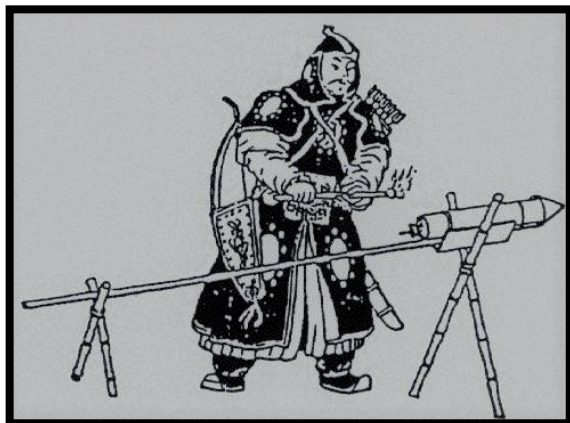


Ziemowit Walkowiak

Silniki rakietowe: kiedyś – dziś – jutro

Już w najdawniejszych czasach ludzie chcieli się wznieść ponad powierzchnię ziemi. Chcieli zobaczyć świat z góry, lub też dowiedzieć się czy coś, gdzieś tam wysoko, się znajduje. Widząc ptaki, ich upierzone skrzydła, starali się odwzorować ich sposób na wznoszenie się w powietrze, lecz początkowo nie udało im się to ani razu. Nasi przodkowie musieli poczekać bardzo długo, by zaspokoić swoją ciekawość. Tysiące lat musiało upłynąć, by człowiek zdołał się wznieść w przestworza, a następnie jeszcze wyżej, w kosmos. Jednakże, zanim pierwsi ludzie tam polecili, zanim pierwszy obiekt zbudowany ludzką ręką opuścił atmosferę Ziemi, ludzkość musiała przejść bardzo długą drogę rozwoju technicznego wiodącą od pierwszych fajerwerków aż do lotów międzyplanetarnych oraz prawdopodobnych podróży do gwiazd. Na łamach niniejszego artykułu poruszone zostaną kwestie rozwoju napędu, umożliwiającego osiągnięcie postępu. Zobaczymy więc czym poszczególne wynalazki były zasilane oraz poznamy ich konstrukcję. Nasza podróż przez dzieje obejmie zaś rozwój od pierwszych, nieśmiałych eksperymentów, aż do nowoczesnych osiągnięć astronautyki i inżynierii kosmicznej.

Żadne z zaawansowanych osiągnięć technicznych, stosowanych w powyższych dziedzinach nie byłyby możliwe, gdyby nie odkrycie niesamowitej substancji użytej po raz pierwszy w Chinach w IX w. Mowa oczywiście o czarnym



Ryc. 1. Chińska rakietą czarnoprochowa

zaczęli z nią eksperymentować. Zapiski tych uczonych tłumaczyły, aby w pobliżu tego prochu znajdowały się tylko materiały niepalne oraz, aby wspomnianych składników nie mieszać, nie będąc do tego przygotowanym.

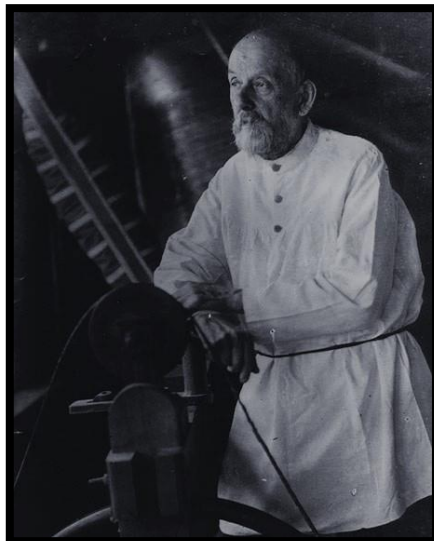
Po tym kluczowym odkryciu, zaczęto go początkowo używać jako paliwa do sztucznych ogni. Oczywiście, starano się zmienić to w oręż. Tym sposobem powstały „wyrzutnie świszczącego ognia” – rodzaj broni, nazwany tak przez Mongołów, którzy doświadczyli jej na sobie jako pierwsi. Były to małe przyczepy ciągnięte przez konie, wyposażone w prowadnice zaopatrzone w rakiety napędzane czarnym prochem. Trzeba powiedzieć, że wyrzutnie te nie były efektywne w niszczeniu pozycji wroga, lecz już sam widok ognistych smug i wybuchów oraz przerażający dźwięk świstu rakiet wystarczyły, aby wpędzić przeciwnika w popłoch. W pewnym momencie czarny proch wywędrował z Chin do Europy, jednak używany był głównie do sztucznych ogni, nie sprawdzając się w walce, stąd nie używano go często w celach militarnych.

Przez długi czas nie odnotowano postępów w rozwoju napędu rakietowego. Lecz, gdy w XVII stuleciu Isaac Newton (1643-1727) ogłosił swoje trzy prawa dynamiki, umożliwiające wytłumaczenie działania silników rakietowych oraz możliwości ich stosowania w różnym środowisku, oficjalnie powstała dedykowana temu nauka. Uczni niemieccy i rosyjscy zaczęli eksperymentować z używaniem rakiet o masie 45 kg i więcej, tworząc czasami konstrukcje tak mocne, że

prochu, który stał się źródłem napędu fajerwerków. W tym czasie, siłą przypadku, chińscy alchemicy, którzy poszukiwali nieskutecznie przepisu na eliksir nieśmiertelności odkryli, że mieszanka siarki, węgla drzewnego oraz saletry potasowej, ma właściwości pirotechniczne. Widząc to,

przy starcie od razu robiły dużą dziurę w ziemi przez potężne gazy wylotowe silnika.

Wyraźnego przełomu w dziedzinie tworzenia rakiet, dokonało w początkach XX wieku dwóch uczonych, którzy w podobnym czasie w swoich pracach doszli do tych samych wniosków. Tymi uczonymi byli Konstantin Ciołkowski (1857-1935) oraz Robert Goddard (1882-1945). Pierwszy z nich był rosyjskim nauczycielem o polskich korzeniach, który w młodości zachorował na



Ryc. 2. Konstantin Ciołkowski
(1857-1935)

szkarlatynę i w wyniku tego niemal stracił słuch. Nigdy przez to nie poszedł do szkoły i stał się samoukiem, co też nie przeszkodziło mu w dokonaniu wielkich przełomów w nauce. Został nauczycielem matematyki i fizyki, zaś w ciągu swojego życia zaproponował stworzenie samolotu jednopłatu (1894 r.), zbudował pierwszy w Rosji tunel aerodynamiczny i opracował technikę pomiarów aerodynamicznych (1897 r.). Wspomnianym przełomem była natomiast praca nad techniką rakietową w początku XX stulecia. Uczony zaproponował użycie rakiet nie jako broni, lecz jako środka transportacji w kosmosie.

Praca naukowa na ten temat, pt. „Eksploracja przestrzeni kosmicznej przy użyciu urządzeń rakietowych”, opublikowana została w 1903 r. Najważniejszym elementem pracy Ciołkowskiego był wzór, opisujący zmianę prędkości rakiety Δv (czyt. „delta v”) wychodzącą z pomnożenia v_e , efektywnej prędkości gazów wylotowych z silnika, funkcji logarytmicznej $\ln$ oraz dzielenia całkowitej masy rakiety razem z paliwem a masy suchej m_0 , czyli bez paliwa, znany bardziej jako równanie rakietowe (ang. *rocket equation*):

$$\Delta v = v_e \ln (m_0 / m_f)$$

To równanie stworzyło fundamenty pod astronautykę taką, jaką znamy dzisiaj, umożliwiając obliczanie ile paliwa i jak szybkich gazów wylotowych silnika potrzeba, by dostać się w miejsce naszego wyboru. W później stworzonym, idealnym równaniu raketowym, używa się także wartości I_{sp} . Oznacza to impuls właściwy, a jego wartość jest proporcjonalna do prędkości gazów wylotowych, stąd im jest większa, tym silnik staje się wydajniejszy.

W międzyczasie, amerykański naukowiec Robert Goddard wpadł na podobne pomysły i stworzył własne prace na temat rakiet, nie znając badań Ciolkowskiego. Od zawsze interesowało go zagadnienie wznoszenia się wysoko, albowiem już jako dziecko zamierzał skonstruować – jednak bez powodzenia – balon na ciepłe powietrze zrobiony z płacht aluminiowych. Marzył o dalekich podróżach w kosmos, dlatego snuł plany budowy pojazdu, który mógłby odbyć lot międzyplanetarny.

Goddard przez całe swoje młode życie był nieprzeciętny. Chciał np. własnoręcznie uformować diamenty z grafitu poprzez eksplozje wodorowe, zaś w swojej piwnicy – w związku ze swymi „wybuchowymi” zainteresowaniami – trzymał walizkę trotylu. Formułował również pomysły dotyczące technologii przyszłości. Zaproponował użycie napędu korzystającego z super przyspieszonych jonów, a także użycie paneli słonecznych jako wydajnego sposobu pozyskiwania energii w kosmosie. Bezbłędnie opisał formę ochrony termicznej dla pojazdu, który w czasie powrotu z kosmosu musiałby się ochronić przed rozgrzaną plazmą powstałą w atmosferze w związku z wysoką prędkością. Wszystkie te pomysły Goddarda wykorzystywane są w budowie współczesnych pojazdów kosmicznych.

Uczony, podczas lat spędzonych w wojsku, stworzył też pierwowzór raketnicy „bazooka”. Była wówczas napędzana nitrogliceryną, przez co armia amerykańska potrzebowała aż 25 lat, by usprawnić jej konstrukcję i włączyć do czynnego użytku. W 1912 r. Goddard podjął pracę nad stworzeniem wzoru, dzięki

któremu mógłby obliczyć położenie rakiety w trakcie jej lotu znając masę paliwa oraz relatywną względem rakiety prędkość gazów wylotowych silnika. Używając elementów rachunku różniczkowego stworzył „wzór rakietowy”, czyniąc to niezależnie od dokonania Konstantina Ciołkowskiego, gdyż jego prace nie były jeszcze rozpowszechnione poza Rosją.



Ryc. 3. Robert Goddard (1882-1945)

Wzór Goddarda był technicznie bardziej precyzyjny, ponieważ ten, opracowany przez poprzednika, nie wliczał w równanie ani oporu powietrza podczas lotu rakiety, ani grawitacji. Mając teraz narzędzie pomocne w skomplikowanych obliczeniach, Goddard rozpoczął prace nad raketą suborbitalną, dzięki której miano pozyskać ogólne informacje o wyższych warstwach atmosfery. Miały one pomóc w określeniu, jakie warunki musiałaby znieść rakietę, przeznaczoną do jej opuszczenia.

Od 1915 r. uczony eksperymentował z raketami o paliwie stałym (z użyciem prochu strzelniczego), które konstrukcyjnie niewiele różniły się od rakiet czarnoprochowych stworzonych przez chińczyków w IX w. Właśnie wówczas, podczas tych eksperymentów, badacz doszedł do wniosku, że silnik zasilany paliwem w stanie ciekłym miałby znacznie więcej zalet. Postanowił więc stworzyć odpowiednią konstrukcję, jednak nie było to zadanie łatwe, gdyż raketę należało zaopatrzyć w specjalne zbiorniki. W 1916 r. Goddard rozpoczął prace w tym kierunku.

Eksperymenty i doświadczenia badacza, doprowadziły dra Artura G. Webstera, głowy departamentu fizyki na Uniwersytecie Clarka w Worcester, gdzie Goddard studiował, do wniosku, że świat powinien już usłyszeć o jego pracach. Polecił mu opisać postępy w badaniach nad techniką rakietową

i opublikować wyniki jako pojedyncze dzieło. W ten sposób powstała „Metoda osiągnięcia ekstremalnych wysokości” z 1919 r.

Praca naukowa Goddarda budziła spore kontrowersje. W ówczesnej prasie raz po raz pojawiały się głosy, że idea podróży poza atmosferą Ziemi jest zbyt fantastyczna, a badania w tym kierunku są nienaukowe i nasączone marzycielstwem. Uczony jednak nie zaprzestał swoich działań nad zbudowaniem pierwszej rakiety, napędzanej paliwem ciekłym.

Silnik chemiczny, działający dzięki gwałtownej reakcji chemicznej paliwa ciekłego, oprócz substancji napędzającej go, nie różni się zbyt wiele substratami, które znajdują się w rakiecie działającej na paliwie w formie stałej. Do reakcji potrzebny jest utleniacz, reaktywna substancja chemiczna oraz obudowa, umożliwiająca ukierunkowanie gazów wylotowych. Rakieta napędzana paliwem ciekłym ma jednak bardziej skomplikowaną konstrukcję złożoną z wielu elementów, których w rakiecie napędzanej paliwem stałym nie potrzeba. Aby taka rakieta mogła zadziałać, potrzeba trzech oddzielnych komponentów: zbiornika z utleniaczem, czyli substancją, która mogłaby umożliwić spalanie; zbiornika z paliwem ciekłym, tj. substancji mającej ulegać gwałtownej reakcji spalania; oraz komory spalania, a więc miejsca, gdzie utleniacz i paliwo mieszają się ze sobą tworząc mieszaninę wybuchową, gotową do podpalenia.

Oczywiście, spalanie bez utleniacza jest możliwe, jednakże – jako zbyt słabe – nie jest wykorzystywane w budowie rakiet. Przykładowo, jeśli podpalimy benzynę, lub podobną substancję łatwopalną w stanie ciekłym, to zachodzi reakcja chemiczna, w której składnikiem jest reaktywna substancja, którą podpaliliśmy, oraz tlen znajdujący się w powietrzu. Tego ostatniego nie jest jednak dużo, gdyż tylko 21% na poziomie morza (dodatkowo ilość jego spada wraz z wysokością). Aby silnik, działający przy użyciu paliwa stałego lub ciekłego, był wystarczająco potężny by przyspieszyć raketę, tlen z atmosfery nie wystarcza, stąd używa się oddzielnej substancji dostarczającej go w wielkich ilościach, bez żadnych dodatkowych związków chemicznych. Najczęściej używanym utleniaczem

jest ciekły tlen (ang. *liquid oxygen* – LOX). Paliwem, które użył Robert Goddard była benzyna, substancja bardzo reaktywna i łatwopalna. Idealnie nadawała się do użycia w jego pierwszej rakiecie bez ponoszenia większego kosztu za inne paliwo, które mogłoby być trudniejsze w przechowywaniu, np. płynny wodór, który wymaga schłodzenia do -253°C , aby utrzymać go w postaci płynnej.

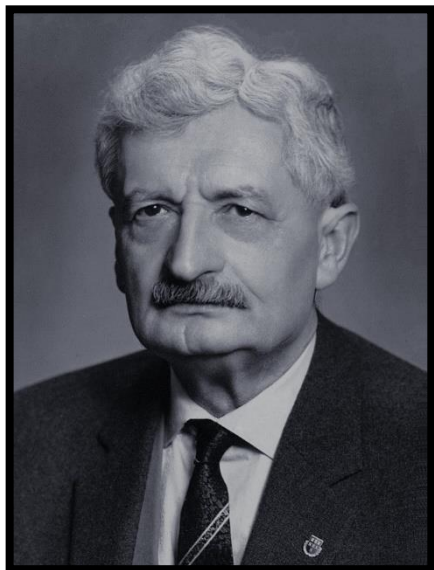
Co prawda, na dzisiejsze standardy konstrukcja rakiety Goddarda mogłaby się wydawać dziwna, jednak trzeba pamiętać, że był to pierwszy taki eksperyment w historii. Zbiorniki z paliwem, benzyną oraz płynnym tlenem znajdowały się na samym dole konstrukcji, a dysza silnika razem z komorą spalania znajdowały się nad zbiornikami. Historyczny lot tej rakiety odbył się w dniu 16 marca 1926 r. Czas działania silnika wyniósł 2,5 sekundy, jednak w tym czasie uniósł całą raketę na wysokość 12 metrów i poprzez wychylenie w bok wylądowała 56 metrów dalej.

W kolejnych latach, rakiety Goddarda stawały się potężniejsze, coraz bardziej zaawansowane oraz osiągały coraz większe wysokości. Zaopatrywane były w nowe elementy, jak żyroskop czy systemy nawigacyjne. W związku ze swymi osiągnięciami Goddard okrzyknięty został jednym z trzech ojców założycieli techniki rakietowej.

Trzecią osobą był austriacki fizyk i inżynier Hermann Oberth (1894-1989), który w tym samym czasie prowadził badania nad silnikami rakietowymi. Jego zainteresowanie kosmosem zaczęło się po przeczytaniu powieści Juliusza Verne, jednak – chcąc pójść w ślady ojca – w 1912 r. rozpoczął studia medyczne na



Ryc. 4. Rakieta Goddarda, 1926 r.

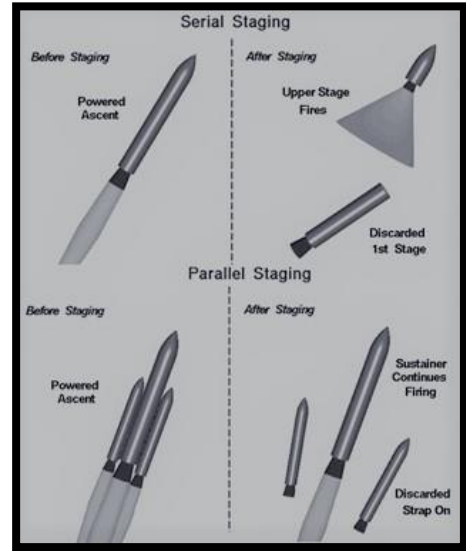


Ryc. 5. Hermann Oberth (1894-1989)

Uniwersytecie w Monachium. W czasie I wojny światowej służył w niemieckim wojsku jako sanitariusz. Po wojnie doszedł do wniosku, że medycyna nie była jego przyszłością, dlatego zmienił przedmiot swych zainteresowań na fizykę. Studiował na wielu uniwersytetach: zaraz po wojnie wstąpił na Uniwersytet w Cluj, gdzie studiował matematykę, chemię i fizykę, potem wrócił na Uniwersytet w Monachium na kierunek nauk ścisłych, następnie przeniósł się na Uniwersytet w Getyndze, zaś w końcu – na Uniwersytet w Heidelbergu. Podczas swoich badań zajął się kwestią lotu w kosmos. Wówczas na uniwersytecie nie było nikogo, kto zajmowałby się naukowo rakietami pod względem możliwości odkrywania odległych jego zakątków, przyciągania grawitacyjnego planet czy innych obiektów.

Badania Obertha w ciągu trzech lat jego studiów fizyki i matematyki doprowadziły do stworzenia pracy doktorskiej, którą zaprezentował w 1922 r. Została jednak odrzucona. Powodem była zarzucana jej autorowi „absurdalność” i „fantastyka”. To wydarzenie zmieniło cele Obertha z próby osiągnięcia wielkich wyników akademickich na dążenie do wyróżnienia się jako człowiek nauki, który dokonał osiągnięć na polu dotychczas nieodkrytym. Książka, która wreszcie nadała mu rozgłos, opierała się na rozważaniach z odrzuconej dysertacji doktorskiej. Ukazała się pod tytułem „Die Rakete zu den Planetenräumen”, czyli „Rakieta w przestrzeni międzyplanetarnej”. Zawierała szczegółowy opis zjawisk, jak również elementów technicznych związanych z rakietami oraz ich wykorzystaniem w lotach kosmicznych. Znajdował się tu także opis tzw. efektu Obertha oraz najważniejszego elementu konstrukcyjnego, tj. wielostopniowości rakiety.

Rakieta wielostopniowa to typ, który jest w stanie osiągnąć lot orbitalny i mieć możliwość dalszego lotu. Taka rakietka składa się co najmniej z dwóch stopni (inna nazwa to „człon”), ułożonych jeden na drugim. Pierwszy stopień zwykle jest większy oraz zaopatrzony w większą ilość paliwa. Ma również silniki mogące udźwignąć masę dwóch lub więcej stopni takiej rakietki. Podczas lotu, gdy paliwo pierwszego stopnia jest w pełni wykorzystane, człon rakietki zostaje odrzucony z pomocą

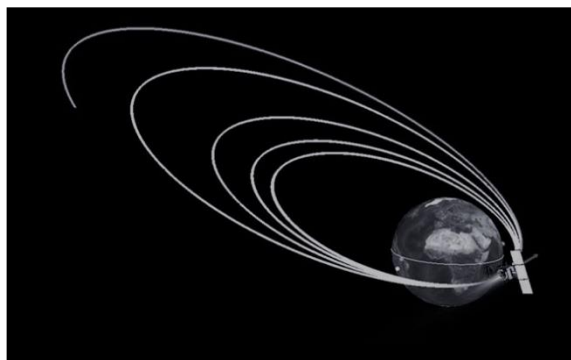


Ryc. 6. Schemat stopniowania napędu rakietki

separatora, który najczęściej występuje w formie pustego w środku cylindra, łączącego oba jej stopnie, oraz chroni silnik drugiego stopnia przed wpływem atmosfery i innych zagrożeń. Po odrzuceniu pierwszego stopnia następuje zapłon silnika drugiego stopnia. Ten ostatni jest mniejszy od pierwszego. Ze względu jednak na wysoką prędkość rakietki przyspieszonej pracą pierwszego silnika, drugi stopień jest w stanie przyspieszyć znacznie bardziej, gdyż łatwiej jest zwiększyć energię kinetyczną mając już jej dużo zakumulowanej (do mechaniki zwiększania energii kinetycznej wrócimy przy objaśnieniu efektu Obertha).

Opisany typ stopniowania rakietki jest najczęściej używany w konstrukcji rakiet. Istnieje jeszcze stopniowanie równoległe, gdy w taki właśnie sposób do pierwszego stopnia przymocowane są rakietki pomocnicze (ang. *booster*), wypalające się szybciej od pierwszego stopnia. Po wyczerpaniu ich paliwa zostają odrzucone a rakietka leci dalej. Nadaje to większą prędkość podczas etapu pierwszego stopnia.

Kolejną, dzisiaj niezbędną, wiedzą w dziedzinie astronautyki jest znajomość efektu Obertha. W momencie zbliżania się rakietki lub statku kosmicznego



Ryc. 7. Efekt Obertha

w kierunku planety, na stabilnej orbicie, maszyna zwiększa swoją energię kinetyczną; przy czym prędkość statku wzrasta w miarę zbliżania się do studni grawitacyjnej. Miejsce największego zbliżenia nazywa się perycentrum.

Wobec tego, obszar najbliższego położenia wobec źródła pola grawitacyjnego jest najlepszym miejscem zwiększenia prędkości rakiety, bądź statku. Przyrost prędkości w tym obszarze nakłada się na resztę orbity rakiety, co zwiększa jej rozmiar. Gdyby rakietą zaczęła przyspieszać w innym momencie, równoległe do wektora jej lotu na tej orbicie, to zużywałaby swoje paliwo znacznie mniej efektywnie, gdyż jej prędkość, a zatem energia kinetyczna, byłaby mniejsza.

Książka Obertha po opracowaniu przez Maxa Valiera (1895-1930), niemieckiego inżyniera zajmującego się technologią rakietową, doprowadziła do powstania wielu amatorskich kół oraz stowarzyszeń rakietowych. Dokładniejsze, poszerzone jej wydanie opublikowano w 1929 r. pt. „Die Wege zur Raumschiffahrt”, czyli „Podróż w przestrzeń międzykosmiczną”. Publikacja przykuła uwagę wielu naukowców i została uznana za rewolucyjne dzieło w dziedzinie fizyki. Hermann Oberth otrzymał za nie pierwszą nagrodę Roberta Esnault-Pelterie w wysokości 10.000 franków. Mając teraz fundament pod bardziej zaawansowane badania, Oberth rozpoczął pracę nad rakieta napędzaną ciekłym paliwem. W 1931 r., z gotowym już prototypem i udanym testem pierwszego silnika o nazwie „Kegeldüse” uczony otrzymał w Rumunii patent na raketę napędzaną paliwem ciekłym.

Dnia 7 maja tego roku, w okolicy Berlina Hermann Oberth udanie wystrzelił pierwszą swoją raketę. Podczas II wojny światowej, już jako obywatel Trzeciej Rzeszy, w latach 1941-1943, pracował w ośrodku rakietowym

w Peenemünde wraz z Wernherem von Braunem (1912-1977) nad rakietami V2. Po wojnie projektował jeszcze rakiety do celów militarnych dla włoskiej marynarki wojennej (lata 1950-1953) oraz dla Stanów Zjednoczonych w 1955 r. Wreszcie, w 1958 r., udał się na emeryturę i osiadł w miasteczku Feucht koło Norymbergi, gdzie przez resztę swojego życia zajmował się pracami pokroju filozoficznego i teoretycznego. W 1969 r. został zaproszony do Stanów Zjednoczonych, gdzie oglądał lot Apollo 11.

Hermann Oberth na początku XX w. dokonał tego, co Amerykanin Robert Goddard, jednak niezależnie od jego badań. Udało mu się stworzyć i osobiście rozpracować mechanikę działania rakiet napędzanych paliwem ciekłym oraz formy eksploracji kosmosu za pomocą fizyki, czego nikomu nigdy wcześniej nie udało się teoretycznie opisać. W efekcie, wraz z Konstantym Ciołkowskim oraz Robertem Goddardem, uznawany jest za ojca założyciela współczesnej techniki rakietowej.

Podczas II wojny światowej, niemieccy naukowcy, inżynierowie i technicy rakietowi (w tym Wernher von Braun i Hermann Oberth) pracowali nad raketą o niemieckim numerze A-4, bardziej znaną pod nazwą V2. Zaprojektowano ją jako raketę balistyczną o średnim dystansie, używaną głównie w bombardowaniach Londynu w 1944 i 1945 r. Raketę V2 wprowadzono jednak zbyt późno, aby zmienić bieg działań zbrojnych na korzyść Niemiec, lecz jej użycie stworzyło fundament pod pierwsze konstrukcje w USA i ZSRR.

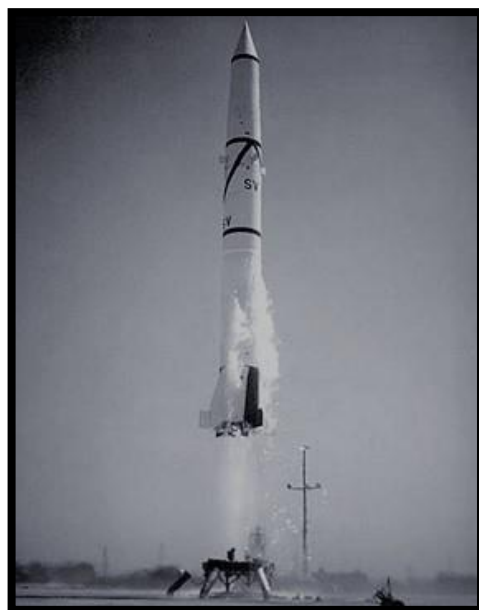
Krótko po wojnie komponenty niemieckich rakiet, jak również ich plany i projekty, zostały wywiezione do dwóch wspomnianych supermocarstw wraz z naukowcami i inżynierami niemieckimi, którzy mieli pracować nad raketami balistycznymi. Byli oni cennym nabytkiem, tym bardziej, że zaczął się okres zimnej wojny między USA i państwami Zachodu a Związkiem Radzieckim i blokiem socjalistycznym. Podczas wykonanej przez amerykańskie służby operacji „Paperclip”, mającej zebrać wspomnianych inżynierów i naukowców niemieckich, jak i specjalistów od medycyny, broni biologicznej i chemicznej, jeden z czołowych



Ryc. 8. Wernher von Braun (1912-1977)

w rodzinie rakiet Redstone to Jupiter-A, ulepszona wersja PGM-11, a następnie Jupiter-C, czyli rakiet atmosferyczna, przeznaczona do testowania modułów powrotnych na Ziemię. Z pomocą tej rakiety planowano wystrzelić pierwszego amerykańskiego satelitę na orbitę, jednak z przyczyn propagandowych miało to być wykonane przez rakietę cywilną, a więc konstrukcję nie związaną z wojskiem amerykańskim. To spowodowało długie opóźnienia, co dało Związkowi Radzieckiemu szansę na pierwsze uderzenie z zaskoczenia. Dnia 4 października 1957 r., na czubku przerobionej rakiety balistycznej R-7, Sputnik 1 poleciał poza granice atmosfery, aby stać się pierwszym sztucznym satelitą wykonanym przez człowieka. Świat wpadł w osłupienie, a świat zachodni przeraził się. Ten lot oznaczał, że Związek Radziecki był

uczonych zajmujący się techniką rakiętową, Wernher von Braun, został przydzielony do pracy nad raketami balistycznymi dla armii amerykańskiej. Rezultatem jego pracy, jak i innych inżynierów, była linia rakiet Redstone, której model PGM-11 bezpośrednio bazował na konstrukcji V2, używając też takiego samego paliwa. PGM-11 był raketą balistyczną o zasięgu maksymalnym 329 kilometrów. Następna



Ryc. 9. Rakiet PGM-11

w stanie dokonać lotów kosmicznych nad terenami alianckimi, a szczególnie Stanów Zjednoczonych.

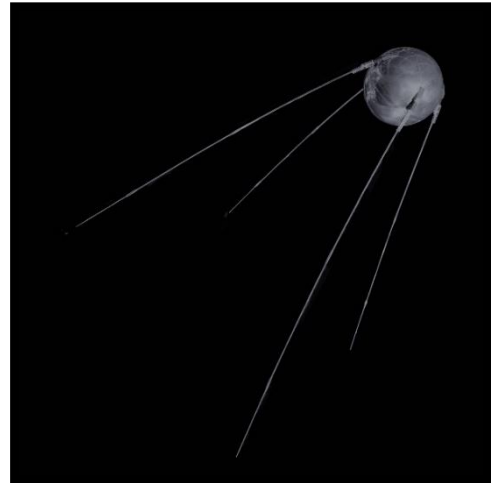
Rząd USA natychmiast uruchomił własny program kosmiczny w celu prześcignięcia przeciwnika. Cztery miesiące po starcie Sputnika 1, w dniu 1 lutego 1958 r., rakietą Juno 1 (będąca przerobionym Jupiterem-C), wystrzeliła pierwszego sztucznego satelitę amerykańskiego.

Dnia zaś 29 lipca w USA oficjalnie założono instytucję, zajmującą się lotami w kosmos, pn. *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Otrzymałszy wielki budżet, włączyła się ona w wyścig kosmiczny.

Pierwsze zwycięstwa należały jednak do Związku Radzieckiego. Jeszcze w 1957 r. Sputnik 2 wystrzelił pierwsze zwierzę w kosmos – słynnego psa Łajkę (ok. 1955-1957), który niestety nie przeżył. W dniu 12 kwietnia 1961 r. odbył się lot Vostoka 1 – Jurij Gagarin (1934-1968) został pierwszym człowiekiem, który poleciał w kosmos. Amerykanie niezwłocznie podjęli stosowne działania. W ich efekcie rozpoczęto program Mercury-Redstone, którego celem było wyniesienie człowieka w przestrzeń kosmiczną. Stworzone rakiety – modele Mercury-Red-



Ryc. 11. Łajka (ok. 1955-1957)



Ryc. 10. Sputnik 1

stone 3 oraz 4 – umożliwiły lot kosmiczny dwóm astronautom. Pierwszym, który poleciał poza umowną linię między atmosferą a kosmosem (tj. linię Kármána), był Alan Shepard (1923-1998) na pokładzie rakiety Mercury-Redstone 3 w ramach misji Freedom 7 (dnia 5 maja 1961 r.). Mimo, że jego lot był suborbitalny



Ryc. 12. Jurij Gagarin (1934-1968)

i trwał jedynie 15 minut, był bardzo ważny dla USA, gdyż oznaczał początek amerykańskiej ekspansji w kosmosie. Podczas swojego przemówienia z okazji odbytej misji, prezydent USA John F. Kennedy zapowiedział, że do końca de-

kady, Stany Zjednoczone postawią swojego astronautę na powierzchni Księżyca i bezpiecznie sprowadzą go na Ziemię.

Kolejna misja – Liberty Bell 7, miała miejsce 21 lipca 1961 r., także była lotem suborbitalnym, jednak po raz pierwszy Amerykanin zdołał okrążyć Ziemię. Był nim zaś John Glenn (1921-2016), który leciał raketą Mercury-Atlas 6. Składała się ona z rakiety nośnej (typu baliścycznego) Atlas-D oraz ze statku Mercury, takiego samego, jak w programie Mercury-Redstone. Rakietę Atlas-D po raz pierwszy użyła w programie kosmicznym paliwa RP-1, tj. odmiany wysoko rafinowanej nafty. Użyto je zamiast stosowanego dotąd ciekłego wodoru z powodu większej gęstości oraz mniejszego ryzyka wybuchu. Rolę utleniacza pełnił ciekły tlen, który używano praktycznie w każdej rakiecie kosmicznej



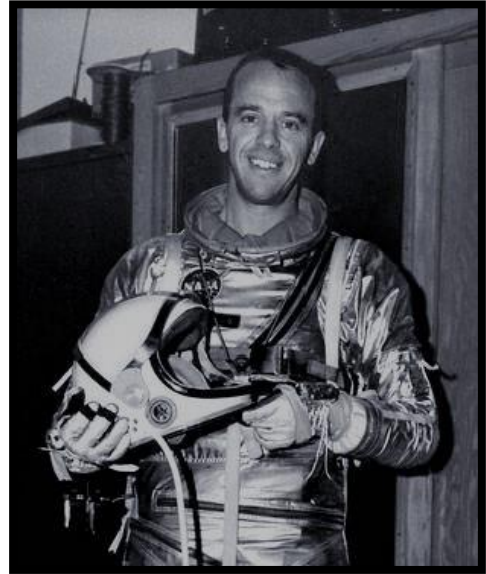
Ryc. 13. Mercury-Redstone, 5 maja 1961 r.

napędzanej paliwem ciekłym. Glenn okrążył Ziemię trzykrotnie i bezpiecznie wrócił z podróży. Program Mercury-Atlas zakończyła misja Faith 7, będąca ostatnim załogowym lotem orbitalnym programu Mercury-Redstone.

W 1961 r. NASA rozpoczęła program Gemini, którego celem było przetestowanie wpływu przebywania w kosmosie na ludziach i sprzęcie przez długi czas, dokowanie dwóch statków na orbicie okołoziemskiej oraz wykonanie pierwszego spaceru kosmicznego (ang. *Extra Vehicular Activity* – EVA). Pierwsze dwie misje, mające przetestować wszystkie systemy statku oraz nową osłonę termiczną, były bezzałogowe. Kapsuła programu Gemini była znacznie ulepszoną wersją kapsuły Mercury. Była dwuosobowa oraz znacznie większa, natomiast rakieta wynosząca, używana do wszystkich misji, była międzykontynentalna ra-



Ryc. 15. John Glenn (1921-2016)



Ryc. 14. Alan Shepard (1923-1998)

kieta balistyczna Titan II.

W międzyczasie, Sowieci ponownie prześcignęli Amerykanów. Podczas załogowej misji Voschod 2, dnia 18 maja 1965 r., Aleksiej Leonov (1934-2019) stał się pierwszym człowiekiem który wykonał spacer kosmiczny. Pierwszym zaś Amerykaninem był Edward White (1930-1967) podczas misji Gemini 4, odbytej miesiąc później, tzn. w dniu 3 czerwca.

Był on pod takim wrażeniem widoku Ziemi w przestrzeni kosmicznej, że celowo przedłużał swój powrót do kapsuły, byle tylko nasycać się jego pięknem.

Następna misja Gemini trwała osiem dni, a więc tyle, ile hipotetyczny czas misji na Księżyc, do której program miał prowadzić. Misja Gemini 6A razem z Gemini 7 spotkały się na orbicie, zbliżając się do siebie na odległość 30 centymetrów.

Gemini 8 przetestował z kolei dokowanie dwóch oddzielnych statków w kosmosie – załogowego i bezzałogowego, co miało nastąpić w dotychczasowym, jak również ostatecznym projekcie rakiety księżycowej w ramach programu Apollo. Statkiem bezzałogowym był ATV (ang. *Agena Target Vehicle*), mający służyć do zmian orbity statku Gemini po zadokowaniu z nim. Niestety ATV spotykały problemy, gdyż ogółem tylko cztery z siedmiu startów zakończyły się powodzeniem.

Awarie sprzętu doprowadzały np. do niepoprawnego otwarcia osłony aerodynamicznej podczas misji Gemini 9A (Gemini 9 nie odbyła się, gdyż ATV nie osiągnął orbity), bądź też – jak to było wcześniej – straty całej rakiety podczas misji Gemini 6, gdy rakieta wynosząca Agena eksplodowała razem z ATV.

Misje Gemini 10 i 11 natomiast zostały przeprowadzone perfekcyjnie. W pierwszym przypadku, statek ATV udanie zwiększył orbitę statku Gemini; w drugim zaś – po połączeniu dwóch pojazdów 30-metrową liną, przetestowano sztuczną grawitację przez obrót całej konstrukcji, co też udowodniło, że grawitacja w nieważkości jest w pełni możliwa. Wygenerowano bardzo mały ułamek ziemskiej grawitacji, bo tylko 0,00015%, jednak było to potwierdzeniem teorii sztucznej grawitacji.

Inne testy, przeprowadzone podczas programu Gemini, obejmowały wpływ promieniowania kosmicznego na ciało człowieka podczas dłuższego przebywania w kosmosie. Projekt Gemini zakończył się w 1966 r. i dał zielone światło do podróży na Księżyc, do czego dążono w programie Apollo.

Rozpoczęło się od jednak katastrofy. Mianowicie w czasie testów rakiety, już miejscu startowym Apollo 1, w dniu 27 stycznia 1967 r., trzech astronautów: Edward White, Virgil Grissom (1926-1967) i Roger Chaffee (1935-1967), straciło swoje życie podczas pożaru w module dowodzenia. Powodem tragedii były wady konstrukcyjne statku. W wyniku dalszych analiz zmodyfiko-



Ryc. 16. Gemini 11

wano moduł dowodzenia na ulepszoną wersję. W ramach misji miała zostać użyta raketa Saturn IB, będąca zmodernizowaną wersją Saturna I. W swoim pierwszym stopniu raketa używała ciekłego tlenu jako utleniacza oraz paliwa RP-1, oba zasilające osiem silników typu H-1. Pierwszy stopień składał się ze zbiornika paliwa Jupiter w środku i ośmiu zbiorników Redstone, ułożonych wokół niego w pierścieniu, cztery miały w sobie ciekły tlen i cztery – RP-1. Zewnętrzne cztery silniki H-1 używały przegubu Cardana, przez co miały możliwość ruchu i stabilizacji rakiety podczas lotu. Przegub Cardana to zdwojone złącze, gdzie wał czynny, w tym przypadku połączony z silnikiem, i wał bierny, połączony z rakieta, są połączone krzyżakowym sworzniem, co umożliwia ruch wału czynnego po dwóch osiach. Drugi stopień rakiety posiadał sześć silników RL-10, spalających ciekły wodór i ciekły tlen. Wszystkie z nich miały możliwość ruchu po dwóch osiach. Na drugim stopniu, po testach aerodynamicznych rakiety, montowano testowy moduł serwisowy, testowy moduł dowodzenia oraz Rakietowy System Ucieczki (ang. *Launch Escape System* – LES), co miało przetestować zachowanie całego statku kosmicznego podczas lotu. Później na tej rakiecie testowano moduł



Ryc. 17. Rakieta Saturn IB

Skylab 2, Skylab 3 i Skylab 4, Saturn IB dostarczał astronautów na tą stację. Po raz ostatni rakieta została użyta w misji ASTP. Była to załogowa kooperacyjna misja Apollo-Sojuz, gdzie statek Apollo zadokował z radzieckim statkiem Sojuz. Misja miała na celu ocieplenie stosunków pomiędzy USA a ZSRR po kosmicznym wyścigu i danie szansy na przyszłą współpracę.

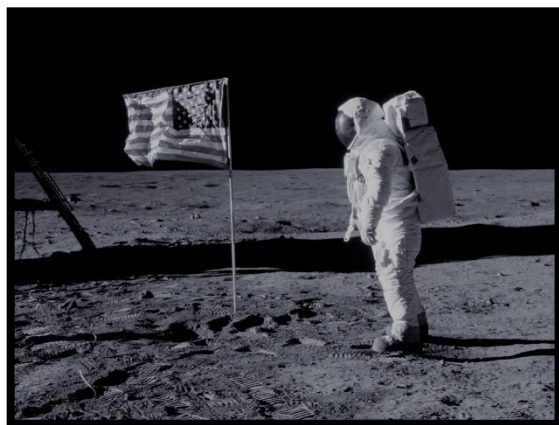
Główną siłą napędową programu Apollo była najbardziej znana rakieta na świecie, Saturn V – jak dotąd największa w czynnej służbie. Składała się z trzech stopni, a razem z adapterem do modułu serwisowego oraz z nim samym, liczyła 110 metrów wysokości. W przypadku lądunku, w ostatecznej wersji Saturna V, mógł liczyć 140 ton z przeznaczeniem na okołoziemską orbitę oraz 43,5 ton na trajektorię w kierunku Księżyca. Pierwszy stopień tej rakiety – S-1C – posiadał 2.077 ton paliwa RP-1 oraz ciekły tlen. Zaopatrzona była w pięć silników Rocketdyne F1, ułożonych w kształcie kwinkunksa (jak pięć kropek na kostce do gry), które są największymi



Ryc. 18. Rakieta Saturn V

księżycowy w misji Apollo 5, a następnie przeprowadzono załogową misję modułu serwisowego oraz dowodzenia drugiej generacji w misji Apollo 7. Saturn IB nie był po tej misji wykorzystywany, aż do lotów na amerykańską stację kosmiczną Skylab w 1973 r., gdy podczas misji

i najpotężniejszymi silnikami z pojedynczą komorą spalania, jakie kiedykolwiek zostały wyprodukowane i użyte. Pojedynczy silnik wytwarzał 6.770 kN na poziomie morza. Silnik w centrum był nieruchomy a pozostałe miały możliwość ruchu po dwóch osiach, co było potrzebne do sterowania całą rakieta. Drugi stopień miał za zadanie przyspieszyć raketę na orbitę okołozemską. Spalające ciekły wodór i ciekły tlen silniki Rocketdyne J-2 przyspieszały Saturna V prawie do prędkości orbitalnej. Stopień S-IVC dokończył insercję orbitalną, a potem wyłączał silnik i czekał na moment manewru dającego wystarczającą prędkość w stronę Księżyca. Adapter modułu księżycowego otwierał się i moduł CSM dokował do niego, rozłączając go ze stopniem S-IVC. Moduł CSM miał za zadanie zwolnić przy Księżycu tak, aby lądownik miał wystarczająco dużo paliwa na podróż do i z jego powierzchni. Silnik CSM był napędzany zupełnie innym paliwem, gdyż ciekły wodór potrzebowałby za dużo miejsca przez jego małą gęstość. Silnik użyty w CSM był napędzany Aerozyną 50, tj. dwuskładnikowym paliwem, będącym mieszanką hydrazyny i dimetylohydrazyny oraz utleniacza, którym był tetratlenek diazotu. Mieszanina tego typu nazywa się paliwem hipergolowym. Są to paliwa, które bez żadnego zewnętrznego zapalnika przechodzą gwałtowne spalanie, jeśli są w kontakcie ze swoimi składnikami. Większość paliw do raket, jak ciekły wodór i ciekły tlen, które razem są paliwami kriogenicznymi, potrzebują bardzo niskich temperatur przechowywania. CSM do precyzyjnych manewrów potrzebował małych zbiorów silników, które mogły obracać statek w każdym kierunku. W atmosferze ziemskiej samoloty, aby się obracać, potrzebują lotek. W kosmicznej próżni, przez brak owej atmosfery, statki potrzebują innej formy obrotu, co umożliwiają silniki RCS (eng. *Reaction Control System*). CSM posiadało cztery zbiory silników RCS, które razem miały możliwość całkowitej kontroli nad obrotem statku w każdą stronę. Po tym, jak CSM, razem z zadokowanym modulem księżycowym, osiągnął księżycową orbitę, lądownik odłączał się i zmierzał na powierzchnię Księżyca.



Ryc. 19. Lądowanie na Księżycu, 20 lipca 1969 r.

(ur. 1933) wyprawili się poza orbitę ziemską i zostali pierwszymi ludźmi, którzy okrążyli Księżyc. Podczas lotu obchodzony był pierwszy dzień Świąt Bożego Narodzenia i załoga modułu dowodzenia nadała krótki sygnał z orbity Księżyca, podczas którego każdy z nich opisał moduł dowodzenia oraz wrażenia z orbity Srebrnego Globu. Na zakończenie, każdy z astronautów przeczytał kawałek biblijnej wizji kreacji świata z Księgi Rodzaju, kończąc pozdrowieniami dla wszystkich na Ziemi.

Misje Apollo 9 i 10 były ostatecznymi przygotowaniem do lądowania na Księżycu, testując systemy mobilnego podtrzymywania życia PLSS oraz dokowanie z modułem księżycowym Spider, który w Apollo 10 został ulepszony do modułu Snoopy. Ten lądownik podczas misji Apollo 10 zbliżył się do Księżyca na niecałe 15 km.

Dnia 16 lipca 1969 r. nadszedł dzień rozpoczęcia właściwej, księżycowej misji. Apollo 11 o godzinie 13:32 UTC wystartował z przylądka Canaveral na Florydzie, aby cztery dni później osiągnąć Srebrny Glob i poprzez lądownik „Eagle” wylądować na nim. Ten historyczny moment udowodnił, że człowiek może dotrzeć na inne ciało niebieskie oraz pokonać barierę, jaką jest kosmos.

Był to początek końca wyścigu kosmicznego, gdyż po tym, jak radziecki inżynier Siergiej Korolow (1907-1966) zmarł podczas operacji w styczniu 1966 r.,

Pierwszym testem rakiety Saturn V była misja Apollo 4, w ramach której przeprowadzano bezzałogowy generalny test rakiety i statku Apollo. Pierwszy załogowy lot rakiety Saturn V odbył się dnia 21 grudnia 1968 r., kiedy Frank Borman (ur. 1928), James Lovell (ur. 1928) i William Anders

program kosmiczny ZSRR praktycznie stanął w miejscu. Radziecka rakietę księżycowa N1, została zaprojektowana z założeniem, że przy każdym starcie pojawi się mnóstwo awarii. Po wielu zmianach terminów, pierwszy jej start odbył się 21 lutego 1969 r., lecz na wysokości 12 km eksplodowała. Aż do 1972 r. wszystkie starty były nieudane, przy czym najbardziej „spektakularny” był drugi test tej rakiety. Wówczas, na wysokości 150 metrów nad miejscem startu przewody paliwowe przez niedopatrzanie techników zostały przerwane, prowadząc do eksplozji całej rakiety. Wybuch był tak potężny, że cała wyrzutnia została zniszczona i wielka fala uderzeniowa była odczuwalna w odległości do 5 km. Sam wybuch jest uważany za największą eksplozję wywołaną przez człowieka, nie będącą eksplozją bomby atomowej, gdyż była porównywalna do eksplozji około sześciu kiloton trotylu (bomba zrzucona na Hiroszimę w 1945 r. była porównywalna do wybuchu 15 kiloton trotylu).



Ryc. 20. Rakietę N1

czona i wielka fala uderzeniowa była odczuwalna w odległości do 5 km. Sam wybuch jest uważany za największą eksplozję wywołaną przez człowieka, nie będącą eksplozją bomby atomowej, gdyż była porównywalna do eksplozji około sześciu kiloton trotylu (bomba zrzucona na Hiroszimę w 1945 r. była porównywalna do wybuchu 15 kiloton trotylu).

Od lat siedemdziesiątych USA oraz Związek Radziecki rywalizowały jeszcze w sprawie długotrwałego zamieszkania kosmosu. Najpierw rosyjska stacja Mir i Salut, a potem amerykański Skylab, były pierwszymi stacjami kosmicznymi. W latach 80. powstał międzynarodowy projekt stacji kosmicznej Freedom, w który wchodziły NASA, Japońska Agencja Kosmiczna (NASDA), Europejska Agencja Kosmiczna oraz Kanadyjska Agencja Kosmiczna (CSA). Ten projekt przerodził się wreszcie w ISS – Międzynarodową Stację Kosmiczną, która stała się, jak dotąd, najdroższą konstrukcją zbudowaną przez człowieka. W budowie oraz innych odrębnych projektach pomagały promy kosmiczne, amerykańskie wahadłowce, mające na celu zmniejszenie ceny lotu w kosmos, gdyż sam statek oraz dwie rakiety



Ryc. 21. Start rakiety SLS

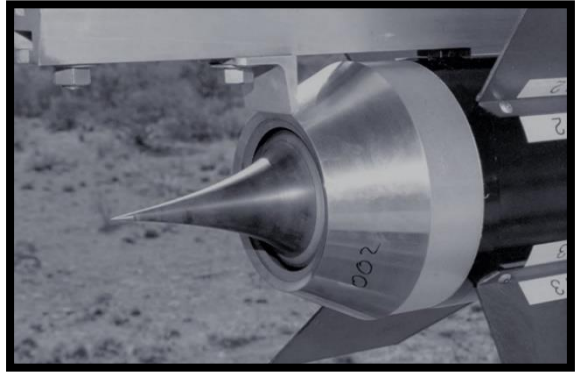
pomocnicze, napędzane stałym paliwem, można było użyć ponownie. Wahadłowce były jednak bardzo trudne w utrzymaniu i nie można było liczyć na ich szybkie, ponowne użycie przez ich skomplikowanie. Ostatni poleciał w 2011 r., kończąc pewną erę eksploracji kosmosu, gdyż NASA

przestało być pożądanym produktem, w który rząd amerykański chciałby inwestować, więc jej budżet drastycznie się zmniejszył. Dzisiaj widzimy loty bezzałogowych sond na inne planety czy instrumenty pomagające nam zrozumieć wszechświat, jednak brak jest tej eksploracji i zapału do działania, widocznego w erze programu Apollo. W 2024 r. planowany jest powrót człowieka na Księżyc, jednak przez wielokrotne przekładanie misji Artemis oraz jeden bezzałogowy lot rakiety SLS, może to okazać się trudne.

Obecnie rozwój lotów kosmicznych utrzymywany jest przez prywatne firmy, głównie amerykański SpaceX i rozwój statku Starship. Dnia 20 kwietnia 2023 r. rakiet Starship w ramach tego programu eksplodowała ok. 4 minut po starcie (blisko 30 km nad Zatoką Meksykańską). Jej szczątki zostały rozrzucone w promieniu nawet 10 km od miejsca startu. Federalna Administracja Lotnictwa wszczęła zaś śledztwo, celem ustalenia przyczyn zdarzenia. Badania i poszukiwania nowych rozwiązań wciąż więc trwają...

Zamysłem, towarzyszącym dzisiejszym projektom raketowym, jest ich 100-procentowa, ponowna używalność. Niestety, nadal nie zdołaliśmy wyjść z granic napędu chemicznego, który jest najmniej wydajnym typem napędu rakiet, jednak na razie najlepszym, jaki warto używać. Jeśli jest on jednak najmniej wydajnym to jakie są lepsze formy napędu rakiet i statków kosmicznych?

Otóż są pewne typy silników chemicznych, które są bardziej wydajne od tych opisanych wcześniej, czyli silników dzwonowych. Silnik typu Aerospike jest silnikiem chemicznym o zupełnie innej konstrukcji. Należy on do klasy silników kompensu-



Ryc. 22. Dysza typu Aerospike

jących ze względu na wysokość, czyli takich, które działają w ten sam sposób na wszystkich wysokościach atmosfery oraz w kosmosie. Normalne silniki rakietowe nie działają tak samo na wszystkich wysokościach przez różnicę ciśnienia. W niższych warstwach atmosfery gazy wylotowe, aby wydostać się z dzwonu silnika, muszą ciągle zmagać się z najwyższym ciśnieniem atmosferycznym. Przez to, działając z każdej strony, strumień gazów jest wąski, węższy niż średnica dyszy silnika. Im wyżej, tym ciśnienie bardziej spada. W pewnym momencie, jest ono na tyle niskie, że wektor gazów wylotowych idzie równoległe do osi rakiety. W tym momencie silnik ma największą wydajność. W kosmosie ciąg silnika spada, gdyż przez brak ciśnienia gazy wylotowe nie zmagają się z żadnym oporem i mogą się rozprzestrzenić. Z dyszy silnika strumień gazów przybiera postać miski, co ozna-



Ryc. 23. Liniowy silnik Aerospike, przeznaczony dla testów programu X-33

cza, że wektor tych gazów nie jest równoległy do osi rakiety i nie może przeznaczyć całej swojej energii na pchanie jej do przodu. Silnik Aerospike nie posiada takich problemów. Jego „dysza” ma kształt albo stożka, po którym są kierowane gazy wylotowe, albo trapezu, gdzie na jego dłuższych ścianach są miejsca wydobywania



Ryc. 24. Stanisław Ulam (1909-1984)

się gazów wylotowych, więc jest optymalnie wydajny na każdej wysokości atmosfery. Drugi wymieniony typ to Aerospike liniowy, który został użyty w najbardziej obiecującym projekcie na następcę promu kosmicznego X-33. Został jednak niestety anulowany. Ostatecznie, póki co, silników Aerospike nie zaczęto używać w przemyśle kosmicznym, jednak w ciągu następnych lat jest to bardzo prawdopodobne.

Obecnie najbardziej obiecującymi silnikami, które mogłyby napędzić międzyplanetarną eksplorację to silniki atomowe. Pierwszy pomysł na zastosowanie energii jądrowej pochodzi od naukowca polsko-amerykańskiego pochodzenia. Stanisław Ulam (1909-1984) pracował przy projekcie Manhattan i w połowie lat 50. przedstawił pomysł nuklearnego napędu pulsacyjnego. DARPA (Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych w Dziedzinie Obronności), Siły Powietrzne USA oraz NASA zainteresowały się tą koncepcją. Ścisłe tajny projekt zainicjowano w 1958 r., a kierowali nim znany fizyk i wizjoner – Freeman Dyson (1923-2020) oraz Theodor Taylor (1925-2004) – jeden z głównych naukowców zajmujących się bombami termojądrowymi. Nazwano ten projekt Silnikiem Orion i miał być statkiem o możliwości latania zarówno załogowo, jak i bezzałogowo. Wstępne kalkulacje pozwoliły uznać napęd pulsacyjno-jądrowy za niesamowicie wydajny, mając możliwość osiągnięcia 10% prędkości światła w jedyne 30 dni! Silnik ten miał używać bomb jądrowych jako paliwa. Zakładano, że statek w momencie przyspieszenia wyrzucałby za siebie ładunek jądrowy i w momencie eksplozji wielka płyta – przyczepiona do napęlnianych gazem poduszek powietrznych – odbijałaby się na plazmie i promieniowaniu, tworzonym podczas eksplozji. Tym sposobem prędkość statku byłby momentalnie ekstremalnie przyspieszana. Oczywiście jest to proste wytłumaczenie. Taka płyta musiałaby

by być zrobiona z materiału, który by się nie topił podczas zetknięcia z wybuchem. Materiałem mogłaby być stal lub aluminium. Teoretycznie, po pojedynczej eksplozji, płyta traciłaby około 1 mm grubości jednak odkryto, że jeśli pokryto by ją warstwą oleju lub smaru grafitowego, nie uległaby stopniowemu niszczeniu. Sama zaś bomba musiałaby być specjalnie zaprojektowana tak, aby wybuch nie miał kształtu kulistego, lecz byłby skierowany w stronę płyty. Wymyślono więc projekt nuklearnego ładunku kumulacyjnego. Według teorii silnik powinien działać, dlatego uczeni przeszli w dalszej kolejności do testów.

W ramach projektu przeprowadzono serię doświadczeń, w czasie których model statku udanie poleciał najpierw na 52 metry, a potem na 100 metrów, przy użyciu powtarzanych eksplozji konwencjonalnych ładunków wybuchowych. Po tych testach zdecydowano o umieszczeniu nad płytą drugiego stopnia amortyzatorów. Ostateczny projekt miał otwór w płycie i pierwszym stopniu amortyzatorów, przez który wylatywały bomby. Płyta, wraz z poduszkami powietrznymi, przyczepiona była do potężnych amortyzatorów teleskopowych. Działo napędzane sprężonym powietrzem wystrzeliwało zmagazynowane bomby przez otwór w konstrukcji statku i płytę, detonując je około 30 metrów za statkiem po jednej sekundzie. Ten system miał także być przystosowany dla żywej załogi, gdyż w momencie przyspieszania moduł dla niej przeznaczony odczuwałby około 4 g, będąc naprawdę wartością niewielką w stosunku do płyty, pozbawionej amortyzatorów, która odczuwałaby około 50.000 g. Moduły załogowe miały być ponadto zaopatrzone w osłonę przeciwradiacyjną.

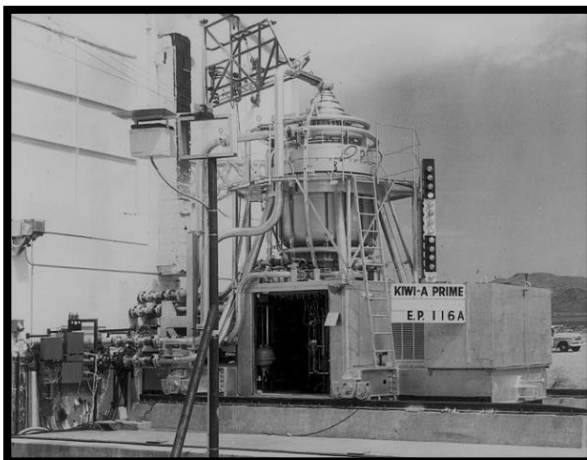
Propozycje misji dla statku typu Orion były głównie natury międzyplanetarnej i międzygwiazdnej. Opracowano wiele projektów statków napędzanych silnikiem Orion, od małych sond o wysokości 40 metrów do tysięcletnich ark o średnicy 20 km. Najbardziej bliski rzeczywistości był Międzyplanetarny Orion, który miał startować w podróż kosmiczną bezpośrednio z powierzchni Ziemi lub w częściach na rakiecie Saturn V. Ten model teoretycznie mógł wykonać załogową podróż na Marsa i z powrotem w jedyne 130 dni, podczas gdy obecnie lot w jedną

stronę trwa około dziewięciu miesięcy. Z biegiem czasu napotykał jednak coraz więcej problemów, przede wszystkim z powodu przewidywanych wysokich kosztów oraz skażenia gruntu i atmosfery promieniowaniem. Projekt zakończył ostatecznie układ o zakazie prób broni nuklearnej w atmosferze, w przestrzeni kosmicznej i pod wodą, podpisany w Moskwie dnia 5 sierpnia 1963 r. przez USA, Wielką Brytanię i ZSRR.

Jakiś czas później uczeni doszli do wniosku, że szkodliwe wpływy użycia silnika Orion z powierzchni Ziemi można by prostym sposobem pominąć, wystrzeliwując statek z pomocą rakiety o silnikach chemicznych i uruchamiając pulsacyjny napęd jądrowy z dala od Ziemi. Eksplozja oraz promieniowanie przez obecność próżni zanika, nie szkodząc niczemu, jednak istnieje możliwość wywołania pulsu elektromagnetycznego, który – będąc wystarczająco blisko Ziemi – mógłby wyłączyć prąd w najbliższych rejonach na powierzchni oraz zniszczyć lub uszkodzić satelity na wysokości orbity, gdzie doszło do wybuchu. Podsumowując, silnik Orion może umożliwić osiągnięcie szybkich lotów międzyplanetarnych, lub nawet międzygwiazdnych, jednak ze względu na ogólny strach przed anihilacją ludzkości poprzez broń jądrową, musimy poczekać, dopóki nie postanowimy polepszyć ogólnoświatowych relacji.

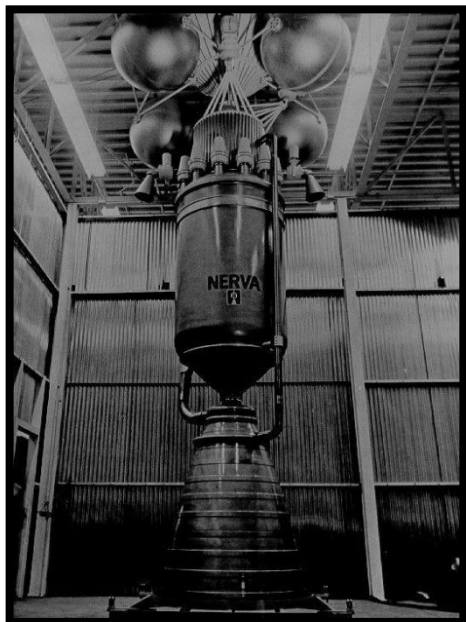
Badania nad silnikiem atomowym zainicjowano jeszcze przed wyścigiem kosmicznym i są rozwijane przez naukowców po dzień dzisiejszy. Zaczęto go projektować jeszcze w latach 60., gdy przyszłe statki, lecące na Marsa i Księżyc, planowano napędzać silnikiem z rodziny NERVA (ang. *Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application*). Pierwotnie zamierzano montować takowe na górnych stopniach pocisków balistycznych podczas amerykańskiego Projektu Rover (zapoczątkowanego w 1955 r.). Po tym, jak Sputnik 1 został pierwszym sztucznym satelitą ziemskim, w 1958 r. program Rover przejęła NASA. Odtąd też, już z większym budżetem, prace przyspieszyły. Pierwszy prototyp silnika Kiwi po raz pierwszy przetestowano w roku następnym. Zamierzano mianowicie przetestować materiały tworzące silnik i ogólną możliwość używania go. Istotnym elementem była

kwestia chłodzenia reaktora za pomocą ciekłego wodoru. Testy Kiwi A, pierwszego modelu, zakończone zostały całkowitym sukcesem. Kiwi B miał natomiast udowodnić niezawodność reaktora w warunkach pracy. Testy obu wersji były prowadzone od 1962 do 1964 r. Cały prototyp silnika, NERVA A2, został pierwszy raz uruchomiony we wrześniu 1964 r.



Ryc. 25. Reaktor typu Kiwi A, 1960 r.

Ciepły silnik jądrowy, bo tak nazywa się silnik programu NERVA, jest napędzany paliwem, w tym przypadku ciekłym wodorem, oraz energią reaktora. Zasada działania tego silnika różni się od normalnych silników chemicznych. Jak już wiemy, silnik chemiczny opiera się na działaniu dwóch turbopomp, dostarczających paliwo i utleniacz do komory spalania, gdzie wchodzi poprzez pojedynczą iskrę z zapalnika w gwałtowną reakcję spalania, przez co silnik jest w stanie przyspieszyć rakietę lub inny pojazd przez niego napędzany. Silnik chemiczny można wyłączyć, ale nie we wszystkich przypadkach włączyć ponownie. NERVA działa w odmienny sposób. Po pierwsze, w procesie nie uczestniczy żaden utleniacz. Nie ma go, gdyż w reakcję wchodzi ekstremalne ciepło z reaktora jądrowego. Temperatura, jaką może osiągnąć reaktor, zależy jedynie od tego czy materiał konstrukcji nie stopi się. Aby tego uniknąć, wokół reaktora umieszcza się specjalne kanały, przez które przepływa chłodziwo – ciekły wodór, pompowany ze zbiornika paliwa. Po przejściu przez kanały chłodzące i obniżeniu temperatury reaktora, paliwo kieruje się do komory reaktora. Tam ciepło, wytwarzane przez reakcję fuzji materiału rozszczepialnego, zamienia ciekły wodór w rozgrzany gaz i z wielką prędkością opuszcza komorę, a potem dyszę silnika. Proces powtarza się, dopóki nie wyczerpie się paliwo lub reaktor nie zostanie wyłączony.



Ryc. 26. Silnik jądrowy typu NERVA

Wyłączenie reaktora następuje poprzez 12 obrotowych bębnow kontrolnych, które są tylko z jednej strony pokryte materiałem odbijającym. Reakcje jądrowe w reaktorze są przez nie podtrzymywane, gdyż powstałe podczas rozszczepiania paliwa reaktora – w przypadku NERVA jest to Uran-235 – neutrony odbijają się od ścian reaktora także pokrytych materiałem odbijającym i bębnow kontrolnych z powrotem do środka reaktora, podtrzymując w nim reakcje. Reaktor może być wyłączony poprzez obracanie bębnow i powodowanie

ucieczki neutronów z reaktora, co zatrzymuje jego działanie. Bębny mogą także regulować moc reaktora nie będąc do końca obróconymi stroną odbijającą do środka reaktora. Możliwość regulowania mocy reaktora oznaczała w teorii nielimitowaną ilość ponownych startów silnika.

Projekt postępował tak dobrze, że udany test systemów był przeprowadzony przed wyznaczonymi terminami. Analiza testów wyznaczyła prędkość gazów wylotowych na 7,59 km/s, czyli impuls właściwy (Isp) wynoszący 811. Podczas późniejszych prac odkryto problem z przegrzewaniem się, ponieważ reaktor jądrowy podchodził pod granicę maksymalnej temperatury przy pełnej mocy, co okazało się winą materiałów, z których był skonstruowany.

Kolejną wersją była NERVA EST (ang. *Engine System Test*). Prowadzone testy miały sprawdzić systemy wyłączania i ponownego włączania silnika, jego stabilność w czasie pracy oraz zbadać czy struktura reaktora i silnika może przetrwać założony czas działania, tzn. czy dojdzie do stopienia konstrukcji lub jej uszkodzenia. Na przestrzeni lutego i marca 1966 r. silnik uruchamiano jedenastokrotnie.

Następnym prototypem był NRX-A5. Pierwsze jego uruchomienie nastąpiło w dniu 8 czerwca 1966 r., od początku działając z pełną mocą, jednak po 23 minutach na dyszy silnika wylądował ptak i przez zatrucie toksycznymi gazami wpadł do komory maszyny (silniki podczas testów były skierowane dyszami do góry). Po wydobyciu ptaka, test kontynuowano 23 dnia tegoż miesiąca. Silnik działał przez 14 minut. Podczas testów odkryto poważną korozję silnika, jednak nadal można było go kontrolować lub ponownie włączyć.

Ostatnim testem serii NRX był model A6 mający przetestować możliwości kontroli ciepła. Po jednym przerwany test z powodu usterki, w grudniu 1966 r. A6 ukończył test, w którym doprowadzono silnik do maksymalnej granicy wytrzymałości, osiągając 2.000 °C. Planowano również budowę potężniejszego silnika – NERVA II, jednak z uwagi na rezultaty testu A6 zarzucono ten pomysł, gdyż A6 dowiódł, że NERVA może być używana w grupie jak normalne silniki na paliwo ciekłe. Rozpoczęto wówczas jeszcze jeden test, w którym silnik miał być ustawiony dyszą w dół, i po jego sukcesie stworzono wersję NERVA XE, mającą przybrać postać gotową do użytku podczas prawdziwych lotów kosmicznych. Miały one być udziałem silnika NERVA w misjach na Marsa oraz przy budowie bazy na Księżycu. Po 28 uruchomieniach silnika i bezproblemowego przejścia wszystkich testów, NASA uznało NERVA za odpowiedni do udziału w misjach.

Ostatni stworzony silnik, NERVA XE PRIME, odbył serię testów w 1969 r. Program jednak stracił cały budżet i został zakończony, gdyż decyzją Kongresu Stanów Zjednoczonych przeniesiono finansowanie do programu załogowych lotów kosmicznych – STS (ang. *Space Transportation System*).

W Związku Radzieckim również zaczęto pracować nad silnikiem jądrowym. Model RD-0410 był cieplnym silnikiem jądrowym, mającym większą wydajność oraz bardziej kompaktową konstrukcję od silnika NERVA. Prace nad tą konstrukcją oraz generalnie napędem jądrowym trwały aż do 1994 r. a po dekadzie Rosja rozpoczęła prace nad elektrycznym napędem jądrowym dla statku TEM (ang. *Transport and Energy Module*). W 2021 r. rosyjska agencja kosmiczna



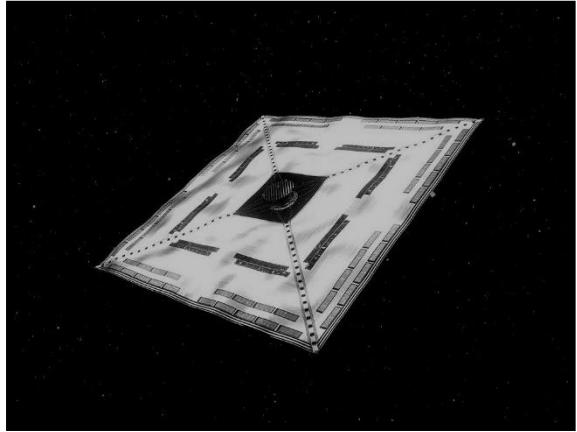
Ryc. 27. Silnik jądrowy RD-0410

Roskosmos przedstawiła plan misji Zeus przy użyciu silnika jądrowego, mającej trwać około cztery lata. W jej ramach rosyjski statek ma oblecieć wokół Księżyc, Wenus i Jowisza. Misja planowana jest na 2030 r. Obecnie także prywatne firmy, Blue Origin, General Atomics oraz Lockheed Martin, otrzymawszy kontrakty od NASA oraz DARPA, są w trakcie projektowania i tworzenia nowoczesnych reaktorów i silników atomowych, które będą miały możliwość pomocy w eksploracji kosmosu.

Ostatnim, możliwym do zbudowania z dostępnych materiałów, napędem statków kosmicznych jest żagiel słoneczny. Pierwszą osobą, która zaproponowała żagiel słoneczny był Johannes Kepler (1571-1630) już w XVII stuleciu. Zaobserwował odchylenie się ogona komety od Słońca. Domyślił się, że ten efekt jest spowodowany przez promienie słoneczne, które można by wykorzystać, zupełnie jak wiatr, napędzający żagle statków. Z kolei James Clerk Maxwell (1831-1879) szkocki fizyk i matematyk w 1865 r. opublikował swoją przełomową pracę, pt. „A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, w której przedstawił tezę, że światło może wywierać ciśnienie na inne obiekty, a co za tym idzie – przekazywać im pęd. Uczony wnioskował, że światło słoneczne może sprawić, że obiekty w przestrzeni kosmicznej będą przyspieszać. Jako pierwszy zjawisko potwierdził Piotr Lebediew (1866-1912) w 1899 r. Natomiast radziecki uczony Friedrich Zander (1887-1933) był jednym z pierwszych, który zaproponował użycie odkrytej możliwości poruszania obiektów z pomocą promieni słonecznych w formie odbijających je cienkich powierzchni. W późniejszym okresie było jeszcze kilku naukowców, którzy spekulowali na temat zastosowania takiego napędu, w tym znany naukowiec i wybitna postać świata astronomii Carl Edward

Sagan (1934-1996), który nalegał na użycie żagla słonecznego w misji do komety Halleya, mającej przejść koło Ziemi w 1986 r.

Naukowcy i inżynierowie z amerykańskiego instytutu badawczego Jet Propulsion Laboratory (JPL) zaprojektowali pierwszy żagiel słoneczny

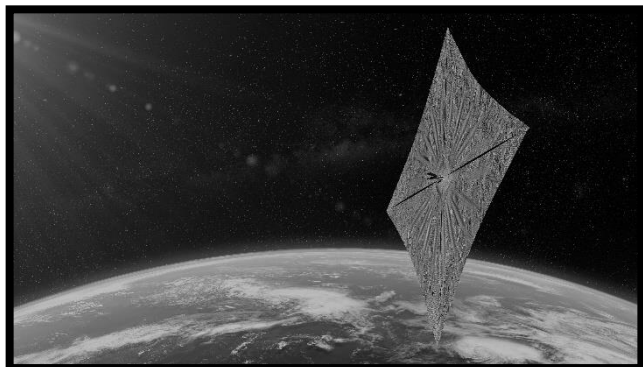


Ryc. 28. IKAROS

w 1975 r., natomiast prezentacja jego modelu odbyła się podczas emisji programu „The Tonight’s Show” w roku następnym. Misja taka nigdy nie wystartowała, jednak pomysł stworzenia statku, napędzanego promieniami słonecznymi, nie zniknął. W 1980 r. utworzono Stowarzyszenie Planetarne (ang. *Planetary Society*). Jego celem było – i nadal jest – eksploracja układu słonecznego, szukanie życia pozaziemskiego oraz śledzenie asteroid i obiektów potencjalnie zagrażających naszej planecie.

Pierwszą dyrektywą po powstaniu tej organizacji dotyczyła stworzenia statku, napędzanego żaglem słonecznym i wystrzelenia go w kosmos. Cosmos 1, bo tak nazywał się ten statek, został wystrzelony przez przerobiony pocisk balistyczny z rosyjskiej łodzi podwodnej w 2005 r., ale nie dotarł na orbitę przez awarię silnika. W latach 2010-2015 japońska agencja kosmiczna przeprowadziła misję IKAROS, w ramach której testowano pierwszy żagiel słoneczny w kosmosie. Dowiedziono skuteczności działania takiego napędu – żagiel słoneczny utrzymywał stabilną orbitę oraz zmieniał jej kierunek z sprawą obrotu i kontrolowanego naświetlania. W grudniu 2010 r., po sześciu miesiącach podróży, IKAROS przeleciał 80.800 km od Venus, kończąc główną misję. Statek pozostał aktywny, przesyłając dane pomiędzy okresami hibernacji.

Po misji IKAROS organizowano kolejne z wykorzystaniem żagli słonecznych: misja NASA NanoSail-D (notujemy dwie misje o tej nazwie; pierwsza z nich



Ryc. 29. LightSail-2

nie dotarła na orbitę), LightSail-1 oraz trwająca do dziś – LightSail-2. Prywatna organizacja Breakthrough Initiatives w 2016 r. zaprezentowała koncept misji „Breakthrough Starshot”.

Wchodzić w nią ma statek-matka wyposażony w żagiel słoneczny. Kiedy statek znajdzie się na orbicie, rozwinię swój żagiel i sfazowany układ laserów na powierzchni Ziemi naświatli jeden punkt w centrum żagla statku-matki i 1TW energii przyspieszy go do około 20% prędkości światła. Potem statek wypuści ok. 1.000 mniejszych sond. Podróż do gwiazdy najbliższej słońcu, Proximy Centauri, trwałaby jedyne 20 lat. Ilość tych statków, StarChipów, jest tak wysoka, gdyż istnieje wysokie prawdopodobieństwo kolizji z mikrometeoroidami lub nawet pojedynczymi atomami wodoru, co przy wytrzymałości żagla słonecznego oraz prędkości mogłoby uszkodzić statek, a nawet go zniszczyć. Inżynierowie zakładają, że rozpoczęcie misji może nastąpić w ciągu następnych 50 lat, chociaż jest to niepewne z powodu stopnia skomplikowania wszystkich elementów programu – od projektu konstrukcji po zaopatrzenie energetyczne układu laserów w wystarczające pokłady energii. Podsumowując, technologia żagla słonecznego jest obecnie jedną z najbardziej obiecujących form napędu, którą można użyć w podróży po układzie słonecznym czy nawet po lokalnym rejonie gwiazdnym. Niestety, będzie trzeba na nią poczekać, krócej lub dłużej.

Omówiliśmy dotąd formy napędów najprostszych rakiet, paliwo stałe, materiały wybuchowe oraz napęd paliwem ciekłym. Do lat 60. XX stulecia to było wszystko, co wiedzieliśmy o napędach rakiet. Po technologii rozszczepiania atomu, odkryliśmy bardzo wydajne napędy, które mogłyby zmienić świat. Zostaliśmy jednak przy spalaniu paliwa chemicznego jako formie napędu, ponieważ

było to rozwiązanie tańsze i prostsze. Ulepszyliśmy je, zwiększyliśmy wydajność, jednak nie było to wystarczające. Obecnie – w XXI wieku – nadal używamy tych samych silników, jednak wiemy już, że przyszłość leży gdzie indziej. Silniki jonowe, okazały się bardzo wydajne, lecz zbyt słabe, aby dolecieć gdzieś szybko, stąd wróciliśmy do rozszczepiania atomu i wreszcie wykorzystaliśmy siłę Słońca, by żeglować po jego falach elektromagnetycznych. Ale co jeśli wykorzystać siłę Słońca w dosłownym znaczeniu? Chodzi technologię, dzięki której ludzkość stanie się gatunkiem międzyplanetarnym, a jeśli nie dokonamy aktu autodestrukcji, może nawet międzygwiazdowym. Pierwszą, najważniejszą rzeczą dla ludzkości, jeśli chcemy się rozwinąć, jest energia fuzji.

Fuzja to koncept znany od dawna, a to za sprawą naszej gwiazdy – Słońca. Odkrył to Arthur Eddington (1882-1944), gdy w 1926 r. zasugerował reakcje łączenia się atomów wodoru w hel, co napędzało gwiazdy. Ernest Rutherford i inni naukowcy z laboratorium Cavendish na Uniwersytecie Cambridge, przy pomocy własnoręcznie zbudowanego akceleratora cząstek, wystrzelili atomy deuteru, izotopu wodoru z dodatkowym neutronem i liczbą masową 2, w siebie oraz atomy innych pierwiastków, helu i wodoru. Największy udział w tych eksperymentach miał Mark Oliphant (1901-2000), który jako pierwszy przeprowadził sztuczną reakcję fuzji oraz wpadł na pomysł używania atomów deuteru zamiast wodoru. Odkrył dzięki temu hel 3, izotop helu oraz tryt, izotop wodoru z dodatkowymi dwoma neutronami. Droga do sztucznie wywołanej fuzji stała otworem.

Od lat 50. XX wieku zaczęto myśleć nad budową reaktorów fuzyjnych, z czego wyszedł projekt tokamaka, czyli rodzaj reaktora „magnetycznego uwięzienia plazmy” (pierwsze takie urządzenie stworzono w Związku Radzieckim w 1956 r.). Powstał jeszcze projekt reaktora Stellarator, jednak tokamak pozostał w centrum uwagi ze względu na jego teoretycznie większą wydajność. W 1978 r. rozpoczęła się budowa pierwszego europejskiego reaktora fuzyjnego Joint European Torus (JET) w pobliżu miejscowości Culham w Wielkiej Brytanii. W listopadzie 1983 r. został rozpoczęty drugi projekt, mający zbadać energię fuzji o nazwie

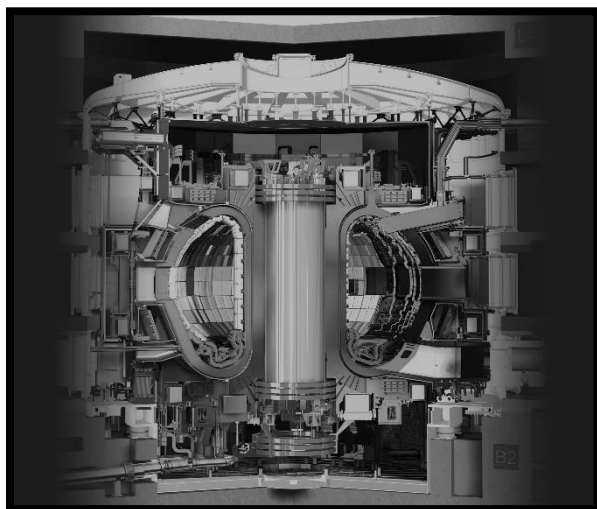


Ryc. 30. Joint European Torus

pierw zapewnić reaktorowi energię. Powodem jest potrzeba podgrzania paliwa, obecnie deuteru i trytu, do ekstremalnej temperatury, żeby mogła zachodzić reakcja fuzji. Dnia 21 grudnia 2021 r. JET wytworzył dwa razy tyle energii, co w eksperymencie w 1997 r., jednak nie pobił rekordu wytworzonej mocy, gdyż tylko 11,8 MW. Natomiast ITER ma w 2025 r. zacząć swoją działalność i wytworzyć więcej mocy niż miałaby pobierać. Przewiduje się wytworzenie 500 MW i pobieranie 50 MW, jednak ta moc nie miałaby być generowana, jak w prawdziwej elektrowni, tylko w formie testu.

Energia z fuzji jest czysta, bez żadnych odpadów. Produktami fuzji deuteru z trytem są neutrony, dzięki którym reaktor produkuje użyteczną energię oraz izotop helu, hel-4, który także produkuje energię z reakcji, jednak trzykrotnie mniej. Problem z wyborem paliwa stanowi to, że tryt jest dość

ITER (ang. *International Thermonuclear Experimental Reactor*). Pierwsze testy wykonywał JET w 1997 r., wytwarzając 16 MW mocy. Jak dotąd jest to największa moc, jaką wytworzono w reaktorze fuzyjnym. Był to ważny rekord, gdyż do rozpoczęcia reakcji fuzji trzeba naj-



Ryc. 31. ITER

rzadkim i drogim do wyprodukowania pierwiastkiem, a zatem lepszym wyborem jest wcześniej wspomniany izotop Helu – hel-3. Reakcja fuzji deuteru z helem-3 jest bardziej wydajna, a na biegunach naszego Księżyca znajdują się ogromne jego pokłady. Nie produkuje także neutronów. Podczas reakcji deuter-tryt neutrony produkują energię, ale są jednocześnie źródłem zabójczego promieniowania, zaś reakcja deuter-hel 3 wytwarza protony, znacznie mniej radioaktywne. Reaktory fuzyjne nie tylko nie produkują odpadów, jak reaktory jądrowe, i mają jedną z największych wydajności paliwa w możliwych do zbudowania elektrowniach na Ziemi. Wytwarzają przede wszystkim wielkie pokłady energii, choć jest to sprawdzone tylko teoretycznie. W pełni funkcjonalny reaktor fuzyjny mógłby wytwarzać moc sięgającą gigawatów. Jak dotąd największa produkcja energii przez elektrownię jądrową należała do Elektrowni Kashiwazaki-Kariwa, która przed wyłączeniem wytwarzała 8,2 MW.

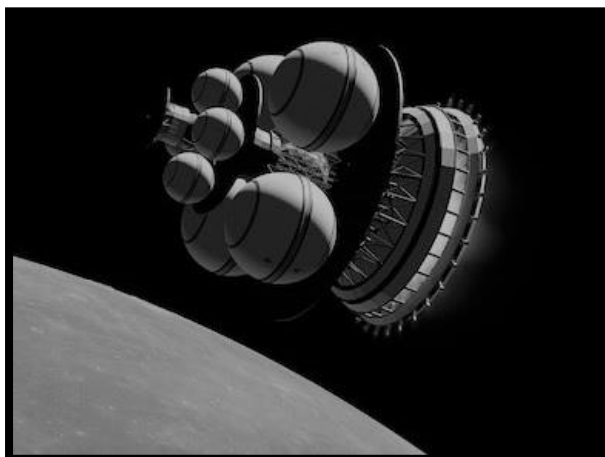
Niewątpliwie zaletą energii fuzji jest możliwość wykorzystania jej w budowie napędu statków kosmicznych. Istnieje wiele pomysłów na wykorzystanie fuzji w budowie silników. Najbardziej znanym jest przepuszczanie paliwa, na przykład ciekłego wodoru, przez obszar reaktora, podobnie jak przy silniku NERVA, jednakże temperatura podchodząca do 150 milionów °C sprawiłaby, że gazy wylotowe opuszczały by dyszę silnika z ekstremalnie dużą prędkością ok. 350 km/s. Problemem jest obecna waga reaktora fuzyjnego, ponieważ wcześniej wspomniany ITER waży blisko 23.000 ton. Potrzebny byłby zatem reaktor znacznie mniejszy o podobnej wydajności, jak np. FRC (ang. *Field-Reversed Configuration*).

Jest to inny typ tokamaka z odmiennym ułożeniem pola magnetycznego i znacznie bardziej kompaktowy. Jeśli ściany tego reaktora byłyby zakrzywione w stronę tyłu rakiety, plazma z reaktora byłaby w stanie uciec z dużą prędkością przez dyszę silnika. Jest to możliwe ze względu na formacje pola magnetycznego w reaktorze, które dyktuje ruch plazmy. W tokamaku oraz sferomaku pole magnetyczne ma dwa kierunki – toroidalny i poloidalny. Pierwszy z nich oznacza

ruch pola magnetycznego po okręgu, czyli względem ruchu plazmy. Drugi natomiast to kierunek pola magnetycznego, który wiedzie przez dziurę w „obwarzanku” (kształt konstrukcji komory reaktora) i obiega plazmę po jej powierzchni. W FRC brak jest linii toroidalnych i przez to jedyny kierunek pola magnetycznego odbywa się po powierzchni oraz prostopadle do rotacji plazmy, mającej kształt podłużnego, zwężającego się na końcach pierścienia. Dzięki temu, że pole magnetyczne biegnie wokół plazmy i w kierunku dyszy, plazma jest przyspieszana i ucieka z komory przez zwężenie przy dyszy, generując ciąg. Nazwa na przyspieszanie plazmy za pomocą pola magnetycznego to Dysza Magnetyczna (ang. *Magnetic Nozzle*). Naukowcy NASA oszacowali czas lotu na Marsa w jedną stronę statku z takim silnikiem na około 30 dni.

Drugim pomysłem na napęd fuzyjny jest fuzja inercjalna (ang. *Inertial Confinement Fusion* – ICF). Zasada działania jest trochę prostsza od magnetycznie uwięzionej fuzyji. Do komory silnika, bądź reaktora, jeśli jedynym produktem ma być energia, instalowana jest kapsuła z paliwem, dla przykładu deuterem i helem 3, wielkości paru milimetrów. W komorze silnika są umieszczone w równych odstępach od siebie lasery, które aktywują się wówczas, gdy kapsuła znajduje się w miejscu ich skupienia. W momencie odpalenia laserów w kierunku kapsuły, jej zewnętrzna warstwa zamienia się w plazmę, po czym paliwo jest kompresowane powodując reakcję fuzyji, wytwarzając energię w postaci plazmy rozgrzanej do 100 milionów °C. Ta plazma jest potem, za pomocą pola magnetycznego z superprzewodzących magnesów, kierowana w kierunku dyszy silnika, tworząc ciąg. Ilość wystrzeliwanych kapsuł na sekundę zależy oczywiście od projektu. Przykładowo, w Projekcie Dedal, gigantycznej sondzie mającej oryginalnie zbadać system gwiazdy Barnarda, do wielkiego dzwonu silnika, w którym znajdowałyby się owe lasery, kapsuła z paliwem miała by być wystrzeliwana 250 razy na sekundę. Opracowany przez Brytyjskie Stowarzyszenie Międzyplanetarne w latach 70. XX wieku Projekt Dedal (ang. *Daedalus*) był pierwszym projektem, mającym zastosować taki napęd, mający teoretycznie możliwość rozpędzenia się do 12%

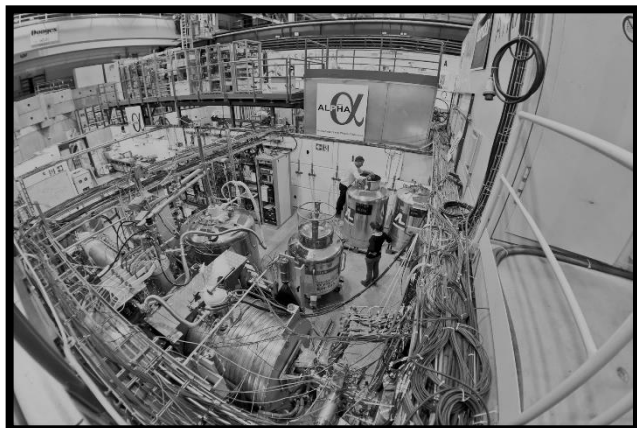
prędkości światła w dwóch stopniach, które w momencie startu razem miały ważyć blisko 54.000 ton. Samo paliwo miało przy tym masę 50.000 ton. Pierwszy stopień przyspieszał cały statek do 0,7% prędkości światła przez około dwa lata, a drugi stopień przez około 1,8 lat do ostatecznych



Ryc. 32. Wizualizacja Projektu Dedal

12%. Projekt zakładał wykonanie misji w czasie życia człowieka, więc przez zaledwie 50 lat Dedal znajdowałby się w przestrzeni kosmicznej, po których znalazłby się w systemie Gwiazdy Barnarda, 5,9 lat świetlnych od Ziemi, aktywując swoją aparaturę badawczą. Nie planowano żadnego lądowania i statek po kilku dniach wylatywałby z układu w przestrzeń kosmiczną, kończąc swoją misję.

Innym obiecującym projektem jest VISTA, wydany w postaci publikacji naukowej w 1987 r. przez grupę naukowców z Centrum Kosmicznego im. Lyndona Johnsona w Houston. VISTA (ang. *Vehicle for Interplanetary Space Transport Applications*) był projektem statku-matki z silnikiem napędzanym fuzją inercyjną, który miał możliwość zmiany siły ciągu o maksimum 240 KN oraz impulsem właściwym, wynoszącym 16.000 sekund. Statek miał uczestniczyć w misjach wynoszenia ładunku i załogi na Księżyc i Marsa, z czasem lotu na Marsa i z powrotem wynoszącym 100 dni. W przyszłości oczekuje się na prawdziwe testy elektrowni fuzyjnych, co może wreszcie otworzyć drogę do dostępnych i wydajnych silników napędzanych fuzją jądrową. Może to doprowadzić ludzkość do statusu gatunku międzyplanetarnego. Szansa na to w ciągu najbliższych 100 lat jest niewielka, jednakże, jeśli nie zahamujemy naszego rozwoju technologicznego, możemy być niemal pewni, że nasze wnuki lub prawnuki będą uczestniczyć w ekspansji człowieka w kosmosie.

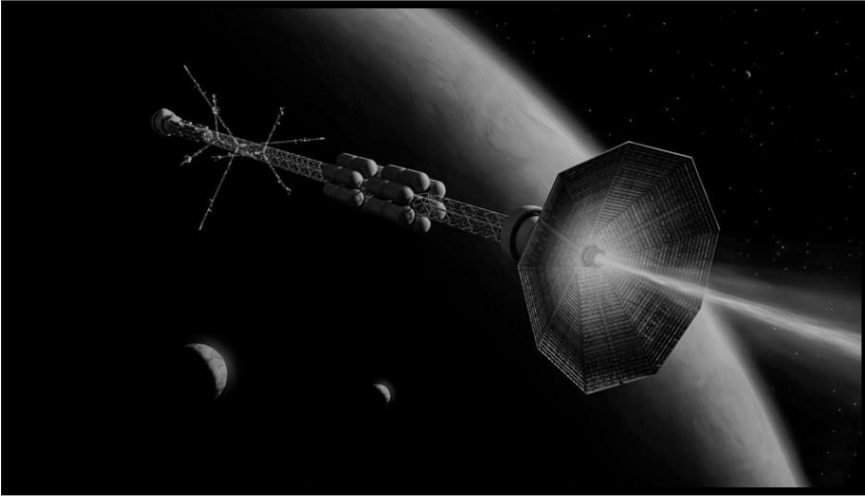


Ryc. 33. ALPHA CERN

Ostatnim, teoretycznym typem napędu statków kosmicznych, jest silnik napędzany antymaterią. Antymateria jest praktycznie tą samą materią, która tworzy wszystko, co widzimy, z jedną różnicą. Jest przeciwieństwem normalnej ma-

terii i kiedy wchodzi z nią w kontakt, powoduje anihilację materii i antymaterii wytwarzając dokładnie 100% procent energii z jednej i drugiej. Równanie $E=mc^2$ mówi nam ile energii zostanie wytworzonej ze 100% konwersji danej masy. To znaczy, że masa materii i antymaterii, w momencie kontaktu, jest przemieniana całkowicie w energię, co nie jest możliwe w żadnym innym procesie jej generowania. Na przykład, omawiana wcześniej fuzja jądrowa przemienia jedynie 0,4% masy paliwa w energię, co i tak jest ogromną wartością. Antymateria występuje we wszechświecie naturalnie, jednak w bardzo małych ilościach. Aby więc zdobyć jej duże zasoby, należy wytwarzać ją sztucznie. Obecnie jedynym znanym sposobem wytwarzania antymaterii jest kolizja cząstek w akceleratorach naziemnych, jak na przykład moduł ALPHA w CERN (Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN), który w czerwcu 2011 r. zdołał złapać około 300 atomów antywodoru na 1.000 sekund.

Problemem jest także przechowywanie antymaterii, ponieważ – jak już wiadomo – w kontakcie z materią następuje wzajemna anihilacja. Obecnie najlepszym pomysłem jest koncept zwany pułapką Penninga, który w warunkach próżni może zmagazynować antymaterię za pomocą jednorodnego pola magnetycznego oraz kwadrupolowego pola elektrycznego. W jednym z teoretycznych typów napędów używających antymaterii, jest ona używana w serii różnych reakcji jako katalizator, tj. czynnik, który przyspiesza daną reakcję, kiedy jest



Ryc. 34. Projekt rakiety kosmicznej, napędzanej silnikiem z reaktorem fuzyjnym w nią wprowadzony. Na przykład w jądrowym napędzie pulsacyjnym katalizowanym antymaterią, najpierw do komory, gdzie ma zająć reakcja, wprowadza się kapsułę z deuterem, trytem i izotopem uranu – uranem 238. Wtedy, podobnie jak w ICF, następuje kompresja tej kapsuły za pomocą laserów, po czym jest ona bombardowana chmurą antyprotonów, co prowadzi do anihilacji części kapsuły z paliwem i wytworzenie wielkiej ilości energii, doprowadzając Uran 238 do fuzji i następnie inicjuje fuzję deuteru z trytem. Ostatecznie wszystko zamienia się w gorącą, napromieniowaną plazmę, która skierowana w kierunku tyłu statku tworzy ciąg. Jest to ogromnie wydajny koncept, który mógłby potrzebować jedynie 100 gramów antymaterii w podróż na odległość orbity Plutona.

W końcu, konceptem na napęd przy użyciu antymaterii jest projekt najprostszy, polegający na bezpośredniej anihilacji materii z antymaterią, gdzie paliwem są protony i antyprotony. Jedynym efektem ubocznym tej reakcji są piony, które po przeprowadzeniu przez dyszę magnetyczną będą generowały ciąg. Prędkość tych gazów wylotowych wynosi parę dziesiątych procenta poniżej prędkości światła a możliwa prędkość statku z takim silnikiem może nawet osiągnąć 40% prędkości światła w racjonalnym okresie czasu. W tym przypadku problemem jest jednak temperatura generowana podczas anihilacji, która jest

w stanie stopić wszystkie znane superprzewodniki, generujące dyszę magnetyczną oraz wielkie zapotrzebowanie antymaterii dla tego silnika. Niemniej antymateria, z jej stuprocentową konwersją z materią w energię, prawdopodobnie będzie w stanie stworzyć w dalszej przyszłości silniki, umożliwiające loty międzygwiazdne.

Ludzkość przebyła długą drogę - od pierwszych rakiet wykorzystywanych jako fajerwerki, do tych, służących jako narzędzie wojny. Wykorzystaliśmy je w poznaniu naszej własnej planety oraz jej okolic. Odkryliśmy jak efektywnie pozostawiać nasze urządzenia w kosmosie przez długi okres czasu i dzięki nim pozyskaliśmy cenną wiedzę. Wysłaliśmy swoich przedstawicieli w pustkę kosmosu i udało nam się postawić ich na naturalnym satelicie naszej planety, prawie 384.400 km stąd. Dzisiaj przygotowujemy się do odkrycia nowych technologii, kontrolując siłę Słońca w urządzeniach, które kiedyś mogą zasilić swoje arki, niosące przyszłe pokolenia na inne planety w naszym układzie słonecznym lub nawet w innym. Nasza pomysłowość pokazała, że my – jako ludzkość – jesteśmy zdolni do wymyślania urządzeń ulepszających nasze życie, coraz to lepszych, coraz to wydajniejszych. Jedynie czas pokaże, czy będziemy niszczyć siebie nawzajem, dopóki nikt nie pozostanie, albo rozwiniemy się na tyle, że zostawimy swoje ślady na innych planetach i miejscach daleko od domu. Musimy tylko wybrać.

Ilustracje:

1. Chińska rakietka czarnoprochowa [źródło: <https://epicfireworks.com/pages/history-of-gunpowder>; dostęp: 05.11.2022 r.]
2. Konstantin Ciolkowski (1857-1935) [źródło: <https://bialczynski.pl/wielcy-polacy/konstanty-ciolkowski-tworca-rakiet-kosmicznych-i-wizjoner-kosmosu/>; dostęp: 05.11.2022 r.]
3. Robert Goddard (1882-1945) [źródło: Wikimedia Commons; dostęp: 05.11.2022 r.]
4. Rakietka Goddarda [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 06.11.2022 r.]

5. Hermann Oberth (1894-1989) [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 06.11.2022 r.]
6. Schemat stopniowania napędu rakiety [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 06.11.2022 r.]
7. Efekt Obertha [źródło: www.jagranjosh.com; dostęp: 06.11.2022 r.]
8. Wernher von Braun (1912-1977) [źródło: <https://www.biography.com/scientists/wernher-von-braun>; dostęp: 10.11.2022 r.]
9. Rakieta PGM-11 [źródło: <https://history.redstone.army.mil/>; dostęp: 12.11.2022 r.]
10. Sputnik 1 [źródło: <https://www.smartage.pl/sputnik-1-pierwszy-sztuczny-satelita-ziemi/>; dostęp: 03.12.2022 r.]
11. Łajka (ok. 1955-1957) [źródło: <https://weneedmore.space/jaka-byla-prawdziwa-historia-psa-lajki/>; dostęp: 03.12.2022 r.]
12. Jurij Gagarin (1934-1968) [źródło: <https://www.rp.pl/swiat/art6737101-historia-pierwszy-lot-w-kosmos-jurija-gagarina>; dostęp: 10.11.2022 r.]
13. Mercury-Redstone, 5 maja 1961 r. [źródło: <https://www.defense.gov/Multimedia/Photos/igphoto/2002156178/>; dostęp: 18.12.2022 r.]
14. Alan Shepard (1923-1998) [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 12.11.2022 r.]
15. John Glenn (1921-2016) [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 12.11.2022 r.]
16. Gemini 11 [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 12.11.2022 r.]
17. Rakieta Saturn IB [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 12.11.2022 r.]
18. Rakieta Saturn V [źródło: [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 12.11.2022 r.]
19. Lądowanie na Księżycu, 20 lipca 1969 r. [źródło: <https://businessinsider.com.pl/technologie/nauka/50-rocznica-ladowania-na-ksiezycu-oto-wszystkie-misje-apollo-nasa/yhlftv1>; dostęp: 18.11.2022 r.]

20. Rakieta N1 [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 12.11.2022 r.]
21. Start rakiety SLS [źródło: <https://www.nasa.gov>; dostęp: 12.11.2022 r.]
22. Dysza typu Aerospike [źródło: M. Folusiak, *Analiza możliwości zastosowania dyszy typu aerospike w pierwszym stopniu rakiety kosmicznej*, „Prace Instytutu Lotnictwa” 198 (2009), nr 3, s. 98.]
23. Liniowy silnik Aerospike, przeznaczony dla testów programu X-33 [źródło: Wikimedia Commons; dostęp: 22.11.2022 r.]
24. Stanisław Ulam (1909-1984) [źródło: Wikimedia Commons; dostęp: 21.11.2022 r.]
25. Reaktor typu Kiwi A, 1960 r. [źródło: Wikimedia Commons; dostęp: 22.11.2022 r.]
26. Silnik jądrowy typu NERVA [źródło: https://www.researchgate.net/figure/Picture-of-a-Nerva-Engine_fig2_320621010; dostęp: 03.12.2022 r.]
27. Silnik jądrowy RD-0410 [źródło: <http://www.astronautix.com/r/rd-0410.html>; dostęp: 02.12.2022 r.]
28. IKAROS [źródło: <https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/current/ikaros.html>; dostęp: 02.12.2022 r.]
29. LightSail-2 [źródło: <https://www.scientificamerican.com/article/solar-sailing-success-planetary-society-deploys-lightsail-2/>; dostęp: 04.12.2022 r.]
30. Joint European Torus [źródło: www.jet.efda.org; dostęp: 10.12.2022 r.]
31. ITER [źródło: <https://www.iter.org/mach>; dostęp: 15.12.2022 r.]
32. Wizualizacja Projektu Dedal [źródło: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=2063483012>; dostęp: 08.01.2023 r.]
33. ALPHA CERN [źródło: <https://home.cern/news/news/physics/alpha-collaboration-cern-reports-first-measurements-certain-quantum-effects>; dostęp: 10.01.2023 r.]
34. Projekt rakiety kosmicznej, napędzanej silnikiem z reaktorem fuzyjnym [źródło: <https://www.iter.org/newsline/-/3303>; dostęp: 10.01.2023 r.]

Wskazówki bibliograficzne:

Opracowania

- Bhullar S. A., Chow A. et al., *Unconventional Rocket Drives*, An Imperial College Department of Electrical and Electronic Engineering Second Year Group Project, supervisor: T. Clarke, London [brw].
- Braun W. von, *The Redstone, Jupiter and Juno*, [w:] *The History of Rocket Technology. Essays on Research, Development and Utility*, ed. E. M. Emme, Detroit 1964, s. 107-121.
- Canetti L., Drewes M., Shaposhnikov M., *Matter and Antimatter in the Universe*, „New Journal of Physics” 14 (2012), s. 1-20.
- Deutsch C., *Fusion Reactions and Matter–Antimatter Annihilation for Space Propulsion*, „Laser and Particle Beams” 24 (2006), nr 4, s. 605-616.
- Dyson G., *Project Orion. The True Story of the Atomic Spaceship*, New York 2002.
- Fei X., Snow W. M., *Cylindrical Penning traps with dynamic orthogonalized anharmonicity compensation for precision experiments*, „Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment” 425 (1999), nr 3, s. 431-440.
- Folusiak M., *Analiza możliwości zastosowania dyszy typu aerospike w pierwszym stopniu rakiety kosmicznej*, „Prace Instytutu Lotnictwa” 198 (2009), nr 3, s. 98-104.
- Furniss T., *Historia podboju kosmosu*, tłum. M. Królikowska-Sołtan, A. Sołtan, Warszawa 2004.
- Gilster P., *Breakthrough Starshot: Mission to Alpha Centauri*, por: <https://www.centauri-dreams.org/2016/04/12/breakthrough-starshot-mission-to-alpha-centauri/> [dostęp: 02.01.2023 r.]

- Godwin R., *Apollo. Eksploracja Księżyca*, tłum. A. Markowski, Warszawa 2011.
- Heppenheimer T. A., *Podbój kosmosu. Historia programów kosmicznych*, tłum. K. Bednarek, Warszawa 1997.
- *History of Fusion*, por: <https://www.euro-fusion.org/fusion/history-of-fusion/> [dostęp: 19.10.2022 r.]
- Jones B., *Podbój kosmosu*, tłum. K. Jarmołowicz-Szulc, Warszawa 1992.
- *Kopernik, astronomia, astronautyka. Przewodnik encyklopedyczny*, red. W. Zonn, Warszawa 1973.
- Lawrie A., Godwin R., *Saturn V. The Complete Manufacturing and Test Records. Plus Supplemental Material*, Berlington 2005.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*, Washington 2021.
- Oberth H., *Wege zur Raumschiffahrt*, München-Berlin 1929.
- Orth C. D., *VISTA – A Vehicle for Interplanetary Space Transport Application Powered by Inertial Confinement Fusion*, 2003; por. <https://www.osti.gov/servlets/purl/15015945> [dostęp: 22.11.2022 r.]
- Sagan C., *Błękitna kropka. Człowiek i jego przyszłość w kosmosie*, tłum. M. Krośniak, Poznań 2018.
- Slough J., Pancotti A., Kirtley D., Votrobek G., *Electromagnetically driven fusion propulsion*, 2013; <https://www.nasa.gov/> [dostęp: 17.10.2022 r.]
- Sutton G. P., *History of Liquid Propellant Rocket Engines*, Reston 2006.
- Whitfield S., *Gemini*, tłum. A. Markowski, Warszawa 2011.
- Whitfield S., *Mercury*, tłum. A. Markowski, Warszawa 2011.

Strony internetowe

- <http://ffden-2.phys.uaf.edu/213.web.stuff/Scott%20Kircher/> [dostęp: 17.10.2022 r.]
- <http://www.nasa.gov/index.html> [dostęp: 02.01,2023 r.]

- <https://alpha.web.cern.ch/> [dostęp: 17.10.2022 r.]
- <https://encyklopedia.pwn.pl/szukaj/Ciołkowski%20Konstantin%20E..html> [dostęp: 02.01.2023 r.]
- <https://home.cern/> [dostęp: 17.10.2022 r.]
- <https://tae.com/fusion-power/> [dostęp: 18.10.2022 r.]
- https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/TRC/Rockets/history_of_rockets.html [dostęp: 17.10.2022 r.]
- <https://www.iter.org/> [dostęp: 17.10.2022 r.]
- https://www.nasa.gov/centers/goddard/about/history/dr_goddard.html [dostęp: 02.01.2023 r.]
- <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/aerospikes.html> [dostęp: 02.01.2023 r.]
- <https://www.planetary.org/sci-tech/lightsail> [dostęp: 17.10.2022 r.]
- <https://www.raumfahrtmuseum.de> [dostęp: 02.01.2023 r.]