



Poszukiwanie cząstek ciemnej materii w laboratoriach na Ziemi

Paweł Moskal
Instytut Fizyki UJ

Materia i materia ciemna

Materia, z której jesteśmy zbudowani i która stanowi znany nam świat, składa się z protonów, neutronów i elektronów. Protony i neutrony składają się z kwarków, a elektron jest cząstką elementarną. Kwarki oddziałują za pośrednictwem gluonów, dzięki czemu protony z neutronami tworzą jądra, a elektrony oddziałując z jądrami poprzez wymianę fotonów, tworzą atomy. Znamy jeszcze wiele innych cząstek niestabilnych zbudowanych z kwarków (np. mezony, hiperony) oraz inne odmiany cząstek pokrewne elektronom – leptonom (mion, lepton tau). Wszystkie zaobserwowane do tej pory cząstki materii składają się z kwarków lub leptonów.

Jednak obserwacje astrofizyczne ruchów niektórych galaktyk nie dają się wytłumaczyć przy użyciu prawa Newtona mówiącego, że $F = m \cdot a$, i braniu pod uwagę jedynie oddziaływania grawitacyjnego tych nietypowo zachowujących się galaktyk z obserwowalną znaną nam materią. Obserwacje te sugerują, że prawo Newtona wymaga modyfikacji, lub że znana nam materia stanowi jedynie kilka procent całej masy Wszechświata. Dlatego rozważa się hipotezę, że istnieje także inny rodzaj materii, takiej, która nie jest zbudowana z kwarków i leptonów i nie oddziałuje za pośrednictwem gluonów czy fotonów, a zatem bardzo trudno ją zarejestrować urządzeniem zbudowanym ze znanej nam materii. Będąc dla nas niewidzialną materia ta została nazwana materią ciemną. W 2008 roku opublikowano w *Fotonie* artykuł P.F. Góry o ciemnej materii i „łowach” na nią. Po sześciu latach przedstawiamy rezultaty tych łowów [1].

Jedną z najbardziej przekonujących obserwacji, ale nie dowodów wskazujących na istnienie ciemnej materii, jest pokazane na rys. 1 połączenie zdjęć rentgenowskich zderzenia gromad galaktyk (wykonanych w umieszczonym na orbicie okołozemskiej obserwatorium Chandra) z rozkładem masy materii w tych gromadach. Promieniowanie rentgenowskie emitowane jest na skutek tarcia „przedzierającej” się z dużymi prędkościami rozgrzanej materii ze zderzających się galaktyk. Temperatura gazu międzygwiazdowego w tej gromadzie galaktyk wynosi kilkaset milionów stopni. Obszary emitujące promieniowanie rentgenowskie zaznaczone są na rys. 1 kolorem różowym*, natomiast obszar, w którym występuje materia, zaznaczony jest kolorem niebieskim. Rysunek 1 można zatem zinterpretować tak, że część materii (kolor niebieski bez różowego) porusza się znacznie szybciej niż zaznaczona na różowo materia emitująca promie-

* Kolory widoczne w wydaniu internetowym.

niowanie rentgenowskie, która na skutek tarcia porusza się wolniej. Dlatego niebieskie obszary, być może odpowiadające ciemnej materii, oddaliły się od siebie dalej niż różowe.



Rys. 1. Obraz dwóch zderzających się gromad galaktyk, które utworzyły gromadę zwaną „Gromada Pocisk” o numerze 1E0657-558. Obserwacji dokonano w obserwatorium satelitarnym Chandra (chandra.harvard.edu). Kolorem niebieskim zaznaczono obszar, w którym wykryto materię na podstawie analizy zakrzywienia trajektorii fotonów, a na różowo – obszar, z którego emitowane jest promieniowanie rentgenowskie. Istnienie materii niezależnie od jej rodzaju można odkryć poprzez jej oddziaływanie grawitacyjne na przelatujące fotony powodujące zakrzywanie ich trajektorii. Wszystko, co istnieje, oddziałuje grawitacyjnie, nawet fotony. Fotony oddziałują grawitacyjnie, ponieważ posiadają energię, a energia jest równoważna masie. Zjawiska przemiany energii w masę i odwrotnie obserwuje się obecnie na co dzień w laboratoriach takich jak CERN, gdzie na przykład rejestruje się rozpady wytwarzanych tam cząstek na wysokoenergetyczne fotony

Jak ciemna materia może wywołać sygnał w urządzeniach zbudowanych ze zwyczajnej materii, z którą nie oddziałuje?

Problem ten wydaje się nierozwiązywalny i nieco z przymrużeniem oka można by go porównać do typowych filozoficznych problemów rozważanych na przykład przez Kartezjusza (René Descartesa) i księżniczkę Elżbietę w ich bogatej korespondencji z pierwszej połowy XVII wieku [2]. W liście do Kartezjusza z dnia 10 czerwca 1643 roku księżniczka Elżbieta pyta: *Jak nierozciąglą i niematerialna dusza może wpływać na ruch materialnego ciała?* Kartezjusz, człowiek wielkiego umysłu i godny podziwu, odpisał księżniczce Elżbiecie 28 czerwca 1643 roku, ale niestety strasznie się gmatwał w swoich słabo prze-

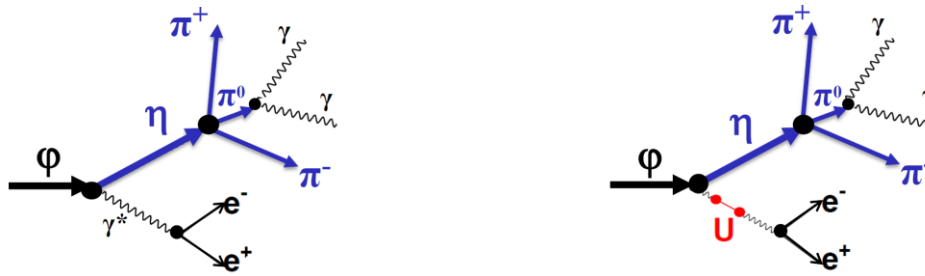
konujących wyjaśnieniach i księżniczka wracała do tego tematu jeszcze kilka razy. Ostatecznie Kartezjusz napisał dla księżniczki rozprawę zatytułowaną *Namiętności duszy* [3], w której starał się wyjaśnić, jak niematerialna dusza wpływa na materialne ciało.



Rys. 2. Portrety księżniczki Elżbiety Czeskiej córki elektora Palatynatu Reńskiego oraz Kartezjusza. Zdjęcia i ramki są dobrane przez autora ze źródeł dostępnych w internecie

Współcześni fizycy starają się dorównać Kartezjuszowi i wymyślają różne sposoby opisu oddziaływania ciemnej materii ze zwykłą. Jeden z nich polega na tym, że jeśli nawet ciemna materia nie oddziałuje z naszą materią, to może nośniki oddziaływania mogą się z sobą „komunikować”. To znaczy być może, iż foton, który jest nośnikiem oddziaływania elektromagnetycznego, jest na tyle podobny do ciemnego fotonu, wywołującego oddziaływanie między cząstkami ciemnej materii, że mogą się z sobą „wymieniać”. Dlatego jednym ze sposobów poszukiwania sygnałów od ciemnej materii jest badanie takich zjawisk, w których foton mógłby się zamienić na ciemny foton. Tak na przykład może się zdarzać w procesie rozpadu mezonów (mezony to cząstki zbudowane z kwarku i antykwarku, które nieustannie powstają w wyniku reakcji jądrowych promieniowania kosmicznego z jądrami atomów w atmosferze, a które można też wytwarzać na przykład w zderzeniach wysokoenergetycznych protonów lub elektronów przyspieszanych w akceleratorach cząstek). Jednym z procesów, które niedawno badano w nadziei odkrycia sygnału od ciemnego fotonu jest rozpad mezonu ϕ na mezon η i foton. Mezon ϕ jest około dwa razy cięższy od mezonu η i układ kwark-antykwark stanowiący mezon ϕ może przejść do niższego energetycznie stanu (mezonu η) emitując przy tym nadmiar energii w postaci fotonu. Proces taki jest przedstawiony schematycznie na rys. 3. Z lewej strony pokazany jest standardowy ciąg rozpadów z udziałem znanych nam cząstek naszej materii, natomiast z prawej strony pokazany jest mechanizm, w którym

dotatkowo w procesie rozpadu bierze także udział hipotetyczny foton ciemnej materii (nazywany bozonem U).



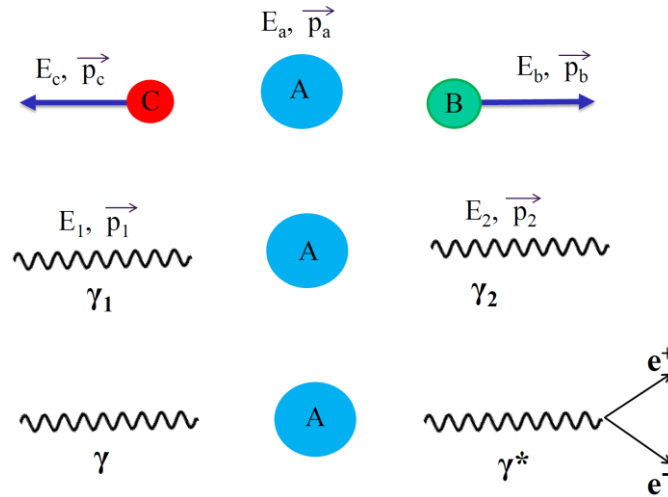
Rys. 3. Schemat rozpadu mezonu ϕ na mezon η z emisją wirtualnego fotonu. Z lewej strony pokazany jest zwyczajny mechanizm, w którym wirtualny foton zamienia się na parę elektron-pozyton, a mezon η rozpada się na trzy mezony π , z których krótko-żyjący mezon neutralny π^0 rozpada się na dwa wysokoenergetyczne fotony. Duże czarne kropki oznaczają przemianę mezonu ϕ w mezon η z emisją wirtualnego fotonu oraz rozpad mezonu η na trzy mezony π . Mniejsze kropki oznaczają konwersję wirtualnego fotonu w parę elektron-antyelektron oraz rozpad mezonu π^0 na parę fotonów. Dodatkowo z prawej strony czerwone kropki oznaczają przemianę fotonu w hipotetyczny bozon U (ciemny foton), a następnie ponowną przemianę ciemnego fotonu w zwyczajny foton. Pojęcie wirtualny foton jest wyjaśnione w kolejnym rozdziale

W celu ułatwienia zrozumienia, w jaki sposób można doświadczalnie sprawdzić czy ciemny foton brał udział w rozpadzie mezonu ϕ , w kolejnym rozdziale wyjaśniona zostanie ogólna zasada badania cząstek tak krótko żyjących, że nie można rejestrować ich bezpośrednio detektorami.

Identyfikowanie cząstek poprzez pomiar ich masy

Masę cząstki możemy wyznaczyć na przykład mierząc jej energię i pęd i korzystając z wzoru $m^2 = E^2 - p^{2**}$. Jako że masy cząstek przyjmują wartości dyskretne, to w oparciu o wartość obliczonej masy możemy cząstkę zidentyfikować. Na przykład elektron ma masę równą 0,5 MeV, mezon π ma masę równą około 140 MeV, mezon η 550 MeV, proton 940 MeV, a mezon ϕ 1020 MeV. Fakt, że masy cząstek mają określone wartości bardzo się od siebie różniące pozwala na poprawne identyfikowanie zmierzonej cząstki nawet, jeśli przy pomiarze energii i pędu popełnimy w eksperymencie niewielki błąd. Oczywiście dokładność pomiaru musi być lepsza niż różnice mas pomiędzy badanymi cząstkami. Jeśli na przykład dokładność wyznaczania masy wynosi 10 MeV i w eksperymencie dostaniemy wartość 145 MeV, to wiemy, że chodzi o mezon π ; jeśli otrzymamy 1015 MeV, to wiemy, że zmierzaliśmy mezon ϕ etc.

** Fizycy dla wygody używają jednostek, dla których $c = 1$, wtedy masa ma wymiar energii, np. GeV.



Rys. 4. Ilustracja rozpadu cząstki A na cząstki B i C, na dwa fotony rzeczywiste oraz na foton rzeczywisty i foton wirtualny

W przypadku, jeśli cząstka bardzo krótko żyje i nie możemy bezpośrednio zmierzyć jej energii i pędu, to wtedy możemy wyznaczyć jej masę, mierząc energie i pędy cząstek, na które się rozpadła. Jeśli, oczywiście, cząstki wtórne na tyle długo żyją, że można je zarejestrować. W górnej części rys. 4 pokazany jest rozpad cząstki A na dwie cząstki B i C. Jeśli cząstki B i C powstały w wyniku rozpadu cząstki A, to wtedy z zasady zachowania energii i pędu wiemy, że $E_a = E_b + E_c$ oraz, że $\vec{p}_a = \vec{p}_b + \vec{p}_c$. Dlatego, jeśli potraktujemy dwie zmierzzone cząstki jako całość, czyli uznamy że tworzą obiekt o energii $E_b + E_c$ i pędzie $\vec{p}_b + \vec{p}_c$, to okaże się, że masa takiego hipotetycznego obiektu składającego się z poruszających się cząstek B i C ma wartość równą masie cząstki A, ponieważ $(E_b + E_c)^2 - |\vec{p}_b + \vec{p}_c|^2 = E_a^2 - p_a^2 = m_a^2$.

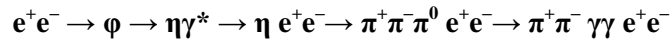
Należy zauważyć, że masa wymagowanego obiektu, składającego się z dwóch poruszających się cząstek, nie musi być równa sumie mas tych cząstek i może być większa niż ta suma. Na przykład cząstka A może rozpaść się na dwa fotony. Masa każdego fotonu wynosi zero ($E_1^2 - p_1^2 = 0 = E_2^2 - p_2^2$), ale jako całość te dwa fotony tworzą obiekt posiadający masę równą masie cząstki A, z której powstały ponieważ $(E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2 = E_a^2 - p_a^2 = m_a^2$.

Pouczające jest rozważyć powyższe procesy w układzie spoczynkowym rozpadającej się cząstki. Wtedy $p_a = 0$ i $m_a = E_c + E_b = E_1 + E_2$. W tym przypadku jasno widać, że masa cząstki A zamienia się na energię cząstek C i B, gdzie w energię wchodzi ich masa spoczynkowa oraz energia kinetyczna.

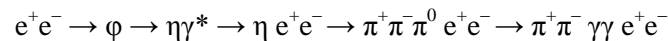
W przypadku rozpadu na fotony masa cząstki A przekształca się w energię fotonów. Zatem widać, że im większa jest względna prędkość poruszających się obiektów, tym większa jest masa hipotetycznego obiektu, który te dwa obiekty stanowią.

Ważny do dalszych rozważań jest też fakt, że fotony niekoniecznie muszą mieć masę równą zero. Fotony rzeczywiste, te, które fizycznie możemy zarejestrować na przykład za pomocą oka czy fotopowielacza, mają masę równą zero, ale fotony pośredniczące w oddziaływaniu między cząstkami, które istnieją bardzo krótko, mogą mieć masy różne od zera. Fotony takie nazywa się wirtualnymi i jako że mają masę niezerową, to mogą rozpadać się na inne cząstki, tak jak symbolicznie pokazano w dolnej części rys. 4, gdzie foton wirtualny oznaczony jest symbolem γ^* . W pokazanym przypadku cząstka A rozpada się na foton rzeczywisty i foton wirtualny, który następnie ulega konwersji na parę elektron-pozyton.

Jak zarejestrować łańcuch reakcji:



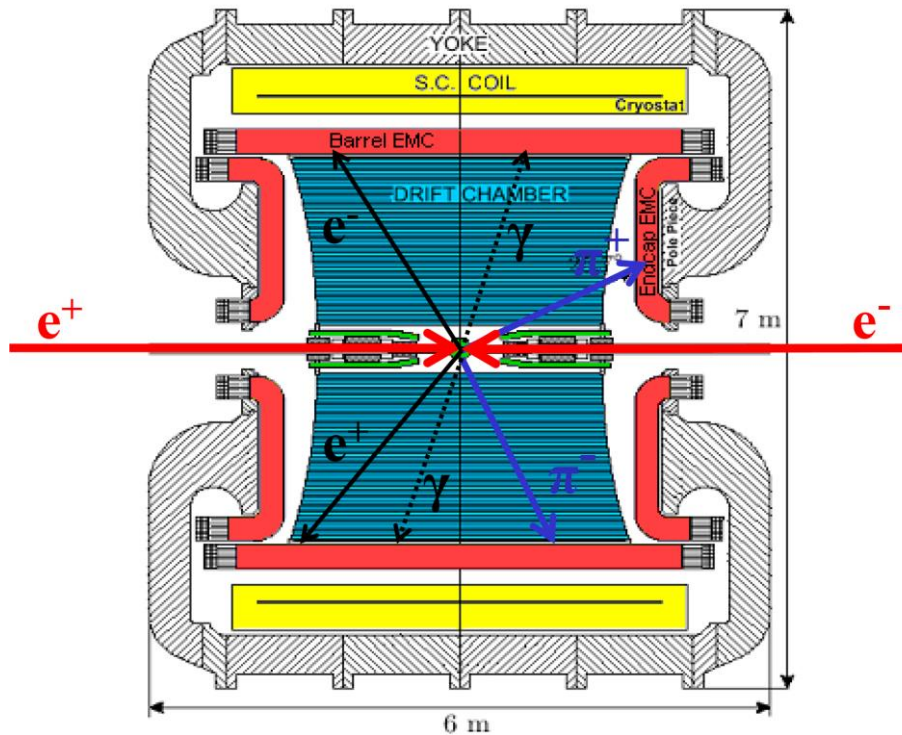
Proces opisany na rys 3. był niedawno badany [4] za pomocą detektora KLOE, otaczającego punkt zderzeń wiązek elektronów i pozytonów (antyelektronów) przyspieszanych w zderzaczu DAFNE w Laboratorium Fizyki Jądrowej we Frascati. Schemat detektora pokazany jest na rys. 5. Badano reakcję, w której mezon ϕ wytwarzany był wewnątrz detektora w zderzeniu przeciwbieżnych wiązek elektronów i pozytonów, a następnie rozpadał się poprzez łańcuch reakcji pokazany z lewej strony rys. 3:



Żeby wytworzyć mezon ϕ , energie elektronu i pozytonu zostały dobrane tak, by $E_{e^+} + E_{e^-} = m_\phi$. Detektor KLOE składa się z komory dryfowej pozwalającej na rejestrowanie trajektorii cząstek naładowanych oraz kalorymetru służącego do pomiaru energii wpadających do niego cząstek. Komora dryfowa znajduje się w polu magnetycznym równoległym do osi wiązek e^+e^- . Dlatego tory cząstek naładowanych zakrzywiają się w płaszczyźnie prostopadłej do tej osi, natomiast w rzucie pokazanym na rys. 5 cząstki lecą po linii prostej. Znając promień zakrzywienia (R) torów cząstek w znanym polu magnetycznym (B) oblicza się ich pęd na podstawie równania: $p = q B R$.

Średnie czasy życia mezonów ϕ , η oraz π^0 są tak małe, że mezony te nie pokonują drogi dłuższej niż kilkadziesiąt nanometrów. Dlatego cały łańcuch rozpadów z rys. 3 następuje praktycznie w samym środku detektora, tak jak pokazano na rys. 5. Analizując zebrane dane spośród wszystkich zarejestrowanych zdarzeń wybrano takie, gdzie zarejestrowane zostały dwie cząstki neutralne, dwie dodatnio naładowane i dwie naładowane ujemnie. Następnie znając pędy

i energie tych cząstek, obliczono ich masy i wybrano tylko takie zdarzenia, gdzie zarejestrowane zostały: $\pi^+ \pi^- \gamma \gamma e^+ e^-$. W kolejnym kroku znając energie i pędy wszystkich cząstek, sprawdzono, czy masa dwóch kwantów gamma jako całości odpowiada masie mezonu π^0 oraz czy masa układu $\pi^+ \pi^- \pi^0$ jest równa masie mezonu η . W ten sposób zidentyfikowano zdarzenia, w których zaszła reakcja: $e^+ e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta e^+ e^-$.



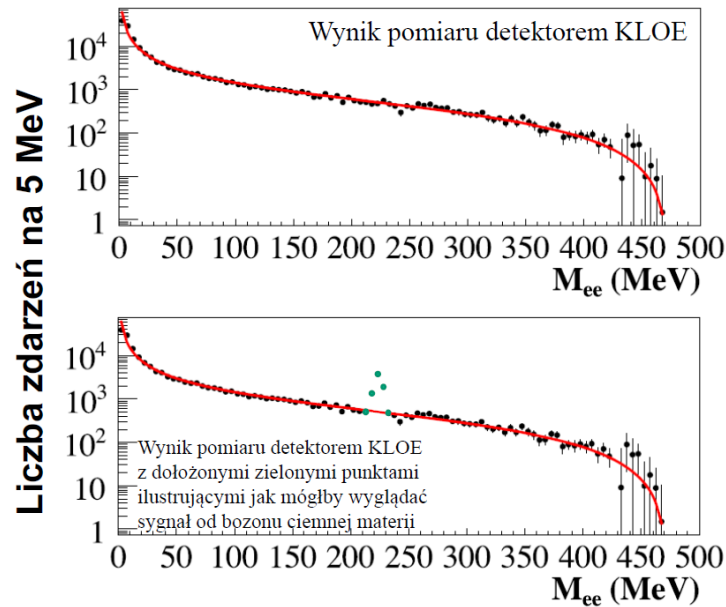
Rys. 5. Schemat detektora zbudowanego w Laboratorium Fizyki Jądowej we Frascati we Włoszech. W środku detektora zderzają się elektrony z pozytonami. Detektor składa się z olbrzymiej komory dryfowej o średnicy 4 metrów umożliwiającej rejestrowanie śladów cząstek naładowanych. Komora otoczona jest kalorymetrem, który umożliwia pomiar energii cząstek oraz pomiar czasu, w którym te cząstki do niego docierają. Kalorymetr i komora znajdują się w polu magnetycznym wytwarzanym przez magnes nadprzewodzący zaznaczony na żółto. Obszar zakreskowany oznacza jarzmo magnesu. Rysunek zrobiony jest w oparciu o schemat z angielskiego artykułu kolaboracji KLOE, dlatego nazwy oznaczające komorę dryfową (*drift chamber*) oraz składowe kalorymetru (*Barrel EMC*, *End cap EMC*) zostały podane w języku angielskim. Na schemacie pokazane są cząstki z ostatniego etapu reakcji: $e^+ e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta \gamma^* \rightarrow \eta e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma \gamma e^+ e^-$

Jak rozpoznać, czy w procesie rozpadu mezonu ϕ brał udział ciemny foton?

Na rys. 6 pokazana jest liczba zmierzonych reakcji $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta e^+e^-$ w funkcji masy układu e^+e^- . Masę systemu e^+e^- jako całości obliczamy znając energie i pędy elektronu i pozytonu wyznaczone na podstawie pomiaru detektorem KLOE. Czyli masa pary e^+e^- M_{ee} na osi poziomej wynosi:

$$M_{ee} = \sqrt{(E_e^+ + E_e^-)^2 - (\vec{p}_e^+ + \vec{p}_e^-)^2}.$$

Ciągła linia pokazuje wynik przewidywań teoretycznych przy założeniu, że mezon ϕ rozpada się na mezon η i foton wirtualny γ^* , a następnie foton wirtualny konwertuje na parę e^+e^- : $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta e^+e^-$. Jako że para e^+e^- powstaje z wirtualnego fotonu γ^* , to masa tego fotonu musi być równa masie M_{ee} . Z wykresu tego wynika, że w takim rozpadzie im większa jest masa wirtualnego fotonu tym mniejsze jest prawdopodobieństwo rozpadu $\phi \rightarrow \eta\gamma^*$. Największa masa, jaką może mieć foton wirtualny w tym rozpadzie, jest równa różnicy mas mezonu ϕ i mezonu η , czyli $1020 \text{ MeV} - 550 \text{ MeV} = 470 \text{ MeV}$ i dlatego powyżej wartości $M_{ee} = 470 \text{ MeV}$ nie ma już punktów na wykresie.



Rys. 6. Górny wykres przedstawia wynik pomiaru masy niezmienniczej pary e^+e^- dla reakcji $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta e^+e^-$. Punkty przedstawiają wyniki pomiaru detektorem KLOE [4], a linia ciągła oznacza przewidywanie teoretyczne przy założeniu, że proces przebiegał następująco: $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta e^+e^-$. Dolny wykres jest przerobionym przez autora wykresem górnym tak, aby zilustrować jak mógłby wyglądać wynik pomiaru, gdyby istniał ciemny foton U o masie 225 MeV

Gdyby istniał foton ciemnej materii U, to wtedy oprócz procesu przedstawionego z lewej strony rys. 3: $e^+e^- \rightarrow \varphi \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta e^+e^-$, mógłby dodatkowo zachodzić proces pokazany z prawej strony rys. 3, czyli:

$$e^+e^- \rightarrow \varphi \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta U \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta e^+e^-.$$

W takim przypadku foton wirtualny γ^* ma masę równą masie fotonu ciemnego U, czyli masa M_{ee} pary e^+e^- jest równa masie fotonu U. Zatem na wykresie pokazującym liczbę zmierzonych zdarzeń w funkcji masy M_{ee} oprócz widma ciągłego odpowiadającego reakcji $e^+e^- \rightarrow \varphi \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta e^+e^-$ powinniśmy zaobserwować dodatkowe zdarzenia dla wartości M_{ee} równej masie ciemnego fotonu U, odpowiadające reakcji $e^+e^- \rightarrow \varphi \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta U \rightarrow \eta\gamma^* \rightarrow \eta e^+e^-$, tak jak zobrazowano to na dolnym wykresie rys. 6.

Zatem jednym ze sposobów potwierdzenia istnienia fotonu ciemnej materii byłyby zaobserwowanie maksimum na widmach masy układu pozyton-elektron powstających w rozpadach mezonów. Do tej pory w żadnym z wykonanych eksperymentów nie zaobserwowano takiego sygnału.

Literatura

- [1] P.F. Góra, *Ciemna materia*, Foton 103, Zima 2008, 16
- [2] R. Descartes, *Listy do księżniczki Elzbiety*, PWN, Warszawa 1995, Biblioteka Kłasyków Filozofii; w wersji angielskiej w zbiorze [descartes1643.pdf](http://www.earlymoderntexts.com/pdfs/) pod adresem: <http://www.earlymoderntexts.com/pdfs/>
- [3] R. Descartes, *Namiętności duszy*, PWN, Warszawa 1986
- [4] D. Babusci *et al.*, Phys. Lett. B720 (2013) 111–115