

## **1. PLAZMA FIZYCZNA W UKŁADACH NIEOŻY- WIONYCH I OŻYWIONYCH – ZARYS PROBLE- MATYKI**

Rozdział ten dotyczy dwu ważnych zakresów badań stanowiących historyczny i rzeczowy kontekst problemu dyskutowanego w niniejszej pracy. Do pierwszego należą badania, które zaowocowały odkryciem plazmy gazowej – nowego stanu materii i jej nadzwyczaj licznych dotychczas nie znanych własności. Co więcej, późniejsze badania wykazały, że stan plazmowy może urzeczywistniać się także w ośrodku, jaki stanowią przewodzące elektronowo ciała stałe. Do drugiego należą badania prowadzone na materiałach pochodzenia biologicznego, które kilku badaczom dały asumpt do wysunięcia hipotezy, że plazma fizyczna może występować także w układach żywych. Niektóre z tych propozycji zostały przedstawione wcześniej niż ukazały się pierwsze prace na temat bioplazmy Włodzimierza Sedlaka i Wiktora M. Iniuszyna.

W drugiej części niniejszego rozdziału uwagę najpierw poświęcono kryteriom opisującym warunki konieczne i wystarczające dla istnienia plazmy fizycznej. Następnie omówiono podstawowe własności plazmy, jej rozpowszechnienie i to zarówno w wymiarze przestrzennym, jak i czasowym. Fakt, że plazma jest najpowszechniejszym stanem materii i może odgrywać istotną rolę w organizmach, daje też podstawę do formułowania tezy, iż plazma jest stanem wspólnym dla Wszechświata i życia.

### **Szkic historii badań**

Problem będący przedmiotem dyskusji w niniejszej pracy powstał na tle dwu nurtów poszukiwań. Pierwszym z nich są prace ściśle przyrodnicze, które doprowadziły do wyodrębnienia i opisanie własności plazmy fizycznej w rozmaitych ośrodkach niebiologicznych; drugi z kolei nurt stanowią rozważania poświęcone „teorii bioplazmy” (w ujęciu W. Sedlaka) lub „konceptji bioplazmy” (w ujęciu W. M. Iniuszyna). Ze względu na szeroki zakres rozbudowania i spopularyzowania tych rozważań, poglądom tym poświęcone zostanie więcej uwagi w następnych dwu rozdziałach. Główny ciąg rozwojowy badań tutaj omówionych stanowią te, które doprowadziły do stwierdzenia, że elektrony

albo dziury lub<sup>1</sup> obydwu te rodzaje nośników ładunku w wielu ciałach stałych są plazmą fizyczną. Ta mocno już ustabilizowana subdyscyplina w obrębie fizyki ciała stałego splata się z nurtem badań biofizycznych, które dają dostateczne podstawy do przekonania, że we wszystkich ważnych strukturach biologicznych występują swobodne elektrony lub dziury. Tak więc do tych struktur odnosiłyby się wszystkie teorie i hipotezy oraz metodyka badań z zakresu elektroniki ciała stałego.

### **1.1. Główne etapy badań nad plazmą fizyczną jako odrębnym stanem materii**

Choć identyfikacja czwartego stanu skupienia materii jest zasługą badaczy pracujących na początku XX stulecia, początków<sup>2</sup> badań nad jego wykryciem można upatrywać w staraniach dwu wybitnych XIX wiecznych eksperymentatorów: Michaela Faradaya i Williama Crookesa [DeKosky 1967]. Pierwszy z nich mówił o czwartym, radiacyjnym stanie materii, który byłby stanem najprostszym, powstającym po utracie charakterystycznych własności stanu stałego, ciekłego i gazowego. Powstawałby on w wyniku doprowadzenia do zmiany stanu gazu proporcjonalnie tak wielkiej, jakiej dokonuje się przy przejściu cieczy w stan gazowy. W pół wieku później drugi z tych badaczy, motywowany przemożną chęcią dokonania fundamentalnego odkrycia, prowadził niezwykle pomysłowe badania eksperymentalne nad skutkami mechanicznymi oddziaływania światła. W celu łatwiejszej obserwacji wspomnianych skutków doprowadzał znajdujące się w szklanych pojemnikach gazy nawet do wysokiego stopnia rozrzedzenia. Zaobserwował przy tym wiele zjawisk, które mogły go doprowadzić do odkrycia elektronu, promieni X, co się jednak nie stało, gdyż jego uwagę pochłaniało najpierw wspomniane wyżej mechaniczne oddziaływanie światła.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> W całej pracy spójnik „lub” używany jest na oznaczenie alternatywy w sensie logicznym, a więc bierze się pod uwagę zachodzenie albo obydwu możliwości jednocześnie, albo jednej z nich. (Aby wyrazić taką sytuację niektórzy autorzy posługują się oznaczeniem (i/lub”).

<sup>2</sup> Linhart (1963 s. 11) skłonny jest nawet rozciągać prehistorię plazmy aż do pradziejów ludzkości. Wtedy bowiem ludzie obserwowali plazmę w postaci: ognia, piorunów i zórz polarnych. Natomiast początek dociekań nad plazmą jako elementem konstytutywnym bytów wiąże z nauką Empedoklesa z Agrigentu, który pierwszy zaczął ogień uważać za czwarty żywioł konstytutywny świata.

<sup>3</sup> Po surowej krytyce z jaką jego wyjaśnienia spotkały się ze strony teoretyków, w tym J. C. Maxwella, zarzucił jednak hipotezę na rzecz zjawisk wywoływanych przez cząstki gazu, które w stanie rozrzedzenia cechują się bardzo wielkimi drogami swobodnego przelotu (DeKosky 1976).

Podczas odczytu w Royal Society w 1878 roku badacz ten<sup>4</sup> stwierdził, iż odkryty przez niego stan „ultragazowy” to w istocie czwarty stan materii. Obowiązuje w nim korpuskularna teoria materii, ale światło nie zawsze porusza się w nim po prostej. Jest on dostępny jedynie od zewnątrz, gdyż istnieje jedynie we wnętrzu naczyń próżniowych [Crookes 1879].

Jak się później okazało, powyższą uwagę należy odnosić do elektronów, o których istnieniu wtedy jeszcze nie wiedziano, niż światła czy też samej plazmy. Po upływie prawie stu lat od sformułowania zacytowanej wyżej wypowiedzi Crookesa o odkryciu świata zupełnie nowych zjawisk trzeba przyznać, iż ocena ta – przynajmniej w odniesieniu do bogactwa obserwowanych zjawisk – okazała się słuszna. Jeśli natomiast wziąć pod uwagę fakt, że występowanie stanu plazmowego nie jest bynajmniej ograniczone do wnętrza rur gazowych – trzeba stwierdzić, że Crookes poważnie chybił w swoich przewidywaniach. Istnieje ona bowiem również w innych układach (w tym też naturalnych). Jej występowanie w przyrodzie jest na tyle powszechne, że mocne racje przemawiają za tym, iż można ją uznać za prątworzywo Wszechświata. Uwagi na ten temat przedstawiono w drugim rozdziale niniejszego opracowania. Nie miał też racji Crookes sądząc, iż zjawisk manifestujących się we wnętrzu rur z rozrzedzonymi gazami nie będzie można badać w skali większej, dopuszczającej badanie jej „od wewnątrz”. Okazało się bowiem, że cała kula ziemską spowita jest w wielowarstwową, mającą skomplikowaną strukturę wewnętrzną otoczkę plazmową: jono- i magnetosferę. Jak dotąd, ten właśnie układ plazmowy jest jednym z najintensywniej badanych, lecz mimo to jest jeszcze zbyt mało poznanych typów naturalnie istniejącej i wytwarzanej plazmy. W stanie plazmowym znajduje się prawie cały Wszechświat – jego obraz uzyskiwany w obserwacjach nieba w zakresie promieniowania elektromagnetycznego o wysokich energiach ( $X$ ,  $\gamma$ ) – to obraz Wszechświata plazmowego [Alfvén 1989]. Na marginesie warto tu zauważyć, że w tym samym roku, w którym Crookes wygłosił swoje uwagi o odkryciu świata nowych zjawisk w rurach próżniowych (1878), B. Stewart zasugerował, iż za dobowe wahania natężenia ziemskiego pola magnetycznego może być odpowiedzialna elektryczna otoczka istniejąca wokół Ziemi [Hellmund 1961].

Warto wspomnieć także o badaniach prowadzonych przez norweskiego badacza K. Birkelanda i jego szkoły, którzy prowadzili badania nad zorzą polarną. Podkreślali oni wielką rolę, jaką w tych zjawiskach (a ogólniej mówiąc w magnetosferze i całym Wszechświecie) odgrywa przepływ prądów elektrycz-

---

<sup>4</sup> Był on także bardzo zaangażowany w badania nad zjawiskami paranormalnymi, szczególnie tymi, jakie dokonywały się przy udziale mediów. Wyniki tych badań oraz ich procedury były przedmiotem bardzo ostrych kontrowersji. Crookes uważał, iż zjawiska te zachodzą dzięki czwartemu stanowi materii. Siebie zaś skłonny był uważać za Newtona w dziedzinie badań nad zjawiskami paranormalnymi [Palferman 1976].

nych w zamykających się tam obwodach.<sup>5</sup> Doprowadziło to do pojawienia się i rozwoju nurtu badań, określanego wcześniej mianem „Elektrodynamiki kosmicznej” [np. Alfvén 1950; Dungey 1958]. Ostatnio zaś – koncepcja Plazmowego Wszechświata, podkreślająca powszechność występowania plazmy i istotne znaczenie, jakie własności tego stanu odgrywają przede wszystkim w dziedzinie astrofizyki, geofizyki oraz kosmologii [Alfvén 1987; Peratt 1986a-c; 1995a, b; 1996; Kanipe 1995].

Właściwe odkrycie stanu plazmowego<sup>6</sup> nastąpiło dopiero przy końcu lat dwudziestych obecnego stulecia [Langmuir 1928; Tonks, Langmuir 1929; Tonks 1931]. I. Langmuir, powołując się na przedstawione wcześniej wyniki obserwacji wskazujących na zachodzenie w zjonizowanym gazie oscylacji<sup>7</sup> o wysokich częstościach i o nieznanym dotąd sposobie ich powstawania, zaproponował dla nich mechanizm. Wykorzystał w tym celu zaproponowaną wcze-

---

<sup>5</sup> „Zgodnie z naszym sposobem patrzenia na materię, każda gwiazda we wszechświecie była by siedliskiem pola aktywności sił elektrycznych o takiej sile, jakiej nikt nie może sobie wyobrazić. Nie mamy [jeszcze] urobionej opinii co do tego, jak są wytwarzane te przypuszczalnie olbrzymie prądy elektryczne o niezwykłym napięciu, ale nie dzieje się to z pewnością zgodnie z zasadami, którymi posługujemy się obecnie na Ziemi w technice. Jednakże można sądzić, że jakaś [gałąź] wiedzy w zakresie przyszłej elektrotechniki niebiosa będzie miała duże praktyczne znaczenie dla naszych inżynierów elektryków. Wniosek, że cała przestrzeń wypełniona jest elektronami i lotnymi jonami elektrycznymi wszelkich typów, z naszego punktu widzenia, wydaje się naturalny. Przyjęliśmy, że każdy układ gwiazdny wykonując ewolucje wyrzuca w przestrzeń cząstki elektryczne. Nie wydaje się zatem rzeczą nierozsądną przyjąć, że większa część materialnych mas wszechświata znajduje się nie w układach słonecznych czy mgławicach, lecz w „pułstaj” przestrzeni” [Birkeland 1908, 1913]. Poglądy tego badacza i jego szkoły przez długi czas nie tylko nie zdobyły sobie większego uznania w świecie nauki, ale były przedmiotem drwin. Nawet ostatnio – z goryczą zauważa szwedzki Noblista – trudno jest przebić się do publikacji w uznawanym czasopiśmie fachowym pracy, którą można by uznawać za należącą do tej szkoły. Alfvén uważa, że poglądy nawet wybitnych geofizyków takich jak S. Chapman są charakterystyczne jeszcze dla ubiegłego wieku, podczas gdy poglądy Birkelanda w pełni zasługują na miano XX-wiecznych [Alfvén 1987].

<sup>6</sup> Z. Celiński [1980 s. 15], podobnie jak niektórzy inni fizycy plazmy, podaje następującą chronologię prehistorii badań nad plazmą: w 1867 r. skonstruowano lampę łukową z elektrodami węglowymi; ok. 1900 – lampę jarzeniową i w 1926 – Pennig stwierdził zachodzenie oscylacji elektrostatycznych w zjonizowanym gazie. Trzeba jednak zauważyć, że taki sposób rekonstrukcji istotnych wydarzeń dla historii badań nad plazmą nie wydaje się właściwy, dlatego że położono tu nacisk na techniczne wykorzystanie własności plazmy, choć w dziedzinie naukowej ten stan skupienia nie był jeszcze znany. Niestosowność tego kryterium ustalania historii tej dziedziny można wykazać poprzez przeniesienie uwagi choćby na zaczątki kultury europejskiej. Mówiąc żartem, wtedy na początku szeregu posługujących się plazmą można by umieścić nawet gromowładnego Zeusa.

<sup>7</sup> Jedną z nazw częstotliwości tych drgań jest „częstotliwość Langmuira”. Okazuje się jednak, że wzór na nią został podany 20 lat wcześniej przez H.A. Lorenza. Spór o przyznanie priorytetu w tym względzie jest jednak bezprzedmiotowy: wzór do jakiego doszedł Langmuir odnosi się do podłużnych drgań elektronów, podczas gdy wzór Lorenza – do poprzecznych [Drummond 1961 s. 2].

śniej przez P. Debye'a i E. Hückela teorię odnoszącą się do ekranowania ładunku w mocnych elektrolitach [Debye, Hückel 1923]. Wykazując, że w zjonizowanym ośrodku składającym się ze zjonizowanego gazu, znajdującego się pod niskim ciśnieniem, mogą naprzemiennie występować obszary zagęszczeń i rozrzedzeń ładunków elektrycznych, zaproponował, żeby pewien znajdujący się w dostatecznej odległości od elektrod obszar wyładowania elektrycznego w rurze próżniowej określać mianem „plazmy”. Ujął to w następujący sposób:

Wydaje się, że te oscylacje należy uznać za elektryczne fale sprężania w pewnym sensie analogiczne do fal dźwiękowych. Wyłączywszy obszar w pobliżu elektrod, gdzie występują warstewki zawierające bardzo niewiele elektronów, zjonizowany gaz zawiera jony i elektrony w prawie równej liczbie, wskutek czego wypadkowy ładunek przestrzenny jest bardzo mały. Nazwę <<plazma>><sup>8</sup> używać będziemy do opisu tego obszaru zawierającego zrównoważoną liczbę ładunku jonów i elektronów. [Langmuir 1928].

Już od początku tego stulecia astrofizycy mieli świadomość, że dla rozwoju ich dziedziny duże znaczenie mieć musi znajomość fizyki zjonizowanych gazów. Zajmowano się więc tą dziedziną fizyki intensywnie i nic dziwnego, że stwierdza się, iż na „przedatomowym etapie” badań nad plazmą, właśnie ci badacze (M.N. Saha, S. Chapman, V. C. Ferraro, S. Chandrasekhar, L. Spitzer, H. Alfvén oraz Szkoła Astrofizyki przy Instytucie Maxa Plancka wnieśli wkład najbardziej wartościowy [Linhart 1963 s. 12].

Przez cały okres międzywojenny badania nad plazmą fizyczną uchodziły w społeczności fizyków za raczej mało atrakcyjne, głównie ze względu na opinię o ograniczonym zasięgu ich zastosowań w technologii (między innymi lampy jarzeniowe i elektronowe, łuk elektryczny). Podstawowym obszarem zastosowań wiedzy o właściwościach plazmy były badania astrofizyczne. W 1939 roku fizycy plazmy sądzili, że wszystkie problemy w tej dziedzinie zostały już rozwiązane, a jedyną rzeczą, jaka pozostała jeszcze do zrobienia to zwiększanie precyzji pojęć i pomnażanie zbioru danych doświadczalnych. Tak więc w latach trzydziestych tego stulecia badania nad plazmą prowadzili nieliczni entu-

---

<sup>8</sup> πλάσμα – po grecku oznacza pewien twór, coś uorganizowanego. W związku z tym A. L. Peratt [Peratt 1986c] pisze, iż badacz ten ukuł termin 'plazma' zapożyczając go z nauk medycznych, prawdopodobnie z tej przyczyny, że obserwowane w eksperymentach zachowanie się objętości, gdzie występowały równoważące się liczby elektronów i jonów przypominało zachowanie się plazmy komórek. Tonks i Langmuir [1929] stwierdzali bowiem w prowadzonych eksperymentach takie zachowanie się elektronów i dodatnich jonów, do opisu czego można było zastosować model pobudzonego do drgań mechanicznych żelu (a więc stanu uważanego przez ówczesnych biologów za charakterystyczny dla subkomórkowych składników materii żywej).

zkości (liczba ich nie przekraczała setki [Pines 1987], którzy nie zwracali uwagi na to, iż ich dziedzina poszukiwań przestała już być modna [Grycz 1966 s. 8].

W czasie II wojny światowej badania nad plazmą zyskały na popularności w wyniku ich powiązania z pewną wynalezioną techniką separacji izotopów uranu (separacja wymagała wytworzenia stanu plazmowego w gazie) oraz dzięki dostrzeżeniu, że plazmę można wykorzystać do generacji i wzmacniania promieniowania mikrofalowego [Pines 1987].

Na radykalną zmianę nastawienia dużych grup uczonych do fizyki plazmy wpłynęła konstrukcja i użycie pierwszych bomb atomowych. Okazało się bowiem, iż fizyka plazmy jest działem fizyki, który ma istotne powiązania z reakcjami rozszczepienia czy też fuzji jąder atomowych. Jej znajomość odgrywa zasadniczą rolę także we wszelkich badaniach nad doprowadzeniem do kontrolowanej termicznej syntezy jąder. Do dzisiaj fizyka plazmy zawdzięcza właśnie tym dwu praktycznym kierunkom prac większość funduszy na swój rozwój. Pines [1987] ocenia, że w ostatnich latach tym stanem skupienia zajmuje się tyśiące badaczy. W ciągu 50 lat po jasnym sformułowaniu podstawowych pojęć teorii plazmy i uzasadnieniu jej poprawności na podstawie licznych eksperymentów przeprowadzanych najpierw przez Langmuira, Tonksa, a później wielu innych badaczy, wykazano nie tylko fakt wielkiego rozpowszechnienia plazmy we Wszechświecie, lecz także wielką użyteczność teorii plazmy dla rozmaitych działów techniki [Goldstein 1984]. Chemia plazmy (plazmochemia) zajmująca się reakcjami przebiegającymi przy udziale reagentów znajdujących się w stanie plazmy, rozwija się bardzo intensywnie. Jednak nie znalazła ona swojego odpowiednika w postaci dziedziny, którą można by określić mianem plazmobiologii. I. Pollo [1979] wskazuje jednak, że biochemią plazmy można by nazwać badania mające na celu ocenę udziału wyładowań elektrycznych w syntezach związków, które były istotne dla pierwotnych etapów ewolucji chemicznej życia. Ujmowanie tych reakcji jako zachodzących w stanie plazmowym niezwykle poszerzałoby zespół mechanizmów, jakie biorą w nich udział. Jako czynniki istotne dochodzą tu bowiem stany wzbudzone atomów i molekuł, rodniki i jonorodniki, których może być dużo więcej, niż bierze się to pod uwagę rozpatrując reakcje w fazie stałej, ciekłej i na granicach tych faz. Mimo tej interesującej perspektywy, w niniejszym szkicu wątek ten został pominięty, a więcej uwagi poświęcono tym badaniom, które doprowadziły do wykrycia i znacznego rozwoju fizyki plazmy w ciałach stałych, a w dalszej konsekwencji do tezy o plazmie w organizmach żywych.

Choć E. Rudberg [1930] zarejestrował charakterystyczne straty energii strumienia elektronów oddziałującego na cieniutkie blaszki z miedzi, złota i srebra, dopiero R. Kronig i J. Korringa [1943], badając hamowanie elektronów przez folie metalowe, zaczęli tłumaczyć zaobserwowane charakterystyczne straty energii, traktując je jako straty powstające wskutek wzbudzenia drgań plazmy w metalu. Od początku lat pięćdziesiątych D. Bohm, D. Pines oraz P. Nozières



bardzo wiele uwagi poświęcali badaniu zjawisk plazmowych dla pełniejszego zrozumienia własności metali [Bohm, Pines 1951; Bohm, Pines 1953; Pines 1953; Pines 1955; Nozières, Pines 1958; Pines, Schrieffer 1961]. Plazmę w metalach, ze względu na jej olbrzymią koncentrację i konieczność uwzględniania efektów kwantowych w opisie jej właściwości, nazwano „plazmą kwantową” [Pines 1987].<sup>9</sup> W 1951 r. po raz pierwszy pojawiło się w literaturze pojęcie plazmonu [Bohm, Pines 1951], który Pines parę lat później określił następująco:

Jeśli szybko poruszająca się cząstka wzbudza oscylacje kolektywne, to mamy do czynienia z przekazem energii pewnej liczbie elektronów poruszających się kooperatywnie dzięki ich wzajemnym oddziaływaniom, a związane z tym straty energii mają charakter kolektywny. Te oscylacje elektronów walencyjnych bardzo przypominają oscylacje plazmowe obserwowane w wyładowaniu gazowym. Wprowadzamy [tu] termin „plazmon” dla opisanego kwantu elementarnego wzbudzenia związanego z takim wysokoczęstotliwym ruchem kolektywnym [Pines 1956].

Kolejnym krokiem było wykrycie efektów plazmowych w półprzewodnikach. W 1955 r. G. Dresselhaus i wsp. opisali po raz pierwszy plazmowy rezonans w kryształach półprzewodzących. Fale Alfvéna i helikonowe przewidziano w półprzewodnikach w 1960 [Konstantinow, Perel 1960], zaś empiryczne ich potwierdzenie nastąpiło niedługo później [Baynham, Boardman 1971]. W 1958 r. J. L. Iwanow i S. M. Rywkin [1958] zbudowali prosty układ zawierający domieszkowany donorowo kryształ germanu, który w temperaturze pokojowej po przyłożeniu stałego pola elektrycznego generował oscylacje elektryczne o wysokiej częstotliwości. R. D. Larrobee i M. C. Steele w 1960 r. wykazali, że u podstaw takiego zachowania się wspomnianego układu leży oddziaływanie plazmy elektronowo-dziurowej z powierzchnią półprzewodnika [Larrobee, Steele 1960].

Od początku lat sześćdziesiątych następuje szybki rozwój badań nad plazmą w ciałach stałych. Fizyka plazmy gazowej bardzo często służy jako podstawa pojęciowa i metodyczna sugerując nowe kierunki poszukiwań. Prace te rozwijają się też dzięki większej dostępności czystych metali i półprzewodników oraz dostrzeżeniu możliwości zastosowań technicznych własności plazmy ciał stałych [Wiesielago i wsp. 1967]. Felix Gutman i Lawrence E. Lyons [1967 s. 621] w pracy poświęconej półprzewodnikom organicznym, omawiają krótko warunki, jakie muszą być spełnione, by w ciałach stałych mogła istnieć plazma.

---

<sup>9</sup> Jedną z ważnych poznawczych konsekwencji pełnego zawilości rozwoju teorii plazmy w metalach było wyjaśnienie i satysfakcjonujące oszacowanie wartości sił wiążących elektrony w metalach [Tamże].

Podjęciem tego zagadnienia wskazali pośrednio na możliwość występowania plazmy w materiałach organicznych.

Ostatnie dziesięciolecia i lata przyniosły wielki rozkwit badań nad różnymi rodzajami plazmy w ciałach stałych. Główne kierunki tych poszukiwań o potencjalnym znaczeniu dla przyszłych prac w zakresie biofizyki to:<sup>10</sup>

- plazma w ciałach stałych o zredukowanej wymiarowości, czyli w układach dwuwymiarowych [May 1967; Ferrel i wsp. 1985], jednowymiarowych a także w pewnych szczególnych przypadkach takich układów: pojedyncze [Fetter 1973; Alastuey, Jankovici 1981; Quinn 1995] i wielokrotne [Fetter 1974; Jain, Allen 1985] warstwy elektronów tworzących plazmę [Apostol 1975], pojedyncze i wielokrotne „nitki” plazmowe, układy o mieszanych wymiarach, itp. [Caillé i wsp. 1982; Quinn 1995];
- zjawiska plazmowe w cienkich warstwach [Yamaguchi 1962; Emeric, Emeric 1967; Bösenberg 1969], a pośród nich – promieniowanie generowane<sup>11</sup> wskutek oscylacji plazmowych [Raether 1977; Raether 1980; Höpfel i wsp. 1982; Höpfel, Gornik 1984];
- zjawiska plazmowe na pojedynczych powierzchniach granicznych<sup>12</sup> (m. in. tzw. plazmony powierzchniowe<sup>13</sup>) [Ritchie 1957] i na bardziej złożonych układach powierzchni [Equiluz i wsp. 1975; Shmelev i wsp. 1977];
- specjalne typy fal plazmowych na powierzchniach granicznych: plazmowe solitony [Stenflo i wsp. 1983] i plazmonowe polaritony [Dohi i wsp. 1984; Kuwamura i wsp. 1983];
- możliwość nadprzewodnictwa w układach zawierających plazmę [Paszickij 1968; Takada 1978; Mahan, Wu 1989<sup>14</sup>];

---

<sup>10</sup> Notki bibliograficzne przytaczanych prac należy traktować jako tylko „pierwszy punkt styku” ze wzmiankowaną problematyką. Prawie każda z tych prac zawiera odsyłacze do prac pionierskich lub tworzących podstawy danego obszaru badań.

<sup>11</sup> W normalnych warunkach oscylacje plazmowe nie są źródłem promieniowania elektromagnetycznego. Odpowiednie jednak ukształtowanie powierzchni po której odbywają się takie oscylacje, albo fakt, że układ ma niewielkie rozmiary (małe trójwymiarowe skupisko cząstek lub cienka warstwa) doprowadza do emisji promieniowania.

<sup>12</sup> Zjawisko generacji plazmonów powierzchniowych w pokrytej badanym materiałem płycie metalowej i wywoływanie rezonansowego pochłaniania przez nie światła, zostało wykorzystane do konstrukcji nowej klasy biosensorów [np. Schuck 1997].

<sup>13</sup> Jest interesujące, że wprowadzeniu takiego pojęcia – podczas pewnej konferencji, gdzie w zastępstwie Ritchiego wyniki teoretycznych badań były referowane przez jednego z jego współpracowników – stanowczo sprzeciwiał się angielski fizyk-noblista D. Gabor, który empirycznie nie wykrył takich drgań. Okazało się, że układ doświadczalny był skonstruowany według „paradygmatu” poszukiwania tzw. plazmonów objętościowych [Plummer i wsp. 1995 – artykuł ten zawiera szczegółowo omówioną historię badań w tej dziedzinie].



- badanie własności plazmy w układach o rozmaitych kształtach, m. in. w tworach kulistych, cylindrach [Martinou, Economou 1983];
- plazma tworzona w układach zdyspergowanych przez cząstki o rozmiarach nanometrycznych [Kreibig, Zacharias 1970] i mikrometrycznych [Doyle 1960; Kawabata, Kubo 1966] stanowiących fazę rozproszoną koloidów. Oddzielną grupę stanowią tu tzw. kryształy plazmowe cząstek koloidalnych [Morfill, Thomas 1996] lub pyłu w przestrzeni kosmicznej [Northrop 1992] także tworzącego kryształy plazmowe [Thomas i wsp. 1994], czy też kuliste lub dyskoidalne cząstki zawierające plazmę rozproszone w objętości [Doyle 1989] lub na powierzchni stałego dielektryku [Gersten 1982];
- tzw. gorąca plazma w ciałach stałych [Denis, Pożęła 1971; Mahler, Forurikis 1985];
- plazma w zbiorowiskach cząstek silnie sprzężonych elektrostatycznie (tzw. plazma nieidealna [Ichimaru 1982];
- plazma w ośrodkach niejednorodnych i rozmiarowo ograniczonych [Liebhaber, Veilex 1962; Gekker 1978; Nikolov i wsp. 1985];
- plazma w materiałach polimerowych [Bright i wsp. 1975], w tym w tzw. organicznych metalach.

### **1.2.2. Sugestie odnoszące się do powiązania pomiędzy stanem plazmy fizycznej a stanem żywym materii**

Powiązania fizyki plazmy półprzewodników z półprzewodnictwem w obrębie organizmu dokonuje D. A. Frank-Kamieniecki [1961]. Stwierdza on mianowicie, że w biostrukturach możliwe jest występowanie mikroobszarów, gdzie istnieją struktury quasi-periodyczne i związane z takimi strukturami pasma energetyczne. Nośniki ładunku znajdujące się w takich pasmach mogą zatem ulegać wzbudzeniom kolektywnym. Badacz ten szczególnie rolę przypisuje ustrukturyzowanej wodzie i białkom, z którymi jest ona związana. Dzięki występowaniu swobodnych nośników ładunku (elektronów i dziur) we wspomnianym materiale możliwe jest przeprowadzenie rozmaitych eksperymentów, polegających przede wszystkim na wywołaniu skutków biologicznych (zabijanie komórek lub wywoływanie mutacji) przez wykorzystanie odpowiednich pól elektromagnetycznych lub magnetostatycznych. Mechanizmem pośredniczącym w wywołaniu wspomnianych skutków mogły być rozmaite zjawiska plazmowe (między innymi pochłanianie rezonansowe przy częstościach cyklotronowej i plazmowej). Według Franka-Kamienieckiego szczególnie dogodnym materiałem doświadczalnym mogą być kultury bakteryjne, które można

---

<sup>14</sup> Autorzy tej pracy dochodzą do wniosku, że plazmony nie odgrywają istotnej roli w tzw. nadprzewodnikach wysokotemperaturowych.

zamrażać do odpowiednio niskich temperatur, dzięki czemu – z jednej strony – byłaby wykluczona wywołana promieniowaniem termiczna denaturacja białek, z drugiej natomiast – kolektywny ruch nośników ładunku nie ulegałby znaczącym rozproszeniom na drganiach cieplnych sieci atomowej. Czysto fizyczne efekty, w postaci wykrywania maksimów absorpcji, za którą byłyby odpowiedzialne określone typy oscylacji plazmy, Frank-Kamieniecki uznał za trudne do zaobserwowania ze względu na możliwość licznych efektów ubocznych zaciemniających obraz sytuacji.

Podczas zorganizowanej w 1967 r. konferencji, poświęconej związkowi fizyki teoretycznej z biologią teoretyczną, H. Fröhlich, rozpatrując hipotezę o występowaniu koherentnych oscylacji w błonach biologicznych, wziął pod uwagę oscylacje plazmy elektronowej w tych biostrukturach [Fröhlich 1969]. Ten sam badacz, rozpatrując wzbudzenie koherentnych fal polaryzacji w układzie fotosyntetycznym, przyjmuje, że energia, gromadzona w drganiach koherentnych o najniższej częstotliwości, jest absorbowana przy udziale oscylacji plazmowych w aparacie fotosyntetycznym [Fröhlich 1968]. W późniejszych publikacjach autor ten wspomina o oscylacjach plazmowych w biostrukturach, lecz nigdy nie rozwija szerzej tego wątku [np. Fröhlich 1977<sup>15</sup>]. W pracy z 1977 r. bierze on pod uwagę możliwość istnienia plazmy elektronowej w zbiorowiskach biomolekuł, gdzie może zachodzić przewodnictwo elektronowe. Zdaniem tego badacza niezwiązane elektrony mogą występować w wielu typach molekuł ważnych biologicznie, lecz mogą być także wprowadzane do organizmu poprzez substancje o charakterze donorów elektronów i mogą być generowane wskutek jonizującego działania promieniowania ultrafioletowego [Fröhlich 1977].

Podczas III Ogólnopolskiej Konferencji Radiospektroskopii i Elektroniki Kwantowej, która odbyła się w 1968<sup>16</sup> roku w Poznaniu, S. Manczarski wskazał na plazmę elektronową w mitochondriach jako na „receptor”, dzięki któremu dochodzą do skutku nietermiczne oddziaływania fal elektromagnetycznych na organizmy [Manczarski 1969]. Gęstość plazmy w organizmach badacz ten ocenił<sup>17</sup> na zawierającą się w zakresie od  $10^{13}$  do  $10^{25}$  elektronów  $m^{-3}$ . Z kolei w 1980 roku Freeman W.

---

<sup>15</sup> Rozpatrując możliwy mechanizm powstawania komórki nowotworowej, ten wybitny fizyk ciała stałego rozpatruje sytuację, kiedy charakterystyczna dla pewnego zespołu komórek częstotliwość oscylacji własnych zostanie zaburzona przez zmienioną częstotliwość oscylacji plazmowych w jądrze komórkowym, do którego dotarły molekuly o charakterze donorów elektronów, albo cząstki te zostały wygenerowane przez promieniowanie z zakresu ultrafioletu.

<sup>16</sup> Referując historię hipotezy o plazmie w biostrukturach Sedlak prawie zawsze podaje jako rok wystąpienia przez Manczarskiego z tezą o plazmie elektronowej w mitochondriach albo 1968 [S79b s. 252], albo 1969 [S72c s. 123; S77a s. 15; S79d s. 24; S88b s. 134]. Rok wcześniejszy odnosi się zapewne do konferencji w Poznaniu, późniejszy natomiast wskazuje rok publikacji w *Postęпах Fizyki*. Jest ciekawe, że w streszczeniu referatu, wygłoszonego podczas posiedzenia Towarzystwa Naukowego KUL, jako rok tej sugestii Sedlak podaje 1966 [S70c s. 104]. Albo jest to błąd literowy, albo Manczarski rzeczywiście w tym roku przedstawił swoją hipotezę na jakimś spotkaniu, o którym wiedział Sedlak.

Cope rozważał możliwość istnienia w organizmach żywych rozproszonej relatywistycznej plazmy nadprzewodzącej [1980a-c]. Stosunkowo niedawno pojawiła się też bardzo interesująca teoretyczna praca wskazująca na możliwość udziału plazmy elektronowo dziurowej w procesach morfogenezy. Warunkiem tego jest dostarczenie energii<sup>18</sup> do skupisk plazmy w tempie osiągającym przynajmniej pewien określony poziom krytyczny, dzięki czemu dochodzi do inwersji obsadzeń stanów energetycznych. W takich warunkach możliwe jest powstawanie struktur dyssypatywnych w skupiskach plazmy, co – po zajęciu sprzężenia pomiędzy siecią atomową i jonami – może również wymuszać przemiany konformacyjne molekuł [Esperidiao i wsp. 1995].

Szczególną pozycję w historii badań nad powiązaniem stanu plazmowego z procesami życiowymi zajmują prace W. Sedlaka oraz W. M. Iniuszyna i jego współpracowników, których początek sięga drugiej połowy lat 60-tych.<sup>19</sup> Z tego też powodu zostały one omówione oddzielnie i poddane w miarę wyczerpującej analizie (Rozdziały: 2 i 3).

D. Eichler w niedawno opublikowanej pracy na temat możliwego mechanizmu oddziaływania pól elektromagnetycznych na układy żywe wziął pod uwagę zachodzenie oscylacji plazmowych w elektrolitach wewnątrz- i zewnątrzkomórkowych oraz oscylacji plazmowych elektronów w cząsteczkach polimerów. Przyznając, że jego rozważania mają charakter wysoce spekulatywny, częstotliwość tych oscylacji ocenił ich autor na  $10^{15}$ - $10^{16}$  Hz [Eichler 1997].

Odkryte w latach sześćdziesiątych bardzo skuteczne oddziaływanie na organizmy słabego monochromatycznego promieniowania mikrofalowego stało się przyczyną podjęcia poszukiwań mechanizmów, dzięki którym takie oddziaływania mogą zachodzić. Plazmowy mechanizm zachodzenia wspomnianych oddziaływań został zaproponowany w 1978 r. [Zon 1978, 1979b]. Podjęto także problem zaangażowania zmian plazmy fizycznej w biostrukturach w procesy powiązane ze starzeniem się organizmów [Zon 1977]. Pytaniu czy żywą komórkę można traktować jako układ zawierający plazmę fizyczną poświęcono pracę opublikowaną w 1980 roku [Zon 1980a]. Wywnioskowano tam, że warunki do istnienia stanu plazmowe-

---

<sup>17</sup> Taki zakres wartości koncentracji objętościowej plazmy elektronowej w mitochondriach uwzględniono na diagramie zamieszczonym w pracy Bogdańskiego z 1972 r. Diagram ten prawdopodobnie pochodzi z niepublikowanego w całości tekstu referatu wygłoszonego przez Manczarskiego na wspomnianej wyżej konferencji.

<sup>18</sup> Ta interesująca praca, jak też wiele zresztą innych napisanych przez fizyków mających daleko mniejsze rozeznanie w biologii niż we własnej dziedzinie, bierze pod uwagę światło jako czynnik dostarczający energii elektronom. Choć współbrzmia to z mocno eksponowaną przez Sedlaka rolą endogennie generowanego promieniowania w procesach życiowych, wspomniani fizycy nie wskazują na typ procesów, jakie w organizmach żywych miałyby być źródłem tego odpowiednio intensywnego świecenia. Zdając sobie zapewne sprawę z tego braku, w zakończeniu artykułu zastrzegają, że pobudzanie energetyczne może dochodzić do skutku także na innej drodze.

<sup>19</sup> O okolicznościach powstania i burzliwych od początku losach koncepcji bioplazmy można przeczytać np. w pracy S85 s. 180n, 249-265, 269-270, 321.

go spełniane są w mitochondriach (pytania o istnienie plazmy w innych organellach nie podjęto), stwierdzono natomiast, że w elektrolicie cytoplazmatycznym mogłaby istnieć plazma, gdyby przenikalność elektryczna tego ośrodka była bardzo wysoka. Ten ostatni wniosek zgadza się z tym, do jakiego doszedł o wiele wcześniej D. Vasilescu [1973]. Warto też odnotować podjęcie uwieńczonej powodzeniem próby teoretycznego<sup>20</sup> wykazania, że oscylacje plazmowe jonów dokonujące się w bezpośrednim sąsiedztwie błony neuronu mogą być mechanizmem decydującym o ruchu jonów poprzez błony oraz przekazu informacji. Oszacowano bowiem, że dzięki takiemu właśnie mechanizmowi byłby możliwy bardzo wydajny energetycznie przekaz w układzie nerwowym: przekazanie ponad  $10^{15}$  bitów w czasie jednej sekundy wymagałoby nakładu poniżej  $10^{-5}$  J energii. Ponieważ oscylacjom plazmowym jonów w błonie neuronu towarzyszyć powinny także zmiany o charakterze chemicznym, amerykańscy badacze sugerują, że mogą one być czynnikiem istotnym w zapisie pamięci długotrwałej [Triffet, Green 1980]. Niedawno też Owczinnikowa [1996], wysunęła hipotezę, że bezpośrednim receptorem promieniowania mikrofalowego w bioukładach mogłyby być superprotonowe prądy przepływające w błonach biologicznych. Absorpcja promieniowania z tego zakresu następowałaby tam wtedy, jeśli częstość oscylacji plazmowych protonów byłaby mniejsza od częstości oddziałującego pola. Autorka nie podejmuje jednak wątku dyskusji czy protony w błonach spełniają warunki konieczne dla istnienia stanu plazmowego.

M. Wnuk, kontynuując ściśle fizyczne podejście do problemu występowania plazmy w organizmach wykazał, że warunki stanu plazmowego mogą realizować się także w chloroplastach, a nawet w pojedynczym pierścieniu porfirynowym [Wnuk 1981; 1983 s. 249; 1987 s. 195n]. Istnienie plazmy w tych strukturach okazuje się być jednak związane z wymaganiem szczególnie wysokich energii kinetycznych elektronów w chloroplastach jako całości i bardzo niskich mas efektywnych elektronów w pierścieniu porfirynowym. Możliwość istnienia plazmy nadprzewodzącej w pierścieniu porfirynowym podjął także Wnuk [1983 s. 286]. Rys. 1. przedstawia główne nurty rozwoju badań nad plazmą fizyczną uwzględnione w niniejszym przeglądzie historycznym.

Na zakończenie warto zwrócić uwagę na dwie prace teoretyczne, odnoszące się do makromolekuł DNA. Pierwsza z nich przewiduje istnienie plazmonów, powstających na skutek oscylacji elektryczno-mechanicznych liniowych cząsteczek DNA względem przeciwjonów znajdujących się w roztworze o charakterze elektrolitu [Van Zandt, Saxena 1988]; druga – wskazuje zakresy częstotliwości promieniowania, które mogą wzbudzać rezonanse plazmowe wspomnianych molekuł [Van Zandt, Saxena 1989]. Autorzy wspomnianych badań nie próbują jednak czynić jakichkolwiek nawiązań do sytuacji charakterystycznej dla biosystemów. Trzeba

---

<sup>20</sup> Najpierw wykazano tę możliwość posługując się zależnościami fizyki elektrolitów i fizyki plazmy, później przetestowano ją przy użyciu programu komputerowego, który zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi generował podobne przebiegi zmian elektrycznych, jakie stwierdzono w neuronie badanego zwierzęcia (pijawka).

przyznać, że jest ona bardzo odległa od tej, jakiej dotyczą przedstawione w artykułach obliczenia.

Możliwość pochłaniania promieniowania mikrofalowego przez plazmony wzbudzone w błonach biologicznych wskazał z kolei rosyjski badacz O. I. Fisun

T: W mocnych elektrolitach zachodzi ekranowanie elektrostatyczne nadwyżkowego ładunku (P. Debye, E. Hückel, 1923)	WE: W rozrzedzonych i zjonizowanych gazach zachodzą oscylacje o bardzo wysokich częstotliwościach (A. P. Ditmer, 1926)	
T: Wysokoczęstotliwościowe oscylacje w zjonizowanym gazie świadczą o istnieniu plazmy (I. Langmuir, 1928)	T: Elektrony w krystalicznych ciałach stałych zachowują się zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej (F. Bloch 1928)	
T: Energetyczną strukturę ciał stałych można opisać przy pomocy mechaniki kwantowej (A. Wilson, 1931a, b)	T: W gazie elektronowym metali możliwe jest występowanie podłużnych fal sprężystych (F. Bloch 1934)	WE: Straty energii elektronów padających na powierzchnię metalu są skwantowane (E. Rudberg, 1936)
H: Przepływ energii oraz ładunku w biostrukturach dokonuje się poprzez pasma energetyczne (A. Szent-Györgyi 1941a, b)	WE: W półprzewodniku zachodzi rezonans przy częstotliwości plazmowej (Dresselhaus i wsp. 1955)	T: <i>Drgania plazmy elektronowej w metalach są skwantowane (plazmon)</i> (D. Pines 1956)
<i>WE/H: W biomaterialach i biosturkturach może zachodzić przenoszenie ładunku na zasadzie elektronowego półprzewodnictwa (m. in. D. Eley, B. Rosenberg -1950'/1970')*</i>	H: Dzięki przewodnictwu elektronowemu, mogą manifestować się także zjawiska plazmowe w biostrukturach (D.A. Frank-Kamieniecki, 1961)	
H: W półprzewodnikach organicznych może występować plazma (F. Gutman, E. Lyons, 1967)	H: <i>Pierwsze sugestie Sedlaka o możliwości istnienia plazmy fizycznej w bioukładach (1967)</i>	H: W biostrukturach mogą zachodzić oscylacje plazmowe (H. Fröhlich 1967; S. Manczarowski 1968)
H: <i>Charakterystyki wymuszonego świecenia bioobektów oraz inne efekty i własności wskazują na występowanie plazmy fizycznej w bioukładach (Iniuszyn i wsp. 1968)</i>	H: <i>W organizmach może istnieć bioplazma - specyficzny dla organizmów stan materii - o własnościach analogicznych do własności plazmy fizycznej (Sedlak, 1972)</i>	
H: Następne publikacje Sedlaka i Inuszyna na temat specyficznego dla organizmów żywych plazmy spełniającej w nich istotną rolę (1972- )		

Rys. 1. Czasowe następstwo pierwszych wyników badań empirycznych (WE), teorii fizycznych (T) oraz hipotez (H), które można uznać za etapy prowadzące do sformułowania tezy o istnieniu w organizmach żywych plazmy fizycznej i swoistego dla układów żywych stanu – bioplazmy. W ramkach oznaczonych podwójną linią mowa jest o pracach odnoszących się pośrednio lub wprost do bioukładów (\* - publikacje ogłoszone w okresie od drugiej połowy lat 50-tych do początkowych lat 70-tych).

[1993]. Tutaj rolę oscylatora plazmowego miałyby spełniać jony oscylujące w kierunku równoległym do powierzchni błon biologicznych.

### **Plazma fizyczna – ogólna charakterystyka**

Plazma cechuje się wielką różnorodnością, wręcz bogactwem, ilościowych i jakościowych charakterystyk, jeśli ją porównać z innymi stanami. W pierwszej części niniejszego fragmentu zostaną wyliczone i scharakteryzowane pokrótce warunki konieczne do jej istnienia, później zostaną przedstawione jej podstawowe własności. W ostatniej części przedstawiona zostanie typologia i informacje odnoszące się do rozpowszechnienia stanu plazmowego we wszechświecie.

#### **1.2.1. Warunki konieczne i wystarczające do istnienia plazmy**

Nie każde zbiorowisko nośników ładunku elektrycznego stanowi skupisko tzw. idealnej<sup>21</sup> plazmy fizycznej. Zarówno poszczególne typy cząstek, jak też całe ich skupiska muszą spełniać określone warunki. Część z nich można wyrazić jakościowo, pozostałe opisywane są przez zbiór relacji pomiędzy podstawowymi charakterystykami cząstek.

Zbiorowisko różnoimiennie naładowanych i obojętnych cząstek stanowi plazmę fizyczną,<sup>22</sup> jeśli spełnione są następujące warunki:

---

<sup>21</sup> Chodzi tu o plazmę, której cząstki zachowują się tak, jakby stanowiły gaz idealny, gdzie krótkozasięgowe oddziaływania (zderzenia sprężyste) pomiędzy cząstkami odgrywają zanedbywalną rolę. Zbiorowiska, w których energia kinetyczna cząstek jest porównywalna lub mniejsza od ich energii oddziaływania elektrostatycznego stanowią tzw. plazmę nieidealną (nazywaną też plazmą silnie sprzężoną). Najbardziej rozpowszechnionym w warunkach ziemskich typem takiej (klasycznej) plazmy są mocne elektrolity oraz elektrony walencyjne metali (plazma cząstek zwyczajnych). W warunkach pozaziemskich klasyczna mocno sprzężona plazma występuje w jądrach zaawansowanych ewolucyjnie gwiazd, np. białych karłów. Plazma nieidealna jest bardzo trudnym do teoretycznego badania ośrodkiem [Fortow 1982], w którym nie manifestują się liczne własności przysługujące plazmie idealnej. Do najważniejszych różnic należy tu skuteczne tłumienie oscylacji elektrycznych przez zderzenia międzycząstkowe.



- 1) przynajmniej jeden rodzaj naładowanych cząstek ma możliwość przemieszczania się na określone odległości. W przypadku elektronów znajdujących się w cząsteczkach – powinna ona przewyższać długość wiązania międzycząsteczkowego;
- 2) liczba dodatnich i ujemnych cząstek jest w przybliżeniu taka sama (zbiorowisko spełnia warunek quasi-neutralności elektrycznej);<sup>23</sup>
- 3) istnieje odpowiednia koncentracja swobodnych nośników ładunku;
- 4) energia kinetyczna składników jest na tyle duża, że powiązanie siłami elektrostatycznymi cząstek niosących przeciwne ładunki odgrywa zaniedbywalną rolę.

Cząstki te mogą występować w otoczeniu cząstek neutralnych (i to często przy olbrzymiej przewodze liczebnej tych ostatnich).

Warunek 1) wyraża żądanie, by w układzie istniały naładowane składniki zdolne do przemieszczania się na dostateczne odległości. Wszystkie one mogą nieść ten sam rodzaj ładunku, ale zbiorowiska mogą też stanowić ruchliwe cząstki obydwu znaków. Nie muszą to być cząstki jednego rodzaju: zbiorowisko może zawierać naładowane cząstki o różnych masach (np. aniony atomowe i cząsteczkowe, elektrony, protony, dziury).

Drugie wymaganie odnosi się do zdolności układu do zneutralizowania<sup>24</sup> w jego obrębie zaburzenia równowagi elektrycznej, spowodowanego jakimikolwiek czynnikami. Oczywiście, liczy się tutaj suma ładunku elektrycznego poszczególnych znaków, nie zaś liczba cząstek naładowanych. W sytuacji, gdy w zbiorowisku występują jony wielokrotnie naładowane ta różnica może być znaczna.

Sens 3-go i 4-ego wymagania jest wyraźniej widoczny, jeśli weźmie się pod uwagę relacje konstytuujące idealną plazmę fizyczną.

Zbiorowisko cząstek, w zależności od podstawowych jego charakterystyk fizycznych, może być zbiorowiskiem, którego zachowanie jest wystarczająco dokładnie opisywane przez zależności fizyki klasycznej albo takim, w którym oddzia-

---

<sup>22</sup> Jeśli nie będzie dokładniejszego określenia okoliczności, należy rozumieć że chodzi o zdolne do przemieszczania się cząstki, jednego znaku, o pojedynczym ładunku, znajdujące się w materiale izotropowym, jednorodnym, mającym bardzo duże rozmiary i zrównoważone termodynamicznie ze swoim otoczeniem. Takie też założenia (zwykle milcząco) przyjmuje się w ogólnych opracowaniach odnoszących się do plazmy.

<sup>23</sup> Znane są jednak skupiska tzw. plazmy złożonej wyłącznie z cząstek jednego znaku (jonów, elektronów, pozytonów), które dłuższy czas mogą istnieć tylko w specjalnych pułapkach [Davidson 1974; O'Neil 1995]. Taka nieneutralna plazma elektronowa może podlegać przemianom fazowym od plazmy gazowej, poprzez plazmę-ciecz do plazmy-kryształu [Malmberg, O'Neil 1977].

<sup>24</sup> Istnieje jednak tzw. plazma nieneutralna elektrycznie, której jedną z odmian jest plazma naładowana, która składa się z nośników ładunku tylko jednego znaku w której nie zachodzi neutralizacja zaburzeń przez cząstki obdarzone przeciwnym znakiem. Dokonuje się ona dzięki okrężnemu ruchowi ładunków wokół linii pola magnetycznego [O'Neil 1995].

ływania kwantowomechaniczne odgrywają zasadniczą rolę, wskutek czego zachowanie układu jako całości jest adekwatnie opisywane poprzez zależności mechaniki kwantowej. Te fundamentalne własności i stosowny do nich sposób opisu stanowi podstawę odróżnienia plazmy niezwyrodniałej (klasycznej) od plazmy zwyrodniałej (kwantowej). Jednym ze sformułowań kryterium zwyrodnienia cząstek jest następujące:

$$(0) \quad T_F > T,$$

gdzie:  $T$  – temperatura bezwzględna cząstek [K],  $T_F$  – tzw. temperatura Fermiego [J]. Jest ona opisywana wzorem:

$$(0) \quad T_F \approx E_F k_B^{-1}$$

$k_B$  – stała Boltzmanna  $\approx 1,3806 \cdot 10^{-23}$  [JK<sup>-1</sup>];

$E_F$  – energia Fermiego, wyrażająca się wzorem:

$$(0) \quad E_F \approx \hbar^2 (3\pi^2 n)^{2/3} (2m^*)^{-1}$$

$n$  – objętościowa koncentracja elektronów<sup>25</sup> [m<sup>-3</sup>];  $m^*$  – masa efektywna elektronu w danym materiale [kg].

Po podstawieniu do powyższej zależności wartości stałych fizycznych:  $\hbar$  – stała Diraca  $\approx 1,05459 \cdot 10^{-38}$  [Js];  $m_e$  – masa spoczynkowa swobodnego elektronu  $\approx 9,1095 \cdot 10^{-31}$  [kg] otrzymuje się:

$$(2a) \quad T_F \approx 4,2317 \cdot 10^{-15} n^{2/3} m_e^{-1} [\text{J}]$$

$$(3a) \quad E_F \approx 5,8423 \cdot 10^{-34} n^{2/3} m_e^{-1} [\text{J}],$$

gdzie  $m_e$  – względna masa efektywna elektronu:  $m^*(m_e)^{-1}$ .

Wstawiając (0) do (2a), po uwzględnieniu zależności (0), uzyskuje się zależność wskazującą, kiedy ma się do czynienia ze zbiorowiskiem cząstek zwyrodniałych:

$$(0) \quad T \ll 4,2317 \cdot 10^{-15} n^{2/3} m_e^{-1} [\text{K}].$$

---

<sup>25</sup> Ponieważ w plazmie koncentracja elektronów zmienia się czasowo i przestrzennie, czasami podaje się dookreślenie, że  $n$  oznacza koncentrację elektronów charakterystyczną dla nie zaburzonego ośrodka.

Spełnianie nierówności wskazuje, że opisywane skupisko cząstek może ewentualnie stanowić plazmę kwantową, natomiast gdy zachodzi  $T_F < T$  należy liczyć się z możliwością występowania plazmy klasycznej.

Warunki istnienia plazmy określone są więc dla plazmy klasycznej przez ciąg następujących nierówności:

$$(0) \quad L_c \ll n^{-1/3} \ll \lambda_{DH} \ll \lambda_c, L$$

zaś dla plazmy kwantowej:

$$(0) \quad L_q \ll k_F^{-1} \ll \lambda_{TF} \ll \lambda_q, L$$

Wyjaśnienia wymaga sens fizyczny oznaczeń wielkości występujących w nierównościach (0) i (6):  $L_c$  oznacza tzw. odległość krytyczną (dla zbiorowiska cząstek klasycznych), natomiast  $L_q$  – taką samą odległość dla cząstek w zbiorowisku zwyrodniałym. Wielkość ta oznacza odległość, przy której energia przyciągania elektrostatycznego ( $E_p$ ) pomiędzy cząstką próbną – posiadającą ładunek  $q$  – a poruszającą się w jej otoczeniu cząstką (o ładunku takim samym co do wartości, lecz przeciwnym co do znaku) jest równa średniej energii kinetycznej ( $E_k$ ) poruszającej się cząstki;  $\lambda_c$  oraz  $\lambda_q$  oznaczają średnią długość drogi swobodnej cząstki, odpowiednio, w zbiorowisku klasycznym lub kwantowym. W przypadku, gdy  $L_c \geq \lambda_{DH}$  (lub  $L_q \geq \lambda_{TF}$ ), wtedy  $E_p \geq E_k$  następuje związanie elektrostatyczne cząstek.<sup>26</sup>

---

<sup>26</sup> Może wtedy dojść do krystalizacji układu cząstek. Przy dużej nierównowadze pomiędzy tymi wielkościami (ok. 172) może układ przekształcać się w tzw. kryształ plazmowy [Thomas, Morfill 1996a, b].

Leżące z lewej strony części złożonych nierówności (0) i (0) wyrażają więc wymaganie, aby istniały w układzie niezwiązane nośniki ładunku elektrycznego. W ciągach tych nierówności:  $n^{-1/3}$  – wyraża odległość<sup>27</sup> pomiędzy cząstkami w zbiorowisku klasycznym zaś  $k_F^{-1}$  – oznacza średnią odległość między cząstkami zbiorowiska zwyrodniałego. Stanowi ją odwrotność tzw. wektora falowego Fermiego, który jest równy  $(3\pi_2 n)^{1/3}$ ;  $\lambda_{DH}$  – charakteryzuje wielkość tzw. promienia Debye’a-Hückela (w zbiorowisku cząstek klasycznych), natomiast  $\lambda_{TF}$  – jest miarą tzw. promienia Thomasa-Fermiego (w zbiorowisku kwantowym). Obydwie wielkości oznaczają promień kuli wokół wybranego ładunku w plazmie, w obrębie której następuje ekranowanie tego ładunku przez cząstki przeciwnego znaku; wreszcie  $L$  – charakteryzuje rozmiary liniowe układu.

Powyższe parametry określane są przez następujące zależności:

$$(0) \quad L_c \approx e^2 (4\pi\epsilon_0\epsilon_r k_B T)^{-1} \text{ [m]}$$

$$(7a) \quad L_c \approx 1,6711 \cdot 10^{-5} (\epsilon_r T)^{-1} \text{ [m]}$$

$$(0) \quad L_q \approx e^2 (4\pi\epsilon_0\epsilon_r E_F)^{-1} \text{ [m]}$$

$$(8a) \quad L_q \approx 3,9489 \cdot 10^9 m_e (\epsilon_r n^{2/3})^{-1} \text{ [m]},$$

gdzie:  $E_F$  podana jest przez równanie (0), natomiast:  $\epsilon$  – absolutna przenikalność elektryczna ośrodka [ $Fm^{-1}$ ],  $\epsilon_0$  – absolutna przenikalność elektryczna próżni [ $Fm^{-1}$ ], zaś  $\epsilon_r$  – względna przenikalność elektryczna  $\epsilon_r = \epsilon(\epsilon_0)^{-1}$

oraz:

$$(0) \quad \lambda_{DH} \approx [\epsilon_0\epsilon_r k_B T (ne^2)^{-1}]^{1/2} \text{ [m]}$$

$$(9a) \quad \lambda_{DH} \approx 69 (\epsilon_r T n^{-1})^{1/2} \text{ [m]}$$

$$(0) \quad \lambda_{TF} \approx [4\pi\epsilon_0 \hbar^2 (3\pi^2 n)^{2/3} (12\pi m^* ne^2)^{-1}]^{1/2} \text{ [m]}$$

$$(10a) \quad \lambda_{TF} \approx 3,6653 \cdot 10^{-6} \epsilon_r^{1/2} (m_e^{1/2} n^{1/6})^{-1} \text{ [m]}.$$

Czasami zamiast powyższych zależności, aby dokonać oceny stopnia kolektywności cząstek w plazmie stosuje się wielkości bezwymiarowe określane mianem liczby Debye’a-Hückela ( $N_{DH}$ ), w przypadku plazmy złożonej z cząstek klasycznych oraz liczby Thomasa-Fermiego ( $N_{TF}$ ) charakteryzującej ten stopień w przypadku cząstek stanowiących zbiorowisko kwantowe:

<sup>27</sup> Niektórzy autorzy przyjmują, iż cząstki wypełniają przestrzeń o symetrii kulistej, stąd średnia odległość dla cząstek rozmieszczonych w takiej przestrzeni wynosić będzie  $[3(4\pi_2 n)^{-1}]^{1/3}$  [np. Alastuey 1986; Ebeling i wsp. 1976 s. 17; 1986; Glicksman 1971].

$$(11) \quad N_{DH} \approx 4\pi(3)^{-1} n \lambda_{DH}^3$$

$$(11a) \quad N_{DH} \approx 1,3765 \cdot 10^6 (\epsilon_r T)^{3/2} n^{-1/2}$$

oraz

$$(12) \quad N_{TF} \approx 4\pi(3)^{-1} n \lambda_{TF}^3$$

$$(12a) \quad N_{TF} \approx 2,0626 \cdot 10^{-16} (\epsilon_r m_e^{-1})^{3/2} n^{1/2}$$

Ujmując ogólnie przedstawione wyżej warunki odnoszące się do plazmy idealnej, należy powiedzieć, że:

- 1) nie wszystkie skupiska naładowanych, zdolnych do przemieszczania się cząstek stanowią plazmę;
- 2) ich koncentracja, średnia energia kinetyczna muszą zawierać się w określonym zakresie. Duże koncentracje naładowanych cząstek muszą iść w parze z wysokimi ich średnimi energiami kinetycznymi;<sup>28</sup>
- 3) Rozmiary przestrzeni zajmowanej przez zbiorowisko cząstek muszą być na tyle znaczne, by w ich obrębie następowało neutralizowanie zaburzenia równowagi elektrostatycznej w tym zbiorowisku, wreszcie:
- 4) ośrodek powinien cechować się możliwie dużymi wartościami przenikalności elektrycznej – im wyższe przyjmuje ona wartości, tym lepiej spełnione są warunki dla zaistnienia stanu plazmowego.<sup>29</sup>

Wskazane powyżej zależności ściśle wiążą się z bardzo ważną kwestią, jaką jest sposób powstawania i zanikania plazmy. W opracowaniach poświęconych fizyce plazmy najczęściej stwierdza się, iż do powstania plazmy idealnej doprowadza każde oddziaływanie, dzięki któremu do układu wnoszona jest energia w odpowiednim tempie.<sup>30</sup> Czynnikiem oddziałującym w ten sposób może być silne pole elektryczne, promieniowanie cząstkowe i elektromagnetyczne,<sup>31</sup> fale uderzeniowe oraz reakcje chemiczne (np. gwałtowne spalanie). Takie jednak ujęcie pomija jeszcze jedną ważną okoliczność: otóż z uwagi na to, że dla plazmy w ciałach stałych relacje konstytuujące plazmę zawierają cztery zmien-

<sup>28</sup> W zbiorowiskach cząstek podlegających statystyce Fermiego-Diraca (a takimi cząstkami są elektrony) zadość czynią temu wymaganiu duże koncentracje tych cząstek: z racji podlegania zakazowi Pauliego muszą one zajmować bardzo wysokie stany energetyczne. Dzieje się tak w metalach, półmetalach i niektórych półprzewodnikach (cechujących się dużą koncentracją elektronów).

<sup>29</sup> Oczywiście z zastrzeżeniem, że promień ekranowania nie przekroczy rozmiarów układu.

<sup>30</sup> Bardziej dokładnie to wyrażając, chodzi o: moc oddziaływania, efektywność mechanizmów doprowadzających do generacji cząstek, efektywność podnoszenia ich energii kinetycznej oraz o moc, z jaką energia jest tracona przez układ.

<sup>31</sup> M. in. jonizujące czy też o dużej gęstości strumienia mocy promieniowanie z zakresu niejonizującego (w tym też promieniowanie laserowe).

ne wielkości fizyczne (temperaturę, koncentrację, masę efektywną cząstek oraz przenikalność elektryczną ośrodka), to plazma fizyczna może powstawać także dzięki zmniejszeniu się niektórych z tych wielkości, czy też zmniejszeniu się jednych (jednej) i zwiększeniu się innych.<sup>32</sup>

### 1.2.2. Podstawowe własności plazmy

Jak już wcześniej wspomniano plazmę tworzą odpowiednio liczne,<sup>33</sup> mające dostatecznie duże rozmiary i odpowiednie temperatury, skupiska ruchliwych składników, będących nośnikami ładunków elektrycznych ujemnych lub dodatnich. Liczba ładunków dodatnich w skupisku musi kompensować liczbę ładunków ujemnych.

Własnością osobliwą, zdecydowanie wyróżniającą plazmę spośród innych stanów agregacji, jest jej urzeczywistnianie się przy olbrzymiej rozpiętości skali temperatur i koncentracji pokrywających dziesiątki rzędów wielkości. Żaden z pozostałych stanów skupienia nie dysponuje tak wielką rozpiętością skali warunków, przy których może on istnieć. Co więcej, przy stale wzrastającej temperaturze układu, wszystkie stany skupienia przechodzą w końcu w stan plazmy. Z kolei w miarę zmniejszania się temperatury ośrodka – z plazmy mogą rekonstruować się pozostałe stany skupienia: obrazowo mówiąc – plazma może „pochłaniać” i „wydzielać” z siebie inne stany skupienia.

Plazma jest także ośrodkiem, w którym sprzęgają się ze sobą oddziaływania chemiczne i fizyczne. Zmiany chemicznego składu plazmy wpływają bowiem na zmiany jej koncentracji, masy cząstek, wielkość ich ładunku elektrycznego, co pociąga za sobą, między innymi, przestrojenie częstotliwości jej oscylacji. Zmiany temperatury plazmy mogą powodować zachodzenie reakcji chemicznych w plazmie, co w innych warunkach nie byłoby możliwe.<sup>34</sup>

Składnikami, do których można odnosić przedstawione wyżej kryteria, mogą być: elektrony, dziury, jednokrotnie lub wielokrotnie naładowane jony oraz jonorodniki. Ponieważ istotnym składnikiem plazmy są naładowane cząstki, za równie istotny składnik należy uznać nie tylko ich „indywidualne” pola elektryczne, magnetyczne i elektromagnetyczne, lecz także te, jakie powstają w ich zbiorowisku kolektywnie oddziałującym. Cechują się one niezwykle bogatymi charakterystykami.

---

<sup>32</sup> Zwrócono na to uwagę już wcześniej przy rozpatrywaniu możliwości zachodzenia przemian fazowych plazmy w ośrodku biologicznym [Zon 1986 s. 323].

<sup>33</sup> Bardziej szczegółowe omówienie warunków niezbędnych do istnienia plazmy przedstawiono wcześniej [Zon 1986, 70n].

<sup>34</sup> Zajmuje się tym oddzielna dziedzina wiedzy i technologii zwana chemią plazmy.



Plazma może istnieć w stanie „czystym”,<sup>35</sup> kiedy wszystkie jej cząstki otoczone są przez składniki obdarzone pewnym ładunkiem elektrycznym, albo w stanie „wymieszanym”, kiedy część zbiorowiska stanowią cząstki neutralne elektrycznie. W tym drugim wypadku, cząstki plazmy doznają dodatkowych zaburzeń swego ruchu w wyniku kolizji z tłem nie naładowanych cząstek.<sup>36</sup>

W takim ośrodku, zwłaszcza gdy znajduje się on w stanie dalekim od równowagi termodynamicznej, z łatwością mogą zachodzić oddziaływania o charakterze nieliniowym, czasami doprowadzające do występowania w nim turbulencji i niestabilności<sup>37</sup> [Dawson 1995].

Plazma cechuje się zespołowym zachowaniem się jej składników. Ruch każdej obdarzonej ładunkiem cząstki dokonuje się przy udziale pewnej liczby innych przeciwnie naładowanych cząstek – cząstka przemieszcza się w ich „otocze”. Własność ta jest skutkiem dalekozasięgowego oddziaływania pól elektrycznych i magnetycznych tych cząstek. Drugą niemniej ważną charakterystyką plazmy jest olbrzymia jej dynamika: wszystkie jej cząstki prócz tego, że bezustannie „odczuwają” zachowanie innych naładowanych cząstek, także „reagują” odpowiednimi zmianami swojego ruchu. Trzeba tu zauważyć, że ruch jakiegokolwiek cząstki lub ich zbiorowiska może być wymuszony przez oddziaływania o różnej naturze fizycznej, przede wszystkim przez chaotyczne ruchy termiczne. Mogą go spowodować przemiany chemiczne w ośrodku, których skutkiem będzie np. uwolnienie lub pochłonięcie energii albo też zmiana własności dielektrycznych ośrodka. Trajektoria ruchu i pęd określonej cząstki plazmy zależy więc nie tylko od jej pędu uzyskanego w rezultacie zadziałania jakiegoś bodźca energetycznego, lecz także od wartości lokalnego pola elektrycznego, które jest superpozycją pól pochodzących od innych cząstek stanowiących najbliższe otoczenie danej cząstki.<sup>38</sup> Zachodzi też zależność w odwrotnym kierunku: zmiany pędu i ładunku określonego składnika plazmy oddziałują na zachowanie się dużej liczby cząstek, czasami nawet całego ich skupiska.<sup>39</sup> Charakterystyczna dla plazmy częstotliwość drgań własnych określana jest przez zależność:

---

<sup>35</sup> Przykładem może być plazma wnętrza gwiazd czy też plazma bardzo „młodego” Wszechświata.

<sup>36</sup> Którymi są neutralne atomy i cząsteczki w plazmie gazowej, zaś w ciałach stałych fonony – kwanty drgań sieci atomowej.

<sup>37</sup> Co, nawiasem mówiąc, jest główną przeszkodą w urzeczywistnieniu kontrolowanych reakcji termojądrowych.

<sup>38</sup> Tym otoczeniem mogą być cząstki rozmieszczone w przestrzeni trójwymiarowej, na powierzchni czy nawet na odcinku, jeśli tylko mieszczą się w zasięgu tzw. promienia ekranowania [por. Zon 1986 s. 76n oraz rys. 2.2. Tamże]

<sup>39</sup> Kolektywne zachowanie, analogiczne do zachowania plazmy, jest możliwe także w przypadku grawitacyjnego oddziaływania pomiędzy rozproszonymi w pewnym obszarze przestrzeni kosmicznej bardzo liczebnymi skupiskami mas grawitacyjnych [Potter 1977 s. 133n].

$$(13) \quad \omega_p \approx [ne^2 (\epsilon m^*)^{-1}]^{1/2} [\text{rad s}^{-1}]$$

$$(13a) \quad \omega_p \approx 56,414 [n (\epsilon_r m_e)^{-1}]^{1/2} [\text{rad s}^{-1}].$$

Z powyższej zależności wynika, że  $\omega_p$  osiąga tym większe wartości, im większa jest koncentracja lub ładunek cząstek oraz im mniejsze wartości przyjmuje przenikalność elektryczna ośrodka i masa efektywna cząstek.

Oscylacje plazmowe mogą być wzbudzone także w dielektrykach [Egri 1982], a więc materiałach, w których zdecydowana większość elektronów jest związana. Nie można jednak powiedzieć, że zawierają one plazmę, gdyż nie zachodzi tam spontaniczne ekranowanie np. wprowadzonego ładunku dodatkowego. Podobnie rzecz przedstawia się z elektrolitami: w nich również mogą powstawać wspomniane oscylacje. Jednak wskutek wysokiej częstotliwości zderzeń międzycząstkowych oscylacje te są silnie tłumione.<sup>40</sup> Warto na marginesie zauważyć, że osobliwością plazmy elektronowej w metalach jest to, że jej oscylacje nie mogą być wzbudzone przez ruchy termiczne sieci, ani nawet przez elektrony zajmujące najwyższą część rozkładu Fermiego: energia plazmonu znacznie je przewyższa. Mogą jednak powstawać oscylacje tej plazmy wskutek odpowiednio silnych oddziaływań zewnętrznych: np. promieniowania elektromagnetycznego lub cząstkowego [Pines 1955].

Plazmę mogą stanowić skupiska cząstek o różnej wymiarowości. Mogą to być cząstki wypełniające określony fragment:

- a) przestrzeni, wtedy ma się do czynienia z plazmą trójwymiarową (3D),
- b) powierzchni – jest to plazma dwuwymiarowa (2D),<sup>41</sup>
- c) linii prostej – plazma jednowymiarowa (1D).

Plazma może być także układem typu międzywymiarowego; mogą też istnieć układy, w których trzeba brać pod uwagę plazmy niższych wymiarowości, wypełniające przestrzeń trójwymiarową. Warto zauważyć, że w przypadku plazm o zredukowanej wymiarowości (a także plazmy w cienkich warstwach, zdyspergowanej w ośrodku o innych własnościach niż materiał cienkiej warstwy) istotną rolę odgrywają relacje zachodzące pomiędzy<sup>42</sup> przewodnością i przenikalnością elektryczną stykających się ośrodków oraz charakterystycznymi rozmiarami „składników plazmonośnych” (grubość warstwy, średnica cząstki) [Glicksman 1971].

<sup>40</sup> Ośrodek taki jest plazmą kolizyjną czyli taką, w której zachodzi związek  $\tau_k \geq 2\pi (\omega_p)^{-1}$ .

<sup>41</sup> Jeśli oscylacje plazmowe zachodzą po powierzchni kulistej, częstotliwość oscylacji własnych zmienia się o czynnik  $(\sqrt{3})^{-1}$ , a gdy po powierzchni płaskiej – o  $(\sqrt{2})^{-1}$  [Ritchie 1957]. Jednak w przypadku cząstek kulistych o bardzo małych rozmiarach następuje wzrost  $\omega_p$  do tej wartości, jaka jest charakterystyczna dla dużej próbki metalu [Parmigiani 1982].

<sup>42</sup> Ta lista nie jest pełna: niewątpliwie w niektórych sytuacjach istotną rolę odgrywać będą także inne własności, jak: rozkład pola magnetycznego czy anizotropia ośrodka.

Pola elektromagnetyczne odgrywają szczególną rolę w plazmie gazowej. Powstają one wskutek procesów rekombinacji i, jeśli posiada ona dostateczną energię w stosunku do energii jonizacji określonego atomu, cząsteczki czy jonu, to mogą znów powodować jonizację tego składnika ośrodka, jeśli takie promieniowanie (jonizujące elektromagnetyczne lub ultrafioletowe) oddziałuje na plazmę z zewnątrz, jest ono czynnikiem zwiększającym stopień zjonizowania ośrodka.<sup>43</sup>

Plazma fizyczna wyróżnia się także wysokim stopniem uwrażliwienia na oddziałujące na nią zewnętrzne pola elektryczne, a przede wszystkim magnetyczne i elektromagnetyczne. Stałe i zmienne pola elektryczne powodują jej spolaryzowanie, a więc takie przesunięcia cząstek wewnątrz skupiska, że w niewielkiej odległości<sup>44</sup> od granicy wewnątrz plazmy następuje wyłumienie tych pól. Statyczne i zmienne pola magnetyczne z kolei wymuszają ruchy rotacyjne naładowanych cząstek plazmy, doprowadzając tym do pojawienia się anizotropii właściwości fizycznych dotąd izotropowego ośrodka plazmowego. Prócz tzw. częstotliwości rezonansu plazmowego, pojawiają się też nowe mody drgań plazmy. Powstają one w rezultacie złożenia się częstotliwości plazmowej i cyklotronowej<sup>45</sup> oraz następuje przesunięcie położenia częstotliwości rezonansowych.

Pola elektromagnetyczne wreszcie – przy zachodzeniu odpowiednich warunków – mogą wchodzić w bardzo silne sprzężenia z ośrodkiem plazmowym, czego konsekwencją są, między innymi gwałtowne zmiany zdolności pochłaniania lub odbijania fal elektromagnetycznych o określonych długościach.

Zbiorowisko cząstek tworzące plazmę jest niezwykle wrażliwe na różnego rodzaju zaburzenia stanu równowagi elektrycznej. Zaburzenia te mogą powstawać wskutek działania czynników „umiejscowionych” w samej plazmie, jak np. rekombinacje nośników ładunku, jonizacja atomów lub cząstek (co powoduje lokalny spadek lub wzrost ich koncentracji) czy spowodowanymi przez ruchy termiczne lokalnymi fluktuacjami koncentracji nośników ładunku. Czynnikiem z zewnątrz zaburzającym stan plazmy mogą być: wnikające do plazmy lub oddziałujące na jej warstwy powierzchniowe strumienie naładowanych lub obojętnych cząstek, fale akustyczne, promieniowanie elektromagnetyczne o dostatecznie dużych energiach kwantów lub gęstości strumienia mocy. Do lokalnych zmian koncentracji naładowanych cząstek może dochodzić również wskutek działania impulsowego pola magnetycznego o dużej indukcji, wprowadzania do układu substancji chemicznych o charakterze donorów lub akceptorów elektronów czy też zmieniających przenikalność elektryczną określonego fragmentu ośrodka zawierającego plazmę. Odpowiedzią na te zaburzenia jest powstawanie podłużnych oscylacji elektrostatycznych w

<sup>43</sup> Co wcale nie musi zwiększać stopnia kolektywizowania oddziaływań pomiędzy cząstkami tworzącymi skupisko plazmy.

<sup>44</sup> Jest ona równa odległości ekranowania.

<sup>45</sup> Zwanej czasami częstotliwością Larmora. Wbrew spotykanym czasem opiniom częstotliwość ta nie jest cechą charakterystyczną wyłącznie dla plazmy: charakteryzują się nią wszystkie cząstki poddane działaniu odpowiednio silnego pola magnetycznego.

ośrodka. Wielkość kwantu tych drgań – zwanego plazmonem,  $E_{pl}$  – zależy od koncentracji swobodnych nośników ładunku ( $n$ ), ich względnej masy efektywnej ( $m_e^*$ ) i przenikalności elektrycznej ośrodka ( $\epsilon_r$ ). Wyraża się ona zależnością:

$$(14) \quad E_{pl} \approx \hbar [(ne^2 (\epsilon m^*)^{-1})^{1/2}] \text{ [J]}$$

$$(14a) \quad E_{pl} \approx 5,9493 \times 10^{-33} [(n(\epsilon_r m_e)^{-1})^{1/2}] \text{ [J]}$$

Bardzo charakterystyczna dla plazmy jest reakcja na oddziałujące na nią z zewnątrz promieniowanie elektromagnetyczne. W przypadku plazmy, na którą nie oddziałuje pole magnetyczne, może ona bowiem być trojakiemu rodzaju:

- 1) w przypadku, gdy częstość kątowna promieniowania ( $\omega$ ) jest niższa od częstości drgań własnych plazmy ( $\omega_p$ ) następuje odbijanie promieniowania od plazmy;
- 2) jeśli częstość promieniowania jest wyższa od częstości drgań własnych plazmy,  $\omega > \omega_p$ , wtedy promieniowanie jest częściowo odbijane oraz częściowo pochłaniane przez plazmę;
- 3) gdy częstości te są sobie równe,  $\omega = \omega_p$ , padające promieniowanie jest przez plazmę bardzo silnie pochłaniane (teoretycznie w 100%).

W plazmie poddanej wpływowi odpowiednio silnego pola magnetycznego pojawia się wiele nowych częstotliwości rezonansowych, o czym już wcześniej wspomniano, oraz „okien” przepuszczalności i silnego odbijania promieniowania przez plazmę.

W miarę obniżania się temperatury i gęstości staje się coraz bardziej prawdopodobne powstawanie struktur także pod wpływem sił innych, niż magnetyczne. Coraz skuteczniej zaczynają dochodzić do głosu siły przyciągania elektrostatycznego pomiędzy indywidualnymi przeciwnie naładowanymi cząstkami, co doprowadza do ich rekombinacji. Po uformowaniu się najpierw lekkich, później także ciężkich jąder atomowych i wychwyceniu przez te jądra dostatecznej liczby elektronów, tworzą się atomy i cząsteczki w coraz bardziej ochładzającej się plazmie. Wskutek dalszego obniżania się temperatury ośrodka dochodzi do powstawania stabilnych bardzo różnorodnych cząsteczek, które mogą kondensować do fazy ciekłej, a z niej na kolejnym etapie przemian – do fazy stałej.

W tym ostatnim wypadku plazma idealna w niektórych typach materiałów może zaniknąć<sup>46</sup> – w niektórych jednak, takich jak metale czy elektrolity, w dalszym ciągu może ona jednak współistnieć z fazą stałą lub ciekłą, na co już zwrócono uwagę

---

<sup>46</sup> Bardzo intrygujące i doskonale przystające do rozwijanej w tym rozdziale tezy jest stanowisko, iż wszędzie tam gdzie ma się do czynienia ze zbiorowiskami cząstek o przeciwnych znakach (a takimi są w gruncie rzeczy nawet rdzenie atomowe i związane z nimi elektrony w dielektrykach), tam istnieje ośrodek plazmowy. Jedynym wyjątkiem byłaby próżnia [Gliksman 1971].

wcześniej. Krótko mówiąc, materiał może kolejno przechodzić poprzez wszystkie stany skupienia, począwszy od stałego, a kończąc na plazmie (w tym wypadku plazmie nukleonów lub kwarków), a w końcu gluonów i kwarków,<sup>47</sup> jeśli tylko zmieni się będzie stosunek średniej energii kinetycznej przypadającej na jedną cząstkę (cząsteczkę) ośrodka do średniej energii ich elektrostatycznego przyciągania się z inną cząstką mającą ładunek przeciwny. Jest więc plazma stanem skupienia pierwotnym, w stosunku do innych stanów skupienia, który nie dość, że może „wchłaniać” i wydzielać z siebie pozostałe, może także z nimi współistnieć w różnych proporcjach ilościowych. Warto tu też dodać, że tzw. elektronowa plazma zwyrodniała może istnieć w ciałach stałych o temperaturach sieci atomowej bardzo niskich, bliskich nawet zera bezwzględnego.

### **1.2.3. Rozpowszechnienie plazmy oraz jej pierwotność w stosunku do pozostałych stanów skupienia**

Zgodnie z przyjętymi obecnie ocenami, prawie cała (99,999%) widzialna materia Wszechświata znajduje się w stanie plazmy [Peratt 1996; Petrasso 1990]. W tym stanie skupienia znajdują się jądra gwiazd i ich „atmosfera”, jądra planet, naładowane elektrycznie cząstki pyłu, znajdującego się w przestrzeniach międzygalaktycznych,<sup>48</sup> międzygwiazdnych i międzyplanetarnych, zjonizowane cząsteczki, atomy, nukleony wypełniające wspomniane przestrzenie oraz górne części atmosfer planet.<sup>49</sup>

Nie jest więc bynajmniej słuszne mniemanie, że plazma jest czymś nietypowym we Wszechświecie. Jest zgoła inaczej: to pozostałe stany skupienia są czymś osobli-

---

<sup>47</sup> Powstaje wtedy mieszanina gluonów i kwarków (plazma gluonowo-kwarkowa). Jest to faza istnienia materii, w której istotną rolę odgrywają słabe oddziaływania pomiędzy gluonami i kwarkami. Jej okres trwania wynosi ok.  $10^{-22}$  s, po czym następuje jej przekształcenie się w materię hadronową. Charakterystyczna dla takiej plazmy temperatura jest rzędu  $2 \times 10^{15}$  K [Cooper i wsp. 1994].

<sup>48</sup> Charakterystyki plazmy znajdującej się w centrach skupisk galaktyk mogą być bardzo nietypowe dla większości obszarów zajmowanych przez plazmę przestrzeni kosmicznej: jej temperatura może być taka, jaka charakteryzuje wnętrza gwiazd ( $10^7$ - $10^8$  K), koncentracja zaś może być bardzo niska ( $10^6 \text{ m}^{-3} \geq n$ ) [Cavaliere 1984].

<sup>49</sup> Ze względu na olbrzymią rozciągłość przestrzenną skupisk plazmy wypełniającej Wszechświat (odległości wewnątrz- i międzygalaktyczne liczące setki megaparseków), olbrzymie energie wypromieniowywane w rezultacie procesów fizycznych w skupiskach plazmy namagnetyzowanej stanowiących większość masy Wszechświata, ukuto termin „Wszechświat plazmowy” [Alfvén 1989]. Zwolennicy tej teorii wszechświata, którzy – nawiasem mówiąc – stanowią mniejszość wśród zajmujących się kosmologią i służącą jej za teren testowania astrofizyką, tak mocno podkreślają znaczenie pól elektrycznych i magnetycznych w ewolucji Wszechświata, że nie akceptują teorii Wielkiego Wybuchu. W prowadzonej tu dyskusji ta niezgodność nie ma większego znaczenia, gdyż zwolennicy obydwu stanowisk nie wykluczają istnienia plazmy w różnych fazach przekształceń pierwotnego Wszechświata [Peratt 1986a, b].

wym.<sup>50</sup> Odnosi się to nie tylko do przestrzeni pozaziemskich, ale także w znacznie większej mierze, niż się potocznie sądzi, do warunków ziemskich.<sup>51</sup> Środowisko to cechuje się bowiem nieoczekiwanie wielkim bogactwem skupisk plazmy idealnej i nieidealnej. Plazma tego pierwszego typu stale istnieje w górnych warstwach atmosfery (jonosfera i magnetosfera Ziemi), tzw. wiatr słoneczny jest plazmą [Cowley 1991], występuje w skupiskach metalicznych i rudach metali, w naturalnie występujących materiałach o charakterze półprzewodników elektronowych. Wszelkie procesy w geosferze i atmosferze, w trakcie których dochodzi do jonizacji ośrodka (chodzi tu głównie o „ciche” i „głośnie” wyładowania elektryczne w atmosferze, efekty tryboelektryczne w skałach (podczas trzęsień ziemi i ruchów górotwórczych) doprowadzają do pojawiania się nietrwałych w czasie skupisk plazmy. Jeśli chodzi o ten ostatnio wspomniany typ plazmy, to jej rozpowszechnienie w warunkach ziemskich jest jeszcze większe, niż plazmy idealnej, gdyż stanowią ją tzw. mocne elektrolity [Tonks 1966]. Roztopione metaliczne jądro Ziemi, elektrolit wód oceanicznych i rzecznych, elektrolity wypełniające przestrzenie komórkowe i pozakomórkowe w organizmach [Vasilescu 1973; Zon 1980b] są właśnie tego rodzaju plazmą. Tezę o powszechności występowania plazmy bardzo sugestywnie przedstawia Sedlak.<sup>52</sup>

W myśl teorii kosmologicznych wynikających z relatywistycznej teorii grawitacji i zgodnych z nimi danych obserwacyjnych, Wszechświat wyłaniał się poprzez szereg stadiów ze stanu, charakteryzującego się dużo wyższymi niż obecnie: koncentracją materii, temperaturą i ciśnieniem. Dzięki tym teoriom i danym obserwa-

<sup>50</sup> Trzeba podkreślić, że wyróżnia się bardzo wiele rodzajów plazmy. Ze względu na to, że nie jest tu konieczne zajmowanie się typologią plazmy, zainteresowanego czytelnika wystarczy odesłać do innej pracy autora [Zon 1986, 122n], gdzie typologii układów znajdujących się w tym stanie skupienia poświęcono dużo więcej uwagi.

<sup>51</sup> Jest ciekawe, że Sedlak posuwa się do mocnego bardzo stwierdzenia, że „Plazma byłaby protostanem materii istniejącym w każdym z dotychczasowych trzech stanów skupienia.” [S70b s. 144]. Co do tego, że plazma była i jest protostanem w stosunku do innych stanów agregacji materii, nie można mieć zastrzeżeń, bowiem tworzywo całego Wszechświata istniało kiedyś w stanie plazmy. Biorąc jednak pod uwagę kryteria istnienia plazmy nie można powiedzieć, że niezjonizowany gaz czy dielektryki są plazmą. Zdarza się jednak, że gaz w którym odpowiednia część jego cząstek jest zjonizowana (jonizacja na poziomie 1% jest tu zupełnie dostateczna) jest plazmą. Podobnie jeśli do dielektryka mogą zostać wprowadzone lub wygenerowane w nim (np. przez naświetlenie promieniowaniem jonizującym) ruchliwe nośniki ładunku, może stać się on ośrodkiem zawierającym plazmę. Zacytowane powyżej stwierdzenie trzeba więc uznać za zbyt-nią ekstrapolację.

<sup>52</sup> „Współczesna fizyka zna uniwersalny czynnik o niezwykłej dynamice, towarzyszący wszystkim stanom skupienia materii – plazmę. Plazma znajduje się również w gazach, płynach może też kursować w strukturze krystalicznej ciał stałych. Istnieje ona w Ziemi jako geoplazma, w hydrosferze i atmosferze, wypełnia całą przestrzeń jako kosmoplazma czy astroplazma. Jest w metalach i dielektrykach, znajduje się w półprzewodnikach i ferrytach. Plazma jest wszędzie. [...] Plazma ustawicznie powstaje i ulega unicestwieniu, plazma rodzi się i umiera, lecz zawsze trwa. Bez przesady można powiedzieć, że wszystkie rzeczy są tylko manifestacją plazmy” [S72a s. 46/7].



cyjnym możliwe jest modelowe rekonstruowanie wcześniejszych faz przemian Wszechświata. Rekonstrukcje te daje się jednak przeprowadzać wiarygodnie jedynie do stanu, który określany jest mianem pierwotnej osobliwości, do opisu którego współczesna nauka nie posiada jeszcze odpowiednich narzędzi teoretycznych.<sup>53</sup> Sądzi się, iż przy badaniu tych najwcześniejszych stadiów istnienia Kosmosu podstawową rolę odgrywałaby już nie teoria względności, lecz fizyka kwantowa w postaci tzw. kwantowej teorii grawitacji.

Po osiągnięciu progowego stanu (nazywanego czasem erą Plancka),<sup>54</sup> Wszechświat zaczął już „podlegać” znanym prawom fizyki. Wtedy materia Wszechświata była w stanie gęstej plazmy kwarkowo-gluonowej, która wskutek ochładzania spowodowanego ekspansją przestrzeni i ucieczką fotonów, przekształciła się w plazmę złożoną z oddziałujących silnie hadronów (mezonów i nukleonów) [Satz 1986]. Jest to tzw. era hadronowa. Z chwilą ustania dominacji oddziaływań silnych, podstawową rolę odgrywają oddziaływania słabe i elektromagnetyczne. Ten następny etap przemian Wszechświata jako całości nosi miano ery leptonowej. W trzeciej fazie przemian pierwotnego Wszechświata (zwanej erą promienistą) decydującą rolę odgrywa promieniowanie elektromagnetyczne. Trzeba jednak zauważyć, że ani ta, ani też żadna inna z faz ewolucji Kosmosu nie przebiega bez udziału oddziałujących za pośrednictwem pola elektrycznego składników o charakterze cząstek obdarzonych masą. Można więc powiedzieć, że na każdym z tych etapów<sup>55</sup> istnieje specyficzny typ plazmy, kiedy jej właściwości znajdują się „w tle” właściwości i procesów wynikających z dominujących oddziaływań innego typu (silnych lub słabych jądrowych, promieniowania elektromagnetycznego czy grawitacji). Oddziaływania plazmowe ubogacają tamte specyficzne dla siebie własności i oddziaływania albo też odgrywają pierwszoplanową rolę. Na kolejnym, już czwartym, etapie dochodzi do

---

<sup>53</sup> Oczywiście, że z taką sytuacją nie można pogodzić postawy metodycznego „naporu poznawczego”, jaki cechuje od samego początku nauki przyrodnicze. Z niechęcią pozostawiając to pole poza obszarem swych kompetencji, badacze ciągle mają nadzieję na stopniowe „wytrawienie” nie poznanego obszaru lub takie przededefiniowanie zadania, by problem osobliwości w ogóle się nie pojawił, albo żeby zakres ograniczenia parametrów fizycznych po których przekroczeniu pojawia się „osobliwość”, był możliwie najmniejszy [np. Heller 1985 s. 184n]. Nie można też wykluczyć możliwości istnienia innych, rozłącznych z naszym, Wszechświatów [np. Markov 1990].

<sup>54</sup> Graniczne charakterystyki materii przed jej „przejściem” do fazy planckowskiej są następujące: koncentracja materii  $= 10^{97}$  kg m<sup>-3</sup>, temperatura = 10<sup>33</sup> K; czas, jaki upłynął od wyłonienia się Wszechświata ze stanu osobliwości = 10<sup>-44</sup> s [Heller 1985 s. 201n]. Być może nie jest sensowne stosowanie pojęcia upływu czasu do Wszechświata w supergęstej fazie jego istnienia [Życiński 1976].

<sup>55</sup> Pominąwszy oczywiście etap najbardziej pierwotny, znajdujący się poza obszarem kompetencji współczesnej nauki, jedynego lub któregoś z kolei „wyłonienia się” Wszechświata. Znalezienie się bowiem Wszechświata w „fazie” osobliwości początkowej likwiduje zupełnie wszelkie możliwości jego naukowego badania. Rozstrzygać o jednorazowości czy powtarzalności tego zdarzenia można jedynie zgodnie z predylekcjami filozoficznymi czy religijnymi [Życiński 1979], ale to jest już – jak wyżej wspomniano – poza dziedziną nauki.

syntezy jąder atomowych, dzięki czemu tworzywo Wszechświata stanowi mieszaninę dodatnio naładowanych jąder, nukleonów (które nie weszły jeszcze w skład utworzonych jąder), elektronów i promieniowania. Od tego przynajmniej etapu ewolucji Kosmosu można mówić, że składnikiem decydującym o własnościach i przemianach Wszechświata jest czwarty stan skupienia materii – plazma.

Przy temperaturach i koncentracjach skrajnie wysokich, a więc takich jakie należy przypisywać stanom Wszechświata graniczącym z punktem osobliwości początkowej,<sup>56</sup> plazmowe skupisko materii cechuje się ogromną dynamiką, czego odbiciem jest skrajnie wysoka częstotliwość oscylacji własnych. Jest mało prawdopodobna możliwość istnienia w niej stabilnych struktur. Z chwilą jednak pojawienia się uporządkowanych strumieni cząstek (a te mogą powstać nawet dzięki fluktuacjom),<sup>57</sup> powstają pola magnetyczne zdolne do dalszego porządkowania ośrodka plazmowego. Może więc zachodzić samoorganizacja plazmy,<sup>58</sup> a w tym kontekście można powiedzieć – samoorganizacja plazmowego tworzywa Wszechświata.<sup>59</sup>

Coraz skuteczniej zaczynają dochodzić do głosu siły przyciągania elektrostatycznego pomiędzy indywidualnymi przeciwnie naładowanymi cząstkami, wskutek czego dochodzi do ich rekombinacji. Po uformowaniu się najpierw lekkich, później także ciężkich jąder atomowych i wychwyceniu przez te jądra dostatecznej liczby elektronów formują się w plazmie atomy i cząsteczki. Wskutek dalszego ochładzania się ośrodka dochodzi do powstawania stabilnych bardzo różnorodnych cząsteczek, które mogą kondensować do fazy ciekłej, a później nawet do stałej. W tym ostatnim wypadku, jak to już wcześniej zauważono, plazma w niektórych typach układów może zaniknąć; w niektórych jednak, takich jak skupiska metali czy elektrolity w dalszym ciągu może współistnieć z fazą stałą lub ciekłą. Krótko mówiąc, materiał tworzący jakiś układ może kolejno przechodzić poprzez wszystkie stany skupienia, począwszy od stałego, a kończąc na plazmie, jeśli tylko zmieniać się będzie stosunek średniej energii kinetycznej przypadającej na jedną cząstkę ośrodka do średniej energii ich elektrostatycznego przyciągania się z inną cząstką naładowaną przeciwnie.

---

<sup>56</sup> Pominęto tu swoistości zachowania tworzywa Wszechświata, jakie trzeba by brać pod uwagę rozpatrując wcześniejsze – od czysto plazmowej – fazy przekształceń Wszechświata, a więc te, kiedy najpierw samo promieniowanie, później promieniowanie, kwarki i krótkozasięgowo siły jądrowe decydowały o własnościach Wszechświata.

<sup>57</sup> Dokładniej mówiąc: fluktuacje gęstości plazmy musiały powodować powstawanie różnicy potencjałów elektrycznych pomiędzy określonymi punktami przestrzeni. Pole to wymuszało przepływ prądu elektrycznego, co doprowadzało do powstawania odpowiednio zorientowanych pól magnetycznych.

<sup>58</sup> Do tej kategorii należy zaliczyć efekt np. pinczu plazmowego, wywołowany przekroczeniem przez gęstość strumienia ładunków w plazmie pewnej granicznej wartości. Plazma organizuje się przestrzennie np. w ciągły sznur lub „sznur koralii”.

<sup>59</sup> Nie można jednak zapominać, że samoorganizacja tworzywa kosmicznego dokonywała się także pod wpływem silnych oddziaływań jądrowych i grawitacji.

W rezultacie tego wielostopniowego procesu, przynajmniej na naszej planecie, doszło do uformowania się złożonych molekuł organicznych, stanowiących substrat znanego nam życia. Na drodze tzw. ewolucji chemicznej, później biologicznej, wykształciło się życie,<sup>60</sup> włączając w to wielkie bogactwo gatunkowe współczesnej biosfery. Trzeba jednak przypomnieć, że choć część prątworki Wszechświata osiągała stany coraz bardziej odległe od fazy początkowej, charakteryzujące się wysokim poziomem komplikacji i bardzo precyzyjnie działającymi układami utrzymywania stanu nierównoważenia termodynamicznego z otoczeniem, to prawie cała masa obserwowanego Wszechświata znajduje się dziś jeszcze w plazmowym stanie skupienia. Plazma ta bowiem w stanie „czystym” występuje w jądrach gwiazd i ich „atmosferach”. Pewna jej część pozostaje w połączeniu i z innymi stanami skupienia. Nie jest więc wykluczone, że stan plazmowy był i jest powiązany z układami żywymi, spełniając w nich znaczącą rolę. Będzie o tym mowa w następnych rozdziałach niniejszego opracowania.

Model Wielkiego Wybuchu, który jest obecnie najbardziej rozpowszechniony i akceptowany ze względu na przemawiające za nim dane obserwacyjne, nie stoi w sprzeczności<sup>61</sup> z teoriami głoszącymi, że Wszechświat mógł wielokrotnie podlegać fazom ekspansji (których początkiem mogły być Wielkie Wybuchy) i fazom kontrakcji. Tak więc model Wszechświata zakładający jeden tylko pierwotny wybuch lub modele dopuszczające wielokrotność tego zdarzenia pośrednio implikują tezę, że mógł przynajmniej jeden raz całkowicie przejść przez fazę pełnej dominacji plazmy, by później wyłonić z siebie wtórne, (ale powiązane z plazmą) stany skupienia. Pośród skonstruowanych przez kosmologów tzw. ewolucyjnych modeli Wszechświata istnieje grupa tzw. modeli pulsujących [Heller 1969; 1985 s. 112; Heller, Szydłowski 1983]. Zgodnie z nimi promień Wszechświata (a więc i średnia odległość pomiędzy cząstkami zawartej w nim materii)<sup>62</sup> w miarę upływu czasu narasta do pewnej wartości granicznej, po czym następuje faza jego zmniejszania się. Trwa ona aż do osiągnięcia pewnej minimalnej wartości, która w pewnych modelach jest jednoznaczna z osiągnięciem tzw. punktu (stanu) osobliwego, charakteryzującego się między innymi skrajnie dużymi wartościami ciśnienia i temperatury Wszechświata. Po „określonym czasie”<sup>63</sup> rozpoczyna się kolejny cykl wzrastania jego pro-

---

<sup>60</sup> Jakkolwiek nie należy to do głównego wątku zagadnień tu referowanych, warto wspomnieć o wyrażanych w drugiej połowie XIX wieku sugestiach E. Pflügera, W. Preyera i J. Tyndalla o zainicjowaniu życia przez ogień [Kreiner, Skowron 1957 s. 231, 232, 234].

<sup>61</sup> Trzeba tu przypomnieć, na co już wcześniej zwrócono uwagę, że wejście Wszechświata w „fazę” osobliwości likwiduje zupełnie wszelkie możliwości jego naukowego badania. Zgodnie z predylekcjami filozoficznymi czy religijnymi można prowadzić dociekania nad jego naturą w tej fazie istnienia, rozstrzygać o jednorazowości czy powtarzalności tego zdarzenia [Życiński 1979], co oczywiście będzie już wykraczać poza obszar kompetencji nauki.

<sup>62</sup> Zakładając jej stałą ilość we Wszechświecie.

<sup>63</sup> Określenie to jest oczywiście podwójnie mylące: po pierwsze, trudno mówić czy w hipotetycznej fazie skupienia materii Wszechświata w jednym punkcie istnieje czas, po drugie, nie bar-

mienia, w którego wczesnych etapach oddziaływania plazmowe posiadają ogromny udział. Tak więc pulsujące modele Wszechświata jako istotny element zawierają tezę o dwukrotnym przynajmniej przechodzeniu tworzywa konstytuującego Wszechświat przez fazę o zdecydowanej (a być może całkowitej) przewodze stanu plazmowego.

\*

\* \*

Plazmowy stan materii jest najbardziej rozpowszechnionym jej stanem, zarówno jeśli chodzi o jego udział w ogólnej masie obecnie istniejącego Wszechświata, jak również poprzednich faz jego przemian. Stanowi ją gaz, którego cząstkami są atomy i cząsteczki o różnym stopniu jonizacji. Często są nimi elektrony i zupełnie pozbawione elektronów jądra atomowe oraz nukleony. Na Ziemi pospolicie występuje plazma innego jeszcze rodzaju. Stanowią ją ruchliwe elektrony (lub luki po nich) ściśle powiązane z siecią atomową ciała w stałej fazie skupienia. Nosi ona miano plazmy ciała stałego.

Plazma posiada wiele własności, których nie stwierdza się w pozostałych stanach skupienia. Szczególnie ważną spośród nich jest zespołowe reagowanie całego zbiorowiska cząstek na zakłócenie stanu jego równowagi. W skupisku rozchodzą się wtedy różnorodne fale, następują wzajemne przekształcenia różnych postaci energii. Jeśli plazma znajduje się w ciele stałym – zachodzi także sprzężenie pomiędzy plazmą a procesami rozgrywającymi się w sieci atomowej.

Organizmy żywe są ośrodkiem, którego ważną część stanowi faza stała. Już w latach 60-tych XX w. niektórzy badacze zauważyli, że w takim ośrodku można się liczyć z występowaniem plazmy fizycznej i drgań charakterystycznych dla niej. Pomimo niezwykle szybkiego rozwoju badań nad plazmą fizyczną w różnych ośrodkach oraz nad różnymi zastosowaniami plazmy w technologii, sugestie te nie zostały rozwinięte przez ich autorów i doprowadzone do empirycznego testowania. Skojarzenie natomiast tez: 1) że nośniki ładunku w półprzewodnikach mogą konstituować plazmę oraz, że 2) w strukturach żywych może występować przewodnictwo elektronowe, stało się podstawą do zaproponowania dwu zbliżonych do siebie ujęć. Obydwa odnoszą się do plazmy swoistej dla układów żyjących, od pewnego czasu przez ich autorów nazywanej bioplazmą. Obydwa zostały scharakteryzowane w kolejnym rozdziale oraz w rozdziale następującym bezpośrednio po nim.

---

dzo wiadomo, według jakich procesów należałoby go odliczać [Heller 1985 s. 189/90].