

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

369 (LXIV) indeks 35810X Nr 4 lipiec/sierpień 2020 CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

Kula plazmowa

Tajemnice eksperymentów

Bania Herona

Pierwowzór silników cieplnych

Loty kosmiczne

- jak opisać ruch rakiety?

Charles-Augustin de Coulomb

i jego prawo

Sztuczna grawitacja

w układzie obracającym się

Ziemia planeta wyjątkowa

- **LADY**

Hydrogen

H₂

H₂
POWERED BY
HYDROGEN

Wodór
- paliwo przyszłości?

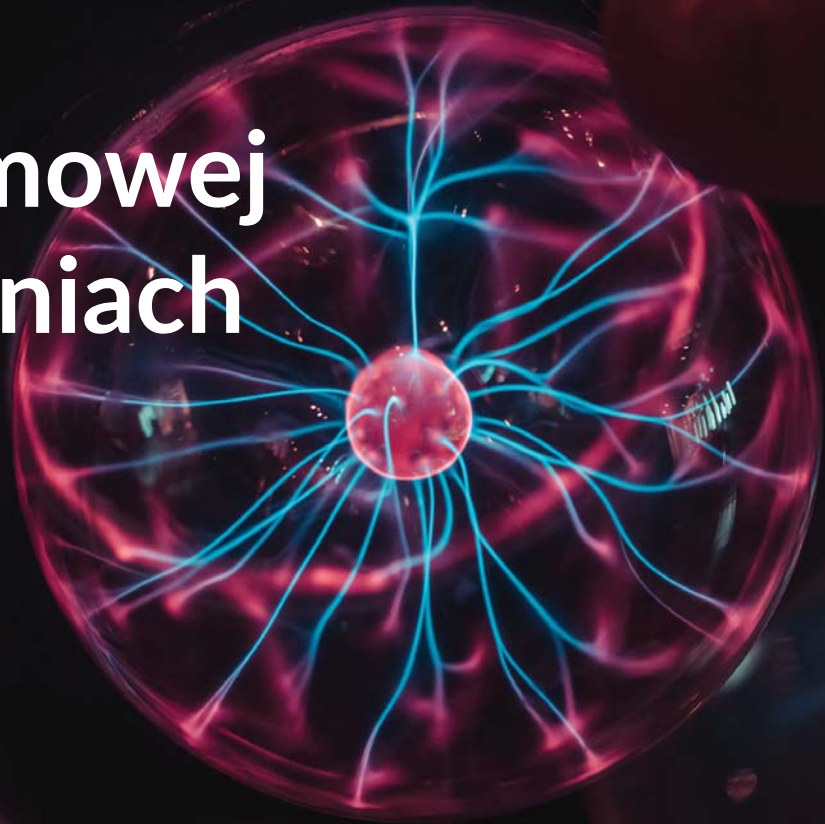
ISSN 0426-3383



9 770426 338001

08

O kuli plazmowej i wyładowaniach w gazach



Grzegorz Karwasz, Andrzej Karbowski, Krzysztof Wejer

Kula plazmowa od 20 lat pojawia się na stronach internetowych [1] i okładkach czasopism. Cóż jest więc w niej jeszcze do opisanego? Tak naprawdę to nie wiemy, jaki gaz jest w środku, dlaczego przepływa prąd między dwoma szklanymi ściankami i dlaczego pojawiają się takie kolory a nie inne. Z kulą plazmową można zrobić 10 ciekawych doświadczeń i jedno nierozsądne. Jakże?

Dziesięć doświadczeń

Doświadczeniem najbardziej lubianym przez wszystkich jest wodzenie palcem po kuli i obserwowanie, jak języki „ognia” podążają za palcem. Opiszemy to doświadczenie na końcu.

Pierwsze pytanie, to jakie napięcie panuje na lampie. Jak to szybko oszacować? Wiemy, że do zasilania świetłówki jest potrzebne 220 V. „Sprawdzimy, czy gdy

dotknę kuli jednym końcem świetłówki a drugi będę trzymał w ręce, świetłówka się zapali?” (Tak dokładnie mówimy, przygotowując „kategorię pojęciową” w myśl teorii poznania Immanuela Kanta). „Rzeczywiście, lampa zapala się! I nawet nie muszę nią dotykać kuli, czyli napięcie 220 V panuje już w pewnej odległości od niej!”

Ale nie jest to zwykły przepływ prądu – to raczej fala elektromagnetyczna podróżująca wzdłuż rury jarzeniowej. Można zapalać i gasić jarzeniówkę, przesuwając rękę wzdłuż rury (foto 1b). Fala taka jest ekranowana przez folię aluminiową do kanapek (1c) a przechodzi przez kartkę papieru (dielektryk, foto 1d).

Pole elektromagnetyczne emitowane przez kulę zapala również lampę energooszczędną (tam też jest rurka z gazem, fot. 2a), małą neonówkę, (fot. 2b), diodę półprzewodnikową, laboratoryjną rurkę Plücker’a, a nawet drugą kulę plazmową, odłączoną od sieci (fot. 2c). W laboratoryjnej rurce do obserwacji promieni katodo-



Foto 1. (a) Świetłówka (wymagająca zasilania z sieci elektrycznej) zapala się nawet nie dotykając kuli: „napięcie” na zewnątrz kuli to co najmniej 220 V (b) Wzdłuż świetłówki propaguje fala elektro-magnetyczna o dużej mocy – to ona zapala świetłówkę. (c) Falę można „ekranować” za pomocą cienkiej folii aluminiowej. (d) Przez kartkę papieru fala przenika bez przeszkód. Foto AK, ręka GK.

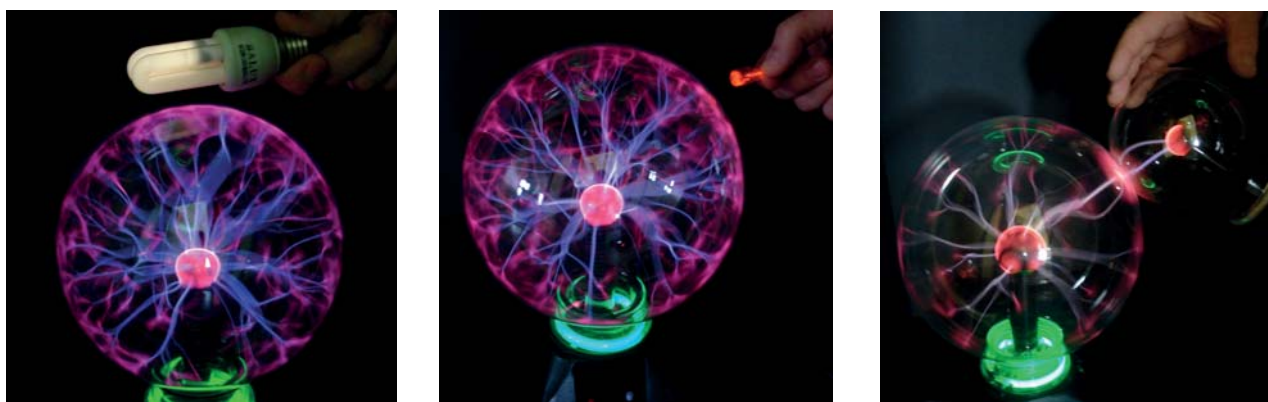


Foto 2. (a) Lampa energooszczędna zapala się w pobliżu lampy plazmowej: należy trzymać rękę za metalową końcówkę (prąd przepływa wówczas przez nasze ciało). (b) Podobnie zapala się mała lampka neonowa. (c) Zapalenie drugiej kuli plazmowej jest trudniejsze – trzeba najpierw położyć rękę blisko kuli zasilanej; po zapaleniu się wyładowania w drugiej kuli, można nieco odsunąć rękę: nawet wewnętrzna sfera się „zarzy”. Zielona obręcz na dole to rurka z gazem, pokryta w środku warstwą „fosforu”: ładunki elektryczne (elektrony i jony) i fotony promieniowania nadfioletowego powodują jego „fosforescencję”. Podobnie działa żółta jarzeniówka z fot. 1. Ręka GK, foto AK.

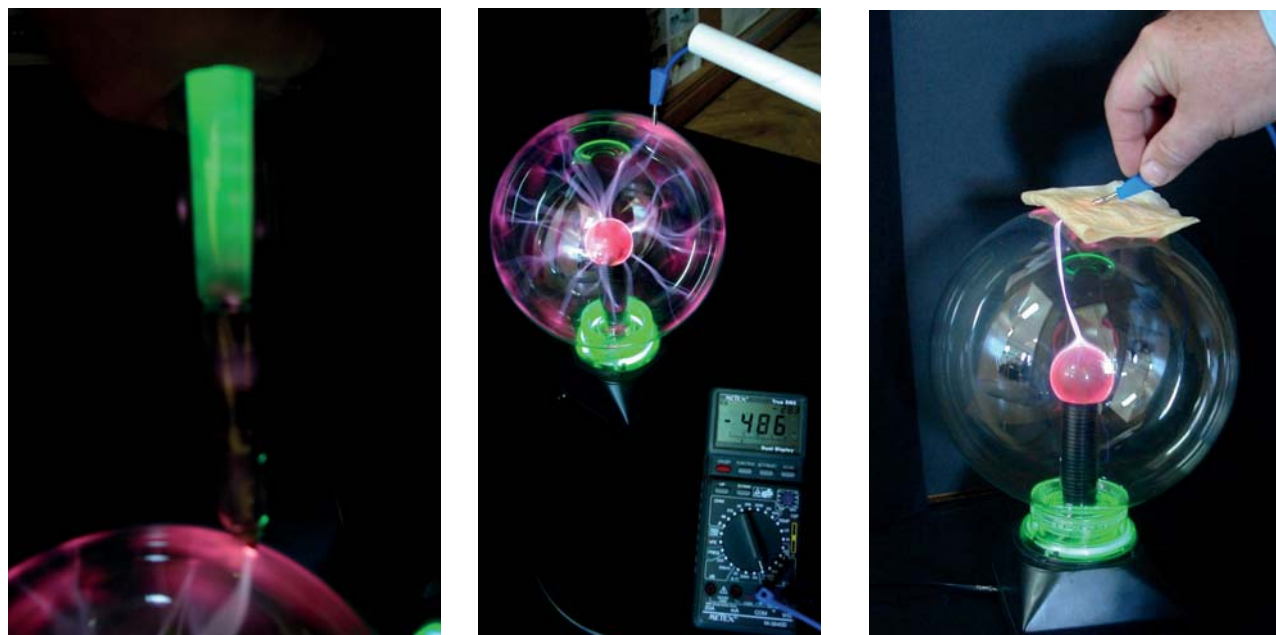
wych, która zawiera resztkowy gaz pod bardzo niskim ciśnieniem, również rozwija się wyładowanie (tzw. ciemne) a powstałe elektrony powodują zieloną fosforescencję wewnętrznego ekranu, fot. 3a.

Spróbujmy *zmierzyć* napięcie na zewnątrz kuli plazmowej. W mierniku napięcia (AC) uziemiajemy jeden przewód a koniec drugiego zbliżamy do kuli (nie musimy jej dotykać). Nawet dość tani miernik pokaże przy powierzchni kuli napięcie ponad 100 V. Miernik dobrej jakości (tzn. o dużym oporze wewnętrznym) pokaże napięcie kilkuset woltów (!), fot. 3b. Prądy indukowane przez pole elektromagnetyczne na zewnątrz kuli są niewielkie, ale napięcia naprawdę niebezpieczne! Pomiaru trzeba dokonać za pomocą plastikowego wysięgnika, bo obecność przewodzącej prąd ręki zmienia konfigurację pola.

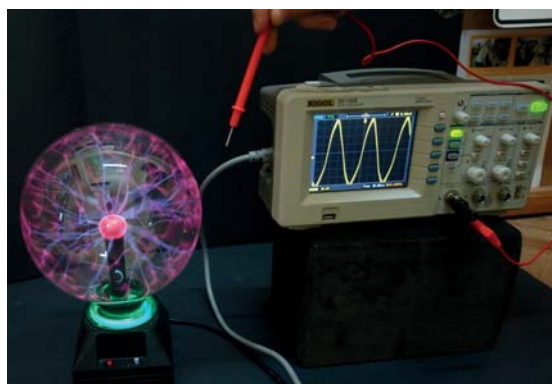
Skoro już zmierzaliśmy napięcie w pobliżu kuli, możemy pokazać, że im dalej, tym jest ono mniejsze – tak jak

to przewiduje prawo Coulomba dla ładunku punktowego. W tym przypadku dokonujemy pewnego uproszczenia – pole wytwarzane przez kulę nie jest elektrostatyczne, ale elektromagnetyczne, zmienne. Możemy to pokazać za pomocą oscyloskopu, fot. 4a. Sygnał mierzony przez sondę umieszczoną w pobliżu kuli jest prawie idealnie sinusoidalny, a jego częstotliwość to 22 kHz. Wyjaśniło się, dlaczego kula, mimo że wytwarza spore napięcie, wydaje się nieszkodliwa: prądy wysokiej częstotliwości nie są tak śmiertelne jak 50 Hz (dokładnych danych jednak brak). Ale dla osób z rozrusznikiem serca dotknięcie ręką kuli może się okazać śmiertelne (nie będziemy próbować, zob. też [2]).

Wracając do prawa Coulomba – przewiduje ono zależność natężenia E pola elektrycznego od odległości r jak $1/r^2$ (a dla potencjału V jak $1/r$). Ale pole wytwarzane przez generator kuli jest zmienne: natężenie zmiennego

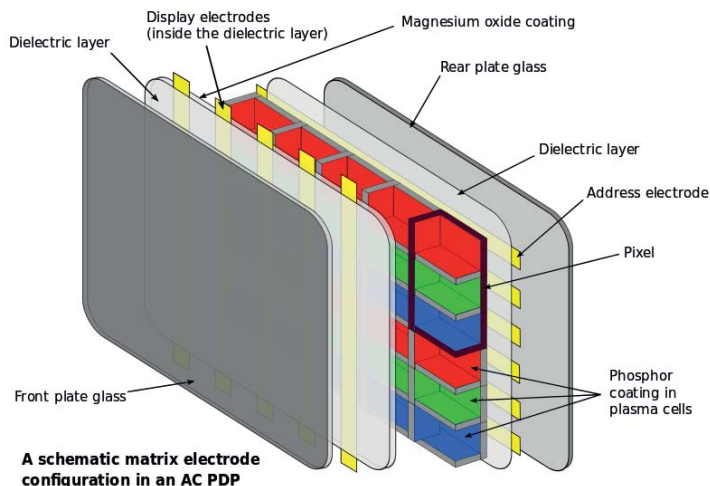


Fot. 3. Kolejne doświadczenia z kulą plazmową. (a) Laboratoryjna rurka do obserwacji promieni katodowych „zapala się” w pobliżu kuli: gaz pod niskim ciśnieniem ulega jonizacji i powstałe elektrony „rozżarzają” warstwę fosforującą. (b) Pomiar „efektywnego” napięcia (tu 486 V), jakie odczuwałaby nasza ręka umieszczona w miejscu niebieskiej elektrody (kabel do miernika poprowadzony w plastikowej rurce). (c) Dowód, że prądy w kuli są znaczne: mokra, tzn. przewodząca prąd elektryczny szmatka i uziemiona elektroda powodują zebranie wszystkich sznurów plazmowych w jeden – iskrzy między elektrodą i szmatką. Zamiast szmatki można położyć na kuli monetę: między monetą a zaostrowym końcem uziemionej elektrody pojawia się łuk elektryczny, jak w spawarce.



Fot. 4. (a) Pomiar przebiegu zmiennego pola elektromagnetycznego na zewnątrz kuli: jest to pole prawie dokładnie sinusoidalne o częstotliwości 22 kHz. (b) Konstrukcja kuli plazmowej jest „odpadem produkcyjnym” z projektu monitorów plazmowych. Podobnie jak w kuli, w monitorze wyładowanie elektryczne zachodzi między dwoma szklanymi szybami (w monitorze dodatkowo pokrytymi tlenkiem magnezu, dla zwiększenia emisji elektronów z powierzchni).

By Jari Laamanen – Own work, [FAL, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1829066](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1829066)



A schematic matrix electrode configuration in an AC PDP

pola elektrycznego zmienia się jak $1/r$, podobnie zmienia się natężenie pola magnetycznego, a ich kwadrat, czyli moc fali zmienia się jak $1/r^2$ (tak jak moc światła emitowanego przez żarówkę lub Słońce). To co mierzymy, mając na uwadze, że wprowadzenie przewodnika mocna zaburza rozkład pola, to jakiś efektywny prąd generowany w sondzie, który „z grubsza” oddaje natężenie pola, czyli stopień zagrożenia.

Na wykładzie uniwersyteckim (a to zagadnienie jest również w programie włoskiego, pięcioletniego liceum) kulę plazmową wykorzystujemy do pokazania prawa Gaussa. Rysunki podręcznikowe prawa Gaussa pokazują linie sił pola elektrycznego, które prostopadle od wewnętrznego ładunku rozchodzą się na zewnątrz: linii ani nie przybywa, ani nie ubywa w miarę oddalania się od centralnego ładunku, tak jak w kuli („mniej więcej”).

Analogia z prawem Gaussa pozwala nam ocenić, jakie „skuteczne” napięcie panuje na wewnętrznej szklanej bańce – tej, która jest otoczona czerwoną warstwą plazmy. Jeśli na zewnątrz (promień kuli 20 cm) mierzymy napięcie 1 kV, to na wewnętrznej kuli (promień 2 cm) zmierzylibyśmy 10 kV. O takim napięciu piszą konstruktorzy kul. To jest naprawdę niebezpieczne urządzenie!

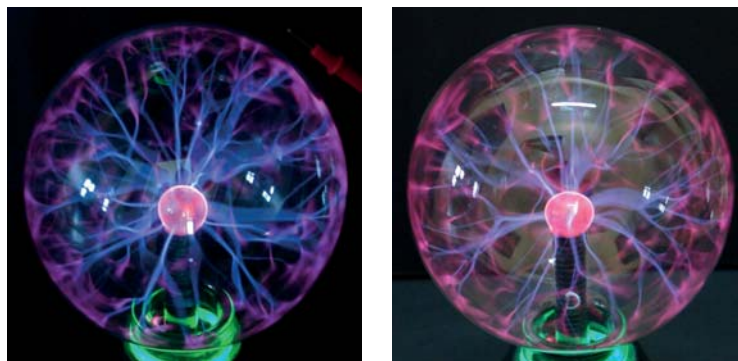
I sama kula i jej zasilacz są niejako „odpadami produkcyjnymi” z konstrukcji monitorów (i telewizorów) plazmowych. W monitorach wyładowanie zachodzi między dwoma szklanymi płaszczyznami. Z tego powodu musi to być wyładowanie o dość wysokiej częstotliwości – szkło nie przewodzi prądu stałego. Układ dwóch płaszczyzn przewodzących elektrod (ta przednia może być wykonana z przewodzącego, ale przezroczystego tlenku indy i cyny, tzw. ITO) przypomina kondensator płaski. A ładowanie się i rozładowanie kondensatora możemy, dydaktycznie, przyrównać do przepływu zmiennego prądu (w rzeczywistości jest to, jak mówi czwarte prawo Maxwella, zmienne pole elektryczne). Dodatkowo, na rys. 4b są pokazane piksele „fosforów” dla trzech (czasem czterech jak w TV Sharp) kolorów podstawowych. Piksele zapalają się pod wpływem promieniowania ultrafioletowego emitowanego przez plazmę, w szczególności przez jeden jej składnik – ksenon.

Kolory lampy

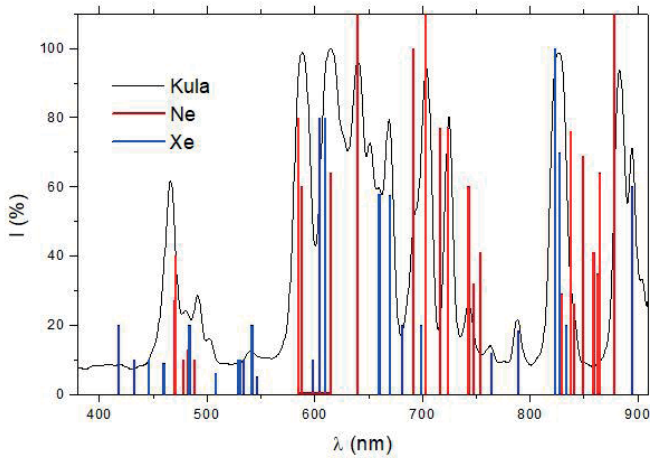
Zanim odpowiemy, skąd się biorą kolory plazmy, musimy wyjaśnić, dlaczego wyładowanie elektryczne w kuli ma formę „jęzorów” a w zasadzie włókien. Wynika to z ciśnienia gazu w kuli: mniejszego niż atmosferycznego (w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym wyładowanie ma formę iskry), a wyższego niż w rurze jarzeniowej (foto. 1), gdzie wyładowanie zajmuje całą szerokość rury. I tak ciśnienie gazów (najczęściej mieszanina neonu i ksenonu lub neonu i argonu) w kuli plazmowej wynosi około 1/10 ciśnienia atmosferycznego – ani dużo, ani mało.

Kolory kul plazmowych są najróżniejsze – nawet dwie pochodzące od tego samego dostawcy różnią się. Dodatkowo, kolory wokół środkowej kuli, „jęzora” plazmy i jego rozczapierzonego końca przy zewnętrznej kuli są różne. Badania widma za pomocą spektrometru optycznego (zachodzącego również na część UV i IR) są trudne, bo plazma w kuli nie ma stałego położenia. Zasadniczo obserwujemy, ryc. 5, obecność w widmie wszystkich kolorów, za wyjątkiem fioletowego i zielonego. Złożenie niebieskiego i czerwonego daje wrażenie różowego.

Czy na podstawie obserwacji widma jesteśmy w stanie w jednoznaczny sposób, jaki gaz jest w środku, bez rozbijania bańki, tak jak to zrobili studenci w Kalifornii [3]? Na rys. 6 nanieśliśmy najsilniejsze linie widmowe neonu i ksenonu, z amerykańskiej danych NIST [4]. Uwzględniliśmy zarówno linie emitowane przez atomy Ne i Xe jak i przez ich jony Ne^+ i Xe^+ .



Fot. 5. Dwie lampy, nawet od tego samego dostawcy, mogą się różnić kolorami. Skład gazu w środku jest tajemnicą producenta (a może też jest nieco przypadkowy). Zwracając uwagę różne kolory plazmy w „jęzorach” i przy powierzchni szkła.

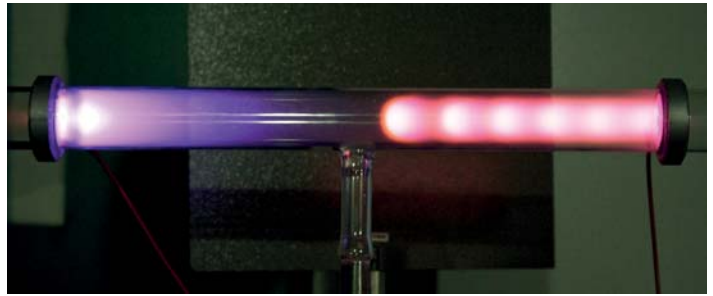


Ryc. 6. Widmo lampy plazmowej z fot. 5b porównane z liniami widma emisyjnego neonu (Ne i Ne⁺) i ksenonu (Xe i Xe⁺) z bazy NIST [4]. Natężenia linii w bazie danych są względne i nie podano, z jakiego rodzaju wyładowania pochodzą. Z tego względu, dla ułatwienia identyfikacji, niektóre natężenia zostały przez nas na tym rysunku arbitralnie „poprawione”. Większość linii emitowanych przez plazmę w kuli daje się przypisać neonowi lub ksenonowi. Linie w plazmie są szerokie, bo ciśnienie gazu jest stosunkowo duże. Pomiar KW i AK, interpretacja GK.

Jak widać z ryc. 6 większość linii udało się przypisać albo neonowi, albo ksenonowi; kwestia natężeń i szerokości linii jest nieco bardziej skomplikowana. Po pierwsze, nie mierzymy dobrze określonego miejsca w wyładowaniu, po drugie linie emisyjne gazu pod ciśnieniem 1/10 atmosferycznego są znacznie poszerzone (zob. dawny artykuł GK o źródłach światła [5]). Po trzecie, baza danych podaje natężenia względne. A po czwarte, nawet dla tego samego gazu, jego świecenie jest zasadniczo różne w różnych strefach wyładowania, fot. 7a. Zbadano to jeszcze w XIX wieku a w Polsce była to kiedyś część wiedzy szkolnej.

Dziś, w dobie Internetu można zagadnienie wyjaśnić dokładniej. Aby prąd przepływał przez gaz, musi on być wcześniej zjonizowany. Nie do końca jest prawdą, jak to kiedyś pisano, że jest on częściowo zjonizowany przez promieniowanie kosmiczne – tak, ale bardzo niewiele. Przyłożenie napięcia do ostrza, jak w maszynie elektrostatycznej [6] powoduje jonizację poprzez silne lokalne pole elektryczne. W lampie jarzeniowej specjalny element, tzw. „zapłonnik” (zewnątrzny układ elektryczny LC) powoduje początkową jonizację. Lampa „energio-oszczędna”, zasilana prądem 50 Hz, też zapala się powoli. Kula plazmowa sama z siebie daje wysokie napięcie, i też zmienne.

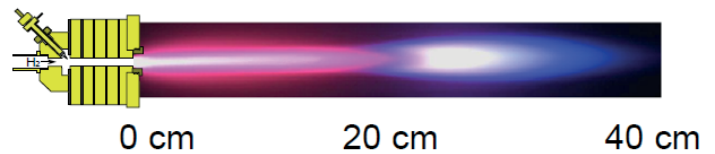
Ale to nie jonizacja jest źródłem światła, ale wzbudzenie elektronowe atomów (i jonów). W wodorze atomowym potencjał jonizacji wynosi 13,6 eV (już kiedyś wyjaśnialiśmy te jednostki), a przejścia elektronowe w zakresie widzialnym (tzw. seria Balmera, czterech kolorów: czerwonego, niebieskawego i dwóch fioletowych) zachodzą przy różnicach energii 2-3,5 eV. Ale seria Balmera to nie są przejścia z wyższych poziomów na poziom podstawowy (główna liczba kwantowa n=1) ale na poziom drugi, n=2, z poziomów n=3, 4, 5, 6. Czyli w wyładowaniu najpierw musi zajść jonizacja, aby były swobodne elektrony, później te elektrony zderzają



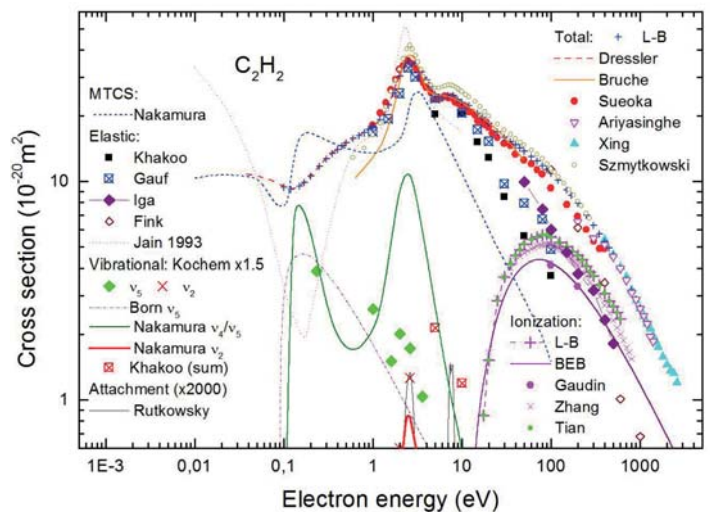
Ryc. 7a. „Podręcznikowe” strefy wyładowania DC w gazie pod niskim ciśnieniem (c.a. 1/100 atmosferycznego). Katoda, czyli elektroda ujemna jest z lewej strony. Niebieska poświata ze strony katody to głównie strefa jonizacji gazu. Dopiero w różowej strefie (tzw. poświacie dodatniej) jest dostatecznie dużo elektronów, aby wzbudzały one różne poziomy elektronowe w atomach. Swobodne elektrony zderzając się tracą nieco energii (na wzbudzenie atomów), później – przyspieszane polem elektrycznym – zyskują, znów tracąc itd.: widać wyraźne strefy. Gaz – przypuszczalnie Ar. Źródło: Wikipedia [7]. [Wikicommons: Chetvorn](#), Jannis Andrija Schnitzer – from Gas discharge. jpg (#/4444189404) on Flickr



Ryc. 7b. Podobne strefy wyładowania widzimy w szkolnej rurce Plücker’a (w tym przypadku hel): w pobliżu elektrod świecenie jest niebieskawe a w długiej, wąskiej rurce służącej do właściwej obserwacji linii widmowych – pomarańczowe. Nie ma asymetrii między dwoma końcami rurki, bo jest to wyładowanie prądu zmiennego. Foto AK i GK.



Ryc. 7c. Jeszcze bardziej wyraźny przykład skomplikowanych procesów w plazmie: wypływ zjonizowanego wodoru: wbrew oczekiwaniom, emisja w pierwszej strefie to tzw. linia Balmera α $n=3 \rightarrow 2$ a dalej to wyższe linie Balmera $n=6,5,4 \rightarrow 2$. Zdjęcia pochodzą z pracy habilitacyjnej w Holandii w 2012 roku [8].



Ryc. 8. Własności plazmy są określone przez tzw. przekroje czynne, czyli prawdopodobieństwa zajścia określonego procesu: 1) zderzenia z elektronem (total), 2) zderzenia elastycznego, 3) jonizacji, 4) wzbudzenia vibracyjnego, 5) wychwytu swobodnego elektronu przez drobinę („attachment”), 6) wzbudzenie elektronowego (brak danych dla C₂H₂). Jak widać, mimo wielu pomiarów, rozbieżności między różnymi wynikami są znaczne a cała wiedza nadal fragmentaryczna. Źródło: GK [13].

się atomami wodoru powodują wzbudzenie elektronów wodoru z poziomu $n=1$ na $n= 2, 3, 4, 5$, itd. Przejścia na $n=2$ dają serię Balmera; przejścia na $n=1$ przypadają w nadfiolecie.

Każdemu wzbudzeniu odpowiada inna energia. Co więcej, prawdopodobieństwo wzbudzenia zależy od energii elektronów. Miarę tego prawdopodobieństwa są tzw. przekroje czynne (bo mierzy się je w jednostkach powierzchni, zob. rys. 8.). Zależności przekrojów czynnych od energii decydują o własnościach plazmy. Zagadnienia są skomplikowane, i jak się to mówi „pracujemy dla was” [13].

Zakończenie

Dość tania i niezawodna kula plazmowa może być cennym nabytkiem w szkolnej pracowni. Może zastąpić drogie i niebezpieczne zasilacze wysokiego napięcia do obserwacji linii widmowych w rurkach Plücker’a. Zabawy ze świetłówkami pokazują, jak po powierzchni plazmy propaguje fala elektromagnetyczna [9]. Pomiar napięcia na zewnątrz ilustruje, poprzez analogię, prawo Coulomba a prostopadłe linie plazmy – prawo Gaussa. Kula działa podobnie jak plazmowy monitor TV – stąd się wzięła [10]. Sznury plazmy to małe pioruny, wędrujące z prędkością 10^6 cm/s [11], a ich rozdawanie się na końcach to skutek oddziaływania dwóch gazów, tzw. jonizacja Penninga [12]. Kolorów plazmy nie potrafimy na razie przewidzieć: na rys. 6 „manewrowaliśmy” natężeniami linii widmowych Ne i Xe. Aby wyjaśnić mechanizmy zachodzące w plazmie, potrzebnych jest mnóstwo danych, a większości z nich (tzn. przekrojów czynnych) jeszcze nie znamy [13].

P.S. Doświadczenia jedenastego, z wodzeniem palcem po lampie nie opiszemy. Wiecie już Państwo – dlaczego? Bo jest ono nierozsądne, by nie powiedzieć dosadniej...

Dr Helenie Nowakowskiej dziękujemy za sprawdzenie rozumowania nt. natężenia pola elektromagnetycznego. Kuli plazmowej dotyczyła praca dyplomowa lic. Krzysztofa Myśliwca. Przypadkowo (autorzy nie znali pracy) amerykański artykuł [14] jest bardzo podobny w treściach: fizyka (i dydaktyka) są uniwersalne.

**Grzegorz Karwasz,
Andrzej Karbowski,
Krzysztof Wejer**

*Instytut Fizyki,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu*

LITERATURA

- [1] G. Karwasz, Kula plazmowa, w: Fizyka Zabawek, PAP Słupsk, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/index-pl.html>
- [2] T. Alanko, L. Puranen, M. Hietanen. Bioelectromagnetics, 32/8 (2011) 644. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21538405>
- [3] M. Campanell, Study of Plasma Globe, http://doeplasma.eecs.umich.edu/files/Web_Campanell_Michael_2013_04_12.pdf
- [4] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team (2019). NIST Atomic Spectra Database. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. <https://physics.nist.gov/asd>
- [5] D. Pliszka, T. Wróblewski, M. Brozis, G.P. Karwasz, „Fizyka w Szkole”, nr 5/2000, 239. <http://153.19.160.11/zabawki/new/files/articles/cd/cd.html>
- [6] M. Sadowska, G. Karwasz, „Fizyka w Szkole”, nr 5/2011, 40. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2011/Maszyna_el_2011.pdf
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Glow_discharge
- [8] W. E. N. van Harskamp, Rozprawa profesorska, Uniwersytet Techniczny w Eindhoven <https://pure.tue.nl/ws/files/3541841/735309.pdf>
- [9] M. Moisan, H. Nowakowska, Plasma Sources Science and Technology, 27 (2018)
- [10] J. Meunier, Ph. Belenguer, J. P. Boeuf, J. Appl. Phys. 78/2 (1995) 731.
- [11] M. D. Campanell, J. N. Laird, T. Provost, S. W. Vasquez, S. J. Zweben, Physics of Plasmas, 17 (2010) 053507.
- [12] M. J. Burin, et al., Physics of Plasmas, 22 (2015) 053509.
- [13] M. Song, J. Yoon, H. Cho, G. Karwasz, V. Kokoouline, Y. Nakamura, J. Tennyson, J. Phys. Chem. Ref. Data, 46 (2017) 013106.
- [14] J. Lincoln, The Physics Teacher, 56 (2018) 62.