

# ΗΥ.Ρ.Α.Τ.Ι.Α.

HYbrid Pupil's Analysis Tool  
for Interactions in ATLAS

Χριστίνα Κουρκουμέλη - Στέλιος Βουράκης



ΕΘΝΙΚΟΝ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ



## Large Hardron Collider (LHC)

Ο LHC είναι ο μεγαλύτερος και ισχυρότερος επιταχυντής σωματιδίων που έχει ποτέ κατασκευαστεί. Βρίσκεται εγκατεστημένος στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN).

Χρησιμοποιεί συγκρουόμενες δέσμες σωματιδίων (αρχικά πρωτονίων και στη συνέχεια πυρήνων μολύβδου και άλλων βαρέων ιόντων). Η ενέργεια της σύγκρουσης των δεσμών είναι η μεγαλύτερη που έχει ποτέ επιτευχθεί στο εργαστήριο και μας βοηθά να πλησιάσουμε τις συνθήκες που επικρατούσαν λίγες στιγμές μετά την μεγάλη έκρηξη. Μέσα από αυτό το πείραμα θα μπορέσουμε να επιβεβαιώσουμε την ορθότητα του «Καθιερωμένου Προτύπου» της σωματιδιακής φυσικής, ή ενδεχομένως την ανάγκη επέκτασης αυτού και πιθανώς και άλλων εναλλακτικών θεωριών της σωματιδιακής φυσικής και κοσμολογίας. Ο LHC ξεκίνησε τη λειτουργία του στις 10 Σεπτεμβρίου 2008.

Ο επιταχυντής βρίσκεται εγκατεστημένος σε ένα τούνελ περιφέρειας 27 χλμ. σε βάθος περίπου 100m κάτω από τα Γάλλο-Ελβετικά σύνορα, κοντά στην Γενεύη της Ελβετίας. Στεγάζεται στο, πλάτους 4μ, τούνελ που σκάφτηκε μεταξύ 1983 και 1988 για τον παλιότερο επιταχυντή LEP.

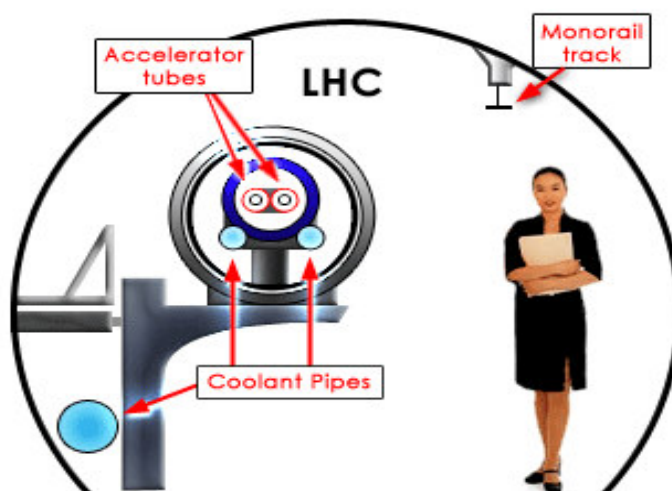


Τοποθεσία του LHC

Μέσα στο τούνελ βρίσκονται 2 παράλληλοι σωλήνες όπου κυκλοφορούν δέσμες σωματιδίων που κινούνται με αντίθετη φορά. Οι σωλήνες



συναντώνται σε 4 σημεία γύρω από τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα τα πειράματα του LHC.



*Τομή του τούνελ του LHC*

Για την καθοδήγηση της δέσμης στην κυκλική της τροχιά φροντίζουν 1232 υπεραγώγιμοι μαγνήτες, ενώ 392 τετραπολικοί μαγνήτες είναι υπεύθυνοι για την εστίαση της δέσμης, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης των δυο δεσμών. Για την ψύξη των περισσότερων από 9000 υπεραγώγιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται 96 τόνοι υγρού Ήλιου, που τους διατηρεί σε θερμοκρασία  $1.9^{\circ}\text{K}$ . Το μαγνητικό πεδίο που χρησιμοποιείται έχει ένταση 8.3 Tesla κατά την πλήρη λειτουργία του επιταχυντή σε ενέργεια δέσμης 7 TeV.

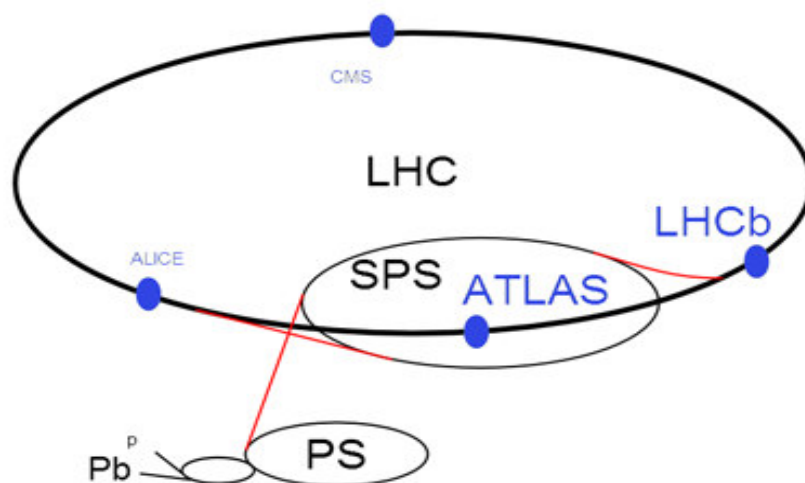


*Από το εσωτερικό του τούνελ*

Τα πρωτόνια που χρησιμοποιούνται δεν βρίσκονται σε διάταξη δέσμης αλλά σε 2808 πακέτα αποτελούμενα από  $3 \times 10^{14}$  πρωτόνια έτσι ώστε οι συγκρούσεις ανάμεσα στις 2 δέσμες να μην είναι συνεχείς αλλά διακριτές, με απόσταση τουλάχιστον 25 ns.

Πριν εισαχθούν στον LHC τα πρωτόνια επιταχύνονται από μια σειρά άλλων διατάξεων έτσι ώστε να αποκτήσουν τη μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια. Αρχικά εισάγονται στον **LINAC 2** (LINear pArticle aCcelerator) που τα επιταχύνει σε ενέργεια 50 MeV και στη συνέχεια εισάγονται στον **PSB** (Proton Synchrotron Booster) που τα επιταχύνει στα 1,4 GeV. Σειρά έχουν το **PS** (Proton Synchrotron) που τα επιταχύνει έως τα 26 GeV και τέλος το **SPS** (Super Proton Synchrotron) που τελικά τα εισάγει στον **LHC** με ενέργεια 450 GeV. Η επιτάχυνση τους μέχρι τα **7 TeV** ανά πρωτόνιο διαρκεί περίπου 20 λεπτά. Σε αυτές τις ταχύτητες τα πρωτόνια έχουν 99.9999991% της ταχύτητας του φωτός.

Για τα βαριά ιόντα η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι ελαφρώς διαφορετική. Αρχικά θα επιταχυνθούν από το **LINAC 3**, και στη συνέχεια θα περάσουν από τα **PS** και **SPS** έως ότου φτάσουν στον **LHC** όπου θα αποκτήσουν την τελική τους ενέργεια των **574 TeV** ανά πυρήνα.



*Πορεία των σωματιδίων μέχρι τον LHC*

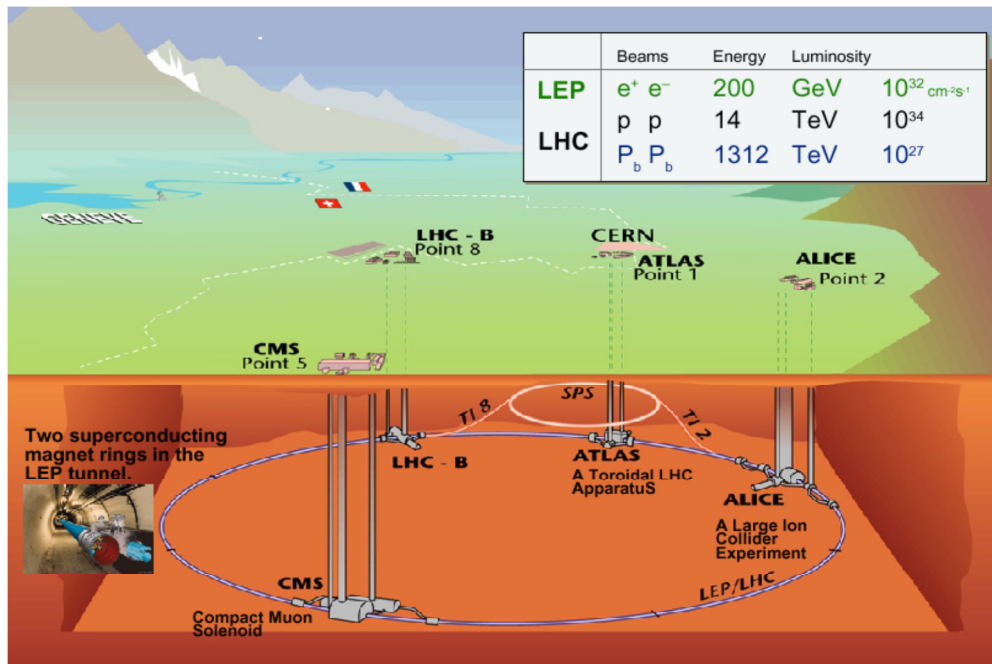
Η ενέργεια κέντρου μάζας που αναμένεται να φτάσει ο LHC είναι **14 TeV** για δέσμες πρωτονίων και **1148 TeV** χρησιμοποιώντας πυρήνες μολύβδου.



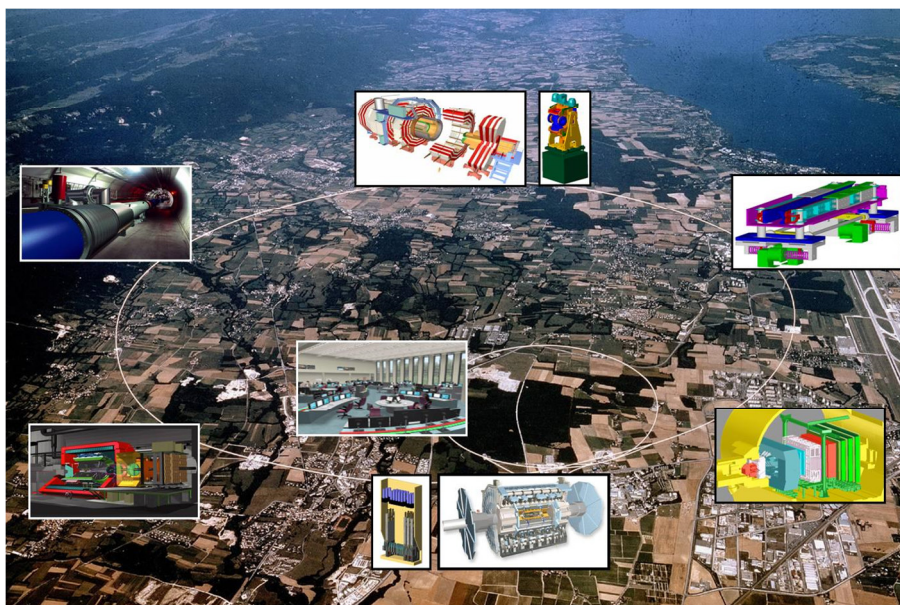
## Πειράματα

Λόγω της μεγάλης ποικιλίας ερευνητικών στόχων του LHC, 6 ανιχνευτές διαφορετικών τύπων έχουν τοποθετηθεί σε 4 υπόγειες κοιλότητες γύρω από τα 4 σημεία τομής των δεσμών.

Οι 2 από αυτούς (ATLAS και CMS) είναι μεγάλοι ανιχνευτές γενικού σκοπού, άλλοι 2 (ALICE και LHCb) έχουν συγκεκριμένους ρόλους, ενώ οι TOTEM και LHCf είναι πολύ μικρότεροι και έχουν πολύ συγκεκριμένο σκοπό.



Εγκαταστάσεις του LHC και διάταξη των ανιχνευτών



Αεροφωτογραφία της περιοχής του LHC με απεικόνιση των ανιχνευτών

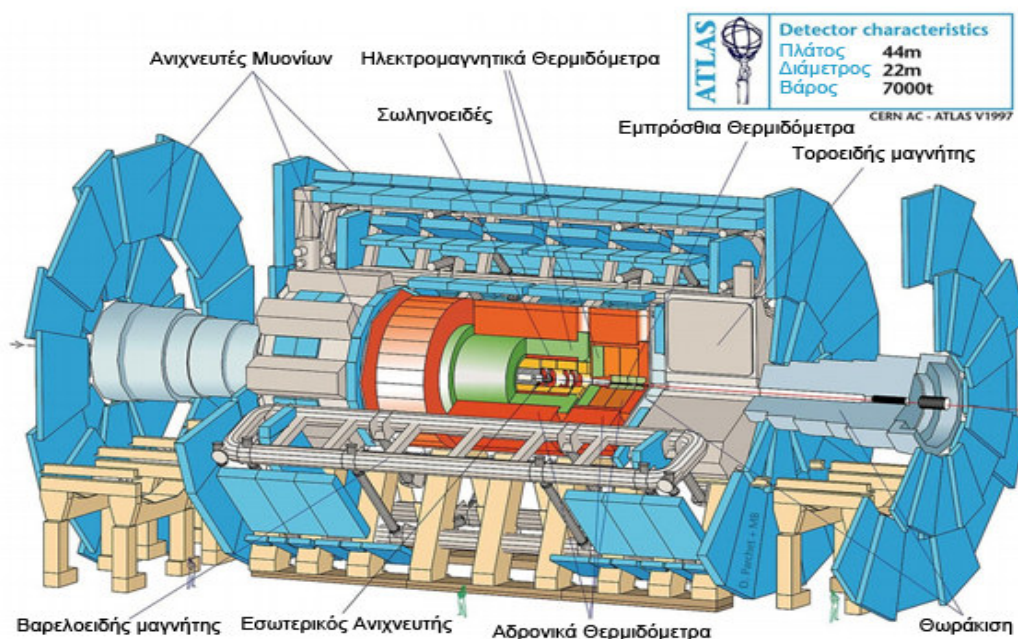
## ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)

Ο ATLAS είναι ένας από τους δυο ανιχνευτές γενικού σκοπού του LHC (ο άλλος είναι ο CMS). Χρησιμοποιείται για μια ευρεία γκάμα επιστημονικών πειραμάτων συμπεριλαμβανομένης και της αναζήτησης του Higgs, επιπλέον διαστάσεων και σωματιδίων που μπορεί να αποτελούν την σκοτεινή ύλη.

Αν και ο σκοπός του ATLAS είναι ίδιος με αυτόν του CMS, και τα δεδομένα που θα καταγράψουν είναι παρόμοια (τροχιές, ενέργειες, κατηγορίες σωματιδίων) ο σχεδιασμός και η κατασκευή των μαγνητών που χρησιμοποιούν είναι τελείως διαφορετικός.

Το κύριο χαρακτηριστικό του ATLAS είναι το τεράστιο σύστημα τοροειδών μαγνητών χωρίς πυρήνα (αέρα). Αποτελείται από 8 υπεραγωγικά πηνία μήκους 25μ, τοποθετημένα έτσι ώστε να δημιουργούν ένα κύλινδρο γύρω από την δέσμη σωματιδίων σε όλο το μήκος του ανιχνευτή. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται μέσα στον κύλινδρο που δημιουργούν τα πηνία.

Περισσότεροι από 3030 επιστήμονες από 174 ινστιτούτα και 38 χώρες δουλεύουν πάνω στο πείραμα ATLAS.



### Ο ανιχνευτής ATLAS

**Μέγεθος :** 44μ μήκος, 25μ ύψος, 25μ πλάτος. Ο ATLAS είναι ο μεγαλύτερος σε όγκο ανιχνευτής που έχει κατασκευαστεί.

**Βάρος :** 7.000 τόνοι (όσο ο πύργος του Άιφελ)

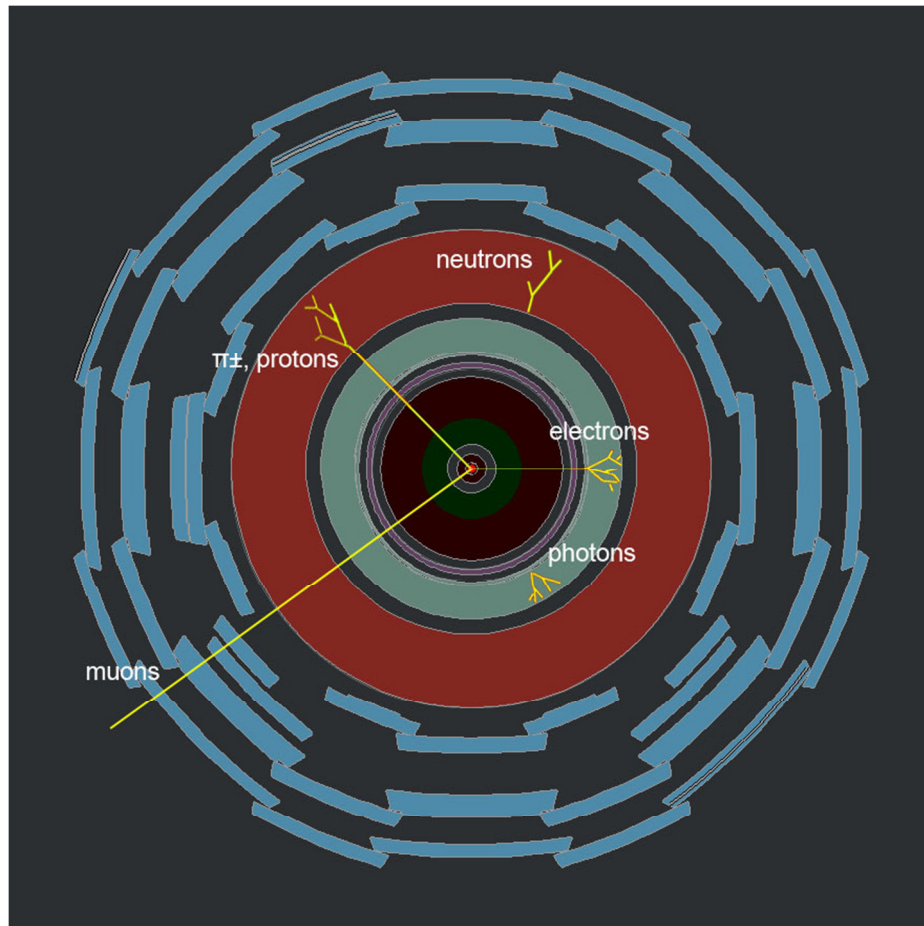
**Σχεδιασμός :** Κεντρικός ανιχνευτής με πλευρικούς δίσκους στις 2 άκρες

Η επεξεργασία των δεδομένων που θα προκύψουν από το πείραμα ATLAS είναι το αντικείμενο του λογισμικού HYPATIA, που θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

## Τα τμήματα του ATLAS

Ο ανιχνευτής ATLAS αποτελείται από μια σειρά ομόκεντρων κυλίνδρων τοποθετημένων έτσι ώστε η σύγκρουση των δεσμών να γίνεται στο κέντρο τους. Τα σωματίδια που προκύπτουν από τη σύγκρουση περνούν μέσα από τους ανιχνευτές διαδοχικά και είτε σταματούν σε κάποιον από αυτούς ή συνεχίζουν την πορεία τους έξω από τον ανιχνευτή.

Ο ανιχνευτής αποτελείται από 4 τμήματα. Τον εσωτερικό ανιχνευτή ή ανιχνευτή τροχιών, το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο και το αδρονικό θερμιδόμετρο, τους θαλάμους μυονίων και το σύστημα μαγνητών.

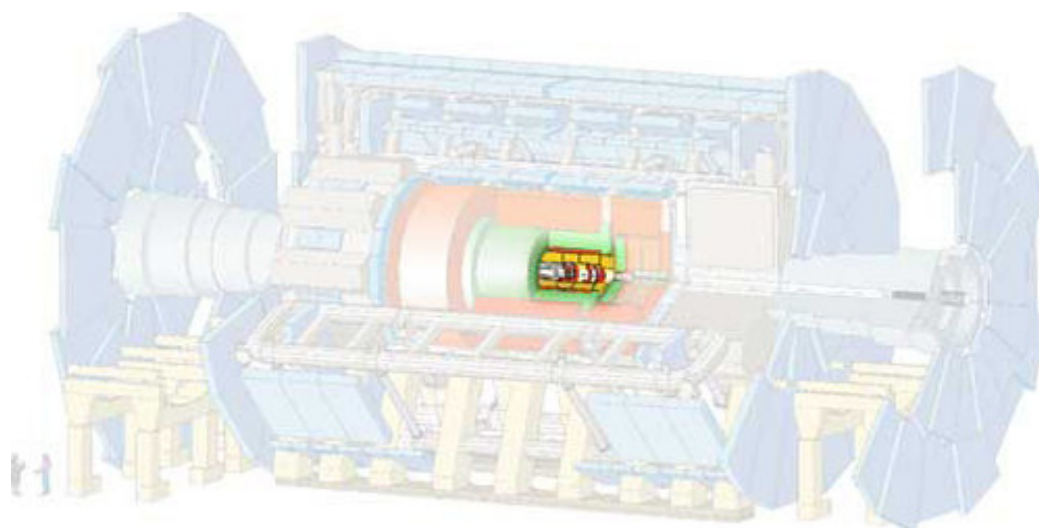


*Εγκάρσια τομή του ανιχνευτή ATLAS*  
*Σκούρο πράσινο και καφέ : Ανιχνευτής Τροχιών*  
*Ανοιχτό πράσινο : Ηλεκτρομαγνητικό Θερμιδόμετρο*  
*Κόκκινο : Αδρονικό Θερμιδόμετρο*  
*Γαλάζιο : Θάλαμοι Μυονίων*



### **Ανιχνευτής Τροχιών ή Εσωτερικός Ανιχνευτής,**

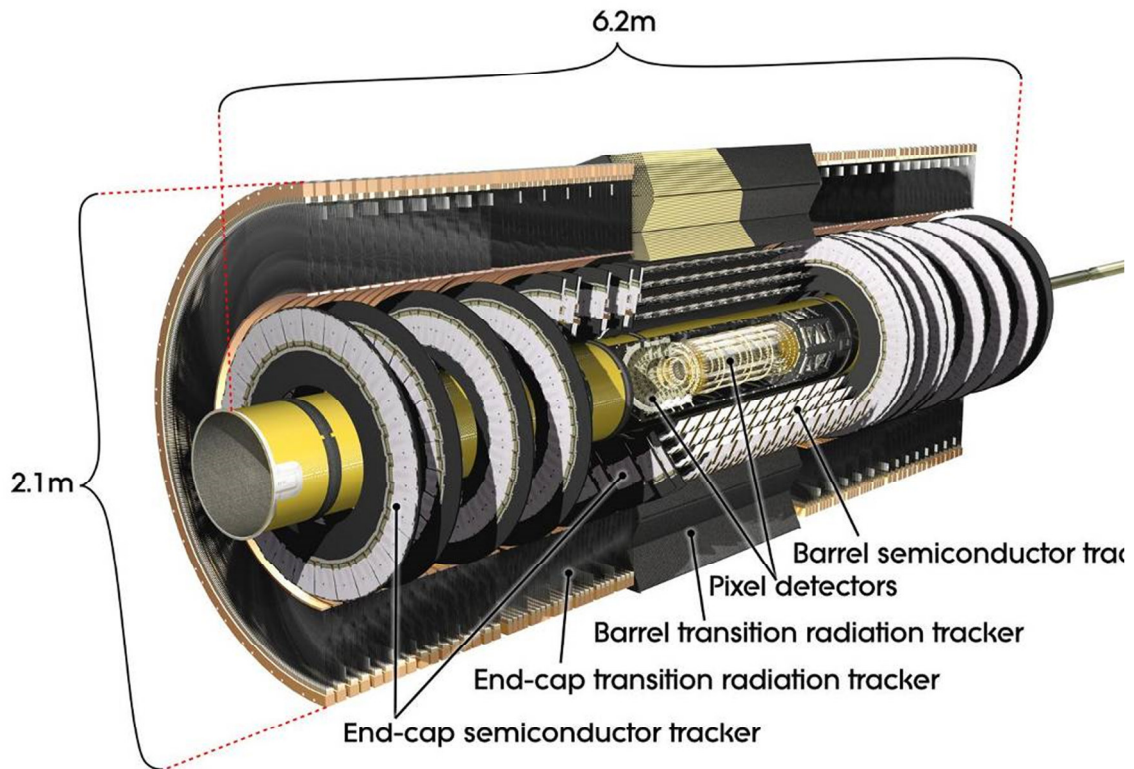
Ο ανιχνευτής αυτός βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης και αποτελείται από τρεις διαφορετικούς υποανιχνευτές, όλους με στόχο την ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων. Τα ουδέτερα σωματίδια (π.χ. φωτόνια) διασχίζουν τους ανιχνευτές απαρατήρητα. Όλα τα φορτισμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή, αλλά βγαίνουν από αυτόν με την ίδια περίπου ενέργεια και κατεύθυνση, που είχαν πριν από την είσοδο τους.



*Εσωτερικός ανιχνευτής*

Στο εσωτερικό του βρίσκονται ανιχνευτές πυριτίου υψηλής ανάλυσης ενώ στο εξωτερικό είναι τοποθετημένοι οι ανιχνευτές τροχιών και ανίχνευσης ακτινοβολίας μετάβασης TR. Όλα τα στοιχεία βρίσκονται τοποθετημένα στο κεντρικό σωληνοειδές που δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο έντασης 2 Tesla.

Η διάμετρος του εσωτερικού ανιχνευτή είναι 1,15μ ενώ το συνολικό του μήκος 7μ. Η διάταξη των επί μέρους ανιχνευτών απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



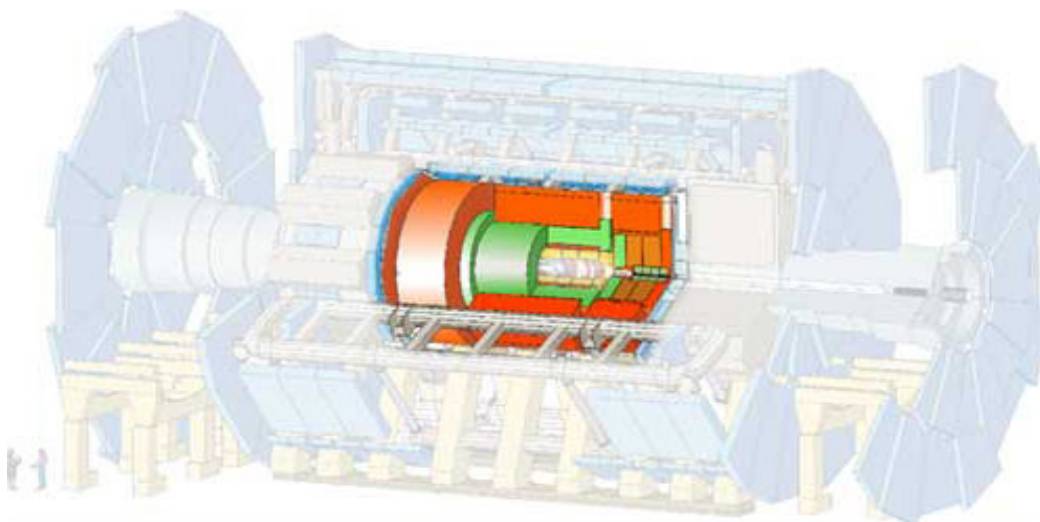
*Διάταξη επί μέρους ανιχνευτών*

Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του ανιχνευτή προκαλεί την καμπύλωση των τροχιών που διαγράφουν τα φορτισμένα σωματίδια. Έτσι από την φορά της καμπύλωσης συμπεραίνουμε το φορτίο του σωματιδίου και από το βαθμό της, τη ορμή του.

Η θέση από την οποία ξεκινούν οι τροχιές των σωματιδίων μας δίνει επιπλέον πληροφορίες. Για παράδειγμα αν οι τροχιές ξεκινούν από σημείο διαφορετικό από εκείνο της σύγκρουσης των δεσμών τότε είναι πολύ πιθανό να προέρχονται από διάσπαση άλλου σωματιδίου που έχει μεγαλύτερο χρόνο ζωής π.χ. b-quark.

## Θερμιδόμετρα

Τα θερμιδόμετρα μετρούν την ενέργεια τόσο των φορτισμένων όσο και των ουδέτερων σωματιδίων. Αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες και αισθητήρες. Η αλληλεπίδραση των σωματιδίων με τις μεταλλικές πλάκες δημιουργεί ένα πίδακα δευτερογενών σωματιδίων από τα οποία κάποια συλλέγονται και καταγράφονται από τους αισθητήρες. Η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου στις περισσότερες περιπτώσεις, απορροφάται από το θερμιδόμετρο. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, τα θερμιδόμετρα βρίσκονται έξω από τον ανιχνευτή, ώστε η τροχιά του φορτισμένου σωματιδίου να καταγράφεται πριν απορροφηθεί από το θερμιδόμετρο.

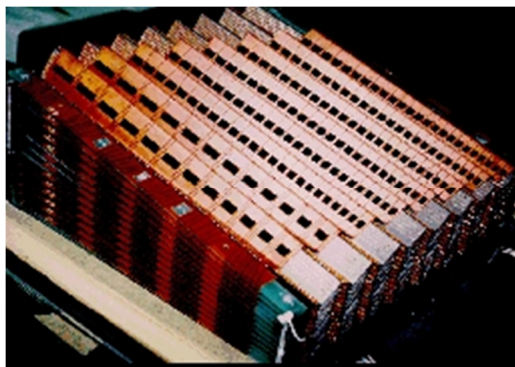


*Ηλεκτρομαγνητικό (πράσινο) και αδρονικό (πορτοκαλί) θερμιδόμετρο*

Τα θερμιδόμετρα του ATLAS αποτελούνται από δυο διαφορετικά τμήματα:

- Το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (πράσινη περιοχή) που μετρά τη συνολική ενέργεια των  $e^+$ ,  $e^-$  και φωτονίων.
- Το αδρονικό θερμιδόμετρο (πορτοκαλί περιοχή): μετρά τη συνολική ενέργεια των αδρονίων (όπως πρωτόνια, νετρόνια).

Μόνο τα μυόνια και τα νετρίνα έχουν την ικανότητα να διεισδύουν πρώτα στον ανιχνευτή -και στη συνέχεια στα θερμιδόμετρα- και να συνεχίζουν στους ανιχνευτές μυονίων.



*Μέρος του ηλεκτρομαγνητικού θερμιδόμετρου*

Στις γραμμικές περιοχές των θερμιδόμετρων οι αισθητήρες περιέχουν υγρό Αργόν. Οι πίδακες σωματιδίων μέσα στο Αργόν απελευθερώνουν ηλεκτρόνια που συλλέγονται και καταγράφονται.

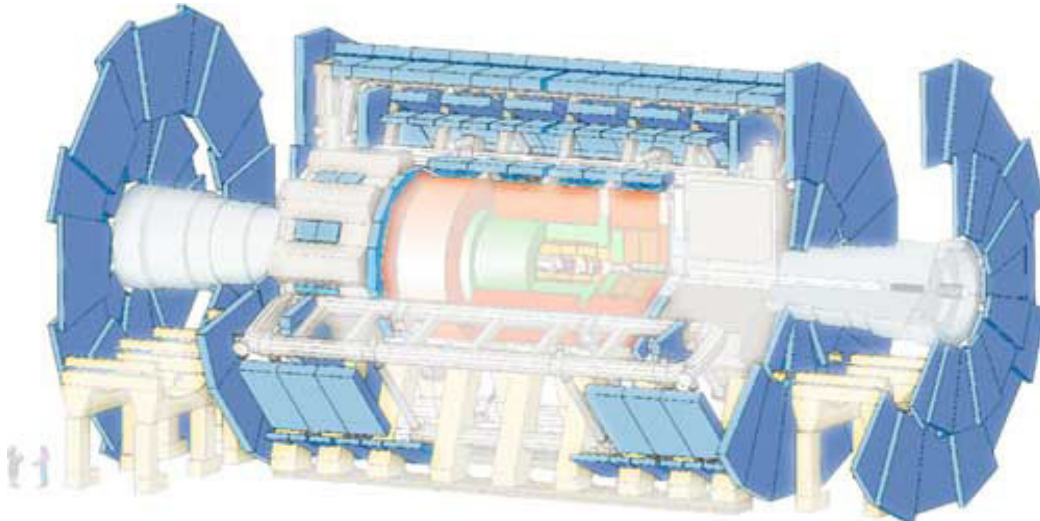
Στις εξωτερικές περιοχές των θερμιδόμετρων οι αισθητήρες είναι πλάκες από πλαστικό που προκαλεί σπινθηρισμούς. Οι πίδακες σωματιδίων προκαλούν την έκκλιση φωτονίων τα οποία καταγράφονται από τους αισθητήρες.



## Θάλαμοι μυνίων

Τα μυνία είναι σωματίδια που μοιάζουν με τα ηλεκτρόνια, μόνο που είναι περίπου 200 φορές βαρύτερα. Είναι τα μόνα ανιχνεύσιμα σωματίδια που μπορούν να περάσουν από τα θερμιδόμετρα χωρίς να χάσουν σχεδόν καθόλου ενέργεια και να φτάσουν στους θαλάμους μυνίων που βρίσκονται στο εξωτερικό του ανιχνευτή ATLAS. Οι θάλαμοι μυνίων καταγράφουν την ορμή και την τροχιά των μυνίων που τους διαπερνούν με μεγάλη ακρίβεια.

Τα μόνα σωματίδια που περνούν από τον ATLAS χωρίς να ανιχνεύονται σε κανένα τμήμα του, είναι τα νετρίνα.



*Θάλαμοι μυνίων*

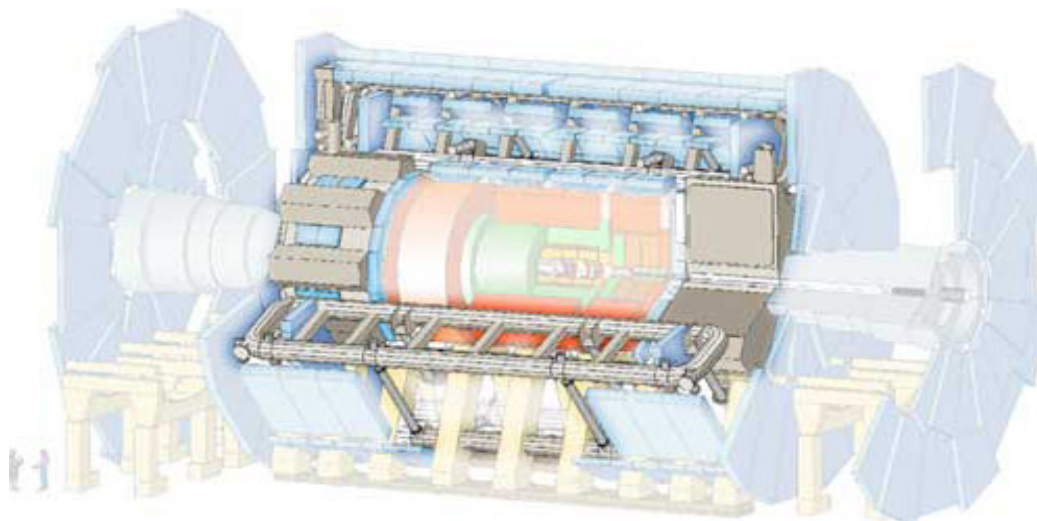
Οι θάλαμοι μυνίων αποτελούνται από χιλιάδες αισθητήρες φορτισμένων σωματιδίων τοποθετημένους στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τεράστια υπεραγωγίμα τοροειδή πηνία. Οι αισθητήρες είναι παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στον εσωτερικό ανιχνευτή, αλλά χρησιμοποιούν μεγαλύτερη διάμετρο σωλήνων.



*Κατασκευή θαλάμων μυνίων στο Πανεπιστήμιο Αθηνών*

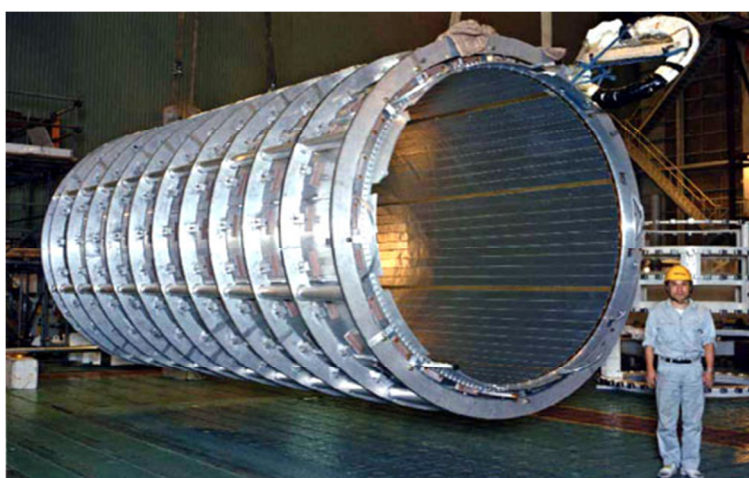
## Σύστημα μαγνητών

Ο ATLAS χρησιμοποιεί δυο είδη μαγνητών, σωληνοειδείς και τοροειδείς. Ο ανιχνευτής βρίσκεται σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο το οποίο κάμπτε τις τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων. Το πεδίο δημιουργείται από τέσσερις διαφορετικούς μαγνήτες: τρεις τοροειδείς και έναν σωληνοειδή. Θετικά και αρνητικά φορτισμένα σωματίδια καμπυλώνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, από το ίδιο μαγνητικό πεδίο. Η ακτίνα καμπυλότητας και η κατεύθυνση των σωματιδίων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ορμής και του φορτίου των σωματιδίων.



*Σύστημα μαγνητών*

Το κεντρικό σωληνοειδές έχει μήκος 5,3μ με διάμετρο 2,4μ. Αποτελείται από επίπεδο υπεραγώγιμο σύρμα τοποθετημένο μέσα σε ένα αλουμινένιο σκελετό ορθογώνιας διατομής. Παρέχει ένα μαγνητικό πεδίο έντασης 2T με μέγιστο σε ορισμένα σημεία τα 2,6T. Το συνολικό του βάρος είναι 5,7 τόνοι.



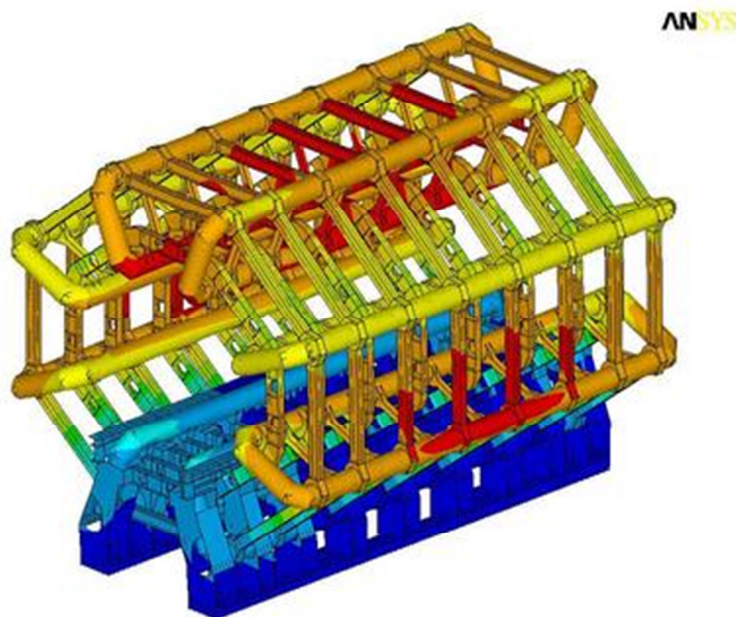
*Ο κεντρικός σωληνοειδής μαγνήτης*

Το σύστημα τοροειδών μαγνητών του ATLAS αποτελείται από 8 πηνία σε κυλινδρική διάταξη και δυο πλευρικούς μαγνήτες, έναν σε κάθε άκρο του κυλίνδρου, με 8 πηνία ο καθένας.



*Μεταφορά των μαγνητών*

Κάθε υπεραγώγιμο πηνίο έχει μήκος 25,3μ εσωτερική ακτίνα 9,4μ και εξωτερική 20,1μ. Το συνολικό βάρος τους είναι 830 τόνοι. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν έχει μέγιστη ισχύ 3,9T.



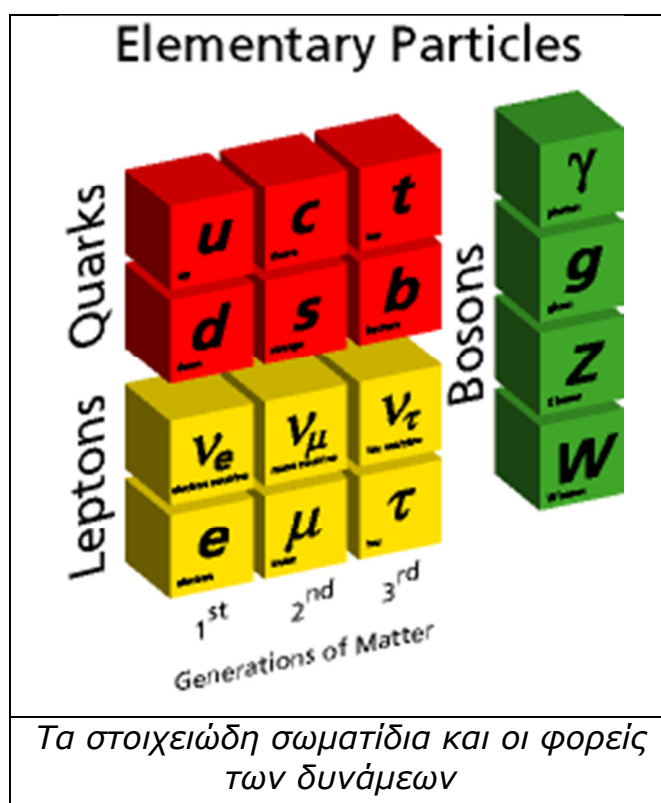
*Το σύστημα οκτώ μαγνητών σε κυλινδρική διάταξη*

Οι πλευρικοί μαγνήτες που αποτελούν τις βάσεις του κυλίνδρου περιέχουν 8 πηνία ο καθένας σε ακτινική διάταξη γύρω από την ευθεία των δεσμών. Κάθε πηνίο έχει ακτινικό μήκος 5μ, εσωτερική διάμετρο 1,65μ και εξωτερική 10,7μ. Το συνολικό βάρος τους είναι 239 τόνοι ενώ το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν έχει ένταση 4,1T. Το ρεύμα που διαρρέει τα υπεραγώγιμα πηνία ξεπερνάει τα 20.000 A.



## Τι ξέρουμε μέχρι τώρα για την φύση και τις δυνάμεις που διέπουν τα σωματίδια

Το παρακάτω **σχήμα** δείχνει (στα αριστερά με κόκκινο και κίτρινο) όλα τα γνωστά στοιχειώδη σωματίδια στη φύση σήμερα. Σύμφωνα με το πιο πετυχημένο θεωρητικό μοντέλο, το Καθιερωμένο Πρότυπο (Κ.Π.), όλα τα σωματίδια μπορούν να περιγραφούν βάσει των έξι quark και των έξι λεπτονίων. Οι δε δυνάμεις που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων είναι τέσσερις και μεταδίδονται μέσω των φορέων τους (η δεξιά κολώνα του σχήματος).



Το φωτόνιο που έχει μηδενική μάζα είναι ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, τα γλουόνια (επίσης άμαζα) είναι οι φορείς της ισχυρής αλληλεπίδρασης, τα σωματίδια Z (τα οποία θα μελετήσετε στην παρούσα άσκηση) και τα W, είναι οι φορείς των ασθενών αλληλεπιδράσεων. Τέλος το γκραβιτόνιο για το οποίο ξέρουμε πολύ λίγα -αλλά είναι διαφορετικό από τους άλλους φορείς- είναι ο φορέας της βαρυτικής δύναμης.

Το Κ.Π. προσπαθεί να περιγράψει με ενιαίο τρόπο τις τρεις πρώτες δυνάμεις, δηλαδή να ενοποιήσει την ηλεκτρασθενή με την ισχυρή δύναμη. Επίσης το μοντέλο αυτό μας έχει επιτρέψει να εξηγήσουμε την ύπαρξη των διαφόρων στοιχειωδών σωματιδίων που έχουμε μέχρι σήμερα ανακαλύψει. Υπάρχουν όμως και ερωτήματα τα οποία το καθιερωμένο μοντέλο δεν έχει απαντήσει.

Το πρώτο από τα αναπάντητα ερωτήματα είναι ο μηχανισμός που δίνει μάζα στα σωματίδια. Για ποιο λόγο τα σωματίδια έχουν την μάζα που μετράμε, και γιατί ορισμένα δεν έχουν μάζα;

Η καλύτερη μέχρι σήμερα εξήγηση δόθηκε το 1964 από τον Peter Higgs, που υπέθεσε την ύπαρξη ενός σωματιδίου –του μποζονίου που φέρει το όνομα του- το οποίο είναι φορέας του πεδίου Higgs. Το πεδίο αυτό, δίνει μάζα σε κάθε σωματίδιο που αλληλεπιδρά μαζί του.

Το σωματίδιο αυτό, καθώς και θεωρίες πέραν από το Κ.Π., είναι το αντικείμενο έρευνας του καινούργιου επιταχυντή LHC.

## Προϊόντα σύγκρουσης σωματιδίων

Όπως είπαμε, στον LHC χρησιμοποιούνται δυο δέσμες σωματιδίων που κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση και συγκρούονται έτσι ώστε να παραχθεί μια μεγάλη ποικιλία νέων σωματιδίων.

Ορισμένα σωματίδια είναι πολύ βραχύβια και διασπώνται σχεδόν αμέσως σε πιο σταθερά σωματίδια. Στις περισσότερες συγκρούσεις πρωτονίων, τα πρωτόνια έχουν ήπιες αλληλεπιδράσεις, και η πλειοψηφία των σωματιδίων συνεχίζει προς την κατεύθυνση των αρχικών σωματιδίων (και όχι κάθετα προς την δέσμη). Ωστόσο, σπάνια παράγονται πολύ λίγα σωματίδια με μεγάλη μάζα. Εάν τα σωματίδια προέρχονται από τη διάσπαση ενός αρχικού σωματιδίου, οι τροχιές τους θα πρέπει να ενώνονται στο ίδιο αρχικό σημείο, που ονομάζεται "κορυφή".

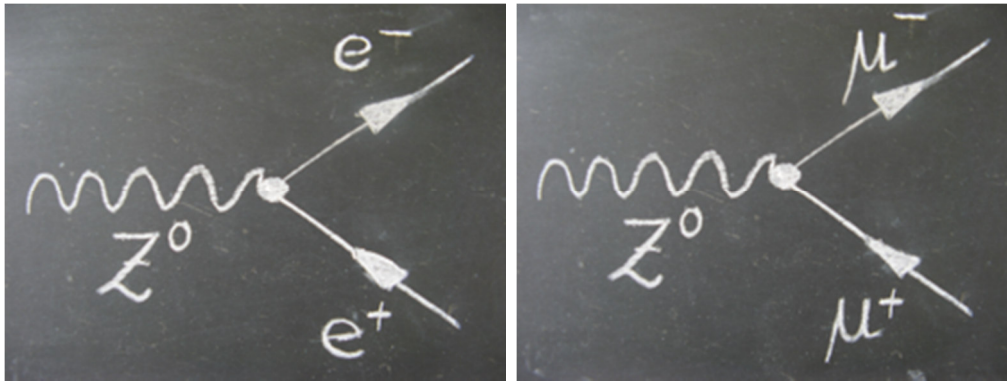
Η διάσπαση των περισσότερων σωματιδίων με μάζα οδηγεί συχνά σε σωματίδια υψηλής ενέργειας που κινούνται σε μεγάλες γωνίες, περισσότερο ή λιγότερο κάθετα προς τα αρχικά πρωτόνια της ακτίνας. Για το λόγο αυτό μετράμε την ορμή, την εγκάρσια ορμή ( $p_T$ ), και τις χρησιμοποιούμε για να ξεχωρίσουμε τα ενδιαφέροντα γεγονότα. Με την πρόσθεση των προϊόντων διάσπασης που προέρχονται από την ίδια κορυφή ανακατασκευάζουμε το αρχικό "αόρατο" σωματίδιο. Σε αυτή την άσκηση θα ανακατασκευάσετε το  $Z^0$  που είναι ο φορέας της ασθενούς δύναμης, υπεύθυνης για την ενέργεια από τον ήλιο και τη ραδιενέργεια.

## Διασπάσεις του Z

Μιας και το σωματίδιο Z είναι ηλεκτρικά ουδέτερο το άθροισμα των φορτίων των σωματιδίων που παράγονται κατά την διάσπασή του πρέπει να είναι 0. Ο λόγος είναι ότι η φύση διατηρεί το φορτίο.

Επομένως, το Z διασπάται σε ζευγάρι σωματίδιο-αντισωματίδιο. Η ποσοστιαία κατανομή των διασπάσεων του Z στους διάφορους τρόπους καθορίζεται από επιπλέον νόμους διατήρησης της φύσης.

- Το 10% των διασπάσεων του Z είναι σε ζευγάρι φορτισμένων λεπτονίων. Οι τρεις δυνατότητες είναι ηλεκτρόνιο-ποζιτρόνιο, μυόνιο-αντιμυόνιο και ταυ-αντιταύ, με κάθε ζευγάρι να έχει περίπου την ίδια πιθανότητα. Έτσι έχουμε 3 δυνατότητες διάσπασης.
- Το 20% των διασπάσεων του Z είναι σε ζευγάρι ουδέτερων λεπτονίων, δηλαδή ζευγάρι νετρίνο-αντινετρίνο. Οι ανιχνευτές μας δεν έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν νετρίνα μιας και αλληλεπιδρούν ελάχιστα με την ύλη (το ηλεκτρικό φορτίο τους είναι μηδενικό). Επομένως, τα νετρίνα είναι αόρατα και μπορούμε να τα "δούμε" μόνο από την παρατήρηση ελλείπουσας εγκάρσιας ορμής μετά την σύγκρουση (μιας και γνωρίζουμε ότι τόσο η ορμή όσο και η ενέργεια διατηρείται στις συγκρούσεις μας).
- Στα 70% των περιπτώσεων, το Z διασπάται σε ζευγάρι κουάρκ-αντικουάρκ. Αυτά εμφανίζονται στον ανιχνευτή ως θύσσανοι που τους αποκαλούμε πίδακες (jets).



Στην άσκηση που θα κάνετε θα ασχοληθείτε μόνο με διασπάσεις Z σε ζευγάρια ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου ή μιονίου αντιμιονίου

## Αναλλοίωτη Μάζα

Η αναλλοίωτη μάζα αποκαλείται επίσης "μάζα ηρεμίας", και είναι χαρακτηριστικό ενός σωματιδίου. Σύμφωνα με τη θεωρία του Αϊνστάιν, η αναλλοίωτη μάζα είναι μια ποσότητα η οποία δεν αλλάζει με την ταχύτητα ή το πλαίσιο αναφοράς. Εάν οι μονάδες έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε η ταχύτητα του φωτός να είναι  $c = 1$ , τότε η αναλλοίωτη μάζα ορίζεται ως

$$m = \sqrt{E^2 - p^2}$$

όπου  $E$  είναι η ενέργεια και  $p = m \cdot v$  η ορμή του σωματιδίου. Για να προσδιοριστεί η αναλλοίωτη μάζα ενός σωματιδίου που διασπάται σχεδόν ακαριαία, πρέπει να εξετάσουμε τα προϊόντα διάσπασής του. Πρέπει να μετρήσουμε την ενέργεια και την ορμή κάθε σωματιδίου και στη συνέχεια να αθροίσουμε όλες τις ενέργειές τους



$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

και τις ορμές τους

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots$$

Το αποτέλεσμα είναι η αναλλοίωτη μάζα και, αν ψάχνετε ένα σωματίδιο, τότε η μάζα που υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να είναι "σχεδόν" το ίδιο, οπότε αν κάνετε την κατανομή των μαζών για διάφορα γεγονότα θα δείτε μια κορυφή γύρω από τη μάζα του σωματιδίου.

## Διασπάσεις του Higgs

Το μποζόνιο Higgs ανακαλύφθηκε από τα πειράματα ATLAS και CMS τον Ιούλιο του 2012 με μάζα  $\sim 125.5$  GeV και δημοσιεύθηκε στο Physics Letter B τον Σεπτέμβριο του 2012. Έτσι τέθηκε σε πέρας μια σχεδόν 50χρονη έρευνα για την ύπαρξη του, από τότε που ο Higgs και άλλοι εισήγαγαν τον Μηχανισμό Higgs για να εξηγήσουν γιατί τα στοιχειώδη Z και W έχουν μη μηδενική μάζα.

Το Higgs στον LHC παράγεται κυρίως από διαγράμματα «σύντηξης δυο γκλουονίων», όπου το καθένα προέρχεται από το κάθε συγκρουόμενο πρωτόνιο.

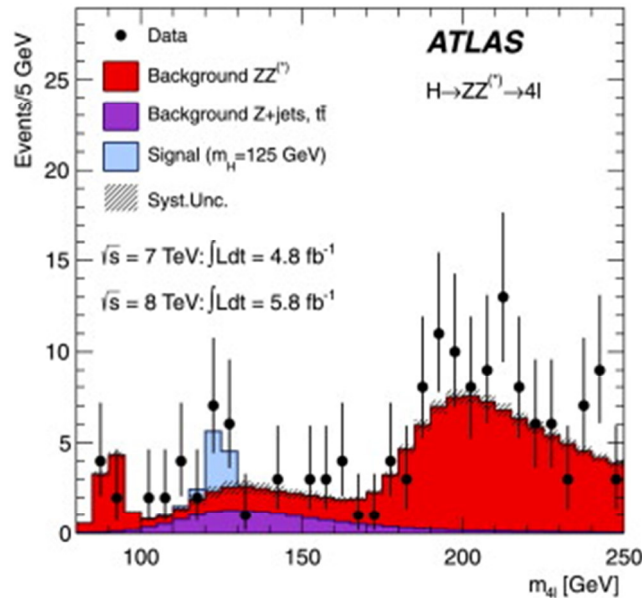


*Παραγωγή Higgs σε αδρονικούς επιταχυντές από σύντηξη δυο γκλουονίων*

Ένας από τους ευκολότερους -για να ανιχνευθεί- τρόπους διάσπασης του Higgs είναι σε δυο μποζόνια Z. Στην συνέχεια το κάθε Z διασπάται σε δυο λεπτόνια αντίθετου προσήμου αλλά ίδιου είδους, οπότε έχουμε σαν παρατηρήσιμες τελικές καταστάσεις τα εξής

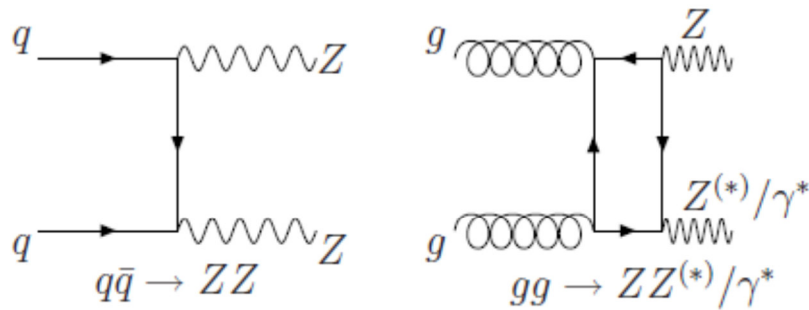
- $H \rightarrow 2 e^+ + 2 e^-$
- $H \rightarrow 2 \mu^+ + 2 \mu^-$
- $H \rightarrow e^+ + e^- + \mu^+ + \mu^-$

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την αναλλοίωτη μάζα των τεσσάρων λεπτονίων από τις μετρήσεις των δεδομένων, όπου φαίνεται μια κορυφή στα  $\sim 125$  GeV (μάζα Higgs) μαζί με την κατανομή του υποβάθρου (υπολογισμός ή εκτίμηση).



### Μάζα τεσσάρων λεπτονίων

Το κυρίως υπόβαθρο είναι από την κατευθείαν παραγωγή δυο Z, δηλαδή ζευγάρι ZZ που όμως δεν προέρχονται από διασπάσεις του συντονισμού Higgs, όπως φαίνεται παρακάτω.



### Μηχανισμοί παραγωγής ZZ\* υποβάθρου

Επειδή το Higgs τώρα ξέρουμε ότι έχει μάζα μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των δυο Z, λέμε ότι διασπάται σε ένα πραγματικό Z και σε ένα «δυναμικό» Z ( $Z^*$ ).

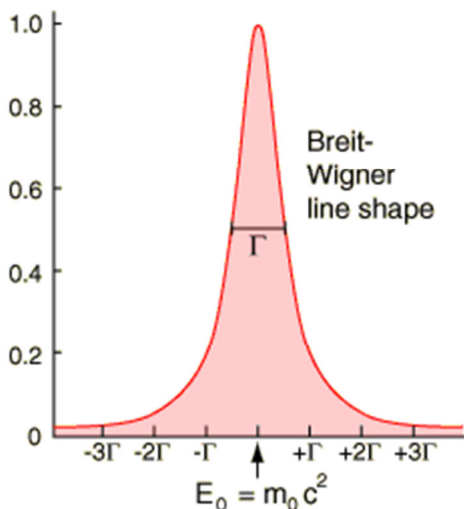
Στην παρακάτω άσκηση για μεγαλύτερη ευκολία έχουμε χρησιμοποιήσει αντί για πραγματικά Higgs, γεγονότα που περιέχουν υπέρθεση 2 διασπάσεων Z. Έτσι τα "Higgs" που προκύπτουν από αυτά θα έχουν μάζα 180 GeV, ακριβώς ίση δηλαδή με 2 μάζες Z.

## Μέτρηση του πλάτους ενός σωματιδίου

Εάν ένα εξαιρετικά βραχύβιο σωματίδιο παράγεται σε μια σύγκρουση υψηλής ενέργειας, η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg :

$$\Delta E * \Delta t > \frac{\hbar}{2}$$

μας δείχνει ότι θα υπάρξει μια σημαντική αβεβαιότητα στην μέτρηση της ενέργειας (που σημαίνει την αναλλοίωτη μάζα του). Η μέτρηση της αναλλοίωτης μάζας ενός ασταθούς σωματιδίου δίνει μια κατανομή (ιστόγραμμα) μαζών που ονομάζεται κατανομή Breit-Wigner. Η κατανομή Breit-Wigner είναι παρόμοια με τη Γκαουσιανή κοντά στην κορυφή, αλλά τα άκρα της καμπύλης είναι περισσότερο επίπεδα.



Το πλάτος της κατανομής αυτής στο μισό του μέγιστου ονομάζεται  $\Gamma$ ,  $\Gamma=1/\tau$ , όπου ο χρόνος ζωής του σωματιδίου  $\tau$  λαμβάνεται όπως η αβεβαιότητα στο χρόνο  $\tau = \Delta t$ . Το  $\Gamma$  που συχνά αναφέρεται ως το "φυσικό πλάτος γραμμής" μας δίνει πολύτιμες πληροφορίες και πρέπει να μετράται. Ως παράδειγμα θα αναφέρουμε ότι η μέτρηση του πλάτους του σωματιδίου Z στο LEP (προηγούμενος μεγάλος επιταχυντής του CERN, ο οποίος αντικαταστάθηκε από τον LHC) έδωσε μια πολύ καλή προσέγγιση του αριθμού

των διαφορετικών τύπων νετρίνων που υπάρχουν.

## Χαμένη εγκάρσια ορμή

Αυτή είναι η ορμή/ενέργεια που δεν ανιχνεύεται στον ανιχνευτή, αλλά αναμένεται λόγω της διατήρησης ενέργειας και ορμής στο εγκάρσιο επίπεδο.

Η ETMiss αποδίδεται γενικά σε σωματίδια που διαφεύγουν από τον ανιχνευτή χωρίς να ανιχνευθούν όπως τα νετρίνα (αν και χαμένη ενέργεια μπορεί να προκληθεί από λανθασμένες μετρήσεις της ορμής/ενέργειας των ανιχνευόμενων σωματιδίων).

Στον LHC, η αρχική ορμή των συγκρουόμενων συστατικών κατά μήκος του άξονα της δέσμης δεν είναι γνωστή (γιατί η ενέργεια του κάθε αδρονίου χωρίζεται, και ανταλλάσσεται διαρκώς, μεταξύ των συστατικών του), οπότε το ποσό της ενέργειας που λείπει δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Ωστόσο, η αρχική ορμή και ενέργεια σε ένα επίπεδο εγκάρσιο προς τον άξονα της δέσμης είναι μηδέν. Έτσι βρίσκουμε την ελλείπουσα εγκάρσια ορμή/ενέργεια (ETMiss). Απεικονίζεται στην οθόνη με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή η οποία εκτός από το μέτρο (το μέγεθος της ελλείπουσας εγκάρσιας ορμής/ενέργειας) δείχνει την κατεύθυνση της σαν διάνυσμα.



## Άσκηση

Η άσκηση θα πραγματοποιηθεί με πραγματικά γεγονότα που συλλέχτηκαν από το πείραμα ATLAS. Ανάμεσα στα γεγονότα από τον ανιχνευτή ATLAS, υπάρχουν κάποια που περιέχουν διασπάσεις του σωματιδίου Z. (Το ίδιο το Z δεν μπορεί να φανεί, διότι έχει πολύ μικρό χρόνο ζωής και διασπάται αμέσως). Μερικές φορές διασπάται σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου ή μιονίου-αντιμιονίου. Τα γεγονότα αυτά πρέπει να τα ξεχωρίσετε από άλλα γεγονότα τα λεγόμενα γεγονότα υποβάθρου.

Από τις συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων παράγονται πάρα πολλά σωματίδια, και με πολύ γρήγορο ρυθμό : 40M γεγονότα/sec. Από τα γεγονότα αυτά ελάχιστα είναι ενδιαφέροντα και το πείραμα χρησιμοποιεί σκανδαλιστές (triggers) ώστε να καταγράφει μόνο τα απολύτως ενδιαφέροντα γεγονότα με ρυθμό 200 γεγονότα/sec

Εκτός από γεγονότα  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , στο δείγμα υπάρχουν γεγονότα όπου τα μύονια προέρχονται από διασπάσεις κουάρκ, καθώς επίσης και γεγονότα με μύονια που προέρχονται από κοσμικές ακτίνες.

- Τα μύονια από διασπάσεις quark δεν είναι απομονωμένα (είναι μέσα σε πίδακες-jets σωματιδίων), ενώ συχνά συνοδεύονται και από ελλείπουσα ενέργεια στο εγκάρσιο επίπεδο ETmiss διότι τα μύονια συνοδεύονται από νετρίνα για να διατηρείται ο λεπτονικός αριθμός.
- Τα μύονια που προέρχονται από κοσμικές ακτίνες, εμφανίζονται ως δύο τροχιές καθώς διασχίζουν τον ανιχνευτή από άκρη σε άκρη. Οι «δύο» ανακατασκευασμένες τροχιές που στην πραγματικότητα είναι μία, σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 180ο, ενώ ακόμη φαίνονται να περνούν μακριά από το σημείο αλληλεπίδρασης, από το οποίο ξεκινούν οι περισσότερες από τις υπόλοιπες τροχιές.
- Τα λεπτόνια που προέρχονται από διασπάσεις του Z έχουν υψηλή εγκάρσια ορμή ώστε το άθροισμα των εγκαρσίων ορμών τους να δίνει χοντρικά τουλάχιστον το μισό της μάζας του Z. Το αν ανήκουν δύο τροχιές στο Z (οι οποίες πρέπει επί πλέον να είναι ετερόσημες) το ελέγχετε βάζοντας τις (με διπλό κλικ) στον πίνακα αναλλοίωτων μαζών στον οποίο υπολογίζεται η σχετικιστική αναλλοίωτη μάζα δύο ή περισσότερων τροχιών.
- Η μάζα πρέπει να είναι γύρω στα 92 GeV που είναι η μάζα του Z, η οποία όμως έχει ένα εύρος μερικά GeV που προέρχεται αφ' ενός από το φυσικό πλάτος του σωματιδίου και αφ' ετέρου από την διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών στην μέτρηση της μάζας.

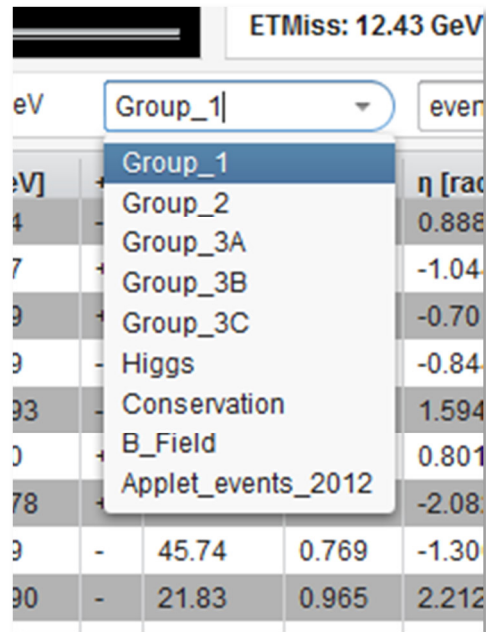
Η μάζα μπορεί να υπολογιστεί και κατευθείαν από τον γνωστό σχετικιστικό τύπο

$$m = \sqrt{E^2 - p^2}$$

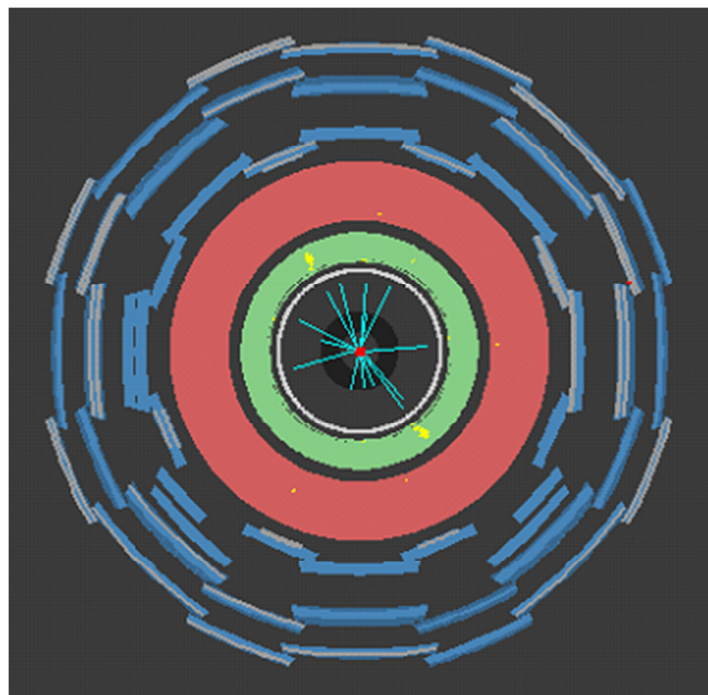
όπου E η ολική ενέργεια και p η ολική ορμή.

## Άσκηση 1

Για την πρώτη άσκηση επιλέγετε από το πρώτο drop down box το 'Group\_1' που περιέχει την πρώτη ομάδα γεγονότων.

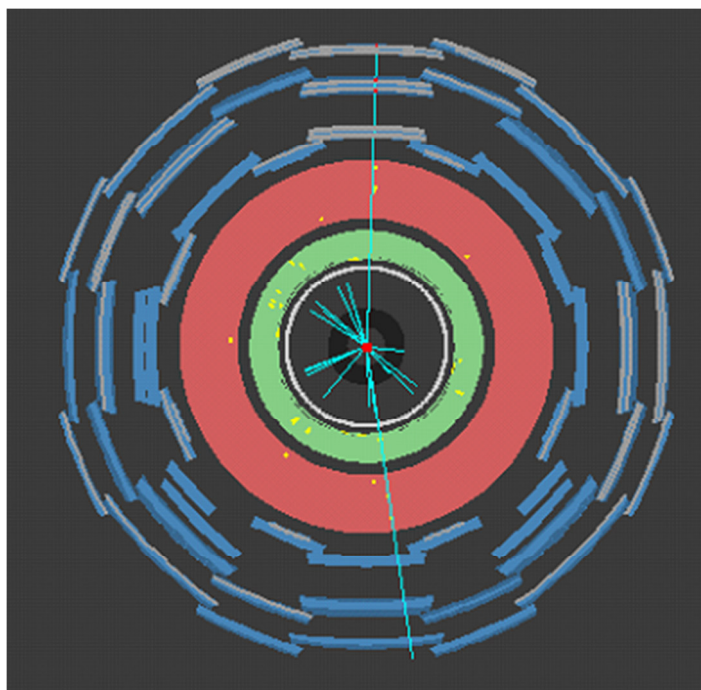


Η ομάδα αυτή περιέχει 10 γεγονότα. Τα 5 πρώτα από αυτά είναι διασπάσεις Z σε ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου και τα 5 επόμενα σε ζεύγος μιονίου – αντιμυονίου. Ας δούμε μερικά παραδείγματα τροχιών ηλεκτρονίων.



Οι τροχιές των ηλεκτρονίων απεικονίζονται σαν μικρές γραμμές στο κέντρο του ανιχνευτή αφού τα ηλεκτρόνια σταματούν στο H/M θερμιδόμετρο (πράσινη περιοχή) και αφήνουν εκεί την ενέργεια τους (κίτρινα σημάδια).

Αντίθετα τα μύονια είναι τα μοναδικά σωματίδια που φτάνουν στους θαλάμους μιονίων (μπλε περιοχή) και απεικονίζονται σαν μεγάλες τροχιές. Τα νετρίνα επίσης μπορούν να βγουν έξω από τον ανιχνευτή καθώς δεν σταματούν σε κανένα τμήμα του αλλά δεν μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα και έτσι δεν απεικονίζονται.



## Άσκηση 2

Για την άσκηση αυτή επιλέγετε την ομάδα 'Group\_2'. Η ομάδα αυτή περιέχει 10 γεγονότα τα οποία όπως και πριν είναι διασπάσεις Z σε ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου ή μιονίου – αντιμιονίου. Όμως αυτή τη φορά πρέπει να ξεχωρίσετε ποια γεγονότα ανήκουν στην κάθε κατηγορία και να συμπληρώσετε τον παρακάτω πίνακα.

| Αριθμός γεγονότος | Αριθμός τροχιάς | Είδος τροχιάς | $p_T$ |
|-------------------|-----------------|---------------|-------|
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |
|                   |                 |               |       |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

### Άσκηση 3

Για την άσκηση αυτή επιλέξτε την ομάδα 'Group\_3A', 3B ή 3C. Σε αυτή περιέχονται 50 γεγονότα που είναι είτε διασπάσεις Z σε ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου ή μιονίου – αντιμιονίου είτε γεγονότα υποβάθρου που προέρχονται από διάφορες άλλες διαδικασίες (κοσμικές ακτίνες, διαφορετικές διασπάσεις Z, διασπάσεις άλλων σωματιδίων κλπ).

Εσείς πρέπει να αναγνωρίσετε ποια γεγονότα περιέχουν διασπάσεις Z σε ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου ή μιονίου – αντιμιονίου. Στη συνέχεια να προσθέσετε αυτές τις δυο τροχιές από κάθε τέτοιο γεγονός στον πίνακα αναλλοίωτης μάζας (κοιτάξτε τη στήλη  $m_{ll}$ ) και έτσι να φτιάξετε ένα ιστόγραμμα με την αναλλοίωτη μάζα του Z. Τα γεγονότα υποβάθρου απλά τα προσπερνάτε.

Τα κριτήρια για την επιλογή σας είναι :

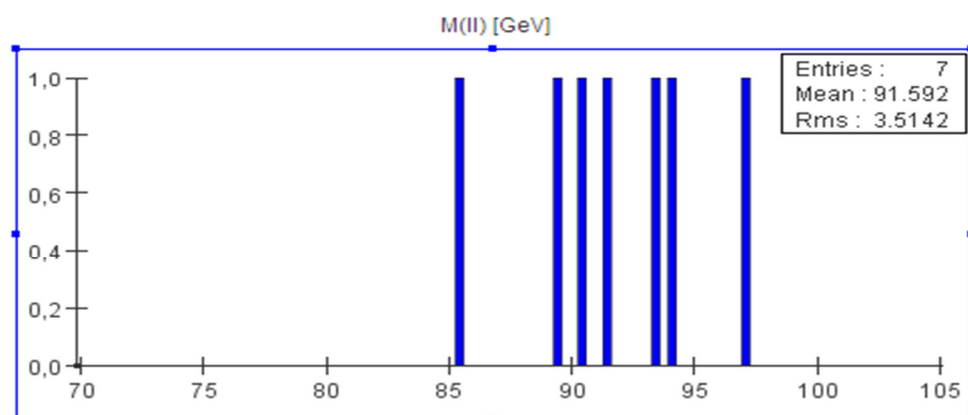
$$Z \rightarrow \mu^+ + \mu^- \quad Z \rightarrow e^+ + e^-$$

- 2 Τροχιές ετερόσημες
- Αναλλοίωτη μάζα 91,2 GeV
- Μικρή ελλείπουσα ενέργεια  $ET_{Miss} < 10$  GeV

### Γεγονότα υποβάθρου

- Συνήθως περιέχουν μόνο ένα λεπτόνιο (διασπάσεις  $W \rightarrow \text{lepton} + \nu$ )
- Κοσμικές ακτίνες : αντιδιαμετρικές τροχιές και στις δυο προβολές
- Μεγάλη ελλείπουσα ενέργεια  $ET_{Miss}$  (ύπαρξη νετρίνων)

Παρακάτω απεικονίζεται ένα παράδειγμα ιστογράμματος που προκύπτει από διασπάσεις Z. Το κέντρο του βρίσκεται γύρω από τα 91,2 GeV που είναι η αναλλοίωτη μάζα του Z και όσο αυξάνεται ο αριθμός των γεγονότων που περιέχει τόσο περισσότερο προσεγγίζει την κατανομή Breit-Wigner που αναφέραμε.





## Άσκηση 4

Για την άσκηση αυτή επιλέξτε την ομάδα 'Higgs'. Σε αυτή περιέχονται 20 events από τα οποία 7 είναι διασπάσεις Higgs σε Z και τα υπόλοιπα είναι γεγονότα υποβάθρου. Το κάθε Higgs διασπάται όπως έχουμε πει σε δυο Z και το καθένα από αυτά σε δυο λεπτόνια. Έτσι μπορούμε να έχουμε :

- $H \rightarrow 2 e^+ + 2 e^-$
- $H \rightarrow 2 \mu^+ + 2 \mu^-$
- $H \rightarrow e^+ + e^- + \mu^+ + \mu^-$

Χρησιμοποιήστε τα κριτήρια από την προηγούμενη άσκηση και αναγνωρίστε τα 7 γεγονότα που περιέχουν διασπάσεις Higgs. Προσθέστε τις 4 τροχιές στον πίνακα αναλλοίωτης μάζας και δείτε τη μάζα του Higgs στη στήλη  $m_{\text{inv}}$  και στο αντίστοιχο ιστόγραμμα. Τα γεγονότα που χρησιμοποιούνται σε αυτή την άσκηση δεν είναι πραγματικά.

## ***HYPATIA web application***

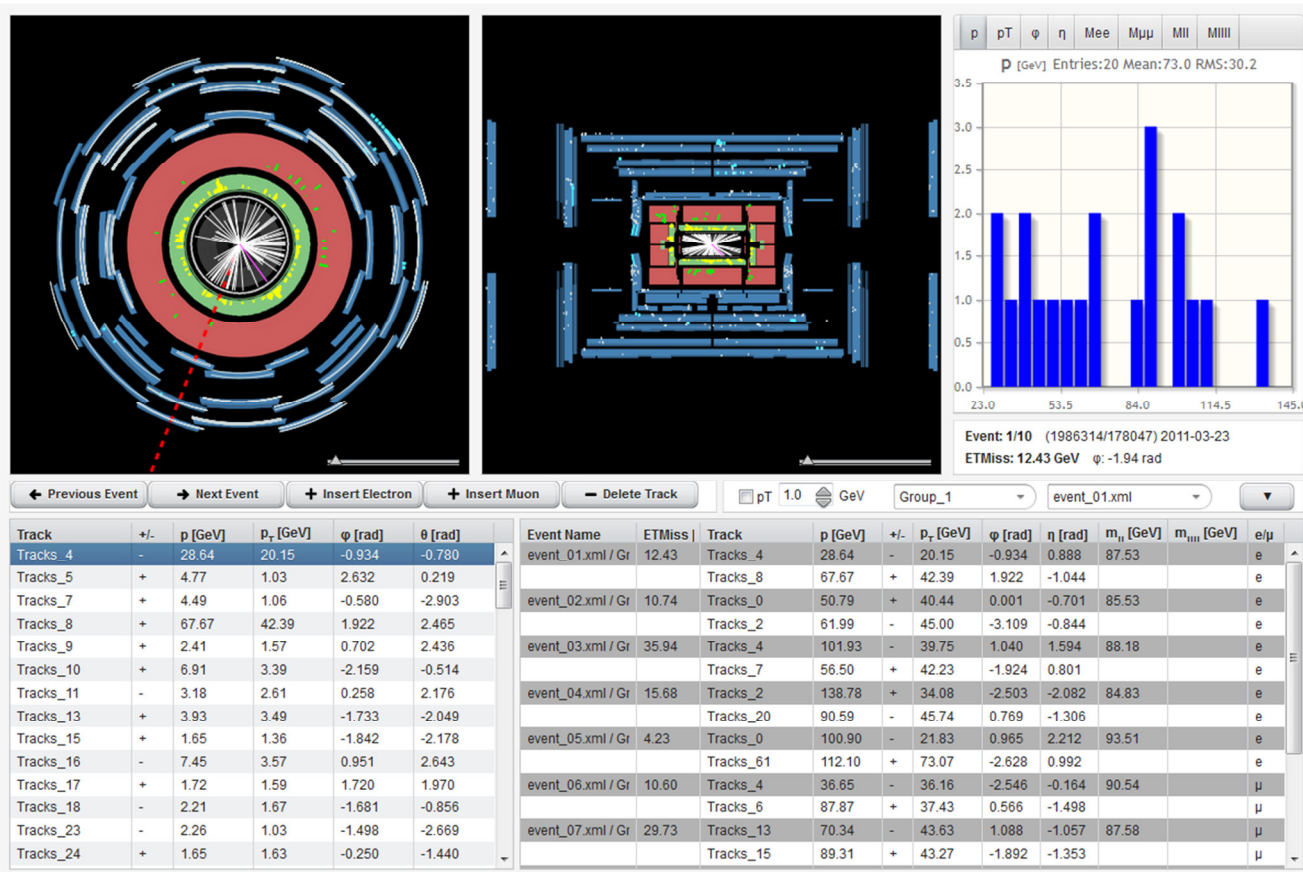
Για να ανοίξετε το webapp χρησιμοποιείτε οποιοδήποτε browser και πηγαίνετε στην διεύθυνση :

<http://hypatia.iasa.gr/>

Εκεί διαλέγετε τη γλώσσα που θέλετε να χρησιμοποιήσετε καθώς και μια από τις 4 διαφορετικές εκδόσεις του webapp ανάλογα με την άσκηση που θα κάνετε. Στην περίπτωση μας επιλέξτε το webapp 4.

Όταν το webapp φορτώνεται για πρώτη φορά, εμφανίζει το πρώτο από τα διαθέσιμα γεγονότα. Οι τροχιές που ανήκουν σε αυτό το γεγονός παρατίθενται στον πίνακα στο μέσο της οθόνης (Πίνακας Τροχιών). Οι δύο όψεις του ανιχνευτή δείχνουν την μπροστινή και πλαϊνή πλευρά του ανιχνευτή ATLAS. Δίπλα τους είναι τα ιστογράμματα των τροχιών που έχει επιλέξει ο χρήστης (άδεια προς το παρόν). Το κάτω μέρος του webapp (Πίνακας αναλλοίωτων μαζών) παραθέτει τις τροχιές που έχει επιλέξει ο χρήστης με τις αντίστοιχες αναλλοίωτες μάζες τους (άδειος προς το παρόν).

Μπορείτε αλληλεπιδράσετε με το webapp χρησιμοποιώντας τα κουμπιά και τα χειριστήρια που είναι διαθέσιμα. Μπορείτε επίσης να κάνετε κλικ πάνω στους πίνακες για να διαλέξετε την τροχιά που θέλετε ή να κάνετε κλικ στις όψεις του ανιχνευτή για να επιλέξετε μια τροχιά.



## Επιλογή γεγονότος

Αρχικά πρέπει να επιλέγετε την ομάδα γεγονότων που θέλετε από το πρώτο drop down box (group 1, group 2 κλπ). Στη συνέχεια εμφανίζονται αυτόματα τα γεγονότα που ανήκουν σε αυτή την ομάδα στο δεύτερο drop down box και φορτώνεται αυτόματα το πρώτο γεγονός. Μπορείτε να επιλέξετε το γεγονός που θέλετε να δείτε, είτε με τη χρήση των κουμπιών "Previous/Next" ή επιλέγοντάς την από το drop down box. Ο αριθμός του επιλεγμένου γεγονότος, μαζί με τον συνολικό αριθμό των διαθέσιμων γεγονότων εμφανίζεται στα αριστερά της λίστας. Δίπλα σε αυτό εμφανίζεται, η ελλείπουσα ενέργεια (ETMiss) του γεγονότος.

## Επιλογή τροχιάς

Όταν κάνετε κλικ πάνω σε μια τροχιά (άσπρη γραμμή) σε οποιαδήποτε από τις δύο όψεις του ανιχνευτή, η τροχιά αυτόματα επιλέγεται και στις δύο όψεις με μοβ χρώμα. Η αντίστοιχη γραμμή του πίνακα τροχιών επιλέγεται επίσης.

Η επιλογή μπορεί να γίνει και αντίστροφα. Επιλέγοντας μια γραμμή στον πίνακα τροχιών επιλέγεται αυτόματα η αντίστοιχη τροχιά στις δυο όψεις του ανιχνευτή.

Αν η τροχιά έχει εισαχθεί στον πίνακα αναλλοίωτων μαζών τότε επιλέγεται και εκεί αυτόματα.

### ***Εισαγωγή τροχιάς***

Αφού προσπαθείτε να "ανακαλύψετε" το σωματίδιο Z μέσα από τις διασπάσεις του σε ζεύγη μιονίων/αντιμυονίων ή ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων, πρέπει να εισάγετε την επιλεγμένη τροχιά στον πίνακα Αναλλοίωτων μαζών είτε ως ηλεκτρόνιο/ποζιτρόνιο κάνοντας κλικ στο κουμπί "Ηλεκτρόνιο" ή ως μιονίο/αντιμυόνιο κάνοντας κλικ στο κουμπί "Μιονίο". Φυσικά για να γίνει αυτό, οι τροχιές ηλεκτρονίων και το μιονίων πρέπει πρώτα να αναγνωριστούν στο προηγούμενο βήμα.

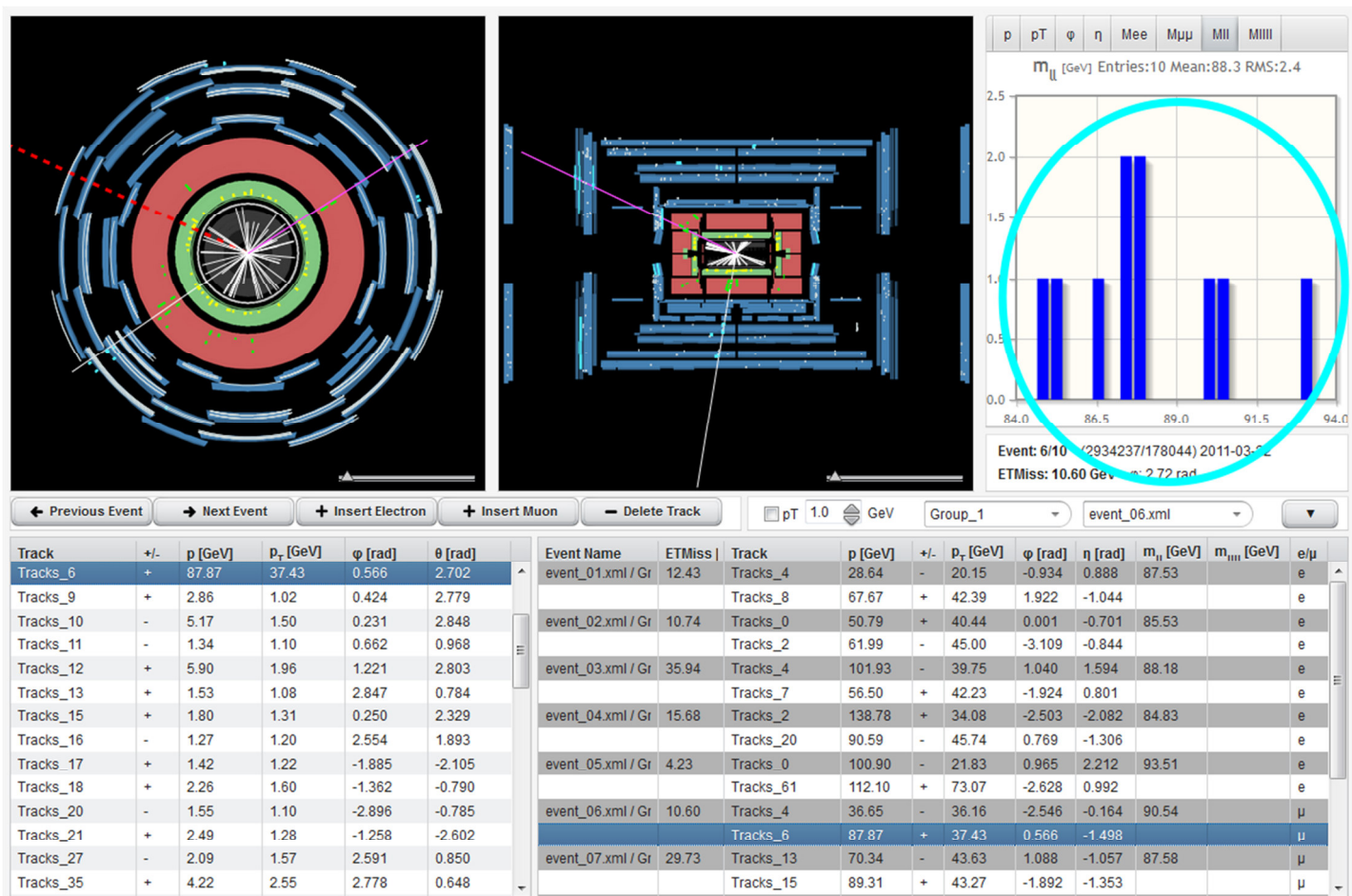
Κάνοντας κλικ στο κατάλληλο κουμπί, η επιλεγμένη τροχιά αντιγράφεται στον πίνακα Αναλλοίωτων μαζών και όταν δύο συμβατές τροχιές (είτε δύο τροχιές ηλεκτρονίων ή δύο τροχιές μιονίων) από το ίδιο γεγονός εισαχθούν στον πίνακα, η αναλλοίωτη μάζα τους υπολογίζεται αυτόματα.

Ένας άλλος έγκυρος συνδυασμός, ειδικά για την ανακάλυψη του Higgs, είναι δύο τροχιές ηλεκτρονίων και δύο τροχιές μιονίων ή τεσσάρων ηλεκτρονίων ή τεσσάρων μιονίων. Μόνο τέσσερις τροχιές από κάθε γεγονός μπορούν να εισαχθούν στον πίνακα και κάθε τροχιά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μία φορά. Ο χρήστης μπορεί να αφαιρέσει μια τροχιά, επιλέγοντάς την και κάνοντας κλικ στο κουμπί "Delete track".

Τα ιστογράμματα με τις τροχιές που έχουν εισαχθεί στον πίνακα Αναλλοίωτης μάζας ενημερώνονται αυτόματα. Όταν κάνετε κλικ σε μια τροχιά στον πίνακα Αναλλοίωτης μάζας το αντίστοιχο γεγονός φορτώνεται αυτόματα και η τροχιά επιλέγεται τόσο για στον πίνακα τροχιών όσο και στις όψεις του ανιχνευτή.

### ***Ιστογράμματα***

Τα ιστογράμματα που αντιστοιχούν στις τροχιές του πίνακα αναλλοίωτης μάζας υπολογίζονται αυτόματα, όταν εισάγετε ή αφαιρείτε μια τροχιά.



Τα πρώτα τρία ιστογράμματα αντιπροσωπεύουν την Ενέργεια, Εγκάρσια Ενέργεια και την κατανομή τροχιών ως προς τη γωνία  $\theta$ . Οι επόμενες δύο δείχνουν μόνο τις αναλλοίωτες μάζες των ηλεκτρονίων ή μιονίων αντίστοιχα. Το επόμενο εμφανίζει όλες τις αναλλοίωτες μάζες που αντιστοιχούν σε ζεύγη τροχιών ανεξάρτητα από τον τύπο τους και το τελευταίο δείχνει το ιστόγραμμα αναλλοίωτης μάζας τεσσάρων τροχιών (είτε τέσσερα ηλεκτρόνια, τέσσερα μύονια ή δύο ηλεκτρόνια και δύο μύονια).

## Cuts

Τα Cuts είναι όρια που μπορείτε να βάλετε στις τροχιές που απεικονίζονται.

Μπορείτε να επιλέξετε το όριο της ενέργειας των τροχιών που εμφανίζονται. Επιλέγοντας το checkbox και εισάγοντας μια τιμή στο αντίστοιχο πεδίο μπορείτε να αφαιρέσετε όλες τις τροχιές των οποίων η ενέργεια είναι κάτω από το όριο. Σημειώστε ότι μετά την εισαγωγή του ορίου, πρέπει να πατήσετε enter. Αυτό μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο στα γεγονότα με μεγάλο αριθμό τροχιών, όπου συνήθως οι τροχιές χαμηλής ενέργειας δεν παρουσιάζουν κανένα ενδιαφέρον.



## **Μεγέθυνση**

Μπορείτε να αλλάξετε το επίπεδο μεγέθυνσης για να έχετε μια καλύτερη εικόνα των τροχιών. Αυτό μπορεί να γίνει σύροντας το ρυθμιστικό μεγέθυνσης. Κάθε όψη του ανιχνευτή μπορεί να μεγεθυνθεί σε διαφορετικό επίπεδο. Η μεγέθυνση μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη σε γεγονότα με μεγάλο αριθμό τροχιών που επικαλύπτονται.