



Vrije
Universiteit
Brussel

Academiejaar 2006 - 2007

Faculteit Wetenschappen
Departement Natuurkunde
Stijn Blyweert

Bachelorproject:

De zoektocht naar supersymmetrie met de
CMS-detector nabij de LHC-versneller te CERN

Promotor: Prof. Dr. Jorgen D'Hondt

Inhoudsopgave

1	Elementaire deeltjes fysica	2
1.1	Het Standaard Model	2
1.2	Uitbreiding van het Standaard Model: Supersymmetrie	5
2	De Large Hadron Collider	7
2.1	Het CERN laboratorium	7
2.2	De LHC versneller	7
2.3	De CMS detector	10
3	Kinematica van $t\bar{t}$ events	13
3.1	Productie en verval van top en anti-top quarks aan de LHC	13
3.2	Analyse van gesimuleerde $t\bar{t}$ events	14
4	Onderscheid tussen mSUGRA en Standaard Model in gesimuleerde protonbotsingen	18
4.1	Hypothese toetsen	18
4.2	Scheiding van Standaard Model en mSUGRA aan de hand van kinematische verschillen	19
4.3	Conclusie's	25

Hoofdstuk 1

Elementaire deeltjes fysica

1.1 Het Standaard Model

Het Standaard Model [1] van de elementaire deeltjes fysica is een theorie die alle bekende elementaire deeltjes beschrijft en die drie van de vier fundamentele interacties tussen de elementaire deeltjes beschrijft. Het is een kwantumveldentheorie die consistent is met kwantummechanica en speciale relativiteit. Het is zeker geen complete theorie aangezien ze nog vele vragen onbeantwoord laat.

Volgens het Standaard Model bestaat alle materie om ons heen uit 4 elementaire deeltjes: de upquark (u), de downquark (d), het elektron (e of e^-) en het elektron-neutrino (ν_e). Dit zijn de deeltjes van de eerste generatie van de materie. In het Standaardmodel zijn er in totaal drie generaties van de materie, zoals uit verschillende experimenten bleek. De verzameling van 4 deeltjes wordt dus drie keer herhaald, steeds met andere deeltjes die een aantal overeenkomstige eigenschappen hebben met hun "broertjes" uit de andere generaties, zoals de elektrische lading, en een aantal eigenschappen hebben die verschillen per generatie, zoals de massa. De deeltjes uit de tweede generatie zijn de charm quark (c), de strange quark (s), het muon (μ of μ^-) en het muon-neutrino (ν_μ). Die van de derde generatie zijn de bottom quark (b), de top quark (t), het tau-lepton (τ of τ^-) en het tau-neutrino (ν_τ). Al deze materiedeeltjes hebben spin $1/2$ en zijn dus fermionen. Volgens het Standaard Model hebben al deze deeltjes een massa verschillend van 0, uitgezonderd de neutrino 's. In recente experimenten is gebleken dat deze neutrino's weldegelijk een massa hebben, maar dat deze zéér klein is. De massa van de deeltjes wordt steeds hoger per generatie. Zo heeft een tau-lepton een grotere massa dan een muon, dat op zijn beurt een grotere massa heeft dan een elektron. Het zwaarste materiedeeltje dat tot nu toe bekend is, is het top quark. Het

heeft een massa van $(170,9 \pm 1,8) \text{ GeV}/c^2$ [2]. Omwille van deze hoge massa was het heel moeilijk om het deeltje te produceren (er was hiervoor een versneller nodig met een zeer hoge massamiddelpuntsenergie) en werd het pas ontdekt in 1995 aan de Tevatron $p\text{-}\bar{p}$ versneller, die toen een massamiddelpuntsenergie bereikte van 1,8 TeV. Tevatron is tot nu toe nog steeds de enige versneller waar er top quarks kunnen geproduceerd worden.

Elk materiedeeltje heeft ook nog een ander "broertje": een anti-materiedeeltje. Dit is een deeltje met dezelfde massa, maar een tegengestelde lading. De anti-deeltjes van de eerste generatie zijn dus de anti-up quark (\bar{u}), de anti-down quark (\bar{d}), het anti-elektron of positron (\bar{e} of e^+) en het elektron-antineutrino ($\bar{\nu}_e$). Deze van de tweede generatie zijn de anti-charm quark (\bar{c}), de anti-strange quark (\bar{s}), het anti-muon ($\bar{\mu}$ of μ^+) en het muon-antineutrino ($\bar{\nu}_\mu$). Voor de derde generatie zijn dit de anti-bottom quark (\bar{b}), de anti-top quark (\bar{t}), het anti-tau lepton ($\bar{\tau}$ of τ^+) en het tau-antineutrino ($\bar{\nu}_\tau$). In totaal zijn dit dus 24 deeltjes. Al deze deeltjes hebben spin 1/2 en zijn dus fermionen.

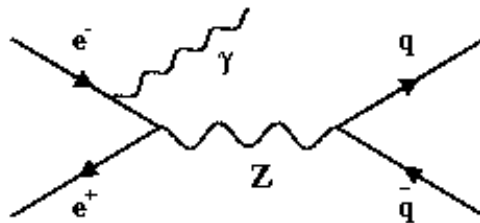
Zoals reeds vermeld werd, bestaat alle materie om ons heen uit deeltjes van de eerste generatie. Dit is een gevolg van het feit dat enkel deeltjes van de eerste generatie stabiel zijn. Wanneer er bijvoorbeeld in een experiment deeltjes gevormd worden van de tweede of de derde generatie, dan zullen deze vervallen naar deeltjes uit de eerste generatie. Een belangrijke eigenschap van quarks is dat ze enkel in gebonden toestanden van meerdere quarks voorkomen, hadronen genoemd. Deze hadronen bestaan uit valentiequarks en uit zeequarks. De valentiequarks zijn diegenen die de kwantumgetallen bepalen. Zeequarks zijn kortlevende quark antiquark paren die enkel bijdragen tot de rustenergie. Een proton (p) bijvoorbeeld is opgebouwd uit 3 valentiequarks: 2 upquarks en 1 downquark (u, u, d). Een neutron is ook opgebouwd uit 3 valentiequarks: 1 upquark en 2 downquarks (u, d, d). Alle materie om ons heen is opgebouwd uit atomen en die zijn opgebouwd uit elektronen en atoomkernen. De atoomkernen zijn op hun beurt opgebouwd uit protonen en neutronen, die opgebouwd zijn uit up- en downquarks. Dus vormen de up- en down quarks samen met de elektronen de bouwstenen van alle materie om ons heen. De neutrino's komen ook veel voor in de natuur, maar worden nooit rechtstreeks waargenomen aangezien ze bijna nooit interageren. Ze kunnen wel onrechtstreeks worden waargenomen aangezien in hun verval deeltjes worden gevormd die wel kunnen worden waargenomen. Een ander belangrijk gevolg van het feit dat quarks enkel in gebonden toestand voorkomen zijn de jets [3] van deeltjes. Wanneer bijvoorbeeld een s -quark wordt gevormd tijdens een experiment, dan zal dit niet rechtstreeks gedetecteerd worden maar zal er een jet van deeltjes worden gedetecteerd. Zo een jet is een verzameling van deeltjes die allemaal in dezelfde richting worden

geproduceerd en die dus in een kegelvormig gebied zullen worden gedetecteerd. De exacte eigenschappen van deze jets zijn zeer ingewikkeld en zijn nog niet volledig begrepen. Wel kunnen uit deze jets eigenschappen worden gehaald van de oorspronkelijke quark dat aanleiding gaf tot de jet. Er is echter één uitzondering: de top quark zal niet direct aanleiding geven tot een jet want de vervaltijd van de top quark is zodanig klein dat het deeltje zal vervallen alvorens er een jet kan gevormd worden. De vervalproducten kunnen natuurlijk wel een jet vormen, maar dan is er geen sprake meer van rechtstreekse productie van de jet door het top quark.

Volgens het Standaard Model gebeuren de interacties tussen deze deeltjes door het uitwisselen van een krachtoverbrengend boson. Elke interactie heeft zo zijn eigen bosonen. Tot zover bekend bestaan er vier fundamentele interacties. Ten eerste is er de gravitatie of de zwaartekracht. Hierbij is het krachtoverbrengend boson het graviton. Dit is het enige krachtoverbrengende boson dat nog nooit experimenteel is waargenomen en het wordt totaal niet beschreven door het Standaard Model. Deze wisselwerking treedt op tussen alle deeltjes, maar ze is in het algemeen heel zwak op korte afstanden in vergelijking met de andere interacties. De zwaartekracht zorgt ervoor dat de planeten in banen bewegen en ze zorgt natuurlijk ook voor de aantrekkingskracht van de aarde, waardoor alles naar de aarde wordt aangetrokken. Ten tweede is er de elektromagnetische wisselwerking. Deze wordt overgebracht door het foton (γ). Ze treedt op tussen alle deeltjes die elektrisch geladen zijn en is verantwoordelijk voor onder andere licht, elektriciteit, magneten, radiogolven, enz. Ten derde is er de sterke interactie. Deze wordt overgebracht door de acht gluonen (g) en ze treedt op tussen alle deeltjes die een kleurlading hebben: de quarks en de gluonen zelf. Ze zorgt voor de aantrekkingskracht tussen de quarks binnen de protonen en neutronen en voor de aantrekkingskracht tussen de protonen en neutronen in de atoomkern. Ten vierde is er de zwakke wisselwerking. Deze wordt overgebracht door de W en de Z bosonen (W^+ , W^- , Z^0). Ze treedt op tussen alle quarks en leptonen en ze zorgt voor het neutronverval en het β^- -verval van radioactieve kernen. Al deze krachtoverbrengende bosonen hebben een spin die gelijk is aan 1 en hebben, op het foton na, een massa die verschilt van 0.

Veel gebruikte schematische voorstellingen van de interactie van elementaire deeltjes zijn de Feynman-diagrammen [4]. Bij deze diagrammen is de horizontale as de tijd-as en de verticale as de ruimte-as. Bosonen worden hierop weergegeven door een golvende lijn, een gekrulde lijn of een stippelijne en fermionen worden weergegeven door volle lijnen met een pijl op. Wanneer deze pijl in dezelfde zin als de tijd-as gaat, dan is het deeltje een gewoon materiedeeltje en wanneer deze pijl in de tegengestelde zin dan de tijd-as gaat, dan gaat het over een anti-materiedeeltje. Deze notatie wordt zo gekozen

omdat een anti-materiedeeltje kan worden gezien als een materiedeeltje dat teruggaat in de tijd. Het op de figuur getoonde Feynman-diagram toont de interactie tussen een elektron en een positron. Het elektron straalt eerst een foton uit en interageert dan met het positron, waardoor er een Z-boson wordt gevormd. Dit Z-boson vervalt dan even later in een quark en een anti-quark. Deze Feynman-diagrammen zijn niet enkel een grafische voorstelling voor de interactie maar zijn ook een handig hulpmiddel om berekeningen over de interactie mogelijk te maken. Zo kan bijvoorbeeld de werkzame doorsnede van een proces uit het Feynman-diagram van dit proces berekend worden.



Voorbeeld van een Feynman-diagram

Het laatste deeltje dat door het Standaard Model voorspeld wordt is het Higgs boson. Dit deeltje met spin 0 is een belangrijk deeltje in het Standaard Model en zorgt er via het Higgs mechanisme voor dat alle deeltjes een massa kunnen krijgen. Dit is het enige deeltje van het Standaard Model dat nog nooit met zekerheid experimenteel werd waargenomen.

1.2 Uitbreiding van het Standaard Model: Supersymmetrie

Het Standaard Model is zeker geen volledige theorie van de fundamentele interacties. Ten eerste omdat gravitatie hierdoor niet wordt beschreven. Ten tweede omdat er een groot aantal numerieke parameters (zoals massa 's en koppelingsconstanten) “met de hand” moeten worden ingestoken, in plaats van dat ze kunnen worden afgeleid uit de theorie zelf of uit de basisprincipes van de theorie. Ook zijn er reeds experimentele feiten die erop wijzen dat er uitbreidingen van het Standaard Model nodig zijn. Een voorbeeld hiervan is de neutrino oscillatie [5]. Hierbij verandert de flavour (elektron, muon of tau) van een neutrino in de tijd. Een elektron neutrino bijvoorbeeld kan dan na een bepaalde tijd veranderen in een neutrino uit een andere generatie (muon of tau) en daarna opnieuw naar zijn oorspronkelijke flavour terugkeren. Dit

		Fermions			Bosons	
Quarks		u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
		d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
		e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
					Higgs* boson	

*Yet to be confirmed

Overzicht van alle door het Standaard Model voorspelde deeltjes

kan enkel optreden wanneer de neutrino 's een massa hebben die verschillend is van 0, wat niet door het Standaard Model wordt beschreven.

Een mogelijke uitbreiding van het Standaard Model is supersymmetrie (SUSY). Supersymmetrie [6] is een symmetrie die elk boson en elk fermion een superpartner geeft. Elk fundamenteel boson krijgt een fermionische superpartner en elk fundamenteel fermion krijgt een bosonische superpartner. Supersymmetrie is een gebroken symmetrie, aangezien de superpartners, als ze bestaan, een veel hogere massa hebben dan hun gewone partners (de reeds gekende deeltjes uit het Standaard Model). Een van de meest bestudeerde uitbreidingen van het Standaard Model is het Minimaal Supersymmetrisch Standaard Model (MSSM) [7]. Dit is de kleinst mogelijke uitbreiding van het Standaard Model die supersymmetrie realiseert. De theorie voorspelt superpartners met een massa tussen $100 \text{ GeV}/c^2$ en $1 \text{ TeV}/c^2$, maar tot hier toe is er nog geen onweerlegbaar experimenteel bewijs van het bestaan van deze superpartners. Dit project heeft als doel een kleine aanzet te geven in deze zoektocht naar supersymmetrie, meer bepaald in de zoektocht naar mSUGRA (minimal supergravity Grand Unification), een van de vele supersymmetrische uitbreidingen van het Standaard Model.

Hoofdstuk 2

De Large Hadron Collider

2.1 Het CERN laboratorium

Het CERN [8] (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) laboratorium in de omgeving van Genève is een internationaal laboratorium dat werd opgericht op 29 september 1954. Het was de eerste gemeenschappelijke onderneming van een aantal Europese landen die later de Europese Unie zouden oprichten. Het heeft als doel de bouwstenen van de materie en de krachten die deze bouwstenen samenhouden te bestuderen. Het is een zeer succesvolle samenwerking die reeds verschillende belangrijke ontdekkingen heeft gedaan, waaronder de ontdekking van de neutrale stromen, de ontdekking van de W en de Z bosonen en de eerste productie van enkele anti-waterstofatomen. Een andere belangrijke prestatie van het CERN is de realisatie van het “World Wide Web” zoals iedereen het vandaag kent. Het CERN heeft momenteel verschillende experimenten lopen. Het belangrijkste en het grootste is natuurlijk de Large Hadron Collider, die hieronder uitgebreid wordt beschreven. Enkele van de andere experimenten die door het CERN worden uitgevoerd zijn ISOLDE (studie van onstabiele kernen), de antimaterie-experimenten (productie en studie van anti-waterstof, opgebouwd uit een antiproton en een anti-elektron in plaats van een proton en een elektron), CNGS (studie van neutrino-oscillatie), ...

2.2 De LHC versneller

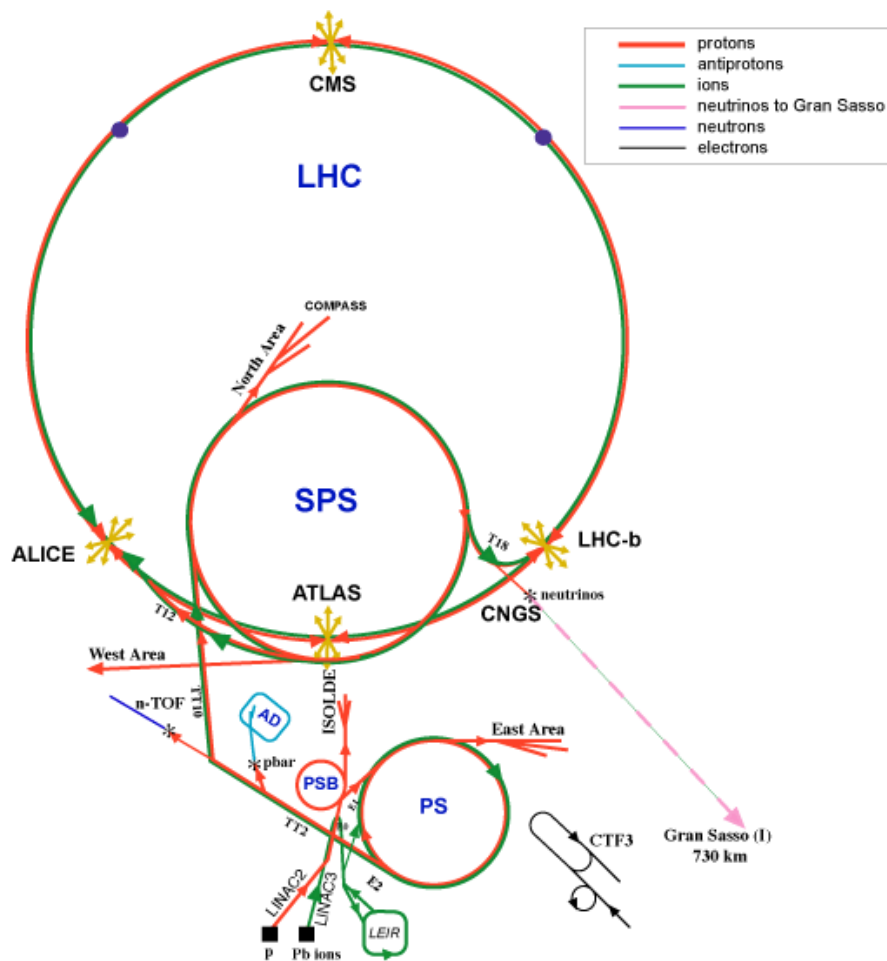
De Large Hadron Collider (LHC) [9] is de deeltjesversneller die momenteel wordt gebouwd in het CERN laboratorium. Hij zal, als alles loopt zoals gepland, vanaf november 2007 protonbotsingen realiseren. Deze zullen eerst bij lagere energie en luminositeit gebeuren en vanaf 2008 zullen deze pro-

tonbotsingen worden gerealiseerd met een massamiddelpuntsenergie van 14 TeV. De luminositeit en botsingsenergie liggen vele malen hoger dan al zijn voorgangers. Hierdoor wordt dus een nieuw gebied in de elementaire deeltjesfysica experimenteel toegankelijk en de verwachtingen zijn natuurlijk bijzonder hoog gespannen. Onder andere het bestaan van het Higgs-boson, van supersymmetrie en van andere uitbreidingen van het Standaardmodel zal eindelijk experimenteel bevestigd of ontkracht kunnen worden. De LHC versneller zal ook, maar in mindere mate, gebruikt worden om zware kernen zoals lood (Pb) te versnellen om het quark-gluonen plasma te bestuderen. Dit is een speciale fase van de materie waarin de quarks en de gluonen niet gebonden zijn, wat ze in normale omstandigheden wel altijd zijn.

De LHC wordt gebouwd in de reeds bestaande tunnel van de Large Electron Positron Collider (LEP) en zal dus een cirkelvormige versneller zijn met een omtrek van ongeveer 27 kilometer die zich 50 tot 175 meter onder de grond bevindt. De beide protonbundels zullen elk versneld worden tot een energie van 7 TeV. Dit komt overeen met een snelheid van 99,9999991 % van de lichtsnelheid [10]. Met deze snelheid zullen de protonen er slechts $90\mu s$ over doen om 1 keer volledig rond te gaan in de versneller. Om de protonen aan zo een hoge snelheid af te buigen zijn natuurlijk heel sterke magneetvelden nodig. Hiervoor worden supergeleidende magneten [10] gebruikt waardoor een stroom van ± 11700 Ampère loopt en die een magneetveld van $\pm 8,33$ Tesla produceren. Hiervoor moeten deze magneten gekoeld worden met supervloeibaar Helium tot een temperatuur van $\pm 1,9$ Kelvin.

De protonen worden bekomen door de volledige ionisatie van H_2 -gas. Deze protonen versnellen tot zo een hoge snelheid kan natuurlijk nooit in 1 keer gebeuren. Daarom worden de protonen eerst versneld door een aantal voorversnellers voor ze in de LHC worden geïnjecteerd:

1. *Linac2*: Deze lineaire versneller genereert protonen tot 50 MeV.
2. *Proton Synchrotron Booster (PSB)*: De eerste synchrotron versnelt de protonen van de *Linac2* tot 1,4 GeV.
3. *Proton Synchrotron (PS)*: De protonen worden verder versneld tot 26 GeV.
4. *Super Proton Synchrotron (SPS)*: De protonen worden in deze laatste voorversneller versneld tot een energie van 450 GeV.
5. *Large Hadron Collider (LHC)*: Deze versnelt de protonen verder tot 7 TeV en laat beide bundels met elkaar botsen.



De versnellers van het CERN

De twee protonbundels zullen op vier plaatsen met elkaar in botsing worden gebracht. Rond deze vier plaatsen worden momenteel gigantische detectoren gebouwd in grote ondergrondse ruimten om na te kunnen gaan wat er juist gebeurt tijdens deze botsingen en welke deeltjes er allemaal geproduceerd worden tijdens de botsingen. Er zullen in totaal 6 experimenten worden uitgevoerd:

- ATLAS (*A large Thoroidal LHC ApparatuS*): Een algemene detector die vooral bedoeld is om mogelijke nieuwe processen en deeltjes te ontdekken.
- CMS (*Compact Muon Solenoid*): Net als ATLAS een algemene detector om mogelijke nieuwe processen en deeltjes te ontdekken.

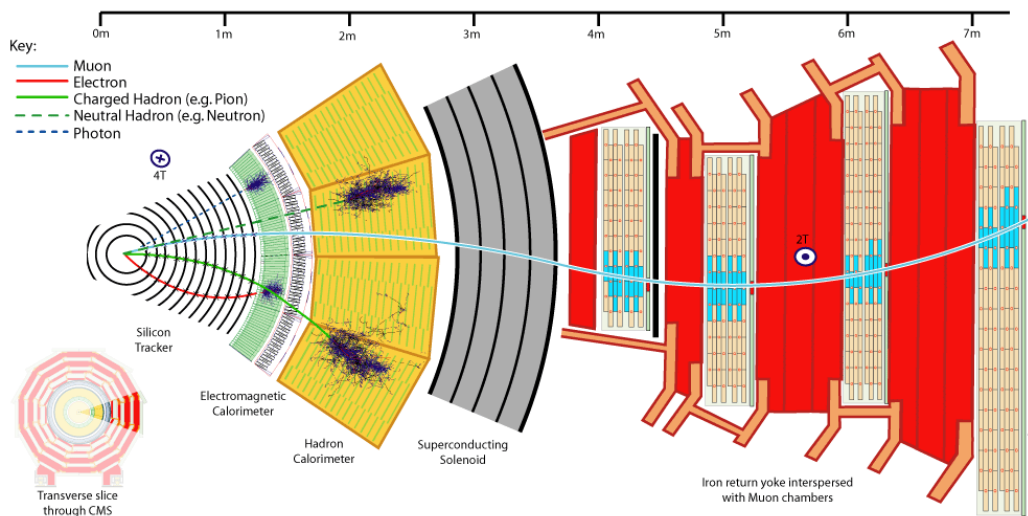
- LHCb (***LHC-beauty***): Een gespecialiseerde detector in b-quark fysica, meer bepaald in de CP schending in de interactie van b-hadronen (zware deeltjes die een bottom quark bevatten).
- ALICE (***A Large Ion Collider Experiment***): Een gespecialiseerde detector die botsingen tussen zware ionen zal opmeten.
- TOTEM (***Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation***): Een kleiner experiment dat totale werkzame doorsnede, elastische verstrooiing en diffractieve processen zal meten. Dit experiment zal op ongeveer dezelfde plaats als het CMS-experiment worden uitgevoerd.
- LHCf (***LHC-forward***): Een gespecialiseerde detector die de deeltjes bestudeert die in de voorwaartse richting (bijna evenwijdig met de bundelpijp) zullen worden geproduceerd. Dit experiment zal op zijn beurt op dezelfde plaats als het ATLAS-experiment worden uitgevoerd.

Eén van de unieke eigenschappen van de LHC is dat het de eerste versneller is die een voldoende hoge energie kan bereiken om het terrein van de top quark fysica eindelijk experimenteel toegankelijk te maken. De vorige versneller die top quarks kon produceren, de Tevatron, kon ze wel produceren maar niet in voldoende hoge aantallen om de top quark fysica volledig experimenteel toegankelijk te maken, wat nu dus wel het geval is.

2.3 De CMS detector

De CMS detector [11] is een cilindervormige detector die 21 meter lang is, een diameter heeft van 16 meter en ongeveer 12500 ton weegt. Het is een algemene detector die in staat is om zoveel mogelijk verschillende aspecten van de protonbotsingen bij 14 TeV te bestuderen. De detector is opgebouwd uit verschillende cilindervormige lagen die elk hun functie hebben:

- *Silicium spoordetector*: Zeer precieze silicium sensoren die toelaten om heel nauwkeurig de posities van doorgaande geladen deeltjes te meten en te bepalen waar stabielere deeltjes juist vervallen. Uit de afbuiging van deze geladen deeltjes in het magnetisch veld kunnen ook de impulsen van de deeltjes bepaald worden. De VUB heeft zelf een deel van deze spoordetector modules geassembleerd. In de spoordetector worden pixeldetectors en stripdetectors gebruikt. Pixeldetectors zijn opgebouwd uit pixels en kunnen dus heel nauwkeurig het spoor van een



Transverse doorsnede van de CMS-detector

geladen deeltje bepalen. Stripdetectoren daarentegen zijn opgebouwd uit een aantal parallelle strips en meten enkel in welke strip het deeltje wordt gedetecteerd.

- *Electromagnetic Calorimeter*: Een calorimeter om de energie van elektromagnetisch interagerende deeltjes te bepalen zoals fotonen, elektronen en positronen. Deze bestaat uit 80 000 scintillerende $PbWO_4$ kristallen van 22 mm op 22 mm en ongeveer 23 cm lang. Er werd voor dit kristal gekozen omwille van de korte radiatielengte en omdat het een snelle scintillator is. Achter de kristallen worden fotodiodes geïnstalleerd en uit de meting van het scintillatielicht kan de energie van de deeltjes worden bepaald.
- *Hadron Calorimeter*: Deze calorimeter is bedoeld om de energie van hadronen, zoals protonen, neutronen, pionen, kaonen, . . . waaruit jets zijn opgebouwd te meten. De calorimeter is opgebouwd uit verschillende lagen van afwisselend koperplaten van 50 mm dik en scintillatorplaatjes van 4 mm dik. Koper werd gekozen omwille van zijn dichtheid.
- *Superconducting Solenoid*: Deze gigantische supergeleidende magneet is 13 meter lang en heeft een diameter van 6 meter. Hiermee is hij de grootste supergeleidende magneet ter wereld. Het is een gekoelde supergeleidende $NiTi$ solenoïde en hij produceert een magneetveld van ± 4 Tesla. Dit hoge magneetveld is nodig om de impulsen van de

deeltjes die gedetecteerd worden in de *Silicium spoordetector* te bepalen. Het hoge magnetisch veld heeft natuurlijk ook een invloed op de calorimeters en zorgde voor een grote technologische uitdaging!

- *The Muon Detectors en Iron Return Yoke*: Dit buitenste gedeelte dient om de impulsen van de muonen zo nauwkeurig mogelijk op te meten en voor de identificatie van de muonen. Dit gedeelte is afwisselend opgebouwd uit stukken ijzer en uit muondetectoren. Deze stukken ijzer zijn nodig om er zeker van te zijn dat de gedetecteerde deeltjes weldegelijk muonen zijn aangezien muonen (en neutrino's) de enige deeltjes zijn die zo ver kunnen doordringen.

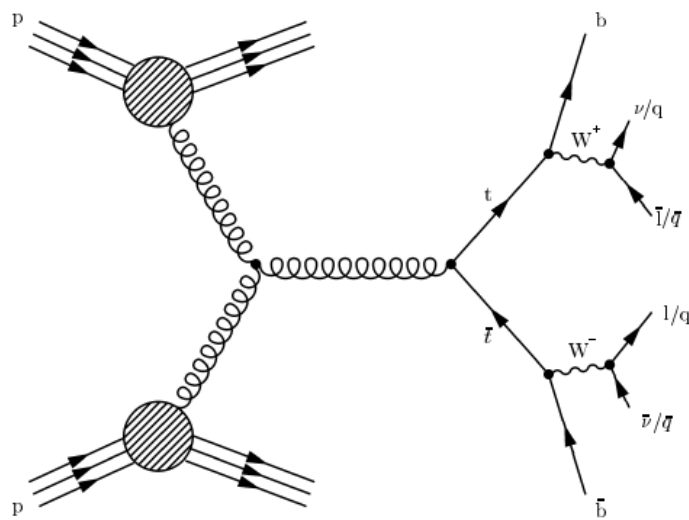
Er zijn ook bepaalde deeltjes, zoals de neutrino's of bepaalde SUSY-deeltjes, die niet door de CMS-detector kunnen worden waargenomen aangezien ze slechts heel uitzonderlijk een interactie ondergaan. Wanneer zulke deeltjes worden gevormd tijdens een botsing, dan kan hun aanwezigheid enkel worden gedetecteerd door de totale impuls loodrecht op de bundelpijp te meten. Aangezien de inkomende deeltjes (meestal protonen) door deze pijp vliegen moet de totale transverse impuls voor en na de interactie gelijk aan nul zijn. Wanneer alle detectoren samen een totale transverse impuls meten die niet nul is, dan zijn er bijgevolg een aantal deeltjes ontsnapt. Voor het nauwkeurig opmeten van dit *missing transverse momentum* moet de detector dus goed alle deeltjes die hij kan detecteren ook daadwerkelijk detecteren en hun energie goed opmeten. Om er zeker van te zijn dat zoveel mogelijk deeltjes worden opgemeten moet de detector het interactiepunt dus goed insluiten.

Hoofdstuk 3

Kinematica van $t\bar{t}$ events

3.1 Productie en verval van top en anti-top quarks aan de LHC

Top en anti-top quarks worden in grotere hoeveelheden geproduceerd bij de protonbotsingen aan de LHC dan aan de Tevatron versneller. Dit is een gevolg van de hogere massamiddelpuntsenergie van de LHC: 1,96 TeV voor de Tevatron tegenover 14 TeV voor de LHC. De productie van top quarks aan de LHC gebeurt in 90 % van de gevallen volgens het productiemechanisme getoond in het Feynman-diagram.



Feynman diagram van de productie en het verval van top quarks

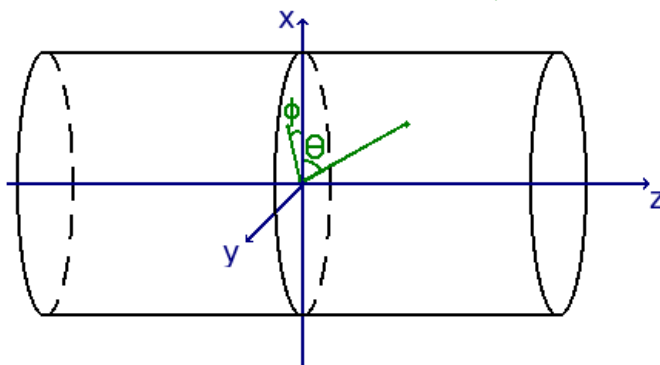
Hierbij interageren twee gluonen (van de botsende protonen) en wordt er een top anti-top ($t\bar{t}$) paar geproduceerd. Er bestaat ook nog een tweede productiemechanisme dat in de andere 10 % van de gevallen optreedt. Hierbij botsen twee quarks van de protonen en hieruit wordt dan een $t\bar{t}$ paar geproduceerd. Het verval van top en anti-top quarks gebeurt ongeveer altijd op dezelfde manier. Top quarks vervallen in een W^+ boson en een b -quark, anti-top quarks in een W^- boson en een \bar{b} -quark. De b - en \bar{b} -quarks zullen een jet vormen en de W bosonen kunnen op twee manieren vervallen. Bij de eerste manier (het leptonisch verval) zal het W^+ boson vervallen in een anti-lepton \bar{l} (e^+ , μ^+ of τ^+) en een neutrino ν_l en zal het W^- boson dus in een lepton l (e^- , μ^- of τ^-) en een anti-neutrino $\bar{\nu}_l$ vervallen. Bij de tweede manier (het hadronisch verval) vervalt elk W boson in een quark anti-quark $q\bar{q}$ paar. Deze twee vervalmoden kunnen natuurlijk ook allebei samen optreden wanneer één van de twee W bosonen leptonisch vervalt en het andere hadronisch vervalt. Enkel de leptonische vervalmode zal verder gebruikt worden. De productie en het di-leptonisch verval van een $t\bar{t}$ paar kan dus kort worden samengevat door:

$$p p \rightarrow t \bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow \bar{l} \nu_l b l \bar{\nu}_l \bar{b}$$

3.2 Analyse van gesimuleerde $t\bar{t}$ events

In een eerste fase van het project (na de literatuurstudie) werden gesimuleerde di-leptonische $t\bar{t}$ gegevens geanalyseerd met als hoofdbedoeling een beetje inzicht te krijgen in de productie en het verval van de top en anti-top quarks. Ook werden hierbij de gebruikte analysemethoden aangeleerd die nodig zijn om de rest van het project uit te voeren. De gesimuleerde gegevens bestonden uit de 4-impulsen van alle einddeeltjes die worden geproduceerd bij di-leptonische $t\bar{t}$ verval: 2 leptonen, 2 neutrino's en 2 b -quarks. In totaal bestonden deze gegevens uit 190000 gesimuleerde gebeurtenissen. Uit deze gegevens werden een groot aantal variabelen berekend, maar hier zullen er slechts 3 interessante besproken worden: de totale massa van het $t\bar{t}$ systeem, de kleinste hoek in de (η, ϕ) ruimte tussen 2 van de 6 deeltjes en het verband tussen de lorentzboost van de top quark en de hoek tussen het W^+ boson en de b -quark in de (θ, ϕ) ruimte. Alle berekeningen doorheen het hele project gebeuren in zogenaamde natuurlijke eenheden met $\hbar = c = 1$. De assen en de het bijhorende stelsel voor bolcoördinaten wordt getoond in de figuur. De z -as wordt evenwijdig met de bundelpijp gekozen. Deze keuze van assenstelsel zal doorheen het hele project worden gebruikt.

De totale massa van het $t\bar{t}$ systeem (M_{tot}) wordt berekend door eerst de energie-impuls 4-vectoren van alle deeltje op te tellen en dan hieruit de massa



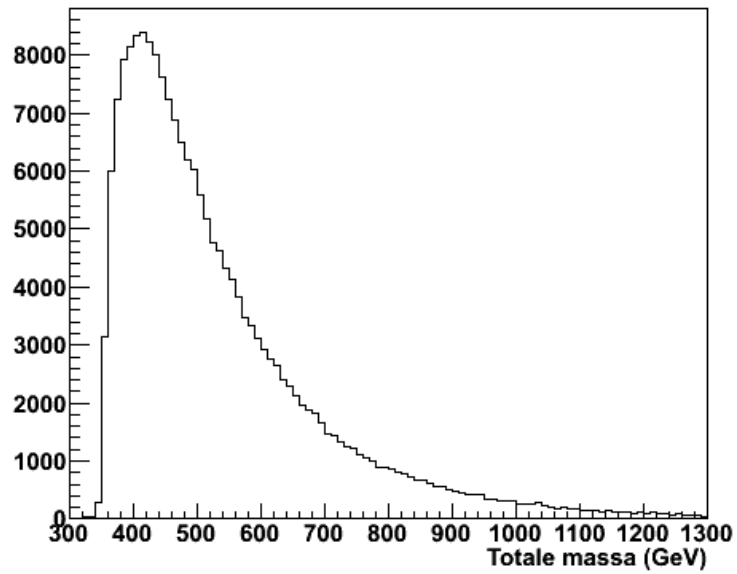
Keuze van het assenstelsel

te bepalen:

$$M_{tot} = \sqrt{E_{tot}^2 - p_{tot}^2} = \sqrt{\left(\sum_{i=l,\bar{l},b,\bar{b},\nu_l,\bar{\nu}_l} E_i \right)^2 - \sum_{i=x,y,z} \left(\sum_{j=l,\bar{l},b,\bar{b},\nu_l,\bar{\nu}_l} p_{i,j} \right)^2}$$

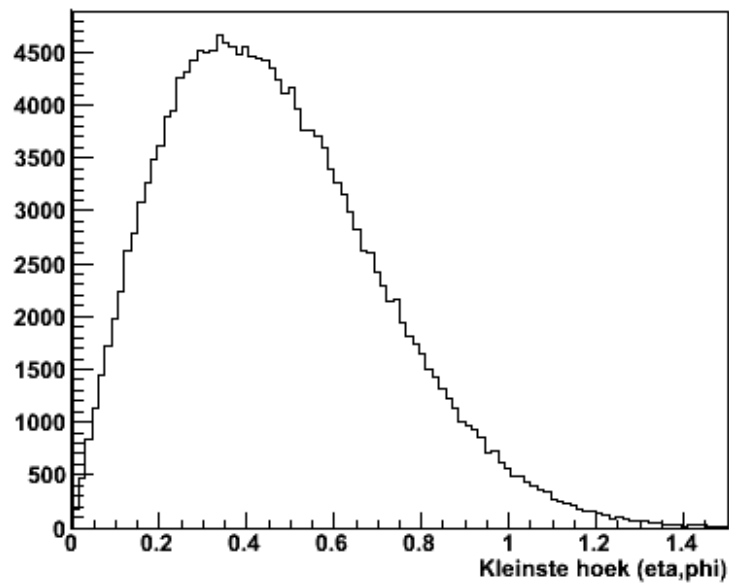
Op de grafiek is duidelijk te zien dat er geen $t\bar{t}$ gebeurtenissen zijn waarbij de massa lager is dan twee maal de top quark massa ($\pm 340 \text{ GeV}$), aangezien dit de minimale massa is van een $t\bar{t}$ paar in rust. In dit geval zullen de top quarks “back-to-back” geproduceerd worden: met een hoek gelijk aan π ertussen. Wanneer M_{tot} stijgt zal ook de lorentzboost β van het $t\bar{t}$ systeem stijgen en zullen de top en anti-top quarks met een kleinere hoek ertussen geproduceerd worden. De curve bereikt een maximum bij een massa van $\pm 420 \text{ GeV}$. Zelfs voor een massa groter dan 1 TeV zijn er nog redelijk wat gebeurtenissen.

Een hoek ΔR tussen twee deeltjes in de (η, ϕ) ruimte wordt berekend volgens $\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2}$. Hierin is η de pseudorapidity en deze wordt gegeven door $\eta = -\ln(\cos(\theta/2))$. ϕ is de azimuthale hoek zoals getoond op de figuur van de keuze van assenstelsel. De kleinste hoek in het (η, ϕ) -vlak (ΔR_{min}) tussen 2 deeltjes wordt dan berekend door alle hoeken tussen alle deeltjes te berekenen en hiervan het minimum te nemen. Op de grafiek is duidelijk te zien dat er steeds minimum twee deeltjes zijn die met een hoek ΔR kleiner dan 1,4 ertussen worden geproduceerd. Meestal is de minimale hoek zelfs nog veel kleiner, want de grafiek bereikt een maximum voor een hoek van $\pm 0,4$. Deze kleine waarde bemoeilijkt het maken van een onderscheid tussen twee deeltjes, zeker wanneer het om een jet gaat. De deeltjes van een jet worden binnen een kegel geproduceerd en dus gedetecteerd, maar aangezien er steeds twee deeltjes zijn die vrij dicht bij elkaar worden gede-



Histogram M_{tot}

tecteerd, zal het wel regelmatig gebeuren dat twee jets elkaar gedeeltelijk overlappen, wat het maken van een onderscheid tussen de twee jets logisch gezien enorm bemoeilijkt.



Histogram kleinste hoek in het (η, ϕ) -vlak tussen 2 deeltjes

De hoek α tussen het W^+ boson en de b -quark wordt bereken met behulp van het inproduct:

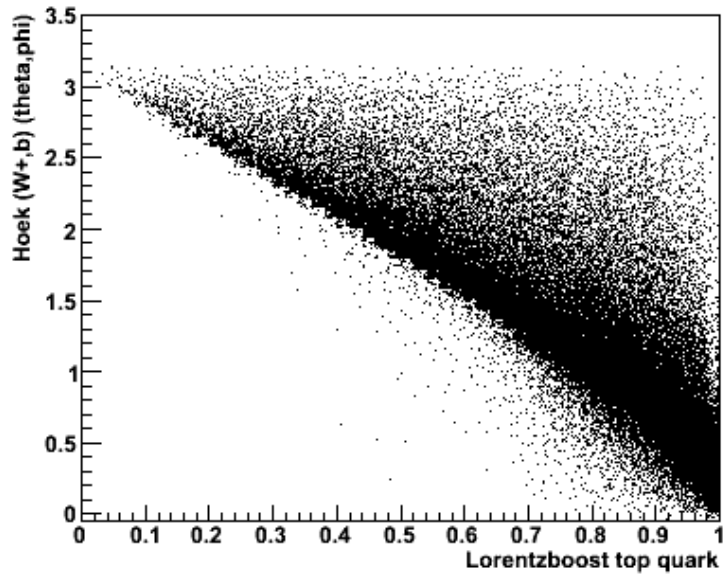
$$\vec{p}_w \cdot \vec{p}_b = \|\vec{p}_w\| \|\vec{p}_b\| \cos \alpha$$

$$\implies \alpha = \arccos \left(\frac{\vec{p}_w \cdot \vec{p}_b}{\|\vec{p}_w\| \|\vec{p}_b\|} \right)$$

De Lorentzboost van de top quark (β_{top}) volgt uit:

$$\beta_{top} = \frac{\|\vec{p}_{top}\|}{E_{top}}$$

Op de grafiek is een duidelijk verband te zien tussen beide variabelen. Wanneer β_{top} klein is, is de top quark bijna in rust en zullen het W^+ en de b -quark bij verval bijna “back-to-back” worden uitgezonden: met een hoek tussen beide deeltjes die bijna gelijk aan π is. Wanneer β_t stijgt zal de hoek tussen beide deeltjes dus logischerwijs dalen en wanneer β_{top} bijna gelijk aan 1 is zullen het W^+ en de b -quark worden geproduceerd met een kleine hoek ertussen, aangezien ze dan een zéér hoge snelheid hebben.



β_{top} versus hoek tussen W^+ en b in het (θ, ϕ) -vlak

Hoofdstuk 4

Onderscheid tussen mSUGRA en Standaard Model in gesimuleerde protonbotsingen

4.1 Hypothese toetsen

Een hypothesetoets is een veelgebruikte statistische methode om na te gaan welke van twee hypothesen (de nulhypothese H_0 of de alternatieve hypothese H_1) waar is volgens een meting van een bepaalde toetsgrootte t . Wanneer de kansverdeling van t als H_0 waar is en de kansverdeling van t als H_1 waar is allebei gekend zijn, dan kan er een bepaalde kritische waarde t^* worden gekozen zodat wanneer de gemeten waarde van t in het aanvaardingsgebied w^* ligt ($t < t^*$) dat dan H_0 wordt aanvaard en H_1 wordt verworpen en dat als de gemeten t in de kritische regio w ligt ($t > t^*$) dat dan H_0 wordt verworpen en H_1 wordt aanvaard. Hierbij worden twee types van fouten gemaakt:

- *Type 1*: H_0 waar, maar $t \in W \Rightarrow \text{kans} = \alpha$
- *Type 2*: H_0 fout, maar $t \notin W \Rightarrow \text{kans} = \beta$

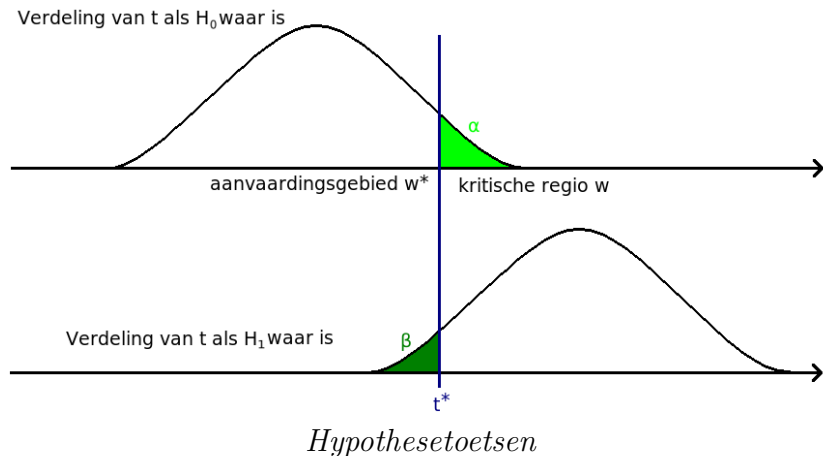
Hierbij zijn α en β de oppervlakten onder de kansverdelingen zoals getoond op de figuur. De gebruiker van de test moet dan zelf uitmaken welk type van fouten hij zoveel mogelijk wilt uitsluiten, afhankelijk van hetgeen er moet getest worden en zal dus zelf de kritische waarde moeten bepalen. Een veelgebruikte kwantitatieve manier om het scheidend vermogen van de test tussen de beide hypothesen weer te geven is door de efficiëntie ε en de zuiverheid P te berekenen voor verschillende waarden van t^* en zo het verband tussen de efficiëntie en de zuiverheid bepalen. De efficiëntie ε en de zuiverheid P

worden berekend volgens:

$$\varepsilon = 1 - \alpha$$

$$P = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha + \beta}$$

De beste hypothese test is die waarvoor de zuiverheid en de efficiëntie allebei zo dicht mogelijk bij 1 liggen.

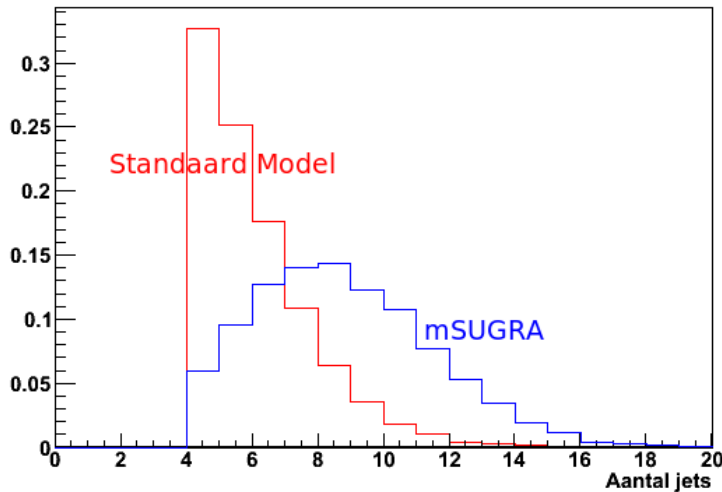


4.2 Scheiding van Standaard Model en mSUGRA aan de hand van kinematische verschillen

De belangrijkste analyse van het project bestond uit het zoeken van kinematische verschillen tussen gesimuleerde Standaard Model $t\bar{t}$ gebeurtenissen en gesimuleerde $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$ mSUGRA gebeurtenissen. Deze laatste zijn gebeurtenissen waarbij twee protonen botsen waardoor er twee gluino's (\tilde{g}) geproduceerd worden, die dan vervallen in een hele hoop deeltjes. Gluino's zijn de supersymmetrische partners van de gluonen. De gesimuleerde gebeurtenissen bestonden uit 101395 di-leptonische $t\bar{t}$ gebeurtenissen en 8019 mSUGRA gebeurtenissen en hieruit werden dan verschillende kinematische variabelen gezocht welke een duidelijk verschil geven tussen signaal (mSUGRA) en achtergrond ($t\bar{t}$). Van al deze variabelen werd tenslotte ook het verband tussen de efficiëntie en de zuiverheid bepaald om na te gaan hoe goed ze onderscheid maken tussen $t\bar{t}$ en mSUGRA. De gesimuleerde gebeurtenissen bestonden deze keer uit gegevens op detectorniveau, wat onder andere als gevolg heeft dat

er geen gegevens meer zijn van vrije quarks maar van de jets tot de welke deze quarks aanleiding geven. Ook is er geen onderscheid van welke deeltjes de jets nu juist afkomstig zijn en er zullen ook geen gegevens zijn over eventuele neutrino's, aangezien die niet gezien worden in de detector zullen alle neutrino's samen enkel aanleiding geven tot een missende transversale impuls. De gegevens voor beide theorieën bestonden uit de energie-impuls 4-vectoren van de 4 jets met de hoogste transversale impuls, de energie-impuls 4-vectoren van de 2 leptonen, het aantal jets die gevormd werden en de missende impuls in de x- en in de y-richting van alle gebeurtenissen.

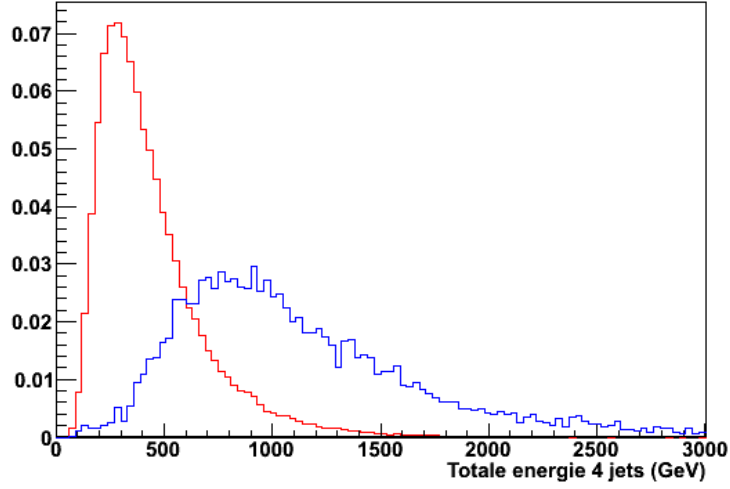
Een eerste variabele die een verschil geeft is het aantal jets (N_{jets}). Deze variabele wordt getoond in de figuur. Zoals altijd in het vervolg van het project, werd de rode curve uit de Standaard Model gegevens berekend en de blauwe curve uit de mSUGRA gegevens. Op de verticale as van het histogram staat niet het totaal aantal per bin, maar het genormaliseerd aantal per bin: het totaal aantal per bin gedeeld door het totaal aantal gebeurtenissen. Deze normalisatie moet gebeuren aangezien er veel minder gesimuleerde mSUGRA gegevens dan $t\bar{t}$ gegevens zijn en er ook voor de berekening van de efficiëntie en de zuiverheid genormaliseerde verdelingen nodig zijn.



Histogram N_{jets}

Een tweede variabele is de totale energie van de 4 jets (E^{jets}). Deze wordt berekend door de scalaire som te nemen van de afzonderlijke energieën van de 4 jets:

$$E^{jets} = \sum_{4 \text{ jets}} E^{jet}$$



Histogram E^{jets}

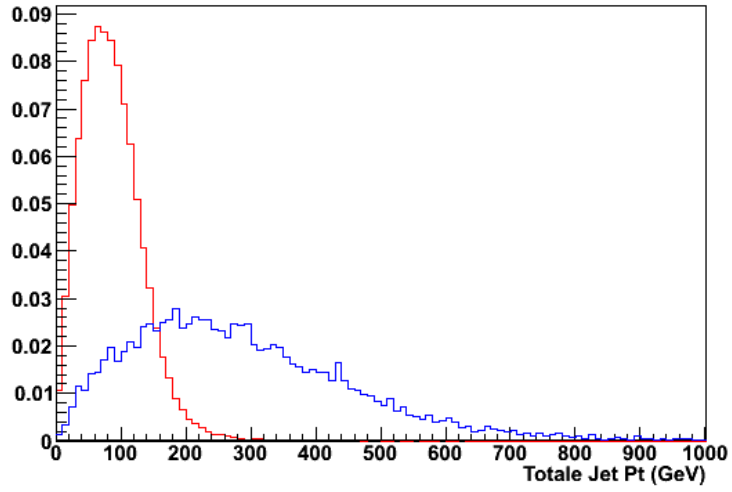
Een andere goede variabele is de totale transversale impuls van de 4 jets (p_t^{jets}). Deze wordt logischerwijs berekend door de energie-impuls 4-vectoren van de 4 jets vectorieel op te tellen en hieruit dan de totale transversale impuls van de 4 jets te berekenen:

$$\begin{aligned}
 p_t^{jets} &= \|\vec{p}_t^{jets}\| = \sqrt{(p_x^{jets})^2 + (p_y^{jets})^2} \\
 &= \sqrt{\left(\sum_{4 \text{ jets}} p_x^{jet}\right)^2 + \left(\sum_{4 \text{ jets}} p_y^{jet}\right)^2}
 \end{aligned}$$

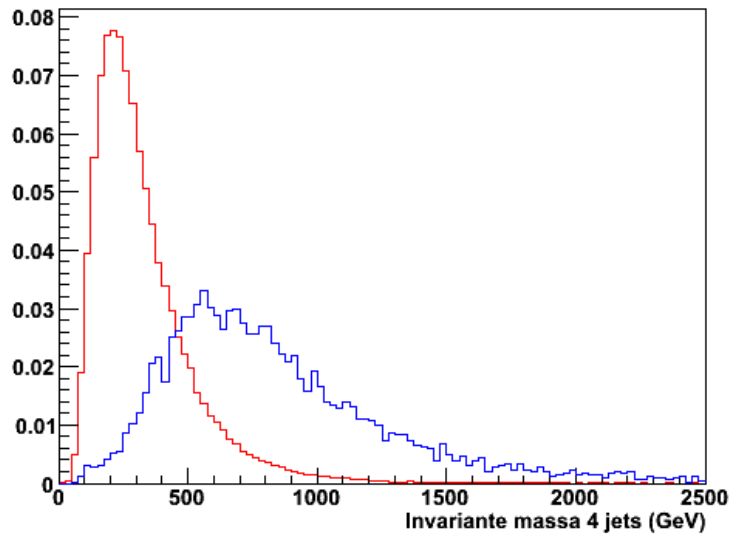
Een volgende variabele die een verschil geeft is de invariante massa van de 4 jets (M_{inv}^{jets}). Deze wordt berekend door opnieuw de energie-impuls 4-vectoren van de 4 jets vectorieel op te tellen en hieruit dan de invariante massa van de 4 jets te bepalen:

$$\begin{aligned}
 M_{inv}^{jets} &= \sqrt{(E^{jets})^2 - (\vec{p}^{jets})^2} \\
 &= \sqrt{\left(\sum_{4 \text{ jets}} E^{jet}\right)^2 - \left(\sum_{4 \text{ jets}} p_x^{jet}\right)^2 - \left(\sum_{4 \text{ jets}} p_y^{jet}\right)^2 - \left(\sum_{4 \text{ jets}} p_z^{jet}\right)^2}
 \end{aligned}$$

De voorlaatste gevonden variabele die een verschil geeft is de missende transversale impuls ($/p_t$). Deze wordt gewoon berekend door de x- en y-



Histogram p_t^{jets}

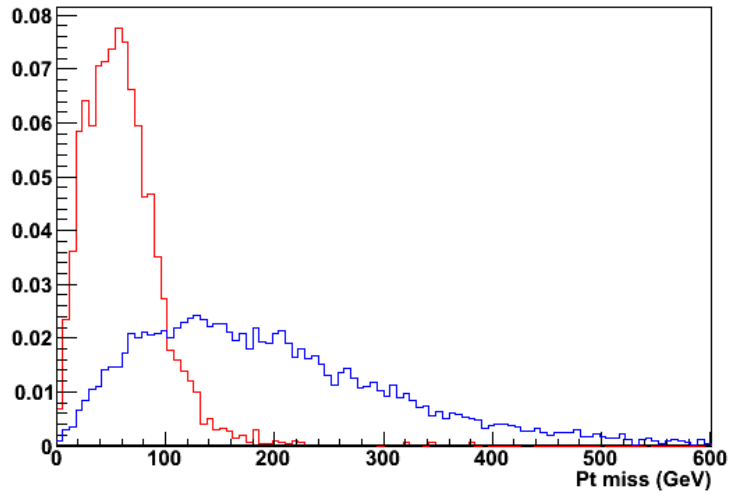


Histogram M_{inv}^{jets}

component van de missende impuls kwadratisch op te tellen:

$$p_t = \sqrt{(p_x)^2 + (p_y)^2}$$

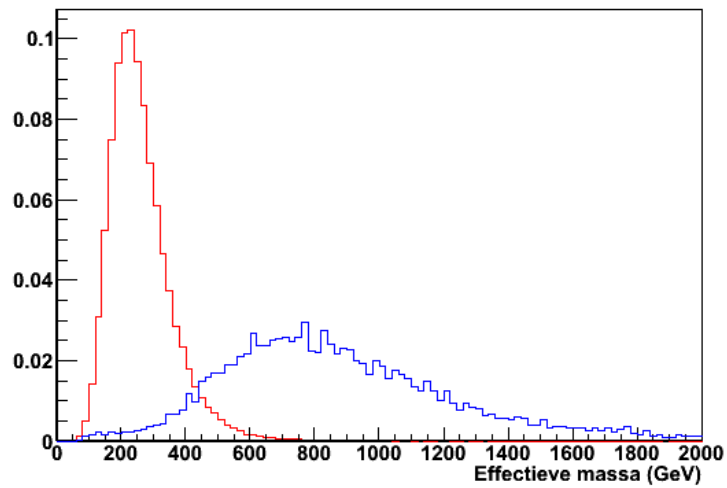
De laatste gevonden variabele die een verschil tussen de beide theorieën toont is de effectieve massa (M^{eff}). Deze is in feite een combinatie van de vorige variabelen en wordt berekend door de scalaire som te nemen van de



Histogram \cancel{p}_t

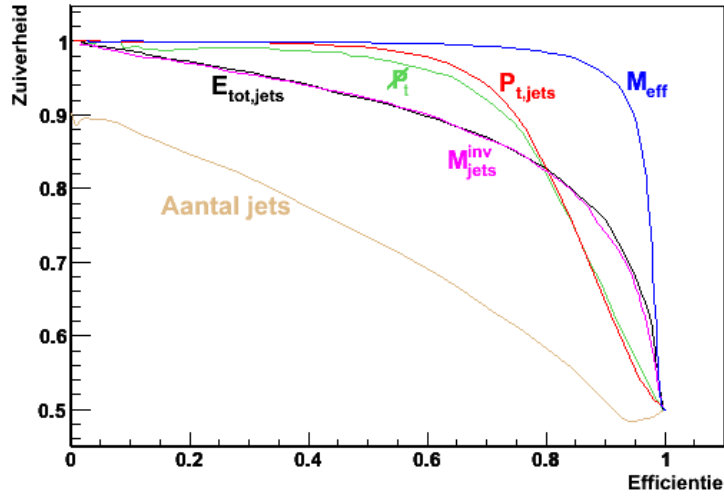
transversale impulsen van de 4 jets en hier de missende transversale impuls bij op te tellen:

$$\begin{aligned}
 M^{eff} &= \cancel{p}_t + \sum_{jets} p_t^{jet} \\
 &= \sqrt{(\cancel{p}_x)^2 + (\cancel{p}_y)^2} + \sum_{jets} \left(\sqrt{(p_x^{jet})^2 + (p_y^{jet})^2} \right)
 \end{aligned}$$



Histogram M^{eff}

Voor alle variabelen werd de efficiëntie ε en de zuiverheid P berekend en hieruit werd dan het verband tussen de efficiëntie en de zuiverheid bepaald.



Grafiek ε en P

De correlatiecoëfficiënt tussen al deze variabelen werd ook berekend volgens de gebruikelijke formule:

$$\text{corr}(X, Y) = \frac{s_{xy}^2}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}}$$

$\text{corr}(X, Y)$	N_{jets}	E^{jets}	p_t^{jets}	M_{inv}^{jets}	\not{p}_t	M^{eff}
N_{jets}	1	0.067	-0.065	0.115	-0.116	0.029
E^{jets}	0.067	1	0.397	0.874	0.360	0.747
p_t^{jets}	-0.065	0.397	1	0.303	0.754	0.645
M_{inv}^{jets}	0.115	0.874	0.303	1	0.290	0.777
\not{p}_t	-0.116	0.360	0.754	0.290	1	0.680
M^{eff}	0.029	0.747	0.645	0.777	0.680	1

Correlatiecoëfficiënten tussen alle variabelen

4.3 Conclusie

Uit de bovenstaande grafieken is duidelijk dat er een goed waarneembaar verschil bestaat tussen Standaard Model $t\bar{t}$ gebeurtenissen en mSUGRA. Uit het eerste histogram kan worden afgeleid dat bij mSUGRA gebeurtenissen er gemiddeld gezien meer jets en dus meer deeltje geproduceerd worden. Uit de andere histogrammen is ook duidelijk dat mSUGRA werkelijk een theorie is die pas optreedt bij hogere energie, hoger dan de energie om een $t\bar{t}$ paar te produceren. Zeker op het gebied van jets is er een duidelijk verschil tussen beide theorieën. Er worden gemiddeld gezien zwaardere deeltjes geproduceerd (grotere M_{inv}^{jets}) en er is gemiddeld ook een grotere missende transversale impuls. Deze grotere missende transversale impuls is het gevolg van de productie van zogenaamde LSP's (*Lightest Supersymmetric Particles*) die stabiel zijn en die de detector verlaten zonder één spoor erin achter te laten. Deze kunnen enkel worden teruggevonden wanneer blijkt dat de totale transversale impuls verschillend van nul is. Deze LSP's kunnen bijvoorbeeld neutralino's zijn, de supersymmetrische partners van de neutrino's.

Twee héél belangrijke variabelen zijn het aantal jets en de effectieve massa. De effectieve massa is zo belangrijk aangezien ze steeds de meest efficiënte en de meest zuivere variabele is. Ze combineert als het ware de goede eigenschappen van de vier variabelen waarmee ze vrij gecorreleerd is. Aangezien het aantal jets als enige niet gecorreleerd is met deze effectieve massa is deze variabele ook vrij belangrijk. Wanneer er eindelijk echte data van de CMS-detector beschikbaar is zullen deze twee onafhankelijke variabelen het dus mogelijk te maken om een duidelijk onderscheid tussen $t\bar{t}$ en mSUGRA te maken. Er zijn natuurlijk nog andere mogelijke theoretische uitbreidingen van het Standaard Model, dus een afwijking van de voorspellingen van het Standaard Model wil natuurlijk niet onmiddellijk zeggen dat mSUGRA of SUSY een juiste theorie is.

Bibliografie

- [1] Wikipedia: *Standard Model*
http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model
- [2] Fermi National Accelerator Laboratory: *Combination of CDF and DØ Results on the Mass of the Top Quark*
<http://tevewwg.fnal.gov/top/mtop0703.ps>
- [3] Wikipedia: *Jet (Particle Physics)*
http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_%28particle_physics%29
- [4] Wikipedia: *Feynman Diagram*
http://en.wikipedia.org/wiki/Feynman_diagram
- [5] Wikipedia: *Neutrino Oscillation*
http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation
- [6] Wikipedia: *SUSY*
<http://en.wikipedia.org/wiki/Supersymmetry>
- [7] Wikipedia: *MSSM*
<http://en.wikipedia.org/wiki/MSSM>
- [8] CERN:
<http://public.web.cern.ch/>
- [9] Wikipedia: *Large Hadron Collider*
http://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider
- [10] CERN: *LHC Machine Outreach*
<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/>
- [11] Cern: *CMS Outreach*
<http://cmsinfo.cern.ch/outreach/>
- [12] Prof. Dr. Jorgen D'Hondt. *Statistische verwerking van experimentele gegevens*, cursus Vrije Universiteit Brussel, 2006.