



## UvA-DARE (Digital Academic Repository)

### Precise predictions for jets and tracks

Schrijnder van Velzen, S.

**Publication date**  
2022

[Link to publication](#)

#### **Citation for published version (APA):**

Schrijnder van Velzen, S. (2022). *Precise predictions for jets and tracks*. [Thesis, fully internal, Universiteit van Amsterdam].

#### **General rights**

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

#### **Disclaimer/Complaints regulations**

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

# Samenvatting

---

Het onderzoek beschreven in dit proefschrift draagt bij aan de vooruitgang die is geboekt in theoretische deeltjesfysica. Dit is een vakgebied in de natuurkunde dat het gedrag van de meest elementaire bouwstenen van ons universum probeert te begrijpen. Omdat nieuwsgierigheid inherent is aan de mensheid, is deze samenvatting geschreven voor het algemene publiek dat zich interesseert in dit onderwerp.

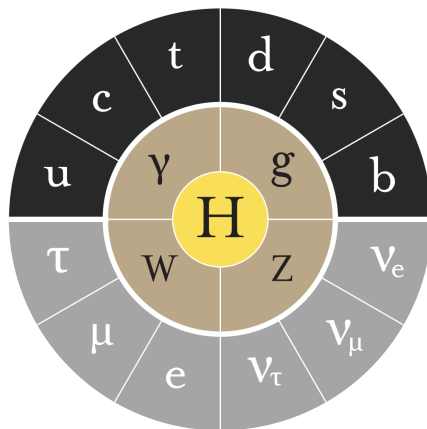
## Deeltjesfysica en het Standaard Model

Al honderden jaren weten we dat materie is opgebouwd uit kleine bouwstenen. De Griekse filosoof Democritus was de eerste die het concept van een atoom introduceerde. Hij postuleerde dat er een oneindig aantal objecten zouden moeten zijn, die in vorm en grootte zouden verschillen. Tegenwoordig weten we dat materie inderdaad uit atomen bestaat. Dit zijn echter niet de kleinste bouwstenen van materie. Atomen zelf bestaan uit een positief geladen kern omgeven door een wolk van negatief geladen elektronen. Het elektron lijkt puntvormig, wat betekent dat het een fundamenteel deeltje is. De kern is op zijn beurt weer opgebouwd uit protonen en neutronen. Zoals de naam al doet vermoeden, dragen de neutronen geen lading, terwijl protonen verantwoordelijk zijn voor de positieve lading van de kern. De totale lading van een atoom wordt bepaald door de verhouding tussen protonen en elektronen. Als een atoom geen lading heeft betekent dit dat er evenveel protonen als elektronen zijn. Hoewel dit al ingewikkeld genoeg lijkt, bestaan de protonen en neutronen in werkelijkheid uit een soep van de fundamentele deeltjes die quarks en gluonen worden genoemd.

De deeltjesfysica focust zich op het ontrafelen van de fundamentele bouwstenen en hun interacties. Het standaardmodel (SM) is de huidige theorie die alle fundamentele deeltjes en hun onderlinge interacties, behalve de zwaartekracht, beschrijft. De door het SM beschreven deeltjes zijn samengevat in figuur [1](#). Materie, zoals wij die in het dagelijks leven kennen, bestaat uit fermionen: de quarks, elektronen en neutrino's. Er zijn zes quark 'smaken' en zes leptonen, die in drie generaties kunnen worden gegroepeerd. De eerste

generatie omvat de up- en down-quark, het elektron en het elektron neutrino. De tweede generatie omvat de strange-quark, de charm-quark, de muon en de muon neutrino. De derde en laatste generatie omvat de bottom-quark, de top-quark, de tau en tau neutrino. Elke generatie is in massa zwaarder dan de vorige, waarbij de top-quark het zwaarste deeltje is. Dan hebben we de bosonen, de dragers van de fundamentele krachten. De meest bekende van de vier bosonen is de foton, de krachtdrager van de elektromagnetische kracht. De  $Z$ - en  $W$ -boson zijn krachtdragers voor de zwakke kernkracht. Deze kracht is verantwoordelijk voor het radioactieve verval van sommige atomen, waarbij zwak verwijst naar de relatief lange tijd voordat een dergelijk verval daadwerkelijk plaatsvindt. De laatste kracht is de sterke kernkracht, die wordt doorgegeven door gluonen. De constante uitwisseling van gluonen tussen de quarks is wat de quarks als het ware aan elkaar plakt. Hierdoor komen de quarks slechts voor in formaties zoals een proton. Het resterende deeltje is het Higgs deeltje, dat geen bouwsteen voor materie is, noch een krachtdrager. Het Higgs deeltje is een speciaal deeltje, omdat het essentieel is in het proces waarin de andere deeltjes massa krijgen.

Het bestaan van elementaire deeltjes en hun interacties wordt getest door die deeltjes met zeer hoge energieën op elkaar te schieten. 's Werelds grootste en krachtigste deeltjesversneller is de Large Hadron Collider (LHC) bij CERN in Geneve. In dit experiment worden protonen versneld tot bijna de lichtsnelheid en worden ze vervolgens met groot geweld op elkaar geknald. De experimentele deeltjesfysici reconstrueren alle details van de botsing uit de data die is verzameld door de detectoren rond het botsingspunt. Alle deeltjes die door het SM zijn voorspeld zijn gevonden, met als laatste het Higgs deeltje in 2012. Nog indrukwekkender is dat er geen enkel extra fundamenteel deeltje is verschenen. Naast het feit dat het SM geen zwaartekracht beschrijft, slaagt het er daarnaast ook niet in enkele van de grootste mysteries van deze tijd te verklaren. Het feit dat er bijna geen antimaterie in ons universum is wordt niet door het SM verklaard. Daarnaast geeft het ook geen uitleg voor donkere materie en donkere energie, die samen rond de 95 procent van het universum blijken te vormen. Het SM is daarom, ondanks zijn successen, onvolledig en de deeltjesfysica is actief op zoek naar antwoorden.



**Figuur 1** In deze afbeelding worden alle fundamentele deeltjes uit het SM weergegeven. De buitenste cirkel omvat de twaalf elementaire deeltjes waaruit materie bestaat. Dit zijn de leptonen en quarks, respectievelijk weergegeven door de zwarte en grijze vakken. Er zijn 6 quark ‘smaken’: up ( $u$ ), down ( $d$ ), strange ( $s$ ), charm ( $c$ ), bottom ( $b$ ) en top ( $t$ ). Er zijn ook 6 leptonen: elektron ( $e$ ), muon ( $\mu$ ), tau ( $\tau$ ) en de bijbehorende neutrino’s ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ). De vier fundamentele krachtdragers zijn weergegeven in de middelste ring. De elektromagnetische kracht wordt gedragen door het foton ( $\gamma$ ), de zwakke kernkracht wordt gedragen door de  $Z$ - en  $W$ -bosonen en de sterke kracht wordt gedragen door het gluon ( $g$ ). Het centrum van het figuur is gereserveerd voor het Higgs-deeltje. De deeltjes die interacteren met het Higgs-deeltje krijgen massa. Het foton en gluon hebben geen interactie met het Higgs-deeltje en zijn daarom massaloos. De drie neutrino’s hebben een uiterst zwakke wisselwerking met de Higgs en hebben daardoor een zeer kleine massa.

## Quantum Chromodynamics

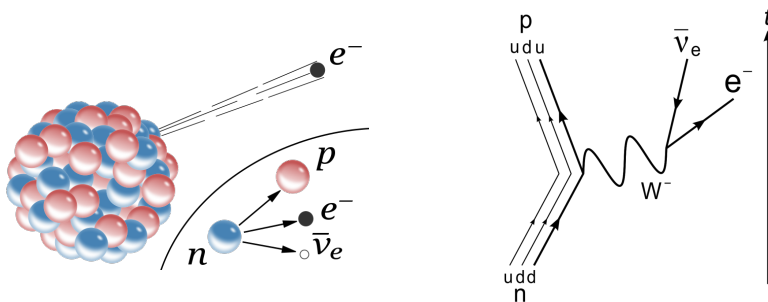
Het onderzoek in dit proefschrift richt zich op de sterke interacties tussen quarks en gluonen. Deze interacties zijn erg belangrijk voor de uitkomst van de proton-proton botsing in de LHC. De tak van het SM die de sterke interacties beschrijft, wordt Kwantumchromodynamica (QCD: van Quantum Chromodynamics) genoemd. Laten we eerst kort terugvallen op de beter bekende theorie van de kwantumelektrodynamica (QED: van Quantum Electrodynamics), die de interactie tussen elektrisch geladen deeltjes beschrijft. Elektrisch geladen deeltjes interacteren met elkaar door fotonen uit te wisselen. Twee positief of twee negatief geladen deeltjes stoten elkaar af en deeltjes met tegengestelde lading trekken elkaar aan. Het voorvoegsel ‘Chromo’ in QCD verwijst naar

het bestaan van drie ladingen, die kleuren worden genoemd. De quarks zijn de materiedeeltjes in het SM die kleur dragen en ze interacteren met elkaar door gluonen uit te wisselen. Een groot verschil met QED is dat de krachtdragers, de gluonen, zelf kleur dragen en daardoor met zichzelf kunnen interageren. De *kleur lading* van quarks en gluonen staat geheel los van de alledaagse betekenis van kleur. De labels rood, groen en blauw zijn slechts in gebruik genomen door de analogie met de primaire kleuren. Een opvallend kenmerk van QCD is dat het alleen kleurneutrale combinaties toelaat op afstanden  $> 10^{-15}$  m. Vanwege deze kleurbeperving worden deeltjes die kleur dragen gegroepeerd in kleurneutrale objecten, hadronen genaamd, en hierdoor kunnen quarks alleen indirect worden bestudeerd in experimenten zoals de LHC. Een quark en een anti-quark met tegengestelde kleurlading vormen mesonen, en drie quarks met een rode, een groene en een blauwe lading combineren tot baryonen. Hier zien we duidelijk het verband met de basis kleuren: rood, groen en blauw combineren tot wit, dat neutraal wordt beschouwd. Een proton is een baryon dat twee up- en één down-quark bevat. Door de continue interactie tussen quarks en gluonen zijn hadronen echter gecompliceerde objecten die in werkelijkheid meer lijken op een constant veranderende soep van verschillende quarks en gluonen.

## Effectieve theorieën, factoriseren en hersommen

In elk vak moet men de beschikbare hulpmiddelen uitbreiden of verfijnen om het product te verbeteren. In de theoretische natuurkunde moeten we onze rekentechnieken verbeteren om de precisie van onze SM-voorspellingen te verbeteren. In het bijzonder gebruiken we zogenaamde *effectieve theorieën* om ingewikkelde berekeningen te omzeilen.

Laten we, om te begrijpen wat een effectieve theorie is, eens kijken naar de theorie die in de jaren '30 door Enrico Fermi is bedacht. Hij deed onderzoek naar *bétaverval*: een vorm van radioactief verval waarbij een atoom vervalt in een ander atoom door een elektron of positron (het antideeltje van het elektron) uit te zenden. In het bijzonder transformeert het *bétaverval* een neutron in een proton en produceert daarbij een elektron vergezeld door een anti-elektron neutrino. Om dit proces te verklaren introduceerde hij de directe interactie tussen de vier leptonen. Deze vierpuntsinteractie is links afgebeeld in figuur 2. Dit was voordat we de huidige theorie van de zwakke kernkracht (onderdeel van het SM) hadden bewezen, waarin het elementaire  $W$ -boson verantwoordelijk is voor het verval. De zwakke kracht dicteert dat een down-quark kan veranderen in een up-quark door een  $W$ -boson uit te zenden. Het  $W$ -boson zelf vervalt bij voorkeur in een elektron en anti-elektron neutrino. Dit vervalproces is



**Figuur 2** Dit figuur geeft twee verklaringen voor neutronenverval. Aan de linker kant zien we het verval van een atoom door middel van een vierpuntsinteractie tussen het neutron, het proton, het elektron en de bijbehorende anti-neutrino. Rechts vervalt het neutron door de zwakke kracht, zoals uitgelegd door het SM. De down-quark draagt negatieve elektrische lading en de up-quark positieve elektrische lading, het zwakke bètaverval wordt gemedieerd door het  $W^-$ -boson, zodat de totale lading behouden blijft. Bron: Wikipedia.

schematisch weergegeven aan de rechterkant van figuur 2.

Nu we weten dat het verval van een neutron wordt verklaard door de zwakke kernkracht, kunnen we Fermi's theorie interpreteren als een effectieve theorie. Voorspellingen gemaakt met de vierpuntsinteractie zijn echter veel eenvoudiger en geven nog steeds een betrouwbaar resultaat. De voorspellende kracht van een effectieve theorie is gebaseerd op de scheiding van energieschalen. In het geval van Fermi's theorie betekent dit dat we energieën dicht bij de massa van het  $W$ -boson moeten vermijden; maar voor kleinere energieën werkt Fermi's theorie uitstekend.

Om de uitkomst van experimenten bij deeltjesversnellers te voorspellen, kunnen we ook een effectieve theorie gebruiken. We gebruiken de scheiding van energieschalen om deeltjes met verschillende energie en richting te onderscheiden. Om preciezer te zijn, we willen zachte interacties (waar laag energetische deeltjes in voorkomen), collineaire interacties (tussen deeltjes die in dezelfde richting bewegen) en harde interacties (tussen deeltjes die veel energie dragen, maar niet in dezelfde richting bewegen) scheiden. De effectieve theorie die dit bereikt is Soft-Collinear Effective Theory (SCET). Theoretische onzekerheden die met deze effectieve theorie worden geïntroduceerd zijn een gevolg van de scheiding tussen de energie waarmee de deeltjes botsen en de energie waarbij de meting wordt uitgevoerd. Deze twee factoren zijn verantwoordelijk voor de validiteit van onze effectieve theorie. De onzekerheden kunnen worden gekwantificeerd door te kijken naar de correcties op de SCET-benadering.

Met behulp van SCET kunnen we de bijdragen van collineaire, zachte en

harde interacties afzonderlijk berekenen. We noemen dit factoriseren, omdat we het hele proces in kleinere (gemakkelijkere) stukjes hebben opgesplitst. We berekenen elk bijdrage in een expansie, waarbij we systematisch meer interacties tussen deeltjes meenemen als we naar hogere ordes in de expansie gaan. Hogere orde berekeningen zijn moeilijk, omdat men rekening moet houden met een toenemend aantal interacties. De bijdragen van zachte en collineaire straling op hogere ordes zijn echter groot en moeten dus worden meegenomen voor nauwkeurige voorspellingen. Dit probleem kan worden verholpen door factorisatie, waardoor het dominante effect van zachte en collineaire straling bij hogere ordes wordt meegenomen. Elk ingrediënt in de factorisatie (zachte, collineaire en harde bijdragen) is afhankelijk van een specifieke energieschaal. Een indirect gevolg van factorisatie is dat elk ingrediënt een energieschaal heeft waarvoor deze dominante effecten verdwijnen op hogere ordes, de zogenaamde natuurlijke energieschaal. We kunnen dus de zachte, collineaire en harde bijdrages berekenen op hun natuurlijke energieschaal, zodat we ons geen zorgen hoeven te maken over dominante effecten van hogere orde. Omdat het bij de eigenlijke botsing maar om één energieschaal gaat, moeten we achteraf wel alle bijdragen omrekenen naar dezelfde energie. De procedure waarbij alle natuurlijke energieschalen worden geëvolueerd naar een gemeenschappelijke energieschaal, staat bekend als hersommenen. Deze techniek heeft het vermogen om de dominante bijdragen van collineaire en zachte straling te voorspellen.

## Onderzoek in dit proefschrift

Het onderzoek dat beschreven staat in dit proefschrift heeft tot doel de theoretische precisie van SM-voorspellingen te vergroten door middel van SCET. In hoofdstuk 2 richten we ons op jets, dit zijn gecollimeerde sprays van hadronen die vaak worden aangetroffen in detectoren van de LHC. Een jet vormt wanneer energetische quarks of gluonen worden geproduceerd in de botsing. Jets bevatten dus belangrijke informatie over deze fundamentele deeltjes en zijn daarom veel bestudeerde objecten. In dit hoofdstuk geven we een geautomatiseerde rekentechniek om de jet-bijdrage te berekenen voor een meting. In hoofdstuk 3 gebruiken we SCET om een voorspelling te doen voor het proces waarin twee protonen botsen en een proton en een jet worden geproduceerd. Specifiek beschouwen we de hoek tussen een foton (of  $Z$  boson) en de jet. Voor situaties waarin deze hoek bijna gestrekt is, d.w.z. wanneer het foton en de jet precies in de tegenovergestelde richting bewegen, blijkt het dat SCET bijzonder nuttig is. In dit limiet is hersommatie namelijk noodzakelijk om betrouwbare resultaten te krijgen, en SCET biedt een kader waarbinnen dit relatief eenvoudig is. In hoofdstuk 4 breiden we onze gereedschapskist uit

met *track functies*. De data die experimentatoren momenteel gebruiken om de LHC-experimenten te vergelijken met de theorie, worden beperkt door de grootte van de calorimetercellen. De calorimeter is het deel van de detector dat de energie en richting meet van de deeltjes die bij de proton-proton botsing worden geproduceerd. Het is mogelijk om de experimentele nauwkeurigheid te verbeteren door gebruik te maken van data uit het zogeheten tracking systeem. Het tracking systeem is een laag in de detector met als voornaamste taak het traject van elektrisch geladen deeltjes te reconstrueren. Het in dit hoofdstuk beschreven onderzoek richt zich op de theoretische implementatie van metingen die uitsluitend zijn gebaseerd op elektrisch geladen deeltjes. Dit doen we door gebruik te maken van track functies, die de fractie van de geproduceerde deeltjes beschrijven die sporen in de detectoren achterlaten.

De strijd om de eerste scheur in het SM te vinden is begonnen, waarbij de in dit proefschrift beschreven technieken een belangrijke rol spelen. Zal precisiefysica het SM verslaan? Of houdt deze theorie stand en geeft het ons de immense taak om de openstaande vragen met betrekking tot donkere materie en energie te verklaren, zonder dat we weten waar te beginnen?