

KRIOGENIKA HELOWA I NADPRZEWODNICTWO W DUŻYCH URZĄDZENIACH BADAWCZYCH – OD NAUKI DO GOSPODARKI

Maciej CHOROWSKI

Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny

10 lipca 2008 roku minęło 100 lat od momentu skroplenia helu przez Heike Kamerlingh-Onnesa, który następnie w 1911 roku odkrył zjawisko nadprzewodnictwa w rtęci i podjął pierwsze próby zbudowania elektromagnesów nadprzewodnikowych. Próby nieudane, gdyż Kamerlingh-Onnes użył do swych prób rtęci, będącej nadprzewodnikiem I rodzaju i charakteryzującej się zanikiem nadprzewodnictwa w obecności nawet niewielkich pól magnetycznych, jednak wskazujące kierunek przyszłych dominujących aplikacji niskich temperatur, jakimi jest kriostatowanie nadprzewodników. Swoje sukcesy fizyka - eksperymentatora Kamerlingh-Onnes zawdzięczał zbudowaniu na terenie uniwersytetu w Lejdzie dużego laboratorium z silnym zapleczem warsztatowym, jak również uruchomieniu szkoły techników i laborantów, stanowiącej zaplecze kadrowe wciąż rozbudowywanych stanowisk i instalacji badawczych. Dzisiaj można stwierdzić, że Heike Kamerlingh - Onnes był niewątpliwie prekursorem koncepcji budowy dużej infrastruktury badawczej realizowanej skutecznie od połowy XX wieku w laboratoriach Stanów Zjednoczonych, Europy i Azji, takich jak np. Brookhaven National Laboratory na Long Island koło Nowego Jorku, Europejska Organizacja Badań Jądrowych CERN w Genewie, czy Fermi National Accelerator Laboratory FERMI LAB w Batavii koło Chicago.

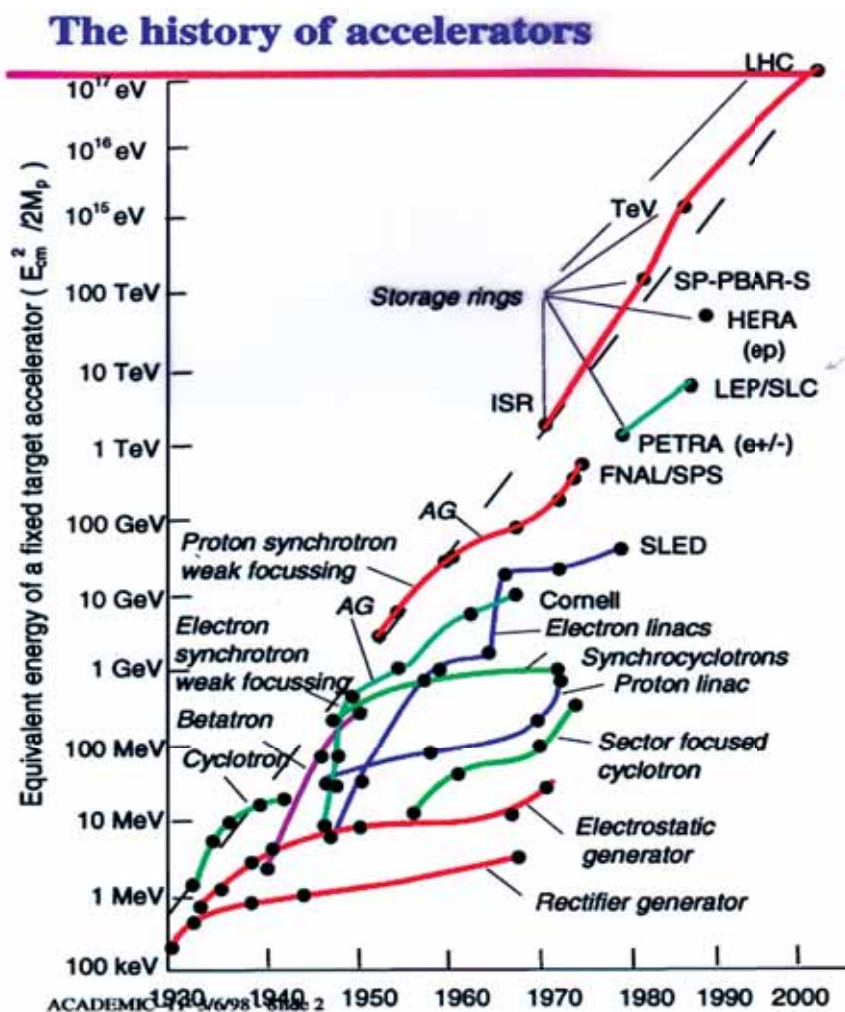
Hel, odkryty w 1868 roku przez Jansena oraz Lockeyra w trakcie badań spektrograficznych promieniowania słonecznego, skroplony po

40 latach przez Kamerlingh-Onnesa i charakteryzujący się normalną temperaturą wrzenia 4,2 K, stanowi do dzisiaj podstawowy czynnik stosowany do uzyskiwania bardzo niskich temperatur, a w szczególności do kriostatowania nadprzewodnikowych magnesów i innych urządzeń. Pomimo odkrycia przez Bednorza i Muellera nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w niektórych materiałach ceramicznych w 1986 roku, i możliwości kriostatowania tych materiałów ciekłym azotem o normalnej temperaturze wrzenia wynoszącej 77,4 K, trudności technologiczne, które towarzyszą wytwarzaniu przewodów z nadprzewodników wysokotemperaturowych nie pozwoliły dotychczas na ich powszechne wykorzystanie do budowy magnesów, transformatorów czy kabli energetycznych. W dalszym ciągu znakomitą większość urządzeń nadprzewodnikowych buduje się ze stosunkowo prostego technologicznie w obróbce plastycznej stopu niobu z tytanem NbTi, o temperaturze krytycznej wynoszącej 12,2 K. Coraz częściej stosuje się też związek międzymetaliczny niobu z cyną Nb₃Sn o temperaturze krytycznej 25 K. Ze względu na kruchość Nb₃Sn, nawinięcie cewek z tego nadprzewodnika wymaga stosowania złożonej technologii cieplno-mechanicznej, cewki takie są wciąż przedmiotem wielu badań. Wykorzystanie innych nadprzewodników niskotemperaturowych w technice i instalacjach badawczych jest marginalne. Z powodu wspomnianych trudności technologicznych towarzyszących obróbce nadprzewodników wysoko-

temperaturowych, pomimo upływu 22 lat od ich odkrycia, w dalszym ciągu nadprzewodnictwo niskotemperaturowe i służebna wobec niego kriogenika helowa stanowią podstawowe technologie wykorzystywane w budowanych obecnie wysokopolowych magnesach oraz wnękach rezonansowych wysokiej częstotliwości. Urządzenia takie znajdują zastosowanie w charakteryzujących się dużymi energiami akceleratorach cząstek elementarnych, hadronów i jonów, reaktorach wysokotemperaturowej fuzji jądrowej (tokamakach i stelaratorach), laserach na swobodnych elektronach, jak również w separatorach magnetycznych.

Duże urządzenia badawcze – nowy, kontynentalny model laboratorium fizycznego

Sukces amerykańskiego projektu Manhattan uruchomionego w 1942 roku i ukierunkowanego na opracowanie technologii i wyprodukowanie bomby atomowej spowodował, że bezpośrednio po zakończeniu II Wojny Światowej w Stanach Zjednoczonych utworzono sieć narodowych laboratoriów zdolnych do realizacji bardzo dużych projektów badawczych w dziedzinie fizyki wysokich energii, fizyki jądrowej, energetyki, badań kosmicznych, badań materiałowych, biologii i innych. Należą do nich Los Alamos National Laboratory, gdzie w ramach projektu Manhattan pod kierunkiem Jakuba Roberta Oppenheimera skonstruowano i wyprodukowano pierwsze bomby atomowe, a obecnie prowadzi



Rys. 1. Wzrost energii akceleratorów od cyklotronu Lawrence'a do LHC

się badania nad wykorzystaniem energii słonecznej i atomowej; uruchomione w 1947 roku Brookhaven National Laboratory, stanowiące dzisiaj rozbudowany kompleks akceleratorów, mikroskopów transmisyjnych, tomografów MRI oraz PET i nanotechnologii; założony w 1967 roku Fermilab z akceleratorem Tevatron, będącym maszyną o najwyższej dotychczas uzyskanej energii zderzeń protonów i antyprotonów; czy też pierwsze z serii ośrodków typu „big science” (dużej nauki) Lawrence National Laboratory w Berkeley, gdzie w 1931 roku Ernest O. Lawrence uruchomił pierwszy duży cyklotron. Laboratoria te od początku swego działania charakteryzowały się dużą koncentracją zasobów ludzkich i środków finansowych pozwalających na osiąganie wręcz strategicznych dla bezpieczeństwa i rozwoju Stanów Zjednoczonych celów. Były

one silnym magnesem dla naukowców z całego świata, a w szczególności ze zniszczonej i zubożałej po II Wojnie Światowej Europy.

W celu zapobieżenia masowej emigracji naukowców z Europy do Stanów Zjednoczonych oraz wzmocnienia potencjału naukowego Kontynentu już w 1949 roku francuski fizyk Louis de Broglie zaproponował utworzenie Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire) – CERN. W 1952 roku na siedzibę Organizacji zaproponowano Genewę, a w 1954 roku 12 państw podpisało konwencję założycielską CERN. Obecnie CERN skupia 20 państw, Polska jest członkiem Organizacji od roku 1991 i warto pamiętać, że CERN był pierwszą zachodnią organizacją międzynarodową, której Polska stała się pełnoprawnym członkiem po transformacji roku

1989. W roku 1957 w CERN uruchomiono pierwszy duży akcelerator, jakim był synchrocyclotron o energii 600 MeV, a we wrześniu 2008 roku po raz pierwszy wprowadzono przeciwbieżne wiązki protonów do 27 – kilometrowego Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC).

W 1959 roku w Hamburgu uruchomiono niemieckie narodowe laboratorium Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY, w którym do połowy roku 2007 eksploatowano nadprzewodnikowy akcelerator protonów i elektronów HERA, a obecnie trwają prace nad budową lasera na swobodnych elektronach XFEL (X-ray Free-Electron Laser). Innym niemieckim laboratorium posiadającym duże urządzenia badawcze jest założone w 1969 roku Gesellschaft fuer Schwerionenforschung mbH (GSI) w Darmstadt. Laboratorium dysponuje infrastrukturą pozwalającą na wytwarzanie niestabilnych jąder oraz rozwój jądrowych terapii medycznych. Obecnie GSI przygotowuje się do uczestnictwa w międzynarodowym projekcie Facility for Antiproton and Ion Research FAIR.

Przykładem dużego laboratorium badawczego ukierunkowanego na fizykę plazmy i dysponującego pierwszym nadprzewodnikowym tokamakiem jest utworzony w 1959 roku oddział Commissariat à l’Energie Atomique (CEA) w Cadarache na południu Francji, w pobliżu Marsylii. W roku 1988 w Cadarache uruchomiono największy z dotychczas zbudowanych tokamak Tore Supra, którego nadprzewodnikowe magnesy są utrzymywane w temperaturze 1,9 K poprzez opanowanie na skalę techniczną technologii nadciekłego helu. Obecnie w Cadarache rozpoczęły się prace ziemne związane z budową Tokamaka ITER, którego uruchomienie jest przewidywane na rok 2016.

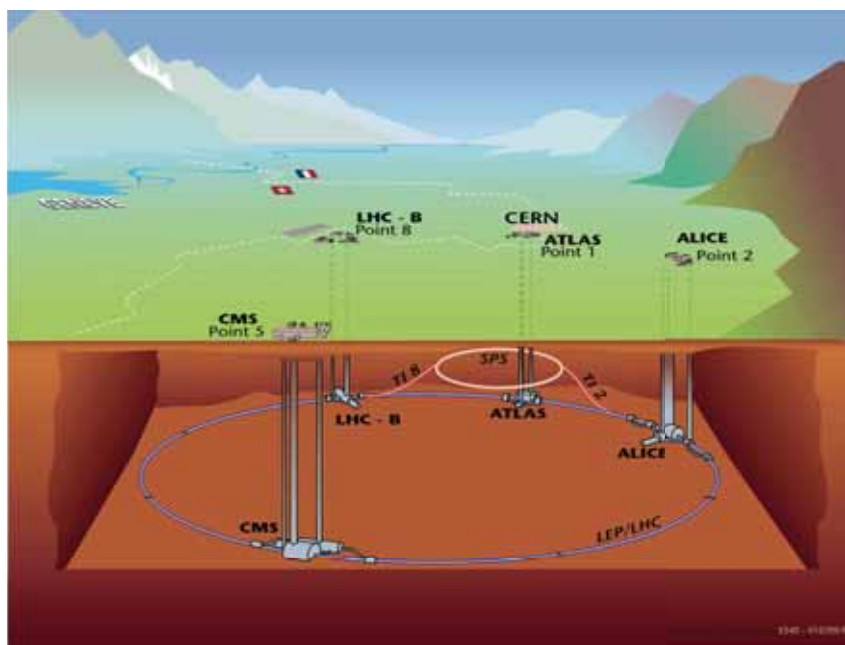
Cechą charakterystyczną wymienionych powyżej laboratoriów jest ich kontynentalny, a nawet globalny charakter. W przypadku Stanów Zjednoczonych ogromną skalę inwestycji w skoncentrowane urządzenia badawcze można było osiągnąć w oparciu o koncepcję sieci Laboratoriów Na-

rodowych, które z kolei stały się magnesem dla fizyków i inżynierów z całego świata wywołując zjawisko tzw. „drenażu mózgow”. W warunkach europejskich osiągnięcie podobnej skali nakładów na duże instrumenty badawcze stało się możliwe poprzez współpracę międzynarodową, czego szczególnym przykładem jest CERN o rocznym budżecie wynoszącym miliard franków szwajcarskich, na który składają się składki 20 krajów członkowskich. Udział Polski w budżecie CERN to prawie 3%.

Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) w CERN

10 września 2008 roku w CERN pod Genewą nastąpiło wstępne uruchomienie największego z dotychczas zbudowanych w skali światowej instrumentu badawczego, jakim jest Wielki Zderzacz Hadronów (LHC). LHC jest akceleratorem protonów o długości ponad 27 km, umieszczonym w kolistym tunelu wydrążonym na średniej głębokości 100 m na pograniczu Szwajcarii i Francji. Dwie przeciwbieżne wiązki protonów, rozpędzone do prędkości bliskich prędkości światła będą krzyżowały swoje tory w detektorach i umożliwią uzyskanie energii w centrum zderzeń protonów wynoszącej 14 TeV. Energia ta umożliwi obserwację obiektów o wielkości w skali liniowej rzędu 10^{-20} m. Dzięki LHC spodziewane jest potwierdzenie istnienia bozonu Higgsa odpowiedzialnego za różnicowanie mas elektronów i protonów, przetestowanie Modelu Standardowego i wejście w nowe obszary odkryć podstawowych praw fizyki, o nie dających się dzisiaj przewidzieć konsekwencjach.

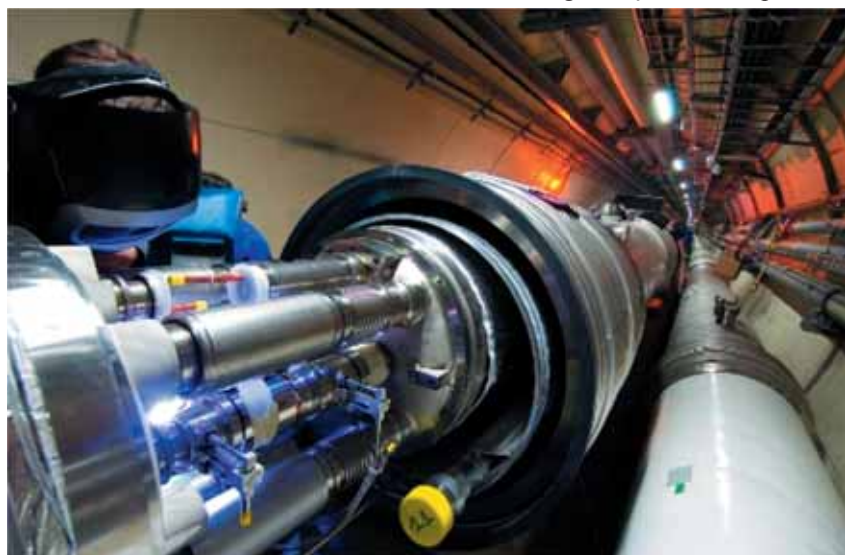
Wielki Zderzacz Hadronów jest najmłodszym z szeregu zbudowanych akceleratorów pokazanych na wykresie Livingstona (rys.1). Szereg ten rozpoczyna skonstruowany przez Lawrence'a i Livingstona w 1930 roku cyklotron o średnicy 5 cali i energii rzędu 100 keV. Przez prawie 80 lat energia akceleratorów rosła wykładniczo, charakterystyczne są wręcz skokowe przeskoki z technologii dojrz-



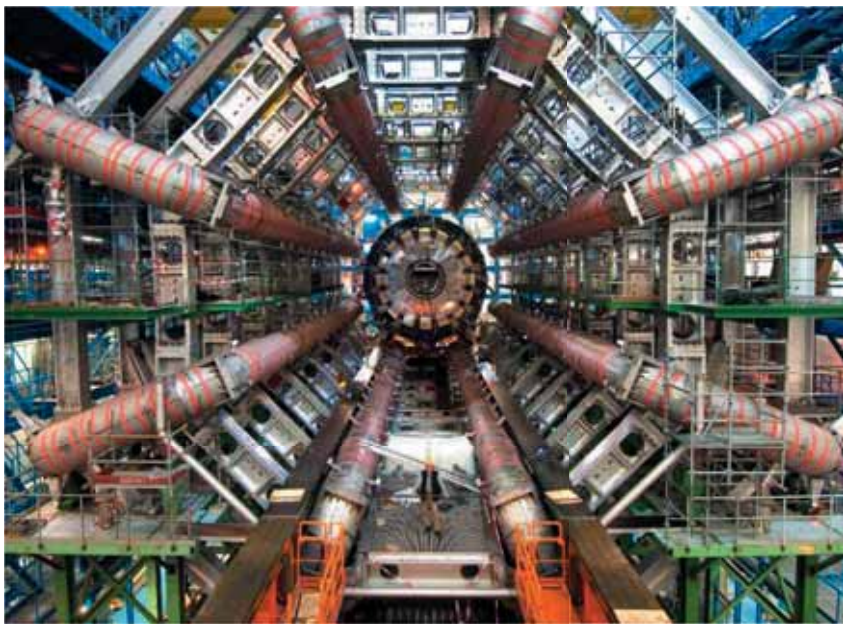
Rys. 2. Wielki Zderzacz Hadronów LHC wraz z detektorami w podziemnym tunelu na pograniczu Szwajcarii i Francji (dzięki uprzejmości CERN)

łych do technologii nowych o dużym ryzyku ich wdrożenia. Począwszy od lat 80 – tych XX wieku wszystkie „frontowe” akceleratory wykorzystywały nadprzewodnictwo i wymagały kriostatowania w temperaturze ciekłego helu tj. 4,2 K. LHC jest maszyną utrzymywaną na całym obwodzie w temperaturze 1,8 K, gdyż zarówno rezonansowe wnęki przyspieszające protony w silnych polach elektrycznych, jak i magnesy skupiające wiązkę i utrzymujące ją na kołowym torze są urządzeniami nadprzewodnikowymi. Podobnie elementami detektorów,

w których zachodzić będą kolizje i dokonywana będzie rejestracja wyników zderzeń są duże toroidalne bądź solenoidalne magnesy nadprzewodnikowe. Usytuowanie Wielkiego Zderzacza Hadronów LHC wraz z detektorami ATLAS, CMS, ALICE i LHC-B w podziemnym tunelu pozostałym po poprzednim akceleratorze leptonów LEP przedstawiono na rysunku 2, natomiast rysunki 3 i 4 pokazują fragment akceleratora w trakcie wykonywania połączeń międzymagnesowych oraz halę detektora ATLAS w trakcie montażu tego urządzenia. Do pierście-



Rys. 3. Tunel Wielkiego Zderzacza Hadronów LHC w trakcie wykonywania połączeń międzymagnesowych (dzięki uprzejmości CERN)



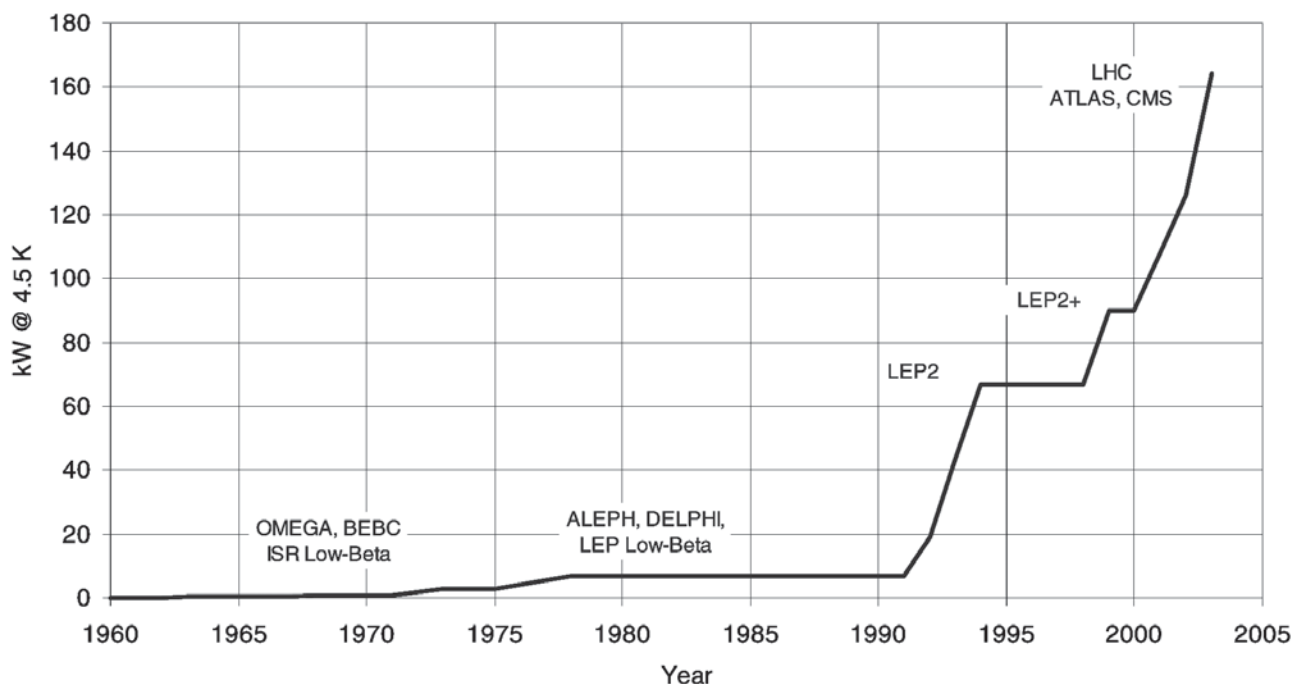
Rys. 4. Detektor ATLAS w trakcie montażu w podziemnej hali – skala urządzenia widoczna przez porównanie z sylwetką człowieka na dolnym podeście (dzięki uprzejmości CERN)

nia Wielkiego Zderzacza Hadronów będą wstrzykiwane protony uprzednio wstępnie przyspieszone w akceleratorze SPS do energii około 500 GeV (0,5 TeV). W pierścieniu Zderzacza LHC, po wielokrotnym okrążeniu tunelu, protony osiągną energię 7 TeV i poprzez skrzyżowanie ich torów będą ulegały kolizji w detektorach. Całkowita energia zderzeń wyniesie 14 TeV i będzie sumą energii przeciwbieżnych protonów, które ulegną zderzeniu.

Długość fali de Broglie’a odpowiadająca tej energii jest rzędu 10^{-20} metra i dzięki temu obiekty o tej skali liniowej będą mogły być zaobserwowane przez detektory. Taka gęstość energii jaka zostanie wytworzona lokalnie w centrum zderzeń protonów była obecna we Wszechświecie w ułamkowej części sekundy po Wielkim Wybuchu. Stąd Wielki Zderzacz Hadronów pozwoli zrozumieć zarówno podstawowe prawa fizyki, jak również

prześledzić ewolucję Wszechświata w bardzo wczesnych momentach po jego powstaniu (rzędu 10^{-11} sekundy).

Uzyskanie założonej energii 14 TeV Wielkiego Zderzacza Hadronów stało się możliwe dzięki zastosowaniu w nim na niespotykaną dotychczas skalę nadprzewodnictwa, kriogeniki helu nadciekłego oraz techniki wysokiej i ultrawysokiej próżni. Do budowy Zderzacza użyto 1250 ton nadprzewodników na bazie Nb-Ti, z których wytworzono 7000 km nadprzewodzących kabli typu “Rutherforda”. Kable te zastosowano w 1232 magnesach dipolowych o długości 15 metrów każdy, 474 magnesach kwadrupolowych i ponad 8000 specjalnych magnesów pozwalających na uzyskanie odpowiednich parametrów wiązki, w tym unikalnej świetlności (rzędu $10^{34}/\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) gwarantującej dużą częstość zderzeń. W celu wytworzenia w magnesach dipolowych pól magnetycznych o indukcji 8 T przy wykorzystaniu opanowanego technologicznie nadprzewodnika NbTi i gęstości prądu w uzwojeniach cewek magnesów $1500 \text{ A}/\text{mm}^2$, konieczne stało się kriostratowanie magnesów w temperaturze 1,9 K. Na całej długości akceleratora jego magnesy są wypełnione helem nadciekłym o temperaturze 1,9 K i unikalnych własnościach cieplnych i trans-



Rys. 5. Dynamika wzrostu mocy kriogenicznej zainstalowanej w CERN

Tabela 1. Budowane i planowane duże urządzenia badawcze wykorzystujące krio-

Urządzenie, lokalizacja	Typ urządzenia	Całkowity budżet [€]	Udział kriogeniki [€]	Zaawansowanie projektu
LHC, CERN, Genewa	zderzacz pp	ok. 3 mld	ok. 360 mln	w trakcie uruchamiania
FAIR, GSI, Darmstadt	akceleratory jonów	ok 1,2 mld	ok 100 mln	faza przygotowywania specyfikacji
XFEL, DESY, Hamburg	laser na swobodnych elektronach	ok. 1,1 mld	ok 50 mln	faza kończenia specyfikacji
W7-X, Max Planck, Greifswald	reaktor termojądrowy: stellarator	ok 300 mln	ok 20 mln	zaawansowana faza budowy
ITER, ITER IO, Cadarache	reaktor termojądrowy: tokamak	ok. 10 mld	ok 300 mln	początek robót ziemnych, etap specyfikacji
ILC, brak decyzji dot. lokalizacji	akcelerator liniowy	w trakcie opracowania	w trakcie opracowania	wstępna faza studialna
Razem		15,6 mld €	830 mln €	

portowych takich jak np. przewodnictwo cieplne przekraczające o 3 rzędy wielkości przewodnictwo najczystszej miedzi, ale wymagającego wręcz doskonałych kriostatów i armatury, gdyż zdolnego do przenikania nawet przez najmniejsze nieszczelności, niedostępne dla helu w postaci normalnej. Budowa Wielkiego Zderzacza Hadronów spowodowała konieczność zainstalowania w CERN mocy chłodniczej, wynoszącej ponad 160 kW, przy odniesieniu do ekwiwalentnej temperatury ciekłego helu 4,5 K (rys. 5). W systemie kriogenicznym Wielkiego Zderzacza Hadronów znajduje się ponad 120 ton helu, z czego większość w postaci nadciekłej wypełnia struktury magnesów dipolowych i kwadrupolowych. Izolacja magnesów przed dopływami ciepła wymagała zbudowania izolacji próżniowej na całej 27 kilometrowej długości akceleratora, a dwie rury przeciwbieżnych wiązek stanowią największy układ ultrawysokiej próżni z dotychczas zbudowanych na świecie.

Całkowity budżet akceleratora LHC wyniósł około 5 mld franków szwajcarskich, z czego na magnesy nadprzewodnikowe przypadło 54%, a system kriogeniczny pochłonął

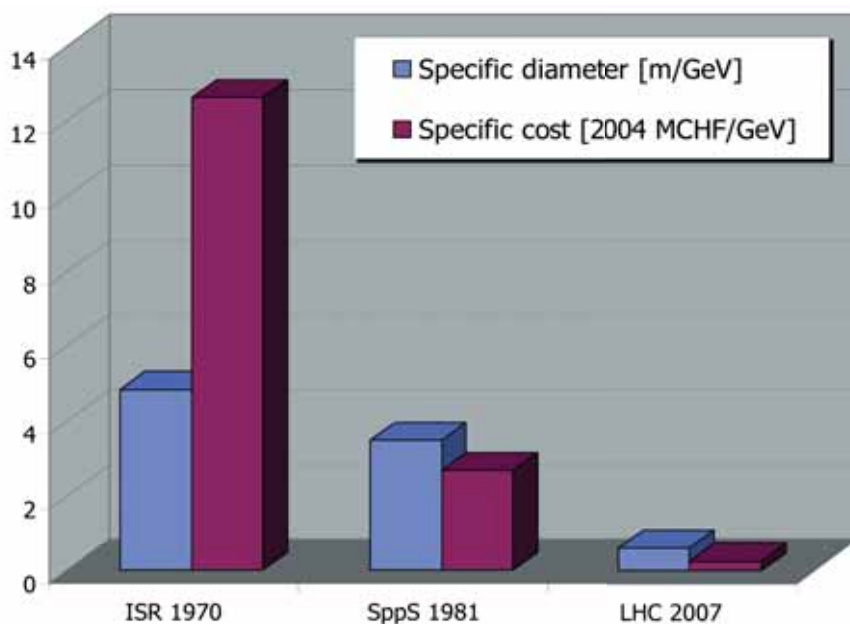
kolejne 12. Podkreślić należy duży udział robót budowlanych w budowie akceleratora, których wartość wyniosła 15% budżetu i to pomimo faktu, że Wielki Zderzacz Hadronów został umieszczony w istniejącym kolistym tunelu, w którym poprzednio znajdował się akcelerator LEP. Pomimo tak dużych nakładów poniesionych na jego zbudowanie, LHC jest względnie tanią maszyną, jeżeli pod uwagę weźmie się względny koszt uzyskania jednostki energii (CHF/GeV) oraz minimalny średnicę akceleratora przypadającą na jednostkę energii (m/GeV) – rys. 6.

Budowa Wielkiego Zderzacza Hadronów wymagała opracowania nowego modelu współpracy dużego laboratorium badawczego z przemysłem, w którym oba środowiska – naukowe i przemysłowe - musiały opanować zdolność współpracy na niespotykaną dotychczas skalę. Koncepcje i pierwsze prototypy magnesów i kriostatów były opracowywane w CERN, który następnie wdrażał rozwinięte technologie w przedsiębiorstwach europejskich poprzez kontrakty zawierane na podstawie rozstrzygnięć przetargów, w których mogły uczestniczyć firmy z krajów członkowskich

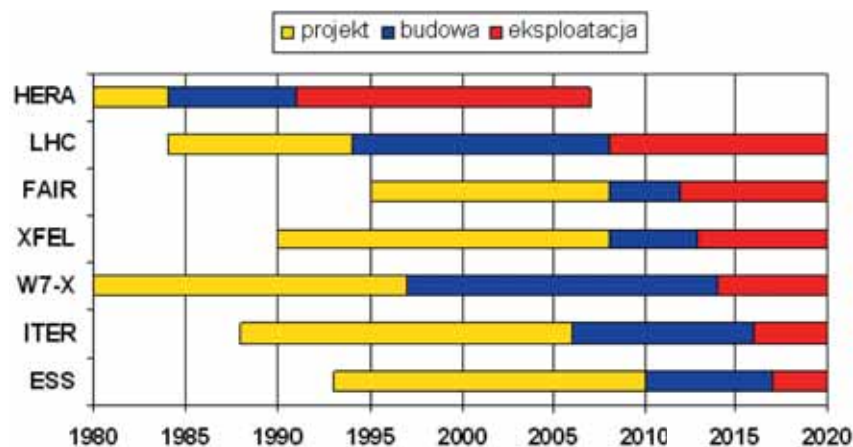
CERN, w tym także z Polski. Technologie rozwinięte na potrzeby CERN przedsiębiorstwa wykorzystują dalej na rynkach związanych z energetyką, przemysłem chemicznym czy budową instalacji kriogenicznych. Przede wszystkim jednak przedsiębiorstwa, które współpracowały z CERN uzyskały kompetencje pozwalające im na uczestniczenie w budowie aktualnie konstruowanych i uruchamianych dużych instalacji badawczych, o skali zbliżonej do Wielkiego Zderzacza Hadronów w CERN.

Duże instalacje badawcze budowane w Europie

W tabeli 1. wymieniono na tle LHC duże urządzenia badawcze, które będą służyły badaniom jądrowym (FAIR), poszukiwaniom sposobów wykorzystania energii termojądrowej (ITER, Wendelstein 7X), badaniom materiałowym i biologii molekularnej (XFEL), czy fizyce wysokich energii po zebraniu danych z LHC (ILC). Dla wszystkich tych instalacji charakterystyczny jest duży udział w ich konstrukcji kriogeniki helowej, wynikający przede wszystkim z zastosowania



Rys. 6. Porównanie względnych kosztów akceleratorów „ciepłych” (ISR, SppS) oraz nadprzewodnikowego LHC (za Ph. Lebrun)



Rys. 7. Harmonogramy realizacji dużych projektów badawczych w Europie

w nich nadprzewodnictwa oraz kriogenicznych pomp próżniowych.

Na rysunku 7. pokazano harmonogramy realizacji projektów wymienionych w tabeli 1 wraz z zamkniętym już akceleratorem HERA w DESY.

Ze względnych przesunięć okresów budowy poszczególnych dużych urządzeń badawczych wynika, że helowe instalacje kriogeniczne będą w Europie budowane w sposób nieprzerwany w ciągu najbliższych kilku - kilkunastu lat. Mając na uwadze, że udział Polski w budżetach wymienionych urządzeń badawczych wynosi około 3 procent, potencjalne polskie dostawy do tych projektów mogłyby wynieść 450 mln euro, w tym wartość urządzeń kriogenicznych może być szacowana na około 25 mln euro.

Podsumowanie – budowy dużych urządzeń badawczych współczesnymi centrami transferu technologii

Wielki Zderzacz Hadronów LHC jest ogromnym wyzwaniem inżynierskim i technologicznym, wciąż nie zakończonym, który będzie podlegał ciągłej modyfikacji i o którym jeszcze dużo usłyszymy. Akcelerator ten jest najlepszym przykładem tego, że laboratoria badawcze takie jak CERN, GSI, DESY czy ITER prowadzą wielomiliardowe inwestycje wymagające zaawansowanych technologii i kompetencji typowych dla przedsiębiorstw z branż: chemicznych, energetycznych i pokrewnych. Laboratoria te, a w szczególności CERN, wytworzy-

ły nowy model współpracy z przemysłem europejskim, polegający na wspólnym rozwoju technologii (przez prototypy i badania), wdrażaniu produkcji w przedsiębiorstwach oraz uruchamianiu urządzeń w laboratoriach. Doświadczenia są następnie wykorzystywane w rozwoju nowych produktów na rynku związane przede wszystkim z energetyką (w tym jądrową). W ten sposób CERN, ITER i inne ośrodki stały się współczesnymi centrami rozwoju i transferu technologii, w których wychowały się całe pokolenia inżynierów i techników, również z Polski. Tak jak kiedyś budowy wciąż nas zadziwiających katedr gotyckich stanowiły miejsca zdobywania kompetencji przez całe pokolenia architektów, budowniczych i kamieniarzy, którzy następnie mogli spożytkować nabyte umiejętności na terenie całej ówczesnej Europy, tak dzisiaj właśnie te duże laboratoria badawcze przyczyniają się do spójności technologicznej kontynentu i ciągłego postępu cywilizacyjnego.

PODZIĘKOWANIA

Autor pragnie podziękować dyrektorowi dywizji AT w CERN, dr. Ph. Lebrun, oraz dyrektorowi Instytutu Problemów Jądrowych prof. G. Wrochnie za dyskusje i uwagi dotyczące dużych urządzeń badawczych budowanych w Europie.

Literatura:

1. M. Chorowski: Kriogenika – podstawy i zastosowania, Wyd. MA-STA, Gdańsk, 2007
2. L. Evans: LHC Accelerator Physics and Technology Challenges, PAC’99, New York (1999)
3. Ph. Lebrun: Superconductivity and Cryogenics for the Large Hadron Collider, CERN LHC Project Report – 441, Geneva 27. Oct. 2000.

