

Sensory kwantowe jako narzędzie poszukiwań fizyki poza Modelem Standardowym

S. Pustelny^{1,2}

¹ *Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej,
Uniwersytet Jagielloński,
ul. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków*

² *Kolaboracja GNOME*

Niezależnie od sukcesów, które współczesna fizyka osiągnęła w ostatnich 100 latach, nauka ta wydaje się stać na rozdrożu. Wiele bowiem wskazuje na to, że szereg luk w naszym opisie świata i niewytłumaczalnych obserwacji może mieć fundamentalne znaczenie dla dalszego rozwoju tej dyscypliny. Być może nowe odkrycia doprowadzą do rewolucji podobnej do tej, do której doszło na początku XX wieku i która w sposób kardynalny zmieniła nasze rozumienie świata.

Zgodnym z różnego rodzaju rankingami, jednym z 10 najważniejszych problemów, jakie stoją przed współczesną nauką jest zrozumienie problemu i natury ciemnej materii. Wiele niezależnych obserwacji astronomicznych, w tym niezrozumiały ruch ciał niebieskich, mikrosoczewkowanie grawitacyjne w pozornie pustej przestrzeni czy fluktuacje w widmie mikrofalowego promieniowania tła, wskazuje na istnienie dotąd nieodkrytych składników materii. Jediną znaną nam manifestacją tej dodatkowej materii jest oddziaływanie grawitacyjne, mimo że próby jej bezpośredniej rejestracji trwają od wielu dziesięcioleci.

Mimo, że nasza wiedza dotycząca ciemnej materii jest bardzo ograniczona, a masa samych potencjalnych „ciemnomaterialnych” cząstek/obiektów rozciąga się w przedziale od 10^{-22} eV/ c^2 dla najlżejszych cząstek, do 10^{50} eV/ c^2 dla masywnych obiektów astronomicznych, gdzie c jest prędkością światła w próżni, wydaje się, że pewne informacje dotyczące ciemnej materii jednak posiadamy. W szczególności, wydaje się, że średnia gęstość ciemnej materii jest blisko pięciokrotnie większa od gęstości („zwykłej”) materii barionowej. Rodzi to oczywiste pytanie o to dlaczego tak trudno jest ciemną materię bezpośrednio zaobserwować?

Istnieją trzy potencjalne powody, które mogą być odpowiedzialne za brak dotychczasowej ewidencji istnienia ciemnej materii. Pierwszym może być zbyt mała czułość dotychczasowych eksperymentów. Choć wydaje się to zaskakujące, gdyż ciemnej materii jest przecież pięciokrotnie więcej niż materii „zwykłej”, a o istnieniu tej drugiej nikt nie musi nas przekonywać, to jednak źródła tego paradoksu należy upatrywać w bardzo „nienaturalnych” warunkach jakie panują wokół nas. Podczas gdy na Ziemi, w 1 cm³ jest rzędu 10^{23} protonów, to średnia wartość gęstości ciemnej materii (~ 0.4 GeV/cm³) oznacza, że jedna cząstka ciemnej materii o masie porównywalnej z masą protonu znajdowałaby się w 2.5 cm³. Nieporozumienie zatem bierze się stąd, że gęstość materii na Ziemi jest średnio ok. 10^{24} razy wyższa niż średnia gęstość

materii barionowej we Wszechświecie. Tak więc nawet jeśli cząstki ciemnej materii istnieją to może ich być po prostu bardzo mało. Ich rejestracja staje się zatem problematyczna. Oczywiście same cząstki ciemnej materii mogą mieć dużo mniejszą masę. Wówczas za brak ich dotychczasowej rejestracji mógłby być odpowiedzialny fakt ich bardzo słabego pozagrawitacyjnego oddziaływania ze zwykłą materią barionową.

Drugim potencjalnym wytłumaczeniem braku bezpośredniego doświadczalnego dowodu istnienia ciemnej materii jest... jej brak. Być może szereg obserwacji, które sugerują istnienie ciemnej materii jest ze sobą niezwiązanych i da się je wytłumaczyć nie zakładając istnienia dodatkowej materii, ale poprzez modyfikację dotychczasowych praw fizyki. Przykładowo zmiana dalekozasięgowego skalowania oddziaływania grawitacyjnego mogłaby tłumaczyć inny ruch gwiazd w galaktykach czy gromadach galaktyk. Inne efekty mogłyby być odpowiedzialne za soczewkowanie grawitacyjne w pozornie pustej przestrzeni, które tak spektakularnie manifestuje się w przypadku gromady galaktyk 1E0657-558 (ang. Bullet Cluster). Warto jednak w tym miejscu zaznaczyć, że do tej pory nie powstał żaden wewnętrznie spójny model teoretyczny, który pozytywnie przechodziłby konfrontacje z danymi obserwacyjnymi. Nie wyklucza to oczywiście możliwości powstania takiej teorii.

Trzecim potencjalnym powodem braku wykrycia ciemnej materii mogą być „błędy” metodologiczne prowadzonych poszukiwań. Znacząca część prowadzonych do tej pory eksperymentów była bowiem nakierowana na wykrycie efektów, które cząstki ciemnej materii wywierają na atomy. Przekładem tego typu badań są eksperymenty, w których na skutek rozpraszania ciemnej materii atomy podlegają odrzutowi czego skutkiem jest rozbłysk „światła”. Aby efekt rozpraszania był wykrywalny, podejście to zakłada dużą masę rozpraszanych cząstek ciemnej materii. Tego typu strategia świetnie sprawdza się w przypadku poszukiwań tzw. WIMPów, których masy miałyby leżeć w przedziale od GeV/c^2 do TeV/c^2 i które przez wiele dekad były głównymi kandydatami na cząstki ciemnej materii. W przypadku cząstek lżejszych strategia ta zawodzi, gdyż potencjalny efekt odrzutu jest zaniedbywalny. Co więcej, może się nawet okazać, że cząstki ciemnej materii mają tak małą masę, a co za tym idzie tak dużą długość fali de Broglie’a, że zachowują się one nie jak pojedyncze obiekty mikroskopowe, ale jak fale. Oczywiście jest, że poszukiwania tego typu cząstek wymagają implementacji zupełnie nowych strategii.

Jednym ze sztandarowych przykładów ultralekkiej ciemnej materii są aksjony. Miałyby to być lekkie, bezspinowe i pozbawione ładunku elektrycznego cząstki, których istnienie zostało zapostulowane w celu wyjaśnienia problemu braku łamania symetrii CP w oddziaływaniach silnych. Aksjony miałyby słabo oddziaływać z materią barionową poprzez pole elektromagnetyczne lub zmianę właściwości fizycznych cząstek zwykłej materii. Przykładowo oddziaływanie z nimi mogłoby powodować modyfikację stałych fundamentalnych czy też pojawienie się pól podobnych w swej naturze do pól magnetycznych, choć nie będących tymi polami (inne stałe sprzężenia do elektronów, protonów i neutronów). Dlatego też do wykrycia aksjonów mogłyby zostać wykorzystane najbardziej czułe spośród czujników tj. czujniki kwantowe, a w szczególności optyczne zegary atomowe i magnetometry optyczne.

Jedną z ciekawych postulowanych właściwości „pola aksjonowego” jest możliwość jego samoorganizacji i stworzenia przez nie większych struktur. W ten sposób pole aksjonowe mogłoby się cechować strukturą topologiczną czy mogłyby powstawać obiekty złożone takie jak np. ciemnomaterialne planety. Impuls pola aksjonowego mógłby

także powstawać pod wpływem gwałtownych zjawisk astrofizycznych, takich jak zderzenie czarnych dziur czy rozbłysk supernowej. W takich przypadkach oddziaływanie z ciemną materią powodowałoby tylko chwilowe efekty w czujnikach. Ich wykrycie i jednoznaczna identyfikacja wymaga implementacji nowych strategii poszukiwawczych. Odpowiedzią na to wyzwanie jest stworzenie przez nas sieci zsynchronizowanych magnetometrów optycznych GNOME.

Podczas referatu, oprócz omówienia motywacji do poszukiwań ultralekkiej ciemnej materii, przedstawione zostaną podstawy działania geograficznie rozproszonej sieci GNOME, bazującej na synchronicznych pomiarach sygnałów z magnetometrów optycznych, działających w magnetycznie izolowanym środowisku. Działanie sieci zostanie przeanalizowane w oparciu o dotychczasowe kampanie pomiarowe. Pozwoli to m.in. na omówienie jednego z modeli teoretycznych, który badany był w oparciu o wyniki uzyskane przy pomocy sieci GNOME. Całość podsumowana będzie planami na dalsze działanie sieci.