



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

FENIKS

Wykłady z pokazami, UJK, cz. III a

Natura światła

Marek Pajek

*Instytut Fizyki
Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy
Jana Kochanowskiego w Kielcach*

(pisemna wersja dwugodzinnego wykładu plenarnego z pokazami
z III semestru zajęć)

Film z wykładu: www.feniks.ujk.edu.pl/index.php/pol/Multimedia/Filmy/UJK



- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomagania fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo - technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

Projekt współfinansowany jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Wstęp

Wykład ten poświęcony jest światłu, czyli falom elektromagnetycznym, których długość wynosi 400-700 nm, a więc jest kilka tysięcy razy większa niż rozmiar atomu. W pokazach poznamy różne źródła światła oraz podstawowe zjawiska związane ze światłem (emisja, absorpcja, odbicie, załamanie, dyfrakcja, interferencja). Zademonstrujemy też jego bardzo ważne własności, jak polaryzacja i spójność. Pokażemy jakiego koloru tak naprawdę jest światło i skąd się biorą kolory w przyrodzie. Wprowadzeniem do tego wykładu jest pokaz drgającej **kolorowej sprężynki**, której drgania i kolory dobrze symbolizują tematykę pokazów.

Część A – pierwsza godzina wykładu z pokazami

Fale elektromagnetyczne

Cykliczne poruszanie **magnesu w pobliżu cewki** (wielu nawiniętych zwojów drutu wykonanego z przewodnika) powoduje indukowanie zmiennego napięcia w obwodzie zawierającym tę cewkę, o czym nas przekonuje cykliczne wychylenie się wskazówki amperomierza wpiętego w obwód. W ten sposób dowiadujemy się, że zmienne pole magnetyczne wytwarza w swoim pobliżu zmienne pole elektryczne, co jest treścią prawa indukcji Faradaya. Podobnie, obserwując cykliczne wychylenie się **igły magnetycznej** umieszczonej w pobliżu przewodnika, w którym płynie zmienny prąd elektryczny zauważamy, że zmienne pole elektryczne wytwarza wokół siebie zmienne pole magnetyczne. Obie te obserwacje prowadzą do następującego wniosku: zmienne pole magnetyczne (elektryczne) wytwarza wokół siebie zmienne pole elektryczne (magnetyczne), które z kolei wytwarza zmienne pole magnetyczne (elektryczne) ... i tak i dalej. W efekcie te wzajemnie zmiennie (oscylujące) pola elektryczne i magnetyczne rozchodzą się w przestrzeni tworząc falę elektromagnetyczną. Fala ta, w przeciwieństwie do dyskutowanych wcześniej fal sprężystych, rozchodzi się w próżni. Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej jest stała (ok. 300 tys. km/s) i stanowi fundamentalną stałą Przyrody. Do tego ważnego zagadnienia wrócimy wkrótce.

Fale elektromagnetyczne, podobnie jak inne fale, mają określoną częstotliwość drgań. Dla większości zakresu tych częstotliwości są one dla nas niewidzialne, bo człowiek nie umie ich rejestrować („widzieć”). Widzimy tylko dość wąski zakres fal elektromagnetycznych, o długościach 4000-7000 razy większych niż rozmiar atomu, które rejestruje oko ludzkie. Fale te nazywamy falami widzialnymi lub światłem. Poszczególne częstotliwości fal oko (a właściwiej mózg!) odbiera jako różne kolory, znane nam z kolorowej tęczy, od fioletu do czerwieni, oraz ich „mieszanki”.

O tym że fala elektromagnetyczna, a więc i światło, jest rozchodzącą się w przestrzeni oscylacją pola elektrycznego i magnetycznego przekonujemy się wykonując najpierw proste doświadczenie z niewidzialnymi dla oka falami elektromagnetycznymi o bardzo niskich częstotliwościach, a zatem dużo większych długościach fali niż światło. Do dwóch cienkich prętów metalowych umieszczonych jeden za drugim (taki układ nazywamy **dipolem**) przykładamy zmienne napięcie,

powodujące pojawienie się zmiennego pola elektrycznego wzdłuż kierunku wyznaczonego przez dipol (nadajnik). Dysponując drugim identycznym dipolem (odbiornik), w którym pręty metalowe zwarte są poprzez małą żarówkę, sprawdzamy, że zmienne pole elektryczne istotnie pojawia się w przestrzeni wokół nadajnika. Potwierdza to świecenie się żarówki w odbiorniku, który oczywiście nie jest w żaden bezpośredni sposób (np. kablami) połączony z pierwszym dipolem. Jasność świecenia żarówki mówi nam o natężeniu obserwowanego pola elektrycznego. Ustawiając dipol z żarówką (odbiornik) **równoległe do nadajnika** zauważamy świecenie żarówki, które staje się coraz słabsze w miarę oddalania dipoli. Świadczy to o istnieniu wokół nadajnika malejącego z odległością pola elektrycznego, o kierunku zgodnym z kierunkiem dipola. W ten sposób obserwujemy „niewidzialne” fale elektromagnetyczne i jednocześnie demonstrujemy istotę komunikowania się na odległość przy pomocy fal elektromagnetycznych (radio, telewizja, telefonia komórkowa): odbiornik rejestruje sygnał wysyłany z nadajnika.

Przy ustawieniu odbiornika **prostopadle do nadajnika** żarówka gaśnie, co potwierdza fakt, że kierunek pola elektrycznego fali emitowanej przez nadajnik jest zgodny z kierunkiem dipola. W ten sposób ustalamy, że pole elektryczne wytwarzanej fali ma ściśle określony kierunek w przestrzeni. Taką falę nazywamy falą *spolaryzowaną* liniowo.

W pokazie z dipolami możemy dodatkowo zaobserwować interesujący efekt: jeśli **zmienimy długość odbiornika**, żarówka gaśnie, a więc nie „odbieramy” wysyłanych przez nadajnik fal elektromagnetycznych. Dlaczego? Przyczyną tego zjawiska jest niedopasowanie częstości własnych drgań dipoli nadajnika i odbiornika, które zależą od ich długości. Tak więc w istocie „odbior” sygnału nadajnika przez odbiornik jest procesem rezonansowym, dla którego zajścia kluczowym warunkiem jest zgodność częstości własnych rezonujących układów. Przypomina to dokładnie wcześniejszy pokaz rezonansu fal akustycznych w układzie dwóch kamertonów! Nadmienmy, że rezonansowe przekazywanie drgań elektromagnetycznych między identycznymi układami jest dobrym modelem rozchodzenia się fal elektromagnetycznych (w tym światła) w materii, gdzie rolę identycznych rezonujących układów pełnią atomy rozpatrywanego ośrodka.

Podstawowe własności dotyczące generowania i rozchodzenia się fal elektromagnetycznych można zademonstrować wykorzystując **mikrofale**, tj. fale elektromagnetyczne o długościach rzędu centymetrów. W mikrofalowym układzie demonstracyjnym, zawierającym generator i dźwiękowy detektor mikrofal oraz polaryzatory (układy równoległych prętów metalowych), można obserwować polaryzację mikrofal (poprzez obrót polaryzatora), a także zjawisko odbicia mikrofal od metalu (podobnie jak światła od zwierciadła!) i pochłaniania mikrofal w materiałach. Pomimo, że dyskutowane tu fale elektromagnetyczne są niewidzialne dla człowieka, możemy je zademonstrować i badać ich podstawowe własności. Mikrofała przechodząc przez polaryzator z równoległych prętów polaryzuje się liniowo, w której kierunku drgającego pola elektrycznego jest prostopadły do prętów. Składowa pola równoległa do prętów ulega wyłumieniu, albowiem wzbudza prąd elektryczny płynący wzdłuż prętów.

Światło

Najprostsze źródła światła, wykorzystujące pojawianie się ognia w procesie spalania, łatwo zademonstrować. Obserwując **palącą się świeczkę** lub **płomień palnika gazowego** zastanawiamy się, co tak naprawdę „świeci”. Odpowiedź na to pytanie, wymagająca znajomości mikroskopowej struktury materii, jest następująca: zjawisko świecenia to emisja „widzialnych” fal elektromagnetycznych przez wzbudzone atomy materii. Wzbudzenie atomów, składających się jak wiemy z dodatnich elektrycznie jąder atomowych otoczonych ujemnie naładowanymi elektronami, zachodzi w wyniku dostarczenia do nich energii, na przykład w procesie podgrzewania lub zderzeń z innymi cząstkami, co powoduje wzbudzenie pojedynczych elektronów do tzw. wyższych stanów energetycznych. Tak wzbudzone atomy wracają po pewnym czasie do stanu pierwotnego, zwanego podstawowym, emitując przy tym promieniowanie elektromagnetyczne, przez co pozbywają się „nadmiaru” energii. Dokładniejszy opis tego procesu daje fizyka kwantowa, zgodnie z którą emitowane fale elektromagnetyczne możemy traktować też jako „cząstki”, zwane fotonami. Fotony są porcjami (kwantami) fal o ściśle określonej energii, równej różnicy energii stanu wzbudzonego i stanu podstawowego atomu. Stąd też wynika, że różne pierwiastki mogą emitować światło o różnych energiach fotonów, które oko ludzkie interpretuje jako różne kolory. Możemy się o tym przekonać **umieszczając w płomieniu substancje zawierające różne pierwiastki**, na przykład sól kuchenną (NaCl), emitującą charakterystyczne światło o żółtym zabarwieniu.

Obserwując dokładniej płomień palnika gazowego zauważamy, że regulując strumień gazu zmieniamy zarówno temperaturę płomienia jak również jego zabarwienie (w różnych obszarach płomienia widzimy kolor żółty, czerwony, niebieski, fioletowy, ...). Doświadczenie to ilustruje bardzo istotną prawidłowość: ciała podgrzane do pewnej temperatury emitują promieniowanie elektromagnetyczne, w tym też widzialne światło, o charakterystycznym rozkładzie długości fal. Rozkład ten został po raz pierwszy poprawnie opisany w 1900 r. przez Maxa Plancka, uważanego za ojca fizyki kwantowej (dokładniej: kwantów promieniowania fal elektromagnetycznych).

W szczególności, rozkład Plancka wyjaśnia wcześniej sformułowane przez Wilhelma Wiena prawo stwierdzające, że ciało emituje najwięcej energii w postaci fal o długości odwrotnie proporcjonalnej to temperatury tego ciała. Ta prosta zależność umożliwia zatem określanie temperatury ciał poprzez obserwacje emitowanego promieniowania, bez konieczności ich bezpośredniego kontaktu z klasycznym termometrem. Obserwacja ta miała kolosalne znaczenie dla rozwoju badań Wszechświata. Umożliwiła bowiem wyznaczanie „na odległość” temperatury obiektów świecących na niebie, na przykład gwiazd, poprzez obserwację ich promieniowania elektromagnetycznego, najczęściej w zakresie fal widzialnych, czyli emitowanego światła. W ten sposób wyznaczona została temperatura powierzchni Słońca! Obserwacje takie umożliwiły też badania składu pierwiastkowego (charakterystyczne częstości zwane liniami) oraz temperatury gwiazd (prawo Wiena). Stwierdzono też, że Wszechświat jest zbudowany z takich samych pierwiastków, jakie znamy na Ziemi, co nie było a priori oczywiste!

Z czasem zauważono, że tzw. charakterystyczne linie promieniowania pierwiastków we Wszechświecie dochodzące do nas z odległych obiektów są przesunięte ku czerwieni (tj. ku dłuższym falom), co jest podstawowym dowodem na rozszerzanie

się Wszechświata. Zmiana koloru linii jest analogiczna do znanego z akustyki efektu Dopplera: słyszana częstość dźwięku przybliżającego się do obserwatora pojazdu jest wyższa, niż pojazdu oddalającego się, a ze zmiany częstości (lub długości fali) możemy wywnioskować, jaka jest prędkość poruszającego się obiektu emitującego fale. Zaobserwowanie ciągłego rozszerzania się Wszechświata prowadzi z kolei do wniosku, że niegdyś w przeszłości był on punktem, który eksplodował w Wielkim Wybuchu około 15 miliardów lat temu. Wszystko to wiemy z obserwacji światła docierającego do nas ze Wszechświata!

Późniejsze dokładniejsze badania rozkładu promieniowania elektromagnetycznego Wszechświata opisanego rozkładem Plancka pozwoliły ustalić że Wszechświat, od momentu Wielkiego Wybuchu, znacznie ostygł z powodu ustawicznego rozszerzania się. Obecnie jest bardzo zimny - jego temperatura wynosi 2.7 stopni Kelvina - co odpowiada około minus 270 stopniom Celsjusza.

Współczesne źródła światła wykorzystują bardziej zaawansowane metody pobudzania atomów do świecenia, na przykład w wyniku przepływu prądu elektrycznego w metalu lub w gazie. W zwykłej **żarówce** przepływający przez metalowe włókno prąd elektryczny powoduje, w konsekwencji istnienia oporu elektrycznego, nagrzanie się włókna do bardzo wysokiej temperatury (powyżej 2000 °C), co z kolei prowadzi do emisji fal elektromagnetycznych w zakresie widzialnym, a więc światła, o widmie zgodnym z omawianym wcześniej rozkładem Plancka. W bardziej wydajnych źródłach światła, takich jak **światłówki**, wykorzystywany jest proces wzbudzenia atomów w wyniku zderzeń atomowych w zjonizowanym gazie. Wzbudzone w tym procesie promieniowanie ultrafioletowe wzbudza z kolei atomy substancji pokrywającej wewnętrzne ścianki światłówki (luminofor), które emitują światło widzialne.

Omówione dotychczas „klasyczne” źródła światła emitują tzw. światło niespójne, czyli takie, w którym każdy atom emituje kwanty promieniowania (fotony) niezależnie od emisji z pozostałych atomów. Traktując takie światło jako strumień fal stwierdzamy, że fale te muszą mieć różne (przypadkowe) fazy, co oznacza że maksima i minima tych fal mają przypadkowy rozkład w przestrzeni. Powstaje zatem pytanie, czy można skonstruować takie źródło światła, w którym fotony mają takie same fazy, a więc wszystkie drgają synchronicznie? Odpowiedź na to pytanie jest pozytywna: takim źródłem światła jest laser, jeden z najważniejszych wynalazków XX wieku. Jak zmusić fotony fale świetlne aby drgały w jednym rytmie (tj. synchronicznie)? Wykorzystujemy w tym celu zjawisko emisji wymuszonej, czyli proces, w którym fala padająca na wzbudzony atom wymusza przejście atomu do stanu podstawowego, z jednoczesną emisją identycznego fotonu (tj. o tej samej częstości, polaryzacji i fazie) jak foton padający. Tłumaczymy to w ten sposób, że oscylujące pole elektryczne padającej fali „rozkołysuje” elektron wzbudzonego atomu zgodnie ze swoją częstością i kierunkiem pola elektrycznego, co prowadzi do emisji identycznej fali jak fala padająca. Tak więc w procesie emisji wymuszonej każdy oddziałujący z atomem foton wymusza powstanie kolejnego identycznego fotonu (zatem ich liczba podwaja się), następnie mechanizm powtarza się na kolejnych atomach, i tak dalej, co powoduje lawinowe rozmnażanie się identycznych fotonów. Emisja spontaniczna wykorzystywana jest w laserach do wzbudzenia światła spójnego, czyli takiego, w którym wszystkie fale-fotony drgają synchronicznie.

Na przykład w laserze helowo-neonowym praktycznie realizowane jest to w ten sposób, że polem elektrycznym wzbudzamy początkowo świecenie w rozrzedzonym gazie (tak, jak w świetłówkach), w wyniku emisji spontanicznej doprowadzając jednocześnie do wzbudzenia znacznej ilości atomów. Umieszczenie na osi lasera dwóch zwierciadeł w odległości zapewniającej powstanie silnej fali stojącej umożliwia selektywne wzmocnienie wybranej częstotliwości, odpowiadającej warunkowi rezonansowego zachodzenia procesu emisji wymuszonej. Po zainicjowaniu takiej akcji laserowej, po krótkim czasie laser emituje intensywną, silnie skolimowaną, wiązkę identycznie drgających fotonów, a więc światło spójne.

Fale spójne łatwo symbolicznie zademonstrować w prostym pokazie z **dwoma rozciągniętymi identycznymi sprężynami**, wzbudzając synchronicznie fale biegnące równoległe obok siebie w obu sprężynach. Niejednoczesne (asynchroniczne) wzbudzanie takich fal demonstruje fale niespójne, rozchodzące się niezależnie. Takie niespójne światło emitują standardowe źródła światła, na przykład żarówka. Światło spójne wytwarzają lasery.

Wykaz pokazów, część a)

- 1) Drgania kolorowej sprężynki
- 2) Świat widziany przez okulary dyfrakcyjne
- 3) Cewka Tesli, jarzenie się świetlówka w polu elektromagnetycznym cewki
- 4) Kula plazmowa jako źródło światła
- 5) Nadajnik i odbiornik fal (anteny dipolowe), natężenie świecenia żaróweczki w odbiorniku w zależności od odległości i kąta, polaryzacja fal elektromagnetycznych, brak świecenia jeśli dipole mają różną długość
- 6) Przypomnienie zjawiska rezonansu: dwa jednakowe kamertony
- 7) Generator i odbiornik mikrofal, odbicie mikrofal od płytki metalowej, polaryzator i analizator z drutów, polaryzacja
- 8) Źródła światła: świeczka, palnik, ogrzany drut, żarówka
- 9) Kolor świecenia żarówki w zależności od napięcia zasilającego prądu, prawo Plancka



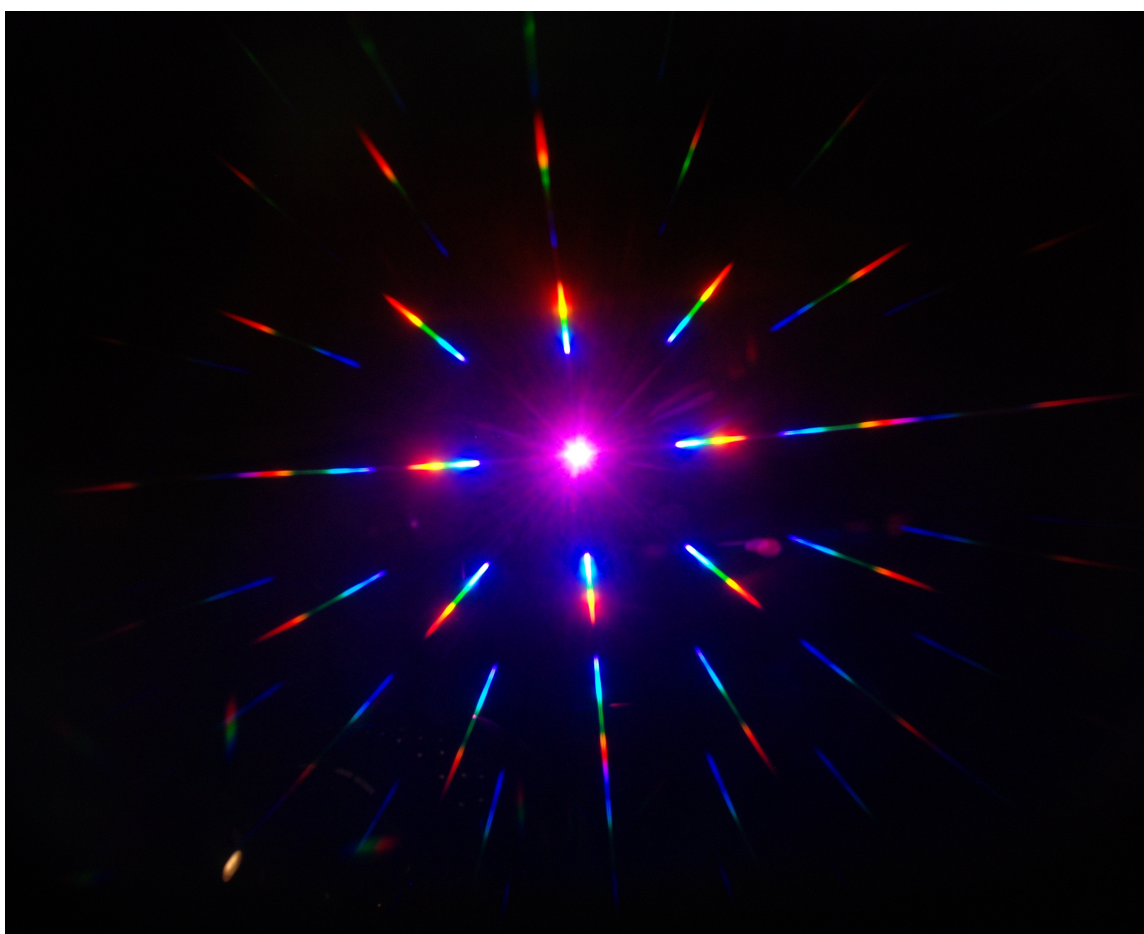
Dyfrakcja i interferencja światła lamp oświetleniowych widzianych przez okulary z siatką dyfrakcyjną



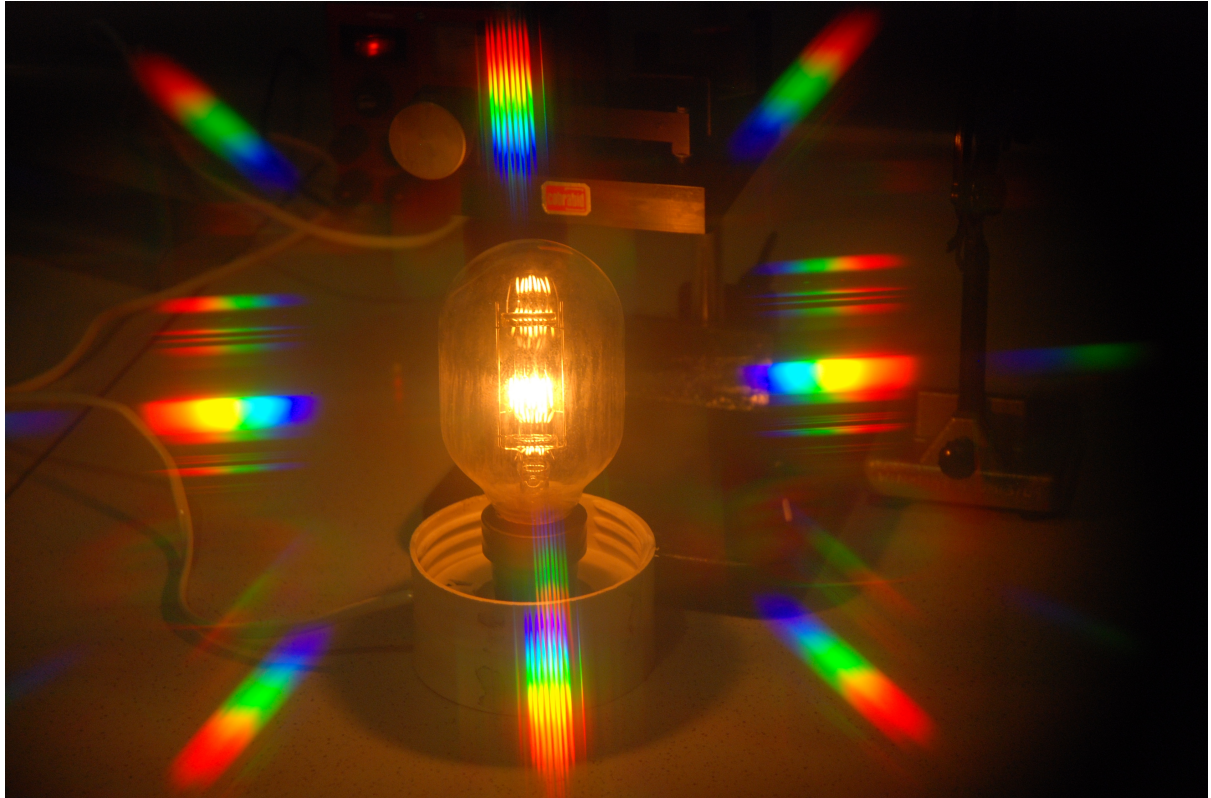
Dipole do demonstracji rezonansu fal elektromagnetycznych



Oddalenie i skręcanie dipola powoduje przygasanie świecącej żaróweczki



Obraz dyfrakcyjny plamki lasera ...



... i żarówki