

Pytania do samodzielnego studiowania:

1. Odnajdź w literaturze polskiej lub światowej, od Homera do Stanisława Lema, relacje z podróży. Co było środkiem podróży (statek, pociąg itd.)? Opisz, co było źródłem energii napędzającej ten środek, i ile czasu, w przybliżeniu, zajmowało przejechanie/przeplnięcie określonej odległości.
2. Nanieś na skalę czasu punkty przełomowe zastosowaniach silników cieplnych: wynalazek Watta, pierwszą lokomotywę parową, pierwszy silnik benzynowy, pierwszy samolot, wodowanie „Titanica”.
3. Nanieś na skalę czasu punkty przełomowe w zastosowaniach prądu elektrycznego: wynalazek ogniwa Volty, odkrycie indukcji elektromagnetycznej, pierwszy tramwaj elektryczny, pierwsze oświetlenie elektryczne miasta w USA i Europie.
4. Podaj przykłady urządzeń korzystających z energii elektrycznej, o mocy: setek miliwatów, pojedynczych watów, setek watów, pojedynczych kilowatów, setek kilowatów.
5. Znajdź w internecie różne rodzaje ogniw elektrochemicznych (takich jak ogniwo Volty). Zidentyfikuj w każdym z nich, co jest katodą (czyli elektrodą ujemną), co jest anodą (czyli elektrodą dodatnią), w czym są umieszczone elektrody (czyli co jest elektrolitem).

Pytania na sprawdzian:

1. Opisz, na czym polegały dwie rewolucje przemysłowe oparte o odkrycia fizyki.
2. Podaj jednostki pomiaru energii, mocy, natężenia prądu i napięcia. Podaj przykładowe wartości mocy wybranych urządzeń korzystających z energii elektrycznej.

## 2.2. Narodziny fizyki współczesnej

Trudno określić dokładny moment narodzin fizyki współczesnej. Często podaje się wykład Maxa Plancka, profesora Uniwersytetu w Berlinie, na posiedzeniu niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w czwartek, 5 grudnia 1900 roku. Na wykładzie tym Planck starał się wyjaśnić widmo<sup>9</sup> tzw. ciała doskonale czarnego<sup>10</sup>. Widmo takiego „czarnego” ciała ma specyficzny rozkład – ciągły, jak kolory w tęczy przechodzące jeden w drugi. Światło słoneczne ma właśnie widmo ciągłe, przypominające świecące, rozgrzane ciało czarne: 45% jego energii przypada na zakres widzialny, 50% na dłuższe fale, tzw. promieniowanie podczerwone, a 5% na nadfiolet, zob. ryc. 2.5.

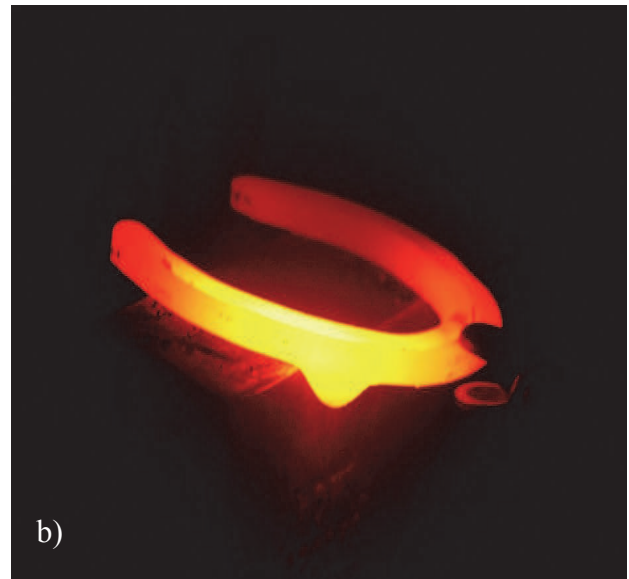
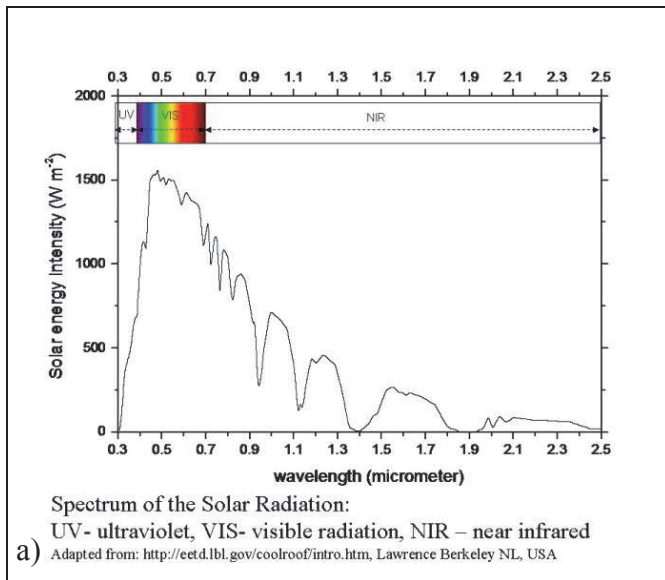
Wiadomo od „zawsze”, że im bardziej rozgrzane ciało, tym świeci bardziej na białą. Kowale od niepamiętnych czasów tak właśnie oceniają temperaturę kutego żelaza: wiśniowy kolor to około 700°C, jasnoczerwony to ponad 800°C, pomarańczowy to około 1000°C<sup>11</sup>. Planck starał się tym obserwacjom nadać opis matematyczny, wychodząc z dwóch przesłanek: nauki o ciepłe (termodynamiki) i równań opisujących prawa elektromagnetyzmu, czyli praw Maxwella. Tym ostatnim wypada poświęcić dwa zdania.

---

<sup>9</sup> Widmo, czyli zależność natężenia światła od długości fali, czyli koloru światła.

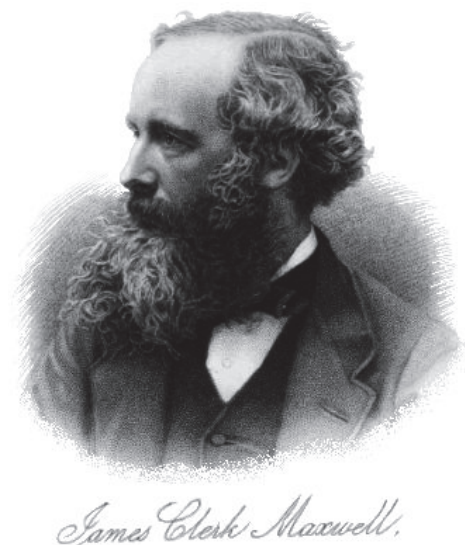
<sup>10</sup> Ciało doskonale czarne to taka konstrukcja wymyślona, dużego pudła z małym otworem. Otwór dla obserwatora na zewnątrz wydaje się całkowicie czarny.

<sup>11</sup> Zobaczymy w rozdziale III, że astronomowie w analogiczny sposób oceniają temperaturę powierzchniowych warstw odległych gwiazd.



**Fot. 2.5.** Obserwacje leżące u podstaw rewolucji Plancka: **a)** widmo Słońca po przejściu przez atmosferę Ziemi; 40% energii przypada na podczerwień; **b)** kolory rozgrzanej podkowy

Na naszą wiedzę o elektryczności i magnetyzmie złożyły się stulecia obserwacji. Od starożytności wiadomo, że potarty bursztyn<sup>12</sup> przyciąga kurz, skrawki włosów itd. Oddziaływaniem magnesów zajmował się m.in. na początku XVII wieku Kartezjusz. Giandomenico Romagnosi w 1803 r., a za nim Hans Ørsted stwierdzili, że prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne. Faraday odkrył prawo indukcji, czyli wytwarzania prądu elektrycznego z pola magnetycznego. Fakty te, pozornie oddzielne, znalazły opis w prawach Maxwella. Ich prostota i ukryta symetria są tak piękne, że cytujemy je na ryc. 2.6.



Pan Bóg powiedział:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{I} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

**I stało się światło!**

**Ryc. 2.6.** Prawa Maxwella w postaci tzw. różniczkowej. Odwrotność iloczynu stałych  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [SI] i  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  [SI] jest równa kwadratowi prędkości światła w próżni,  $1/\mu_0 \epsilon_0 = c^2$ . Nie musisz tych równań rozumieć, ale dzięki nim mamy telefony komórkowe, radio i TV

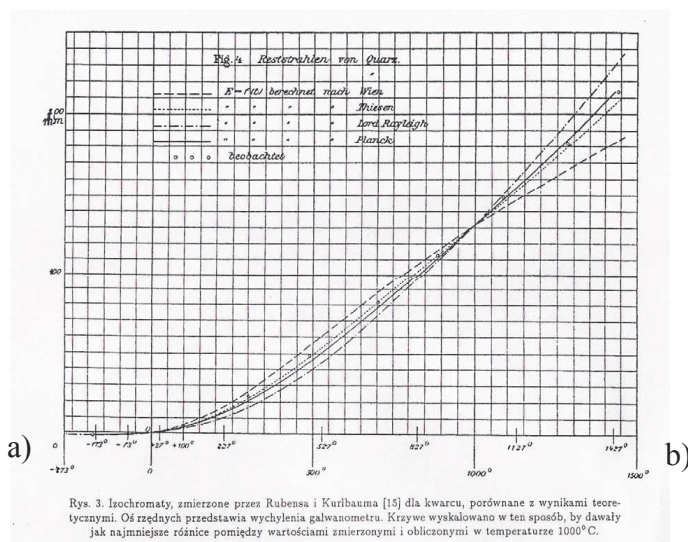
Rozwiązanie równań Maxwella w taki sposób, jak to robimy w matematyce, tzn. poprzez wyznaczenie jednej niewiadomej i podstawienie do drugiego równania, dało wynik zaskakujący: pole magnetyczne i pole elektryczne mogą się cyklicznie zmieniać jedno w drugie i wędrować w przestrzeni. Wyliczono prędkość rozchodzenia się takich pól, na podstawie znanych stałych oddziaływań elektrycznych i magnetycznych: wynikiem była

<sup>12</sup> Bursztyn, po słowiańsku *jantar* po grecku nosi nazwę *elektron*.

znana prędkość światła,  $c = 299\,792\,458$  m/s (czyli około **trzysta tysięcy kilometrów na sekundę**).

Natychmiast podjęto poszukiwania fal elektro – magnetycznych. W 1887 roku w Getyndze młody asystent H.R. Hertz zauważył mikroskopijny przeskok iskry między dwoma metalowymi kulkami, gdy w pobliżu wywołał przeskok iskry między innymi kulami. Fale elektromagnetyczne, a przez to poprawność równań Maxwella, zostały potwierdzone. Nie było wiadomo, czy do ich rozchodzenia się jest potrzebny jakiś ośrodek (zwany eterem), ale to już inna historia, do której wrócimy przy okazji astrofizyki.

Max Planck starał się „pogodzić” równania Maxwella z zasadami emisji energii przez rozgrzane ciała. Już w październiku 1900 roku uzyskał niezłą zgodność z doświadczeniem, zob. ryc. 2.7. Niestety, w zakresie światła podczerwonego zależność nie była zadowalająca. W referacie w grudniu 1900 roku Planck przyjął następującą hipotezę<sup>13</sup>: założył, że energia jest emitowana w ściśle określonych porcjach (kwantach) przez elementarne drgające mini-anteny wewnątrz czarnego pudła. Wielkość tych porcji, niesionych przez fale elektromagnetyczne tak wyemitowane, zależna byłaby jedynie od częstotliwości fali  $\nu$  (czytaj: ni) lub równoważnie - od długości fali  $\lambda$ , czyli od koloru światła.



6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder Allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

**Ryc. 2.7.** Dwie prace, które leżą u podstaw fizyki kwantowej: **a)** praca Plancka nt. widma ciała doskonale czarnego (Annalen der Physik, vol. 4, p. 553, 1901r.) – wykres przedstawia różne teorie porównane z danymi doświadczalnymi<sup>14</sup>; **b)** fragment pracy A. Einsteina nt. efektu fotoelektrycznego – niemożliwe było wyjaśnienie tego zjawiska bez założenia, że atomy pochłaniają energię światła w postaci ściśle określonych porcji, zależnych jedynie od koloru światła; porcje te nazywane fotonami

Opisujemy to prostym wzorem,

$$E = h \cdot \nu \tag{2.8}$$

gdzie  $E$  jest energią fotonu a  $\nu$  jego częstotliwością.

Stała Plancka  $h$ , przypuszczalnie taka sama w całym Wszechświecie, jest tak ważna, że jest pokazana przy wejściu do Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, zob. fot. 2.11a.

<sup>13</sup> Przez hipotezę rozumiemy stwierdzenie założone, ale nie dość dobrze udowodnione. Wyższym szczeblem pewności jest teoria, która daje również przepis doświadczalny na jej sprawdzenie. Znamienne jest rozgraniczenie między hipotezą a teorią, jaką uczynił bł. Papież Jan Paweł II pisząc o ewolucji: „ewolucja, do niedawna mająca charakter jedynie hipotezy w ostatnich latach przyjęła znamiona teorii”, *Message to the Pontifical Academy of Sciences: On evolution*, 22 październik 1996.

<sup>14</sup> A. Kiejna, Stulecie wzoru i stałej Plancka, *Postępy Fizyki*, 2000, 51 (6), 294

Energię fotonów obliczamy ze wzoru

$$E = h \cdot \nu,$$

gdzie  $\nu$  jest częstotliwością światła, obliczaną z okresu drgań fali za pomocą wzoru:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (2.9).$$

Związek między częstotliwością światła a długością fali światła jest bardzo prosty:

$$\lambda = c \cdot T \quad (2.10)$$

Gdzie  $T = \frac{1}{\nu}$  jest okresem drgań fali świetlnej, a  $c$  prędkością fali.

Związek (2.10) przypomina wzór na drogę w ruchu jednostajnym  $s = vt$  więc jest łatwy do zapamiętania.

Dla światła fioletowego na granicy widzialności dla oka ludzkiego (długość fali 380 nm) energia kwantów wynosi 3,26 eV, a dla światła czerwonego na granicy widzialności (760 nm) energia wynosi 1,61 eV. Dla porównania jednostek, energia odłączenia jednej grupy OH w cząsteczce glukozy wynosi (w próżni, poprzez przyłączenie elektronu) 2,0 eV. Energia ta jest niższa w środowisku wodnym (około) 1,2 eV.

Hipoteza kwantów energii światła, czyli fotonów, była tak rewolucyjna, że sam Planck jeszcze w 1916 roku nie chciał używać słowa „foton”. Oczekiwaliśmy od czasów Demokryta, że materia może składać się z niepodzielnych części, zwanych atomami<sup>15</sup>. Nie spodziewaliśmy się, że światło również jest wymieniane (wysyłane i absorbowane) w postaci minimalnych porcji. Któryś z fizyków przyrównał ideę kwantów światła do zakupów cukru, sprzedawanego nie w małych torebkach, a jedynie w dziesięcio-kilogramowych blokach<sup>16</sup>.



**Fot. 2.8. a)** Stała Plancka w symbolu Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu; dokładna znajomość stałej Plancka ma zasadnicze znaczenie dla całej fizyki; **b)** kwanty w życiu codziennym: cukier można kupić w postaci kwantu 1 kg lub, w barze – 5 g.

Z obserwacji, że światło jest wyświecane (emitowane) lub absorbowane w ściśle określonych porcjach, wynikają niezwykle ważne konsekwencje nie tylko dla fizyki, ale

<sup>15</sup> Z kolei sam A. Einstein nie wierzył w możliwość obserwacji *atomów*, rzecz elementarną dzięki nowym osiągnięciom fizyki (np. [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy\\_archiwum/z\\_omegi/high\\_performance\\_stm\\_1\\_300.jpg](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/high_performance_stm_1_300.jpg))

<sup>16</sup> Rzeczywiście, jeszcze pod koniec XIX wieku cukier był rozprowadzany nie w kilogramowych torebkach, ale w postaci wielkich bloków, tzw. głów cukru. Ważyły one nawet 5 kilogramów.

nawet dla tak prostych zjawisk, jak kolory otaczających nas przedmiotów i zjawisk. Na fot. 2.9 przedstawiamy wazę z berlińskiego straganu ze starociami. Jest ona czerwona oglądana w świetle przechodzącym, ale niebieskawa po bokach. Te dziwne kombinacje kolorów wynikają z obecności bardzo małych (rzędu kilkuset atomów) skupisk złota w szkłe. Te skupiska atomów absorbują światło w szerokim zakresie kolorów ale odsyłają (emitują) światło o ściśle określonej energii – światło niebieskie. Przez cały nasz podręcznik zagadnienia porcji (kwantów) energii będą się przewijały.



**Fot 2.9.** Waza według tajnej recepty z Berlina z XVIII wieku na produkcję szkła rubinowego; waza jest czerwona w świetle przechodzącym ale z niebieskimi odcieniami po bokach; jest to przykład zjawisk kwantowych w absorpcji i emisji światła (eksponat GK)

Pytania:

1. Wyjaśnij, na czym polegała hipoteza Plancka i w jakim celu ją poczynił?
2. Podaj zależność długości fali od jej częstotliwości
3. Podaj wzór na energię kwantów światła.
4. Ile wynosi prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych (Maxwella) w próżni.

### 2.3. Efekt fotoelektryczny i dwoista natura światła

Albert Einstein odkrył teorię względności (słynne równanie  $E = m \cdot c^2$ ), ale nagrodę Nobla otrzymał za wspomniany w poprzednim paragrafie efekt fotoelektryczny. Na czym on polega i jakie ma znaczenie?

Ogólnie efekt ten polega na wybiciu elektronu z atomu, przez padający kwant światła. Efekt ten został zaobserwowany na samym początku XX wieku<sup>17</sup>: światło padające na płytkę z cynku wybijało z niej elektrony i powodowało przepływ prądu<sup>18</sup>. Trudne do zrozumienia było to, że energia wybitych elektronów nie zależała od natężenia światła a jedynie od jego *koloru*. Na fot. 2.11. przedstawiono współczesną wersję tego doświadczenia z Muzeum Nauki w Monachium<sup>19</sup>. „To jakby w porcie kołysał się delikatnie na łagodnej fali rząd statków. Nagle, niespodziewanie jeden ze statków jest wyrzucany na kilkanaście metrów w górę, a pozostałe kołyszą się, jak gdyby nigdy nic” – określił to jeden z fizyków w XX wieku.

Analogia z jachtami nie jest zbyt dokładna – elektrony zostają wybite z atomu, jeżeli długość fali jest *mniejsza* niż ściśle określona wartość (czyli energia fotonów jest dostatecznie duża, zgodnie ze wzorem 2.8) Zadziwiające pozostaje jednak, że zwiększanie natężenia

<sup>17</sup> Odkrywcą efektu fotoelektrycznego, w 1902 roku był niemiecki fizyk, Philipp Lenard.

<sup>18</sup> Płytkę cynkową znajdowała się w szklanej bańce, w której wytworzono próżnię.

<sup>19</sup> Muzeum nauki w Monachium <http://www.deutsches-museum.de/>