



*To the Bottom of the Stop: Calibration of Bottom-Quark Jets Identification
Algorithms and Search for Scalar Top-Quarks and Dark Matter with the Run I
ATLAS Data*

P. Pani

Samenvatting

Het Standaard Model en verder

In de vorige eeuw heeft de hoge energie fysica ongelooflijke stappen gemaakt in ons begrip van de aard van het heelal, de materiële inhoud ervan en de interacties van die materie. Het Standard Model (SM) levert een overtuigende beschrijving van alle bekende subatomaire deeltjes en hun quantum interacties via de sterke, zwakke en elektromagnetische wisselwerkingen. De voorspellende kracht van het SM is tot op ongekende nauwkeurigheid getest, inclusief de recente ontdekking van het higgs-deeltje door de Large Hadron Collider (LHC)-experimenten waarmee het laatste stukje van de deeltjespuzzel is gelegd. Ondanks zijn succes wordt het SM niet als een complete theorie van elementaire deeltjes gezien doordat het een aantal vragen over ons heelal open laat, zoals de aard van donkere materie en donkere energie die 96% van de inhoud van het universum uitmaken, en de relatie van de zwaartekracht met de andere drie interacties. Deze en nog veel meer open vragen over de natuur roepen op tot theorieën die het SM uitbreiden.

Een van deze theorieën, Supersymmetry is een van de meest veelbelovende ideeën voor een dergelijke uitbreiding. Het is gebaseerd op een generalisatie van de ruimtetijd transformaties die fermionen en bosonen koppelen, en het voorspelt het bestaan van een supersymmetrische partner voor elk bekend deeltje met een verschil in spin van een halve eenheid, terwijl de andere eigenschappen en quantum getallen hetzelfde blijven. Supersymmetry is een van de belangrijkste aandachtspunten van het onderzoeksprogramma van de LHC experimenten.

De LHC en het ATLAS-experiment tijdens Run I

De Large Hadron Collider (LHC) is momenteel de meest krachtige proton-proton versneller ter wereld en het is gelegen op CERN bij Genève in Zwitserland. De eerste

periode waarin de LHC in bedrijf was (Run I) duurde van 2010 tot 2012. Het A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS) experiment is een van vier experimenten die gegevens verzamelt van de door de LHC geleverde botsingen. Dit proefschrift is gebaseerd op de door ATLAS tijdens Run I verzamelde data overeenkomend met een totale geïntegreerde luminositeit van pp botsingen van respectievelijk 5 en 20 fb^{-1} met een zwaartepuntsenergie van 7 en 8 TeV.

De ATLAS detector wordt vaak aangeduid als een *multifunctioneel* experiment; het ontwerp van de detector is zodanig dat het een grote verscheidenheid aan zeer verschillende metingen kan verrichten op de in de komende twintig jaar te verzamelen data.

Daarom is het van groot belang dat de detector de gestelde ontwerpeisen bereikt, en indien mogelijk zelfs beter presteert.

Dit kan in drie verschillende actiepunten worden samengevat:

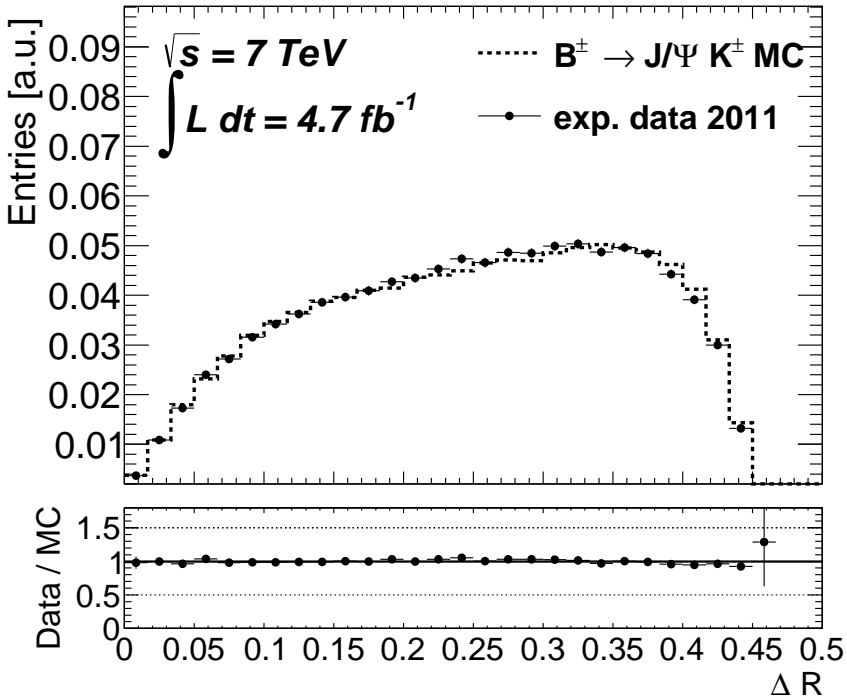
- (a) Garandeer dat de detector efficiënt gegevens registreert met hoge kwaliteit.
- (b) Verhoog het begrip van de detector zodat de prestaties kunnen worden verbeterd en een nauwkeurige simulatie van de detector kan worden gemaakt;
- (c) Evalueer de tijdevolutie van de prestaties van de detector, zowel op de lange als op de korte termijn, zodat de goede status van de detector gedurende het hele experiment kan worden gegarandeerd.

Een deel van dit proefschrift richt zich op twee voorbeelden van prestatie-monitoring en verbetering, namelijk voor de *inner tracker*, de binnenste detector die de sporen van geladen deeltjes meet. Na uitlijning bereikt de inner tracker een nauwkeurigheid in de orde van $10\ \mu\text{m}$. De controle van een van de sub-detectors, de Semi-Conductor Tracker (SCT), laat zien dat in het verzamelen van botsingsdata een efficiëntie van respectievelijk 99,9%, 99,6% en 99,1% in 2010, 2011 en 2012 bereikt wordt [95].

Kalibratie van bottom-quark jet identificatie algoritmes

In 2011 was de belangrijkste focus van het ATLAS experiment niet alleen om voor het eerst fysica bij de allerhoogste energiën te doen, maar ook om verbeteringen aan te brengen in het begrip en de kalibratie van de detector, en aan de afstemming en de validatie van de Monte Carlo simulaties die gebruikt worden om SM (en nieuwe fysica) processen na te bootsen.

Een groot aantal metingen en de speurtochten naar nieuwe fysica die worden gedaan in ATLAS vertrouwen op de identificatie van jets afkomstig van b -quarks,



Samenvatting, Figuur 1: Hoekafstand tussen de sporen van geladen deeltjes die ontstaan in de hadronisatie van een jet en de jet as.

die wordt uitgevoerd door middel van toegewijde *b-tagging* algoritmes. Het doel van de eerste analyse gepresenteerd in dit proefschrift is om de betrouwbaarheid van de Monte Carlo simulaties bij het beschrijven van de directe en indirecte resultaten door deze *b-tagging* algoritmes te onderzoeken. Dit wordt bereikt door het bestuderen van een verzameling van volledig gereconstrueerde $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ vervallen. Het onderzoek is gebaseerd op de 5 fb^{-1} van gegevens verzameld in 2011 bij een zwaartepuntsenergie van $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$, en het werd gedreven door de noodzaak om de factoren die een rol spelen bij de kalibratie van de *b-tagging* algoritmes en die nodig zijn om de simulatie overeen te laten komen met de experimentele gegevens beter te begrijpen. De eigenschappen van de *b*-jets en de prestaties van de tagging algoritmes zijn bestudeerd in data en vergeleken met de Monte Carlo simulatie. De meeste observabelen blijken goed te worden beschreven door de simulatie en de *b-tagging* prestaties in data blijken in overeenstemming te zijn met de Monte Carlo

binnen een paar procent. Figuur 1 toont de hoekafstand tussen de sporen van geladen deeltjes die ontstaan in de hadronisatie van een b -jet en de jet-as²⁾. De ononderbroken lijn geeft de verdeling aan voor de Monte Carlo simulatie, en die wordt vergeleken met dezelfde verdeling voor data, aangegeven met punten. De punten in het onderste deel van de figuur tonen de verhouding tussen de data en de Monte Carlo simulatie. De twee distributies komen op een niveau van een paar procent overeen, waaruit blijkt dat de hadronisatie topologie van de geladen deeltjes in de b -jets goed gemodelleerd is door de simulatie. De verdelingen van de transversale en longitudinale impact parameters van de hadronisatie deeltjes blijken daarentegen in data en Monte Carlo simulatie tot 20 % niet overeen te komen.

Zoeken naar scalaire top-quarks en Dark Matter

De in 2012 door ATLAS verzamelde dataset is vier keer groter dan die in 2011 en de hogere zwaartepuntsenergie resulteert in een hogere productie werkzame doorsnede voor een van de meest intrigerende deeltjes voorspeld door Supersymmetry: het scalaire top quark (top squark).

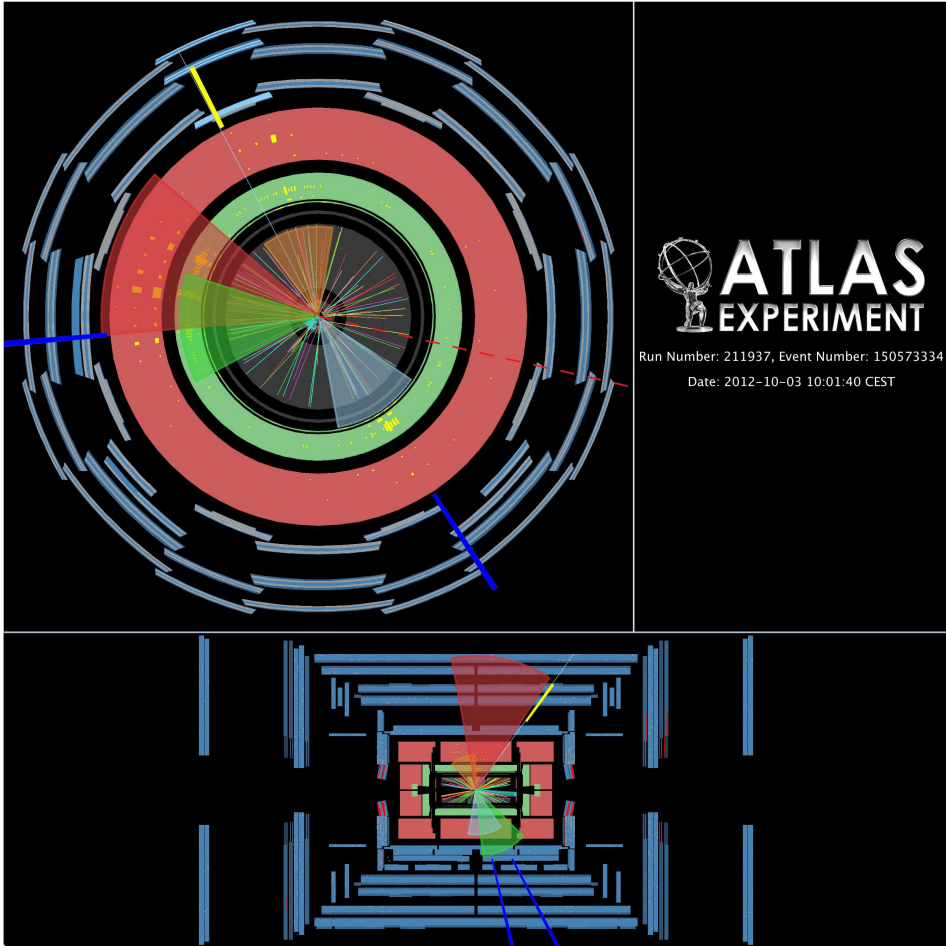
De Supersymmetry (SUSY) analyse gepresenteerd in dit proefschrift is een speurtocht naar top squarks in gevallen waarbij de eindtoestand een geïsoleerd lepton, b -jets en missende transversale impuls bevatten. Aangezien R-pariteit wordt verondersteld geconserveerd te zijn worden top squarks altijd geproduceerd in paren. Van alle mogelijke top squark vervalswijzen worden er drie beschouwd:

- a) $\tilde{t} \rightarrow t \tilde{\chi}^0$ (met daaropvolgende verval $t \rightarrow W b$)
- b) $\tilde{t} \rightarrow b \tilde{\chi}^\pm \rightarrow b W^\pm \tilde{\chi}^0$ (met $W^\pm \rightarrow \ell\nu$ or $W^\pm \rightarrow \bar{q}q'$)
- c) $\tilde{t} \rightarrow b W^\pm \tilde{\chi}^0$ (via off-shell top en $W^\pm \rightarrow \ell\nu/\bar{q}q'$)

De neutralino ($\tilde{\chi}^0$) wordt verondersteld het lichtste supersymmetrische deeltje te zijn, en als gevolg van het behoud van de R-pariteit is het stabiel en ontsnapt het de detector zonder interacties. De massa's van de top squark en van de andere supersymmetrische deeltjes in de vervalsketen (chargino's en neutralino's) zijn onbekend.

Om een goede gevoeligheid voor de drie top squark vervalswijzen te verkrijgen en om het breedste scala aan aannames voor $m_{\tilde{t}}, m_{\tilde{\chi}^\pm}, m_{\tilde{\chi}^0}$ te bereiken worden twee verschillende strategieën bekeken om selecties verrijkt in SUSY signaal te definiëren:

²⁾gedefinieerd als $\Delta R(\text{jet}, \text{trk}) = \sqrt{(\phi_{\text{jet}} - \phi_{\text{trk}})^2 + (\eta_{\text{jet}} - \eta_{\text{trk}})^2}$

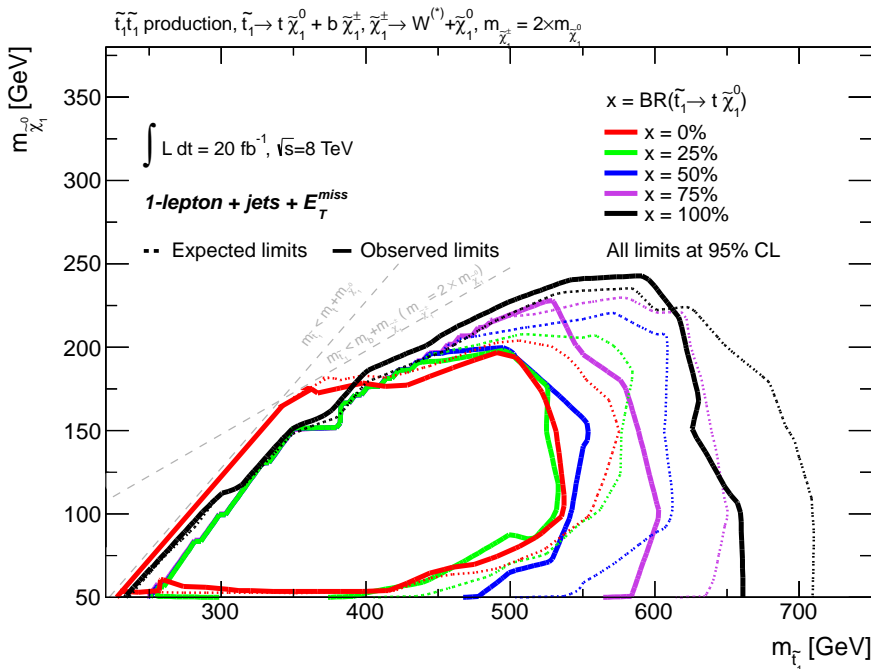


Samenvatting, Figuur 2: Grafische weergave van een $\tilde{t} \rightarrow b \tilde{\chi}^{\pm}$ kandidaat gebeurtenis. Deze gebeurtenis heeft een missende transversale impuls van 609 GeV (rode stippellijn). Hij heeft vier jets met transversale impuls van respectievelijk 424, 199, 130 en 99 GeV. Jets worden aangeduid als kegels met een oppervlakte evenredig met de jet transversale impuls. De tweede en de derde meest energieke jets zijn geïdentificeerd als b-jets met behulp van het MV1 b-tagging algoritme (blauwe lijnen). Een muon is geïdentificeerd in het event en het heeft een transversale impuls van 51 GeV (gele lijn). Sporen met een transversale impuls van minstens 0,5 GeV worden getoond in de inner tracker.

- Selecties gedefinieerd door snedes te maken in een aantal variabelen die het signaal van de achtergrond goed kunnen scheiden. De uiteindelijke separatie wordt bereikt door het tellen en het vergelijken van het aantal signaal en achtergrond gebeurtenissen die aan alle eisen voldoen. Daarom worden deze selecties *cut-and-count* selecties genoemd.
- Een gelijktijdige waarschijnlijkheidsfit aan multi-bin selecties (*vorm fits*). De binning is gedefinieerd in de twee meest discriminerende variabelen en bekijkt het verschil in vorm tussen de distributies van die variabelen in de achtergrond en in het signaal om het onderscheidend vermogen te verhogen.

Een totaal van zeven *cut-and-count* selecties en vier *vorm fits* zijn gedefinieerd voor deze analyse.

Een grafische weergave van een $\tilde{t} \rightarrow b \tilde{\chi}^\pm$ kandidaat gebeurtenis is getoond in



Samenvatting, Figuur 3: Uitsluiting limieten op 95% CL in het $(m_{\tilde{t}}, m_{\tilde{\chi}^\pm})$ vlak. De twee vervalswijzen $\tilde{t} \rightarrow b \tilde{\chi}^\pm$ en $\tilde{t} \rightarrow t \tilde{\chi}^0$ worden verondersteld met een fractie van respectievelijk $(100 - x)\%$ en $x\%$, voor elke lijn in de plot. $m_{\tilde{\chi}^\pm} = 2m_{\tilde{\nu}_\tau}$ wordt aangenomen.

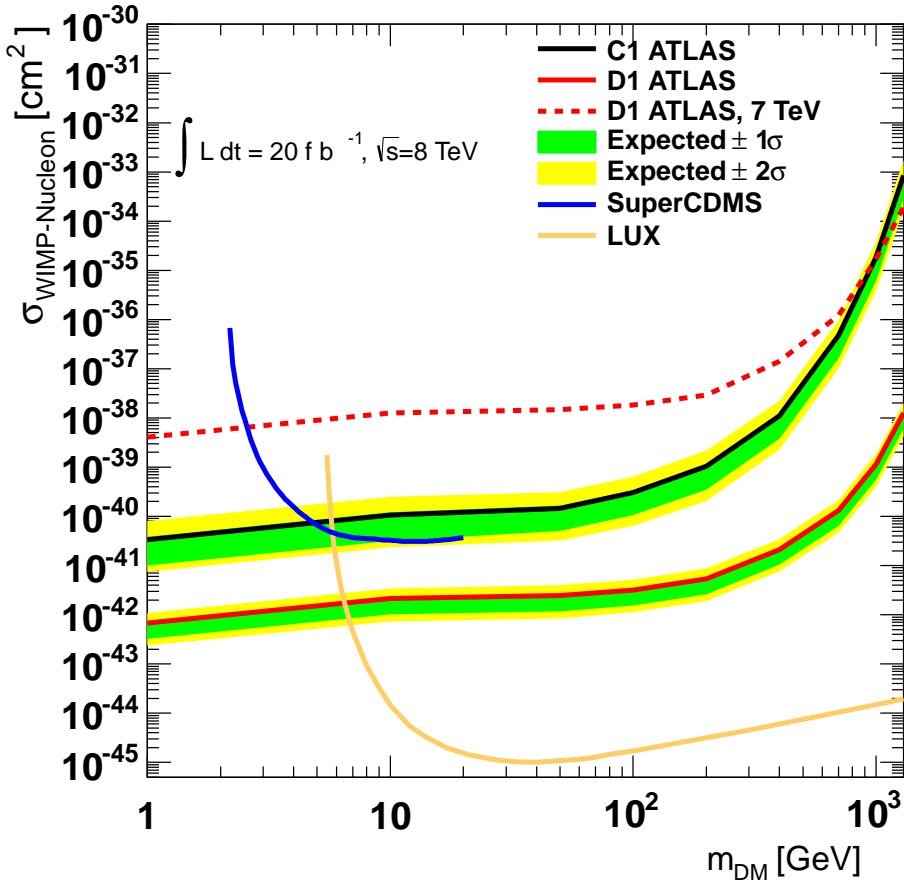
figuur 2. Deze gebeurtenis heeft een missende transversale impuls van 609 GeV, aangegeven met een rode stippellijn in de figuur. Hij heeft vier geselecteerde jets met een transversale impuls van respectievelijk 424, 199, 130 en 99 GeV. Jets worden aangeduid als kegels en het oppervlak van de kegel is evenredig met de transversale impuls van de jet. De tweede en de derde meest energieke jets zijn geïdentificeerd als b -jets met behulp van het MV1 b -tagging algoritme (blauwe lijnen). Een muon is geïdentificeerd in de gebeurtenis met een transversale impuls van 51 GeV (gele lijn).

De hoeveelheid geobserveerde gebeurtenissen in data na toepassing van alle selecties komt overeen met de hypothese dat alleen het SM bijdraagt, en er zijn geen aanwijzingen voor top squarks. Derhalve zijn de resultaten geïnterpreteerd in termen van bovengrenzen op top squark productie, aannemende de drie bestudeerde top squark vervalswijzen.

Figuur 3 toont het resultaat in het $(m_{\tilde{t}}, m_{\tilde{\chi}^0})$ massa vlak verkregen voor modellen waarin twee verschillende vervalswijzen van de top squark in dezelfde gebeurtenis zijn toegestaan. Elke lijn in de grafiek stelt de uitsluiting curve voor voor een gegeven fractie van de twee vervalswijzen, $x\%$ in $\tilde{t} \rightarrow t \tilde{\chi}^0$ en $(100-x)\%$ in $\tilde{t} \rightarrow b \tilde{\chi}^\pm \rightarrow b W^\pm \tilde{\chi}^0$. $(m_{stop}, m_{\tilde{\chi}^0})$ massa veronderstellingen binnen de ononderbroken lijnen zijn uitgesloten op 95 % CL. Onderbroken lijnen geven de verwachte uitsluitingen op basis van alleen simulaties. Vertakking verhoudingen van 0-100 %, 25-75 %, 50-50 %, 75-25 % en 100-0 % zijn getest. Voor de uitsluitingen zijn alle signaal selecties die in deze analyse zijn gepresenteerd gecombineerd. De combinatie werd verkregen door a-priori de selectie te kiezen met de beste verwachte limiet voor elk $(m_{\tilde{t}}, m_{\tilde{\chi}^0})$ punt. Top squark massa's tussen de 290 en 530 GeV zijn uitgesloten voor alle combinaties van vervalswijzen in het geval van een neutralino massa van 100 GeV.

Neutralinos zijn uitstekende kandidaten voor Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) Dark Matter. In het kader van een Effectieve Velden Theorie beschrijving van DM [76, 77], zijn bepaalde Lagrangiaan operatoren die de contact interacties tussen DM deeltjes en quarks beschrijven evenredig met de quark massa's, waardoor interacties tussen DM en bottom en top quarks mogelijk versterkt zijn. De resultaten van de top squark analyse zijn geïnterpreteerd in termen van DM deeltjes productie samen met top quarks ($pp \rightarrow t\bar{t}\chi\chi$), dat dezelfde eindtoestand heeft als $\tilde{t} \rightarrow t \tilde{\chi}^0$ verval. De gecombineerde uitsluiting curves op 95% CL voor de werkzame doorsnede voor DM-nucleon verstrooiing zijn aangegeven in figuur 4, voor contact operatoren D1 (Dirac scalaire DM) en C1 (complex scalaire DM). Waarden boven de curves zijn uitgesloten. De resultaten zijn vergeleken met limieten verkregen door de ATLAS mono-jet analyse op basis van de 7 TeV dataset en met de

uitsluiting limieten (90 % CL) die onlangs door de LUX en Super-CDMS samenwerkingen zijn bepaald. Uitgaande van een DM massa van 1 GeV, DM-nucleon verstrooiings werkzame doorsnedes boven de $3 \cdot 10^{-41} \text{ cm}^2$ en $7 \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2$ zijn uitgesloten voor respectievelijk complex scalaire and Dirac DM contact operatoren. De uitsluitings grenzen die voortvloeien uit deze analyse zijn de sterkste beperkingen op scalaire Dark Matter koppelingen ter wereld voor operatoren met zware quarks.



Samenvatting, Figuur 4: Uitsluitings curves op 95% CL voor de werkzame doorsnede voor DM-nucleon verstrooiing voor operatoren D1 en C1. De resultaten worden vergeleken met 90% CL uitsluiting curves van de Super-CDMS en de LUX samenwerkingen en waarden boven de curves zijn uitgesloten.

