

Il y a 40 ans : la découverte en 1983 des bosons W et Z au CERN

Daniel Froidevaux (Daniel.Froidevaux@cern.ch)

CERN, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, CH-1211 Genève 23, Suisse

Cet article retrace la carrière scientifique de l'auteur, expérimentateur en physique des particules au CERN. Cette carrière, consacrée à la physique des interactions électrofaibles et qui s'est déroulée du début des années 1980 à 2019, a comporté plusieurs étapes.

- (1) Participation à la mise en œuvre, à la prise de données et à leur analyse, du détecteur UA2 qui recherchait les traces des particules issues des collisions proton-antiproton du supersynchrotron SPS ;
- (2) participation à la découverte en 1983 des bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z^0 , médiateurs de la force nucléaire faible, et premières études de leurs propriétés ;
- (3) puis, à partir de 1990, contribution aux travaux de simulation de la physique du collisionneur LHC et à l'optimisation de ses détecteurs, dans le but de découvrir le boson de Higgs (ce qui a été réalisé en 2012).

Les premières années

La première chose qui me vient à l'esprit en commençant à écrire cet article, c'est à quel point le monde était différent au début des années 1980 quand je finissais de rédiger ma thèse de doctorat.

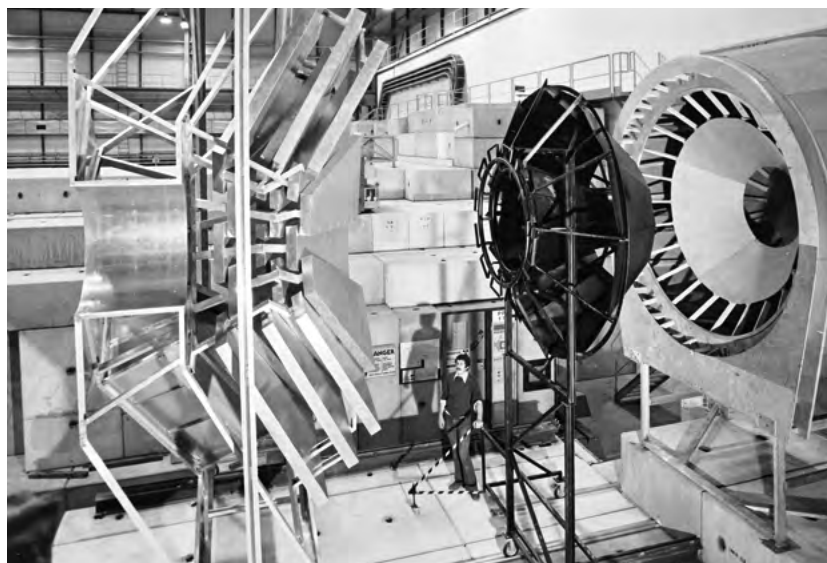
J'utilisais des cartes perforées pour soumettre mes programmes à l'unique gros ordinateur du campus de la fac d'Orsay, un Univac qui tournait à 75 kHz. Quand j'avais de la chance, le programme qui analysait toutes les données de ma thèse tournait sans planter pendant la nuit, et, avec encore un peu de chance supplémentaire, imprimait ses résultats sur l'unique imprimante du centre de calcul à raison d'une ligne bien lisible à la fois (plutôt que toutes les lignes les unes sur les autres ou illisibles par manque d'encre).

Je rédigeais ma thèse à la maison et faisais mes figures sur papier millimétré. Ensuite, je confiais tout cela à deux dames adorables qui tapaient le texte à la machine et dessinaient mes figures à l'encre sur du beau papier.

Plus globalement, notre discipline était en pleine révolution technologique et théorique. En vrac, je cite l'émergence des chambres proportionnelles et de leur électronique de lecture associée, les débuts timides mais fulgurants des logiciels de déclenchement, les balbutiements initiaux des premiers logiciels tentant de simuler l'ensemble des particules produites dans une interaction aussi compliquée qu'une collision proton-antiproton, et, pour couronner le tout, des théoriciens sans peur et sans reproches capables de calculer à la main des centaines de graphes de Feynman pour prédire la production

de bosons intermédiaires accompagnés de jets hadroniques.

En même temps que j'écrivais ma thèse, mon groupe s'était lancé dans la construction du détecteur de traces de particules chargées pour l'expérience UA2 qui venait d'être approuvée comme toute petite sœur de l'expérience UA1 dirigée par Carlo Rubbia. Tout ce que je savais de Carlo Rubbia à l'époque c'est qu'il avait réussi à convaincre la direction du CERN de la faisabilité de son projet de créer pour la première fois des collisions entre protons et antiprotons à grande énergie. Une énergie suffisante pour produire les bosons intermédiaires W et Z, clés de voute postulées des interactions faibles. Je savais aussi que nous avions ramé un peu pour obtenir l'approbation de l'expérience UA2 par le CERN ; il fallait donc



© CERN

Le détecteur UA2 au CERN.

proposer un détecteur bien moins ambitieux que UA1 qui serait certain d'être approuvé et déjà en préparation de construction, et il a fallu se débrouiller pour convaincre les décideurs que le projet UA2, qui faisait le pari des électrons et des jets hadroniques, était meilleur que le projet de Sam Ting et collaborateurs qui, lui, misait sur les muons. Nous n'avions aucun des outils de simulation modernes et ne pouvions donc répondre clairement à des questions cruciales pour un projet expérimental en terre inconnue :

- Quels seraient les bruits de fond réels auxquels nous serions confrontés, même au niveau d'une simulation naïve des principaux processus de physique à grande impulsion transverse ?

- Quelles seraient les performances du détecteur (peu de données prises en faisceau test, pas d'outils permettant de simuler en détail les interactions des différentes particules dans la matière du détecteur) ?

Ce fut un peu une foire d'empoigne avec des arguments parfois tirés d'un chapeau de prestidigitateur, mais UA2 fut approuvé fin 1978, six mois après UA1. Pendant sa phase de construction à laquelle je n'ai pas contribué, j'ai pu finir mon analyse de thèse. Lors de ma soutenance fin 1981, plusieurs physiciens éminents du laboratoire d'Orsay m'interrogèrent sur ce que je comptais faire après ; certains froncèrent un peu les sourcils et me demandèrent pourquoi je ne venais pas faire de la physique

« propre » au LEP plutôt que parier sur ce projet qui pouvait certainement paraître, à l'époque, risqué techniquement, tant pour l'accélérateur que pour les expériences.

Il faut, sans aucun doute, rendre hommage aux deux promoteurs visionnaires du projet, Carlo Rubbia et Simon Van der Meer, et le prix Nobel qui leur fut décerné en 1984 était amplement mérité.

Le tableau 1 résume les presque dix années d'opération de cette première machine hadronique, qui a réussi à produire suffisamment de collisions protons-antiprotons à grande énergie pour défricher des terres encore vierges et riches en potentiel de découvertes, comme indiqué dans la dernière colonne.

>>>

Année	Énergie des collisions (GeV)	Luminosité max. ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Luminosité collectée (cm^{-2})	Physique
1981	546	1×10^{27}	2×10^{32}	Observation de jets hadroniques
1982	546	5×10^{28}	3×10^{34}	Découverte des bosons W^+ et W^-
1983	546	2×10^{29}	2×10^{35}	Découverte du boson Z^0
1984 - 1985	630	4×10^{29}	1×10^{36}	Quark top ? Supersymétrie ?
1985 - 1987	Améliorations de l'accélérateur et de UA2			
1987 - 1990	630	2×10^{30}	2×10^{37}	Première publication globale électrofaible

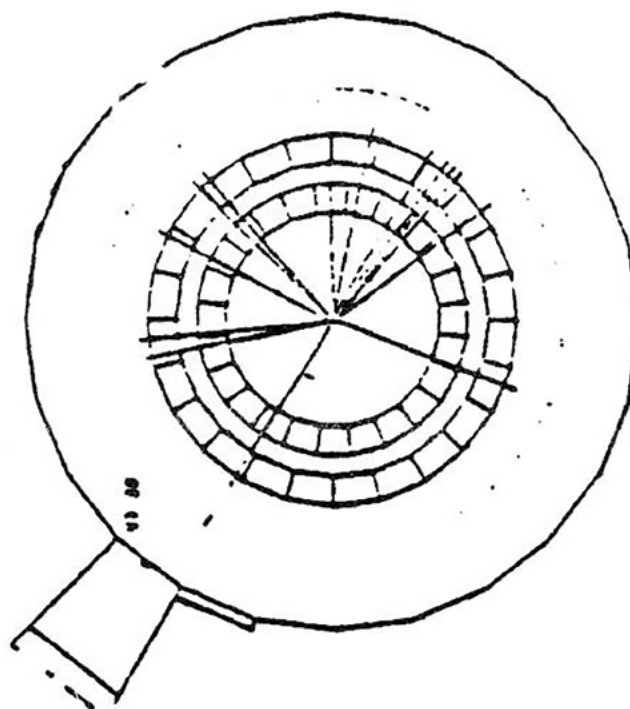
Tableau 1. Calendrier des opérations du collisionneur protons-antiprotons du CERN.

>>>

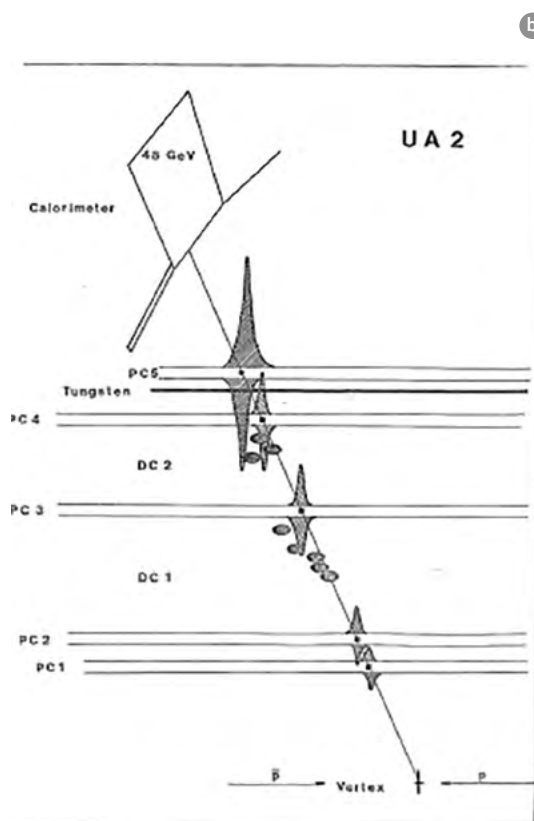
L'énergie des collisions et la luminosité (nombre de collisions susceptibles de se produire par unité de surface et de temps) furent suffisantes pour fournir à la fin du programme quelques milliers de bosons $W^{+,-}$ et quelques centaines de bosons Z^0 . Elles permirent aussi, à défaut de découverte, d'établir les meilleures limites directes sur la masse du quark *top* avant la mise en œuvre du Tevatron au Fermilab (Chicago) en 1989, avec une énergie de collisions trois fois plus élevée.

La découverte

Fin 1981, je repartis donc au CERN pour me lancer plein d'énergie dans la préparation de la première longue période de prise de données de UA2. Je fus confronté à un environnement nouveau avec des écrans alpha-numériques sans aucune capacité graphique, sans courriel, mais avec la possibilité, une révolution qui changea nos vies, de modifier et lancer les programmes informatiques sur les quelques grosses calculatrices du CERN.



1. Détection d'un boson W sur l'expérience UA2 du CERN en 1983. (a) Vue en coupe horizontale du détecteur UA2. Les traces issues du point de collision sont dues à la désintégration d'un probable boson W formé dans l'interaction entre un proton et un antiproton. (b) On a ici le cas d'un boson W se désintégrant en un électron et un neutrino (invisible). On voit la trace de l'électron, ainsi que les dépôts d'énergie qu'il a laissés au passage des différentes couches du détecteur UA2.



J'y découvris surtout l'énergie collective incroyable qui nous animait tous, du plus jeune au plus expérimenté, dans les expériences UA1 et UA2 ainsi que dans la salle de contrôle de l'accélérateur, à l'aube des découvertes que nous pensions presque garanties huit ans après celle des courants neutres à Gargamelle (voir l'article, pp. 52-55). C'était une ambiance totalement différente de celle de l'expérience de ma thèse, qui était plus petite et n'avait jamais été sous le feu des projecteurs.

Après la prise de données de 1982, nous savions que nous avions peut-être une poignée d'électrons (ou positons) provenant de la désintégration de bosons $W^{+,-}$, cachés dans notre échantillon d'événements, et que ces électrons devaient être, en principe, la seule particule de haute énergie observée. Avec un jeune collègue anglais, nous avons mis au point une représentation graphique moderne (pour l'époque) de nos données reconstruites pour visualiser un à un les candidats sélectionnés par des critères aussi peu contraignants que possible. Je me souviens qu'une

de nos avancées majeures fut de pouvoir sélectionner sur une représentation dans le plan transverse une trace chargée reconstruite et présenter la vue correspondante dans le plan longitudinal.

La figure 1 montre un exemple de ce que l'on pouvait obtenir à l'époque avec une carte graphique sur un écran géant, bien loin des standards d'aujourd'hui. Sur la figure 1a (en haut de la page), on voit dans le plan transverse le seul dépôt d'énergie important observé dans l'événement candidat présélectionné. Cette énergie de 48 GeV correspond à peu près à ce qui est attendu pour un boson W, soit environ la moitié de sa masse (l'autre moitié s'échappant sous la forme d'un neutrino n'interagissant pas avec la matière du détecteur). Une seule parmi les traces reconstruites de particules chargées provenant du point d'interaction pointe dans la direction de ce dépôt d'énergie, ce qui est confirmé pleinement dans la vue longitudinale correspondante montrée en bas de la page (fig. 1b). On y voit également les énergies déposées

dans chacune des chambres proportionnelles (PC1 à PC5) et à dérive (DC1 et DC2) par cette particule chargée. Comme prévu pour un électron (par contraste avec les pions et kaons chargés produits majoritairement dans les collisions proton-antiproton), cette particule produit un signal de forte amplitude dans la chambre PC5 placée après une couche de quelques millimètres de tungstène et juste devant le calorimètre électromagnétique.

Cet examen visuel de chaque événement présélectionné rappelle un peu ce qui était fait pour les photos prises dans les chambres à bulles comme celle où avaient été découverts les courants neutres dix années auparavant (voir l'article, pp. 52-55). Mais les résultats scientifiques publiés au moment de la découverte du boson W ont été obtenus par un examen informatique des données, et l'examen visuel sert de validation.

La mesure de la masse, $M_W = 80^{+10}_{-6}$ GeV, avec seulement quatre événements [1], donna lieu à des débats animés. Quelqu'un cita Fermi, le célèbre théoricien italien, qui aurait dit : « Un événement c'est une section efficace, deux — une masse, et trois — une asymétrie. » Les rumeurs couraient que notre grande sœur UA1 allait annoncer cette mesure de masse avec six candidats électrons, ce qui fut le cas [2] : $M_W = 81 \pm 5$ GeV. Les deux articles furent finalement envoyés avec un en-tête mettant seulement l'accent sur l'observation de quatre événements compatibles avec ce que l'on attendait de la théorie électrofaible [3] et des données expérimentales de l'époque (premières mesures de l'angle de mélange électrofaible).

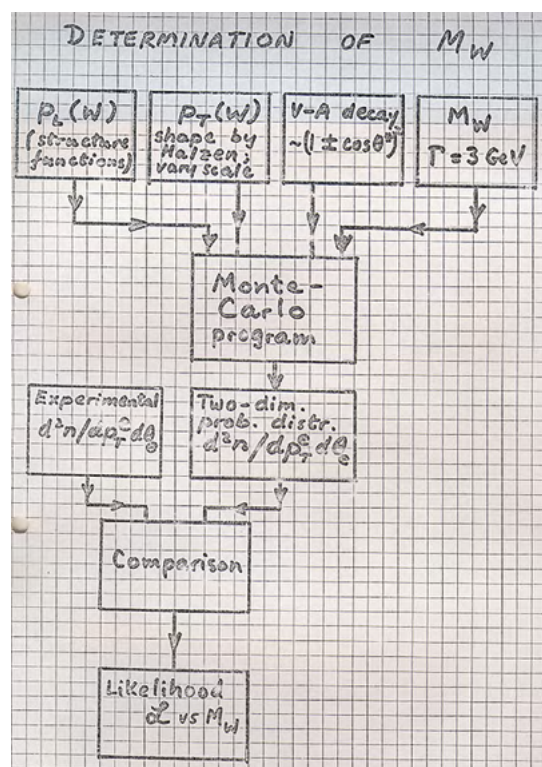
Encore aujourd'hui, je me souviens à quel point mon éducation ultracartésienne à la française m'avait peu préparé à tout ce qui est si central dans un travail d'expérimentateur : estimer les incertitudes, fussent-elles seulement statistiques, en présence de bruit de fond, et surtout toutes les autres incertitudes appelées systématiques liées à l'imperfection de la connaissance de notre appareillage et de la physique qui gouverne l'interaction des particules avec les éléments du détecteur.

Quelques mois plus tard, avec un échantillon de données cinq fois plus important, la mesure de la masse devint nettement plus précise, comme illustré par la figure 2. Celle-ci montre en haut la « documentation » de l'analyse comparant les mesures expérimentales aux prédictions théoriques en fonction de la valeur de M_W , et en bas le résultat de la mesure.

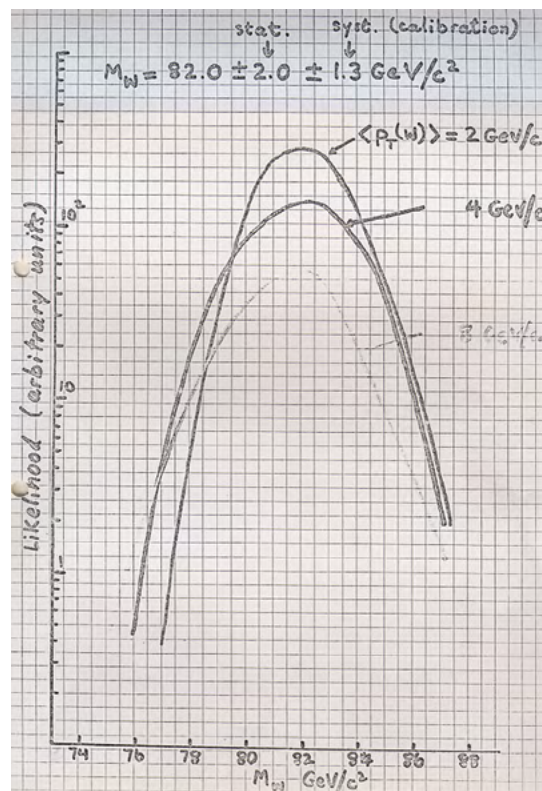
L'année 1983 fut aussi celle de la découverte du boson neutre Z^0 , avec à nouveau quelques événements observés dans chaque collaboration [4]. Mais ce fut surtout le début d'intenses années de mesures de plus en plus précises des propriétés de ces nouvelles particules, de fausses alertes en termes de nouvelles découvertes (quark *top*), et plus globalement de recherche d'une nouvelle physique avec en fer de lance la supersymétrie, cette théorie si élégante postulant une symétrie des plus simples reliant fermions et bosons par un changement de spin de $1/2$.

La confirmation et les premiers tests du modèle électrofaible

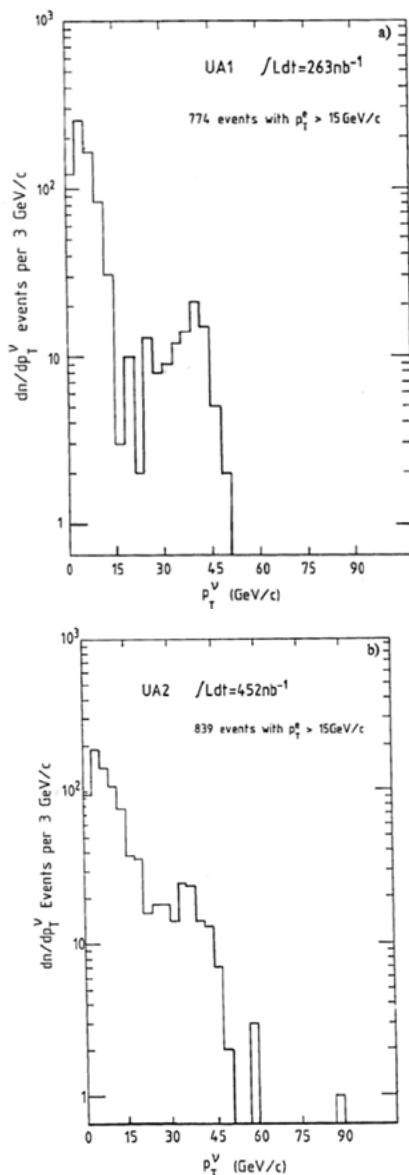
Mes souvenirs des années 1983 à 1985 sont ceux d'un tourbillon de nouveaux résultats, de conférences très animées autour de théoriciens et d'expérimentateurs flamboyants, et surtout de discussions passionnées à la cafeteria du CERN. Nous y débattions de tout entre collègues de UA1 et UA2, et nous le faisons plus comme compagnons dans un voyage extraordinaire que comme rivaux gardant jalousement nos secrets. Lors d'un discours mémorable prononcé en septembre 2003 pour les vingt ans de la découverte des bosons W et Z [5], la réelle échelle de la rivalité scientifique dans notre science à l'époque, à savoir entre Europe et États-Unis, a été brillamment présentée par Pierre Darriulat. J'y souscris pleinement, car la rivalité entre UA1 et UA2 relevait bien plus de celle entre frère et sœur faisant la course que de celle entre personnes rêvant de prix Nobel ! Je me souviens notamment de longues soirées passées avec Marie-Noëlle Minard en 1985 pour préparer ensemble la toute première présentation conjointe UA1/UA2 des résultats de physique électrofaible que les organisateurs m'avaient demandée



2. Documentation (en haut) et résultats (en bas) de la mesure de la masse du boson W après la prise de données en 1983.



>>>



3. Distribution en énergie transverse manquante (attribuée au neutrino de la désintégration $W \rightarrow e + \nu$). Comparaison des données des expériences UA1 et UA2.

>>>

pour une conférence à Beaune. Nous avions la pleine liberté de travailler sur nos données pour produire des images comparant les performances de nos détecteurs respectifs. La figure 3 en est un exemple : elle montre clairement que la distribution d'énergie transverse manquante dans UA1 est plus étroite que celle observée dans UA2 pour les basses valeurs de cette observable, grâce à la meilleure couverture calorimétrique de UA1. Pour les valeurs plus élevées au-delà de 30 GeV, le signal des désintégrations $W \rightarrow e + \nu$ est ainsi mieux séparé du bruit de fond dans UA1 que dans UA2. J'étais particulièrement motivé pour produire de telles comparaisons quantitatives, car nous étions en pleine préparation d'une proposition d'amélioration du détecteur UA2, avec comme fer de lance le projet de compléter la couverture calorimétrique.

Les années qui suivirent, de 1986 à 1990, fournirent à UA2 une grande quantité de données nouvelles de bien meilleure qualité que celles de la découverte. Comme le montre le tableau 1 p. 57, ceci a aussi été le fruit d'une amélioration considérable de l'accumulateur d'antiprotons. Encore aujourd'hui, je trouve délicieux de contempler l'évolution de notre compréhension de la physique électrofaible et surtout de l'impact de nos mesures, depuis la découverte du boson neutre Z^0 [4] jusqu'aux résultats complets de l'expérience huit ans plus tard [6]. En 1983, nous écrivions par exemple « la largeur de la résonance observée est inférieure à 11 GeV, ce qui limite à un maximum de cinquante le nombre de familles de neutrinos ».

Huit ans plus tard, la précision des mesures était évidemment bien meilleure, avec des échantillons respectifs de 2065 bosons W^{+-} et 251 bosons Z^0 [6] utilisés pour la mesure du rapport de leurs masses. Par le biais des corrections radiatives qui augmentent la masse du boson W au fur et à mesure que la masse du quark top augmente, nous avons obtenu (fig. 4a) les limites les plus contraignantes à l'époque sur la masse de ce quark, le dernier qui restait à découvrir. En même temps, nous avons obtenu une limite inférieure directe de 67 GeV sur la masse du quark top à travers la non-observation de désintégrations du boson W en paire $top+bottom$ avec désintégration semi-leptonique du quark top , $t \rightarrow b + e + \nu$ (fig. 4b). La balle était maintenant dans le camp du LEP (recherches indirectes) et surtout du Tevatron (recherche directe par production de paires de quarks $top-antitop$). Il est intéressant de remarquer aussi dans la figure 4a l'apparition du boson de Higgs dans les prédictions théoriques incluant les effets radiatifs sur la masse du boson W .

Revenons maintenant quelques années en arrière : en 1984 j'ai assisté à Lausanne, des étoiles plein les yeux, au premier atelier de travail sur le projet LHC du CERN. Ce projet partait de loin, avec plusieurs handicaps par rapport au projet SSC aux USA. Handicap temporel d'abord, car le gigantesque projet SSC avait le vent en poupe de l'autre côté de l'Atlantique, et déjà une forte communauté d'experts de tous bords y travaillaient. En Europe en revanche, outre le projet LEP avec ses quatre expériences, les

1. UA2 Collaboration, "Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN ppbar collider", *Phys. Lett. B* **122** (1983) 476-485.
2. UA1 Collaboration, "Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s=540$ GeV", *Phys. Lett. B* **122** (1983) 103-116.
3. S. Weinberg, "A model of leptons", *Phys. Rev. Lett.* **19** (1967) 1264-1266. A. Salam, "Weak and electromagnetic interactions", Proc. 8th Nobel Symp., Aspenäsgråden, (1968), in *Elementary Particle Theory*, Almqvist and Wiksell, Stockholm (1968) 367-387.
4. UA1 Collaboration, "Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around 95 GeV/c² at the CERN SPS collider", *Phys. Lett. B* **126** (1983) 398-410.

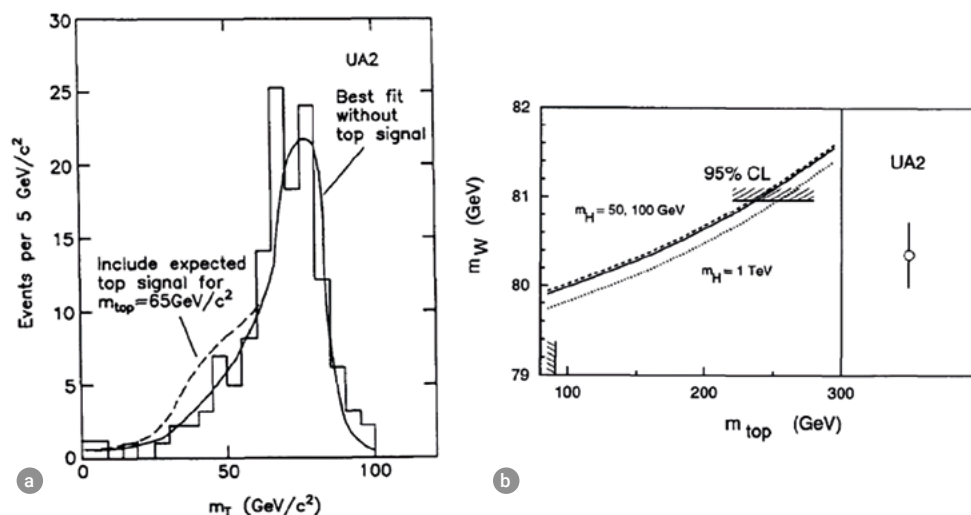
UA2 Collaboration, "Evidence for $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ at the CERN pp collider", *Phys. Lett. B* **129** (1983) 130-140.

5. P. Darriulat, "The discovery of the W & Z, a personal recollection", *Eur. Phys. J. C* **34** (2004) 33-40.

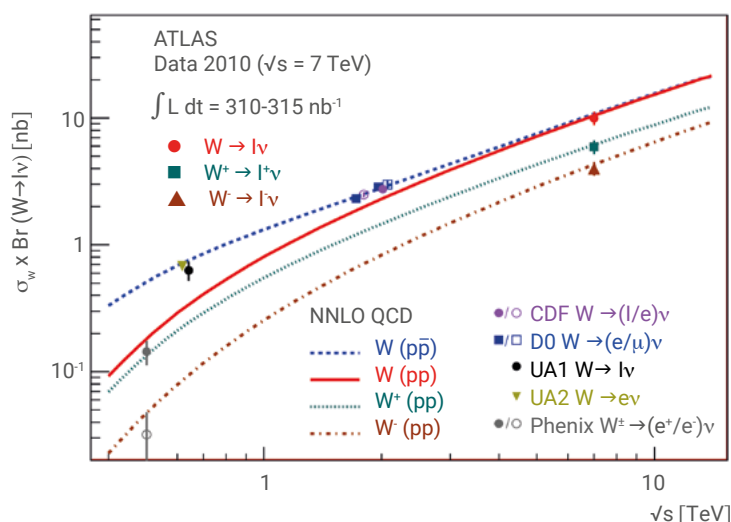
6. Voir par exemple : K. Jakobs, "The physics results of the UA2 experiment at the CERN ppbar collider", *Int. J. of Mod. Phys. A* **9** (1994) 2903-2977.

7. The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $W \rightarrow \ell \nu$ and $Z/\gamma^* \rightarrow \ell \ell$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", *J. High Energ. Phys.* **1012** (2010) 060, [https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2010\)60](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2010)60).

8. D. Froidevaux, "The long hunt for the Higgs boson", *CERN Newsletter* (2022). <https://ep-news.web.cern.ch/content/long-hunt-higgs-boson>



4. Limites obtenues sur la masse du quark *top*. (a) Limites indirectes obtenues par l'expérience UA2 en 1991 à partir de la mesure du rapport des masses des bosons W et Z. (b) Limite directe obtenue par UA2 en 1991 à partir de la recherche de désintégrations $W \rightarrow t + b$.



5. Évolution de la production de $W \rightarrow l + \nu$ (lepton chargé + neutrino) en fonction de l'énergie dans le centre de masse pour des collisions proton-antiproton et proton-proton.

synergies pour la machine suivante n'étaient pas du tout en place. C'était l'époque des comparaisons brutes de fonderie : physique propre et sans bavures en collisions e^+e^- , *versus* physique polluée par les débris hadroniques des protons en collisions proton-proton. Ce débat n'est toujours pas clos, malgré les immenses contributions des expériences du Tevatron et du LHC à notre compréhension actuelle du modèle standard de la physique des particules élémentaires. C'est en partie compréhensible, car les mesures réalisées au LEP restent la référence encore aujourd'hui pour un nombre important d'aspects de la physique électrofaible. Néanmoins, il

était clair à l'époque que les collisions hadroniques à grande énergie étaient le terrain idéal pour ratisser large dans l'espace cinématique disponible en vue d'observer de nouvelles particules.

Conclusion

L'écriture de cet article m'a plongé dans un passé lointain mais encore vibrant d'excitations multiples vécues lors de l'événement rare qu'est pour tout physicien expérimentateur une découverte majeure dans notre discipline. Pour conclure, je voudrais mettre l'accent sur la chance immense que j'ai eu de vivre à cette époque et je

fais donc un saut temporel de vingt ans, de 1991 à 2011, date de la première publication de l'observation des bosons W et Z dans ATLAS au LHC [7]. La figure 5 montre à quel point le monde a encore changé depuis la fin des expériences UA représentées par deux petits points de mesure à une énergie qui, à l'époque, était la plus haute atteinte mais qui semble si faible à l'échelle d'aujourd'hui. Je trouve remarquable également que les courbes de production en collisions proton-antiproton soient rejointes par celles en proton-proton à une énergie dans le centre de masse de 4-5 TeV.

Cela démontre à quel point la vision de Carlo Rubbia il y a plus de quarante ans était prémonitoire et juste : sans lui, il n'y aurait probablement jamais eu de collisionneur protons-antiprotons dans notre histoire collective, et surtout, il n'y aurait peut-être pas eu de projet LHC ou SSC car les nombreuses mesures faites par les expériences UA ont définitivement prouvé que la physique de précision était réalisable dans une machine hadronique. Les milliers de personnes impliquées dans le projet LHC en ont été récompensées en 2012 au moment de la découverte du boson de Higgs, avec le piment additionnel par rapport aux bosons W et Z de ne pas vraiment savoir quelle serait sa masse. J'ai donc été doublement chanceux de vivre deux aventures aussi extraordinaires dans ma vie de physicien, et je voudrais dire à quel point j'en suis conscient et finir cet article avec humilité [8].

Il ne faut pas oublier que des aventures extraordinaires dans la recherche du boson de Higgs ont aussi eu lieu au LEP et au Tevatron, avec certainement la même excitation animant leurs participants, mais sans le nirvana de la découverte. Par ailleurs, nombreux sont ceux et celles qui ont contribué de manière importante à ces immenses projets que sont ATLAS et CMS, mais qui, soit n'étaient plus parmi nous pour vivre ces années extraordinaires de 2011 à 2019, année de ma retraite, soit sont arrivés récemment et ont peut-être l'impression de récolter les miettes du festin. Puissent les années futures être riches d'aventures magnifiques dans notre domaine et, si la nature le veut bien, que le modèle standard soit enfin mis en défaut de manière éclatante ! ■