

Υπολογιστική Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Υπολογιστικής Φυσικής
Εαρινό Εξάμηνο 2022-23

Δήμος Σαμψωνίδης

Ποιος είναι ο στόχος του μαθήματος ?

- Πως από μετρήσεις στα πειράματα στοιχειωδών σωματιδίων(ΣΣ) εξάγουμε πληροφορίες για την ΦΥΣΙΚΗ
- Τεχνικές ανάλυσης δεδομένων από πειράματα ΣΣ
- Τι μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε ?

Ας δούμε την περίπτωση του Καθιερωμένου Προτύπου...

Το Καθιερωμένο Πρότυπο Standard Model

Η ύλη : Quarks & Leptons

Οι Αλληλεπιδράσεις : Σύζευξη
δυνάμεων και ύλης
(gauge symmetry)

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Αλληλεπιδράσεις

Διαδότες

Ηλεκτρομαγνητικές
Ασθενείς
Ισχυρές
βαρυτικές

γ
 W^\pm, Z
Gluon(g)
Graviton(G)
Higgs

Φερμιόνια : spin 1/2

Μποζόνια : spin 0, 1 (2)

Βαρυόνια : πρωτόνιο:uud,
νετρόνιο:ddu

Υπολείπεται : Graviton

Τι ΔΕΝ γνωρίζουμε στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων?

- Τα πειράματα έχουν επαληθεύσει το Καθιερωμένο Πρότυπο με εντυπωσιακή ακρίβεια!
- \Rightarrow ... έχουμε βρεί την θεωρία !
- ΔΕΝ έχουμε λόγο να ψαχνουμε....
- ... αυτό είναι όλο???

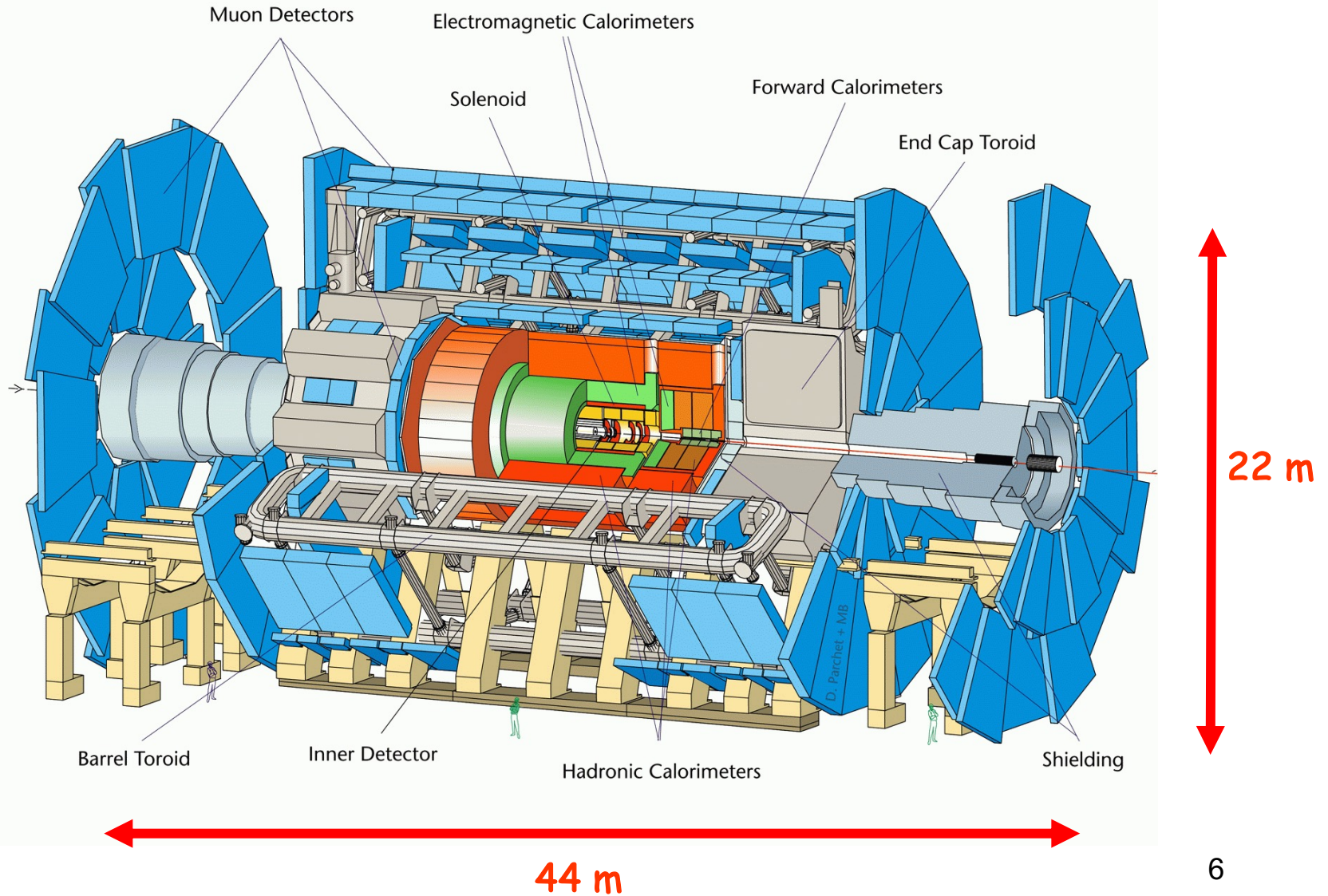
Αναπάντητα ερωτήματα στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

- Γιατι η φύση έχει φτιαξει πανομοιότυπες 'γενιές' σωματιδίων ?
- Ποιος μηχανισμός δίνει μάζες στα quark και τα λεπτόνια? ΟΚ
- Γιατι οι μάζες τους διαφέρουν τοσο παρα πολυ?
- Υπαρχει ενοποίηση ΟΛΩΝ των δυναμεων (GUT)?
- Μπορεί η βαρύτητα να ενοποιηθει με QM σε ένα SM
- Γιατί υπάρχει ασυμμετρία μεταξύ ύλης και αντιύλης?
...και άλλα.....
- Χρειάζεται μια συνεχής 'ανταλλαγή' ανάμεσα στη θεωρία και το πείραμα !

ATLAS

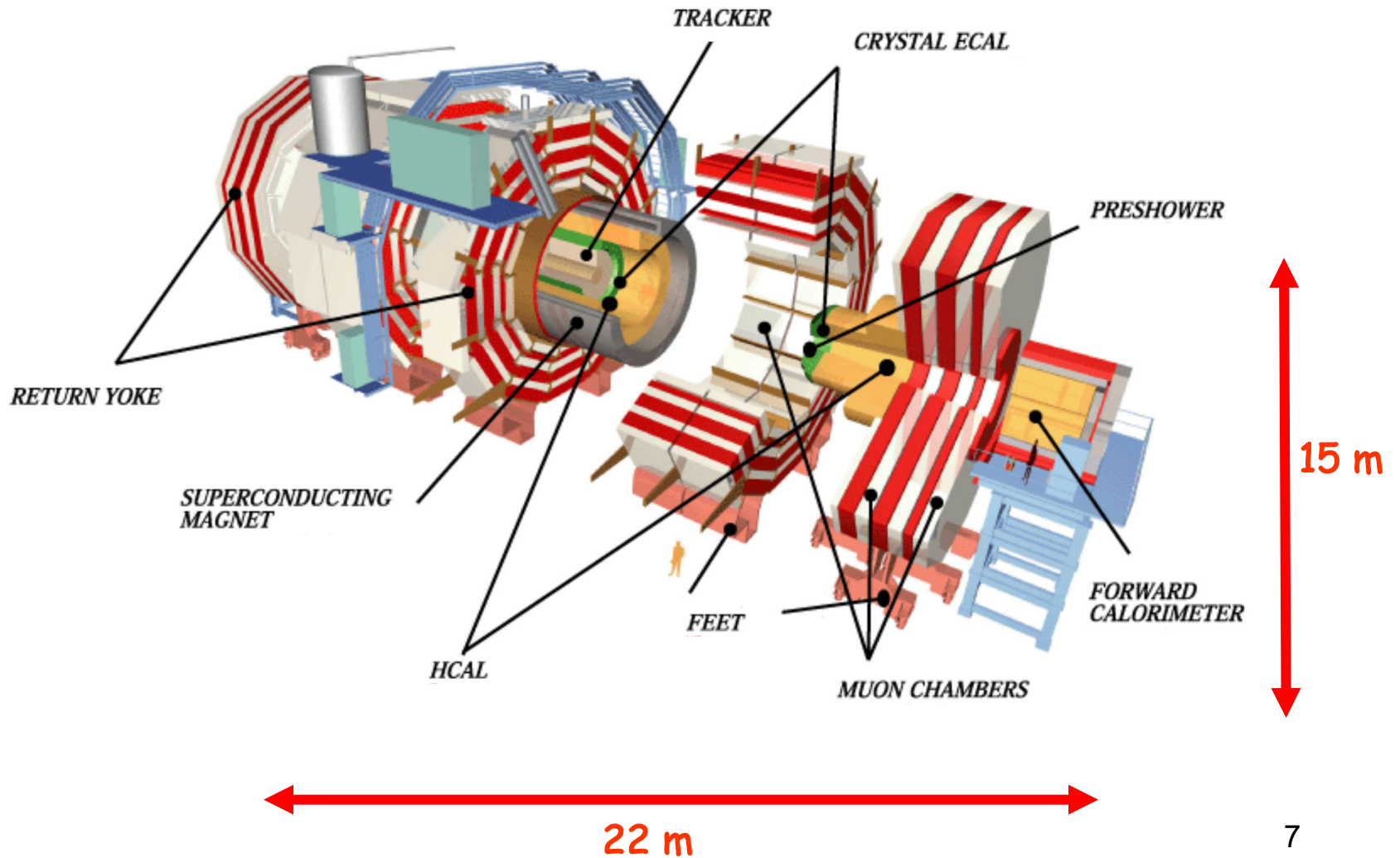
A Toroidal LHC Apparatus

D712mb-26/06/97

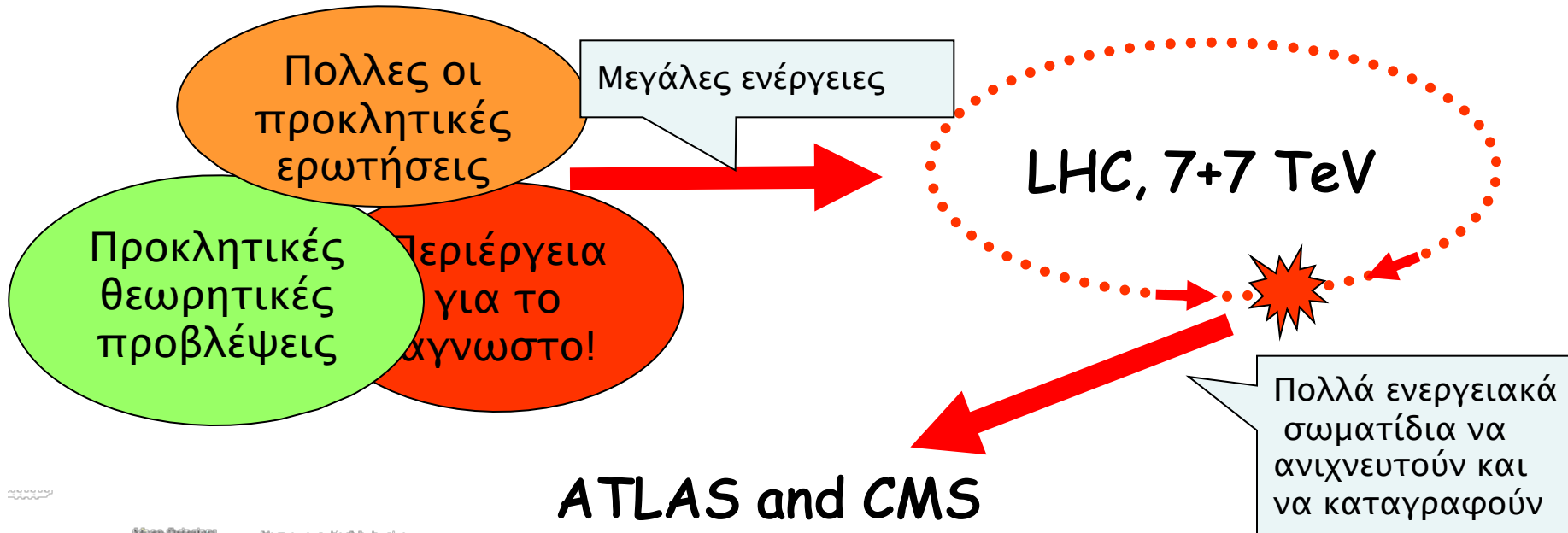


CMS

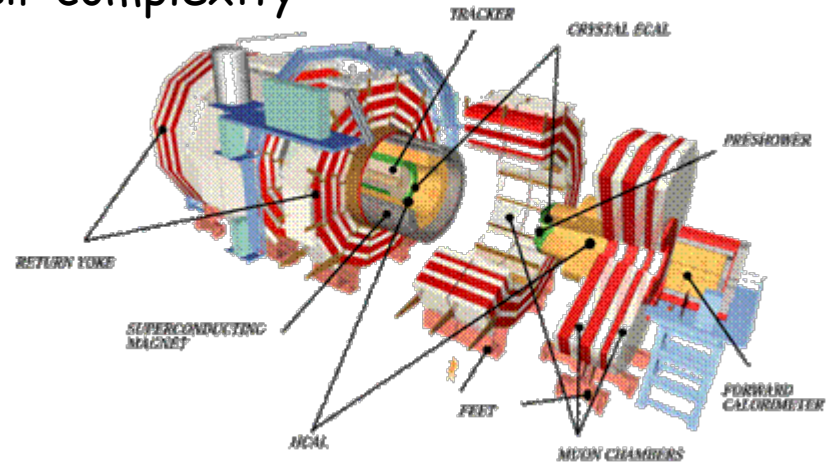
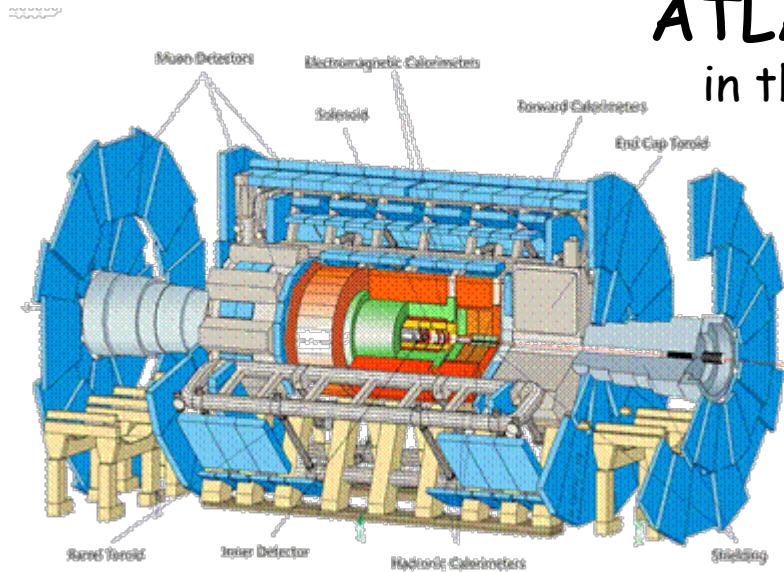
Compact Muon Spectrometer



Γιατί μεγάλες ενέργειες και μεγάλοι ανιχνευτές???



ATLAS and CMS in their complexity





CMS Collaboration



36 Nations, 160 Institutions, 2008 Scientists and Engineers (November 2003)

TRIGGER & DATA ACQUISITION

Barrel: Austria, CERN, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

TRACKER

Barrel: Austria, Belgium, CERN, Finland, France, New Zealand, Germany, Italy, Japan*, Switzerland, UK, USA

CRYSTAL ECAL

Barrel: Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Ireland, Italy, Japan*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER

Barrel: Armenia, Belarus, CERN, Greece, India, Russia, Tajik, Uzbekistan

RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia
Endcap: Japan*, USA, Brazil

SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular: Finland, France, Italy, Japan*, Korea, Switzerland, USA

FEET
Pakistan
China

FORWARD CALORIMETER

Barrel: Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain*, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine
HC: India

MUON CHAMBERS

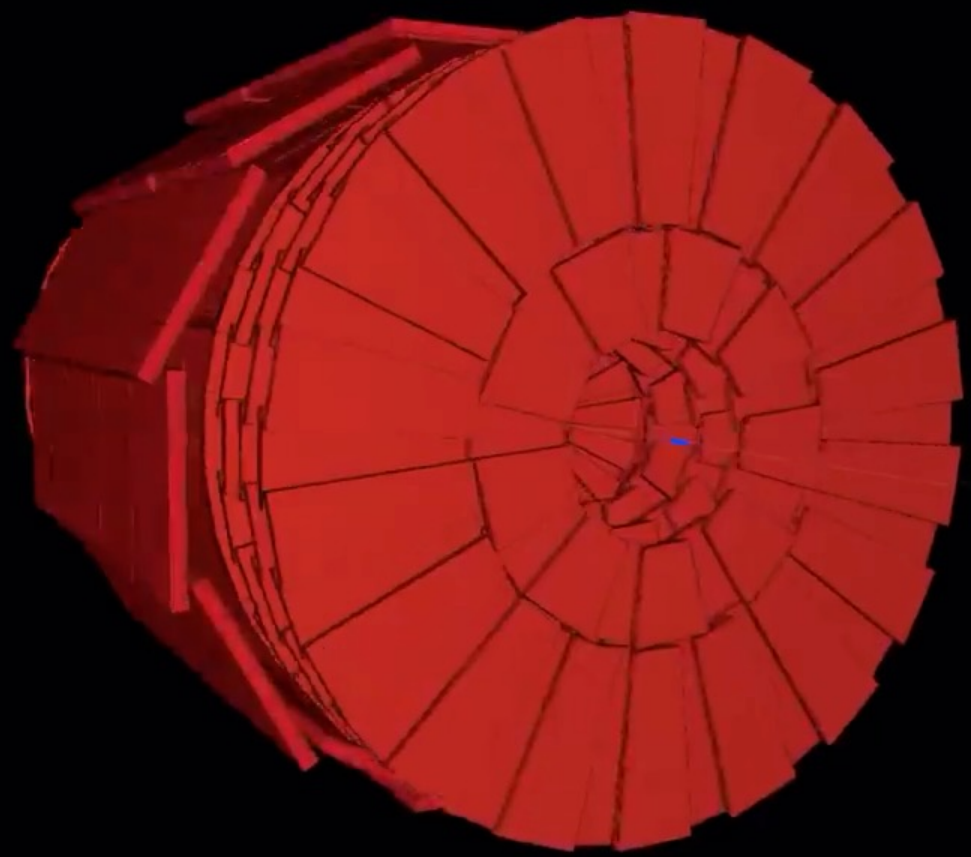
Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China, Germany, Hungary, Italy, Spain, Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

Total weight : 12500 T
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 21.5 m
Magnetic field : 4 Tesla

* Only through industrial contracts

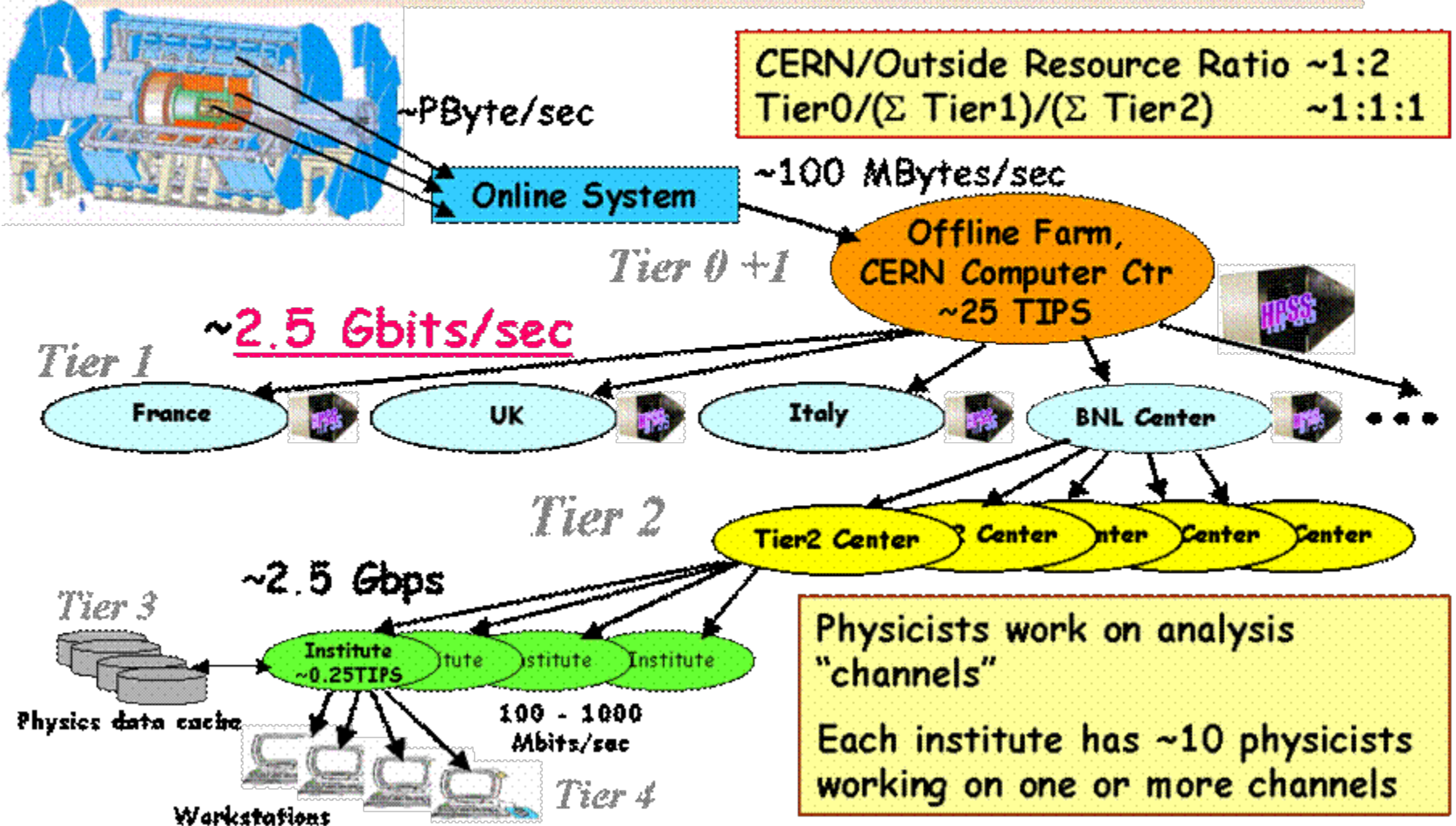


CMS Experiment at the LHC, CERN
Sun 2011-Aug-07 05:00:32 CET
Run 172822 Event 2554393033
C.O.M. Energy 7.00TeV
H \rightarrow ZZ \rightarrow 4mu candidate





Hierarchical Computing Model



How these collaborations work? Where they get money?

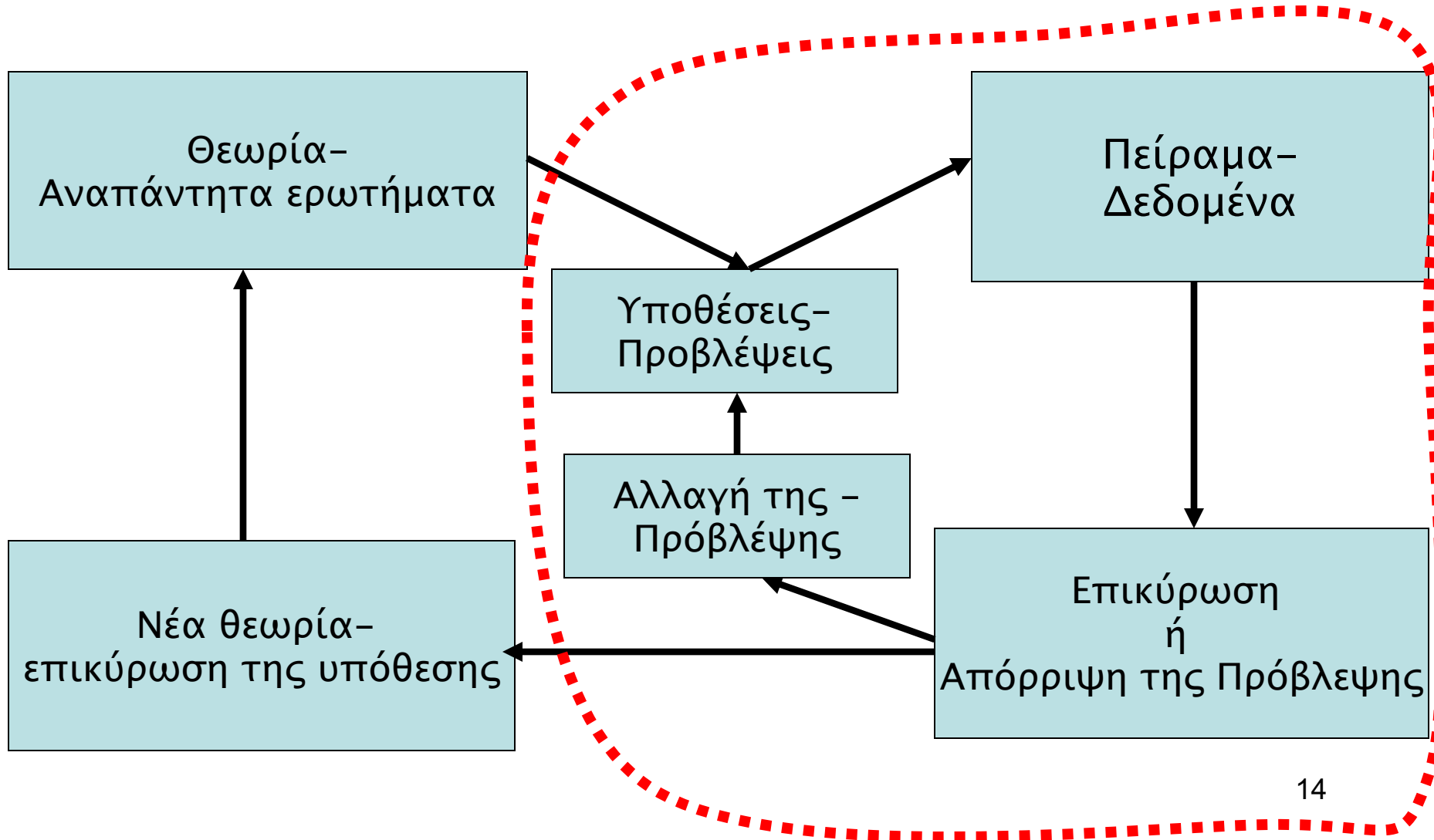
The ATLAS Collaboration includes about 1850 physicists and engineers from 175 institutes in 34 countries. CMS has a similar list of participants often from the same countries, but not completely overlapping.



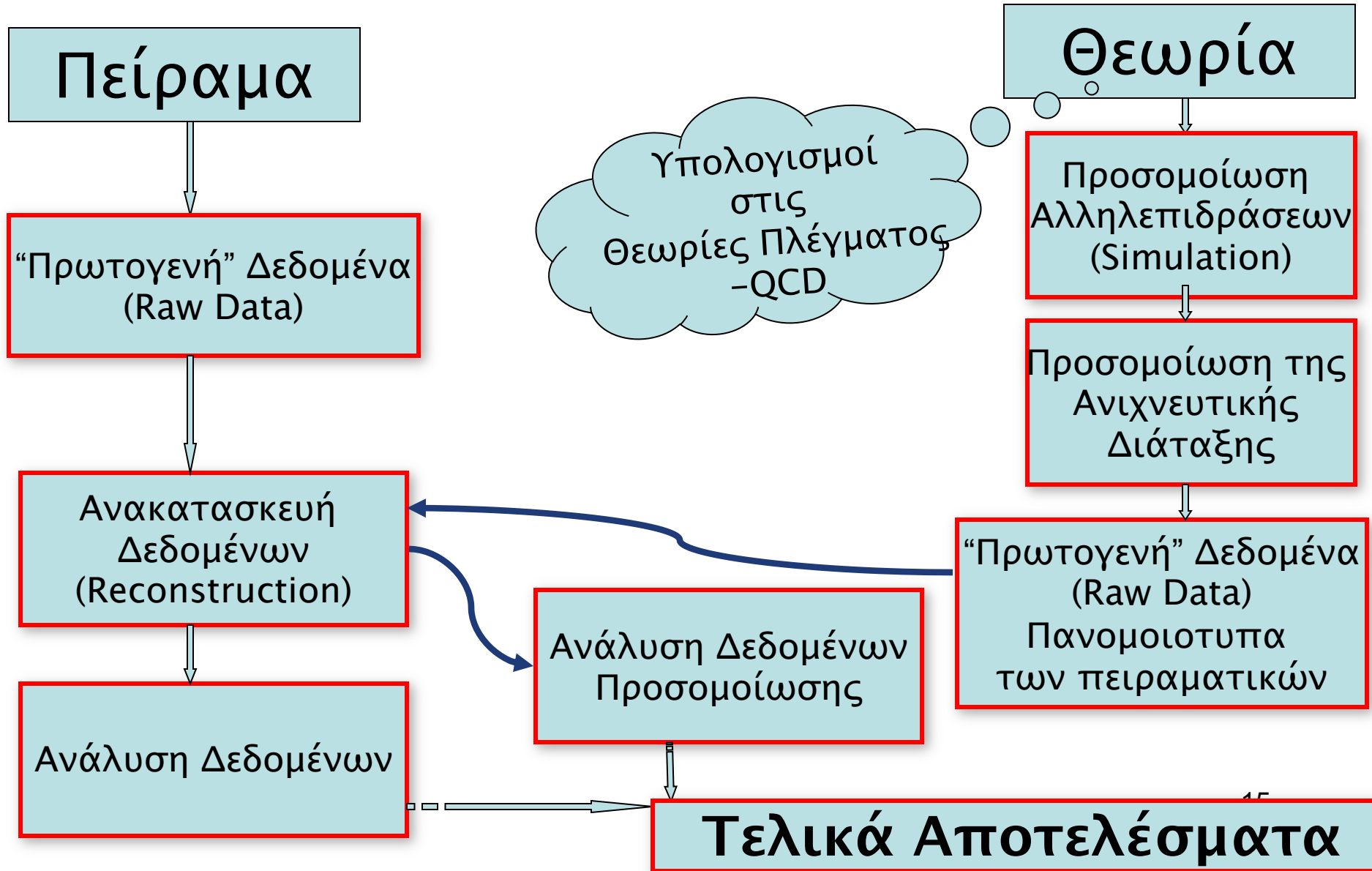
Each institute has specific responsibilities as formalized in a Memorandum of Understanding.

Financial support comes from the funding agencies of individual participating states.

Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

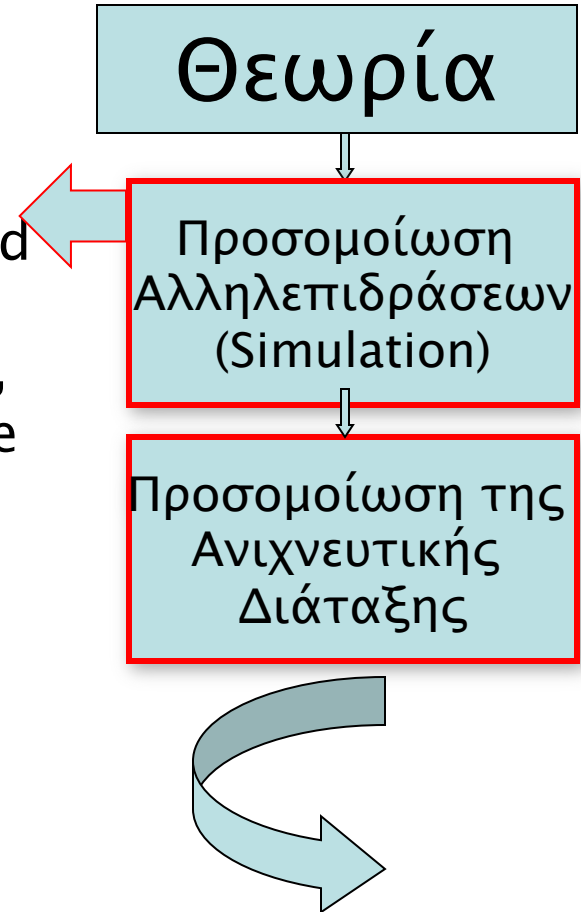


Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Επιλογή της διαδικασίας (physical process)
 - Feynmann Diagrams
 - Matrix Elements
 - 'home made' MC if a 'new' process (attached to the general frame i.e. PYTHIA)
 - Επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης δομής, αν συγκρούονται αδρόνια (i.e. proton structure function if pp colliders)
 - Επιλογή κατάλληλου προτύπου για την αδρονοποίηση των quark, gluon (fragmentation model)
 - Παραγωγή γεγονότος
- Existing Frames : PYTHIA, VECBOS, ISAJET..... Η PYTHIA είναι το πλήρες και συνήθως χρησιμοποιούμενο MC στο οποίο μπορεί να προσαρμοστεί MC για non-standard model process π.χ. SUSY επειδή περιέχει Structure & Fragmentation functions



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Από τον Γενήτορα της αλληλεπίδρασης (π.χ. ΡΥΤΗΙΑ) προκύπτει για κάθε γεγονός το σύνολο των 'σταθερών', ανιχνεύσιμων σωματιδίων, ο τύπος τους (e, γ , μ , K, π , p) τα (E, $p \rightarrow$)_i

Προσομοίωση του Ανιχνευτή

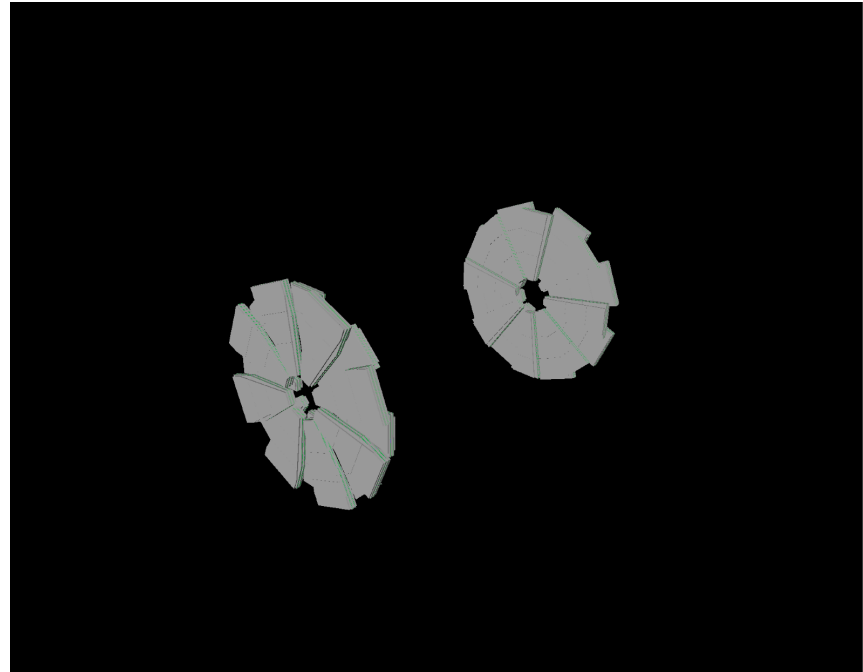
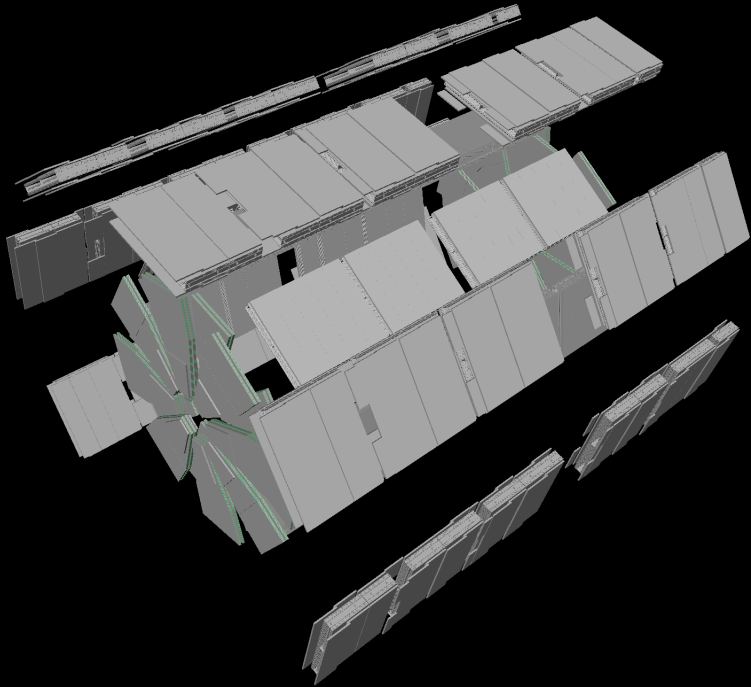
- Αλληλεπίδραση με την ύλη (απώλεια ενέργειας dE/dx , ηλεκτρομαγνητικές και πυρηνικές αλληλεπιδράσεις, πολλαπλή σκέδαση MS)
- Ιδιότητες της ανιχνευτικής διάταξης: ηλεκτρικό και/ή μαγνητικό πεδίο, παραγωγή, διάδοση, ανάκλαση του φωτός κλπ)
- Γεωμετρία του ανιχνευτή
- Μετασχηματισμός του σήματος (ηλεκτρονικά)
- Ψηφιοποίηση του σήματος

Θεωρία

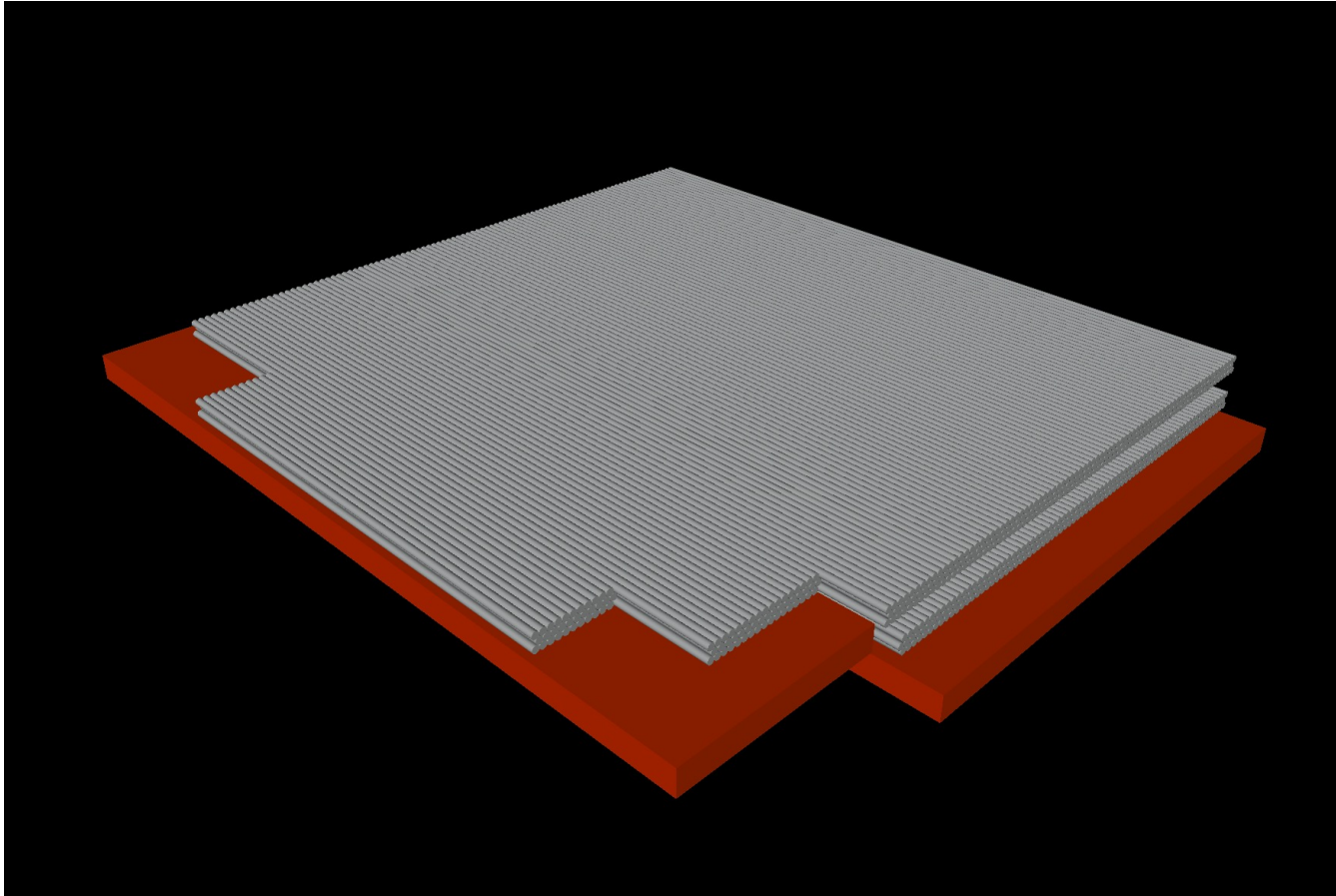
Προσομοίωση
Αλληλεπιδράσεων
(Simulation)

Προσομοίωση της
Ανιχνευτικής
Διάταξης

ATLAS Muon



MDTs in ATLAS



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

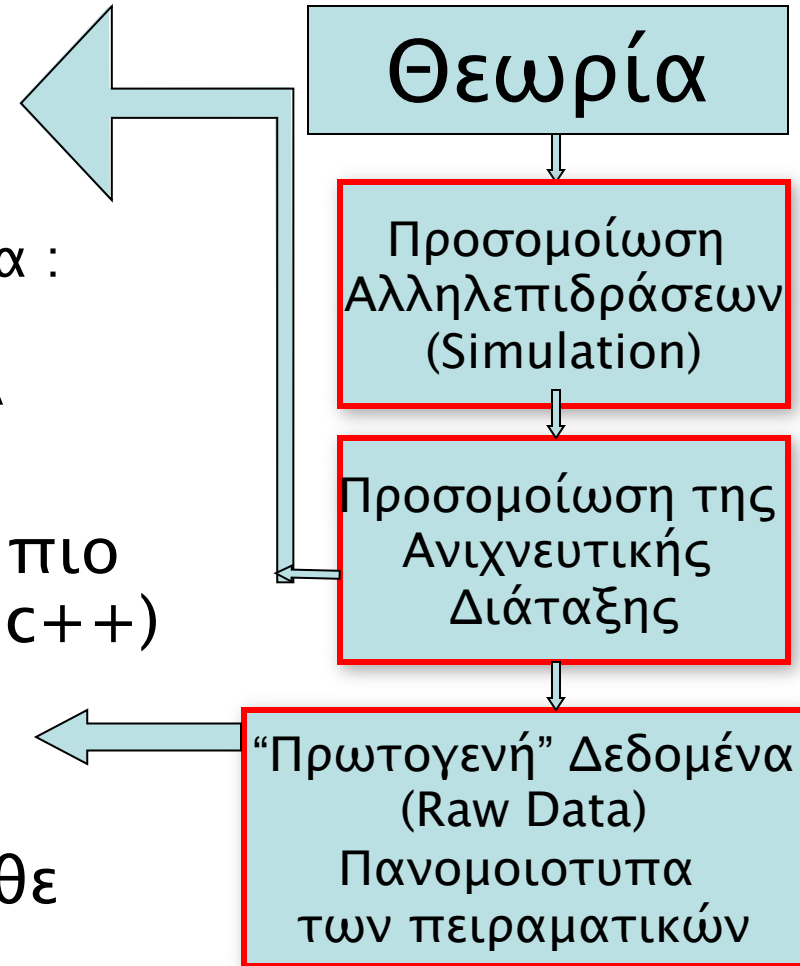
- Ιστορικά:

- ‘home-made’ προγράμματα προσομοίωσης

- Εξελίσσονται σε λογισμικά πακέτα : Garfield (drift chambers), EGS (e-γ: σπινθιριστές, καλορίμετρα), FLUKA (νετρόνια),...- χρήση 1970-σήμερα

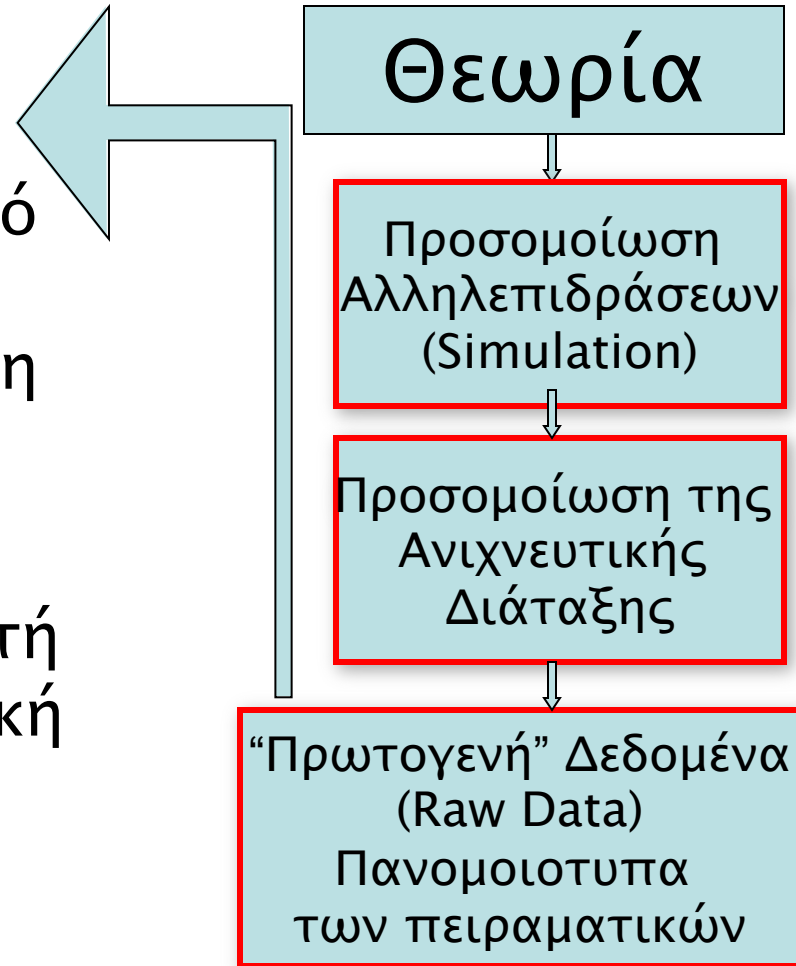
- Σήμερα περιλαμβάνονται στην πιο εξελιγμένη μορφή του Geant (σε c++) BIG Machine-Big Overhead!

- Παράλληλα χρησιμοποιούνται ‘home-made’ fast simulations-κάθε πείραμα δικό του πακέτο, π.χ. ATLFAST. Καταλήγουν σε Raw Data

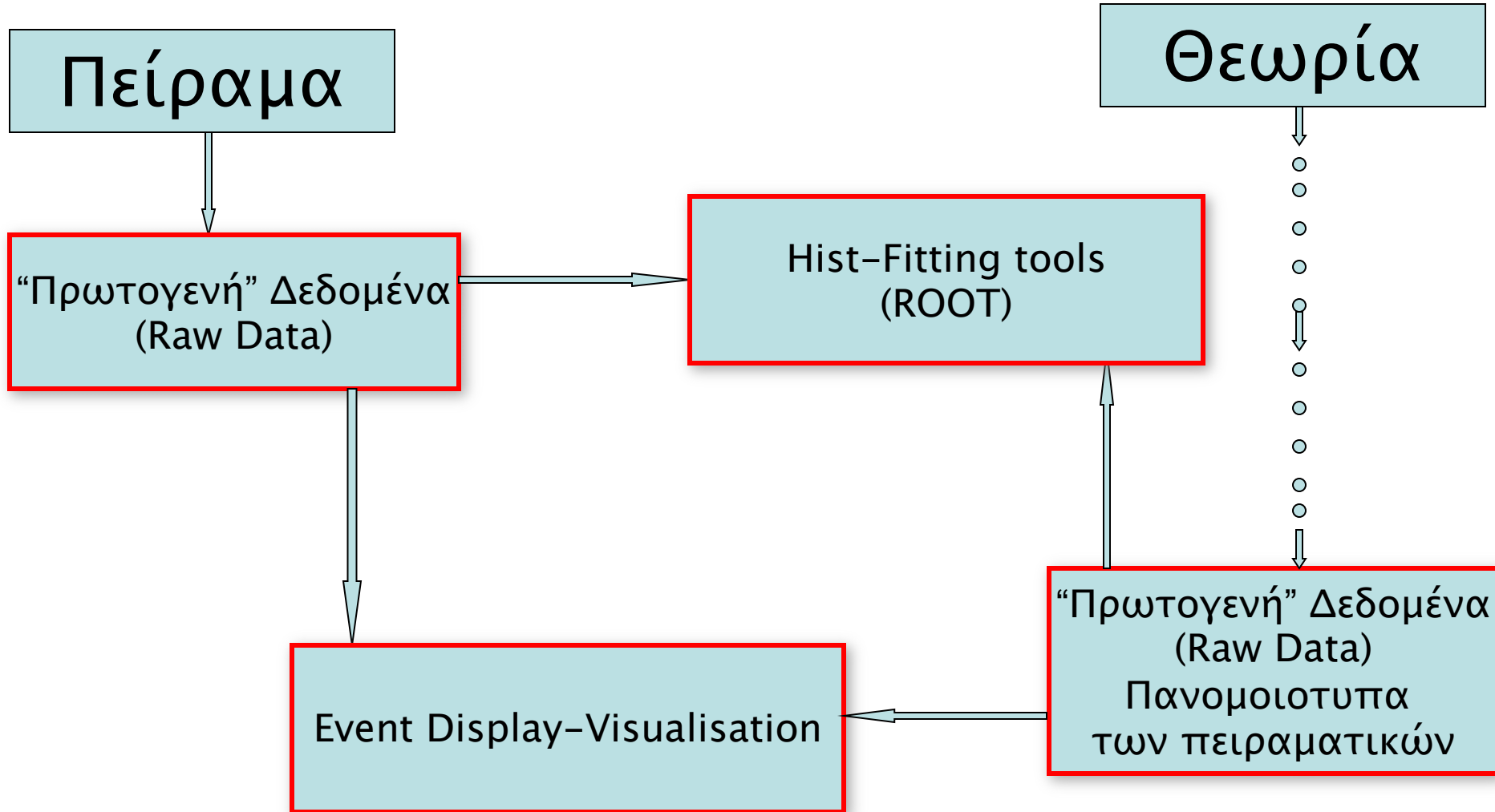


Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

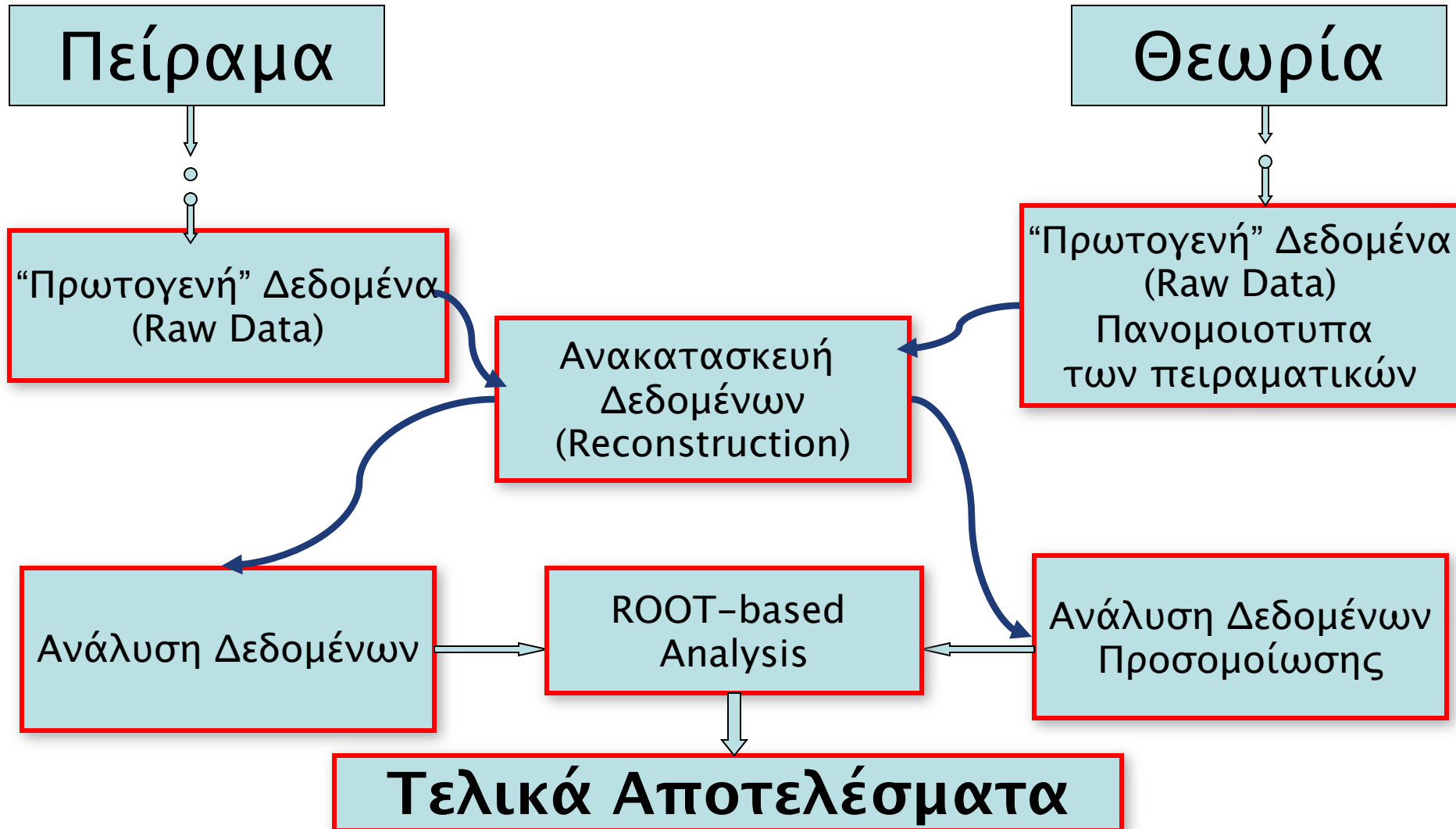
- Χρήση Histogramming-fitting tools [ROOT+Minuit= λογισμικό πακέτο για προσαρμογή κατανομής] (Παλαιότερα χρήση HBOOK, PAW+Minuit).
- Μελέτη των γενικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή occupancy, απόδοση, διακριτική ικανότητα
- Σύγκριση με ‘πρωτογενή’ δεδομένα από το πείραμα.



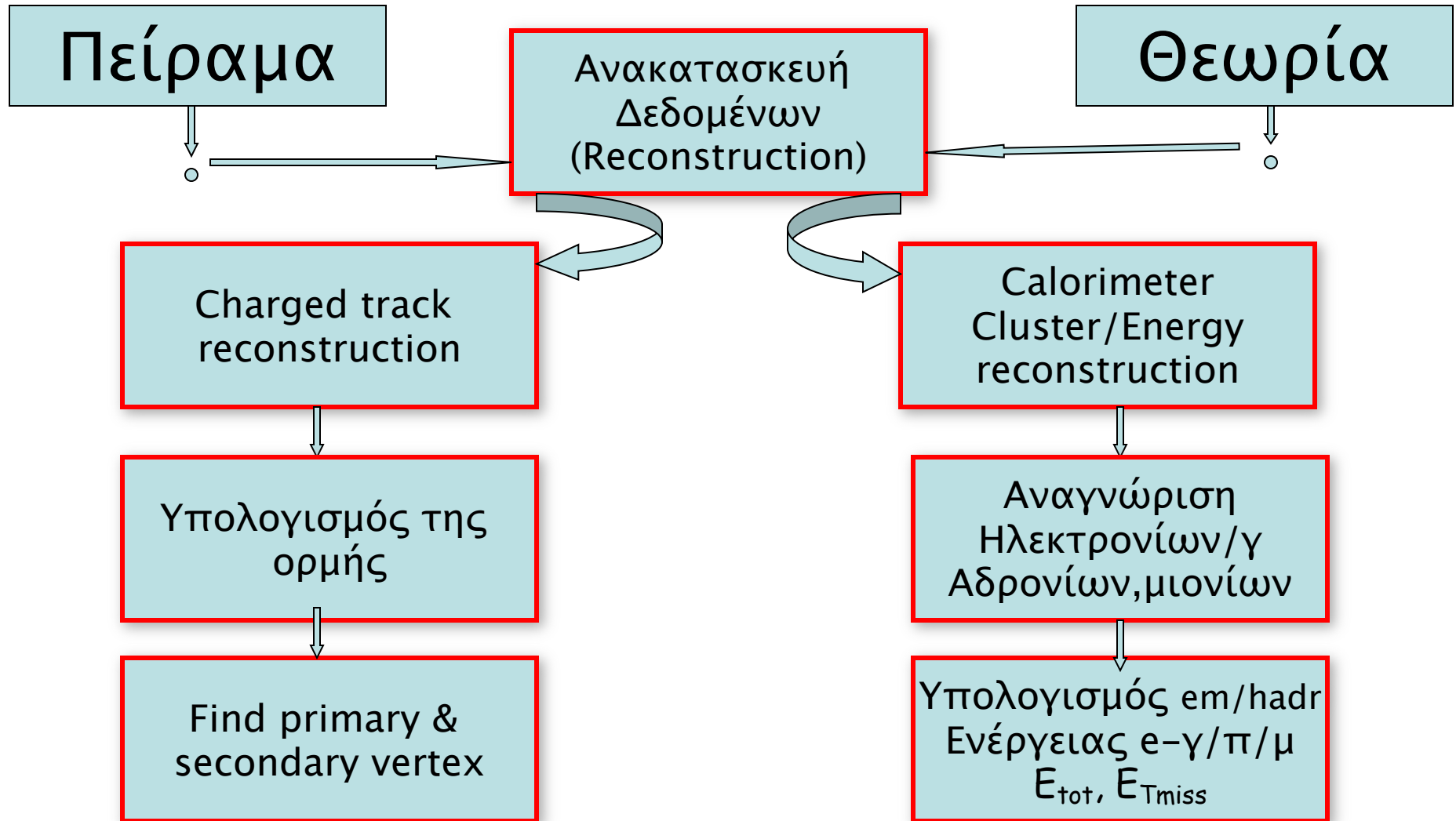
Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

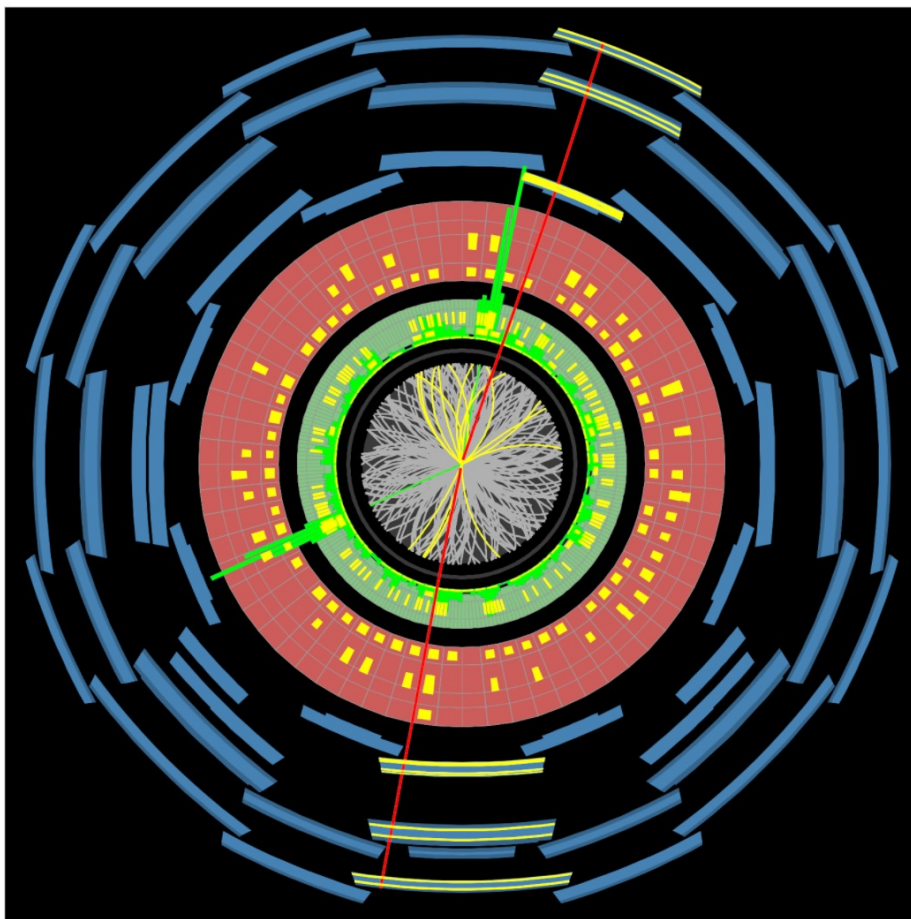


Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

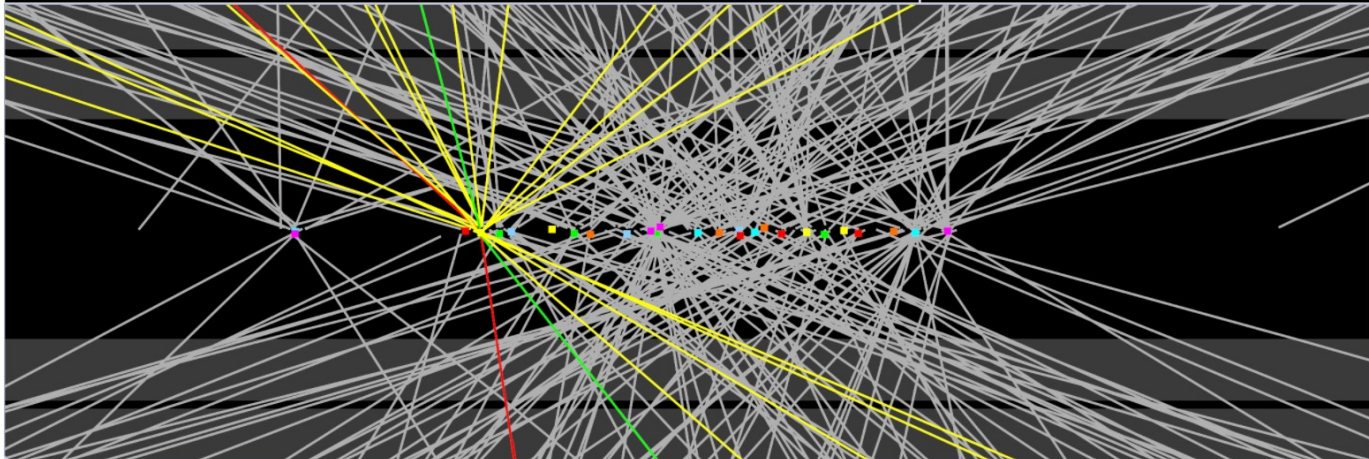
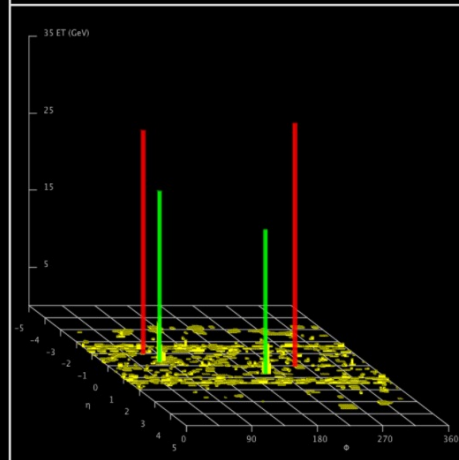




 **ATLAS**
EXPERIMENT

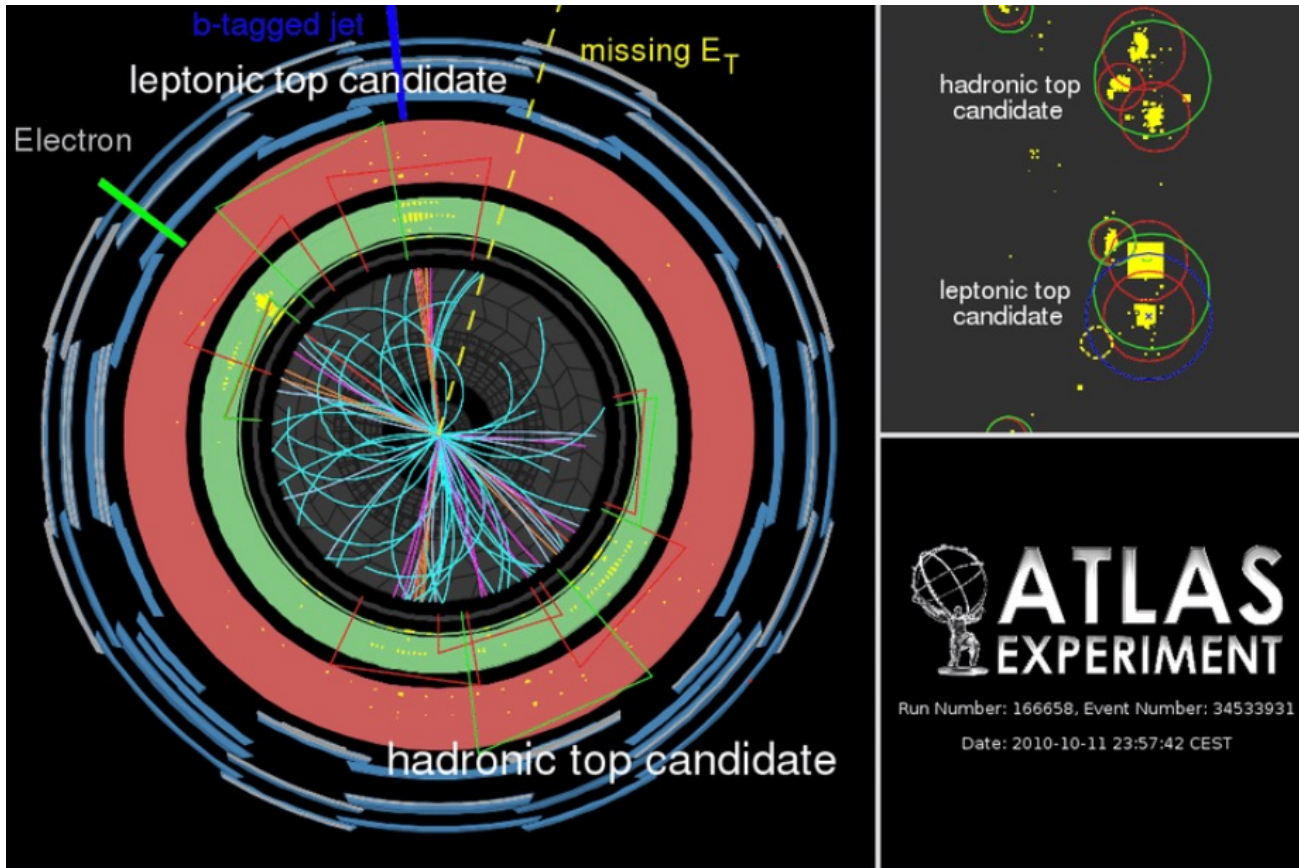
Run Number: 304431, Event Number: 2206548301

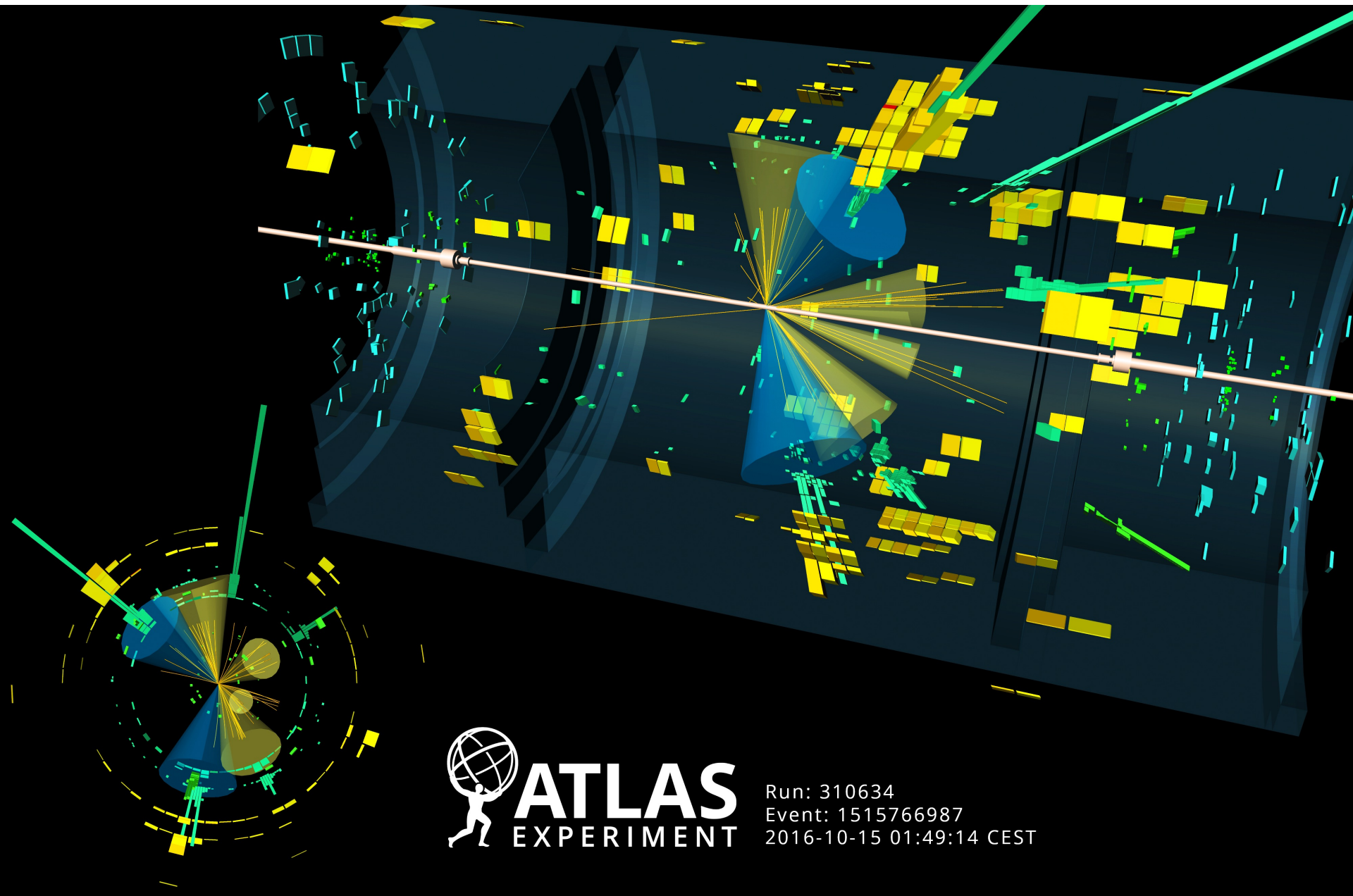
Date: 2016-07-25 05:01:07 UTC



An example of an Atlantis Event Display showing a di-muon event with several additional pile-up vertices.

Event Display

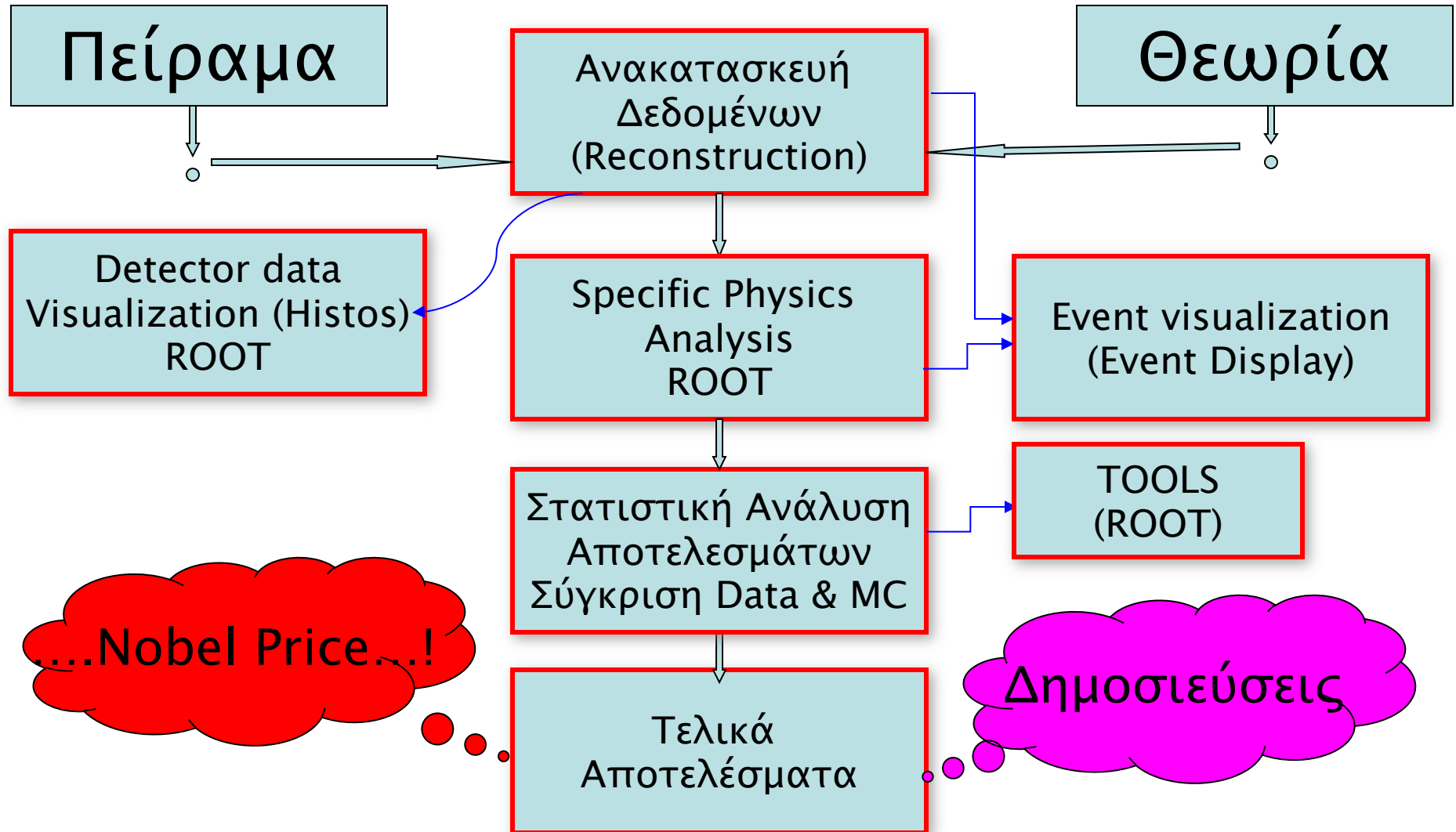




 **ATLAS**
EXPERIMENT

Run: 310634
Event: 1515766987
2016-10-15 01:49:14 CEST

Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)



Τι θα μάθουμε ?

- Βασικές τεχνικές στην ανάλυση δεδομένων - Στατιστική
- Βασικές τεχνικές στην προσομοίωση δεδομένων : -Μέθοδοι Monte Carlo
- Σύγκριση του πειράματος με την θεωρία - Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Γιατι χρειάζεται Υπολογιστική Φυσική στα Στοιχειώδη Σωματλια ?

- Υπολογισμός απο τις κατανομές δεδομένων παραμέτρων όπως
 - ⇒ πόλωση (polarization), σταθερές σύζευξης : από κατανομές $d\sigma/d\Omega$
 - ⇒ χρόνος ημιζωής σωματιδίου : από κατανομές dN/dt
 - Estimators:** Least Square, Maximum Likelihood
 - ⇒ Μάζες σωματιδίων :
 - Fitting :** Κατανομές Breit–Wigner (Cauchy)

Γιατι χρειάζεται Υπολογιστική Φυσική στα Στοιχειώδη Σωματία ?

- Υπολογισμός της σπουδαιότητας του σήματος και της πιστότητας της μέτρησης :
 - ⇒ **Signal/Background**
 - ⇒ **Confidence limits**
 - ⇒ **Συστηματικά σφάλματα (systematic errors, checks), μέτρησης**

Γιατι χρειάζεται Υπολογιστική Φυσική στα Στοιχειώδη Σωματίια ?

- Σύγκριση θεωρίας και πειράματος :
 - ⇒ **Γενήτορες** κατανομών/μεμονωμένων γεγονότων **κατά τα θεωρητικά πρότυπα**
 - ⇒ **Προσομοίωση της ανιχνευτικής διάταξης** :
Αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη-
Συμπεριφορά της ανιχνευτικής διάταξης
- Event Display

Πώς θα πετύχουμε το στόχο του μαθήματος?

- Απόκτηση **εμπειρίας** στην ανάλυση δεδομένων με την **αντιπαράθεση θεωρίας και πειράματος** ως εξής:
 - **Εισαγωγικά μαθήματα** στα διάφορα θέματα
 - Πρακτική εξοικείωση με παραδείγματα : **επίλυση προβλημάτων** με την βοήθεια των διδασκόντων
 - Επίλυση προβλημάτων απο τους φοιτητές
 - Οι φοιτητές αναλαμβάνουν εργασίες που αφορούν **ανάλυση πραγματικών δεδομένων**
 - Οι φοιτητές παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των εργασιών υπο μορφή **επιστημονικής παρουσίασης**
- Η γνώση και εμπειρία που θα αποκτηθεί έχει εφαρμογές σε πολλά πεδία πέρα από την Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Εισαγωγικές Διαλέξεις

- Αναδρομή στην Στατιστική
 - Κατανομές (διακριτές & συνεχείς: binomial, poisson, gauss, chi-square)
 - Estimators (Least square, Max.Likelihood)
 - Confidence limits
 - Errors : statistical, systematic
- Εισαγωγή στην ROOT
 - Η ROOT εργαλείο ανάλυσης δεδομένων (histogramming tool)
 - Η Root σαν περιβάλλον ανάλυσης δεδομένων
 - Επίλυση προβλημάτων με την ROOT
- Μέθοδοι Monte Carlo
 - Βασικές αρχές
 - Παραδείγματα-Υπολογισμοί
 - Γενήτορες

Εισαγωγικές Διαλέξεις (συνέχεια)

- Βασικές στρατηγικές στην ανάλυση
 - Επιλογή γεγονότων, απόδοση, Διακριτική ικανότητα, 'καθαρότητα' δεδομένων , γεγονότα υποβάθρου
- Αποτελέσματα Φυσικής
 - Ενεργές διατομές, μάζες, exclusion limits, υπολογισμός παραμέτρων φυσικής
 - Event Display
- Παρουσίαση επιστημονικών αποτελεσμάτων

Βιβλιογραφία

- Introduction to High Energy Physics (4th edition), Donald H. Perkins (Cambridge, 2000)
- Particles and Nuclei (4th edition), Ch. Povh et al (Springer, 2004)
- Introduction to Experimental Particle Physics, Richard Fernow (Cambridge)
- Numerical Recipes in C (2nd edition), William Press et al (Cambridge)
- Statistics for Particle Physics, Richard Barlow ()
- PYTHIA manual, CERN (www.
- ROOT manual, CERN (www.
- Review of Particle Physics, Physical Review D (PDG, 2004)

Βιβλιογραφία (συνέχεια)

Βοηθητικά

- Nuclear and Particle Physics, W.S.C.Williams, (Oxford)
- Quarks and Leptons, Halzen & Martin (Willey,1984)
- Concepts of Particle Physics, Gottfreid & Weisskopf (Oxford, 1984)
- The Experimental Foundations of Particle Physics, Cahn & Goldhaber (Cambridge, 1989)
- Pattern Classification, R.O. Duda et al (Willey)
- Introduction to Statistical Pattern Recognition, Fukunaga, (Academic Press)

Βιβλιογραφία (συνέχεια)

Βοηθητικά (συνέχεια)

- Probability and Statistics in Particle Physics, A.G.Frodesen et al., (Universitetsforlaget Bergen-Oslo-Tromso, 1979)
- Workshop on Confidence Limits, Ed. F.James, L.Lyons & Y.Perrin (Cern yellow report 2000-05, Jan 2000):
<http://user.web.cern.ch/user/Index/library.html>
- MINUIT: Function Minimization and Error Analysis Reference Manual, F. James,
<http://wwinfo.cern.ch/asdoc/minuit/minmain.html>
- Introduction to Linux <http://www.ibiblio.org/mdw/LDP/gs/gs.html>