

## Projekt Manhattan – Los Alamos

*Krzysztof Fiałkowski*

*Instytut Fizyki UJ*

Z okazji siedemdziesięciolecia „Projekt Manhattan” wspominaliśmy niedawno, jak powstał największy w historii projekt naukowo-wojskowy, skąd wzięła się jego nazwa i jakie były jego pierwsze sukcesy. Jednak większości ludzi projekt ten kojarzy się z jednym tematem: konstrukcją pierwszych bomb atomowych, i z jednym miejscem: Los Alamos. Wypada więc wyjaśnić, dlaczego między konstrukcją pierwszego reaktora i konstrukcją bomby upłynęły niemal trzy lata intensywnej pracy ogromnego zespołu, nie tylko w Los Alamos, ale i w innych miejscach w USA i w Kanadzie.

Pozornie może się wydawać, że przeprowadzanie kontrolowanej reakcji łańcuchowej jest trudniejsze niż jednorazowe doprowadzenie materiału rozszczepialnego do wybuchu. Przypomnijmy jednak, że reaktor Fermiego nie miał produkować znacznych ilości energii ani działać stabilnie i długo. Jego zadaniem było tylko wykazanie, że reakcja łańcuchowa rozszczepienia jest naprawdę realna. Rozszczepienie jądra uranu 235 uwalnia zwykle dwa lub większą liczbę swobodnych neutronów, które mogą inicjować dalsze rozszczepienia. Nie oznacza to jednak wcale, że liczba rozszczepień będzie gwałtownie rosła w czasie.

Aby reakcja łańcuchowa rozwijała się, prawdopodobieństwo kolejnych rozszczepień musi być dostatecznie duże. Jest to oczywiście możliwe tylko wtedy, gdy dość duża jest „porcja” uranu. Jednak nie jest to jedyny warunek. Neutrony powstające w wyniku rozszczepienia mają znaczną energię kinetyczną. Dla takich neutronów prawdopodobieństwo kolejnych rozszczepień jest niewielkie, jeśli masa uranu nie jest naprawdę duża (rzędu kilkudziesięciu kilogramów). Reakcja łańcuchowa rozpocznie się dla znacznie mniejszej masy uranu, jeśli wyemitowane neutrony zostaną przed zderzeniem z kolejnymi jądrami uranu „spowolnione”, czyli oddadzą znaczną część energii kinetycznej ośrodkowi, w którym się poruszają, zwanemu moderatorem. Najskuteczniejsze moderatory to tzw. ciężka woda (w której wodór zastąpiono jego ciężkim izotopem – deuterem) i węgiel, zwykle w postaci grafitu. Fermi zbudował reaktor właśnie z cegieł uranowych i grafitowych, potrzebował więc stosunkowo niewiele uranu.

Wzrost liczby rozszczepień w wybuchu bomby musi być bardzo szybki, bo w przeciwnym razie wybuch rozrzuci materiał rozszczepialny, zanim wyzwolona zostanie naprawdę duża energia. Zatem nie ma czasu na spowalnianie; uranu 235 musi być tak dużo, aby neutrony o znacznej energii miały dostatecznie duże prawdopodobieństwo spowodowania kolejnych rozszczepień. Warto przy tym pamiętać, że w naturalnym uranie  $^{235}\text{U}$  stanowi tylko 0,7% całej masy.

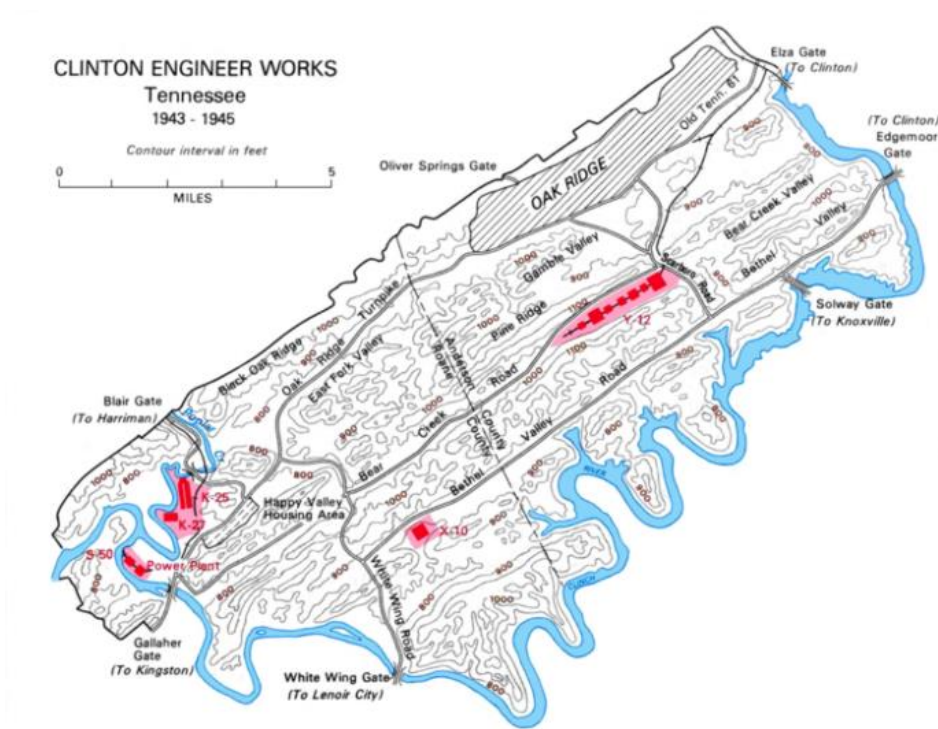
Mniejsza masa jest wymagana w przypadku innego materiału rozszczepialnego, izotopu plutonu  $^{239}\text{Pu}$ . Jednak pluton praktycznie nie występuje naturalnie w przyrodzie, bo czas rozpadu wszystkich jego izotopów jest zbyt krótki. Można wyprodukować pluton w reaktorach, wykorzystując „najpopularniejszy” izotop uranu  $^{238}\text{U}$ . Jądra tego izotopu po pochłonięciu neutronu przekształcają się w jądra neptunu, a te po kolejnych rozpadach przekształcają się w pluton. Przed konstrukcją bomby, a nawet przed ostatecznym wyborem materiału rozszczepialnego, należało zgromadzić duże ilości obu izotopów, a dla zabezpieczenia dobrego działania reaktorów, także i ciężkiej wody.

W chwili objęcia przez generała Leslie Grovesa kierownictwa projektu działało już kilka laboratoriów przygotowujących możliwe materiały rozszczepialne. Grupa Ernesta Lawrence’a na Uniwersytecie Berkeley badała możliwość elektromagnetycznej separacji izotopów uranu, podczas gdy inne grupy badały separację przez dyfuzję. Grupa Harolda Ureya na Uniwersytecie Columbia zajmowała się możliwością użycia ciężkiej wody, a grupa Arthura Comptona w Chicago – grafitu jako moderatora w reaktorach produkujących pluton z uranu. Zanim można było rozważać szczegółowo konstrukcję bomby, której teoretyczną możliwość potwierdzono na konferencjach w Chicago i Berkeley, należało opracować skuteczne metody separacji dużych ilości uranu  $^{235}\text{U}$  i produkcji plutonu oraz zbudować fabryki i reaktory produkujące w dostatecznych ilościach potrzebne materiały. Koordynacją pracy tych fabryk i wykorzystaniem ich produktów musiał zająć się zespół ekspertów zebranych w jednym ośrodku.

Pierwszą fabryką, której budowę zaczął Groves, był zakład wzbogacania uranu w izotop  $^{235}\text{U}$  w pobliżu Knoxville w Tennessee. Tereny pod jej budowę zostały przejęte przez armię już jesienią 1942 roku. Później na tych terenach powstało dla pracowników fabryki i ich rodzin całe nowe miasto Oak Ridge.

Pierwotnie rozważano ulokowanie zespołu konstrukcji bomby w tym samym miejscu, ale uznano, że należy wybrać lokalizację bardziej odległą od miast. W listopadzie 1942 roku zbadano tereny wokół Albuquerque w stanie Nowy Meksyk i ostatecznie wybrano tereny, na których mieściła się „szkoła przetrwania” dla chłopców – Los Alamos Ranch School.

Produkcja plutonu w reaktorze miała rozpocząć się w lesie Argonne pod Chicago. Wkrótce zdecydowano, że nie ma tam dość miejsca i rozważano przeniesienie planów do Oak Ridge. Zanim jednak podjęto ostateczną decyzję o lokalizacji Compton zdecydował, aby zbudować próbny reaktor na terenie Uniwersytetu Chicago. Jak wiadomo, zespół pod kierunkiem Enrico Fermiego wywiązał się z tego zadania znakomicie. Wkrótce kierownictwo projektu uznało, że lokalizacja w centrum miasta jest zbyt ryzykowna nawet dla próbnego reaktora, więc rozebrano go i zmontowano ponownie w Argonne.



Plan ośrodka Oak Ridge. Y-12 oznacza zakład separacji elektromagnetycznej, K-25 i K-27 zakłady separacji dyfuzyjnej, X-10 reaktor produkujący pluton



Wjazd na teren Los Alamos w początkowym okresie budowy ośrodka

Tymczasem uznano, że przemysłowa produkcja plutonu w reaktorze nie może być prowadzona blisko istniejących miast i zamiast Oak Ridge wybrano lokalizację w Hanford pod Richland nad rzeką Columbia w stanie Waszyngton.



Reaktor w Hanford

Tam też powstało całe miasto, które w szczytowym okresie stało się trzecim największym miastem stanu. Inne centra projektu powstały w Kanadzie, gdzie w Trail produkowano ciężką wodę, a w reaktorze w Chalk River pluton.

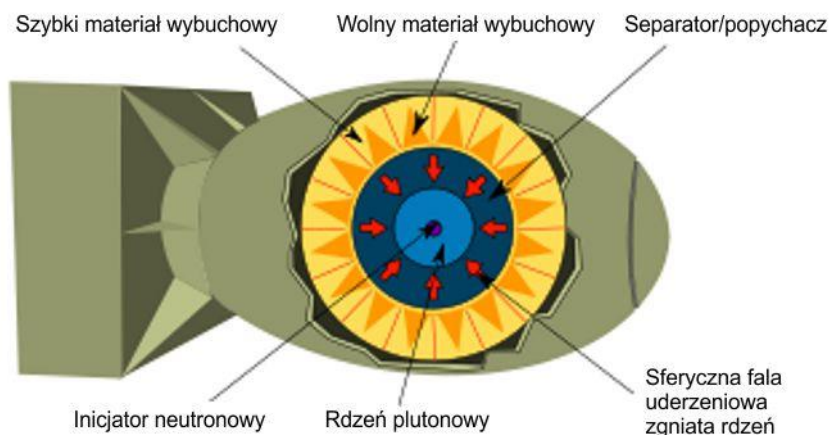


Rozmieszczenie głównych ośrodków Projektu Manhattan

Jednak sercem projektu stało się Los Alamos, gdzie zaczęli wkrótce zbierać się najwybitniejsi fizycy USA i Wielkiej Brytanii, zwoływani tam przez Roberta Oppenheimera, któremu generał Groves powierzył kierownictwo prac. Oczywiście wezwanym nie było wolno informować nikogo, dokąd się udają, a nawet stacja kolejowa, do której mieli przesyłać swoje bagaże, miała być wybrana niezbyt blisko Los Alamos. Richard Feynman opisuje jednak w swoich wspomnieniach, jak udało mu się bez wysiłku odkryć tajemnice projektu. Chcąc dowiedzieć się, gdzie jest to dziwne miejsce, dokąd go wezwano, wypożyczył z biblioteki uniwersyteckiej przewodnik po Nowym Meksyku. Lista poprzednich wypożyczających pokryła się dokładnie z listą osób, które w ostatnich miesiącach zniknęły tajemniczo z uniwersytetu...

Badania w Los Alamos oprócz ściśle naukowych eksperymentów, jak badanie oddziaływań neutronów czy procesów dyfuzji, dotyczyło głównie planowania mechanizmu bomby. Rozważano pierwotnie tylko tzw. schemat działa, z którego „kula” uranowa miała być wystrzelona przy użyciu konwencjonalnego materiału wybuchowego w uranową „tarczę”. Kula i tarcza miały zbyt małe masy, aby rozpoczęła się w nich reakcja łańcuchowa, ale po ich połączeniu masa krytyczna miała być przekroczona inicjując wybuch. Okazało się jednak, że dla plutonu ten schemat nie jest właściwy. W reaktorach pluton  $^{239}\text{Pu}$  szybko zmieniał się w znacznym stopniu w wyniku pochłonięcia neutronu w pluton  $^{240}\text{Pu}$ , który ulegał rozszczepieniu spontanicznemu zbyt szybko. Tylko bardzo mała część materiału uległaby rozszczepieniu po zderzeniu kuli z tarczą i wówczas siła wybuchu byłaby znacznie mniejsza, niż oczekiwano.

Opracowano więc znacznie bardziej skomplikowany schemat, tzw. implozyjny, gdzie rozmieszczony wokół kuli plutonowej materiał wybuchowy miał „zgnieść” kulę zwiększając jej gęstość i inicjując wybuch.

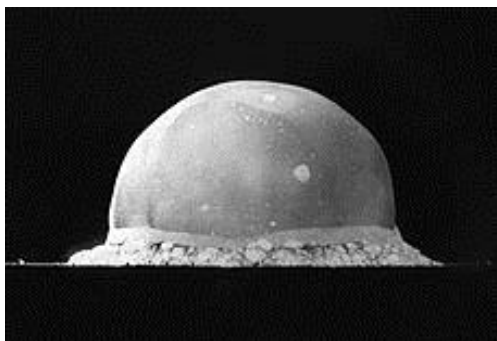


Schemat implozyjnej bomby plutonowej

W rzeczywistości proces ten był jeszcze bardziej skomplikowany, a kulę plutonu pokrywano warstwami innych materiałów dla uniknięcia korozji, zabezpieczenia przed wcześniejszym przypadkowym wybuchem i wzmocnienia odbić neutronów dla przedłużenia eksplozji. Pierwszą taką kulę wyprodukowano dopiero 2 lipca 1945 roku, a następne w kilka tygodni później. Trudność obliczenia wszystkich tych efektów zmusiła kierownictwo projektu do przeprowadzenia wybuchu próbnego. Wybrano dla niego miejsce na pustyni w pobliżu poligonu wojskowego w Alamogordo, ponad 300 kilometrów na południe od Los Alamos.

Dodajmy, że w tym samym czasie wizjonerskie pomysły Edwarda Tellera, który jako jedyny zalecał równoczesne badania nad możliwością wykorzystania nie tylko rozszczepień uranu czy plutonu, ale i fuzji lekkich jąder, doprowadziły do nieoczekiwanego wyniku. Zainspirowany przez niego Bethe sprawdził już w 1943 roku czy eksplozja bomby rozszczepieniowej w atmosferze nie może zainicjować fuzji atomów azotu i w rezultacie „pożaru atmosfery”. Wyniki obliczeń były jasne i Bethe z Tellerem zapisali w raporcie, że takie niebezpieczeństwo nie istnieje, ale legenda o tym, że twórcy bomby jeszcze w 1945 roku obawiali się takiego „pożaru” przeżyła do dziś.

Próbny wybuch przeprowadzono 16 lipca 1945 roku. Spełnił on wszystkie oczekiwania – jego energia wyniosła 20 kiloton, czyli odpowiadała energii wybuchu 20 tysięcy ton trotylu, popularnego konwencjonalnego materiału wybuchowego. Wybuch był odczuwany w odległości ponad stu kilometrów, natomiast by utrzymać to w tajemnicy, rozpowszechniono wiadomość o wybuchu składu amunicji na poligonie.



Próbny wybuch 16 lipca 1945, 16 ms po eksplozji. Promień kuli to około 200 m

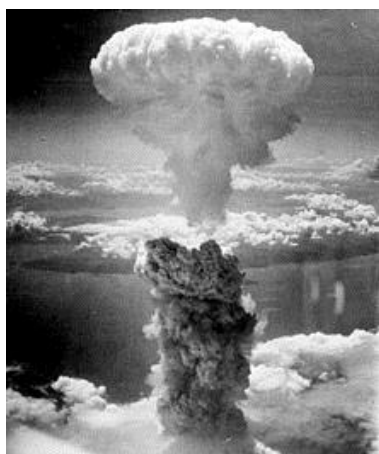
Wybuch obserwowano z czterech schronów odległych o 10 km od miejsca wybuchu. W schronach tych przebywali najwybitniejsi fizycy projektu, jak Oppenheimer, Chadwick, Fermi czy Lawrence. Co ciekawe, wśród żołnierzy chroniących ich znalazł się osiemnastoletni szeregowy Val Fitch, późniejszy laureat Nagrody Nobla z fizyki...



Generał Groves i Oppenheimer na miejscu próbnego wybuchu

Sukces próbnego wybuchu skłonił prezydenta USA Harry'ego Trumana do podjęcia decyzji o użyciu bomb atomowych przeciw Japonii, która kontynuowała wojnę na Pacyfiku i okupowała znaczne obszary Azji i Oceanii. Oczekiwano, że inwazja na wyspy japońskie, które zostały całkowicie zmilitaryzowane, mogła pochłonąć nawet miliony ofiar. Do tego wkrótce upływał termin obiecanego przez Stalina ataku Związku Radzieckiego na Japonię, który mógł skrócić wojnę, ale i doprowadzić do nieobliczalnego wzrostu potęgi ZSRR.

6 sierpnia 1945 roku bomba uranowa „Little Boy” działająca w „schemacie działa” została zrzucona na Hiroszimę. Japonia jednak nie zdecydowała się na kapitulację. Nawet po rozpoczęciu 9 sierpnia wojny w Mandzurii przez ZSRR i zrzuconiu bomby plutonowej „Fat Man” na Nagasaki rząd Japonii rozważał przez niemal tydzień decyzję i dopiero stanowisko cesarza rozstrzygnęło sprawę. 15 sierpnia Japonia zapowiedziała kapitulację, którą podpisano 2 września. Wojna skończyła się, choć jeszcze tygodniami izolowane oddziały japońskie prowadziły walkę.



Chmura po wybuchu bomby nad Nagasaki

Zgodnie z obliczeniami metoda implozyjna okazała się nieporównanie wydajniejsza. 21% plutonu uległo rozszczepieniu wyzwalając energię 23 kiloton, podczas gdy w bombie uranowej zaledwie 1,2% materiału uległo rozszczepieniu, wyzwalając energię 15 kiloton z dziesięciokrotnie większej masy.

Do dziś trwają dyskusje czy użycie broni jądrowej i śmierć ponad stu tysięcy mieszkańców obu miast były uzasadnione. Rozważano, czy „pokazowa” eksplozja na jakiejś bezludnej wyspie nie byłaby wystarczająca dla zmuszenia Japonii do kapitulacji. Trudno jednak zaprzeczyć, że prowadzenie dalszych negocjacji i próba zorganizowania takiej demonstracji z pewnością wydłużyłaby wojnę co najmniej o tygodnie. Tymczasem każdego dnia w wal-

kach na wyspach i kontynencie, a na terenach okupowanych w obozach jeńców i obozach koncentracyjnych dla ludności cywilnej, umierały tysiące ludzi.

Szczególnie dramatyczne były rozważania nad moralnym aspektem projektu wśród jego uczestników. Kilku z nich zrezygnowało z pracy w Los Alamos już po próbnym wybuchu, a następni natychmiast po kapitulacji Japonii. Jednak ogromna większość kontynuowała pracę. Uznali oni, że nie straciła aktualności ich wcześniejsza motywacja konstrukcji broni, która miała zabezpieczyć demokratyczne kraje przed podbojem przez dyktatury. Projekt trwał, a nawet powodował ofiary wśród uczestników.

Stopień komplikacji bomby plutonowej powodował konieczność dalszych eksperymentów nad precyzyjnym wyznaczeniem masy krytycznej. Powszechnie znany, i opisany nie tylko w reportażach, ale i w powieściach, jest przypadek śmierci kanadyjskiego fizyka Louisa Slotina w maju 1946 roku w wyniku napromieniowania podczas takiego eksperymentu. Polscy czytelnicy mogą znać tę historię z reportażu „Dziwna śmierć Louisa Slotina” opublikowanego w zbiorze *W stronę czwartego wymiaru*, albo z powieści Dextera Mastersa *Wypadek*. Opisano tam, że Slotin zsuwał pomału kawałki plutonu składając je w kulę, aby wyznaczyć masę krytyczną, a napromieniowanie nastąpiło, gdy śrubokręt wyslizgnął mu się z ręki i połączył nagle całość.

Dzisiejsze źródła podają, że było całkiem inaczej. Zapewne wymogi tajemnicy wojskowej spowodowały przekazanie dziennikarzom fałszywych informacji. Kula plutonowa była przygotowana wcześniej i miała masę podkrytyczną. Slotin badał wzrost promieniowania przy przysuwaniu dwóch półkul z berylu odbijającego neutrony, a przez to przyspieszającego reakcję. Wyślizgnięcie się śrubokręta spowodowało opadnięcie górnej półkuli na dolną i gwałtowne przyspieszenie reakcji. Prawdą jest natomiast, że Slotin rękami rozsunął natychmiast półkule i uratował tak pozostałe osoby obserwujące eksperyment. Sam zmarł po dziewięciu dniach. Od tego czasu podobne eksperymenty wykonywano już tylko zdalnie.

Zaskakujący jest inny fakt: ta sama kula plutonu zabiła już wcześniej innego fizyka! 21 sierpnia 1945 roku asystent Slotina, Harry K. Daghlian, upuścił na plutonową kulę cegłę z innego materiału odbijającego neutrony i zmarł po miesiącu w wyniku napromieniowania podczas tego wypadku.

Dlaczego wypadek Slotina był powszechnie znany już w latach pięćdziesiątych XX wieku, a o Daghlianie długo nikt nie słyszał? Przyczyna wydaje się oczywista: w dniach między ogłoszeniem i podpisaniem kapitulacji Japonii władze USA z pewnością nie chciały, aby rozeszły się wieści, jak niedoskonałe są jeszcze metody badań nad „cudowną bronią”.

Projekt Manhattan został oficjalnie zakończony z końcem 1946 roku, po przeprowadzeniu jeszcze dwóch prób z bombami plutonowymi na atolu Bikini w lipcu tego roku. Nie zakończyło to oczywiście badań wojskowych nad jeszcze potężniejszą bronią masowej zagłady: bombą fuzyjną, zwaną bombą wodorową. Ale to już zupełnie inna historia.