

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/36523> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Ivashko, Artem

Title: Sterile neutrinos in the early Universe

Issue Date: 2015-12-09

Samenvatting

Alhoewel het Standaard Model (SM) van elementaire deeltjes het Heelal succesvol beschrijft tot op de kleinste bekende schalen, weten we dat er een aantal observationele fenomenen bestaan, die niet beschreven worden binnen het raamwerk van deze theorie. Hieronder vallen neutrino-oscillaties, donkere materie en de baryon-asymmetrie van het Heelal.

In dit proefschrift bestuderen we het Neutrino Minimale Standaard Model (ν MSM), een minimalistische extensie van het Standaard Model dat alle drie de bovenstaande BSM-fenomenen (Beyond the Standard Model) tegelijk kan beschrijven, doormiddel van het toevoegen van drie rechtshandige neutrinos N_1 , N_2 en N_3 aan de bekende drie linkshandige neutrinos. Op deze manier wordt de symmetrie tussen linkshandige en rechtshandige deeltjes, die afwezig is in het Standaard Model, bereikt. Tegelijkertijd worden de massa's van de rechtshandige neutrinos in ν MSM gekozen onder de 100 GeV, zodat er geen nieuwe hoge energie schaal wordt toegevoegd aan het Standaard Model.

Hoewel deze nieuwe deeltjes slechts een zwakke wisselwerking hebben met de bekende materie, hebben zij wel een significante uitwerking op het huidige Heelal, voor de volgende reden. Alhoewel de kans dat een enkele steriele neutrino een interactie heeft met een deeltje uit het Standaard Model zeer klein is (vergeleken bij de kans op een interactie tussen de Standaard Modeldeeltjes onderling), wordt de totale kans op een interactie significant op het moment dat we terug gaan naar de tijd van het hete en dichte vroege heelal, vanwege de vele deeltjes die het steriele neutrino op zijn wereldlijn tegen komt. Hieruit volgt dat steriele neutrinos in groten getale geproduceerd kunnen worden en een effect kunnen hebben op de rest van het Heelal. De twee zwaardere deeltjes van ν MSM, N_2 en N_3 , produceren de baryon- en lepton-asymmetrie van het Heelal en het overgebleven N_1 deeltje speelt de rol van donkere materie en bevat als dusdanig de meeste gravitationele massa in het huidige Heelal.

Het ν MSM heeft een groot potentieel om gemeten te worden, aangezien de twee zwaardere N_2 and N_3 deeltjes direct in een deeltjesversneller geproduceerd kunnen worden. Een dergelijk experiment is gepland in CERN, genaamd SHiP (Search for Hidden Particles). Bovendien vervalt het donkeremateriedeeltje N_1 onder productie van een monochromatische Röntgenlijn in de regionen die door

donkere materie gedomineerd worden. Dit specifieke signaal kan doormiddel van sterrenkundige waarnemingen worden gemeten.

In dit proefschrift laten we zien dat de steriele neutrinos N_2 en N_3 met massa's kleiner dan 140 MeV (de massa van het π -meson), welke de neutrino-oscillaties verklaren via het wipmechanisme, aanwezig zouden kunnen zijn in het vroege heelal in zulke grote hoeveelheden dat ze de, anders uitstekende, overeenstemming tussen de voorspelling van het Standaard Model voor de productie van lichte elementen tijdens de oerknal en de sterrenkundige waarnemingen hiervan teniet kunnen doen. Op deze manier zijn de steriele-neutrino-massa's van onder begrenst, hetgeen de potentieel interessante parameterruimte voor toekomstige deeltjesversnellerexperimenten verkleint.

Alhoewel N_2 en N_3 de BSM-fenomenen beschrijven die ogenschijnlijk niet gerelateerd zijn aan donkere materie, worden in ν MSM de eigenschappen van het donkeremateriedeeltje N_1 beïnvloed door N_2 en N_3 . Namelijk, om tegelijk de waargenomen hoeveelheid van donkere materie te produceren en aan de sterrenkundige voorwaarden te voldoen, moet leptonasymmetrie aanwezig zijn in het Heelal op relatief lage temperaturen (onder de 1 GeV). De waarde van deze asymmetrie wordt op hogere temperaturen bepaald door de dynamica van N_2 en N_3 . Maar, zoals in dit proefschrift wordt beargumenteerd, is deze dynamica in staat om de productie van magnetische velden op grote schalen in te leiden door het zogenaamde Chirale Magnetische Effect (CME).

CME manifesteert zichzelf op twee manieren. Ten eerste verschijnt het als linkshandige en rechtshandige deeltjes asymmetrisch bevolkt zijn. De fermion massa m is belangrijk voor ν MSM, omdat we geïnteresseerd zijn in magnetisch velden op grote schaal, $q \ll m$, waar q een typische golfgetal is van het magnetische veld. In dit proefschrift laten we zien dat CME in dit geval ook aanwezig is, en het moet worden meegenomen in de beschrijving van de ν MSM -dynamica in het vroege heelal. CME is in wezen een onevenwichteffect, aangezien de toestand met asymmetrische populatie vervalt naar de symmetrische toestand gedreven door (langzame) processen die het aantal links- en rechtshandige deeltjes veranderen. In deze symmetrische toestand, verwachten we nog steeds dat CME zichzelf manifesteert, aangenomen dat leptonasymmetrie aanwezig is, aangezien de aantallen links- en rechtshandige deeltjes verschillend zijn vanwege de aanwezigheid van pariteitsschendende (zwakke) interacties in het Standaard Model. Op deze manier verwachten we dat de grondtoestand van het plasma verschoven is en dat het magnetische velden op grote schalen bevat. In dit proefschrift laten we echter zien dat het systematisch bijhouden van verschillende bijdragen van de zwakke interacties impliceert dat zij elkaar opheffen en dat de verschuiving van de grondtoestand in werkelijkheid niet plaatsvindt.

We concluderen dat om de evolutie van leptonasymmetrie op lage temperaturen te begrijpen en consistent de hoeveelheid donkere materie te voorspellen en zodoende de parameterruimte van ν MSM te verkleinen, het Chirale Magnetische Effect meegenomen moet worden in de beschrijving van het Heelal, samen met de Maxwellvergelijkingen voor het electromagnetische veld en de vergelijking

voor chirale asymmetrie. Magnetische velden en elektrische stromen leiden tot de excitatie van macroscopische materiestromen, turbulentie kan ontstaan, en dit systeem moet beschouwd worden met een set van correcte magnetohydrodynamische vergelijkingen, welke de chirale asymmetrie in rekening nemen. Dit is werk voor toekomstige studies.

