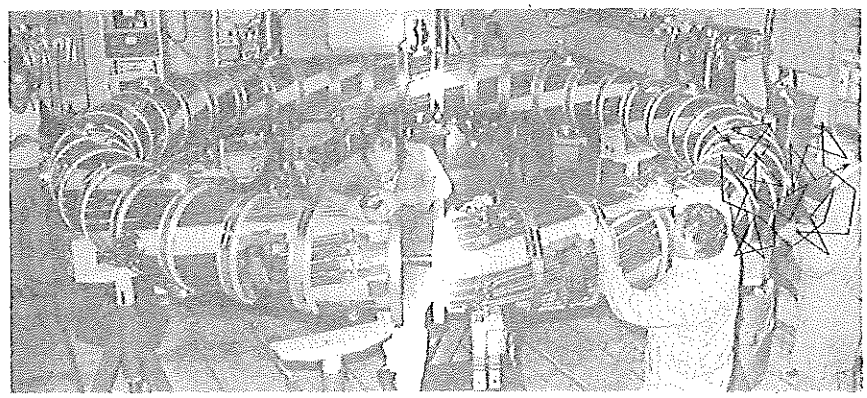
Badania syntezy termojądrowej w Instytucie Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka



Dr Brigitte RÖTHLEIN (RFN)

(Artykuł napisany specjalnie dla „Delty").

Sytuacja energetyczna

Od czasu „kryzysu naftowego" w październiku 1973 sytuacja energetyczna jest tematem głośnej dyskusji publicznej. Z wielką rozwagą myśli się o możliwych sposobach zaspokojenia przyszłego zapotrzebowania na energię. Zasoby są ograniczone. Ropa naftowa i gaz ziemny wyczerpują się i są coraz droższe, węgiel nadaje się nie do wszystkich celów, ponadto używanie go powoduje poważne skażenia środowiska: użycie energii jądrowej jest wciąż z wielu względów kontrowersyjne; energia słoneczna nie jest wartościową propozycją w wysokich szerokościach geograficznych, nie jest nią również użycie wiatru, pływów morskich, energii geotermicznej itp. Panuje ogólna zgoda co do tego, że należy wykorzystać wszystkie rozsądne możliwości produkcji energii i że badania energetyczne trzeba rozpocząć równocześnie w wielu dziedzinach. Jednym z przykładów wieloskalowej produkcji energii jest synteza (fuzja) termojądrowa. Ta metoda, choć jeszcze nie gotowa do zastosowań, ma dobre perspektywy na przyszłość. Potrzebne surowce, deuter (ciężki wodór) i lit, są osiągalne na Ziemi w ilościach niemal nieograniczonych, fizyczne bezpieczeństwo reaktora fuzyjnego jest duże, zaś wpływ na środowisko i jego zagrożenie są mniejsze niż w przypadku innych porównywalnych urządzeń.

Zasady

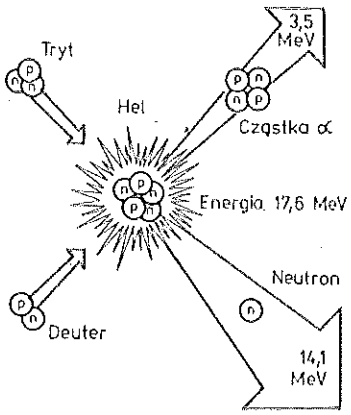
Synteza termojądrowa opiera się na procesie, dzięki któremu generują swoją energię Słońce i gwiazdy, mianowicie na połączeniu lekkich jąder atomowych w cięższe. Wynikający stąd defekt masy (wyprodukowane jądro jest nieco lżejsze niż były jądra początkowe w sumie) prowadzi do wyzwolenia energii, która jest przekazywana produktom reakcji w postaci energii cieplnej. Spośród wielu możliwych reakcji syntezy, reakcja

$$^{2}D^{+} + {}^{3}T^{+} \rightarrow n + {}^{4}He^{++} + 17{,}58\,MeV$$

jest szczególnie korzystna z powodu dogodnego przekroju czynnego (rys. 1). Obecna praca badawcza jest więc głównie skoncentrowana na możliwościach stwarzanych przez tę reakcję. Wskutek odpychania elektrostatycznego dwa dodatnio naładowane jądra potrzebują bardzo dużych prędkości względnych, aby mogły się zderzyć. Zderzenia elastyczne, czyli tak zwane zderzenia kulombowskie, zachodzą o wiele częściej niż zderzenia fuzyjne. Jest zatem oczywiste, że mieszanina jąder deuteru i trytu musi być ogrzana do wysokiej temperatury i utrzymana w tym stanie w ograniczonej przestrzeni, aby można było otrzymać w niej rozsądną wydajność syntezy. Wymaga to temperatur 100 do 150 milionów stopni, tzn. energii jąder 10 do 15 keV. W takich temperaturach mieszanina gazowa jest oczywiście całkowicie zjonizowana; jest ona wtedy nazywana plazmą termojądrową. To określenie pochodzi od greckiego słowa $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$ oznaczającego „coś uformowanego".

Pomysł użycia syntezy termojądrowej jako środka do produkcji energii zyskał na ważności w latach pięćdziesiątych. Po ogłoszeniu sensacyjnych sukcesów w Harwell (Wielka Brytania) badania syntezy termojądrowej zostały zadeklarowane jako nietajne przez Wielką Brytanię, Związek Radziecki i Stany Zjednoczone w dniu 31 sierpnia 1958 r. w przededniu drugiej konferencji genewskiej na temat pokojowych zastosowań energii atomowej. Dostarczyło to silnego bodźca do badań syntezy termojądrowej również w Republice Federalnej Niemiec. Jest to więc dość młoda dziedzina badań, lecz wymagająca dużych nakładów od samego początku. Ponieważ przewidywano, że prace planowane w RFN pociągną za sobą wielki wysiłek techniczny, rzeczą podstawową było utworzenie dostatecznie dużej instytucji badawczej, możliwej do rozbudowy. W r. 1960 Towarzystwo im. Maxa Plancka podpisało kontrakt z Wernerem Heisenbergiem, ustanawiający Instytut Fizyki Plazmy (IFP), początkowo jako spółkę z ograniczoną odpowiedzialnością. Dziesięć lat później, z początkiem roku 1971, instytut ten, z około tysiącosobowym personelem stał się oficjalnie Instytutem Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka. Dziś personel jest tylko nieco liczniejszy, zaś cały roczny budżet wynosi

Symbole użyte w zapisie reakcji oznaczają: D — deuter, T — tryt (ciężkie izotopy wodoru) n — neutron, He — jon helu. Symbol $^{4}He^{++}$ oznacza: jon helu o masie równej czterem masom protonu, dwukrotnie zjonizowany (a więc o ładunku +2e).



1. W badanej reakcji *DT* jądro deuteru (ciężkiego wodoru) i jądro trytu łączą się w jądro helu. Uwalnia to neutron, który niesie dużą część energii reakcji (17,6 MeV) w postaci energii kinetycznej.

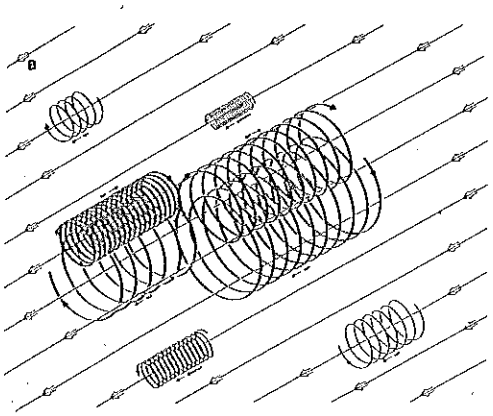
około 100 milionów marek. Instytut jest finansowany wspólnie przez rząd federalny, rząd krajowy Bawarii i Europejską Wspólnotę Energii Atomowej (EURATOM), z którą był związany od roku 1961.

Problemy

Aby otrzymać rozsądną wydajność reakcji syntezy, plazma deuterowo-trytowa musi osiągnąć pewną tepmeraturę T, być utrzymana w tej temperaturze przez dostatecznie długi czas τ i mieć dostatecznie dużą gęstość n. Obliczenia bilansu energii i ekonomicznej opłacalności reaktora syntezy pokazały, że muszą być osiągnięte równocześnie następujące wartości:

$T = 10$ keV (100 milionów stopni)
$n \cdot \tau \geqslant 10^{14}$ sek/cm^3, gdzie na przykład:
$n = 10^{14}$ cząstek/cm^3
$\tau = 1$ sek.

Do dziś nie udało się spełnić tych wymagań. Postęp ostatnich lat dał jednak rezultaty bardzo zachęcające do badań syntezy na całym świecie. Instytut Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka w Garching również czyni wszelkie wysiłki, aby osiągnąć swój cel.

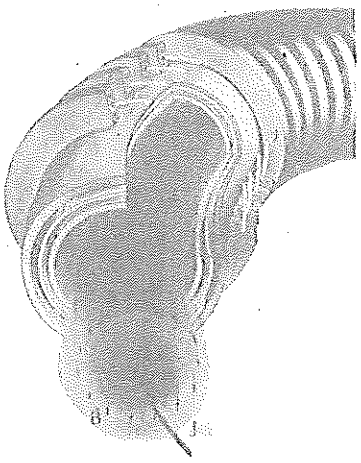


2. Fakt, że naładowane cząstki w jednorodnym polu magnetycznym poruszają się po liniach śrubowych wokół linii pola, jest wykorzystywany w idei uwięzienia magnetycznego.

a) Utrzymanie plazmy

Podstawowy warunek otrzymania energii z syntezy termojądrowej, mianowicie utrzymanie gorącej plazmy przez pewien czas, może być spełniony na różne sposoby. Instytut Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka wyspecjalizował się w uwięzieniu magnetycznym (rys. 2). Wskutek działania pola magnetycznego, cząstki naładowane mogą poruszać się tylko po śrubowych torach wokół linii pola magnetycznego, jeśli nie zostaną odchylone przez zderzenia. Ta pożyteczna własność pola magnetycznego jest wykorzystywana do utrzymywania plazmy z dala od materialnych ścianek naczynia.

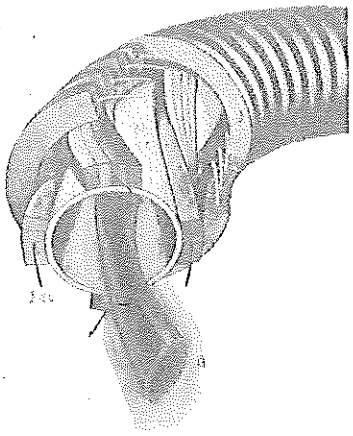
Mimo, że urządzenia liniowe używane przedtem miały zalety w postaci prostego, jasno rozplanowanego i dostępnego układu, powodowały one straty cząstek na końcach. Aby zlikwidować ucieczkę plazmy wzdłuż linii pola magnetycznego, linie te zostały zamknięte w pierścienie, tworząc w ten sposób konfigurację toroidalną. Taka geometria ma jednak tę wadę, że niejednorodność pola magnetycznego wypycha plazmę na zewnątrz doprowadzając ją do kontaktu ze ścianą naczynia. Dla utrzymania toroidalnej plazmy w równowadze muszą być zastosowane dodatkowe pola magnetyczne. Wypadkowe pole musi być takie, że jego linie nie tylko zamykają się w pierścienie, lecz biegną po drogach śrubowych tworząc zamknięte magnetyczne powierzchnie przepływu. Dwie odmienne metody skręcania pola doprowadziły do skonstruowania ,,tokamaka'' i ,,stellaratora''.



Rys. 3

Za pomocą transformatora można wzbudzić w pierścieniu plazmy prąd plazmowy, który generuje pole magnetyczne wokół mniejszego obwodu pierścienia (rys. 3). Nałożenie się tego pola na już istniejący pierścień daje w wyniku śrubowy kształt linii pola. Urządzenia tego typu są nazywane ,,tokamakami''. Indukowany prąd plazmowy służy nie tylko do ustalania równowagi, lecz także do ogrzewania plazmy.

W innej metodzie, stosowanej w ,,stellaratorze'', nie trzeba wzbudzać prądu w plazmie, lecz wywołuje się śrubowy kształt linii pola po prostu za pomocą cewek magnetycznych zainstalowanych na zewnątrz naczynia z plazmą (rys. 4). Wymaga to bardzo skomplikowanej konfiguracji cewki, którą można wyprodukować i obsługiwać tylko przy wysokiej sprawności technicznej producentów i personelu.



Rys. 4

Jednym z urządzeń serii ,,tokamak'' w IFP jest ASDEX (Axially Symmetric Divertor Experiment), który zaczął pracę na początku 1980 r. Jako największe obecnie urządzenie tego typu w Europie, ASDEX dostarcza plazmy o wysokiej czystości, w której straty energii na promieniowanie będą najmniejsze z możliwych. Odchylacz, zainstalowany w tym celu, jest pomocniczym urządzeniem do oddzielania i usuwania zanieczyszczeń z plazmy (np. ciężkich jąder atomowych wybitych ze ścianek komory próżniowej) za pomocą specjalnych pól magnetycznych i silnych pomp.

Inny tokamak — to mniejsze urządzenie o nazwie PULSATOR, które dostarczało wartościowych wyników przez szereg lat i jest teraz używane do roboczych eksperymentów przy badaniu problemów szczegółowych.

Seria ,,stellarator'' jest reprezentowana w IFP także przez dwa urządzenia. WENDELSTEIN VII, ukończony w roku 1976, służy do badań nad zachowaniem i stabilnością uwięzionej plazmy w warunkach stellaratora. To urządzenie ma służyć również do testowania wyrafinowanej metody nagrzewania plazmy, tzw. neutralnego wtrysku (patrz paragraf b). Inny eksperyment testujący metody nagrzewania, mianowicie nagrzewanie plazmy przez pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości, jest prowadzony w Grenoble, na urządzeniu WEGA, przy którym zespół naukowców z IFP współpracuje z kolegami belgijskimi i francuskimi.

Rozwiązanie zadania M 241.

Ponieważ $\left(1+\frac{1}{n}\right)^n = \binom{n}{0}\cdot 1 + \binom{n}{1}\cdot\frac{1}{n} + \ldots + \binom{n}{n}\left(\frac{1}{n}\right)^n = 1+1+\ldots+\left(\frac{1}{n}\right)^n > 2$, więc $2^{\frac{1}{n}} < 1+\frac{1}{n}$, czyli $\log_2\left(1+\frac{1}{n}\right) > \frac{1}{n}$ c.b.d.o.

b) Temperatura plazmy

Temperatury milionów stopni, jakie są wymagane w dzisiejszej fizyce plazmy, zmuszają do użycia skomplikowanych metod nagrzewania. Z czasem, w wyniku ewolucji, najpowszechniejszą metodą stało się nagrzewanie wirowym prądem elektrycznym (nagrzewanie omowe), za pomocą którego zjonizowana uprzednio plazma może być nagrzana do 10 lub 20 milionów stopni. Ta metoda jest stosowana głównie w tokamakach. Jednak ponieważ opór elektryczny, a więc i moc ogrzewania, maleje przy rosnącej temperaturze, trzeba użyć dodatkowych środków. Jedna z możliwości — to uwięzienie szybkich cząstek neutralnych, które przekazują swoją energię plazmie w wyniku zderzeń kulombowskich. Program neutralnego wtrysku w IFP posługuje się urządzeniami, w których jony wodoru są przyspieszane do dużych prędkości i potem neutralizowane. Dwa wtryskiwacze tego typu, każdy o mocy 500 kW i natężeniu prądu ok. 30 A, zostały już zainstalowane w WENDELSTEINIE VII; pierwsze serie testów pokazały, że energia plazmy jest zwiększana o około 100% podczas wtrysku. Najwyższa temperatura osiągnięta dotychczas metodą neutralnego wtrysku (w Princeton w r. 1978) jest rzędu 60 milionów stopni.

Inną metodą dodatkowego nagrzewania plazmy jest poddanie jej działaniu intensywnych fal elektromagnetycznych. Przy pewnych częstotliwościach zwanych plazmowymi, efekty rezonansowe powodują przekształcenie dużej części energii wejściowej w energię kinetyczną cząstek. Ten typ nagrzewania jest jednak wciąż na tym etapie, na którym bada się i testuje mechanizmy fizyczne.

Sukcesy osiągnięte w ostatnich latach w badaniu syntezy termojądrowej znacznie zwiększyły szanse otrzymania plazmy samopodtrzymującej syntezę. Analogicznie do rozpalonego pieca, plazma taka nie wymagałaby dalszego wkładu energii ze źródeł zewnętrznych, odpowiednia temperatura byłaby podtrzymywana przez procesy nagrzewania wewnętrznego, mimo strat energii. Przyczyną tego jest fakt, że jądra helu (cząstki α) wyprodukowane w procesach syntezy mogą przekazywać plazmie swoją energię kinetyczną w wyniku zderzeń, dając w pewnych warunkach decydujący wkład do ogrzewania plazmy. Osiągnięcie tego tak zwanego punktu zapłonu, w którym nagrzewanie wewnętrzne i straty energii w plazmie równoważą się, jest celem nowego wielkoskalowego urządzenia ZEPHYR, przewidzianego do zbudowania w IFP za kilka lat. Urządzenie to jest tokamakiem o szczególnie silnych polach magnetycznych, kombinującym nagrzewanie omowe i neutralny wtrysk, po którym następuje sprężanie adiabatyczne. Nagły silny wzrost pola magnetycznego powoduje tu sprężenie plazmy, nagrzewające ją dodatkowo. Powinno to umożliwić osiągnięcie koniecznej temperatury zapłonu wynoszącej około 150 milionów stopni.

Problemy specjalnego rodzaju związane są z mierzeniem tak wysokich temperatur. Tak jak w przypadku wyznaczania innych parametrów plazmy: gęstości, zanieczyszczeń itp. jest możliwe stosowanie jedynie pośrednich metod pomiarowych, które nie zaburzają plazmy. Jedną z głównych technik jest spektroskopia na wszystkich długościach fal, aż do promieni X, która pozwala zarejestrować z największą precyzją wszystkie zmiany energii plazmy. Lecz metody nieoptyczne, jak diagnostyka cząstek neutralnych produkowanych przez wymianę ładunku w plazmie, które opuszczając plazmę dostarczają informacji o prędkości jonów, również służą do określenia temperatury. Ważną rolę odgrywają też pomiary oceniające zmiany wiązki promieniowania laserowego przechodzącego przez plazmę (przesunięcie częstotliwości, intensywność rozpraszania itp.). Wspólną cechą wszystkich metod pomiarowych jest to, że wymagają one znacznych wydatków pieniężnych i dużej zręczności eksperymentatorów. Ponieważ ciągłe określenie i rejestrowanie danych o plazmie jest nieodzowne dla badania własności plazmy, na potrzeby tej pracy poświęca się znaczną część kubatury dostępnej w IFP.

c) Gęstość plazmy

Trzecim decydującym parametrem plazmy, oprócz czasu utrzymania i temperatury, jest jej gęstość. Gdy rośnie gęstość plazmy, narasta również częstość zderzeń cząstek, a więc także liczba reakcji na jednostkę czasu.

Wskutek wymiany ładunku i procesów dyfuzji cząstki plazmy wciąż uciekają podczas okresu utrzymywania i uderzają o ścianę komory próżniowej. Oprócz bardzo niepożądanego efektu wybijania atomów ze ściany, które potem zanieczyszczają plazmę, skutkiem ucieczki jest stopniowy spadek gęstości plazmy. Urządzenia takie jak odchylacz (patrz paragraf a), które wyciągają pewne ilości plazmy, przyczyniają się do dalszego zmniejszenia jej gęstości. Jest więc rzeczą zasadniczą zapewnienie kompensacji tego ubytku. Jednym z możliwych sposobów jest wtryskiwanie cząstek neutralnych, służące w pierwszej kolejności ogrzewaniu. Jest również możliwe „zimne" uzupełnianie paliwa, np. przez wdmuchiwanie gazu do komory próżniowej podczas pracy reaktora. W przypadku dużych urządzeń budowanych dzisiaj sensowniej jest jednak strzelać w plazmę dokładnie określonymi porcjami paliwa stałego, tzw. śrutem. Ta technika jest rozwijana i testowana w ramach specjalnego programu w IFP.

Rozwiązanie zadania M 242.

Oznaczmy $S_k = 1+\frac{1}{p_k}+\frac{1}{p_k^2}+\ldots = \frac{1}{1-\frac{1}{p_k}} = 1+\frac{1}{p_k-1}$ i zauważmy, że dla każdego m

(*) $S_1\cdot\ldots\cdot S_m > 1+\frac{1}{2}+\ldots+\frac{1}{m}$, ponieważ dla każdego $n \leqslant m$ w rozkładzie n na czynniki pierwsze nie występują liczby pierwsze większe niż m i wobec tego $\frac{1}{n} = \frac{1}{p_1^{l_1}}\cdot\ldots\cdot\frac{1}{p_m^{l_m}}$ występuje po lewej stronie nierówności (*).

Logarytmując obie strony (*) przy podstawie 2 i korzystając z wyniku zadania M 241, otrzymamy

$$\log_2\left(1+\frac{1}{2}+\ldots+\frac{1}{m}\right) < \log_2 S_1+\ldots+\log_2 S_m < \frac{1}{p_1-1}+\ldots+\frac{1}{p_m-1}$$

i ponieważ $p_{k+1} > p_k-1$, gdy $k > 1$, mamy ostatecznie $\log_2\left(1+\frac{1}{2}+\ldots+\frac{1}{m}\right) < 1+\frac{1}{p_1}+\ldots+\frac{1}{p_m-1}$.

Ale szereg $1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\ldots$ jest, jak wiadomo, rozbieżny, a więc ciąg logarytmów jego sum częściowych dąży do $+\infty$. Wynika stąd, że szereg $1+\frac{1}{p_1}+\ldots+\frac{1}{p_m}+\ldots$ jest również rozbieżny.

Słowa „program" użyto jako odpowiednika angielskiego terminu „project", oznaczającego całość prac zmierzających do realizacji pewnego przedsięwzięcia, a także grupę ludzi realizujących to przedsięwzięcie i używany przez nich sprzęt (przypis tłumacza).

Struktura IFP

Duże programy badań w IFP, takie jak ZEPHYR, ASDEX i WENDELSTEIN VII, są wyposażone i wspierane przez wiele różnych grup.
Program zbierania danych rozwija i nadzoruje systemy, za pomocą których dane eksperymentalne są przechowywane, przekazywane do centrum komputerowego i tam przetwarzane i oceniane. Celem jest dostarczenie wyników takich obliczeń w ciągu kilku minut, tak, aby parametry mogły być zoptymalizowane dla bezpośrednio następnych pomiarów w instalacji eksperymentalnej.

Wydział teorii wykonuje obliczenia analityczne i numeryczne, które są podstawą planowania nowych urządzeń. Wspiera też operacje eksperymentalne oceniając otrzymane rezultaty i używając ich w modelach zachowania plazmy, mechanizmów nagrzewania lub problemów zanieczyszczeń.
Wiele problemów fizyki plazmy jest dzisiaj rozwiązywanych przez „symulację numeryczną", tzn. używa się programu komputerowego do symulowania zachowania dużej liczby indywidualnych cząstek w celu określenia, przez całkowanie, zachowania całej plazmy. Obliczenia tego typu i inne metody numeryczne wymagają olbrzymiej pamięci operacyjnej i bardzo długich czasów liczenia. Ta praca teoretyczna oraz szacowanie wielkiej liczby danych eksperymentalnych wymagają dużych i wszechstronnych komputerów. Dotychczas IFP miał maszynę IBM 360/91 połączoną z maszyną AMDAHL 470 V/6, które czyniły IFP jednym z największych naukowych centrów komputerowych w Europie. Komputer IBM został niedawno zastąpiony przez maszynę CRAY-1, która kilkakrotnie powiększy moc obliczeniową IFP.
Zanieczyszczenia plazmy wywołujące silne niepożądane efekty muszą być dokładnie badane. Ponieważ główną przyczyną zanieczyszczeń jest oddziaływanie plazmy z otaczającą ścianą materialną, związane z tym procesy są badane w Wydziale Fizyki Powierzchniowej IFP. Przykładem takiego badania jest bombardowanie próbek możliwych materiałów ściany szybkimi jonami z akceleratora w celu symulowania erozji ściany.

Aby śledzić indywidualne modele reaktorów i dostarczać podstaw planowania nowych urządzeń bada się i porównuje różne możliwości konstruowania reaktorów termojądrowych w ramach Programu Badań Systemowych. Praca tej grupy dotyczy głównie możliwości technicznych, struktury kosztów, wpływu na środowisko i możliwych zagrożeń.
W celu konstruowania i obsługi wyrafinowanych eksperymentów z plazmą w IFP różne programy badań mogą korzystać z Centralnej Obsługi Technicznej. Najważniejsze usługi to dostarczenie energii elektrycznej do eksperymentów, projektowanie i mechaniczna konstrukcja aparatury oraz ulepszanie i konstruowanie specjalnego wyposażenia nieosiągalnego w handlu. Szczególnie ważnymi źródłami energii są duże generatory z kołem zamachowym, z których najsilniejszy, o wadze 230 ton, dostarcza prądu o maksymalnej mocy 150 MW.
(tłum. *A. Krasiński*)