

PRODUCTION MECHANISMS AND SELF-INTERACTIONS OF VECTOR DARK MATTER

Abstract

The standard model of particle physics and the Λ CDM – the standard model of cosmology are two bases of our understanding of the Universe from the smallest experimental scales up to the size of the cosmological horizon. Although dark matter is the essential element in the latter theory, the former one does not contain any dark matter particle candidate. Moreover, dark matter detection experiments have not provided any conclusive discovery signal, therefore multiple models of dark matter have to face with tight constraints. On the other hand, the small scale structure problems of the Λ CDM motivate the models of self-interacting dark matter.

This dissertation is devoted to the specific extension of the standard model, the Abelian vector dark matter model, which provides a stable dark matter candidate with density matching the observed relic abundance. It is a simple yet renormalizable theory, which may be valid up to the high energy scales, with cosmological predictions and experimental signatures that are worth to be studied in detail. However, we treat this model also as a useful tool to facilitate a more general discussion of possible mechanisms for generation of dark matter density and its large self-interactions, even if their exact realization in nature may be different.

First, we give a detailed analysis of theoretical and experimental constraints on the scenario of thermally produced vector dark matter with a mass in the GeV range. We determine the region in the parameter space where couplings are perturbative and the vacuum is stable up to the Planck energy scale. Furthermore, we impose bounds coming from the collider or direct detection probes and dark matter relic abundance and present a comparison with a similar model of pseudo-Goldstone dark matter.

In the following chapters, we analyze three scenarios with possible large dark matter self-interactions. In the first case, where we focus on the resonant dark matter annihilation, indirect detection bounds exclude the self-scattering cross-section at the level required to alleviate the small-scale structure problems. However, we recognize here the importance of the kinetic decoupling effects on the calculation of dark matter abundance and employ the pinch technique to discuss the gauge-invariance of the amplitudes calculated beyond the Breit-Wigner approximation. In the second scenario, we discuss dark matter self-interactions enhanced by the presence of a light mediator. We utilize the freeze-in production mechanism to avoid the evident tension with experimental data which nonetheless restrict masses of the dark matter and the mediator to the keV and MeV range, respectively. Finally, we present the extension of the model with two Majorana fermions. In this multicomponent scenario, the vector boson acts as a light mediator for the dominant, fermionic component of the dark matter. As the stable particle, the vector boson does not generate any visible decay products. Consequently, the astrophysical signals comply with the indirect detection and the cosmological bounds on the light decaying particles are avoided.

MECHANIZMY PRODUKCJI I SAMOODDZIAŁYWANIA WEKTOROWEJ CIEMNEJ MATERII

Streszczenie

Model standardowy fizyki cząstek i Λ CDM – model standardowy kosmologii stanowią podstawę naszego rozumienia Wszechświata począwszy od najmniejszych, eksperymentalnie dostępnych skal aż po rozmiar kosmologicznego horyzontu cząstek. Mimo, że ciemna materia jest niezbędnym elementem drugiej z wymienionych teorii, to pierwsza z nich nie zawiera żadnego kandydata na cząstkę ciemnej materii. Ponadto, eksperymenty bezpośredniej detekcji nie dostarczyły jednoznacznych sygnałów obecności ciemnej materii nakładając jednocześnie silne ograniczenia na liczne, istniejące modele. Z drugiej strony, problemy modelu Λ CDM z wyjaśnieniem cech struktur na mniejszych skalach astrofizycznych motywują badanie modeli z samooddziaływającą ciemną materią.

Niniejsza dysertacja poświęcona jest rozszerzeniu modelu standardowego z Abelową wektorową ciemną materią, która jest stabilna, a jej gęstość reliktoowa odpowiada obserwowanej wartości. Rozpatrywany model jest prosty, ale renormalizowalny i może być poprawnym opisem oddziaływań również dla bardzo wysokich skal energii. Jego przewidywania kosmologiczne i eksperymentalne sygnatury są warte dokładnego zbadania, jednak w tej pracy stanowi on również bazę do szerszej dyskusji możliwych mechanizmów generowania cząstek ciemnej materii i ich samooddziaływań, których rzeczywista realizacja może być inna.

W pierwszej części pracy przedstawione zostały teoretyczne i eksperymentalne ograniczenia dla przypadku wektorowej ciemnej materii o masie rzędu GeV, która jest produkowana termicznie. W szczególności, wyznaczony został region w przestrzeni parametrów modelu, gdzie wielkość sprzężeń umożliwia rozwinięcie perturbacyjne, a próżnia pozostaje stabilna przy skalach energii rzędu masy Plancka. W dalszej kolejności nałożone zostały więzy pochodzące z eksperymentów akceleratorowych i bezpośredniej detekcji oraz z obserwowanej gęstości reliktowej. Przewidywania modelu wektorowego zostały porównane z podobnym modelem pseudo-Goldstonowej ciemnej materii.

W kolejnych rozdziałach przeanalizowane zostały trzy scenariusze ciemnej materii z silnymi samooddziaływaniami. W pierwszym z nich anihilacja i samorozpraszanie ciemnej materii wzmocnione są rezonansowo. Okazuje się, że w ograniczenia pochodzące z pośredniej detekcji wykluczają samooddziaływania na poziomie koniecznym do rozwiązania problemów z małymi kosmologicznymi strukturami. Niemniej jednak, przypadek ten został dokładnie zbadany wykorzystując niezależne od cechowania amplitudy obliczone przy użyciu pinch technique i nowe metody obliczanie gęstości reliktowej uwzględniające wcześnie kinetyczne odprężanie. W drugim rozpatrywanym scenariuszu, silne samooddziaływania generowe są poprzez obecność lekkiego mediatora. Dzięki wykorzystaniu mechanizmu freeze-in do produkcji ciemnej materii, silne ograniczenia eksperymentalne dla termicznej produkcji z lekkim mediatorem są złagodzone, jednak masa ciemnej materii i mediatora muszą pozostawać odpowiednio w zakresie MeV i keV. W ostatniej części przedstawione zostało rozszerzenie modelu o dodatkowe dwa fermiony Majorany. W takim wielokomponentowym modelu ciemnej materii, cząstka wektorowa może pełnić rolę lekkiego mediatora, który będąc stabilnym nie generuje widocznych produktów rozpadu. W ten sposób, astrofizyczne sygnały ciemnej materii pozostają w zgodzie z eksperymentami pośredniej detekcji, a liczne ograniczenia kosmologiczne na obecność lekkich, niestabilnych cząstek nie muszą być brane pod uwagę.