

Prof. dr Sylwester KALISKI, czł. rzeczywisty PAN

1. Od 25 lat trwają fascynujące zmagania fizyków i inżynierów z problemem syntezy jądrowej. Jak wiadomo, przy rozszczepianiu ciężkich jąder (uran, pluton) oraz przy łączeniu lekkich jąder (wodór, deuter, tryt, lit itd.) następuje znaczne wydzielanie energii jądrowej.

O ile rozszczepienie bazuje na surowcach drogich, rzadkich, o tyle synteza jądrowa, która jest *nota bene* energetycznie wydajniejsza, bazuje na surowcach powszechnie dostępnych. Rozszczepieniu towarzyszą szkodliwe promieniowania, synteza jest pod tym względem procesem na ogół czystym. Jest jednak znacznie trudniejsza do urzeczywistnienia.

W latach pięćdziesiątych, gdy Anglicy dokonali pierwszych eksperymentów z pinczem, wydawało się, że cel jest tuż, tuż. Potem okazało się, że sznur plazmowy, wytwarzany przy znacznych wyładowaniach prądowych prowadzących do ściskania i wysokotemperaturowego nagrzewania plazmy, jest niestabilny — rozlatuje się.

I efekt syntezy na tej drodze jest dotychczas nieosiągalny.

Przez 20 lat budowano mozolnie coraz to większe systemy, bazujące na różnych pułapkach magnetycznych, utrzymujących nagrzaną plazmę w stanie skupienia. Do najbardziej udanych w tym względzie należy rodzina radzieckich „tokomaków”, opracowanych pod kierunkiem wybitnego fizyka radzieckiego Lwa Arcymowicza. Na przeszkodzie do osiągnięcia celu ostatecznego stanęły i tutaj problemy stabilności plazmy.

Podstawowym kryterium osiągnięcia progu syntezy jest tzw. kryterium Lawsona:

$$n\tau \geq 10^{14}(\text{s/cm}^3),$$

gdzie n oznacza liczbę cząstek w cm^3 plazmy, a τ — czas utrzymania jej w stanie skupienia (w tokomakach czas ten jest rzędu 0,01 – 0,1 s).

Na początku okresu prac nad pułapkami magnetycznymi brakowało trzech rzędów wielkości dla realizacji tego kryterium (1000 razy za mało). Przez 20 lat posunięto się naprzód o ponad 1,5 rzędu wielkości. Dziś do spełnienia tego kryterium brak jeszcze kilkadziesiątkrotnego zwiększenia gęstości plazmy i czasu jej utrzymania w stanie skupienia.

2. Dokładnie 10 lat temu dwóch uczonych, niezależnie, mianowicie Basow (laureat nagrody Nobla) w ZSRR i Dawson w USA, zwróciło uwagę na możliwość wykorzystania laserów do nagrzewania plazmy w bardzo krótkich okresach czasu, wykorzystując fakt, że impulsem laserowym można działać na zestaloną mieszaninę deuteru i trytu o gęstości $n \approx 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, co prowadzi do żądania, by τ było rzędu zaledwie $2 \cdot 10^{-9}$ s. Wtedy czynnikiem utrzymującym plazmę w stanie skupienia byłaby bezwładność cząstek — po prostu w tak krótkim czasie, mimo ogromnych temperatur i ciśnień, plazma nie zdążyłaby się rozlecieć przed zajściem w niej reakcji termojądrowej.

Idea Basowa i Dawsona miała w 1964 roku charakter idei ogólnej, nie wchodzącej szczegółowo w mechanizmy możliwości realizacji tego procesu zarówno od strony fizycznej, jak i technicznej. Później okazało się, że droga, o której początkowo myśleli obaj uczeni, jest praktycznie nie w pełni realna.

Po prostu dlatego, że przy gęstości $n = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ i czasie rzędu $2 \cdot 10^{-9}$ s tylko w znikomej części kulki (o masie rzędu miligrama) zdąży zajść reakcja syntezy, czas reakcji termojądrowej jest bowiem ponad 1000 razy dłuższy. W efekcie nie odzyskalibyśmy energii włożonej do nagrzania takiej kulki do temperatury syntezy, tj. około 100 mln K.

Czas ten stałby się wystarczający, gdyby np. udało się przedtem ścisnąć kulkę zmniejszając jej objętość ponad 1000 razy (ze wzrostem gęstości zwiększa się prędkość reakcji syntezy). Ale nie tylko to stało na przeszkodzie.

Obliczona energia potrzebna do nagrzania kulki zestalonej mieszaniny deuteru i trytu (D-T) o masie 1 mg do temperatury 100 mln K wynosiła 10^{10} J, a istniejące wtedy lasery dawały w impulsie nanosekundowym ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) energię rzędu 0,1 J. Tym niemniej prace Basowa i Dawsona mają charakter pionierski i dziś już historyczny; otworzyły one nową, fantastyczną perspektywę realizacji syntezy termojądrowej za pomocą laserów.

Do osiągnięcia celu wytyczonego przez Basowa i Dawsona brakowało 11 rzędów wielkości, co w porównaniu z trzema w systemach pułapek magnetycznych oznaczać mogło czekanie wiekami na osiągnięcie odpowiedniego poziomu techniki

Tak się z angielska (*pinch*) nazywa zjawisko skurczu plazmy, polegające na zwięźnieniu obszaru wyładowania elektrycznego, w wyniku czego tworzy się swego rodzaju sznur plazmowy (wskutek takiego samościskania się plazmy wzrastają jej gęstość, ciśnienie i temperatura). Zjawisko warunkują efekty magnetodynamiczne. Modelowo można je wyjaśnić po prostu rozważając oddziaływanie magnetyczne między przewodnikami w kablu, przez które płynie prąd elektryczny w tym samym kierunku.



W wyniku łączenia się najbliższych jąder w cięższe powstają też swobodne neutrony, zwane neutronami syntezy (dla odróżnienia ich od neutronów swobodnych powstających w efekcie innych zjawisk). Powstawanie ich wskazuje, że zachodzi reakcja syntezy jądrowej.

laserowej. Są jednakże dziedziny nauki i techniki, które pokonują normalny rozwój okresu „wieków” w parę lat.

Od czasu pojawienia się prac Basowa i Dawsona praktycznie do 1968 roku, w literaturze naukowej było cicho. W 1968 Basow ze współpracownikami ogłosił, że uzyskali oni za pomocą laserów temperaturę plazmy rzędu kilkunastu mln K i pierwsze neutrony syntezy. Basow operował wtedy już laserem o energii 20 J, zaś dokładniejsze wyliczenia pokazały, że wystarczyłoby do osiągnięcia syntezy energii lasera rzędu 10^9 J. A zatem w przeciągu trzech lat przeskoczono 3 rzędy wielkości.

Autor niniejszego artykułu pracował od 1966/67 r. nad możliwością wstrzeliwania (metodą klasycznego wybuchu) ciężkich otoczek (o odpowiednio dobranej gęstości) do plazmy, proponując wprowadzić impuls laserowy w momencie zbliżonym do momentu maksymalnego sprężenia plazmy.

Taki system powodował znaczne wydłużenie czasu skupienia plazmy (dzięki wstępnej kompresji i bezwładności otoczki). Energia potrzebna do osiągnięcia temperatur krytycznych spadła do 10^5 J, zaś lasery w tym czasie (1969–1970), gdy prace zostały opublikowane, dawały już 100 J w impulsie nanosekundowym. A zatem do celu zabrakło trzech rzędów wielkości, zaś 8 rzędów pokonano w przeciągu pięciu, sześciu lat. Ale pokonanie „ostatnich” rzędów wielkości jest zawsze trudniejsze i nie należy oczekiwać, że można będzie osiągać dalsze sukcesy w czasie wynikającym z ekstrapolacji osiągnięć okresu ostatniego.

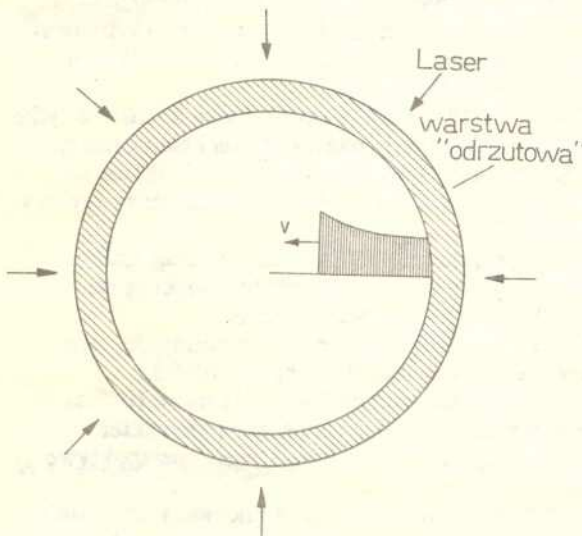
Trzeba tutaj dodać, że metoda wstrzeliwanych dodatkowo otoczek, poza pewnymi komplikacjami natury technicznej, dała również szereg niekorzystnych zjawisk związanych z promieniowaniem otoczek; jej praktyczna realizacja natrafiła na wiele dodatkowych niewiadomych.

Uczonych ciągle jednakże nurtowała myśl, że gdyby udało się ścisnąć materiał 1000 do 10 000 razy, wówczas przy nagrzewaniu kulki cała materia zdążyłaby przereagować jądrowo i reakcja stałaby się wydajna — opłacalna technicznie. Ale aby ścisnąć deuter 10^4 razy, należałoby wytworzyć horendalne ciśnienie 10^{17} paskali, czyli 10^{12} atm ($1 \text{ P} = 1 \text{ N/m}^2 \cong 10^{-5} \text{ atm}$) w centrum kuli. Dotąd metodami wybuchowymi (kumulacyjnymi) osiągnięto ciśnienia kilkunastu bilionów paskali, czyli kilkunastu milionów atmosfer, i zaledwie kilkakrotne sprężenie. A zatem wydawałoby się, że sprawa jest utopijna. Przełom nastąpił w 1972 r.

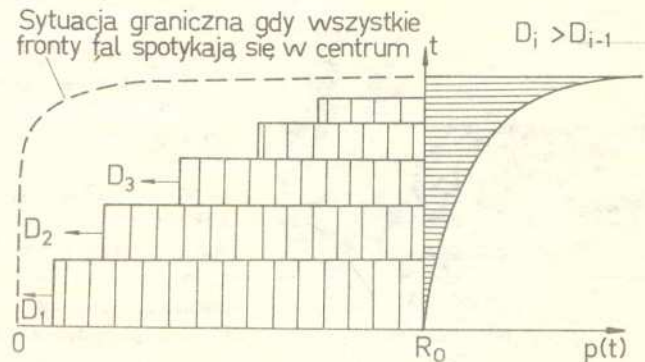
Trzech autorów równolegle: Brueckner oraz Nuckolls i współpracownicy w USA, a także autor niniejszego artykułu w Polsce, opublikowali tzw. laserową metodę kompresji plazmy. Na czym ona polega?

Wyobraźmy sobie kulę plazmową (rys. 1) o średnicy około 0,1 cm, nagrzaną impulsami z koncentrycznego układu laserów tak, aby promieniowanie laserowe wnikało tylko na nieznaczną głębokość pod powierzchnię kulki — rzędu mikrometrów (nie możemy tutaj wchodzić w mechanizmy, na bazie których tego typu efekt można uzyskać). Wtedy gwałtownemu nagrzaniu podlega tylko zewnętrzna warstewka kulki.

Do nagrzania tej warstewki trzeba znacznie mniejszej energii lasera. Zewnętrzna warstewka podlega gwałtownej ekspansji i odrzutowi na zewnątrz (ablacji), oddając



Rys. 1



Rys. 2



potężny impuls ściskający ku centrum kulki. Powstał swego rodzaju silnik odrzutowy. Laser dalej doprowadza energię do następnych warstw dopóty, dopóki fala uderzeniowa wywołana ciśnieniem odrzucanych warstewek nie dotrze do centrum kulki. Energię lasera kontroluje się tak, aby narastała w czasie (rys. 2). Z teorii fal uderzeniowych wiadomo, że na froncie fali kompresja nie może przekroczyć określonej wartości (dla naszej plazmy rzędu 4 razy). Wiadomo dalej, że każda następna fala uderzeniowa o wyższym ciśnieniu propaguje się szybciej ($D_i > D_{i-1}$, gdzie D_i — prędkość i -tej fali uderzeniowej) i powoduje następną kompresję plazmy ściśniętej przez falę poprzedzającą (~ 4 razy itd.).

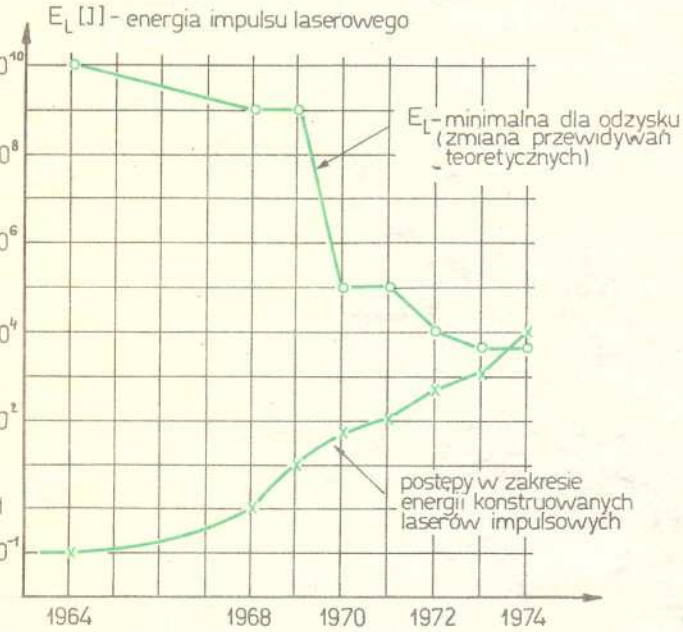
Jeżeli profil impulsu laserowego dobrać tak, aby wszystkie fale uderzeniowe spotkały się jednocześnie w centrum kulki, wówczas kompresja w centrum kulki rzędu 10^3 – 10^4 jest osiągalna za pomocą energii impulsu laserowego rzędu 10^4 J. Ściślej — energia potrzebna do uzyskania znacznie większego odzysku energii aniżeli włożona wynosi 10^4 – 10^5 J, zaś energia potrzebna do pokonania tzw. proggu krytycznego, przy którym stosunek energii odzysku do energii włożonej będzie większy niż 1, jest rzędu tylko kilku tysięcy dżuli.

Metoda kompresyjna stanowi przełom w laserowej mikrosyntezie. W latach 1973–1974 zbudowano już pojedyncze lasery na szkle neodymowym, o energii 1000 J w impulsie nanosekundowym. Podobne wyniki osiągnięto w roku 1974 w laserach gazowych na CO_2 .

Pierwsze operują długością fali 1,06 μm , drugie 10,6 μm . W związku z tym zasady ich stosowania do mikrosyntezy są odmienne. Oczywiście do laserowej syntezy można stosować zespoły laserów (np. prof. Basow osiągnął za pomocą 20 laserów po 100 J energię 2000 J i buduje obecnie układ na 5000 J). Amerykanie budują laser gazowy na 10 000 J. Tak więc krzywe dostępnej energii impulsu laserowego i energii potrzebnej do mikrosyntezy przecięły się. Masa kulki D-T zredukowała się obecnie do rzędu (10^{-4} – 10^{-5}) g. Energia uzyskiwana z „wybuchu” takiej kulki wskutek syntezy termojądrowej odpowiada w przybliżeniu energii wyzwolonej z około kilograma materiału wybuchowego! 100 takich wybuchów w ciągu sekundy to w procesie ciągłym odpowiednik elektrowni o mocy przekraczającej 1 GW!

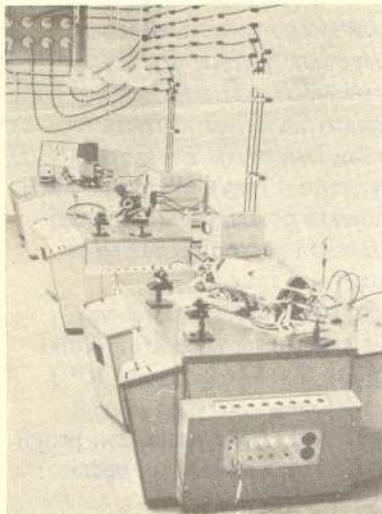
Tak więc w przeciągu 10 lat bariera 11 rzędów wielkości została teoretycznie pokonana. Takiego fantastycznego postępu chyba nie zna dotąd historia nauki. Sytuację scharakteryzuje rys. 3. „Laserowa droga” do syntezy jądrowej jest więc — jak wykazały dotychczasowe badania teoretyczne i doświadczalne (jeśli chodzi o zagadnienia podstawowe) — możliwa i fizycznie realna. Zadaniem fizyków i inżynierów jest obecnie szczegółowa realizacja tego programu. Od strony technicznej, a również i fizycznej należy pokonać jeszcze ogrom trudności; pojawiają się nowe uboczne efekty, które podobnie jak niestabilności plazmy w tokomakach mogą w decydujący sposób wpłynąć na realizację przedsięwzięcia. Stąd końcowy efekt może stać się osiągalny w przeciągu kilku lat, gdy trudności te nie będą zasadnicze, może jednakże też znacznie się oddalić.

Nie podlega jednakże kwestii, że metody laserowe zbulwersowały świat i stały się jednym z podstawowych konkurentów w wyścigu do syntezy termojądrowej. W latach 1972–1974 pojawiło się szereg propozycji mutacji metody nakreślonej wyżej; z braku miejsca nie omawiam ich tutaj. Dotąd 6 państw uzyskało za pomocą laserów takie temperatury (rzędu dziesiątek milionów kelwinów), iż zachodzi mikrosynteza termojądrowa, przy której wydzielają się neutrony syntezy. Są to: ZSRR, USA, Francja w pierwszej grupie, w drugiej zaś RFN, Polska i Japonia. W Polsce eksperyment ten zrealizowano w Wojskowej Akademii Technicznej. Pierwszy efekt neutronowy mikrosyntezy termojądrowej uzyskaliśmy w Polsce w kwietniu 1973 r. Wszystkie efekty syntezy otrzymano przy większym wkładzie energii laserowej aniżeli energia odzysku. Obecnie, jak już wspominałem, idzie o taką eskalację procesu, aby odzysk był najpierw dodatni, a potem — aby pokrywał wszelkie straty i aby mimo to przeważał. O to toczy się obecnie batalia.

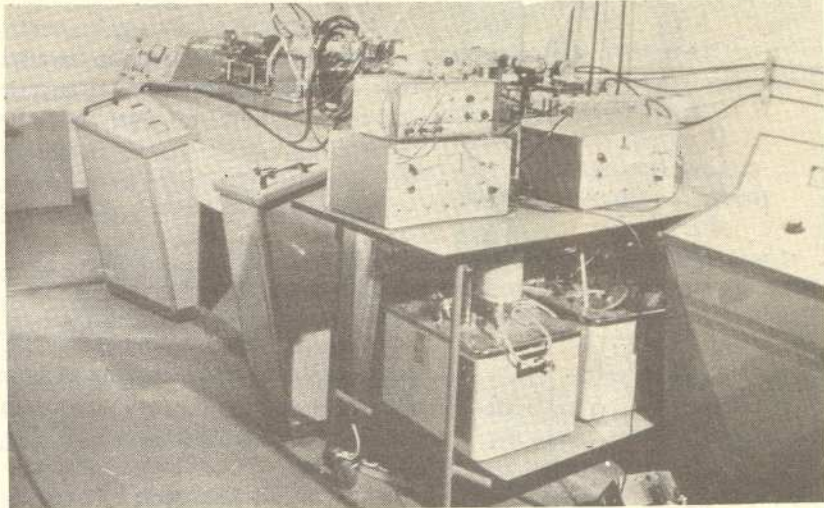


Rys. 3

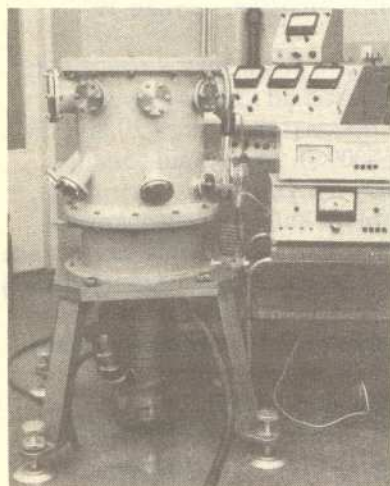




Fot. 2



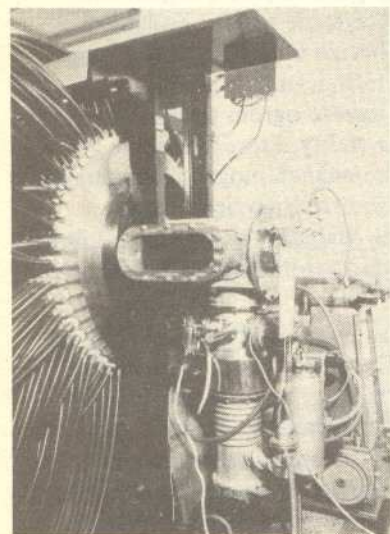
Fot. 1



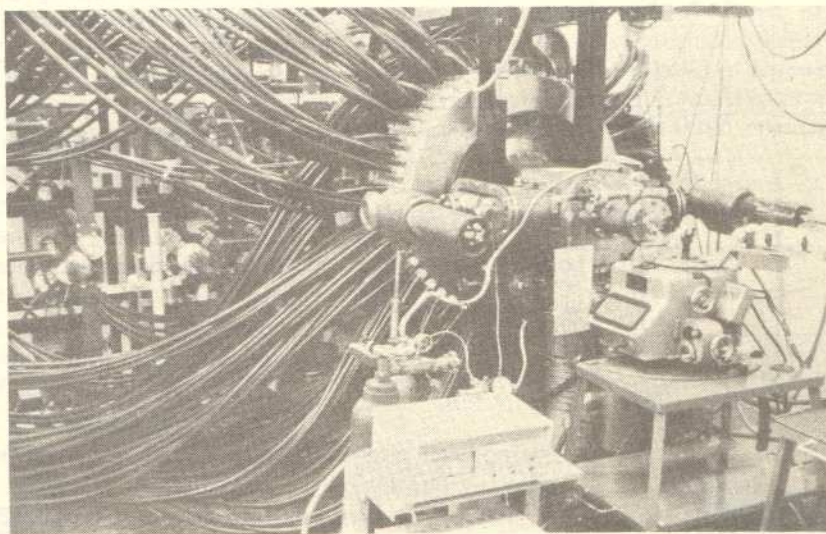
Fot. 3

Układy laserowe i głowice pomiarowe, na których zrealizowano polski eksperyment (energia lasera rzędu 40 J), pokazane są na zdjęciach 1, 2 i 3.

3. Budowa laserów o energiach rzędu 10 tys. J jest niezwykle kosztowna, idzie w miliardy. Trudno byłoby ponieść tak wielkie koszty w kraju naszej wielkości. W związku z tym pracujemy w Polsce nad systemem laser-focus, gdzie focus jest to koncentrator plazmowy, skupiający wstępnie plazmę, na którą następnie działa się impulsem laserowym. Pozwoli to obniżyć krytyczną wartość impulsu. Układ focus pokazany jest na zdjęciach 4 i 5. Został zbudowany dla WAT w IBJ. Niezależnie od tego, autor niniejszego artykułu opracował w 1973 r. metodę prekompresji wybuchowej plazmy, poprzedzającej wstępnie kompresję laserową. Metoda ta, oparta na specjalnych technikach wybuchowych, za pomocą których osiągnięto niezwykle wysokie, nieznane dotychczas efekty kompresyjne, pozwala obniżyć krytyczną wartość energii impulsu laserowego kilkakrotnie, tak że teoretycznie mikrosynteza jest osiągalna przy poziomie energii impulsu rzędu 1000 J, co leży już w granicach naszych możliwości. Możliwości te poza tym potęgują się dzięki współpracy z ZSRR — z grupą prof. Basowa.



Fot. 4



Fot. 5

4. Trudno powiedzieć, jak potoczą się losy „drogi laserowej”. Stała się ona jednakże już dziś rewolucyjna. Trudności fizycznych i technicznych jest jeszcze ogrom — dotyczy to w szczególności rozwiązań samych reaktorów mikrosyntezy. Gdyby jednak trudności te zostały pokonane, wówczas skok w rozwoju ludzkości dałby się porównać tylko ze skokiem, jaki spowodowało odkrycie elektryczności. Oznaczałoby to nie tylko wybawienie człowieka od wszelkich kryzysów energetycznych, ale dałoby jeszcze możliwości sztucznego kształtowania klimatu, ocieplania pól, nowe perspektywy komunikacyjne, w szczególności kosmiczne, nowe perspektywy materiałowe, badawcze, słowem — ogromny skok w rozwoju ludzkości. Najbliższe lata winny rozstrzygnąć ten frapujący problem.

Szczegółowe omówienie zagadnień przedstawionych w artykule znajdzie Czytelnik w książce autora *Laserowa mikrosynteza termojądrowa*; książka ta ukaże się w serii „Omega”.