

Πού βρίσκεται το νετρίνο; (10 μονάδες)

Κατά τη σύγκρουση δύο πρωτονίων σε πολύ υψηλές ενέργειες μέσα στο Μεγάλο Ανιχνευτή Αδρονίων (Large Hadron Collider ή LHC), παράγεται ένα πλήθος σωματιδίων, όπως ηλεκτρόνια, μίονια, νετρίνα, quark, καθώς και τα αντισωματίδιά τους. Τα περισσότερα από αυτά μπορούν να ανιχνευθούν μέσω του ανιχνευτή σωματιδίων που περιβάλλει το σημείο σύγκρουσης. Για παράδειγμα, τα quark υποβάλλονται σε μια διαδικασία που ονομάζεται *αδρονισμός* (*hadronisation*), μέσω του οποίου μετατρέπονται σε ένα καταγισμό υποατομικών σωματιδίων που ονομάζεται "πίδακας" ("jet"). Επιπρόσθετα, το ισχυρό μαγνητικό πεδίο εντός των ανιχνευτών αναγκάζει ακόμη και τα φορτισμένα σωματίδια υψηλών ενεργειών να διαγράψουν καμπύλη τροχιά, καθιστώντας δυνατό τον προσδιορισμό της ορμής τους. Ο Ανιχνευτής ATLAS χρησιμοποιεί ένα σύστημα υπεραγωγίων σωληνοειδών που παράγει σταθερό και ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης 2.00 T, το οποίο περιβάλλει το σημείο σύγκρουσης. Φορτισμένα σωματίδια με ορμή μικρότερη μας καθορισμένης τιμής θα διαγράψουν τροχιά τόσο μεγάλης καμπυλότητας ώστε να εκτελέσουν επαναληπτικά τροχιές στο μαγνητικό πεδίο και πιθανότατα δεν θα καταμετρηθούν. Από τη φύση του, το νετρίνο δεν ανιχνεύεται καθόλου, καθώς διαφεύγει από τον ανιχνευτή χωρίς να αλληλεπιδρά με άλλα σωματίδια.

Δεδομένα: μάζα ηρεμίας ηλεκτρονίου $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg, Στοιχειώδες φορτίο $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C;

Ταχύτητα του φωτός $c = 3.00 \times 10^8$ m s⁻¹, Ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F m⁻¹

Μέρος Α. Η Φυσική του Ανιχνευτή ATLAS (4.0 μονάδες)

- A.1** Βρείτε μια εξίσωση της ακτίνας r της κυκλικής τροχιάς ενός ηλεκτρονίου μέσα στο κύκλοτρο, υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικής δύναμης κάθετης στην ταχύτητά του, και εκφράστε την ακτίνα ως συνάρτηση της κινητικής του ενέργειας K , του φορτίου e , της μάζας m και του μαγνητικού πεδίου B . Υποθέστε ότι το ηλεκτρόνιο είναι μη σχετικιστικό (κλασικό) σωματίδιο. 0.5pt

Τα ηλεκτρόνια εντός του ανιχνευτή ATLAS πρέπει να μελετούνται σχετικιστικά. Παρ' όλ' αυτά, η εξίσωση της ακτίνας στο κύκλοτρο συνεχίζει να ισχύει για σχετικιστική κίνηση όταν συνοπολογίζεται η σχετικιστική ορμή.

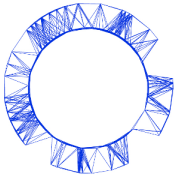
- A.2** Υπολογίστε την ελάχιστη τιμή της ορμής ενός ηλεκτρονίου, προκειμένου αυτό να δραπετεύσει από το εσωτερικό τμήμα του ανιχνευτή κατά την ακτινική διεύθυνση. Το εσωτερικό τμήμα του ανιχνευτή έχει κυλινδρικό σχήμα ακτίνας 1,1 m, και το ηλεκτρόνιο παράγεται στο σημείο κρούσης, ακριβώς στο κέντρο του κυλίνδρου. Εκφράστε την απάντησή σας σε MeV/c. 0.5pt

Όταν επιταχύνονται κάθετα στην ταχύτητα, σχετικιστικά σωματίδια φορτίου e και μάζας ηρεμίας m εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που ονομάζεται ακτινοβολία σύγχροτρου. Η εκπεμπόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση

$$P = \frac{e^2 a^2 \gamma^4}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

όπου a η επιτάχυνση και $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$.

Theory



IPHO 2018
Lisbon, Portugal

Q2-2

Greek (Greece)

- A.3** Για ένα σωματίδιο με ταχύτητα που προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός (σχετικιστικό σωματίδιο) η εκπεμπόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση: 1.0pt

$$P = \xi \frac{e^4}{\epsilon_0 m^k c^n} E^2 B^2,$$

όπου ξ είναι ένας πραγματικός αριθμός, n, k ακέραιοι αριθμοί, E είναι η ενέργεια του φορτισμένου σωματιδίου και B το μαγνητικό πεδίο. Υπολογίστε τις ποσότητες ξ, n και k .

- A.4** Στο όριο που η ταχύτητά του προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός (σχετικιστικό όριο), η ενέργεια του ηλεκτρονίου ως συνάρτηση του χρόνου είναι: 1.0pt

$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \alpha E_0 t},$$

όπου E_0 είναι η αρχική ενέργεια του ηλεκτρονίου. Υπολογίστε την ποσότητα α ως συνάρτηση των e, c, B, ϵ_0 και m .

- A.5** Θεωρήστε ένα ηλεκτρόνιο που παράγεται στο σημείο κρούσης κινούμενο κατά την ακτινική διεύθυνση με ενέργεια 100 GeV. Εκτιμήστε το ποσό της ενέργειας που χάνεται εξ αιτίας της ακτινοβολίας σύγχροτρου, μέχρι το ηλεκτρόνιο να εγκαταλείψει το εσωτερικό τμήμα του ανιχνευτή; Εκφράστε την απάντησή σας σε MeV. 0.5pt

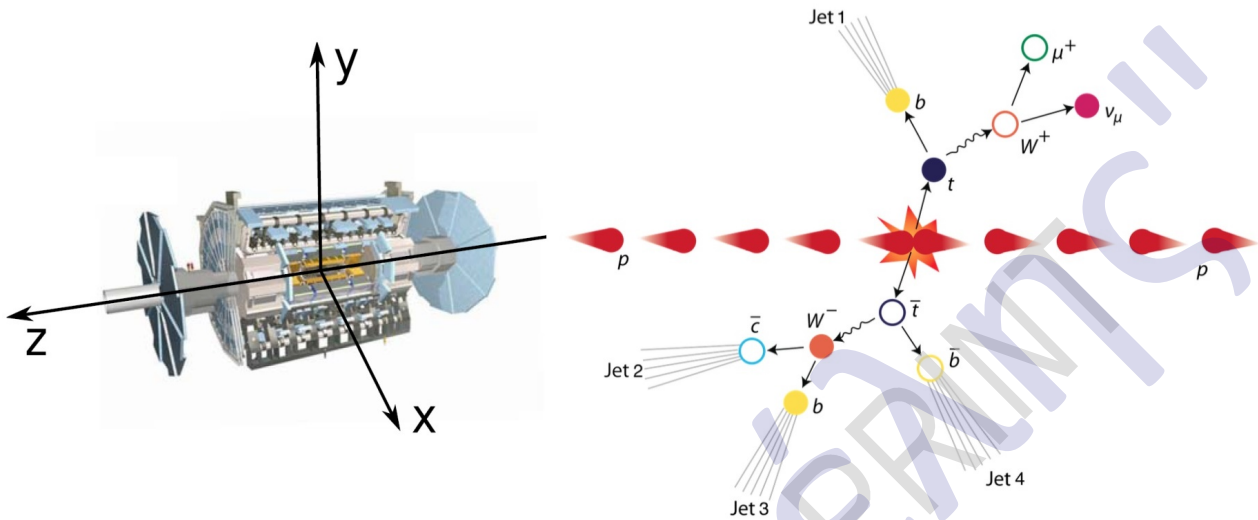
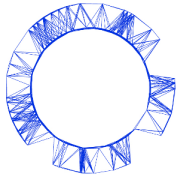
- A.6** Βρείτε μια έκφραση της κυκλοτρονικής συχνότητας του ηλεκτρονίου ως συνάρτηση του χρόνου στο σχετικιστικό όριο. 0.5pt

Μέρος Β. Εντοπίζοντας το νεutrino (6.0 μονάδες)

Η σύγκρουση δύο πρωτονίων που φαίνεται στην Εικόνα 1, οδηγεί στην παραγωγή ενός top quark (t) και ενός αντι-top quark (\bar{t}), τα πιο βαριά σωματίδια που έχουν ανιχνευτεί ποτέ. Το top quark διασπάται σε ένα μποζόνιο W^+ και ένα bottom quark (b), ενώ το αντί-top quark διασπάται σε ένα μποζόνιο W^- και ένα αντι-bottom quark (\bar{b}). Στην περίπτωση που φαίνεται στην Εικόνα 1, το μποζόνιο W^+ διασπάται σε ένα αντι-μυόνιο (μ^+) και ένα νεutrino (ν), και το μποζόνιο W^- διασπάται σε ένα quark και ένα αντί-quark. Σκοπός του προβλήματος αυτού είναι η ανακατασκευή της Ορμής του νεutrίνου χρησιμοποιώντας τις ορμές κάποιων ανιχνευόμενων σωματιδίων. **Για απλότητα, όλα τα σωματίδια και οι πίδακες σε αυτό το πρόβλημα θα θεωρούνται χωρίς μάζας, εκτός από το top quark και τα μποζόνια W^\pm .**

Οι ορμές των προϊόντων της διάσπασης του top quark μπορούν να προσδιοριστούν από το πείραμα (βλ. Πίνακα), εκτός από τη συνιστώσα της ορμής του νεutrίνου κατά τη διεύθυνση της κρούσης (άξονας z). Η ολική γραμμική ορμή των σωματιδίων που συλλαμβάνει ο ανιχνευτής στην τελική κατάσταση, είναι μηδέν μόνο στο κάθετο επίπεδο (επίπεδο xy) και όχι κατά τη διεύθυνση της κρούσης (άξονας z). Συνεπώς, η κάθετη συνιστώσα της ορμής του νεutrίνου μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ορμής στον κάθετο άξονα.

Στις 4 Ιουνίου 2015, το πείραμα ATLAS στον LHC κατέγραψε μια σύγκρουση πρωτονίου-πρωτονίου στις 00:21:24 GMT+1 όπως αυτή που φαίνεται την Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος αναφοράς του ανιχνευτή ATLAS (αριστερά) και της σύγκρουσης πρωτονίου-πρωτονίου (δεξιά).

Η (γραμμική) ορμή των τριών σωματιδίων κατά την τελική κατάσταση, προερχόμενων από τη διάσπαση του top quark, συμπεριλαμβανομένου του νετρίνου, παρουσιάζεται ακολούθως για κάθε σωματίδιο.

Σωματίδιο	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)
αντι-μιόνιο (μ^+)	-24.7	-24.9	-12.4
Πίδακας 1 (j_1)	-14.2	+50.1	+94.1
νεutrino (ν)	-104.1	+5.3	—

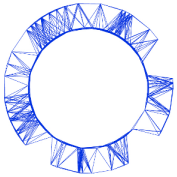
B.1 Βρείτε μια εξίσωση που συνδέει το τετράγωνο της μάζας m_W του μποζόνιου W^+ με τις συνιστώσες ορμής του νετρίνου και του αντι-μιόνιου που περιλαμβάνονται στον προηγούμενο πίνακα. Εκφράστε τις απαντήσεις σας ως συνάρτηση των ορμών του νετρίνου και του αντι-μιόνιου

$$\vec{p}_T^{(\nu)} = p_x^{(\nu)} \hat{i} + p_y^{(\nu)} \hat{j} \text{ and } \vec{p}_T^{(\mu)} = p_x^{(\mu)} \hat{i} + p_y^{(\mu)} \hat{j},$$
 και των συνιστωσών τους $p_z^{(\mu)}$ and $p_z^{(\nu)}$ στον άξονα z . 1.5pt

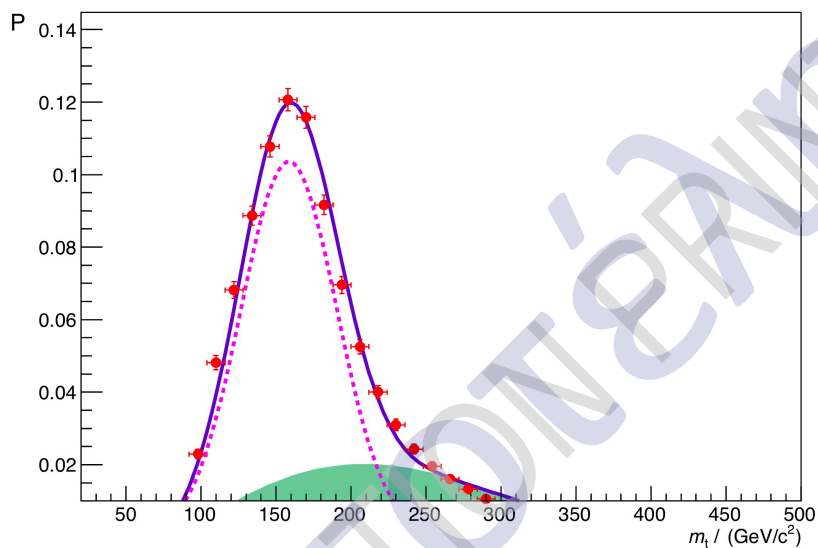
B.2 Θεωρώντας ένα μποζόνιο W^+ μάζας $m_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2$ υπολογίστε τις δύο πιθανές λύσεις για τη συνιστώσα $p_z^{(\nu)}$ της ορμής του νετρίνου κατά τον άξονα z . Εκφράστε την απάντησή σας σε GeV/c . 1.5pt

B.3 Υπολογίστε τη μάζα του top quark για κάθε μία από τις δύο προηγούμενες λύσεις. Εκφράστε την απάντησή σας σε GeV/c .
 [Αν δε λύσατε το ερώτημα B.2, χρησιμοποιείστε $p_z^{(\nu)} = 70 \text{ GeV}/c$ και $p_z^{(\mu)} = -180 \text{ GeV}/c$.] 1.0pt

Το κανονικοποιημένο πλήθος συγκρούσεων για τη μέτρηση της μάζας του top quark (όπως προκύπτει



από το πείραμα) έχει δύο συνιστώσες: εκείνη που αποκαλείται "σήμα" (και αντιστοιχεί στη διάσπαση του top quark) και εκείνη που ονομάζεται "υπόβαθρο" (που αντιστοιχεί σε άλλες διεργασίες οι οποίες δεν περιλαμβάνουν top quarks). Τα πειραματικά δεδομένα περιλαμβάνουν και τις δύο διεργασίες, βλ. Εικ. 2.

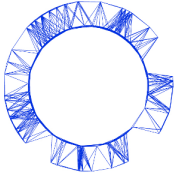


Εικόνα 2. Κατανομή μάζας του top quark, όπως καθορίζεται από το πείραμα, δηλ. κανονικοποιημένο πλήθος συμβάντων σε συνάρτηση με τη μάζα του top quark. Τα σημεία αντιστοιχούν στα δεδομένα. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο "σήμα" και η σκιασμένη περιοχή στο "υπόβαθρο".

B.4 Σύμφωνα με την κατανομή μάζας του top quark, ποια από τις δύο προηγούμενες λύσεις είναι πιθανότερα η σωστή; Εκτιμήστε την πιθανότητα της πιο πιθανής λύσης. 1.0pt

B.5 Υπολογίστε την απόσταση που διανύει το top quark πριν διασπαστεί, χρησιμοποιώντας την πιθανότερη λύση. Υποθέστε ότι το top quark έχει, σε ηρεμία, μέσο χρόνο ζωής 5×10^{-25} s. 1.0pt

Theory



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A2-1

Greek (Greece)

Πού βρίσκεται το νεutrino; (10 μονάδες)

Μέρος Α. Η Φυσική του Ανιχνευτή ATLAS (4.0 μονάδες)

A.1 (0.5 pt)

$r =$

A.2 (0.5 pt)

$p =$

A.3 (1.0 pt)

$\xi =$ $n =$ $k =$

A.4 (1.0 pt)

$\alpha =$

A.5 (0.5 pt)

$\Delta E =$

A.6 (0.5 pt)

$\omega(t) =$

Μέρος Β. Εντοπίζοντας το νεutrino (6.0 μονάδες)

B.1 (1.0 pt)

$m_W^2 =$

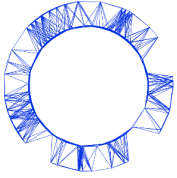
B.2 (2.0 pt)

$p'_z =$ or $p'_z =$

B.3 (1.0 pt)

$m_t =$ or $m_t =$

Theory



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A2-2

Greek (Greece)

B.4 (1.0 pt)

Πιθανότερη υποψήφια:

B.5 (1.0 pt)

$d =$

"ΑΡΕΙΟΤΗΤΟΝ ΕΝΕΛΠΗΣ"