**Η επαναλειτουργία του LHC \***

Στις 5 Ιουλίου ξεκίνησε η επαναλειτουργία του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων (Large Hadron Collider, LHC) (1) στο CERN, το Ευρωπαϊκό Εργαστήριο Σωματιδιακής Φυσικής, κοντά στη Γενεύη. Στα μέσα ενημέρωσης και στο διαδίκτυο δημοσιεύτηκαν οι πρώτες πολύπλοκες εικόνες από αλληλεπιδράσεις- συγκρούσεις των κυκλικά περιφερόμενων και συγκρουόμενων δεσμών πρωτονίων τα προϊόντα από τις οποίες ανιχνεύτηκαν από τους αναβαθμισμένους γιγάντιους ανιχνευτές A.T.L.A.S. και C.M.S.(1), 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της Γης. Η επαναλειτουργία του LHC συνέπεσε με τη συμπλήρωση δεκαετίας από την επέτειο της ανακοίνωσης στις 4 Ιουλίου 2012 για την ανακάλυψη (2) με τους παραπάνω ανιχνευτές ενός σημαντικού νέου σωματιδίου του οποίου η ταυτότητα διευκρινίστηκε σύντομα ότι μάλλον επρόκειτο για το επί 50-ετία αναζητούμενο σωματίδιο higgs (χιγγς - στο εξής θα συμβολίζεται με Η). Πριν 10 χρόνια η μεγάλη πλειοψηφία των φυσικών υψηλών ενεργειών είχε πειστεί ότι είχε ανακαλυφθεί ένα σωματίδιο χιγγς. Το μόνο ερώτημα που παρέμενε ήταν αν επρόκειτο για το μποζόνιο που προέβλεπε το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής (ΚΠ) ή ανήκε σε μια θεωρητική επέκτασή του. Από τότε οι ερευνητές έχουν δημοσιεύσει περί τις 350 εργασίες για το νέο σωματίδιο και τις ιδιότητές του, ενώ αρκετές παραμένουν μυστηριώδεις (3). Γι’ αυτό η έμφαση της νέας περιόδου λειτουργίας, RUN3, που ξεκίνησε, αλλά και των επομένων, είναι να γίνουν ακριβέστερες μετρήσεις των διαφόρων ιδιοτήτων του Η.

Η πανδημία καθυστέρησε σημαντικά την έναρξη της RUN3, μετά την ολοκλήρωση της προηγούμενης, RUN2, και διακοπή της τον Νοέμβριο 2018. Κατά το μεσολαβήσαν διάστημα έγιναν σημαντικές αναβαθμίσεις (4), επεμβάσεις συντήρησης των συνιστωσών και αντικατάστασης κάποιων ηλεκτρονικών ή μαγνητών του επιταχυντή, ο οποίος θα λειτουργεί με μεγαλύτερη ενέργεια πρωτονίων στην κάθε δέσμη, 6,8 TeV (5) και 1,5 φορά μεγαλύτερη φωτεινότητα των δύο δεσμών από αυτή στο RUN2: Τον Ιούλιο θα κυκλοφορήσουν 1200 δεσμίδες πρωτονίων (και θα υπερδιπλασιαστούν αργότερα) με 1,8Χ1011 πρωτόνια ανά δεσμίδα οι οποίες κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός και σε διαδοχικές χρονικές αποστάσεις των 25 ns (5). Ανάλογες συντηρήσεις έγιναν στο σύμπλεγμα των επιταχυντών από τους οποίους διέρχονται τα πρωτόνια πριν υποβληθούν στην τελική επιτάχυνση από τον LHC. Με τις αναβαθμίσεις αυτές θα επιτυγχάνονται περισσότερες αλληλεπιδράσεις – «συγκρούσεις» των πρωτονίων των δύο δεσμών.

Αυτό απαίτησε αντίστοιχες αναβαθμίσεις των παραπάνω ανιχνευτών, του «σκανδαλισμού» (trigger: επιλογής κατάλληλων γεγονότων), των προγραμμάτων ανακατασκευής των τροχιών και ανάλυσης των δεδομένων κ.λπ. ώστε να μπορούν να ανιχνεύουν αποδοτικά περισσότερες «συγκρούσεις» και τα σωματίδια που αναδύονται από αυτές. Διάφορες από αυτές τις αναβαθμίσεις πραγματοποιήθηκαν αφορώντας και στην επόμενη φάση λειτουργίας του LHC, μετά το 2029.(6)

**Τι μάθαμε και τι μένει να μάθουμε για το σωματίδιο higgs;**

Κατά τη δεκαετία του 1960 οι θεωρητικοί φυσικοί Brout, Englert και Higgs (Μπράουτ, Ένγκλερτ και Χιγκς, βραβείο Νομπέλ Φυσικής 2013) πρότειναν ότι μια ιδιότητα του χώρου (που επικράτησε να λέγεται πεδίο Higgs) εξηγούσε γιατί τα φωτόνια (φορείς των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων) δεν έχουν μάζα, ενώ τα σωματίδια W και Z (φορείς των ασθενών πυρηνικών δυνάμεων) είναι βαρυά. Πρότειναν έναν μηχανισμό που θα μπορούσε να εξηγήσει την παραβίαση (σε χαμηλές ενέργειες) της ηλεκτρασθενούς συμμετρίας, δηλαδή της σύγκλισης - ενοποίησης που παρατηρείται σε υψηλές ενέργειες μεταξύ των θεμελιωδών ηλεκτρομαγνητικών και ασθενών πυρηνικών δυνάμεων. Επίσης, ότι τα υλικά θεμελιώδη σωματίδια (ηλεκτρόνια, μυόνια, κουάρκ κ.λπ) αποκτούσαν μάζα αλληλεπιδρώντας με το πεδίο αυτό. Η ανακάλυψη, επομένως, του κβάντου αυτού του υποθετικού πεδίου – δηλαδή του λεγόμενου σωματιδίου Higgs – θα επιβεβαίωνε την ύπαρξη αυτού του πεδίου.`

Με την ανακάλυψη του 2012 ενός σωματιδίου με ιδιότητες των οποίων οι πρώτες μετρήσεις συμφωνούσαν με αναμενόμενες ιδιότητες του υποθετικού σωματιδίου Η, θεωρήθηκε ότι συμπληρώθηκε ο πίνακας του θεωρητικού σχήματος που ονομάζεται Καθιερωμένο Πρότυπο (ΚΠ) για τα θεμελιώδη σωματίδια της ύλης (λεπτόνια και κουάρκ) και τα σωματίδια - φορείς (φωτόνιο, W, Z και γλοιόνιο) των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων (ηλεκτρομαγνητικών, ασθενών πυρηνικών και ισχυρών πυρηνικών) αντίστοιχα.

Η μάζα του σωματιδίου που ανακαλύφθηκε δεν προβλεπόταν από το ΚΠ αλλά μετρήθηκε ότι είναι περίπου 125 GeV σε μονάδες ενέργειας (γιγα-ηλεκτρονιοβολτ. Ένα γίγα = 1 δισεκατομμύριο) (5) . Η τιμή αυτή θεωρείται ότι είναι χαμηλή και λόγω των κβαντικών διορθώσεων που γίνονται θεωρητικά, θα έπρεπε να ήταν τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη και γι’ αυτό θεωρείται «αφύσικη»!(8) .

Από τη μελέτη της διάσπασης του Η σε δύο φωτόνια αποδείχθηκε ότι έχει σπιν (ιδιοστροφορμή) μηδέν και όχι 1/2 ή 1 που έχουν τα άλλα θεμελιώδη σωματίδια ή οι φορείς των δυνάμεων, αντίστοιχα. Το ηλεκτρικό του φορτίο είναι μηδενικό και επομένως δεν έχει ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Επίσης, δεν έχει αλληλεπιδράσεις μέσω της ισχυρής πυρηνικής δύναμη, αλλά μόνον μέσω της ασθενούς.

Μια σημαντική ιδιότητα-πρόβλεψη του ΚΠ που έχει επαληθευτεί είναι ότι ο ρυθμός διάσπασης του Η σε ένα σωματίδιο είναι ανάλογος της μάζας του σωματιδίου. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται από τον βαθμό σύζευξης του σωματιδίου αυτού με το πεδίο Higgs.

Επίσης, η μέτρηση του χρόνου ζωής του άκρως ασταθούς σωματιδίου Η συμφωνεί χονδρικά με την πρόβλεψη του ΚΠ που είναι περί τα 10-21 δευτερόλεπτα.

Όλοι οι προβλεπόμενοι τρόποι παραγωγής και διάσπασης του Η έχουν παρατηρηθεί και οι σταθερές σύζευξης με τα διανυσματικά μποζόνια (φορείς) W και Z καθώς και με τα φερμιόνια της τρίτης γενιάς (b, t) έχουν εξεταστεί με ακρίβεια 5% – 10% επιβεβαιώνοντας την εικόνα που αναμένεται, γενικά, από τον μηχανισμό των Brout, Englert και Higgs (8)

Παρόλες τις εξαιρετικές επιτυχίες επαλήθευσης πολλών άλλων προβλέψεων του θεωρητικού σχήματος του ΚΠ κατά τις προηγούμενες δεκαετίες, παραμένουν αναπάντητα αρκετά ερωτήματα. Τέτοια αφορούν τα φαινόμενα ταλαντώσεων των νετρίνων – αλλαγής εν πτήσει της ταυτότητάς τους-, η κυριαρχία της ύλης έναντι της αντιύλης στο Σύμπαν, το πρόβλημα της μάζας που αναφέρθηκε, η φύση της σκοτεινής ύλης που είναι πενταπλάσια της γνωστής μας ύλης, κ.λπ. γι’ αυτό και έχουν προταθεί ποικίλες θεωρητικές επεκτάσεις του ΚΠ (Beyond the Standard Model, BSM) οι οποίες προβλέπουν την ύπαρξη και άλλων σωματιδίων (π.χ. άλλων σωματιδίων χιγγς με λίγο διαφορετικές ιδιότητες από αυτό του ΚΠ !) ή άλλων φαινομένων και τα οποία αναφέρονται ως Νέα Φυσική.

Το πιο ευνοούμενο σενάριο Νέας Φυσικής που εξετάστηκε εντατικά ήταν η υπερσυμμετρία (supersymmetry, SUSY) η οποία προβλέπει την ύπαρξη συντρόφων των σωματιδίων του ΚΠ και ενός ελαφρού σωματιδίου χιγγς με μάζα πλησίον των W και Ζ. Απεδείχθη ότι τα απλούστερα μοντέλα που προβλέπουν υπερσυμμετρικά σωματίδια στην κλίμακα μάζας των TeV δεν συμβαίνουν στη φύση(8) ή τέθηκαν όρια ελάχιστης μάζας, όπως π.χ. για το γκλουίνο ( μεγαλύτερη από 2,3 TeV). Άλλα σενάρια, όπως επιπλέον χωρικών διαστάσεων, διανυσματικών κουάρκ με σύνθετο σωματίδιο χιγγς , ή διανυσματικών λεπτοκουάρκ, ή διανυσματικών λεπτονίων, κ.λπ. δεν ευοδόθηκαν, τουλάχιστον με τα μέχρι σήμερα δεδομένα των RUN 1 και 2 και διαμορφώνουν μέρος του προγράμματος αναζήτησης για το RUN3.

**Προωθώντας το μέτωπο ακριβείας με μεγαλύτερη στατιστική**

Κατά τη δεκαετία λειτουργίας του LHC από το 2009 έχουν επιτευχθεί μετρήσεις μεγάλης ακριβείας, όπως π.χ. η μάζα του Η με ακρίβεια 0,12%, (CMS) και του W , με 0,02% (ATLAS), η σχέση αναλογίας της ισχύος σύζευξης με τη μάζα των θεμελιωδών σωματιδίων τ, b, t, W, Z και μ (CMS) και πολλές άλλες μετρήσεις, όπως και από τα άλλα δύο μεγάλα αλλά πιο εξειδεκευμένα πειράματα LHCb και A.L.I.C.E. που βρίσκονται στα δύο άλλα σημεία σύγκρουσης των δεσμών του LHC.

Η μάζα του μποζονίου Higgs είναι η μόνη παράμετρος που δεν προβλέπεται από το ΚΠ. Μια μέτρηση εξαιρετικής ακριβείας της μάζας είναι κρίσιμη διότι όταν αυτή είναι γνωστή όλες οι σταθερές σύζευξης των θεμελιωδών σωματιδίων με το πεδίο Higgs και οι ενεργές διατομές παραγωγής (πιθανότητες παραγωγής διαφόρων σωματιδίων) μπορούν να υπολογιστούν και να συγκριθούν με τις πειραματικές μετρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε, όμως, άλλες θεωρίες πέραν του ΚΠ (BSM), προβλέπουν αντίστοιχες ιδιότητες ή διασπάσεις που είναι πολύ κοντά με αυτές του ΚΠ! Γι΄αυτό χρειάζονται πολύ ακριβέστερες μετρήσεις για να απομονωθεί η αληθής θεωρία. Οι ανακαλύψεις των προηγουμένων δεκαετιών και του Η καθοδηγούντο από ακριβείς ποσοτικές προβλέψεις. Η φυσική των επεκτάσεων BSM, όμως, χρειάζεται περισσότερη υπομονή και επιμονή! (8)

Ο Frank Wilczek (βραβείο Νομπέλ Φυσικής 2004) υποστηρίζει ότι ο ερευνητικός τομέας των higgs μπορεί να λειτουργήσει ως «πύλη» δια μέσου της οποίας θα μπορέσουμε να έχουμε πρόσβαση σε μια ευρεία κλάση «φανταστικών» σωματιδίων, τα οποία αλλοιώς θα μας διέφευγαν. Αυτό το αποδίδει στις ιδιότητες του Η που δεν έχει ηλεκτρομαγνητικές ή ισχυρές αλληλεπιδράσεις και θα μπορούσε να διασπαστεί κατευθείαν σ’ αυτά (9).

Σύμφωνα με τον διακεκριμένο θεωρητικό φυσικό John Ellis(10) οι τιμές των μαζών του Η και του κουάρκ t (top, κορυφαίο) υποδεικνύουν ότι πρέπει να υπάρχει φυσική πέρα από το ΚΠ (BSM) η οποία αποτρέπει την «κύλιση» του σύμπαντος σε μια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση (του «κενού»). Στην «κύλιση» αυτή θα μπορούσε να συμβάλει η αλληλεπίδραση του Η με τον εαυτό του (self-interaction, αφού και αυτό είναι υλικό σωματίδιο). Γι’ αυτό η μέτρηση της διάσπασης ενός ενεργητικού Η σε δύο άλλα Η είναι ιδιαίτερης σημασίας αλλά εξαιρετικά σπάνια διαδικασία και πιθανόν να μην αρκέσουν όλα τα δεδομένα του LHC, αλλά ενός μελλοντικού επιταχυντή.

 Τα μεγαλύτερα σύνολα γεγονότων που θα συλλεχθούν περισσότερο επιλεκτικά με τους αναβαθμισμένους ανιχνευτές, τα νέα συστήματα ταχείας ανάγνωσης των σημάτων και οι νέες τεχνικές φυσικής ανάλυσης που έχουν επινοηθεί θα επιτρέψουν τον «εξονυχιστικό» έλεγχο του ΚΠ σε πρωτοφανή επίπεδα ακριβείας (11), πράγμα που θα επιδιωχθεί και με το RUN3, ιδιαίτερα όμως με την επόμενη φάση αναβάθμισης, High Luminocity LHC κατά το 2026-29, με την οποία θα επιτευχθεί πολύ μεγαλύτερη φωτεινότητα των συγκρουόμενων δεσμών πρωτονίων. Με την επόμενη αυτή αναβάθμιση θα έχουν συλλεγεί προς το τέλος της δεκαετίας του 2030 δεκαπλάσια δεδομένα από αυτά που έχουν συλλεγεί και αναλυθεί μέχρι σήμερα.(12)

Με νωπές τις εντυπώσεις από τις πρόσφατες πρώτες φωτογραφίες του νέου διαστημικού τηλεσκοπίου “James Webb” από τον βαθύ μεγάκοσμο του Σύμπαντος, αλλά και τις λίγο προηγουμένως πρώτες φωτογραφίες από τον βαθύ μικρόκοσμο που ερευνάται με τον LHC, έχουμε μείνει σχεδόν άφωνοι από τα αποτελέσματα των συλλογικών αυτών ανθρωπίνων προσπαθειών για τη μελέτη του σύμπαντος κόσμου και της σχέσης αυτών των «άκρων» της Δημιουργίας. Θαυμάζουμε για τον δόντα «τοιαύτην εξουσίαν τοις ανθρώποις» και στοχαζόμαστε ότι «Μέγας Κύριος και αινετός σφόδρα και της μεγαλωσύνης αυτού ουκ έστι πέρας» (Ψαλμός 144, στιχ. 3).

(\*) Το άρθρο αυτό δημοσιεύτηκε (σε πολυτονική γραφή) στο περιοδικό *Ακτίνες,* τεύχος 794 , Ιούλιος-Αύγουστος 2022, σελ. 145 – 150.

1. Δείτε π.χ. στις διευθύνσεις [www.lhc.ch](http://www.lhc.ch), [www.atlas.ch](http://www.atlas.ch) και [www.cern.ch](http://www.cern.ch)

Το τεύχος Ιουλίου-Αυγούστου 2022 του περιοδικού CERN Courier (για ενημέρωση στην Φυσική Υψηλών Ενεργειών διεθνώς) είναι αφιερωμένο στο σωματίδιο higgs.

1. “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, ATLAS Collaboration, Physics Letters B, Vol. 716, issue 1, 2012, pages 1 - 29.

“Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at LHC”, CMS Collaboration, Physics Letters B, Vol. 716 (2012), pages 30 – 61.

1. Σε προηγούμενο άρθρο έγινε εκτενέστερη θεωρητική εισαγωγή για το ΚΠ και προεκτάσεις του, καθώς και ενημέρωση για τα αποτελέσματα και τους προβληματισμούς του RUN1: Η.Κατσούφης, Περιοδικό *Ακτίνες*, τεύχος Ιουλίου – Αυγούστου, 2015, σελ. 144 – 150 (με αναφορές και σε προηγούμενες σχετικές ενημερώσεις) .

Τα τεύχη των *Ακτίνων* από το 2013 και εξής είναι αναρτημένα πλήρη στην ιστοσελίδα της Χ.Ε.Ε., [www.xee.gr](http://www.xee.gr).

1. “LHC Run3: the final countdown”, CERN Courier, March-April 2022, σελ 6

“The LS2 vacuum challenge”, CERN Courier, March-April 2022, σελ 39

1. 1 TeV = 1 τερα-ηλεκτρονιοβόλτ = 1012 eV = 1 τρισεκατομμύριο ηλεκτρονιοβόλτ. Τα φωτόνια που μπαίνουν στα μάτια μας και βλέπουμε έχουν ενέργεια μερικά ηλεκτρονιοβόλτ. 1 ns = 1 nanosecond = 1 δισεκατομμυριοστό του δευτερολέπτου.
2. Βλ. π.χ. “Wheels in motion for ATLAS upgrade”, CERN Courier, Nov.-Dec. 2021, σελ. 27 – 31.
3. H μάζα m μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια Ε, με τη σχέση του Αϊνστάιν Ε = mc2 , όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό.
4. Patrick Riek, Aurelio Juste, “Search for new physics: take three”, CERN Courier, May – June 2022, σελ. 29

Marco Pieri, Guillaume Unal, “The higgs boson under the microscope”, Cern Courier, July – August 2022, sel. 40 – 43.

1. Frank Wilczek, “Through the Higgs portal”, Cern Courier, July – August 2022, σελ 55-57
2. John Ellis, “The Higgs and the fate of the Universe”, CERN Courier, July-August 2022, σελ 59-60.
3. Abideh Jahari, “Pushing the precision frontier”, CERN Courier, May – June 2022, σελ. 33-35

 (12) Mathew Chalmers, Editor, Cern Courier, May – June 2022, σελ. 59-60

Ηλίας Κωνστ. Κατσούφης

Φυσικός, Ομότ. Καθηγ. Ε.Μ.Π.