



Haute école pédagogique

Avenue de Cour 33 — CH 1014 Lausanne
www.hepl.ch

Master of Advanced Studies et Diplôme d'enseignement pour le degré secondaire II

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

Mémoire professionnel

Travail de

Louis Nicolas

Sous la direction de

Philippe Lo Bello

Membre du jury

Frédéric Chaberlot

Lausanne,

Juin 2010

Table des matières

1.	INTRODUCTION	5
2.	QU'EST-CE QUE LA PHYSIQUE MODERNE ?.....	7
3.	LA SITUATION ACTUELLE DANS LES GYMNASES VAUDOIS	9
3.1	PROGRAMME DE PHYSIQUE AU GYMNASSE VAUDOIS.....	9
3.2	LA RÉALITÉ DE LA CLASSE.....	11
3.2.1	<i>Écoles professionnelles.....</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Première année de gymnase</i>	<i>13</i>
3.2.3	<i>Deuxième année de gymnase</i>	<i>15</i>
3.3	QUE SE PASSE-T-IL AILLEURS ?.....	16
4.	DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES AU GYMNASSE ?.....	19
4.1	THÉORIE DE PHYSIQUE DES PARTICULES	20
4.2	EXPÉRIENCES DE PHYSIQUE DES PARTICULES	24
4.3	ACTIVITÉS EXTRASCOLAIRES DANS LE CADRE DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES	26
5.	CONCLUSION	27
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	29
	REMERCIEMENTS	31
	LISTE DES TABLEAUX	33
	LISTE DES FIGURES	33
	ANNEXES	35
A.	DIFFÉRENTES BRANCHES DE LA PHYSIQUE MODERNE.....	35
A.1	<i>Théorie de la relativité</i>	<i>35</i>
A.2	<i>Physique quantique</i>	<i>36</i>
A.3	<i>Modèle standard de la physique des particules.....</i>	<i>36</i>
A.4	<i>Physique et énergie nucléaires</i>	<i>37</i>
A.5	<i>Cosmologie moderne</i>	<i>38</i>
A.6	<i>Astrophysique moderne</i>	<i>40</i>
A.7	<i>Technologie</i>	<i>41</i>
B.	THÉORIE DE PHYSIQUE DES PARTICULES	43
B.1	<i>Particules élémentaires</i>	<i>43</i>
B.2	<i>Forces fondamentales.....</i>	<i>44</i>
B.3	<i>Modèle des quarks.....</i>	<i>46</i>
B.4	<i>Lois de conservation.....</i>	<i>47</i>
B.5	<i>Diagrammes de Feynman.....</i>	<i>48</i>
C.	ENTRETIEN AVEC LE PROFESSEUR OLIVIER SCHNEIDER.....	53

1. Introduction

En 1905, un ouvrier de l'Office des brevets de Berne publie quatre articles scientifiques. Dans l'un de ceux-ci, le troisième, Albert Einstein, c'était lui, s'attaque au postulat d'un espace et d'un temps absolus. C'est la naissance de la relativité restreinte, qui sera suivie, dix ans plus tard, par la théorie complète de la gravitation, la relativité générale. Cet événement, ainsi que ceux qui suivirent, dans les années 1920 durant le développement de la mécanique quantique, comptent parmi les plus importants dans l'histoire de la physique, car ils y jetaient les bases d'une double révolution, dans l'infiniment petit et dans l'infiniment grand. Ces théories ont nécessité des années avant que leur portée ne soit comprise et elles continuent, encore aujourd'hui, à occuper les plus grands chercheurs (Chapitre 2) ; voir aussi Annexe A).

Soit, ces théories comptent parmi les plus importantes en physique. Mais qu'en est-il de leur étude dans le système éducatif vaudois, et plus particulièrement au gymnase ? Plus d'un siècle après l'article fondateur d'Albert Einstein, et 90 ans après les premières briques de la mécanique quantique, leur étude au gymnase semblent toujours vouée aux quelques minutes que les enseignants peuvent grappiller ici et là, entre deux sujets primordiaux imposés par le plan d'étude vaudois. N'y a-t-il pas là une contradiction ? N'est-ce pas là l'envie, et le devoir, des enseignants de physique, physiciens eux-mêmes, de partager les connaissances actuelles, à la pointe de la science ? Celles-là même sur lesquelles se basent, par exemple, les développements technologiques dont les jeunes gymnasiens sont tant friands.

Ce mémoire s'intéresse à un aspect particulier de la physique moderne, la physique des particules. Au travers de ce mémoire, la place laissée à la physique moderne au gymnase est évaluée, d'abord du côté des plans d'études (Section 3.1), puis du côté de la réalité de certaines classes du canton de Vaud (Section 3.2). Il se penche ensuite sur les chemins qui pourraient être empruntés, du point de vue théorique en premier lieu (Section 4.1 ; voir aussi Annexe 0), puis du côté de l'expérience (Section 4.2), pour terminer par un paragraphe concernant de possibles activités extrascolaires (Section 4.3).

2. Qu'est-ce que la physique moderne ?

Selon l'encyclopédie participative en ligne Wikipedia (Wikipedia, 2010), l'expression « physique moderne » peut faire référence à différentes branches de la physique. Il s'agit d'un côté de la physique quantique, qui prend sa source dans la mécanique quantique, dont les fondements ont été posés entre 1922 et 1927 par les physiciens Bohr, Dirac, de Broglie, Heisenberg, Jordan, Pauli et Schrödinger. Elle comprend aussi, entre autres, la physique des particules, qui sera traitée plus en détails dans ce texte. D'un autre côté, il y a la théorie de la relativité, fondée par le physicien germano-américano-suisse Albert Einstein en 1905 (relativité restreinte), puis en 1915 (relativité générale). De manière plus générale, la physique moderne correspond aussi aux concepts physiques qui ont été abordés à partir du début du XX^{ème} siècle (définition que vérifient autant la physique quantique que la relativité).

Ainsi, la physique moderne couvre un certain nombre de théories, qui sont rapidement parcourues dans ce chapitre, et développées un peu plus en Annexe A.

- La théorie de la **relativité** a été présentée par Albert Einstein sous forme restreinte en 1905, et sous forme générale en 1915. La relativité restreinte prend en compte deux aspects apparemment contradictoires de la physique : la relativité galiléenne et le principe que la vitesse de la lumière dans le vide est identique dans tout référentiel inertiel. Ce dernier point apparaissait déjà dans les équations de Maxwell, mais sous forme implicite, et n'avait pas été compris jusqu'alors. La relativité générale, quant à elle, prédit que toute expérience physique, quelle qu'elle soit, et dans quelque référentiel qu'elle se trouve, produira les mêmes résultats. Elle explique aussi la gravitation comme une manifestation de la courbure de l'espace-temps.
- La **physique quantique** est l'ensemble des théories quantiques qui décrivent l'infiniment petit, atomes et particules, pour lequel la mécanique classique échoue. Elle est basée sur la mécanique quantique, elle-même reposant sur un certain nombre de postulats. Elle permet d'expliquer les mouvements et phénomènes inhérents au domaine de la matière microscopique, ainsi que certains phénomènes liés à l'électromagnétisme.
- Le **modèle standard de la physique des particules** est une théorie quantique des champs qui décrit l'ensemble des particules élémentaires qui constituent la matière (les 6 quarks, les 6 leptons, ainsi que leurs 12 antiparticules), de même que les interactions électromagnétique, forte et faible. Ce n'est cependant pas une théorie

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

complète, dans le sens qu'elle ne décrit pas l'interaction gravitationnelle, et qu'elle repose sur la détermination par l'expérience de 29 paramètres. Cette théorie est discutée à la Section 4.1 et à l'Annexe 0.

- La **physique et l'énergie nucléaires** sont deux problématiques du XX^{ème} siècle, avec l'apparition d'abord des bombes atomiques, puis les centrales nucléaires par la suite. La physique nucléaire étudie la structure du noyau atomique, ainsi que les interactions entre ce noyau et l'environnement (particules passant à proximité). Certains domaines de la médecine lui sont également liés.
- La **cosmologie** moderne décrit l'histoire, la structure actuelle et l'évolution de l'Univers. Elle traite de l'expansion de l'Univers, découverte par Hubble en 1920, ainsi que de la théorie du Big Bang, la « naissance » de l'Univers.
- L'**astrophysique** moderne s'attelle à l'étude de tous les objets de l'Univers (étoile, planètes, galaxies, milieux interstellaires, ...).
- La **technologie** moderne est très en lien avec la science moderne et un grand nombre d'inventions récentes se sont faites en parallèle au développement théorique à la base du phénomène utilisé.

3. La situation actuelle dans les gymnases vaudois

3.1 Programme de physique au gymnase vaudois

Que dit le règlement, quant aux branches de la physique devant être abordées par les élèves durant leur cursus de formation ? Le plan d'étude vaudois (PEV) définit le programme de physique au niveau cantonal, pour les écoles de maturité (EM) autant que pour les écoles de culture générale et de commerce (ECGC) (DGEP, 2009a ; DGEP 2009b). Ce mémoire traitera principalement de ce programme, avec quelques incursions possibles dans d'autres programmes, autant au niveau suisse qu'international (voir la Section 3.3). Dans le cadre des EM, deux programmes sont définis, suivant l'option spécifique choisie par l'élève. Pour tous les élèves choisissant l'option spécifique Physique et Applications des Mathématiques (OSPM), le programme couvre les trois années de gymnase, avec une dotation horaire de 4 périodes par semaine en première et deuxième année, et 3 périodes hebdomadaires en troisième année. Ce total comprend une période de travaux pratiques (deux périodes à quinzaine, par demi-classe). La fin des trois années d'études est sanctionnée par un examen écrit (combiné à l'option spécifique des applications des mathématiques) et un examen oral. Les élèves ayant choisi une autre option spécifique ne suivent que deux ans de physique, en tant que discipline fondamentale (DF), à raison de 1.5 périodes par semaine en première année, comprenant une demi-période de travaux pratiques (deux périodes toutes les quatre semaines, par demi-classe) et 2.5 périodes par semaine en deuxième année, avec le même temps consacré aux travaux pratiques¹. Ces élèves ont de plus la possibilité de choisir l'option complémentaire (OC) physique en troisième année. Cette option correspond à 3 périodes par semaine, dont une de travaux pratiques (deux périodes à quinzaine par demi-classe). Ces horaires sont récapitulés dans le Tableau 1.

Dans le cadre de l'ECGC, la physique est regroupée avec la chimie et la biologie sous le domaine des « sciences expérimentales ». Tous les élèves de première année suivent des cours de ces trois branches, à raison de quatre périodes hebdomadaires, dont une de travaux pratiques, à partager entre les trois matières. En deuxième et troisième années, seuls les élèves en voie santé ou socio-pédagogique suivent des cours de sciences expérimentales. En voie santé, deux périodes de cours de physique hebdomadaires sont proposées aux élèves de

¹ Le Gymnase de Nyon opère différemment en égalisant le nombre de périodes en première et en deuxième année, de telle sorte que les élèves suivent 2 périodes par semaine sur les deux ans. Ce total comprend une demi-période de travaux pratiques, c'est-à-dire deux périodes toutes les quatre semaines par demi-classe.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

deuxième année, auxquelles s'ajoutent une période de travaux pratiques en troisième année (deux périodes toutes les deux semaines, par demi-classe). En voie socio-pédagogique, les deux dernières années d'études gymnasiales donnent lieu à 3 périodes hebdomadaires, dont une de travaux pratiques, à répartir de manière équilibrée entre la biologie, la chimie et la physique. Ces horaires sont récapitulés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Récapitulatif des horaires de physique pour les classes d'école de maturité et d'école de commerce et de culture générale.

	Classe	Cours	Travaux pratiques	
EM	1M DF	1	0.5	*
	1M OS	3	1	#
	2M DF	2	0.5	*
	2M OS	3	1	#
	3M OS	2	1	#
	3M OC	3	1	#
ECGC	1C	1.33	0.33	+
	2C Sa	2	0	
	2C Sp	0.67	0.33	+
	3C Sa	2	1	#
	3C Sp	0.67	0.33	+

* Les travaux pratiques pour les classes d'école de maturité en discipline fondamentale ont lieu deux semaines sur quatre et sont donnés par demi-classe sur deux périodes.

Les travaux pratiques pour les classes d'école de maturité en option spécifique et d'école de commerce et de culture générale en option santé (troisième année) sont donnés par demi-classe sur deux périodes.

+ Les cours et les travaux pratiques pour les classes de première année d'école de commerce et de culture générale en discipline fondamentale et les classes de deuxième et troisième année en option socio-pédagogique font partie d'un bloc de cours de sciences expérimentales, qui comprennent, outre la physique, la biologie et la chimie. Ceci explique les taux fractionnaires de périodes hebdomadaires.

La physique est donc présente de manière obligatoire dans le programme de tous les élèves du gymnase vaudois, avec un minimum de une période par semaine sur une année (ECGC, arts visuels et commerce) et un maximum de 11 périodes par semaine sur les trois ans cumulés (EM – OSPM). Qu'en est-il de la matière couverte par ces programmes ? La physique est considérée comme une discipline fondamentale, au même titre que d'autres disciplines de culture générale. Dans ce sens, un certain nombre de thèmes sont abordés par tous les élèves. Il s'agit par exemple des notions générales (ordres de grandeurs, grandeurs physiques, mesure et unités de mesure, ...). De même, la mécanique (cinématique, dynamique, énergie, ...) est étudiée, à des degrés divers, par tous les élèves du gymnase. Ce devrait aussi être le cas de la gravitation, ainsi que d'une introduction à l'astronomie. En dehors de la mécanique, l'électromagnétisme est un sujet largement couvert, ainsi que l'énergie au sens large et les

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

ondes. Le PEV cite encore la thermodynamique, la mécanique des fluides, ainsi que la rotation des solides comme étant des sujets pouvant être abordés par les élèves en OSPM. Jusqu'ici, tous les chapitres mentionnés s'inscrivent historiquement dans une période de découvertes scientifiques allant du philosophe grec Aristote, au IV^{ème} siècle avant Jésus-Christ, jusqu'au physicien anglais James Clerk Maxwell, à la fin du XIX^{ème} siècle. Est-ce à dire que le siècle qui nous a vus naître a été stérile en termes de génies ? Bien entendu, ceci n'est pas le cas. Le plan d'étude va légèrement au-delà, en proposant, parmi d'autres sujets à choix, la physique nucléaire et la radioactivité pour les élèves en DF, et la relativité et l'astrophysique pour les élèves en OSPM. Ces thèmes, qui sont facultatifs, ouvrent le chapitre d'une physique plus moderne. De Henri Becquerel découvrant la radioactivité en 1896, aux théories actuelles en astrophysique, en passant par Albert Einstein énonçant la théorie de la relativité générale en 1915, ou encore James Chadwick découvrant le neutron en 1932, ce sont plusieurs percées qui sont tentées dans le couvercle d'incompréhension de la physique actuelle qui semble recouvrir la physique. Cependant, ce ne sont que quelques pistes facultatives qui sont proposées, quelques facettes de la physique moderne qui sont entrevues.

3.2 La réalité de la classe

Cette section condense les approches de la physique moderne au gymnase (l'école, maturité ou culture générale, ainsi que le degré, 1, 2 ou 3^{ème} année, seront précisés si nécessaire) d'un certain nombre de personnes soumises à un court questionnaire :

- 1) Durant vos cours (que ce soit en EM ou ECGC, en OS ou DF, en 1, 2 ou 3^{ème} année), abordez-vous certains thèmes de physique "moderne" (comme par exemple la relativité (au sens d'Einstein et non pas seulement de Galilée), la cosmologie, la physique des particules, l'astrophysique (moderne), la physique quantique, etc.)? Si oui, pouvez-vous exposer brièvement quel(s) thème(s) vous avez abordé ?
- 2) Lorsque vous traitez de ces sujets modernes, le faites-vous uniquement du côté de la phénoménologie? Ou présentez-vous aussi certains éléments théoriques?
- 3) Avez-vous connaissance de programme d'études qui laissent une plus grande place à la physique moderne?

Le groupe des personnes interrogées, au nombre de 22, était composé de 8 collègues enseignant la physique au Gymnase de Nyon, ainsi que de 13 stagiaires disséminés dans les établissements du secondaire II vaudois (dont une école professionnelle), plus un enseignant

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

au Gymnase de Morges et l'auteur de ce mémoire, stagiaire en responsabilité au Gymnase de Nyon. Les stagiaires rapportent dans leurs propos soit leur propre expérience, soit celle qu'ils ont observée auprès de leur praticien formateur. Les propos retransmis ici ont, bien entendu, été rendus anonymes et n'ont pas pour prétention d'offrir une vision exhaustive du problème. Ils sont cependant destinés à montrer la tendance actuelle en termes d'enseignement de la physique moderne au gymnase.

3.2.1 Écoles professionnelles

Du côté des écoles professionnelles, peu de connaissances ont été acquises, avec seulement un avis présenté parmi les 22. Au niveau du plan d'étude (DGEP, 2008), aucune mention n'est faite d'une introduction à la physique moderne. Selon la personne interrogée, les livres proposés aux élèves contiennent certains sujets de physique moderne, tels que la relativité einsteinienne, la physique des particules et l'astrophysique. Cependant, en pratique, rien n'est fait en cours pour cause de manque de temps. Les sujets classiques sont traités en priorité. Ce comportement est commun et les sujets modernes sont souvent laissés au second plan. Quelles en sont les raisons ? Elles sont multiples, et ce paragraphe n'a pas la prétention de répondre totalement à ce sujet. Premièrement, dans une construction d'un cours de physique, il est commun d'avancer dans la matière de manière chronologique. Le programme étant chargé, il n'y a pas assez de temps pour tout couvrir, et donc les derniers sujets sont ceux qui sont le plus facilement laissés de côté. De plus, il peut être considéré comme sensé de débiter par des sujets simples et concrets, et d'aller de plus en plus loin dans l'abstrait. Les programmes sont donc en général construits selon le schéma : mécanique – électricité – ondes - ... Les chapitres de physique moderne, comme la mécanique quantique ou la relativité, parlent de phénomènes hautement abstraits pour la plupart des gens. Il est question de l'extrêmement grand, ou, au contraire, de l'infiniment petit. Du fait de cette difficulté supplémentaire, ces sujets sont donc gardés pour la fin de l'année, si le temps le permet. Finalement, la physique moderne faisant intervenir des concepts nettement plus abstraits et des moyens mathématiques hautement sophistiqués, la théorie est en général présentée sous forme phénoménologique et vulgarisée. Ceci est d'autant plus vrai que le niveau des élèves en mathématique est souvent insuffisant. La nécessité d'évaluer les élèves, et la difficulté d'évaluer des connaissances phénoménologiques (ou, autrement dit, la relative facilité d'évaluer des connaissances techniques sous forme d'exercices calculatoires) est fortement rebutante. Ces quelques difficultés expliquent, en partie, pourquoi la physique moderne est souvent laissée de côté.

3.2.2 Première année de gymnase

Cependant, un certain nombre de concepts et objets d'apprentissage appartenant aux chapitres de la physique moderne sont tout de même abordés par les enseignants interrogés. Les paragraphes qui suivent apportent un éclairage sur les pratiques de certains enseignants, la matière traitée et l'aspect, phénoménologique ou théorique, de leurs cours. Les premiers paragraphes traitent du programme de première année, alors que les suivants mentionnent les possibilités en deuxième année. Aucun enseignant ne rapporte quelconque détour par la physique moderne en troisième année, que ce soit en option spécifique ou en option complémentaire. Une raison à ceci pourrait être la pression du programme, due à l'examen de physique auxquels sont soumis les élèves d'option spécifique physique et applications de mathématiques. Les élèves des différentes classes passant le même examen, un enseignant ne peut pas se permettre de couvrir un programme différent de celui de ses collègues, sous peine de pénaliser ses élèves vis-à-vis des autres. Cette pression est moins forte en première année, les examens traitant du programme des deuxième et troisième années.

La première occasion qui est en général saisie par les enseignants pour aborder ces concepts de physique moderne est le tout début du programme, qui traite de notions générales (grandeurs physiques, ordres de grandeurs, unités de mesures, etc.). Présenter aux élèves les ordres de grandeurs permet déjà, en naviguant de notre échelle à l'infiniment petit, de parler de la structure de la matière, de l'atome aux particules élémentaires (quarks, électrons, etc.). Ainsi, plusieurs enseignants se lancent dans la zoologie des particules, mais n'osent pas rentrer dans les détails. Le chapitre 4 de ce texte tentera de répondre à ce problème, en proposant certaines pistes qui pourraient être explorées afin de rentrer dans des détails abordables par les élèves. Des liens avec les expériences actuelles au CERN sont aussi présentés aux élèves, ce qui conduit aussi à parler de cosmologie (voir ci-dessous). La structure de la matière est aussi en lien avec la physique quantique et certains enseignants abordent ainsi la problématique du nuage électronique et la non-localisation des particules élémentaires.

D'un autre côté, en allant regarder vers l'infiniment grand, la possibilité est donnée d'évoquer certaines découvertes d'ordre astronomique, de mentionner l'existence des planètes, étoiles, galaxies et autres objets célestes. En particulier, certains collègues citent les trous noirs en tant qu'objets célestes, ce qui les amène à développer un peu les idées de forces de marées et de déformation de l'espace-temps. De plus, il est possible de parler d'observations et de

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

technologies récentes, comme par exemple l'optique adaptative, l'interférométrie ou les simulations numériques. Cette matière peut être couverte autant en 1M qu'en 1C. Enfin, ce voyage se prête tout à fait à l'introduction des quatre forces fondamentales (interactions gravitationnelle et électromagnétique, forces nucléaires forte et faible), du domaine du modèle standard de la physique des particules, et de la relativité générale. La relativité einsteinienne est aussi souvent évoquée en cours de mécanique, de manière à la différencier de la relativité galiléo-newtonienne. De plus, différence est faite en certains cas entre masse inerte et masse grave, en utilisant la relativité générale comme cadre.

La définition des unités standards de mesure permet aussi de faire un détour par les technologies modernes (comme le laser, par exemple), et d'évoquer des phénomènes contre-intuitifs, comme la dilatation du temps en relativité. Cette approche a été choisie par un enseignant en classe de 1C. L'intérêt des élèves a été relevé, de même, d'un autre côté, que la relative frustration de l'enseignant et des élèves face à l'impossibilité de se lancer dans les détails théoriques.

Plusieurs enseignants interrogés rapportent donc un certain nombre d'expériences avec la physique moderne, mais toujours de manière très phénoménologique, et sans forcément prévoir ni exercices, ni évaluations notées. Ce mode de fonctionnement se rapporte ainsi plus à une forme d'exposé, qu'à un cours scolaire. Il a le désavantage, dans un système visant fortement l'évaluation, de n'être que difficilement évaluable (en termes d'apprentissages des élèves), mais permet justement d'introduire des concepts plus en lien avec la science et la technologie moderne, suscitant de ce fait probablement un intérêt accru chez les élèves.

Ainsi, certains rapportent des présentations ponctuelles de cosmologie (théorie du Big Bang, évolution future de l'Univers avec la loi de Hubble), de relativité (paradoxe des jumeaux, dilatation du temps et contraction des longueurs, équivalence masse-énergie², avec la possibilité d'utiliser des animations informatiques), ou encore de physique quantique (dualité ondes-corpules, principe de Heisenberg, effet tunnel). Dans le même genre d'idées, des études d'articles récents de magazines de vulgarisation scientifique ont été soumises à des élèves, afin de les lier à des aspects concrets et actuels de recherche scientifique.

Pour en terminer avec les expériences faites en classes de première année, le domaine de l'astrophysique est cité par un enseignant qui présente à ses élèves l'observation spectrale des

² Sur ce sujet, deux enseignants au moins rapportent proposer des exercices calculatoires à leurs élèves, en particulier dans des chapitres liés à l'énergie et à la radioactivité, à la fission et à la fusion nucléaire, ainsi que certains calculs de quantités de mouvements relativistes.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

étoiles, ce qui amène à la question des spectres atomiques, de niveaux d'énergies électroniques (mécanique quantique) et toute la technologie moderne utilisant la spectroscopie³. Cependant, cette activité n'a pas été utilisée à des fins d'évaluation, ni formative avec des exercices, ni notée.

3.2.3 Deuxième année de gymnase

Le programme de deuxième année laisse aussi la place à quelques incursions dans les domaines modernes de la physique. Ce programme étant plus libre, chaque enseignant choisissant le fil conducteur pour son cours, différentes approches ont été repérées parmi les questionnaires reçus. L'étude de la physique nucléaire, et de l'énergie en particulier, permet de parler, à nouveau pour certains, de particules (par exemple pour expliquer la désintégration β^-), d'équivalence masse-énergie (relativité avec la fameuse formule $E = mc^2$) et de réactions nucléaires, dans le cadre de la fusion et de la fission nucléaire. Le domaine de la radioactivité est aussi étudié par plusieurs enseignants, et peut, si le matériel le permet, déboucher sur des séances de travaux pratiques, qui mettent en évidence l'aspect statistique de ce phénomène. Une grande partie de ces chapitres est présentée de manière phénoménologique, avec seulement certains exercices mettant en pratique des calculs de défauts de masse, des réactions nucléaires, etc. En lien avec ce qui précède, mais sous un aspect plus technologique et lié à la problématique de l'énergie, un enseignant rapporte la description du principe de fonctionnement général du projet ITER (fusion nucléaire) et de centrales nucléaires (fission), sans calculs sur les réactions, ainsi qu'une vue générale du fonctionnement des cellules solaires, sans détail sur le fonctionnement des semi-conducteurs. Ce même enseignant propose des séances de travaux pratiques utilisant des transistors et traitant du principe général de leur fonctionnement.

En choisissant un programme basé sur l'astrophysique, une enseignante est chaque année amenée à parler d'objets célestes découverts dernièrement, comme par exemple les trous noirs. Ces objets fascinent les élèves, ce qui débouche sur des discussions à propos de la déformation de l'espace-temps, voire de lentilles gravitationnelles pour les classes les plus motivées. D'autres, qui étudient les ondes, présentent la théorie du corps noir, les phénomènes de diffraction (qui, couplés à d'autres effets, permet de présenter la dualité ondes-corpuscules) avec les ondelettes de Huygens, ou encore l'effet Cherenkov, en analogie avec l'effet Doppler

³ Ce chapitre est aussi présenté en deuxième année, suivant l'enseignant, avec quelques calculs de longueur d'onde de la lumière émise lorsqu'un électron passe d'une couche à une autre, dans le modèle de l'atome d'hydrogène.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

(cet enseignant a noté la surprise des élèves de savoir que quelque chose pouvait se déplacer plus vite que la vitesse de la lumière dans un milieu donné). Un autre exemple, du côté de l'électromagnétisme, est donné par une enseignante qui présente le concept de spin afin de pouvoir aborder clairement le magnétisme dans la matière.

Pour résumer le problème soulevé par l'approche de la physique moderne dans le programme gymnasial, voici la citation de l'un des enseignants questionnés :

« Le seul souci que je me fais (en plus du temps que ça va prendre), c'est que dans la plupart des cas, on ne pourra rester que dans le domaine phénoménologique, car les difficultés théoriques deviennent vite ingérables pour les élèves (en tout cas, pour ceux en DF). »

Cette citation met bien avant les deux problèmes le plus souvent évoqués, qui sont le temps nécessaire à présenter de tels sujets, ainsi que les contraintes imposées par ces théories hautement sophistiquées. Les élèves n'ont en effet pas le niveau pour s'aventurer trop avant dans les théories de physique moderne, surtout pas en première année, mais difficilement aussi en deuxième et troisième année. Malgré ceci, plusieurs enseignants qui débutent leur carrière au gymnase, et qui affirment ne pas, ou très peu, présenter de physique moderne à leurs classes de première ou deuxième années actuellement, émettent le désir de passer plus de temps sur ces sujets modernes, principalement avec des classes de deuxième année en option spécifique.

Il est encore à noter que des semaines spéciales (par exemple dans le cadre de l'année Einstein en 2005) et des cours facultatifs sont organisés sur des thèmes comme la relativité, l'effet photoélectrique, l'astronomie et l'astrophysique (où des sujets de cosmologie peuvent être traités), etc. Ces cours spéciaux ne sont pas forcément uniquement présentés sous forme phénoménologique, mais peuvent entrer dans quelques détails théoriques, les participants étant motivés à suivre le cours.

3.3 Que se passe-t-il ailleurs ?

Il est difficile de se faire une idée des programmes qui sont suivis à l'étranger. Certes, il est possible de se renseigner sur le contenu des plans d'études, mais ceci ne renseigne en aucun cas sur les pratiques réelles. Par exemple, une recherche sur Internet mène rapidement au plan d'études tessinois (UIMS, 2009), qui propose pour les élèves de troisième année, des cours de

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

physique comprenant, entre autres sujets, la structure atomique de la matière, la spectrométrie, le noyau et les particules subatomiques, ou encore la dualité onde-corpuscule. Cependant, il est tout à fait envisageable, ces sujets faisant partie d'une longue liste, qu'ils ne soient traités par les enseignants uniquement s'ils en ont le temps. Le programme de l'option complémentaire suggère lui l'étude du comportement des particules élémentaires, ainsi que des interactions nucléaires. L'option spécifique programme, quant à elle, de l'astronomie avec un voyage du microscopique au macroscopique avec, entre autres, la loi de Hubble, le fond de rayonnement diffus, les modèles d'univers, ainsi que la relativité.

En Belgique francophone, le plan d'études ne fait que brièvement mention, sous la forme d'une approche historique, des modèles atomiques, des particules élémentaires, ainsi que de la relativité restreinte (MCF, 2001).

En France, le programme de physique de terminale S (3ème année de gymnase, section scientifique) laisse la place à des chapitres sur les lasers (principe de fonctionnement), la radioactivité, une ouverture au monde quantique ou encore de la spectroscopie (CNDP, 2002). Dans le programme de 1989 (Fontaine, Paul & Tomasino, 1989), on trouve de plus un chapitre de physique atomique et nucléaire qui débute par une section sur les particules de grande énergie. L'approche est historique et il est question d'accélération, ainsi que de détection de particules de haute énergie, suivi d'éléments de mécanique relativiste et de l'étude de collisions de particules de grande énergie. Il n'est cependant pas possible ici de dire ce qui est effectivement, ou a été, fait en classe avec les élèves.

D'autres ressources sont disponibles pour un enseignement de la physique des particules au gymnase. Ainsi, le site Internet du CERN héberge une page intitulée *High School Teachers (HST) at CERN* (HST at CERN, 2010), autrement dit une page destinée aux enseignants du secondaire II du monde entier, dont le but est de documenter le travail effectué par les participants au programme HST et de récolter du matériel utile pour des activités en classe et l'éducation publique en physique. Cette page donne accès à du matériel, principalement en anglais, concernant les accélérateurs de particules, les différents types de détecteurs et les expériences en cours. Il est aussi question d'une approche simple aux diagrammes de Feynman (dont il sera question à la Section 4.1, ainsi que dans l'Annexe B.5). Une multitude d'autres liens permettent d'accéder facilement à du matériel didactique sur le sujet. Finalement, le site propose aussi un programme de rencontres entre enseignants au secondaire II du monde entier, le programme HST, afin de développer des idées pour faciliter

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

l'enseignement de cette matière. Ce programme, tenu chaque année durant trois semaines en été, est financé en partie par le CERN. Il y a là, à n'en pas douter, une mine d'informations d'une grande richesse dont chacun peut profiter à sa guise.

4. De la physique des particules au gymnase ?

Deux constats importants doivent ici être faits, sur lesquels pourra se construire la suite de la réflexion. Tout d'abord, il est évident que tant que les enseignants ressentiront la pression du programme, tel qu'il est écrit actuellement, peu pourra être fait pour sortir du cadre classique et présenter la physique moderne aux élèves. Il a certes été vu que certains enseignants présentent des sujets actuels (ou du moins récents), mais dans la plupart des cas, ceci est fait sous forme de présentations annexes, de manière phénoménologique, lorsque l'enseignant trouve le temps de le faire. Il faut, pour voir un vrai changement, que les enseignants profitent du peu de liberté qui leur est laissé sous la forme de sujets libres enseignables aux classes de 2M DF et de 2 et 3 OSPM⁴. Il est donc important que la séquence de physique moderne soit prévue dans le programme, qu'un certain nombre de périodes lui soit consacré, et non qu'elle ne serve qu'à remplir les trous après une évaluation ou en fin d'année. Concernant le public cible, il y a un conflit entre les capacités des élèves et leur proximité aux examens. Les élèves de 3OSPM, avec le bagage physique accumulé durant les deux premières années, sembleraient être les mieux placés pour bénéficier d'une telle nouveauté. Cependant, les examens de fin d'année, qui sont les mêmes pour les quelques classes de 3OSPM de l'établissement (deux classes au Gymnase de Nyon), exigent une certaine uniformité au niveau du programme. Pour les élèves de deuxième année, le problème se situe plus au niveau du contenu. Il est effectivement nécessaire d'avoir une bonne connaissance de la physique classique, avant de s'attaquer aux théories récentes (le développement de la physique ne s'est pas fait dans ce sens par hasard).

Le deuxième constat important est que bon nombre d'élèves ont des lacunes en mathématiques, ou en tout cas n'ont pas le bagage leur permettant d'aborder les théories actuelles, sophistiquées. Ainsi, les chapitres choisis en physique moderne doivent être en adéquation avec ce fait et ne pas présenter de techniques mathématiques qui constitueraient des difficultés insurmontables aux élèves. C'est aussi ce que rapporte le Professeur Olivier Schneider, du Laboratoire de Physique des Hautes Énergies de l'EPFL⁵. Au niveau des étudiants en première année d'EPFL, il affirme que « les difficultés rencontrées par les élèves sont parfois énormes, malgré leur motivation ». Il précise que « le calcul oral est très lacunaire chez beaucoup d'étudiants. La rigueur mathématique manque également. Le calcul algébrique

⁴ Dans le programme, ceci apparaît sous le titre « Autre... » ou « Autre sujet » dans une liste de sujets à choix en plus des sujets imposés.

⁵ L'intégralité de l'entretien avec le professeur Schneider est retranscrite en Annexe C.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

n'est pas toujours maîtrisé. Il manque aussi des bases mathématiques à certains étudiants, surtout ceux qui ont fait des options non scientifiques au gymnase ». Cependant, ces problèmes d'ordre mathématiques ne sont pas les seuls à poser des difficultés. « Je suis souvent surpris par la difficulté que les étudiants ont en général avec l'écrit, même les étudiants de langue maternelle française. Ils ont de la peine à comprendre le texte d'une donnée d'examen. On dirait qu'il manque à ces étudiants une rigueur de lecture. Et quand on leur demande d'écrire une explication ou un raisonnement, c'est souvent décevant ». Les problèmes qui sont observés en première année d'EPFL proviennent bien entendu des études précédentes et le même genre de constats peut être fait au gymnase. Cependant, et sans se limiter aux concepts phénoménologiques, il est possible de faire de la théorie avec les élèves du gymnase.

C'est le but de la première section ci-dessous que de mettre en lumière les possibilités au niveau théorique. La deuxième section tentera de présenter les expériences en lien avec la physique des particules, et qui peuvent être proposées durant les séances de travaux pratiques. Finalement, la troisième section traitera des activités extrascolaires (visites) qui peuvent être envisagées dans ce domaine.

4.1 Théorie de physique des particules

Les difficultés au niveau des mathématiques impliquent donc que les sujets choisis doivent être traités de manière phénoménologique, ou au plus de manière théorique n'exigeant pas un niveau supérieur à celui des élèves de deuxième ou troisième année. Cela limite bien entendu beaucoup l'approche. Voici pourtant quelques pistes qui pourraient être suivies. Elles sont tirées du cours d'introduction à la physique nucléaire et corpusculaire du Professeur Olivier Schneider (Schneider, 2002 ; voir aussi Collot, 2006).

Comme présenté au chapitre précédent concernant les sujets de physique moderne qui sont actuellement traités au gymnase, un certain nombre d'enseignants de physique présentent, durant leurs cours de physique, même en discipline fondamentale, la zoologie des particules. Durant ces cours, ils parlent en fait principalement de la structure de la matière en couvrant les connaissances actuelles, de l'atome aux quarks (up et down, avec mention de l'existence des quatre autres quarks, charm, strange, top et bottom), en passant par le noyau atomique, les électrons, les protons et les neutrons. Ce cours d'introduction couvre en général aussi les interactions fondamentales, que sont l'interaction gravitationnelle, les forces nucléaires forte

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

et faible et l'interaction électromagnétique. Mais le voyage dans la matière s'arrête en général ici. Il est possible d'aller un peu plus loin, tout en restant à un niveau d'abstraction acceptable pour des gymnasiens.

Le but de cette partie de cours (c.f. Annexe B.1) serait de montrer comment on est parvenu à la conception qui prévaut actuellement concernant la structure ultime de la matière. Ceci se ferait de manière historique, en présentant les situations de conflits entre théorie et expérience auxquels les chercheurs se retrouvèrent confrontés. Cette approche est de plus en accord avec le plan d'étude, qui encourage un tel cheminement. En continuant l'historique des découvertes, donc, il serait possible de passer en revue les leptons, y compris les neutrinos, ainsi que les quarks, des up et down aux top et bottom, antiparticules comprises.

Afin d'avoir une vision plus complète du panorama de la matière au niveau microscopique, il s'agit encore de présenter les forces responsables des interactions entre une ou plusieurs de ces particules (c.f. Annexe B.2). Cette partie du cours permet de faire des liens directs avec ce qui aurait été vu en première et en deuxième année, avec la théorie de la gravitation universelle par Newton et l'étude de l'électromagnétisme, conduisant jusqu'aux élégantes équations de Maxwell (qui demandent un certain bagage mathématique pour être introduites de manière formelle, mais qui sont tout de même présentées par des enseignants en deuxième année). Par contre, les deux interactions nucléaires nécessiteraient un peu de théorie, mais qui pourrait être mise en regard à des cours sur la radioactivité, qui sont aussi proposés à certaines classes de deuxième année.

Au niveau de l'enseignement, la présentation de ces interactions fondamentales ne peut pas se faire dans le détail, tant les calculs d'intensité et les concepts (section efficace, largeur de désintégration, etc.) deviennent complexes. Cependant, il est important de présenter aux élèves les différentes interactions et les médiateurs, ainsi que les effets de ces interactions. Ceci peut se faire de manière phénoménologique (en présentant les résultats d'expériences), mais aussi sous forme de réactions, par exemple sous la même forme que celle utilisée pour les réactions nucléaires, dont un exemple est donné en bas de page suivante. L'Annexe B.5 présente une autre forme sous laquelle ces interactions peuvent être présentées, une forme simple et élégante qui est tout à fait abordable par les élèves du gymnase. Cet aspect est aussi mentionné ci-dessous. Une fois encore, ces interactions peuvent aussi être abordées selon une séquence historique, en présentant d'un côté la vision théorique et de l'autre la vision expérimentale.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

Une fois que les six quarks et les six leptons ont été présentés, il est possible d'étudier les règles de composition de ces particules élémentaires pour former les particules observables, comme par exemple les protons, les neutrons et ensuite les atomes (c.f. Annexe B.3). La zoologie continue quelque peu, mais il est possible d'aller plus loin que ce qui est fait habituellement (où, en général, seuls les protons et neutrons, constituants de la matière, sont traités). Les compositions de quarks en baryons et mésons peuvent être présentées de la même manière que les éléments seraient introduits dans un cours de chimie. Il semble difficile d'introduire tous les concepts fondamentaux aux élèves, mais leur faire sentir que les particules s'organisent en groupes est possible. À partir de ces familles de hadrons, et de l'étude des réactions et désintégrations de particules, il est assez direct de parler de lois de conservations (c.f. Annexe B.4). Ceci permet d'ailleurs à nouveau de se rapporter à des thèmes connus en mécanique (conservation de l'énergie) et en électromagnétisme (conservation de la charge électrique), pour autant que ces chapitres aient été traités auparavant. D'autres lois, comme les conservations des nombres baryonique, leptonique, d'étrangeté, etc. pourraient suivre assez naturellement, et sans difficulté insurmontable de la part des élèves. D'autres lois enfin, comme par exemple la conservation de la parité, de l'isospin, etc., semblent moins faciles à introduire au niveau du gymnase et demanderaient probablement un formalisme plus rigoureux pour ce faire.

Une fois que toutes les particules, les interactions fondamentales et les lois de conservations ont été définies, il reste à trouver un bon moyen de représenter ces réactions, ces interactions. Ces réactions peuvent s'écrire en ligne, comme pour une réaction chimique. En prenant l'exemple de la désintégration radioactive β^\pm , on aurait :

$$p \rightarrow n e^+ \overline{\nu_e} \quad \text{et} \quad n \rightarrow p e^- \nu_e$$

Cette notation a l'avantage d'être simple et concise. Cependant, rien n'est indiqué quant au contenu en quarks des différentes particules (qui en contiennent). Une idée, pour un cours au gymnase, serait d'introduire les diagrammes de Feynman (c.f. Annexe B.5) (Schutz, 2000 ; SLAC, 2009 ; 't Hooft & Veltman, 1973). Le but, dans un cours gymnasial, ne serait pas d'introduire le formalisme permettant de calculer les taux de processus électromagnétiques, faibles ou forts, mais simplement de représenter les réactions, et de déterminer les réactions possibles de celles qui violent l'une ou l'autre des lois de conservations. La construction se fait comme un puzzle, en utilisant les pièces adéquates, qui permettent de vérifier les lois de conservation, tout en ayant les bons produits initiaux et finaux. Cette tâche ne demande pas de

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

rigueur mathématique, qui fait peut-être défaut aux gymnasiens (ainsi qu'aux universitaires, comme le dit le Professeur Olivier Schneider en Annexe C).

Ainsi que le présente le Professeur Olivier Schneider (c.f. Annexe C), il serait nécessaire, en lien avec ce cours de physique des particules, de présenter aux élèves une introduction aux idées de la mécanique quantique, sous forme vulgarisée, afin qu'ils puissent en saisir l'essence. Ceci permettrait de comprendre plus profondément le fonctionnement des particules étudiées (en introduisant par exemple le spin, l'isospin, la parité, etc.). Des concepts tels que la statistique de Fermi-Dirac, celle de Bose-Einstein, ou encore les relations de Heisenberg ou le principe d'exclusion de Pauli sont primordiaux en physique des particules. Il serait certainement possible, sans utiliser de formalisme trop contraignant pour les élèves, d'apporter les connaissances nécessaires afin de rentrer tout de même dans des calculs de bases concernant des réactions entre particules. Le Professeur Schneider indique aussi que la cosmologie devrait être abordée. Ceci permettrait en effet de relier le monde des particules infiniment petites au monde de l'infiniment grand, en parlant, par exemple, du modèle du Big Bang et de la création de toutes les particules à une période où l'Univers était extrêmement dense et chaud. Ceci permettrait de plus de faire un parallèle avec ce qui est fait au CERN, entre autres expériences de physique des hautes énergies, où les scientifiques tentent de recréer des conditions qui se rapprochent de plus en plus de celles qui prévalaient il y a près de 14 milliards d'années. La cosmologie permettrait aussi de parler de la relativité (restreinte et générale), qui est primordiale lorsque l'on parle du mouvement (collisions, diffusions, ...) de particules subatomiques. Les calculs d'énergie (et d'équivalence masse-énergie), à partir de calcul quadri-vectoriel, la conservation de l'énergie dans une réaction ou une désintégration, ainsi que d'autres considérations cinématiques, pourraient probablement être abordés avec des gymnasiens en fin de 2OSPM, ou en début de 3OSPM, lorsque la pression des examens n'est pas trop élevée (à moins que les plans d'études ne changent). Cependant, ces chapitres sortent du contexte pur de la physique des particules et devraient faire l'objet d'un travail séparé.

Le but d'un tel cours de physique des particules ne serait donc d'aller dans les détails de la théorie. Il s'agirait de présenter aux élèves une autre vision, plus complète et fondamentale que ce qui est fait actuellement en classe. L'Annexe 0 opère cette présentation. En ajoutant les quelques sujets mentionnés ci-dessus, il serait possible de couvrir bon nombre de réactions, interactions et désintégrations. Certaines ont une portée fortement historique et ont changé la vision qui prévalait alors, d'autres sont des sujets de recherches actuels. Des exercices

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

pourraient même être proposés aux élèves afin, par exemple, de trouver le diagramme correspondant à une réaction donnée, ou alors, au contraire, de déterminer si un certain processus serait possible ou non (à la lumière des lois de conservations, et autres règles régissant les interactions fondamentales).

Qu'en est-il de la relevance de l'étude d'une telle branche au gymnase ? Une question qui pourrait se poser est de savoir si un tel sujet ne serait pas trop abstrait pour les élèves. Il est effectivement question de phénomènes inobservables au quotidien, et qui nécessite des expériences extrêmement sophistiquées pour être mis en lumière. Pour reprendre les propos du Professeur Schneider (c.f. Annexe C), la physique moderne devrait avoir sa place au gymnase, mais cette place devrait être modeste. Cependant, il considère que de telles études seraient très utiles pour exciter la curiosité des élèves, pour susciter des vocations et pour comprendre l'importance de la recherche fondamentale dans notre société. Un autre avis émane du Professeur Jean-Marc Lévy-Leblond, physicien et essayiste français, et ancien professeur aux universités de Paris 7 et de Nice. Ce professeur, au cours d'une conférence à la HEP le 17 mai 2010, demandait s'il est nécessaire de présenter la physique moderne aux gymnasiens (ou lycéens français), alors que les enseignants ont déjà tant de peine à leur faire comprendre les concepts de la physique classique. D'un autre côté, il suggère aussi qu'il serait possible d'aborder la physique classique par le biais de la physique moderne, dans le sens que la physique classique peut être vue comme une approximation (par exemple à basse énergie), ou un cas particulier de la physique moderne. Cette approche, bien que séduisante du point de vue scientifique, n'est probablement pas celle qui correspondrait le mieux aux élèves. Pour ceux-ci, il est effectivement plus favorable de construire leurs connaissances en partant de ce qu'ils connaissent déjà (et qui s'apparente plus à la physique classique). De plus, le cheminement de la physique classique à la physique moderne répond à la logique historique (ce n'est pas pour rien que les découvertes ont été faites dans cet ordre-ci et non dans l'ordre inverse).

4.2 Expériences de physique des particules

Il est intéressant et important, au gymnase ainsi que plus tard à l'université / école polytechnique, de pouvoir ancrer les connaissances traitées en cours grâce à des séances de travaux pratiques, des expériences que les élèves peuvent effectuer eux-mêmes. La principale difficulté, dans le cadre de la physique moderne, est d'ordre technologique (et donc financier). La plupart des expériences nécessitent un appareillage lourd, sophistiqué et coûteux. Ceci,

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

conjugué au fait que la physique des particules n'est pas au programme, implique qu'il n'y a généralement pas ou très peu de matériel pour effectuer des expériences de physique moderne au gymnase. En fait, le problème est même plus profond, étant donné qu'il n'y a que très peu de matériel de ce genre disponible sur le marché. L'entreprise américaine Pasco (Pasco, 2010), par exemple, qui propose un grand nombre d'expériences dans tous les domaines, et à laquelle les gymnases recourent largement dans le cadre de l'élaboration de laboratoires de travaux pratiques, ne propose qu'un seul type de matériel concernant la physique moderne. Il s'agit en fait de matériel qui permet d'étudier la radioactivité, sujet à l'interface de la physique classique et de la physique moderne (si l'on s'en tient à la définition chronologique). Le gymnase de Nyon possède un tel matériel, ce qui permet aussi de confronter les élèves à des phénomènes obéissant à des lois statistiques. Dans le courant de cette année, ce même gymnase a aussi acquis du matériel permettant d'étudier l'effet photo-électrique. Mais, comme pour illustrer la difficulté d'aborder la physique moderne par l'expérience, personne n'a encore testé ce matériel et le premier contact a été reporté aux vacances d'été.

La radioactivité mise à part, il semble difficile d'imaginer effectuer une autre expérience de travaux pratiques au gymnase. Le Laboratoire de Physique des Hautes Énergies de l'EPFL propose deux expériences supplémentaires (LPHE, 2007). La première permet d'étudier les rayonnements cosmiques et de mesurer le temps de vie des muons cosmiques. La deuxième expérience, utilisant un accélérateur électrostatique de Van de Graaff, a pour but d'étudier la diffusion de proton sur une cible de carbone et de mettre en évidence la résonance du système $p + {}^{12}\text{C}$ due à l'existence d'un état excité du noyau ${}^{13}\text{N}$. Ces deux expériences sont abordables pour des étudiants en troisième année d'EPFL, mais il semble difficile d'imaginer des gymnasiens travaillant sur de telles manipulations, autant par les connaissances techniques (mathématiques et physiques) qu'elles imposent, que par la dimension et le coût de telles installations.

Une autre possibilité serait d'étudier des photos (par exemple provenant de chambres à bulles) d'interactions entre particules et de reconstruire l'évènement en utilisant les connaissances des conditions de la prise de vue. Ceci s'apparente peut-être plus à de simples exercices qu'à une expérience de travaux pratiques, mais ce principe est déjà utilisé par certains enseignants dans le cadre de travaux pratiques sur la balistique (photo stroboscopique d'un mouvement balistique) ou sur le mouvement circulaire (reconstruire la trajectoire d'un astéroïde donnée sous forme de table numérique). Mais il est donc certain qu'il est difficile d'effectuer de

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

véritables expériences de physique des particules au gymnase, ce qui serait indubitablement un manque pour les élèves.

4.3 Activités extrascolaires dans le cadre de la physique des particules

Les gymnases vaudois ont l'énorme avantage, dans le cadre de la physique des particules, d'être situés proche du temple européen (si ce n'est mondial) de la physique des particules, le CERN (CERN, 2010). L'organisation européenne pour la recherche nucléaire propose des visites gratuites de sites d'expériences et d'infrastructures. Ainsi que l'indique le site Internet des visites, une visite commence par une introduction sur le CERN présentée par un guide, suivie de la projection d'un film et de la visite d'une des expériences et d'un accélérateur en surface. La visite peut ensuite se poursuivre, soit au Globe de la science et de l'innovation, soit à l'exposition Microcosm. C'est une formidable opportunité de rentrer en contact avec la pointe de la recherche dans le domaine. De plus, il est certain que le CERN attire les élèves, ne serait-ce que par ses apparitions dans les médias ces dernières années, concernant une éventuelle fin du monde au démarrage de son nouvel accélérateur, le LHC, ou pour son lien avec le livre grand public, adapté au cinéma, *Anges et Démons*. Ces visites offrent la possibilité d'ancrer un peu plus l'intérêt des élèves pour la physique des particules, en leur montrant l'aspect pratique de ce type de recherches.

Une autre possibilité est offerte à l'Institut Paul Scherrer (PSI, 2010), à Villigen. Cet institut possède aussi un accélérateur de particules et exploite la seule installation suisse permettant le traitement de maladies cancéreuses spécifiques au moyen de proton (protonthérapie). Il est ainsi possible de montrer aux gymnasiens une application plus sociale, ou publique, de la physique des particules, afin de désamorcer les critiques prétendant que la physique de pointe ne sert à rien.

5. Conclusion

La physique moderne, celle qui a été développée durant le XX^{ème} siècle (physique quantique, relativité, physique des particules, etc.) est très peu abordée au gymnase, malgré les décennies qui nous séparent de ces développements scientifiques. Les plans d'études ne prévoient que quelques mises en contact des élèves avec ces théories et/ou phénomènes. Pourtant, il y aurait matière à discuter, étudier, enseigner. Comme le dit le Professeur Olivier Schneider, du Laboratoire de Physique des Hautes Énergies de l'EPFL, leur présenter ces sujets est primordial pour leur faire comprendre les enjeux de la physique moderne et l'importance actuelle de cette science dans la société. La réalité de la classe n'est pas beaucoup plus réjouissante. Certes, plusieurs enseignants ont fait part de sujets de physique moderne traités en classe. Mais cela reste fortement épisodique, souvent confiné aux espaces vides laissés entre deux sujets « importants ». Quelles en sont les raisons ? Il y en a deux, qui ont été évoquées par des enseignants de physique au gymnase : le manque de temps dans un programme chargé (les thèmes modernes ne sont pas mis en avant dans le programme) et les difficultés des élèves face aux aspects théoriques et mathématiques, déjà pour la physique classique, et peut-être d'autant plus pour des sujets modernes. La question est d'ailleurs posée par le Professeur Jean-Marc Lévy-Leblond : « Faut-il faire de la physique moderne alors qu'on a déjà de la peine à faire passer la physique classique aux élèves ? ».

Ce mémoire professionnel s'est intéressé à une branche particulière de la physique moderne, la physique des particules. Le côté théorique de la physique (les équations, les maths) étant si effrayant pour les élèves des gymnases, il est montré que même une branche aussi à la pointe dans le domaine scientifique peut être présentée de manière phénoménologique, ou du moins avec des théories qui ne rebutent pas les élèves moins scientifiques. Une présentation du monde des particules peut être faite en parcourant la zoologie des particules, en étudiant les propriétés de ces corpuscules, en en tirant des lois de conservation et en représentant leurs interactions sous forme schématique, grâce aux diagrammes de Feynman. Une fois les briques de base présentées, la représentation de réactions de particules s'apparente à un simple puzzle (dont les règles de couplage des pièces sont données par les lois de conservation et les principes de fonctionnement des trois interactions fondamentales décrites par le modèle standard de la physique des particules).

Outre les contraintes horaires liées au programme et les difficultés mathématiques des élèves face à des problèmes théoriques, ce mémoire soulève aussi la question des expériences

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

réalisables dans le cadre des séances de travaux pratiques. Il est effectivement difficile de trouver du matériel pour le gymnase à un prix et un niveau technologique abordables. Seul du matériel permettant d'étudier la radioactivité (à l'interface entre physique classique et physique moderne) a pu être trouvé en passant par les filières habituelles. Le Laboratoire de Physique des Hautes Énergies de l'EPFL propose deux autres expériences pour des élèves en troisième année du cycle Bachelor, mais pour lesquelles les besoins matériels vont bien au-delà de ce qui serait réalisable au gymnase.

Finalement, il est aussi question d'activités extrascolaires qui pourraient être faites dans le cadre de la physique des particules. Les gymnases vaudois ont le grand avantage de se trouver à proximité du CERN, le centre de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. Le CERN propose des visites gratuites qui permettent de rentrer en contact avec les expériences à la pointe de la recherche actuelle dans ce domaine. Ceci représente une formidable opportunité pour les élèves d'être confrontés au domaine de la recherche fondamentale.

Y a-t-il de la place pour la physique des particules, et de manière plus générale pour la physique moderne, au gymnase ? Oui, probablement. Et ce serait sûrement une chance et un avantage pour les élèves que d'élargir leur horizon de connaissances, particulièrement en lien avec la recherche scientifique actuelle, qui est très liée à la technologie que les élèves emploient tous les jours. Cependant, cette place doit être planifiée, dans les plans d'études pour commencer. Sans ça, il est certain que les sujets de physique moderne continueront d'être cantonnés aux quelques périodes entre deux chapitres « importants » ou en fin d'année. Il est aussi nécessaire de réfléchir au public cible pour ces sujets, que ce soit en 2OSPM ou en 3OSPM, tout en sachant qu'il serait difficile d'évaluer les élèves lors d'un examen (de par la forme vulgarisée et phénoménologique que les cours prendraient), mais que, d'autre part, le niveau des élèves en mathématiques et en physique devrait être suffisant pour aborder ces sujets sans qu'ils constituent un obstacle infranchissable. Et pour répondre à cette question, de l'expérience pédagogique, dans des classes au gymnase, est nécessaire. Mais quelle est la place laissée à ce genre d'expériences dans l'enseignement gymnasial ?

Références bibliographiques

- Centre national de documentation pédagogique (CNDP) (2002). *Physique, classe de terminale scientifique*. Paris : Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation nationale et de la Recherche. Direction de l'enseignement scolaire.
- Collot, J. (2006). *Cours de physique des particules du master recherche de physique subatomique et d'astroparticule*. Grenoble : Université Joseph Fourier, Université de Savoie.
- Direction Générale de l'Enseignement Postobligatoire (DGEP) (2008). *Plan d'études école cantonale de maturité professionnelle, PEEc MP Vaud*. Lausanne : DFJC – DGEP, Canton de Vaud.
- Direction Générale de l'Enseignement Postobligatoire (DGEP) (2009a). *École de culture générale et de commerce. Répartition horaire des disciplines. Plan d'études. Liste des examens écrits et oraux pour l'année scolaire 2009-2010*. Lausanne : DFJC – DGEP, Canton de Vaud.
- Direction Générale de l'Enseignement Postobligatoire (DGEP) (2009b). *École de maturité. Répartition horaire des disciplines. Plan d'études. Liste des examens écrits et oraux pour l'année scolaire 2009-2010*. Lausanne : DFJC – DGEP, Canton de Vaud.
- Fontaine, G., Paul, J.-C. et Tomasino, A. (1989). *Physique, terminales C.E.* Paris : Nathan.
- High School Teachers (HST) at CERN (2010). *High School Teachers at CERN*. Consulté le 6 juin 2010 dans le site web du programme High School Teachers at CERN de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire : <http://teachers.web.cern.ch/teachers/>
- Laboratoire de Physique des Hautes Énergies (LPHE) (2007). *Travaux pratiques de quatrième année*. Consulté le 7 juin 2010 dans le site web du Laboratoire de Physique des Hautes Énergies : <http://lphe.epfl.ch/fran/enseigne/tp4/>
- Laboratoire de Physique des Hautes Énergies (LPHE) (2010). Site web consulté le 7 juin 2010 : <http://lphe.epfl.ch/>
- Ministère de la Communauté française (MCF) (2001). *Les compétences terminales et savoirs requis en sciences*. Consulté le 6 juin 2010 dans le site web de l'Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, de la Communauté française de Belgique : <http://www.enseignement.be/index.php?page=25189&navi=296>
- Nicolas, L. (2009). *Alignment of the LHCb tracking stations and selection of X(3872) and Z(4430)[±] in pp collisions at 14 TeV*. Thèse de doctorat ès Sciences en Physique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) (2010). *Venez au CERN*. Consulté le 7 juin dans le site web de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire : <http://outreach.web.cern.ch/outreach/fr/visits/>

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

Pasco (2010). *Physics – High School*. Consulté le 7 juin 2010 dans le site web de l'entreprise PASCO :

<http://www.pasco.com/physhigh/index.cfm>

Paul Scherrer Institut (PSI) (2010). *Forschung live erleben am Paul Scherrer Institut*. Consulté le 7 juin dans le site web du Paul Scherrer Institut :

<http://www.psiforum.ch/>

Schneider, O. (2002). *Introduction à la physique nucléaire et corpusculaire*. Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Schutz, Y. (2000). *Diagramme de Feynman*. Consulté le 6 juin 2010 dans le site web du groupe Photons de Subatech, Nantes :

<http://www-subatech.in2p3.fr/~photons/subatech/physics/collisionneurs/node23.html>

SLAC National Accelerator Laboratory (2009). *Feynman Diagrams*. Consulté le 6 juin 2010 dans le site web du SLAC National Accelerator Laboratory :

<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/theory/feynman.html>

't Hooft, G. et Veltman, M. J. G. (1973). *Diagrammar*. Genève : CERN.

Ufficio dell'insegnamento medio superiore, Divisione della scuola (UIMS) (2009). *Piano degli studi liceali*. Bellinzona: Dipartimento dell'istruzione e della cultura, Repubblica e Cantone Ticino.

Wikipedia (2010). *Physique moderne*. Consulté le 6 juin 2010 dans le site web de l'encyclopédie participative en ligne Wikipedia :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Physique_moderne

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Philippe Lo Bello, professeur formateur à la HEP et enseignant de physique au gymnase de Morges, pour la direction de ce mémoire professionnel, ainsi que pour les échanges constructifs qui ont eu lieu durant cette année de cours de didactique de la physique à la HEP et par courriel. Merci pour la bonne humeur, l'ouverture et la sincérité.

Mes remerciements vont aussi au Professeur Olivier Schneider, du Laboratoire de Physique des Hautes Énergies de l'EPFL, pour les quatre ans de doctorat qu'il m'a permis d'effectuer dans son laboratoire, pour le meilleur cours de physique suivi durant mes 9 ans d'études à l'EPFL, ainsi que pour ses réponses sincères à mes questions dans le cadre de ce mémoire.

J'exprime aussi ici ma gratitude envers le Professeur Jean-Marc Lévy-Leblond qui, au travers de sa conférence du 17 mai 2010 à la HEP, m'a donné l'envie d'aller voir plus loin, derrière les connaissances que nous enseignons à nos élèves. Je le remercie pour la clarté de son exposé et pour l'illumination qu'il a créée à propos de certains sujets de physique moderne.

Je voudrais encore remercier mes collègues de la file de physique du gymnase de Nyon pour la collaboration tout au long de cette année de stage, pour leur aide durant certaines périodes difficiles, ainsi que pour les discussions agréables dans la salle de préparation de physique du gymnase.

Mes pensées vont enfin à mes collègues à la HEP, stagiaires en physique, qui ont grandement contribué à faire de cette année une expérience positive.

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 – Récapitulatif des horaires de physique pour les classes d'école de maturité et d'école de commerce et de culture générale.</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 2 – Les particules de matière, quarks et leptons.</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 3 – Récapitulatif des interactions fondamentales.</i>	<i>46</i>

Liste des Figures

<i>Figure 1 – Diagramme de Feynman de la diffusion élastique électron-positon.</i>	<i>49</i>
<i>Figure 2 – Vertex de base de l'interaction électromagnétique dans la représentation de Feynman.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 3 – Vertex de base de l'interaction nucléaire forte dans la représentation de Feynman.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 4 – Vertex d'auto-couplage de gluons dans la représentation de Feynman.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 5 – Deux vertex de base de l'interaction nucléaire faible dans la représentation de Feynman.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 6 – Vertex de l'interaction faible liant les trois bosons vecteurs dans la représentation de Feynman.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 7 – Deux diagrammes de Feynman : (a) diagramme en arbre et (b) diagramme pingouin QCD.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 8 – Diagramme de Feynman en boîte de l'oscillation $B_q - \bar{B}_q$, où $q \in \{d, s\}$.</i>	<i>52</i>

Annexes

A. Différentes branches de la physique moderne

Les chapitres qui suivent traitent brièvement de quelques sujets de physique moderne. Ils sont inspirés des différentes pages y relatives de l'encyclopédie participative en ligne Wikipedia (Wikipedia, 2010).

A.1 Théorie de la relativité

Le principe de relativité stipule que les lois de la physique sont les mêmes dans tout référentiel inertiel⁶. Autrement dit, si deux expérimentateurs répètent la même expérience, dans deux référentiels inertiels différents, les résultats des deux expériences seront identiques. Par contre, l'observation du phénomène dépendra du référentiel de l'observateur. Ce principe était déjà connu du temps de Galilée (1632), pour toutes les lois de la mécanique. En 1905, Albert Einstein élabore une théorie formelle appelée relativité restreinte, où il élargit le domaine d'action du principe de Galilée à toutes les lois physiques, hormis la gravitation. De plus, afin d'être cohérent avec la théorie de l'électromagnétisme de J. C. Maxwell (1864), un autre postulat dit que « la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de la vitesse de sa source », ou, autrement dit, que « la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens ». Puis, en 1915, Albert Einstein, à nouveau, généralise sa théorie et fonde la théorie de la relativité générale. Il y affirme que toutes les lois de la physique sont identiques dans tous les référentiels. Ce principe est accompagné d'un autre, nommé principe d'équivalence. Il stipule que la gravitation est équivalente à une accélération du référentiel. Cette théorie implique certains phénomènes contre-intuitifs, comme la contraction des longueurs, qui désigne le fait que la longueur d'un objet en mouvement est diminuée par rapport à la mesure faite dans le référentiel où l'objet est immobile. De même, la dilatation du temps prédit qu'une horloge se déplaçant à une certaine vitesse par rapport à un autre référentiel verra le temps avancer moins vite qu'une horloge située dans l'autre référentiel. Finalement, en rupture avec la vision newtonienne, la relativité générale explique la gravitation non pas comme une force, mais comme la manifestation d'une courbure de l'espace-temps, due à la distribution de matière dans l'Univers. La théorie de la relativité a aussi mené à des prédictions d'ordre astronomique, avec entre autres le phénomène de lentille

⁶ Un référentiel inertiel, ou galiléen, est un référentiel, ou système de coordonnées de l'espace et du temps, dans lequel un objet soumis à une résultante (somme des forces) externe nulle est soit immobile, soit en mouvement rectiligne uniforme.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

gravitationnelle (la lumière est déviée à proximité d'un objet massif) et les trous noirs, dont l'idée remonte au XVIII^{ème} siècle, mais dont la théorique existence fut en premier lieu publiée par Karl Schwarzschild en tant que solution de l'équation d'Einstein (équation principale de la relativité générale).

A.2 Physique quantique

La physique quantique est la théorie qui décrit le mouvement et les phénomènes fondamentaux des particules à l'échelle atomiques et subatomiques. En ce sens, cette théorie est complémentaire de la physique dite classique, qui décrit les phénomènes à l'échelle macroscopique. Elle est née en 1922 avec le développement de la mécanique quantique. Cependant, la mécanique quantique ne couvrait initialement pas l'étude de particules élémentaires relativistes. Il faudra attendre 1928 et le travail de Paul Adrien Maurice Dirac pour qu'une théorie quantique des champs voie le jour. Dirac complète le travail de ses prédécesseurs et donne une équation qui décrit le mouvement de particules élémentaires relativistes. L'équation de Dirac mènera celui-ci à prédire l'existence de l'antimatière. La théorie quantique est connue pour être contre-intuitive et mathématiquement ardue. Ce point fera dire à Feynman que « personne ne comprend vraiment la physique quantique ». Parmi les exemples de faits et phénomènes décrits par la physique quantique et qui tranchent fondamentalement avec la physique classique, la quantification, par exemple de l'énergie des électrons d'un atome, est à la base de la théorie. La dualité onde-corpuscule dit que la lumière peut se comporter comme une onde ou comme des particules, selon l'expérience considérée. De même, les particules comme l'électron peuvent aussi être considérées comme des ondes. Un autre principe, énoncé par Werner Karl Heisenberg en 1927, et qui porte le nom de théorème d'indétermination de Heisenberg, dit qu'il est fondamentalement impossible de mesurer exactement et simultanément deux grandeurs conjuguées, comme par exemple la position et la vitesse d'une particule.

A.3 Modèle standard de la physique des particules

Le modèle standard de la physique des particules est une théorie qui décrit les particules élémentaires, composantes fondamentales de la matière, et leurs interactions au travers des interactions forte, faible et électromagnétique. Dans ce sens, elle regroupe la théorie électrofaible (qui à son tour englobe la théorie de l'électrodynamique quantique, ou QED) et la chromodynamique quantique (QCD). Cette théorie fut développée entre 1970 et 1973.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

C'est une théorie quantique des champs, qui est par conséquent compatible avec la mécanique quantique et avec la relativité. Les particules élémentaires de cette théorie sont au nombre de 12 pour les constituants de la matière, auxquelles s'ajoutent les 12 antiparticules correspondantes. De plus, chaque interaction fondamentale est « transportée » par une particule, aussi appelée médiateur. Ainsi, l'interaction électromagnétique correspond à l'échange de photons, l'interaction faible à l'échange de bosons-vecteurs, les W^+ , W^- et Z^0 et l'interaction forte à l'échange de l'un ou l'autre des 8 gluons. La physique décrite par le modèle standard est une physique des hautes énergies, dans le sens qu'une majeure partie des particules qu'elle décrit sont instables et donc n'existent pas à l'état naturel. Elles peuvent être observées uniquement lors de collisions à hautes énergies de particules plus stables, comme c'est le cas dans le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) au CERN, ou encore à l'accélérateur de particules KEK, au Japon.

Cette théorie a un grand succès pour décrire les phénomènes observés dans les expériences de physique des particules et aucune mesure expérimentale ne semble devoir le remettre en questions jusqu'à présent. Cependant, le modèle standard n'est pas pour autant considéré comme la théorie complète des particules et de leurs interactions. La première raison à cela est qu'il ne décrit pas l'interaction gravitationnelle, l'une des quatre forces fondamentales. Il faut se tourner du côté de théories de gravitation quantique pour avoir des pistes de théories complètes de ce point de vue-ci. Un autre défaut de la théorie est le nombre élevé de paramètres libres nécessaire à décrire les masses des particules élémentaires et leurs couplages. Ces paramètres, au nombre de 29, ne sont pas prédits par le modèle, mais doivent être fixés « à la main », c'est-à-dire mesurés expérimentalement. De plus, l'hypothétique boson de Higgs, qui doit conférer leur masse aux particules par couplage avec celles-ci, n'a toujours pas été découvert. De grands espoirs reposent sur les expériences actuelles du CERN, comme ATLAS et CMS, et LHCb dans une moindre mesure, pour enfin détecter cette particule. Finalement, les grands mystères de la cosmologie que sont la matière noire et l'énergie sombre ne sont pas non plus décrits par le modèle standard.

A.4 Physique et énergie nucléaires

La physique nucléaire est la science qui décrit le noyau atomique, ainsi que les phénomènes y relatifs. Il s'agit ici premièrement d'élaborer un modèle décrivant la structure du noyau atomique, c'est-à-dire la manière dont les nucléons, protons et neutrons, s'arrangent grâce à l'interaction nucléaire forte pour former le noyau. Cette science prend ses racines dans la

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

découverte de la radioactivité, en 1896 par Henri Becquerel, et dans les études qui suivirent par Marie et Pierre Curie. Elle débute réellement en 1911 lorsque Ernest Rutherford découvre que les atomes ne sont pas indivisibles, qualificatif dont leur nom était tiré, mais qu'ils semblaient être composés d'un noyau dur et petit, entouré à grande distance (relativement à la taille du noyau) par des électrons en orbite.

Outre la structure nucléaire, cette théorie décrit aussi les réactions qui se produisent au sein du noyau atomique, comme par exemple la radioactivité, la fission et la fusion. La fission nucléaire, un noyau lourd se fragmente en plusieurs morceaux, est utilisée à des fins civiles pour la « production » d'énergie électrique dans les centrales nucléaires depuis 1951 (aux États-Unis). Elle est aussi utilisée à des fins militaires avec la construction de bombes atomiques de type A, comme celles qui furent utilisées en 1945 par les États-Unis pour détruire Hiroshima et Nagasaki, au Japon. Elle est aussi utilisée comme énergie de propulsion de sous-marins, porte-avions et vaisseaux spatiaux. La fusion nucléaire, quant à elle, décrit ce qu'il se passe lorsque des noyaux légers fusionnent pour en former un plus lourd. C'est le mode de production énergétique des étoiles, comme le Soleil. Cette énergie a été utilisée dans le cadre militaire pour fabriquer des bombes atomiques de type H, jusqu'à 1000 fois plus énergétiques que les bombes A. La première bombe H explosa en 1952 sur un atoll du pacifique sud, sous la direction des américains. Elle ne fut jamais utilisée dans un conflit armé. Dans le cadre civil, la production d'énergie grâce à la fusion nucléaire n'est pas encore maîtrisée. Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), proposé en 1985 par Mikhaïl Gorbatchev, tentera de répondre à ce manque. Plusieurs petits réacteurs existent, comme par exemple au Centre de Recherche en Physique des Plasmas de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, mais ces réacteurs ne servent qu'à étudier une partie de la réaction globale. La construction du premier véritable réacteur a débuté en 2005 à Cadarache, dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, en France, mais ne devrait pas voir le jour avant 2018 au moins.

A.5 Cosmologie moderne

La cosmologie est l'étude globale de l'Univers, de sa structure, la description de sa formation et de son évolution. On peut faire remonter l'étude scientifique de l'Univers au XVIII^{ème} siècle, lorsque la preuve optique que la Terre n'était pas fixe fut apportée, avec la découverte de l'aberration des étoiles par James Bradley en 1725. C'est à ce moment que la voie scientifique se détache de la cosmologie religieuse. Cependant, on peut parler de cosmologie

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

moderne à partir du moment où Hubble, dans les années 1920, découvrit que ce qui était alors appelé « nébuleuses », était en fait des galaxies hors de notre propre galaxie. L'Univers connu grandit d'un coup, et il continuait son expansion, comme le découvrit aussi Edwin Hubble avec ses observations que les galaxies s'éloignent les unes des autres, d'autant plus vite qu'elles sont éloignées.

Afin de correctement décrire l'univers, en tant que distribution uniforme et infinie (ou en tout cas à très grande échelle), il est indispensable de faire intervenir la relativité générale. Einstein s'attela à cette tâche dès la parution de sa théorie, mais avant que Hubble ne fasse ses découvertes cruciales. Des travaux d'Einstein ressortirent ce qui est appelé le principe cosmologique, qui indique que l'Univers doit être homogène et isotrope. Ce principe, qui n'était alors qu'une hypothèse de travail, fut ensuite étayé par toutes les observations de l'Univers observable et prend une part importante dans tous les modèles cosmologiques actuels. Il venait de plus appuyer la pensée copernicienne comme quoi l'homme n'a pas une position privilégiée dans l'Univers.

L'expansion découverte par Hubble, prise dans le sens chronologique inverse, pose aussi les bases de la théorie actuelle de formation de l'Univers, la théorie du Big Bang, qui dit que l'Univers a débuté sous la forme d'une phase extrêmement dense et chaude. Tous les objets astrophysiques que nous observons aujourd'hui se sont formés durant la phase d'expansion de l'Univers, grâce à des instabilités gravitationnelles. Cette théorie fait remonter l'origine de l'Univers à 13.7 milliards d'années. Le modèle standard de la cosmologie, qui englobe cette théorie, décrit son évolution en fonction de la matière contenue, et de la courbure de l'espace-temps, courbure qui paraît être nulle, c'est-à-dire que la géométrie de l'Univers serait la géométrie usuelle de l'espace. À la suite de certaines observations (accélération de l'expansion de l'univers, incohérence entre vitesse de rotation des galaxies et contenu matériel), il fut aussi déterminé que l'Univers actuel doit être composé à 4 % de matière ordinaire (atomes, molécules, électrons), à 21 % de matière sombre (matière qui n'est pas composée de baryons, mais de particules massives inconnues à ce jour) et à 75 % d'énergie sombre. Cette dernière est une forme inconnue d'énergie, dont l'existence fut postulée en un certain sens par Einstein lorsqu'il introduisit une constante cosmologique dans la solution de ses équations de la relativité générale pour assurer à l'univers d'être statique.

A.6 Astrophysique moderne

L'astrophysique est la branche de l'astronomie qui fait intervenir la physique dans la description des propriétés des objets de l'Univers. Elle regroupe un certain nombre de discipline, comme la cosmologie (traitée au paragraphe précédente), la planétologie (l'étude de la formation et de l'évolution des planètes), l'hélio-sismologie (l'étude des mouvements sismiques du soleil), l'exobiologie (l'étude des conditions pouvant amener la vie à se développer sur une planète dans ou hors du système solaire), ou encore la physique galactique (qui décrit la formation et l'évolution des galaxies).

L'astronomie a toujours existé, aussi loin que remontent les données historiques. Cependant, elle était alors bien séparée de la physique. Aristarque de Samos tenta bien, au III^{ème} siècle avant Jésus-Christ, d'expliquer le mouvement des corps célestes par la rotation des planètes, dont la Terre, autour du Soleil, mais il dut bien vite se rétracter (pour des questions religieuses), et il fallut attendre le XVI^{ème} siècle et Nicolas Copernic pour que l'héliocentrisme reprenne vie. Galilée, Tycho Brahe ou encore Isaac Newton, sont autant de scientifiques qui ont posé les bases de l'astrophysique, en tant que description par la physique du mouvement des planètes. Enfin, l'arrivée de la spectroscopie à la fin du XIX^{ème} siècle, et son développement au début du XX^{ème} siècle (grâce à la physique quantique qui permettait d'expliquer les phénomènes observés), lança une nouvelle ère d'observation de l'Univers et de ses composantes.

L'astrophysique moderne utilise en grande partie des principes d'observation liés au spectre électromagnétique. Plusieurs branches d'observations ont vu le jour, qui utilisent tantôt les ondes radio (radioastronomie), le rayonnement infrarouge, la lumière visible, ou encore les rayonnements de haute énergie, comme les ultraviolets, les rayons X, ou encore les rayons gamma. Chacun de ces modes d'observation a permis la découverte d'un certain nombre d'objets célestes, comme par exemple les quasars (noyaux actifs de galaxies très éloignées), les pulsars (étoile à neutron tournant rapidement sur elle-même et émettant un faisceau de rayonnement électromagnétique), les trous noirs, etc. Afin de pouvoir mener à bien ces observations, un certain nombre d'outils furent développés durant le siècle dernier. Des radiotélescopes géants aux télescopes spatiaux, en passant par l'optique adaptative utilisée sur des réseaux de télescopes terrestres, des avancées technologiques impressionnantes furent réalisées.

A.7 Technologie

Chacun des domaines de physique moderne qui ont été présentés ci-dessus est accompagné d'un certain nombre d'avancées dans le domaine technologique. À côté de la technologie développée dans le domaine de l'observation spatiale, la technologie des matériaux fit aussi un grand pas en avant (avec l'introduction par exemple du Kevlar, en 1965 par la société Du Pont de Nemours, et d'autres fibres similaires, qui ont joué un rôle important dans le succès des missions Apollo). Les avancées en physique nucléaire permirent la création de centrales nucléaires, ainsi, malheureusement, que de bombes atomiques. Les besoins énormes dans le domaine de la communication pour les expériences de physique des particules permirent la venue au monde du World Wide Web, ou www, inventé par Tim Berners-Lee du CERN en 1991. La physique quantique apporta aussi son lot d'applications technologiques. Le laser, dont le principe est décrit dès 1917 par Einstein, et dont le procédé fut décrit en 1950 par Alfred Kastler, vit le jour en 1960, grâce à Théodore Maiman. Ce procédé utilise directement la quantification au centre de la mécanique quantique, et plus précisément les niveaux d'énergie occupés par les électrons des atomes. De même, les ordinateurs quantiques, ainsi que la cryptographie quantique utilisent les phénomènes d'intrication et de superposition d'états quantiques.

B. Théorie de physique des particules

Les paragraphes qui suivent présentent les sujets théoriques auxquels se réfèrent les commentaires de la Section 4.1 (Schneider, 2002 ; voir aussi Collot, 2006).

B.1 Particules élémentaires

La matière est composée d'atomes, ce qui avait déjà été spéculé par Démocrite dans l'antiquité. Ces atomes sont tous construits à partir d'un noyau atomique et d'un nombre bien défini d'électrons, comme découvert par Rutherford en 1912. Chaque noyau atomique est composé de protons, en même nombre que les électrons pour un atome neutre, et de neutrons, que découvrit Chadwick en 1932, en nombre qui peut varier, formant ainsi différents isotopes du même élément chimique. À force d'observer des collisions entre des atomes et des projectiles de plus en plus rapides, les physiciens se sont rendus compte que ces protons et neutrons, qui forment la famille des nucléons, sont chacun formés de quarks, de deux sortes différentes : les quarks u (pour up) et d (pour down). Avec les électrons, ils forment la famille des particules élémentaires à la base de toute la matière qui nous entoure. Élémentaire veut dire ici que, dans l'état actuel des connaissances, il semblerait que ces particules ne soient pas elles-mêmes composées de briques plus petites. L'observation de collisions à haute énergie a révélé l'existence d'une quantité d'autres objets (plusieurs centaines) que les protons, les neutrons ou les électrons. Au fil des découvertes, les physiciens ont mis en évidence l'existence des muons, découverts en 1938, des neutrinos, dont l'existence avait été envisagée dans les années 1930 par Pauli pour expliquer la nature continue du spectre des électrons émis dans les désintégration β , ainsi que de l'antimatière, et par exemple le positon observé en 1933 par Anderson et Milikan, mais postulé déjà en 1931 par Dirac en tant que solution d'énergie négative de l'équation qui porte son nom. Muons et neutrinos, avec les électrons, forment la famille des leptons. Une porte s'ouvre ainsi sur une autre facette de la physique des particules, celle des particules instables, qui ne composent pas directement la matière qui nous entoure. À partir d'autres observations et d'arguments de symétries, par exemple, entre les familles de quarks et de leptons, les physiciens ont ainsi pu reconstruire les grandes familles des particules, composées de 6 quarks, de 6 leptons, ainsi que des 12 antiparticules

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

correspondantes. Ces particules élémentaires sont présentées dans le Tableau 2, avec leur charge électrique, l'une des propriétés caractéristiques des particules⁷.

Tableau 2 – Les particules de matière, quarks et leptons. Chaque particule est accompagnée de son antiparticule.

Famille	Charge électrique	1 ^{ère} génération	2 ^{ème} génération	3 ^{ème} génération
Quarks	2/3	u	s	t
	-1/3	d	c	b
Leptons	-1	e	μ	τ
	0	ν_e	ν_μ	ν_τ

B.2 Forces fondamentales

Une fois les particules élémentaires définies, il s'agit encore de présenter les forces responsables des interactions entre une ou plusieurs de ces particules. Le modèle standard de physique des particules décrit les interactions électromagnétique, nucléaires forte et faible. Il s'agit donc ici de préciser quelles particules peuvent interagir ensemble, sous l'action de quelle force et au travers de quel médiateur.

La première interaction est celle traitée par la théorie de l'électrodynamique quantique. L'interaction électromagnétique agit à distance grâce à l'échange de photons. Cette force lie les particules chargées électriquement entre elles, de telle sorte que les particules dont les charges électriques sont de mêmes signes se repoussent, et celles qui ont des charges de signes opposés s'attirent. Il s'agit donc de rajouter aux particules précédemment présentées la propriété de la charge électrique (voir Tableau 2). Par convention, l'électron et le proton ont des charges entières, le proton étant chargé positivement et l'électron chargé négativement. Les quarks ont des charges électriques fractionnaires et les neutrinos sont neutres, comme leur nom l'indique. Le photon, médiateur de l'interaction électromagnétique, est une particule⁸ sans masse et neutre. De ce fait, elle n'interagit pas directement avec elle-même. Cette interaction est responsable de la cohésion de l'atome, les électrons, chargés négativement, étant liés aux noyaux atomiques chargés positivement.

⁷ Il est à noter que, bien que la masse est aussi une propriété caractéristique des particules, en pratique, la masse des quarks n'est pas facile à connaître, ni même à définir.

⁸ En fait, ainsi que le définit la dualité onde-corpuscule, le photon, et chacune des particules élémentaires, peut être vue autant comme une particule que comme une onde, suivant la situation, le phénomène étudié. Il est certes important de parler de ce fait étonnant, mais il est plus facile ici de parler de particules que d'ondes.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

La chromodynamique quantique, qui fait aussi partie du modèle standard de la physique des particules, traite de l'interaction nucléaire forte. Cette force est responsable de la cohésion des nucléons (protons et neutrons), c'est-à-dire qu'elle lie les quarks entre eux. De même, elle assure aux noyaux atomiques une certaine stabilité. De fait, si seule l'interaction électromagnétique agissait, alors les protons du noyau se repousseraient et la matière que nous connaissons ne pourrait pas exister. À nouveau, une propriété des particules peut être ajoutée. Il s'agit de la charge de couleur (rouge, bleu ou vert), qui est responsable de l'interaction, et l'interaction forte est aussi nommée force de couleur. Le médiateur de cette force et le gluon, qui est aussi sans masse. Contrairement au photon qui ne portait pas de charge électrique, le gluon porte une charge de couleur, ce qui fait qu'il peut interagir avec lui-même. En fait, il porte une couleur et une anticouleur. En étudiant toutes les combinaisons possibles, on s'aperçoit qu'il y en a 8 qui sont effectivement colorées et il y a donc 8 gluons différents. Chacun des quarks porte une des trois couleurs, et un antiquark porte une anticouleur. Les leptons ne portent pas de charge de couleur. Lorsqu'un quark et un gluon interagissent, le quark peut changer de couleur. Par contre, il ne peut pas changer de saveur, de type (u, d, s, etc.). Dans la nature, une particule observable ne peut pas être colorée. Cela implique qu'un quark ne peut jamais se trouver seul, mais les quarks se combinent en d'autres particules, afin que, en additionnant les couleurs, on retrouve une particule incolore (de la même manière qu'en ajoutant des rayons de lumière vert, bleu et rouge, on retrouve de la lumière blanche, ou encore en ajoutant de la lumière verte avec sa couleur complémentaire, le magenta). La force forte n'agit qu'à très courte distance, typiquement de l'ordre de la taille d'un noyau atomique (un femtomètre). Lorsque deux quarks s'éloignent l'un de l'autre, l'intensité de la force forte s'accroît, de telle sorte que les quarks sont attirés l'un vers l'autre. Ceci s'appelle le confinement des quarks. Par contre, deux quarks très proches l'un de l'autre sont relativement libre, profitant de ce qui s'appelle la liberté asymptotique. Lorsqu'un quark a suffisamment d'énergie pour s'échapper de la zone de portée de l'interaction forte, l'énergie transportée par ce quark se transforme en une paire de quarks, de telle sorte que chacun des deux quarks initiaux reste accompagné.

La dernière force qui est décrite par le modèle standard de physique des particules est l'interaction faible. C'est la force qui est responsable de certaines formes de radioactivité, comme la radioactivité β durant laquelle un proton d'un noyau atomique est transformé en un neutron en émettant un positon et un neutrino électronique, ou alors un neutron est transformé en un proton en émettant un électron et un antineutrino électronique. L'interaction faible est

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

aussi médiée par une particule, qui peut être le W^+ , le W^- ou le Z^0 . Ces médiateurs, contrairement à ceux présentés précédemment, sont très massifs, ce qui implique la très courte portée de cette interaction. Cette interaction permet de coupler les quarks aux leptons. Lors d'une interaction faible, les médiateurs de cette force permettent le changement de saveur des quarks, sans changement de couleur (ce qui est donc l'inverse des gluons). De plus, si la particule échangée est chargée, l'effet est que la charge électrique des particules en interaction est échangée. Par contre, si le médiateur est neutre, les charges électriques sont conservées.

La quatrième interaction fondamentale, la gravitation, n'est par contre pas décrite pas le modèle standard. Il se trouve qu'au niveau des particules élémentaires, l'effet de cette force est extrêmement plus faible que celui des trois autres (10^{32} fois plus faible que l'interaction faible). Le Tableau 3 récapitule les informations données ci-dessus à propos des quatre forces fondamentales.

Tableau 3 – Récapitulatif des interactions fondamentales avec le médiateur, l'intensité relative (interaction forte prise comme référence) et la portée.

Interaction	Médiateur	Intensité relative	Portée [m]
Nucléaire forte	Gluons (8) : g	1	10^{-15}
Électromagnétique	Photon : γ	10^{-2}	∞
Nucléaire faible	W^\pm, Z^0	10^{-8}	10^{-17}
Gravitationnelle	Graviton?	10^{-40}	∞

B.3 Modèle des quarks

Dès 1932, il a été remarqué que le neutron et le proton sont similaires, ont une petite différence de masse et un rôle équivalent dans la constitution du noyau. Ce fait a conduit à formuler le principe d'indépendance de charge des forces nucléaires. Si les nucléons sont dans le même état quantique, alors l'interaction entre deux protons, deux neutrons ou un proton et un neutron est la même. De la même manière que pour les nucléons, il a été découvert que les trois pions (π^+ , π^- et π^0) se comportent de manière similaire. En fait, toutes les particules connues alors, qui ne faisaient intervenir que les trois quarks (u , d , s) découverts jusque là, peuvent être classées en supermultiplets, des groupes de particules ayant les mêmes nombres quantiques (spin, parité et nombre baryonique, qui sera traité dans la section suivante), et s'organisent de manière régulière dans ces groupes, selon leur isospin et leur hypercharge⁹.

⁹ L'hypercharge d'une particule, Y , est définie à partir de sa charge électrique Q et de la troisième composante de l'isospin I_3 : - .

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

Sur cette base-ci, Gell-Mann et Zweig ont proposé, pour expliquer ces structures, un triplet de quarks formant l'ensemble des hadrons connus. Par la suite, une troisième famille de lepton (le τ) et trois autres quarks (le c , le b et le t) furent découverts. Ces quarks s'organisent alors selon une structure simple : ils peuvent former des groupes de trois quarks ou de trois antiquarks (l'un étant l'antiparticule de l'autre), ou alors des groupes d'un quark et d'un antiquark. Les premiers s'appellent les baryons (ou antibaryons) et les seconds forment la famille des mésons (et antimésons). Ces particules composées de quarks doivent être incolores, ce qui veut dire que les trois quarks d'un baryon portent chacun l'une des trois couleurs, et que le quark d'un méson porte une couleur, alors que l'antiquark porte l'anticouleur correspondante.

B.4 Lois de conservation

L'étude des réactions et désintégrations de particules a permis de mettre en lumière un certain nombre de grandeurs qui doivent être conservées dans de telles interactions. Tout d'abord, l'énergie et l'impulsion doivent être conservées, ce qui est valable en physique des particules aussi bien qu'en mécanique générale. La première fait cependant intervenir des concepts de la relativité d'Einstein, comme l'équivalence masse-énergie, et du calcul quadri-vectoriel.

Une autre loi de conservation très forte est la conservation de la charge électrique q . Dans toutes les réactions qui peuvent être imaginées, seules sont possibles celles où la charge électrique totale avant et après réaction sont égales. Il est à noter que la combinaison de trois quarks, ou de trois antiquarks, pour former un baryon, ou un antibaryon, possède une charge électrique entière, qui peut prendre une valeur entre -2 et $+2$. De même, la combinaison d'un quark et d'un antiquark pour former un méson, ou un antiméson, possède une charge électrique entière, entre -1 et $+1$.

Il a aussi été observé que le nombre de nucléon dans une réaction est conservé. Ce fait a poussé l'introduction du nombre baryonique B , qui vaut $+1$ pour les baryons (comme par exemple les protons et les neutrons) et -1 pour les antibaryons. Les mésons ont un nombre baryonique nul, de même que tous les leptons. Pour faire le lien avec la section précédente, il est possible de donner un nombre baryonique aux quarks eux-mêmes, qui vaut $+1/3$ pour les quarks et $-1/3$ pour les antiquarks. Le modèle des quarks peut alors être reformulé tel qu'une particule ne peut exister que si son nombre baryonique est compris dans l'ensemble $\{-1, 0, +1\}$. Toutes les interactions connues conservent le nombre baryonique, et une interaction

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

n'est possible que si ce nombre est conservé (c'est-à-dire que la somme des nombres baryoniques de l'état initial doit être égale à la somme des nombre baryonique de l'état final).

Les leptons possèdent eux aussi une propriété qui leur est propre, et qui est appelée nombre leptonique. Ce nombre vaut +1 pour les leptons et -1 pour les antileptons. De plus, ce nombre se décline en trois saveurs : les nombres leptoniques électronique L_e , muonique L_μ et taunique L_τ . Dans une réaction entre différentes particules, le nombre leptonique total est conservé. De même, la quasi-totalité des réactions connues conservent chacun des nombres leptoniques partiels individuellement. La seule exception connue à ce jour est l'oscillation des neutrinos, qui fait l'objet de recherches actuelles.

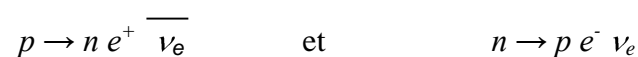
Les nombres leptoniques et baryoniques sont toujours conservés. Des recherches actuelles tentent de découvrir la désintégration leptonique du proton. Cette découverte serait le signe de non-conservation de ces deux nombres. Cependant, cette désintégration n'a jamais été observée à ce jour. Ceci implique que le proton doit avoir une période de demi-vie supérieure à 10^{30} ans. Les lois de conservations ci-dessus permettent d'expliquer pourquoi certaines réactions sont possibles, alors que d'autres n'ont jamais été observées.

A part lors d'interactions impliquant la force faible, qui peut changer la saveur des quarks, il a été observé que le nombre de quarks des deuxième et troisième générations sont aussi conservés. De nouvelles propriétés ont donc été introduites. L'étrangeté S indique le nombre de quarks étranges contenus dans l'état initial ou final de la réaction. De même, le charme C , la beauté B et la « topité », ou « sommitalité » T peuvent être définies. Ces nombres sont aussi additifs (dans les états initiaux et finaux) et doivent être conservés dans toute réaction qui ne fait pas intervenir l'interaction faible (qui peut changer la saveur des quarks).

D'autres lois de conservations sont connues, comme par exemple la parité, l'isospin, etc., mais elles demandent un formalisme plus rigoureux pour pouvoir être introduites ici et, de ce fait, sortent du cadre de ce travail.

B.5 Diagrammes de Feynman

La méthode traditionnelle pour représenter une réaction nucléaire est de l'écrire en ligne, sous la forme (en prenant l'exemple de la désintégration radioactive β^+) :



Cette notation a l'avantage d'être simple et concise. Cependant, rien n'est indiqué quant au contenu en quarks des différentes particules (qui en contiennent), ni sur la manière (l'interaction responsable) dont cette réaction se produit. Un outil a été développé par le physicien américain Richard Feynman à la fin des années 1940. Cet outil, les diagrammes de Feynman (Schutz, 2000 ; SLAC, 2009 ; 't Hooft & Veltman, 1973), permet de calculer de manière simple les amplitudes de désintégration et de réaction entre particules. Il permet de réduire considérablement les calculs décrivant ces interactions en les réduisant à de simples variations d'amplitudes de probabilité. Ils sont une sorte de représentation graphique des calculs d'amplitudes des diverses interactions. L'idée de cet outil est de représenter chaque particule et chaque médiateur par des lignes qui s'approchent, ou s'éloignent du vertex d'interaction. La Figure 1 représente une interaction de type électromagnétique qui, dans la notation introduite précédemment, se lirait :

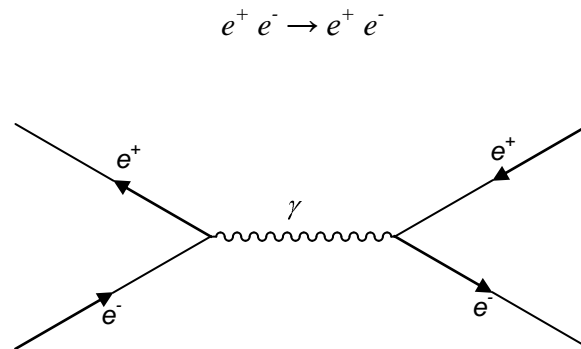


Figure 1 – Diagramme de Feynman de la diffusion élastique électron-positon (annihilation et création de paire).

Ce type de diagramme se lit grâce à un certain nombre de règles. Tout d'abord, l'axe du temps est en général représenté horizontalement de gauche à droite. Les lignes droites continues représentent les particules, alors que les médiateurs des interactions fondamentales sont représentés par des lignes ondulées (photons), bouclées (gluons) ou tiretées (bosons W^\pm et Z^0). À chaque vertex, les différentes lois de conservation présentées dans la section précédente doivent être vérifiées (par exemple l'énergie, la charge électrique, le nombre baryonique, etc.). Les lignes aux deux extrémités du diagramme sont les particules réelles, alors que les lignes intérieures sont soit les médiateurs, soit des particules virtuelles (qui participent à l'interaction de manière cachée). Les particules réelles s'approchent ou s'éloignent du vertex, suivant le sens des flèches. Les antiparticules sont représentées par des lignes qui portent des flèches allant en sens inverse de l'axe du temps (dans la Figure 1, le positon e^+ de gauche est

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

une antiparticule entrant dans le vertex). Il existe certaines autres règles, concernant les amplitudes de ces interactions, mais elles sortent du cadre de ce travail.

L'interaction électromagnétique est représentée par un seul type de vertex. Il lie deux fermions (lepton chargé ou quark) à un photon, comme illustré en Figure 2. Ce diagramme peut être orienté dans un sens ou dans l'autre (comme représenté en Figure 1, où l'un des deux fermions est une particule et l'autre est son antiparticule) et peut aussi être utilisé verticalement, comme ce serait le cas dans une diffusion élastique d'un électron et d'un positon avec échange de photon (sans annihilation). Dans ce cas-là, les deux fermions de chaque côté du vertex sont les mêmes.

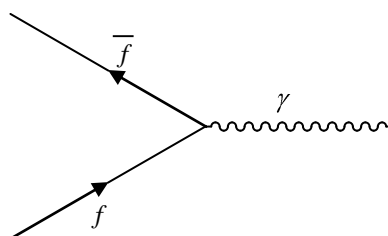


Figure 2 – Vertex de base de l'interaction électromagnétique dans la représentation de Feynman.

L'interaction forte lie deux quarks colorés à un gluon bicolore (portant une charge de couleur et une charge d'anticouleur). Comme dans le cas de l'interaction électromagnétique, cette brique élémentaire de diagramme peut être placée horizontalement ou verticalement. De même, dans le cas vertical, les deux quarks sont identiques de part et d'autre du vertex (à part la couleur qui peut être changée par le gluon), au contraire du diagramme horizontal où un quark et un antiquark se rencontrent (c.f. Figure 3). La particularité de l'interaction forte, décrite à la Section B.2, est que les gluons, porteurs d'une charge de couleur, peuvent interagir entre eux. Ainsi, il y a deux autres vertex possibles pour ce type d'interaction, comme montré en Figure 4.

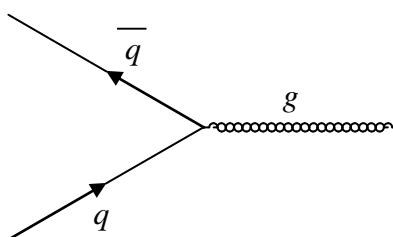


Figure 3 – Vertex de base de l'interaction nucléaire forte dans la représentation de Feynman.

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

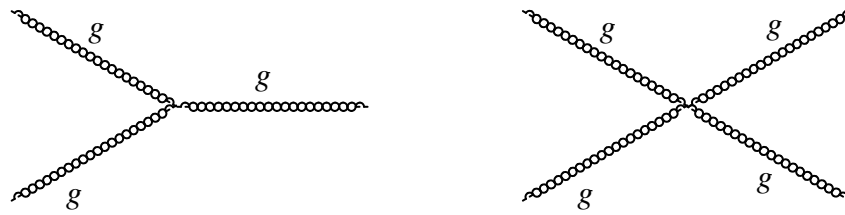


Figure 4 – Vertex d'auto-couplage de gluons dans la représentation de Feynman.

Finalement, l'interaction faible est aussi représentée par trois vertex. La première réaction, appelée courant chargé, fait intervenir l'un des deux quarks W^\pm . Elle est illustrée en Figure 5, sur le côté gauche. Ce boson médiateur est couplé à deux fermions (quarks ou leptons) différents. Le boson W changeant la charge électrique des particules en présence, les deux quarks ou les deux leptons en interaction doivent impérativement faire partie de groupes différents en termes de charge électrique (un quark de charge $+2/3$ et un quark de charge $-1/3$, ou similairement pour des antiquarks, ou un lepton de charge -1 et un neutrino de charge nulle, ou similairement pour des antileptons). Un autre type de réaction fait intervenir le Z^0 , dans ce qui est appelé un courant neutre, représenté en Figure 5, sur le côté droite. Le Z^0 couple deux fermions identiques dans le cas vertical, ou un fermion et son propre antifermion dans le cas horizontal. Le dernier diagramme possible est celui qui lie le Z^0 au W^\pm (Figure 6) et qui peut aussi se trouver dans l'une des deux directions, horizontalement (les deux bosons W sont couplés) ou verticalement (le même W se retrouve des deux côtés). Une remarque à faire à propos des diagrammes de l'interaction faible est que les lois de conservation ne sont pas toutes vérifiées aux vertex, comme par exemple la conservation de l'étrangeté, qui est violée par l'interaction faible.

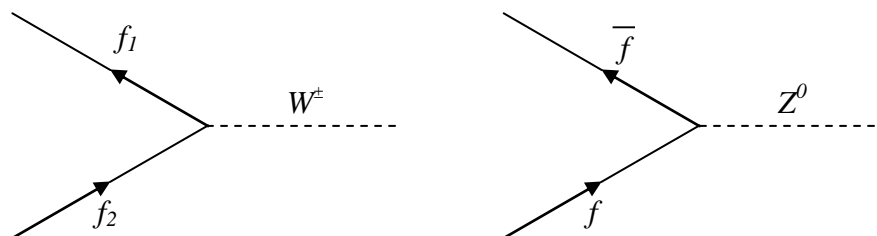


Figure 5 – Deux vertex de base de l'interaction nucléaire faible dans la représentation de Feynman.

Une fois que toutes ces briques élémentaires ont été définies, il reste à les assembler afin de reproduire sous forme schématique les réactions nucléaires ou interactions entre particules proposées. Un premier exemple a été donné en Figure 1, où deux briques électromagnétiques

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

sont collées l'une à l'autre, en sens opposé. Les deux exemples suivants montrent des réactions plus complexes. L'exemple de la Figure 7 (a) montre une désintégration en arbre d'un quark b selon un processus faible, alors que l'exemple de la Figure 7 (b) représente une désintégration, selon un diagramme appelé pingouin, d'un quark b par l'interaction faible, et faisant intervenir l'interaction forte. Un dernier exemple, reporté en Figure 8, montre deux chemins possibles pour l'oscillation d'un méson B_q (au contenu en quark $\bar{b}q$, où q peut être soit un quark d , soit un quark s) en un antiméson \bar{B}_q (au contenu en quark $b\bar{q}$). Ce processus, qui est beaucoup étudié dans l'expérience LHCb du CERN, fait intervenir l'interaction faible et des boucles de quarks virtuels.

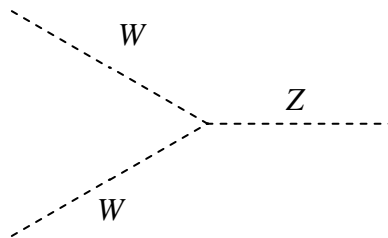


Figure 6 – Vertex de l'interaction faible liant les trois bosons vecteurs dans la représentation de Feynman.

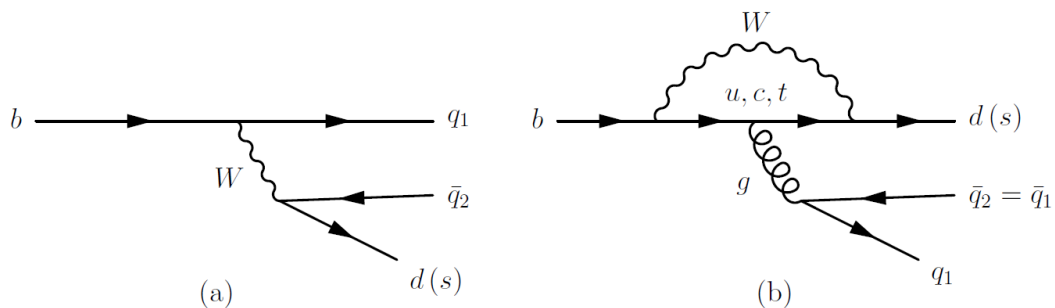


Figure 7 – Deux diagrammes de Feynman : (a) diagramme en arbre ($q_1, q_2 \in \{u, c\}$) et (b) diagramme pingouin QCD ($q_1 = q_2 \in \{u, d, c, s\}$) (Nicolas, 2009).

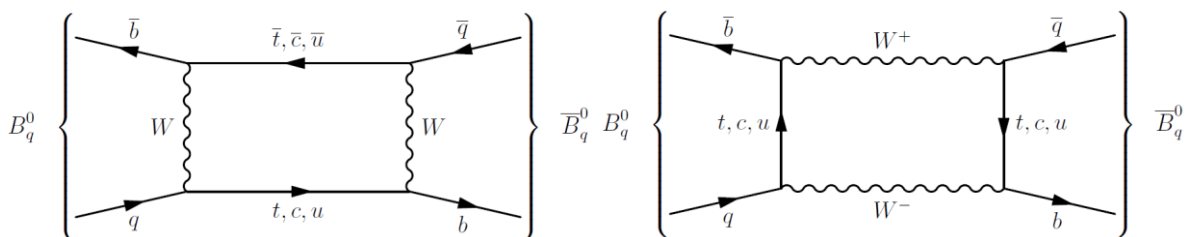


Figure 8 – Diagramme de Feynman en boîte de l'oscillation $B_q - \bar{B}_q$, où $q \in \{d, s\}$ (Nicolas, 2009).

C. Entretien avec le Professeur Olivier Schneider

Ce chapitre rapporte les paroles du Professeur Olivier Schneider, professeur au Laboratoire de Physique des Hautes Énergies (LPHE, 2010) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Le Professeur Schneider est, entre autres, responsable du cours d'introduction à la physique nucléaire et corpusculaire, enseigné, sous forme de cours à option, aux élèves de troisième année de Bachelor de la section de physique.

1) En tant que professeur, et donc chercheur, quelle place tient l'enseignement dans votre expérience professionnelle (importance quantitative et qualitative) ?

Jusqu'à présent, cette place était très importante. Je pense que j'ai eu, pendant plusieurs années, une charge d'enseignement supérieure à la moyenne. Cette charge a maintenant un peu diminué, en raison de nouvelles charges administratives.

2) Au niveau de votre enseignement général pour des classes de 1ère année à l'EPFL (physique ou autres sections), quelles sont les difficultés que vous avez pu ressentir de la part des vos élèves (conceptions ? mathématiques ? ...) ?

J'ai enseigné la physique générale aux étudiants de 1^{ère} année des sections suivantes :

- génie mécanique,
- génie électrique et électronique,
- mathématiques.

Je n'ai pas vus de grandes différences entre les sections du point de vue des difficultés rencontrées. Ces difficultés sont parfois "énormes". En règle générale les étudiants sont bien motivés, mais la motivation ne suffit pas toujours. Je suis souvent surpris par la difficulté que certains étudiants ont en général avec l'écrit, même les étudiants de langue maternelle française. Ils ont de la peine à comprendre le texte d'une donnée d'examen. On écrit qu'on a deux billes contraintes à se déplacer sur un cercle horizontal et qu'on néglige les effets gravifiques, et voilà qu'il y en a toujours quelques-uns qui essaient de résoudre le problème avec un champ de pesanteur dans le plan du cercle (peut-être parce que dans les exercices on avait une fois eu un cercle vertical avec une bille soumise à son poids). On dirait qu'il manque à ces étudiants une rigueur de lecture. Et quand on leur demande d'écrire une explication ou un raisonnement, c'est souvent décevant. Je pense que cela traduit un phénomène de société. On est habitué au multi-média et au multiple-choice, on zappe sans arrêt et on se contente de flou. Le calcul oral est également lacunaire chez un bon nombre d'étudiants. La rigueur

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

mathématique manque également : j'ai souvent vu écrire qu'un vecteur est égal à sa norme. Et il n'est pas rare que le manque de calligraphie conduise à des erreurs (par exemple une variable "nu" se "déforme" dans un développement jusqu'à devenir un "n" qui est ensuite simplifié avec un vrai "n", etc ...). Le calcul algébrique n'est pas non plus toujours bien maîtrisé. Finalement la difficulté de modéliser une situation physique par des équations constitue un obstacle pour plusieurs étudiants au début de leurs études à l'EPFL (mais ça, c'est aussi ce que nous devons leur apprendre).

Il manque aussi des bases mathématiques à certains étudiants, surtout ceux qui ont fait des options non scientifiques au gymnase. Pour ceux qui ont la "rigueur de l'écrit" et de la logique, ce n'est pas trop un problème, ils arrivent à s'en sortir, ils apprennent simplement la trigonométrie et le calcul différentiel en même temps que le cours de physique générale.

3) Lors de la construction de votre cours d'introduction à la physique des particules, quel fut le rapport entre l'importance du contenu et l'importance de l'approche, la matière et la manière de l'aborder ?

Lorsque j'ai dû donner mon cours pour la première fois, je pense que j'étais très focalisé sur le contenu. Avec le temps, je crois que j'ai donné plus d'importance à l'approche, mais je pense que pour un cours de niveau universitaire, le contenu doit rester le plus important. Sans le contenu, l'approche ne sert pas à grand chose dans nos domaines. Une bonne approche est par contre utile (et même nécessaire) pour motiver les étudiants.

4) Ce cours s'adresse à des élèves de troisième année de physique à l'EPFL. Pensez-vous, aussi en référence à la question 2, qu'il serait possible d'en donner tout ou partie à des élèves plus jeunes (1^{ère} année d'EPFL, voire même 3^{ème} année du gymnase, en option spécifique physique et applications des mathématiques) ?

Oui, je pense qu'il serait possible de le faire. Il faudrait évidemment simplifier certains aspects mathématiques. En même temps il faut se demander qu'est-ce qu'on supprime dans le plan d'études de ces étudiants ? Et si l'échange en vaut la peine.

4b) Quels chapitres traiteriez-vous ?

Les forces fondamentales, le modèle des quarks, les grandes découvertes de la physique des particules et leur conséquence sur notre vision du monde. Il faudrait aussi une introduction

Quelle place laissée à la physique des particules dans l'enseignement gymnasial ?

aux idées de la mécanique quantique, et un peu de cosmologie (mais ceci ne fait pas partie de mon cours).

4c) Changeriez-vous la manière d'aborder ces thèmes ?

Probablement. Ce serait plus un cours de "vulgarisation" qu'un "enseignement". Je pense qu'il faudrait concevoir un tel cours avec l'optique d'élargir leur culture générale, pas de leur "apprendre" la physique des particules comme à des étudiants en physique.

5) Outre la visite du CERN (qui est moins intéressante, maintenant qu'on ne peut plus vraiment descendre dans le tunnel), y a-t-il d'autres visites ou activités que vous conseillerez, comme illustration, enrichissement de ce cours ?

Pour ce cours, ça restera toujours le CERN, même si on ne peut pas descendre dans le tunnel. C'est le laboratoire mondial de la physique des particules, après tout. Quoi de mieux pour illustrer un cours sur la physique des particules ?

6) Dans un cadre plus général, quelle place, pensez-vous, est, et devrait être, laissée au gymnase à l'enseignement de la physique moderne ?

Je pense qu'elle a sa place. Mais elle doit rester relativement modeste.

6b) Croyez-vous que ce serait une préparation utile aux élèves en vue de suivre des études de physique à l'EPFL ?

Non, pas forcément. Par contre, je pense que ce serait très utile pour exciter leur curiosité, pour les motiver à faire des études de physique (ou scientifiques en général), pour leur faire comprendre les enjeux de la physique moderne et l'importance de notre domaine dans notre société. Je n'ai pas l'impression que l'école publique a donné ce type de message à mes enfants.

Les plans d'études vaudois pour la physique au gymnase n'abordent que trop rarement la physique moderne. Le problème se retrouve aussi hors du canton. C'est comme si, du point de vue gymnasial, la recherche scientifique s'était arrêtée en 1865 avec l'écriture des lois de Maxwell. Certains enseignants tentent bien quelques incursions dans les sujets récents de recherche (c'est-à-dire des sujets de physique du XX^{ème} siècle, relativité d'Einstein, physique quantique ou astrophysique), mais c'est bien trop souvent comme bouche-trou, en fin d'année ou entre deux sujets, que c'est fait. Il y a deux raisons à ceci : le programme est chargé et ne propose pas vraiment de physique moderne, et les élèves ont de grandes difficultés avec les mathématiques, présentes à un niveau si technique dans les sciences modernes.

Ce mémoire professionnel tente de répondre à ce manque en étudiant une facette particulière de la physique moderne : la physique des particules. La première question posée est de savoir à quel niveau ce genre de matière pourrait être traité. Il y a en effet une certaine contradiction d'intérêts entre la proximité aux examens et le bagage scientifique que les élèves possèdent. Le problème de l'enseignement de cette science au gymnase est abordé de trois côtés différents. Premièrement, au niveau théorique, il est montré qu'un certain nombre de sujets peuvent être abordés au gymnase, sans forcément rester uniquement au niveau phénoménologique, mais en présentant une théorie édulcorée des éléments les plus techniques. Deuxièmement, la partie pratique est survolée, où il est montré, et c'est l'un des désavantages de l'étude de tels sujets au gymnase, que peu d'expériences pourraient être proposées dans le cadres des séances de travaux pratiques. Finalement, des activités extrascolaires sont présentées, avec en particulier la visite du CERN, près de Genève, le centre mondial de la physique des particules.

Didactique de la physique – Plan d'études gymnasial vaudois – Physique des particules – Phénoménologie – CERN – Diagrammes de Feynman