera considérablement la capacité de mesurer avec précision l'énergie des particules, dans les conditions expérimentales les plus difficiles prévues au HL-LHC.

- ▶ En outre, TRIUMF développe et fournira des cryomodules à cavité en crabe pour le HL-LHC dans le cadre d'une contribution canadienne à la mise à niveau de l'accélérateur.

● L'expérience Belle II du laboratoire KEK au Japon recherche des preuves de la nouvelle physique dans un large éventail d'états finaux où les prédictions du modèle standard sont bien comprises. Son programme de physique est basé sur l'étude d'une quantité record de collisions électron-positron à une énergie spécifique favorisant la production de hadrons B. Il est complémentaire du programme de physique du LHC. Les Canadiens ont dirigé le développement d'aspects essentiels de l'expérience Belle II et contribuent actuellement à son exploitation. Voici quelques exemples de réalisations au cours des cinq dernières années :

- ▶ L'équipe canadienne a fourni le blindage destiné à protéger les calorimètres « endcap » du niveau élevé de rayonnement généré par les faisceaux de particules accélérées intenses. Le blindage contient également des moniteurs utilisés pour caractériser le bruit de fond pendant l'injection du faisceau afin de faciliter le fonctionnement du collisionneur.
- ▶ Les Canadiens ont développé le code de reconstruction pour le calorimètre Belle II en exploitant avec succès l'ensemble des informations de la forme d'onde pour produire une résolution énergétique nettement meilleure en présence de bruit de fond et en inventant une capacité d'identification des hadrons à la fois unique et novatrice. Cette contribution a un impact positif sur l'ensemble du programme

Belle II grâce à l'augmentation de la sensibilité globale des études de physique.

- ▶ L'interprétation des données de collision nécessite une simulation détaillée des processus physiques connus, par exemple pour estimer les bruits de fond. L'équipe canadienne a créé et maintient désormais le modèle virtuel du détecteur Belle II nécessaire à l'ensemble du programme de physique de Belle II.
- ▶ Les Canadiens ont déjà commencé à exploiter le nouvel ensemble de données sans cesse croissant de Belle II et ils ont publié des résultats préliminaires concernant la recherche de nouvelles particules appartenant à un potentiel « secteur sombre » de l'univers.
- ▶ Les Canadiens ont dirigé le développement du projet international Chiral-Belle, une proposition visant à mettre à niveau le collisionneur e^+e^- SuperKEKB avec des faisceaux d'électrons polarisés. L'objectif principal de Chiral-Belle est de mesurer avec précision l'angle de mélange électrofaible, un paramètre fondamental du modèle standard, à des échelles d'énergie complémentaires à d'autres mesures, afin de rechercher des preuves d'une nouvelle physique au-delà du modèle standard. L'équipe canadienne dirige l'étude de la dynamique du faisceau de particules accélérées autour des composants essentiels de la future infrastructure de l'accélérateur : les rotateurs de spin utilisés pour aligner les électrons polarisés au point de collision, et le polarimètre Compton utilisé pour surveiller en permanence la polarisation du faisceau d'électrons avec une grande précision.

● L'expérience NA62 au CERN vise à mesurer avec une grande précision les fractions d'embranchement de la désintégration des kaons rares. L'expérience a permis de recueillir des données au cours de la période 2016–2018 et une période de prise de données est prévue pour 2022–2025. Les Canadiens ont contribué aux activités opérationnelles et de développement liées au calorimètre et aux systèmes de suivi. Au cours des cinq dernières années, l'équipe canadienne s'est concentrée sur l'objectif principal de l'expérience, la mesure du mode de désintégration ultra-rare du kaon $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$. Le processus de désintégration est fortement supprimé dans le modèle standard, mais sa probabilité d'apparition est calculée avec précision au niveau 10^{-10} . La mesure de ce processus de désintégration ultra-rare offre une occasion unique de rechercher une nouvelle physique à des échelles de masse très élevées, de manière complémentaire aux recherches menées au LHC.

● L'objectif de l'expérience MOLLER est d'effectuer la mesure hors résonance la plus précise au monde de l'angle de mélange électrofaible, en utilisant la diffusion d'électrons polarisés au Jefferson Laboratory (JLab) aux États-Unis, comme un essai sensible pour la physique au-delà du modèle standard. L'expérience est en cours de développement et la collecte de données est prévue dès 2027. Depuis le dernier PLT, l'équipe canadienne a réalisé d'importants progrès dans la conception du spectromètre magnétique, des détecteurs intégrés et de l'électronique associée. L'équipe canadienne a également assumé des rôles de premier plan dans le domaine des logiciels de simulation et d'analyse.

● L'expérience MoEDAL au LHC est un réseau de détecteurs spécialisés conçus pour détecter les monopoles magnétiques et d'autres particules massives hautement ionisantes, dont l'hypothèse d'existence est émise dans un certain nombre de scénarios de la physique au-delà du modèle standard. Au cours des cinq dernières années, les Canadiens ont participé à l'obtention de données de l'expérience et ont contribué à la publication des premiers résultats de physique issus de la collaboration, qui fournissent certaines des contraintes les plus strictes à ce jour concernant l'existence des monopoles. Les Canadiens ont aussi dirigé le développement, la construction et désormais, l'installation actuelle d'un nouveau système de détection qui permettra d'élargir considérablement le programme de physique de l'expérience pendant la prochaine campagne de collecte de données 3 du LHC.

● La proposition d'expérience MATHUSLA a été développée au cours de la dernière période du PLT. L'expérience proposée est un détecteur dédié de grand volume qui sera situé sur la surface, au-dessus de l'une des régions d'interaction du LHC. L'expérience aura pour but de rechercher des particules neutres à longue durée de vie dont on suppose l'existence dans divers scénarios de nouvelle physique au-delà du modèle standard. Les Canadiens ont joué un rôle crucial dans le développement de la physique de cette proposition expérimentale par le biais de diverses études de sensibilité. Les Canadiens ont récemment participé à la construction et à la mise en service d'une unité de démonstration et contribueront à l'analyse des données préliminaires enregistrées avec ce démonstrateur.

● Le développement d'une future usine de Higgs est considéré par la communauté internationale comme une priorité absolue. L'ILC est la proposition la plus avancée et la plus mûre sur la scène mondiale qui, si elle est approuvée, serait située au Japon. Il existe également des propositions complémentaires pour des machines à électrons-positrons, telles que le futur collisionneur circulaire (FCC-ee), une fois que le HL-LHC sera arrivé à son terme, et qui pourrait éventuellement être transformé en machine à hadrons à la prochaine frontière énergétique. Au cours des cinq dernières années, les Canadiens ont continué à contribuer aux travaux de R et D pour la conception de systèmes de poursuite et de calorimètres, et pour améliorer les performances des cavités de radiofréquences supraconductrices (SRF) pour un futur détecteur ILC. Plus récemment, les Canadiens se sont joints aux efforts internationaux visant à mettre au point

des dispositifs de détection à semi-conducteurs qui peuvent tolérer des niveaux de rayonnement très élevés et être utilisés dans la conception de systèmes de poursuite dans les futurs collisionneurs. De plus, TRIUMF est membre d'une collaboration internationale sur le développement de cavités SRF en crabe pour l'ILC. Ce programme collectif de R et D s'appuiera sur l'infrastructure canadienne existante et permettra aux Canadiens de jouer un rôle central dans un futur projet de collisionneur international.

● La communauté canadienne de la théorie des particules a activement proposé des moyens de vérifier si le boson de Higgs découvert en 2012 est le même que celui prédit par le modèle standard en utilisant les données du LHC et au-delà. Il explore les signatures d'une nouvelle physique qui motivent les analyses des collisionneurs.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Symétries fondamentales et asymétries observées

LES PRINCIPES DE symétrie jouent un rôle fondamental en dictant les lois de la nature. Pourtant, la réalisation complète de notre univers repose également sur des mécanismes subtils par lesquels la symétrie est brisée ou cachée. Ainsi, les mesures expérimentales de précision des symétries observées et des violations de

symétrie connues constituent une approche puissante et complémentaire de la recherche de nouveaux phénomènes physiques au-delà du modèle standard. Plus précisément, les tests d'invariance sous les transformations discrètes de la conjugaison des charges (C), de la parité (P) et de l'inversion du temps (T)

fournissent des sondes importantes pour la nouvelle physique. Les observations expérimentales ont établi que la symétrie associée aux transformations P individuelles et CP combinées est violée dans la nature, et ces effets sont intégrés dans le modèle standard, bien que leur origine fondamentale reste inconnue. De plus, l’ampleur de la violation de la symétrie CP observée dans la nature est insuffisante pour expliquer la prédominance de la matière sur l’antimatière observée dans l’univers. Les sources de violation de la symétrie CP (ou T) dues à des phénomènes de la nouvelle physique peuvent être recherchées par le biais d’un certain nombre d’approches expérimentales distinctes, notamment : des mesures de précision de la violation de la symétrie CP dans les désintégrations de kaons et de mésons B ; la recherche d’une violation de la symétrie CP dans les oscillations des neutrinos dans les expériences à grande distance et la recherche de l’existence de moments de dipôle électrique violant la symétrie temporelle dans les neutrons, les atomes et les molécules. Il est intéressant de noter que la violation de la symétrie de parité offre un moyen extrêmement sensible d’étudier l’interaction faible du courant neutre, qui est autrement généralement masquée par les processus électromagnétiques dominants. Par conséquent, des tests de précision de l’interaction faible peuvent être réalisés à l’aide de mesures violant la parité effectuées dans la diffusion électron-électron, la diffusion électron-proton, les systèmes atomiques et à l’aide de neutrons froids. D’autres tests importants des propriétés de symétrie du modèle standard incluent l’universalité de la saveur des leptons et la conservation du nom-

bre de leptons, qui peuvent être explorés dans diverses désintégrations de particules et dans des expériences qui étudient la nature des neutrinos. Enfin, la symétrie CPT combinée, considérée comme une symétrie exacte de la nature, peut être testée dans des expériences de spectroscopie utilisant des atomes d’antihydrogène. Toute déviation observée impliquerait une rupture de la théorie quantique relativiste des champs.

🇨🇦 Contributions et réalisations canadiennes

Les paragraphes suivants décrivent certaines des contributions et des réalisations canadiennes des cinq dernières années liées à l’exploration des symétries fondamentales.

- ALPHA est une expérience du CERN qui vise à tester la symétrie CPT et l’universalité des interactions gravitationnelles entre la matière et l’antimatière en utilisant la spectroscopie de l’antihydrogène. Grâce au leadership des Canadiens, la collaboration ALPHA a donné lieu à une série de réalisations notables, comme le test de la neutralité de la charge de l’antihydrogène, la mesure de la fréquence de la transition $1s-2s$ de l’antihydrogène et la démonstration du refroidissement par laser de l’antihydrogène.

- TUCAN est une expérience à TRIUMF dont le but est de mesurer le moment dipolaire électrique des neutrons avec une précision sans précédent en utilisant des neutrons ultra-froids. Les Canadiens ont franchi des étapes import-

antes dans la mise en œuvre de ce programme de physique avec notamment : la construction d'un nouvel aimant rapide pour alimenter une nouvelle ligne de faisceaux de protons avec une cible de spallation de haute puissance; la production réussie des premiers neutrons ultra-froids à TRIUMF; et la caractérisation de leurs interactions avec de l'hélium superfluide.

- L'objectif de la collaboration FrPNC est de rechercher des preuves de phénomènes de la nouvelle physique par l'étude des interactions faibles entre courants neutres avec des méthodes de physique atomique. Les Canadiens ont réussi à mettre en place une installation de piège à laser à TRIUMF et ils ont récemment franchi une étape importante : la détection de la transition interdite $7s-8s$ du Francium, ouvrant la voie aux futures mesures de violation de la parité.

- Les Canadiens ont utilisé l'installation TRINAT à TRIUMF pour étudier les désintégrations des isotopes à courte durée de vie produits à ISAC dans le cadre de la recherche d'une nouvelle physique. La capacité récemment ajoutée de pomper optiquement et efficacement les atomes piégés a permis aux Canadiens d'obtenir la mesure la plus précise de l'asymétrie de la désintégration bêta à ce jour en utilisant ^{37}K .

- À l'aide de neutrons froids produits au Laboratoire national d'Oak Ridge, des Canadiens ont contribué à la première mesure de la violation de la parité dans les relations neutron-proton et neutron- ^3He , ce qui fournit les contraintes les plus

strictes à ce jour sur les constantes de couplage faible nucléon-nucléon. Dans la foulée de ces efforts, les Canadiens ont également participé à l'élaboration de l'expérience Nab, qui permettra de vérifier la présence de la physique au-delà du modèle standard par l'étude de la désintégration bêta des neutrons froids. Plus précisément, les Canadiens ont mis au point un accélérateur de protons de 30 keV à l'Université du Manitoba, qui sera utilisé pour caractériser les détecteurs en silicium de grande surface de l'expérience Nab.

- Les Canadiens ont réalisé des progrès importants dans l'élaboration d'expériences capables de tester et de mesurer les symétries fondamentales dans le cadre de divers autres programmes de recherche tels que ATLAS, Belle II, Chira-Belle, MOLLER, NA62, T2K, Hyper-K, DUNE, SNO+, nEXO et LEGEND, ainsi que des programmes expérimentaux dans les installations de faisceaux radioactifs. Les réalisations canadiennes spécifiques à chacun de ces projets sont présentées dans les descriptions des autres moteurs scientifiques.

- L'une des principales motivations pour explorer de nouvelles sources de violation de la symétrie CP et du nombre de leptons est leur lien avec l'asymétrie matière-antimatière dans l'univers. Les théoriciens canadiens ont activement analysé les signatures physiques de ces mécanismes potentiels, les implications cosmologiques qui leur sont associées et les nouvelles possibilités d'essais expérimentaux.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Propriétés des neutrinos

Au cours des dernières décennies, les études sur les neutrinos ont révélé de nombreuses propriétés de ces particules insaisissables : de la découverte qui a changé le paradigme que les neutrinos ont une masse non nulle, jusqu'à la mesure des angles de mélange étonnamment grands entre les différentes espèces de neutrinos. Cependant, il y a encore beaucoup à apprendre. Nous ne connaissons pas l'échelle absolue de la masse des neutrinos, qui a une incidence importante sur l'impact des neutrinos et l'évolution de l'univers, ni quelle est l'espèce de neutrinos la plus légère, ni même si les neutrinos et les antineutrinos sont des particules distinctes. Nous ne savons pas non plus si les neutrinos violent la symétrie *CP* d'une manière qui pourrait contribuer à expliquer l'excès de la matière par rapport à l'antimatière dans l'univers.

L'approche expérimentale la plus prometteuse pour déterminer si les neutrinos ont ou non leurs propres antiparticules est la recherche d'une double désintégration bêta sans émission de neutrinos ($0\nu\beta\beta$). L'observation de ce processus de violation du nombre de leptons serait une preuve évidente de la présence d'une physique au-delà du modèle standard et démontrerait clairement que les neutrinos sont des particules de type Majorana et qu'ils peuvent donc obtenir leur masse d'une manière totalement indépendante du célèbre mécanisme de Higgs. Le taux observé

de $0\nu\beta\beta$ contraindrait également la masse absolue des neutrinos. Un certain nombre d'expériences dans le monde entier sont à la recherche de $0\nu\beta\beta$ en utilisant différentes technologies et différents isotopes candidats. Le Canada joue un rôle de premier plan dans cet effort, car SNOLAB offre un site exceptionnel à faible bruit de fond.

Les mesures de précision des oscillations des neutrinos permettent de réaliser de nouvelles percées fondamentales. Les expériences d'oscillation de neutrinos, telles que celles basées sur les faisceaux de neutrinos à haute luminosité, les antineutrinos des réacteurs et les neutrinos atmosphériques, tenteront de déterminer la hiérarchie des masses de neutrinos et la phase de violation de la symétrie *CP*. Elles rechercheront aussi des signes de la nouvelle physique, comme l'existence de neutrinos stériles et d'interactions neutrino-matière non standard.

Les neutrinos peuvent également agir comme des « messagers », en fournissant des informations autrement inaccessibles sur des sujets tels que les explosions de supernova, la composition de l'intérieur de la Terre, le noyau solaire et les processus d'accélération des particules à haute énergie dans le cosmos. Ces neutrinos naturels offrent en outre la possibilité d'étudier les propriétés des neutrinos et de rechercher la physique au-delà du modèle standard.

🇨🇦 Contributions et réalisations canadiennes

Les chercheurs canadiens sont à la pointe des recherches expérimentales sur les propriétés des neutrinos. Les réalisations spécifiques des Canadiens au cours des cinq dernières années sont les suivantes :

- L'expérience SNO+ dirigée par le Canada au SNOLAB recherchera la double désintégration bêta sans émission de neutrinos ($0\nu\beta\beta$) dans l'isotope ^{130}Te . Elle contribuera également aux études sur l'oscillation des neutrinos en mesurant les antineutrinos des réacteurs et les neutrinos solaires de faible énergie. Des étapes importantes dans l'élaboration de ce programme de recherche ont été franchies. L'expérience SNO+ a débuté en 2017 avec une phase de remplissage d'eau et, après une collecte de données réussie avec de l'eau, la transition du détecteur vers un remplissage de scintillateur a été achevée en 2021.
- L'objectif de EXO-200 et de la future expérience nEXO proposée est de rechercher la $0\nu\beta\beta$ dans le xénon. L'expérience EXO-200 a été close en 2018, à la Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) au Nouveau-Mexique. Les Canadiens ont joué un rôle de premier plan, à la fois dans l'exploitation du détecteur et dans l'analyse subséquente des données, atteignant une sensibilité similaire à celle des recherches les plus sensibles et ne trouvant aucune preuve statistiquement significative de l'existence de la $0\nu\beta\beta$. Les Canadiens ont contribué, en parallèle, au développement de la prochaine génération

de l'expérience nEXO, qui pourrait être installée au SNOLAB. Par ailleurs, ils ont pris en charge la livraison de composants clés du détecteur, tels que le veto à muons du détecteur extérieur, les systèmes de circulation et de dosage de l'eau et les essais du détecteur de photons.

- LEGEND est un programme d'expériences de la $0\nu\beta\beta$ basé sur ^{76}Ge . Il est possible que l'expérience LEGEND-1000 proposée soit située au SNOLAB. Un petit effort sur ce programme de recherche a récemment été entrepris au Canada avec des contributions initialement axées sur le développement et la caractérisation de capteurs spécialisés en germanium.
- L'expérience T2K est un projet sur les neutrinos à grande distance en cours au Japon. Les Canadiens ont joué un rôle actif à toutes les étapes de cette expérience, contribuant à de nombreux aspects de la construction et de l'analyse. Leur travail a abouti à la publication de la première contrainte significative sur la phase de violation de la symétrie CP dans les neutrinos, un résultat qui a un impact profond sur la communauté dans son ensemble et sur la planification de la prochaine génération d'expériences d'oscillation.
- Le futur projet Hyper-K au Japon s'appuie sur les réussites de l'expérience T2K avec la construction d'un détecteur lointain huit fois plus grand et l'amélioration de l'intensité du faisceau du J-PARC pour construire une expérience de neutrino de premier plan au niveau mondial. Le projet Hyper-K a été approuvé et la construction du détecteur a débuté en 2020. Le Canada a joué un rôle de premier plan dans le

programme Hyper-K depuis sa conception. Les récentes activités de l'équipe canadienne se sont concentrées sur diverses initiatives visant à supprimer les sources d'incertitudes systématiques susceptibles de limiter à terme la précision des mesures Hyper-K. Par exemple, les Canadiens ont dirigé la proposition d'une nouvelle expérience de production de hadrons pour recueillir des données sur l'interaction des hadrons dans les régions de l'espace de phase pertinentes pour les mesures Hyper-K. Les Canadiens ont développé le concept de déplacement du détecteur proche vers différentes positions hors axe pour échantillonner différents spectres d'énergie des neutrinos. Les Canadiens ont également dirigé une expérience d'essai proposée au CERN pour définir les technologies de détection, les méthodes d'étalonnage et les modèles du détecteur Cherenkov à eau intermédiaire, nécessaires pour réaliser des mesures de la section efficace différentielle des neutrinos au pourcentage.

- L'expérience DUNE, située à l'installation de recherche souterraine de Sanford (SURF) dans le Dakota du Sud, étudiera les oscillations de neutrinos à l'aide d'un faisceau de neutrinos artificiels, ainsi que les neutrinos atmosphériques, solaires et de supernovæ. La participation canadienne à l'expérience DUNE a été récemment établie avec des contributions autour des domaines clés suivants du programme de physique : mise en service du détecteur proche, développement de l'acquisition de données, systèmes de déclenchement et de calibration, et développement du modèle de calcul DUNE.

- IceCube est un télescope à neutrinos à haute énergie situé au pôle Sud. Outre l'étude des neutrinos à ultra-haute énergie, IceCube apporte contribue de manière significative à la mesure de précision des paramètres de mélange à haute énergie. Les Canadiens ont établi leur leadership dans des analyses de données fondamentales, telles que les flux et les oscillations des neutrinos atmosphériques, les neutrinos de supernovæ, les recherches indirectes de matière noire et les tests de l'invariance de Lorentz. De plus, les Canadiens ont joué un rôle actif dans le développement et l'utilisation de nouveaux modules optiques qui seront déployés dans le cadre d'une extension d'IceCube afin d'améliorer la résolution angulaire des événements de neutrinos à hautes énergies. Ces travaux de mise à niveau d'IceCube poursuivis par les Canadiens présenteront une grande synergie avec les travaux nécessaires pour mettre au point des algorithmes de déclenchement et de reconstruction similaires pour le futur détecteur P-ONE, qui utilisera des modules optiques presque identiques à ceux de la mise à niveau d'IceCube. En effet, le Canada se prépare à jouer un rôle majeur avec P-ONE au large de l'île de Vancouver, en Colombie-Britannique, dans le cadre d'un projet qui utilisera les infrastructures d'Ocean Networks Canada financées par le Fonds des initiatives scientifiques majeures de la FCI pour étendre les capacités mondiales et la couverture du ciel des télescopes à neutrinos.

- HALO est une expérience de neutrinos de supernovæ dirigée par le Canada et exploitée au SNOLAB. L'équipe canadienne a étendu son leadership au développement de l'expérience HALO-1kT proposée, qui serait installée au

Laboratorio Nazionale del Gran Sasso (LNGS) en Italie. HALO-1kT est un projet de détecteur mis en œuvre en raison de la disponibilité de 1000 tonnes de plomb provenant du démantèlement de l'expérience OPERA.

● L'expérience BeEST vise à effectuer la recherche la plus sensible à ce jour de neutrinos stériles à l'échelle du keV en utilisant la désintégration par capture d'électrons du ^7Be implanté dans des capteurs quantiques supraconducteurs. Les Canadiens ont contribué à la publication des premières limites avec cette technique. Ces nouvelles contraintes améliorent les mesures de désintégration précédentes jusqu'à un ordre de grandeur.

● Le processus de diffusion élastique cohérente des neutrinos et des noyaux offre un environnement propre à la recherche de nouvelle physique. Il est également important sur le plan astrophysique, car il joue un rôle dans les processus des supernovæ et leur détection. Les Canadiens participent à un certain nombre d'expériences qui étudient, ou prévoient d'étudier, la diffusion élastique cohérente entre neutrinos et noyaux en utilisant différents types de noyaux cibles. Celles-ci comprennent COHERENT, Scintillating Bubble Chamber (SBC), NEWS-G, MINER et RICOCHET.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Matière noire et secteurs sombres potentiels

DES DONNÉES CONVAINCANTES provenant des courbes de rotation des galaxies, de la dynamique des amas de galaxies, de la structure à grande échelle de l'univers et du rayonnement micro-onde cosmique démontrent qu'environ ~ 85 % de la matière de l'univers actuel est constitué de matière noire non baryonique. En outre, les mesures de neutrinos et la structure à grande échelle indiquent que seule une petite fraction de la matière noire peut être sous forme de neutrinos. Un effort expérimental et théorique global teste de nombreuses hypothèses

concernant la nature de la matière noire, y compris les reliques thermiques de l'univers primitif, une catégorie qui inclut les particules massives à faible interaction (WIMP), et une série de scénarios de masse plus légère motivés théoriquement, tels que les axions, les neutrinos stériles, les photons sombres et d'autres degrés de liberté du secteur sombre, y compris les médiateurs de nouvelles forces par lesquelles la matière noire pourrait interagir.

Les expériences peuvent rechercher la matière noire d'au moins trois façons : par la

détection directe de la matière noire ambiante dans le halo galactique, par la production et la détection dans des expériences basées sur des accélérateurs, et par l’observation des signatures d’annihilation de la matière noire.

Les recherches directes de candidats à la matière noire sont effectuées dans de grands observatoires souterrains ultra-propres ou par le biais de leurs éventuelles interactions avec un champ magnétique puissant. Les recherches les plus sensibles de WIMP de masse élevée utilisent des liquides nobles comme cible, tandis que les recherches directes de WIMP de masses faibles utilisent une variété de techniques et de matériaux, y compris des recherches de diffusion d’électrons. Les recherches de WIMP qui interagissent avec le spin des nucléons exploitent des cibles telles que le fluor. En revanche, les recherches directes d’axions reposent généralement sur une éventuelle conversion axion-photon qui pourrait avoir lieu dans un champ magnétique intense, tel que celui présent dans une cavité résonante ou à proximité d’un noyau dans un matériau cible.

Les particules de matière noire et les particules liées à un éventuel secteur sombre pourraient être produites dans des expériences basées sur des accélérateurs, dans des collisions de particules ou des expériences de décharge de faisceau. La stratégie de cette approche expérimentale consiste à rechercher les désintégrations visibles ou invisibles d’une particule médiatrice sombre qui se couplerait à la fois à la matière noire et aux particules connues du modèle standard.

Des recherches indirectes de la matière noire sont également menées par des obser-

vatoires astronomiques en vue de détecter des signatures de l’annihilation de la matière noire, notamment les rayons cosmiques et les neutrinos.

🇨🇦 Contributions et réalisations canadiennes

La présence du SNOLAB donne au Canada une position privilégiée pour jouer un rôle de premier plan dans la recherche directe de la matière noire. Les Canadiens ont été particulièrement productifs au cours des cinq dernières années et la liste suivante met en évidence certaines des réalisations récentes.

- Dirigée par le Canada, l’expérience DEAP-3600 utilise un grand détecteur à argon liquide au SNOLAB pour rechercher des WIMP de masses élevées. En service depuis 2017, il a démontré avec succès les très faibles niveaux de bruit de fond réalisables dans l’argon liquide, en s’appuyant notamment sur l’utilisation de techniques avancées de discrimination des impulsions. La collaboration DEAP-3600 a publié les meilleures limites de matière noire dans l’argon liquide; celles-ci sont complémentaires aux limites obtenues avec d’autres matériaux cibles. Les Canadiens ont également contribué à l’interprétation de ces limites dans le contexte des théories des champs effectifs et de la distribution des vitesses de la matière noire compte tenu des incertitudes de la dynamique galactique.

● Le programme PICO de chambre à bulles dirigé par le Canada au SNOLAB utilise des cibles fluorées surchauffées pour rechercher des interactions WIMP-noyau qui dépendent du spin. Le détecteur PICO-40 est en service et le détecteur PICO-500 est en construction. La collaboration PICO a publié la contrainte de détection directe la plus stricte sur la section dépendant du spin WIMP-proton.

● L'expérience SuperCDMS, qui est actuellement déployée au SNOLAB, utilisera des détecteurs au germanium et au silicium pour rechercher des WIMP de faible masse. Les Canadiens ont contribué de manière significative à l'analyse des données obtenues lors des précédents déploiements à Soudan Mine, aux États-Unis, et aux publications qui en ont découlé sur les résultats des détecteurs fonctionnant avec une polarisation à haute tension, exploitant l'effet Luke-Neganov. Ces travaux sont à la base du déploiement de SuperCDMS-SNOLAB. En outre, l'installation canadienne d'essai cryogénique souterrain (CUTE) du SNOLAB a été construite et mise en service, ce qui permettra de procéder à des essais préalables approfondis des cristaux avant leur déploiement dans SuperCDMS-SNOLAB et d'obtenir des résultats préalables concernant la matière noire.

● Des chercheurs canadiens ont contribué à la publication d'une analyse conjointe avec les observatoires de neutrinos IceCube et Antares qui recherchent l'annihilation de la matière noire au centre de la Voie lactée. Bien qu'aucun excès par rapport au bruit de fond attendu ne soit observé, ces limites présentent une amélioration allant jusqu'à un facteur deux dans la gamme de masse de matière noire pertinente par rapport

aux limites individuelles publiées par les deux collaborations.

● L'expérience NEWS-G dirigée par le Canada au SNOLAB recherche les WIMP de faible masse à l'aide de compteurs proportionnels sphériques remplis de gaz de faible masse atomique, comme le néon, le méthane et l'hélium, et présente donc une sensibilité particulière aux WIMP de faible masse. Les Canadiens ont contribué à la publication des premiers résultats de recherche de matière noire avec un compteur proportionnel sphérique au Laboratoire Souterrain de Modane, en France. Au moment de la publication, les résultats ont établi de nouvelles contraintes sur la section efficace de la diffusion WIMP-nucléon indépendante du spin pour les masses de WIMP inférieures à 0,6 GeV. Les Canadiens ont également contribué de façon significative à l'installation et à la mise en service de l'expérience au SNOLAB, qui sera exploitée sous peu.

● Les Canadiens ont initié et développé la nouvelle collaboration internationale SBC pour le développement d'une chambre à bulles scintillantes qui combinera la scintillation des liquides nobles avec le rejet des bruits de fond électromagnétiques que l'on trouve dans les chambres à bulles, afin de rechercher des WIMP de faible masse. Les Canadiens ont participé à l'élaboration de tous les aspects de l'expérience.

Les théoriciens canadiens ont participé activement à l'élaboration de modèles pour la matière noire sur toute la gamme de masses, en étudiant une série de contraintes astrophysiques et terrestres. Ils ont proposé de nombreuses idées nouvelles pour la détection directe et indirecte.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Nouveaux principes et nouvelles structures physiques

LES PHYSICIENS THÉORICIENS explorent incités à explorer des questions fondamentales sur la structure même de la théorie quantique relativiste des champs, le fondement qui sous-tend le modèle standard (MS) de la physique des particules. Ces questions couvrent un champ particulièrement large et visent des objectifs ambitieux, notamment la compréhension de la nature ultime de la physique des hautes énergies, et l’unification de la physique des particules avec la gravité.

Bien que le modèle standard constitue une réalisation scientifique remarquable et qu’un haut degré de contrôle quantitatif ait été atteint dans un certain nombre de régimes, une compréhension complète des éléments constitutifs de la théorie quantique des champs n’a pas encore été atteinte et certains mystères doivent être élucidés. L’examen a révélé des connexions surprenantes, par exemple des dualités entre des théories apparemment sans rapport, ce qui a conduit à de nouvelles techniques de calcul à la fois pour le couplage faible et le couplage fort. Récemment, d’importants progrès dans l’étude de la théorie des champs fortement couplés ont fait intervenir l’approche dite « Bootstrap conforme », dans laquelle les contraintes d’analyticité et d’unitarité sont utilisées pour extraire des informations sur les théories des champs quantiques, même

en l’absence d’une expansion perturbatrice traditionnelle. La théorie de jauge sur réseau est une approche plus directe pour comprendre la dynamique forte dans les théories de jauge et la théorie de la chromodynamique quantique (QCD) en particulier, et fait également l’objet d’un développement théorique considérable, par exemple pour comprendre les fermions chiraux, peut-être comme application potentielle pour l’informatique quantique. Un autre axe de recherche récent est l’étude des amplitudes de diffusion, qui permet de mieux comprendre les structures géométriques sous-jacentes, peut-être même la nature de l’espace-temps, ainsi que des méthodes pratiques pour effectuer des calculs en QCD et en gravité. Nombre de ces approches reposent notamment sur des liens profonds et croissants entre les méthodologies formelles et phénoménologiques de la théorie des particules.

Une compréhension cohérente et complète de la gravité au niveau quantique reste l’un des plus grands défis de la physique. La théorie des cordes fournit un cadre théorique qui tient compte à la fois de la relativité générale classique et de la mécanique quantique, mais elle est une structure mathématique riche et son application concrète à la physique subatomique reste moins claire. Plus récemment, l’exploration de la théorie

des cordes a permis d'élucider de nombreux aspects non triviaux de la théorie quantique des champs, de la QCD, de la physique de la matière condensée, des trous noirs, de l'espace-temps, de l'information quantique et des mathématiques formelles, ainsi que les liens entre ces éléments. La structure la plus ambitieuse et la plus originale à émerger de cette méthode est peut-être la correspondance ou l'holographie AdS/CFT, qui relie les théories de la gravité aux théories quantiques des champs dans les dimensions inférieures. Réalisée il y a près de 25 ans, cette découverte continue de stimuler un vaste ensemble de travaux théoriques portant sur la dynamique forte dans les théories quantiques des champs et concernant la physique des particules et de la matière condensée, la dynamique thermique, l'hydrodynamique et le plasma quark-gluon, ainsi que les trous noirs. Ces dernières années, cette approche de la physique (quantique) des trous noirs a établi de nouvelles connexions avec la théorie de l'information quantique et l'informatique quantique, et a généré de nouvelles idées sur le rayonnement de Hawking et une résolution possible du paradoxe de la perte d'information. Certaines de ces nouvelles idées peuvent être formulées dans le langage traditionnel des intégrales de trajectoire gravitationnelle, ce qui montre une fois de plus la capacité de cette double perspective à fournir un point de vue nouveau et productif sur des énigmes profondes de la physique conventionnelle. Au-delà de la gravité elle-même, la cohérence interne de la théorie des cordes a fourni des indices sur les lieux où chercher une nouvelle physique au-delà du modèle standard. Par exemple, les dimensions supplémentaires constituent un

nouveau point de vue à partir duquel on peut considérer la sensibilité de l'échelle électrofaible aux corrections quantiques et l'origine de la structure de la symétrie des saveurs dans le modèle standard.

La synergie entre la physique des particules et la cosmologie précoce offre de plus un terrain fertile pour la recherche théorique formelle qui vise à comprendre l'univers primordial. Les données cosmologiques actuelles exigent une époque primitive d'inflation ou une autre description qui produit les caractéristiques à grande échelle observées aujourd'hui et les origines de la structure. Une compréhension théorique complète de la cosmologie primitive, et de ses conditions initiales, reste un domaine de recherche actif et l'un des rares secteurs où la physique subatomique à très haute échelle peut laisser des traces observables. En effet, les origines de la structure peuvent nous donner des indices sur la nature particulière de la matière noire, tandis que les preuves de l'inflation peuvent nous renseigner sur la structure à très haute énergie de la physique subatomique. Divers scénarios d'univers primitifs conduisent également à de nouvelles prédictions, telles que la formation de trous noirs primordiaux, des transitions de phase ou des défauts topologiques, qui sont aujourd'hui considérés comme des sources potentiellement observables d'ondes gravitationnelles. Enfin, la compréhension de la nature de l'énergie sombre, ou de la petite taille de la constante cosmologique, reste un autre grand défi à l'étude qui se situe à l'intersection de la théorie quantique des champs et de la gravité, et qui pourrait conduire à la compréhension d'autres aspects profonds de la physique fondamentale.

Contributions et réalisations canadiennes

La communauté canadienne de la théorie formelle a activement contribué aux progrès réalisés dans les recherches décrites ci-dessus et, dans de nombreux cas, elle a joué le rôle de chef de file. Voici des exemples concrets de développement depuis le dernier PLT :

- Nouvelles perspectives sur la structure des amplitudes de diffusion dans la théorie quantique des champs et la gravité, ainsi que sur les composantes fondamentales associées de la théorie des champs et de la théorie des champs conformes.
- Meilleure compréhension fondamentale des systèmes thermiques, du régime hydrodynamique relativiste et de ses applications, par exemple au plasma quark-gluon.
- Nouvelle compréhension de la structure de phase et de la dynamique des théories de jauge fortement couplées.

- Meilleure compréhension de l'holographie et des liens entre les trous noirs et la structure de l'espace-temps avec la théorie de l'information quantique.

- Nouvel aperçu des caractéristiques quantiques des trous noirs, de l'entropie et des modèles de gravité quantique de faible dimension.

- Progrès variés dans la compréhension de la théorie quantique des champs dans l'univers primordial, dans l'espace-temps de Sitter, et implications pour les signatures des ondes gravitationnelles.

Le Canada possède des centres théoriques de haut niveau, notamment l'Institut Périmètre, mais la communauté de la théorie formelle est diverse et largement répartie sur l'ensemble du territoire canadien. Les chercheurs collaborent activement au sein de petites équipes, souvent internationales.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Propriétés et phases des hadrons

LA NATURE DES quarks et des gluons, les constituants fondamentaux des hadrons, est l'un des principaux problèmes non résolus de la

physique moderne. Les interactions fortes entre quarks et gluons à très hautes énergies (échelles de distances courtes) sont décrites

dans le modèle standard par la théorie de la chromodynamique quantique (QCD), mais la compréhension complète de la force forte à longues distances, où le confinement des quarks domine, est l'un des principaux problèmes non résolus de la physique subatomique.

On adopte des approches différentes pour mieux comprendre le régime non-perturbateur de la QCD, où domine le confinement des quarks (couleur). Une stratégie consiste à mesurer les propriétés des hadrons, telles que la masse, le spin et la polarisabilité, dans des expériences de diffusion d'électrons et de photoproduction. Une autre possibilité consiste à rechercher des mésons hybrides dont l'existence est prédite par des calculs de QCD sur réseau, afin de comprendre comment les degrés de liberté des quarks et des gluons présents dans le lagrangien fondamental de la QCD se manifestent dans le spectre des hadrons. La mise en évidence de nouveaux types d'hadrons, notamment les états tétraquark et pentaquark, est une découverte passionnante qui motive fortement la poursuite des études. Les mesures des facteurs de forme électromagnétiques des mésons, tels que le pion et le kaon chargés, permettront d'élucider le rôle du confinement et de la rupture de symétrie chirale dans la fixation de la taille et de la masse de l'hadron, ainsi que la transition entre les domaines de la QCD perturbative et de couplage fort (distances courtes et longues). La matière exotique peut également être créée par la collision de noyaux à des énergies relativistes, créant des conditions similaires à celles qui existaient peu après le Big Bang, ce qui permet de construire le diagramme de phase de la matière nucléaire.

🇨🇦 Contributions et réalisations canadiennes

Les Canadiens sont à l'avant-garde de la quête de compréhension des propriétés des hadrons, tant sur le plan expérimental que théorique. Les réalisations canadiennes au cours des cinq dernières années sont les suivantes.

- La communauté théorique canadienne s'appuie sur une série d'approches de calcul, notamment la QCD sur réseau, la QCD holographique à cône de lumière et la théorie de la perturbation chirale, pour faire progresser le domaine et soutenir les efforts expérimentaux canadiens. Par exemple, parmi les réalisations récentes, on peut citer le premier calcul direct de QCD sur réseau prédisant l'existence de tétraquarks avec un contenu de valence $ud\bar{b}\bar{b}$ et des calculs des prédictions du modèle standard pour le rapport d'embranchement différentiel de la désintégration rare $B_s \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$.

- Le projet GlueX, qui se déroule actuellement au Jefferson Laboratory, vise à mesurer les propriétés des mésons hybrides produits par photoproduction. Les Canadiens ont conservé la responsabilité des étalonnages de gain des PMT en silicium pour le calorimètre Barrel qui a été conçu et construit au Canada. L'équipe canadienne a également dirigé la mesure de l'asymétrie photon-faisceau pour les mésons η et η' , concluant que ce processus de photoproduction est dominé par l'échange de parité naturelle avec une faible dépendance au transfert de momentum.

- Le programme consacré aux facteurs de forme des pions au Jefferson Laboratory a été dirigé par des Canadiens, qui ont obtenu plus de 1 000 citations pour leur travail de collecte et d’analyse des données issues de diverses expériences.
- Les Canadiens ont mené un programme de mesures pour extraire les polarisations de spin du proton au Microtrom de Mainz (MAMI), en Allemagne. Ces polarisations sont des observables fondamentales de la structure des hadrons. Elles peuvent être calculées à l’aide de divers modèles inspirés de la QCD et de théories effectives. De nombreuses mesures ont été publiées et se sont révélées en accord avec plusieurs

types de prédictions obtenues de différentes approches théoriques.

- Les Canadiens continuent de jouer un rôle essentiel dans l’étude des collisions d’ions lourds ultra-relativistes en général, et des propriétés du plasma quark-gluon en particulier, grâce aux calculs des observables expérimentales pertinentes en utilisant des techniques d’hydrodynamique et au développement de ce formalisme. La participation canadienne à ces efforts a stimulé l’élaboration des concepts de détecteurs requis dans les collisionneurs d’ions lourds passés et futurs, et a permis de faire progresser nos connaissances sur la structure des hadrons.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Structure nucléaire

LES NOYAUX ATOMIQUES, le cœur de toute la matière visible, constituent des systèmes uniques de fermions en forte interaction. Les propriétés et la structure des noyaux sont d’une importance capitale pour de nombreux aspects de la physique, à des échelles allant de 10^{-15} m (rayon du proton) à 10^4 m (rayon des étoiles à neutrons), ainsi que pour l’histoire de l’évolution de l’univers. Plusieurs phénomènes rencontrés dans les noyaux partagent également des ingrédients communs de physique fondamentale avec d’autres systèmes mésoscopiques, ce qui rend la recher-

che sur la structure nucléaire pertinente pour d’autres domaines de la science contemporaine, par exemple en matière condensée et en physique atomique.

Il existe une grande variété de noyaux dans l’univers, mais les modèles nucléaires traditionnels sont basés sur les propriétés de ceux qui existent sur Terre ou qui peuvent être créés artificiellement avec des demi-vies relativement longues. Les isotopes rares, avec des noyaux à la limite de la liaison nucléaire, ouvrent une nouvelle fenêtre sur la structure nucléaire. Leurs propriétés observées présen-

tent des écarts inattendus par rapport aux modèles actuels, ce qui remet en question notre compréhension fondamentale des principes de la nature dans la construction de ces systèmes quantiques à corps multiples.

Les recherches actuelles en physique nucléaire à basse énergie portent sur l'existence des noyaux atomiques, leurs limites et leur structure sous-jacente. Elle vise également à décrire les interactions entre les noyaux et les processus dynamiques tels que la fission. Le but ultime est d'obtenir une compréhension prédictive des noyaux et de leurs interactions, fondée sur la théorie fondamentale de la QCD et la théorie électrofaible. On arrive à saisir les défis actuels de la structure nucléaire par les questions primordiales suivantes. Comment la structure des noyaux émerge-t-elle des forces nucléaires? Quelles nouvelles caractéristiques et quels nouveaux phénomènes apparaissent avec une grande asymétrie neutron-proton dans les isotopes rares? La troisième question concerne le rôle des isotopes rares dans la formation de la matière visible dans l'univers conduit au dernier moteur scientifique abordé dans la sous-section suivante.

Les réponses à ces questions découleront d'une compréhension plus large et plus approfondie des noyaux atomiques, tant sur le plan expérimental que théorique. Ces dernières décennies ont vu des progrès dans notre compréhension de la force nucléaire forte. Cependant, l'étude des noyaux exotiques, rendue possible par les développements des faisceaux d'isotopes rares, bouleverse les connaissances conventionnelles sur l'organisation des protons et des neutrons, notamment

avec une grande asymétrie neutron-proton aux limites de la liaison nucléaire. Par exemple, de nouvelles formes de noyaux, de halos nucléaires et de peaux de neutrons apparaissent. Les écarts bien établis des couches à proximité de la région de stabilité nucléaire sont également érodés par les effets de spin-isospin des forces à deux noyaux ($2N$) et à trois noyaux ($3N$) et de nouveaux nombres magiques apparaissent loin de la région de stabilité.

L'exploration des isotopes rares vers les limites extrêmes des liaisons N et Z fournira les informations nécessaires à une compréhension globale des noyaux. Cette exploration révèle de nouvelles caractéristiques quantiques à plusieurs corps. Elle nous conduit vers une vraie compréhension globale des systèmes quantiques complexes et des mécanismes responsables des caractéristiques émergentes trouvées dans les noyaux atomiques. En outre, elle ouvrira de nouvelles voies aux contributions interdisciplinaires dans les sciences fondamentales et les applications sociétales.

■+■ Contributions et réalisations canadiennes

Le Canada est un leader mondial dans la description théorique des noyaux atomiques à partir des premiers principes. Le but ultime de ces efforts est de développer une théorie ab-initio prédictive de la structure nucléaire et des réactions nucléaires, afin de comprendre les noyaux étudiés dans les installations d'isotopes

rare. La collaboration existante et étroite entre les expérimentateurs et les théoriciens canadiens a permis d'obtenir un retour d'information concernant la qualité des interactions inter-nucléoniques utilisées comme données d'entrée dans ces calculs, ce qui a permis d'améliorer la connaissance de l'interaction entre les forces $2N$ et $3N$. La liste suivante met en évidence les réalisations récentes du Canada au cours des cinq dernières années.

- Des Canadiens ont contribué à révéler les empreintes de la force nucléaire à partir d'une étude de la diffusion élastique des protons sur ^{10}C . L'expérience dirigée par le Canada, réalisée avec l'installation IRIS au laboratoire TRIUMF-ISAC, a mesuré la forme et l'ampleur de la section différentielle. Les calculs *ab initio* des réactions nucléaires effectués dans le cadre d'une collaboration dirigée par le groupe de théorie TRIUMF ont montré que ces observables sont fortement sensibles à la prescription de la force nucléaire. La comparaison avec les données suggère que l'interaction effective chirale $\text{N}^2\text{LO}_{\text{sat}}$ fournit une meilleure description de la force nucléaire par rapport aux autres forces, même si elle n'est pas tout à fait adéquate.
- Les taux de désintégration β dans les noyaux, systématiquement plus faibles que pour les neutrons libres, impliquent une atténuation apparente de la constante de couplage fondamentale. Une collaboration internationale dans le champ de la théorie, avec des contributeurs clés du groupe de théorie nucléaire de TRIUMF, a récemment résolu cette énigme vieille de 50 ans à partir des premiers principes. Leurs travaux ont montré que cette extinction

résulte dans une large mesure du couplage de la force faible à deux nucléons ainsi que des corrélations fortes dans le noyau. En combinant les théories effectives des champs des forces fortes et faibles avec de puissantes techniques quantiques à plusieurs corps, le groupe a effectué des calculs *ab initio* de désintégrations β à partir de noyaux de masse légère et moyenne jusqu'à ^{100}Sn , qui sont cohérents avec les données expérimentales. Ces résultats ont également des implications sur la synthèse des éléments lourds dans les fusions d'étoiles à neutrons et sur les prédictions concernant la double désintégration β sans émission de neutrinos.

- Les Canadiens ont aussi apporté d'importantes contributions à la mesure et à la compréhension des noyaux de Halo. Par exemple, des études récentes menées sous la direction du Canada avec la Radioactive Ion Beam Factory (RIBF) au centre RIKEN Nishina au Japon ont dévoilé un halo à deux neutrons dans ^{29}F . Il s'agit à ce jour du halo le plus lourd et du premier halo borroméen observé dans la couche sd des protons. Alors que les résultats sont expliqués par les calculs de pointe du modèle de couche avec des interactions effectives, les prédictions *ab initio* sont contestées pour expliquer le halo dans ^{29}F , ce qui montre une fois de plus les limitations de nos connaissances de la force nucléaire à partir des premiers principes
- Les Canadiens ont contribué aux mesures de masse de haute précision des isotopes $^{50-55}\text{Sc}$ au LEBIT et aux installations TITAN à TRIUMF. Ce travail a permis d'ajouter des informations importantes à la compréhension des phénomènes émergents de couche fermée dans le domaine

de l'énergie nucléaire $N=32$ et $N=34$ au-dessus du nombre magique $Z=20$. Plus précisément, les nouvelles données ont permis de caractériser de manière complète et précise les tendances des énergies de liaison de l'état fondamental le long de l'isotone $N=32$, confirmant que les énergies empiriques de l'intervalle des couches neutroniques atteignent un pic au niveau du ^{52}Ca doublement magique. De plus, les résultats suggèrent que le comportement de couche fermée n'apparaît dans la surface de la masse que pour $N < 20$.

● Les Canadiens ont dirigé la récente étude de la structure du ^{80}Ge à l'aide du spectromètre GRIFFIN au TRIUMF-ISAC. Les nouvelles preuves expérimentales combinées aux prédictions du modèle des couches ont clairement montré que la coexistence de formes à énergie basse n'est pas présente dans ^{80}Ge , contrairement aux résultats rapportés précédemment.

MOTEUR SCIENTIFIQUE –

Formation cosmique des noyaux

L'humanité cherche depuis longtemps à comprendre l'origine de la matière visible et l'abondance des noyaux stables et à longue durée de vie. Il a été fermement établi que la synthèse des éléments dans l'univers se produit par le biais de divers processus nucléaires, de la combustion stellaire latente aux conditions dynamiques impliquant le reste des explosions stellaires et les fusions d'objets compacts. Toutefois, seulement la moitié du nombre total de noyaux qui devraient exister entre la ligne de fuite des neutrons et celle des protons a été découverte, soit environ 3 450 noyaux. Il reste beaucoup à faire pour expliquer précisément les différents processus de nucléosynthèse qui entrent en jeu.

Pour comprendre la nucléosynthèse, il faut combiner les observations et les simulations astrophysiques, les données de la physique nucléaire et les prévisions de la théorie nucléaire. Plus précisément, du point de vue de la physique nucléaire, l'étude des réactions astrophysiques d'intérêt et la connaissance des propriétés des noyaux impliqués nécessitent des faisceaux d'ions radioactifs arrêtés et accélérés tels que ceux produits par l'installation ISAC et ARIEL à TRIUMF. Les mesures de physique nucléaire peuvent également contribuer à élucider la physique des étoiles à neutrons, les objets les plus petits et les plus denses de l'univers, et les explosions de supernovæ, notamment grâce à des mesures précises de l'épaisseur

de la peau des neutrons dans les noyaux riches en neutrons, qui permettent de contraindre l’équation d’état de la matière nucléaire riche en neutrons.

Ce domaine est de plus en forte synergie avec l’astronomie multimessager, comme en témoignent les remarquables observations simultanées de la fusion binaire d’étoiles à neutrons GW170817 à plusieurs longueurs d’onde électromagnétiques, déclenchées par l’interférométrie des ondes gravitationnelles.

■ Contributions et réalisations canadiennes

Les efforts de recherche de la communauté canadienne de physique nucléaire couvrent tous les processus de la nucléosynthèse, ainsi que les phénomènes astrophysiques associés. Les installations ISAC et ARIEL de TRIUMF au Canada offrent d’immenses possibilités pour de telles études, et les Canadiens dirigent un grand nombre de ces projets. Les Canadiens participent également à des projets choisis dans des installations extraterritoriales utilisant une technologie complémentaire. Certains faits saillants de la recherche depuis le dernier PLT sont résumés ci-dessous :

- La mesure directe des réactions de capture de protons à des énergies astrophysiques est possible en utilisant les spectromètres de recul DRAGON et EMMA à TRIUMF. Grâce à cette infrastructure, les Canadiens ont récemment mesuré la valeur de la réaction $^{38}\text{K}(p,\gamma)^{39}\text{Ca}$, réduisant considérablement les incertitudes

dans la connaissance du mécanisme impliqué dans la synthèse de Ar, K et Ca. Les Canadiens ont en outre exploité les capacités conjointes des détecteurs EMMA et TIGRESS à TRIUMF pour effectuer la première mesure de la réaction $^{83}\text{Rb}(p,\gamma)^{84}\text{Sr}$, une donnée importante dans le processus p pour contraindre la réaction inverse.

- Les Canadiens ont contribué à plusieurs études de pointe sur les propriétés nucléaires pertinentes des processus de nucléosynthèse. Par exemple, les Canadiens ont effectué des mesures précises de la masse des isotopes de Ga et d’In riches en neutrons pour la nucléosynthèse du processus r à l’aide du piège de Penning TITAN. Ils ont également contribué à la mesure précise de la demi-vie du ^{130}Cd avec le spectromètre GRIFFIN à TRIUMF, ce qui a permis de résoudre les divergences entre les mesures précédentes pour ce noyau crucial du processus r . Les Canadiens ont de plus participé au projet BRIKEN au RIBF, au Japon, en mesurant les demi-vies et les rapports de ramification des neutrons pour les noyaux riches en neutrons les plus exotiques sur une large gamme de masses. Ils ont de la sorte dirigé la mise au point d’une base de données de référence sur les émetteurs de neutrons à retardement bêta à l’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA).

- Les chercheurs canadiens ont élaboré des programmes pour mesurer indirectement le taux de capture des neutrons dans la synthèse des éléments lourds en utilisant l’infrastructure de TRIUMF, Michigan State University et Argonne National Lab.

● Les chercheurs canadiens ont mené des efforts continus pour mesurer l'épaisseur de la peau des neutrons dans ^{48}Ca par diffusion d'électrons violant la parité en utilisant l'expérience CREX.

● Les Canadiens ont continué à maintenir une position de leader mondial dans la prédiction des propriétés de la structure nucléaire qui sont

nécessaires à l'astrophysique nucléaire. Par exemple, les Canadiens ont atteint un niveau de précision impressionnant dans le calcul des taux de capture directe du $^8\text{Li}(n,\gamma)^9\text{Li}$ en utilisant la théorie *ab initio* de la réaction. Les Canadiens ont également poursuivi des simulations astrophysiques de fusions binaires.

Impact et synergies avec d'autres domaines

L'OBJECTIF PRIMORDIAL DE la physique subatomique, qui est de repousser les limites de nos connaissances sur la composition de l'univers, et le développement connexe d'outils de recherche spécialisés, créent naturellement des liens étroits avec de nombreux autres domaines de recherche.

Des possibilités et des synergies uniques existent à la frontière entre la recherche en physique subatomique et d'autres domaines, tant sur le plan scientifique que technologique. D'un point de vue scientifique, les découvertes dans les domaines de l'astrophysique et de la cosmologie fournissent des informations complémentaires pour aborder plusieurs des moteurs scientifiques de la physique subatomique, et à son tour, l'avancement des connaissances en physique subatomique a un impact direct sur les modèles des phénomènes cosmologiques et astrophysiques. Par exemple, l'approche multimessager qui se développe rapidement pour

étudier les objets astrophysiques se situe précisément à la frontière entre les domaines de la physique subatomique et de l'astrophysique. D'un point de vue technologique, les techniques et les instruments mis au point pour la recherche en physique subatomique ont été, et continuent d'être, adaptés pour leur utilisation dans un large éventail d'autres domaines, ouvrant la voie à des travaux innovants et révolutionnaires. Ces domaines comprennent notamment la biologie, la science des données, le génie électrique, la science des matériaux, l'imagerie médicale et la santé publique. Parmi les exemples spécifiques de ces synergies, citons les techniques de détection de particules utilisées en imagerie médicale, la spectrométrie de masse par accélérateur employée dans la recherche biomédicale et en archéologie pour la datation au radiocarbone, l'imagerie nucléaire appliquée des plantes et du sol et la tomographie à muons utilisée dans plusieurs



FIGURE 2. Représentation schématique des huit moteurs scientifiques pour le domaine de la recherche en physique subatomique et exemples de synergies avec d'autres domaines de recherche.

domaines tels que la géologie, la sécurité et la protection de l'environnement. De leur côté, les développements dans le domaine de la détection quantique et des techniques de physique atomique, moléculaire et optique offrent des possibilités nouvelles, voire révolutionnaires, de répondre aux enjeux scientifiques de la physique subatomique. Les développements de la technologie des accélérateurs pour la physique subatomique ont également des applications dans les accélérateurs pour la science des matériaux,

le diagnostic et le traitement médical ainsi que les applications industrielles telles que la sécurité, l'environnement et le stockage des aliments.

En résumé, il existe de précieuses occasions scientifiques dans la collaboration interdisciplinaire aux frontières entre différents domaines, et la recherche en physique subatomique est particulièrement bien placée pour contribuer aux initiatives dans les régions de chevauchement avec d'autres domaines et en bénéficier (voir [FIGURE 2](#)).



Je suis actuellement doctorante aux Pays-Bas et j'utilise un supercalculateur pour simuler la couche limite atmosphérique et les parcs éoliens à grande échelle. Cependant, mes premiers projets de recherche étaient en physique subatomique, avec des bourses d'été CRSNG/IPP/CERN. Bien que la physique que je fais maintenant soit plus appliquée, je ne serais pas ici sans la fondation que j'ai reçue au campus Grenfell de l'Université Memorial de Terre-Neuve. Les professeurs avaient toujours une porte ouverte, mettaient du temps et voulaient sincèrement que nous réussissions. Non seulement j'ai acquis des compétences en recherche et en informatique que j'utilise à ce jour, mais j'ai aussi appris que de grandes choses n'étaient pas hors de portée.

— JESSICA STRICKLAND (BSC MEMORIAL UNIVERSITY, GRENFELL),
PHD CANDIDATE AT UNIVERSITY OF TWENTE, NETHERLANDS

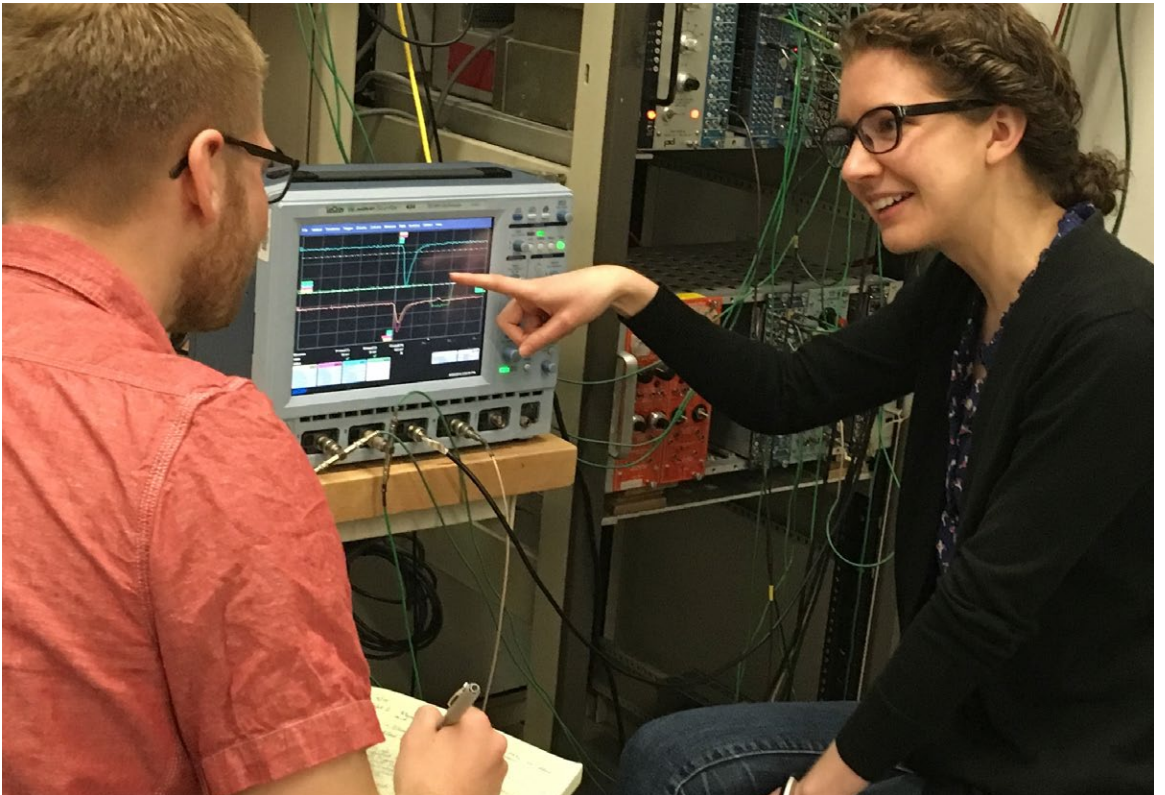
La collaboration SuperCDMS recherche des particules de matière noire dont la masse est inférieure à dix fois la masse du proton. La détection de ces particules révolutionnerait notre compréhension du monde subatomique et ouvrirait une fenêtre sur un ensemble totalement inconnu de nouvelles particules.

CETTE PAGE : Étudiante de premier cycle aidant à préparer un nouveau détecteur SuperCDMS pour un premier test dans des conditions de faible bruit de fond dans l'installation de test cryogénique souterraine (CUTE) de SNOLAB. [Crédit : SNOLAB]

PAGE SUIVANTE, EN HAUT : Une étudiante diplômée et un étudiant de premier cycle discutant d'aspects techniques de l'expérience SuperCDMS. [Crédit : SLAC]

PAGE SUIVANTE, EN BAS : Une tour d'ingénierie SuperCDMS sera installée au SNOLAB. [Crédit : SLAC]





SECTION 2 –
Plan de recherche
en physique
subatomique au
Canada

AVEC DES antécédents bien établis, des partenariats internationaux en cours et en développement, des installations de recherche locales de grande valeur comme TRIUMF, SNOLAB et l’Institut Périmètre, et un soutien récent important pour le développement d’infrastructures expérimentales, la communauté canadienne est prête à tirer parti d’un certain nombre de possibilités scientifiques au cours des cinq prochaines années et de la décennie suivante. La présente section décrit les nou-

velles possibilités scientifiques et les technologies habilitantes qui permettront d’effectuer des progrès. Le programme de recherche est ensuite présenté sous forme d’un portefeuille multidimensionnel de projets qui aideront la communauté canadienne à maximiser son impact scientifique, ses possibilités de formation et ses avantages pour la société. Le portefeuille existant et les occasions émergentes conduisent à une série de recommandations scientifiques.

Occasions scientifiques pour le Canada

LES CARACTÉRISTIQUES UNIQUES de l’écosystème canadien de recherche en physique subatomique placent la communauté en bonne position pour saisir les nouvelles occasions scientifiques, dans le but de maximiser l’impact scientifique, les possibilités de formation et les avantages pour la société. En particulier, le Canada dispose d’une infrastructure de recherche importante avec TRIUMF, SNOLAB et l’Institut Périmètre. En outre, il existe des organisations communautaires actives et des structures de financement souples pour soutenir les nouvelles initiatives scientifiques. Le Canada jouit également d’une excellente réputation en tant que partenaire international de confiance, et la communauté a la capacité de former du personnel hautement qualifié (PHQ) supplémentaire.

Plusieurs occasions scientifiques existent dans les années à venir et elles sont mises en évidence pour chacun des moteurs scientifiques dans les sections ci-dessous.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Higgs, la physique à l’échelle électrofaible et au-delà

Au cours de la prochaine décennie, nous aurons des occasions uniques d’explorer en profondeur le secteur du boson de Higgs, d’étudier la physique de la rupture de la symétrie électrofaible et de rechercher une nouvelle physique à la frontière de l’énergie, avec des perspectives importantes pour un large éventail de nouveaux résultats passionnants. Des recherches dédiées aux signatures de la physique non conventionnelle offriront

en outre un potentiel de découverte important. Il y aura plusieurs possibilités d'explorer indirectement de nouvelles régions de la physique multi-TeV par des mesures de processus physiques connus et rares à un niveau de précision inégalé, offrant des possibilités complémentaires d'observer des indices de la nouvelle physique. Il est également probable que d'ici la fin de la décennie, la situation concernant les anomalies persistantes dans le secteur de la physique B indiquant une possible violation de la saveur des leptons sera clarifiée.

Fort de son expertise et de ses investissements passés, le Canada est bien placé pour saisir d'autres occasions scientifiques grâce à sa participation et à son leadership, par exemple, dans les programmes de physique générale d'ATLAS et de Belle II, dans les recherches spécialisées en nouvelle physique de MATHUSLA et de MoEDAL, et dans les programmes de précision comme ceux de MOLLER et de NA62. Il existe de plus une communauté théorique canadienne active, qui s'emploie à interpréter les nouvelles données et à mettre en évidence les signatures potentielles de la nouvelle physique. Enfin, il est possible de faire progresser la R et D sur les détecteurs et les accélérateurs en synergie avec les contributions au HL-LHC, le développement de Chiral-Belle, le collisionneur linéaire international et le futur collisionneur circulaire.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Symétries fondamentales et asymétries observées

L'exploration des symétries fondamentales de la physique subatomique et leur violation continueront d'être à la pointe de la recherche de nouveaux phénomènes et principes physiques, offrant des sensibilités puissantes et complémentaires. Il est possible de sonder les symétries à un nouveau niveau de précision en exploitant une variété de techniques différentes.

Dans le paysage des possibilités, l'expertise canadienne combinée en matière de recherche atomique, nucléaire, de physique des particules et d'accélérateurs offre des occasions uniques pour le Canada de jouer un rôle scientifique de premier plan dans le monde. TRIUMF peut devenir un centre mondial de tests de la violation de la symétrie CP et T au moyen des recherches du moment dipolaire électrique (EDM), avec le début de l'exploitation pour le projet TUCAN dirigé par le Canada, l'expérience FrEDM, et le développement de l'installation RAMS utilisant des molécules de monofluorure de radium et d'argent francium. De nouveaux tests de violation de la parité peuvent être réalisés avec FrPNC, des études des désintégrations bêta avec ISAC et TRINAT à TRIUMF, et le lancement des opérations Nab à ORNL. Avec le développement de MOLLER, de Belle II et l'éventuelle mise à niveau de Chiral-Belle, les Canadiens sont également bien placés pour jouer un rôle important dans les futures mesures de la structure de la symétrie électrofaible et de la valeur de l'angle de Weinberg en fonction de

l'énergie. Des tests spectroscopiques d'anti-hydrogène avec une précision nettement améliorée seront réalisables avec ALPHA-3 et ALPHA-g, et le déploiement de HAICU dirigé par le Canada. Les tests d'universalité de la saveur des leptons seront prolongés avec NA62 au CERN, et le développement potentiel de PIONEER. Les mesures des propriétés des neutrinos et de la symétrie CP se poursuivront avec des expériences de neutrino à grande distance telles que T2K et passeront à la prochaine génération de précision avec les opérations Hyper-K et DUNE. Les essais de violation du nombre de leptons par double désintégration bêta sans émission de neutrinos peuvent être explorés plus avant avec des expériences de nouvelle génération telles que nEXO, LEGEND ou d'autres détecteurs complétant le programme SNO+ existant au SNOLAB.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Propriétés des neutrinos

Les dix prochaines années s'annoncent passionnantes pour la physique des neutrinos. À leur terme, il est probable que la hiérarchie des masses soit déterminée et que la recherche de la violation de la symétrie CP soit bien engagée, ce qui pourrait aboutir à des résultats concluants. En même temps, les recherches sur la $0\nu\beta\beta$ auront continué à progresser, et probablement atteint une sensibilité permettant de couvrir l'espace de paramètres de la hiérarchie inversée. Les mesures des neutrinos astrophysiques auront continué à nous informer sur les processus à hautes énergies du cosmos, et les neutrinos

auront encore éclairé notre compréhension du fonctionnement du Soleil et de l'intérieur de la Terre. La recherche sur la physique des neutrinos continue de progresser avec dynamisme et de nouvelles découvertes révolutionnaires sont tout à fait possibles.

Le Canada est bien placé pour jouer un rôle de premier plan dans toutes ces réalisations scientifiques, avec le développement de Hyper-K et de DUNE, l'évolution d'IceCube et le développement potentiel de P-ONE, ainsi que la primauté du SNOLAB comme lieu privilégié pour les expériences à l'échelle de la tonne telles que nEXO et LEGEND.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Matière noire et secteurs sombres potentiels

Des percées importantes dans notre compréhension de la nature de la matière noire sont potentiellement à portée de main au cours de la prochaine décennie. Les expériences conçues pour détecter directement la présence de matière noire dans notre halo galactique sont susceptibles d'augmenter considérablement leur sensibilité grâce au perfectionnement continu des techniques expérimentales. À mesure que la sensibilité expérimentale se rapproche de l'important bruit de fond des neutrinos solaires et atmosphériques (le « plancher de neutrinos »), les nouvelles orientations possibles comprennent la mise au point d'expériences capables d'explorer diverses échelles de masse, la diffusion de matière noire par des électrons atomiques et la capacité directionnelle dans la reconstruction des interactions de la matière

noire. Au cours des dix prochaines années, plusieurs projets basés sur des accélérateurs et visant à produire de la matière noire et des particules liées à un éventuel secteur sombre devraient également avoir acquis des données significatives permettant d'autres tests directs de ce paradigme. La recherche de la matière noire par l'observation de ses signatures d'annihilation sera poursuivie grâce à plusieurs observatoires de sensibilité croissante. La communauté canadienne qui travaille sur la théorie des astroparticules est de plus bien placée pour jouer un rôle synergique dans cet effort.

Le Canada est promis à un brillant avenir dans la recherche de la matière noire et il est en excellente position pour saisir ces occasions scientifiques. L'infrastructure de l'expérience canadienne d'essai cryogénique souterrain (CUTE) au SNOLAB permettra une exploitation précoce des cristaux du SuperCDMS pour les résultats de physique. D'ici la fin de la décennie, l'expérience SuperCDMS au SNOLAB aura exploré une large bande de l'espace des paramètres pour les WIMP de faible masse et se rapprochera de la sensibilité au bruit de fond des neutrinos solaires et atmosphériques. La collaboration DEAP a rejoint la Global Argon Dark Matter Collaboration dans le but de faire fonctionner DarkSide-20k au laboratoire souterrain du Gran Sasso (LNGS) en Italie, puis un détecteur ARGO de plusieurs centaines de tonnes, le SNOLAB étant l'emplacement privilégié. L'expérience PICO devrait continuer à améliorer sa sensibilité de pointe dans le secteur des WIMP dépendant du spin, tandis que la nouvelle expérience SBC adapt-

era cette nouvelle technologie passionnante de chambre à bulles scintillantes à la recherche de WIMP de faible masse. L'expérience NEWS-G est également prête à apporter des contributions intéressantes au régime de masses faibles et explorera la sensibilité directionnelle en utilisant une nouvelle anode centrale composite dans son détecteur. Des recherches sur le secteur sombre basées sur des accélérateurs de haute précision seront effectuées à ATLAS, Belle II, NA62, MoEDAL et MOLLER. L'expérience DarkLight prépare en outre un rapport de conception technique pour l'utilisation du faisceau d'électrons intense d'ARIEL sur une cible mince à TRIUMF afin d'explorer les secteurs sombres. Les Canadiens participeront aussi à la mise en service et à l'exploitation d'un démonstrateur pour le futur projet MATHUSLA. Les recherches indirectes de l'annihilation de la matière noire se poursuivront à IceCube.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Nouveaux principes et nouvelles structures physiques

Les théoriciens canadiens qui cherchent à mieux comprendre les fondements de la physique subatomique ont acquis une stature mondiale dans toute une série de sous-domaines de recherche. Cela offre des possibilités de progrès dans plusieurs thématiques d'actualité. Les théoriciens canadiens se penchent sur des questions fondamentales concernant la structure sous-jacente de la théorie quantique des champs, notamment l'amélioration des méthodes de calcul des amplitudes de diffusion, les structures

géométriques qui les sous-tendent et les contraintes de cohérence des théories quantiques des champs autorisées dans le régime de couplage fort. Le rôle de la théorie de l'information quantique dans les théories quantiques des champs est un autre domaine croissant de l'activité théorique au Canada; par le biais de la correspondance AdS/CFT. Ce travail permet de comprendre le paradoxe de l'information des trous noirs, le rayonnement de Hawking et, plus généralement, la gravité quantique. L'holographie (la correspondance AdS/CFT et ses extensions) continue également de présenter des occasions pour faire progresser notre compréhension des théories de jauge fortement couplées, avec des progrès continus dans la modélisation de la physique nucléaire, comme le plasma quark-gluon, et l'hydrodynamique. D'autres possibilités de recherche dans le cadre de la théorie des cordes visent à expliquer diverses caractéristiques du modèle standard, ainsi que des propriétés du vide, telles que la constante cosmologique ou l'énergie sombre. Cela ouvre aussi d'autres voies d'avancement, car les développements théoriques de la théorie quantique des champs peuvent apporter de nouvelles idées concernant les époques très anciennes de l'histoire de l'univers et ses conditions initiales. Les observations cosmologiques promettent à leur tour de fournir davantage d'informations sur la nature à haute énergie de la physique subatomique, notamment sur les propriétés de la matière noire. L'universalité des outils théoriques formels utilisés en physique subatomique offre également des possibilités de connexions avec d'autres

domaines, notamment l'astrophysique, la physique de la matière condensée et l'informatique quantique.

Les efforts de théorie formelle sont principalement motivés par l'objectif de déterminer les structures sous-jacentes qui peuvent systématiser et étendre notre compréhension théorique de la physique fondamentale. Toutefois, à long terme, la recherche formelle continuera à alimenter les domaines plus phénoménologiques de la physique subatomique afin d'éclairer notre compréhension de nombreux autres moteurs scientifiques, comme cela a été le cas par le passé. Les théoriciens canadiens sont bien placés pour faire progresser la théorie formelle sur un certain nombre de sujets, offrant ainsi de nouvelles orientations pour la recherche subatomique phénoménologique et expérimentale à long terme.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Propriétés et phases des hadrons

Au cours de la prochaine décennie, de nouvelles capacités expérimentales et des avancées sur toute une série de sujets théoriques permettront de faire la lumière sur la structure des nucléons et les propriétés des hadrons.

Des détecteurs améliorés pour GlueX au JLab et au MAMI permettront d'étendre la portée en termes de précision et de cibles nucléaires disponibles. La proposition du JLab Eta Factory (JEF) implique une mise à niveau significative de l'instrumentation de base de GlueX afin d'améliorer la résolution en énergie et en position et permettre une

précision sans précédent dans les recherches de mésons hybrides exotiques. Le détecteur solénoïdal de grande intensité (SoLID) du JLab étudiera les distributions généralisées de partons, qui peuvent fournir une image tomographique en 3D des nucléons. Les mesures de la polarisation de spin des neutrons seront possibles grâce à une combinaison de mesures sur He et He au MAMI, avec le développement d'une cible active d'hélium à haute pression.

En ce qui concerne l'avenir, le futur collisionneur électron-ion (EIC, Electron-Ion Collider) sera le seul collisionneur nord-américain à être construit dans un avenir prévisible et il se trouve aux portes du Canada. Les nouvelles possibilités offertes par l'EIC permettront de parvenir à une compréhension transformatrice du système dynamique des quarks et des gluons. Il existe une synergie importante entre l'EIC et le programme Jlab 12 GeV, avec un ensemble riche et diversifié d'expériences capables d'étudier précisément la chromodynamique quantique, de la nature du problème des corps multiples à température finie, à la cartographie de la transition des degrés de liberté hadroniques jusqu'aux degrés de liberté partoniques. Des chercheurs canadiens participent à tous ces projets, depuis les activités théoriques de pointe jusqu'au développement de technologies habilitantes pour l'EIC, comme les cavités en crabe. Ils feront très certainement des découvertes importantes sur la structure des hadrons.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Structure nucléaire

Une compréhension prédictive des noyaux et de leurs interactions nécessite une grande variété d'expériences et d'outils théoriques complémentaires. Au cours des dix prochaines années, on verra le début de l'exploitation d'infrastructures de nouvelle génération pour une étude systématique des propriétés et des modèles nucléaires, ouvrant potentiellement une fenêtre sur des phénomènes nouveaux et inattendus.

Au Canada, la mise en service de l'installation ARIEL et du projet CANREB à TRIUMF permettra de tripler le temps de faisceau et d'étendre les capacités physiques et la portée de la recherche sur la structure nucléaire. Les scientifiques canadiens continueront également à jouer un rôle décisif au niveau mondial en contribuant au développement d'instruments uniques et de programmes de physique de pointe à RIBF (Japon), FAIR (Allemagne) et FRIB (États-Unis).

L'élaboration de nouvelles théories ab initio, tant pour la structure nucléaire que pour les interactions, fait aussi partie intégrante de ce programme. La synergie entre l'expérience et la théorie pour concevoir des expériences plus sensibles et le retour d'information sur le cadre théorique seront essentiels pour tracer la voie vers l'objectif primordial du domaine : un modèle standard prédictif des noyaux.

MOTEUR SCIENTIFIQUE – Formation cosmique des noyaux

La prochaine décennie offrira de nouvelles occasions scientifiques pour l'étude de la synthèse des éléments lourds en raison de l'augmentation significative des infrastructures de faisceaux radioactifs dans le monde, combinée aux observations multimessagers des fusions d'étoiles à neutrons. Par exemple, il sera possible d'étudier directement les réactions clés et les noyaux à courte durée de vie nécessaires pour comprendre les voies de réaction des événements astrophysiques explosifs.

Le Canada est particulièrement bien placé pour assumer un rôle de premier plan dans ces enquêtes avec le début de l'exploitation des installations ARIEL et CANREB à TRIUMF. Diverses extensions et mises à niveau des capacités expérimentales existantes sont prévues dans l'optique d'exploiter pleinement la future capacité de faisceaux de TRIUMF. Par exemple, un réseau LaBr_3 est prévu pour multiplier par dix la sensibilité du marquage gamma de DRAGON. Une chambre de projection temporelle de cible active (EXACT-TPC) est également prévue pour offrir de nouvelles orientations dans les mesures de sections des réactions, notamment avec ${}^3\text{He}$.

Les infrastructures à l'étranger offriront de plus de nouvelles possibilités scientifiques. Par exemple, des intensités plus élevées de noyaux rares étendront la portée de l'étude des désintégrations exotiques avec, par exemple, des ions fortement chargés dans les anneaux de stockage ou des émetteurs de neutrons multiples à retardement bêta

au GSI/FAIR. La mesure de l'épaisseur de la peau neutronique des noyaux riches en neutrons, qui permet d'explorer l'équation d'état de la matière nucléaire asymétrique, est en outre prévue au GSI/FAIR et au FRIB.

Les développements futurs de la théorie ab initio promettent d'étendre la portée aux noyaux de masse élevée en utilisant la puissance de calcul à l'échelle exaflopique et le perfectionnement de l'informatique quantique et des capacités algorithmiques. Plusieurs nouvelles avancées sont prévues dans la modélisation des fusions d'objets compacts, notamment des simulations de dynamique moléculaire.

À plus long terme, il est envisagé d'installer un anneau de stockage avec un générateur de neutrons à TRIUMF. Ce projet d'infrastructure pourrait fournir une capacité unique pour mesurer directement les sections efficaces de capture des neutrons des isotopes rares.

Occasions découlant des synergies avec d'autres domaines

Au cours de la prochaine décennie, les connaissances acquises dans d'autres domaines de recherche pourraient également contribuer à faire progresser notre compréhension des moteurs scientifiques de la physique subatomique. Voici quelques exemples :

- Des avancées en astronomie et en astrophysique; par exemple, les signatures potentielles des ondes gravitationnelles de la cosmologie des particules précoces, les signatures potentielles de la matière



FIGURE 3. Représentation schématisée des huit moteurs scientifiques pour le domaine de la recherche en physique subatomique et des infrastructures habilitantes.

noire dans un certain nombre de futurs observatoires terrestres et spatiaux, les développements dans la simulation de la structure et de la formation des galaxies et les observations multimessagers des fusions d'objets compacts qui pourraient fournir des connaissances sur l'équation d'état de la matière à haute densité.

- ▶ La prochaine génération d'expériences de mesure du fond diffus cosmologique permettra d'accroître considérablement la précision des contraintes imposées à la nature des neutrinos, de la matière noire et des secteurs sombres.
- ▶ Le perfectionnement de la technologie de détection et de l'informatique quantique, ainsi que les aspects théoriques de la matière condensée quantique, se produit rapidement et est susceptible d'ouvrir de nouvelles possibilités d'exploration des moteurs scientifiques de la physique subatomique; certains exemples sont présentés ci-dessous.

De même, il est possible que les résultats des futures recherches en physique subatomique

aient un impact sur d'autres domaines de recherche connexes :

- ▶ Une mesure expérimentale de l'échelle de masse absolue des neutrinos pourrait avoir des implications directes en cosmologie.
- ▶ Des mesures précises des nouvelles propriétés et des taux nucléaires permettront de mieux comprendre et de modéliser les processus de l'astrophysique stellaire.
- ▶ Les progrès réalisés dans la technologie des accélérateurs et des détecteurs sont susceptibles d'ouvrir de nouvelles possibilités de recherche dans d'autres domaines, notamment pour ce qui suit :
 - nouveaux diagnostics et traitements en physique médicale;
 - applications soutenant les technologies vertes;
 - systèmes spatiaux conçus pour l'exploration de l'espace lointain;
 - instruments d'imagerie et de tomographie pour la science des matériaux.

Infrastructures et technologies habilitantes

LES PROGRÈS RÉALISÉS pour chacun des moteurs scientifiques dépendent de nombreux facteurs, mais une série d'infrastructures et de technologies habilitantes sont essentielles

pour les avancées expérimentales et théoriques. Elles sont décrites ci-dessous, ainsi que leur application pour chaque moteur scientifique.

Infrastructures spécialisées

La recherche en physique subatomique est rendue possible par la mise au point et la disponibilité d'infrastructures uniques, comme l'illustre la **FIGURE 3**.

Accélérateurs de particules

L'infrastructure des accélérateurs de particules reste une force motrice dans le développement de la physique expérimentale des particules et de la physique nucléaire, et constitue une infrastructure habilitante pour presque tous les moteurs scientifiques. À son tour, le domaine de la physique des accélérateurs est en synergie avec la physique subatomique. Il est motivé par de nombreux objectifs scientifiques, mais avec des applications plus larges. L'infrastructure des accélérateurs avec un accès et une participation importants du Canada comprend : TRIUMF au Canada, le LHC au CERN, J-PARC et KEK au Japon, Fermilab, JLab, RHIC et le futur EIC aux États-Unis, et le MAMI en Allemagne. Les développements nécessaires pour ce type d'infrastructure à l'appui de la recherche en physique subatomique comprennent :

- ▶ La R et D sur les accélérateurs, axée sur la technologie de la radiofréquence supraconductrice (SRF).
- ▶ Le développement de faisceaux à haute luminosité (neutrinos, électrons, neutrons, kaons, pions, ions ou antimatière) pour des mesures de précision.
- ▶ Le développement de faisceaux polarisés de différentes espèces.

- ▶ Les progrès réalisés dans la compréhension de la physique des faisceaux permettent un contrôle de précision pour un fonctionnement à plus haute intensité ou efficacité.

La poursuite des progrès dans la technologie des accélérateurs implique également l'étude de nouvelles techniques d'accélération, telles que l'accélération du faisceau dans les plasmas.

Isotopes rares

Les faisceaux d'isotopes rares permettent d'étudier la structure nucléaire, y compris les processus astrophysiques à l'origine des éléments. TRIUMF est une installation de classe mondiale qui fournit des faisceaux d'isotopes uniques à faible énergie et à des énergies proches de la barrière de Coulomb, avec un ensemble complet de détecteurs pour l'analyse. L'achèvement d'ARIEL augmentera considérablement la capacité de TRIUMF à délivrer des faisceaux d'isotopes.

Situées à l'étranger, les installations suivantes d'isotopes rares avec des faisceaux relativistes offrent des capacités complémentaires : Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) aux États-Unis, Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) en Allemagne et RI Beam Factory (RIBF) à RIKEN, au Japon.

Les domaines importants dans lesquels le développement de ces infrastructures est nécessaire comprennent le ciblage des faisceaux, le transport des faisceaux et les capacités de détection.

Faibles bruits de fond

Les mesures de processus rares et celles qui exigent une grande précision dépendent de manière critique des installations à faible bruit de fond. Ces infrastructures sont essentielles pour les progrès expérimentaux dans la recherche de la matière noire et des propriétés des neutrinos, ainsi que pour les tests de haute précision des symétries fondamentales. Les installations qui ont bénéficié d'un accès et d'une participation importants de la part des Canadiens sont les suivantes : SNOLAB au Canada, Gran Sasso en Italie et WIPP aux États-Unis. Les avancées spécifiques pour ce type d'infrastructures nécessaires au soutien de la physique subatomique comprennent ce qui suit :

- ▶ Le développement et la production de matériaux ultra-propres.
- ▶ Le développement de techniques améliorées de dosage des matériaux.
- ▶ Des champs électromagnétiques, des propriétés et une dynamique de faisceaux contrôlés et surveillés avec précision, ainsi qu'une polarisation des faisceaux élevée et mesurée avec précision.
- ▶ Détecteurs spécialisés de haute précision.

Outils habilitants et technologies émergentes

Les progrès réalisés dans le domaine de l'instrumentation, de l'analyse des données, de la théorie et de la puissance de calcul favorisent des révolutions axées sur les outils qui

peuvent ouvrir la voie à de nouvelles découvertes. Il est donc important de maintenir et de renforcer davantage un environnement de recherche et de développement qui stimule et soutienne l'innovation dans ces domaines.

R et D concernant les détecteurs

La R et D concernant les détecteurs est essentielle pour les nouvelles découvertes. Il est donc important que la communauté soutienne et promeuve un portefeuille diversifié d'activités de R et D générique et de R et D axée sur la résolution des défis technologiques connus de la prochaine génération d'expériences. La mise au point d'instruments pour la physique subatomique est à la fois un moteur et un bénéficiaire des progrès réalisés dans d'autres domaines de la physique subatomique et dans d'autres domaines scientifiques et industriels. L'innovation technologique émerge souvent de ces synergies. Parmi les exemples de développements de détecteurs, citons :

- ▶ Des dispositifs semi-conducteurs résistants aux rayonnements pour le suivi des détecteurs dans les futures expériences de collision.
- ▶ Des photodétecteurs performants et nouveaux.
- ▶ Des technologies de détection du recul nucléaire et électronique à faible seuil, y compris des capteurs quantiques.
- ▶ La capacité de mesurer des caractéristiques combinées telles que celles associées au développement du suivi 4D et de l'imagerie 5D.

Infrastructure de recherche numérique

La recherche en physique subatomique nécessite l'accès à une infrastructure de recherche numérique de pointe dotée de capacités de calcul importantes, de stockage à l'échelle du pétaoctet et d'une connectivité réseau à haut débit entre les différents sites de calcul et centres de recherche du monde entier, afin de gérer de grands ensembles de données partagées. Dans les années à venir, cette infrastructure de recherche numérique sera fournie et gérée au Canada par CANARIE et la Nouvelle organisation d'infrastructure de recherche numérique (NDRIO) en cours de création. Comme le souligne la politique de gestion des données de recherche des trois organismes fédéraux de financement de la recherche, « la gestion des données de recherche (GDR) est un élément nécessaire à l'excellence de la recherche ». Dans ce contexte, il est important de noter que les besoins en physique subatomique ne se limitent pas au stockage général des données issues des expériences, mais comprennent également le stockage d'archives à long terme (préservation des données).

Analyse, théorie et informatique

Les outils d'analyse d'ensembles de données toujours plus complexes et l'élaboration du cadre théorique permettant de comprendre les lois fondamentales de la physique sub-

atomique doivent évoluer de concert avec les techniques expérimentales. La physique subatomique a favorisé le développement de nombreuses technologies d'analyse, notamment la simulation de Monte Carlo pour la modélisation des signaux et du bruit de fond, et l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique pour l'analyse des données. En parallèle, l'évolution de la modélisation phénoménologique, des technologies de calcul et de notre compréhension théorique laisse entrevoir de nouvelles connexions et synergies. Les développements spécifiques comprennent :

- ▶ Des méthodologies d'apprentissage automatique en matière de déclenchement, de simulation et d'analyse des données.
- ▶ L'informatique quantique et les algorithmes quantiques pour la reconstruction, la simulation et l'analyse des données des grandes expériences de physique des particules.
- ▶ De nouvelles techniques de calcul d'amplitude, qui ont permis une analyse d'ordre supérieur du bruit de fond du modèle standard dans les collisionneurs.
- ▶ De nouvelles connexions théoriques et synergies avec d'autres domaines, par exemple l'utilisation d'outils d'information quantique dans l'analyse de la physique des trous noirs.

Portefeuille de recherche

Les objectifs primordiaux suivants ont été définis pour le plan de recherche en physique subatomique afin de maximiser l'impact du programme canadien de physique subatomique, en tenant compte de toutes les possibilités décrites ci-dessus :

- ▶ Concentrer les efforts sur les problèmes de recherche les plus pertinents.
- ▶ Exploiter pleinement les installations uniques, les avantages concurrentiels et les investissements passés du Canada.
- ▶ Participer à des projets de recherche internationaux de premier plan et respecter les engagements.
- ▶ Maintenir la capacité et la flexibilité pour explorer et développer de nouvelles occasions scientifiques.
- ▶ Engager pleinement le PHQ dans tous les aspects de la recherche scientifique afin de maximiser les résultats de la formation.

Le Comité de planification à long terme estime qu'il est utile pour la communauté de présenter le plan de recherche sous la forme d'un portefeuille de projets de recherche, où un équilibre optimal entre les différentes dimensions maximiserait la probabilité d'un impact scientifique selon les objectifs ci-dessus tout en minimisant les risques. Les axes

(ou dimensions) du portefeuille sont les suivants :

- ▶ Spécialisation scientifique canadienne par rapport à l'étendue.
- ▶ Cycle de vie des projets expérimentaux (R et D et construction ou exploitation et résultats scientifiques).
- ▶ Résultat scientifique garanti ou risque élevé/récompense élevée.
- ▶ Calendrier du projet.
- ▶ Approche théorique vs expérimentale.

Le portefeuille conserve un équilibre optimal entre ces dimensions, tout en présentant une vision des futures priorités scientifiques de la physique subatomique tirée de la communauté ainsi que les moyens les plus efficaces d'y répondre. Il ouvre également de nouvelles possibilités scientifiques, des interconnexions entre les sous-domaines de recherche et le besoin de ressources dans les délais plus longs qui sont désormais courants pour les projets de physique subatomique à grande échelle.

Une représentation schématique du portefeuille actuel de la recherche en physique subatomique, en relation avec les moteurs scientifiques, est présentée dans la **FIGURE 4**.

DES QUARKS ET DES GLUONS AUX NOYAUX



- MOTEURS SCIENTIFIQUES :
- Structure nucléaire
 - Noyaux cosmiques
 - Hadrons
 - Matière/secteurs sombres
 - Neutrinos
 - Higgs et au-delà
 - Symétrie
 - Nouveaux principes

Théorie

THÉORIE



Installations d'isotopes rares

TRIUMF: ISAC experiments

TRIUMF: ARIEL photo-fission

TRIUMF: ARIEL 2nd proton beamline

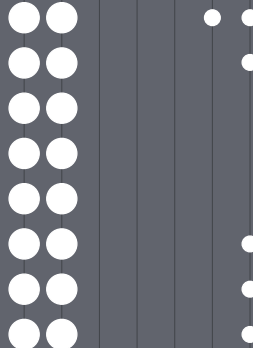
TRIUMF: CANREB

RIBF

GSI: FAIR Phase-0

GSI: FAIR

FRIB



Accélérateur de particules

CREX

GlueX

SoLID

JEF



Collisionneur electron-ion

EIC



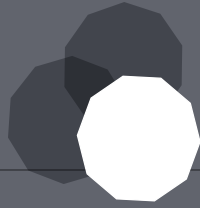
2020 2025 2030 2035

FIGURE 4. Une représentation schématique du portefeuille canadien de recherche en physique subatomique, avec les projets actuels et approuvés indiqués en couleurs pleines, et les projets futurs potentiels avec des échéanciers concrets au moment de la rédaction indiqués en couleurs hachurées.

LÉGENDE

- Phase R&D
- Construction
- Operation
- Poursuite de l'exploitation
- Projets proposés

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS FAIBLEMENT COUPLÉ



MOTEURS SCIENTIFIQUES :

- Structure nucléaire
- Noyaux cosmiques
- Hadrons
- Matière/secteurs sombres
- Neutrinos
- Higgs et au-delà
- Symétrie
- Nouveaux principes

Théorie

THÉORIE

Détection directe de la matière sombre

SNOLAB: DEAP

SNOLAB: SuperCDMS

SNOLAB: PICO-500

SNOLAB: NEWS-G

SNOLAB: SBC

DS20k

ARGO

Accélérateur de particules

TRIUMF: DarkLight

TRIUMF/LLNL: BeEST

Double désintégration bêta sans émission de neutrinos

SNOLAB: SNO+

SNOLAB: nEXO

SNOLAB: LEGEND

Observatoires de neutrinos

IceCube

SNOLAB: HALO

HALO-1kT

P-ONE

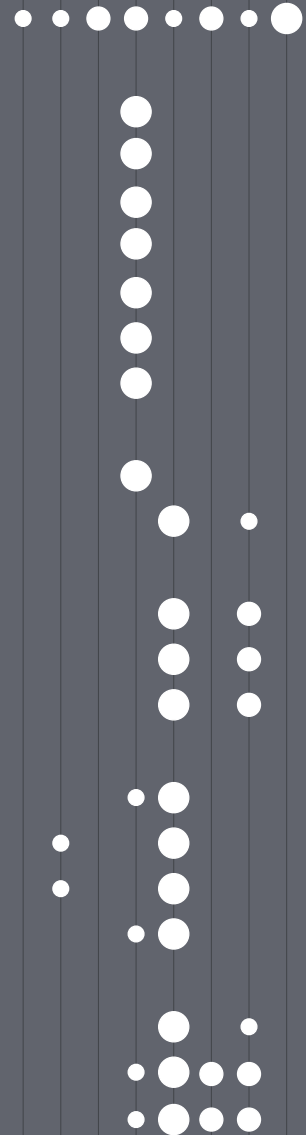
Neutrinos sur longue distance

T2K

Hyper-K

DUNE

2020 2025 2030 2035



LÉGENDE

- Phase R&D
- Construction
- Operation
- Poursuite de l'exploitation
- Projets proposés

AU-DELÀ DE L'ÉCHELLE ÉLECTROFAIBLE



MOTEURS SCIENTIFIQUES :

Structure nucléaire

Noyaux cosmiques

Hadrons

Matière/secteurs sombres

Neutrinos

Higgs et au-delà

Symétrie

Nouveaux principes

Théorie

THÉORIE



Collisionneur proton-proton

ATLAS



ATLAS (HL-LHC)



Collisionneur electron-positon

Belle-II



Chiral Belle



ILC



FCC-ee

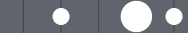


Accélérateur de particules

NA62



MoEDAL



MOLLER



MATHUSLA



PIONEER



Installations d'isotopes rares

TRIUMF: Francium experiments



TRIUMF: RAMS



Source de neutrons

TRIUMF: TUCAN



Nab



Source d'antimatière

ALPHA-3/g



HAICU



2020

2025

2030

2035

LÉGENDE

Phase R&D

Construction

Operation

Poursuite de l'exploitation

Projets proposés

Recommandations scientifiques :

LE COMITÉ DE planification à long terme a élaboré un certain nombre de recommandations scientifiques qui s'appuient sur les activités de recherche en cours, telles que présentées dans le portefeuille, et sur les nouvelles possibilités de recherche décrites ci-dessus. Ces recommandations sont décrites ci-dessous.

Le Canada a la chance de posséder plusieurs laboratoires et installations de recherche en physique subatomique de classe mondiale. Cela comprend notamment l'infrastructure expérimentale pour la physique nucléaire à TRIUMF et une des installations souterraines à faible bruit de fond les plus profondes pour la physique des neutrinos et

de la matière noire à SNOLAB. En outre, l'Institut Périmètre est l'un des centres les plus importants au monde, consacré à la physique théorique. Ces centres mènent des recherches et servent également de points de convergence pour stimuler la collaboration avec la communauté mondiale. Des investissements importants ont été réalisés au cours de la dernière décennie à TRIUMF, notamment pour le développement d'ARIEL et à SNOLAB pour la mise en ligne de nouveaux espaces expérimentaux. Il est de la plus haute priorité de tirer pleinement parti de ces investissements pour saisir les nouvelles occasions scientifiques associées.

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES 1 – INFRASTRUCTURES CANADIENNES

Nous recommandons de tirer pleinement parti des occasions scientifiques uniques offertes par les infrastructures SNOLAB et TRIUMF, ainsi que par l'Institut Périmètre, dans la poursuite des moteurs scientifiques.



La physique subatomique repose sur les avancées théoriques et expérimentales, car elle cherche à comprendre les lois fondamentales de la physique. Pour la santé de la communauté, il est essentiel que le travail théorique se poursuive selon deux voies :

l'une qui soit pleinement collaborative, avec des expériences sur le nucléaire et les particules, afin d'interpréter et de comprendre les données et d'indiquer de nouvelles possibilités; et l'autre qui explore de nouvelles structures théoriques et cherche à comprendre

les aspects de la nature qui échappent au modèle standard, comme la nature quantique de la gravité, les trous noirs et la cosmologie primitive. Historiquement, la communauté

théorique canadienne a connu beaucoup de succès dans ces deux directions et elle a besoin de soutien pour continuer à avoir un impact mondial.

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES

2 – PROGRAMMES THÉORIQUES

La masse critique et l'étendue des recherches sont essentielles pour que la communauté théorique au Canada puisse optimiser l'incidence de la recherche à venir en physique subatomique. Nous recommandons de soutenir activement la recherche théorique en physique subatomique au cours de la prochaine décennie, à la fois pour explorer de nouvelles directions purement théoriques, ainsi que pour soutenir l'interaction synergique entre la théorie et l'expérimentation subatomiques.



La communauté canadienne de la physique subatomique a réussi à établir sa réputation mondiale en identifiant soigneusement les projets expérimentaux qui répondent aux questions scientifiques de premier rang. Les possibilités du programme actuel et futur ont été

décrites ci-dessus, et la série actuelle de projets complète le portefeuille représenté schématiquement dans la **FIGURE 4**. Ces considérations conduisent aux recommandations suivantes pour le programme expérimental.

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES

3 – PROGRAMMES EXPÉRIMENTAUX

Il est nécessaire de mettre en œuvre un vaste programme expérimental pour répondre aux moteurs scientifiques de la recherche en physique subatomique. Nous recommandons la poursuite des orientations scientifiques hautement prioritaires suivantes.

- ▶ *Des quarks et des gluons aux noyaux – Le futur programme doit explorer la structure des hadrons et des noyaux en utilisant des isotopes rares et des installations basées sur des accélérateurs. Il doit inclure l'exploitation complète de TRIUMF, des installations de faisceaux d'électrons et de faisceaux d'isotopes rares (RIB) à l'étranger et un futur collisionneur électronion.*

continue sur la prochaine page →

- ▶ *La matière dans l'univers faiblement couplé* – Le futur programme doit intégrer la recherche de la matière noire en utilisant des techniques complémentaires directes et indirectes, y compris par la détection directe à l'échelle de plusieurs tonnes. Il doit inclure l'exploration plus poussée des propriétés des neutrinos par le biais d'expériences de double désintégration bêta sans émission de neutrinos, d'expériences à grande distance et d'observatoires de neutrinos.
- ▶ *Au-delà de l'échelle électrofaible* – Le futur programme doit étudier la matière et ses interactions à des échelles d'énergie de plus en plus élevées, y compris l'exploitation d'une future « usine à Higgs » et d'un collisionneur à la frontière des hautes énergies, ainsi que des techniques indirectes de haute précision.

Ce programme scientifique est actuellement mis en œuvre sous l'impulsion du leadership canadien dans un ensemble de projets phares identifiés en fonction de leurs retombées scientifiques potentielles, de l'expertise canadienne de base, du niveau d'engagement communautaire, des possibilités de formation scientifique et technologique de la prochaine génération et des investissements canadiens à ce jour :

	<i>Projets phares avec des résultats généraux en physique</i>	<i>Projets phares avec des résultats stratégiques en physique</i>
DES QUARKS ET DES GLUONS AUX NOYAUX	Expériences TRIUMF ARIEL-ISAC, EIC	Programme JLab 12 GeV, expériences RIB à l'étranger
LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS FAIBLEMENT COUPLÉ	T2K/HK, IceCube, SNO+	DEAP, PICO-500, SuperCDMS
AU-DELÀ DE L'ÉCHELLE ÉLECTROFAIBLE	ATLAS(LHC/HL-LHC), Belle II	ALPHA/HAICU, MOLLER, TUCAN

*Nous recommandons de soutenir ces projets, ainsi que les initiatives du programme scientifique ayant un fort potentiel d'impact, qui sont en cours de développement ou qui pourraient être développées dans les années à venir. Les projets potentiels, les activités de développement en cours et leurs échéances sont énumérés dans le portefeuille de recherche présenté à la **FIGURE 4**.*

En gardant à l'esprit les perspectives à plus long terme, jusqu'en 2036, il est important de souligner que le développement de projets dépend essentiellement de la capacité de la communauté à explorer, à développer et à évaluer l'utilité des nouvelles technologies d'une manière qui ne soit pas trop étroitement liée à leur application finale. La participation du Canada à de nouveaux projets nationaux et internationaux exige la capacité de mettre au point et d'utiliser de nouvelles technolo-

gies, et un engagement précoce maximise les possibilités de leadership, de développement de la propriété intellectuelle et de formation ultérieure. Cependant, cette R et D générique n'est pas entièrement soutenue dans l'écosystème actuel de financement par projet, et nous soulignons la nécessité d'un soutien supplémentaire pour cet aspect critique dont dépendent le développement et le progrès à long terme de la physique subatomique.

RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES

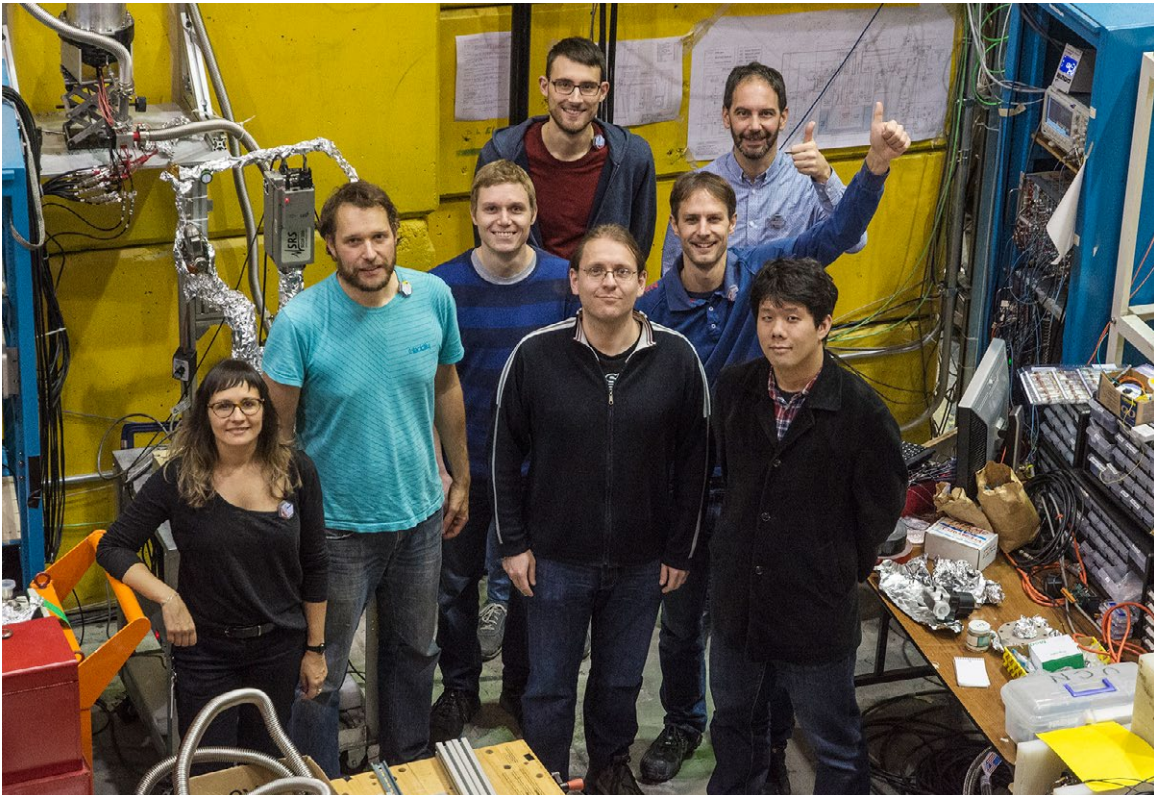
4 – ACTIVITÉS DE R ET D

Nous recommandons de soutenir les activités de R et D pour le développement des accélérateurs de particules et de la technologie des détecteurs, ainsi que la mise au point et l'utilisation des technologies émergentes, notamment les nouveaux outils de calcul et d'analyse.



L'étude de la physique subatomique a présenté de nombreux défis qui m'ont aidé à acquérir des compétences en mécanique, en codage, en recherche, en analyse et en résolution de problèmes. Mais peut-être plus important encore, cela m'a montré que je suis un apprenant capable. Cela me donne confiance en mes compétences alors que j'avance dans un autre cheminement de carrière. Plus concrètement, j'ai pu m'engager dans des projets de communication scientifique tout au long de ma maîtrise qui m'ont apporté une expérience directement liée à mon poste actuel. Être soutenue dans mes projets de communication scientifique m'a donné des compétences non techniques qui ont complété les compétences plus difficiles que j'ai acquises en physique.

— LIA FORMENTI (MSC MCGILL 2021),
COORDONNATRICE DES ÉVÉNEMENTS EN LIGNE, PARLONS SCIENCES



EN HAUT : Des chercheurs de la collaboration canado-japonaise TUCAN réunis dans l'enceinte expérimental à TRIUMF. L'expérience TUCAN vise à mesurer le moment dipolaire électrique des neutrons avec une précision sans précédent, afin de comprendre l'origine de la prépondérance de la matière sur l'antimatière dans l'univers. [Crédit : TRIUMF]

EN BAS : Chercheurs travaillant sur l'expérience PICO au laboratoire canadien SNOLAB. Le but de l'expérience PICO est de rechercher la matière noire à travers d'éventuelles interactions avec la matière nucléaire qui dépendent du spin du noyau cible. [Crédit : SNOLAB]

EN HAUT : Un chercheur travaillant sur l'expérience ALPHA au laboratoire du CERN. L'expérience ALPHA utilise l'anti-hydrogène pour tester la symétrie fondamentale CPT de la nature et l'universalité des interactions gravitationnelles entre la matière et l'antimatière. [Crédit : TRIUMF]

EN BAS : Des chercheurs de TRIUMF développent de nouveaux modules photodétecteurs pour l'expérience Hyper-Kamiokande. Ce futur projet de classe mondiale fournira de nouvelles informations sur la nature déroutante des neutrinos. [Crédit : TRIUMF]

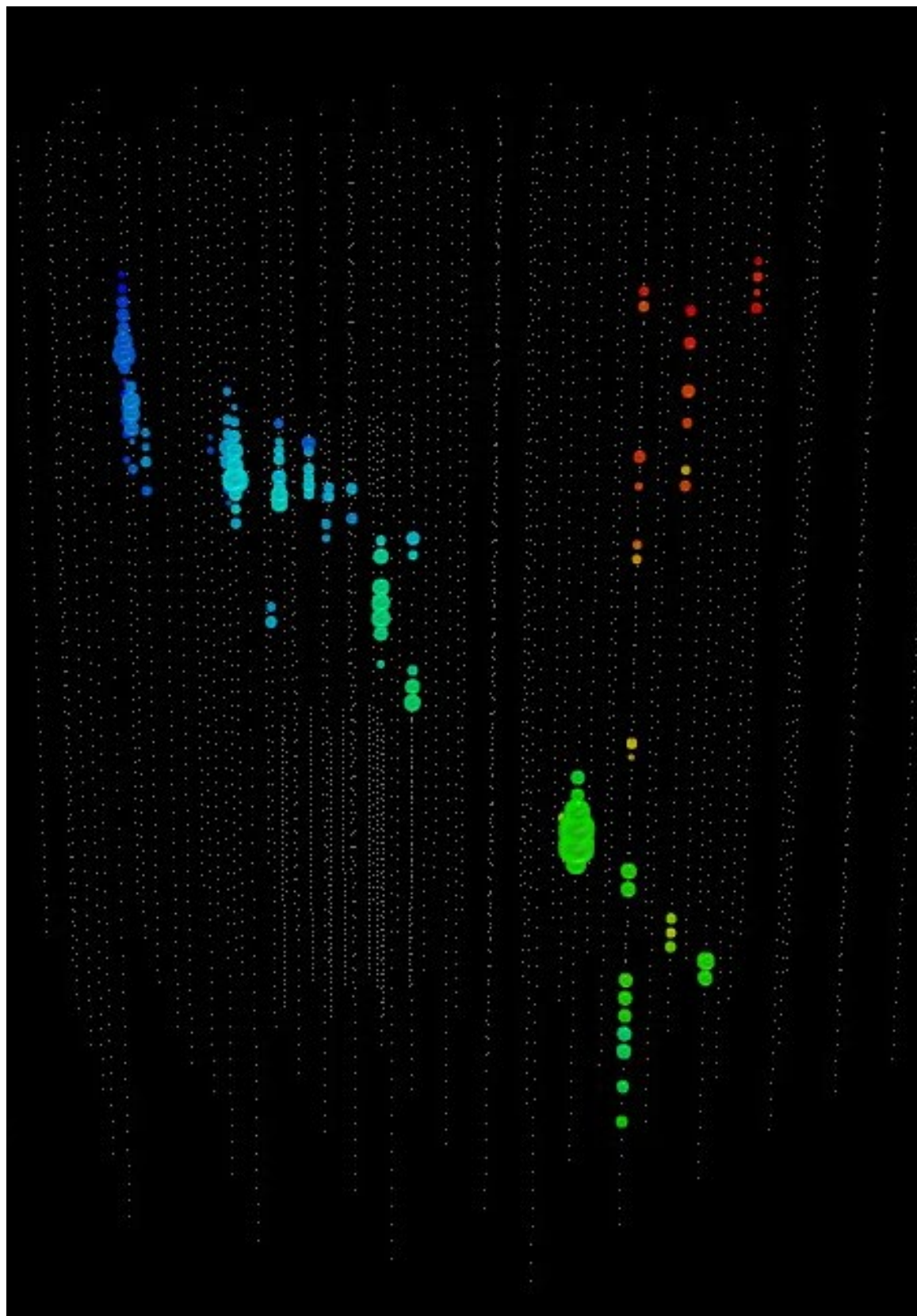


L'observatoire de neutrino IceCube est le plus grand détecteur de neutrinos au monde, conçu pour détecter les neutrinos de haute énergie provenant du cosmos. Ces messagers cosmiques fournissent des informations clés pour en savoir plus sur les propriétés uniques du neutrino, la nature de la matière noire et les mécanismes sous-jacents aux événements astrophysiques les plus violents de l'univers.

CETTE PAGE : Le laboratoire IceCube à la station du pôle Sud d'Amundsen-Scott en Antarctique. [Crédit : F. Pedreros, IceCube/NSF.]

PAGE SUIVANTE : Reconstruction informatique d'une interaction de neutrinos dans la glace de l'Antarctique enregistrée par le détecteur IceCube. [Crédit : Collaboration IceCube]





SECTION 3 – Réaliser le plan de recherche

LA RÉALISATION des projets ambitieux de la communauté canadienne de physique subatomique nécessitera un soutien de plusieurs sources : les principales installations de recherche nationales, TRIUMF, le SNOLAB et l’Institut Périclète; les universités qui accueillent la majorité des chercheurs en physique subatomique, y

compris les étudiants et les postdoctorants; les infrastructures de soutien, comme les ordinateurs et les réseaux à haute performance; et les organismes de financement fédéraux, le CRSNG et la FCI. En outre, la communauté devra être cohésive et inclusive pour s’attaquer efficacement aux moteurs scientifiques et optimiser la réussite des stagiaires.

La communauté canadienne de physique subatomique

LA RÉALISATION DU plan de recherche dépend avant tout de la communauté canadienne des chercheurs en physique subatomique. Cette communauté a réussi à s’imposer sur la scène mondiale grâce à son organisation et à une approche collaborative cohésive. Elle est également véritablement nationale : la **FIGURE 5** et le **TABLEAU 1** montrent la répartition géographique des chercheurs admissibles à une bourse en physique subatomique et son évolution sur une échelle de temps de 10 ans. La communauté de la physique subatomique continue d’être dynamique et forte dans toutes les régions du Canada, avec une croissance récente importante en Ontario. Le renouvellement des chercheurs principaux de la communauté, à un peu plus de 2 % par an, est conforme au taux de départ à la retraite prévu, mais il y a eu récemment une croissance supplémentaire due en partie à l’injection de fonds du programme Apogée

Canada par l’intermédiaire de l’Institut McDonald et à l’embauche consécutive de 12 nouveaux professeurs. Un autre renouvellement des chercheurs principaux sera nécessaire au cours de la prochaine décennie. À cet égard, le programme de soutien à des postes de professeur offert par TRIUMF est efficace et de tels liens entre les universités et les installations nationales canadiennes pourraient être étendus pour soutenir davantage le renouvellement de la communauté.

Le profil de recherche de la communauté canadienne a évolué au cours des deux dernières décennies, pour refléter les progrès réalisés dans le domaine et l’évolution des priorités scientifiques. La **FIGURE 6** montre l’évolution des tendances de la recherche au sein de la communauté au cours des 20 dernières années, par exemple l’accent mis sur les propriétés des neutrinos et la recherche de la matière noire, conformément aux tendances



FIGURE 5. Les institutions canadiennes participant à la recherche en physique subatomique en 2021.

TABLEAU 1. Répartition géographique du nombre de chercheurs en physique subatomique financés par le CRSNG en 2011, 2015 et 2021. La communauté de la physique subatomique continue d'être dynamique et forte dans toutes les régions du Canada, avec une croissance récente importante en Ontario.

Région	2011	2015	2021
Colombie-Britannique (BC)	86	88	88
Prairies (AB, SK, NB)	38	38	40
Ontario (ON)	60	66	81
Québec (QC)	35	31	32
Atlantique (NL, NB, NS, PE)	6	8	8
Total	225	231	251

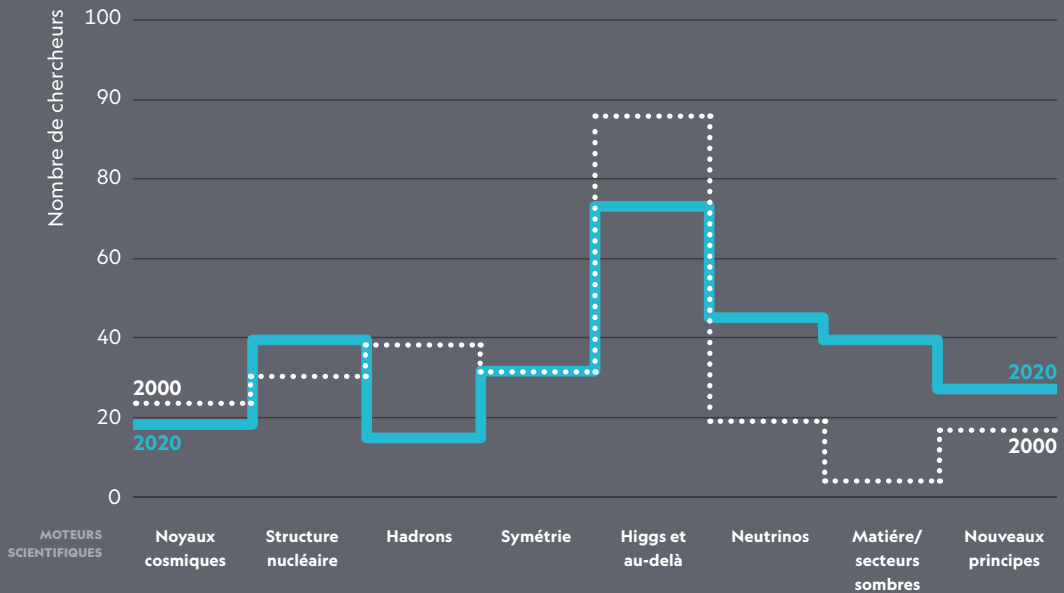


FIGURE 6. Le nombre de chercheurs en physique subatomique financés par le CRSNG, classés selon le principal moteur scientifique de leur recherche, est indiqué pour 2000 et 2020. Le profil de recherche de la communauté canadienne a évolué au cours des deux dernières décennies, pour refléter les progrès dans le domaine et l'évolution des priorités scientifiques, par exemple l'accent mis sur les propriétés des neutrinos et la recherche de la matière noire, conformément aux tendances mondiales et à la présence de SNOLAB au Canada.

TABLE 2. Nombre moyen d'étudiants à la maîtrise et au doctorat supervisés par chercheur équivalent temps plein (ETP), et comparé à la capacité de supervision correspondante. Il existe une capacité latente importante au sein de la communauté pour la formation d'étudiants diplômés supplémentaires. Cette capacité représente une occasion précieuse de maximiser à la fois les résultats scientifiques des investissements existants et la formation de membres hautement qualifiés des travailleurs canadiens. En 2020, environ 60% des étudiants diplômés étaient des étudiants internationaux.

Année	Étudiants gradués supervisés (Moyenne par ETP)	Capacité de supervision (Moyenne par ETP)
2015	2.1	3.7
2020	2.6	3.7

mondiales et à la présence de SNOLAB au Canada. Pour ce qui est de l'avenir, étant donné que le Canada est le principal hôte de TRIUMF et que plusieurs nouvelles installations internationales seront mises en service au cours de la prochaine décennie (p. ex. FRIB et FAIR), il existe des possibilités de croissance dans le domaine de la structure nucléaire.

La physique subatomique est un domaine de recherche dont les progrès dépendent essentiellement de l'interaction entre la théorie et l'expérience. La communauté théorique canadienne a toujours représenté environ 30 % de l'ensemble de la communauté, mais le nombre de chercheurs en théorie financés

par le CRSNG a légèrement diminué au cours de la dernière décennie pour atteindre 24 %, bien que le nombre total de chercheurs ait augmenté. Il existe un fort soutien au sein de la communauté de la physique subatomique pour un programme théorique dynamique, et les théoriciens canadiens ont eu du succès et un impact mondial dans de multiples sous-domaines; nous observons par conséquent l'occasion de développer l'effort théorique canadien. À cet égard, il est vital que les deux thèmes principaux de la recherche théorique — le développement formel de nouveaux principes et structures, et la phénoménologie synergique avec l'expérience — soient poursuivis



J'ai beaucoup appris au-delà de la portée de la recherche en ayant une femme comme directrice de thèse. J'ai eu un aperçu du travail supplémentaire auquel les membres du corps professoral des minorités sont confrontés dans les universités. Ma directrice de thèse était impliquée dans des programmes d'équité, de diversité et d'inclusion (EDI) et de sensibilisation. L'un de ces programmes vise à faire venir des élèves autochtones du secondaire à l'Université du Manitoba pour qu'ils fassent l'expérience de différents programmes scientifiques dans l'espoir d'encourager ces personnes à poursuivre des études scientifiques. Ma participation à ces programmes de sensibilisation m'a permis de mieux comprendre l'expérience que vive d'autres personnes au Canada.

— BRYNNE BLAIKIE (MSC, UNIVERSITY OF MANITOBA, 2022)

avec vigueur. Tous les aspects de la recherche théorique bénéficient de canaux efficaces de communication et de collaboration. En s'appuyant sur le travail de centres existants tels que l'Institut Périphère, l'Institut McDonald, la Station de recherche internationale de Banff (BIRS), TRIUMF et le SNOLAB, on constate des occasions pour soutenir davantage la communauté théorique avec des programmes d'ateliers thématiques qui ont été couronnés de succès ailleurs dans le monde, par exemple, dans des institutions comme l'Institut Kavli de physique théorique (KITP) et l'Institut de théorie nucléaire (INT) aux États-Unis, le CERN en Suisse, l'Institut de physique théorique de Mayence (MITP) en Allemagne et le Centre international de physique théorique (CITP*) en Italie.

La communauté de la physique subatomique établit également des collaborations interdisciplinaires avec des domaines de recherche adjacents, comme le souligne la section 1. Cela s'avère précieux, car ces collaborations ont traditionnellement fourni un terrain fertile pour de nouvelles idées théoriques et de nouvelles applications technologiques. Il existe d'importants chevauchements dans les objectifs scientifiques avec les domaines de l'astronomie et de la cosmologie, de la physique atomique, moléculaire et optique, et plus généralement de la science des matériaux. Les collaborations interdisciplinaires sont également motivées par le chevauchement des outils technologiques et par le développement de technologies émergentes telles que la détection quantique.

Au-delà du profil scientifique de la communauté de la physique subatomique, il est

nécessaire d'aborder des questions plus larges d'équité, de diversité et d'inclusion. La société canadienne est diverse et la célébration de cette diversité constitue un aspect important de notre identité nationale. En outre, l'égalité des chances et la représentation équitable sont des moteurs principaux de l'économie et du progrès scientifique. Une enquête nationale sur la communauté de la physique, menée par le comité d'Équité, de diversité d'inclusion de l'Association canadienne des physiciens en 2020, a confirmé que la diversité au sein du domaine ne correspond pas à celle de la société en général. En effet, la fraction de femmes titulaires d'une subvention du CRSNG dans la communauté de la physique subatomique est passée de 12 % en 2016 à 15 % en 2021, mais elle demeure bien inférieure à celle d'un certain nombre d'autres domaines des STIM. L'enquête d'EDI de l'Association canadienne de Physique a indiqué qu'au sein de la communauté de la physique au sens large, ces disparités entre les sexes sont similaires à tous les niveaux, des étudiants de premier cycle aux professeurs, tandis que les disparités pour les autres groupes d'équité étaient plus importantes pour ceux qui se trouvent à des étapes ultérieures de leur carrière. Bien que les résultats définitifs de l'enquête n'étaient pas encore disponibles au moment de la rédaction du présent document, le Comité de planification à long terme s'est associé à l'équipe de l'enquête EDI de l'Association canadienne de physique pour ajouter des questions qui permettraient de séparer les réponses de la communauté de la physique subatomique de celles de la communauté de

la physique en général. Ainsi, si l'enquête initiale de 2020 fournit une base de référence, dans les années à venir, les données longitudinales des enquêtes annuelles fourniront des informations précieuses à la communauté pour évaluer les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs de diversité et l'inclu-

sivité de la communauté dans son ensemble. À cet égard, les efforts déployés par des organismes de financement comme le CRSNG et la FCI pour s'assurer que les comités d'examen sont diversifiés et pour exiger des demandeurs de subventions qu'ils abordent explicitement les initiatives d'EDI sont les bienvenus.

RECOMMANDATION POUR LA COMMUNAUTÉ

5 – ÉQUITÉ, DIVERSITÉ ET INCLUSION

La communauté canadienne de la physique subatomique manque de diversité, à l'instar de certains autres domaines scientifiques et technologiques. Ce manque de représentation a de nombreuses causes et s'étend à toute la gamme des carrières, des étudiants diplômés aux professeurs chevronnés. Il est largement reconnu que la diversité est précieuse pour la recherche et que le manque de diversité constitue, en soi, un obstacle à l'entrée dans le domaine.

- ▶ *Nous recommandons la poursuite d'autres actions soutenues alignées sur la charte Dimensions des trois organismes fédéraux de financement de la recherche, y compris la collecte et l'analyse régulières de données, des initiatives ciblées pour améliorer l'équité, la diversité et l'inclusion dans les activités communautaires, et l'utilisation par la communauté de comités formels par le biais des instituts pour soutenir ces efforts ou les coordonner avec les partenaires.*
- ▶ *Nous recommandons à la communauté de la physique subatomique de promouvoir une représentation équilibrée dans les rôles de direction à haute visibilité, car les personnes occupant ces postes sont des modèles importants, tout en reconnaissant que la réalisation d'une représentation adéquate peut augmenter la charge de travail des membres des groupes sous-représentés.*
- ▶ *Nous recommandons que la communauté de la physique subatomique favorise l'inclusion en reconnaissant l'héritage de la colonisation au Canada, par exemple en reconnaissant l'utilisation des terres lors d'événements organisés au Canada, conformément à l'esprit des appels à l'action de la Commission de vérité et de réconciliation du Canada et de la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones.*



La communauté canadienne de la physique subatomique compte de nombreux étudiants de premier et deuxième cycles, des boursiers postdoctoraux et des associés de recherche, qui représentent le moteur pour faire progresser la recherche de manière significative et qui reçoivent une formation générale dans un domaine de recherche technique et international. Cette formation fait partie intégrante du programme de recherche en physique subatomique. Comme nous le verrons plus en détail dans la section 4, l'une des particularités de la formation en physique subatomique est la nature hautement collaborative et internationale de ses activités. L'enquête auprès de la communauté de planification à long terme a mis en évidence une capacité latente importante pour la formation d'étudiants diplômés supplémentaires (voir [TABLEAU 2](#)). Cette capacité représente une occasion précieuse de maximiser à la fois les résultats scientifiques des investissements existants et la formation de membres hautement qualifiés des travailleurs canadiens.

Le perfectionnement professionnel des nouveaux professeurs et chercheurs au Can-

ada est également essentiel au renouvellement de la recherche. Un autre résultat de l'enquête communautaire montre que les chercheurs en début de carrière (mais aussi tous les professeurs et chercheurs, dans une moindre mesure) ont souligné que la capacité à recruter des stagiaires talentueux était le principal obstacle à l'augmentation de la productivité de la recherche. La nature collaborative du domaine peut aussi apporter un soutien, grâce à un partage efficace de l'information. Il est de plus reconnu que des fonds de recherche supplémentaires et du temps pour la recherche peuvent être très précieux au cours des premières années d'une carrière. Le programme de bourses de recherche en début de carrière Arthur B McDonald du CRSNG, qui vient d'être rebaptisé, offre un tel soutien; une expansion du programme à une échelle similaire à celle des programmes de soutien de chercheurs en début de carrière disponibles dans d'autres pays, en physique subatomique et dans d'autres domaines de recherche canadiens, serait utile pour lancer la carrière des nouveaux professeurs et chercheurs.

RECOMMANDATION POUR LA COMMUNAUTÉ

6 – FORMATION ET PERFECTIONNEMENT PROFESSIONNEL

Pour permettre au personnel hautement qualifié de recevoir une formation fondée sur la structure de collaboration nationale de la recherche en physique subatomique, nous recommandons la coordination et le partage des possibilités de formation entre les centres, les instituts et les universités du Canada.

continue sur la prochaine page →

Pour soutenir le perfectionnement professionnel, nous recommandons que les chercheurs en début de carrière soient encadrés de manière à acquérir rapidement une connaissance de l'écosystème canadien d'aide et de financement de la recherche en physique subatomique, et qu'ils aient la possibilité d'interagir largement avec la communauté.



La communauté canadienne de la physique subatomique a utilisé l'auto-organisation de manière efficace pour accroître son impact mondial, et a soutenu les instituts communautaires qui peuvent défendre ses intérêts auprès du gouvernement et des organismes de financement. Les processus de planification à long terme sur une base de 5 ans constituent

une partie importante de l'organisation communautaire, mais le Comité de planification à long terme voit également l'intérêt de formaliser la coordination de certaines activités de promotion efficaces et plus fréquentes, par exemple par les Instituts communautaires ICPN et IPP.

RECOMMANDATION POUR LA COMMUNAUTÉ

7 – **COMMUNICATION ET ENGAGEMENT AVEC LES AGENCES ET LE GOUVERNEMENT**

Nous recommandons la formalisation (par ex. par l'ICPN et l'IPP) d'un comité de consultation sur la physique subatomique pour l'engagement et la mobilisation auprès des agences de financement et du gouvernement.



L'un des avantages d'effectuer mes études supérieures à l'Université Simon Fraser est que j'avais un accès direct à TRIUMF. Cela m'a permis non seulement d'effectuer mes propres recherches, mais j'ai pu participer à de nombreuses autres expériences. De plus, j'ai pu observer le fonctionnement quotidien de TRIUMF qui comprend non seulement les préparatifs pour les expériences à venir, mais aussi les préparatifs pour les progrès à long terme alors que les débuts d'ARIEL étaient en cours. Mes expériences à l'Université Simon Fraser et à TRIUMF m'ont préparée pour le travail que j'effectue actuellement en tant que scientifique de projet au Lawrence Berkeley National Laboratory. Je sais utiliser toutes les ressources qui sont à ma disposition. Je reconnais également l'importance d'établir de solides collaborations avec d'autres chercheurs à la fois localement et dans d'autres institutions afin de créer le soutien nécessaire pour générer un programme scientifique solide. Je me sens confiante dans ma carrière pour aller de l'avant.

— DR JENNIFER PORE (PHD, SIMON-FRASER UNIVERSITY, 2016),
PROJECT SCIENTIST, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY,
BERKELEY, CALIFORNIA



En tant qu'étudiant autochtone, le fait d'être financé pour l'été m'a apporté d'incroyables possibilités de recherche et d'apprentissage, comme travailler à l'élaboration d'une contribution théorique pour une expérience au Jefferson Lab.

— NICHOLAS O'NEIL (STUDENT, MEMORIAL UNIVERSITY OF NEWFOUNDLAND)

Financement

LE FINANCEMENT DES investissements et des opérations est essentiel pour soutenir le plan de recherche en physique subatomique. Nous caractérisons le soutien nécessaire dans les recommandations ci-dessous.

Financement en capital

La communauté de la physique subatomique a réussi à obtenir un soutien important pour les financements en capital des programmes de la FCI au cours des 15 à 20 dernières années, et les récentes mesures visant à permettre des conditions de jumelage plus souples et, surtout, à régulariser le calendrier des concours, sont les bienvenues pour faciliter la planification à plus long

terme. Le financement en capital de la FCI pour les projets de physique subatomique a totalisé 372 millions de dollars depuis 2002, dont 52 % ont été consacrés au soutien direct des principales installations canadiennes de physique subatomique (TRIUMF, SNOLAB, Institut Péricimètre). Pour 2019-2020, la communauté de la physique subatomique a reçu 13,5 millions de dollars, soit 3,8 % du financement des bourses de la FCI (<https://www.innovation.ca/fr/propos/gouvernance/rapports-annuels-plans-directeurs>). Ce niveau de soutien permettra le développement substantiel de nouveaux projets dans les années à venir, comme prévu dans le portefeuille de recherche.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

8 – PROGRAMMES DE LA FCI

Le soutien au développement des infrastructures par la FCI a été déterminant pour le développement de la recherche en physique subatomique au Canada. Nous recommandons de maintenir ces investissements aux niveaux annualisés actuels, ce qui s'avérera indispensable à la réussite du plan canadien de recherche en physique subatomique, y compris les initiatives subséquentes proposées.



Financement des opérations

Le succès des programmes canadiens de recherche en physique subatomique dépend essentiellement de l'accès à de nouveaux capitaux pour développer et construire des expériences, ainsi que du soutien opérationnel pour exécuter les expériences, découvrir de nouvelles sciences et former le personnel hautement qualifié.

La Section d'évaluation de la physique subatomique du CRSNG, avec son modèle de financement par enveloppe et ses programmes de subventions de projets, individuelles, d'appui aux ressources majeures (ARM) et d'outils et d'instruments de recherche (OIR), s'est avérée bénéfique pour la recherche en physique subatomique, qui fonctionne souvent avec de grandes équipes multinationales et sur des délais plus longs. Avec un niveau de coordination et de financement approprié, les structures de financement de l'enveloppe de physique subatomique de la FCI et du CRSNG peuvent soutenir avec succès la communauté de la physique subatomique en maximisant l'impact de sa recherche et de sa formation. La communauté apprécie également le fait que le CRSNG ait agi rapidement et de manière décisive pour minimiser l'impact de la COVID-19 sur la recherche canadienne, en mettant en œuvre des prolongations précieuses et en fournissant des fonds de récupération en 2020 pour atténuer les problèmes liés aux blocages et aux perturbations des activités internationales.

Cela a permis à la communauté de résister à la pandémie mondiale et de poursuivre plusieurs de ses projets de recherche en cours.

Comme indiqué ci-dessus, la communauté a particulièrement bien réussi à obtenir le soutien financier de la FCI. Toutefois, la croissance du financement des opérations a été limitée au cours de la dernière décennie. Comme l'illustre la **FIGURE 7**, le financement des opérations n'a pas suivi le rythme des investissements en capital au cours des dernières années, ce qui a entraîné une modification importante du ratio entre le financement des opérations et le financement du capital d'investissement.

En 2019-2020, l'enveloppe de 26 millions de dollars du CRSNG pour la physique subatomique représentait 0,8 % de l'ensemble du financement des trois organismes fédéraux de financement de la recherche, et moins de 2 % du financement du CRSNG (https://www.nserc-crsng.gc.ca/NSERC-CRSNG/Reports-Rapports/plans-plans_fra.asp). Ce chiffre est bien inférieur aux 3,8 % du financement de la FCI alloués aux projets de physique subatomique au cours de cette période, et indique que l'exploitation complète de cet investissement en capital pour maximiser les résultats scientifiques et de formation est limitée. En effet, l'enveloppe de la physique subatomique est restée pratiquement inchangée entre 2005 et 2015, ce qui a considérablement réduit le soutien opérationnel après prise en compte de l'inflation. Depuis 2015, l'enveloppe a augmenté de 23 % (5,5 M\$), contribuant à

atténuer ce qui était devenu un déficit critique de soutien opérationnel aux projets. Bien que cette augmentation soit bienvenue et qu'elle permette de maximiser l'impact scientifique des investissements précédents en capital, après ajustement pour tenir compte d'une inflation de 1,5 %, elle représente un financement approximativement stable en termes réels depuis 2005.

Le succès et l'évolution de la communauté canadienne, ainsi que le développement de la physique subatomique au niveau mondial au cours des 5 dernières années, justifient de nouvelles augmentations de l'enveloppe de la physique subatomique, comme indiqué ci-dessous :

- 1 Assurer la transition de douze professeurs de l'IM soutenus par les Fonds Apogée vers l'enveloppe de physique subatomique (nécessitant 1,2 million de dollars en supposant le financement actuel par ETP). Ces professeurs sont tous intégrés dans la communauté de la physique subatomique et travaillent sur des projets dont les échéances dépassent le programme de Fonds Apogée.
- 2 Besoins de financement opérationnel :
 - a **Capitaliser sur l'investissement en capital** : La communauté de la physique subatomique a continué à obtenir avec succès des financements de la FCI pour de nouvelles infrastructures expérimentales dans des installations nationales et extraterritoriales. Pour tirer parti de ces investissements et permettre à la communauté cana-

dienne d'être concurrentielle sur le plan international, un financement opérationnel supplémentaire est nécessaire.

- b **Maximiser les possibilités de formation** : les récents investissements dans l'infrastructure de TRIUMF (en particulier ARIEL) et du SNOLAB (offrant une utilisation complète de l'espace utilisateur scientifique) constituent l'occasion de renforcer la stature mondiale de ces installations et de créer de vastes possibilités de formation pour le personnel hautement qualifié. Cela nécessite un soutien opérationnel suffisant pour maximiser l'impact scientifique des installations. Les investissements dans l'infrastructure des installations extraterritoriales telles que le CERN et le JLab demandent également un soutien opérationnel complet afin de maximiser les possibilités de formation du personnel hautement qualifié canadien.
- c **Développer les futurs projets phares** : comme indiqué dans le portefeuille, la prochaine décennie verra la mise en service de plusieurs installations nucléaires internationales (FRIB, FAIR, EIC) et une nouvelle génération d'expériences de détection des neutrinos et de la matière noire. La capacité de la communauté canadienne à jouer un rôle efficace dans ces projets de transformation dépendra à la fois du financement de l'enveloppe de la

physique subatomique du CRSNG pour les opérations et des fonds de la FCI et de l'OIR pour les contributions en capital. L'entier engagement dans ces projets nécessitera de nouvelles augmentations de l'enveloppe dans la seconde moitié de la décennie.

- La mise en œuvre complète du plan de recherche proposé, y compris les points (a-c) ci-dessus, exige une augmentation de la capacité de recherche et du personnel hautement qualifié au cours des cinq prochaines années. En effet, il est reconnu que la communauté a la capacité de former 40 % d'étudiants diplômés supplémentaires. Compte tenu du nombre actuel de chercheurs et des allocations moyennes des étudiants, cela se traduit par une augmentation de l'enveloppe de 4 millions de dollars, ce qui permettrait un certain nombre de développements critiques décrits ci-dessus.
- 3 Le financement des nouvelles occasions (par exemple, pour soutenir le programme d'OIR) continue d'être très limité, et le rétablissement de cette fraction de l'enveloppe à un niveau de base de 5 % nécessite un financement supplémentaire (1 million de dollars).

Au total, ces arguments soutiennent une croissance de l'enveloppe de physique subatomique de 6,2 millions de dollars (en dollars courants) jusqu'en 2026. Cet objectif devra être adapté en fonction de la croissance de la communauté canadienne des chercheurs en physique subatomique.

Les besoins de financement opérationnel associés aux points 1, 2(a,b) et 3 reflètent les composantes essentielles du programme de recherche. Ils sont critiques pour maximiser efficacement le rendement du capital investi dans les projets en cours, et l'infrastructure développée à TRIUMF et SNOLAB et dans les installations à l'étranger. D'autres investissements opportuns permettront de s'engager plus fermement dans les nouvelles installations internationales, comme indiqué au point 2(c), et dans d'autres occasions émergentes.

Les arguments exposés ci-dessus, combinés aux recommandations scientifiques présentées à la section 2, conduisent aux recommandations suivantes pour le financement de l'enveloppe de physique subatomique du CRSNG.

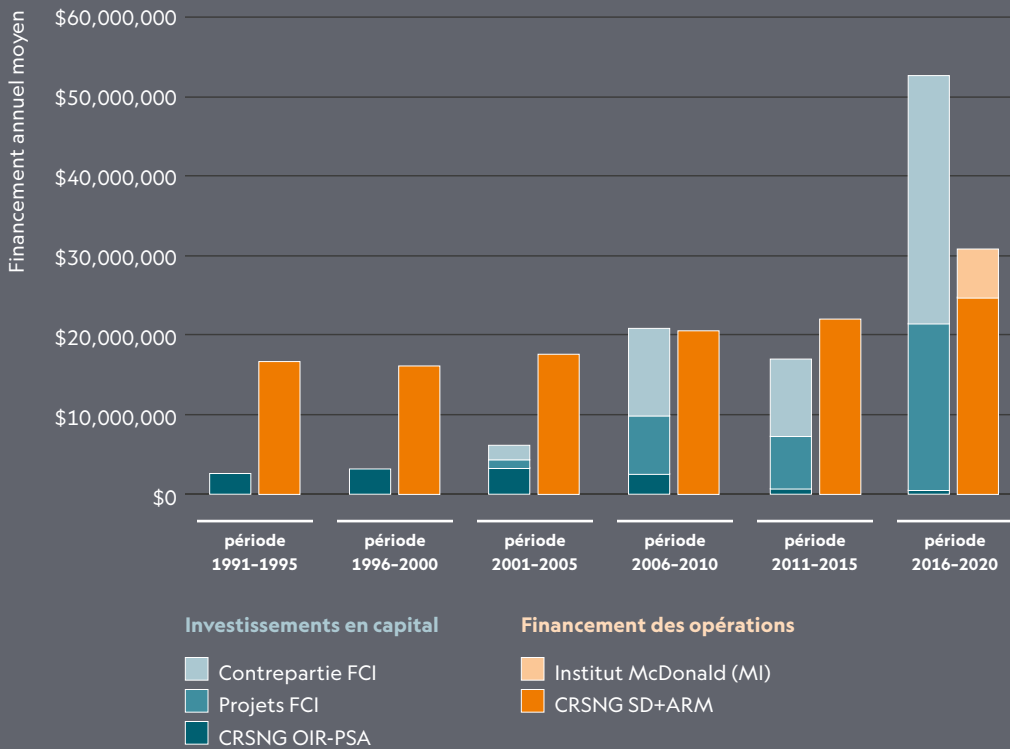


FIGURE 7. Le financement annuel moyen de la physique subatomique est présenté en différentes catégories sur des fenêtres de cinq ans, en fonction du temps. Les investissements en capital (première barre) sont mis en contraste avec le financement des opérations (deuxième barre) pour chaque fenêtre temporelle. Il n’y a pas d’ajustement à l’inflation. Les montants des subventions et des contributions de contrepartie de la Fondation Canadienne pour l’innovation (FCI) ne comprennent pas les investissements de la FCI à l’appui de l’infrastructure ARIEL au laboratoire TRIUMF, des installations SNOLAB et de l’Institut Périmètre. La part de financement de l’Institut Arthur B McDonald (MI) correspond uniquement aux fonds alloués en soutien direct à la recherche. Le financement des opérations n’a pas suivi le rythme des investissements en capital au cours des dernières années, ce qui a entraîné une modification importante du ratio entre le financement des opérations et l’investissement en capital.

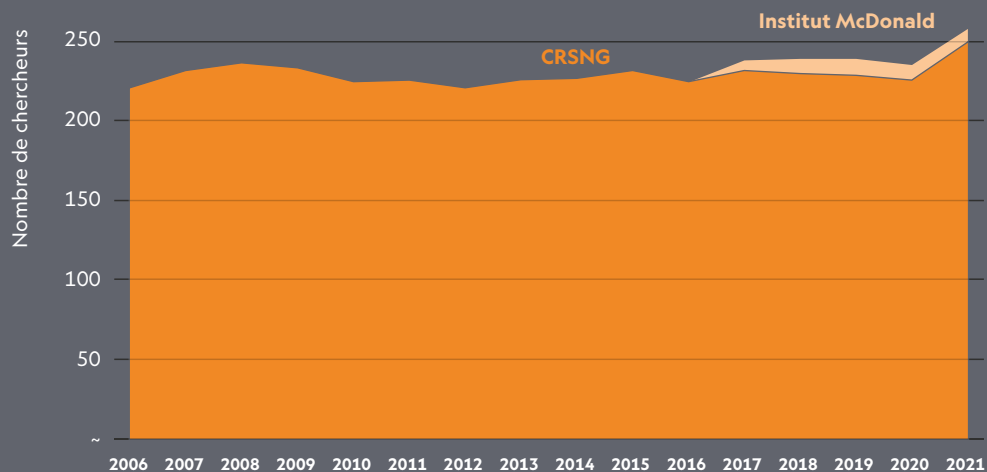


FIGURE 8. Le nombre de chercheurs en physique subatomique au cours des 15 dernières années dont la recherche est financée par le CRSNG et l'Institut Arthur B McDonald. Avec la fin du financement du Fonds d'excellence de recherche Apogée Canada (CFREF) de l'Institut McDonald, les professeurs financés par l'Institut McDonald auront besoin du soutien opérationnel du CRSNG.

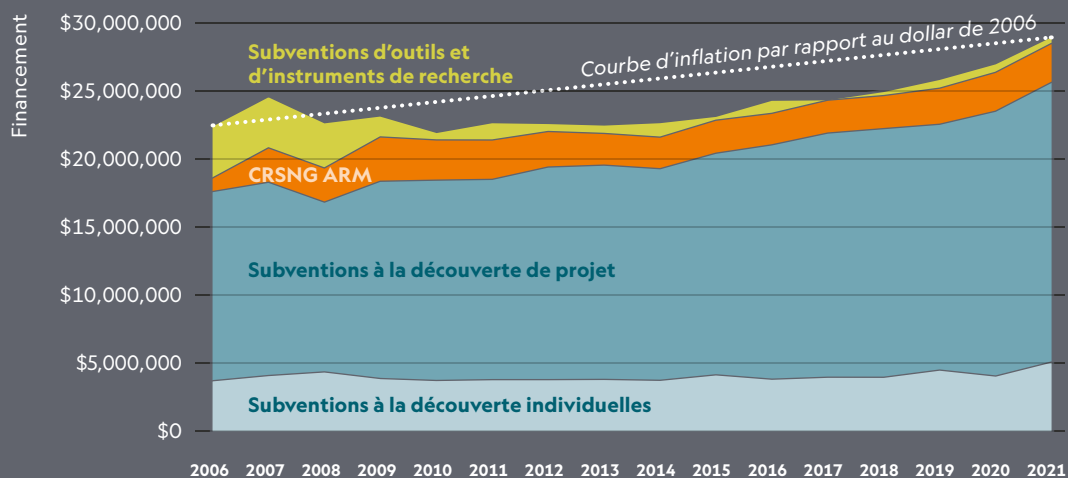


FIGURE 9. Financement du CRSNG alloué à différents programmes dans l'enveloppe de la physique subatomique au cours des 15 dernières années. Le soutien aux coûts de fonctionnement récurrents (au sein des programmes de subventions à la découverte et du programme ARM) a augmenté ces dernières années. Or, en 15 ans, cette croissance vient à peine de rattraper l'inflation. Entre-temps, la portion des fonds affectés au financement des immobilisations par l'entremise du programme d'outils et d'instruments de recherche (OIR) a diminué à une fraction mineure de l'enveloppe. La FCI est devenue la principale source de financement des immobilisations. À noter que l'augmentation de l'enveloppe en 2007 correspond à une contribution ponctuelle hors enveloppe aux fonds de fonctionnement de SNOLAB.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

9 – ENVELOPPE DU CRSNG POUR LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE

Pour maximiser l'impact des investissements présents et futurs, et pour tirer parti des possibilités scientifiques à venir, il convient d'accroître l'enveloppe du CRSNG consacrée à la physique subatomique afin d'assurer le soutien opérationnel.

- ▶ *Nous recommandons le maintien de la structure de l'enveloppe de physique subatomique du CRSNG et de ses programmes, qui ont joué un rôle déterminant dans le financement opérationnel de la recherche en physique subatomique.*
- ▶ *Nous recommandons une augmentation de l'enveloppe du CRSNG pour la physique subatomique de 6,2 millions de dollars de 2021 au cours des cinq prochaines années pour assurer la compétitivité du programme canadien sur le plan international. Cette croissance est nécessaire pour plusieurs raisons : permettre la transition des membres du corps professoral de l'Institut McDonald qui ont besoin du soutien du CRSNG; utiliser la pleine capacité de la communauté pour la formation de personnel hautement qualifié et maximiser le rendement des investissements en capital; et assurer une disponibilité de fonds suffisante pour les petits projets d'infrastructure et le développement de nouvelles possibilités scientifiques.*
- ▶ *Nous recommandons un soutien continu pour toutes les catégories de programme disponibles au sein de l'enveloppe de la physique subatomique du CRSNG, y compris le Programme d'appui aux ressources majeures (ARM), qui favorise de manière critique une collaboration efficace de l'utilisation des ressources techniques uniques en matière de développement et de construction de nouveaux instruments, ainsi que le Programme de subventions d'outils et d'instruments de recherche (OIR), qui offre un soutien important pour le développement de détecteur et d'accélérateur.*
- ▶ *Nous recommandons le suivi et la protection de la fraction de l'enveloppe du CRSNG consacrée à la physique subatomique allouée pour financer les chercheurs en théorie. En outre, le seuil minimal d'attribution ne devrait pas être inférieur au niveau de financement requis pour soutenir la formation des diplômés, comme c'est le cas dans d'autres Sections d'évaluation des demandes en physique.*

Infrastructures et soutien technique

EN PLUS DU financement des immobilisations et des opérations, il faut apporter un soutien aux infrastructures principales pour mettre en œuvre le plan de recherche.

Les grands laboratoires et instituts canadiens de recherche en physique subatomique apportent une valeur essentielle à la communauté et constituent un élément central de l'infrastructure du Canada. Les laboratoires nationaux, TRIUMF pour la physique nucléaire, la physique des particules et la science des accélérateurs, et le SNOLAB, pour la science des astroparticules dans des installations souterraines, ainsi que l'Institut Périphère pour la physique théorique, ont une stature mondiale et jouent un rôle important dans le positionnement du Canada dans la communauté mondiale de la physique subatomique. Ces installations physiques sont soutenues par des instituts virtuels, l'Institut canadien de physique nucléaire (ICPN) et l'Institut de physique des particules (IPP), qui englobent collectivement la communauté des chercheurs canadiens en physique subatomique. Plus récemment, une injection de fonds provenant du programme Apogée

Canada a facilité la création de l'Institut McDonald (IM), qui soutient la sous-communauté impliquée dans la science des astroparticules dans des installations souterraines.

En commençant par les grands laboratoires expérimentaux, TRIUMF et SNOLAB, les investissements récents (évoqués dans la section 3) permettront d'accroître leur production scientifique, ce qui nécessitera un financement opérationnel soutenu pour exploiter pleinement ces investissements antérieurs. TRIUMF a récemment fait la transition d'une coentreprise à une société à but non lucratif, et continue de dépendre des allocations de financement fédérales quinquennales pour soutenir la majorité de ses opérations et programmes. SNOLAB continue de se développer et a été bien soutenu par le programme des ISM de la FCI avec une contrepartie provinciale en Ontario. La flexibilité du programme des ISM est précieuse. Toutefois, pour se développer pleinement en tant que laboratoire de recherche mondial, il faut une plus grande flexibilité pour soutenir le personnel technique axé sur la recherche.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

10 – SOUTIEN AUX CENTRES CANADIENS DE RENOMMÉE MONDIALE

Les grands centres canadiens de recherche en physique subatomique ont une stature mondiale et offrent des avantages concurrentiels dans la poursuite de programmes scientifiques hautement prioritaires.

continue sur la prochaine page →

Nous recommandons de maintenir un soutien fort aux centres canadiens (TRIUMF, SNOLAB, Institut Périmètre) pour que les activités de recherche restent en tête de peloton dans le monde.



Le partage efficace des ressources au sein de la communauté de la physique subatomique a été un facteur important de son succès. Cela inclut en partie les aides de recherche communautaires tels que les laboratoires de soutien technique d'ARM à travers le pays, et le programme de chercheurs scientifiques de l'IPP. Ce dernier programme, qui finance huit chercheurs expérimentaux de haut niveau capables de diriger la participation du Can-

ada à de grands projets internationaux, a été essentiel pour permettre au Canada de jouer un rôle de premier plan dans ces projets. Cette valeur est clairement mise en évidence dans la note de l'IPP sur la planification à long terme, qui souligne que la communauté canadienne de la physique des particules considère le programme de chercheurs de l'IPP comme sa plus haute priorité de financement.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

11 – PROGRAMME DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE DE L'IPP

Le programme de recherche scientifique de l'IPP a eu une incidence majeure sur le leadership et les contributions du Canada aux projets internationaux.

Nous recommandons de maintenir un soutien total au programme scientifique des chercheurs de l'IPP.



L'Institut McDonald, actuellement soutenu par le programme Apogée Canada, représente un ajout important à la communauté canadienne de physique subatomique depuis

le dernier plan à long terme. Il a favorisé la croissance de la sous-communauté axée sur les observatoires souterrains et subsuperficiels qui visent à étudier les neutrinos et la

matière noire. En particulier, ce financement a permis de mettre au point d'importants programmes de soutien technique dans les

institutions partenaires, et il serait utile de maintenir ce soutien lorsque le financement du programme Apogée Canada prendra fin.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT 12 – INSTITUT ARTHUR B MCDONALD

L'Institut Arthur B McDonald et ses programmes de soutien à la recherche et de sensibilisation ont ajouté une valeur considérable à la communauté. Cependant, son financement par le programme Apogée Canada touche à sa fin.

Nous recommandons qu'en plus de la croissance de l'enveloppe du CRSNG pour la physique subatomique destinée à soutenir les coûts opérationnels, de nouveaux mécanismes soient établis pour financer et maintenir la continuité des programmes de recherche et de soutien technique fournis par l'Institut.



Pendant de nombreuses années, la physique subatomique a été un moteur du développement du calcul intensif et des réseaux, avec le World Wide Web développé au CERN et les outils d'apprentissage automatique utilisés depuis longtemps pour la simulation et l'analyse des données. Les besoins actuels et futurs en matière de calcul sont difficiles à surestimer en raison de l'augmentation des débits de données et du besoin de modélisation et de simulation de haute précision. La communauté de la physique subatomique a été un utilisateur majeur des services de Calcul Canada, et compte sur CANARIE pour l'infrastructure réseau, ainsi que sur des services de soutien spécialisés comme le

programme HEPNET financé le programme ARM. Pendant que l'infrastructure informatique de la recherche canadienne traverse une période de restructuration, les membres de la communauté se sont pleinement engagés dans le développement de la nouvelle Digital Research Alliance (anciennement NDRIO). Il est important que les nouvelles structures qui voient le jour disposent d'une organisation appropriée et des ressources suffisantes pour répondre aux besoins spécifiques de la communauté de la physique subatomique au cours de la prochaine décennie.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

13 – L'INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE NUMÉRIQUE DU CANADA

Toutes les composantes de l'infrastructure de recherche numérique (p. ex. Calcul Canada, CANARIE) sont essentielles au succès de la recherche en physique subatomique.

Nous recommandons que CANARIE continue d'être financé par le gouvernement fédéral canadien pour l'exploitation du réseau national de recherche et les liens clés avec nos partenaires internationaux. De plus, nous recommandons que les infrastructures informatiques critiques qui sont fournies par les organisations informatiques nationales (Calcul Canada et Digital Research Alliance [anciennement NDRIO]) continuent d'être vivement soutenues par les gouvernements fédéral et provinciaux, à un niveau suffisant pour répondre aux besoins de la communauté de recherche en physique subatomique.



La perspective à plus long terme (15 ans) de cette présente planification met en évidence l'importance d'appuyer la recherche et le développement. Cela favorisera la participation du Canada à de nouvelles possibilités de projets nationaux et internationaux dans les années à venir. Le perfectionnement et l'ap-

plication des technologies émergentes sont essentiels pour évaluer leur utilité dans les progrès de la physique subatomique. Les efforts qui ne sont pas directement liés à un projet spécifique sont précieux, mais difficiles à financer dans l'écosystème actuel.

RECOMMANDATION EN MATIÈRE DE FINANCEMENT

14 – FINANCEMENT DES ACTIVITÉS DE R ET D

Le développement de nouveaux instruments et de nouvelles technologies ouvre de nouvelles possibilités de recherche. Ce développement repose sur la capacité d'explorer les frontières technologiques qui dépassent la portée des expériences individuelles de physique subatomique.

Nous recommandons d'établir des mécanismes appropriés pour financer efficacement des investissements modestes et opportuns dans des activités génériques de R et D, susceptibles d'atteindre les objectifs scientifiques de la recherche en physique subatomique.

Politique de recherche

Le programme de recherche en physique subatomique du Canada fait appel à d'importantes installations nationales telles que le SNOLAB et TRIUMF, mais il utilise également les meilleures installations du monde pour mener ses recherches. Ces installations comprennent le CERN en Suisse, qui héberge le LHC; le J-PARC et le KEK au Japon, qui hébergent respectivement les expériences T2K et Belle II; le JLab aux États-Unis, qui est l'une des principales installations d'utilisateurs de l'énergie nucléaire dans le monde; et un certain nombre d'autres laboratoires dans le monde.

La participation de la communauté à des projets internationaux à grande échelle est une caractéristique intrinsèque de la recherche en physique subatomique et, en cette époque de préoccupations croissantes en matière de sécurité, il est important que cet aspect de collaboration ouverte soit maintenu. Toutefois, la nécessité d'une collaboration à grande échelle met aussi en lumière certaines préoccupations structurelles de l'écosystème de recherche canadien. En particulier, alors que le CRSNG et la FCI fournissent un soutien précieux à l'élaboration de projets et de composantes de projets jusqu'à un seuil de 10 à 20 millions de dollars, il y a moins de structure en place pour faciliter la participation du Canada à des projets de plus grande envergure, ou les contributions en nature associées qui peuvent être nécessaires pour la participation à des laboratoires internation-

aux. Au Canada, les exemples d'initiatives potentielles à grande échelle au cours de la prochaine décennie comprennent l'expansion de la caverne scientifique du SNOLAB, et le développement d'un anneau de stockage au TRIUMF. Il est également salutaire que ces laboratoires continuent de favoriser la participation des Canadiens aux laboratoires internationaux à l'étranger, par exemple en fournissant des contributions en nature comme celles pour le complexe d'accélérateurs du LHC qui soutient la participation du Canada au CERN et à l'expérience ATLAS. Ce rôle est renforcé par le développement continu d'une infrastructure et d'une expertise de premier plan au niveau mondial dans ces laboratoires. Toutefois, il est à noter que le soutien des laboratoires aux engagements à l'étranger a souvent nécessité un processus de négociation ad hoc.

Les préoccupations ci-dessus soulignent le fait que la mise en place d'une structure nationale pour superviser le développement et la gestion du cycle de vie complet des projets à grande échelle dont le coût total est supérieur à 50 millions de dollars, et d'un point de contact unique pour aider à élaborer et à gérer les accords internationaux, aiderait la communauté à s'engager pleinement dans les occasions scientifiques émergentes à grande échelle au cours des dix prochaines années.

RECOMMANDATION STRATÉGIQUE

15 – SOUTIEN AUX PROJETS SCIENTIFIQUES À GRANDE ÉCHELLE

La coordination des coûts d'investissement et du financement opérationnel tout au long du cycle de vie des projets scientifiques et d'infrastructure à grande échelle (≥ 50 millions de dollars) s'avère difficile dans l'écosystème actuel.

Nous recommandons la création d'une nouvelle structure administrative pour assurer cette coordination (comme le prévoit la recommandation 4.7 de L'Examen du soutien fédéral aux sciences 2017: Investir dans l'avenir du Canada, <http://sciencereview.ca>).

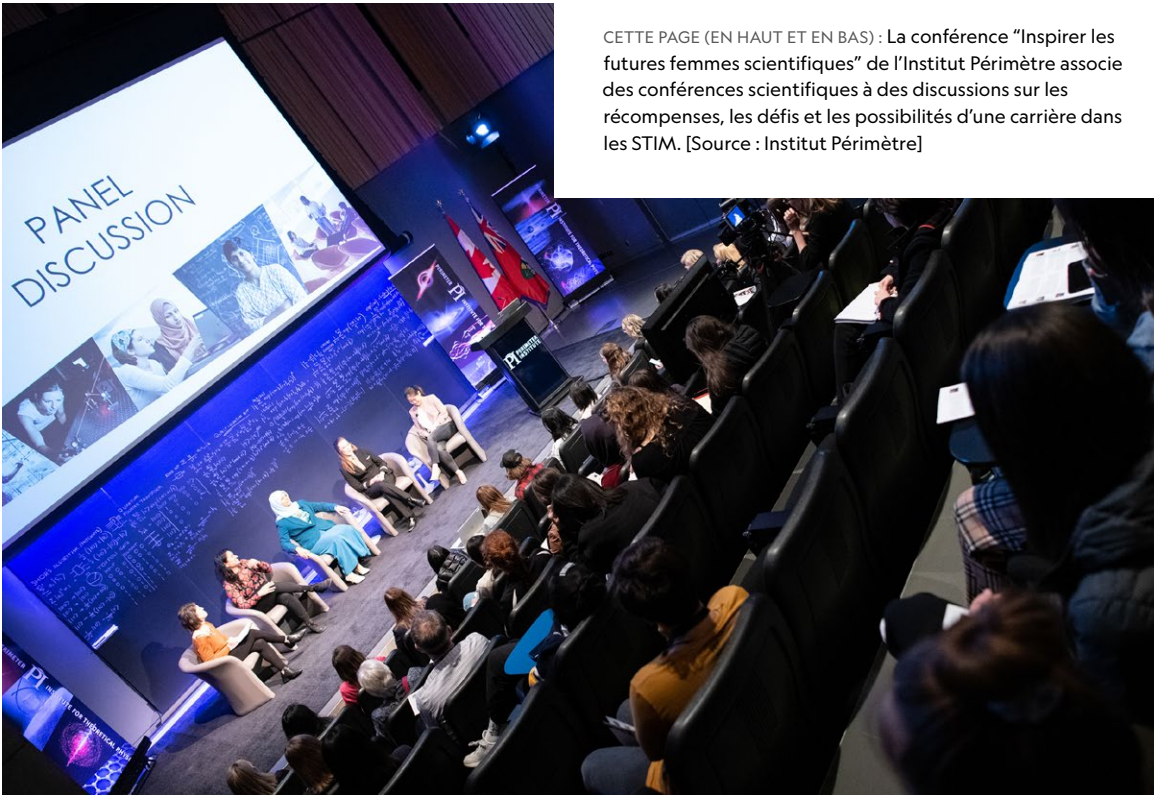
RECOMMANDATION STRATÉGIQUE

16 – BUREAU CANADIEN D'ENGAGEMENT POUR LA RECHERCHE INTERNATIONALE

La recherche en physique subatomique, par sa nature, est mondiale et nécessite de plus en plus d'accords multinationaux complexes.

Nous recommandons de désigner un organisme au sein du gouvernement canadien qui serait responsable de négocier avec les instances étrangères et internationales afin de faire progresser les nouvelles initiatives scientifiques majeures.

CETTE PAGE (EN HAUT ET EN BAS) : La conférence "Inspirer les futures femmes scientifiques" de l'Institut Péricètre associée des conférences scientifiques à des discussions sur les récompenses, les défis et les possibilités d'une carrière dans les STIM. [Source : Institut Péricètre]



L'Institut Périmètre en physique théorique, à Waterloo, en Ontario, est un centre de renommée mondiale et de renommée internationale pour la recherche fondamentale, la formation des diplômés et la sensibilisation par l' ducation.

CETTE PAGE ET LA PAGE SUIVANTE : Des chercheurs interagissent à l'Institut Périmètre de physique théorique.
[Source : Institut Périmètre]





SECTION 4 - Avantages pour la société

L'IMPACT DES activités canadiennes de recherche et de développement en physique subatomique va au-delà des efforts scientifiques individuels, avec de nombreuses contributions de grande portée pour la société canadienne. Les progrès de la physique subatomique inspirent et enrichissent notre culture, tout en repoussant les limites de la technologie. En effet, la physique subatomique améliore notre compréhension fondamentale du monde physique tout en favorisant l'innovation par le développement de technologies habilitantes comme les accélérateurs de particules, l'électronique de pointe et les techniques de communication et d'analyse des données, et en formant des personnes techniquement qualifiées qui aident le Canada à rester compétitif dans l'économie du savoir. La physique subatomique relie également les gens par-delà les cultures et les frontières nationales et sociétales. En effet, ses acteurs posent des questions fondamentales, auxquelles ils tentent de répondre, tout en favorisant le développement d'une économie innovante fondée sur la connaissance. Les progrès de la physique subatomique conduisent aussi à de nouvelles possibilités com-

merciales qui exploitent les technologies ou les découvertes de la physique subatomique.

Il est possible de visualiser les différents niveaux d'impact de la recherche en physique subatomique à l'aide d'un modèle en oignon, avec la communauté de physique subatomique au centre et les couches représentant la pertinence pour des secteurs de plus en plus larges de la société :

- ▶ Domaines scientifiques qui collaborent
- ▶ Formation pour l'économie de la connaissance
- ▶ Applications technologiques
- ▶ Occasions commerciales
- ▶ Impact environnemental
- ▶ Retombées culturelles

La première de ces couches d'impact, relative à la science transfrontalière, a été abordée dans la section 1. Dans cette section, nous examinons les domaines plus larges de l'impact et du rendement du capital investi de la recherche en physique subatomique pour le Canada.

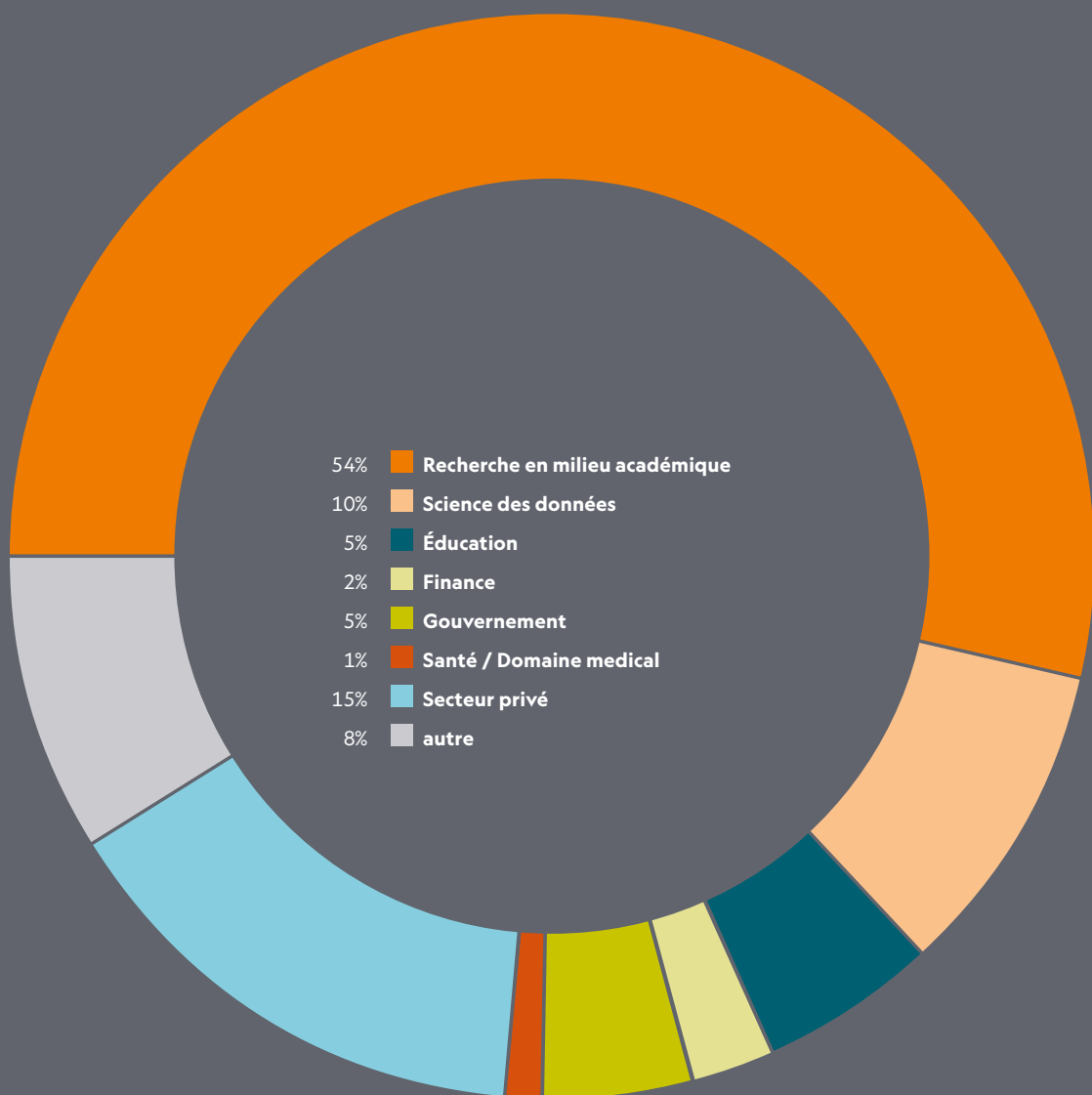


FIGURE 10. Plans de carrière des étudiants diplômés actuels en physique subatomique, d'après l'enquête nationale menée par le comité du PLT 2022, avec un échantillon de 106 personnes.

La formation en physique subatomique pour l'économie de la connaissance

UN ASPECT IMPORTANT du programme de physique subatomique est la formation de personnel hautement qualifié (PHQ). Le champ d'application de la formation de PHQ dans le domaine est riche et diversifié, couvrant toute la gamme des constructions théoriques, de l'acquisition et de l'analyse des données, à la conception et à la fabrication du matériel, en passant par les essais et le perfectionnement, les rapports et la promotion, ainsi que la gestion de projets. La formation de PHQ en physique subatomique est réalisée par un apprentissage hiérarchique qui implique à la fois des étudiants de premier et deuxième cycles et des boursiers post-doctoraux dans le cadre d'une université ou d'un institut. Les étudiants participent à des activités collectives et indépendantes basées sur les thèmes communs d'un groupe de recherche particulier. Ce processus d'apprentissage est complété par la participation à des conférences, à des ateliers ou à d'autres possibilités de formation. Par exemple, des programmes tels que l'institut d'été TRIUMF ou l'école d'été du Tri-institut canadien sur la physique des particules élémentaires offrent aux étudiants des occasions uniques d'apprendre et de créer des réseaux.

La recherche en physique subatomique présente de nombreuses caractéristiques uniques et distinctives, avec des possibilités exceptionnelles de formation et de préparation à des domaines spécifiques de l'économie de la connaissance :

- ▶ La portée, la taille et la nature internationale des réseaux de collaboration par lesquels la recherche est effectuée.
- ▶ Le partage efficace des ressources et des financements de la recherche mondiale.
- ▶ L'étendue des compétences et de l'expertise techniques et non techniques qui ont été acquises (par exemple, de la théorie à l'analyse de données complexes, en passant par l'instrumentation, le développement de logiciels et l'intégration de systèmes).

Les étudiants diplômés en physique subatomique s'orientent en effet vers un vaste éventail de carrières techniques, comme le montre la **FIGURE 10**.

Applications technologiques et occasions commerciales

De l'utilisation économique générale de la technologie des accélérateurs à la naissance de l'internet, la physique subatomique a eu un impact technologique sur la société à bien des façons. Les impacts directs comprennent les applications dérivées de la technologie développée pour la recherche en physique subatomique. On retrouve des exemples récents dans des domaines allant de l'imagerie médicale à la sécurité et aux réseaux sans fil. Il existe des preuves moins directes, mais plus omniprésentes, de cet impact dans le diagnostic et le traitement des maladies par la production d'isotopes, les radiothérapies et les diagnostics, l'énergie nucléaire, la gestion des déchets nucléaires, la science des matériaux et le développement de détecteurs applicables à la dosimétrie dans les applications médicales et spatiales. L'infrastructure de physique médicale soutenue par la physique nucléaire est également un ingrédient clé dans le développement de produits radiopharmaceutiques. Ces progrès sont stimulés par le haut niveau d'innovation technologique requis pour réussir dans la recherche en physique subatomique. La communauté doit souvent mettre au point ses propres instruments pour progresser dans la résolution des problèmes scientifiques, qui trouvent ensuite des applications plus larges.

Au cours des cinq dernières années, les chercheurs canadiens ont fait progresser

des techniques qui peuvent sauver des vies tout en alimentant l'économie de demain. En réponse à la pandémie mondiale, la Collaboration « Milano Ventilatore Meccanico » (MVM), un projet international de laboratoires nationaux de physique nucléaire et de physique des particules d'Italie, du Canada, des États-Unis et d'autres pays, a mis à profit son expertise collective dans la conception de systèmes de traitement des gaz et de contrôle électronique menant à un ventilateur économique pour la ventilation obligatoire et assistée. La simplicité de la conception, rendue possible par le système de contrôle sophistiqué du MVM, permet d'utiliser des pièces facilement disponibles et de le fabriquer rapidement. Guidée par des experts médicaux et en coopération avec les partenaires industriels Vexos et JMP Solutions au Canada, la Collaboration MVM a réussi, dans des délais remarquablement courts, à concevoir, à développer, à construire et à certifier un ventilateur sûr en réponse à la crise mondiale de la COVID. Au Canada, ces efforts ont été menés par le lauréat du Nobel Art McDonald, avec la participation de membres de l'équipe de TRIUMF, de CNL Chalk River, du SNOLAB et de l'Institut McDonald. Le développement du MVM est un excellent exemple de la manière dont l'expertise des physiciens subatomiques qui tentent de percer les mystères de l'univers peut être utilisée

de manière efficace au profit de la société pour relever ses autres grands défis.

La communauté de la physique subatomique a une histoire de collaboration mutuellement bénéfique avec un certain nombre de secteurs industriels. Comme le montre l'exemple de MVM ci-dessus, les laboratoires et les collaborations de physique subatomique connectés au niveau mondial constituent une ressource précieuse, avec l'expertise et la capacité de changer de cap et de répondre rapidement aux nouvelles priorités, de la genèse à la commercialisation. Plusieurs autres collaborations inédites mettent au point des technologies au bénéfice de la société, notamment dans le domaine médical. Quelques exemples sont énumérés ci-dessous :

- ▶ Des chercheurs de TRIUMF et de SFU étudient l'utilisation du thorium comme matériau cible pour la production d'isotopes médicaux.
- ▶ Des chercheurs de TRIUMF et de l'Université de Guelph collaborent pour améliorer la vérification de la portée de la thérapie du cancer par protons/hadrons grâce à des techniques de spectroscopie des rayons gamma.
- ▶ Des chercheurs de l'Université McGill et de l'Université de Sherbrooke collaborent pour étudier la possibilité d'utiliser les propriétés d'émission de lumière dans le Xe liquide mises au point pour la recherche d'événements rares (nEXO) pour l'imagerie médicale en TEP.

Au-delà de la recherche sur la santé, des investigations dans le secteur de l'environnement sont également menées. En voici quelques exemples :

- ▶ Les chercheurs de TRIUMF et de l'Université de Calgary étudient l'écoulement / le suivi de l'eau et de l'atmosphère par le biais du traçage des isotopes radioactifs.
- ▶ Les membres de la collaboration MOLLER travaillent avec des chercheurs en biosciences pour étudier le comportement de croissance des champignons et d'autres plantes dans des conditions environnementales extrêmes en misant sur la personnalisation de la conception électronique MOLLER pour produire un petit système DAQ déployé dans une zone éloignée afin de surveiller les données environnementales.
- ▶ Le SNOLAB et l'Université Laurentienne participent à des efforts de R et D dirigés par la CCSN pour améliorer les technologies de vérification des traités de non-prolifération nucléaire. Les compteurs proportionnels sphériques mis au point par NEWS-G pourraient ouvrir la voie à une technologie compacte et non intrusive pour surveiller les réacteurs nucléaires et les garanties nucléaires internationales.

Si la R et D de pointe est le moteur de la physique subatomique, les possibilités d'avantages sociétaux ou commerciaux doivent être incubées pour élargir leur impact. Les possibilités de commercialisation sont souvent évi-

dentes, grâce au développement de nouvelles technologies et applications, mais il existe également un certain nombre de défis. Les délais de la recherche peuvent être sensiblement plus longs que ceux qui sont tolérables pour un rendement du capital investi dans l'industrie. Le personnel universitaire et de recherche dispose de peu de temps pour établir des contacts et entretenir des relations avec l'industrie. Les performances exigées pour la recherche de pointe en physique subatomique peuvent également aller au-delà de ce qui est commercialement viable. Cependant, dans certains cas, ces exigences strictes repoussent les limites de la fabrication et conduisent à des processus nouveaux et plus efficaces; la mise à niveau actuelle du trajectographe au silicium ATLAS en est un exemple. La poursuite des

travaux visant à relever ces défis d'incubation permettra d'accroître les possibilités d'élargir l'impact de la physique subatomique. Un tel soutien à l'incubation peut être fourni par les bureaux de transfert de technologie des universités, et dans les centres de transfert technique comme TRIUMF Innovations, la branche de commercialisation de TRIUMF. Par exemple, par le biais de TRIUMF Innovations, IDEON propose des détecteurs de muons pour un meilleur diagnostic des gisements miniers. Le transfert de technologie permet d'améliorer l'incubation non seulement en reliant la science et la technologie de pointe à des occasions commerciales tangibles, mais aussi en entretenant les relations et les partenariats industriels nécessaires à la réussite.



Ma formation et mes années d'expérience comme chercheuse ont été partie prenante de ma transition vers l'industrie, autant au niveau des outils (programmation, équipement scientifique, notions physiques de base) que dans les apprentissages connexes (présentation de résultats aux pairs, leadership, habileté à travailler de façon autonome). En particulier dans le domaine de la science des données, le profil de physique des particules est très bien adapté aux demandes de l'industrie avec l'intégration de l'apprentissage machine dans la recherche.

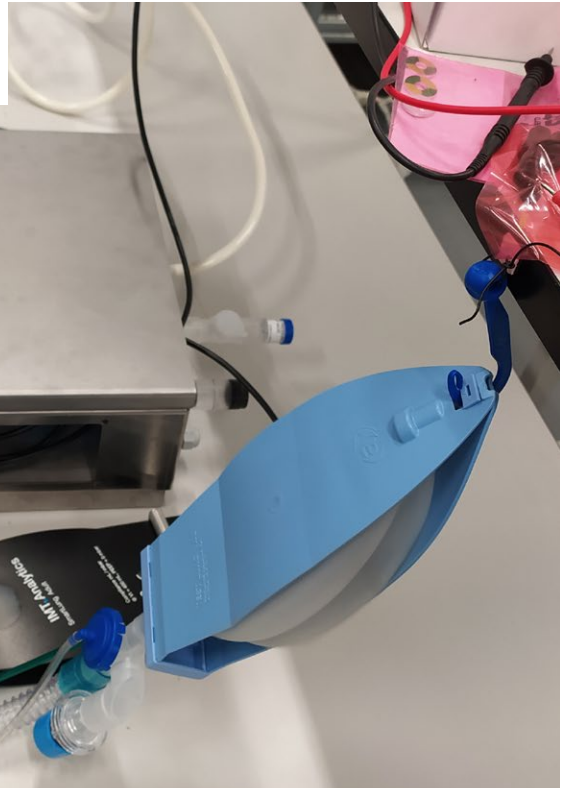
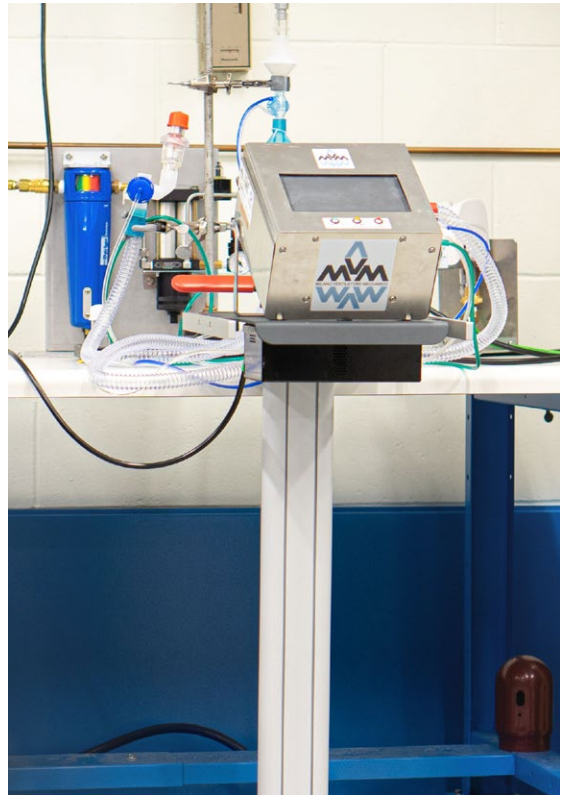
— DR ANDRÉE ROBICHAUD-VÉRONNEAU

(MSC, MCGILL 2005; ASSOCIÉE DE RECHERCHE, MCGILL 2014-2017), DATA SCIENTIST, CIENA

CETTE PAGE (HAUT ET BAS) : En réponse à la pandémie mondiale de COVID-19, la collaboration MVM, une collaboration internationale de laboratoires de physique subatomique d'Italie, du Canada, des États-Unis et d'autres pays, a mis à profit son expertise collective pour développer un ventilateur qui peut fournir à la fois une ventilation contrôlée ou assistée. La simplicité de la conception, rendue possible par le système de contrôle sophistiqué du MVM, permet une disponibilité aisée des pièces et une fabrication rapide dans différents pays.

Guidée par des experts médicaux et en coopération avec les partenaires industriels Elemaster en Italie ainsi que Vexos et JMP Solutions au Canada, la collaboration MVM a réussi – en un temps record – à concevoir, développer, construire et certifier un ventilateur sûr. Au Canada, l'effort a été dirigé par le lauréat du prix Nobel Art McDonald, impliquant des membres de l'équipe des Laboratoires Nucléaires Canadiens de Chalk River, de l'Institut McDonald, de SNOLAB et de TRIUMF. En septembre 2020, le MVM a reçu l'approbation de Santé Canada en vertu de l'arrêté d'urgence et Vexos a commencé à livrer les 10 000 unités qui ont été commandées par le gouvernement fédéral du Canada.

Le développement rapide de ce projet n'a été possible que grâce au travail 24 heures sur 24 d'une grande équipe répartie sur neuf fuseaux horaires, permettant un transfert efficace et une progression des différentes tâches de développement. Le développement de MVM est un excellent exemple de la manière dont l'expertise des physiciens du nucléaire et des particules – qui tentent de percer les mystères des fondements de l'Univers – peut être efficacement mobilisée en temps réel pour aider à relever nos grands défis sociétaux mondiaux. [Crédit : Collaboration MVM]



Impact environnemental

EN ENVISAGEANT LES futures applications technologiques, il est aussi important de reconnaître que la nature globale de la recherche en physique subatomique, un domaine qui repose essentiellement sur la coopération internationale et la transparence, a une incidence environnementale non négligeable. Si les voyages en avion pour la collaboration et le travail expérimental dans des laboratoires hors site restent importants pour le domaine, la pandémie de COVID-19 a mis en évidence la pleine valeur des outils de collaboration et de communication en ligne. On peut donc s'attendre à une plus grande souplesse dans les modes de collaboration à l'avenir. Les installations de recherche exploitées dans le domaine de la physique subatomique sont également d'importants consommateurs d'énergie, par exemple pour faire fonctionner les aimants, les amplificateurs RF et les installations cryogéniques, et cela s'applique aussi largement à la communauté des chercheurs par leur utilisation importante des ressources informatiques. Toutefois, cet impact est atténué par la collaboration mondiale, qui permet de développer et d'exploiter un nombre réduit d'installations internationales à grande échelle dans le monde. En outre, la communauté des accélérateurs, par exemple, continue à rechercher des technologies et des systèmes d'alimentation en énergie plus efficaces afin de réduire leur empreinte globale et d'explorer de meilleurs systèmes de récupération de l'énergie.

Il est en outre important de souligner les possibilités que la recherche en physique subatomique, et les installations de recherche à grande échelle qui lui sont associées, peuvent offrir pour ouvrir la voie à de nouvelles sources d'énergie verte, telles que les réacteurs nucléaires de génération IV, les petits réacteurs modulaires et les technologies de fusion par plasma. Certaines des applications potentielles de la technologie des accélérateurs développée pour la recherche en physique subatomique permettent d'atténuer l'impact environnemental de la production d'énergie, par exemple dans la manipulation des matériaux radioactifs à longue durée de vie, qui nécessitent un déclassement prudent. Des efforts actifs sont déployés pour explorer la transmutation nucléaire, qui aura des répercussions mondiales plus larges pour l'énergie nucléaire verte. Par exemple, les accélérateurs linéaires de protons de haute puissance peuvent faire fonctionner des centrales nucléaires sous-critiques ou traiter les combustibles nucléaires usés par transmutation. Les accélérateurs d'électrons à haute intensité pourront également servir à traiter les gaz de combustion produits dans les centrales électriques industrielles. Par conséquent, la communauté de la physique subatomique et ses laboratoires mondiaux sont bien placés pour soutenir le développement de technologies qui atténuent l'impact climatique à l'avenir.

Retombées culturelles

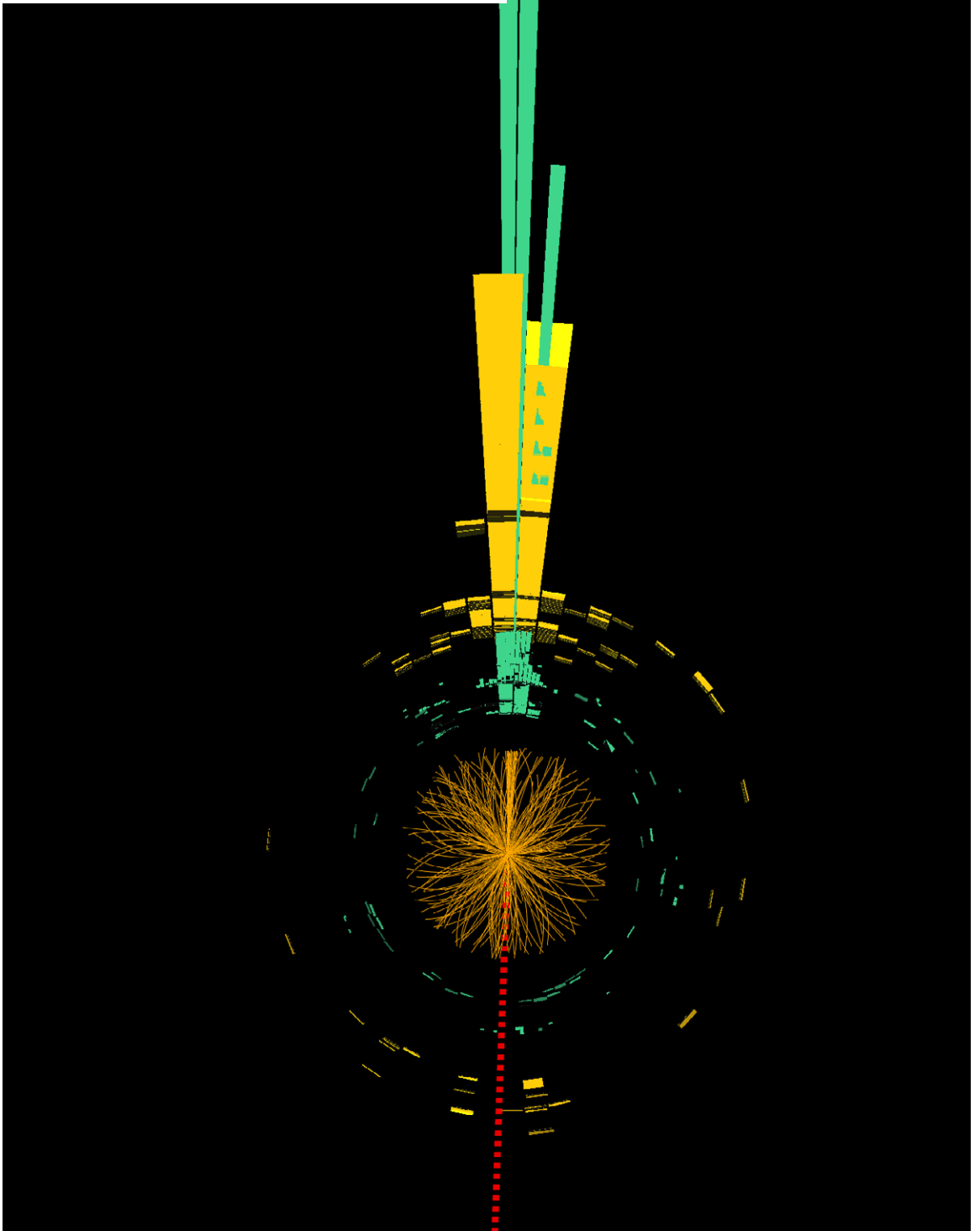
LA RECHERCHE EN physique subatomique a un impact durable sur la société, grâce à l'inspiration fournie par une meilleure compréhension collective des lois fondamentales de la nature, et grâce à sa structure mondiale hautement collaborative. Le vif intérêt suscité par les nouvelles découvertes dans ce domaine est une source d'inspiration pour les Canadiens, et peut inciter les jeunes esprits à entreprendre des carrières dynamiques en sciences et en technologie.

Le Canada a eu la chance de compter plusieurs lauréats récents du prix Nobel de physique, notamment : Art McDonald, en 2015, pour la découverte des oscillations de neutrinos et son rôle moteur dans l'expérience SNO à Sudbury, en Ontario; Donna Strickland, en 2018, pour la physique des lasers à haute intensité; et Jim Peebles, en 2019, pour ses multiples contributions à la cosmologie théorique.

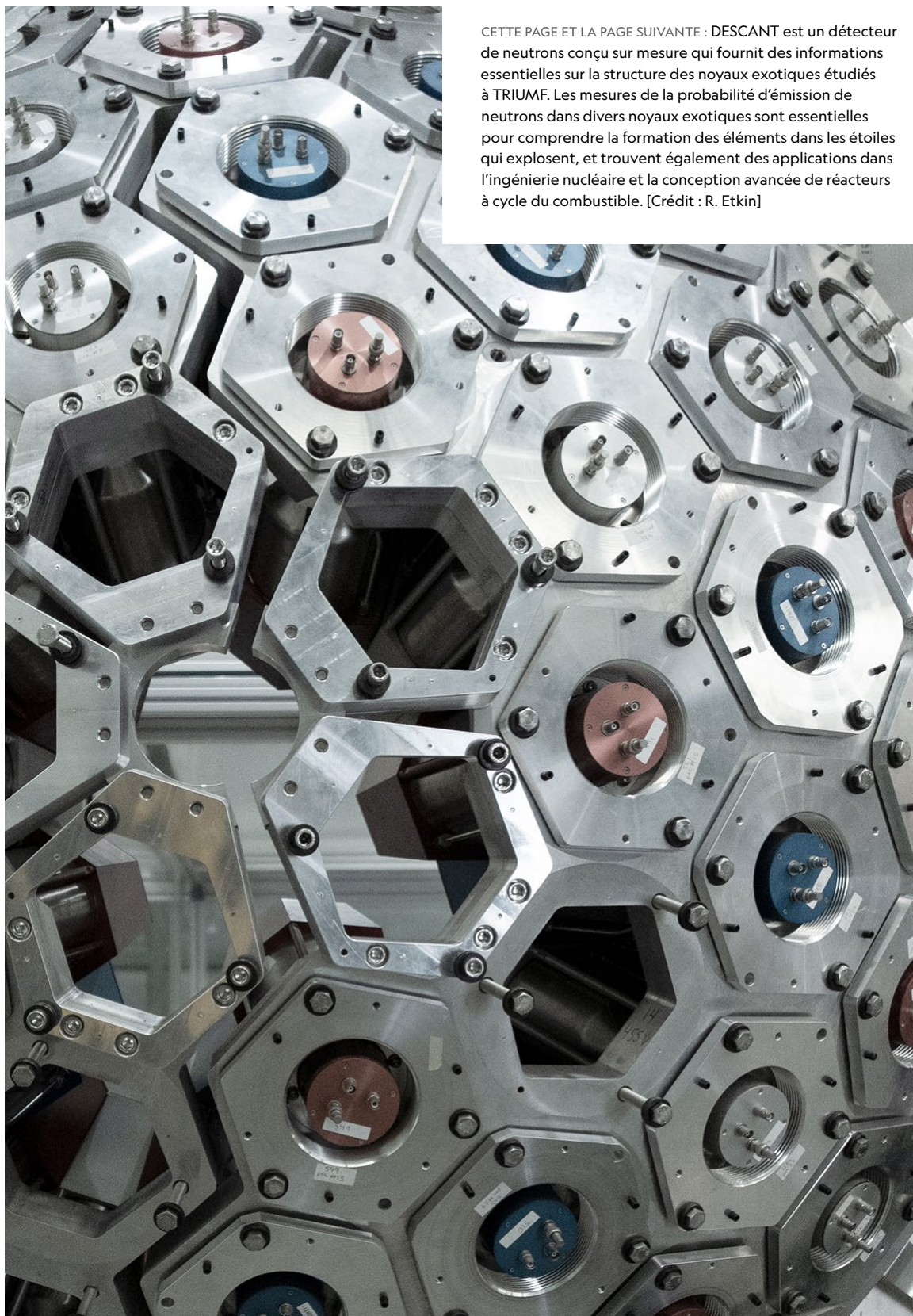
Au-delà de ces importantes reconnaissances par les pairs qui renforcent la stature des efforts canadiens en matière de physique subatomique et suscitent l'intérêt et l'enthousiasme du public, la sensibilisation du public est au cœur des activités de

physique subatomique pour soutenir l'éducation du public et l'interaction avec la communauté. La sensibilisation est également essentielle en matière d'EDI, car elle permet d'atteindre les groupes sous-représentés et de chercher à intéresser le public canadien et les futurs étudiants à la physique subatomique. Les grands centres, TRIUMF, le SNOLAB, l'Institut Périmètre, l'Institut McDonald et les universités ont des programmes de vulgarisation qui constituent un service de base essentiel pour favoriser l'impact à tous les niveaux – le grand public, les élèves des écoles primaires et secondaires et les étudiants de premier cycle. Il est important de reconnaître que les efforts de sensibilisation demandent du temps et des efforts. La communauté peut soutenir efficacement d'autres actions de sensibilisation en s'associant à ces grands centres et à d'autres organisations communautaires. Ces efforts sont importants pour faire progresser la compréhension de la physique subatomique et notre connaissance croissante de l'univers au sein de la société canadienne.

CETTE PAGE : Reconstruction par ordinateur du résultat d'une collision proton-proton de haute énergie enregistrée par le détecteur ATLAS au Grand collisionneur de hadrons (LHC), un accélérateur de particules du laboratoire du CERN en Suisse. [Crédit : Collaboration ATLAS]



CETTE PAGE ET LA PAGE SUIVANTE : DESCANT est un détecteur de neutrons conçu sur mesure qui fournit des informations essentielles sur la structure des noyaux exotiques étudiés à TRIUMF. Les mesures de la probabilité d'émission de neutrons dans divers noyaux exotiques sont essentielles pour comprendre la formation des éléments dans les étoiles qui explosent, et trouvent également des applications dans l'ingénierie nucléaire et la conception avancée de réacteurs à cycle du combustible. [Crédit : R. Etkin]



Glossaire

ALPHA (Antihydrogen Laser Physics Apparatus)

Ensemble d'expériences au CERN visant à piéger les atomes d'antihydrogène (incorpore ALPHA-3 et ALPHA-g) et à en étudier les propriétés.

ARIEL (Advanced Rare Isotope Laboratory)

Projet visant à accroître les capacités de TRIUMF pour produire des faisceaux d'isotopes rares et démontrer la nouvelle technologie canadienne des accélérateurs.

ARM (Appui aux ressources majeures)

Programme du CRSNG visant à faciliter l'accès des chercheurs universitaires canadiens en physique subatomique aux grandes ressources uniques nationales ou internationales (établies au Canada) de recherche expérimentale ou thématique, en offrant à ces ressources un appui financier leur permettant de recevoir les chercheurs.

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)

Expérience du Grand collisionneur de hadrons du CERN, l'un des deux détecteurs polyvalents du Grand collisionneur de hadrons, détectant principalement les produits de collisions proton-proton.

Belle II

Expérience de physique des hadrons B au collisionneur électron-positron SuperKEKB du Japon.

BRIKEN (Beta-delayed neutron studies at RIKEN)

Grand réseau de détection de contre-neutrons de ^3He de long avec un détecteur d'implantation qui prendra des données au centre Riken Nishina jusqu'en 2021.

CANARIE

Le réseau CANARIE exploite et développe le réseau principal du Réseau national de recherche et d'éducation (RNRE) à ultra-haute vitesse du Canada, ce qui assure le réseautage national et international des chercheurs canadiens en physique subatomique.

CANREB (CANadian Rare-isotope facility with Electron-Beam ion source)

Projet financé par la FCI qui améliorera la pureté des faisceaux d'ions rares fournis par le laboratoire ARIEL à l'accélérateur ISAC.

CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire, autrefois le Conseil européen pour la recherche nucléaire)

Laboratoire international en physique nucléaire et des particules, établi à la frontière franco-suisse près de Genève.

CPT (Charge, Parity, Time)

La symétrie combinée de la charge, de la parité et du temps est supposée être une symétrie exacte de la nature au niveau fondamental.

CREX (Calcium Radius Experiment)

Expérience réalisée au JLab afin de mesurer le rayon de la distribution des neutrons du ^{48}Ca .

CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada)

Organisme du gouvernement du Canada qui appuie les étudiants universitaires dans leurs études supérieures, encourage et appuie la recherche axée sur la découverte et favorise l'innovation en incitant les entreprises canadiennes à investir dans des projets de recherche d'établissements postsecondaires et à y participer.

CUTE (Cryogenic Underground Test Experiment)

Installation souterraine du SNOLAB pour les essais sur des cristaux SuperCDMS et leur caractérisation, ainsi que d'autres détecteurs cryogéniques.

DEAP/DEAP-3600 (Dark matter Experiment using Argon Pulse shape discrimination)

Expérience visant à trouver des signes de la matière sombre par la détection directe de particules massives interagissant faiblement à l'aide de la scintillation produite dans 3,3 tonnes d'argon liquide.

DESCANT (DEuterated SCintillator Array for Neutron Tagging)

Détecteur de neutrons qui sera utilisé avec l'accélérateur ISAC.

DOE (Department of Energy)

Département de l'Énergie des États-Unis, qui exploite plusieurs laboratoires nationaux aux États-Unis.

DRAGON (Detector of Recoils And Gammas Of Nuclear reactions)

Détecteur visant à mesurer les taux des réactions nucléaires importantes en astrophysique, utilisé avec l'accélérateur ISAC-I.

EDM (moment dipolaire électrique)

Moment électrique dipolaire, déplacement relatif des charges positives et négatives dans un objet. Les moments électriques dipolaires permanents sont interdits pour les particules élémentaires, parce que cela viole la symétrie par inversion du temps.

EIC (Electron-Ion Collider)

Nouvelle installation pour les utilisateurs de physique nucléaire du DOE en construction au Brookhaven National Lab.

EMMA (ElectroMagnetic Mass Analyzer)

Dispositif destiné à l'étude des produits de réactions nucléaires avec des isotopes rares à ISAC-II.

EXO (Enriched Xenon Observatory)

Expérience visant à mesurer la double désintégration bêta sans émission de neutrinos du ^{136}Xe . L'expérience EXO-200 est située à l'installation WIPP au Nouveau-Mexique (États-Unis). Un détecteur nEXO de prochaine génération, beaucoup plus gros, est proposé pour le SNOLAB.

FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research)

Accélérateur construit pour étudier la structure nucléaire et la matière nucléaire, actuellement en construction, et qui constituera une amélioration de l'installation GSI à Darmstadt (Allemagne).

FCI (Fondation canadienne pour l'innovation)

Créé en 1997 par le gouvernement fédéral canadien, le FCI investit dans des installations et des équipements de pointe pour une grande variété de disciplines scientifiques.

FRIB (Facility for Rare Isotope Beams)

Nouvelle installation du Département de l'Énergie des États-Unis en science nucléaire sur le campus de l'Université Michigan State, aux États-Unis. Les premières expériences doivent débiter en 2022.

FrEDM (Moment dipolaire électrique en francium)

Expérience visant à étudier du moment dipolaire électrique dans le francium, à TRIUMF ISAC-I.

FrPNC (Francium Parity Non-Conservation)

Expérience visant à étudier la non-conservation de la parité atomique dans le francium, à ISAC-I.

GlueX (Gluonic Excitations Experiment)

Expérience visant à identifier les mésons hybrides présentant des degrés de liberté explicites de la matière gluonique, dans le hall D du Jefferson Laboratory.

GSI (GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research)

Centre de recherche situé à Darmstadt, en Allemagne.

GRIFFIN (Gamma-Ray Infrastructure For Fundamental Investigations of Nuclei)

Détecteur de l'accélérateur ISAC-I pour l'étude à haute résolution des désintégrations nucléaires.

HALO (Helium and Lead Observatory)

Détecteur à long terme, à faible coût, à longue durée de vie et à faible entretien consacré à la détection des supernovæ et exploité au SNOLAB.

HL-LHC (LHC haute luminosité)

Phase de prise de données au LHC avec luminosité accrue, qui devrait commencer en 2027.

Hyper-K (Hyper-Kamiokande)

Un observatoire de neutrinos, le successeur de Super-Kamiokande, qui est en cours de construction près de Kamioka, au Japon, afin d'étudier les propriétés des neutrinos et des processus rares tels que la désintégration de protons.

IceCube (Observatoire de neutrinos IceCube)

Détecteur de particules au pôle Sud réparti sur un kilomètre cube de glace, instrumenté par un réseau 3D de photodétecteurs.

ICPN (Institut Canadien de Physique Nucléaire)

Organisation officielle de la communauté canadienne des chercheurs en physique nucléaire visant à promouvoir l'excellence dans la recherche et la formation, et à défendre les intérêts et les objectifs de la communauté au pays et à l'étranger. L'Institut a consulté la communauté canadienne des chercheurs en physique nucléaire pour produire le présent document.

ILC (International Linear Collider)

Projet d'accélérateur linéaire de particules dont l'énergie de collision initiale prévue serait de 250 GeV, avec la possibilité de passer à 1 TeV.

IPP (Institut de physique des particules)

Organisation officielle qui favorise l'excellence canadienne en recherche et en éducation dans le domaine de la physique des particules. L'Institut a consulté la communauté canadienne des chercheurs en physique des particules pour produire le présent document.

IRIS (ISAC Charged Particle Spectroscopy Station)

Poste de spectroscopie pour l'étude des réactions avec isotopes rares utilisant les réactions dans une cible d'hydrogène solide et de deutérium

ISAC (Isotope Separator and ACcelerator)

Accélérateur d'isotopes rares à TRIUMF. L'installation comporte deux halls d'expérience, ISAC-I et ISAC-II.

JLab (Jefferson Lab)

Ce sigle désigne l'accélérateur national Thomas Jefferson, situé à Newport News (Virginie).

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

Projet conjoint entre KEK et l'Agence atomique de l'énergie du Japon, où se trouve l'accélérateur de protons utilisé pour l'expérience T2K (et la future expérience Hyper-K).

KEK (Organisation et laboratoire national chargé de la recherche avec les accélérateurs de haute énergie)

Laboratoire situé à Tsukuba, au Japon, spécialisé dans la physique des neutrinos et des hadrons B.

KEKB (KEK B-physics)

Collisionneur positrons-électrons asymétrique pour l'étude de la physique des hadrons B, situé à KEK. C'est là où l'expérience Belle II sera réalisée.

LBNF/DUNE (Long-Baseline Neutrino Facility/ Deep Underground Neutrino Experiment)

Expérience à double site pour la science des neutrinos et l'étude de la désintégration des protons, hébergée par le Fermilab et le Sanford Underground Research Facility.

LEGEND

Collaboration pour la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos formée avec la fusion des collaborations Gerda et Majorana. LEGEND-200 est une expérience en cours de construction au laboratoire de Gran Sasso en Italie. LEGEND-1000 est un projet de détecteur comprenant 1000 kg de cristaux de germanium.

LHC (Large Hadron Collider)

Grand collisionneur d'ions lourds et de protons, au CERN, où sont réalisées les expériences ATLAS, CMS, LHCb et ALICE.

MAMI (Mainz Microtron)

Accélérateur d'électrons, situé sur le campus de l'Université Johannes Gutenberg à Mainz (Allemagne).

MOLLER (Measurement of a lepton-lepton electroweak reaction)

Expérience visant à mesurer l'asymétrie de la violation de la parité dans la diffusion électron-électron (Moller) au Jefferson Laboratory.

NA62

Expérience réalisée avec le super synchrotron de protons du CERN pour mesurer la désintégration rare du kaon $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$.

NDRIO (New Digital Research Infrastructure Organization)

Organisation chargée de restructurer l'infrastructure de l'informatique de recherche universitaire au Canada. L'organisation a été rebaptisée Digital Research Alliance of Canada à la fin de 2021.

NEWS-G (New Experiments With Spheres - Gas)

Collaboration qui développe des compteurs proportionnels sphériques à gaz pour diverses expériences de détection de particules. NEWS-G @ SNOLAB est une recherche expérimentale directe de la matière noire en cours au SNOLAB.

nEXO (The next phase of the Enriched Xenon Observatory)

Expérience de prochaine génération qui cherchera à détecter la double désintégration bêta sans neutrinos dans 5 tonnes de xénon liquide enrichi en ^{136}Xe , et qui se déroulerait à SNOLAB.

PI (Institut Périmètre de physique théorique)

Centre de recherche scientifique, de formation et de vulgarisation en physique théorique fondamentale, établi à Waterloo (Ontario).

OIR (outils et instruments de recherche)

Programme du CRSNG qui offre un soutien financier à l'acquisition d'outils et d'instruments de recherche.

PHQ (Personnel Hautement Qualifié)

Personnes acquérant des compétences avancées grâce à la recherche financée par le CRSNG, et comprenant les étudiants, les stagiaires postdoctoraux et les techniciens.

Physique subatomique

Domaine plus large de la physique nucléaire et de la physique des particules, comprenant toutes les connaissances qui se déroulent à des échelles plus petites que celle de l'atome.

PICO

Collaboration formée en fusionnant les expériences Picasso et COUPP qui cherchaient à détecter directement la matière noire avec des chambres à bulles au SNOLAB. Le détecteur actuel, PICO-40L, fonctionne avec 40 L de liquides surchauffés. Une version de 500 kg, PICO-500, est en cours de construction au SNOLAB.

P-ONE (Pacific Ocean Neutrino Experiment)

Projet de télescope à neutrinos dans les eaux profondes de l'océan Pacifique au large de l'île de Vancouver, en Colombie-Britannique, soutenu par l'infrastructure d'Ocean Networks Canada.

QCD (chromodynamique quantique)

Théorie qui décrit les interactions fondamentales entre les quarks et les gluons.

RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)

Collisionneur d'ions relativistes au Brookhaven National Laboratory, aux États-Unis.

RIB (Rare Isotope Beam Factory)

Faisceau utilisé dans les études de la structure nucléaire et des réactions nucléaires d'importance astrophysique.

RIBF (Rare Isotope Beam Factory)

Installation de faisceau d'isotopes rares ouverte aux utilisateurs en science nucléaire, située au laboratoire RIKEN.

RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research)

Plus important organisme de recherche au Japon qui réalise des expériences et des recherches de haut niveau dans un large éventail de domaines, dont la physique, la chimie, les sciences médicales, la biologie et l'ingénierie.

SBC (Scintillating Bubble Chamber)

Expérience proposée pour le SNOLAB afin de rechercher la matière noire et la diffusion cohérente des neutrinos.

SLAC (Stanford Linear Accelerator)

L'accélérateur SLAC est un laboratoire national de l'Office of Science du Département de l'Énergie des États-Unis, exploité par l'Université Stanford.

MS (Modèle standard)

Modèle standard des interactions entre particules élémentaires.

SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

Expérience de physique des neutrinos solaires basée sur l'eau lourde, située dans les profondeurs de Sudbury, qui a permis de résoudre le problème des neutrinos solaires. Le professeur Arthur McDonald a partagé le prix Nobel 2015 pour sa direction du SNO.

SNO+

Expérience au SNOLAB qui étudie la double désintégration bêta sans émission de neutrinos, les neutrinos solaires de basse énergie et les géoneutrinos, grâce à un scintillateur liquide en remplacement de l'eau lourde dans le détecteur SNO.

SNOLAB (Sudbury Neutrino Observatory Laboratory)

Installation souterraine à Sudbury, Ontario, spécialisée en physique des neutrinos et dans la recherche de la matière sombre.

SoLID (Solenoidal Large Intensity Device)

Détecteur à grande luminosité et à grande ouverture pour le hall A du Jefferson Laboratory, et qui utilisera l'aimant à solénoïde de l'ancienne expérience CLEO.

SRF (Superconducting Radio Frequency)

Les cavités supraconductrices sont utilisées dans la plage de fréquences radio pour accélérer des particules chargées. Mentionnons plusieurs exemples d'utilisation : les accélérateurs ISAC-II et ARIEL à TRIUMF, et l'accélérateur à faisceau d'électrons continus au Jefferson Laboratory.

SuperCDMS (Cryogenic Dark Matter Search)

Expérience sur la matière sombre en cours de construction au SNOLAB, et suite des générations précédentes d'expériences CDMS. Elle vise à détecter directement les particules massives à faible interaction (WIMP) à l'aide de détecteurs cryogéniques au silicium-germanium.

T2K (Tokai to Kamioka)

Expérience à grande distance, entre J-PARC et le détecteur de neutrinos Super-Kamiokande au Japon, visant à étudier la physique des oscillations des neutrinos.

TIGRESS (TRIUMF-ISAC Gamma-Ray Escape-Suppressed Spectrometer)

Détecteur de l'accélérateur ISAC-II pour l'étude à haute résolution des désintégrations nucléaires.

TITAN (TRIUMF's Ion Trap for Atomic and Nuclear science)

Piège à ions utilisé avec l'accélérateur ISAC pour les mesures de haute précision de la masse des isotopes rares.

TRINAT (TRIUMF Neutral Atom Trap)

Dispositif servant à piéger et à étudier les désintégrations radioactives des atomes neutres, utilisé avec l'accélérateur ISAC-I.

TRIUMF

Laboratoire national du Canada en physique des particules, en physique nucléaire et en science des accélérateurs.

TUCAN (TRIUMF Ultra-Cold Advanced Neutron)

Installation financée par la FCI pour l'étude à haute précision des propriétés des neutrons ultra-froids, en cours de développement à TRIUMF.

UCN (Ultra-Cold Neutrons)

Neutrons ayant une énergie cinétique d'environ 300 neV, ou une vitesse de ~ 7 m/s.

Processus de planification

Mandat du Comité

Contexte

La communauté canadienne de la physique subatomique établit ses priorités scientifiques et ses priorités en matière de financement au moyen de plans quinquennaux à long terme (PLT). Ces plans conseillent la communauté canadienne de la recherche en physique subatomique et les intervenants concernés sur les priorités des activités actuelles et futures. Le dernier plan à long terme portait sur la période de 2017 à 2021, en plus de présenter des prévisions pour la période allant jusqu'à 2026, lesquelles reposaient principalement sur des hypothèses. Un nouvel exercice de planification à long terme doit être réalisé. Le nouveau plan sera effectif de 2022 à 2026, et son champ d'application s'étendra jusqu'en 2036. Un renouvellement de ce plan 2022-2026 aura lieu avant 2026. Le programme canadien de physique subatomique à long terme 2022-2026 est soutenu conjointement par l'Institut de physique des particules (IPP), l'Institut canadien de physique nucléaire (ICPN) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG). Les autres parties prenantes, TRIUMF, SNOLAB, l'Institut Périmètre et la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), soutiennent ce processus.

Comité

La communauté canadienne de la physique subatomique sera le moteur du processus d'établissement du plan à long terme. Un comité sera invité à examiner la contribution de cette communauté et à formuler le plan à long terme. Le Comité de planification à long terme sera composé d'un nombre adéquat de spécialistes qui évoluent dans les principales sous-disciplines en physique subatomique du Canada, y compris les aspects expérimentaux et théoriques, à savoir la physique nucléaire, l'astrophysique nucléaire, la physique des champs et des particules élémentaires et l'astrophysique des particules. Le Comité sera coprésidé par des chercheurs chevronnés possédant une connaissance approfondie du milieu de la recherche en physique subatomique au Canada et à l'étranger. Il se peut que des membres du Comité de planification à long terme précédent fassent partie du Comité, afin d'assurer la continuité.

Les représentants suivants des organismes mandataires de la planification à long terme seront des membres sans droit de vote au sein du comité de planification à long terme.

- ▶ Directeur de l'Institut de la physique des particules
- ▶ Directeur de l'Institut canadien de physique nucléaire

- ▶ Chef d'équipe du CRSNG travaillant sur la physique subatomique
- ▶ Coprésidents de la Section d'évaluation de la physique subatomique du CRSNG pour 2020-2021

Le Comité de planification à long terme comprendra également des membres d'office qui seront uniquement des observateurs et des personnes-ressources pour les autres membres.

- ▶ Directeur du TRIUMF
- ▶ Directeur du SNOLAB
- ▶ Représentant de l'Institut Périmètre
- ▶ Directeur des programmes de la FCI travaillant avec la physique subatomique

Le Comité de planification à long terme peut choisir de tenir certaines réunions à huis clos sans la présence des membres d'office ou des observateurs.

Mandat

Compte tenu i) de l'internationalisation croissante des projets et des collaborations portant sur des questions fondamentales de la physique subatomique; ii) de l'exigence concurrente de maintenir et d'élargir une infrastructure et des programmes de recherche nationaux de premier ordre; iii) de l'expertise et des points forts reconnus de la communauté canadienne; et iv) du fait que la communauté canadienne de la physique subatomique n'est pas en mesure de participer à

tous les projets de recherche, le Comité est invité à recenser les projets scientifiques en physique subatomique que la communauté des chercheurs devrait mener et les priorités connexes auxquelles il devrait donner suite dans un délai de cinq à quinze ans et qui assureraient le maintien du leadership scientifique mondial du Canada. Les estimations budgétaires, tant pour les nouveaux investissements en capital que pour les opérations, doivent également être fournies, y compris les fourchettes de financement pour les projets prioritaires. Ces plages devraient inclure des niveaux de financement qui permettraient une contribution limitée, mais efficace, aux projets ainsi que les niveaux qui permettraient une plus grande contribution.

L'évaluation du Comité reposera sur une vaste consultation de la communauté canadienne de la physique subatomique. Le Comité devra évaluer la faisabilité, l'état de préparation technique et les risques associés à des projets particuliers. Il est impératif que cette évaluation se fasse selon un processus équitable et rigoureux.

Le Comité est également invité à examiner et à analyser les facteurs qui touchent la communauté de la physique subatomique et à formuler des recommandations sur la façon de réduire toute incidence négative ou d'accroître toute incidence positive. Ces facteurs comprennent, entre autres, les diverses possibilités de financement, les relations entre les organismes de financement et les autres organisations, les activités des organismes de recherche nationaux et le contexte international.

Le rapport devra traiter de l'équité, de la diversité et de l'inclusion ainsi que du soutien aux chercheurs en début de carrière dans le contexte de la communauté de recherche en physique subatomique.

Processus et calendrier

Le recrutement des membres du comité de la planification à long terme sera terminé au printemps 2020, et une réunion de lancement sera organisée immédiatement après. Le personnel du CRSNG coordonnera le recrutement des membres en consultation avec les coprésidents du comité ainsi que le ICPN et l'IPP.

Le ICPN et l'IPP seront chargés de préparer des communications pour le Comité de planification à long terme. Ces communications doivent résumer la vision et les priorités scientifiques mises de l'avant par les sous-groupes qu'ils représentent et servent, y compris les aspects expérimentaux et théoriques. Des recommandations générales peuvent également être incluses dans les communications. Chaque institut devrait consulter dans une large mesure les sous-groupes de diverses façons et assurer un processus juste et rigoureux. Les communications doivent être présentées au Comité de planification à long terme et au CRSNG au plus tard le 1er décembre 2020.

Les instituts doivent veiller à ce que les communications puissent être consultées par l'ensemble de la communauté dans leur site Web accessible au public. D'éventuelles réponses aux communications par des personnes ou des organisations seront acceptées.

Tout au long du processus, le Comité de planification à long terme peut également demander la contribution d'autres sources, s'il le juge approprié.

Le comité de planification à long terme organisera des consultations publiques (réunions publiques) au début de 2021, après avoir reçu les communications. Le Comité organisera ensuite des réunions en personne ou des téléconférences jusqu'en été 2021.

Livrables

Le Comité de planification à long terme présentera son rapport final au CRSNG, au ICPN et au PPI au plus tard le 30 septembre 2021. Le rapport sera publié par la suite dans les deux langues officielles.

Confidentialité et conflits d'intérêts

Tous les membres doivent respecter les termes du Code d'éthique professionnelle régissant la conduite des membres des comités permanents et consultatifs du CRSNG. De plus, aux fins du présent exercice, un membre sera jugé être en situation de conflit d'intérêts pendant une discussion sur l'établissement de la priorité d'un projet particulier qui profiterait directement au membre ou à son organisme.

Personnel du comité

Membres du comité

Eckhard Elsen	CERN, Suisse
Chris Jillings	SNOLAB, Canada
Rituparna Kanungo	Université St. Mary's, Canada
Bob Laxdal	TRIUMF, Canada
Augusto Macchiavelli	LBNL, USA
Juliette Mammei	Université du Manitoba, Canada
Jeff Martin	Université de Winnipeg, Canada
Adam Ritz (co-président)	Université de Victoria, Canada
Niki Saoulidou	Université d'Athènes, Grèce
Kate Scholberg	Université de Duke, États-Unis
Brigitte Vachon (co-présidente)	Université McGill, Canada
Alex Wright	Université Queen's, Canada

Membres d'office et observateurs

Cliff Burgess	Faculté, Institut Perimeter (PI)
Emily Diepenveen	Chef d'équipe, CRSNG (jusqu'au 1er janvier 2021)
Jens Dilling	Directeur adjoint de laboratoire, Sciences physiques, TRIUMF
Olivier Gagnon	Gestionnaire, John R. Evans Leaders Fund, FCI
Thomas Gregoire	CRSNG SAPES (co-président)
Jeter Hall	Directeur de recherche, SNOLAB (à partir du 8 avril 2021)
Garth Huber	Directeur exécutif, ICPN
Kevin Lapointe	Chef d'équipe, CRSNG (à partir du 1er janvier 2021)
Alison Lister	CRSNG SAPES (co-présidente)
Tony Noble	Directeur scientifique, Institut McDonald (MI)
J. Micheal Roney	Directeur, IPP
Nigel Smith	Directeur exécutif, SNOLAB (jusqu'au 8 avril 2021)

Tel que décrit dans le mandat, tous les membres du CPLT doivent respecter les termes du Code d'éthique professionnelle régissant la conduite des membres des comités permanents et consultatifs du CRSNG. De plus, aux fins du présent exercice de planification, la situation des membres en conflit d'intérêts sera jugée pendant une discussion sur l'établissement de la priorité d'un projet particulier qui profiterait directement au membre ou à son organisme.

Pour gérer les conflits d'intérêts, tous les membres déclarent leurs intérêts par écrit lorsqu'ils rejoignent le comité, ou lorsque ces intérêts changent. Ces intérêts déclarés ont été diffusés confidentiellement à tous les membres du Comité de planification à long terme par souci de transparence. Les membres sont priés de garder le silence pendant les discussions spécifiques pour lesquelles ils ont un conflit d'intérêts déclaré.

Calendrier

LE PROCESSUS DE planification mené par le Comité de planification à long terme en physique subatomique est décrit dans cette section. Il est important de souligner que toutes les étapes du processus en 2020 et 2021 ont été menées pendant la pandémie de COVID-19, et que les mesures de sécurité existantes exigeaient que toutes les réunions du Comité de planification à long terme et toutes les consultations publiques avec la communauté se déroulent en ligne et par vidéoconférence.

Le processus de planification à long terme a impliqué une consultation et un engagement étendus de la communauté. Les sous-communautés de la physique nucléaire et de la physique des particules ont présenté leur contribution au Comité de planification à long terme dès le début du processus par le biais d'exposés de position détaillés soumis par l'Institut canadien de physique nucléaire (ICPN) et l'Institut de physique des particules (IPP). Le Comité

de planification à long terme s'est également engagé régulièrement auprès de la communauté par le biais d'une enquête, de multiples réunions publiques en ligne et en sollicitant des commentaires tout au long du processus sur les projets de recommandations et les premières versions du rapport final. L'utilisation de la vidéoconférence a permis une large accessibilité aux membres de la communauté à travers le Canada, y compris les étudiants diplômés, et a permis au Comité de planification à long terme d'organiser un certain nombre d'assemblées publiques thématiques, afin d'élargir la phase de consultation et d'engagement communautaire du processus de planification.

Le Comité de planification à long terme s'est réuni par vidéoconférence toutes les 2 à 3 semaines tout au long de l'exercice de planification. Les principales étapes du processus sont résumées ci-dessous.

Lancement du processus de planification à long terme de la physique subatomique

11 juin 2020 – Session conjointe ICPN-IPP au Congrès de l'Association canadienne de physique

22 et 23 juin 2020 – Réunion générale du ICPN

15, 16, 21 juillet 2020 – Réunion générale de l'IPP

Analyse de l'environnement

Septembre/octobre 2020

- ▶ Analyse des données historiques de financement du CRSNG et de la FCI
- ▶ Analyse des plans nationaux à long terme :
 - Plans à long terme de l'Association canadienne de physique de 2006, 2011 et 2017
 - Plan à long terme de la Société canadienne d'astronomie 2020
 - Rapport 2014 du P5 américain, et processus SNOWMASS en cours pour 2020
 - Plan à long terme 2015 pour la science nucléaire américaine
 - Plan à long terme européen NuPECC 2017
 - Stratégie européenne pour la physique des particules – Mise à jour 2020

Plan à long terme de l'Association canadienne de physique – Enquête communautaire

- Novembre 2020 – 370 boursiers et membres du personnel hautement qualifié répondent aux questions de l'enquête sur les activités de recherche, l'EDI et la sensibilisation

Documents de synthèse du ICPN et de l'IPP

- 1er décembre 2020 – Documents de synthèse soumis au Comité de planification à long terme par l'Institut canadien de physique nucléaire (ICPN) et l'Institut de physique des particules (IPP). Ces documents détaillés résumement les activités de recherche actuelles ainsi que les plans et priorités futurs de ces sous-communautés canadiennes de physique subatomique.

Consultation de la communauté

Actualité réunion générale 1 : Communauté de la physique subatomique

- ▶ 16 février 2021 – Éducation, formation et carrières – séance de questions et réponses modérée avec la communauté
- ▶ 17 février 2021 – Équité, diversité et inclusion, chercheurs en début de carrière, organisation de la communauté – séance de questions et réponses modérée avec la communauté

Actualité réunion générale 2 : Occasions scientifiques en physique subatomique

- ▶ 8 mars 2021 – Planification et occasions scientifiques – table ronde internationale et séance de questions-réponses modérée avec la communauté
- ▶ 10 mars 2021 – Connexions en physique subatomique : Liens avec d'autres domaines et la société – débat d'experts et session de questions-réponses avec la communauté

Document de consultation sur les thèmes émergents (publié le 16 avril 2021)

Réunion générale du Comité de planification à long terme

- ▶ 20 avril 2021 – La physique subatomique canadienne en 2021 – synthèse des données de financement et enquête auprès de la communauté
- ▶ 21 avril 2021 – Retour d'informations sur les thèmes émergents – discussion modérée de questions-réponses sur le document des thèmes émergents avec la communauté

Préparation du rapport

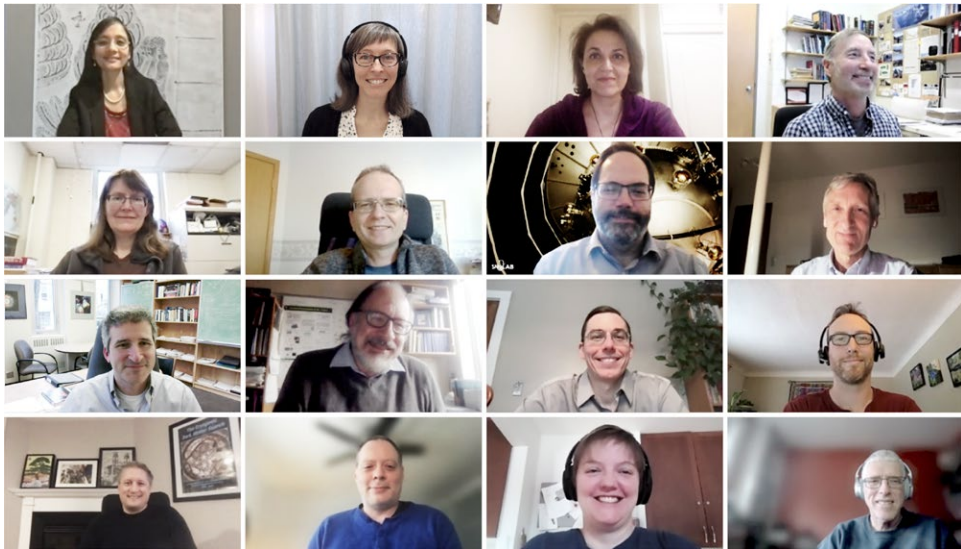
11 juin 2021 – Présentation du projet de recommandations pour commentaires (Congrès de l'Association canadienne de physique)

3 août 2021 – Publication du projet de rapport v1 pour les commentaires de la communauté

10 septembre 2021 – Publication du projet de rapport v2 pour les commentaires de la communauté

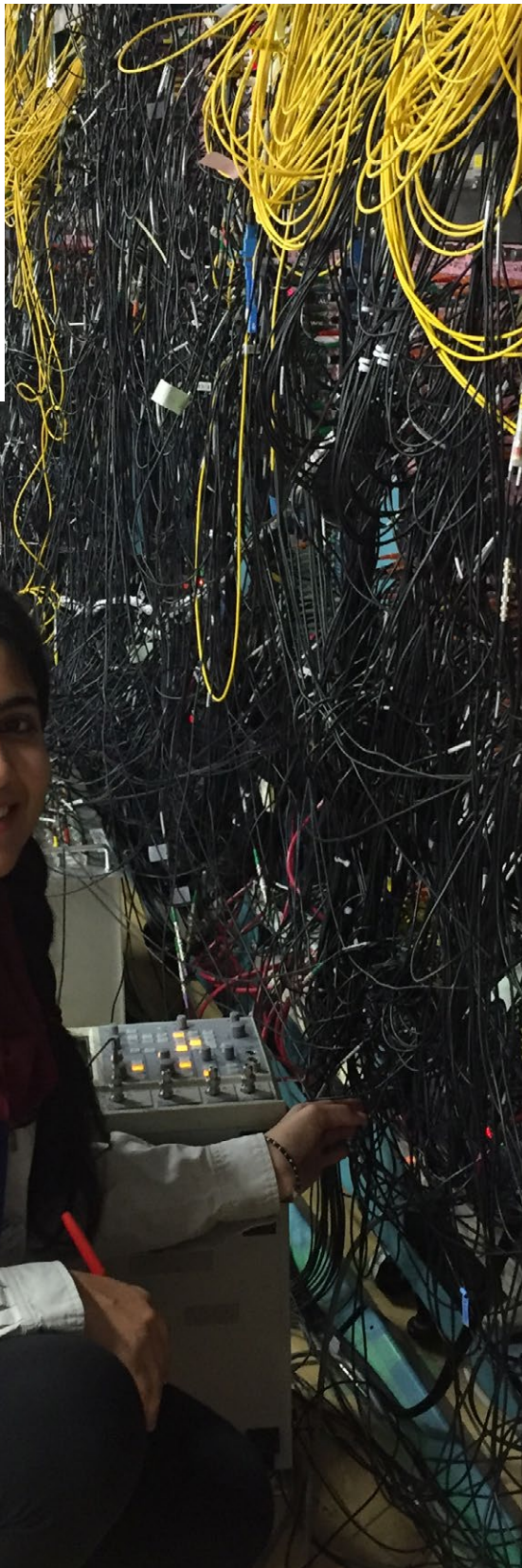
30 septembre 2021 – Finalisation du texte du rapport de planification à long terme

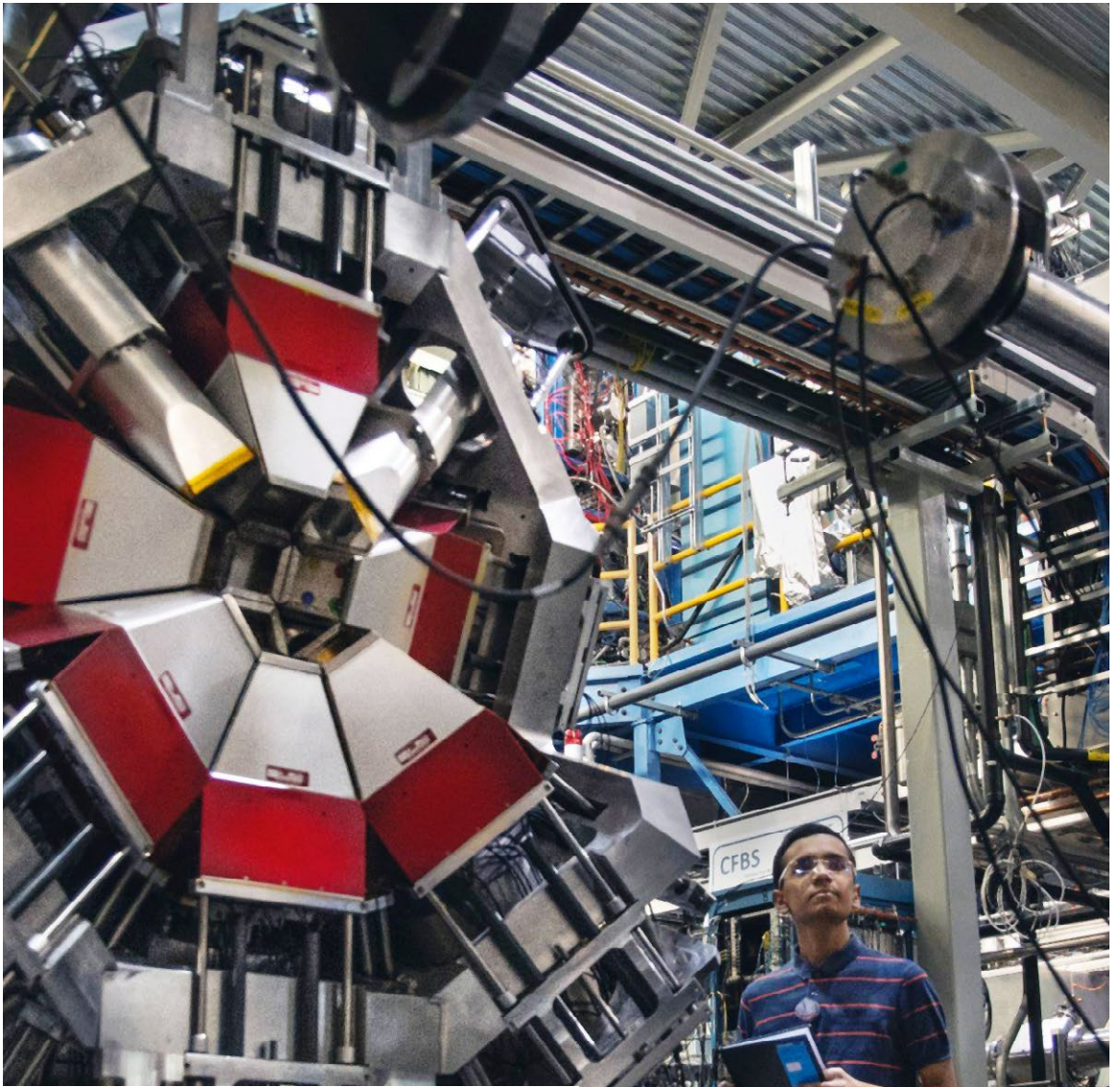
Mars 2022 – rapport formaté et définitif en anglais et en français.



CETTE PAGE : Étudiante diplômée Satbir Kaur (Université St. Mary's) travaillant à l'usine de faisceaux d'isotopes radioactifs RIBF au Japon. [Crédit : R Kanungo]

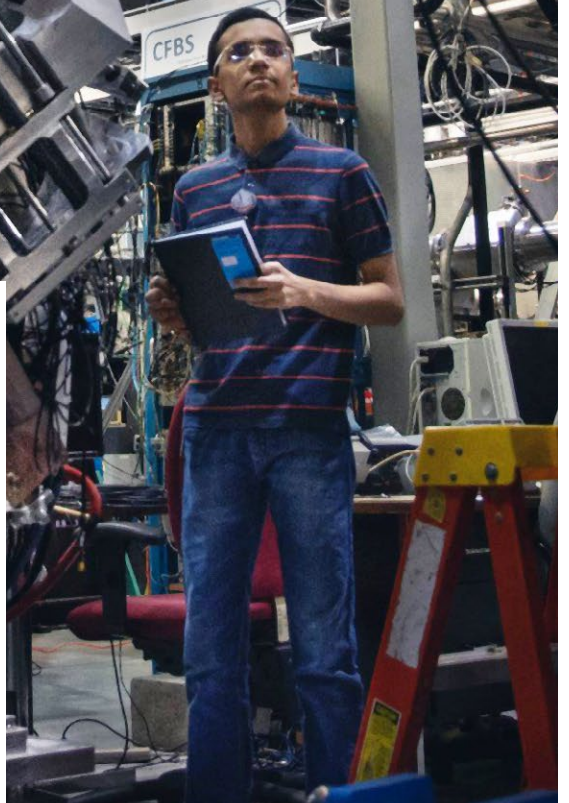
« Durant mon doctorat à l'Université Dalhousie et à l'Université Saint Mary's, l'occasion de travailler dans des laboratoires internationaux (GSI et RIKEN) m'a aidé à maîtriser la pensée critique et à développer mes compétences en résolution de problèmes. Cela m'a aidé à maîtriser l'analyse des données, la visualisation des données et de développer des compétences de vulgarisation. Toutes ces compétences sont très utiles dans les projets de mon emploi actuel d'expert en mégadonnées chez iWave à l'Île-du-Prince-Édouard. »





CETTE PAGE : Étudiant de premier cycle Aditya Babu (Waterloo) travaillant sur la mesure des durées de vie des noyaux à vie courte à l'aide du détecteur GRIFFIN à TRIUMF. [Crédit : TRIUMF]

« Michael Faraday n'a pas eu de formation universitaire — il a juste suivi sa curiosité et est devenu l'un des expérimentateurs les plus réputés en physique et au-delà. Bien que la recherche en physique soit beaucoup plus spécialisée aujourd'hui, le travail effectué à TRIUMF est considérablement plus collaboratif et a tellement plus d'applications interdisciplinaires que je ne l'aurais jamais imaginé. Des personnes du monde entier travaillent ensemble, chacune avec sa propre expérience. Même si presque toutes les expériences de nos jours sont hautement spécialisées dans un domaine particulier, vous avez toujours besoin de personnes possédant un ensemble de compétences diverses pour qu'elles réussissent. »





Copyright © 2022 Comité de planification à long terme. Le texte et les figures contenus dans ce rapport peuvent être copiés sans autorisation à condition que les copies ne soient pas faites ou distribuées pour un avantage commercial direct et que le titre du rapport et la date apparaissent sur les copies. Le droit d'auteur pour la photographie reste avec leurs propriétaires.

Conception graphique par Rocketday Arts.

Pour des figures optimisées et téléchargeables de ce rapport, visitez la version du site Web.

CITATION RECOMMANDÉE

Comité de planification à long terme, « Plan à Long Terme pour La Physics Subatomique au Canada 2022-2026: Rapport », 2022, Canada, <https://physiquesubatomique.ca>

Ce rapport est disponible sous forme de fichier PDF et de texte de site Web. Un abrégé est également disponible sous forme de fichier PDF.

This report is also available in English.

physiquesubatomique.ca

PLAN À LONG TERME POUR la physique subatomique au Canada



INSTITUT DE
PHYSIQUE DES
PARTICULES
1971 - 2021



CINP Canadian Institute of
Nuclear Physics
ICPN Institut canadien de
physique nucléaire



NSERC
CRSNG