

Υπολογιστική Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Εαρινό Εξάμηνο 2016–2017

Διδάσκοντες : Χαρά Πετρίδου
με την συμμετοχή του μεταδιδάκτορα
Δημήτρη Ηλιάδη

Ποιος είναι ο στόχος του μαθήματος ?

- Πως από μετρήσεις στα πειράματα στοιχειωδών σωματιδίων(ΣΣ) εξάγουμε πληροφορίες για την ΦΥΣΙΚΗ (τους νόμους της φύσης)
- 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)

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Φερμιόνια : spin 1/2

Αλληλεπιδράσεις

Διαδότες

Ηλεκτρομαγνητικές
Ασθενείς
Ισχυρές
βαρυτικές

γ
 $W^\pm, Z$
Gluon(g)
Graviton(G)

Μποζόνια : spin 0, 1 (2)
Higgs

Βαρυόνια : πρωτόνιο:uud,
νετρόνιο:ddu

Υπολείπονται : Graviton

Τι ΔΕΝ γνωρίζουμε στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων?

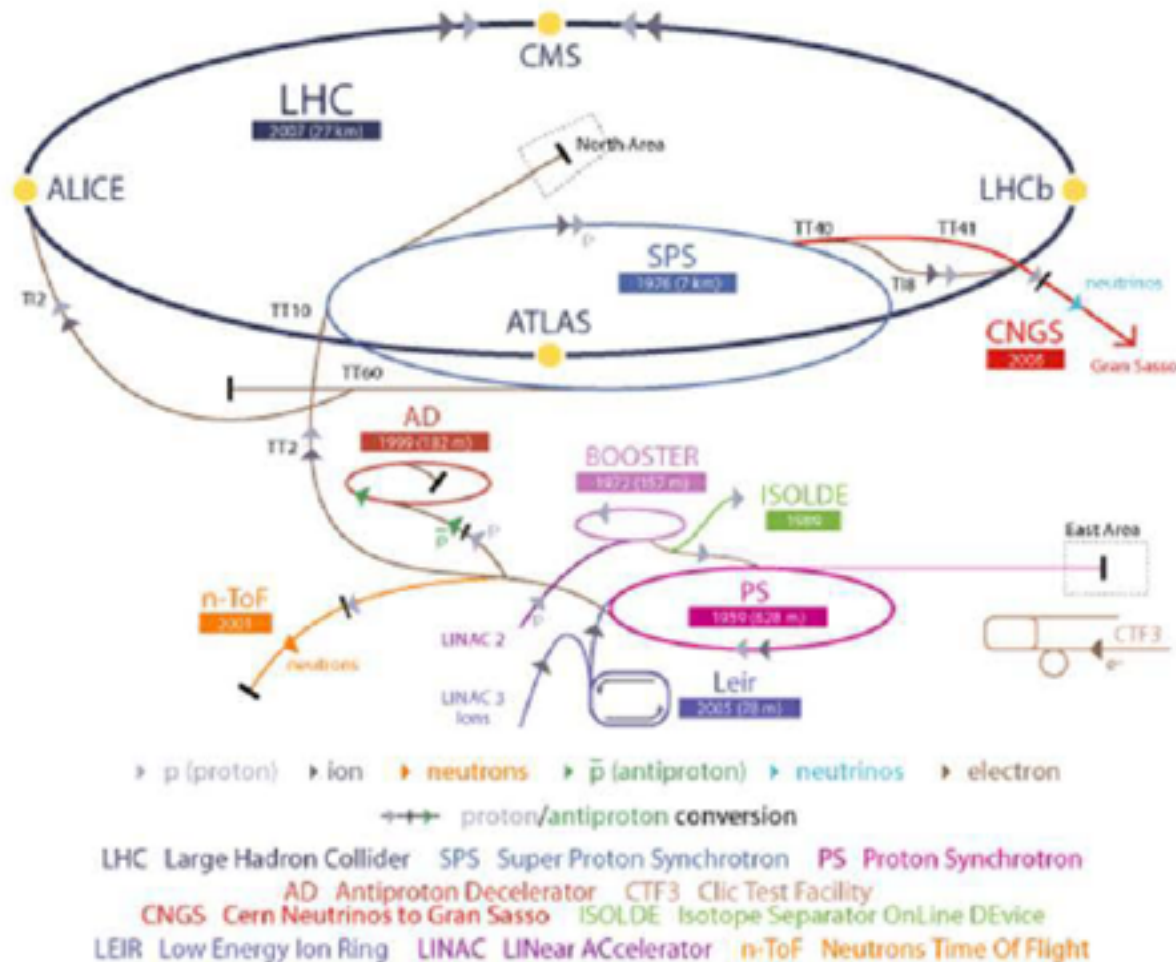
- Τα πειράματα έχουν επαληθεύσει το Καθιερωμένο Πρότυπο με εντυπωσιακή ακρίβεια!
- $\Rightarrow$... έχουμε βρεί την θεωρία ! (??)
- ΔΕΝ έχουμε λόγο να ψάχνουμε....
- ... αυτό είναι όλο???

Αναπάντητα ερωτήματα στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

- Γιατι η φύση έχει φτιαξει τρεις πανομοιότυπες (υπάρχουν περισσότερες?) 'γενιές' σωματιδίων ?
- Ο μηχανισμός Higgs δίνει μάζες στα quark και τα λεπτόνια (βρήκαμε το Higgs ! αλλά είναι μόλις η αρχή...)
- Γιατι οι μάζες των κουάρκ είναι τόσο διαφορετικές?
- Υπάρχει ενοποίηση ΟΛΩΝ των δυναμεων (GUT)?
- Μπορεί η βαρύτητα να ενοποιηθεί με QM σε ένα SM (Hierarchy problem: weak interactions 10^{24} stronger than gravity!)
- Γιατί υπάρχει ασυμμετρία μεταξύ ύλης και αντιύλης?
...και άλλα..... Σκοτενή Υλη, Σκοτεινή Ενέργεια ...

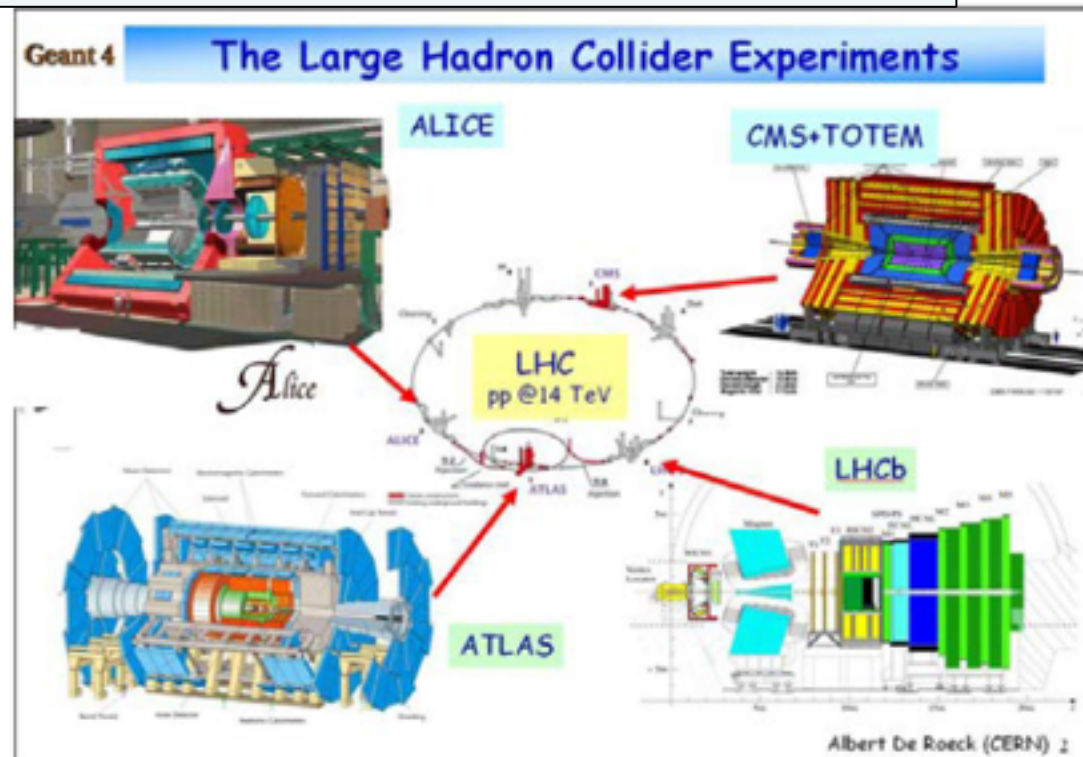
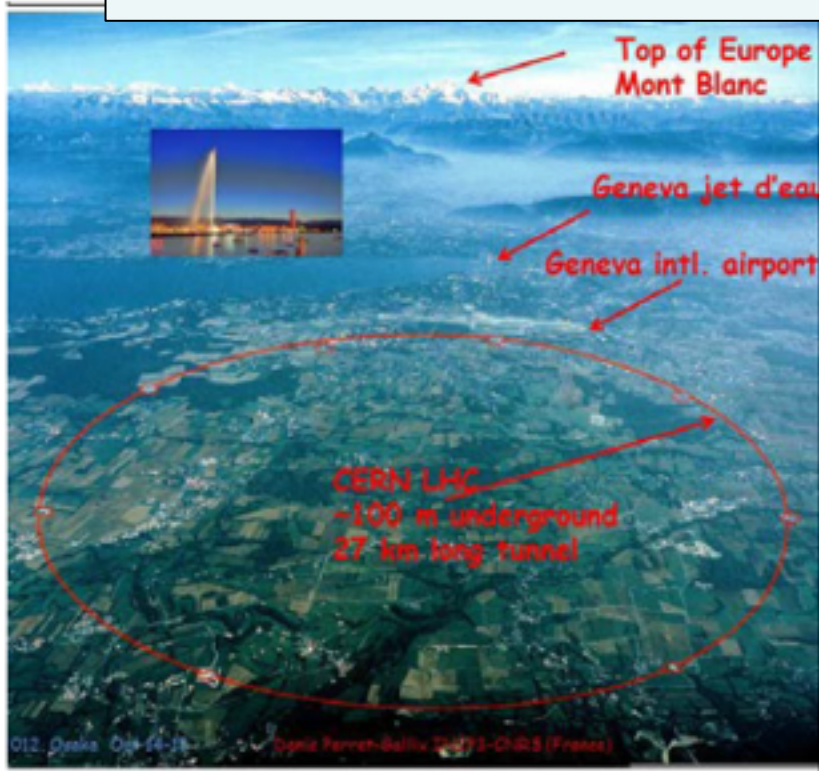
Χρειάζεται μια συνεχής 'ανταλλαγή' ανάμεσα
στη *θεωρία* και το *πείραμα* !

The CERN Accelerating Complex



The LHC benefits from a large accelerator infrastructure progressively installed at CERN since it was founded back in the 50's. The proton bunches produced from a hydrogen source are accelerated by the Linac and Booster. Then, the PS and SPS increase the energy up to 450 GeV before entering the LHC.

The LHC and the Experiments at CERN

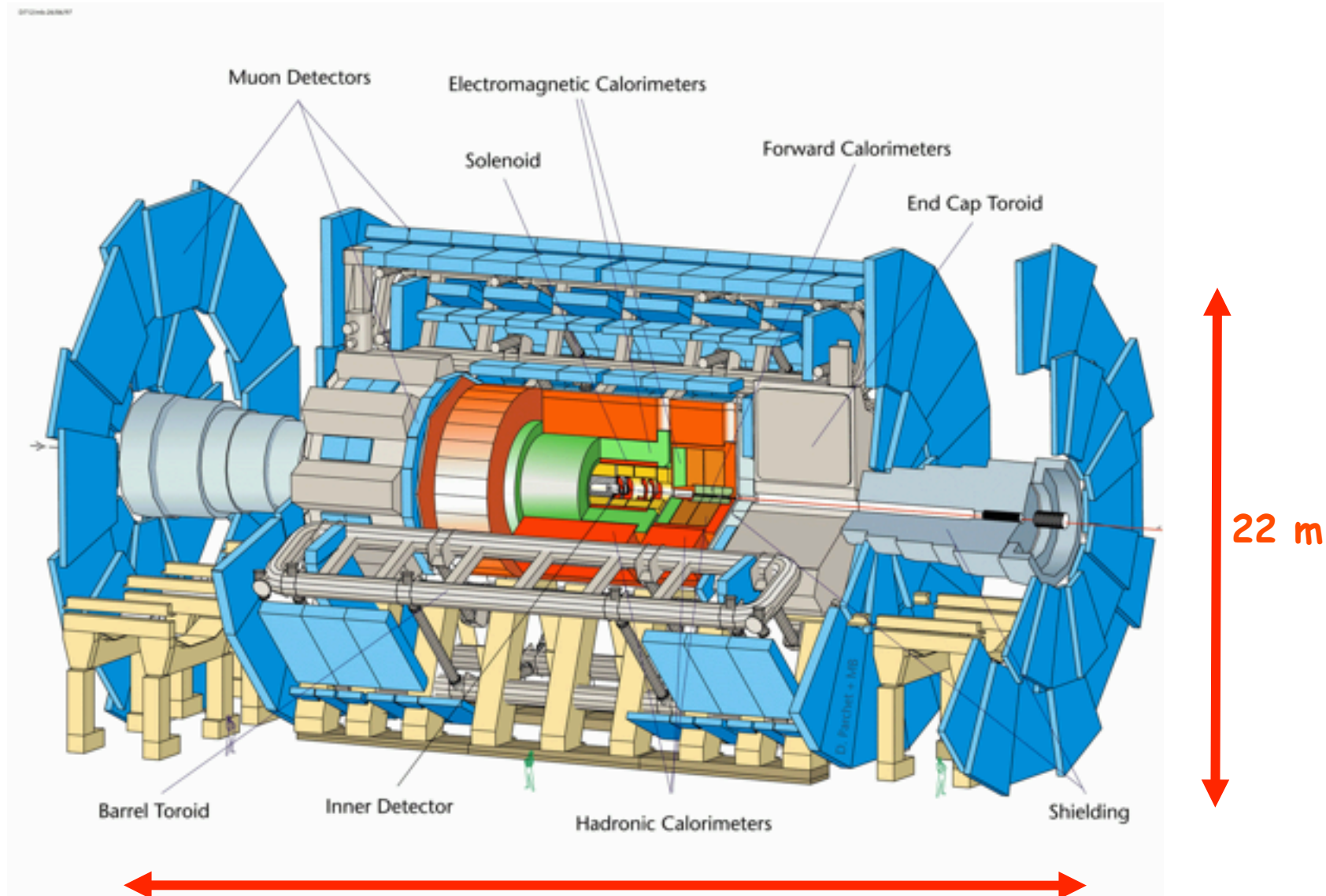


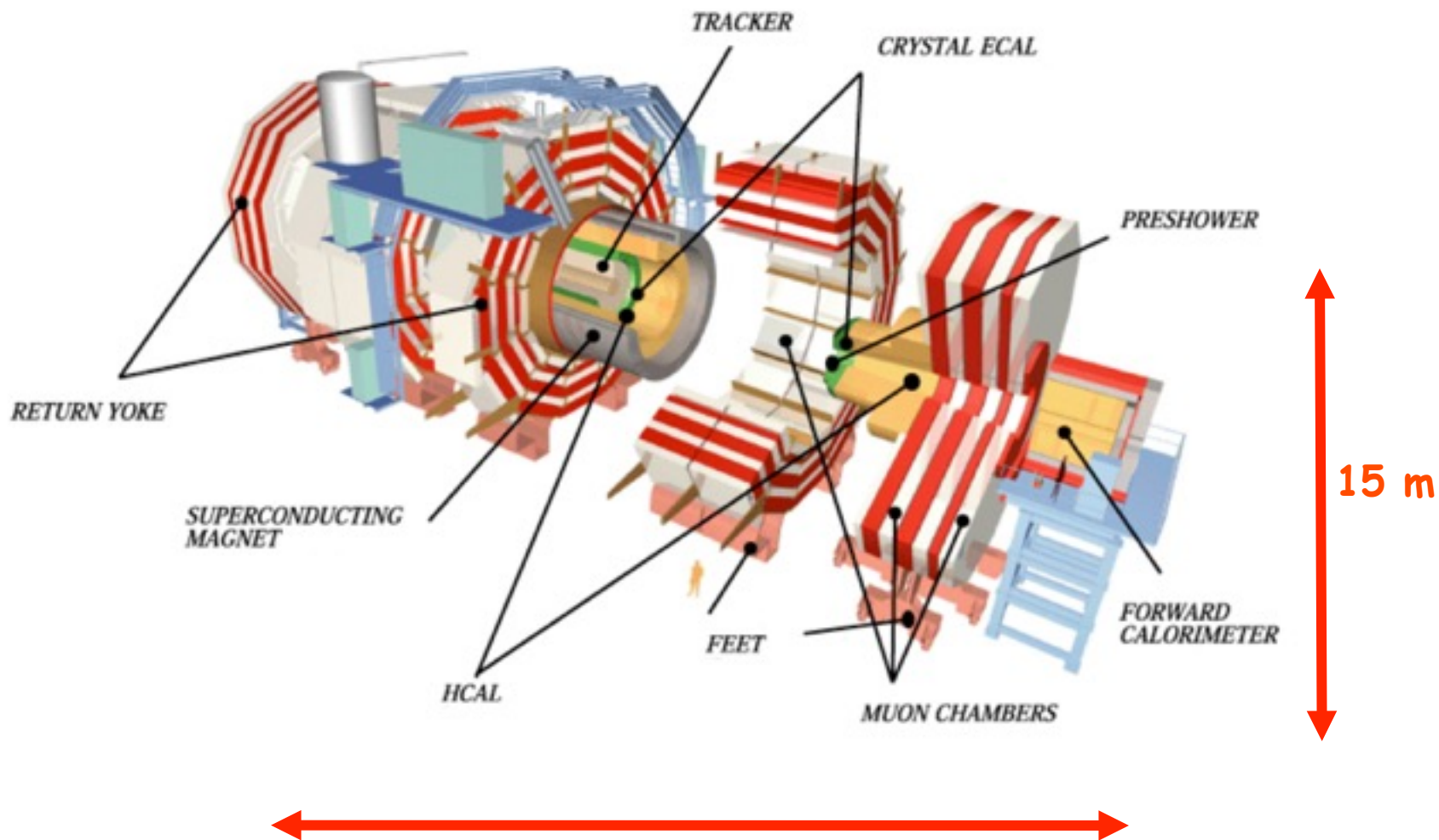
4 μεγάλα πειράματα στο LHC υπάρχουν + 3 μικρότερα-εξειδικευμένα πειράματα:
LHCf(LHC-forward): measurement of neutral π^0 meson production, in order to understand ultra high energy cosmic rays

MOEDAL: Monopole and exotic particle detector at the LHC

TOTEM: Total cross section, elastic scattering and diffraction dissociation at the LHC

ATLAS





TRIGGER & DATA ACQUISITION

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

TRACKER

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

CRYSTAL ECAL

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

PRESHOWER

Armenia, Belarus, CERN, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

RETURN YOKE

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

SUPERCONDUCTING MAGNET

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

HCAL

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

FEET

Pakistan, China

FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

MUON CHAMBERS

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

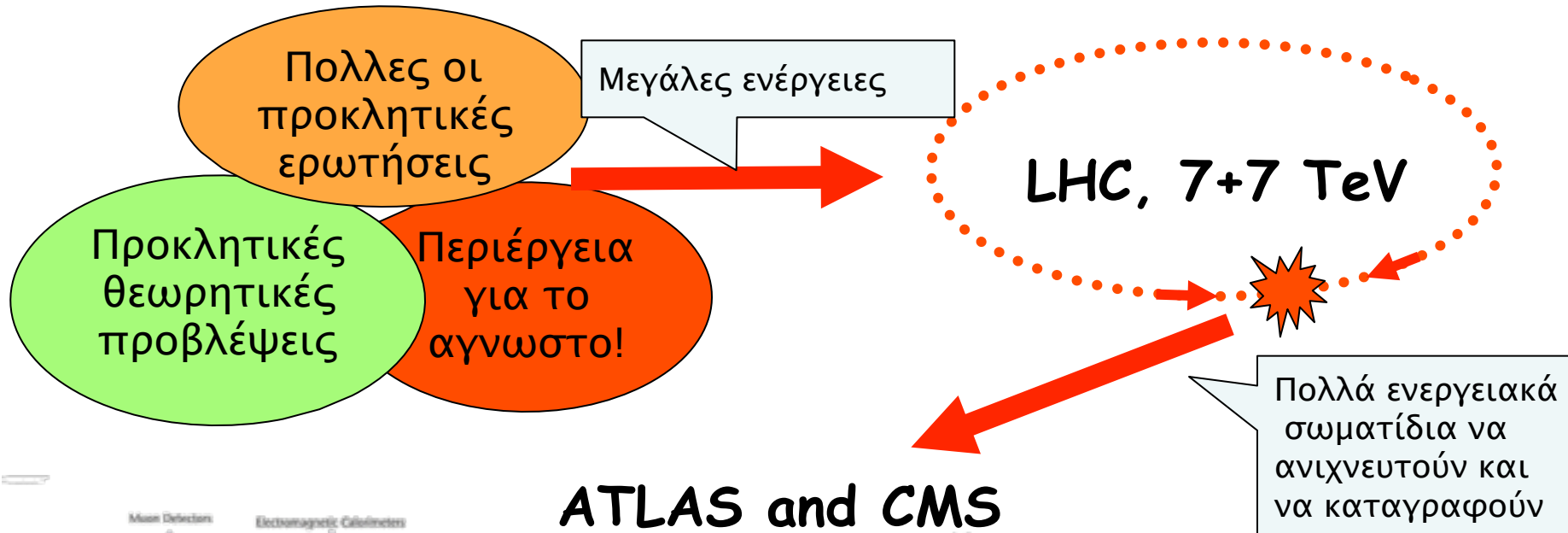
Total weight : 12500 T
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 21.5 m
Magnetic field : 4 Tesla

Υπολογ.Φυσική ΣΣ

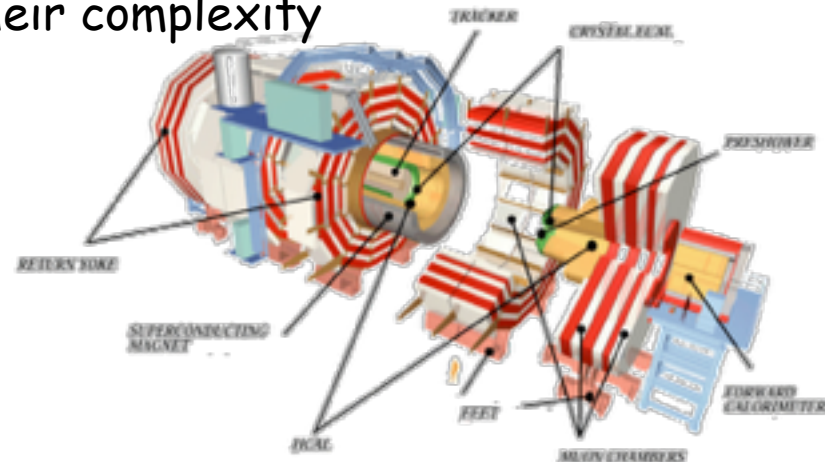
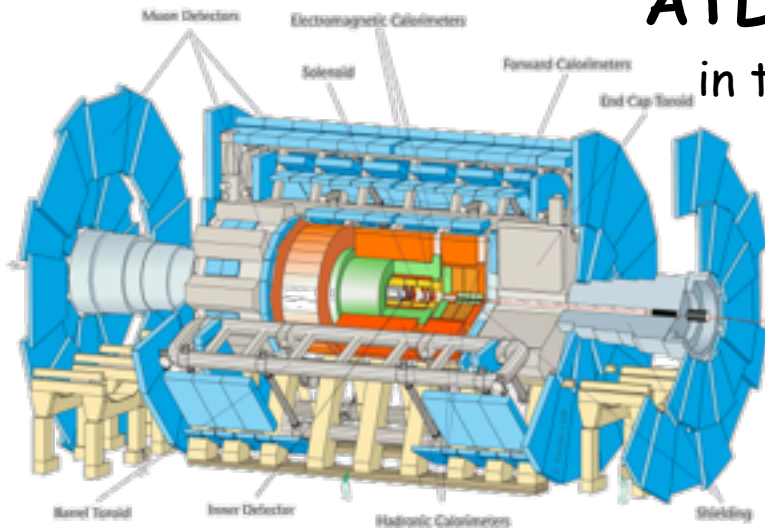
10

* Only through industrial contracts

Γιατί μεγάλες ενέργειες και μεγάλοι ανιχνευτές???



ATLAS and CMS in their complexity

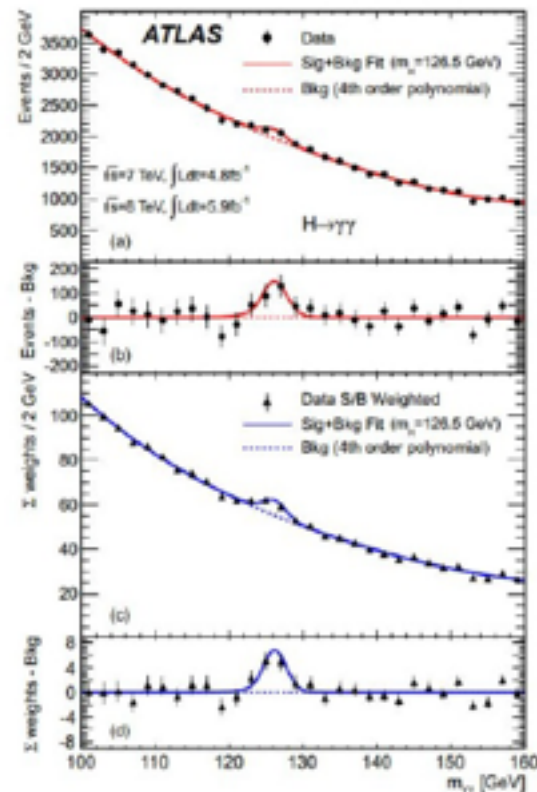
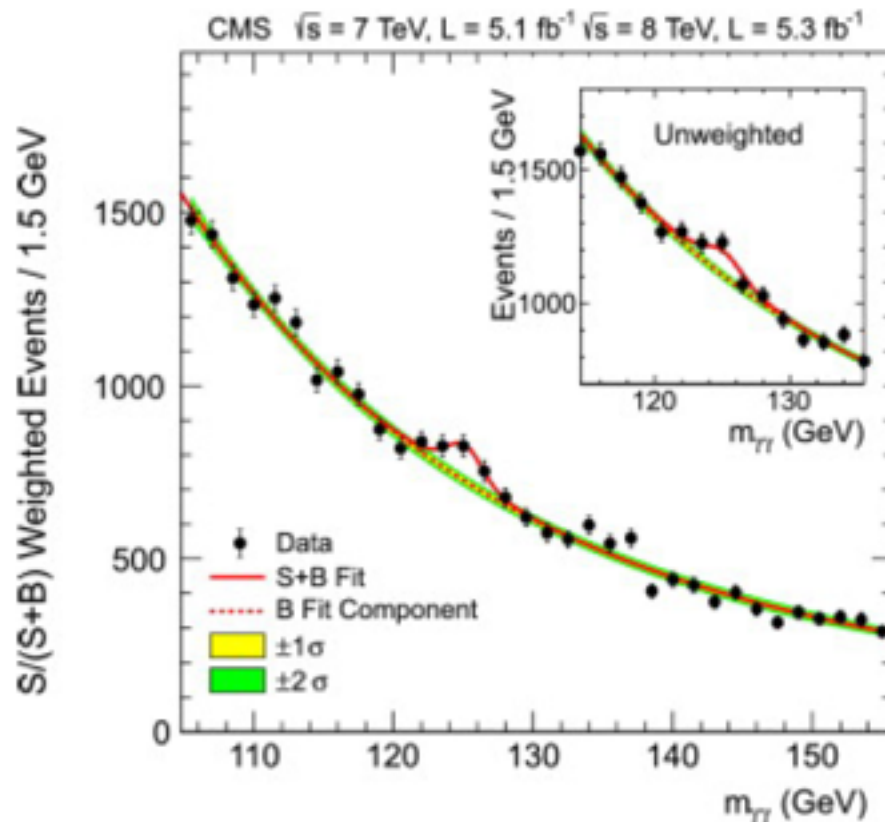


6/3/2017

Υπολογ.Φυσική ΣΣ

11

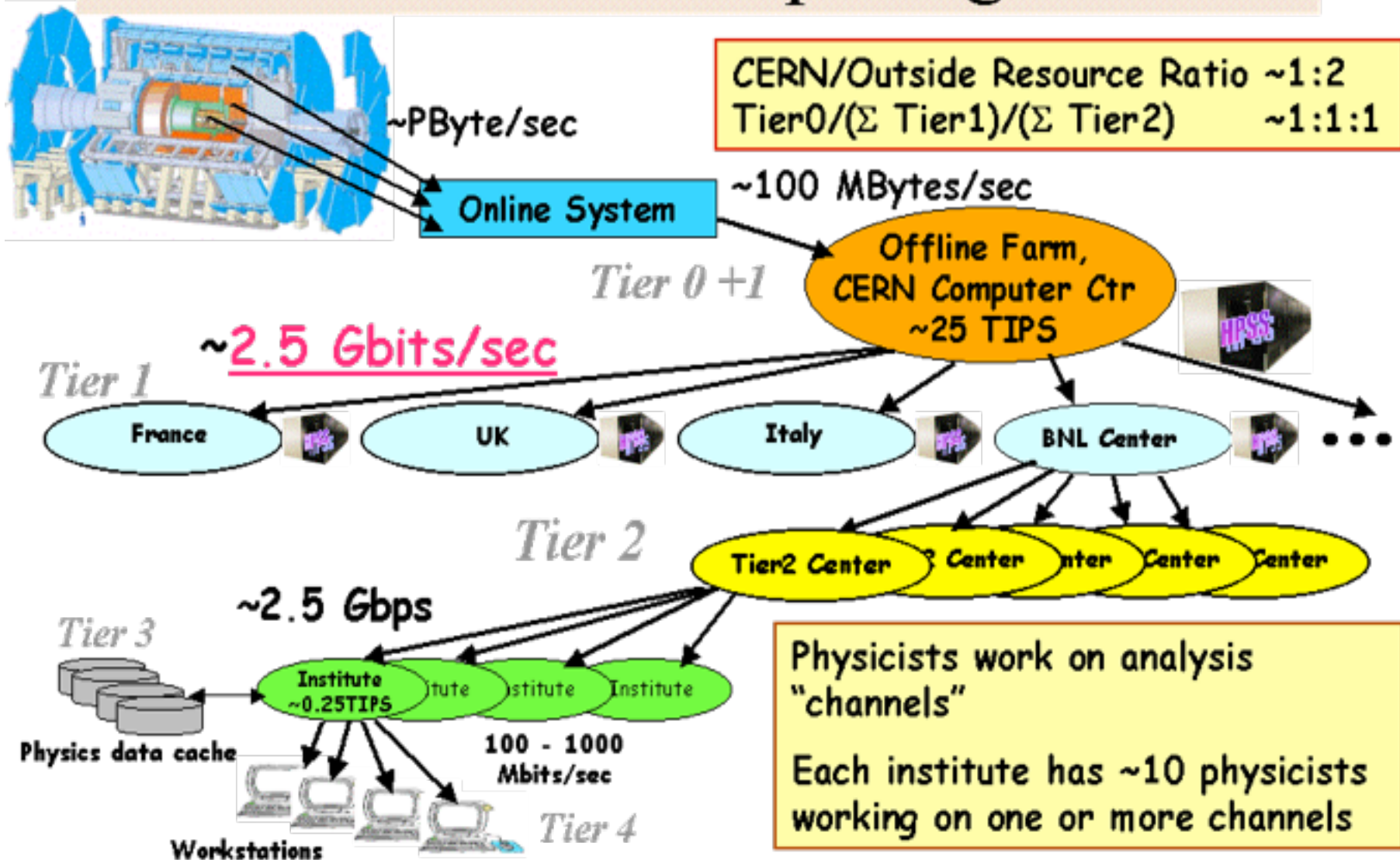
Η πρόσφατη ανακάλυψη του Higgs απόρροια μιας σύνθετης υπολογιστικής διαδικασίας !



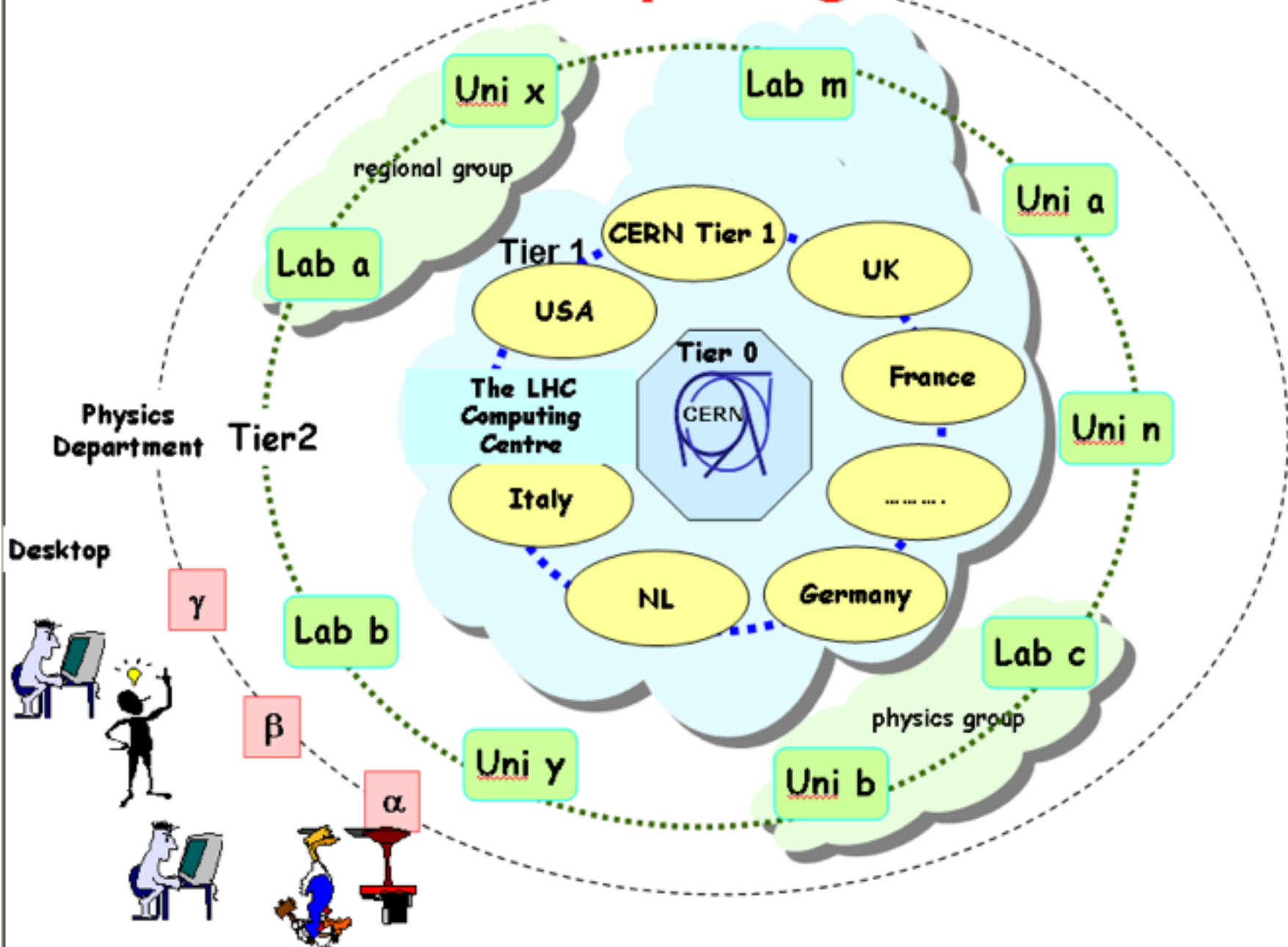
The dots and the error bars represent the observed number of events in a given mass bin. The numbers come from a long chain of data analysis beginning with the trigger event selection, followed by the event reconstruction, the event filtering and analysis for the millions of events recorded by the experiments

The data simulation and analysis is performed on a distributed data grid system called the WLCG (Worldwide LHC Computing Grid). This infrastructure based on tiers computing centres has been installed all around the world to absorb the heavy computing load of the high LHC statistics. The tier 0 is located at the data production centre (CERN) and absorbs 20% of the load, 11 tiers 1 connected through direct high bandwidth fibre links (10 Gb/s) are scattered across the main participating countries/regions and ~ 140 tiers 2 are providing the specific computing support necessary to research teams. The WLCG provides more than 250,000 processors, and close to 150 PB of disk storage from over 150 sites in 34 countries, producing a massive distributed computing infrastructure that support the needs of more than 8,000 physicists.

Hierarchical Computing Model



LHC Computing Model



200Hz - 400Hz
RAW: ~1.7-1.1 MB/evt

Event Summary Data (ESD): ~1 MB/evt
Analysis Object Data (AOD): ~100 kB/evt
derived data (dESD, dAOD, NTUP,...)
distributed over the Grid

Calibration

CERN
Analysis
Facility

Tier-0

Data Recording to tape
First Pass Processing

Tier-1

Tier-1

Tier-2

Tier-1

Tier-2

Tier-2

11 Tier-1 centers
RAW data copy on tape
Analysis data on disk
Reprocessing

140 Tier-2 centers
(~80 sites)
Analysis data on disk
User Analysis



How these collaborations work? Where they get money?

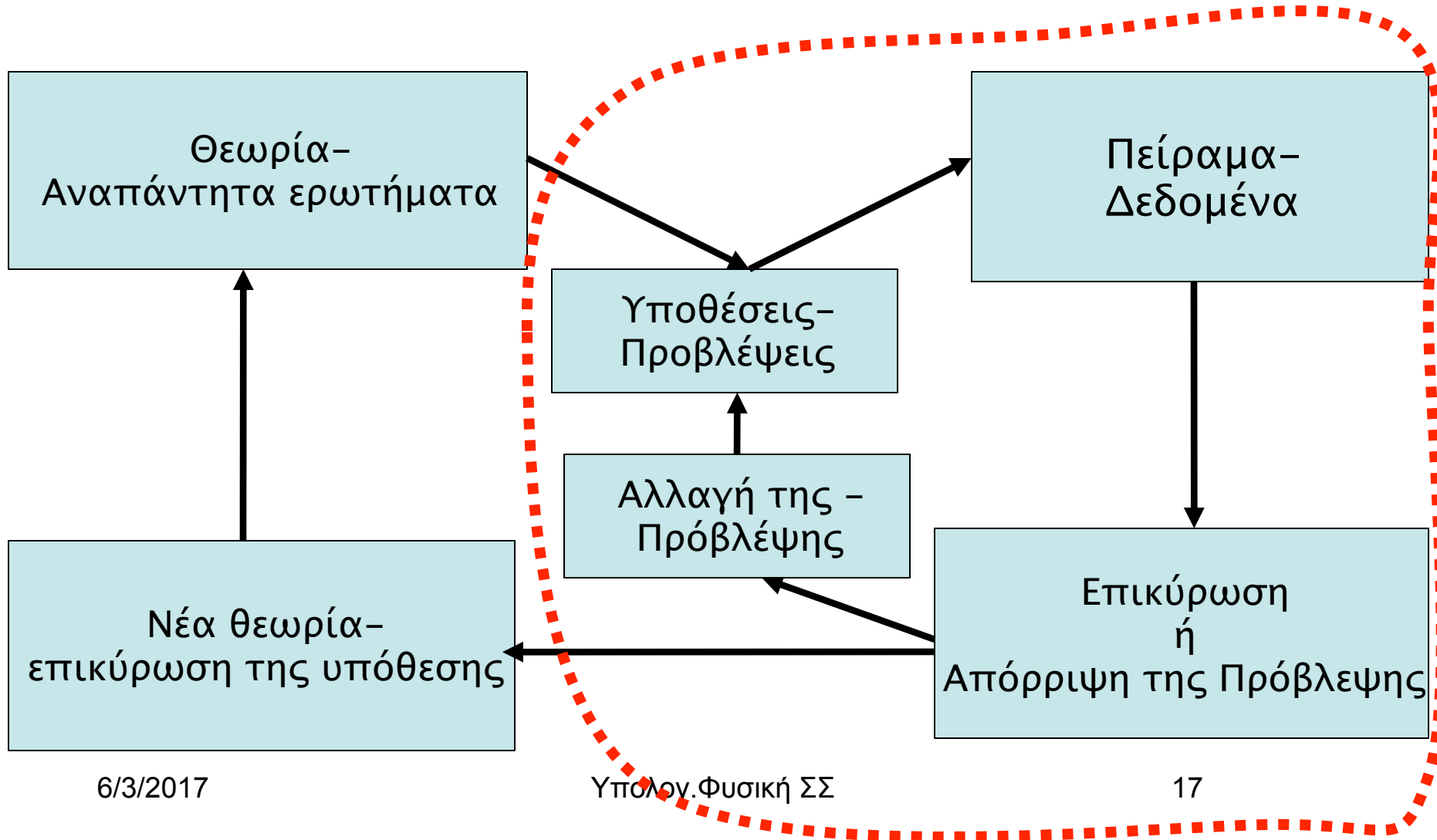
The ATLAS Collaboration includes about 3000 physicists and engineers from 175 institutes in 39 countries. CMS has a similar list of participants often from the same countries, but not completely overlapping.



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

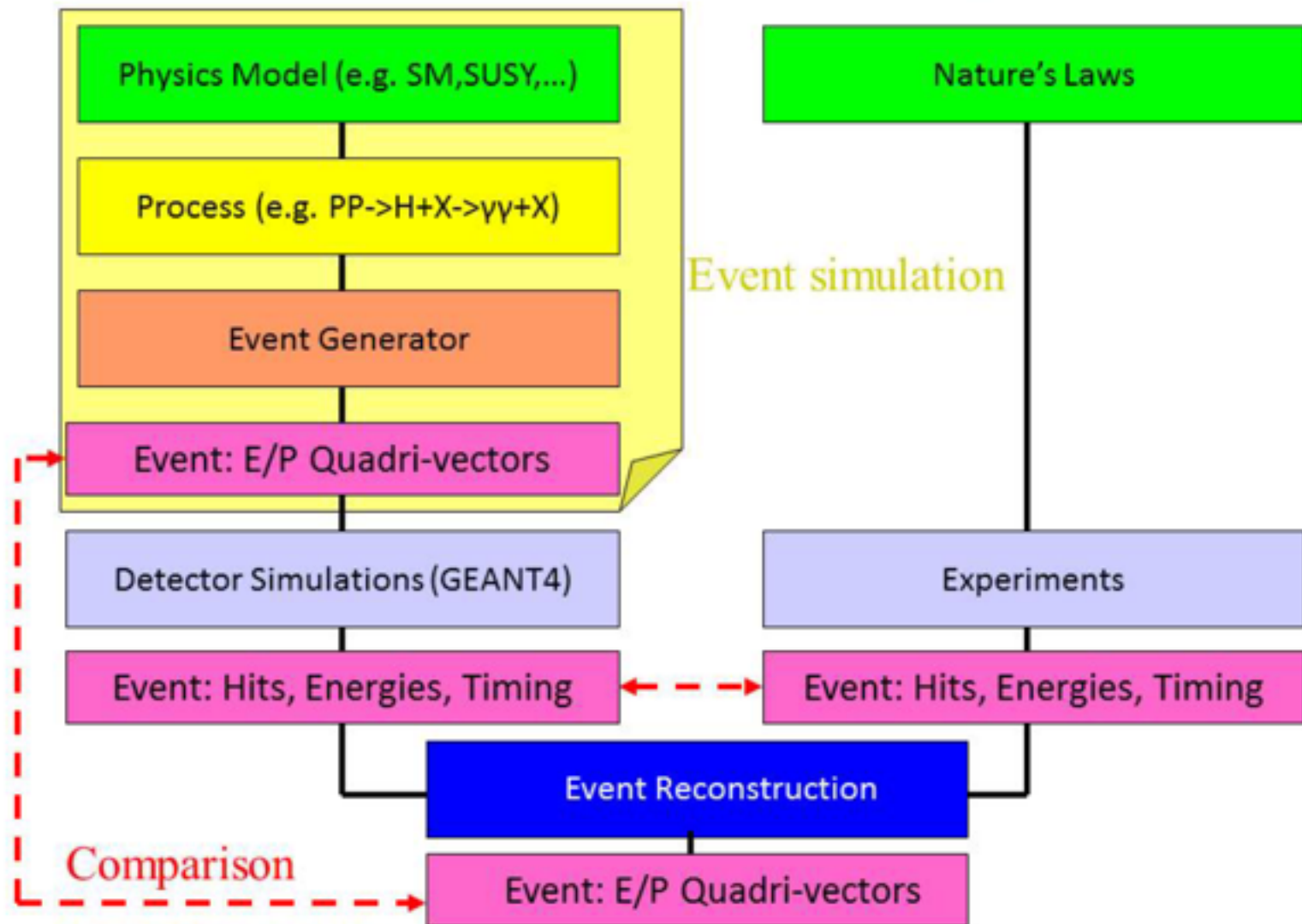
Financial support comes from the funding agencies of individual participating states.

Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

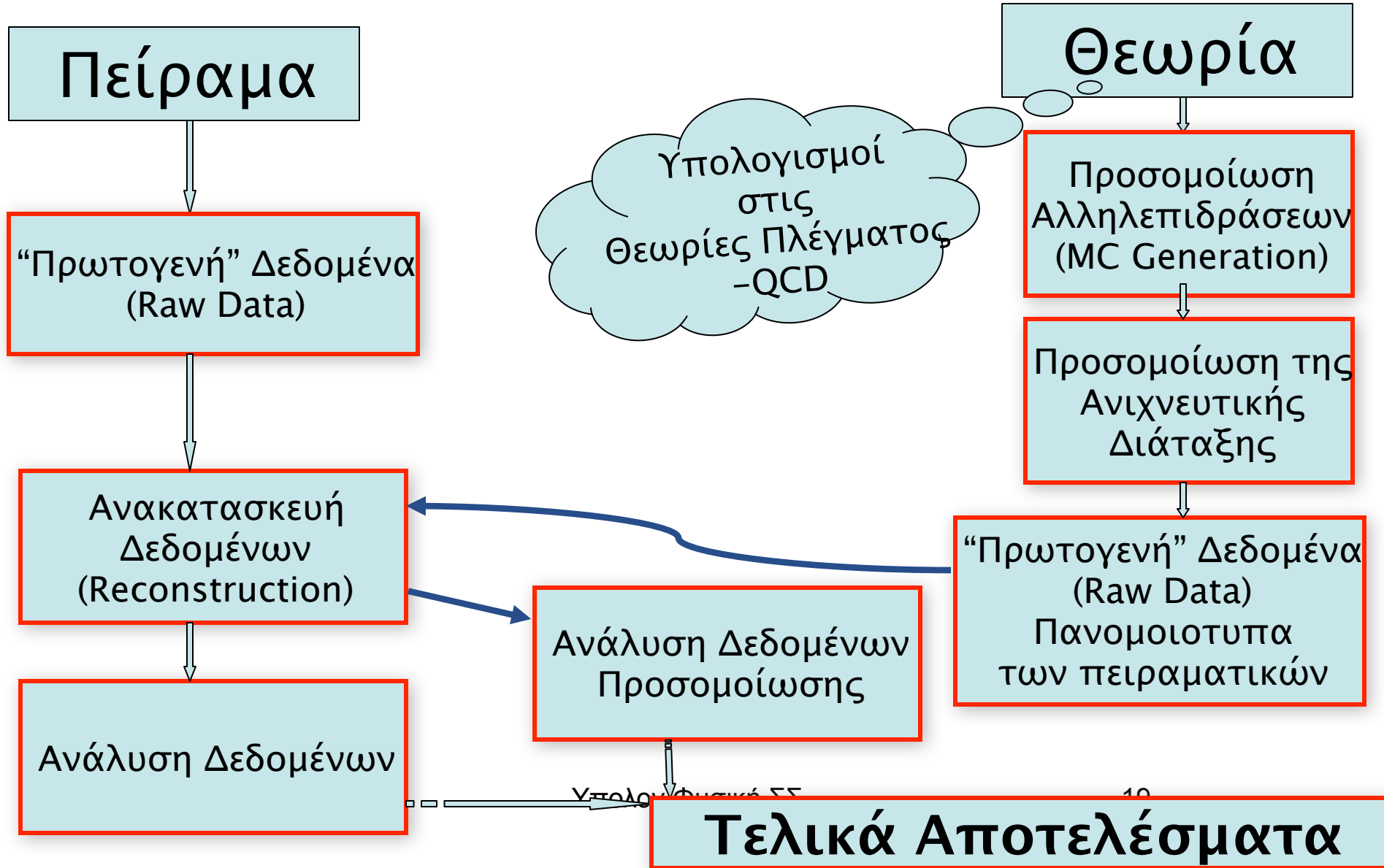


Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Simulation and Data Analysis Chain

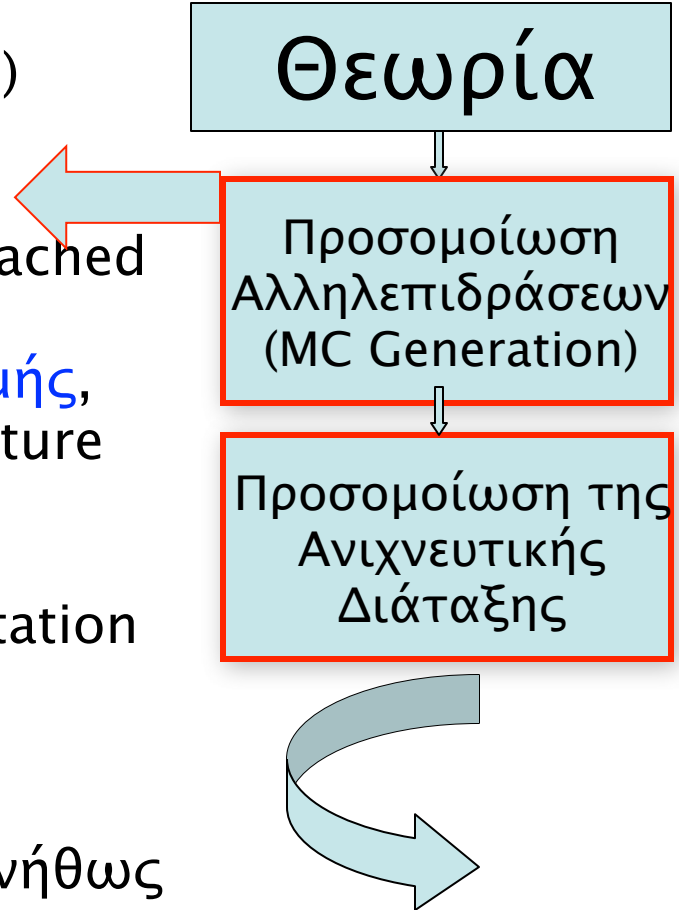


Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων



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, HERWIG, 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



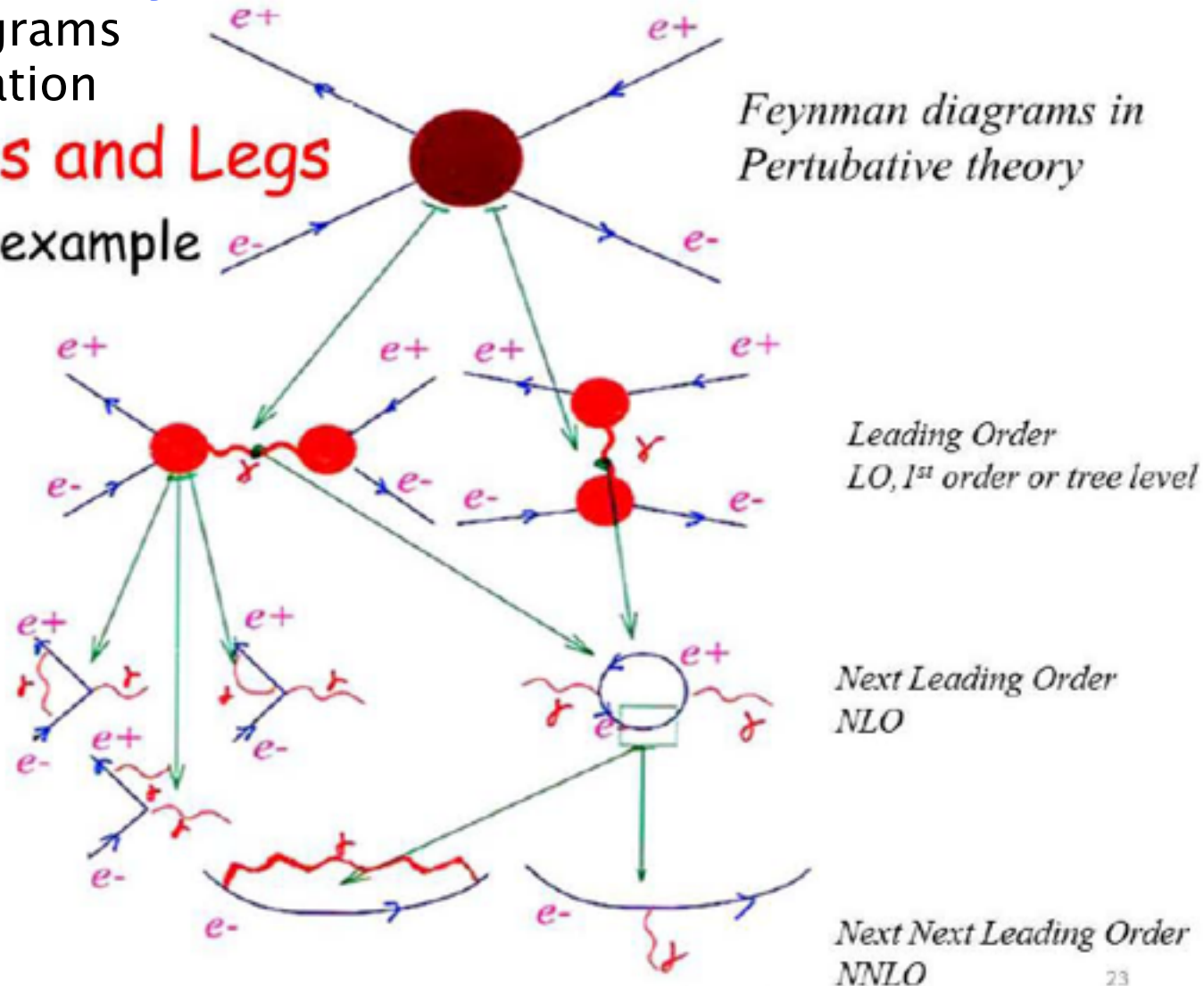
Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Επιλογή της διαδικασίας (physical process)

- Feynmann Diagrams
- Process Calculation

Loops and Legs

QED example



Loops and legs in QED

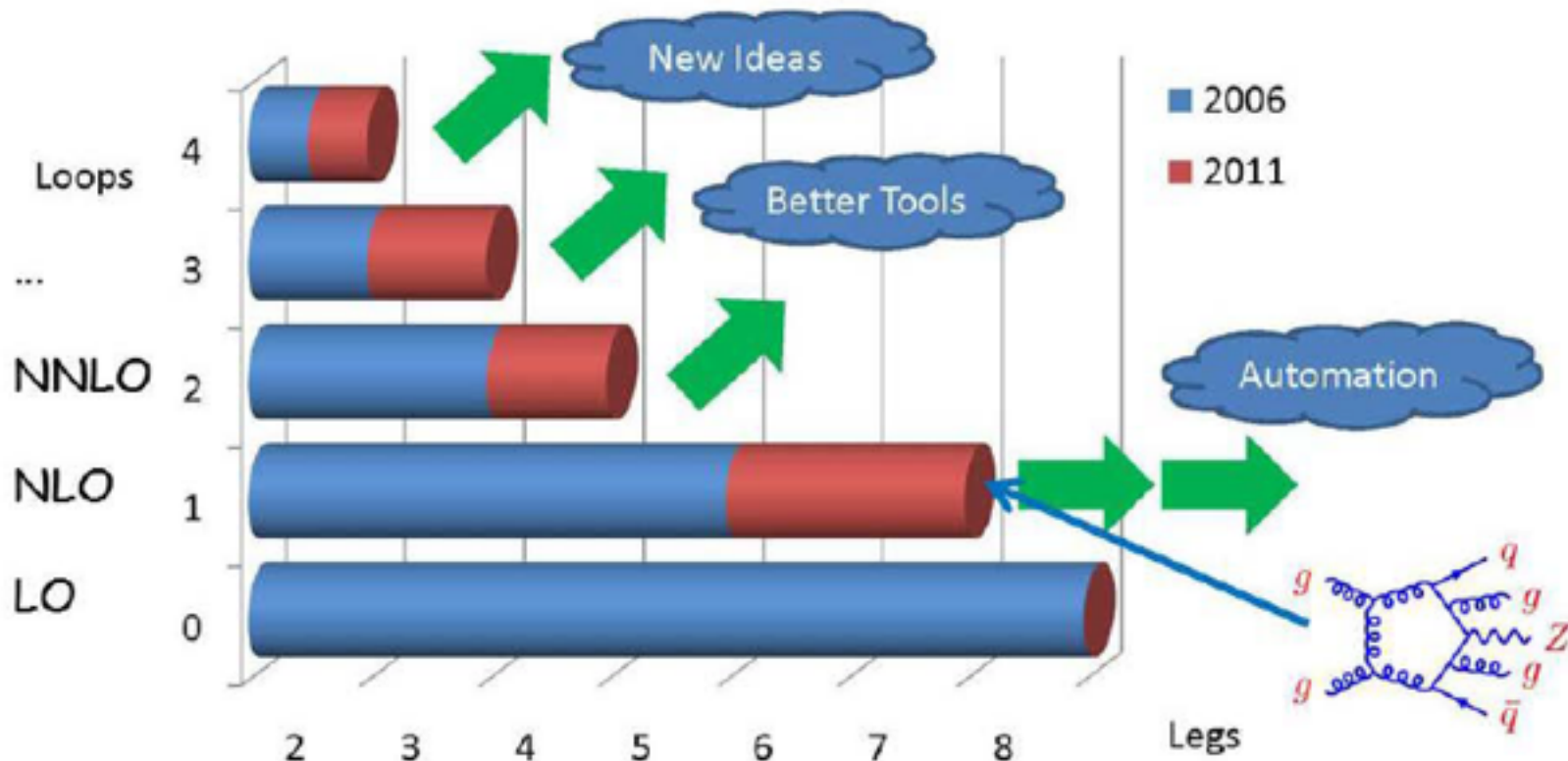
Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Επιλογή της διαδικασίας (physical process)

- Feynmann Diagrams

- Process Calculation

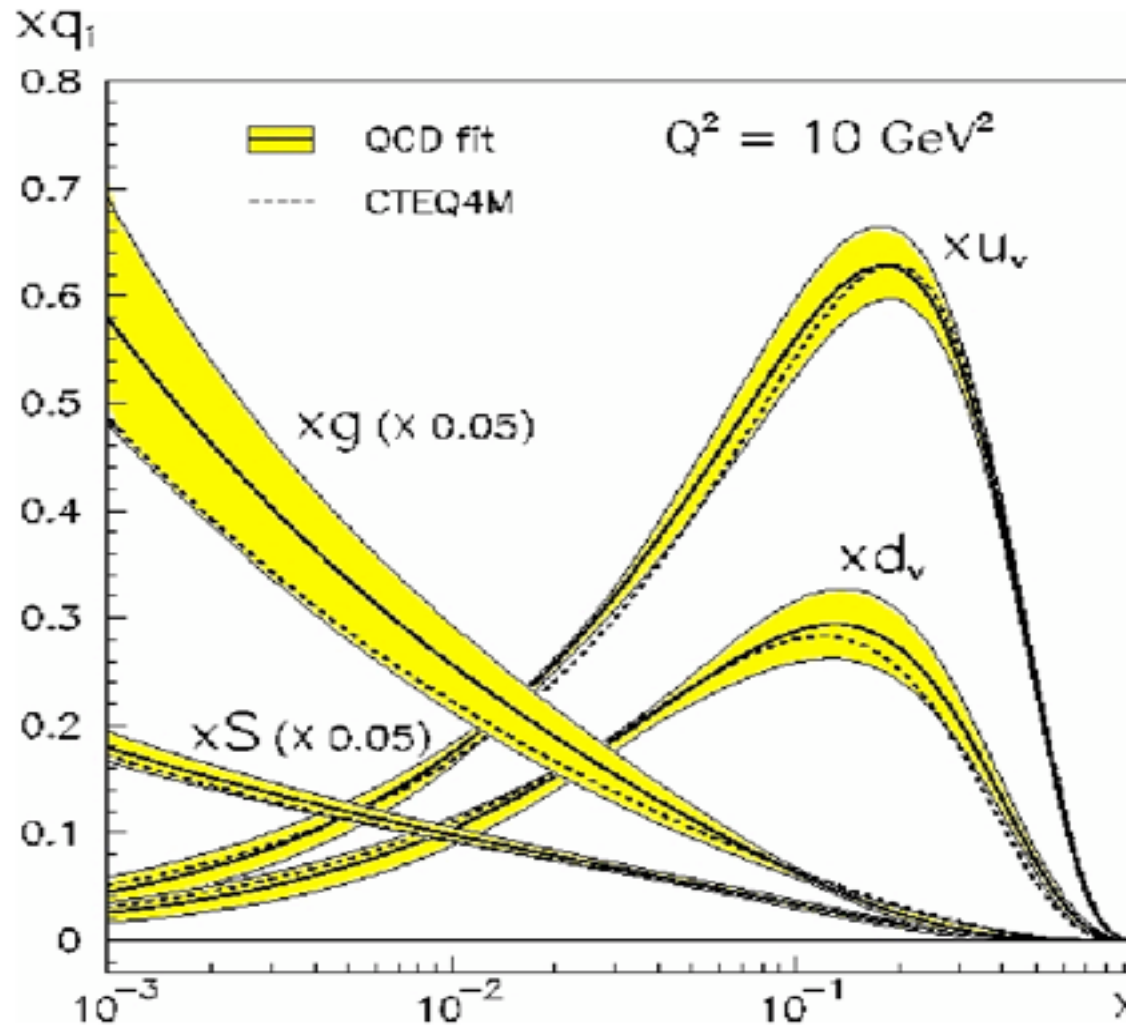
NLO Revolution



N. Glover Durham Univ. UK, ACAT'2011

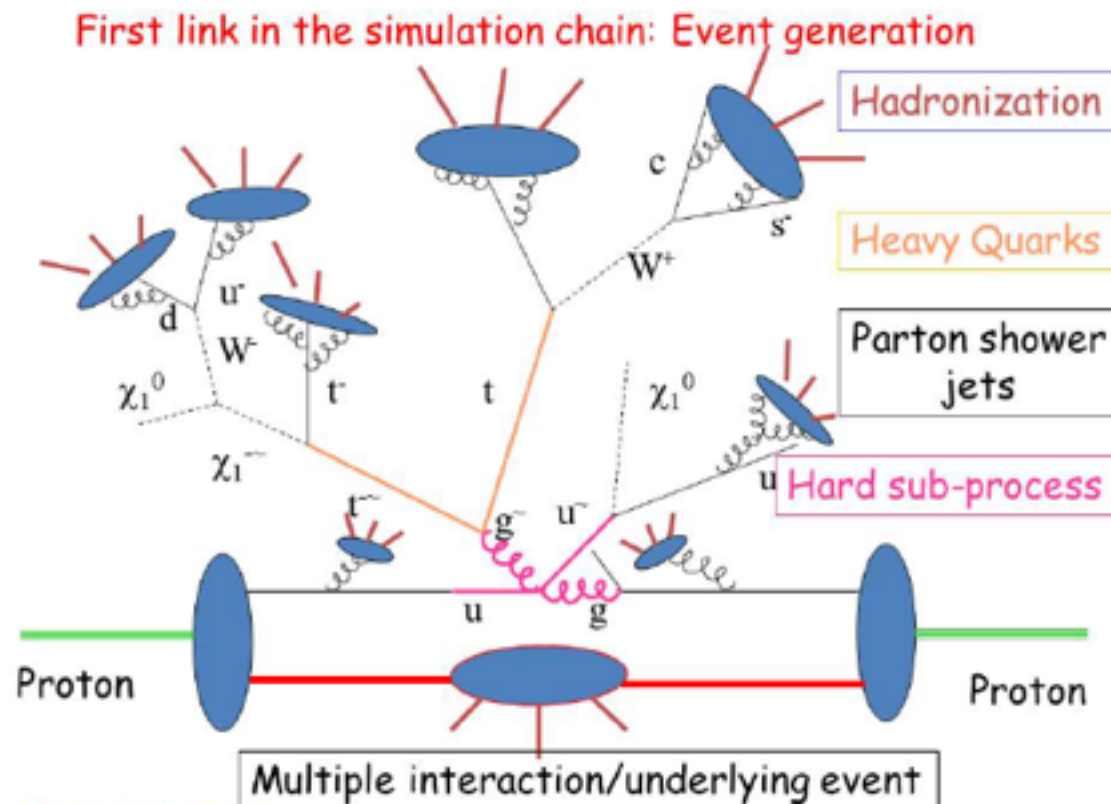
Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης δομής



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Επιλογή κατάλληλου προτύπου για την αδρονοποίηση των quark, gluon (fragmentation model)

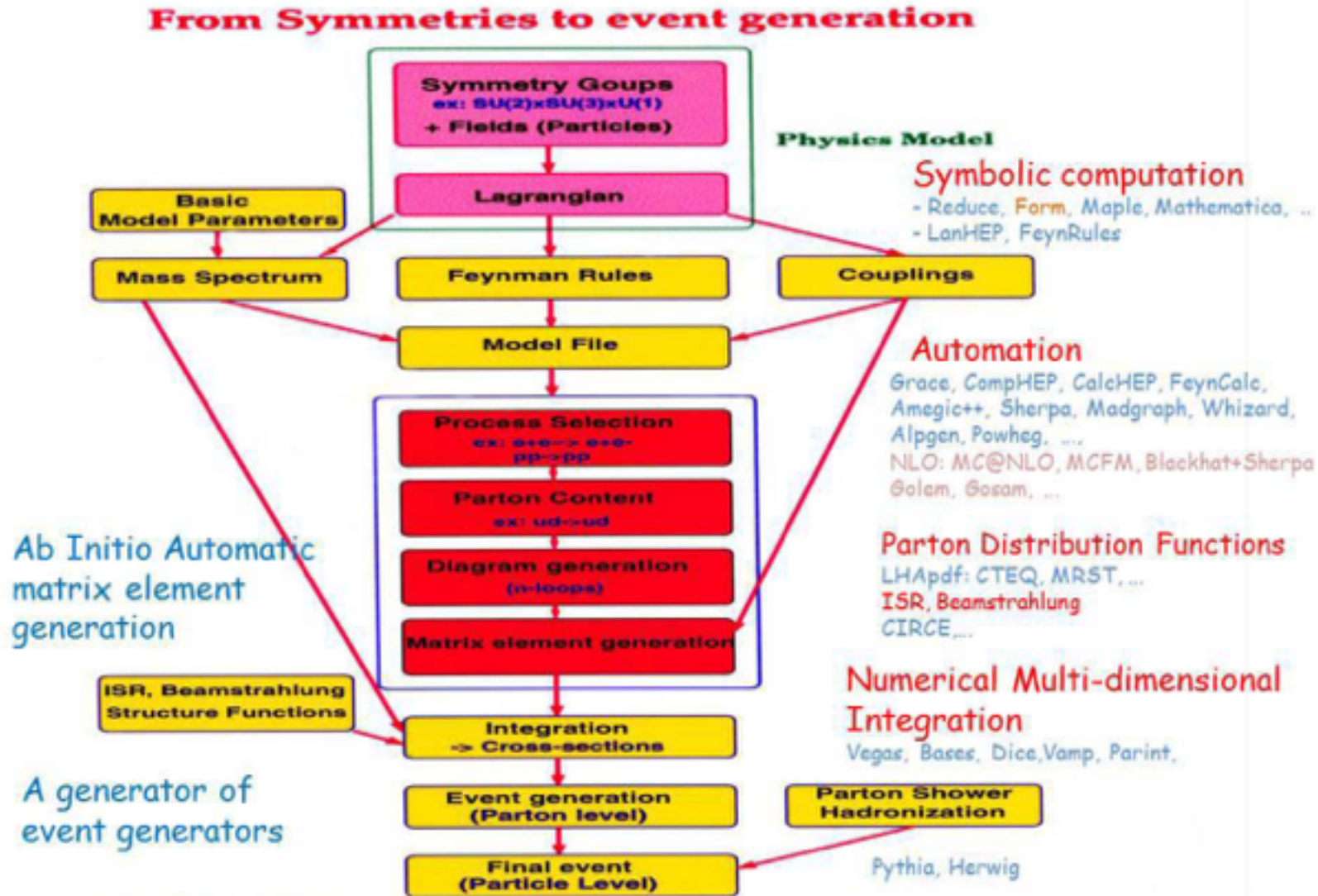


Sequential steps in the formation of an event

(The event presented here is a SUSY event with a hard process: $u\text{-quark gluon} \rightarrow u\text{-squark gluino}$, the $u\text{-squark}$ being the superpartner of a $u\text{-quark}$ and the $gluino$ the $gluon$ counterpart)

Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Process Calculation



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

• Από τον Γενήτορα της αλληλεπίδρασης (π.χ. ΡΥΘΗΙΑ) προκύπτει για κάθε γεγονός το σύνολο των 'σταθερών', ανιχνεύσιμων σωματιδίων, ο τύπος τους (e, γ, μ, K, π, ρ) τα 4-διανύσματά τους: $(E, \vec{p})_i$

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
(MC Generation)

Προσομοίωση της
Ανιχνευτικής
Διάταξης

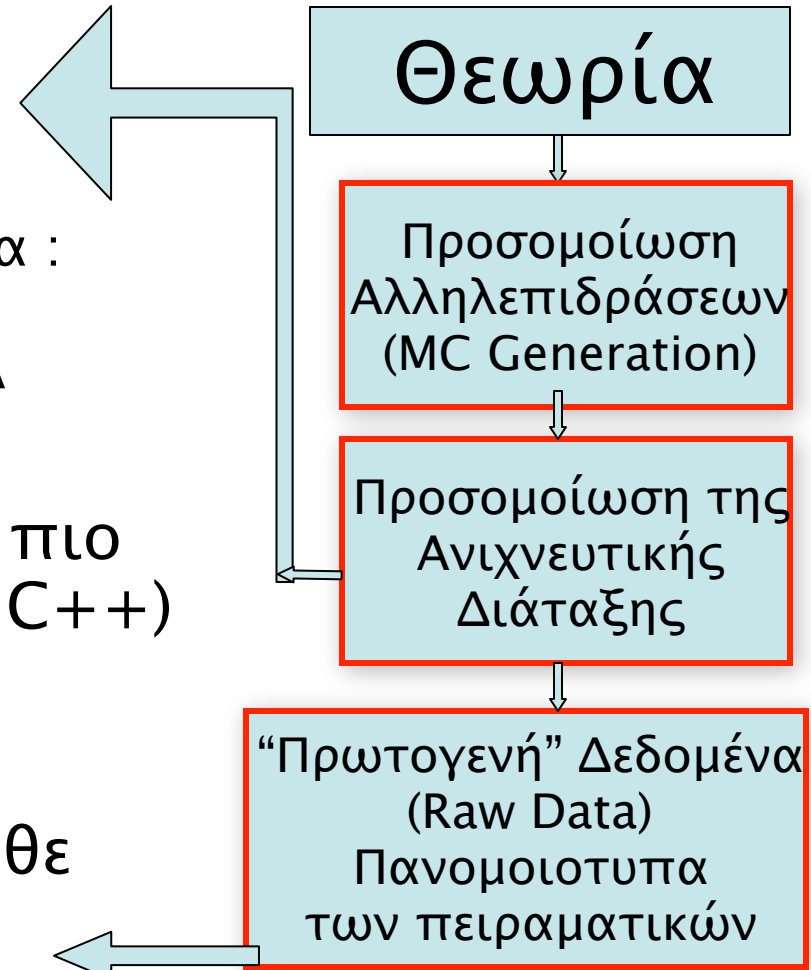
Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

- Ιστορικά:

- ‘home-made’ προγράμματα προσομοίωσης
- Εξελίσσονται σε λογισμικά πακέτα : Garfield (drift chambers), EGS (e-γ: σπινθιριστές, καλορίμετρα), FLUKA (νετρόνια),...- χρήση 1970-σήμερα

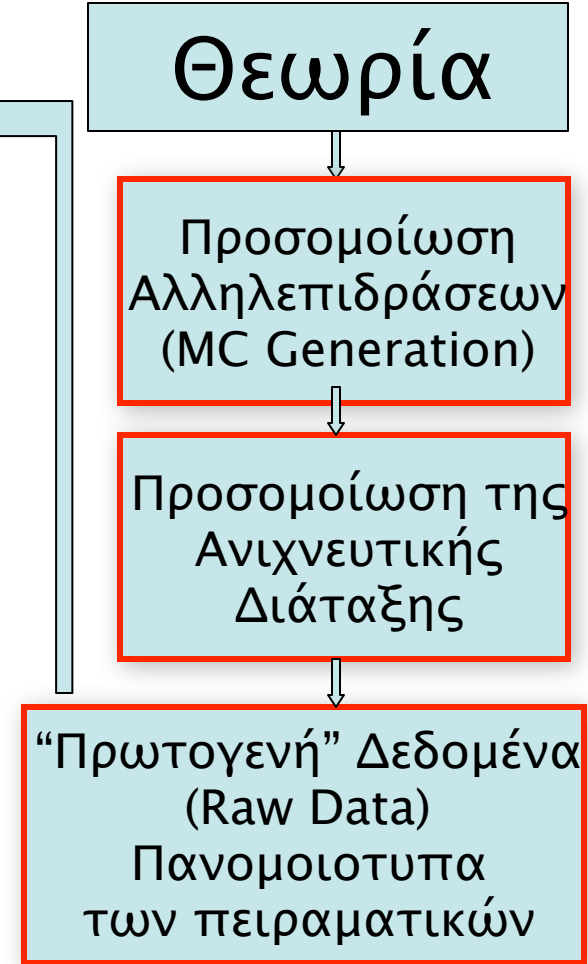
- Σήμερα περιλαμβάνονται στην πιο εξελιγμένη μορφή του Geant (σε C++)
BIG Machine–Big Overhead!

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

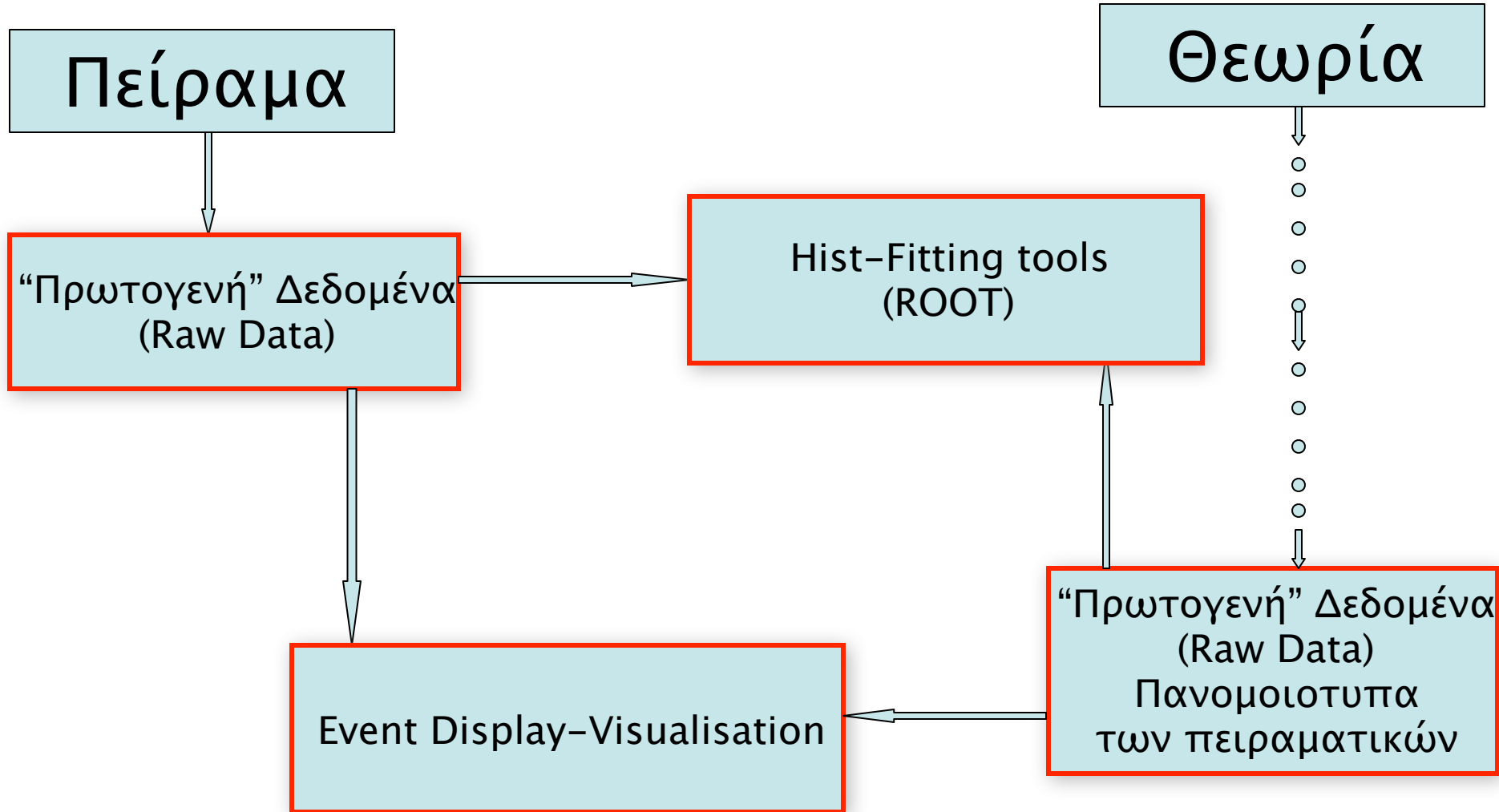


Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)

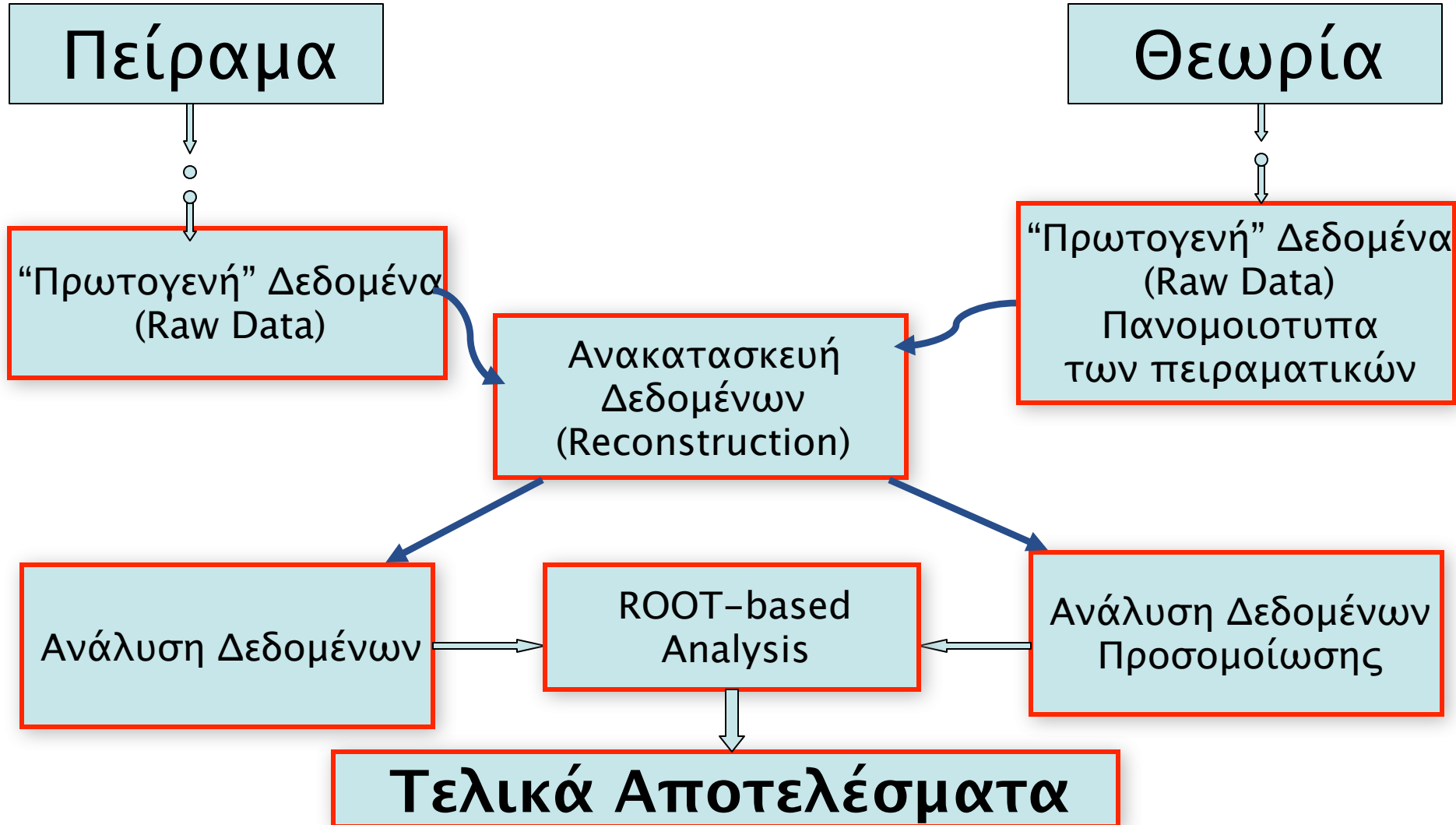
- Χρήση Histogramming-fitting tools [ROOT+Minuit= λογισμικό πακέτο σε C++ για την ανάλυση δεδομένων, για προσαρμογή κατανομών κλπ].
- Μελέτη των γενικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή occupancy, απόδοση, διακριτική ικανότητα
- Σύγκριση με ‘πρωτογενή’ δεδομένα από το πείραμα.



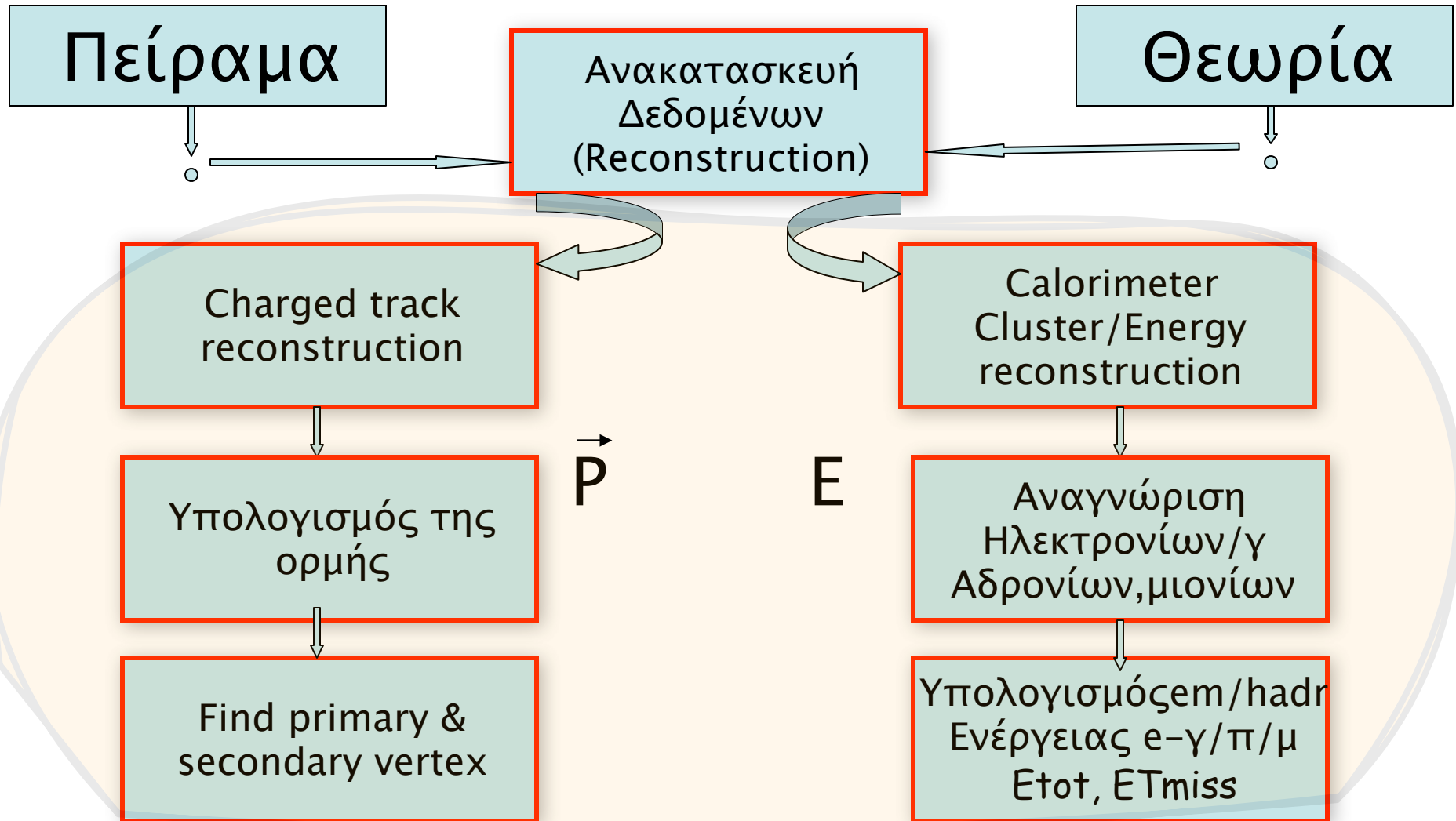
Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)



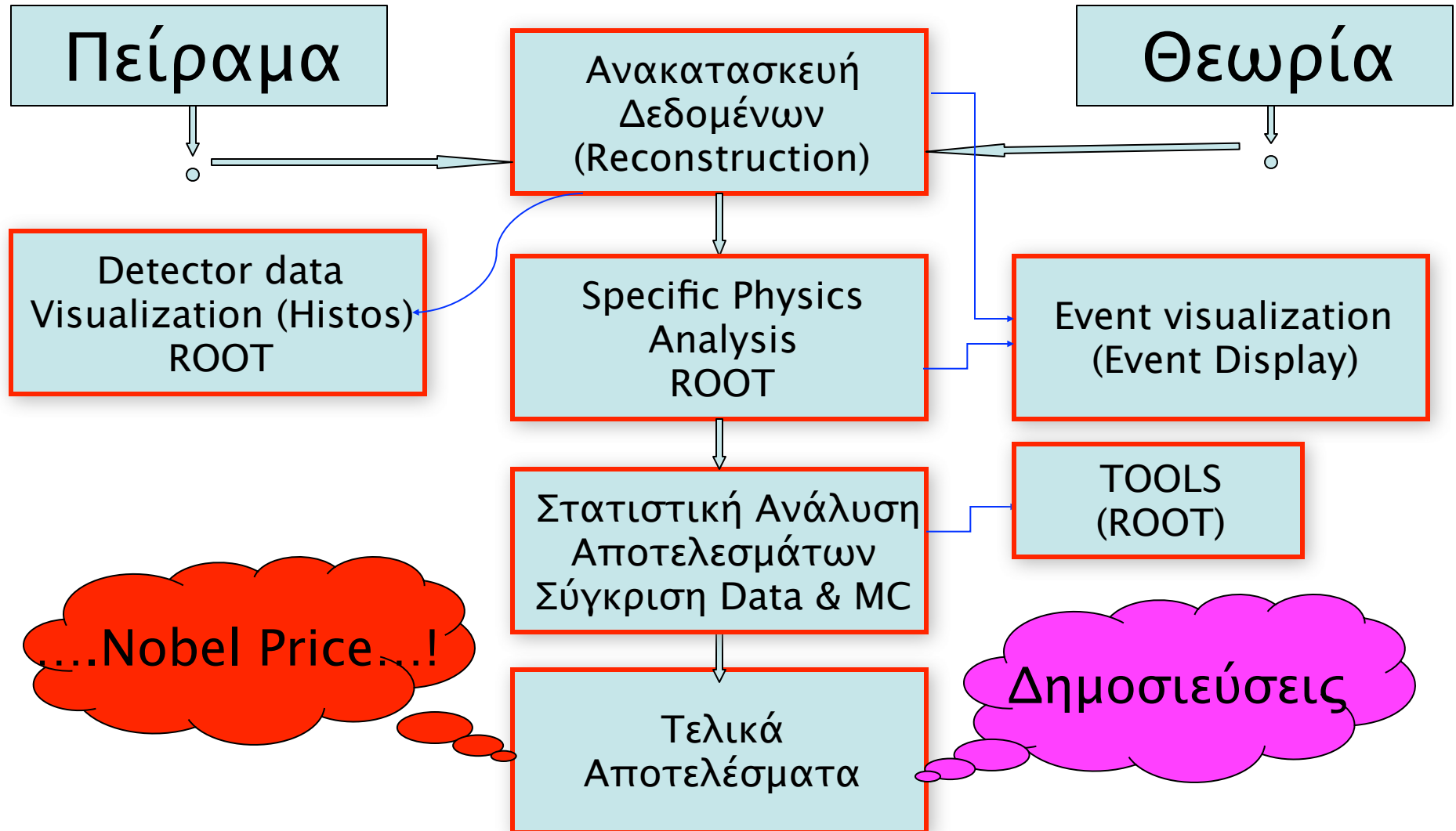
Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)



Η Μεθοδολογία στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (συνέχεια)



Τι θα μάθουμε ?

- Βασικές τεχνικές στην ανάλυση δεδομένων – Στατιστική
- Βασικές τεχνικές στην προσομοίωση δεδομένων :
 - Μέθοδοι Monte Carlo
 - Χρήση Γεννητόρων
- Σύγκριση του πειράματος με την θεωρία
 - Εξαγωγή των αποτελεσμάτων (ενεργές διατομές όρια για ύπαρξη νέων σωματιδίων)

Γιατι χρειάζεται Υπολογιστική Φυσική στα Στοιχειώδη Σωματία ?

- Υπολογισμός απο τις κατανομές δεδομένων παραμέτρων όπως:
 - ⇒ ενεργές διατομές, χρόνος ημιζωής σωματιδίου: (κατανομές dN/dt)
Estimators: Least Square, Maximum Likelihood/ profile likelihood...
 - ⇒ Μάζες σωματιδίων :
Fitting : Κατανομές Breit–Wigner (Cauchy)
 - ⇒ πόλωση (polarization), σταθερές σύζευξης : από κατανομές $d\sigma/d\Omega$
 - ⇒ αναζήτηση νέων σωματιδίων (confidence limits method: CLs) 

Γιατι χρειάζεται Υπολογιστική Φυσική στα Στοιχειώδη Σωματίια ?

- 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 από 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

- Εισαγωγή στην ROOT
 - Η ROOT εργαλείο ανάλυσης δεδομένων (histogramming tool)
 - Η Root σαν περιβάλλον ανάλυσης δεδομένων
 - Επίλυση προβλημάτων με την ROOT
- Αναδρομή στην Στατιστική
 - Κατανομές (διακριτές & συνεχείς: binomial, poisson, gauss, chi-square)
 - Estimators (Least square, Max.Likelihood)
 - Confidence limits
 - Errors : statistical, systematic
- 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)
- Modern Particle Physics (October 2013), Mark Thomson (Cambridge University Press 2013)
- Introduction to Elementary Particles, D. Griffiths (John Wiley)
- Particles and Nuclei (4th edition), Ch. Povh et al (Springer, 2004)
- Numerical Recipes in C (2nd edition), William Press et al (Cambridge)
- Statistics for Particle Physics, Richard Barlow ()
- PYTHIA manual, CERN (<http://www.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>)
- ROOT manual, CERN (<http://root.cern.ch>)
- The Review of Particle Physics, <http://pdg.lbl.gov/>

Βιβλιογραφία (συνέχεια)

Βοηθητικά

- 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)
- Data Analysis Techniques for High Energy Physics, Fruwirth, Regler, Bock, Grotte, Notz (Cambridge)
- Pattern Classification, R.O. Duda et al (Willey)
- Introduction to Statistical Pattern Recognition, Fukunaga, (Academic Press)

Βιβλιογραφία (συνέχεια)

Βοηθητικά (συνέχεια)

- Statistical data analysis, Glen Cowan (Oxford Science Publication)
- 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) and useful links on Statistics in Particle Physics: <http://www.nu.to.infn.it/Statistics/>
- L.Lyons Open statistical issues in Particle Physics (2008): <http://projecteuclid.org/DPubS?service=UI&version=1.0&verb=Display&handle=euclid.aoas/1223908045>
- MINUIT: Function Minimization and Error Analysis Reference Manual, F. James, <http://wwwasdoc.web.cern.ch/wwwasdoc/minuit/minmain.html>
- Introduction to Linux (<http://tldp.org/LDP/intro-linux/html/>) and Ubuntu (<http://www.techsoup.org/learningcenter/software/page7858.cfm>)