

Επιταχυντές & Ανιχνευτές στην Πυρηνική και Σωματιδιακή Φυσική

8ο Εξάμηνο, Ακαδημαϊκό έτος 2015 – 2016

Ασκήσεις - Ομάδα 1: επιταχυντές, ενεργές διατομές αλληλεπιδράσεων, PDFs

Άσκηση 1.1

Μαγνητικό πεδίο για να κρατά τα σωματίδια σε κυκλικό επιταχυντή

α) Αν έχουμε ένα σωματίδιο 3-ορμής p , μέσα σε μαγνητικό πεδίο B και κάνει κυκλική τροχιά, πόση είναι η ακτίνα, R , της τροχιάς του; Αποδείξτε ότι αν τα p , B και R εκφράζονται σε GeV/c, Tesla και m, αντίστοιχα, τότε $p = 0.3 B R$.

β) Στον κυκλικό επιταχυντή LHC του εργαστηρίου CERN συγκρούονται πρωτόνια με πρωτόνια. Το LHC έχει περίμετρο 27 km. Θέλουμε οι δέσμες πρωτονίων να έχουν ενέργεια 7 TeV η κάθε μία. Πόσο πρέπει να είναι το μαγνητικό πεδίο ώστε να είναι ικανό να κρατά τα πρωτόνια σε αυτή την τροχιά;

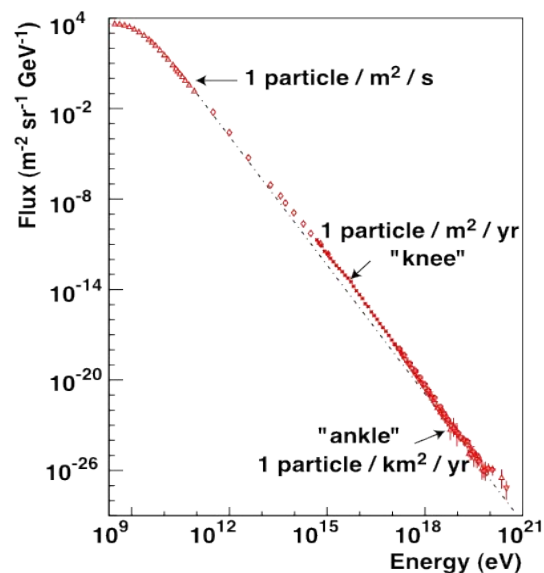
Άσκηση 1.2

Επιταχυντής σταθερού στόχου ή συγκρουστήρας;

Στο διπλανό διάγραμμα φαίνεται η ροή των κοσμικών σωματιδίων που βομβαρδίζουν τη Γη, συναρτήσει της ενέργειάς τους. Επικεντρωθείτε στα 10^{20} eV:

α) Θεωρείστε ότι τα προσπίπτοντα σωματίδια της κοσμικής κάνουν σκέδαση σταθερού στόχου με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε συγκρούσεις πρωτονίων σ' αυτή τη διαδικασία, πόση είναι η ενέργεια στο κέντρο μάζας του συστήματος;

β) Αν θέλαμε να φτιάξουμε έναν συμμετρικό συγκρουστήρα (collider) που να έφτανε στην ίδια ενέργεια στο κέντρο μάζας, πόση ενέργεια θα έπρεπε να έχει κάθε δέσμη; Με το μαγνητικό πεδίο που χρησιμοποιεί ο LHC (άσκηση 1.1β παραπάνω), πόση ακτίνα και περίμετρο έπρεπε να έχει ένας τέτοιος επιταχυντής;



Άσκηση 1.3

Ένας τρόπος να μετρήσουμε την ενεργό διατομή μιας αλληλεπίδρασης

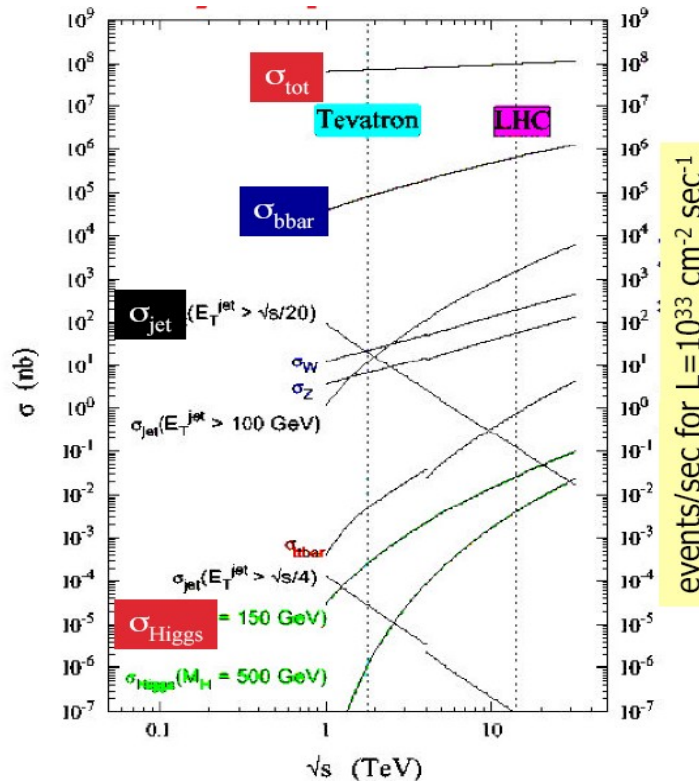
Σ' ένα πείραμα παράγονται πυρήνες ^{24}Na με βομβαρδισμό ενός στόχου καθαρού νατρίου ^{23}Na πάχους 1mm, με δέσμη δευτερίου ρεύματος 500nA. Ο βομβαρδισμός του στόχου ^{23}Na με τη δέσμη δευτερίου διήρκεσε 2 ώρες και αμέσως μετά η ενεργότητα του στόχου μετρήθηκε σε 56 MBq. Θεωρώντας σε πρώτη προσέγγιση ότι ο χρόνος βομβαρδισμού είναι αμελητέος σε σχέση με το χρόνο ημιζωής του ^{24}Na ($T_{1/2} = 15.02 \text{ h}$) και άρα οι παραγόμενοι πυρήνες ^{24}Na δεν διασπώνται πριν τη μέτρηση της ενεργότητας του στόχου, υπολογίστε την ενεργό διατομή της αντίδρασης.

Δίνεται η πυκνότητα του νατρίου $\rho = 0.97 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Αρ. Avogadro: $6.022 \cdot 10^{23}$ άτομα/mole

Άσκηση 1.4

Φωτεινότητα συγκρουστήρα, ενεργές διατομές και ρυθμός αλληλεπιδράσεων

Στον κυκλικό επιταχυντή LHC του CERN συγκρούονται πρωτόνια με πρωτόνια. Το LHC έχει περίμετρο 27 km. Θέλουμε οι δέσμες πρωτονίων να έχουν ενέργεια 7 TeV η κάθε μια, και να διαπερνούν η μία την άλλη κάθε 25 ns. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την ενεργό διατομή παραγωγής γεγονότων στον επιταχυντή Tevatron ($\sqrt{s} = E_{CM} = 1.96 \text{ TeV}$) που λειτουργούσε μέχρι το 2011 στο εργαστήριο Fermilab στο Σικάγο, και στον LHC ($\sqrt{s} = E_{CM} = 1.96 \text{ TeV}$). Π.χ. θεωρήστε ότι η ολική ενεργός διατομή αλληλεπιδράσεως πρωτονίων σε ενέργεια συγκρούσεως 14 TeV είναι 100 mb. Από το ίδιο σχήμα μπορείτε να πάρετε κατά προσέγγιση τις ενεργές διατομές για την παραγωγή κάποιου συγκεκριμένου τύπου γεγονότων.



- Αν σκεφτούμε κάθε δέσμη πρωτονίων σαν ένα τρένο, όπου κάθε βαγόνι είναι και μία “ομάδα πρωτονίων” (a “proton bunch”), τότε πόσες τέτοιες ομάδες (βαγόνια, δεσμίδες, bunches όπως θέτε πείτε το) μπορεί να έχει κάθε δέσμη;
- Αν σε κάθε δεσμίδα μπορούμε να βάλουμε 10^{11} πρωτόνια, πόση πρέπει να είναι η διατομή της κάθε δέσμης για να επιτύχουμε τη σχεδιαζόμενη φωτεινότητα του LHC, που είναι $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,
- Πόσες αλληλεπιδράσεις πρωτονίων θα συμβαίνουν ανά δευτερόλεπτο γι' αυτή τη φωτεινότητα;
- Πόσες αλληλεπιδράσεις πρωτονίων θα έχουμε κάθε φορά που δύο ομάδες πρωτονίων διαπερνούν η μία την άλλη; (αυτό αναφέρεται ως “interactions per bunch-crossing”).
- Πόσο συχνά (σε “γεγονότα ανά δευτερόλεπτο” και σε “γεγονότα ανά bunch-crossing”), κατά μέσο όρο, θα έχουμε παραγωγή
 - ζευγών b και anti-b;
 - Πόσο συχνά θα παράγονται γεγονότα με τουλάχιστον ένα μποζόνιο Z;
 - Πόσο συχνά θα παράγονται γεγονότα με ένα μποζόνιο Higgs μάζας $125 \text{ GeV}/c^2$;
- Απαντήστε στα ερωτήματα (a, και c-e), αλλά για τον επιταχυντή LEP ($e^+ e^-$ collider), όπου συγκρούονταν δέσμες ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων που είχαν ενέργεια 40.5 GeV η κάθε μία, διαπερνούσαν η μία την άλλη κάθε $22 \mu\text{s}$, και η φωτεινότητα του επιταχυντή ήταν $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Θεωρήσε ότι η ολική ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης $e^+ e^-$ σε ενέργεια $\sqrt{s} = E_{CM} = 91 \text{ GeV}$

(όση είναι η μάζα του μποζονίου Z δηλαδή) είναι περίπου 30nb. Για την ενεργό διατομή παραγωγής ζευγών b και anti-b, θεωρήστε ότι αυτά προέρχονται αποκλειστικά από τη διάσπαση $Z \rightarrow b \bar{b}$, οπότε θα χρειαστείτε το “branching ratio” για αυτή τη διάσπαση του Z από το PDG (Particle Data Group) online <http://pdg.lbl.gov/2013/tables/rpp2013-sum-gauge-higgs-bosons.pdf>

Άσκηση 1.5

Ένας συγκρουστήρας ηλεκτρονίων συγκρούει σημειακά σωμάτια. Ένας συγκρουστήρας πρωτονίων συγκρούει τα σημειακά συστατικά των πρωτονίων, που το καθένα φέρει ένα ποσοστό x της ορμής του πρωτονίου (PDFs).

Ας θεωρήσουμε δύο από τους τρόπους παραγωγής του Higgs στο Tevatron (p pbar) και στο LHC: (pp): τον τρόπο $gg \rightarrow H$ (“gluon fusion”) και τον τρόπο $q \bar{q} \rightarrow Z H$ (“Higgs strahlung” ή “associated Higgs production”).

α) Δεδομένου ότι οι ενέργεια δέσμης στο Tevatron ήταν 1 TeV (από το 2002 και μετά) και στον LHC ήταν 4 TeV το 2012, και θεωρώντας ότι οι κατανομές ορμής των παρτονίων στα πρωτόνια (PDFs, ιδες για πρωτόνια και αντιπρωτόνια) είναι όπως φαίνονται δίπλα, ποιός από τους δύο παραπάνω τρόπους παραγωγής του Higgs ήταν πιθανότερος στο Tevatron και ποιός στον LHC;

β) Στον LEP ($e^+ e^-$) το Higgs μπορούσε να παραχθεί με το αντίστοιχο διάγραμμα “associated production” ($e^+ e^- \rightarrow Z H$).

- Βρείτε τις μάζες του Higgs και του Z στα “summary tables” του PDG online (“Gauge and Higgs bosons”) και υπολογίστε πόση ενέργεια στο κέντρο μάζας απαιτούνταν να έχει ο LEP για να παράγει το Higgs και το Z “on-shell” (δηλαδή με μάζα όση η αναγραφόμενη τιμή ~91 GeV).
- Δεδομένου ότι το LEP έφτασε σε ενέργεια συγκρούσεων μέχρι 209 GeV, μέχρι τί μάζας Higgs θα μπορούσε να είχε παράγει (και ανακλύψει) το LEP;

