ΔΙΕΡΕΥΝΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ

ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΠΑΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ. Η πρόβλεψη αποτελεί διαχρονικά θεμέλιο της Φυσικής και αντικείμενο φιλοσοφικής συζήτησης. Ελάχιστες όμως μελέτες έχουν αναδείξει τον δυναμικό της ρόλο στην επιστημονική πρακτική και πώς αυτός μεταβάλλεται ιστορικά. Το άρθρο αποσκοπεί στην ιστορικοποίηση της μεταβαλλόμενης σημασίας της πρόβλεψης στη Φυσική Υψηλών Ενεργειών (ΦΥΕ), σε συνάρτηση με τη σχέση θεωρίας, πειραμάτων και επιστημονικών οργάνων. Θα επικεντρωθούμε σε τρία διαφορετικά επεισόδια από την ιστορία της ΦΥΕ: την ανακάλυψη των ασθενών ουδέτερων ρευμάτων το 1973, σε μια εποχή που το Καθιερωμένο Πρότυπο (ΚΠ) δεν είχε ακόμη αποκτήσει ευρεία αποδοχή εντός της πειραματικής κοινότητας· την ανακάλυψη των μποζονίων W και Z το 1983, όταν το ΚΠ είχε παγιωθεί· και τον σχεδιασμό του LHC κατά τις δεκαετίες 1980–1990, που ακολούθησε μια σχετικά αυτόνομη πορεία από τις θεωρητικές προβλέψεις. Μέσα από αυτά τα επεισόδια, διερευνούμε πώς η πρόβλεψη συνδέεται με την ανακάλυψη, την υλικοτεχνική ανάπτυξη της ΦΥΕ και τη διαμόρφωση της επιστημονικής πολιτικής οργανισμών όπως το CERN.

ABSTRACT. Prediction has long been central to physics and a subject of philosophical analysis. However, few studies have explored its evolving role in scientific practice. This paper aims to historicize how the epistemic status and function of prediction have shifted in High Energy Physics (HEP), shaped by the interplay of theory, experimentation, and instrumentation. We examine three key cases: the 1973 discovery of weak neutral currents, before the Standard Model (SM) gained broad acceptance within the experimental community; the 1983 discovery of W and Z bosons, when the SM had become dominant; and the LHC's design during the 1980s–1990s, which followed a relatively theory-independent path. These episodes help us understand the role of prediction in discovery, infrastructure development, and science policy in Big Science institutions like CERN.

* Ο Γ. Πανουτσοπουλος είναι Μεταδιδακτορικός Ερευνητής στο Institut d'Història de la Ciència (Ινστιτούτο Ιστορίας της Επιστήμης) στο Universitat Autònoma de Barcelona (Αυτόνομο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης). Ο συγγραφέας θα ήθελε να ευχαριστήσει την ερευνητική ομάδα του PYTHIA, τον Αριστοτέλη Τύμπα, τον Στάθη Αραποστάθη, τον Ηρακλή Κατσαλούλη, τον Στέλιο Καμπουρίδη, τη Βασιλική Χριστοπούλου και κυρίως τον Επιστημονικό Υπεύθυνο του προγράμματος, Θεόδωρο Αραμπατζή, για τη συνεργασία, τα πολύτιμα σχόλιά τους και τη συνολική τους υποστήριξη μέσα στα χρόνια. Είναι επίσης ευγνώμων στον Κώστα Γαβρόγλου για την καθοδήγησή του και τις γόνιμες συζητήσεις που συνέβαλαν στη διαμόρφωση της προσέγγισής του. Η ερευνητική αυτή εργασία υποστηρίχθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) στο πλαίσιο της Δράσης «1η Προκήρυξη Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των Μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια ερευνητικού εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου: 875).

1. Εισαγωγη

Εάν κάποιος επιχειρούσε να συγκεντρώσει τις έννοιες που θεμελιώνουν την σύγχρονη επιστημονική μέθοδο, η έννοια της πρόβλεψης θα κατείχε σίγουρα μια αδιαφιλονίκητη θέση. Δεν προκαλεί επομένως εντύπωση το γεγονός ότι αρκετές φιλοσοφικές μελέτες έχουν επιχειρήσει να ρίξουν φως στην ιδιαίτερη αυτή έννοια (Carrier 2014, Douglas and Magnus 2013, Gonzalez 2013). Παρότι όμως είναι πλέον κοινός τόπος ότι η έννοια της πρόβλεψης γνωρίζει σημαντικές παραλλαγές από επιστημονικό σε επιστημονικό κλάδο (Northcott 2020), λίγες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο πώς οι επιστήμονες χρησιμοποιούν την έννοια στην καθημερινή πρακτική τους (Brush 2015), αλλά και πώς η χρήση αυτή εξαρτάται από το εκάστοτε ιστορικό πλαίσιο.

Στην παρούσα εργασία θα επιχειρήσουμε μια τέτοια ενδελεχή μελέτη της πρόβλεψης σε ένα από τα σημαντικότερα επιστημονικά πεδία του 20ου αιώνα, τη Φυσική Υψηλών Ενεργειών (ΦΥΕ). Πιο συγκεκριμένα, στόχος της είναι να μην αντιμετωπίσει την έννοια της πρόβλεψης μέσα από μια αφηρημένη και «αφ' υψηλού» οπτική, αλλά να την κατανοήσει μέσα από τους τρόπους που οι ίδιοι οι επιστήμονες εκλαμβάνουν και χρησιμοποιούν την έννοια. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, μια τέτοια οπτική θα φωτίσει ιδιαίτερες πτυχές της πρόβλεψης και θα αναδείξει ότι τόσο ο ρόλος της, όσο και η βαρύτητα που έχει στην πειραματική διαδικασία υπόκεινται σε σημαντικές αλλαγές μέσα στον χρόνο. Παρά το γεγονός όμως ότι η έννοια της πρόβλεψης αλλάζει και επανανοηματοδοτείται, είναι σημαντικό για την ιστορική ανάλυση να κατηγοριοποιήσουμε τα κυριότερα κριτήρια, βάσει των οποίων μεταβλήθηκε ιστορικά η στάση της επιστημονικής κοινότητας των ΦΥΕ απέναντί της.

Θα επικεντρωθούμε σε τρεις διαφορετικές περιόδους της ιστορίας των ΦΥΕ, όπου η ισορροπία θεωρίας, πειράματος και επιστημονικών οργάνων άλλαξε ραγδαία. Η πρώτη αφορά την πολύ σημαντική, αλλά και συχνά παραγνωρισμένη, ανακάλυψη του ουδέτερου ασθενούς ρεύματος, το 1973, που άνοιξε το δρόμο για την εγκαθίδρυση του Καθιερωμένου Προτύπου (ΚΠ) ως βασικού θεωρητικού μοντέλου των ΦΥΕ. Η δεύτερη περίοδος έχει ως επίκεντρο της την ανακάλυψη των μποζονίων W και Z, το 1983, κάτω από την πίεση των θεωρητικών προβλέψεων του ΚΠ. Τέλος, η τρίτη περίοδος εστιάζει στον σχεδιασμό του μεγαλύτερου επιταχυντή που φτιάχτηκε ποτέ, του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων (Large Hadron Collider), γνωστού και ως LHC, και στον ρόλο που έπαιξαν οι θεωρητικές προβλέψεις.

2. Εξημερωνοντας τη θεωρητικη αβεβαιοτητα: Η προβλεψη των ουδετερων ρευματων

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1960, το τοπίο στη σωματιδιακή φυσική φάνταζε εξαιρετικά συγκεχυμένο. Παρότι εκατοντάδες σωματίδια

είχαν ανακαλυφθεί, οι γνώσεις γύρω από αυτά ήταν νεφελώδεις και θεωρούνταν, λανθασμένα όπως αποδείχθηκε αργότερα, ως στοιχειώδη. Η αποτυχία μιας συστηματικής ταξινόμησης τους οδηγούσε πολλούς φυσικούς να παρομοιάζουν την κατάσταση με έναν ζωολογικό κήπο σωματιδίων («particle zoo»). Μία φιλόδοξη προσπάθεια για να μπει μία τάξη στο πεδίο επιχειρήθηκε από τους Steven Weinberg και Abdus Salam το 1967-8. Πιο συγκεκριμένα, οι Weinberg και Salam, ενσωματώνοντας στη θεωρία του Sheldon Glashow για την ηλεκτρασθενή αλληλεπίδραση, τον μηχανισμό του Higgs, άνοιξαν τον δρόμο στο Καθιερωμένο Πρότυπο, που θα πρωταγωνιστούσε τις επόμενες δεκαετίες.[1] Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι η καθιέρωση αυτού του θεωρητικού μοντέλου δεν συνέβη ούτε απρόσκοπτα, ούτε εν μία νυκτί. Μέχρι και το 1972, ελάχιστοι θεωρητικοί και πειραματικοί φυσικοί του είχαν δώσει την πρέπουσα προσοχή, και έτσι παρέμενε απλώς μια αφηρημένη θεωρητική πρόταση ανάμεσα σε πολλές άλλες.

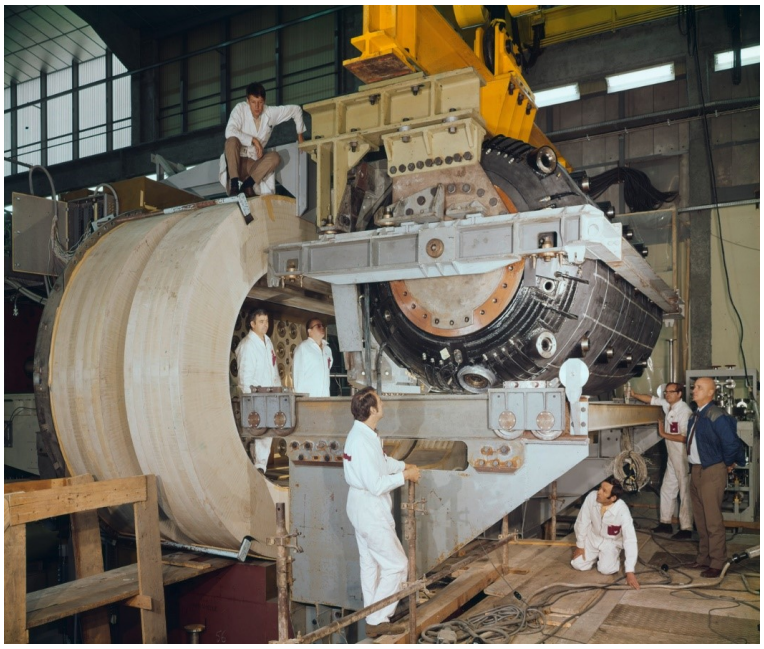
Αυτό που αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την ευρεία αποδοχή της θεωρίας ήταν η ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων. Ο τρόπος, όμως, που συχνά παρουσιάζεται η συγκεκριμένη ανακάλυψη, σαν ένα στιγμιαίο «εύρηκα», αποσιωπώντας τα ενδιάμεσα στάδια και τις αποτυχίες ως την επίτευξη της, είναι αναχρονιστικός και συσκοτίζει τον δύσβατο δρόμο που έπρεπε να διανύσουν οι φυσικοί μέχρι να επέλθει η κρίσιμη ισορροπία μεταξύ θεωρίας, πειραματισμού και επιστημονικών οργάνων. Στην ενότητα αυτή, στόχος μας είναι να επιχειρήσουμε τη μελέτη ακριβώς αυτού του πολύπλοκου δρόμου, επιδιώκοντας να φωτίσουμε πτυχές της σχέσης μεταξύ των θεωρητικών προβλέψεων και ανακάλυψης.

Πρωταγωνιστές της πρώτης ιστορίας μας θα είναι δύο πειράματα νετρίνων: το HWPF στο Fermilab στις ΗΠΑ,[2] και το Ευρωπαϊκό Gargamelle[3] στο CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire - Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Πυρηνικής Έρευνας). Και τα δύο αυτά πειράματα άρχισαν να σχεδιάζονται στις αρχές τις δεκαετίας του 1960, αρκετό καιρό πριν την εγκαθίδρυση του ΚΠ ως του κύριου θεωρητικού πλαισίου μέσα στο οποίο θα εξελισσόταν η πειραματική ΦΥΕ. Παρά λοιπόν το γεγονός ότι έμειναν γνωστά για τη συμβολή τους στην ανακάλυψη των ουδέτερων

[1] Το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική και την ασθενή αλληλεπίδραση ως δύο διαφορετικές πτυχές της ηλεκτροασθενούς αλληλεπίδρασης.

[2] Το όνομα της συνεργασίας HWPF προερχόταν από τα αρχικά των πανεπιστημίων και των εργαστηρίων που συμμετείχαν σε αυτό: Harvard University, University of Wisconsin, University of Pennsylvania και Fermilab.

[3] Ο Gargamelle ήταν ένας καινοτόμος ανιχνευτής θαλάμου φυσαλίδων που λειτούργησε στο CERN μεταξύ 1970 και 1979. Σχεδιάστηκε για την ανίχνευση νετρίνων και αντινετρίνων, τα οποία θα παράγονταν από τον επιταχυντή σωματιδίων Proton Synchrotron (PS). Ήταν ένα όργανο τεραστίων διαστάσεων για τα δεδομένα της εποχής, μιας και ζύγιζε περίπου 1000 τόνους, ενώ έφερε 12 κυβικά μέτρα υγρό φρέον. Το χαρακτηριστικό όνομα του προερχόταν από το έργο του Φρανσουά Ραμπελαί *Η Ζωή του Γαργαντούα και του Πανταγκρυέλ*, όπου η γιγαντιαία Gargamelle ήταν η μητέρα του Γαργαντούα.



ΕΙΚΟΝΑ 1. Ο Gargamelle εγκαθίσταται στον επιταχυντή σωματιδίων Proton Synchrotron (PS), Σεπτέμβριος 1970, CERN PhotoLab, (Original ref.:1970-01_X_CERN_14229_0032).

ρευμάτων, ο έλεγχος της συγκεκριμένης θεωρίας αρχικά δεν βρισκόταν στις πρώτες προτεραιότητες τους. Αντίθετα, κατασκευάστηκαν με διαφορετικές πειραματικές στοχεύσεις, όπως η ανακάλυψη του διανυσματικού μποζονίου W ή η διερεύνηση του μοντέλου των παρτονίων.[4] Όπως θυμάται ο Dieter Haidt, ο οποίος αποτελούσε ενεργό μέλος της ερευνητικής ομάδας Gargamelle: «Κατά τη διάρκεια της διήμερης συνάντησης τον Νοέμβριο του 1968 στο Μιλάνο, όπου η συνεργασία Gargamelle συζήτησε διεξοδικά το μελλοντικό της ερευνητικό πρόγραμμα, οι λέξεις "ουδέτερο ρεύμα" ούτε καν αναφέρθηκαν.» (Haidt 2004, 21)

Το 1971 άρχισαν να αναλύονται οι πρώτες φωτογραφίες του θαλάμου φυσαλίδων. Σε αυτές παρατηρήθηκαν κάποια ασυνήθιστα γεγονότα (events), τα οποία παρείχαν τις πρώτες ενδείξεις των ουδέτερων ρευμάτων. Καθότι όμως ο έλεγχος της θεωρίας που τα προέβλεπε δεν βρισκόταν ανάμεσα στις προτεραιότητες των πειραματικών φυσικών, κανείς δεν έδωσε ιδιαίτερη σημασία στις συγκεκριμένες ενδείξεις. Το περιστατικό θα το περιγράψει, λίγα χρόνια αργότερα, ένας από τους πρωταγωνιστές του πειράματος, ο Jean-Pierre Vialle, ως εξής: "Ένα πράγμα που είδαμε

[4] Δείτε και Kabir 1963; Galison 1983.

αμέσως στις φωτογραφίες είναι ότι υπήρχαν γεγονότα μεγάλης ενέργειας στον θάλαμο φυσαλίδων χωρίς να υπάρχουν μιόνια.[5] Αλλά δεν θα μπορούσαμε να έχουμε ισχυριστεί ότι αυτά ήταν ουδέτερα ρεύματα.»[6] Όπως γίνεται σαφές και από τις μαρτυρίες των άμεσα εμπλεκομένων πειραματικών φυσικών, η απουσία μιας συγκεκριμένης θεωρίας που θα μπορούσε να ερμηνεύσει τις πειραματικές παρατηρήσεις αλλά και να τους υποδείξει συγκεκριμένα ερευνητικά μονοπάτια, ήταν καταλυτική για τη μη ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων. Άλλωστε αυτή δεν θα ήταν η πρώτη φορά που τα ουδέτερα ρεύματα θα αποτυπώνονταν σε κάποιον ανιχνευτή στο CERN. Λίγα χρόνια πριν, την περίοδο 1963-1964, τα ουδέτερα ρεύματα είχαν αποτυπωθεί και πάλι, εξαιρετικά καθαρά, σε φωτογραφίες που προέρχονταν από παλαιότερες πειραματικές διατάξεις, όπως ο θάλαμος σπινθήρων. Ωστόσο, οι πειραματικοί, χωρίς την καθοδήγηση από μία θεωρία με συγκεκριμένες σχετικές προβλέψεις, παρερμήνευσαν και γρήγορα προσπέρασαν τις φωτογραφίες από τον θάλαμο και σε εκείνη την περίπτωση. Η περιγραφή των συμβάντων από έναν από τους σημαντικότερους πειραματικούς φυσικούς της περιόδου, τον Helmut Faissner, είναι ενδεικτική:

> Έχοντας δει αυτές τις φωτογραφίες ο ίδιος, και έχοντας αγνοήσει τη σημασία τους, πιστεύοντας πως είναι αστέρες νετρονίων, δεν μπορώ να κατηγορήσω για το συγκεκριμένο λάθος την ακαταλληλότητα των επιστημονικών οργάνων. Οι παλιοί θάλαμοι σπινθήρων ήταν απολύτως κατάλληλοι για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης. Το ότι δεν πιστέψαμε αυτό που είδαμε, ήταν ένας ατυχής συνδυασμός πνευματικού «μπλοκαρίσματος», που προερχόταν από θεωρητική προκατάληψη και έλλειψη πειραματικής μεθοδικότητας. (Faissner 1979, 374)

Όπως παραδέχεται ο Faissner αλλά και άλλοι πρωταγωνιστές της περιόδου, σε πείσμα ενός τεχνολογικού ντετερμινισμού που συχνά διακατέχει την ιστορία των ΦΥΕ, η ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων δεν ήταν κατά κύριο λόγο αποτέλεσμα της τεχνολογικής καινοτομίας που έφερε ένα νέο επιστημονικό όργανο, ο θάλαμος φυσαλίδων Gargamelle, αλλά, όπως θα δούμε και αργότερα, η κρίσιμη ισορροπία και η συνέργεια μεταξύ θεωρίας, πειραματισμού και επιστημονικών οργάνων.

Στο άλλο μέτωπο τώρα, αυτό της θεωρητικής σωματιδιακής φυσικής, σημαντικές εξελίξεις άρχισαν να σημειώνονται στις αρχές της δεκαετίας του 1970, καθώς οι Gerard 't Hooft και Martinus J. G. Veltman θα αποδείκνυαν πως το ΚΠ ήταν επανακανονικοποιήσιμο. Η συγκεκριμένη εξέλιξη ήταν καταλυτική για τη σύσφιξη της σχέσης μεταξύ θεωρίας και

[5] Η μη ανίχνευση μιονίων, που θα δικαιολογούσαν τις υψηλές ενέργειες σε αυτά τα γεγονότα, ήταν χαρακτηριστικό της μετέπειτα ανακάλυψης.

[6] Όπως παρατίθεται στο Galison 1983, 482.

πειράματος, μιας και πλέον θα μπορούσαν να διατυπωθούν συγκεκριμένες θεωρητικές προβλέψεις που θα ελέγχονταν πειραματικά. Έτσι η θεωρία των Weinberg και Salam που βρισκόταν στο περιθώριο για περίπου τέσσερα χρόνια, θα μεταφερόταν θεαματικά στο προσκήνιο της θεωρίας των ΦΥΕ. Τους επόμενους μήνες οι θεωρητικοί φυσικοί συνέχισαν να δουλεύουν με μεγάλο ενθουσιασμό πάνω στη νέα θεωρία, προσπαθώντας να εξαγάγουν τις πρώτες συγκεκριμένες προβλέψεις. Πολύ γρήγορα σχηματίστηκε μια πολύ γόνιμη κοινότητα γύρω της, από διάσημους θεωρητικούς φυσικούς όπως ο 't Hooft, ο Abraham Pais, ο Sam Treiman, ο Emmanuel Paschos, ο Steven Weinberg και ο Lincoln Wolfenstein, και μια σειρά από επιδραστικές δημοσιεύσεις σε σχέση με την πιθανή πειραματική εφαρμογή της θεωρίας άρχισαν να κυκλοφορούν από το 1971 έως το 1973.

Οι θεωρητικοί φυσικοί άρχισαν να υποδεικνύουν συντονισμένα πως μια πειραματική ανίχνευση των ουδέτερων ρευμάτων θα ήταν καταλυτική για να ανοίξει ο δρόμος προς την εγκαθίδρυση του ΚΠ. Αυτό όμως δεν σήμαινε και την ταυτόχρονή στροφή του ενδιαφέροντος των πειραματικών φυσικών στη συγκεκριμένη πρόβλεψη και τη νέα θεωρία. Όπως θα σημείωνε ο Faissner, οι πειραματικοί φυσικοί και η ερευνητική ομάδα του Gargamelle εξακολουθούσαν να είναι επικεντρωμένοι στην εξέταση προϋπαρχουσών θεωριών, όπως το μοντέλο των πατρονίων, και έστρεφαν την πλάτη στη διεξοδική εξέταση των ουδέτερων ρευμάτων:

> Η διερεύνηση των ουδέτερων ρευμάτων ανήκε στις αγγαρείες, που κάποιος έπρεπε να αναλάβει κατά τη διάρκεια του ελεύθερου χρόνου του. Οι φήμες ότι κάποιοι θεωρητικοί πρόσμεναν με αγωνία την ύπαρξή τους, προσέθετε μόνο μια αύρα ενός πικρού σκεπτικισμού. (Faissner 1979, 372)

Η διστακτικότητα των πειραματικών να στρέψουν το ενδιαφέρον τους προς τη νέα θεωρία δεν θα πρέπει να προκαλεί εντύπωση. Οι κοινότητες τους είχαν συγκροτήσει τα πειράματα τους με βάση παλαιότερες θεωρίες, είχαν αναπτύξει συγκεκριμένη ειδημοσύνη σε σχέση με αυτά, ενώ και τα επιστημονικά όργανα τους είχαν ρυθμιστεί και προσανατολιστεί στη διερεύνηση προγενέστερων θεωρητικών υποθέσεων. Ένας ακόμη σημαντικός λόγος της διστακτικότητας των πειραματικών να αλλάξουν συγκροτητικά τον προσανατολισμό των πειραμάτων τους προς την κρίσιμη θεωρητική πρόβλεψη των ουδέτερων ρευμάτων ήταν ότι πίστευαν πως θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να εξαχθούν πληροφορίες για τα ρεύματα από το πολύπλοκο υπόβαθρο (background) των αντίστοιχων πειραμάτων, από τη στιγμή μάλιστα που η κατανόηση του ήταν ελλιπής.[7]

Οι θεωρητικοί φυσικοί έπρεπε να πείσουν τους πειραματικούς για τη σημασία που θα είχε για την επόμενη μέρα της ΦΥΕ η ανακάλυψη των

[7] Δείτε και Galison 1983, 483-484.

ουδέτερων ρευμάτων και να στρέψουν την ερευνητική ατζέντα του κλάδου τους προς το πολλά υποσχόμενο ΚΠ. Με άλλα λόγια, για να βρεθεί αυτός ο κοινός βηματισμός, θα έπρεπε πρώτα να δομηθεί, αυτό που θα ονόμαζε ο Galison, μια εύρωστη «ζώνη συναλλαγής»[8] μεταξύ θεωρητικής και πειραματικής κοινότητας. Αυτό επετεύχθη μέσα από διαδοχικές συναντήσεις ανάμεσα σε θεωρητικούς και πειραματικούς φυσικούς, όπου επιχειρήθηκε να κατασκευαστεί μια νέα κοινή υβριδική γλώσσα γύρω από το ΚΠ, που θα γινόταν κατανοητή τόσο στο θεωρητικό όσο και στο πειραματικό «στρατόπεδο». Επιπλέον, δομήθηκαν κοινές ερευνητικές ατζέντες πάνω στη βάση των συγκεκριμένων προβλέψεων, που θα αποτελούσαν ένα εξαιρετικά εύφορο έδαφος για την ανάπτυξη και των δύο κοινοτήτων στις επόμενες δεκαετίες.

Μια τέτοια συνάντηση έλαβε χώρα τον Νοέμβριο του 1971 στο CERN, όταν οι διάσημοι θεωρητικοί φυσικοί Bruno Zumino, Jacques Prentki και Mary K. Gaillard επισκέφθηκαν την ομάδα του Gargarmelle. Στη συγκεκριμένη συνάντηση εξηγήθηκαν αναλυτικά στους φυσικούς του CERN οι λόγοι της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος για τη θεωρία των Weinberg και Salam μετά την απόδειξη της επανακανονικοποίησης της, ενώ συζήτησαν από κοινού ποια θα ήταν η καλύτερη πειραματική στρατηγική για τον έλεγχο της ύπαρξης τους (Haidt 2015, 173; Galison 1983, 483-484). Στην αντίπερα όχθη του Ατλαντικού, τη συγκεκριμένη αποστολή την είχε αναλάβει ο ίδιος ο Weinberg που εξηγούσε αυτοπροσώπως στους πειραματικούς στο Fermilab τη σημασία που θα είχε η ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων για το μέλλον ολόκληρου του κλάδου.

Η πρόβλεψη, λοιπόν, που αποτελεί την κρίσιμη γέφυρα ανάμεσα σε θεωρία και πείραμα, δεν χτίζεται αυτόματα και απρόσκοπτα, αλλά απαιτεί μεθοδικές κινήσεις, αμοιβαία «μεταφρασιμότητα» εννοιών και δόμηση εμπιστοσύνης ανάμεσα στις «ζώνες συναλλαγής» διαφορετικών επιστημονικών κοινοτήτων. Επιπλέον, οι δομικοί λίθοι αυτής της γέφυρας δεν είναι μόνο εξισώσεις και αφηρημένοι θεωρητικοί ισχυρισμοί, αλλά και διαπροσωπικές σχέσεις, διαδικασίες πειθούς, υποσχέσεις για νέες προοπτικές, καινούριες πρακτικές και επιστημονικές μέθοδοι.

Μέχρι τον Απρίλιο του 1972, η ανίχνευση των ουδέτερων ρευμάτων είχε πλέον αναχθεί στους τρεις κυριότερους στόχους του Gargamelle, αν και ακόμα οι πειραματικοί ήταν χωρισμένοι σε δύο στρατόπεδα. Από τη μία, βρίσκονταν αυτοί που πίστευαν ότι το πείραμα θα αποδείκνυε την

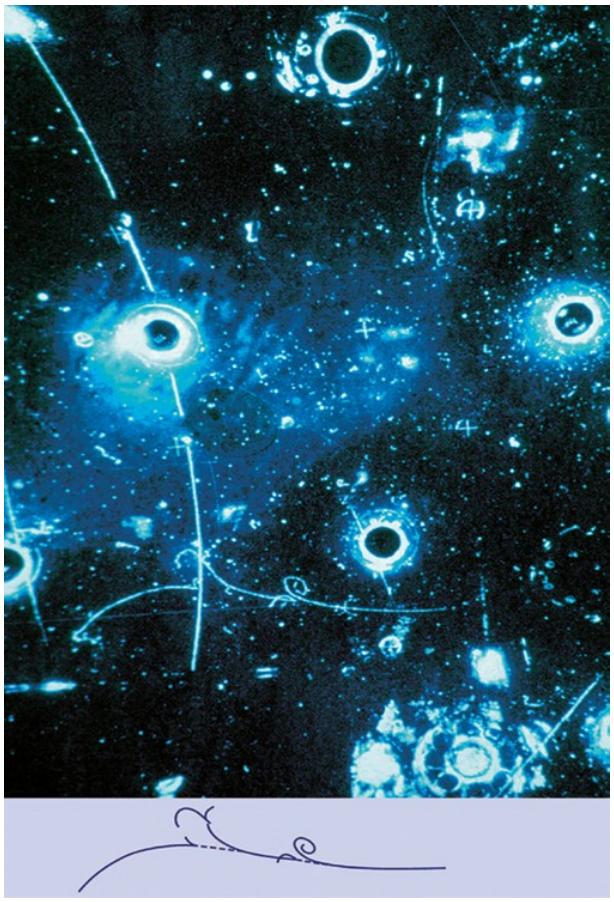
[8] Ο Galison χρησιμοποιεί τον ανθρωπολογικό όρο "ζώνη συναλλαγής" για να περιγράψει την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών υπο-ομάδων στη σωματιδιακή φυσική: των κατασκευαστών οργάνων, των πειραματιστών και των θεωρητικών φυσικών. Υποστηρίζει ότι αυτές οι υπο-ομάδες, με κάθε μία να έχει το δικό της ξεχωριστό υπόβαθρο, εκπαίδευση, γλώσσα και στόχους, μπορούν υπό συνθήκες να αναπτύξουν υβριδικές γλώσσες επικοινωνίας και να θεσπίσουν κοινούς στόχους και κοινές ερευνητικές ατζέντες. Αυτή η διαδικασία όμως δεν λαμβάνει χώρα ούτε αυτόματα ούτε ανεμπόδιστα, αλλά δομείται σταδιακά και στηρίζεται πάνω στην αμοιβαία ανταλλαγή και στο κοινό συμφέρον των διαφόρων υπο-ομάδων. Για περισσότερες λεπτομέρειες δείτε Galison 1997, 783, 803.

ΕΙΚΟΝΑ 2. Εξετάζοντας τα φωτογραφικά φιλμ του Gargamelle, Αύγουστος 1972, CERN PhotoLab, (Original ref.:206-8-72).

ύπαρξη τους και, από την άλλη, υπήρχαν αρκετοί που πίστευαν ότι το μοντέλο των Weinberg και Salam θα διαψευδόταν. Για αρκετούς μήνες οι πειραματικοί προσπαθούσαν ανεπιτυχώς να διαχωρίσουν τα χρήσιμα πειραματικά δεδομένα από τον θόρυβο υποβάθρου.

Καμία πρόοδος δεν είχε επιτευχθεί μέχρι τα Χριστούγεννα του 1972. Όμως τις πρώτες μέρες του 1973, έλαβε χώρα μια παρατήρηση που θα άλλαζε το ρου της ιστορίας και θα ανάγκαζε τους πειραματικούς φυσικούς στο CERN να αφοσιωθούν στο κυνήγι των ουδέτερων ρευμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η πειραματική ομάδα του Άαχεν, που αποτελούσε μέλος της ευρύτερης συνεργασίας του Gargamelle, υποστήριξε για πρώτη φορά ότι είχε στα χέρια της μια ισχυρή ένδειξη για την ύπαρξη των ουδέτερων ρευμάτων. Επρόκειτο για μια φωτογραφία του θαλάμου φυσαλίδων όπου ένα αντινετρίνο, προερχόμενο από τα δεξιά της φωτογραφίας, «χτυπούσε» ένα ηλεκτρόνιο, δημιουργώντας μια χαρακτηριστική "βροχή" (shower) από ζεύγη ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων.

Αυτό που έκανε τη συγκεκριμένη φωτογραφία εξαιρετικά σημαντική ήταν ότι το παρατηρησιακό γεγονός του Aachen πληρούσε ολόκληρο το σύνολο των πολύ αυστηρών κριτηρίων που είχαν τεθεί: είχε αποτυπωθεί σε σημείο του ανιχνευτή που απέκλειε το γεγονός να επρόκειτο για φωτόνιο, είχε πολύ υψηλή ενέργεια, δεν υπήρχαν άλλα γεγονότα σε κοντινή απόσταση και είχε την κατεύθυνση της δέσμης νετρονίων. Με άλλα



ΕΙΚΟΝΑ 3. Η πρώτη παρατήρηση των ουδέτερων ρευμάτων από την ομάδα του Άαχεν, CERN Courier, 63 (4) Ιούλιος-Αύγουστος 2023, σ. 35.

λόγια, επρόκειτο για ένα «χρυσό γεγονός» («golden event»), όπως ονομάζονταν στην πειραματική ορολογία τα γεγονότα τα οποία πληρούσαν όλα τα κριτήρια που είχαν τεθεί για την επιβεβαίωση της ύπαρξης των ουδέτερων ρευμάτων.

Το γεγονός του Άαχεν ήταν εξαιρετικά επιδραστικό για την πειραματική κοινότητα του CERN. Θα πρέπει άλλωστε να συνυπολογίσουμε πως η πειραματική κουλτούρα ήταν αρκετά διαφορετική εκείνη την εποχή. Αρκετά πριν την καθιέρωση και την εκτεταμένη χρήση στατιστικών μεθόδων στον κλάδο, οι πειραματικοί που δούλευαν με φωτογραφίες ανιχνευτών, στήριζαν τις ανακαλύψεις τους σε λίγα αλλά πολύ καλά καθορισμένα γεγονότα. Μάλιστα, πολύ μεγάλες πειραματικές επιτυχίες στο παρελθόν, όπως στην περίπτωση του περίφημου Ω-, είχαν βασιστεί ακόμα και σε ένα μόνο «χρυσό γεγονός». Όπως γίνεται κατανοητό, σε αυτό το πλαίσιο το γεγονός του Άαχεν είχε πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα.

Όπως χαρακτηριστικά θα έγραφε σχετικά ο Faissner στον επικεφαλής του Gargamelle, André Lagarrigue: «Ακόμα θυμάμαι ξεκάθαρα τη δήλωση σου δώδεκα χρόνια πριν, ότι ακόμα και ένα ευδιάκριτο ηλεκτρόνιο είναι ικανό να αποδείξει την ταυτότητα του μυονίου-νετρονίου και του ηλεκτρόνιου-νετρονίου.»[9]

Αυτή τη φορά όμως, όλοι και όλες στο CERN καταλάβαιναν πως το διακύβευμα ήταν πολύ μεγαλύτερο, καθότι η συγκεκριμένη πρόβλεψη είχε ένα πολύ μεγαλύτερο ειδικό βάρος. Μια ενδεχόμενη ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων θα σήμαινε μια συνολική αλλαγή παραδείγματος για τον κλάδο των ΦΥΕ, καθώς θα έπρεπε να αλλάξει θεωρητικό και πειραματικό προσανατολισμό και να ακολουθήσει τον νέο δρόμο που χάραζε το ΚΠ. Υπό αυτό το πρίσμα, θα επρόκειτο για μια εξαιρετικά κρίσιμη ανακάλυψη, η οποία ήταν ικανή να χαρίσει στους πρωταγωνιστές της ακόμα και το πολυπόθητο βραβείο Νόμπελ Φυσικής.

Κατά συνέπεια, ο έλεγχος στον οποίο θα υποβαλλόταν το συγκεκριμένο αποτέλεσμα από την παγκόσμια κοινότητα θα ήταν εξονυχιστικός. Αυτός ήταν και ο λόγος που αποφασίστηκε να μην προχωρήσουν στην επίσημη ανακοίνωση των αποτελεσμάτων, πριν αυτά καταστούν απολύτως ακλόνητα. Πολύ σύντομα και με μεγάλη ένταση, ξεκίνησαν οι προσπάθειες των πειραματιστών του Gargamelle για να οχυρώσουν την ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων από κάθε πιθανή αμφισβήτηση. Επίκεντρο αυτών των προσπαθειών ήταν η βαθύτερη κατανόηση και ο έλεγχος του θορύβου υποβάθρου.[10]

Μετά από έξι μήνες εξαντλητικής διερεύνησης των ενδιαφερόντων σημάτων σε αντιδιαστολή με τον θόρυβο, όλα τα δεδομένα φαίνονταν να είναι συμβατά με τις θεωρητικές προβλέψεις του ΚΠ.[11] Πέρα από το ηλεκτρόνιο της ομάδας του Άαχεν, που αφορούσε το «κανάλι σήματος» των λεπτονίων, υπήρχαν πλέον και άλλα γεγονότα, αυτή τη φορά προερχόμενα από το κανάλι των αδρονίων, που επίρρωναν την πρόβλεψη των ουδέτερων ρευμάτων. Ακόμα και τα πιο δύσπιστα μέλη της συνεργασίας φαίνονταν πλέον να έχουν πειστεί και ένα ερώτημα άρχιζε να συζητείται έντονα: Πόσα ακόμα γεγονότα θα χρειαζόντουσαν για να μπορέσει η πειραματική ομάδα του Gargamelle να ισχυριστεί δημόσια πως ο έλεγχος του θορύβου ήταν υπό τον έλεγχο της και ότι η ύπαρξη των ουδέτερων ρευμάτων ήταν γεγονός; Ο Donald Perkins, ένα διαπρεπές μέλος της πειραματικής ομάδας, θα σημειώσει μερικά χρόνια αργότερα:

> Θυμάμαι ότι τότε (την άνοιξη και το καλοκαίρι του 1973), οι απόψεις σχετικά με την πειραματική διαδικασία εντός της συνεργασίας Gargamelle ήταν κάπως διχασμένες. Η

[9] (όπως παρατίθεται στο Galison 1983, 487).

[10] Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη συγκεκριμένη διαδικασία δείτε και Haidt 2004.

[11] Ο Vialle θυμάται χαρακτηριστικά πως ο Lagarrigue τον επισκεπτόταν σχεδόν κάθε μέρα στο γραφείο του έχοντας στο μυαλό του μια νέα πηγή θορύβου που έπρεπε να αποκλειστεί (Galison 1983, 490).

> πεποίθηση για την ύπαρξη των ουδέτερων ρευμάτων ήταν εκείνο τον καιρό ακλόνητη, αλλά η στάση απέναντι στη δημοσίευση των αποτελεσμάτων κυμαινόταν από τον άκρατο ενθουσιασμό έως την εξαιρετική επιφυλακτικότητα. Μια ψηφοφορία, που πραγματοποιήθηκε τον Μάιο του 1973, αποφάσισε οριακά να συνεχιστεί η ανάλυση προκειμένου να συλλεχθούν και άλλα δεδομένα πριν από την ανακοίνωση της ανακάλυψης. (Perkins 1997, 438)

Τελικά, ο γόρδιος δεσμός αυτής της ατέρμονης συλλογής νέων γεγονότων και ελέγχου του θορύβου θα κοβόταν από ένα γεγονός που ελάχιστα είχε να κάνει με την ίδια τη φυσική. Ο Carlo Rubbia, ένας Ιταλός φυσικός που διατηρούσε σχέσεις και με τα δύο πειράματα στις αντίπερα όχθες του Ατλαντικού, ενημέρωσε τη συνεργασία του Gargamelle ότι το πείραμα στο Fermilab ήταν και εκείνο πολύ κοντά στην ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων. Η συγκεκριμένη πληροφορία και ο έντονος συναγωνισμός ανάμεσα στα δύο πειράματα, ήταν καταλυτικοί παράγοντες για να επιταχυνθούν οι διαδικασίες δημοσίευσης των αποτελεσμάτων.

Έτσι, στις 19 Ιουλίου του 1973 ανακοινώνεται επίσημα στο CERN η ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων, ενώ λίγες μέρες αργότερα αποστέλλεται στο περιοδικό Physics Letters η επίσημη δημοσίευση (Hasert, et al. 1973). Ακολούθως, τον Αύγουστο του 1973, σε ένα συνέδριο στη Βόννη, ανακοινώνονται από κοινού, τόσο από τη συνεργασία Gargamelle όσο και από το HPWF, οι ισχυρές ενδείξεις που υπήρχαν για την επιβεβαίωση της πρόβλεψης των ουδέτερων ρευμάτων. Μάλιστα, ο θεωρητικός φυσικός Chen-Ning Yang θα αναγάγει την «ανακάλυψη» τους ως την κορυφαία στιγμή του συνεδρίου (Haidt 2004).[12]

Όμως η περιπέτεια της ανακάλυψης των ουδέτερων ρευμάτων δεν είχε ακόμα τελειώσει, καθώς οι πειραματικές ομάδες γύρω από το Fermilab αποδείχθηκαν πιο επιφυλακτικές από τους Ευρωπαίους συναδέλφους τους στο να δεχτούν μία πρόβλεψη που θα άλλαζε ριζικά το θεωρητικό και πειραματικό τοπίο του κλάδου. Λίγο καιρό μετά τη Βόννη λοιπόν, πολλά εξέχοντα μέλη της συνεργασίας HPWF, όπως ο David Cline και ο Alfred Mann, εξακολουθούσαν να διατηρούν αμφιβολίες σχετικά με τα ουδέτερα ρεύματα. Έτσι πείθουν ολόκληρη την ερευνητική ομάδα να κάνει σημαντικές τροποποιήσεις των επιστημονικών οργάνων και του ανιχνευτή και να προχωρήσει σε έναν νέο γύρο συλλογής σχετικών δεδομένων.

Η μη αναγνώριση των αποτελεσμάτων από το πείραμα HPWF, παρά την εξαιρετικά ενδελεχή διερεύνηση των πειραματικών αποτελεσμάτων που είχε προηγηθεί από την επιστημονική ομάδα του Gargamelle, άνοιξε για ακόμα μία φορά έναν εκτεταμένο κύκλο αμφισβήτησης στη διεθνή κοινότητα, που γρήγορα μεταφέρθηκε και στο ίδιο το CERN. Παρά το ότι τα αποτελέσματα της HPWF δεν δημοσιεύτηκαν ποτέ επίσημα, και μόνο

[12] Δείτε και Perkins 2003.

η διαρροή τους ήταν ικανή να «επιφέρει έντονη πίεση και κριτική στη συνεργασία Gargamelle από τη συντριπτική πλειοψηφία των φυσικών του CERN.» (Perkins 1997, 443)

Η διστακτικότητα του ευρωπαϊκού οργανισμού να αποδεχτεί την επιβεβαίωση της πρόβλεψης ήταν σημαντική. Είναι χαρακτηριστικό πως ο Willibald Jentschke, ο οποίος κατείχε τη θέση του Γενικού Διευθυντή του οργανισμού εκείνη την εποχή, συγκάλεσε έκτακτη σύσκεψη με τους επικεφαλής του Gargamelle, για να τους ζητήσει να προχωρήσουν σε έναν νέο κύκλο ανάλυσης των αποτελεσμάτων τους. Ο φόβος της διοίκησης, που εκφραζόταν ανοιχτά, ήταν πως το CERN θα μπορούσε ενδεχομένως να γίνει το κέντρο μιας «λανθασμένης» ανακάλυψης που θα συγκέντρωνε πάνω της, εξαιτίας και της σημασίας της, μια εξαιρετικά ευρεία αρνητική δημοσιότητα. Έτσι, το 1974, ένας νέος γύρος ακόμη πιο αυστηρής ανάλυσης εκτυλίχθηκε και στις δύο πλευρές του Ατλαντικού Ωκεανού. Ο όγκος των συλλεχθέντων δεδομένων αυξήθηκε θεαματικά, τα γεγονότα υποβλήθηκαν σε πολλαπλούς γύρους εξέτασης, οι ενεργειακές μετρήσεις ελέγχθηκαν από την αρχή, οι περιοχές αναφοράς επαναπροσδιορίστηκαν και έγιναν επίπονες προσπάθειες για την επανεκτίμηση όλων των υπαρχουσών πειραματικών φωτογραφιών.

Τελικά, περίπου ένα χρόνο μετά την αρχική επίσημη ανακοίνωση του πειράματος Gargamelle για την ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων, τρία ακόμη πειράματα που διεξήχθησαν σε διαφορετικά εργαστήρια στις Ηνωμένες Πολιτείες, στο Argonne, στο Brookhaven και στο Fermilab, επιβεβαίωσαν ανεξάρτητα μεταξύ τους την ύπαρξη ουδέτερων ρευμάτων. Ταυτόχρονα, η επιστημονική ομάδα του Gargamelle επιβεβαίωσε τον αρχικό της ισχυρισμό, βασιζόμενη αυτή τη φορά σχεδόν στα διπλάσια δεδομένα. Τα αποτελέσματα αυτών των τεσσάρων διαφορετικών πειραμάτων παρουσιάστηκαν από κοινού στο διεθνές συνέδριο του Λονδίνου τον Ιούνιο του 1974.[13] Εν τω μεταξύ, η συνεργασία HPWF εντόπισε την αιτία του λάθους της και τεκμηρίωσε και αυτή με τη σειρά της την ύπαρξη των ασθενών ουδέτερων ρευμάτων. Κατά αυτόν τον τρόπο ολοκληρώθηκε ένας από τους πιο περιπετειώδεις ελέγχους μιας θεωρητικής πρόβλεψης στην ιστορία της ΦΥΕ, αναδεικνύοντας την περίπλοκη σχέση μεταξύ θεωρίας και πειράματος.

Ανοίγοντας λοιπόν το «μαύρο κουτί» της ανακάλυψης των ουδέτερων ρευμάτων, η αφηρημένη και αναχρονιστική εικόνα που απεικονίζει την εγκαθίδρυση του Καθιερωμένου Προτύπου ως μια προκαθορισμένη, αναπόφευκτη και ομαλή διαδικασία φαίνεται να κλονίζεται. Όπως είδαμε, κατά την πρώτη περίοδο ελέγχου της θεωρίας, οι προβλέψεις του ΚΠ αντιμετωπίστηκαν με μια ευρεία καχυποψία ενώ σημειώθηκε και μια σημαντική αντίσταση από την πειραματική κοινότητα στο να γίνουν εν τέλει δεκτές. Η εγκαθίδρυση του θεωρητικού μοντέλου προέκυψε τελικά

[13] Μια πρώτη εκδοχή των αποτελεσμάτων παρουσιάστηκε στο συνέδριο της Αμερικανικής Φυσικής Εταιρείας στην Ουάσιγκτον τον Απρίλιο του 1974. Δείτε και Perkins 2003.

μέσα από την επιμονή και τις συγκεκριμένες παρεμβάσεις θεωρητικών και πειραματικών φυσικών, που στήριζαν σθεναρά τη νέα θεωρία, όπως ο Steven Weinberg, ο Sheldon Glashow, ο Gerard 't Hooft και η πειραματική συνεργασία του Gargamelle στο CERN.

Με άλλα λόγια, η κομβική ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων δεν αποτέλεσε μια στιγμιαία ανακάλυψη, ένα συγκυριακό «εύρηκα» πάνω στο οποίο «σκόνταψε» κάποιος φυσικός. Παρόλο που τα ίχνη τους υπήρχαν στα πειραματικά δεδομένα από πολύ νωρίς, πριν ακόμα και τη ρητή πρόβλεψη τους από τη θεωρία, η ανακάλυψή τους εξελίχθηκε σε μια παρατεταμένη και επίπονη διαδικασία, με πολλούς πειραματιστές να απορρίπτουν αρχικά αυτό που αργότερα θα περιέγραφαν ως «προφανές». Στα μέσα της δεκαετίας του 1960, χωρίς μια συμπαγή θεωρία που θα μπορούσε να αποτελέσει οδηγό για την ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων των φωτογραφιών από τους θαλάμους σπινθήρων, οι πειραματικοί ήταν πολύ εύκολο να τις παρερμηνεύσουν με βάση κάτι που τους ήταν πειραματικά οικείο και συγκεκριμένα τους αστέρες νετρονίων. Αλλά ακόμα και αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν πλέον η νέα ηλεκτρασθενής θεωρία είχε καταστεί πολύ πιο ώριμη, η πλειοψηφία των πειραματικών ούτε την κατανοούσε σε βάθος, ούτε είχε πειστεί για την ορθότητα της, ούτε είχε τους τρόπους για να τη «χειριστεί» πειραματικά. Δεν θα πρέπει να προκαλεί εντύπωση, λοιπόν, πως ακόμα και την περίοδο 1972-1973, πολλοί πειραματιστές επιχειρούσαν πεισματικά να βρουν εναλλακτικές ερμηνείες των δεδομένων προκειμένου να μην αποδεχτούν την ύπαρξη των ουδέτερων ρευμάτων. Όπως θα σημείωνε ο Alfred Mann, ένας από τους διασημότερους πειραματικούς φυσικούς της περιόδου, κατά τη διάρκεια μιας συνέντευξης το 1980:

> Θα μπορούσατε να πείτε ότι καταλήξαμε αμέσως στο συμπέρασμα ότι είχαμε παρατηρήσει τα αδύναμα ουδέτερα ρεύματα. Αλλά θα εκπλαγείτε, γιατί αυτό ήταν το τελευταίο συμπέρασμα στο οποίο θα καταλήγαμε. Το πρώτο μας συμπέρασμα ήταν ότι κάναμε κάποιο λάθος και ότι τα μιόνια με κάποιο τρόπο διέφευγαν από την πειραματική διάταξη ή για κάποιον λόγο δεν μπορούσαμε να τα εντοπίσουμε και ότι δεν θα μπορούσε να υπάρξει κανένα αποτέλεσμα τέτοιου μεγέθους [της ύπαρξης των ουδέτερων ρευμάτων].[14]

Η διστακτικότητα των πειραματικών να υιοθετήσουν τη συγκεκριμένη πρόβλεψη μπορεί να γίνει κατανοητή και υπό το πρίσμα της κρισιμότητάς της, καθώς μια πιθανή επίρρωση της θα σήμαινε και μια πειραματική και θεωρητική αλλαγή παραδείγματος της ΦΥΕ. Έτσι, για αρκετούς μήνες, οι πειραματιστές γύρω από τους θαλάμους φυσαλίδων αντιμετώπισαν την πρόκληση της διαχείρισης του θορύβου υποβάθρου, της εξάλειψης εναλλακτικών σεναρίων, της συγκέντρωσης πρόσθετων δεδομένων

[14] όπως παρατίθεται στον Galison 1983, 494.

και της διενέργειας όλο και περισσότερων στατιστικών αναλύσεων. Μόνο όταν διαλύθηκαν και τα τελευταία ίχνη αμφιβολίας και το αποτέλεσμα υποστηρίχθηκε από τέσσερα ανεξάρτητα πειράματα, η παγκόσμια κοινότητα της ΦΥΕ ήταν επιτέλους έτοιμη να αποδεχθεί την ύπαρξη των ουδέτερων ρευμάτων.

Ένα ακόμα σημείο που είναι κρίσιμο να ληφθεί υπόψη, κατά την εξέταση της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των θεωρητικών προβλέψεων και του πειραματικού τους ελέγχου στο πλαίσιο της ΦΥΕ, είναι οι ιδιαίτερες συνθήκες που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο πεδίο. Το πλήθος των πειραματικών υποομάδων με διαφορετική ειδημοσύνη που εργάζονταν με μερική ανεξαρτησία μεταξύ τους, η ανάγκη εκατοντάδων φυσικών να διαμορφώσουν συναίνεση γύρω από τα πειραματικά αποτελέσματα, η περίπλοκη φύση των εμπλεκόμενων οργάνων και το ανταγωνιστικό τοπίο μεταξύ ευρωπαϊκών και αμερικανικών εργαστηρίων -συμπεριλαμβανομένων των παραγόντων δημόσιας εικόνας και φήμης, έπαιξαν από κοινού έναν καθοριστικό, διαμορφωτικό ρόλο.[15]

Για να αποκτήσουμε, ωστόσο, μια πληρέστερη εικόνα σχετικά με το πώς οι θεωρητικές προβλέψεις μπορεί να αντιμετωπίζονται ουσιωδώς διαφορετικά κατά τον πειραματικό τους έλεγχο, είναι κρίσιμο να αντιπαραβάλουμε την περίπτωση της ανακάλυψης των ουδέτερων ρευμάτων με μια άλλη πρόβλεψη του ΚΠ, αυτή των W και Z μποζονίων. Η σύγκριση αυτή καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική αν αναλογιστεί κανείς ότι η συγκεκριμένη πρόβλεψη υποβλήθηκε σε πειραματικό έλεγχο λίγα μόλις χρόνια αργότερα, όταν όμως πλέον το ΚΠ είχε εδραιωθεί ως το κυρίαρχο θεωρητικό πλαίσιο αναφοράς στη ΦΥΕ.

3. Η ανακαλυψη των W και Z μποζονιων: Μια «αυτοεκπληρουμενη προφητεια»

Μετά την επίρρωση της πρόβλεψης των ουδέτερων ρευμάτων, το ΚΠ άρχισε να επιβάλλει την κυριαρχία του στη ΦΥΕ, σηματοδοτώντας ένα σημείο καμπής στη δυναμική σχέση μεταξύ θεωρίας και πειράματος.[16] Επιπροσθέτως, η εγκαθίδρυσή του πυροδότησε έναν εξαιρετικά έντονο ανταγωνισμό μεταξύ των εργαστηρίων ΦΥΕ στις δύο πλευρές του Ατλαντικού. Έχοντας ως θεωρητικό οδικό χάρτη τις προβλέψεις του ΚΠ, μέσα

[15] Πιο συγκεκριμένα, όπως είδαμε και πιο πάνω, δύο συνθήκες, οι οποίες προέρχονταν έξω από τα «τείχη» του εργαστηρίου είχαν καταλυτική επίδραση στο πως εξελίχθηκαν τα πειράματα. Η πρώτη αφορούσε τον ανταγωνισμό μεταξύ HPWF και Gargamelle, που αντικατόπτριζε τον γενικότερο ανταγωνισμό ανάμεσα στην Ευρωπαϊκή και Αμερικάνικη ΦΥΕ. Η δεύτερη σχετιζόταν με την ιδιαιτερότητα του CERN, ως ένα εργαστήριο που λογοδοτούσε άμεσα σε μια σειρά διαφορετικών ευρωπαϊκών κυβερνήσεων. Συχνά η συνθήκη αυτή έκανε τον ευρωπαϊκό οργανισμό αρκετά επιφυλακτικό στο να ανακοινώνει τα πειραματικά του αποτελέσματα ώστε να διαφυλάξει την αξιοπιστία και τη φήμη του (Για περισσότερες λεπτομέρειες δείτε Panoutsopoulos & Arabatzis 2022).

[16] Δείτε επίσης Pickering 1984a, Pickering 1984b.

σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα συγκροτήθηκε μια πυκνή σειρά πειραμάτων. Τον Νοέμβριο του 1974, η ύπαρξη των μεσονίων J/psi πιστοποιήθηκε σχεδόν ταυτόχρονα από δύο διαφορετικές πειραματικές ομάδες στις ΗΠΑ, με την πρώτη να βρίσκεται στον Γραμμικό Επιταχυντή του Στάνφορντ (SLAC) και τη δεύτερη στο Εθνικό Εργαστήριο Brookhaven. Σε αντίθεση με την περίπτωση των ουδέτερων ρευμάτων και την παρατεταμένη αμφιβολία που αναπτύχθηκε γύρω τους, η ανακάλυψη των J/psi αναγνωρίστηκε αμέσως και συνολικά από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Έτσι, έλαβε πολύ σύντομα, το 1976, το βραβείο Νόμπελ Φυσικής και έμεινε στην ιστορία ως η «Επανάσταση του Νοεμβρίου». Τη σκυτάλη πήραν μια σειρά πειραμάτων που διεξήχθησαν μεταξύ 1974 και 1977 στον SLAC και οδήγησαν στην ανακάλυψη του Ταυ, ενός λεπτονίου τρίτης γενιάς, ενώ το 1977, το Fermilab συμπλήρωσε ακόμα ένα κομμάτι στο «παζλ» του ΚΠ με τον εντοπισμό του «down quark». Η εποχή της «νέας φυσικής», όπως ονομάστηκε, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 είχε αδιαμφισβήτητα το πειραματικό κέντρο της στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το γεγονός αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να ασκηθούν στο CERN, στις αρχές της δεκαετίας του 1980, τεράστιες πιέσεις, καθώς στον συναγωνισμό των συνεχιζόμενων ανακαλύψεων του ΚΠ καταλάμβανε μονίμως τη δεύτερη θέση πίσω από τα αμερικάνικα εργαστήρια. Υπό αυτές τις συνθήκες, με απώτερο στόχο να εξασφαλίσει το πολυπόθητο πρώτο του Νόμπελ,[17] ο ευρωπαϊκός οργανισμός έστρεψε όλες τις δυνάμεις του στην επόμενη σημαντική ανακάλυψη στο πλαίσιο του ΚΠ, αυτής των μποζονίων W και Z, που περιγράφονταν από τη θεωρία ως φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης.

Το κίνητρο για το CERN ήταν τεράστιο. Είχε όμως να αντιμετωπίσει και ένα θεμελιώδες εμπόδιο. Οι προβλεπόμενες μάζες των μποζονίων, σύμφωνα με τη θεωρία, κυμαίνονταν από 60 GeV έως 80 GeV για το W και από 75 GeV έως 92 GeV για το Z. Ωστόσο, ο κύριος επιταχυντής σωματιδίων στο CERN εκείνη την εποχή, το Super Proton Synchrotron (SPS), δεν είχε τη δυνατότητα να παράγει τις απαιτούμενες ενέργειες. Όπως σημειώνεται και από τους πειραματικούς φυσικούς της περιόδου, ο οργανισμός θα μπορούσε να εξετάσει το ενδεχόμενο να περιμένει ως τη λειτουργία του επερχόμενου επιταχυντή Large Electron-Positron (LEP), ο οποίος θα ήταν κατάλληλος όχι μόνο για την ανίχνευση των μποζονίων W και Z αλλά και για τον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους (Di Lella & Rubbia 2015). Παρ' όλα αυτά, η κατασκευή του LEP θα απαιτούσε μερικά επιπλέον χρόνια,[18] ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο το CERN θα κινδύνευε να χάσει μέσα από τα χέρια του ακόμα μία κρίσιμη ανακάλυψη από τα αμερικανικά εργαστήρια. Η ατμόσφαιρα στο CERN κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου αποτυπώνεται με γλαφυρό τρόπο στα λόγια του Pierre Darriulat, ο οποίος αποτέλεσε ένα από τα

[17] Δείτε Panoutsopoulos & Arabatzis 2022.

[18] Ο LEP τέθηκε τελικά σε λειτουργία το 1989.

πρόσωπα-κλειδιά στην ανακάλυψη των μποζονίων: «Η πίεση για την ανακάλυψη των W και Z ήταν τόσο μεγάλη που ο μακροχρόνιος σχεδιασμός του LEP άφηνε τους περισσότερους από εμάς, ακόμη και τους πιο υπομονετικούς, δυσαρεστημένους. Ως εκ τούτου, μια γρήγορη (αλλά όχι «πρόχειρη») ματιά στα νέα μποζόνια θα ήταν ιδιαίτερα ευπρόσδεκτη.» (Darriulat 2004, 14)

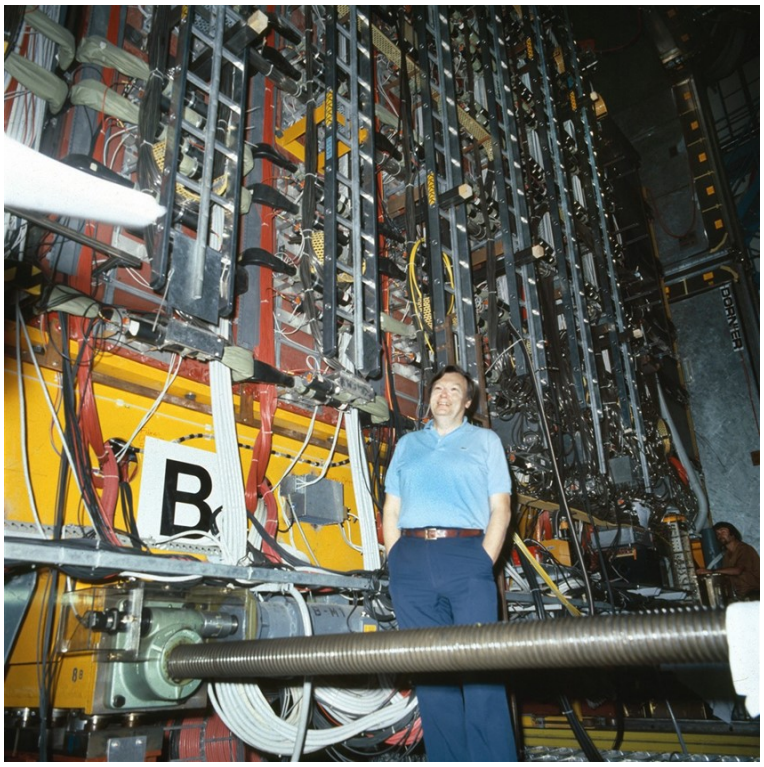
Υπό αυτές τις συνθήκες, ελήφθη από τη διοίκηση του οργανισμού η τολμηρή απόφαση να μετατραπεί ο υφιστάμενος SPS από επιταχυντής πρωτονίων σε επιταχυντή πρωτονίων-αντιπρωτονίων (SppbarS). Ο μετασχηματισμός αυτός βασίστηκε σε μια πρωτοποριακή ιδέα που διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1976 από τους Carlo Rubbia, David Cline και Peter McIntyre. Οι τρεις καταξιωμένοι φυσικοί πρότειναν τη χρήση μιας δέσμης πρωτονίων και μιας δέσμης αντιπρωτονίων, που περιστρέφονται προς αντίθετες κατευθύνσεις μέσα στον σωλήνα κενού του επιταχυντή και συγκρούονται μετωπικά. Επιπλέον, η πρωτοποριακή τεχνική «στοχαστικής ψύξης» («stochastic cooling»), που ανέπτυξε ο μηχανικός επιταχυντών Simon Van den Meer, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση αυτής της ιδέας. Η μετατροπή αυτή αποσκοπούσε στην άμεση επίτευξη των απαιτούμενων ενεργειακών επιπέδων και στη διευκόλυνση της ανακάλυψης των σωματιδίων W και Z το ταχύτερο δυνατό, ακόμα και αν υπήρχαν βάσιμοι φόβοι, ότι σε αυτή την περίπτωση θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να ελεγχθεί και να απομονωθεί ο θόρυβος υποβάθρου. Έτσι, σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικά πειράματα, τα UA1 και UA2,[19] που ήταν επικεντρωμένα στον έλεγχο αυτής της συγκεκριμένης πρόβλεψης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διοίκηση του CERN αποφάσισε να δημιουργήσει το UA2, 6 μήνες περίπου μετά την έγκριση του UA1, ως ένα συμπληρωματικό πείραμα, το οποίο θα κατασκεύαζε τον δικό του ανιχνευτή και θα έλεγχε ανεξάρτητα και αμερόληπτα το UA1. Πιο συγκεκριμένα, κάθε πειραματική ομάδα θα εργαζόταν αποκλειστικά με τον δικό της ανιχνευτή, αποφεύγοντας να ανταλλάξει δεδομένα και μεθοδολογίες για να ενισχύσει την αξιοπιστία των τελικών πειραματικών ευρημάτων. Αυτή η στρατηγική επιλογή αποτέλεσε ένα προληπτικό μέτρο του οργανισμού για να μετριάσει τις υψηλές προσδοκίες της πειραματικής κοινότητας στο CERN για την επικείμενη ανακάλυψη. Η ακλόνητη πίστη στο θεωρητικό μοντέλο του ΚΠ και στις προβλέψεις του σε συνδυασμό με τον φρενήρη ρυθμό που έθετε η κούρσα για την απονομή του προσδοκώμενου βραβείου Νόμπελ φυσικής, θα μπορούσε να έχει καταστροφικές συνέπειες αν δεν λαμβάνονταν από τον ευρωπαϊκό οργανισμό τα κατάλληλα μέτρα.[20]

Η προσμονή για την επίτευξη αυτής της ανακάλυψης ήταν τόσο μεγάλη ώστε ο έγκριτος πειραματιστής και διευθυντής του Fermilab, Leon Lederman, προσπάθησε να επιστήσει την προσοχή στους συναδέλφους

[19] Το όνομα UA προερχόταν από τα αρχικά του «Underground Area» («Υπόγεια Περιοχή»).

[20] Για περισσότερες λεπτομέρειες δείτε Panoutsopoulos & Arabatzis 2022.



ΕΙΚΟΝΑ 4. Το πείραμα UA1, με επικεφαλής τον Carlo Rubbia, Αύγουστος 1983, CERN PhotoLab, (Original ref.:CERN-PHOTO-8308578X).

του, έτσι ώστε να κρατήσουν κάποιες «αποστάσεις ασφαλείας» από το γενικό κλίμα ευφορίας σχετικά με τις θεωρητικές προβλέψεις του ΚΠ: «Πρέπει να προσπαθήσουμε σκληρά για να διατηρήσουμε τον παραδοσιακό σκεπτικισμό μας παρά την ισχυρή επιρροή που ασκούν πάνω μας οι θεωρητικοί συνάδελφοι μας, η οποία τείνει να αποδυναμώσει την αντίσταση μας.» (Lederman 1983, 576) Σε αντίθεση, λοιπόν, με τα ασθενή ουδέτερα ρεύματα, στην περίπτωση των μποζονίων W και Z, η σχέση μεταξύ θεωρητικών προβλέψεων, πειραματισμού και οργάνων διέφερε σημαντικά, ακόμα και πριν την έναρξη συλλογής των πρώτων δεδομένων, και αυτό θα ήταν καθοριστικό για τη διαφορετική εξέλιξη της.

Ακόμη και σε αυτό το πλαίσιο, ωστόσο, οι δύο πειραματικές ομάδες προσέγγισαν την πρόβλεψη των μποζονίων με διαφορετικό τρόπο. Συγκεκριμένα, τον Ιανουάριο του 1983, το κλίμα στο CERN διαταράχθηκε εξαιτίας μιας έντονης διαφωνίας μεταξύ των πειραμάτων UA1 και UA2. Το σημείο τριβής ανάμεσα στις δύο ερευνητικές ομάδες εντοπιζόταν στο εάν τα πειραματικά δεδομένα που είχαν στα χέρια τους μέχρι εκείνη τη στιγμή ήταν ικανά για να υποστηρίξουν την ανακάλυψη του μποζονίου W. Αλλά ας πάρουμε τα πράγματα από την αρχή.

Στις 12 Ιανουαρίου, κατά τη διάρκεια μιας ημερίδας στη Ρώμη, και οι δύο ομάδες παρουσίασαν δημοσίως τα αποτελέσματά τους για πρώτη φορά. Το UA1 παρουσίασε έξι «υποψήφια γεγονότα», τα οποία υποδείκνυαν την ύπαρξη του W, ενώ το UA2 τέσσερα. Σε εκείνη τη φάση και οι δύο ομάδες συμφώνησαν ότι, παρότι βρίσκονταν σε πολύ καλό δρόμο, τα συγκεκριμένα ευρήματα τους ήταν ακόμα πρώιμα και ήταν απαραίτητο να συνεχίσουν την περαιτέρω συλλογή δεδομένων πριν από την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων.

Παρ' όλα αυτά, ο «πυρετός» του βραβείου Νόμπελ φαίνεται ότι είχε κυριεύσει μεγάλο μέρος της πειραματικής κοινότητας του CERN. Έτσι, το Σαββατοκύριακο 22-23 Ιανουαρίου, και παρά την απουσία οποιουδήποτε νέου πειραματικού δεδομένου, η πειραματική ομάδα του UA1 και ο επικεφαλής του, Carlo Rubbia, άλλαξαν απότομα στάση. Χρησιμοποιώντας ως μοχλό πίεσης την εμπιστοσύνη της επιστημονικής κοινότητας στο ΚΠ και την προσδοκία της ότι οι προβλέψεις του επρόκειτο να επιβεβαιωθούν, άρχισαν να πιέζουν τη διοίκηση του οργανισμού να ανακοινώσει άμεσα την ανακάλυψη του μποζονίου W. Σύμφωνα με τα λόγια του Rubbia, τα πειραματικά δεδομένα που υπήρχαν ήταν ήδη επαρκή: «μοιάζουν με W, έχουν την αίσθηση των W, μυρίζουν σαν W, θα πρέπει να είναι W.»[21] Αντίθετα, το πείραμα UA2, που εκπροσωπούνταν από τον Pierre Darriulat, διατήρησε μια εξαιρετικά προσεκτική και επιφυλακτική προσέγγιση, τονίζοντας τους κινδύνους που μπορούσαν να ανακύψουν εάν το CERN προχωρούσε στην ανακοίνωση μιας τόσο σημαντικής ανακάλυψης που θα βασιζόταν σε τόσο περιορισμένα πειραματικά δεδομένα (Krige 2001; Panoutsopoulos & Arabatzis 2022).

Η διαμάχη ανάμεσα στα UA1 και UA2 ίσως να μας φέρνει στο μυαλό την αντίστοιχη διαφωνία μεταξύ της ερευνητικής ομάδας του Gargamelle και της HWPF που παρακολουθήσαμε προηγουμένως. Όμως, η εξέλιξη της ιστορίας αυτή τη φορά θα είχε μια πολύ διαφορετική κατάληξη και ένας από τους βασικούς λόγους ήταν η ωρίμανση και η ευρεία αποδοχή που πλέον απολάμβανε το θεωρητικό μοντέλο του ΚΠ στην κοινότητα της ΦΥΕ. Υπό αυτές τις συνθήκες, παρά τις όποιες δεύτερες σκέψεις υπήρχαν, η διοίκηση του CERN επέλεξε να στηρίξει την ανακάλυψη του μποζονίου W, ιδίως υπό το πρίσμα της πρόσφατης εμπειρίας με τα ουδέτερα ρεύματα, όπου η αμφισβήτηση της συγκεκριμένης ανακάλυψης είχε πολύ αρνητικό αντίκτυπο στην ευρύτερη αποδοχή της. Έτσι λοιπόν, στις 25 Ιανουαρίου, ο τότε γενικός διευθυντής του ευρωπαϊκού οργανισμού, Herwig Schopper, συγκάλεσε μια ειδική συνέντευξη Τύπου για να ανακοινώσει με κάθε επισημότητα την ανακάλυψη, παρά τις σημαντικές επιφυλάξεις πολλών πειραματιστών σχετικά με την αναγκαιότητα συλλογής περισσότερων δεδομένων και ανάλυσης αυτών. Προκειμένου, μάλιστα, να εξαλειφθούν οι όποιες αμφιβολίες και να παρουσιαστεί το

[21] όπως αναφέρεται στο Watkins 1986, 185.

ΕΙΚΟΝΑ 5. Συνέντευξη Τύπου στις 25 Ιανουαρίου 1983 στο CERN, για την ανακάλυψη του μποζονίου W. Από δεξιά προς αριστερά: ο Carlo Rubbia, εκπρόσωπος του πειράματος UA1· ο Simon van der Meer, υπεύθυνος για την ανάπτυξη της «στοχαστικής ψύξης»· ο Herwig Schopper, Γενικός Διευθυντής του CERN· ο Erwin Gabathuler, Διευθυντής Έρευνας του CERN, και ο Pierre Darriulat, εκπρόσωπος του πειράματος UA2. CERN PhotoLab, (Original ref.: X-243-1-83).

CERN σαν ένα ενιαίο μέτωπο προς τα έξω, η διεύθυνση επέμενε να παρουσιαστεί ο Darriulat μαζί με τον Rubbia στη συνέντευξη Τύπου, παρά τις αντιρρήσεις που πρόβαλε ο ίδιος και η ομάδα του σχετικά με την πρώιμη ανακοίνωση της ανακάλυψης.[22]

Λίγες μόνο εβδομάδες αργότερα, την άνοιξη του 1983, μια αντίστοιχα ομαλή πειραματική διαδικασία οδήγησε στην ανακάλυψη του μποζονίου Z, βασιζόμενη και πάλι σε πολύ περιορισμένα δεδομένα. Όπως θα παρατηρούσε ο Donald Perkins, που είχε ζήσει από κοντά και την περιπέτεια

[22] Όπως σημειώνει ο John Krige, ο Schopper τοποθέτησε τον Darriulat δίπλα στον Rubbia, «για να διαλύσει τις αμφιβολίες σχετικά με την αξιοπιστία των ευρημάτων του UA1. Με αυτόν τον τρόπο, εκμεταλλεύτηκε το κύρος του Darriulat, αναγκάζοντας τον εκπρόσωπο του UA2, από αφοσίωση στο CERN, να συμπράξει στην προώθηση ενός ισχυρισμού για τον οποίο ο ίδιος δεν ήταν πλήρως πεπεισμένος [...] Ο πρωταρχικός ρόλος του Darriulat ήταν να καθησυχάσει, όχι να πανηγυρίσει, να προσδώσει αξιοπιστία στο UA1, όχι να επιδιώξει επαίνους για το UA2.» (Krige 2001, 536)

της ερευνητικής ομάδας του Gargamelle, η ανακάλυψη των μποζονίων W και Z «έγινε δεκτή με ανακούφιση παρά με δυσπιστία» από ολόκληρη την κοινότητα της ΦΥΕ, σε αντίθεση με την αντίστοιχη προβληματική αποδοχή των ουδέτερων ρευμάτων (Perkins 1997, 444). Λιγότερο από έναν χρόνο αργότερα, τον Οκτώβριο του 1984, ο Carlo Rubbia και ο Simon van der Meer τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής για την ανακάλυψη των W και Z. Αντίθετα, η ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων που άνοιξε τον δρόμο για την καθιέρωση του ΚΠ, παρά την τεράστια σημασία της, δεν τιμήθηκε ποτέ με το συγκεκριμένο βραβείο εξαιτίας των αρχικών αμφιβολιών γύρω από αυτήν.

Η στρατηγική του Rubbia να ευθυγραμμιστεί με το ευνοϊκό κλίμα που επικρατούσε στην κοινότητα της ΦΥΕ όσον αφορά τις συγκεκριμένες προβλέψεις αναμφισβήτητα ανταμείφθηκε. Ωστόσο, πολύ σύντομα θα αποδεικνυόταν ότι αυτή η «τυφλή» εμπιστοσύνη στις προβλέψεις του ΚΠ θα μπορούσε να οδηγήσει και σε πολύ προβληματικά μονοπάτια. Στις 25 Ιουνίου 1984, ο Rubbia, έχοντας ακόμα νωπή τη μνήμη της επιτυχίας που του χάρισε το Νόμπελ, έσπευσε να ανακοινώσει στους New York Times (Sullivan 1984, 13) ότι το UA1 βρισκόταν στα πρόθυρα μιας ακόμη σημαντικής ανακάλυψης. Επρόκειτο για την επικύρωση μιας ακόμα πολύ-αναμενόμενης πρόβλεψης του ΚΠ: του «top quark». Η πεποίθησή του ότι το UA1 πλησίαζε σε μια ακόμα σπουδαία ανακάλυψη στηρίχθηκε, για άλλη μια φορά, σε εύθραυστα θεμέλια, καθώς η πειραματική του ομάδα είχε να επιδείξει μόλις έξι «ενδιαφέροντα γεγονότα». Λίγες ημέρες πριν το δημοσίευμα της εφημερίδας, που όπως ήταν λογικό είχε σκορπίσει τον ενθουσιασμό και στη δημόσια σφαίρα για την επικείμενη ανακάλυψη, τα συγκεκριμένα ευρήματα είχαν ανακοινωθεί σε διεθνή workshops της ΦΥΕ στο Ντόρτμουντ της Γερμανίας και στο Λουντ της Σουηδίας, παρά το γεγονός ότι η συλλογή και η ανάλυση δεδομένων ήταν ακόμα υπό εξέλιξη.

Λίγες ημέρες αργότερα, στις 4 Ιουλίου, το CERN θα έβγαζε μια επίσημη ανακοίνωση για να υποστηρίξει τους ισχυρισμούς του Rubbia, με τον χαρακτηριστικό τίτλο «Η αναζήτηση για το top quark στέφεται με επιτυχία στο CERN» (CERN 1984). Η ανακοίνωση περιλάμβανε επίσης μια ειδική αναφορά στην εκτιμώμενη μάζα του top quark, η οποία σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Rubbia και της ομάδας του ήταν «30 με 50 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του πρωτονίου (δηλαδή 30 έως 50 GeV).» (CERN 1984) Οι πανηγυρισμοί αυτή τη φορά όμως είχαν βραχεία διάρκεια, τιμωρώντας την υπερβολική εμπιστοσύνη στις προβλέψεις του ΚΠ. Τους επόμενους μήνες διαπιστώθηκε ότι το UA1 είχε παραβλέψει μια σημαντική πηγή θορύβου υποβάθρου (Staley 2004) και, όπως αποκαλύφθηκε σχεδόν μία δεκαετία αργότερα, οι πειραματικοί του CERN είχαν στην προκειμένη περίπτωση καταλήξει σε μια «ψευδή ανακάλυψη» (false discovery). Το top quark ανακαλύφθηκε τελικά το 1995 στο Fermilab, με εντελώς διαφορετική μάζα, περίπου 175 GeV.

Η ιστορία της ψευδούς ανακάλυψης του top quark από τη συνεργασία UA1 ξεχάστηκε αρκετά γρήγορα και πολλά από τα ίχνη της έχουν ξεθωριάσει μέσα στον χρόνο. Αντίθετα, η επιτυχής ανακάλυψη των μποζονίων W και Z συνεχίζει να προβάλλεται πολύ συχνά, ακόμα και από τους ίδιους τους φυσικούς, σαν ένα πρότυπο της σχέσης μεταξύ θεωρίας και πειράματος. Όμως, για να κατανοήσουμε τη μεταβαλλόμενη επιστημική αξία της πρόβλεψης και του ρόλου της στη συνολική ανάπτυξη του πεδίου των ΦΥΕ ως μιας δυναμικής γέφυρας μεταξύ θεωρίας και πειραματισμού, είναι ζωτικής σημασίας να αποφύγουμε τις αναχρονιστικές ιστορικές προσεγγίσεις και να διερευνήσουμε όχι μόνο τις επιτυχίες αλλά και τις αποτυχίες αυτής της σχέσης.

4. Σχεδιαζοντας τον LHC: το οραμα ενος νεου επιταχυντη και ο ρολος των προβλεψεων

Ενώ μέχρι στιγμής έχουμε εξετάσει διεξοδικά την αλληλεπίδραση μεταξύ θεωρητικών προβλέψεων και πειραματισμού, μια πολύ σημαντική πτυχή της ΦΥΕ έχει μείνει, ως επί το πλείστον, ανεξερεύνητη. Σε αυτήν την ενότητα θα επιχειρήσουμε να καλύψουμε αυτό το κενό, μελετώντας την σχέση μεταξύ των προβλέψεων και του τρίτου βασικού πυλώνα του κλάδου, των επιστημονικών οργάνων.[23] Επίκεντρο αυτής της διερεύνησης θα αποτελέσει ο ρόλος που έπαιξαν οι προβλέψεις στον σχεδιασμό της μεγαλύτερης και σημαντικότερης πειραματικής μηχανής που κατασκευάστηκε ποτέ στην ιστορία της ΦΥΕ, του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων (LHC). Προτού, ωστόσο, επικεντρωθούμε στην ιστορία του LHC, για να κατανοήσουμε την περίπλοκη σχέση μεταξύ θεωρητικών προβλέψεων και επιστημονικών οργάνων, θα πρέπει πρώτα να αντιληφθούμε τη δυναμική αυτών των κολοσσιαίων πειραματικών μηχανών στο πλαίσιο της ΦΥΕ.

Καθώς μεταπολεμικά οι επιταχυντές, από δεκαετία σε δεκαετία, μεγάλωναν θεαματικά σε μέγεθος, πολυπλοκότητα και κόστος, η ίδια η επιβίωση του κλάδου της ΦΥΕ άρχισε να εξαρτάται όλο και περισσότερο από την ύπαρξή τους. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι πρακτικές και η στοχοθεσία της κοινότητας των φυσικών υψηλών ενεργειών διαμορφώθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό που σχετίζεται με αυτά τα όργανα και ενέχει πολλά επίπεδα επιστημονικής, τεχνολογικής, οικονομικής και διοικητικής πολυπλοκότητας. Επιπλέον, δεδομένου ότι αυτές οι πειραματικές υποδομές λειτουργούν σε μια πολύ διαφορετική κλίμακα από τα συνηθισμένα «πειράματα πάγκου», ο σχεδιασμός και η υλοποίησή τους τηρούν ιδιαίτερα χρονοδιαγράμματα, τα οποία μπορεί να εκτείνονται ακόμα και σε δεκαετίες. Για παράδειγμα, ο LHC ενώ ξεκίνησε τη φάση σχεδιασμού του το 1984, τέθηκε σε λειτουργία μόλις το 2009. Αυτή η ανάγκη για μακροχρόνιο σχεδιασμό έχει ως συνέπεια να

[23] Σχετικά με τα τρία επίπεδα της ΦΥΕ, δηλ. της θεωρίας, του πειραματισμού και των επιστημονικών οργάνων, αλλά και της δυναμικής σχέσης που αναπτύσσεται ανάμεσά τους δείτε και Galison 1997, 799.

καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθούν οι πιθανές θεωρητικές ή πειραματικές εξελίξεις που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Ως εκ τούτου, οι σημαντικότεροι επιταχυντές σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων των LEP και SPS στο CERN, του Tevatron στις Ηνωμένες Πολιτείες και του U-70 Proton Synchrotron στη Σοβιετική Ένωση, δεν κατασκευάστηκαν έχοντας ως βασική επιδίωξη τον έλεγχο συγκεκριμένων θεωρητικών προβλέψεων. Αντίθετα, ο σχεδιασμός τους προσανατολίστηκε σε πολύ ευρύτερους πειραματικούς στόχους και στη μη αυστηρά καθορισμένη διερεύνηση ολοένα και υψηλότερων ενεργειακών φασμάτων.[24]

Το παραπάνω ισχύουν και για την περίπτωση του LHC. Παρά το γεγονός πως ο επιταχυντής μνημονεύεται σήμερα κυρίως για την επιβεβαίωση της πρόβλεψης του μποζονίου Higgs, μια πιο λεπτομερής εξέταση της περιόδου σχεδιασμού του, αποκαλύπτει ότι η κατασκευή του είχε πολύ ευρύτερα κίνητρα. Συγκεκριμένα, όταν το 1984 άρχισαν οι πρώτες συζητήσεις στο CERN σχετικά με την κατασκευή ενός επιταχυντή πρωτονίων, ούτε το μποζόνιο Higgs ούτε άλλες θεωρητικές προβλέψεις έπαιξαν κεντρικό ρόλο. Όπως θα τόνιζε, κάποια χρόνια αργότερα σε μια συνέντευξή του ο Herwig Schopper, ο οποίος κατείχε τη θέση του γενικού διευθυντή εκείνη την εποχή, «το Higgs φάνταζε σαν ένα πολύ μακρινό μελλοντικό ζήτημα και κανείς δεν μιλούσε πραγματικά γι' αυτό». Αντίθετα, σύμφωνα με τον Schopper, το κυρίαρχο θέμα συζήτησης ήταν «ο ανταγωνισμός με τον SSC»[25] και το «ποιος θα μπορούσε να επιτύχει πρώτος υψηλότερες ενέργειες.» (Chalmers 2019)

Αυτή ήταν και η αφετηρία από την οποία ξεκίνησαν τα τρία μεγάλα workshops, που έθεσαν τις βάσεις για τον σχεδιασμό του LHC: το πρώτο πραγματοποιήθηκε στη Λωζάνη το 1984, το δεύτερο στη Λα Τουίλ το 1987 και το τρίτο στο Άαχεν το 1990. Στα συγκεκριμένα workshops συγκεντρώθηκαν εκατοντάδες θεωρητικοί, πειραματικοί και μηχανικοί επιταχυντών, αντιπροσωπεύοντας την «αφρόκρεμα» της ευρωπαϊκής κοινότητας της ΦΥΕ. Η συντριπτική πλειοψηφία των συζητήσεων σε αυτές τις συναντήσεις επικεντρώθηκε γύρω από τις τεχνικές πτυχές του μελλοντικού επιταχυντή και σε θέματα όπως οι παράμετροι της ενέργειας και της φωτεινότητας του. Αντίθετα, οι ενότητες που ήταν αφιερωμένες στη φυσική που θα μελετούνταν από τον LHC ήταν αρκετά αφηρημένες και νεφελώδεις. Στην ουσία, επρόκειτο για την παρουσίαση ενός συνόλου θεωρητικών υποθέσεων, που βρίσκονταν ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο,

[24] Η μόνη αξιοσημείωτη εξαίρεση είναι η μετατροπή του SPS σε SPPbarS, η οποία, ωστόσο, δεν απαιτούσε την κατασκευή ενός νέου επιταχυντή, αλλά τεχνικές τροποποιήσεις σε έναν ήδη υπάρχοντα, με κύριο στόχο την επίσπευση της ανακάλυψης των μποζονίων W και Z.

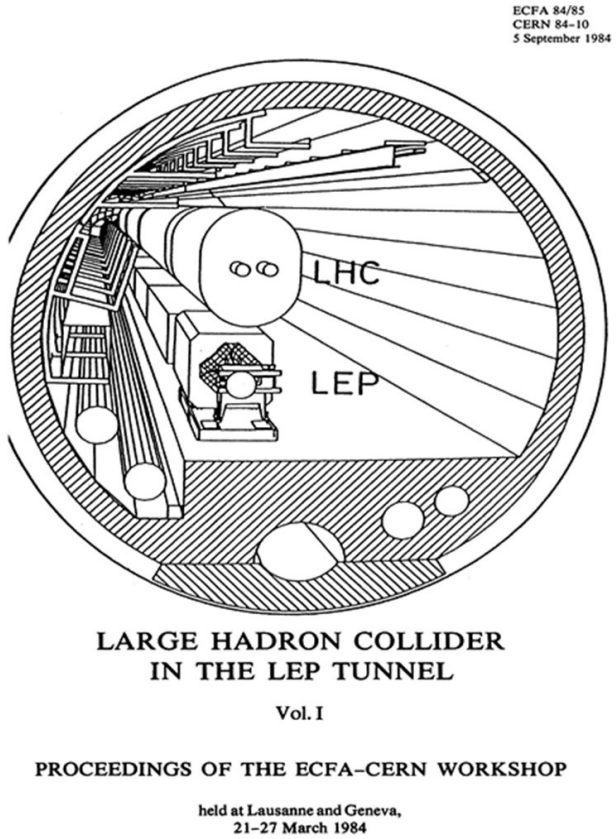
[25] Ο SSC (Superconducting Super Collider) ήταν ένα εξαιρετικά φιλόδοξο σχέδιο για την κατασκευή ενός τεράστιου επιταχυντή σωματιδίων στο Τέξας των Ηνωμένων Πολιτειών. Η κατασκευή του ματαιώθηκε τελικά το 1993. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι το όραμα για την κατασκευή του LHC ήταν αρχικά η «ευρωπαϊκή απάντηση» σε αυτό το φιλόδοξο έργο.

κάτω από τον ευρύ τίτλο «Νέα Φυσική»,[26] χωρίς όμως να προσδιορίζεται αν και κατά πόσον ο LHC ήταν απαραίτητος για την πειραματική τους διερεύνηση. Όσον αφορά τη λιγότερο αμφιλεγόμενη θεωρητική πρόβλεψη, αυτή του μποζονίου Higgs, δεδομένου ότι εκείνη την εποχή η μάζα του δεν μπορούσε ακόμη να προσδιοριστεί θεωρητικά με ακρίβεια, ήταν πιθανό η ανακάλυψη του να λάμβανε χώρα είτε στον LEP είτε στον Tevatron, πολύ πριν την έναρξη της λειτουργίας του LHC. Το συγκεκριμένο ενδεχόμενο αναφερόταν ρητά ακόμα και στο δελτίο Τύπου που εξέδωσε το CERN το 1989 σχετικά με την περιγραφή του σχεδιαζόμενου LHC: «Η μάζα του μποζονίου Higgs είναι ακόμη άγνωστη, ως εκ τούτου ο LEP ενδέχεται να το εντοπίσει εάν το εύρος της μάζας του εκτείνεται περίπου ως τα 80 GeV.» (CERN 1989) Για αυτόν τον λόγο, αν και η πρόβλεψη του μποζονίου Higgs αποτελούσε αναπόσπαστο κομμάτι του ΚΠ, δεν βρέθηκε ποτέ στο κέντρο των συζητήσεων που έλαβαν χώρα στις δεκαετίες του 1980 και 1990 για τον σχεδιασμό του LHC. Ο περιορισμένος ρόλος που είχαν οι θεωρητικές προβλέψεις στον σχεδιασμό του νέου επιταχυντή, γίνεται ξεκάθαρα αντιληπτός στις καταληκτικές παρατηρήσεις του υπεύθυνου της θεωρητικής ενότητας των συζητήσεων στο workshop της Λωζάνης, Chris Llewellyn Smith:

> Ένας μεγάλος επιταχυντής αδρονίων εμφανιζόταν πάντα σαν μια προφανής επιλογή για να διαδεχθεί τον LEP και είναι σαφές ότι έχει έρθει η ώρα να ξεκινήσει η έρευνα για τους κατάλληλους μαγνήτες. Είναι λιγότερο συνετό όμως να αρχίσουμε να συζητάμε σχετικά με τη φυσική που θα μπορούσε να μελετηθεί με μια τέτοια μηχανή [...] Υπάρχει μια θεωρητική συναίνεση ότι νέα φαινόμενα θα ανακαλυφθούν κοντά στην ενέργεια του 1 TeV. Δεν υπάρχει συναίνεση σχετικά με τη φύση αυτών των φαινομένων, αλλά είναι ενδιαφέρον ότι πολλές από τις ιδέες που έχουν προταθεί μπορεί ενδεχομένως να δοκιμαστούν σε πειράματα στον LHC. Ωστόσο πολλές, αν όχι όλες, από αυτές τις ιδέες θα έχουν αναμφίβολα απορριφθεί, διαψευστεί ή καθιερωθεί μέχρι τη στιγμή που θα κατασκευαστεί ένας LHC, και αυτό ακριβώς δείχνει την αξία μιας τέτοιας μηχανής (ECFA-CERN 1984, 27, 47)

Όπως γίνεται εμφανές από τα λόγια του Smith, η έλλειψη συγκεκριμένων προβλέψεων όχι μόνο δεν θεωρήθηκε εμπόδιο για την κατασκευή μιας τόσο πολύπλοκης και δαπανηρής μηχανής αλλά αντίθετα, παρουσιάστηκε ως σημαντικό πλεονέκτημα, που θα επέτρεπε στον σχεδιασμό της να προχωρήσει ανεξάρτητα και χωρίς να «περιορίζεται» από αυτές. Στο ίδιο πνεύμα κινήθηκε και η καταληκτική έκθεση της οργανωτικής επιτροπής του workshop: «Μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι προς

[26] Στις συζητήσεις σχετικά με τη «Νέα Φυσική» πρωταγωνιστούσαν τρία κυρίως υποθετικά θεωρητικά μοντέλα: οι θεωρίες Technicolor, η Υπερσυμμετρία και Συνθετότητα.



ΕΙΚΟΝΑ 6. Το εξώφυλλο των πρακτικών του workshop της Λωζάνης το 1984 (ECFA-CERN 1984).

το παρόν υπάρχει μια θεωρητική συναίνεση ότι κάποια στιγμή η [πειραματική] έρημος θα ανθίσει πραγματικά, αλλά δεν υπάρχει ακόμα συναίνεση για το ποια λουλούδια θα βρεθούν εκεί.» (ECFA-CERN 1984, 12). Στα workshops που ακολούθησαν, στη Λα Τουίλ και στο Άαχεν, δεν αναπτύχθηκαν νέες ιδέες σχετικά με την πειραματική επικύρωση των αφηρημένων θεωρητικών προβλέψεων ούτε και κάποια συναίνεση γύρω από τα «λουλούδια της ερήμου». Όπως θα δήλωνε κατά τη διάρκεια του workshop του Άαχεν ο Carlo Rubbia, ο οποίος εν τω μεταξύ είχε ανακηρυχθεί σε Γενικό Διευθυντή του CERN: «Δεδομένου ότι καμία θεωρία πέρα από το καθιερωμένο πρότυπο δεν έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά μέχρι στιγμής, είναι δύσκολο να κρίνουμε τη βαρύτητα των διαφόρων υποθέσεων.» (CERN 1990, 587).

Σε αντίθεση λοιπόν με ότι ενδεχομένως να περίμενε κανείς, ο ρόλος των προβλέψεων κατά τις αρχικές φάσεις του σχεδιασμού του LHC ήταν εξαιρετικά περιορισμένος. Όπως και η συντριπτική πλειοψηφία των επιταχυντών, ο LHC δεν σχεδιάστηκε πρωτίστως ως μια πειραματική μηχανή για την επικύρωση συγκεκριμένων θεωρητικών προβλέψεων ή για

την ανακάλυψη ενός συγκεκριμένου σωματιδίου όπως το μποζόνιο Higgs. Το όραμα του CERN ήταν να σχεδιάσει τον LHC σαν μια πειραματικά ευέλικτη, «πολλαπλών χρήσεων» ερευνητική μηχανή - σαν έναν ακόμη κρίκο στην αλυσίδα των επιταχυντών που διαρκώς στόχευαν σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Σε αυτό το πλαίσιο οι συγκεκριμένες θεωρητικές προβλέψεις θεωρούνταν περισσότερο περιοριστικές παρά βοηθητικές.

Για να κατανοήσουμε όμως την ιδιαιτερότητα των επιταχυντών ως επιστημονικών οργάνων και τη σχέση τους με τις θεωρητικές προβλέψεις θα πρέπει να τους αντιληφθούμε ως αποτέλεσμα των ιδεών και της ιδιαίτερης επιστημονικής κουλτούρας και πρακτικής που διαμόρφωσαν τη μεταπολεμική ΦΥΕ, η οποία χαρακτηρίζεται από βασικές αφετηρίες όπως:

Α) Η δέσμευση στον αναγωγισμό και η επιδίωξη του προσδιορισμού των θεμελιωδών δομικών συστατικών της ύλης

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, οι υψηλότερες ενέργειες έδιναν την ευκαιρία για μια νέα εξερεύνηση των βαθύτερων συστατικών της ύλης και κάθε μελλοντικός επιταχυντής υποσχόταν, έστω και αόριστα, «να αποκαλύψει βασικές γνώσεις για τους υποκείμενους μηχανισμούς της Φύσης» (CERN 1991). Όπως θα υποστήριζε σχετικά ένας από τους πρωταγωνιστές του κλάδου, ο Steven Weinberg: «Ζούμε σε έναν ενιαίο κόσμο, και προσπαθώντας να τον κατανοήσουμε ανακαλύπτουμε ερμηνευτικές αλυσίδες που δεν μπορούμε να τις ακολουθήσουμε εάν δεν ψάξουμε βαθύτερα στη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων.» (Weinberg 1988, 476) Με βάση αυτές τις μεταφυσικές δεσμεύσεις, η αναγκαιότητα κατασκευής ενός μεγαλύτερου επιταχυντή στα μάτια της επιστημονικής κοινότητας των ΦΥΕ, όπως ο LHC, φάνταζε αυτονόητη και η ύπαρξη συγκεκριμένων θεωρητικών προβλέψεων περιττή. Στο workshop της Λωζάνης τα παραπάνω τέθηκαν χωρίς περιστροφές: «η αύξηση της ενέργειας είναι απλώς μια αναγκαιότητα στην προσπάθειά μας για μία καλύτερη κατανόηση.» (ECFA-CERN 1984, 10)

Β) Η πρακτική του Διερευνητικού Πειραματισμού (Exploratory Experimentation)[27]

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, αρχής γενομένης από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, τα πειράματα της ΦΥΕ ωφελήθηκαν από έναν πειραματικό «οδικό χάρτη» προβλέψεων που υποδείκνυε το ΚΠ. Συγχρόνως, όμως, ένα σημαντικό μέρος της πειραματικής κοινότητας των ΦΥΕ, καθώς τα ενεργειακά επίπεδα αυξάνονταν θεαματικά από επιταχυντή σε επιταχυντή, υιοθέτησε μια πιο ευέλικτη, διερευνητική πρακτική, με αρκετά μικρότερους περιορισμούς. Αυτή η προσέγγιση επέτρεπε μεγαλύτερη ελευθερία από την άκαμπτη προσκόλληση σε συγκεκριμένες θεωρητικές υποθέσεις ή προβλέψεις. Αν και η προσέγγιση αυτή δεν είχε

[27] Για περισσότερες λεπτομέρειες για την πρακτική του Διερευνητικού Πειραματισμού στη ΦΥΕ, δείτε και Karaca 2017, Beauchemin 2017.

να επιδείξει κάποια ιδιαίτερη πειραματική επιτυχία από τη στιγμή της καθιέρωσης του ΚΠ, άρχισε σταδιακά να κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος καθώς ο οδικός χάρτης του ΚΠ πλησίαζε στην ολοκλήρωσή του. Ο Rubbia εξέφρασε συνοπτικά τη σημασία αυτής της πρακτικής, κατά τη διάρκεια του workshop του Άαχεν, ως εξής: «Το ένδοξο παρελθόν [του CERN] αποδεικνύει ξεκάθαρα την ανάγκη για πολλές διαφορετικές και συμπληρωματικές πειραματικές κατευθύνσεις», δεδομένου ότι «η ίδια η φύση της πειραματικής έρευνας δεν επιτρέπει να προβλεφθεί εκ των προτέρων το αποτέλεσμα οποιασδήποτε μεμονωμένης προσέγγισης.» (CERN 1990, 9)

Γ) Η συμβιωτική σχέση μεταξύ των κοινοτήτων ΦΥΕ και των επιταχυντών

Η δυναμική και η απήχηση κάθε κοινότητας ΦΥΕ ήταν στενά συνυφασμένες με τις δυνατότητες του επιταχυντή που διαχειριζόταν. Ένας «αδύναμος» επιταχυντής συχνά σήμαινε και μια «ασθενέστερη» κοινότητα. Αυτός ο ισχυρός δεσμός μεταξύ επιταχυντών και επιστημονικών κοινοτήτων εξηγεί γιατί οι Ευρωπαίοι, οι Αμερικανοί και, παλαιότερα, οι Σοβιετικοί φυσικοί σωματιδίων επιδόθηκαν σε ένα εξαιρετικά έντονο συναγωνισμό σχετικά με το ποιος θα κατασκευάσει πρώτος την επόμενη μεγάλη πειραματική μηχανή.

Όπως γίνεται αντιληπτό, σε αντίθεση με ένα στερεοτυπικό, άκαμπτο και μονολιθικό σχήμα που έχουμε συχνά στο μυαλό μας για να περιγράψουμε την επιστημονική διαδικασία, τα επιστημονικά όργανα δεν αποτελούν απλά το μέσο για να ελεγχθούν συγκεκριμένες προβλέψεις της θεωρίας. Σε πολλές περιπτώσεις, όπως αυτή του κλάδου της ΦΥΕ, αντί να είναι η θεραπαινίδα της θεωρίας και της πειραματικής διαδικασίας, έχουν τη δική τους δυναμική και αυτονομία, καθορίζοντας συχνά ακόμα και τη συνολική εξέλιξη του κλάδου.

5. Συμπεράσματα

Με τη συγκεκριμένη εργασία επεδίωξα να εξετάσω την έννοια της πρόβλεψης σε αλληλεξάρτηση με τα συγκεκριμένα ιστορικά πλαίσια μέσα στα οποία αυτή νοηματοδοτείται και χρησιμοποιείται, και όχι σαν να αποτελεί μέρος ενός ιδεατού και άχρονου πλατωνικού βασιλείου των ιδεών. Επιχείρησα να περιγράψω την έννοια της πρόβλεψης στη βάση του ιδιαίτερου ρόλου της στην καθημερινή πρακτική των επιστημόνων. Αυτή ακριβώς η εστίαση είναι που μας επιτρέπει να κατανοήσουμε τη μεταβαλλόμενη επιστημική της αξία και τον εξελισσόμενο χαρακτήρα της μέσα στον χρόνο.

Όπως αναλυτικά είδαμε, υπήρχε μια πολύ σημαντική διαφοροποίηση στον τρόπο με τον οποίο οι πειραματικοί φυσικοί εκλάμβαναν τις θεωρητικές προβλέψεις των ουδέτερων ρευμάτων, από τη μια πλευρά, και των μποζονίων W και Z, από την άλλη. Αυτή η διαφορά διαμόρφωσε εν πολλοίς και την εξέλιξη των δύο πειραμάτων, του Gargamelle και του UA1,

συμπεριλαμβανομένων της προσήλωσης τους στις προβλέψεις, του όγκου των δεδομένων που κρίθηκε απαραίτητο να συλλέξουν και να αναλύσουν, της αυστηρότητας των κριτηρίων για την αναγνώριση των «ενδιαφερόντων γεγονότων» ως ανακαλύψεων, και της συνακόλουθης συναίνεσης της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας γύρω από τα αποτελέσματά τους. Η ιστορία της «λανθασμένης» ανακάλυψης του top quark, μόλις λίγους μήνες μετά την ανακάλυψη των μποζονίων W και Z, είναι επίσης ενδεικτική.

Αν επιχειρούσαμε τώρα, στηριζόμενοι στις περιπτώσεις που αναλύσαμε, να κατηγοριοποιήσουμε τα κυριότερα κριτήρια, βάσει των οποίων αλλάζει η στάση της επιστημονικής κοινότητας των ΦΥΕ απέναντι στην έννοια της πρόβλεψης θα μπορούσαμε να καταλήξουμε στα εξής:

1. Η εμπιστοσύνη σε μια θεωρία και η πειραματική γονιμότητά της

Το ενδιαφέρον της πειραματικής κοινότητας για τη νέα ηλεκτρασθενή θεωρία ήταν εξαιρετικά περιορισμένο πριν από την επανακανονικοποίησή της το 1971, μιας και αδυνατούσε να προσφέρει συγκεκριμένες προβλέψεις. Αλλά ακόμη και μετά, ο έλεγχος της συγκεκριμένης θεωρίας δεν θα είχε καταστεί βασική προτεραιότητα της πειραματικής ατζέντας χωρίς τη δραστική συμβολή των θεωρητικών φυσικών, που κατόρθωσαν να πείσουν τους πειραματικούς συναδέλφους τους για τις προοπτικές που άνοιγε η νέα θεωρία. Η συνειδητοποίηση ότι το αναδυόμενο Καθιερωμένο Πρότυπο προσέφερε έναν συγκεκριμένο «οδικό χάρτη» προβλέψεων, εξαιρετικά πρόσφορο για μελλοντικά πειράματα και μια νέα σχέση μεταξύ πειράματος και θεωρίας, ήταν πολύ κρίσιμη για να στρέψει αρχικά το πειραματικό ενδιαφέρον προς τη νέα θεωρία. Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας ήταν η εμπιστοσύνη που ανέπτυξαν σταδιακά οι πειραματικοί φυσικοί στη νέα θεωρία. Μία εμπιστοσύνη που άρχιζε να εδραιώνεται μετά την ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στον μετασχηματισμό της επιστημικής αξίας των προβλέψεων του ΚΠ.

2. Η εξοικείωση των πειραματιστών με τη θεωρία

Η αρχική έλλειψη βαθύτερης κατανόησης και εξοικείωσης των πειραματιστών με τη νέα ηλεκτρασθενή θεωρία αποτέλεσε μία σημαντική τροχοπέδη που δυσκόλεψε την εξαγωγή των «ενδιαφερόντων γεγονότων» από τον θόρυβο υποβάθρου στην περίπτωση των ουδέτερων ρευμάτων. Επιπλέον, αυτή η περιορισμένη ικανότητα πειραματικής αξιοποίησης των νέων θεωρητικών εννοιών ήταν κομβική για την ευρεία αμφισβήτηση και την καθυστερημένη υιοθέτηση των πειραματικών πορισμάτων εντός και εκτός της συνεργασίας του Gargamelle. Αντιθέτως, η αυξημένη εξοικείωση που απέκτησαν σταδιακά οι πειραματιστές με το θεωρητικό μοντέλο του ΚΠ, ήταν καταλυτική για την άμεση αποδοχή της ανακάλυψης των μποζονίων W και Z, ακόμα και αν αυτή βασιζόταν στη συλλογή και ανάλυση πολύ μικρότερου όγκου δεδομένων.

3. Η κρισιμότητα μιας πρόβλεψης

Όταν ο Perkins επισήμαινε ότι οι πειραματιστές υποδέχθηκαν την ανακάλυψη των μποζονίων W and Z «με ανακούφιση παρά με δυσπιστία», υπογράμμιζε μια σημαντική αλλαγή στη συλλογική πειραματική προσέγγιση σε σχέση με την περίπτωση των ουδέτερων ρευμάτων. Αυτή η ειδοποιός διαφορά προέκυψε, μεταξύ άλλων, εξαιτίας του γεγονότος ότι η αποδοχή της ύπαρξης των ουδέτερων ρευμάτων συνδεόταν εγγενώς με την υιοθέτηση μιας νέας θεωρίας, ενός νέου παραδείγματος που θα εγκαινίαζε μια καινοτόμο σχέση ανάμεσα στη θεωρία και στο πείραμα. Αντίθετα, η ανακάλυψη των μποζονίων W και Z είχε πολύ διαφορετική βαρύτητα, καθώς λειτούργησε ως μια ακόμα επιβεβαίωση ενός θεωρητικού μοντέλου που είχε ήδη εδραιωθεί και είχε καθιερώσει μια συγκεκριμένη σχέση μεταξύ θεωρίας και πειράματος.

Μία ακόμη καίρια θέση που υποστηρίζεται σε αυτό το άρθρο αφορά τον ρόλο των θεωρητικών προβλέψεων στη διαμόρφωση του σχεδιασμού των επιταχυντών, οι οποίοι αποτελούν τα βασικά επιστημονικά όργανα της ΦΥΕ. Όπως ανέδειξε η περίπτωση του LHC, τα επιστημονικά όργανα στο συγκεκριμένο πλαίσιο δεν αποτελούν απλά ένα παθητικό συμπλήρωμα της επιστημονικής διαδικασίας. Αντίθετα, όχι μόνο έχουν τη δική τους δυναμική, αλλά και εξαιτίας των μοναδικών χαρακτηριστικών τους, ο σχεδιασμός τους παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητος από τις θεωρητικές προβλέψεις. Μάλιστα, η ανάδειξη αυτής της σχετικής αυτονομίας των επιταχυντών έρχεται να αμφισβητήσει την αντίληψη της επιστήμης ως μίας θεωρητικοκεντρικής κατασκευής και υπογραμμίζει την περίπλοκη και διαρκώς μεταβαλλόμενη ισορροπία μεταξύ των τριών αλληλένδετων διαστάσεων της σύγχρονης φυσικής: της θεωρίας, του πειράματος και των οργάνων.

Εάν αναγνωρίσουμε ότι η επιστημονική πρακτική είναι ένα σύστημα στο οποίο οι ρόλοι και οι δυναμικές μεταβάλλονται, τότε οι προβλέψεις μπορεί να θεωρηθούν ως ένα πολύτιμο εργαλείο για τον εντοπισμό αυτών των μετασχηματισμών, καθώς αποτελούν έναν σημαντικό κόμβο όπου συναντιούνται τα διάφορα επίπεδα της επιστημονικής δραστηριότητας. Για να διερευνήσουμε, ωστόσο, σε βάθος αυτόν τον πολύπλοκο κόμβο θα πρέπει να προχωρήσουμε πέρα από μια αφηρημένη θεώρηση της επιστήμης και να εμβαθύνουμε στις εσωτερικές της λειτουργίες, βυθίζοντας τους εαυτούς μας στον πολύπλοκο κόσμο της ιστορίας. Εκεί, στο «μηχανοστάσιο» της επιστήμης, οι πρακτικές, οι πεποιθήσεις, η άρρητη γνώση, οι προσωπικότητες των πρωταγωνιστών, οι χρηματοδοτήσεις, τα χρονοδιαγράμματα και ο ανταγωνισμός διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην εξέλιξή της - πτυχές που συχνά αποκρύπτονται όταν προσεγγίζουμε το επιστημονικό γίγνεσθαι από μια αποστασιοποιημένη από τις ιστορικές της διαστάσεις οπτική γωνία.

Βιβλιογραφια

[1] P. H. Beauchemin: "Autopsy of measurements with the ATLAS detector at the LHC", *Synthese* 194:2 (2017), 275-312.

[2] S. G. Brush: *Making 20th Century Science: How Theories Became Knowledge*. Oxford, Oxford University Press, 2015.
[3] M. Carrier: "Prediction in context: On the comparative epistemic merit of predictive success", *Studies in History and Philosophy of Science* 45 (2014), 97-102.
[4] CERN: "Search for Top Quark Succeeds at CERN", *CERN Press Release*, 4 July 1984, PR 07.84.
[5] CERN: "The LHC", *CERN Press Release*, PR. 24.89 (1989).
[6] CERN: "Proceedings of the Large Hadron Collider Workshop", Aachen, Germany, 4–9 October, CERN90–10 (1990).
[7] CERN: "CERN Council Holds Special Session on the LHC Project", *CERN Press Release*, 19 December 1991, PR 10.91.
[8] M. Chalmers: "Lessons from LEP: An interview with Herwig Schopper", https://cerncourier.com/a/lessons-from-lep/ (Accessed: 24 January 2022).
[9] D. Cundy & C. Sutton: *Gargamelle: the tale of a giant discovery*, *CERN Courier* 49:7 (2009), 25-27.
[10] P. Darriulat: "The W and Z Particles: A Personal Recollection", *CERN Courier* 44:3 (2004).
[11] L. Di Lella & C. Rubbia: "The Discovery of the W and Z Particles", στο *60 Years of CERN Experiments and Discoveries*, επιμ. H. Schopper και L. Di Lella, Hackensack, NJ, World Scientific, 2015, 137–163.
[12] H. Douglas & P. D. Magnus: "State of the Field: Why Novel Predictions Matter", *Studies in History and Philosophy of Science* 44 (2013), 580-589.
[13] ECFA-CERN: "Workshop on Large Hadron Collider in the LEP Tunnel", Proceedings, 21-27 March 1984, Lausanne, Switzerland, CERN-84-10-V-1 (1984).
[14] H. Faissner: "Weak Neutral Currents Unveiled", στο *New Phenomena in Lepton-Hadron Physics*, επιμ. D. E. C. Fries & J. Wess, NATO Advanced Study Institutes Series, 49 (1979), 371-432.
[15] P. Galison: "How the first neutral-current experiments ended", *Rev. Mod. Phys.* 55 (1983), 477-506.
[16] P. Galison: *How Experiments End. Chicago*, University of Chicago Press, 1987.
[17] P. Galison: *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*. Chicago, University of Chicago Press, 1997.
[18] W. J. Gonzalez: "Scientific Prediction in the Beginning of the "Historical Turn": Stephen Toulmin and Thomas Kuhn", *Open Journal of Philosophy* 3:2 (2013), 351-357.
[19] D. Haidt: "The discovery of the weak neutral currents", *CERN Courier* 44:8 (2004), 21-24.
[20] D. Haidt: "The Discovery of Weak Neutral Currents", στο *60 Years of CERN Experiments and Discoveries*, επιμ. H. Schopper & L. Di Lella, Hackensack, NJ, World Scientific, 2015, 137-163.
[21] F. J. Hasert et al.: "Observation of Neutrino-Like Interactions Without Muon or Electron in the Gargamelle Neutrino Experiment", *Phys. Lett.* 46B (1973), 138-140.
[22] P. K. Kabir (επιμ.): *The Development of Weak Interaction Theory*. New York, Gordon and Breach, 1963.
[23] K. Karaca: "A case study in experimental exploration: exploratory data selection at the Large Hadron Collider", *Synthese* 194 (2017), 333–354.
[24] J. Krige: "Distrust and Discovery: The Case of the Heavy Bosons at CERN", *Isis* 92:3 (2001), 517–540.
[25] L. Lederman: "Conclusions and Future Perspectives", στο *Proceedings of the Third Topical Workshop on Proton-Antiproton Collider Physics*, Rome, 12–14 January 1983, *CERN Yellow Report* 83–04, CERN-83–04 (1983).
[26] R. Northcott: "Big data and prediction: Four case studies", *Studies in History and Philosophy of Science* 81 (2020), 96-104.

[27] A. Pais & S. Treiman: "How Many Charm Quantum Numbers Are There?", *Physical Review Letters* 35:23 (1975), 1556.
[28] G. Panoutsopouloa & T. Arabatzis: "CERN's Balancing Act Between Unity and Disunity: The 'Sister Experiments' UA1 and UA2 and CERN's First Nobel Prize", *Phys. Perspect.* 23 (2021), 181–201.
[29] G. Panoutsopoulos & K. Gavroglu: "From Big Science to Bigger Science: Preparing for the LHC", στο *Big Science in the 21st Century: Economic and Societal Impacts*, επιμ. P. Charitos, T. Arabatzis, H. Cliff, G. Dissertori, J. Forneris, J. L. Yin, Bristol, IOP Publishing, 2023.
[30] D. Perkins: "Gargamelle and the Discovery of Neutral Currents", στο *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, επιμ. L. Hoddeson, L. Brown, M. Riordan, και M. Dresden, Cambridge, Cambridge University Press, 1997, 428–446.
[31] D. Perkins: "Neutral currents", *CERN Courier* 43 (2003), 15-19.
[32] A. Pickering: "Against putting the phenomena first: The discovery of the weak neutral current", *Studies in History and Philosophy of Science* 15:2 (1984a), 85–117.
[33] A. Pickering: *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*. Chicago, University of Chicago Press, 1984b.
[34] W. Sullivan: "Physicists may have tracked last quark to lair", *New York Times*, 25 June 1984.
[35] K. Staley: *The Evidence for the Top Quark: Objectivity and Bias in Collaborative Experimentation*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004.
[36] P. Watkins: *Story of the W and Z*. Cambridge, Cambridge University Press.
[37] S. Weinberg: "The limits of reductionism", *Nature* 331 (1988), 475–476.