

Høj præcision på små skalaer

Rosanna Ignazzi

Formidlingstekst - Ph.D. cup 2020

Er universet overhovedet stabil? Og kender vi de naturlove der har gjort, at vores verden og hverdag ser ud som den gør idag? Svaret er, at vi ved meget, men samtidig langt fra det hele. Med mit Ph.D. projekt er vi kommet lidt tættere på svaret til disse to spørgsmål ved at udføre præcise målinger af subatomare partikler ved hjælp af data fra ATLAS eksperimentet ved CERN.

Partikelfysik og dens betydning

Først, hvorfor overhovedet forske i partikelfysik? Partikelfysik prøver at give os svar på, hvordan den subatomare verden ser ud, hvilke partikler der er og hvordan de interagerer med hinanden. Disse informationer giver indblik i hvorfor atomerne er som de er, hvorfor de reagerer som de gør og dermed hvordan og hvorfor grundstofferene eksisterer. Med grundstoffernes eksistens kan man også forklare vores og dermed universets eksistens. Partikelfysik er med til at finde svar på vores eksistentialistiske spørgsmål, og søgen mod svaret er en af menneskets store bedrifter.

En af de teorier, som indtil videre beskriver vores opfattelse af den subatomare verden og dens interaktioner, er Standard Modellen, som teoretisk kan forudsige bestemte fysiske størrelser med en ufattelig præcision, for eksempel elektronens magnetisk moment kan forudsiges med en præcision der er bedre end 1 til en milliard, mens elektronens spin kan forudsiges med en præcision der er bedre en 1 til en trilliard.

Dette betyder dog ikke, at denne teori er det endelige svar på, hvordan den subatomare verden ser ud. I forskningen skal vi konstant tjekke, om teorien passer, givet de data vi samler i de eksperimenter vi udfører. Disse eksperimenter bliver mere vilde og avancerede med tiden og det største eksperiment vi har i øjeblikket er Large Hadron Collider (LHC) på CERN.

For eksempel ved vi, at der i universet findes noget stof, som vi ikke ved hvad er og som vi kalder "mørkt stof", fordi vi ikke kan se den. Vi ved endnu ikke om mørkt stof er dannet af partikler, der allerede eksisterer i Standard Modellen, eller om den er dannet af nye partikler. Derfor søger vi på CERN (og ved andre eksperimenter) en forklaring for mørkt stof, og svaret kunne udvide eller udelukke Standard Modellen som teori der forklarer den subatomare verden.

At finde svaret på menneskets eksistentiale spørgsmål gennem forskning i partikelfysik bærer med sig et bredt samarbejde tværs nationaliteter, alder og kulturer, hvilket jeg har nydt under min Ph.D., da de samme spørgsmål opstår i alle verdensdele.

Ud over det, har forskning i partikelfysik været gavnligt for hele verden, da i søgen mod nye partikler og de mest præcise målinger, skubber vi grænserne for den teknologisk udvikling indenfor detektor fysik, signalbehandling, software og data lagring, for at sikre de mest avancerede løsninger. Et eksempel er WWW, som blev opfundet på CERN, takket været en lyst til at dele informationer nemt mellem forskere.

Terningskast med partikler

Hovedprojektet i min Ph.D. har været at tjekke om Standard Modellen stadig er den mest egnede teori til at forklare den subatomare verden, og jeg har gjort dette ved at tjekke, om den mængde af subatomare partikler kaldt for top kvarker, som vi observerer bliver produceret under kollisionerne i LHC, er den samme som den mængde Standard Modellen forudsiger burde produceres under kollisionerne.

Hver kollision som sker i LHC svarer til et terningskast, hvor terningen har en milliard sider, en for hver kombination af partikler der kan dannes under kollisionerne. Ifølge Standard Modellen har hver side en sandsynlighed for at blive slået og denne sandsynlighed kan blive teoretisk beregnet.

I LHC eksperimentet kolliderer vi partikler utallige mange gange, ca. 1 gang hver 25 nanosekund, i en periode på 8 – 12 timer for ca. 11 måneder om året for 4 år - dette svarer til en run periode kaldt Run 2, som foregik på CERN mellem 2015 og 2018 og som er den data-opsamlingsperiode som jeg har brugt i min Ph.D.. Takket været den detektor jeg har brugt, ATLAS detektoren, kan man se om der er blevet produceret et top kvark par i den pågældende kollision.

En ekstra sværhedsgrad bliver introduceret fra det faktum, at vi ikke kan se top kvarkerne direkte, de er nemlig ultra-ustabile partikler, som kun eksisterer i 10^{-34} sekunder. Derfor bliver vi nødt til at studere dem ud fra deres stabile henfaldsprodukter, som for eksempel elektroner og myoner, som er også fundamentale partikler i Standard Modellen, og som vi kan måle meget præcist i detektoren. Vi bliver også nødt til at finde frem til de rigtige henfaldsprodukter, da man kan forveksle de henfaldsprodukter fra et andet henfald med dem fra de top kvark henfald, som vi er interesserede i.

Når vi har talt alle de kollisioner/terningskast med det ønskede udfald, kan vi så sammenligne resultatet med hvad teorien forudsiger, vi burde få. For eksempel, hvis vi kastede en almindelig terning utallige mange gange ville udfaldet for en seks'er være $1/6$ af alle kast. For top kvark par forventer vi, at udfaldet er omtrent 1 top kvark par hver milliard kollisioner.

I min Ph.D. har jeg igennem data-analysen af de ekstrem store datamængder

samlet kunne konstatere, at de top kvark par producerede i LHC og målt i ATLAS detektor svarer til det forventede antal som Standard Modellen forudsiger burde blive producerede.

Dette bekræfter, at Standard Modellen beskriver vores opfattelse af den subatomare verden og dens interaktioner, da den forudsiger de data opsamlet i ATLAS detektoren. Hvad kan man så bruge den viden til? I bund og grund bekræfter vi os i, at vores forståelse af den subatomare verden passer med de nyeste observationer. Det betyder at Standard Modellen stadig er en valid teori og vi kan stadig bruge den til at forudsige andre partikel-egenskaber med højere og højere præcision.

Sikkerhedstjek

Selvfølgelig er dette ikke det eneste der skal til. Den svære del af eksperimentet er at være meget sikker på at konklusionen er rigtig. Men hvordan bliver man egentlig meget sikker?

I princippet er det korrekt at sige, at en elefant og en hund er lige høje indenfor usikkerheden af højdemåling, hvis usikkerheden på begge højdemålinger er store nok, for eksempel hvis en elefant er 3 ± 2 meter og en hund er 1 ± 2 meter. Men med så store usikkerheder er ens udsagn ikke særligt brugbart. Hvis usikkerhederne til gengæld er små (of eksempel 0.2 meter), bliver de to højder af hunden og elefanten meget forskellige og dermed er det med sikkerhed forkert at sige at en elefant og en hund er lige høje.

Det samme gælder i fysikkens verden og i min Ph.D., hvor størstedelen af arbejdet bestod i, at minimere usikkerheden af antallet af de målte top kvark par producerede i kollisionerne. På baggrund af de små usikkerheder på både den målte værdi og den teoretisk beregnede værdi kan jeg sige, at det antal top kvark par produceret i LHC svarer til det forudsagte antal fra Standard Modellen, indenfor usikkerhederne.

Dette betyder, at Standard Modellen ikke alene kan forudsige de begivenheder vi observerer i ATLAS detektoren, men den kan gøre det med en ret høj præcision.

Universets stabilitet

Hvordan går vi så herfra og til universets stabilitet? Universets stabilitet er defineret ud fra hvor stabilt det tomme rum, vakuum, er. Hvis vakuum er stabilt, har vi ingenting af bekymre os om. Men hvis det er ustabil ville verden falde fra hinanden. Der er også en sidste mulighed, hvor vakuum kan være meta-stabilt, hvilket betyder stabilt for lang tid indtil den enten bliver fuldstændig stabilt eller henfalder og bliver ustabil.

En af parametrene der bliver brugt af teoretikerne til at beregne hvor stabilt universets vakuum er, er top kvark massen. Denne størrelse er desværre

ikke forudsagt af Standard Modellen og vi har derfor hellere ikke et teoretisk værdi som vi kan beregne præcist. Istedet bliver vi nødt til at måle den i eksperimenterne og denne værdi, sammen med dens usikkerhed, bliver brugt i udregning af universets vakuums stabilitet.

I min Ph.D. har jeg estimeret top kvark massen ud fra målingen af hvor mange top kvark par der bliver dannet i LHC som funktion af for eksempel hastigheden og energien af elektronerne og myonerne målt i ATLAS detektoren. Dette gøres ved at sammenligne de målte værdier af antallet af top kvark par med værdier fra simulationer med forskellige top kvark masser. Ved sammenligning kan man finde den mest sandsynlige top kvark masse observeret.

For at værdierne kan bruges og er mest korrekte, skal man bruge meget avancerede simuleringer, som inkluderer ikke kun de mest simple udregninger, men også effekterne fra andre processer ud over top kvark dannelse og henfald. Disse simuleringer kræver flere måneder for at blive udarbejdet af teoretikere.

Derfor har jeg i min Ph.D. kun anvendt simple simuleringer for at vise, hvordan man kan ekstrahere top kvark masse fra sådan et dataset. Derfor kan mine resultater omkring top kvark massen ikke bruges direkte til at måle universets stabilitet, da de bare ville vise et kedeligt og stabilt univers, men når mere avancerede simuleringer bliver anvendt, burde man, med den samme metode, kunne finde med sikkerhed om vi faktisk befinder os i et stabilt, ustabil eller i et meta-stabilt univers.