

Eksperymenty Birkelanda z terrellą i ich znaczenie dla nowoczesnej synergii laboratoryjnej i kosmicznej fizyki plazmy

K. Rypdal i T. Brundtland

Departament Fizyki, Uniwersytet w Tromsø, 9037 Tromsø, Norwegia

Streszczenie. Prezentacja studiów ewolucji teorii Kristiana Birkelanda na temat kosmicznej fizyki, ze specjalnym uwzględnieniem jego eksperymentów laboratoryjnych wyładowań w gazach. Zauważono, że jego najważniejsze przemyślenia były kształtowane przez intensywne łączenie eksperymentów laboratoryjnych, obserwacji geofizycznych i modelowania matematycznego. Okazjonalnie, z niespodziewanych rezultatów w laboratorium wyrastały oryginalne pomysły o fundamentalnym znaczeniu dla kontekstu przestrzeni kosmicznej. Dyskutujemy możliwe implikacje dla interdyscyplinarnego podejścia do nowoczesnej fizyki plazmy.

1. Wprowadzenie

Chociaż fizyka plazmy pojawiła się jako niezależna dyscyplina naukowa w latach 50-tych, jej korzenie sięgają XIX wieku, czasów, zanim jeszcze został odkryty elektron przez J. J. Thomsona w 1897 r. W owym czasie nie było regularnej koncepcji czwartego stanu materii, ale kilku wielkich naukowców rozwijało poprzez laboratoryjne eksperymenty z tubami wyładowaniowymi oraz badania geofizyczne fundamentalne idee związane z plazmową naturą Słońca, przestrzeni międzyplanetarnej, oraz oddziaływań pomiędzy Słońcem a Ziemią. Gigantem pośród owych wizjonerów był norwesko fizyk i wynalazca Kristian Birkeland (1867-1917), którego wybitna praca naukowa uzyskała rosnące zrozumienie przez ostatnie dwie dekady aktywnej eksploracji kosmosu.

Chociaż współczesna nauka o kosmosie kontynuuje ponowne odkrywanie głębokiej prawdy zawartej w niektórych ideach Birkelanda, ciekawszym aspektem jego pracy może być interdyscyplinarne podejście badań naukowych. Birkeland gromadził i analizował informacje z szeregu dyscyplin badawczych, obecnie praktycznie ze sobą nie powiązanych, i poprzez śmiałe wnioskowanie oraz analogie proponował hipotezy, które nie doczekały się powszechnego zaakceptowania nawet 50 lat po jego śmierci. Pośród tych dyscyplin była teoria elektromagnetyzmu, inżynieria elektryczna, laboratoryjne wyładowania w gazie, geofizyka i astrofizyka. Podczas pierwszej dekady zakończeniu II Wojny Światowej, badania plazmy wyrosły jako nowa dziedzina, łącząca fundamentalne dyscypliny teorii elektromagnetycznej, mechaniki statystycznej, teorii kinetyki z astrofizyką, fizyką przestrzeni i nauką materiałową. Aczkolwiek, w ostatnich dwudziestu latach zdaje się następować upadek świadomości o nauce plazmy jako niezależnej, ale jednoczącej, dyscyplinie naukowej. Mamy tendencję do fragmentacji nauki o plazmie na specjalizacje, jak plazma fuzyjna, plazma kosmiczna, słabo zjonizowana plazma laboratoryjna oraz industrialne przetwarzanie plazmy, a wielu fizyków plazmowych uznaje za łatwiejsze sprzedanie się agencjom finansowym jako fizycy od fuzji, fizycy od kosmosu i



Rys. 1. Banknot 200-koronowy wypuszczony w 1996 roku w celu upamiętnienia stulecia hipotezy zorzy polarnej. Bezpośrednio z lewej od portretu Birkelanda widzimy łuk zorzowy od dołu, wznoszący się ku gwiazdzie polarnej. Można również zobaczyć szereg gwiazdozbiorów. Kryształ śniegu symbolizuje zimę, podczas której zorza jest obserwowana najczęściej. Najdalej po lewej znajduje się rysunek ostatniej i największej terrelli. Została ona odtworzona i jest wystawiona na widok publiczny w Uniwersytecie w Trondheim.

tak dalej. To z kolei prowadzi do zmniejszenia nacisku na podstawową fizykę plazmy, do bardziej specjalistycznych pism i konferencji, oraz do zmniejszenia interdyscyplinarności. Główną lekcją, jaką możemy się nauczyć od Birkelanda, oraz innych wybitnych twórców nauki plazmy, jest odzyskać wiarę w zjednoczenie i prostą naturę naszej nauki, oraz starać się zburzyć ściany, które wyrosły pomiędzy wyspecjalizowanymi obszarami.

2. Krótka biografia

Kristian Olaf Bernhard Birkeland urodzony został w Christianii (obecnie Oslo) w Norwegii 13-tego listopada 1867 roku. Studiował fizykę na Uniwersytecie w Christianii 1885-1890, a w latach 1890-93 pracował jako asystent badań na Uniwersytecie przy studiowaniu eksperymentalnym i teoretycznym propagacji fal elektromagnetycznych. W roku 1893 wyjechał za granicę, aby kontynuować swoje studia w Paryżu, Genewie, Bonn oraz Lipsku. W paryżu pracował z H. Poincaré'em, P. Appell'em, oraz E. Picard'em, dokonał też swoich pierwszych eksperymentów z promieniowaniem katodowym w monopolowym polu magnetycznym. W Szwajcarii współpracował z geofizykami jak E. Sarasin, i to przypuszczalnie tutaj Birkeland zdobył swoją pasję badań geomagnetyzmu i zorzy polarnej. W Bonn pracował w radio laboratorium Heinricha Herza. Nie utrzymał z nim owocnej współpracy, ponieważ Hertz był chory i zmarł wkrótce potem, współpracował jednak przez pewien czas z P. Lénardem.

Birkeland powrócił na stanowisko na Uniwersytecie w Christianii w 1895 roku i natychmiast zaczął eksperymentować z wyładowaniami w gazie i promieniami katodowymi. W 1896 przeprowadził eksperyment, w którym promienie katodowe były przyciągnięte przez biegun magnetyczne, co doprowadziło do

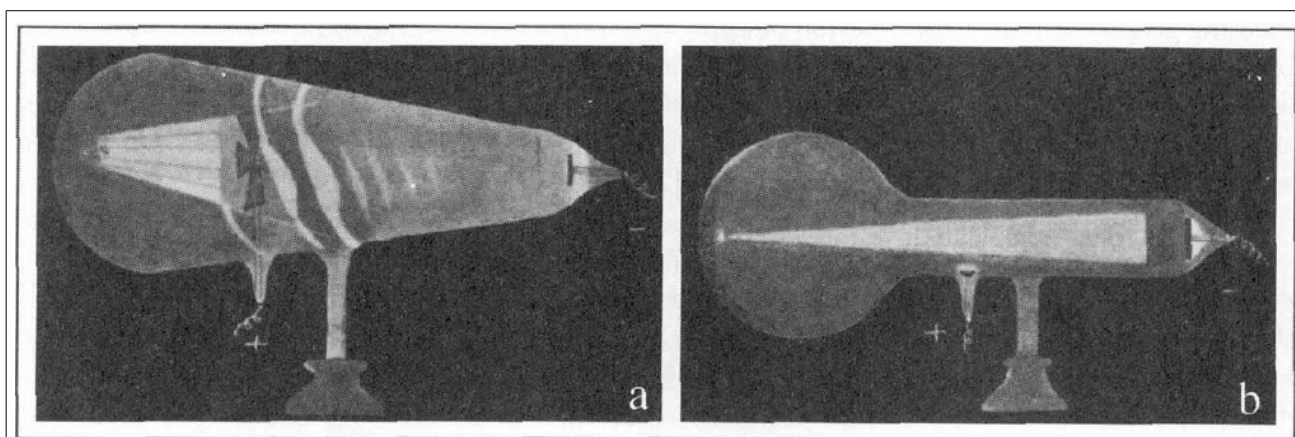
jarzenia się okolic tego bieguna, przypominając zorzę polarnąⁱ. Ta obserwacja ukształtowała jego hipotezę zorzy - zorza musi być tworzona przez promienie katodowe przyciągane przez ziemskie bieguny magnetyczne, oraz w taki, czy inny sposób, ta energia musi docierać ze Słońca. Sformułowanie tej hipotezy rozpoczęło okres intensywnego programu eksperymentów, obserwacji i teoretyzowania, aby odkryć sekrety Natury dotyczące pochodzenia zorzy, sztormów geomagnetycznych, aktywności słonecznej, komet, pierścieni planetarnych a nawet pochodzenia samego Układu Słonecznego. W 1996, w stulecie hipotezy zorzowej Birkelanda, został przez Bank Norwegii wydany banknot (rys. 1). Oprócz portretu Birkelanda, zawierał szereg szczegółów związanych z badaniami zorzy. W szczególności, można na nim zobaczyć rysunek ostatniej i największej terrelli do eksperymentów.

W okresie 1897-1903 Birkeland zorganizował trzy ekspedycje do Arktyki, aby dokonać pomiarów geomagnetycznych i geofizycznych. Podczas ostatniej ekspedycji, "Norweskiej Ekspedycji Zorzowej Polaris 1902-1903", założono w różnych miejscach Arktyki cztery obserwatoria, zbierające dane geofizyczne przez okres około roku. Dane te zostały przeanalizowane wraz z dużą ilością danych geomagnetycznych z całego świata oraz wynikami eksperymentów laboratoryjnych z terrellą. Dały one początek daleko idącym teoriom na temat przyczyn burz magnetycznych i ziemskiego magnetyzmu. Praca ta została podsumowana w 800-stronnicowym opracowaniu. Pierwsza część została opublikowana w 1908 roku, a następna w 1913ⁱⁱ.

Pierwsza seria eksperymentów z terrellą przeprowadzona została w latach 1900-1908 w szklanych tubach o różnym kształcie i rozmiarze. Przeprowadzane były pomiędzy i po wyprawach polarnych, i były oczywiście bardzo użytecznym narzędziem dla Birkelanda, gdy dążył on do odnalezienia sensu w ogromnej ilości zgromadzonych danych geofizycznych. Podczas pracy nad drugą częścią opracowania poczuł się ograniczony ograniczeniami tub do eksperymentów, więc rozpoczął budowę serii pudełkowych komór z płaskimi, szklanymi ścianami. Eksperymenty z czterema różnymi komorami o rosnącym rozmiarze zostały przeprowadzone w latach 1908-1913, a rezultaty zostały opublikowane w drugiej części opracowania.

W 1903 roku Birkeland rozpoczął współpracę z norweskim matematykiem i fizykiem zorzowym Carlem Størmerem. Henri Poincaré wiedział wówczas o wczesnych eksperymentach Birkeladna z z promieniami katodowymi z 1896 roku, i natychmiast zaprezentował rozwiązanie równania ruchu naładowanej cząstki w magnetycznym polu monopolowymⁱⁱⁱ. Birkeland poruszył dalej ten temat w eksperymentalno teoretycznej publikacji z 1898 roku^{iv}. Problem monopolu jest całkowalny, ale powiązany problem dipolowy już nie, i to właśnie ten problem Birkeland chciał, żeby utalentowany młody Størmer go rozwiązał. Dla Størmera zadanie to okazało się życiowym odkryciem a jego obliczenia stały się kamieniem milowym w teoriach Birkelanda^v.

W czasie swojej całej kariery, Birkeland spędzał sporo czasu na praktycznych, industrialnych badaniach i wynalazkach technicznych. Pośród swoich najbardziej znanych wynalazków znajduje się działo elektromagnetyczne oraz piec plazmowy do utleniania atmosferycznego azotu, który szybko został zaadoptowany przez najlepiej prosperujące norweskie fabryki. Birkeland dostał 59 patentów i na niektórych z nich zdobył znaczną fortunę. Pieniądze te wydał



Rys. 2. (a) Pierwsze wyprodukowanie sztucznej zorzy w marcu 1896. (b) Instalacja, której Birkeland użył do wypisania na okularach swoich inicjałów przy użyciu promieni katodowych.

w większości na swoje własne badania. Nie wszystkie jego idee weszły natychmiast do praktycznego zastosowania. Już w 1906 roku szukał on środków do rozpoczęcia projektu mającego na celu rozwijanie metod uwalniania energii atomowej.

Z końcem swojego krótkiego życia, zdrowie Birkelanda znacznie się pogorszyło. W 1913 roku przeniósł się na stałe do Egiptu, mając nadzieję, że ciepły klimat dobrze mu zrobi. Tutaj mógł on również studiować jedną ze swoich ostatnich pasji - światła zodiakalne. Aczkolwiek jego fizyczne i psychiczne zdrowie się nie poprawiło. W marcu 1917 roku zdecydował się wrócić do Norwegii, jednak nie przez ogarniętą wojną Europę, ale przez morze do Japonii a następnie koleją syberyjską. Chciał zatrzymać się kilka miesięcy w Japonii, ale 15-tego czerwca został znaleziony martwy w swoim pokoju hotelowym z pistoletem i małą paczką weronalu na stole^{1viviiviii}.

3. Pochodzenie i znaczenie hipotezy zorzy

Kiedy Birkeland wrócił do Norwegii latem 1895, był bardzo zainteresowany wyładowaniami w gazie, które były popularnym w owym czasie polem badań. Otrzymał stanowisko na uniwersytecie w wieku 28 lat, i w czasie gorączkowych miesięcy pod koniec 1895 założył laboratorium do badań wyładowań w gazach. Zaczął również przygotowywać kurs "wyładowania gazowe i eksperymenty", który miał wystartować w lutym 1896. W styczniu 1896 roku gazety na całym świecie rozpisywały się o nowym promieniowaniu odkrytym przez W. C. Röntgena w Niemczech^{ix}. W Christianii, Birkeland skomentował te doniesienia w artykułach z gazet^x. W mniej niż miesiąc po pierwszej publicznej demonstracji Röntgena, Birkeland zademonstrował promienie X grupie inżynierów, fizyków i lekarzy. 23 marca miał miejsce publiczny seans, podczas którego Birkeland mógł zaprezentować sztuczną zorzę w tubie wyładowaniowej w postaci "żarzenia powietrza w paskach, jak zorza, poprzez magnetyczny wpływ na promienie katodowe". Zasugerował również wysłanie klisz fotograficznych, wrażliwych tylko na promieniowanie katodowe, na duże wysokości w balonach, aby sprawdzić powiązania pomiędzy zorzą a promieniowaniem katodowym.

1 Po bardziej kompletnej biografii odsyłamy do dzieła A. Egeland i E. Leera "Profesor Kr. Birkeland: jego życie i praca", A. Egeland "Kristian Birkeland, człowiek i naukowiec", oraz do A. Egeland "Kristian Birkeland, mennesket og forskeren"

W kwietniu 1896 opublikował artykuł^{xi}, w którym opisał szereg różnych eksperymentów z wyładowaniami w gazach. Publikacja rozprawiała o soczewkach magnetycznych, spektrum magnetycznym oraz wyładowaniach, które mają znaczne podobieństwo do zorzy polarnej. W jednym z eksperymentów był w stanie skupić promienie katodowe przez zewnętrzne magnesy do rozmiarów igłowego punktu po wewnętrznej stronie szklanej ściany. Oddziaływanie takiej wiązki było tak intensywne, że gdy pozwoliło się mu przesunąć po szklanej powierzchni przesuwając magnesy, zostawiało ślad poprzez odłupywanie cząstek szkła ze ściany. Tą metodą można było pisać po szkle. Birkeland z łatwością mógł napisać wewnątrz swoje inicjały, Kr. B. Tuba wyładowaniowa użyta do tego eksperymentu pokazana jest na ilustracji 2.

Były to same w sobie bardzo ważne rezultaty, ale najbardziej dalekosiężne konsekwencje tej pracy eksperymentalnej zawarte zostały we wnioskach z ostatniego paragrafu:

"...Szereg razy opisywano fenomen, że promienie katodowe skierowane były ku biegunom magnetycznym. Obserwacja ta jest rozważana jako interesująca w połączeniu z teorią zorzy polarnej. Meteorolog duński Paulsen i rozważył, czy zorza nie jest fosforescencją powietrza pod wpływem promieni katodowych w wyższych warstwach atmosfery. Największą trudnością tej teorii jest wyjaśnienie, dlaczego te zjawiska są widoczne w okolicach biegunów, oraz skąd pochodzi energia dająca początek promieniom. Po tym, co zostało powiedziane, można założyć, że promienie są przyciągane przez bieguny magnetyczne Ziemi, oraz że w taki czy inny sposób energia ta dostarczana jest ze Słońca. Druga hipoteza wspierana jest co najmniej przez fakt, że dzienne wariacje zorzy, oraz cykliczne zmiany odpowiadają 11-letniemu cyklowi aktywności słonecznej."

Postawiona powyżej hipoteza nie jest całkiem nowa, konkurowała ona z bogactwem innych idei na temat pochodzenia zorzy. Około 1878 roku H. Bequerel sugerował, że cząstki są wystrzeliwane z plam słonecznych oraz są prowadzone przez ziemskie pole magnetyczne do obszarów biegunowych. Podobny pomysł zaproponował E. Goldstein. Tym, co odróżniało hipotezy Birkelanda, było dojście do tego poprzez kontrolowane eksperymenty. To uczyniło jego idee czymś więcej niż sugestiami, były to hipotezy sformułowane na bezpośrednich testach laboratoryjnych, i przez dwie dekady prowadziło go to przez coś, co było być może najszerszym programem eksperymentalno obserwacyjnym na świecie, aż do tej pory.

W pierwszych latach po sformułowaniu hipotezy zorzy, Birkeland przeprowadził więcej pracy nad eksperymentami z promieniami katodowymi i magnetyzmem. Miał szereg publikacji na ten temat, jednak równocześnie studiował plamy słoneczne i różne zjawiska kosmiczne. Napisał potem dumnie i z wielką satysfakcją, że J. J. Thomson w swojej klasycznej pracy o naturze promieni katodowych z 1897^{xii} wziął kilka odkryć z tego okresu jako punkty startowe w swoim dowodzie, że atom nie jest najmniejszą cząstką materii.

Birkeland, który w 1898 został profesorem, prowadził kampanię na rzecz otrzymania obserwatorium do studiów nad aurorą, założonego na górze Haldde, niedaleko Alty w północnej Norwegii. Rząd norweski dostarczył funduszy, a Birkeland wraz z asystentem zostali w budce obserwacyjnej na

szczycie góry na czas zimy 1899-1900. Wyniki tej ekspedycji opisane są w książce "Expedition Norvegienne 1899-1900"^{xiii}. Książka ta, opublikowana w 1901 roku, zawiera również rozdział o eksperymentach z wyładowaniami w gazach, przeprowadzonych w Christianii. Jednym z wielu eksperymentów opisanych tam jest instalacja wyładowcza, która ukazała spektakularne zjawiska elektrostatyczne. Birkeland mógł prowadzić widoczne wyładowania po szklanej ścianie poprzez przyłożenie z zewnątrz palca, podobnie, jak to ma miejsce we współczesnych ozdobnych "kulach plazmowych".

Opisał również eksperyment z tubą wyładowań sferycznych, umieszczoną na szczycie dużego elektromagnesu, z anodą ulokowaną na szczycie tuby. Z takim układem udało mu się stworzyć kilka wyładowań o porywającym pięknie, tańczących jak pasma zorzy. Podsumował ten eksperyment następującą frazą:

"Wytworzone pasma są więc tak analogiczne do pasm zorzy, że będąc świadkami tego eksperymentu, bez cienia wątpliwości, widzimy, że te dwa zjawiska są ściśle powiązane."

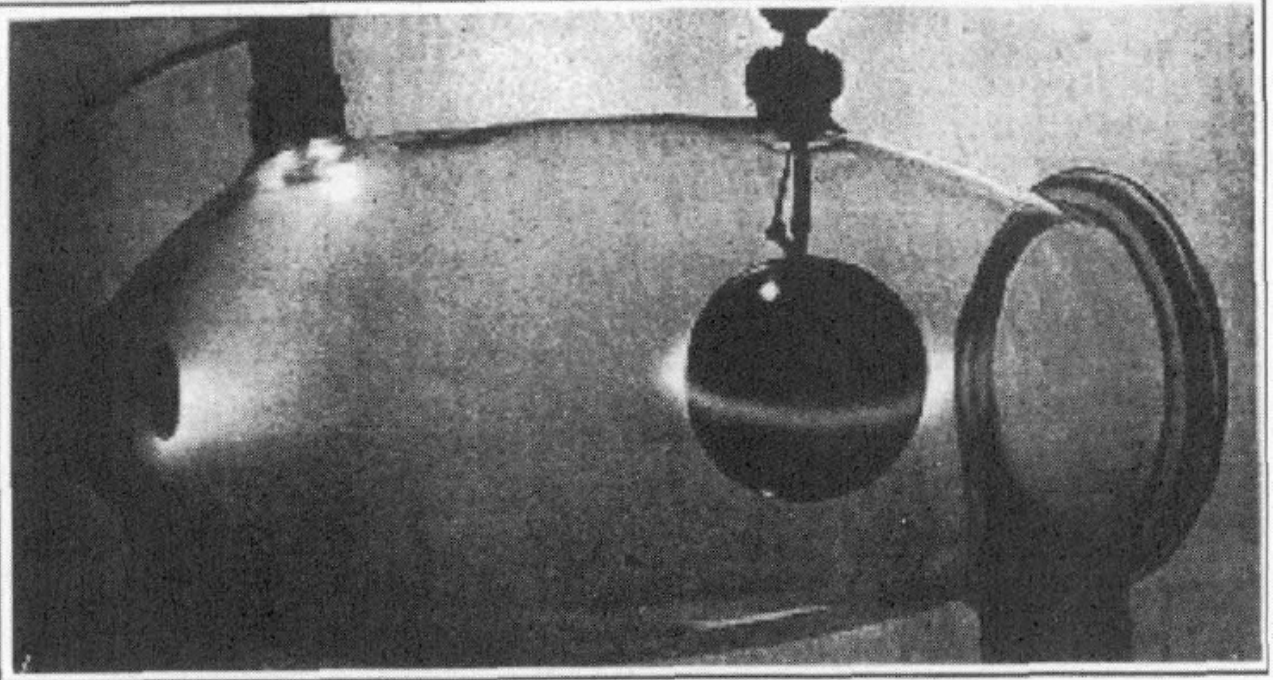
Wraz z tym udanym eksperymentem, okres aktywności w laboratorium Birkelanda dobiegł końca. Po czterech latach ciężkiej pracy z klasycznymi tubami do wyładowań w gazach, studiowania promieni X, wpływu magnesu na promienie katodowe oraz wyładowania odtwarzające zorzę polarną, przeszedł teraz do nowej klasy eksperymentów. Podczas hibernacji na szczycie góry na północy, zrodziły się w nim większe idee.

4. Ewolucja eksperymentów i idei

W październiku 1900, norweskie pismo o inżynierii elektrycznej, "Elektroteknisk Tidsskrift", zamieściło notkę pt. "Zorzowa Wyprawa". Zawierała ona krótki opis drugiej wyprawy Birkelanda do Arktyki. Birkeland był wówczas z powrotem w Christianii i przeprowadził już kilka eksperymentów ze "sferycznym elektromagnesem". Chciał przetestować niektóre szczegóły swojej teorii zorzy, bazując na niedawnych obserwacjach z ekspedycji. W dwóch instalacjach do wyładowań gazowych otrzymał rezultaty, które zinterpretował jako prądy wirujące wokół metalowej sfery pomalowanej fosforyzującym materiałem, z elektromagnesem w środku. Za każdym razem sfera symulowała Ziemię z jej polem magnetycznym. Prądy były generowane przez zimne wyładowanie katodowe pomiędzy elektrodami w tubie i były widoczne na terrelli jako iluminacja fosforyzującej farby oraz jako kliny światła z zagnieżdżonymi promieniami w rozrzedzonym gazie. Mógł zobaczyć dwa wąskie pierścienie światła wokół biegunów sfery, co zinterpretował jako zorzę w miniaturze. Obserwacje w Arktyce w połączeniu z udanymi eksperymentami były wielkim krokiem Birkelanda w stronę weryfikacji jego hipotezy zorzy.

W książce z ekspedycjixiii, opublikowanej następnej wiosny, zawarty był rozdział opisujący szczegóły tych eksperymentów. Później nazwał sferyczny elektromagnes terrellą (mała Ziemia), na wzór małych magnesów lub kawałków magnetytu używanych jako modele Ziemi używanych w szesnastym stuleciu przez Williama Gilberta (1540-1603) oraz opisanych w jego książce "De Magnete"^{xiv}.

Pomysł użycia magnesowalnej sfery w wyładowaniu gazowym otworzył nowe wielkie pole badań Birkelanda. Prawie cała jego przyszła fizyka laboratoryjna

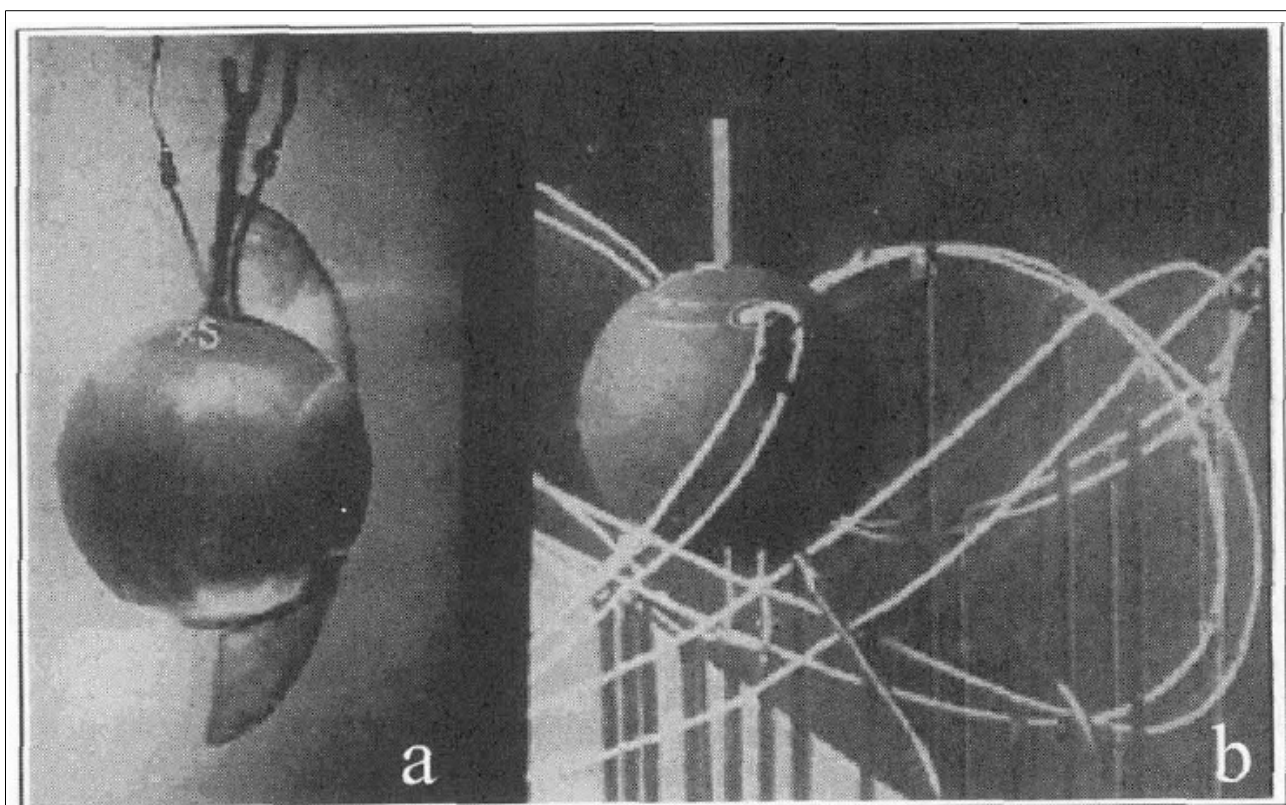


Il. 3. Ta symulacja "równikowych pierścieni światła" przeprowadzona została w pierwszej, 12-litrowej szklanej tubie z 10-cio centymetrową terrellą. Była ona wzbudzona przez maszynę indukcyjną dającą 6000V, przy prądzie magnetyzującym 10A. W tym eksperymencie poprowadzono wyładowanie pomiędzy katodą (z lewej) a oddzieloną anodą (na górze po lewej). Ponieważ nie podano schematu obwodu, potencjał powierzchni terrelli jest nieznany.

skupiona była na tej miniaturowej Ziemi. W gorączkowych latach 1900-1913 użył do różnych celów wielu terrelli, o różnej wielkości i kształcie. Oprócz wytwarzania sztucznej zorzy, symulował również zjawiska słoneczne, komety oraz pierścienie Saturna. Dziesięć różnych terrelli opisywanych było jako mających średnicę od 2,5 do 36 cm. W pierwszych eksperymentach, przeprowadzonych jesienią 1900, Birkeland używał dwóch terrelli, o średnicach 5 i 7,5 cm. Elektromagnesy z rdzeniem i uzwojeniami były kształtu sferycznego i pokryte były cienką warstwą mosiądzu powleczoneą platyno-cyjankiem baru. Birkeland dobrze wiedział, że nie może osiągnąć znacznego podobieństwa do naturalnych warunków magnetycznych. Z terrellą o średnicy 7,5 cm, a więc $1,7 \times 10^8$ mniejszą od Ziemi, wymagałoby to analogicznego pola magnetycznego otaczającego sferę silniejszego $1,7 \times 10^8$ razy od pola geomagnetycznego, co było niemożliwe w praktyce. Na szczęście zauważył, że świecące zjawiska nie zmieniają się zbyt wiele wraz z siłą magnetyczną terrelli, dzięki czemu siła faktycznie osiągnięta mogła być brana pod uwagę.

Wszystkie pozostałe eksperymenty Birkelanda z terrellami opisane zostały w opracowaniu z trzeciej ekspedycji, zawierającym jego pracę laboratoryjną z lat 1901-1913. Wiele z tych eksperymentów przeprowadzonych było na terrellach, w których uzwojenia, a więc i oś pola magnetycznego, były nachylone do osi pionowej. Podczas tych eksperymentów mógł obracać terrellę wokół osi pionowej, studiując w ten sposób efekt mimośrodowy biegunów magnetycznych Ziemi.

Na początku systematycznych eksperymentów z terrellami, używał cylindrycznych tub o pojemności około 12 litrów, jak przedstawiono na ilustracji



Ilustracja 4. Porównanie eksperymentu z terrellą (z lewej), a modelem pokazującym obliczone przez profesora Størmera trajektorie dla tego eksperymentu. Został on przeprowadzony w lipcu 1907, w pierwszej, 12-litrowej szklanej tubie, i pokazał świecące regiony wzdłuż "strefy zorzowej". Obliczone trajektorie dotyczą cząstek startujących w różnych kierunkach w pozycji odpowiadającej katodzie, z energiami odpowiednimi do woltażu wyładowania.

3. Eksperymenty z tymi tubami posłużyły również do porównania orbit obliczonych przez Carla Størmera. Dla bezpośredniego porównania zbudowano druczany model dla wizualizacji orbit w kosmosie, jak na ilustracji 4.

Podczas symulowania zorzy w laboratorium, Birkeland musiał dać terrelli jakąś atmosferę. Ten problem został rozwiązany kilkoma sposobami. Podczas wczesnych wyładowań powierzchnię terrelli pokrywano fosforyzującą farbą, która zaczynała świecić po wpływie promieni katodowych. Później opisał inną metodę, pozwalającą w łatwiejszy sposób zaobserwować promienie w otaczającej przestrzeni. Przy przepuszczaniu dużego prądu przez magnetyzujące uzwojenia, terrella się nagrzewa i wydziela gaz. Wówczas obniżał natężenie pola magnetycznego do żądanej wartości, wywoływał wyładowanie i robił zdjęcia. Trzecią metodą było pokryć powierzchnię cienką warstwą tłoczonych oliwy, która parowała podczas wyładowania.

Na ilustracji 4 pokazana jest terrella z dużym, pionowym ekranem. Przy mało intensywnych wyładowaniach zauważenie, w którym miejscu promienie katodowe trafiają w terrellę możliwe było tylko z fosforyzującą powierzchnią. W celu zaobserwowania, jaką trajektorie miały promienie przed trafieniem w sferę, wstawiano powierzchnie (zwane przez Birkelanda ekranami), również pokryte materiałem fosforyzującym. Były tam ekrany pionowe i poziome, z dziurami i szczelinami, szeregiem do ośmiu ekranów na jednej terrelli, ekranów

z kołkami, kombinacjami ekranów i kołków wystających z powierzchni terrelli, i wiele innych. Kołki rzucały cienie, które pomagały uzyskać informacje o ścieżkach promieni.

Od 1895 do 1907 roku, wszystkie eksperymenty Birkelanda, włącznie ze studiami aurory, przeprowadzane były w delikatnych komorach, w których refrakcja światła na krzywiznach szkła prowadziła do zniekształceń obrazu na zdjęciach. Chcąc wyeliminować to niedociągnięcie, zaprojektował nową, eksperymentalną komorę w formie pudła, z górami i dołami wykonanymi z płyt metalowych, oraz z oknami z czterech stron. Całkowita pojemność jego nowej komory wynosiła 22 litry, okna miały powierzchnię około 20×45 cm oraz 20×25 cm, przy grubości 2 cm. Były zespolone ze sobą przy pomocy "Cementium", a cała komora została wykończona od zewnątrz smołopodobnym, czarnym uszczelniaczem. Z tak udoskonaloną konstrukcją, Birkeland kontynuował badania nad wyładowaniami, celem ustalenia dokładnych dróg, jakimi promienie docierają do terrelli. Jednym z powodów dla kontynuowania przez niego eksperymentów na tym polu był sceptycyzm wobec idealizowanego modelu matematycznego. Tak długo, jak modele matematyczne nie są doskonałe, użyteczność takich obliczeń jest ograniczona - stwierdził, zwracając się do Størmera.

W tym czasie, w zimie 1910 - 1911, zainteresowania laboratoryjne Birkelanda przeniosły się z zorzy na zjawiska solarne i kosmiczne. Zaczął z kilkoma całkiem nowymi eksperymentami w 22-litrowej komorze, symulującymi Słońce, Saturna i warkocze kometarne.

W szeregu spośród swoich eksperymentów, Birkeland otrzymał zjawiska, mogące służyć za punkt startowy w wyjaśnianiu światła zodiakalnego. Chodzi o poświatę, widoczną na nocnym niebie po zachodzie Słońca, oraz przed jego wschodem, na niskich wysokościach. Wierzył, że światło to również jest spowodowane wyładowaniami, podobnie jak zorza, i próbował uzyskać je w laboratorium. Ten eksperymentalny układ był podobny do tego dla zorzy, ale zmianie uległa polaryzacja wyładowania. To terrella, bez fosforyzującej warstwy, była teraz ujemna i służyła za katodę, symulując Słońce. Jako anod użył jednego lub dwóch aluminiowych dysków.

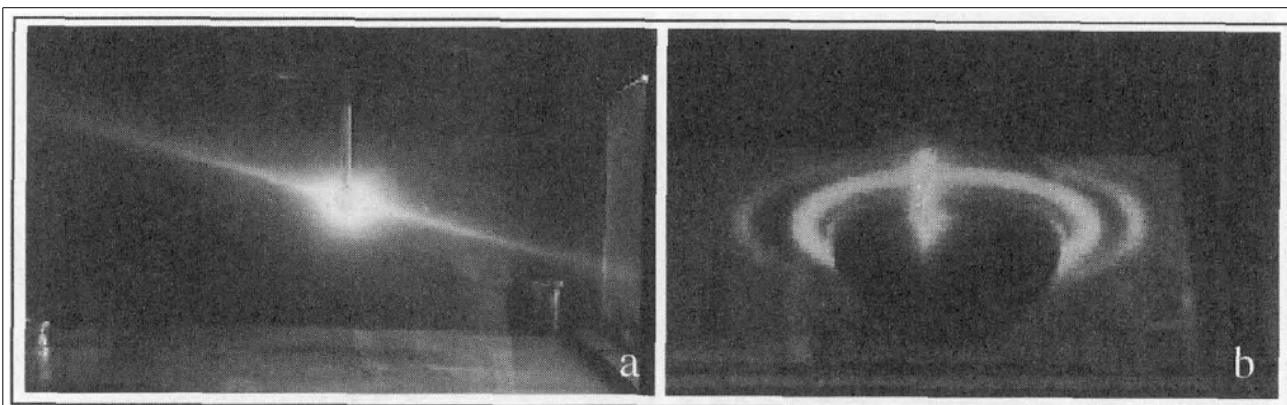
Tak daleko, jak można wywnioskować z tekstu, był to jego zwykły sposób na podłączanie urządzenia, podczas symulacji światła zodiakalnego, plamami słonecznych czy pierścieni Saturna. Jego wyjaśnieniem światła zodiakalnego była chmura "pyłu atomowego", pochodzącego od Słońca, rozciągająca się cienką warstwą w płaszczyźnie równikowej Słońca, i oświetlana jakimiś wyładowaniami kosmicznymi. Po raz pierwszy zademonstrował to wyładowaniami na ośmio centymetrowej terrelli. Z silnie namagnesowaną terrellą, oraz niewielkim prądem wyładowania, mógł stworzyć cienkie, płaskie, świecące wyładowanie w pasie równikowym terrelli. W idealnych warunkach mógł stworzyć płaskie pierścienie gwałtownie ucinane szklanymi oknami. Napisał, że gdyby posiadał odpowiednie ilości czystego bromku radu, mógłby pokryć nim równik najbardziej namagnesowanej terrelli i zobaczyć, gdzie tworzą się pierścienie promieni α i β . Komentarz ten przedstawiał przeważającą wówczas koncepcję materii jako złożonej z neutralnych atomów oraz trzech rodzajów promieniowania korpuskularnego. Aczkolwiek później Birkeland wyraził ideę materii międzyplanetarnej zbliżoną do współczesnej koncepcji

pyłowej plazmy.

W 1910, podczas przelotu komety Halley'a, Birkeland sformułował wyjaśnienie formowania się ogonów kometarnych. Zasugerował, że komety, zbliżając się do Słońca, otrzymują bardzo silny ładunek ujemny od promieni katodowych emanujących z okolic plam słonecznych. Powstaje powiązanie anoda-katoda i dochodzi do wyładowania z jądra komety do otaczającego ją gazu. Ta teoria również została przetestowana w laboratorium. Wiercono, że jądra komet są węglowe, przeprowadził więc serię eksperymentów z węglem w różnych konfiguracjach nad metaliczną katodą w pojemniku próżniowym. Gwałtowna dezintegracja i emisje światła potwierdziły pomysł Birkelanda, że widocznym ogonem komety jest gaz "zapalony" wyładowaniem. Symulował również komety za pomocą cienkiej, wydrążonej srebrnej igły, penetrującej komorę próżniową od zewnątrz. W trakcie pompowania, robiąc słaby wiatr z CO₂ przez igłę do otaczającej przestrzeni, doprowadził do wyładowania pomiędzy igłą a anodą. Igła działała jak katoda. Przez ostrożne regulowanie przepływu gazu i woltażu wyładowań, mógł otrzymać cienkie snopy światła, wystrzeliwujące z "komety".

W opisie swojego pierwszego eksperymentu z terrellą w 1900 roku, Birkeland wspomniął, że w niektórych eksperymentach widział trzy świecące pierścienie wokół terrelli. Poza pierścieniami w regionach polarnych, mógł też czasem zaobserwować trzeci, otaczający model Ziemi niemal jak pierścienie Saturna. Później, podczas swoich systematycznych studiów nad laboratoryjną zorzą, znów opisał ten fenomen, raczej trudny do odtworzenia w jego standardowych warunkach eksperymentalnych. Dziesięć lat potem rozpoczął systematyczne symulacje pierścieni Saturna. Zauważył, że łatwo je wytworzyć poprzez zmianę polaryzacji wyładowania. W istocie była to ta sama instalacja, której użył do symulacji światła zodiakalnego, tylko parametry wyładowania były inne. W nowej, 70-litrowej pudełkowej komorze wytworzył wyładowanie zawierające trzy, a czasem do pięciu równikowych pierścieni wokół terrelli. Jego wyjaśnienie tych pierścieni było podobne do światła zodiakalnego. Stałemu *promieniowaniu elektrycznemu* z planety towarzyszy wyrzucanie małych cząstek materiału, co nazwał *parowaniem elektrycznym*. Cząstki te tworzą pierścień. Laboratoryjną analogią tego procesu jest to, co dzisiaj nazywamy *pryskaniem*. Eksperymenty z terrellą, symulujące światło zodiakalne i pierścienie Saturna, są przedstawione na il. 5.

W celu studiowania zjawiska pryskania, Birkeland przeprowadził szereg eksperymentów w słoiku próżniowym z silnym polem magnetycznym. Prześledził dezintegrację katod z palladu w potężnych wyładowaniach oraz odkładanie się palladu na szklanych ścianach. Innymi słowy wykazał, że materiał może być wybrany z aktywnej katody i poprowadzony polem magnetycznym. Również w przypadku katodowego globu, będącego katodą w komorze próżniowej, materiał był wyrzucany w płaszczyźnie równika. Wydedukował to z ciemnienia szklanych ekranów ustawionych w pobliżu terrelli. Podsumował swoje studia stwierdzeniem, że Saturn każdego dnia wyrzuca w płaszczyźnie pierścieni tony materii, przez co pierścienie są ciągle odnawiane. Spekulował również, że księżyce planet mogły zostać utworzone przez wyrzuconą w ten sposób materię. Pod wpływem siły grawitacji, pył pierścieni Saturna mogą się zbijać razem, formując więcej księżyców, a pyłowe pierścienie mogą zaniknąć. Również planety słoneczne mogły utworzyć się z



Ilustracja 5. (a) Światło zodiakalne. Pośrodku zdjęcia mamy najmniejszą terrellę, 2,5-centymetrową, jako Słońce. Terrella otoczona jest poświatą, koroną słoneczną, a światło zodiakalne widoczne jest jako cienki dysk światła w płaszczyźnie równikowej terrelli. (b) Pierścienie Saturna. Ten eksperyment przeprowadzono w komorze 320-litrowej, z terrellą o średnicy 24 cm. Terrella służyła za katodę i była silnie namagnesowana.

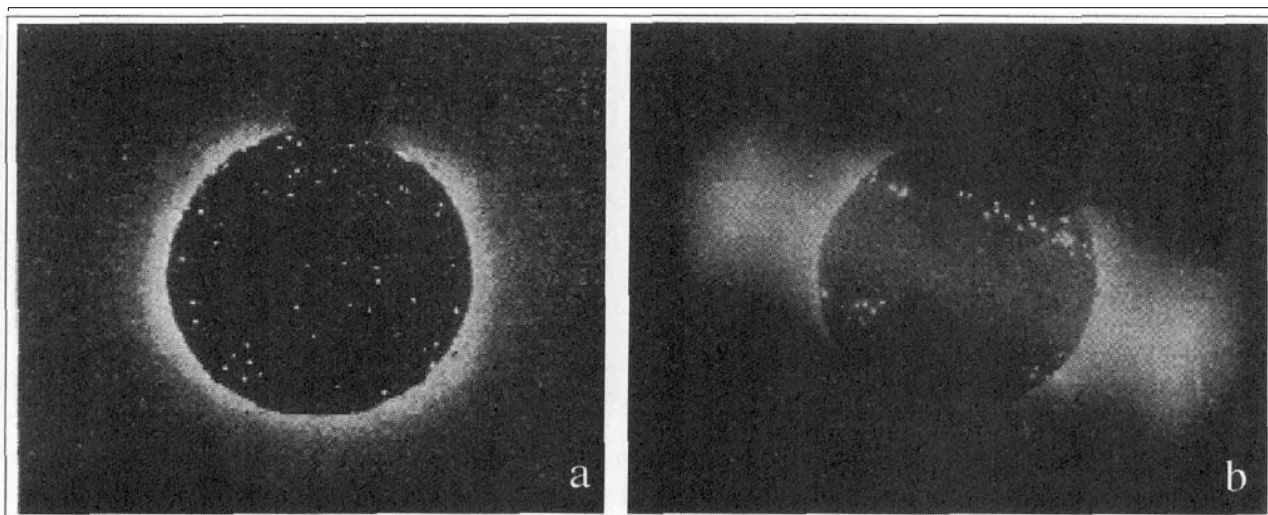
materii wyrzuconej elektrycznie ze Słońca.

Eksperymenty symulujące światło zodiakalne i pierścienie Saturna doprowadziły Birkelanda do odkryć wielkiej wagi. W ciągu lat drążenia rozwinął wspaniałą teorię o początkach Układu Słonecznego^{xv}. Wierzył, że plamy słoneczne są podstawami niszczących wyładowań elektrycznych ze Słońca w przestrzeń, co było przyczyną zorzy, światła zodiakalnego, a nawet planet. Podczas wcześniejszych eksperymentów widział, jak wyładowania te mogą promieniować z punktów na powierzchni katodowej terrelli. Przy niskim ciśnieniu gazu, wysokim prądzie wyładowania i braku pola magnetycznego wokół terralli, potrafił spowodować łuki elektryczne z punktów na powierzchni do płaszczyzny anody lub ścian komory. To znów była ta sama konfiguracja, co przy świetle zodiakalnym i pierścieniach, ale z innymi wartościami parametrów.

Owe punktowe wyładowania, rozrzucone po całej powierzchni terrelli, zostały zinterpretowane przez Birkelanda jako modele plam słonecznych. Zaobserwował, że plamy są łatwiejsze do wytworzenia, gdy powierzchnia jest chropowata. Przy dodaniu pola magnetycznego do terrelli, zauważył, że plamy grupują się w dwie strefy na tych samych szerokościach północnej i południowej. Poprzez zwiększanie pola magnetycznego, strefy te zbliżały się do równika. Przy zwiększonym polu magnetycznym, plamy zmieniały się w świecące obwódki, złączone na równiku.

Po przeprowadzeniu wyładowań, Birkeland wyjmował terrellę i badał ją pod mikroskopem. Zauważył małe kraterki w miejscach plam wyładowań. Ta obserwacja doprowadziła go do wniosku, że masa słoneczna jest wyrzucana w przestrzeń podczas rozbłysków słonecznych. Część *pyłu atomowego* opadała z powrotem na Słońce, część przepadała w przestrzeni, a część pozostawała na orbicie, powoli się zlepiając i tworząc planety. Rozważał pas asteroid jako masę wópł drogi pomiędzy byciem pyłem a planetami.

Przy zwiększonym ciśnieniu gazu, snopy promieni nie były już dłużej emitowane radialnie z powierzchni globu, lecz przyjmowały gwiazdkowate kształty lub wiry wokół wybuchowych plam. Uznał to zjawisko za bardzo ważne i próbował je



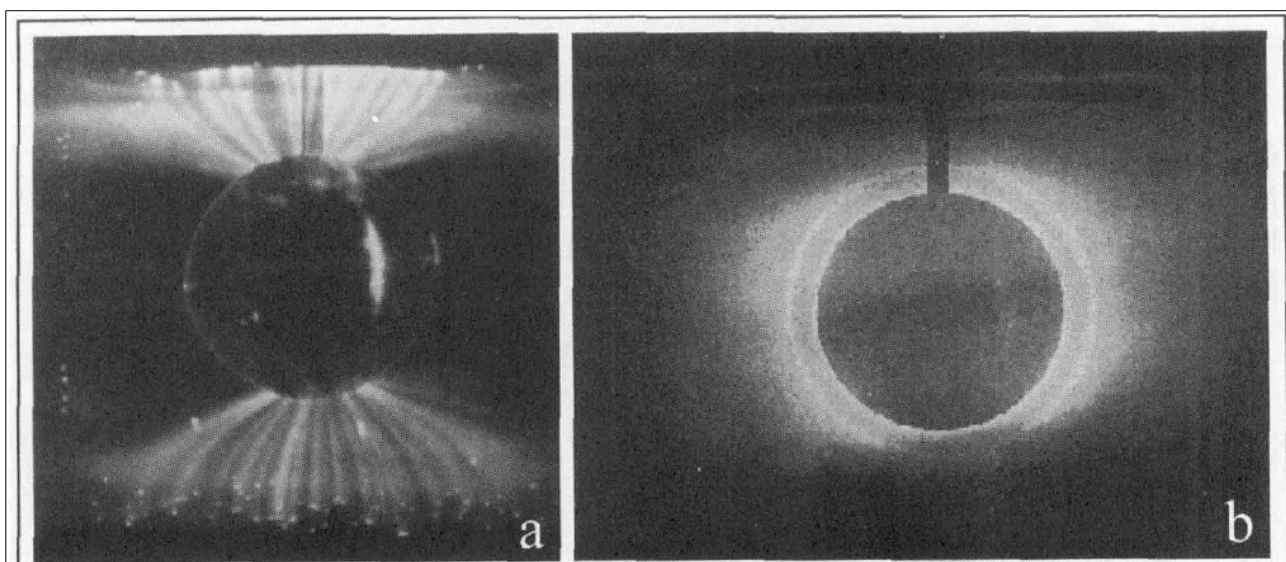
Ilustracja 6. Zdjęcia przedstawiają "plamy słoneczne" na jednej z mniejszych terrelli. Plamy są gorącymi punktami na chropowatej powierzchni katody (terrelli) w wysoko prądowym wyładowaniu. Przy braku pola magnetycznego plamy są równomiernie rozrzucone po terrelli (z lewej). Z polem magnetycznym są skoncentrowane w dwóch pasach (z prawej).

sfotografować. Jednak jego komory próżniowe nie pracowały zgodnie z jego oczekiwaniami, zbudował więc nową, 320-litrową, w której kontynuował swoje symulacje plam, używając teraz 24-centymetrowej terrelli. Okazało się, że w tej komorze nie jest wcale łatwiej wytworzyć plamy w konwencjonalny sposób, lecz można było łatwo wytworzyć plamo-podobne wyładowania przez odwrócenie polaryzacji. Z globem jako anodą, oraz z chropowatymi, niepolerowanymi dołem i górą komory jako katodą, mógł wytworzyć "fajerwerki" punktowych wyładowań z podstawami w płytach komory.

Przy konfiguracji o niskim ciśnieniu, braku pola magnetycznego terrelli oraz niskim prądzie wyładowania, powstawało zjawisko, w którym cała terrella była pokryta jarzeniem katodowym. Było to pisane przez Birkelanda jako "światło przypominające koronę". W tej 320-litrowej komorze przeprowadził eksperymenty nad światłem zodiakalnym, pierścieniami Saturna, plamami słonecznymi, koroną słoneczną i kosmicznym napędem promieni katodowych. Aczkolwiek, gdy eksperymenty stały się bardziej wyrafinowane, posiadanie sufitu oraz podłogi z magnetyzowalnej stali stało się wadą. Problem ten mógł być rozwiązany tylko zastosowaniem innego stopu i dalszym powiększeniem terrelli. Jego kolejna komora miała pojemność 1000 litrów i posiadała 36-centymetrową terrellę. Tym razem podłoga i sufit były z brązu, a grubość szklanych ścian była zaprojektowana na 5 cm.

Birkeland wyraził zadowolenie i radość z prostoty i piękna eksperymentów w tej komorze. Odnosił, że gdy zwiększyła się skala, eksperymenty stały się bardziej interesujące. Wystarczyło teraz spojrzenie, aby pokazać występowanie zjawisk, których przedtem z trudnością można było się tylko domyślać z długiej serii eksperymentów. Jedyna symulacja zorzy w tej komorze opisana była jako "wybitnie piękna".

Studia nad symulowanymi zjawiskami słonecznymi oraz kosmicznymi nie były już przeprowadzane tak systematycznie, jak nad zorzą. Dane z eksperymentów stały się bardziej przestraszające [?], i prawie zupełnie nieobecne w jego



Ilustracja 7. (a) wyładowania punktowe zrobione w 320-litrowej komorze z górną i dolną powierzchnią jako katodami, oraz 24-centymetrową terrellą jako anodą. (b) Symulacja korony słonecznej, przeprowadzona z 24-cm terrellą i bardzo niewielkim polem magnetycznym.

ostatnim eksperymencie w największej komorze. Można by odnieść wrażenie, że rozważał teraz widoki pomiędzy szklanymi ścianami oraz ich podobieństwo do zjawisk naturalnych jako wystarczające potwierdzenie swoich teorii. Zbliżył się do punktu wyjścia z roku 1896, kiedy to traktował eksperymenty jako *generator pomysłów*, zdając sobie sprawę, że nie może modelować jednocześnie wszystkich aspektów zjawisk kosmicznych w szklanym pudle. Jego wielkie spekulacje na temat "pochodzenia światów" były niewątpliwie inspirowane doświadczeniami z terrellą, ale oczywiście nie było sposobu, żeby zasymulować formację układu słonecznego i planet w jego laboratorium.

Z opisów jego ostatnich eksperymentów można też wywnioskować, że nie miał już dłużej cierpliwości i samodyscypliny do przeprowadzania serii dokładnych i systematycznych prac laboratoryjnych, pomimo wielkiego doświadczenia, jakiego nabrał w technikach eksperymentalnych podczas poprzednich dekad. Nie jest wykluczone, że jego rozwój związany był ze zmianą zainteresowań ku bardziej kosmologicznym problemom, które nie sposób było dokładnie zbadać w laboratorium. Aczkolwiek jest również możliwe, że było to odbiciem jego zmniejszonej wydolności fizyczno umysłowej, która w roku 1913 stawała się już zauważalna.

Diagnostyka eksperymentów z terrellą i wyładowaniami ograniczona była do wizualnej rejestracji oraz fotografii, co jest oczywiście spowodowane faktem, że bardziej wyrafinowane narzędzie diagnostyczne nie istniało, dopóki I. Langmuir nie wynalazł elektrostatycznej probówki plazmy w 1923. To właśnie Langmuir po raz pierwszy użył słowa *plazma* w kontekście zjonizowanego gazu, wskazując przez to potrzebę na zgodne traktowanie cząstek i pól oraz wagę efektów złożonych. Birkeland dobrze sobie zdawał sprawę z niedociągnięć ze śledzenia cząstek w danym polu, a w swojej pracy o Układzie Słonecznym walczył rozwijając nowe koncepcje medium zawierającego dodatnie i ujemne cząstki oraz pył, podlegające siłom elektrycznym oraz magnetycznym. Używał szerokiej terminologii na opisanie ośrodka wypełniającego jego komory wyładowaniowe oraz przestrzeń międzyplanetarną. Przy różnych okazjach używał

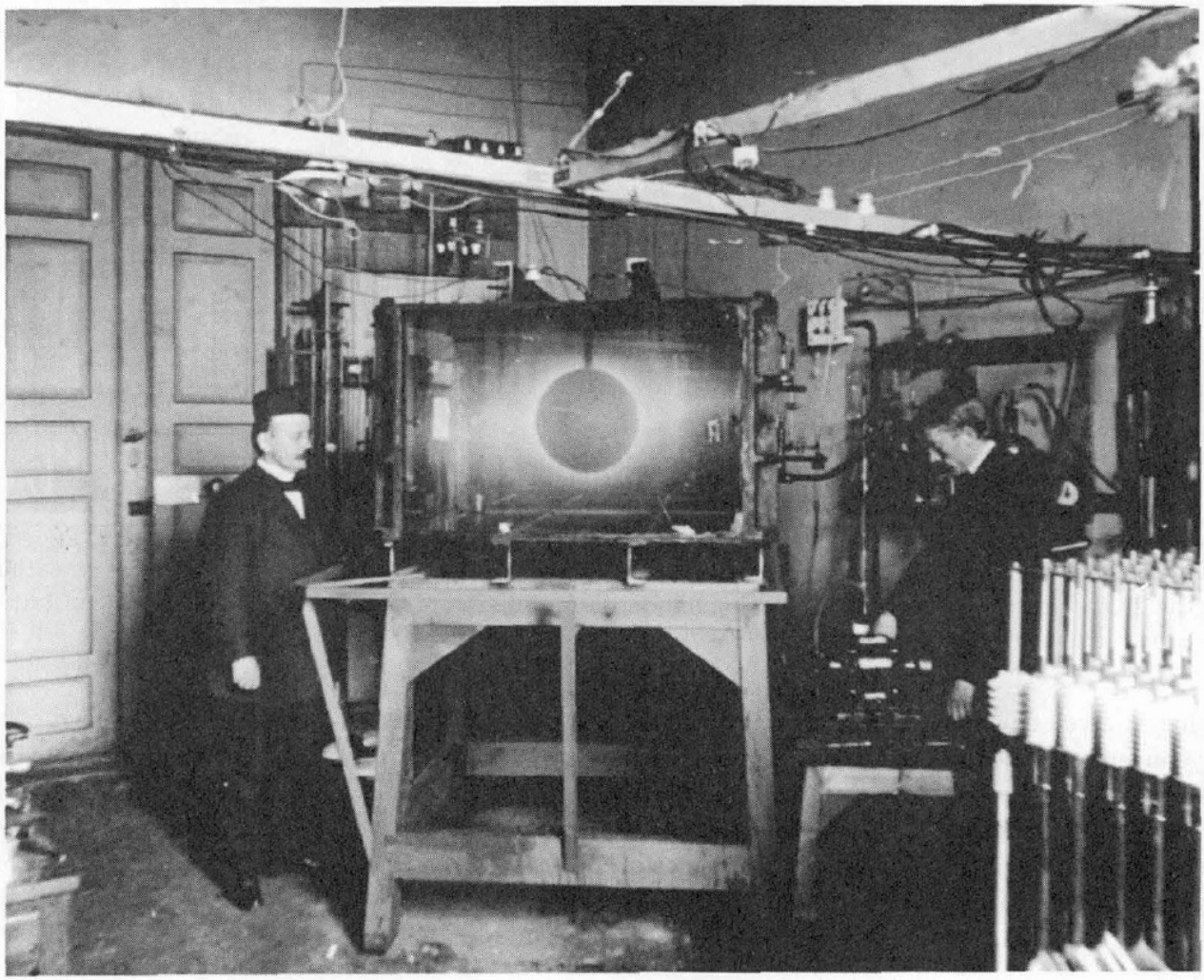
takich określeń, jak *świeący* lub *rozrzedzony gaz*, promieniująca materia, czy *czwarty stan materii*, w miejscach, gdzie współcześni pisarze użyli by słowa *plazma*.

5. Odniesienie wyników laboratoryjnych do obserwacji geofizycznych

5 kwietnia 1741 roku, O. P. Hiorter w Uppsali odkrył, że pojawienie się zorzy zdaje się zaburzać igłę magnetyczną, a w 1826 H. C. Ørsted wyjaśnił to jako wyładowanie elektryczne wzdłuż łuku zorzowego. W 1770 J. C. Wilcke zanotował, że promienie zorzowe rozchodzą się w górę wzdłuż pola magnetycznego. A zatem, w czasach Birkelanda geofizycy byli dobrze poinformowani o możliwych bliskich konotacjach aurory z geofizycznymi perturbacjami magnetycznymi. W okresie 1825 - 1850 H. Schwabe dokonywał systematycznych rejestracji plam słonecznych, i w 1844 odkrył cykl plam słonecznych. Szybko zauważono, że występowanie aurory jest ściśle związane z tym cyklem, a w 1851 E. Sabine pokazał, że intensywność zaburzeń geomagnetycznych również zmienia się w zależności od cyklu plam słonecznych. W pierwszej połowie XIX wieku rozwinięto globalną sieć szeroko rozmieszczonych magnetometrów, rozrzuconych po wszystkich brytyjskich koloniach, oraz znaleziono metodę oddzielenia wpływów na pole geomagnetyczne ze strony prądów wewnątrz Ziemi oraz tych powstających wysoko w atmosferze.

Po zapoczątkowaniu swojej hipotezy zorzy, Birkeland zdał sobie sprawę, że bliższe studia zaburzeń magnetycznych mogą być kluczem do zrozumienia relacji między Słońcem a Ziemią. Istniał jednak problem, ponieważ wszystkie obserwatoria geomagnetyczne znajdowały się nisko, lub na średniej wysokości [geograficznej], podczas gdy większość najbardziej interesujących zjawisk magnetycznych miało miejsce w regionach polarnych. Zorganizował ekspedycję do północnej Norwegii w lutym i marcu 1897, jednak wyprawa ta zakończyła się zupełnym fiaskiem, gdyż nie przygotowano jej na ostrą zimę w tym regionie. Aczkolwiek praktyczne doświadczenia z niej wypływające były użyteczne przy organizowaniu kolejnej, bardzo udanej, ekspedycji w latach 1899 - 1900. Jego obserwacje na dwóch szczytach górskich, Halddetop i Talviktop, podczas tej zimy, wykazały jasno, że sploty zorzy polarnej były związane z silnymi prądami w górnej atmosferze, a w swoim raporcie z ekspedycji zawarł konkluzję, że te same naładowane cząstki, które powodują zorze, powodują również zaburzenia magnetyczne. Może się to dzisiaj wydawać oczywiste, ale należy pamiętać, że było to zaledwie kilka lat po odkryciu elektronu, i nie było jeszcze powszechnie zaakceptowane, że wszystkie prądy elektryczne przenoszone są przez subatomowe naładowane elektrycznie cząstki.

Wzór zaburzeń magnetycznych okazał się niezwykle złożony i Birkeland poczuł, że dalszy postęp wymaga obserwacji z globalnej sieci stacji, włącznie z regionami polarnymi. Było to podstawą trzeciej ekspedycji w latach 1902 - 1903, podczas której założył w Arktyce cztery szeroko rozstawione obserwatoria. W stacjach tych przeprowadzał obserwacje zorzowe i magnetyczne, pomiary elektryczności atmosferycznej i prądów ziemskich, oraz obserwacje meteorologiczne. Zapisy z tych stacji były porównywane z danymi gromadzonymi z obserwatoriów całego świata, a to pozwalało mu stworzyć globalne mapy zaburzeń magnetycznych i wzorów prądowych. Skrupulatna analiza tych wzorów pozwoliła mu podzielić je na trzy główne kategorie:



Ilustracja 8. Birkeland i jego asystent Olav Devik wraz ze 1000-litrową komorą oraz 36-centymetrową terrellą (1913). Rysunek na banknocie (il. 1) oparty jest na tym właśnie zdjęciu.

zaburzenia równikowe, podstawowe burze słoneczne oraz burze cyklonowe.

Zaburzenia równikowe odnoszą się do tego, co dzisiaj nazywamy burzami geomagnetycznymi. Spowodowane są zaburzenia prądowe z północy lub południa, blisko płaszczyzny równika. Istnienie takich prądów można wydedukować z obliczeń trajektorii, dokonanych przez Størmera. We współczesnym języku są one utożsamiane z wariacjami w zachodnim pierścieniu prądowym, spowodowane energetycznymi cząstkami uwięzionymi w pasach radiacyjnych Ziemi.

Birkeland przeprowadził eksperymenty z terrellą, w których zademonstrował istnienie pasów radiacyjnych. Na ilustracji 3 obserwujemy świecący pierścień, który był wg Birkelanda elektronami spiralującymi na wschód blisko płaszczyzny równika, tworząc prąd pierścieniowy. Aczkolwiek zaburzenia równikowe są dwójakiego rodzaju - dodatnie i ujemne, co odpowiada zachodnim i wschodnim zaburzeniom prądowym, podczas gdy sam pierścień prądowy skierowany jest na zachód. Pośród rozważania tego problemu, napisał:

"Jeśli, z drugiej strony, założymy permanentną obecność takiego pierścienia,

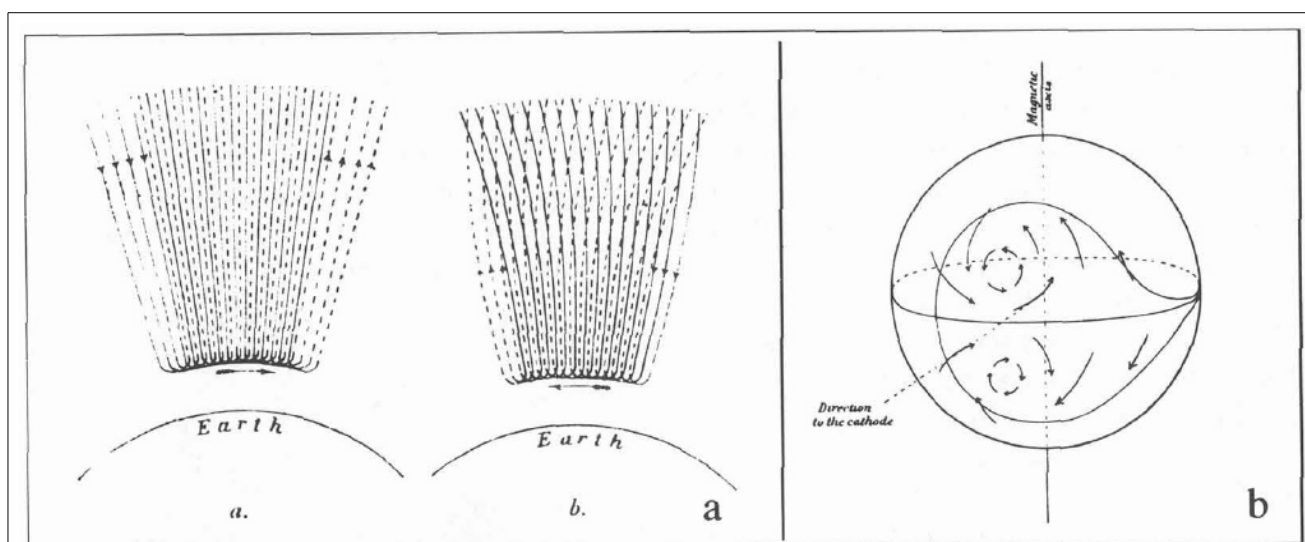
możemy wyobrazić sobie wyjaśnienie (dodatniej) perturbacji poprzez zmniejszenie natężenia prądu. To wyjaśnienie jest bardzo nieprawdopodobne i niepotrzebne."

Właśnie w takie wyjaśnienie wierzy się obecnie, ale Birkeland je odrzucił. Powodem zdają się być obserwacje zrobione przy pomocy terrelli wyposażonej w pionowy ekran. Wschodni dryf uwięzionych elektronów powinien dać świecenie po zachodniej stronie ekranu. Jednak eksperyment wykazał odwrotny rezultat, jak pokazano na ilustracji 9a. Birkeland mógł wyjaśnić ten wynik określoną klasą trajektorii Størmera, ale cząstki te nie były uwięzione i nie mogły tworzyć stale istniejącego pierścienia prądowego. Jego alternatywne wyjaśnienie było bardzo mętne, i sam przyznał, że jest daleki od końcowego rozwiązania. Jest to przykład, w którym eksperymenty z terrellą pozostawiały go zagubionego, a jest ich oczywiście znacznie więcej. Jednak ważną rzeczą jest fakt, że wskazywał problem, pozostawiając jego rozwiązanie do późniejszych dociekań.

Burze polarne, zwane obecnie magnetycznymi, stanowią poważniejsze wyzwanie, ponieważ zaburzenia pola magnetycznego zdają się być bardzo trudne do wyjaśnienia samymi poziomymi prądami. Po bardzo żmudnej analizie danych, Birkeland doszedł do wniosku, że zaburzenia te są związane z opadającym prądem na jednej wysokości, oraz z prądem wznoszącym na innej, połączonymi prądem poziomym w górnej atmosferze na wysokości kilkuset kilometrów. Szablony takich prądów mogą być wsparte do pewnego rozmiaru obliczeniami orbit Størmera (Il. 10a). Odnalazł również potwierdzenie w eksperymentach z terrellą, w formie silnego świecącego pasma na pionowym ekranie wzdłuż pola magnetycznego w sektorze późnej nocy oraz wczesnego ranka, na dużych wysokościach jak to widać na ilustracji 9b. Pasma te zostały zinterpretowane jako skutek prądów przyległych do pola, połączonych przez prąd wschód-zachód w sektorze nocnym. Jednak rozważał również mechanizm wychodzący poza niespójne obliczenia orbit:

"W tym zstępowaniu elektrycznych korpuskuł, niektóre mogą okazjonalnie znaleźć się tak blisko Ziemi, że są przechwytywane przez jej atmosferę i mogą spowodować powstanie aurory. Jeśli Ziemia jest w stanie zachować ładunek elektryczny, powinniśmy mieć poziome w przybliżeniu prądy, potrzebne do zachowania elektrycznej równowagi. Ale pojawia się również wtórne promieniowanie elektryczne, które, będąc wciąż po wpływie ziemskiego magnetyzmu, prowadzi do powstania pionowych prądów... Zaczynając od fizycznych rozważań, zostajemy w naturalny sposób zaprowadzeni do poszukiwań wyjaśnienia pola przez układ, który w uśrednieniu posiada dwa pionowe prądy o przeciwnych kierunkach, połączone przez część poziomą."

Tak więc Birkeland zdał sobie sprawę, że cząsteczki zorzy jonizują atmosferę, oraz że w odpowiedzi na pole elektryczne w przewodzącym ośrodku, poprzez pole magnetyczne może płynąć prąd poziomy. Założył wówczas, że drugorzędne elektrony zostaną przyspieszone do góry wzdłuż pola magnetycznego, na skutek pola elektrycznego utworzonego przez kumulujący się ładunek kosmiczny, pochodzący z nadchodzących elektronów, co zamyka obwód elektryczny. Wyjaśnienie to jest bardzo zbliżone do współczesnych teorii, za wyjątkiem przyczyny przychodzącego strumienia cząstek. Zgodnie z tymi teoriami, spadek potencjału przez ziemski ogon magnetyczny spowodowany

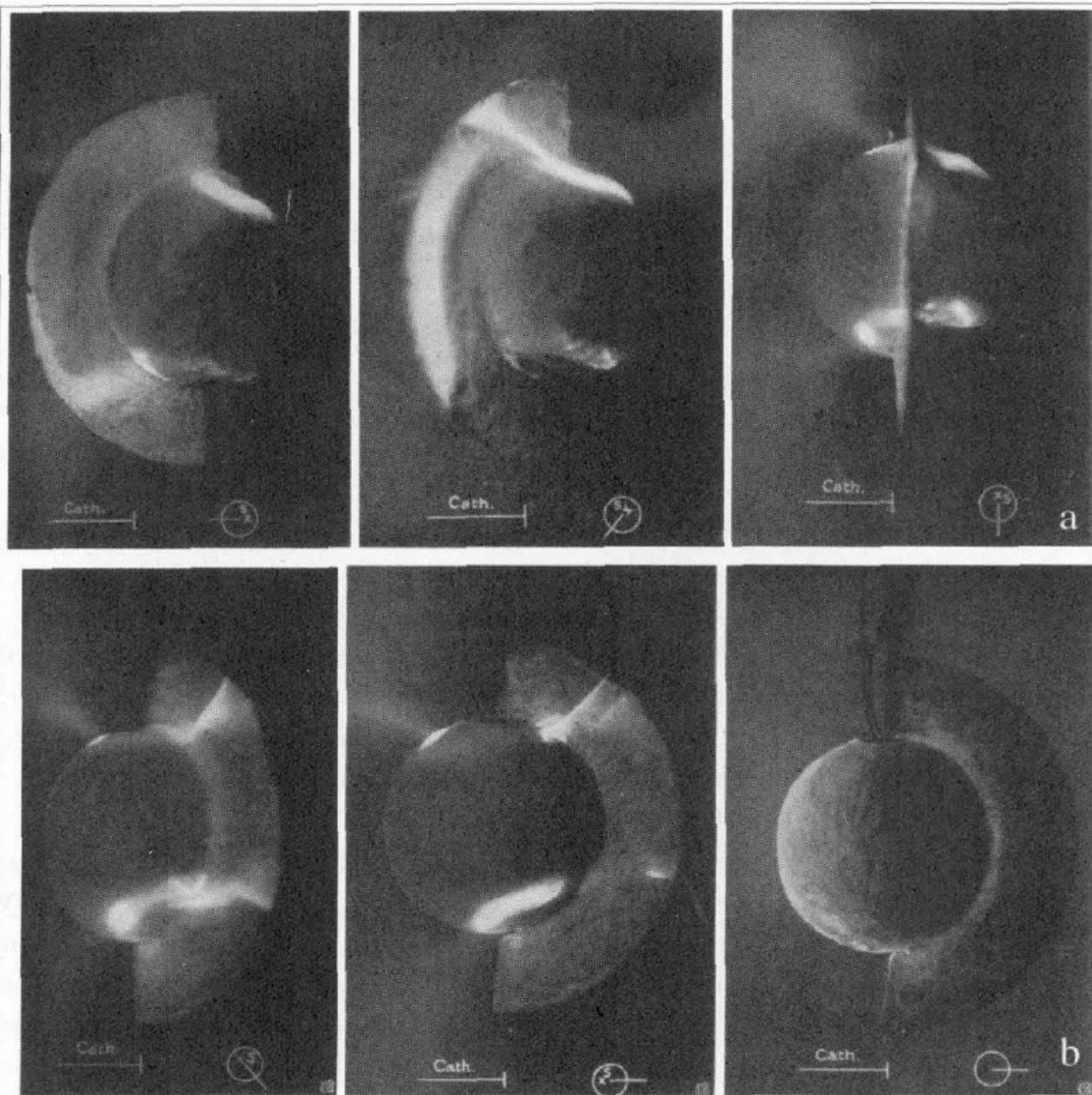


Ilustracja 10. (a) Własna ilustracja Birkelanda prądów podczas podstawowej burzy biegunowej. Prąd osiagający płynący na zachód prąd poziomy (z lewej) odpowiada jednej z możliwych klas orbit Størmera, oraz wzorowi łączącemu układ wschodni prądu (z prawej) z innym. W obu przypadkach arkusz lub zasłona opadających i powracających cząstek posiada efekt prądów opadających na jednej szerokości oraz prądów wstępujących na innej, połączonych prądem poziomym. Klinowaty wzór zgadza się ze współczesnym spojrzeniem, lecz szczegółowe wyjaśnienie jest inne. (b) Ilustracja Birkelanda przedstawiająca wzór prądów związany z burzą cyklonową.

jest wiatrem słonecznym, i ten spadek potencjału posiada projekcję w dół, na jonosferę. Podczas burzy magnetycznej normalny przepływ prądu wysoko w magnetosferze zostaje przerywany i zwarty przez przewodzącą jonosferę, jakościowo w ten sam sposób, w jaki opisał to Birkeland. Teoria ta ma dalekosiężne konsekwencje, ponieważ podkreśla, że układ prądów w ziemskiej atmosferze jest bezpośrednio związany z układami prądów w przestrzeni międzyplanetarnej. Co więcej, cytata powyżej wskazuje, że Birkeland zdał sobie sprawę z istnienia jonosfery, przynajmniej w kontekście zorzy. Sama jonosfera została odkryta w 1925 roku przez E. V. Appletona.

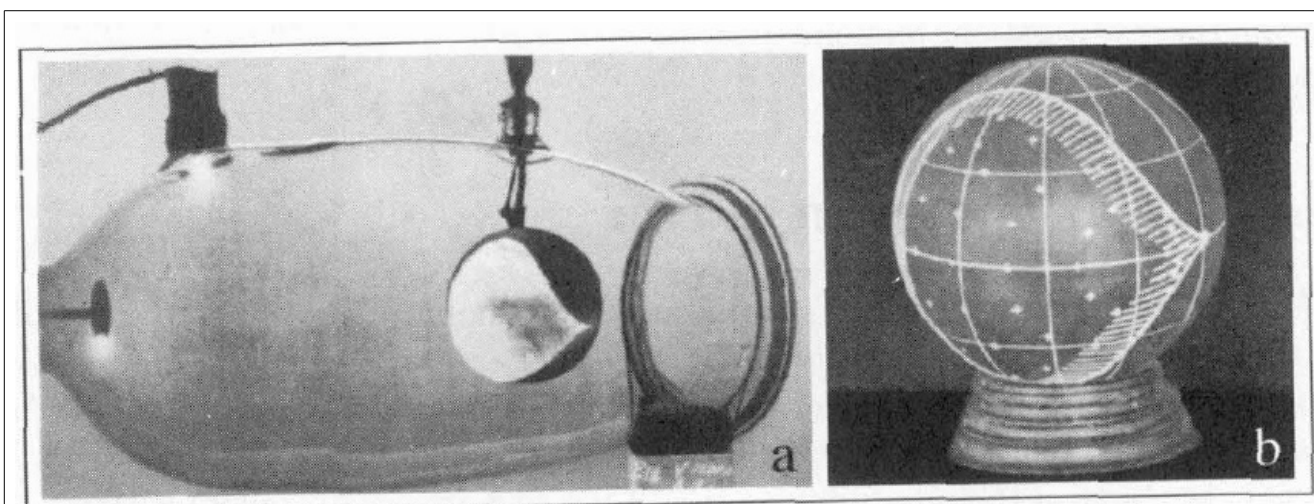
Nap oparcie tej interpretacji, Birkeland policzył zaburzenia pola magnetycznego z różnych tego rodzaju szablonów prądowych, i otrzymał bardzo przekonującą zgodność z obserwacjami. Niestety, wyniki te były pomijane przez społeczność fizyków kosmicznych przez niemal pół wieku, czego rezultatem była przewaga niepoprawnych teorii na temat prądów jonosferycznych i burz magnetycznych, dopóki dane z satelitów nie potwierdziły występowania prądów przyległych do pola magnetycznego w 1973 roku^{xvi}. Prądy te są dzisiaj nazywane "prądami Birkelanda".

Burze cyklonowe pojawiają się jako duże wiry prądowe, o środku zlokalizowanym na stosunkowo niewielkiej szerokości. Dzisiaj przypisuje im się wysoko energetyczne fotony z rozbłysków słonecznych, powodujących prądy wywołane zmianami w przewodnictwie jonosfery z powodu zwiększonej jonizacji. Birkeland obserwował podobne struktury prądowe w bardzo energetycznych promieniach katodowych w swoich eksperymentach z terrellami, a Størmer potrafił wyjaśnić te wyniki obliczając orbity dla takich cząstek (il. 11).



Ilustracja 9. (a) Eksperyment z efektami prądu pierścieniowego na pionowym ekranie. Zauważmy, że wschodnia ściana ekranu się świeci, podczas gdy prąd złapanych elektronów powinien oświetlić stronę zachodnią (patrz dyskusję w tekście). (b) Jasne świecenie na ekranie wzdłuż pola magnetycznego zostało zinterpretowane jako skutek prądów przyległych do pola.

Jak w przypadku wielu obliczeń dla orbit, energia dla obliczonych trajektorii była znacznie większa niż typowa energia wiatru słonecznego i cząstek magnetosferycznych (wyjątkiem są cząstki z pasów radiacyjnych). Oznacza to, że teorie oparte bezpośrednio na obliczeniach orbit muszą ulec modyfikacji, i obecnie wiemy, że cząstki i pole muszą być traktowane spójnie. Birkeland był oczywiście pod wrażeniem obliczeń Størmera, ale były przypadki, w których krytykował to podejście z powodu zbyt idealizmu i pomijania faktów doświadczalnych. Teoria Størmera jest bardziej adekwatna do eksperymentów z terrellą, niż do układu Ziemia-Słońce, ponieważ wcześniejsze eksperymenty z terrellą nie uwzględniały płynącej plazmy (wiatru słonecznego).

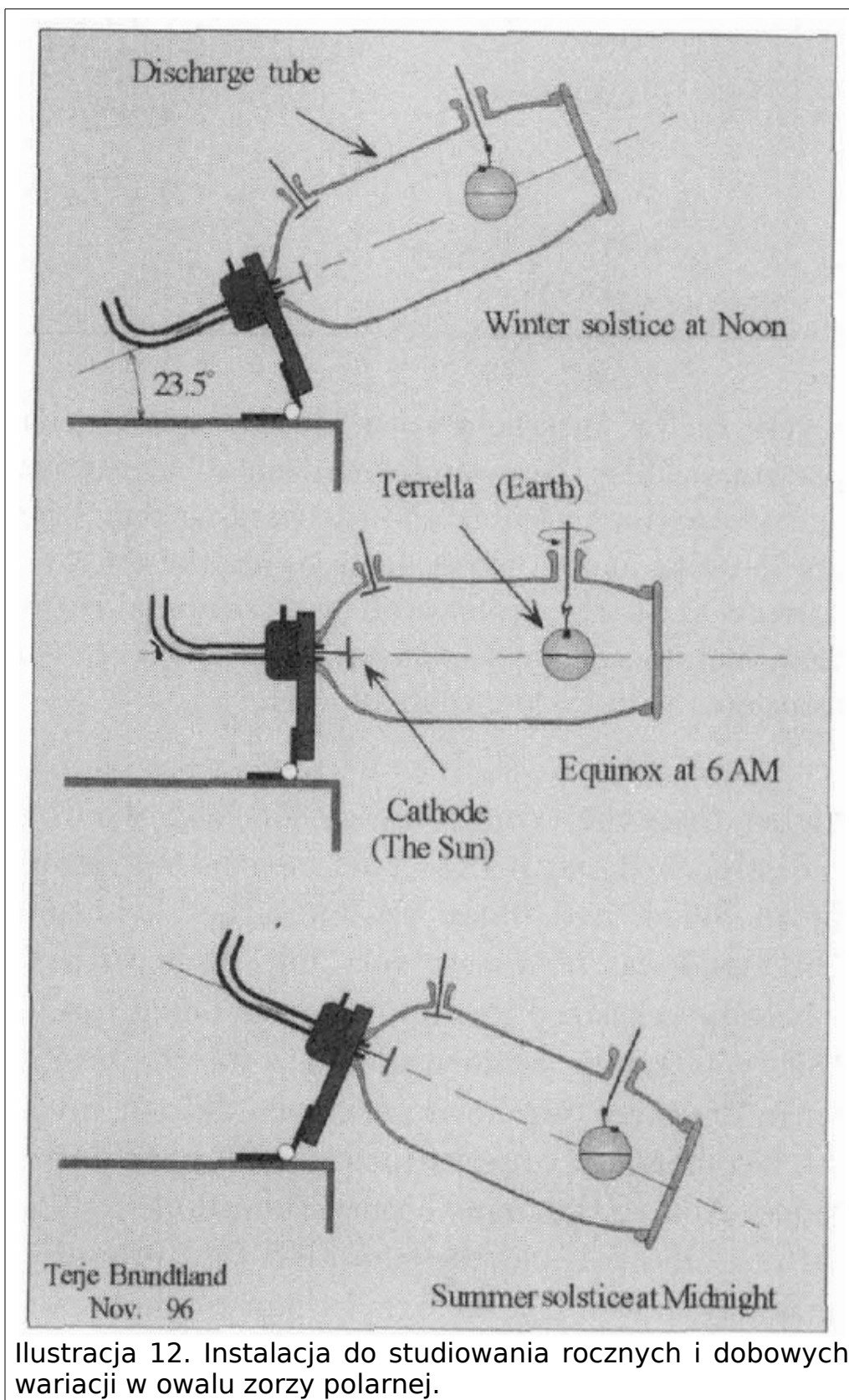


Ilustracja 11. (a) Eksperyment z terrellą, pokazujący region świecenia od wysoko energetycznych promieni katodowych. (b) Wynik obliczeń Størmera dla tego samego przypadku. Porównaj z rysunkiem Birkelanda na il. 10b.

Obserwacje geomagnetyczne nie były jedynymi, które zebrał Birkeland podczas swoich wypraw polarnych. Pośród różnych rutynowych obserwacji były zapisy o formach i występowaniu zorzy. Było wówczas dobrze wiadomym, że występowanie zorzy miało swoje maksimum w strefie blisko 23° od biegunów magnetycznych, ale dokładny kształt całego owalu zorzy był nieznany. Dzienna wariacja strefy zorzowej w danym miejscu na Ziemi mogła być przypisana do zmiany kształtu owalu z kołowego, ale również do zmiany położenia biegunów magnetycznych.

W 1907 lub 1908 Birkeland przeprowadził elegancki eksperyment sprawdzający, jak jego sztuczna zorza zachowuje się podczas warunków odwzorowujących różne pory roku. Zbudował geometryczną instalację, pozwalającą na pozycjonowanie Ziemi w każdej porze roku o każdej porze dnia (na południowym biegunie magnetycznym). W eksperymencie tym użył drugiej szklanej tuby, o pojemności 12 litrów. Była podparta z jednej strony przez przegub, umożliwiając obrócenie tuby o kąt $23,5^\circ$ ponad i poniżej płaszczyzny poziomej. Terrella miała nachylony elektromagnes i była zawieszona na geograficznej północy przy pomocy swobodnego przegubu. W ten sposób zawsze była ustawiona pionowo osią północ południe, podczas, gdy tuba była pochyła. Terrella mogła się obracać, a ponieważ położenie osi magnetycznej było odmienne od geograficznej, można było symulować w ten sposób położenie biegunów magnetycznych o każdej porze dnia. Katoda, reprezentująca Słońce, była na jednym końcu tuby, blisko zawiasu. Terrella wisiała na drugim końcu, blisko szklanej ściany. Przy takiej konstrukcji Birkeland mógł symulować wariacje pomiędzy kątem promieniami katodowymi ze Słońca a obrotową osią Ziemi przez przechylanie tuby, naśladując w ten sposób pory roku. Obracając terrellę wokół osi uzyskiwał dobowe wariacje Ziemi, a tym samym dobowe wariacje biegunów magnetycznych. Instalację zrekonstruowano na ilustracji 12.

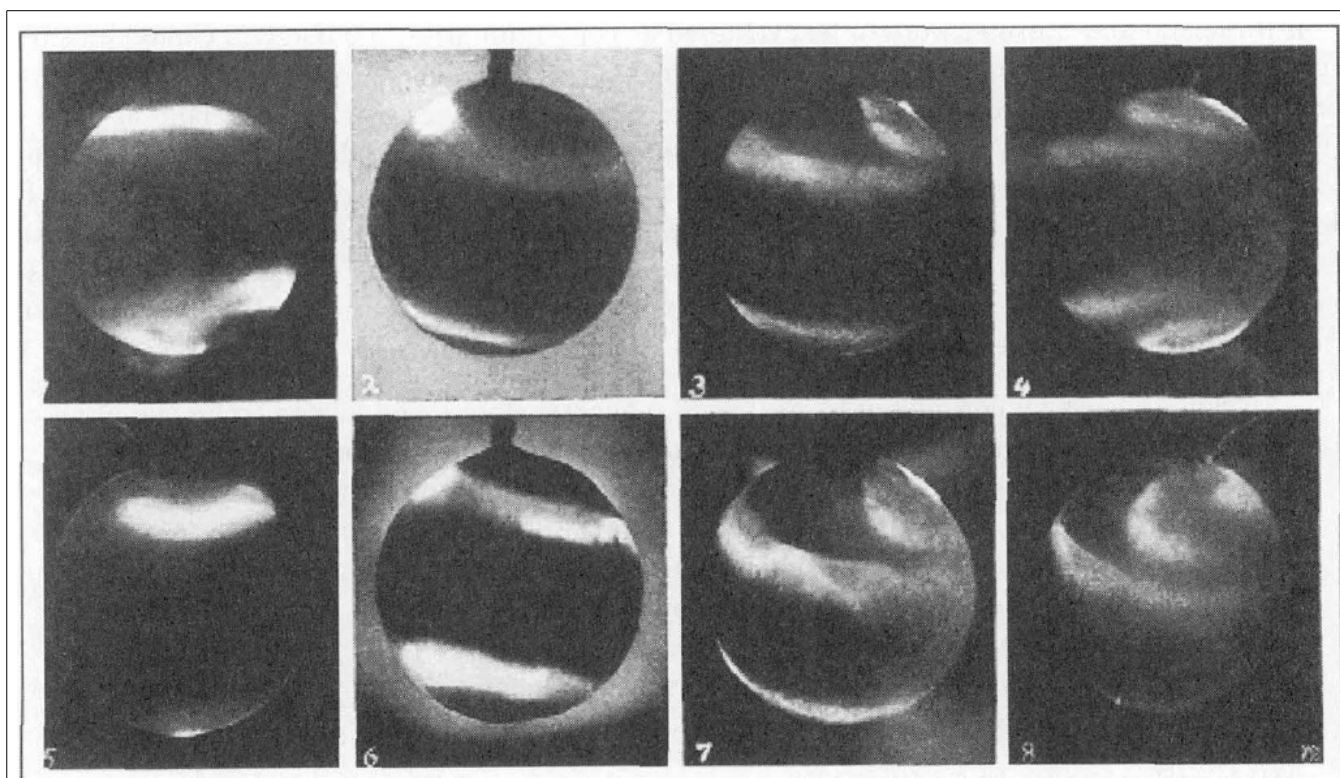
Ilustracja 13 pokazuje 8 fotografii zrobionych pod różnymi kątami podczas przesilenia zimowego, z południowym biegunem magnetycznym w pozycji świtu.



Ilustracja 12. Instalacja do studiowania rocznych i dobowych wariacji w owalu zorzy polarnej.

Birkeland potraktował spiralny kształt owalu zorzowego jako bardzo istotne odkrycie i poczynił próby wyjaśnienia obserwacji dobowej wędrówki łuków zorzowych w tych eksperymentach. Te interpretacje są dzisiaj niezalecane, jednak ponownie dociekania wskazały ważny problem do dalszych badań.

5. Spuścizna Birkelanda i Størmera



Ilustracja 13. Zdjęcia terrelli wykonane pod różnymi kątami aparatu, z tubą w pozycji odpowiadającej przesileniu zimowemu i magnetycznym biegunem południowym ustawionym na 6 rano.

Jest to niefortunny fakt, że praca Birkelanda nad wyładowaniami w gazach i fizyką ziemsko-solarną była ignorowana przez fizyków plazmowych i kosmicznych przez ponad pół wieku. Po tym, jak obserwacje satelitarne zaczęły potwierdzać najbardziej kontrowersyjne idee Birkelanda, postawa fizyków zmieniła się w podziw i niemal całkowitą akceptację. Z drugiej strony, fizycy plazmowi datowali początki swojej dyscypliny na lata 1920-ste, i z reguły byli ignorantami w kwestii dorobku Birkelanda. Aczkolwiek, aktualna chwała Birkelanda, bazująca na zdaniu sobie sprawy z tego, że wiele z jego pomysłów okazało się merytorycznie poprawnych, nie dała sama w sobie postępu w nauce. Fakt jest taki, że ważniejszy do studiowania może być nawet rozwój niepoprawnych i martwych idei, ponieważ poprawne idee często z trudem przebijają się przez konkurujące sposoby myślenia. W pewnym sensie praca Birkelanda była skazana na niepowodzenie, ponieważ zbyt wyprzedzała swoje czasy. Chciał on rozwinąć wielką teorię, podobną do *Plazmowego Wszechświata* H. Alfvéna^{xvii}, ale nie miał komu sprzedać koncepcji ani teoretycznych metod fizyki plazmy. Chciał badać i głęboko zrozumieć zjawiska wyładowań w zjonizowanych gazach, nie posiadał jednak potrzebnych narzędzi diagnostycznych. Aczkolwiek, dzięki zastosowaniu całej dostępnej wiedzy oraz metod dostępnych w owym czasie, był w stanie formułować wszechstronne i spójne teorie, gotowe do testów przeciwko przyszłemu zaawansowaniu w fizyce i technologii. Tragedią było jednak, że tylko garstka naukowców zaakceptowała apel do wykorzystania eksplozywnej energii w teoriach Birkelanda po jego przedwczesnej śmierci. Jednym z niewielu, którzy wystąpili przeciw głównemu nurtowi, był Carl Størmer, innym był Hannes Alfvén (1908-1995).

W przemówieniu otwierającym Sympozjum Birkelanda o Aurorze i Burzach Magnetycznych, zorganizowanym przez IAGA w Norwegii w 1967 roku, Sydney

Chapman (1888-1970) uczynił następujący komentarz do współpracy Birkelanda i Størmera^{xviii}:

"Widocznie niewzruszony uchwyt[?], w umyśle Birkelanda, dotyczący jego podstawowych acz niepoprawnych koncepcji o intensywnych strumieniach elektronów nierozdzielnie mieszał błąd z prawdą w interpretacji jego pomysłów i eksperymentów nad zorzą i burzami magnetycznymi. Co do zorzy, to samo można powiedzieć o teoretycznej pracy Størmera."

Chapman był przypuszczalnie najbardziej wpływowym naukowcem na polu kosmologicznej geofizyki w latach 1920-1960, był też autorem matematycznie eleganckiej teorii dotyczącej układów prądów jonosferycznych i burz magnetycznych^{xix}. Zgodnie z tą teorią wszelkie zaburzenia geomagnetyczne mogłyby być wyjaśnione z układu prądów płynących poziomo w sferycznej strefie wokół Ziemi. Nie było w niej miejsca na prądy przyległe do pola, autorstwa Birkelanda. Chapman rozwinął również kinetyczną teorię zjonizowanego gazu, opisaną w ostatnim rozdziale swojej sławnej książki, napisanej razem z T. G. Cowlingiem^{xx}. Z wielu względów teoria ta była przestarzała przed swoją pierwszą edycją w 1939 roku, gdyż nie mogła opisywać zbiorowych efektów plazmowych, zaobserwowanych przez Langmuira i innych^{xxi} dekadę wcześniej.

Gdyby Birkeland i Størmer byli oceniani jako nam współcześni, osąd Chapmana byłby na miejscu. Tak jednak spowodował ślepotę na słabości naszych własnych koncepcji, i dokładnie to właśnie przytrafiło się Chapmanowi. Krytykując Birkelanda, jakby był współczesnym mu adwersarzem, przegapił wielką szansę skorzystania z idei starego olbrzyma jako punktu startowego do dalszego postępu. Alfvén nie popełnił tego błędu. Wiele jego podstawowych idei zapoczątkowanych było przez Birkelanda, i było to podkreślane przez samego Alfvéna. W 1987 roku Alfvén wygłosił pierwszy wykład z serii "The Kristian Birkeland Lecture" na Uniwersytecie w Oslo, a w publikacji opartej na jego ustnej prezentacji można zaobserwować silne podobieństwa pomiędzy ich podejściami naukowymi. Rozważając rolę Chapmana, Alfvén napisał^{xxii}:

"Ponieważ Chapman traktował swoją teorię burz magnetycznych i zorzy polarnej jako jedno ze swoich największych osiągnięć, pragnął zdusić wszelką wiedzę o teorii Birkelanda. Będąc szanowanym członkiem dumnej angielskiej tradycji naukowej, oraz uczęszczając, o ile ich nie organizując, na wszystkie ważne konferencje w tym temacie, było to dla niego łatwe. Konferencje szybko przyjęły formę rytualną. Otwierane były przez Chapmana prezentującego swoją teorię na temat burz magnetycznych, następnie były długie wykłady jego współpracowników, potwierdzających jego słowa. Jeśli pozostało trochę czasu na dyskusję, na obiekcje albo nie udzielano odpowiedzi, albo odsyłano do któregoś z artykułów Chapmana. Wspomnieć o Birkelandzie było jak przekląć w kościele."

Gorzki wydźwięk tego stanowczego oświadczenia odzwierciedlało sentymenty Alfvéna związane z jego własnymi problemami w zrozumieniu [przez świat] jego własnych teorii, które z reguły doczekały się akceptacji dekady po ich opublikowaniu. Próbował jednak znaleźć racjonalne wyjaśnienie dla oporu wobec radykalnych idei, i przypisał to zwiększającej się specjalizacji w nauce.

Specjalizacja owa dotknęła również rozwój idei Birkelanda i Størmera. Z powodu

silnego wpływu szkoły Chapmana, osiągnięcia matematyczne Størmera nie doczekały się uwagi, na jaką zasługiwały. Niedawno zdano sobie sprawę, że problem Størmera, ruch naładowanych cząstek w magnetycznym polu dipolowym, jest przykładem chaotycznego hamiltonianu. Størmer dowiódł, że układ taki ma dwie całki ruchu, i może być zredukowany do hamiltonianu dwuwymiarowego, który jest całkowalny tylko dla konkretnej wartości energii całki. W 1970 roku wykazano, że twierdzenie KAM stosuje się do małych perturbacji tych energii, a zatem również do przestrzeni fazowej spójnej ze zbiorem Cantora dla chaotycznych i regularnych orbit^{xxiii}. Wynika to wprost z dwuwymiarowego potencjału odpowiadającemu zredukowanemu hamiltonianowi, zawierającemu trzy "wzgórki" potencjału, zgrupowanym blisko punktu siodłowego. Problem ten jest strukturalnie podobny do mocno przebadanego problemu trzech dysków, w którym kula bilardowa zderza się z trzema cylindrami w rogach trójkąta. Jednym z największych osiągnięć Størmera i jego asystenta były obliczenia numeryczne orbit cząstek, bez użycia komputera. Spędzili na nich więcej niż 18000 godzin roboczych, a z rysunków i modeli można wyciągnąć wnioski, jak podatne były niektóre z nich na drobne zmiany warunków początkowych. Owa wrażliwość, oraz jej powiązania z chaosem, były po raz pierwszy odkryte w połączeniu z innymi dynamicznymi systemami, w czasie, gdy powszechne stało się rozwiązywanie tego typu zadań na komputerach. Interesujące są spekulacje, czy teoria chaosu mogłaby rozwinąć się wcześniej, gdyby obliczenia Størmera, będące przypuszczalnie pierwszymi numerycznymi obliczeniami chaotycznych orbit, były szerzej znane.

Lepiej znanym od sztucznego chaosu niezaburzonych orbit Størmera jest chaos wynikający z zaburzeń spowodowanych falami czy innymi efektami kolektywnymi. Efekty takie mogą być bardzo ważne w mechanizmie ucieczki cząstek z pasów radiacyjnych. Ostatnio zmontowano bardzo interesujący eksperyment z terrellą na Uniwersytecie Kolubijskim, którego celem jest studiowanie tego radialnego ruchu w sztucznych pasach radiacyjnych. Eksperyment ten jest bezpośrednią kontynuacją pracy Birkelanda i Størmera, wiąże się też ściśle z aktualnym problemem geofizyki^{xxiv}.

The Columbia University Terrella (CTX) jest przykładem klasy eksperymentów laboratoryjnych, których celem jest studiowanie w szczegółach mikroprocesów, co do których zakłada się, że mają podstawowe znaczenie dla globalnej dynamiki układu ziemsko słonecznego. Eksperymenty Birkelanda były próbą modelowania samego tego układu, ale dyskusja teoretyczna, oraz seria eksperymentów z terrellą przeprowadzonych w Royal Institute of Technology w Sztokholmie w latach 50-tych oraz 60-tych wykazały, że nie jest możliwe przeskalowanie wszystkich potrzebnych parametrów do skali laboratoryjnej^{xxv}. Problem skalowania jest używany przez wielu fizyków kosmicznych jako argument do porzucenia eksperymentów laboratoryjnych jako narzędzia dla fizyki kosmicznej, ze wskazaniem, że wielkoskalowe symulacje numeryczne są bardziej miarodajne od eksperymentów. Ten argument jest właściwy dla całościowych symulacji laboratoryjnych, ale nie stosuje się do eksperymentów badających mikro procesy. Przykładem jest wielka, trójwymiarowa symulacja MHD kawitacji magnetosferycznej, co do której dowiedziono, że ma ograniczoną wartość, gdyż idealna MHD jest niewystarczająca do opisanie globalnej dynamiki. MHD przełamuje się w krytycznych regionach granicznych jak fala uderzeniowa, oraz w obszarze rekoneksji w magnetopauzie jak i w ogonie. W rzeczy samej, wirtualnie, cała interesująca fizyka kształtująca

magnetyczną topologię, napędzająca cząstki zorzy itp., zachodzi w takich regionach. Taka mikro fizyka będzie dołączana do modeli globalnych, i to jest miejsce, w którym eksperymenty laboratoryjne mają wielką rolę do odegrania.

Istnieje również rozpowszechniona niechęć pośród fizyków laboratoryjnych do zmierzania się z zagadnieniami związanymi z rolą plazmy w kosmosie. Przypuszczalnie jest to związane z brakiem funduszy dla tego typu pracy, ale prawdopodobnie jest to też spowodowane głęboką ignorancją na temat bogactwo interesujących problemów, jakie oferuje fizyka kosmiczna kreatywnym naukowcom z laboratoriów plazmowych.

Mała, lecz rosnąca, grupa naukowców z dwóch środowisk wyczuła ten problem, i od 1991 roku zorganizowała cztery półroczne warsztaty zatytułowane "Powiązania pomiędzy eksperymentami z plazmą w laboratorium a kosmosem" (ang. IPELS). Warsztaty te, będące w duchu Kristiana Birkelanda, sygnalizują nadzieję na wzrost uwagi na potrzebę interdyscyplinarnego podejścia do całej nauki związanej ze zjonizowaną materią.

Honory

Autorzy są wdzięczni A. Brekke, A. Egelandowi, H. Pésceli, M. Mauel, oraz B. Bringham za interesujące dyskusje. Specjalne podziękowania dla personelu Norwegian Museum of Science nad Technology za asystę podczas studiów nad starymi aparatami i źródłami pisanymi.

- i Birkeland, K., *Archives des sciences physiques et naturelles* 3ème periode **T. 33** (1896) 297-309.
- ii Birkeland, K. The Norwegian Aurora Polaris Expedition 1902-1903, Vol. 1, (H. Aschehoug & co., Christiania 1908 and 1913).
- iii Poincaré, H., *C/R. Acad. Sci. Paris*, **123** (1896) 930.
- iv Birkeland, K., *Archives des sciences physiques et naturelles* 4ème periode **T. 6** (1898) 205-228.
- v Størmer, C., The Polar Aurora (Clarendon Press, Oxford, 1955).
- vi Egeland, A. and Leer E., *IEEE Trans. on Plasma Science* **PS-14** (1986)
- vii Egeland, A., "Kristian Birkeland, The Man and the Scientist", Magnetospheric Currents, AGU Geophys. Monograph 28, T. A. Potemra, Ed. (Amer. Geophys. Union, Washington D. C., 1984) pp. 1-16.
- viii Egeland, A., Kristian Birkeland, mennesket og forskeren (Norges Banks Seddeltrykkeri, Oslo, 1994) ISBN 82-7553-017-7
- ix Röntgen, W. C. "Über eine neue Art von Strahlen" (Würtzburger Physik-Med Gessellschaft, Würtzburg, 1895).
- x Birkeland, K., "De Røntgenske Straaler", (Aftenposten January 22, 1896).
- xi Birkeland, K., *Archives des Sciences physiques et naturelles* 4ème période **T.1** (1896) 497-512.
- xii Thomson, J. J., *Phil. Mag.* No. CCXIX, Octomber (1897).
- xiii Birkeland, K., Expedition Norvegienne 1899-1900 (Videnskabselskabets Skrifter I. Mat-Nat Klasse 1901. no 1, Christiania, 1901).
- xiv Gilbert, W., De Magnete (Dover Publications, Inc., New York, 1958).
- xv Birkeland, K., *Archives de sciences physiques er naturelles*, 4ème période, T.35 (1913) 529-564.
- xvi A. McPherron, R. L. Russel C. T. i Aubry M., *J. Geophys. Res.* **78**, (1973) 3131-3149.
- xvii Alfvén, H., *Physics Today*, September (1986), pp. 22 and IEEE Transaction of Plasma Science **PS-14** (1986) 629-639.
- xviii Chapman S., "Historyczne wprowadzenie do aurory i burz magnetycznych", Proceedings from the Birkeland Symposium on Aurora and Magnetic Storms, Egeland, A. and J. A. Holted Eds. (Centre Nat. de la Rech. Sci., Paris, 1967).
- xix Chapman, S. and Bartels J., Geomagnetism, vol 1. (Oxford, Clarendon Press, 1962).
- xx Chapman, S. and Cowling, T. G., The Mathematical Theory of Nonuniform Gases (Cambridge University Press, London, 1939).
- xxi Langmuir, I., *Phys. Rev.* **33** (1929) 954.
- xxii Alfvén, H. and Egeland A., "Auroral research in Scandinavia", The Kristian Birkeland Lecture 1. (The Norwegian Academy of Science and Letters, 1987).
- xxiii Braun, M., *J. Differential Equations* **8** (1970) 294.
- xxiv Mauel, M., "Laboratory obserwations of wave induced radial transport within an artificial radiation belt", Iopical invited lecture this conference.
- xxv Block, L. P., *Planet. Space Sci.* **15** (1967) 1497-1487.