

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

360 (LXIV) indeks 35810X Nr 1 styczeń/luty 2019 CENA 27,50 zł (w tym 5% VAT)

Paradoksy szczególnej
teorii względności

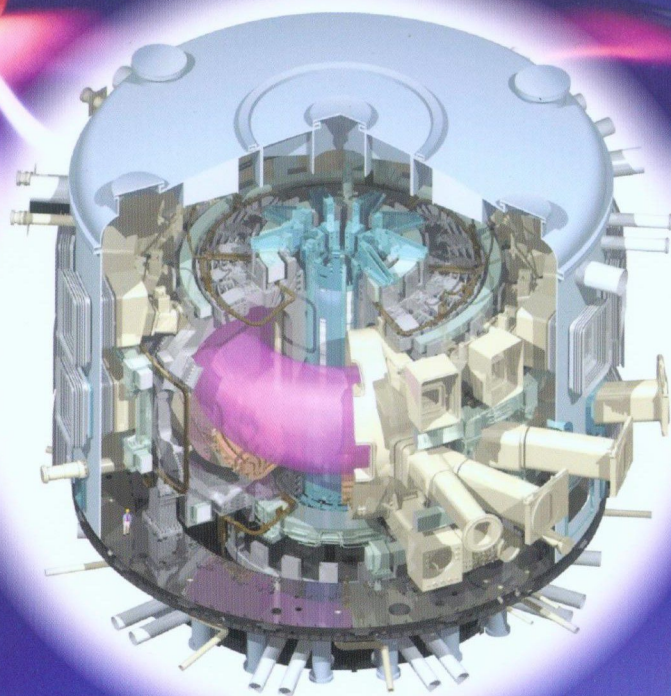
Ile jest stanów skupienia?

Plazma

REWOLUCJA KOPERNIKAŃSKA
OKIEM FIZYKA

WOKÓŁ NEPTUNA
– PLANETOIDY, SEDNOIDY
I DYSK ROZPROSZONY

LEONARDO DA VINCI
CZŁOWIEK RENESANSU,
INŻYNIER RENESANSU



ISSN 0426-3383



9 770426 338902

02

Ile jest stanów skupienia?

Od kuli plazmowej do plazmy termojądrowej

Grzegorz Karwasz

Ile jest stanów skupienia? Podręczniki szkolne odpowiadają, że trzy: ciała stałe mają kształt, ciecze nie mają kształtu a tylko objętość, a gazy starają się zająć objętość jak największą (czyli „rozprężyć”). Ale stanów skupienia, jak to pokazujemy w Toruniu na interaktywnych wykładach dla młodzieży [1] jest więcej: naliczyliśmy ich cztery, może pięć. Nie wiadomo jak zakwalifikować ciekłe kryształy, a jak kondensat Bosego-Einsteina (uporządkowany stan atomów w stanie gazowym [2]).

Kolejne typowe zdanie z podręczników to: „już starożytni Grecy”. Rzeczywiście, w odróżnieniu od Egipcjan czy mieszkańców Malty, Grecy nie budowali gigantycznych obserwatoriów astronomicznych, ale pisali książki. Arystoteles, który w jednym umyśle zawarł miłość do wiedzy (czyli filo-zofię), miał za sobą pięćset lat rozwoju nauki, w jej ogromnej różnorodności, rozsypanej w greckim archipelagu po całym Morzu Śródziemnym. Jego poprzednicy poszukiwali składników materii. Anaksymander (a może Anaksagoras) uważał, że pierwotnym składnikiem jest ziemia (albo woda, nie pamiętam). Arystoteles podsumował te poszukiwania tak we wstępie do *Fizyki* jak i *Metafizyki*. To Empedokles jako pierwszy wyróżnił cztery „elementy”, ale jak pisze Arystoteles (*Metafizyka*, 985b, 1), sam Empedokles uważał ogień za element odmienny od trzech pozostałych. I właśnie „ogniem”, czyli plazmą zajmujemy się w tym artykule.

Lampa jarzeniowa

Plazmą nazywamy „zjonizowany gaz”, gdzie zaraz wszystko wyjaśnimy. Podobno większość Wszechświata to plazma – bo z niej składają się wszystkie gwiazdy świecące na nocnym niebie (gwiazdy neutronowe to już nie plazma).

Gaz w zwykłych warunkach nie przewodzi prądu elektrycznego – gdyby było inaczej, między dwoma otworami gniazodka elektrycznego cały czas byłoby widać „sznurek”

ognia. Ale w lampie jarzeniowej nad głową prąd płynie: niektóre z atomów gazu (jest w takiej lampie głównie argon i pary rtęci) straciły elektrony (zazwyczaj po jednym elektronie) – stały się jonami (o ładunku dodatnim). W ten sposób, zarówno dodatnie jony, jak i uwolnione elektrony mogą przewodzić prąd. W którym kierunku? W rurze nad głową raz w prawo, raz w lewo – 50 razy na sekundę.

Aby zaobserwować, że rzeczywiście muszą najpierw powstać jony, aby popłynął prąd, włączamy lampę jarzeniową na ułamek sekundy – nie zapala się, a jedynie na jej końcu coś się jarzy – to żarnik uruchamiany przez układ zapłonowy (cewkę i przerywnik, tzw. starter). Żarnik wytwarza początkową „paczkę” jonów i elektronów, które są potrzebne do inicjacji wyładowania elektrycznego w całej rurze. Raz zainicjowane wyładowanie podtrzymuje się samo. (Potrzebny oczywiście zewnętrzny układ stabilizujący, ale wystarczy zwykły opornik włączony szeregowo w obwód lampy).

Wyjaśnienia wymagają dwie kwestie: ile jest jonów w gazie i dlaczego, mimo że rura świeci (czyli jest w niej jakby ogień) pozostaje zimna? Jonów w gazie jest niewiele – łatwo to policzyć. Lampa jarzeniowa „konsumuje” niewiele energii – rzędu 20 W. Oznacza to, że przepływa przez nią prąd rzędu 0,1 ampera; w ciągu 1/50 sekundy do elektrod dopływa mniej więcej 10^{16} elektronów (ładunek elektronu to $1,6 \times 10^{-19}$ C). Zakładając dla uproszczenia, że są to wszystkie elektrony, które w ciągu cyklu 1/50 sekundy powstały w rurze, a objętość rury to 1 dm^3 , koncentracja elektronów (i jonów) jest więc rzędu $10^{13}/\text{cm}^3$. Ponieważ ciśnienie w rurze jest rzędu 1/10 ciśnienia atmosferycznego (a przy ciśnieniu atmosferycznym w $22,4 \text{ dm}^3$ jest $6,02 \times 10^{23}$ atomów), w rurze jarzeniowej jeden jon przypada na jakieś 100 tysięcy atomów (oczywiście, uczniowie mogą to policzyć dokładniej bez większych trudności). Taki rodzaj plazmy to w rzeczywistości *slabo zjonizowany gaz*.

Ponieważ i elektronów, i jonów jest niewiele, prawdopodobieństwo zderzeń z atomami gazu też jest niewielkie

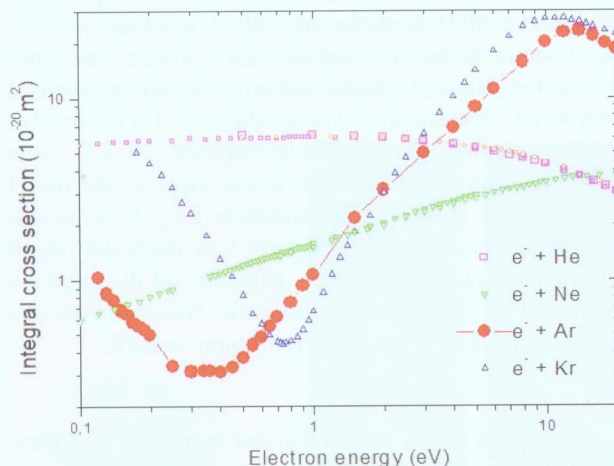
– gaz się nie grzeje. Ale pytanie, jaka jest temperatura tej plazmy, nie jest takie proste. Na rysunku 1 przedstawiam wyniki naszych badań – są to tzw. „przekroje czynne”, czyli prawdopodobieństwa zderzeń elektronów z atomami argonu. Najwyższa krzywa przedstawia *całkowite* prawdopodobieństwo zderzenia, ale nas interesuje krzywa zielona – prawdopodobieństwo, że w zderzeniu powstanie kolejny jon (bo w przeciwnym razie starter musiałby pracować cały czas).

Z wykresu wynika, że aby elektron dokonał jonizacji atomu, np. argonu, jego energia musi wynosić kilkanaście elektronowoltów – dokładniej powyżej 15,7 eV. Wynika z tego, że w rurze jarzeniowej podłączonej do napięcia 220 V jeden elektron może kilkakrotnie dokonać jonizacji.

Fizycy atomowi nie korzystają na co dzień z jednostki energii SI, tj. dżuli. Nie byłaby ona „namacalna”. W procesach atomowych fizycy (szczególnie tzw. doświadczalnicy) korzystają z jednostki eV: jest to energia, jaką nabywa elektron przyspieszony różnicą potencjału 1 V. Jest to jednostka bardzo praktyczna, bo energia niezbędna do oderwania elektronu z atomu wodoru to 13,6 eV. Zresztą, napięcie na baterii telefonu komórkowego, zazwyczaj litowej, to 3,7 V, bo to też proces przekazywania pojedynczych elektronów między elektrodami baterii. Ponieważ ładunek elektronu to $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Plazma niskotemperaturowa

Plazma w lampie jarzeniowej jest nie tylko słabo zjonizowana, ale jest też *niskotemperaturowa*. Aby to ocenić, potrzebujemy zamienić jednostki energii kinetycznej na temperaturę. Można tego dokonać używając stałej Boltzmanna k (albo stałej gazowej $R=8,31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$): ciepło właściwe gazu jednoatomowego przy stałym ciśnieniu wynosi $3/2R$, a więc energia termiczna jednego mola gazu (tak zwana energia wewnętrzna) wynosi $3/2 RT$; energia pojedynczego atomu wynosi $3/2 kT$ (stała Boltzmanna to stała gazowa podzielona przez liczbę Avogadro).



Ryc. 1. Prawdopodobieństwo zachodzenia określonych procesów w plazmie opisujemy za pomocą tzw. przekrojów czynnych: na zderzenia w ogólności, na wzbudzenie poziomów elektronowych (a w konsekwencji świecenie plazmy), na jonizację. Źródło: prace autora.

„Reguła” zamiany temperatury używa iloczynu kT : w jednostkach energii eV, dla temperatury pokojowej 300 K, wynosi on 25 meV.

Jak więc w gazie o temperaturze pokojowej, jaki wypełnia lampę jarzeniową może zachodzić jonizacja? Otóż temperatura gazu i energia kinetyczna elektronów nie są takie same: atomy argonu mają temperaturę 300 K, ale elektrony mają energię kinetyczną wyższą, jakieś 0,35 eV (co odpowiada minimum przekroju czynnego na rys. 1). Ale to za mało, aby dokonać jonizacji! Tak, ale pojęcie temperatury jest pojęciem statystycznym – średnio temperatura elektronów to 4000 K, ale część z tych elektronów, te „najgorętsze” mają energię wystarczającą do dokonania jonizacji atomów argonu.

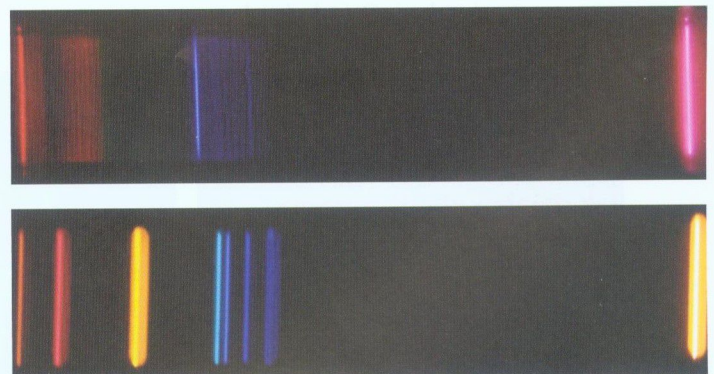
Plazma niskotemperaturowa to nie tylko lampka jarzeniowa, ale też zorza polarna (fot. 2), kula plazmowa czy wyładowania „szkolne”, w rurkach z gazem pod niskim ciśnieniem.

Ciemnia Faradaya, ciemnia Crookesa

Wyładowanie elektryczne w rurze jarzeniowej zachodzi w gazie rozrzedzonym: w tych warunkach dwie temperatury – atomów gazu i elektronów są różne. Temperatura gazu jest pokojowa: plazma, dość rozrzedzona, jest „niskotemperaturowa”. Zderzeń elektronów z atomami



Fot. 2. Zorza polarna jest przykładem plazmy niskotemperaturowej w bardzo rozrzedzonym gazie. Świecą w niej atomy azotu, tlenu i drobiny tlenku azotu (NO). Foto – Adobe Stock



Fot. 3. Nawet tanie okulary dyfrakcyjne pozwalają na analizę kolorów w wyładowaniu elektrycznym (w tzw. rurkach Plückera). Plazma wodorowa (również ta na obrzeżach w reaktorze termojądrowym) jest różowa, plazma helowa – pomarańczowa. W rzeczywistości, jest to wiele linii (w wodrze, nie do końca dysocjowanym, oprócz 4 linii Balmera widać również pasma H₂).



Fot. 4. Aby zapalić lampę jarzeniową, nie trzeba nawet dotykać kuli plazmowej – wystarczy do niej zbliżyć jeden koniec (drugi jest uziemiony ręką wykładowcy). Napięcie na zewnątrz kuli może przekraczać 1 kV.

gazu jest mało, więc dwie temperatury – gazu i elektronów pozostają różne: zapaloną lampę jarzeniową można spokojnie wziąć do ręki.

Dalsze obniżanie ciśnienia gazu prowadzi do coraz słabszego świecenia – widoczne stają się pewne obszary ciemne: zderzeń jest zbyt mało, aby spowodować wzbudzenie atomów gazu. Zresztą, atomy gazu ulegają wzbudzeniu i jonizacji nie tylko w zderzeniach z elektronami, ale również z jonami. Do jakiego poziomu energetycznego zostanie wzbudzony atom, zależy to od energii zderzenia i rodzaju „pocisku”.

Tak więc, zarówno w lampie jarzeniowej, jak w rurkach wyładowczych do demonstracji linii widmowych, występują rejony o świeceniu w innym kolorze lub obszary ciemne. Rurka helowa świeci intensywnie pomarańczowo, ale w okolicy katody plazma ma inny kolor – niebieskawy. Atom helu ma tylko dwa elektrony, ale poziomów energetycznych mnóstwo: linii widzialnych „gołym” okiem jest w zakresie optycznym kilkanaście (foto 3). Jaki jest kolor wyładowania, zależy od energii elektronów i koncentracji elektronów i jonów. Dziś to potrafimy modelować, ale w czasach Faradaya (około 1830 roku) i Crookesa (około 1860 roku) była to zagadka.

Prawie, że prawie potrafimy już zrozumieć, jak działa kula plazmowa. Tylko że w kuli plazmowej nie ma żadnych metalowych elektrod, jak w lampie jarzeniowej czy rurce spektralnej. Otóż kula plazmowa, teoretycznie opatentowana przez Nikołę Teslę jeszcze w XIX wieku, trafiła do sklepów dopiero jakieś 25 lat temu. Przy okazji wyprodukowania nowego rodzaju telewizorów – plazmowych, czyli płaskich, bez „rury katodowej” z tyłu.

Jak działa kula plazmowa

Zdjęcia kuli plazmowej są na stronach co drugiego centrum nauki i prawie w każdym podręczniku fizyki. Wodzenie palcem po szklanej bańce i przyglądanie się językom plazmy jest podobnie fascynujące jak oglądanie rybek w akwarium. Niestety, dużo bardziej niebezpieczne.

Niezwykłość kuli plazmowej polega na tym, że wyładowanie elektryczne zachodzi między dwoma szklanymi bańkami, a szkło, jak wiadomo, nie przewodzi prądu elektrycznego. Ale tak samo działają telewizory plazmo-

we, a także wyświetlacze dzisiejszych smartfonów: prąd przepływa, wydaje się, między dwoma płytkami szkła. W rzeczywistości, pod dolną szklaną płytką wyświetlacza smartfonu jest cienka warstwa metalu a przednia „szybka” jest z wierzchu pokryta przezroczystym a przewodzącym prąd elektryczny tlenkiem indy i cyny (tzw. ITO). Dwie przewodzące warstwy, rozdzielone dwoma szklanymi płytkami (w wyświetlaczach telefonów są to materiały bardziej wytrzymałe niż szkło, ale ciągle kruche) to jakby dwie okładki kondensatora – a przez kondensator prąd „płynie”, tylko że zmienny.

I w kuli plazmowej, i w ekranie telewizora plazmowego, płynący prąd jest to zamienne ładowanie się jednej lub drugiej szklanej powierzchni – dodatnio lub ujemnie. Ale częstotliwość takiej zamiany znaku elektrycznego okładek musi być bardzo szybka – w kuli plazmowej jest to jakieś 20-30 kHz. Rzeczywiście, wewnątrz mniejszej bańki szklanej umieszczona jest cewka dająca zmienne napięcie. Jak duże? Potrzebne jest doświadczenie.

Dlaczego lepiej nie bawić się kulą plazmową?

Najbardziej widowiskowym (a przy tym dydaktycznym) doświadczeniem z kulą plazmową jest zapalanie się lampy jarzeniowej już po zbliżeniu do kuli (wcale nie trzeba jej dotykać, foto 4). Ponieważ jarzeniówka zapala się przy napięciu sieciowym, na zewnętrznej powierzchni kuli panuje napięcie co najmniej 200 V. Z prawa Gaussa (uczniowie włoskich liceów mają je w programie) można oszacować, że wewnątrz kuli musi być to napięcie co najmniej 2 kV. Zresztą, nie jest to napięcie łatwe do pomiaru – dla zapewnienia wyładowania elektrycznego między dwoma szklanymi powierzchniami (tego rodzaju wyładowanie elektryczne nazywamy wyładowaniem z barierą dielektryczną „Dielectric barrier discharge”), nie tylko znak napięcia musi się zmieniać szybko, ale też zbocza tych zmian powinny być prawie pionowe. Można próbować zmierzyć napięcie na zewnątrz kuli, ale potrzeby jest miernik o dużej oporności wewnętrznej (prądy, jakie generowane są przez pole elektryczne na zewnątrz kuli są niewielkie).

Dla sprawdzenia, jak wielkie są napięcia na zewnątrz kuli, jeden z autorów filmów internetowych proponuje położyć małą monetkę na kuli a następnie zbliżyć do monetki palec: przeskakuje iskra, a sam palec jest okopcony. Niezbyt mądra zabawa! Jeżeli w suchym powietrzu przeskakuje iskra o długości 1 cm, między dwoma przewodnikami panuje napięcie 30 kV. Iskra w internetowym doświadczeniu jest krótsza, ale nawet napięcie 1 kV może być śmiertelne, jeśli np. ktoś ma rozrusznik serca. Napięcie wewnątrz kuli dochodzi do 10 kV a dodatkowo są to impulsy napięcia: ot! dlaczego nie polecam kuli plazmowej jako zabawki. Natomiast jest ona nieoceniona do lekcji o czwartym stanie materii.

Kolory kuli plazmowej

Skład gazu w kuli plazmowej jest tajemnicą producenta. Studenci z Kalifornii [3], używając skomplikowanych technik stwierdzili, że jest tam neon z małym dodatkiem ksenonu. Ksenon jest najrzadszym z gazów szlachetnych, jest więc drogi. Po co ksenon w kuli? Otóż, już z roz-

ważać o lampie jarzeniowej wiemy, że jej działanie jest skomplikowane. Lampa jest wypełniona argonem, pod niskim ciśnieniem i w argonie płynie prąd, ale po rozgrzaniu się lampy, świecą w niej pary rtęci (i luminofor na wewnętrznej powierzchni, który zamienia światło nadfioletowe na widzialne). W kuli plazmowej ksenonu jest kilka procent, ale to on głównie świeci, i to jonów ksenonu jest więcej niż jonów neonu (energia jonizacji ksenonu to 12,1 eV a neonu 21,6 eV). Tak przynajmniej sugerują modele [4] stworzone w czasach, kiedy telewizory plazmowe dopiero były projektowane.

A neon? Neon pomaga w jonizacji ksenonu: wzbudzone atomy neonu zderzają się z atomami ksenonu. W tego rodzaju zderzeniu, wzbudzony elektron w atomie neonu wraca do poziomu podstawowego, a jeden elektron w atomie ksenonu zostaje oderwany. Taki proces nazywamy jonizacją Penninga.

Jasne staje się więc, że kolory kul plazmowych, a także wygląd samego wyładowania mogą być różnorodne (a modele fizyczne bardzo skomplikowane, gdyż muszą uwzględniać wiele możliwych procesów). Pokazujemy kilka przykładów na fot. 5.

Iskra, piorun, łuk spawalniczy

Niskotemperaturowe, niskociśnieniowe wyładowanie elektryczne w lampie jarzeniowej to nie jedyny rodzaj plazmy, z jaką mamy do czynienia na co dzień. W kuli plazmowej tworzą się sznury prądu elektrycznego, bo ciśnienie jest większe niż w lampie jarzeniowej – nieco mniejsze tylko od ciśnienia atmosferycznego (i znów zależy to od producenta). Aby płynął prąd w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym, trzeba gaz zjonizować. Spawarka elektryczna to transformator dający napięcie kilkunastu tylko woltów, ale prąd kilkudziesięciu amperów. Spawacz najpierw dotyka elektrodą spawanego elementu, zaczyna płynąć spory prąd, elektroda paruje i wówczas trzeba sprawnie odsunąć elektrodę, na kilka milimetrów, tak aby ustabilizować prąd. Spawacze są najlepiej zarabiającymi pracownikami – niestety, nadfioletowe promieniowanie emitowane przez plazmę niszczy wzrok. A temperatura plazmy to tysiące stopni Celsjusza.

O ile łuk elektryczny jest wyładowaniem o niskim napięciu i dużym prądzie (a temperatura plazmy wystarcza do odparowania metalu), to iskra jest wyładowaniem

zachodzącym przy dużym napięciu (i małym prądzie). Maszyna elektrostatyczna daje piękne iskry, ale pamiętajmy, napięcia na jej elektrodach (czyli też w pobliżu i na kablach) są rzędu setek (!) tysięcy woltów [5]. Powstawanie iskry (i pioruna, który jest gigantyczną iskrą) jest na tyle skomplikowane, że nawet Richard Feynmann poświęcił mu oddzielny wykład.

Od wełny do układu scalonego

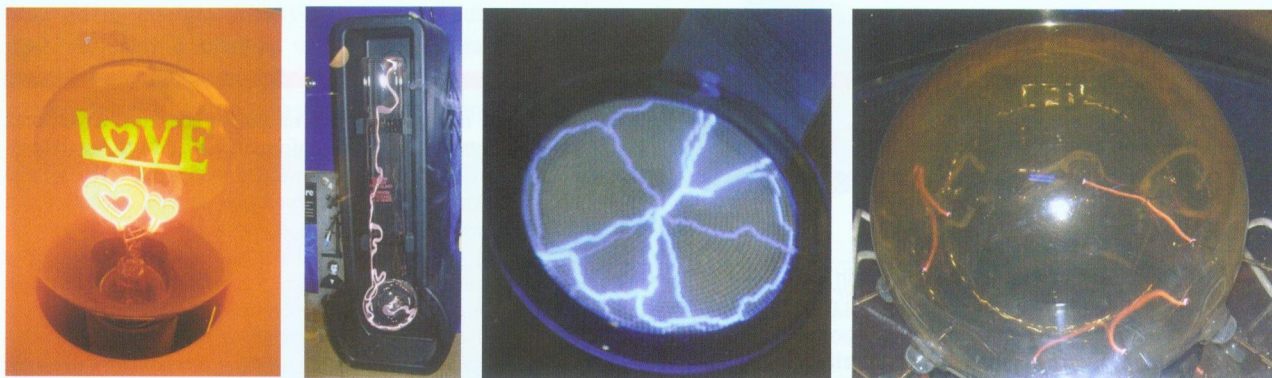
Zastosowań technologii plazmowych jest nieskończenie wiele – od czynienia higroskopijnymi ubrań, poprzez osadzenie tlenków ITO na ekranach telewizorów i smartfonów, do utwardzania wrzecion przedzarek bawełny. „Złote” warstwa na plastikowych elementach to TiN, nakładane są plazmowo. Wszystkie układy scalone muszą przejść kilka etapów plazmowych – od osadzania tlenków do ich trawienia. Każdy proces jest inny, a postęp technologiczny polega na znalezieniu takiego sposobu napyłania, trawienia, domieszkowania, jakiego konkurencja jeszcze nie zna. Kupując nowy, lepszy smartfon pamiętaj, że za nowymi możliwościami stoi praca nie tylko informatyków, ale i fizyków od plazmy.

Słońce w magnetycznym koszyku

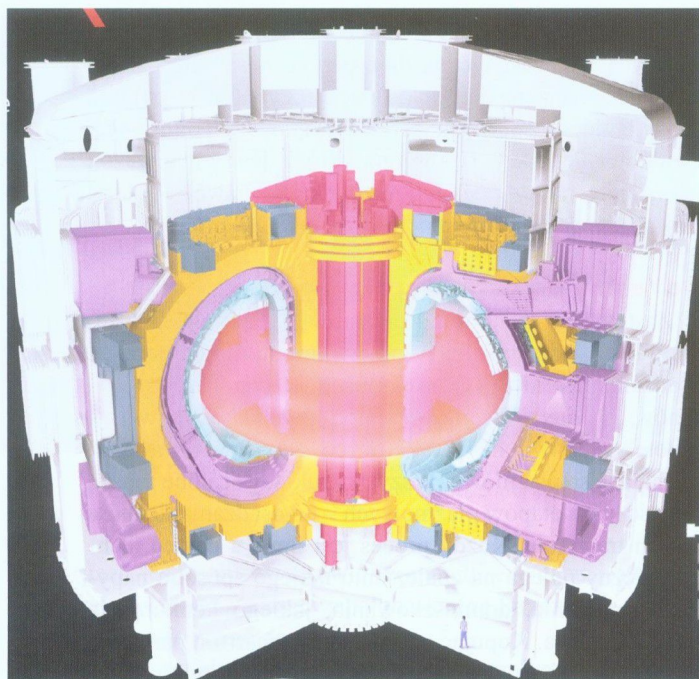
90% widzialnego wszechświata, a może i więcej, to plazma: wszystkie gwiazdy na nieboskłonie to kule gazu rozgrzanego do milionów stopni Celsjusza: wodoru, helu, ale i par węgla i żelaza. Trudno tę plazmę porównywać z lampą jarzeniową, bo nie tylko wszystkie atomy tracą elektrony, ale też tracą ich większość (jeśli nie wszystkie). To badając linie widmowe Słońca sprawdzamy, jakie poziomy energetyczne ma atom (a właściwie jon) żelaza bez dziesięciu lub dwudziestu elektronów.

I temperatury w gwiazdach są ogromne: na powierzchni co prawda jedynie kilka tysięcy stopni (5500°C Słońca, więcej np. niebieskich gigantów), ale wewnątrz Słońca – 15 milionów. Takie energie są potrzebne, aby protony (albo jądra helu) przezwyciężyły odpychanie elektrostatyczne i zbliżyły się na odległości (rzędu 10^{-15} m), gdzie działają ogromne, przyciągające siły jądrowe. Tak mogą powstać jądra węgla, tlenu, siarki – jednym słowem wszystkiego, co jest potrzebna dla życia.

Ale Słońce to nie tylko reaktor jądrowy – przede wszystkim niewyczerpane (na jeszcze 4 miliardy lat)



Fot. 5. Przykłady plazmy z witryn sklepowych w Paryżu: (a) mała żarówka wypełniona neonem pod ciśnieniem atmosferycznym, plazma widoczna w pobliżu włókna żarówki, (b) sznur plazmy (napisano „nie dotykać szkła”) i (c) płaska lampa plazmowa (chyba z domieszką tlenu) w sklepie Science Center La Villette, (d) bańka plazmowa, chyba wypełniona neonem (S.C. La Villette) – widać sznury plazmy. Foto Maria Karwasz



Fot. 6. Pierwszy reaktor termojądrowy, który dostarczy netto 500 MW energii powstaje w Cadarache we Francji, jako wspólny światowy projekt badawczy. Ma wielkość 10-piętrowego budynku, plazma zajmuje 900 m³. Wersja przemysłowa będzie gotowa w 2050 roku. Źródło: ITER.

źródło energii docierającej również do Ziemi. Jak piszę w książce astronomicznej dla dzieci [6], w ciągu sekundy Słońce „spala” tyle wodoru, ile wydobywa się węgla w Polsce przez rok. Warto byłoby mieć podobny reaktor na ziemi. I właśnie nad tym pracujemy [7].

W Cadarache, na południu Francji, powstaje reaktor, który będzie zamieniał wodór (dokładniej jądra „ciężkiego” wodoru, czyli deuteru) w hel. Podobnie jak dzieje się to w Słońcu. Ale we wnętrzu Słońca panuje ogromne ciśnienie – średnia gęstość Słońca, zbudowanego z plazmy, czyli gazu, równa jest gęstości wody. Na ziemi nie ma ogromnego pola grawitacyjnego, aby tak ścisnąć plazmę – temperatura plazmy reaktora termojądrowego musi więc być wyższa – nie 15, ale 150 milionów stopni. Nie ma materiału na zbiornik tak gorącej plazmy. No chyba że użyjemy ogromnego pola magnetycznego, które ściśnie sznur plazmy. Ale i tak na ścianki reaktora potrzebny jest wolfram – dlatego brakuje go na żarówki.

W następnym numerze:

Hemodynamika obliczeniowa gałęzią medycyny przyszłości

Marcin Majka

Wśród najprężniej rozwijających się dziedzin nauk niewątpliwie miejsce w czołówce zajmuje medycyna. Dzięki rozwojowi techniki powstają nowe metody diagnostyczne, sprzęty chirurgiczne ale przede wszystkim lekarstwa i urządzenia umożliwiające lepsze ich poddawanie. Niestety nic z tych rzeczy nie miałyby miejsca gdyby nie współpraca lekarzy z naukowcami – fizykami, chemikami, biologami oraz inżynierami. Od dawna rozwija się mało znana gałąź

Reaktor termojądrowy ma rozmiary 10-cio piętrowego budynku a objętość plazmy, w Cadarache, to 900 m³, rys. 6. Będzie gotowy za kilka lat, a reaktor przemysłowy, dla wytwarzania energii elektrycznej już jest projektowany w Republice Korei: będzie gotowy w 2050 roku.

P.S. Naukowcy pilnie potrzebni

Dlaczego to wszystko o plazmie i tak szczegółowo? Reaktor termojądrowy w Cadarache to największy, wspólny projekt badawczy całego świata, o wartości kilkunastu miliardów euro. Tylko lot na Marsa pochłonie więcej pieniędzy. Ale gra w Cadarache jest warta świeczki: paliwa kopalne – ropa, węgiel, gaz wyczerpują się. Można dyskutować, na ile lat ich starczy, ale na pewno nie na sto. A energie alternatywne też nie zaspokoją wszystkich potrzeb świata. Z dachu domku jednorodzinnego starczy energii fotowoltaicznej tylko na własny użytek (o ile, oczywiście, świeci słońce). A energii termojądrowej, z deuteru w oceanach winno starczyć na trzy tysiące lat. Warto, aby i polscy, młodzi uczeni w tym pasjonującym wyścigu z czasem uczestniczyli!

Grzegorz Karwasz

Zakład Dydaktyki Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Profesor G. Karwasz zajmuje się plazmą zawodowo, badając procesy elementarne, mierząc jej właściwości i proponując modele reaktorów, w tym termojądrowych: we Włoszech, Czechach, Korei, Australii. Artykuł jest poświęcony pamięci prof. Zenona Zakrzewskiego, od którego autor uczył się o plazmie.

LITERATURA

- [1] G. Karwasz i wsp. Cztery i pół stany skupienia, Pokazy interaktywne, Toruń 2017, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/4_i_pol_stany_skupienia/
- [2] G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, Toruński podręcznik do fizyki. I Mechanika. Wyd. Naukowe UMK 2009, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Ksiazki/Porecznik/1.5.pdf>
- [3] [3] M. J. Burin et al., Princeton Plasma Physics Laboratory, On filament structure and propagation within a commercial plasma globe, *Physics of Plasmas* 22, 053509 (2015)
- [4] <https://aip.scitation.org/doi/am-pdf/10.1063/1.4919939>
- [5] J. Meunier, Ph. Belenguer, and J. P. Boeuf, Numerical model of an ac plasma display panel cell in neon-xenon mixtures, *J. Appl. Phys.* 78 (1995) 731
- [6] M. Sadowska, G. Karwasz, Stara, pocziwa maszyna elektrostatyczna, *Fizyka w Szkole*, nr 5/2011, str. 40, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2011/Maszyna_el_2011.pdf
- [7] G. Karwasz, Mały astronom. Przewodnik dla dzieci, Publicat, Poznań, 2016.
- [8] G. Karwasz, Słońce w(magnetycznym) koszyku, *Głos Uczelni*, UMK, 3/2017, str. 24, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2017/GK_Slonce_w_koszyku_2017.pdf

łącząca wiedzę medyczną opartą na pomiarach klinicznych oraz wiedzę i umiejętności fizyków i informatyków. Jest to hemodynamika obliczeniowa, która obecną wiedzę medyczną wykorzystuje do opisu matematycznego oraz fizycznego zjawisk zachodzących w układzie krążenia człowieka. To dzięki hemodynamice obliczeniowej możemy z wyprzedzeniem przewidywać nagłe incydenty sercowo-naczyniowe i co ważniejsze, określać ich konsekwencje. Hemodynamika obliczeniowa oprócz ściśle aplikacyjnego zastosowania w medycynie posiada w sobie ogromny potencjał naukowy, pozwalający odkrywać dotąd nieznane mechanizmy i reakcje zachodzące w układzie krążenia człowieka. Nic dziwnego, że coraz większa liczba naukowców z całego świata zaczyna się interesować łączeniem nauk ścisłych i medycyny.