

Άσκηση “ATLAS Z path” Τι θα μετρήσουμε σήμερα και πώς

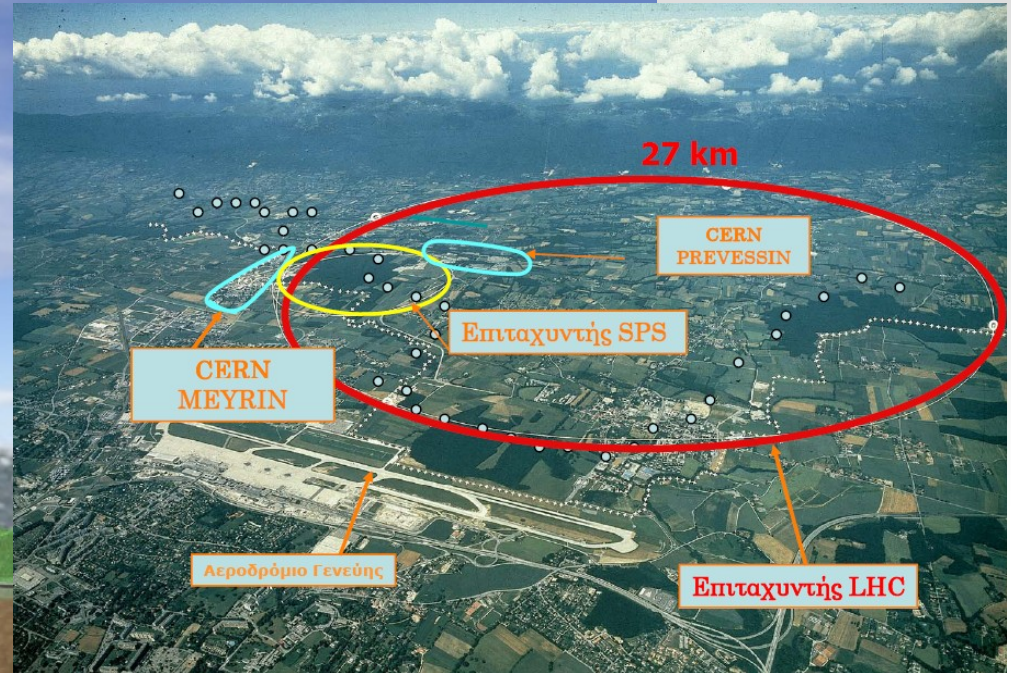
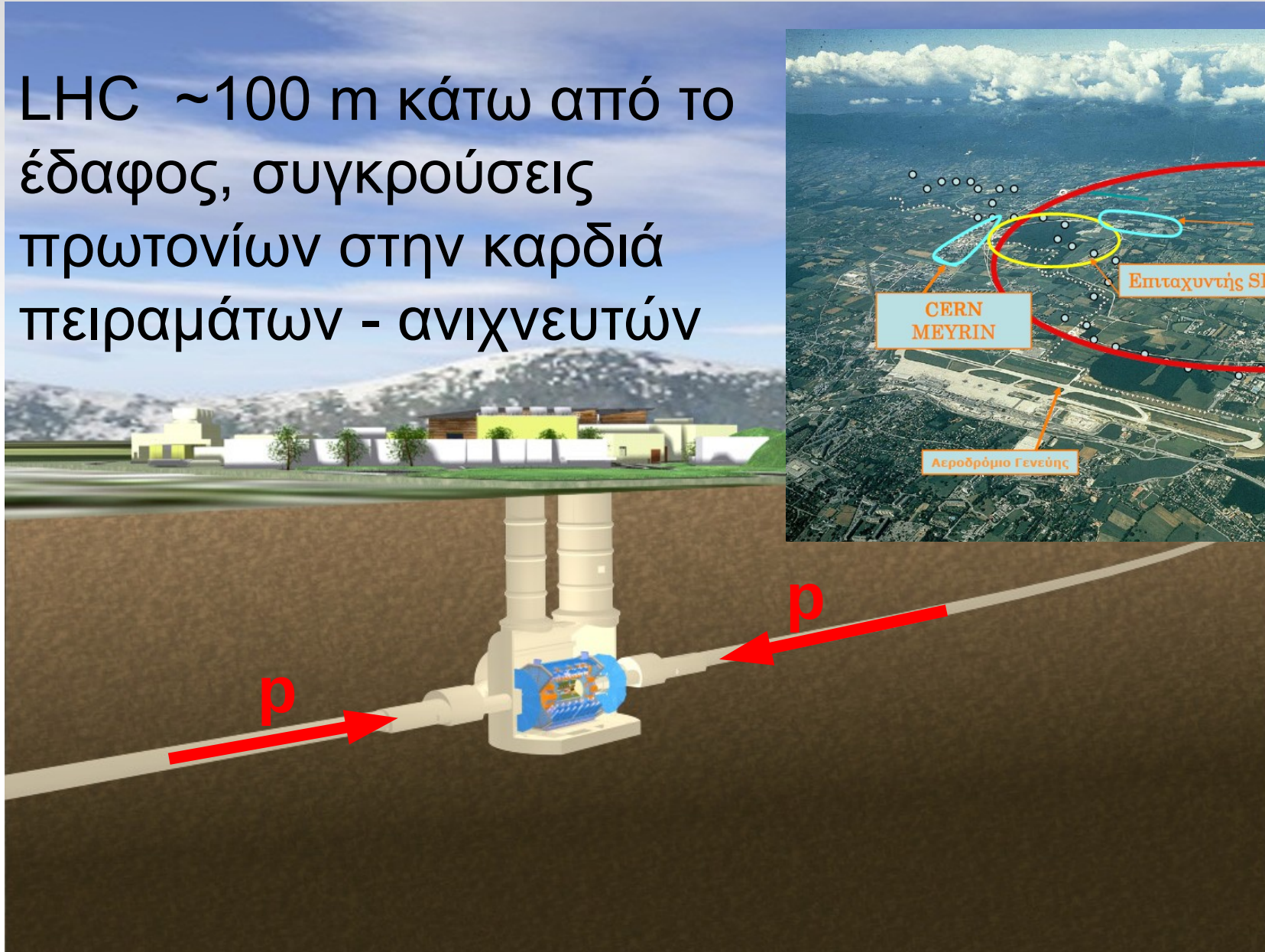
Εργαστήριο Πυρηνικής ΙΙ, 8ου εξαμήνου

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

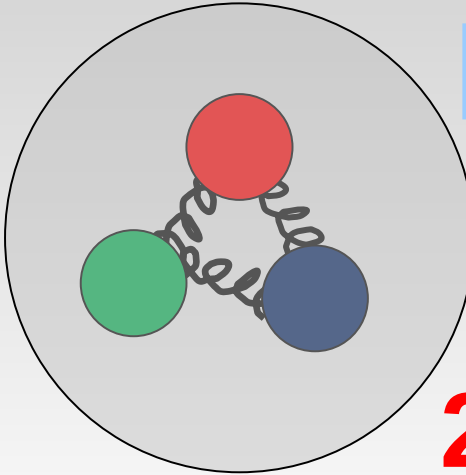
Το LHC και ο ανιχνευτής ATLAS

LHC ~100 m κάτω από το έδαφος, συγκρούσεις πρωτονίων στην καρδιά πειραμάτων - ανιχνευτών



1. Πριν τη σύγκρουση

Πρωτόνιο

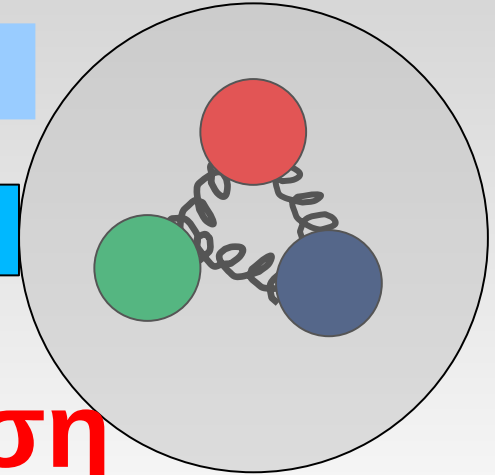


$$E_{total} = E_{proton1} + E_{proton2}$$

Ενέργεια: E_{p1}

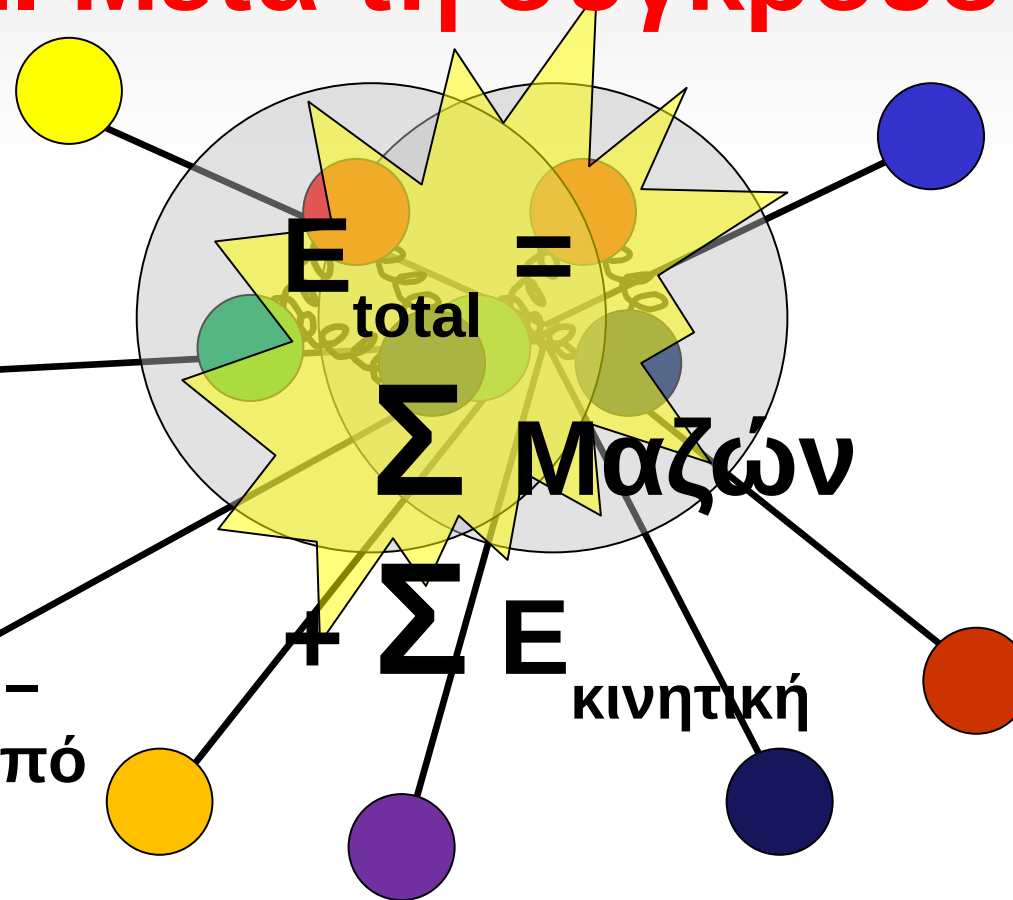
Ενέργεια: E_{p2}

Πρωτόνιο



2. Μετά τη σύγκρουση

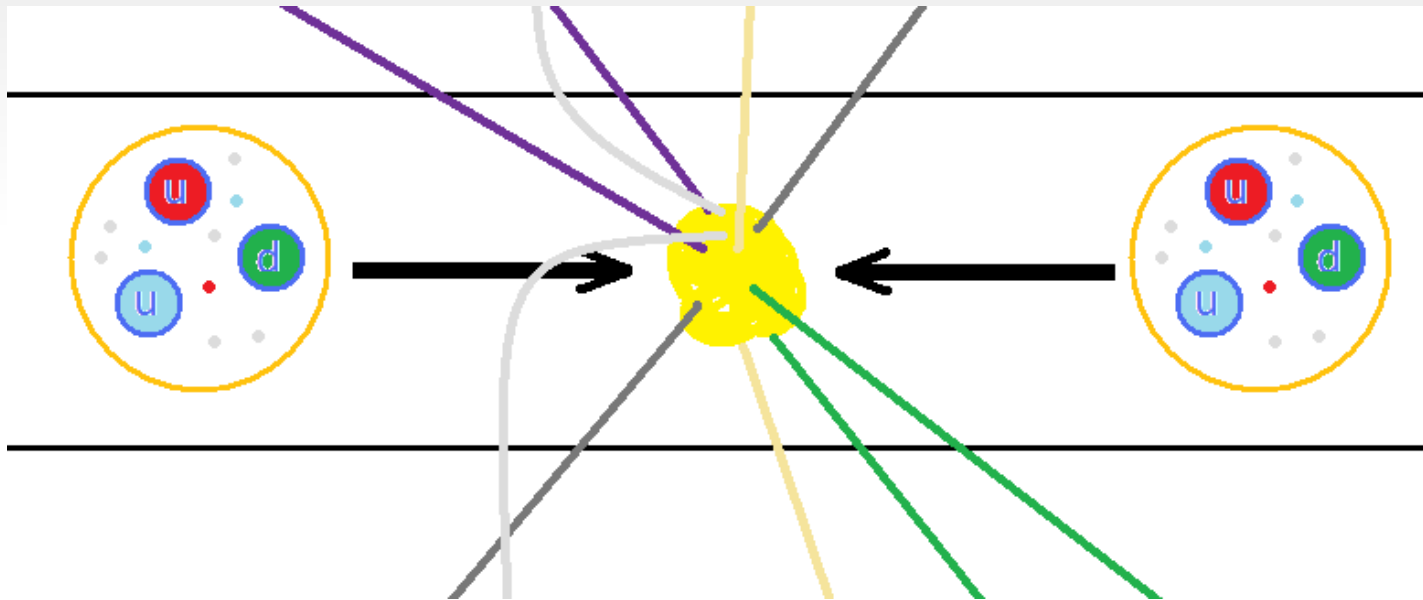
...διάφορα
σωματίδια
– γνωστά και
άγνωστα σε εμάς –
δημιουργούνται από
την ενέργεια
σύγκρουσης



Kordas

... όσο
μεγαλύτερη η
ενέργεια
σύγκρουσης,
τόσο πιο βαριά
σωματίδια
μπορεί να
παραχθούν!
**Μποζόνια Z,
Higgs,
Άγνωστα μέχρι
τώρα σωματίδια**

Στη σύγκρουση παράγονται πολλά και διαφορετικών ειδών σωματίδια που ταξιδεύουν προς όλες τις κατευθύνσεις



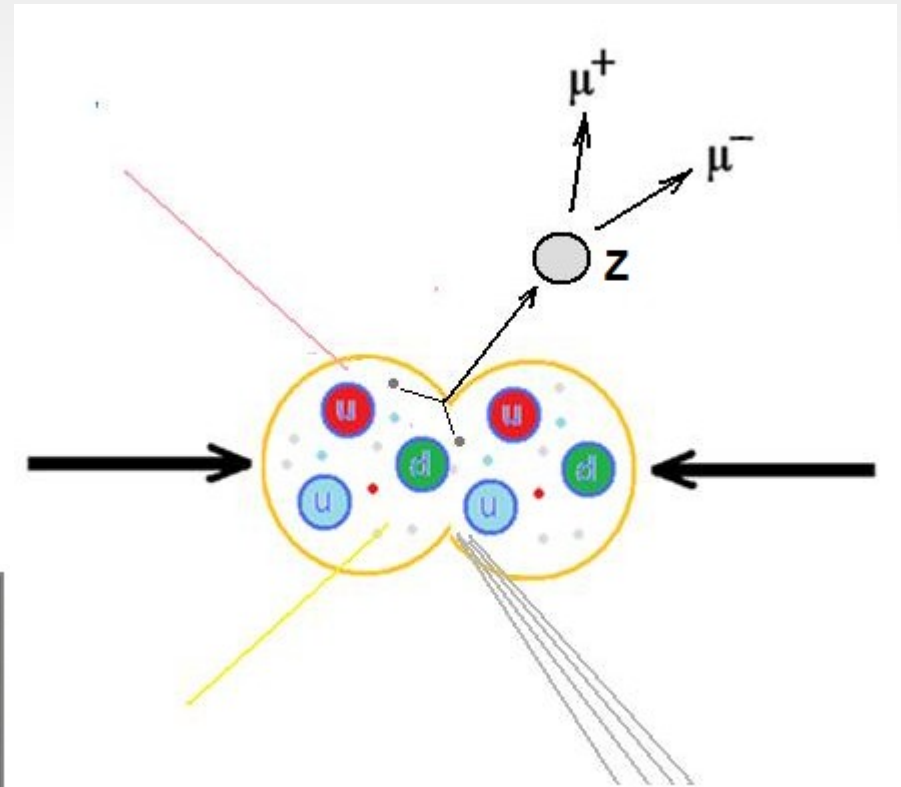
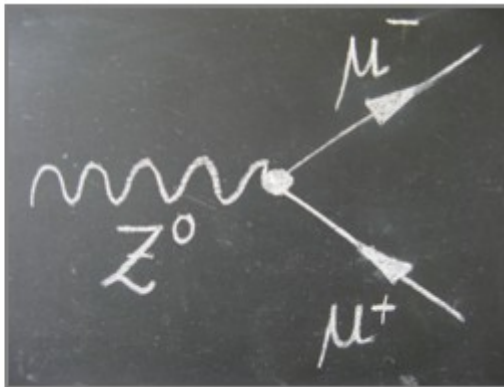
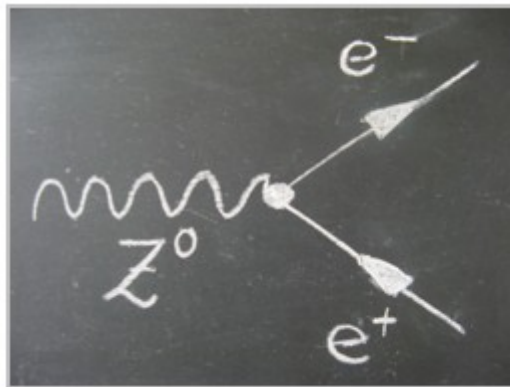
Σήμερα θα ψάξουμε για “γεγονότα” (= συγκρούσεις) όπου παράχθηκαν ουδέτερα σωματίδια τα οποία κατόπιν διασπάστηκαν σε $e^+ e^-$ ή $\mu^+ \mu^-$

Για παράδειγμα:

$$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

ή

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



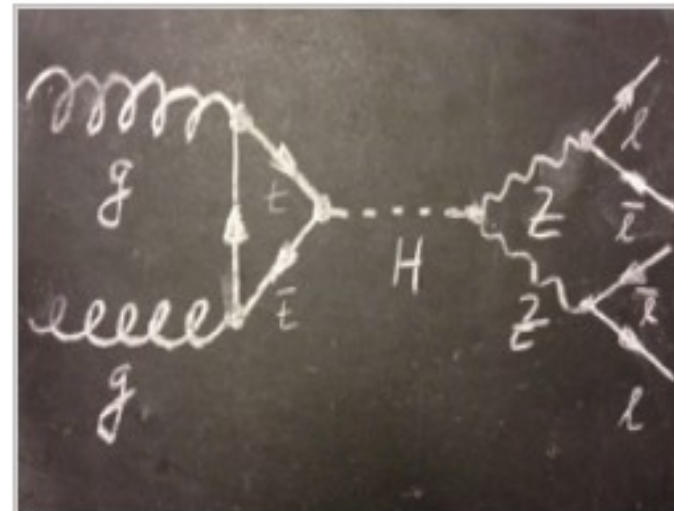
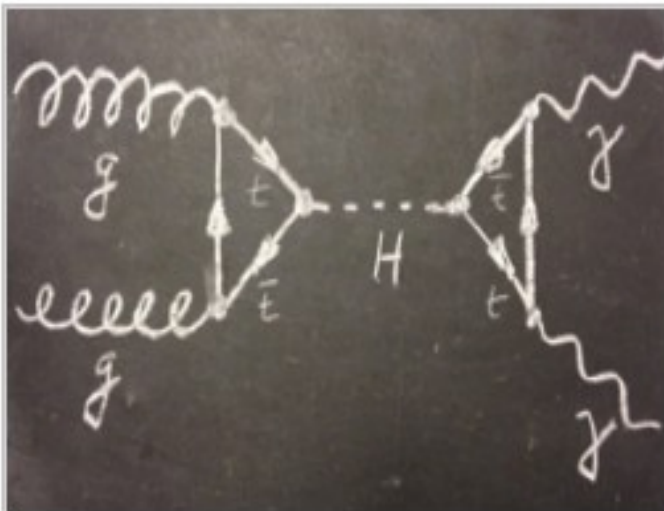
Σήμερα θα ψάξουμε για “γεγονότα” (= συγκρούσεις) όπου παράχθηκαν ουδέτερα σωματίδια τα οποία κατόπιν διασπάστηκαν σε

$$e^+ e^- \text{ ή } \mu^+ \mu^- \text{ ή } \gamma\gamma,$$

$$\text{ή } e^+ e^- e^+ e^- \text{ ή } e^+ e^- \mu^+ \mu^- \text{ ή } \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

Ψάχνουμε και πέρα από τα ήδη γνωστά.
Πρωτοεμφανιζόμενα! → ΑΝΑΚΑΛΥΨΕΙΣ

$$H \rightarrow \gamma\gamma \text{ ή } H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$$



ΠΩΣ λέμε ότι παρατηρήσαμε ένα σωματίδιο (π.χ., το Z ή το Higgs) που ζεί τόσο λίγο που δεν αφήνει ίχνη στον ανιχνευτή μας;

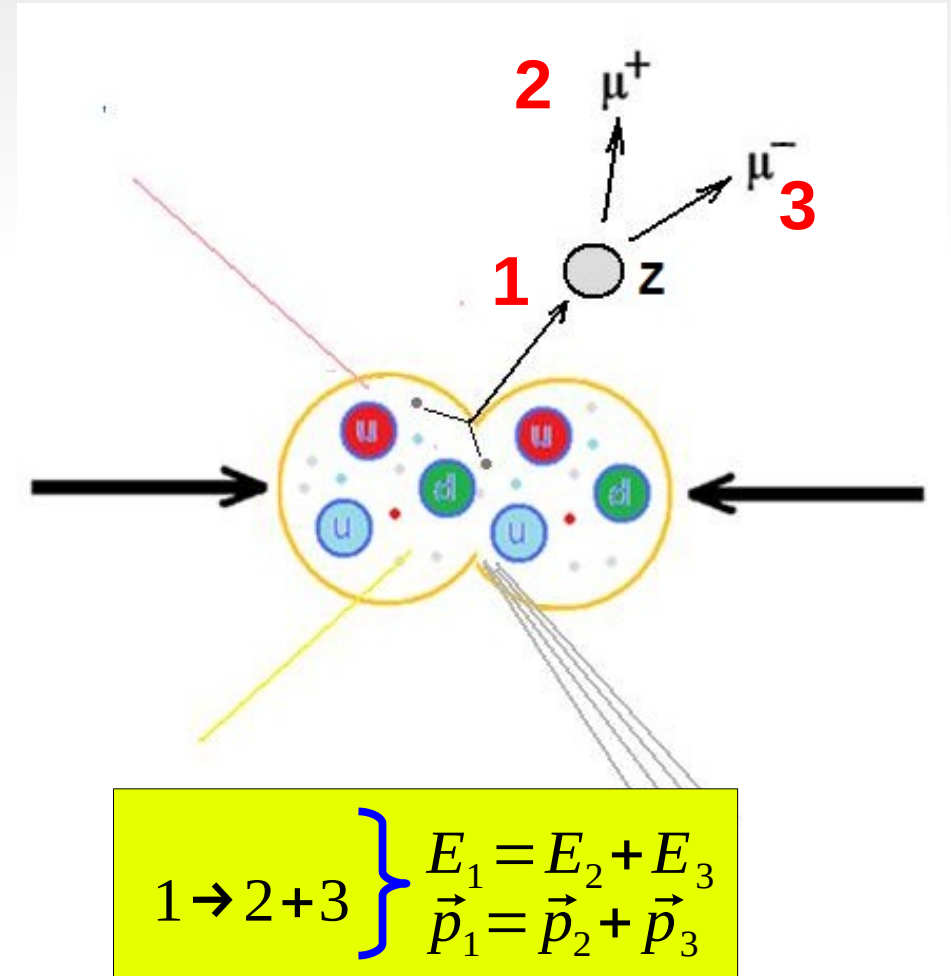
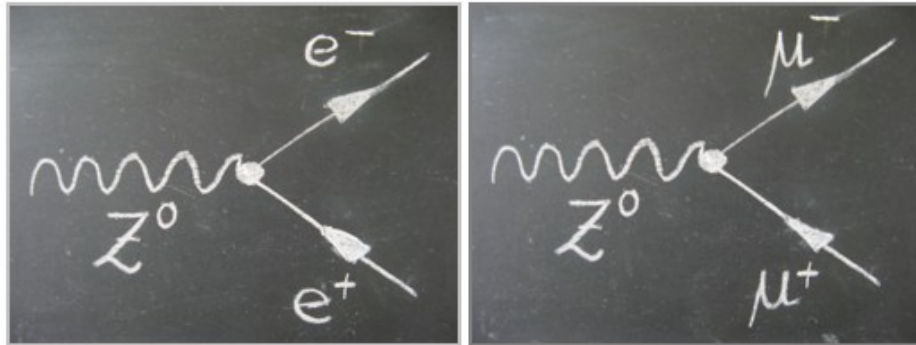
-> Από τα παιδιά του!

Για παράδειγμα:

$$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

ή

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

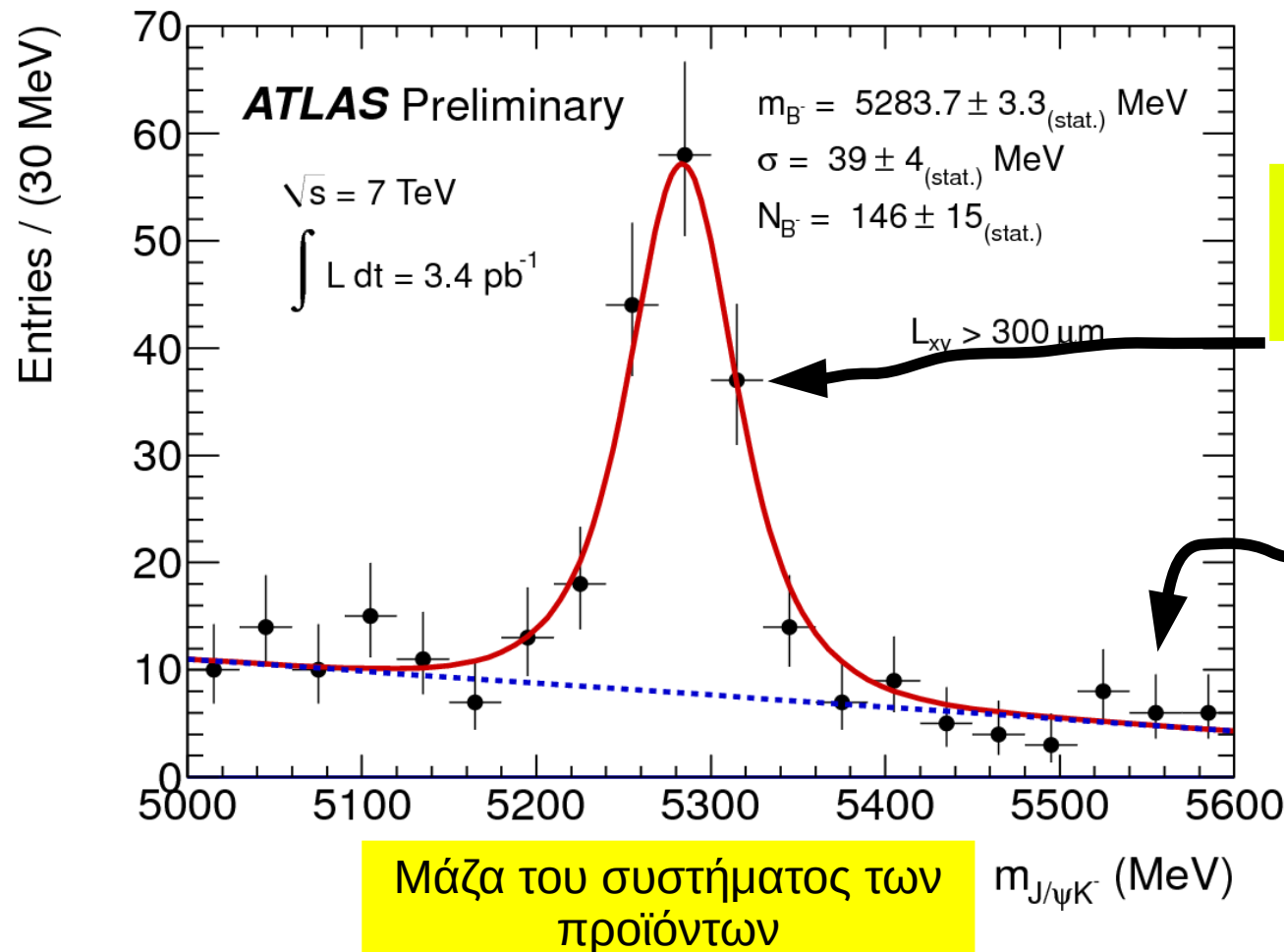


Μετράμε τα τελικά προϊόντα για να γνωρίσουμε τους γονείς που δεν υπάρχουν πιά!

Ενέργεια και ορμή μητρικού σωματιδίου =
ενέργεια και ορμή, αντίστοιχα, των προϊόντων/παιδιών

$$E = mc^2 \rightarrow E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2 = m^2 + p^2 \rightarrow m = \sqrt{E^2 - p^2}$$

Απαριθμήσεις
(= αριθμός μετρήσεων)



Τα σωματίδια που συνδυάσαμε είναι από κοινό γονιό!

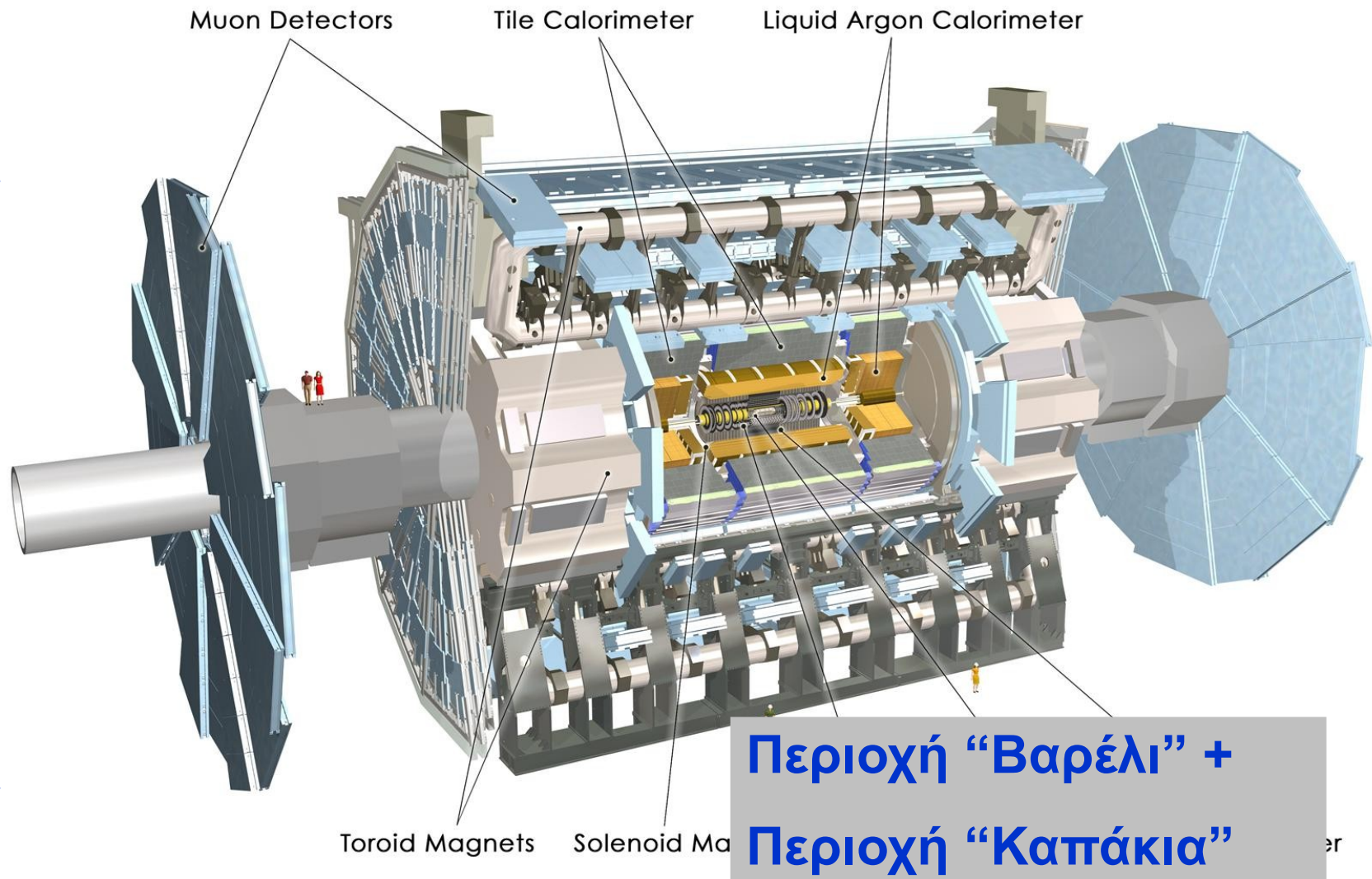
Τα σωματίδια που συνδυάσαμε είναι άσχετα μεταξύ τους

Ο ανιχνευτής ATLAS στο LHC

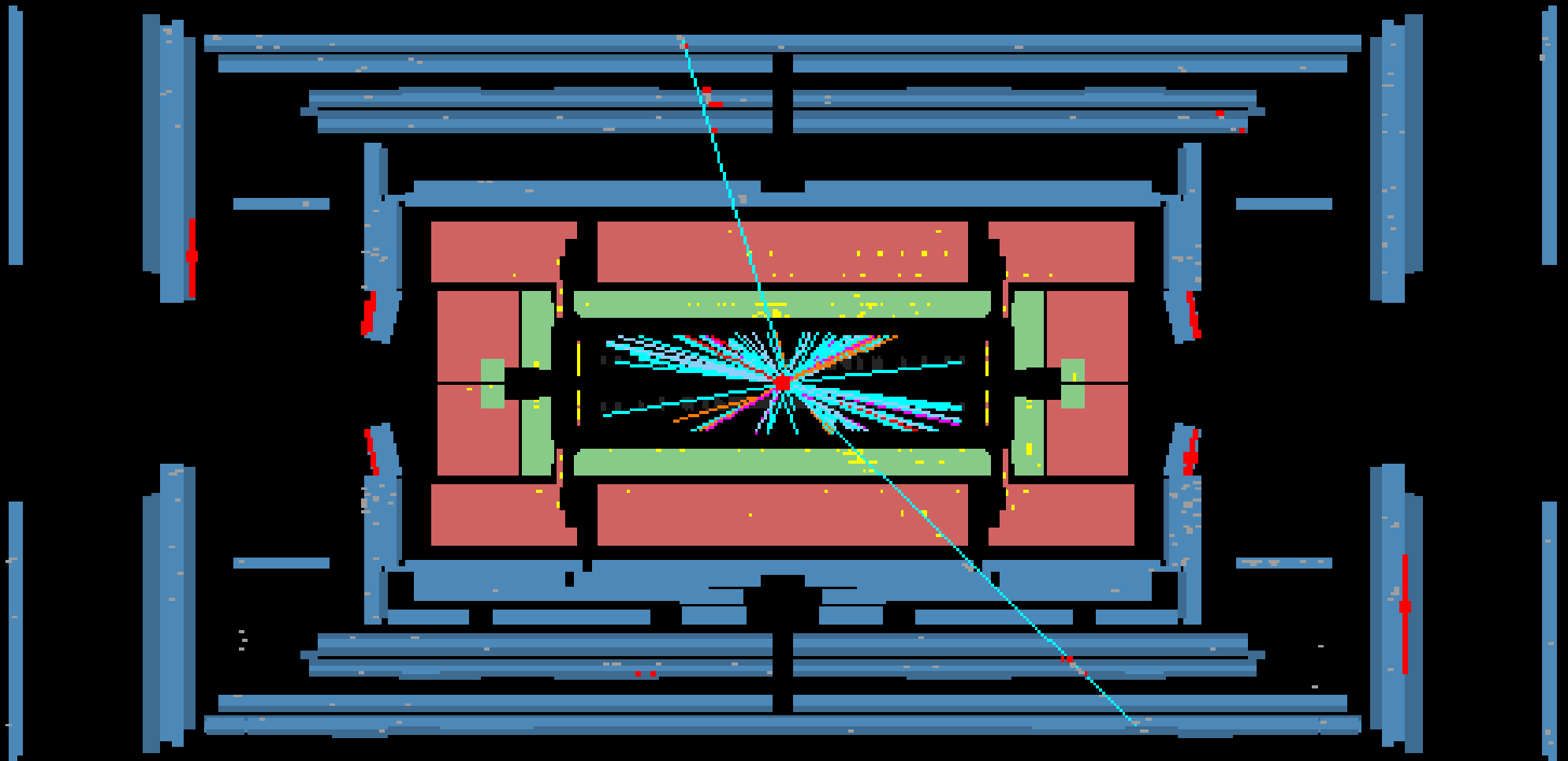
κυλινδρική συμμετρία

43 m

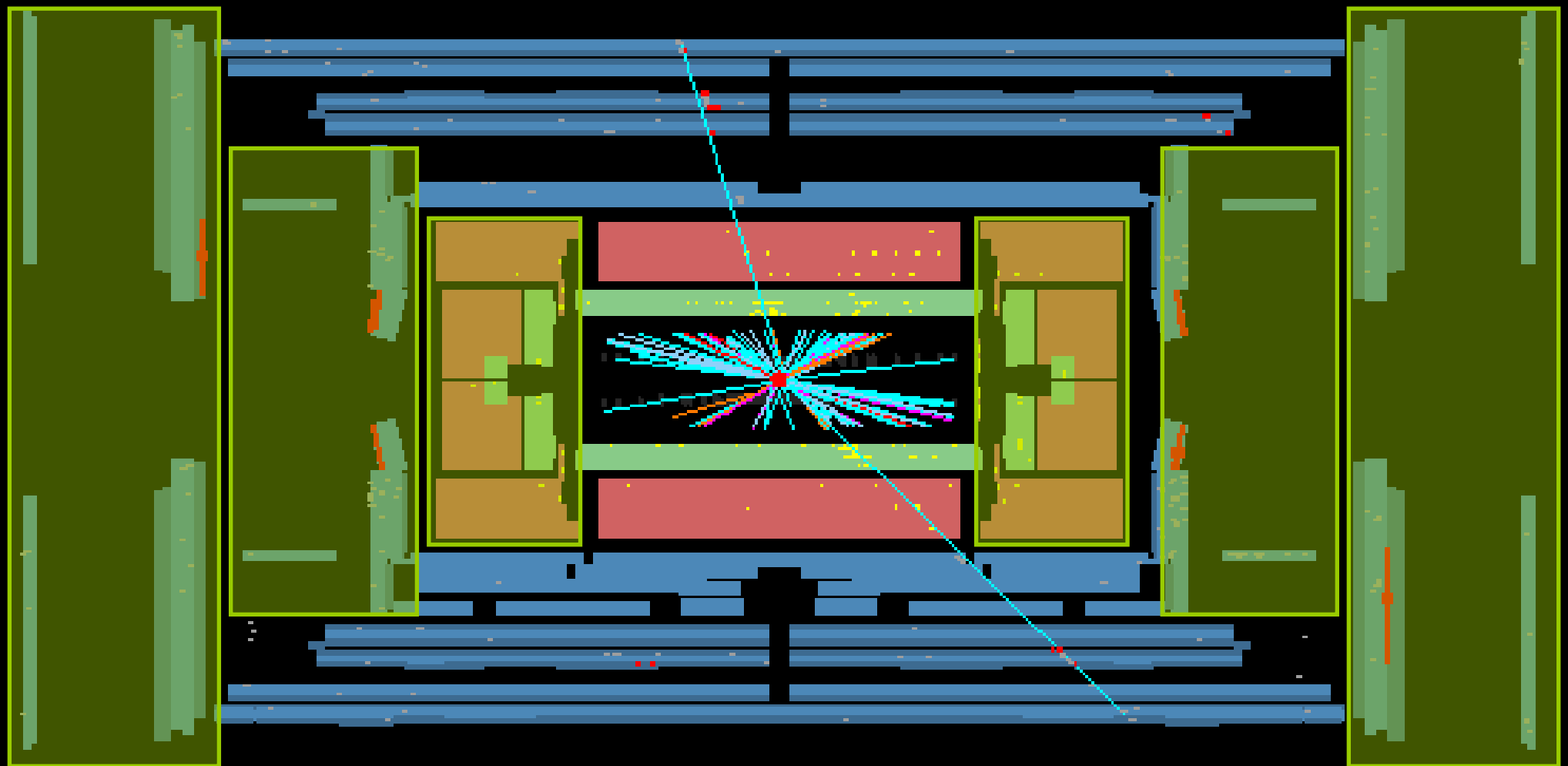
22 m



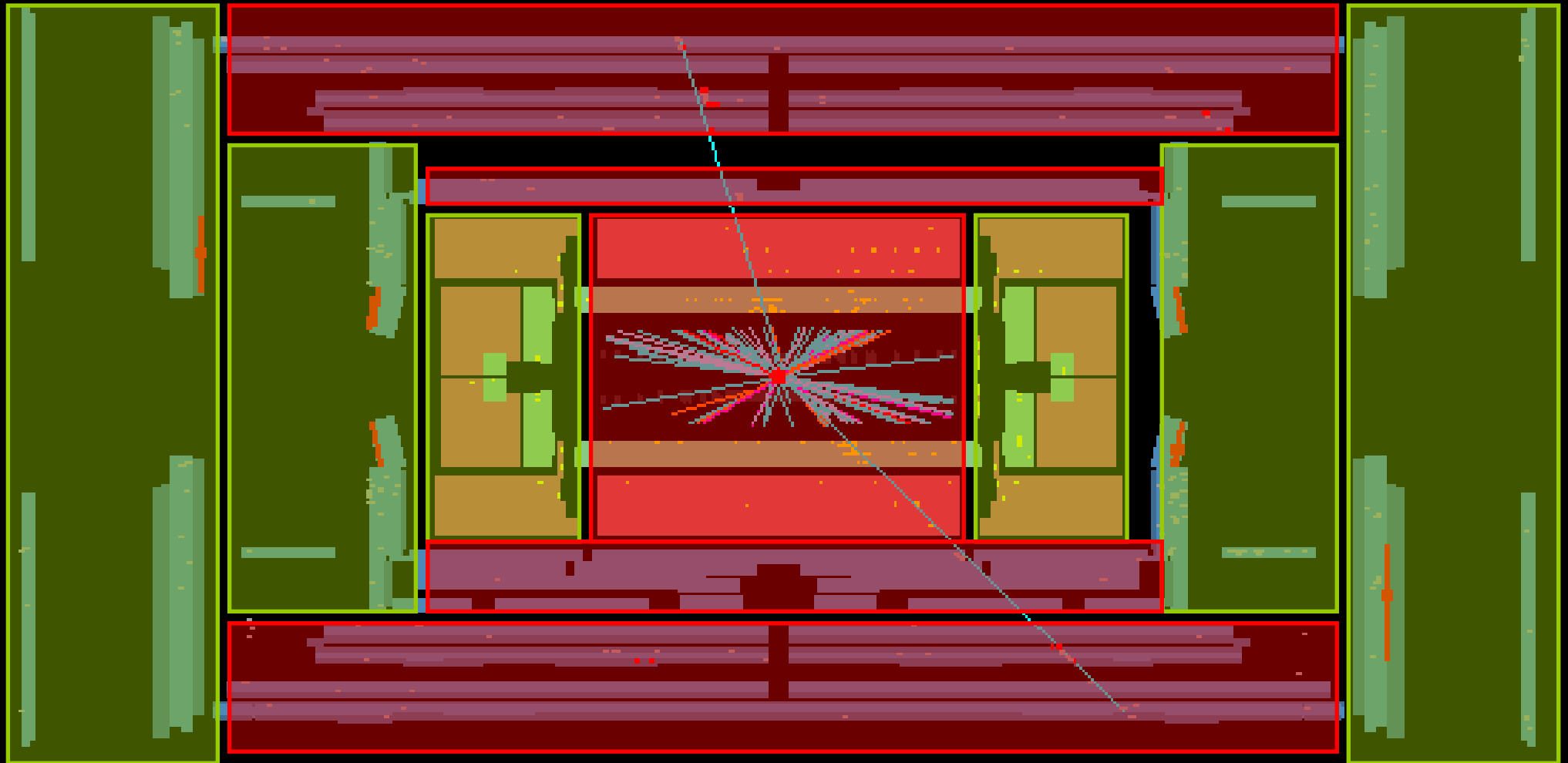
ATLAS – άποψη απο “δίπλα”



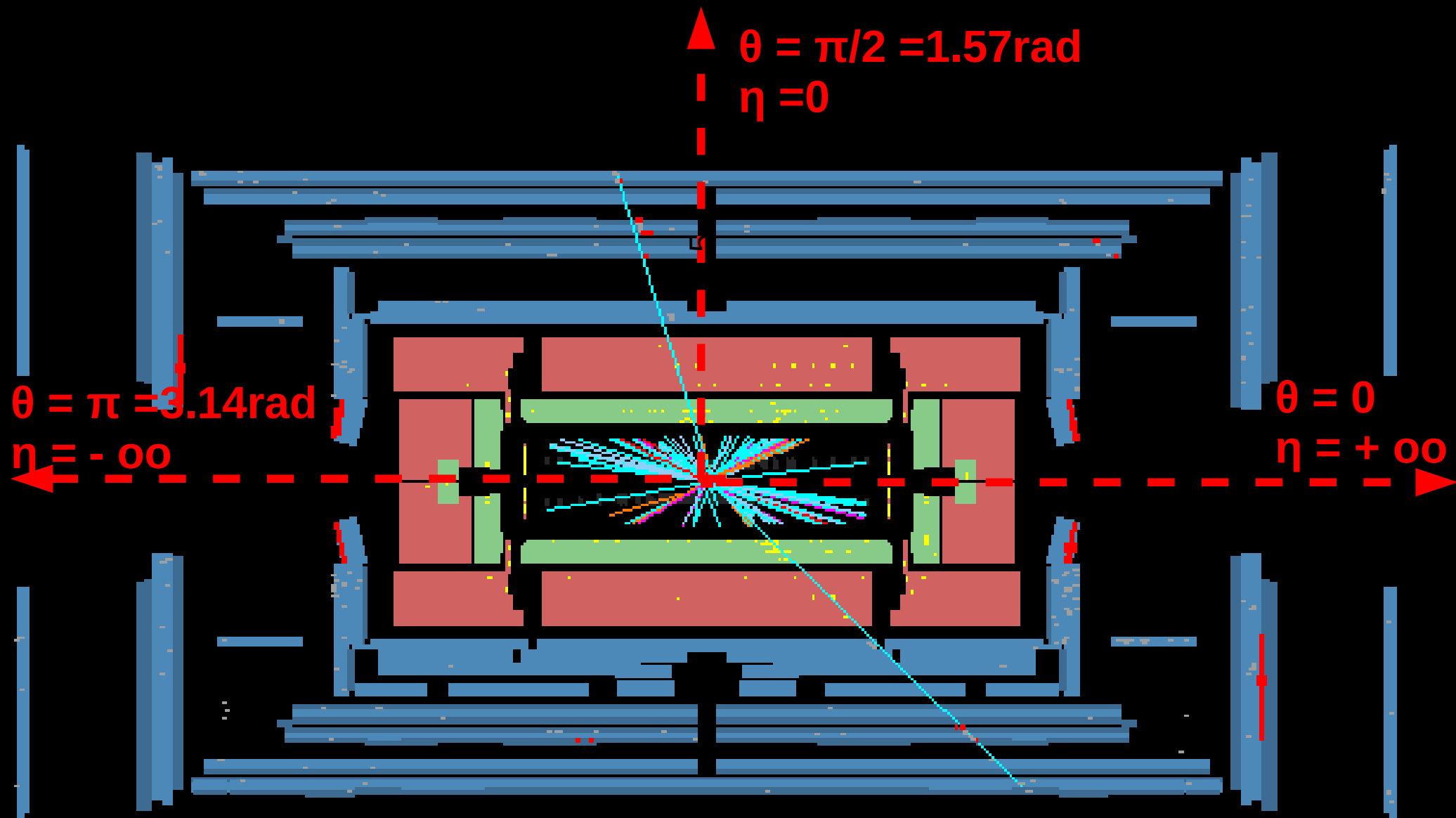
Καπάκια



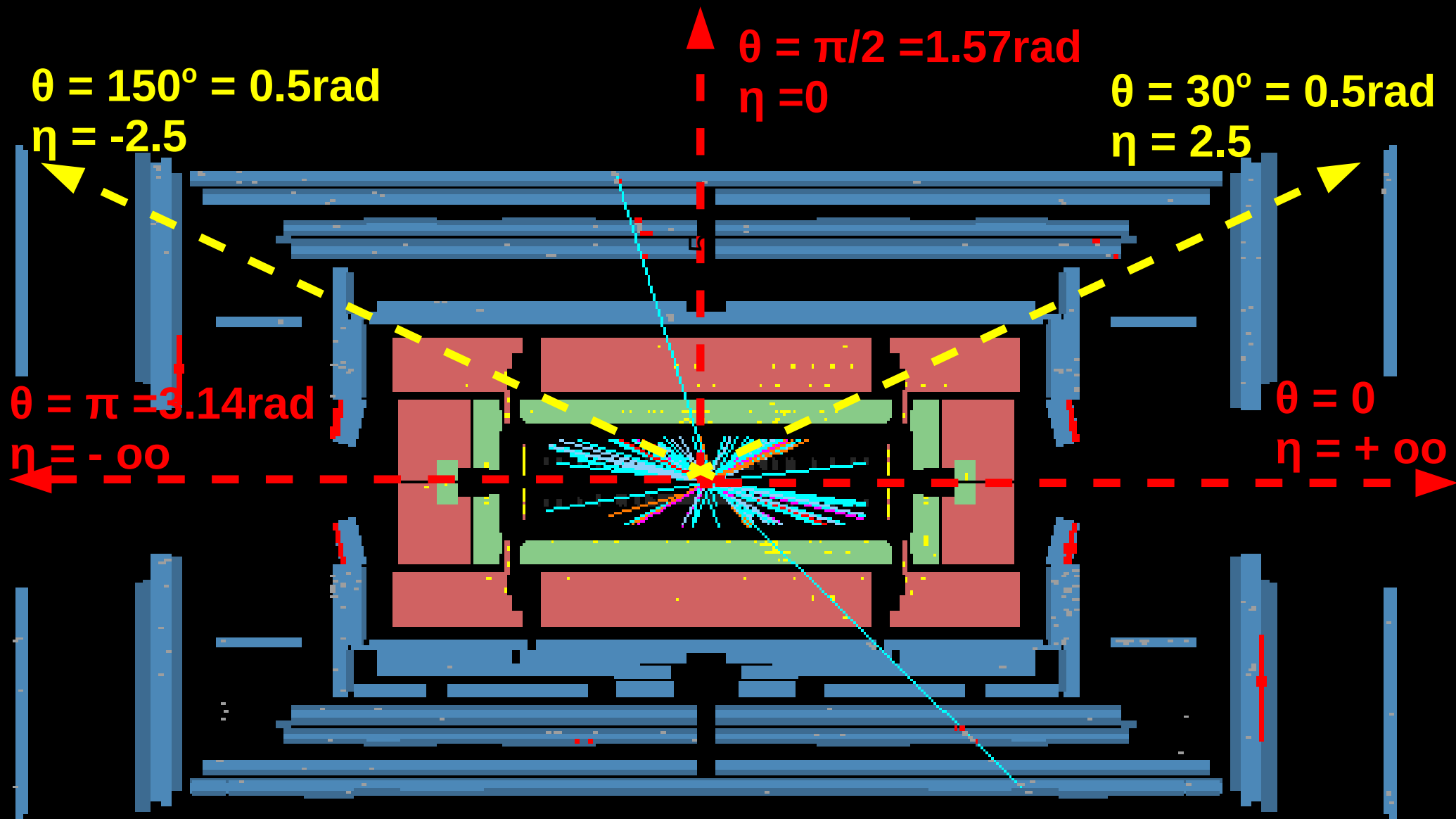
Καπάκια + **Βαρρέλι** = **όλο**



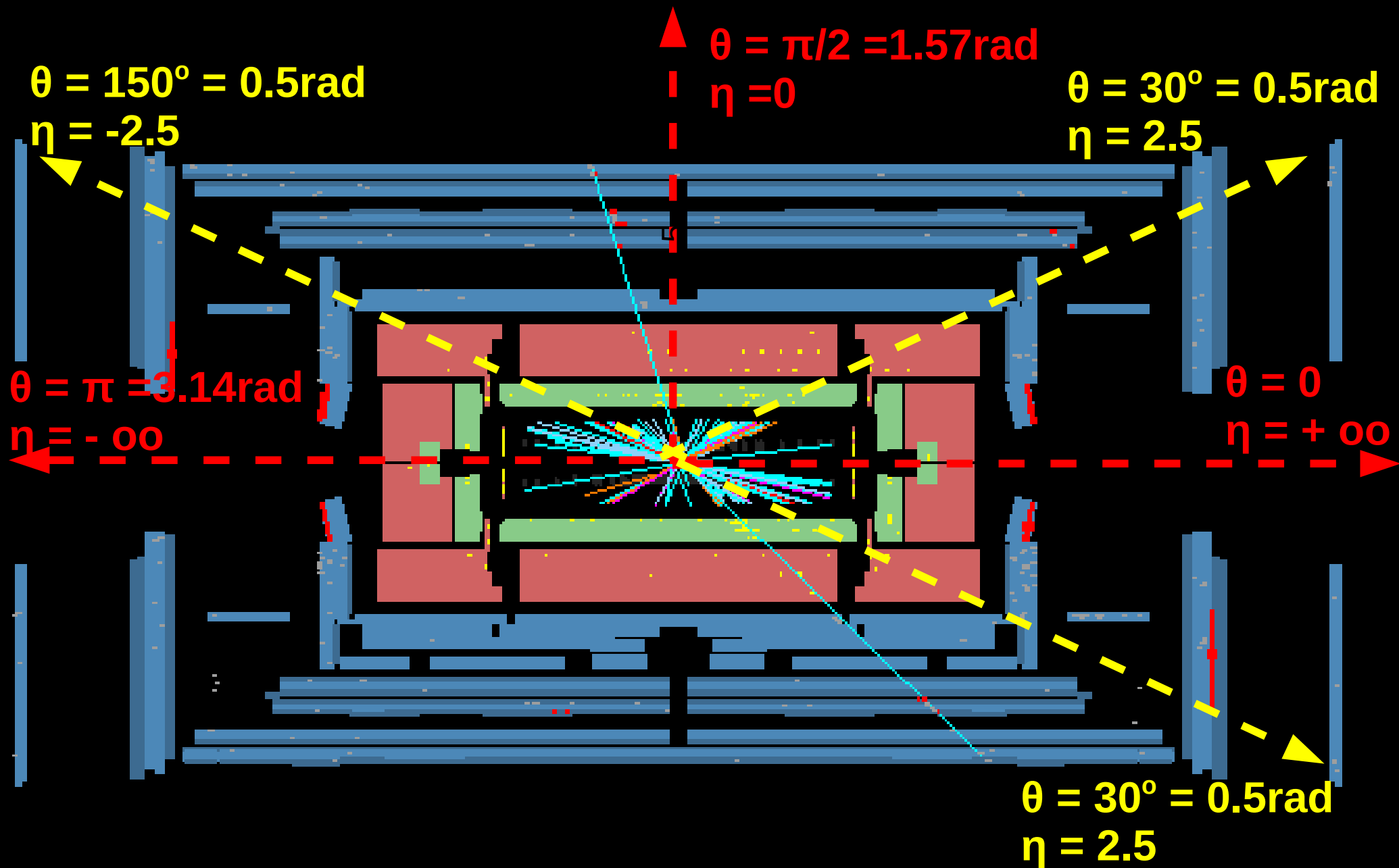
ATLAS – άποψη απο “δίπλα”



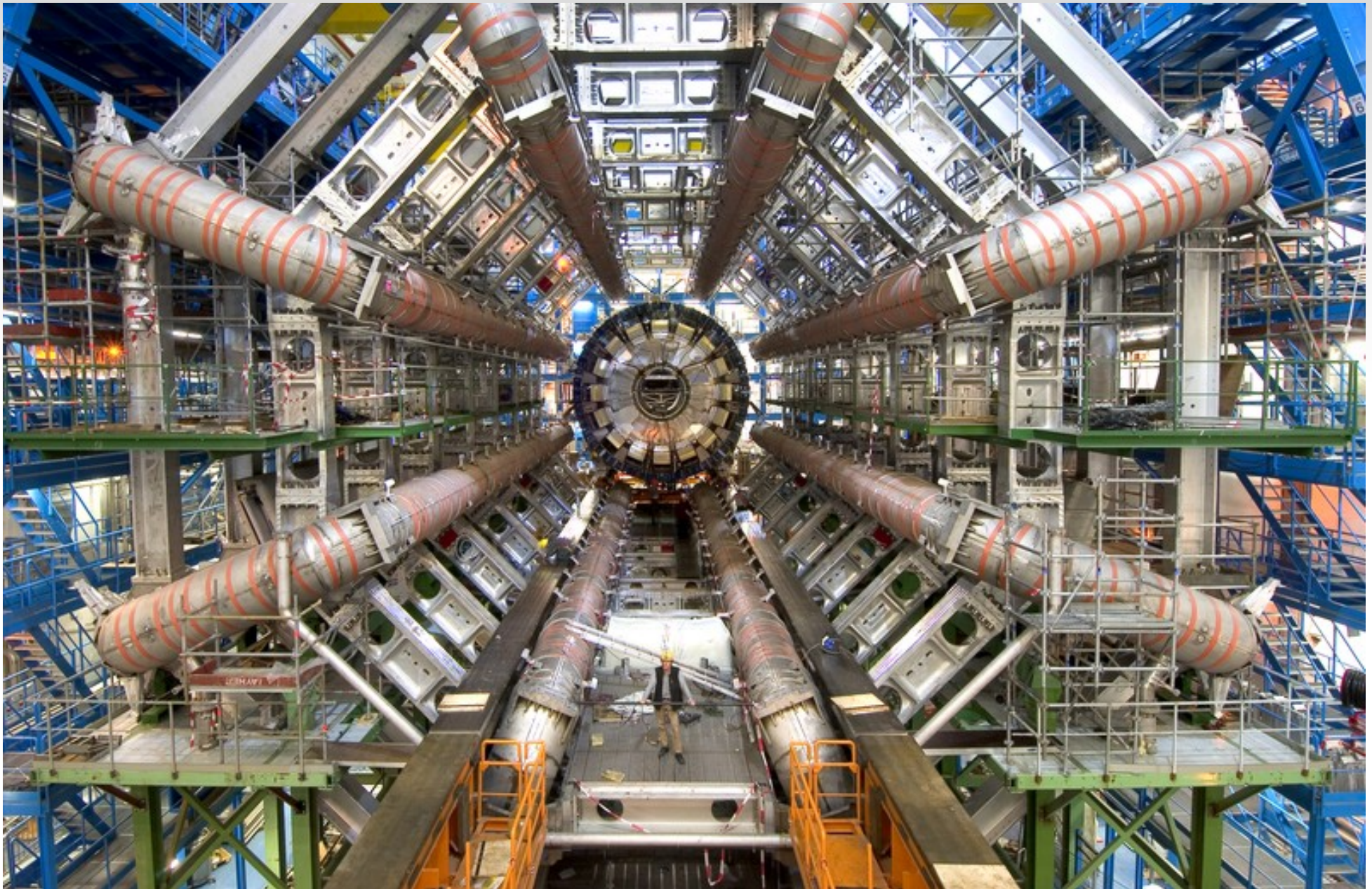
ATLAS – άποψη απο “δίπλα”



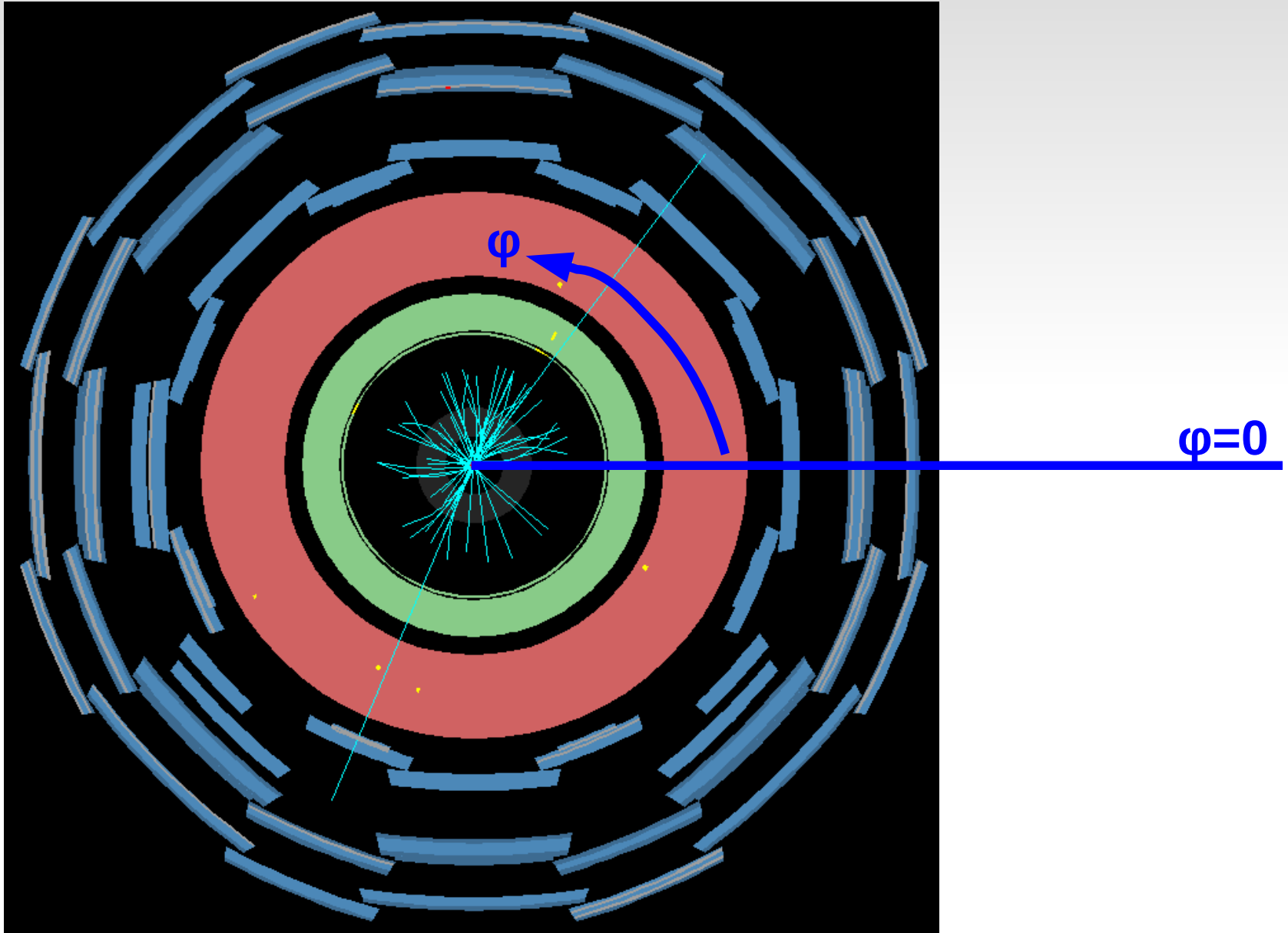
ATLAS – άποψη απο “δίπλα”



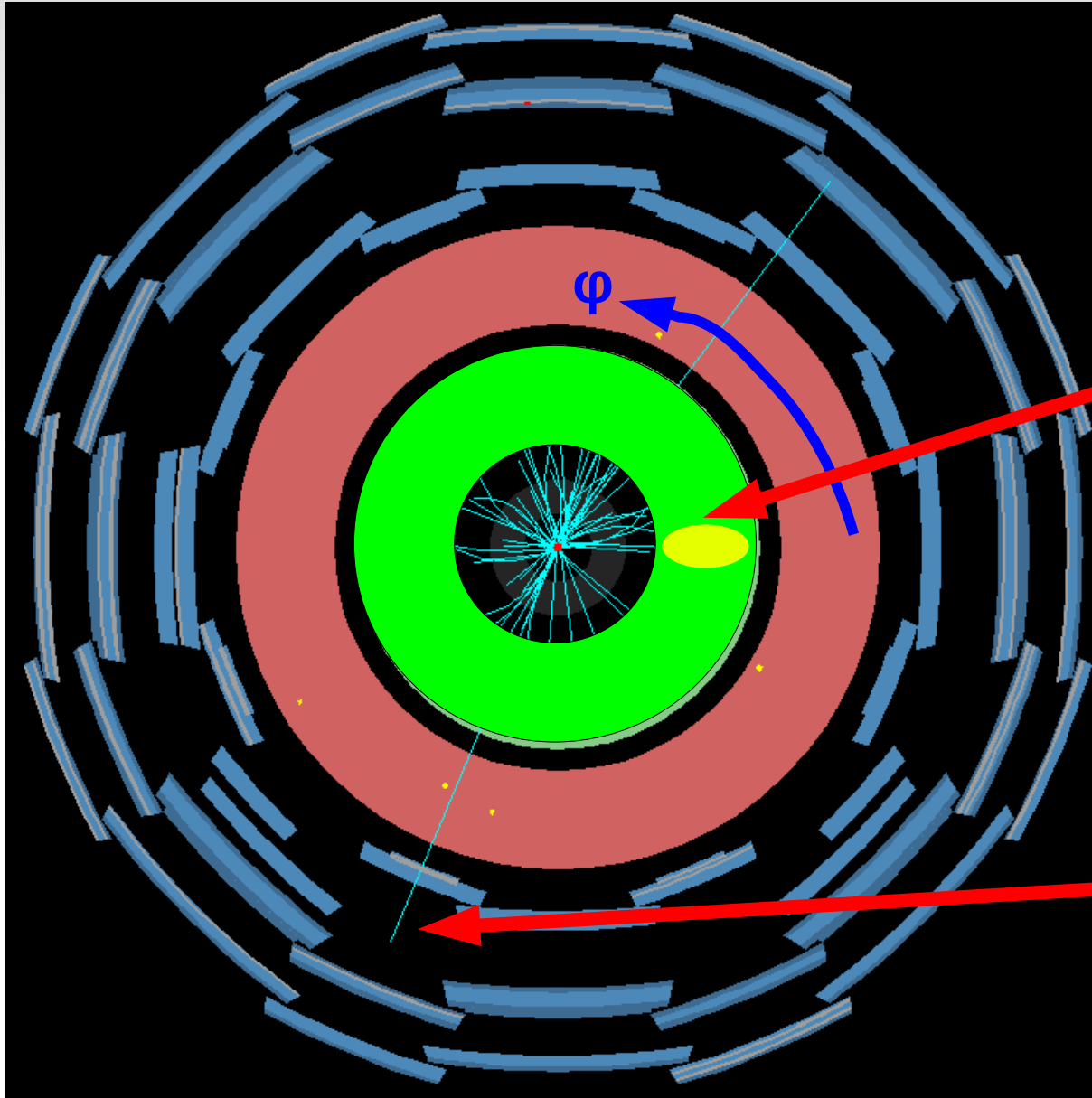
Άποψη κοιτώντας όπως βλέπει τον ATLAS ένα πρωτόνιο του LHC



Άποψη κοιτώντας όπως βλέπει τον ATLAS ένα
πρωτόνιο του LHC. ΠΡΟΣΟΧΗ:
στην άποψη αυτή δείχνουμε μόνο το “βαρρέλι”

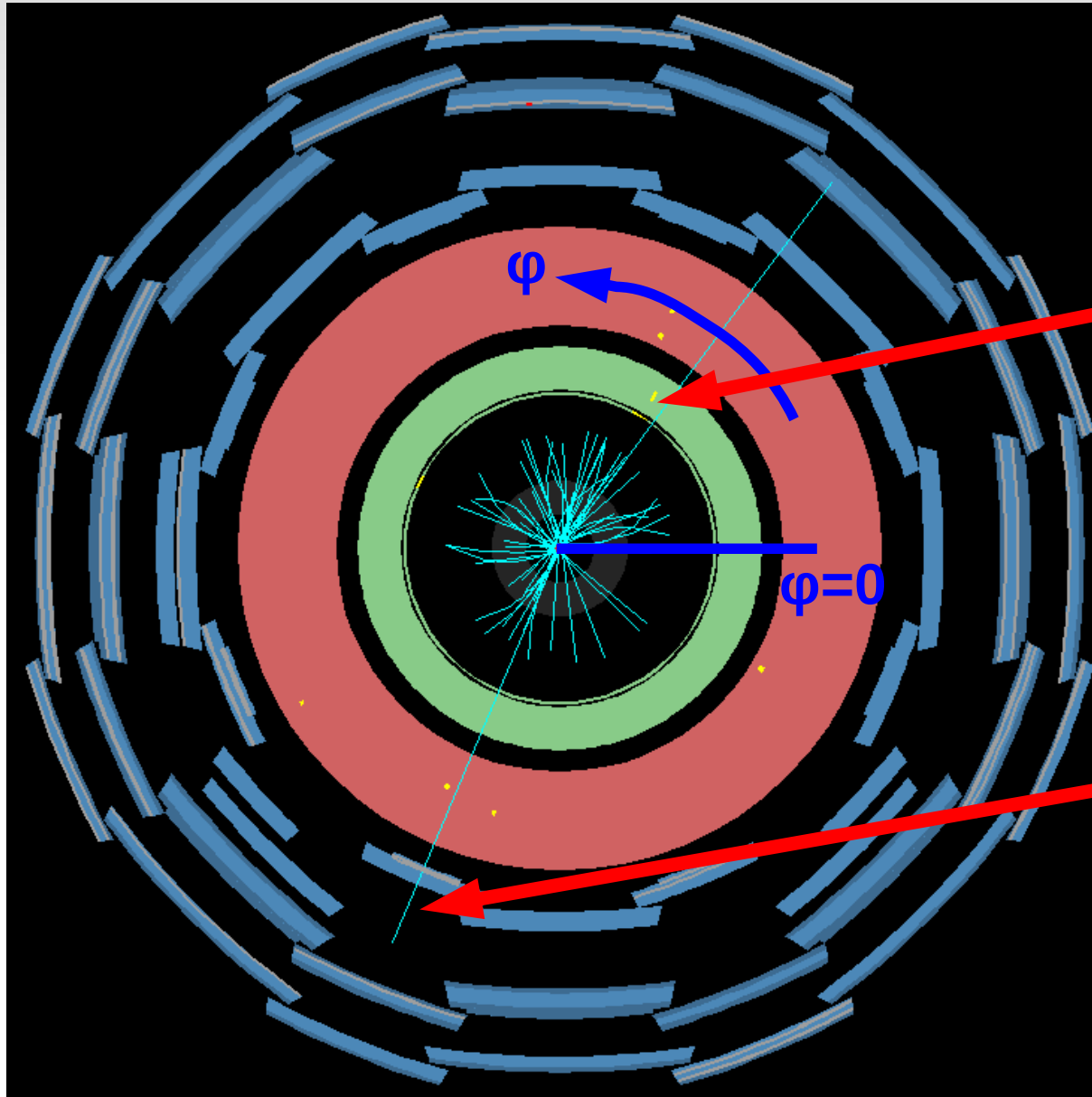


Άποψη κοιτώντας όπως βλέπει τον ATLAS ένα πρωτόνιο του LHC. ΠΡΟΣΟΧΗ: στην άποψη αυτή δείχνουμε μόνο το “βαρρέλι”



Εδώ, στο ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο, σταματούν Ηλεκτρόνια / ποζιτρόνια ($e^+ e^-$) και φωτόνια (γ) Τα μίονια ($\mu^+ \mu^-$) διαπερνούν όλο τον ανιχνευτή

Άποψη κοιτώντας όπως βλέπει τον ATLAS ένα πρωτόνιο του LHC. ΠΡΟΣΟΧΗ: στην άποψη αυτή δείχνουμε μόνο το “βαρρέλι”



Εδώ, στο ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο, σταματούν τα ηλεκτρόνια

Τα μίονια διαπερνούν όλο τον ανιχνευτή

HYPATIA (ΥΠΑΤΙΑ) : γεγονός $\mu^+ \mu^-$

4. Βλέπετε
Ότι κρατάει
Την τροχιά

2. Κάντε κλικ
Σε μια
τροχιά
- μίονιο

3. Κάντε κλικ στο "insert Muon"

1.

File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	η	M(2l) [GeV]	M(4l) [GeV]	e/ μ
event001.xml	9.494	Tracks 5	25.5	+ 21.1	2.823	0.632			μ

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Tracks 1	+	7.68	2.66	-0.024	2.788
Tracks 2	-	1.23	1.16	-0.271	1.247
Tracks 4	-	33.15	26.45	-3.053	0.924
Tracks 5	+	25.51	21.15	2.823	0.977
Tracks 6	-	15.18	4.08	-1.125	0.272
Tracks 7	+	10.22	1.89	0.412	0.186
Tracks 10	-	1.41	1.21	-0.936	2.103
Tracks 11	+	1.83	1.09	-0.513	2.502
Tracks 14	-	3.19	1.05	2.075	2.806
Tracks 17	-	7.66	2.61	0.472	2.794
Tracks 20	+	5.31	1.74	0.237	2.809
Tracks 21	-	3.09	1.77	0.284	0.611
Tracks 23	-	1.29	1.18	1.673	1.998

HYPATIA :

γεγονός $\mu^+ \mu^-$

7.

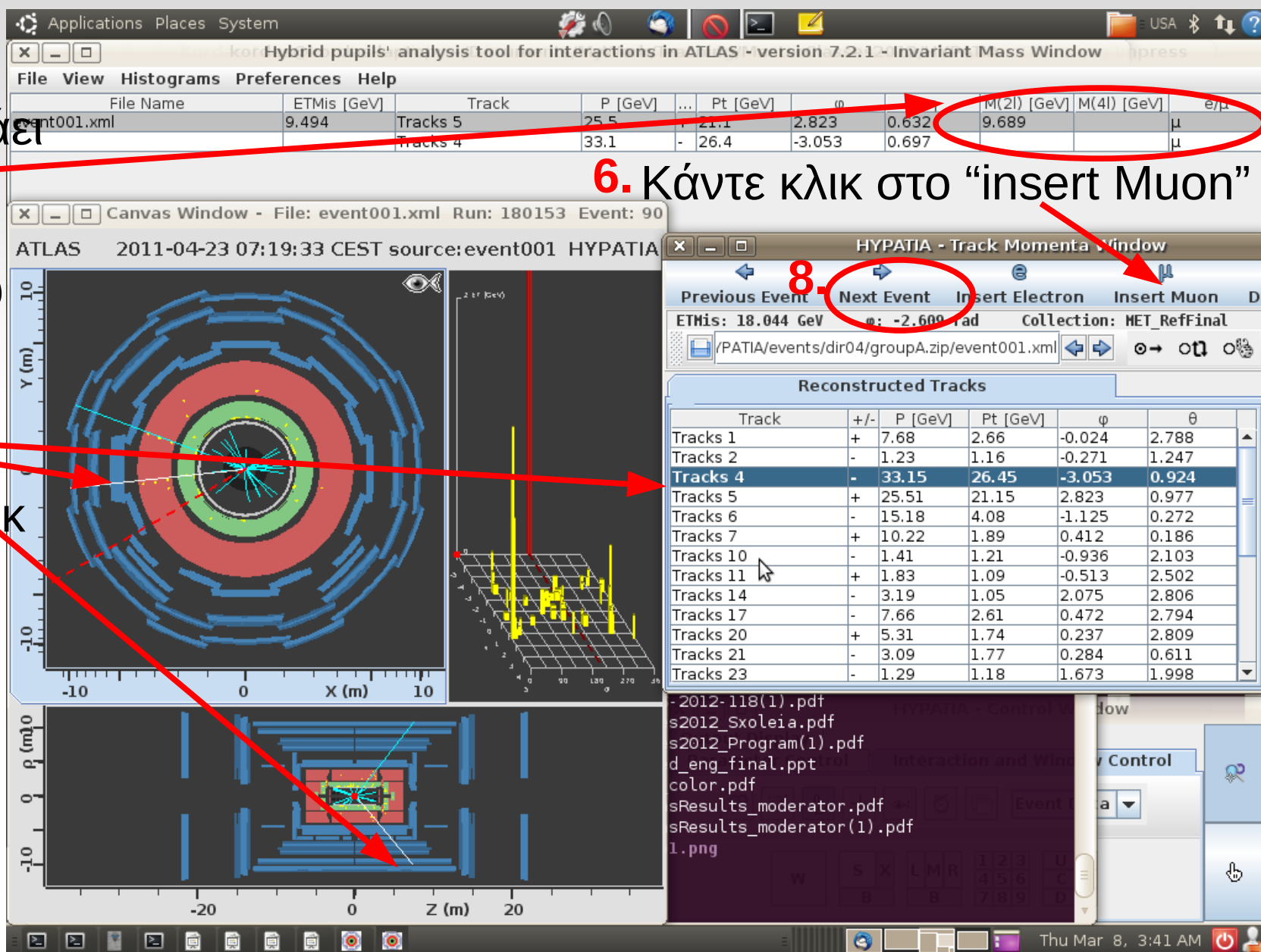
Βλέπετε
Ότι κρατάει
Τα μίονια
Και τη
Μαζα του
ζεύγους

5.

Κάντε κλικ
Σε μια
τροχιά
- μίονιο

6. Κάντε κλικ στο "insert Muon"

8.



HYPATIA: γεγονός $e^+ e^-$

3.

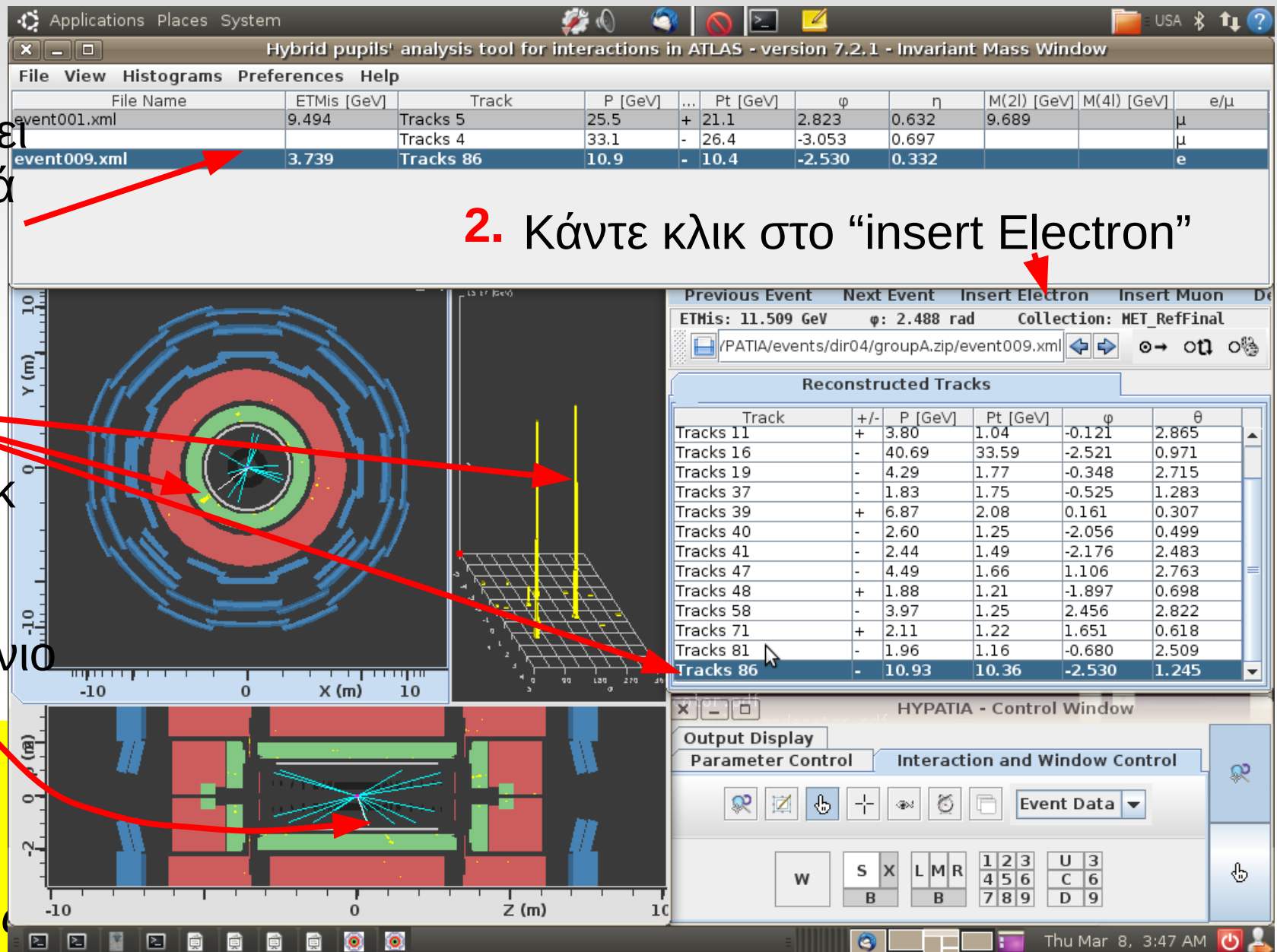
Βλέπετε
Ότι κρατάει
Την τροχιά
Απ'το
Γεγονός
αυτό

1.

Κάντε κλικ
Σε μια
τροχιά
- ηλεκτρόνιο

Καθαροί
λεπτοί
“πύργοι”
ενέργειας

2. Κάντε κλικ στο “insert Electron”



HYPATIA : γεγονός $e^+ e^-$

6.

Βλέπετε

Ότι κρατάει

Τα

ηλεκτρόνια

Και τη

Μαζα του

ζεύγους

4.

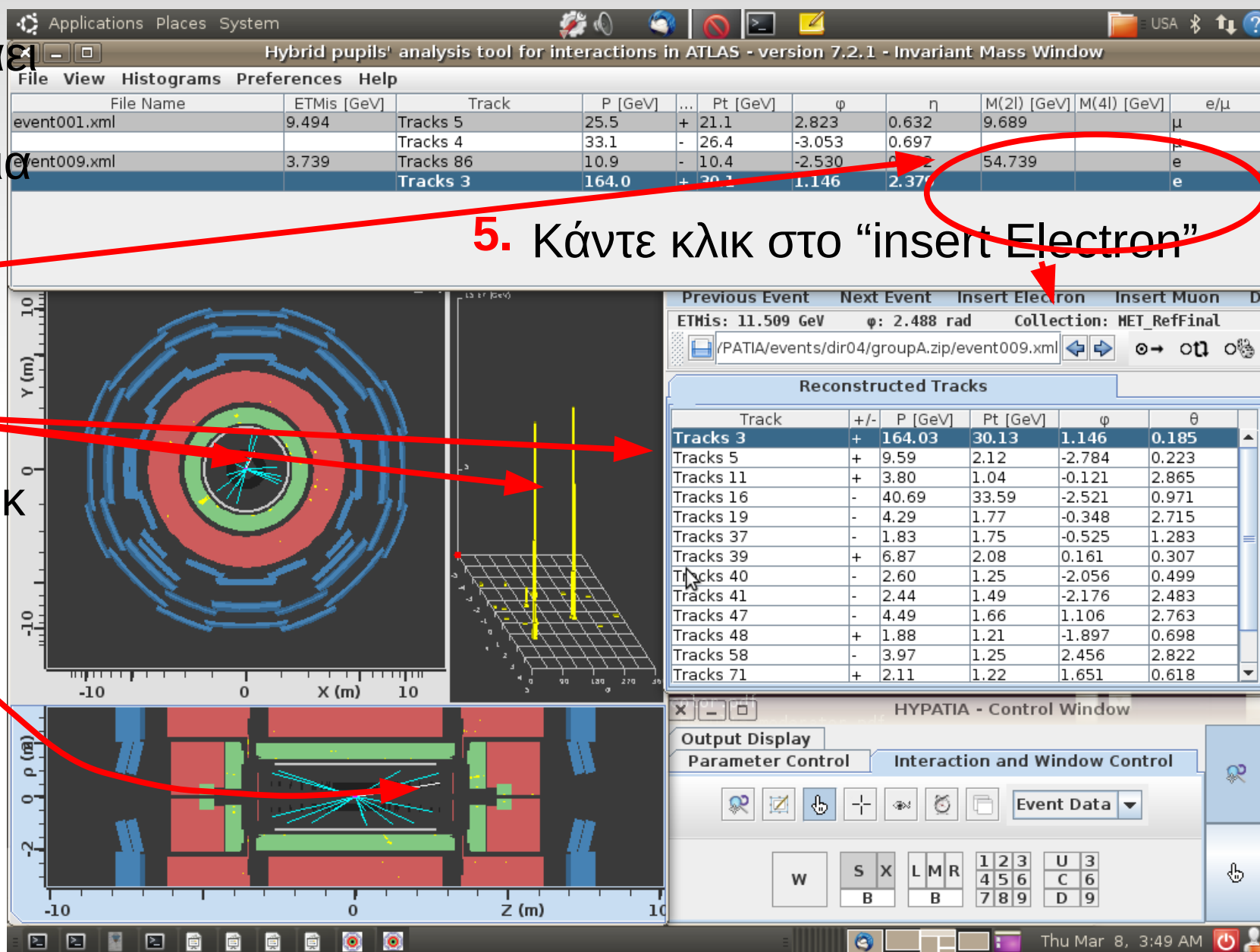
Κάντε κλικ

Σε μια

τροχιά

- μίονιο

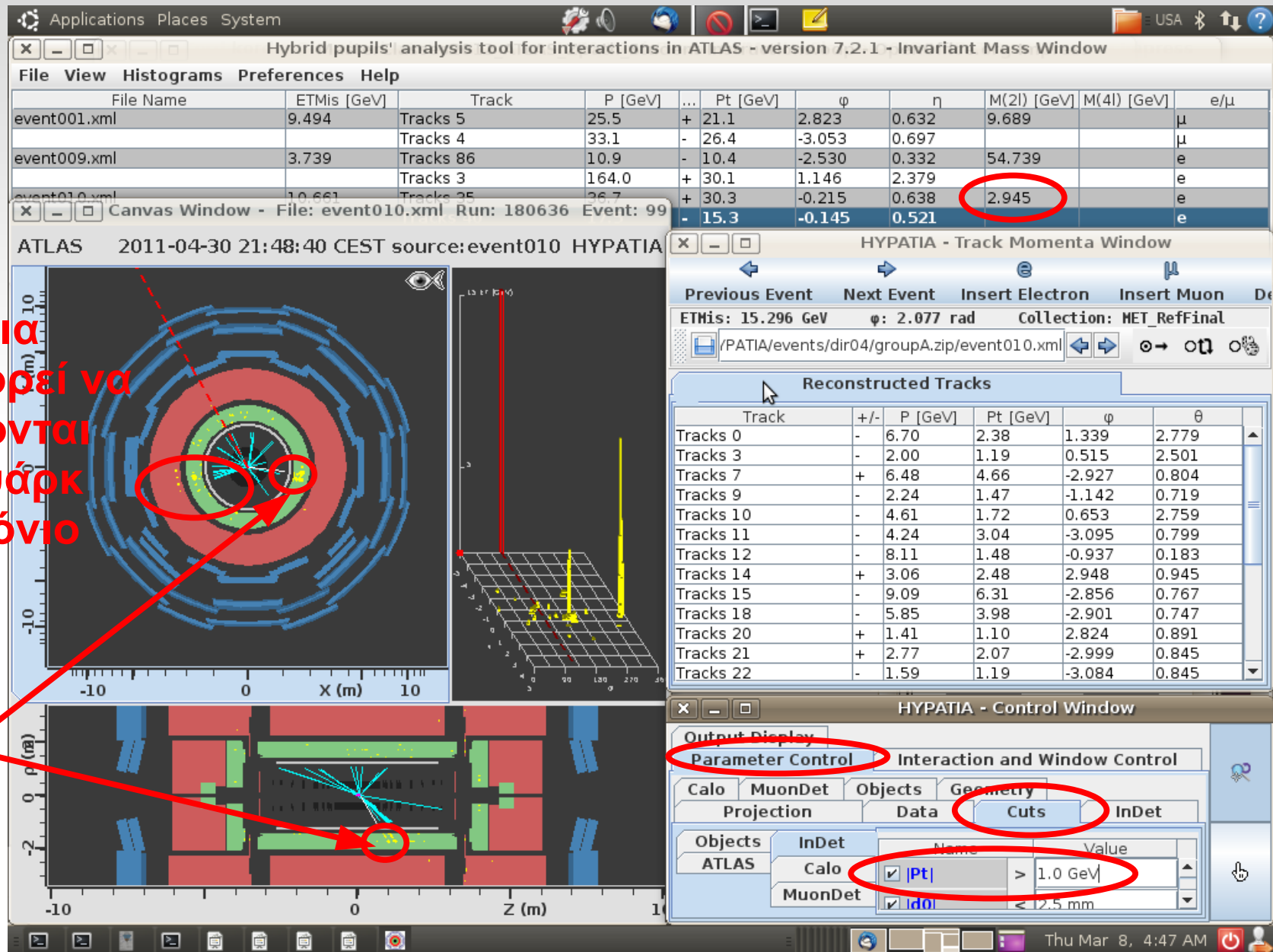
5. Κάντε κλικ στο "insert Electron"



HYPATIA: άλλο γεγονός $e^+ e^-$

“jet”
από
Σωματίδια
Που μπορεί να
Προέρχονται
Από κουάρκ
ή γκλουόνιο

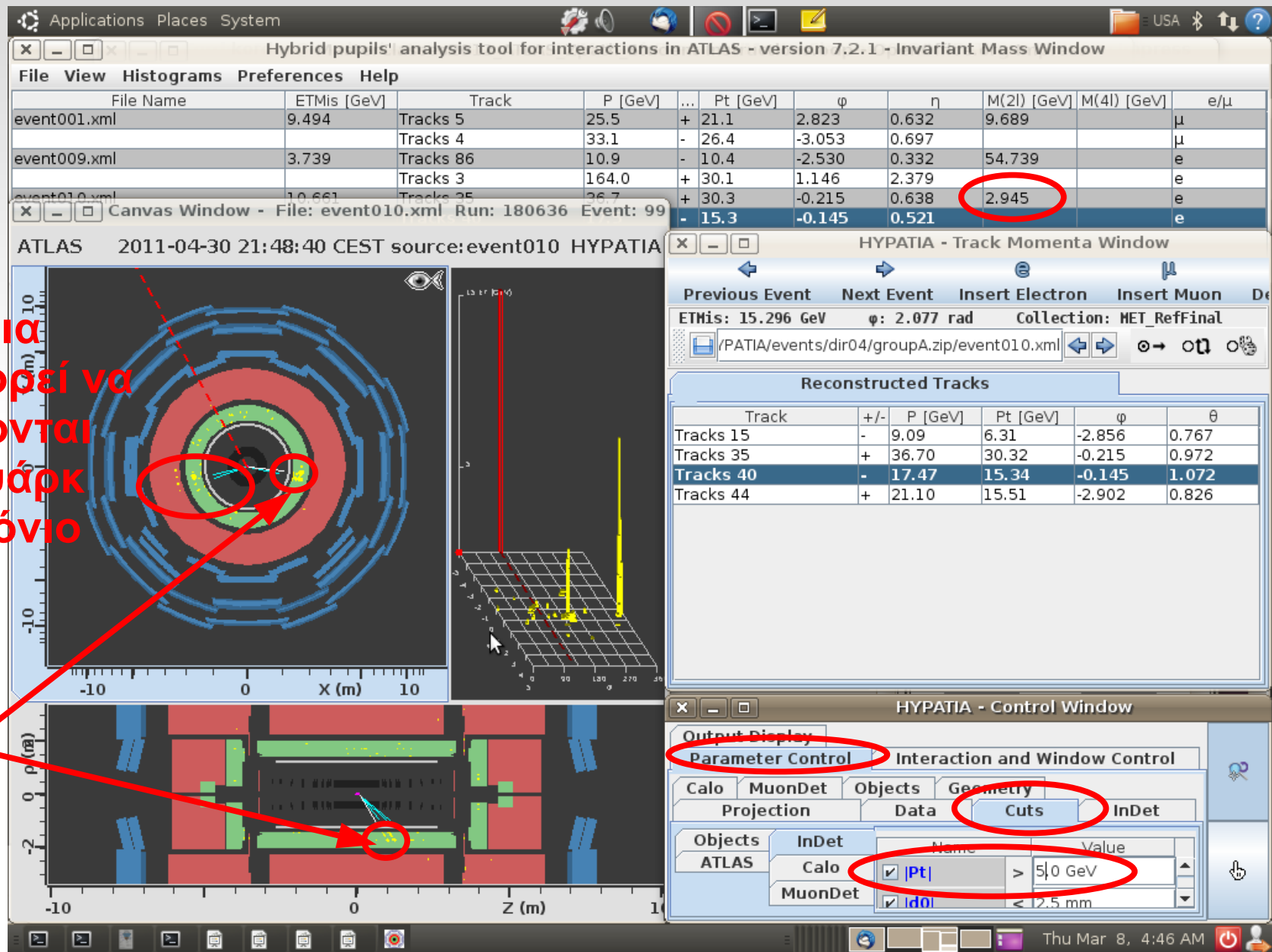
$e^+ e^-$



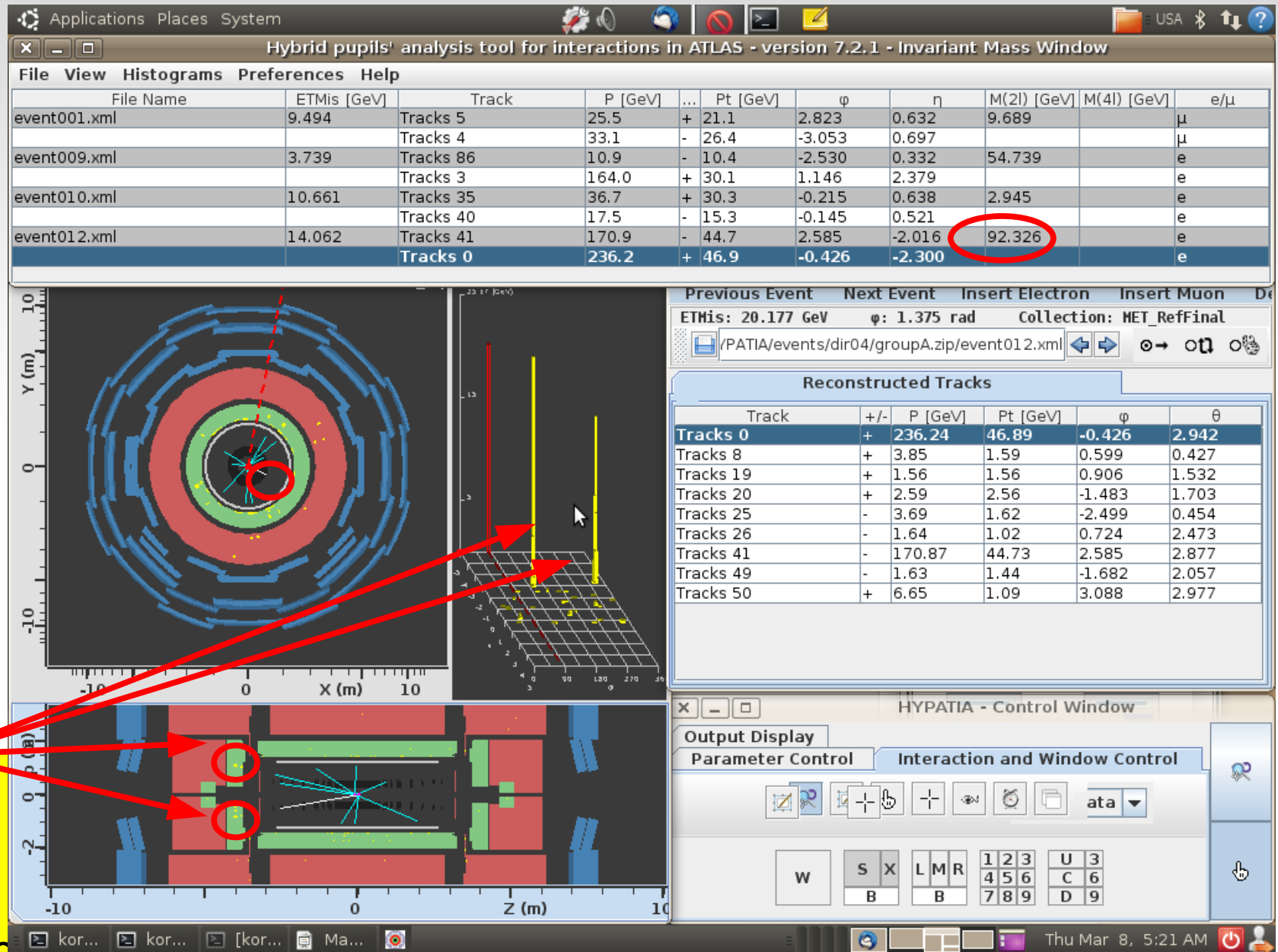
ΗΥΡΑΤΙΑ: άλλο γεγονός $e^+ e^-$

“jet”
από
Σωματίδια
Που μπορεί να
Προέρχονται
Από κουάρκ
ή γκλουόνιο

$e^+ e^-$



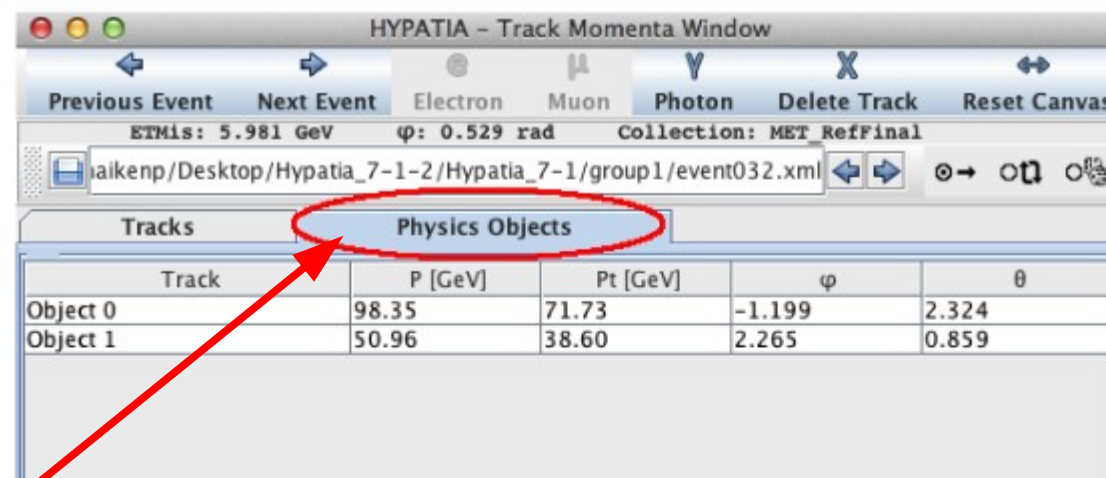
HYPATIA: άλλο γεγονός $e^+ e^-$



$e^+ e^-$

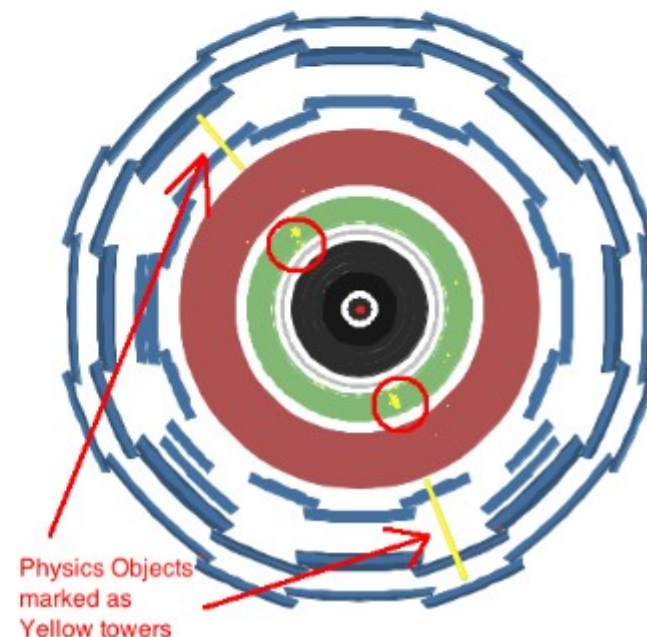
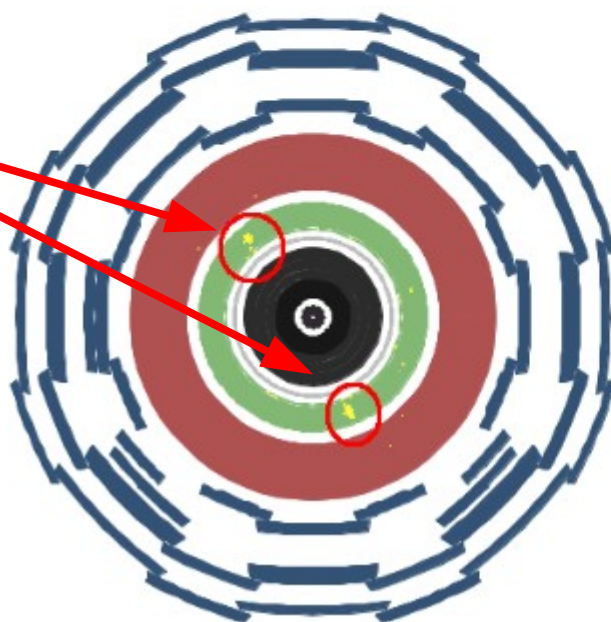
Καθαροί
λεπτοί
“πύργοι”
ενέργειας

HYPATIA - $\gamma\gamma$ (φωτόνια)



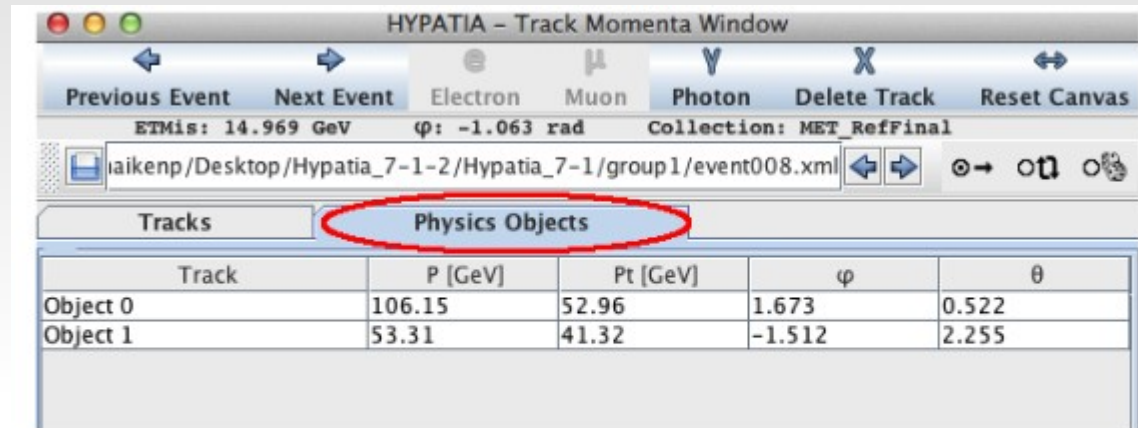
Track	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Object 0	98.35	71.73	-1.199	2.324
Object 1	50.96	38.60	2.265	0.859

Τα φωτόνια ΔΕΝ αφήνουν τροχιά (track),
Οπότε τα βλέπουμε στη λίστα των “Physics Objects”



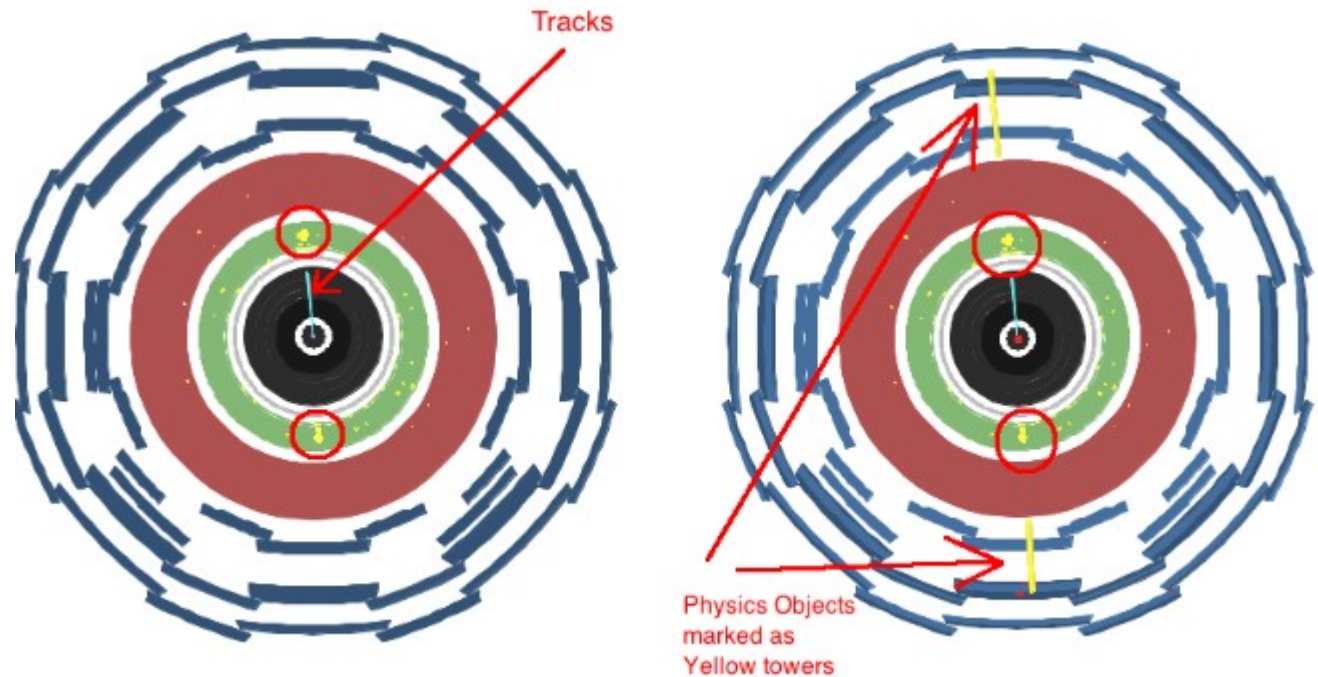
HYPATIA - μερικές φορές βλέπουμε “converted photons” (φωτόνια που κάνουν δίδυμη γέννηση)

$$\gamma \rightarrow e^+ e^-$$



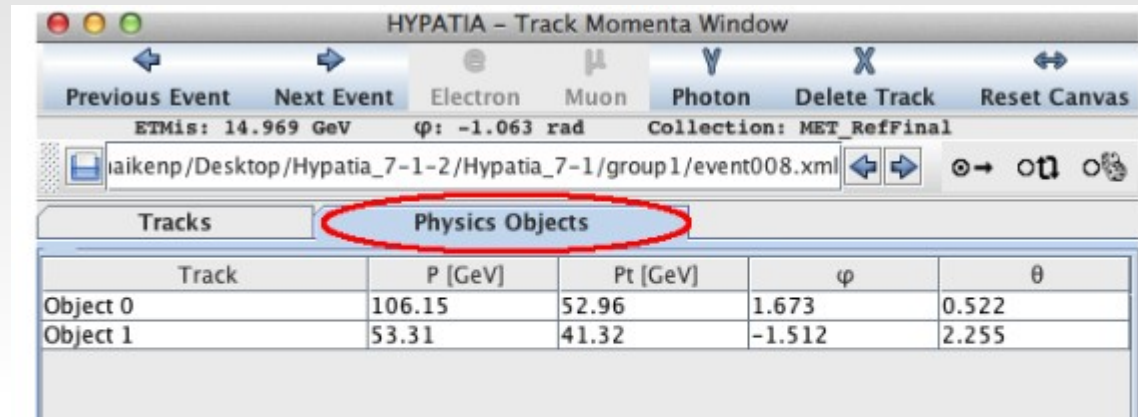
Track	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Object 0	106.15	52.96	1.673	0.522
Object 1	53.31	41.32	-1.512	2.255

Κι έτσι ένα
φωτόνιο μπορεί να
δίνει 2 τροχιές (e^+
 e^-), και το
βλέπουμε και στη
λίστα των “tracks”,
και στη λίστα των
“Physics Objects”



HYPATIA - μερικές φορές βλέπουμε “converted photons” (φωτόνια που κάνουν δίδυμη γέννηση)

$$\gamma \rightarrow e^+ e^-$$



The screenshot shows the HYPATIA - Track Momenta Window. The 'Physics Objects' tab is selected and circled in red. Below it is a table with the following data:

Track	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Object 0	106.15	52.96	1.673	0.522
Object 1	53.31	41.32	-1.512	2.255

Αφού $m(\gamma)=0 \rightarrow$ η μαζα του συστήματος $e^+ e^-$
πρέπει να είναι μικρή,

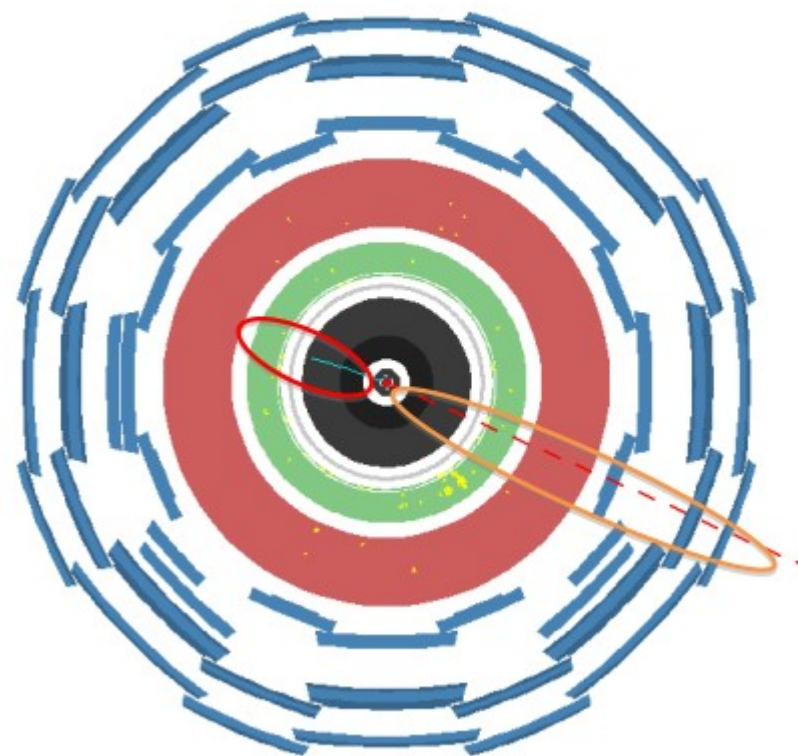
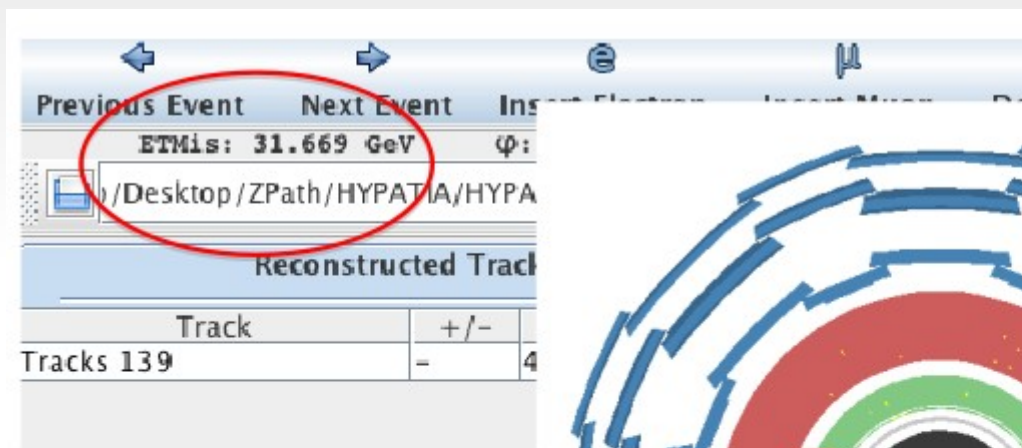
και

οι τροχιές έχουν ξεκινήσει
όχι από το σημείο σύγκρουσης των πρωτονίων,
αλλά πιά αργά

(αν ζητάμε $N_pixel_hits > 3$
πετάμε αρκετά τέτοια ηλεκτρόνια που είναι από φωτόνια)

HYPATIA: γεγονός υποβάθρου (background). Μοιάζει κάπως με το σήμα μας, αλλά δεν είναι.

Τα γεγονότα $W \rightarrow e \nu$ και $W \rightarrow \mu \nu$ είναι 11 φορές πιά συχνά από τα $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$ και $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$



ΕΝΑ μόνο ηλεκτρόνιο ή μίονιο
και
ΠΟΛΥ (>30 GeV) ελλείπουσα
ενέργεια “missing energy”
(E_{tmiss}) από το νεutrίνο που
δεν αλληλεπιδρά και διαφεύγει

“Κι αν κάνω λάθος;”

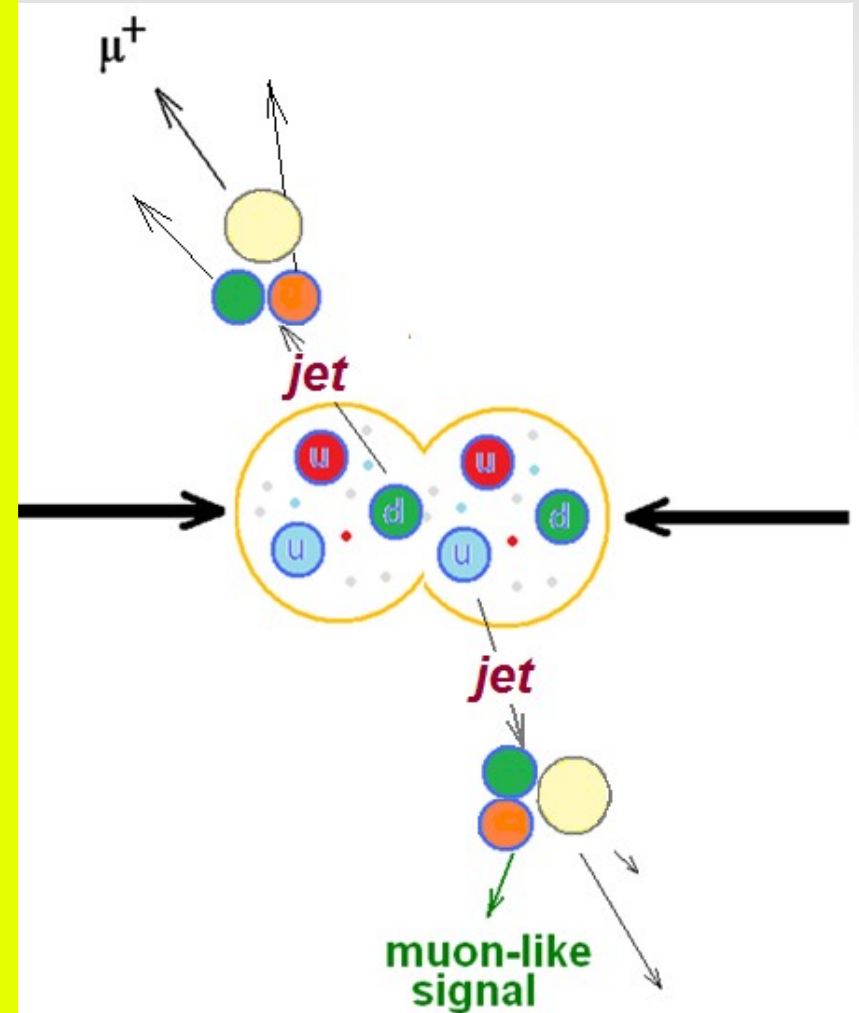
Μην ανησυχείτε! Τα λάθη είναι μέρος της μέτρησης και της έρευνας γενικά!

Καμιά φορά δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα αν έχουμε βοροοσά μας ένα γεγονός σήμα ή υπόβαθρο: τότε κάνουμε μια επιλογή και προχωράμε.

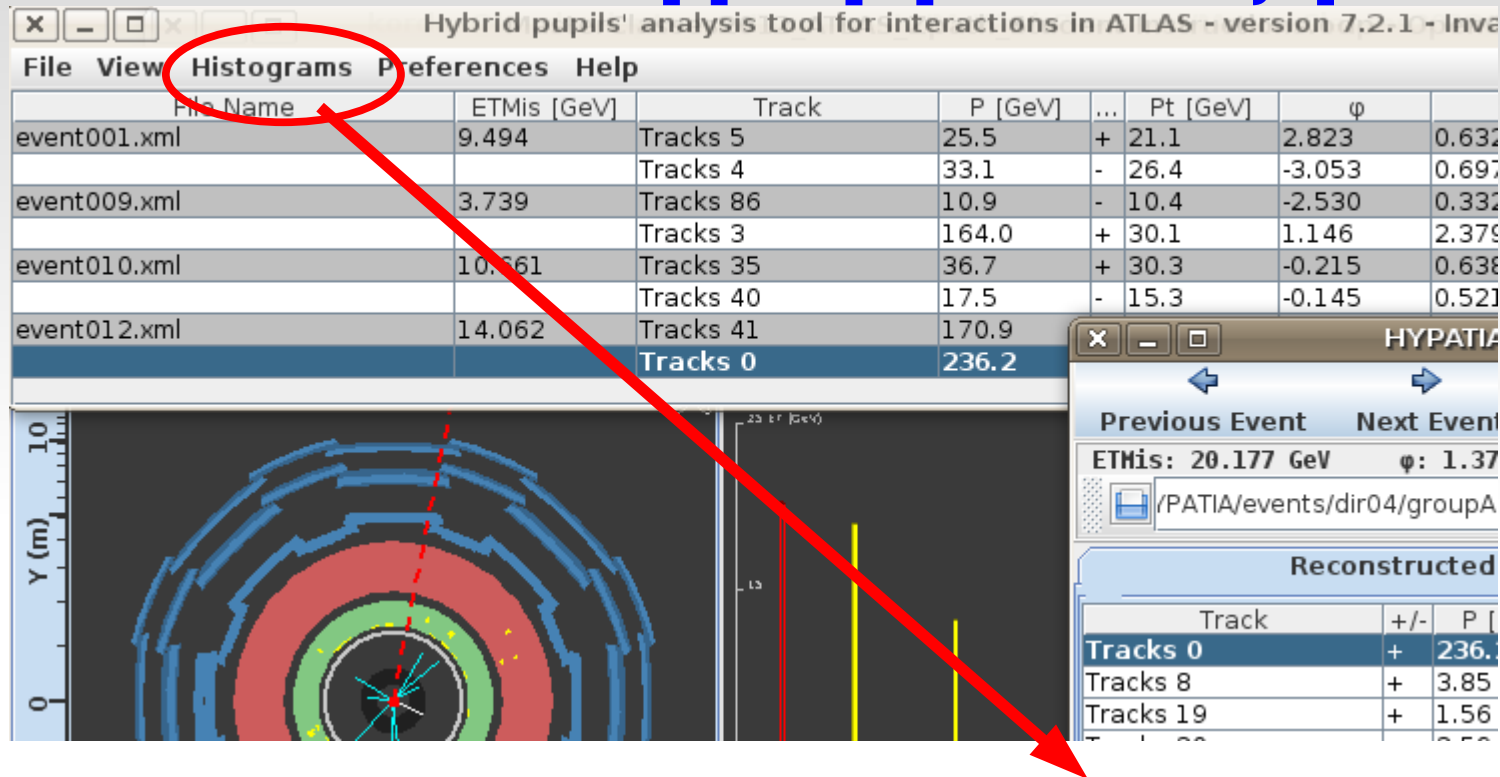
Δεν χάθηκε ο κόσμος αν κάνουμε λάθος. Είναι μέσα στο παιχνίδι κι αυτό.

Η ανάλυση πολλών γεγονότων θα μας φανερώσει το σήμα μας, ακόμα κι αν σε μερικά γεγονότα κάναμε λάθος.

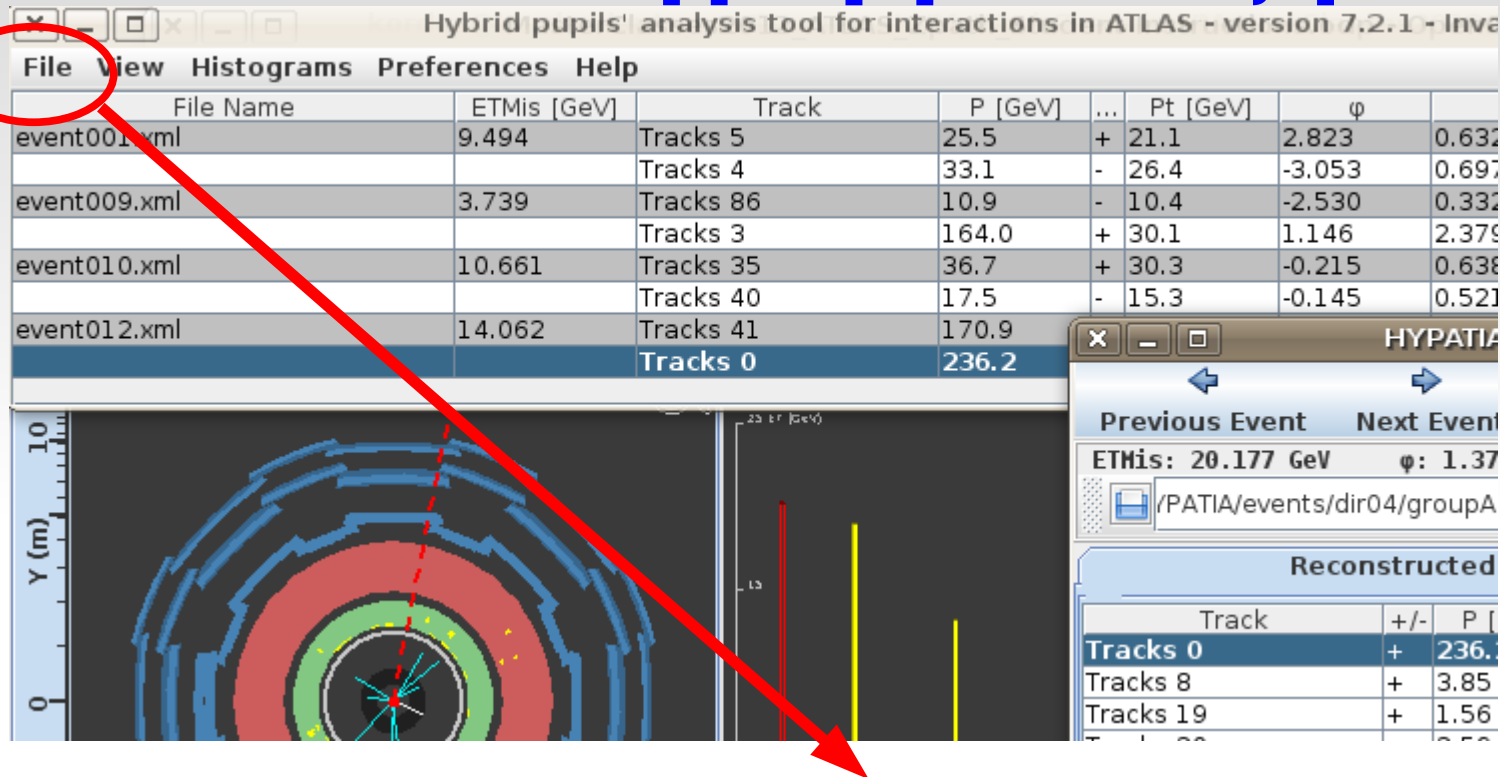
Ακόμα και σήμα που δεν περιμέναμε!



Κι έτσι, φασούλι το φασούλι γεμίζει το ιστόγραμμά σας με τιμές



Κι έτσι, φασούλι το φασούλι γεμίζει το ιστόγραμμά σας με τιμές



1. Pull-down menu to save masses as text file
2. upload this text file to the OPlot web site.

Μεγαλύτερη ακρίβεια με πολλές μετρήσεις

Μέση τιμή από πολλές μετρήσεις
(και βόλτα β' αυτή τη μέση τιμή)

Έχω δύο μετρήσεις, ανεξάρτητες μεταξύ τους, που προσπαθούν να βρουν ποιά είναι η τιμή ενός φυσικού μεγέθους

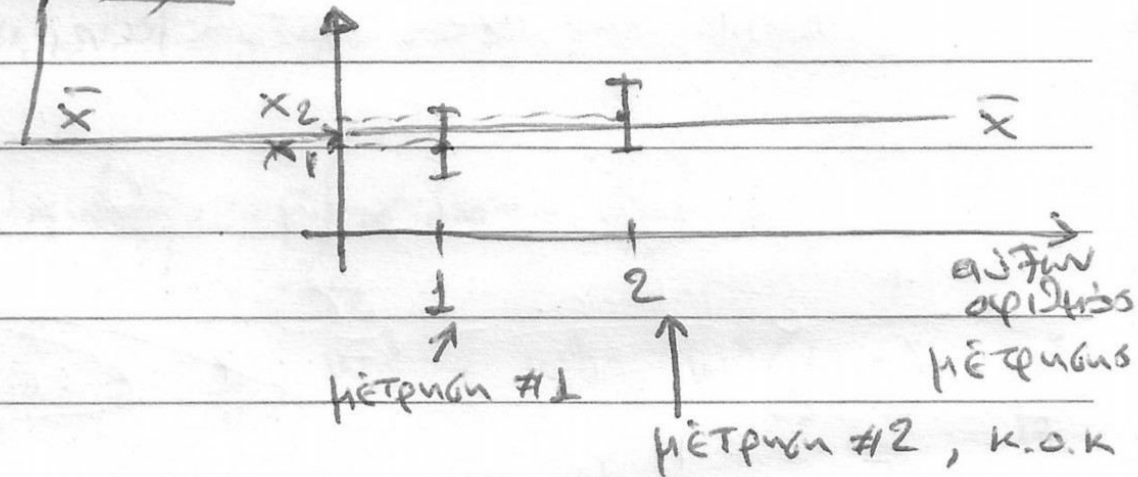
Οι μετρήσεις είναι : $x_1 \pm \sigma_1$ και $x_2 \pm \sigma_2$

Μηρώ να τις συνδυάσω ώστε να μου δώσουν μια καλύτερη εκτίμηση για την τιμή του φυσικού μεγέθους;

↪ Ναι. Η "μέση τιμή" τους είναι η καλύτερη εκτίμηση.

Μεγαλύτερη ακρίβεια με πολλές μετρήσεις

α) Ποια είναι η μέση τιμή ($\bar{x}$);



Η καλύτερη εκτίμηση $\bar{x}$
είναι αυτή που βρίσκεται
στη μικρότερη απόσταση,
συνδυαστικά, από τις μετρήσεις
 x_1 και x_2

$$\downarrow$$
$$\text{Το } \chi^2 \equiv \left(\frac{x_1 - \bar{x}}{\sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2 - \bar{x}}{\sigma_2} \right)^2$$

είναι για μέτρηση της
απόστασης όλων μαζί των
μετρήσεων από το $\bar{x}$

▼ Η καλύτερη τιμή $\bar{x}$ είναι αυτή που ελαχιστοποιεί το χ^2

↓
Βρίσκω το $\bar{x}$ για το οποίο $\frac{\partial \chi^2}{\partial \bar{x}} = 0$

Μεγαλύτερη ακρίβεια με πολλές μετρήσεις

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial \bar{x}} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[\frac{(x_1 - \bar{x})^2}{\sigma_1^2} + \frac{(x_2 - \bar{x})^2}{\sigma_2^2} \right] = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{-2x_1 + 2\bar{x}}{\sigma_1^2} + \frac{-2x_2 + 2\bar{x}}{\sigma_2^2} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 \left[\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \right] \bar{x} = 2 \left[\frac{1}{\sigma_1^2} x_1 + \frac{1}{\sigma_2^2} x_2 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \bar{x} = \frac{1/\sigma_1^2}{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2} \cdot x_1 + \frac{1/\sigma_2^2}{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2} \cdot x_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\bar{x} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N 1/\sigma_i^2} \right] \cdot x_i}, \text{ για } N \text{ μετρήσεις: } x_i \pm \sigma_i, i=1, \dots, N$$

↑
αυτό είναι το "βάρος" συμμετοχής
της κάθε μέτρησης x_i στο άθροισμα
που μας δίνει την εκτίμηση $\bar{x}$

Μεγαλύτερη ακρίβεια με πολλές μετρήσεις

β) Ποιο είναι το σφάλμα στο $\bar{x}$;

Από μετάδοση σφαλμάτων: $f(x, y) \Rightarrow \sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2$

όπου στην περίπτωση μας $f = \bar{x} = f(x_1, x_2)$

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 = \left(\frac{1/\sigma_1^2}{\sum 1/\sigma_i^2}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{1/\sigma_2^2}{\sum 1/\sigma_i^2}\right)^2 \sigma_2^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2}{(\sum 1/\sigma_i^2)^2} = \frac{\sum 1/\sigma_i^2}{(\sum 1/\sigma_i^2)^2} = \frac{1}{\sum 1/\sigma_i^2}$$

$$\Rightarrow \sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{\sum 1/\sigma_i^2}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sigma_{\bar{x}}^2} = \sum \frac{1}{\sigma_i^2}$$

$\sigma_{\text{μέσης τιμής}} < \sigma_{\text{κάθε μίας μέτρησης}}$