

Project

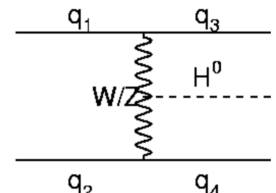
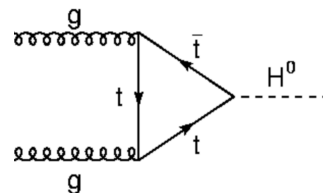
Επιστροφή: Προαιρετικό

Ένας από τους κύριους στόχους του προγράμματος φυσικής του LHC στο CERN ήταν η ανακάλυψη και μελέτη του μποζονίου Higgs. Το πείραμα CMS (Compact Muon Solenoid) σχεδιάστηκε ώστε να έχει μεγάλη ευαισθησία για την ανίχνευση του μποζονίου Higgs μέσω της διάσπασής του σε δυο Z^0 μποζόνια, τα οποία με τη σειρά τους το καθένα διασπάται σε ζεύγος λεπτονίων e^-e^+ , $\mu^-\mu^+$. Η τελική κατάσταση μπορεί να μοιάζει ως $e^-e^+ + e^-e^+$, $\mu^-\mu^+ + \mu^-\mu^+$ ή $e^-e^+ + \mu^-\mu^+$. Θα επικεντρωθούμε στην περίπτωση της τελικής κατάστασης με 4 μόνια. Η διάσπαση επομένως μοιάζει ως $H^0 \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$. Λόγω της μάζας του μποζονίου Higgs ($m_H = 125 \text{ GeV}/c^2$) και της μάζας του Z^0 μποζονίου ($m_Z = 91.19 \text{ GeV}/c^2$), για να πραγματοποιηθεί η διάσπαση, το ένα από τα δύο Z μποζόνια, συγκεκριμένα το Z^* , παράγεται με μάζα μικρότερη της κανονικής του μάζας, ενώ το άλλο μποζόνιο βρίσκεται στην κανονική του μάζα. Στον ανιχνευτή παρουσιάζονται 4 μόνια τα οποία έχουν χαρακτηριστικό σήμα και είναι εύκολο να ανιχνευτούν σε κατάλληλους θαλάμους ιονισμού που βρίσκονται περισσότερο απομακρυσμένοι από το σημείο της σκέδασης της δέσμης των πρωτονίων. Στο συγκεκριμένο project που έχετε, θα μελετήσετε τη δυνατότητα ανακάλυψης του σωματιδίου Higgs μάζας μέσω της διάσπασής του σε 4 μόνια όπως προβλέπεται από το Καθιερωμένο Πρώτυπο, την θεωρία που περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης.

Το σήμα

Η ενεργός διατομή παραγωγής και διάσπασης του μποζονίου Higgs με την συγκεκριμένη μάζα είναι $\sigma_{pp \rightarrow H} = 57.03 \text{ pb}$. Η ενεργός διατομή είναι ανάλογη της πιθανότητας εμφάνισης μιας συγκεκριμένης αλληλεπίδρασης και έχει διαστάσεις επιφάνειας ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$, και $1 \text{ pico} = 10^{-12}$). Για τις μικροσκοπικές

αυτές κλίμακες, η σκέδαση δύο πρωτονίων ακτίνας μερικών fm αντιστοιχεί σε επιφάνεια, πR^2 , της τάξης των 10^{-30} m^2 ή 10^{-2} b . Το μποζόνιο Higgs μπορεί να



διασπαστεί σε διάφορα σωματίδια αλλά η πιθανότητα για το είδος της διάσπασης εξαρτάται από τη μάζα των σωματιδίων των τελικών προϊόντων. Η διάσπαση του Higgs μάζας $125 \text{ GeV}/c^2$ σε ζεύγος ZZ^* μποζονίων καταλαμβάνει ποσοστό 2.64% των συνολικών τρόπων διασπάσεων του (ποσοστό διακλάδωσης). Αυτό το γράφουμε συνήθως ως $Br(H^0 \rightarrow ZZ^*) = 2.64\%$. Επομένως η ενεργός διατομή σκέδασης $\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^{0*}} = 1.51 \text{ pb}$. Το

ποσοστό αυτό θα πρέπει να το πολλαπλασιάσουμε επίσης με την πιθανότητα τα Z μποζόνια να διασπαστούν σε ζεύγος μιονίων ($\mu^+\mu^-$). Το ποσοστό αυτό διακλάδωσης είναι $Br(Z \rightarrow \mu^-\mu^+) = 3.366\%$. Η πιθανότητα και τα δύο Z μποζόνια να διασπαστούν σε $\mu^+\mu^-$ είναι $[Br(Z \rightarrow \mu^-\mu^+)]^2 = 0.134\%$. Επομένως η ολική ενεργός διατομής για την διεργασία που μας ενδιαφέρει είναι: $\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^-\mu^+\mu^-\mu^+} = 0.00191 pb = 1.91 fb$.

Το υπόβαθρο

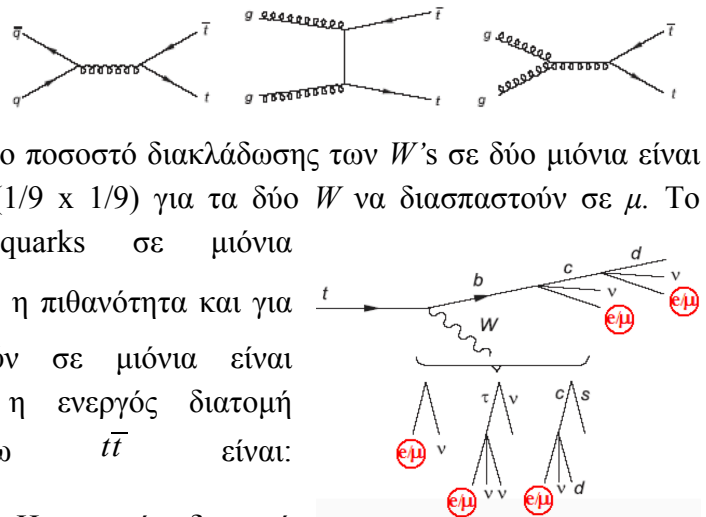
Δυστυχώς το σήμα παραγωγής και διάσπασης του σωματιδίου Higgs σε δυο Z μποζόνια, καλύπτεται από άλλες διεργασίες οι οποίες οδηγούν σε παρόμοιες τελικές καταστάσεις προϊόντων. Οι διεργασίες αυτές συμβαίνουν με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα από ότι η επιθυμητή διεργασία και αποτελούν όπως λέμε διεργασίες υποβάθρου για το σήμα το οποίο ψάχνουμε. Οι κυριότερες τέτοιες διεργασίες για την περίπτωση μας είναι (i) παραγωγή $\gamma^*/Z^0 + b\bar{b}$ όπου τα b-quarks μπορούν να διασπαστούν και να δώσουν μόνια ενώ το γ^*/Z μπορούν να διασπαστούν σε ζεύγος μιονίων, (ii) παραγωγή $t\bar{t}$ τα οποία κατόπιν διασπώνται σύμφωνα με την αλυσίδα διάσπασης: $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow W^+(\rightarrow \mu^+\nu_\mu) bW^-(\mu^-\bar{\nu}_\mu) \bar{b}$ και κατόπιν τα

δύο b-quarks σε 2 μόνια. Η ενεργός διατομή παραγωγής ζεύγους $t\bar{t}$ είναι $840 pb$ και διασπώνται σχεδόν 100% σε ένα W -boson και ένα b-quark όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το ποσοστό διακλάδωσης των W 's σε δύο μόνια είναι $1/9$ για κάθε W και επομένως $1/81$ ($1/9 \times 1/9$) για τα δύο W να διασπαστούν σε μ . Το ποσοστό διακλάδωσης των b-quarks σε μόνια ($b \rightarrow \mu + \nu_\mu + c$) είναι 10%. Επομένως η πιθανότητα και για

τα δύο b-quarks να διασπαστούν σε μόνια είναι $0.1 \times 0.1 = 0.01$. Διαπιστώνουμε ότι η ενεργός διατομή παραγωγής 4-μιονίων μέσω $t\bar{t}$ είναι:

$\sigma_{t\bar{t} \rightarrow 4\mu+X} = 840 pb \times \frac{1}{81} \times 0.01 = 104 fb$. Η ενεργός διατομή

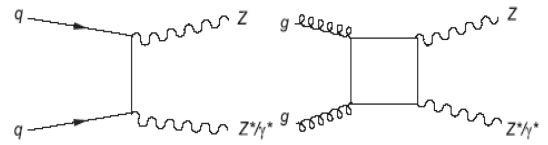
είναι ~50 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του σήματος. Ωστόσο τα 2 μόνια από τις διασπάσεις των W -μποζονίων σχηματίζουν μάζα που είναι διαφορετική του Z ενώ τα μόνια που παράγονται από τα b-quarks βρίσκονται κοντά σε άλλη δραστηριότητα (π.χ. c-quark) σε αντίθεση με τα μόνια που παράγονται στις διασπάσεις των W ή των Z που συνήθως είναι απομονωμένα από άλλη δραστηριότητα. Αυτές οι διαπιστώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόρριψη γεγονότων $t\bar{t}$ υποβάθρου.



Η διεργασία $\gamma^*/Z^0 + b\bar{b}$ έχει ενεργό διατομή παραγωγής ίση με 650pb. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο μόνια από την διάσπαση του Z αλλά και δύο μόνια από τη διάσπαση των b-quarks τα οποία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αναμένεται να μην είναι απομονωμένα. Λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό διακλάδωσης των Z σε μόνια και το αντίστοιχο ποσοστό των b-quarks η ενεργός διατομή για αυτή τη διεργασία είναι $\sigma_{\gamma^*/Z+bb} = 171fb$.

Οι προηγούμενες δύο διεργασίες έχουν μεγάλη ενεργό διατομή αλλά γεγονότα τέτοιου είδους μπορούν να απορριφθούν σχετικά εύκολα χωρίς να επηρεάζουν το σήμα.

Υπάρχει όμως μία διεργασία η οποία είναι πανομοιότυπη με αυτή που μας ενδιαφέρει. Η διεργασία αυτή προέρχεται από απευθείας παραγωγή ζεύγους Z μποζονίων



$pp \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$. Η ενεργός διατομή σκέδασης για τη διεργασία και ενέργεια κέντρου μάζας των δύο πρωτονίων 14 TeV είναι $\sigma_{pp \rightarrow ZZ} = 18.77pb$. Λαμβάνοντας υπόψη το

ποσοστό διακλάδωσης $Br(Z \rightarrow \mu^-\mu^+) = 3.366\%$, η ενεργός διατομή θα είναι:

$$\sigma_{pp \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-} = 18.77pb \times 0.0366^2 = 0.025pb = 25fb.$$

Φωτεινότητα και κανονικοποίηση γεγονότων

Υποθέστε ότι ο επιταχυντής LHC λειτουργεί με συγκρουόμενες δέσμες πρωτονίων – πρωτονίων με ενέργεια 7TeV η κάθε μια, δηλαδή η συνολική ενέργεια στο σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας είναι 14TeV. Υποθέστε ακόμα ότι ο συνολικός αριθμός γεγονότων που συλλέγετε αντιστοιχεί σε ολοκληρωμένη φωτεινότητα, $\mathcal{L} = 1fb^{-1}$. Η ολοκληρωμένη φωτεινότητα σχετίζεται την φωτεινότητα της δέσμης (που αντιπροσωπεύει τις συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων ανά δευτερόλεπτο) με τον συνολικό χρόνο καταγραφής γεγονότων σκεδάσεων από τον ανιχνευτή. Η ενεργός διατομής μιας διεργασίας μπορεί να

γραφεί ως $\sigma_{signal} = \frac{N_{tot}^{signal}}{\mathcal{L}}$ όπου N_{tot}^{signal} είναι ο συνολικός αριθμός των γεγονότων σήματος

που παράχθηκαν. Να σημειωθεί ότι δεν ξέρουμε τον αριθμό των γεγονότων σήματος που παράχθηκαν αλλά μόνο τον συνολικό αριθμό γεγονότων, N_{det}^{obs} , που παρατηρούμε στον

ανιχνευτή. Ο αριθμός αυτός, N_{det}^{obs} , εμπεριέχει ένα αριθμό γεγονότων σήματος, N_{det}^{signal} , και

αριθμό γεγονότων διεργασιών υποβάθρου, N_{det}^{bkg} , που παραμένει στο τελικό δείγμα των

γεγονότων παρά τα κριτήρια επιλογής που θέσαμε. Επομένως, $N_{det}^{obs} = N_{det}^{signal} + N_{det}^{bkg}$. Ο

αριθμός των γεγονότων υποβάθρου υπολογίζεται συνήθως με ένα συνδυασμό Monte Carlo προσομοιώσεων των διεργασιών υποβάθρου αλλά και πραγματικών γεγονότων, επιλέγοντας κατάλληλα δείγματα γεγονότων εμπλουτισμένα στις διεργασίες που ενδιαφέρουν. Επίσης ο

αριθμός των γεγονότων που παρατηρούμε στον ανιχνευτή δεν αντιπροσωπεύουν τον συνολικό αριθμό των γεγονότων που παράχθηκαν στις σκεδάσεις πρωτονίων-πρωτονίων. Αυτό γιατί ο ανιχνευτής που χρησιμοποιούμε δεν είναι τέλειος, δεν καλύπτει ολόκληρη την στερεά γωνία παραγωγής και διάσπασης των σωματιδίων της διεργασίας που μελετάται και γιατί για να επιλέξουμε τα ενδιαφέροντα γεγονότα εφαρμόζουμε μια σειρά από κριτήρια επιλογής που σκοπό έχουν να ελαχιστοποιήσουν το υπόβαθρο ως προς το σήμα. Επομένως υπάρχει πάντα μια πιθανότητα ανίχνευσης των σωματιδίων αυτών, ή διαφορετικά απόδοση,

ε , της επιλογής που κάνουμε. Η απόδοση αυτή ορίζεται εν γένει ως $\varepsilon = \frac{N_{pass}}{N_{tot}}$, όπου N_{pass}

ο αριθμός γεγονότων που περνούν κάποια κριτήρια επιλογής ως προς τον συνολικό αριθμό γεγονότων που εξετάσαμε. Με βάση αυτά που αναφέρθηκαν η ενεργός διατομή παραγωγής

μιας διεργασίας είναι: $\sigma_{signal} = \frac{N_{tot}^{signal}}{\mathcal{L}} = \frac{N_{det}^{signal}}{\varepsilon \mathcal{L}} = \frac{N_{det}^{obs} - N_{det}^{bkg}}{\varepsilon \mathcal{L}}$.

Τι θα μελετήσετε

Στα επόμενα θα πρέπει να κάνετε τα εξής:

1. Δημιουργήστε Monte Carlo δείγματα γεγονότων σε επίπεδο γεννήτορα:

- (α) 10 000 γεγονότα για το σήμα σας, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$.
- (β) 10 000 γεγονότα υποβάθρου $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.
- (γ) 10 000 γεγονότα υποβάθρου $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow 4\mu$.
- (δ) 10 000 γεγονότα $pp \rightarrow \gamma^*/Z + b\bar{b} \rightarrow 4\mu$

Για την παραγωγή των γεγονότων θα χρησιμοποιήσετε τον γεννήτορα γεγονότων PYTHIA (οδηγίες θα βρείτε παρακάτω). Και για τα δυο δείγματα θα πρέπει να γράψετε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σε κάποια αρχεία στο δίσκο. Στα αρχεία αυτά θα πρέπει να περιέχεται μια γραμμή για κάθε σωματίδιο που παράγεται συμπεριλαμβανομένου του αριθμού γεγονότος που δημιουργήθηκε, των συνιστωσών της 4-ορμής, το είδος του σωματιδίου καθώς και η πληροφορία του σωματιδίου από το οποίο προέκυψε (δείτε για αυτό περισσότερες πληροφορίες στις οδηγίες) σε απλή μορφή κειμένου.

Διαβάστε τα files σήματος και υποβάθρων που έχετε δημιουργήσει και αναλύστε τα γεγονότα χρησιμοποιώντας ROOT. Συγκεκριμένα:

(A) Βρείτε τα μόνια του σήματος. Εφαρμόστε τα ακόλουθα για κάθε υποψήφιο μόνιο:

(i) Σφάλμα μέτρησης: Προσομοιώστε το σφάλμα στη μέτρηση του μιονίου τόσο της ορμής όσο και της διεύθυνσής του (γωνίες θ και ϕ) θεωρώντας 1% Gaussian σφάλμα στην ορμή και 2mrad Gaussian σφάλμα στις γωνίες. Το Gaussian σφάλμα αντιστοιχεί

ουσιαστικά σε $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \pm 1\%$. Επομένως η τροποποιημένη για σφάλμα ορμή θα είναι:

$p'_T = p_T + r\sigma_{p_T}$ όπου p_T η τέλεια αρχική ορμή (χωρίς σφάλμα), r ο Gaussian κατανομημένος τυχαίος αριθμός και σ_{p_T} το σφάλμα της ορμής. Ανάλογα ισχύουν για την περίπτωση της γωνιών.

Θα χρειαστείτε για χρησιμοποιήσετε ένα γεννήτορα τυχαίων αριθμών που παράγει Gaussian κατανομημένους αριθμούς με κάποια μέση τιμή μ και κατάλληλο εύρος. Μπορείτε να βρείτε έναν τέτοιο γεννήτορα στο ROOT όπως έχουμε δει.

Επεξεργαστείτε τα γεγονότα και θα πρέπει να απαιτήσετε τα γεγονότα να περιέχουν τουλάχιστον τέσσερα μόνια με εγκάρσια ορμή $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \geq 2 \text{ GeV}/c$ και η ψευδο-ωκύτητα $|\eta| \leq 2.5$, όπου $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ και θ η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση κίνησης του σωματιδίου με τον +z-άξονα. Η $p_T \geq 2 \text{ GeV}/c$ είναι η ελάχιστη ορμή που πρέπει να έχουν τα μόνια για να φθάσουν στον ανιχνευτή μιονίων και η τιμή της ψευδο-ωκύτητας αυτή που καλύπτεται από τον ανιχνευτή τροχιών. Τα δύο αυτά κριτήρια καθορίζουν την κινηματική επιδεκτικότητα του ανιχνευτή. Θα πρέπει να βρείτε την απόδοση της επιλογής αυτής (πόσα γεγονότα περνούν τα δύο αυτά κριτήρια και εξακολουθούν να έχουν 4 μόνια ως προς τα γεγονότα που εξετάσατε) και να συμπληρωθεί ο πίνακας 1.

Table 1 Ενεργός διατομή για διάφορες διεργασίες συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού διακλάδωσης σε τελική κατάσταση με 4 μόνια. Δίνονται ακόμα οι αποδόσεις για γεωμετρία, trigger και κριτηρίων επιλογής

Διεργασία	$\sigma \times BR$ (fb)	$\mathcal{E}_{\text{κιν}}$	$\mathcal{E}_{\text{trig}}$	$\mathcal{E}_{\text{επιλ.}}$
$pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^*$	1.91			
$pp \rightarrow ZZ$	25			
$pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow bW^+\bar{b}W^-$	104			
$pp \rightarrow Z + b\bar{b}$	171			

(ii) Απόδοση Σκανδαλιστή Γεγονότων: Απαιτήστε τουλάχιστον 4 μόνια σε κάθε γεγονός τα οποία ικανοποιούν τα κριτήρια $p_T > 5 \text{ GeV}/c$ και $|\eta| \leq 2.3$ όπου

$\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ Τα κριτήρια αυτά είναι για να ικανοποιηθεί ο σκανδαλιστής των γεγονότων. Υπολογίστε την απόδοση του κριτηρίου αυτού.

(iii) Επιλογή των τεσσάρων μιονίων του σήματος: Κατατάζτε τα μίονια σε φθίνουσα σειρά ως προς την ορμή τους. Θα πρέπει επίσης να υπάρχουν 2 αρνητικά φορτισμένα μίονια και 2 θετικά φορτισμένα μίονια εφόσον για να συνάδει η τελική κατάσταση με το σήμα θα πρέπει να φαίνεται ότι τα μίονια ανά ζεύγος προέρχονται από ουδέτερα σωματίδια.

Κατασκευάστε την αναλλοίωτη μάζα του ζεύγους μιονίων αντίθετων φορτίων. Σε κάθε γεγονός θα έχετε τουλάχιστον 4 δυνατούς συνδυασμούς (ανάλογα με το αν έχετε 4 ή περισσότερα μίονια). Κάντε την γραφική παράσταση της αναλλοίωτης μάζας

$M_{\mu^+\mu^-} = \sqrt{\left(E_{\mu^+} + E_{\mu^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\mu^+} + \vec{p}_{\mu^-}\right)^2}$ των συνδυασμών αυτών. Αυτό θα πρέπει να το κάνετε τόσο για το δείγμα του σήματος όσο και για τα δείγματα των γεγονότων υποβάθρου.

Για να κατασκευάσετε την αναλλοίωτη μάζα θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε την κλάση των 4-διανυσμάτων του ROOT (TLorentzVector) και να ορίσετε τα 4-διανύσματα των 4 μιονίων (E, \vec{p}) . Η μάζα των μιονίων είναι $106 \text{ MeV}/c^2$. Δημιουργήστε τα 4-διανύσματα των υποψηφίων Z-μποζονίων από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ζευγών μιονίων. Υπάρχει η μέθοδος *SetXYZ* της *TLorentzVector* κλάσης που δέχεται τις συνιστώσες της ορμής και μάζα για να κατασκευάσει το 4-διάνυσμα. για το σκοπό αυτό. Κοιτάζτε στο ROOT για περισσότερες πληροφορίες. Τα *TLorentzVector* αντικείμενα προστίθενται και το αποτέλεσμα είναι το 4-διάνυσμα του προκύπτοντος σωματιδίου του συνδυασμού. Κατόπιν και με βάση τους προηγούμενους συνδυασμούς δημιουργήστε τα 4-διανύσματα ζευγών ZZ σωματιδίων.

Κατασκευάστε ένα γράφημα το οποίο δείχνει τον αριθμό των ζευγών ZZ σωματιδίων που έχετε σε κάθε γεγονός για το σήμα και το υπόβαθρο που έχετε.

Απαιτήστε κατόπιν το μίονιο με την μεγαλύτερη p_T να έχει $p_T^{(1)} \geq 20 \text{ GeV}/c$, το δεύτερο σε p_T μίονιο να έχει $p_T^{(2)} \geq 15 \text{ GeV}/c$ ενώ το τρίτο σε σειρά να έχει $p_T^{(3)} \geq 10 \text{ GeV}/c$. Κατασκευάστε και πάλι ένα ιστόγραμμα με την μάζα των δύο συνδυασμών για όλα τα δείγματα γεγονότων που έχετε.

Ζητήστε ακόμα η απόσταση, ΔR_{ij} , οποιονδήποτε i, j μιονίων να είναι $\Delta R_{ij} = \sqrt{\left(\eta_{\mu_i} - \eta_{\mu_j}\right)^2 + \left(\varphi_{\mu_i} - \varphi_{\mu_j}\right)^2} > 0.1$. Κατασκευάστε και πάλι ένα ιστόγραμμα με την μάζα των δύο συνδυασμών για όλα τα δείγματα γεγονότων που έχετε.

Από τους δυνατούς συνδυασμούς αναλοϊώτης μάζας, επιλέξτε τον συνδυασμό που είναι πιο κοντά στην μάζα του Z μποζονίου ($m_{Z^0} = 91.188 \text{ GeV}/c^2$ και εύρος $\Gamma_{Z^0} = 2.495 \text{ GeV}/c^2$). Αυτός είναι ο συνδυασμός, M_{12} ή Z_1 . Θα πρέπει η μάζα να είναι στην περιοχή $60 \text{ GeV}/c^2 \leq M_{12} \leq 110 \text{ GeV}/c^2$. Αυτόματα επιλέγεται και ο δεύτερος συνδυασμός. Η μάζα του συνδυασμού αυτού, M_{34} ή Z_2 , απαιτείται να ικανοποιεί το κριτήριο $M_{\min} \leq M_{34} \leq 115 \text{ GeV}/c^2$, όπου $M_{\min} > 10 \text{ GeV}/c^2$ για την περίπτωση που η

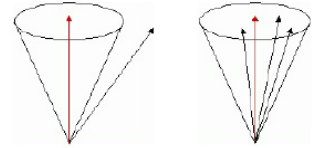
$$\text{μάζα που προκύπτει από τα 4 λεπτόνια είναι } M_{4\mu} = \sqrt{\left(\sum E_\mu\right)^2 - \left(\sum \vec{p}_\mu\right)^2} \leq 140 \text{ GeV}/c^2,$$

όπου το άθροισμα είναι ως προς τα 4 μόνια, και αυξάνει γραμμικά έως τα $50 \text{ GeV}/c^2$, για $M_{4\mu} < 190 \text{ GeV}/c^2$. Η $M_{\min} = 50 \text{ GeV}/c^2$ για $M_{4\mu} > 190 \text{ GeV}/c^2$. Κατασκευάστε και πάλι ένα ιστόγραμμα με την μάζα των δύο συνδυασμών (στο ίδιο ιστόγραμμα και οι δύο συνδυασμοί).

Αν υπάρχουν περισσότεροι από έναν συνδυασμοί M_{34} που ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια επιλέξτε τον συνδυασμό που είναι πιο κοντά στην μάζα του Z μποζονίου.

(iv) Επιλογή απομονωμένων (isolated) μιονίων: Για να ελαττώσετε το υπόβαθρο θα πρέπει να απαιτήσετε τα μόνια που επιλέξατε να είναι απομονωμένα από άλλη δραστηριότητα στο γεγονός. Η παράμετρος που θα χρησιμοποιήσετε για να χαρακτηρίσετε την απομόνωση ενός

$$\text{μιονίου είναι: } iso = \sum_{i=1}^N p_T / p_T^\mu \text{ όπου } \sum_{i=1}^N p_T \text{ είναι η εγκάρσια}$$



ενέργεια όλων των **σταθερών φορτισμένων** σωματιδίων (Status = 1) εκτός του μιονίου

$$\text{που βρίσκονται σε ένα κώνο ακτίνας } \Delta R = \sqrt{(\eta_i - \eta_\mu)^2 + (\phi_i - \phi_\mu)^2} \leq 0.3 \text{ γύρω από την}$$

διεύθυνση του μιονίου. Θα πρέπει να απαιτήσετε η απομόνωση των μιονίων να είναι

$$iso = I_\mu^{track} < 0.15.$$

Ορίστε μία ανάλογη μεταβλητή, μόνο που τώρα στο άθροισμα θα πρέπει να συμπεριλάβετε όλα τα σταθερά σωματίδια (Status=1) εκτός των νετρίνο (pid=12,14,16) τα οποία μπορούν να εναποθέσουν όλη την ενέργειά τους στο καλορίμετρο (αδρονικό και ηλεκτρομαγνητικό). Στην περίπτωση αυτή θεωρήστε $\Delta R = 0.2$ και

$$iso = I_\mu^{calo} = \sum_{i=1}^N E_T / p_T^\mu < 0.30.$$

Συμπληρώστε στον πίνακα 1 την απόδοση των κριτηρίων επιλογής από τα προηγούμενα βήματα (iii) και (iv).

Κανονικοποίηση δειγμάτων

Όλα τα ιστογράμματα της αναλλοίωτης μάζας που κάνετε στα προηγούμενα στάδια θα πρέπει να είστε σε θέση να τα συγκρίνετε σε ισοδύναμη στατιστική βάση. Τα γεγονότα που παίρνετε αντιστοιχούν σε διεργασίες διαφορετικών ενεργών διατομών και επομένως κάποια από αυτά είναι πολύ πιο πιθανόν να παραχθούν κατά το χρονικό διάστημα λειτουργίας του επιταχυντή σε σχέση με άλλα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε την λεγόμενη ολοκληρωμένη φωτεινότητα \mathcal{L} . Θα πρέπει όλα τα δείγματα γεγονότων που έχετε και επομένως τα histograms που κατασκευάζετε να αναχθούν στην ίδια ολοκληρωμένη φωτεινότητα. Επομένως για την κάθε περίπτωση δείγματος θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε κατάλληλη κανονικοποίηση. Η σταθερά της κανονικοποίησης για κάθε δείγμα (σήμα ή υπόβαθρο) καθορίζεται από την ολοκληρωμένη φωτεινότητα του

δείγματος, $\mathcal{L}_i = \frac{N_i^{\text{gev}}}{\sigma_i}$, όπου N_i^{gev} ο αριθμός των γεγονότων που παράξατε για κάθε

δείγμα i , και σ_i η αντίστοιχη ενεργός διατομή της συγκεκριμένης διαδικασίας. Θα πρέπει επομένως να κανονικοποιήσετε τα δείγματα και histograms στην ίδια ολοκληρωμένη φωτεινότητα. Θα μπορούσε να θεωρήσετε την κανονικοποίηση σε ολοκληρωμένη φωτεινότητα $\mathcal{L} = 1 \text{ fb}^{-1}$ γιατί κατόπιν για οποιαδήποτε άλλη τιμή ολοκληρωμένης φωτεινότητας θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσετε έναν πολλαπλασιαστικό παράγοντα (300 για $\mathcal{L} = 300 \text{ fb}^{-1}$ ή 3000 για $\mathcal{L} = 3000 \text{ fb}^{-1}$). Για να κατασκευάσετε το γράφημα και των δύο κατανομών θα μπορούσατε να χρησιμοποιήσετε τις μεθόδους *DrawNormalized*(#value) και *DrawNormalized*("SAME",#value), όπου #value είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης.

(B) Απαιτήστε η μάζα και των δύο Z-υποψήφιων σωματιδίων σε έναν ZZ συνδυασμό να είναι μεγαλύτερη από $10 \text{ GeV}/c^2$. Ακολουθήστε την περιγραφή που αναφέρθηκε στο τέλος του βήματος **(iii)**.

(1) Θα πρέπει να αναφέρετε τον αριθμό των γεγονότων που περνούν το κριτήριο αυτό επιλογής τόσο για το σήμα όσο και για το υπόβαθρο.

(2) Κατασκευάστε ένα γράφημα με την μάζα των υποψηφίων Z σωματιδίων, $M_{\mu\mu}$, που περνούν τα προηγούμενα κριτήρια επιλογής για το σήμα και το υπόβαθρο ξεχωριστά.

(Γ) Προσαρμόστε την κατανομή της μάζας, $M_{\mu-\mu^+}$, που αντιστοιχεί στον Z_1 συνδυασμό.

Χρησιμοποιήστε ως συνάρτηση για την προσαρμογή την συνάρτηση Breit-Wigner και κάντε την προσαρμογή σε κατάλληλη περιοχή μάζας. Η συνάρτηση Breit-Wigner δίνεται

από την σχέση $f_{BW} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Gamma}{(m - m_0)^2 + \Gamma^2/4}$ όπου $m = M_{\mu\mu}$, m_0 η μέση τιμή της μάζας στην

κορυφή και Γ το εύρος του σωματιδίου. Στην προσαρμογή σας οι παράμετροι m_0 και Γ

είναι παράμετροι που προσδιορίζονται από την προσαρμογή. Η συνάρτηση είναι ορισμένη στο ROOT αλλά θα μπορούσατε να την ορίσετε στο πρόγραμμά σας:

```
Double_t breit_wigner(Double_t *x, Double_t *par){
return par[0]*par[2]/(2.0*TMath::Pi()*
((x[0]-par[1])*(x[0]-par[1]) + par[2]*par[2]/4.0)); }
```

Η μάζα του Higgs

Κατασκευάστε ένα γράφημα με την μάζα των ζευγών των ZZ σωματιδίων που επιλέξατε. Κατασκευάστε το γράφημα αυτό ξεχωριστά για το σήμα και για το υπόβαθρο και κατόπιν μαζί (υπόβαθρο + σήμα). Από το γράφημα αυτό θα πρέπει να βλέπετε την κορυφή του σωματιδίου Higgs πάνω από την συνεισφορά των διεργασιών υποβάθρου.

Κάντε το γράφημα αυτό για ολοκληρωμένη φωτεινότητα $\mathcal{L} = 300 \text{ fb}^{-1}$ και $\mathcal{L} = 3000 \text{ fb}^{-1}$. Κάντε προσαρμογή της κατανομής της μάζας των 4 μιονίων (μάζα του Higgs) χρησιμοποιώντας μια Gaussian συνάρτηση. Προσδιορίστε το εύρος της Gaussian από την προσαρμογή. Θεωρήστε 3σ εκατέρωθεν της κορυφής της Gaussian και μετρήστε τον αριθμό των γεγονότων που περιέχονται στην περιοχή αυτή για το σήμα, αλλά και για την αντίστοιχη περιοχή των διεργασιών υποβάθρου. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα για την περίπτωση ολοκληρωμένης φωτεινότητας $\mathcal{L} = 35 \text{ fb}^{-1}$, $\mathcal{L} = 300 \text{ fb}^{-1}$ και $\mathcal{L} = 3000 \text{ fb}^{-1}$.

Φωτεινότητα	$H \rightarrow ZZ^*$ $M_{peak} \pm 3\sigma$	ZZ	$t\bar{t}$	$Z + b\bar{b}$	Αναμενόμενος αριθμός γεγονότων	S/\sqrt{B}
$\mathcal{L} = 35 \text{ fb}^{-1}$						
$\mathcal{L} = 300 \text{ fb}^{-1}$						
$\mathcal{L} = 3000 \text{ fb}^{-1}$						

Η τελευταία στήλη υπολογίζει την σημαντικότητα του αριθμού των γεγονότων σήματος, S , ως προς τον αριθμό των γεγονότων υποβάθρου, B , που αναμένονται. Αν ο αριθμός αυτός είναι μεγάλος και μεγαλύτερος από 5 σημαίνει ότι στατιστική διαταραχή των γεγονότων υποβάθρου (αβεβαιότητα $= \sqrt{B}$) είναι πολύ μικρότερη από το αναμενόμενο (στην πραγματικότητα παρατηρούμενο) σήμα.

Εδώ θα βρείτε χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τον γεννήτορα γεγονότων PYTHIA καθώς και μερικά ακόμα πληροφορίες.

Εγκατάσταση του γεννήτορα PYTHIA – (FORTRAN)

Για την εγκατάσταση του γεννήτορα MonteCarlo PYTHIA ακολουθήστε τις παρακάτω οδηγίες:

1. Δημιουργήστε έναν directory που ονομάζεται pythia6 με την εντολή `mkdir pythia6`
2. `cd pythia6`
3. Download την πιο τελευταία version του pythia6 file (6.4.28) από την επίσημη ιστοσελίδα (χρησιμοποιώντας την εντολή `wget`):
`wget http://www.hepforge.org/archive/pythia6/pythia-6.4.28.f.gz --no-check-certificate`
Αν το παραπάνω δεν δουλεύει, μπορείτε να κατεβάσετε το PYTHIA από την ιστοσελίδα <http://www2.ucy.ac.cy/~fotis/phy347/Homeworks/pythia6/pythia-6.4.28.f>
4. `gunzip pythia-6.4.28.f.gz` (πιθανόν να είναι αυτόματα unzipped)
5. Κάντε compile το file της PYTHIA δίνοντας την εντολή: (`g77` αν υπάρχει)
`gfortran -c -m64 -fPIC pythia-6.4.28.f`
Θα σας δώσει το file `pythia-6.4.28.o`
6. Κατεβάστε το file <http://www2.ucy.ac.cy/~fotis/phy347/Homeworks/project2018/main.f>
Το file αυτό μπορείτε να το χρησιμοποιήσετε για να περάσετε μεταβλητές στο PYTHIA. Αποτελεί ένα καλό παράδειγμα για το τι χρειάζεστε για να δημιουργήσετε τα αρχεία με τα δεδομένα σας όπως περιγράφονται στο (α) μέρος της άσκησης.
Θα πρέπει να το κάνετε compile επίσης δίνοντας την ανάλογη εντολή όπως για το PYTHIA: `gfortran -c -m64 -fPIC main.f`
Θα πάρετε ένα file με το όνομα `main.o`
7. Κάντε link τα δύο ο files για να πάρετε το executable. Για να το κάνετε αυτό δώστε την εντολή: `gfortran -Wall main.o pythia-6.4.28.o -o run_pythia.exe` (μια παύλα “-”)
Αν θέλετε να αλλάξετε κάτι, το μόνο που χρειάζεται να αλλάξετε είναι το `main.f` και επομένως είναι το μόνο file που πρέπει να κάνετε compile (βήμα 6). Μετά το compilation μπορείτε να κάνετε link σύμφωνα με την βήμα 7.
Μπορείτε να κατεβάσετε από την ιστοσελίδα του μαθήματος το file: <http://www2.ucy.ac.cy/~fotis/phy347/Homeworks/project2018/compile.sh>
το οποίο αφού κάνετε executable (`chmod +x compile.sh`) μπορείτε να χρησιμοποιήσετε για να κάνετε compile και link τα δύο αρχεία (βήματα 5, 6, 7)
8. Κατεβάστε από την ιστοσελίδα του μαθήματος το file: <http://www2.ucy.ac.cy/~fotis/phy347/Homeworks/project2018/pp2H2ZZ4mu.inp>
το οποίο περιέχει τις παραμέτρους για τη δημιουργία της διεργασίας $pp \rightarrow H^0 \rightarrow ZZ^*$. Όπως θα δείτε υπάρχει η παράμετρος `PMAS(25,1)` που θέτει την μάζα του Higgs ίση με $125 \text{ GeV}/c^2$. Υπάρχουν 2 διεργασίες που παράγουν το Higgs. Η διεργασία `MSUB(102)` η οποία ονομάζεται gluon-gluon fusion, $gg \rightarrow H^0$ (δείτε το παρακάτω σχήμα). Επίσης

υπάρχει η διεργασία VBF (vector boson fusion) MSUB(123)=1 και MSUB(124)=1 όπου δύο διανυσματικά μποζόνια (W^+W^- ή Z^0Z^0) που εκπέμπονται από τα quarks των σκεδαζόμενων πρωτονίων μετατρέπονται σε Higgs, όπως στο σχήμα.

Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να περάσουν στο executable που δημιουργήσατε στο βήμα 10, δίνοντας την εντολή `./run_pythia.exe < pp2H2ZZ4mu.inp`

Κοιτάζετε τι περιέχει το file `pp2H2ZZ4mu.inp`. Σημειώστε ότι οι παράμετροι που σας δόθηκαν στο file θα δημιουργήσουν 2 γεγονότα τα οποία θα γραφούν στο file `HZZ.dat`. Θα πρέπει να αλλάξετε κατάλληλα το file `pp2H2ZZ4mu.inp` που σας δόθηκε ώστε να έχετε τον αριθμό γεγονότων που θέλετε.

Σύμφωνα με το file αυτό, η πληροφορία που δίνεται για κάθε σωματίδιο είναι στην μορφή: “**Event Index PId Status MotherPos Px Py Pz E Mass**”.

Όπου Index είναι η θέση του σωματιδίου στην λίστα των σωματιδίων του γεγονότος, PId το Id του σωματιδίου, Status πληροφορεί αν το σωματίδιο είναι σταθερό (Status=1) ή διασπάται (Status#1), , MotherPos η θέση της μητέρας του σωματιδίου στην λίστα των σωματιδίων του γεγονότος, και Px, Py, Pz, E και Mass η 4-ορμή και μάζα του σωματιδίου.

Η πληροφορία σχετικά με την θέση της μητέρας προστέθηκε ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα να κοιτάζετε το ίδιο σωματίδιο το οποίο γράφεται δυο φορές από το PYTHIA. Για παράδειγμα, στην παραγωγή και διάσπαση του Higgs σε δυο φωτόνια, η πληροφορία της διάσπασης γράφεται δυο φορές γιατί το PYTHIA κάνει διόρθωση στο κέντρο μάζας των τελικών προϊόντων της διεργασίας. Ωστόσο δεν θα θέλατε να επιλέξετε το ίδιο σωματίδιο δυο φορές. Για το λόγο αυτό θα πρέπει το σωματίδιο που ελέγχεται να έχει σαν πρόγονο τον εαυτό του. Επομένως θα πρέπει να δείτε αν το id που αντιστοιχεί στη θέση της μητέρας είναι ίδιο με το id του σωματιδίου που κοιτάζετε.

Ένας διαφορετικός τρόπος θα ήταν να υπολογίσετε με βάση τις συνιστώσες της ορμής του κάθε σωματιδίου την γωνία ϕ και θ και από την γωνία θ να υπολογίσετε την ψευδο-ωκύτητά του $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$, όπου θ η αζιμουθιακή γωνία, μεταξύ της ορμής και του άξονα z της δέσμης. Μπορείτε να βρείτε την απόσταση δυο σωματιδίων στον η - ϕ χώρο σύμφωνα με τη σχέση του ΔR που δίνεται παρακάτω και να ζητήσετε το ΔR να είναι μικρότερο από κάποια τιμή ($\Delta R < 0.1$) την οποία μπορείτε να επιλέξετε αφού κάνετε το αντίστοιχο γράφημα για να δείτε την κατανομή ΔR .

9. Ανάλογα κατεβάστε τα ακόλουθα αρχεία:

<http://www2.ucey.ac.cy/~fotis/phy347/Homeworks/project2018/pp2ZZ4mu.inp>

<http://www2.ucey.ac.cy/~fotis/phy347/Homeworks/project2018/pp2ttbar4mu.inp>

<http://www2.ucey.ac.cy/~fotis/phy347/Homeworks/project2018/pp2Zbbar4mu.inp>

τα οποία περιέχουν τις εντολές για την παραγωγή των γεγονότων υποβάθρου.

Θα πρέπει να τροποποιήσετε τα αρχεία αυτά ώστε να δημιουργήσετε τον αριθμό γεγονότων που θέλετε ή το όνομα του file στο οποίο θα γραφούν τα γεγονότα.

Πληροφορίες για το PYTHIA μπορείτε να βρείτε στην ιστοσελίδα του prof. Torbjorn, συγγραφέα του PYTHIA, <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/pythia6/lutp0613man2.pdf> καθώς και στην ιστοσελίδα <https://pythia6.hepforge.org>.

Θα χρειαστείτε επίσης μερικά ως προς τον κωδικό των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται από το PYTHIA. Τη λίστα των σωματιδίων και τους κωδικούς τους μπορείτε να τους βρείτε από την ιστοσελίδα του particle data group: <http://pdg.lbl.gov> και ιδιαίτερα την επιμέρους ιστοσελίδα <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-monte-carlo-numbering.pdf>

Particle	Particle Code
H^0	25
e^\pm	± 11
μ^\pm	± 13
ν_e, ν_μ, ν_τ	12,14,16
Z	23
π^\pm	± 211
K^\pm	± 321
p^\pm	± 2212

Επίσης για τις μεταβλητές/παραμέτρους του PYTHIA οι βασικότερες είναι:

Παράμετρος	Λειτουργία
MSEL=i	Επιλογή διεργασίας σκέδασης
MSUB(i) = 1/0	Διακόπτης για ON/OFF διεργασίας i
MDME(i) = 1/0	Διακόπτης για ON/OFF διεργασίας διάσπασης i
PMAS(i) = j	Θέτει τιμή για την μάζα του σωματιδίου i σε $j \text{ GeV}/c^2$
CKIN(3)	Χαμηλότερο p_T όριο για την σκέδαση
CKIN(4)	Υψηλότερο p_T όριο για την σκέδαση

Μερικές χρήσιμες σχέσεις:

$$M_{X \rightarrow n\text{part}}^2 = \left(\sum_{i=1}^{n\text{part}} E_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n\text{part}} \vec{p}_i \right)^2$$

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

$$E^2 = p^2 + m^2$$

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} \quad \text{η απόσταση μεταξύ δυο σωματιδίων στον η-φ χώρο.}$$