

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
Laboratory for Particle Physics

Departmental Report

CERN/AT 2007-30

**ADVANCED TECHNOLOGY FROM AND FOR BASIC SCIENCE:
SUPERCONDUCTIVITY AND SUPERFLUID HELIUM
AT THE LARGE HADRON COLLIDER**

**ZAAWANSOWANA TECHNOLOGIA Z I DLA NAUK PODSTAWOWYCH:
NADPRZEWODNICTWO I NADCIĘKŁY HEL
W AKCELERATORZE LARGE HADRON COLLIDER**

Philippe Lebrun
CERN, Geneva, Switzerland

Translated in Polish by Maciej Chorowski
Wrocław University of Technology

Inaugural Lecture of the Academic Year 2007-2008
Politechnika Wrocławska/Wrocław University of Technology
2 October 2007

ADVANCED TECHNOLOGY FROM AND FOR BASIC SCIENCE: SUPERCONDUCTIVITY AND SUPERFLUID HELIUM AT THE LARGE HADRON COLLIDER

Foreword

Having the privilege and honor of speaking in front of such an eminent audience, I must first express my deepest thanks to the Senate of the Wrocław University of Technology for distinguishing me in this manner, and providing this opportunity of presenting the object of my work and that of my colleagues at CERN over the past twenty years – half of my professional life. In the following, I will try and illustrate how superconductivity, superfluidity and particle accelerators, all products of early twentieth century discoveries, have moved forward over the years and joined their forces since the 1970s to sustain development towards very large engineering projects. This is exemplified by the largest scientific instrument ever built, the Large Hadron Collider (LHC), a 26.7 km circumference, high-energy proton and ion collider in construction at CERN to serve the world's physics community [1]. Upon its completion in 2008, the LHC will probe the structure of matter at the Terascale, i.e. that of the quarks and gluons constitutive of nucleons, and experimentally address fundamental questions such as the asymmetry between matter and antimatter, the nature of “dark matter” and “dark energy” which constitute 96 % of the mass-energy of the universe, or the unification of gravity with the other forces of nature. The LHC is also the largest application of superconductivity and superfluidity, with its 8310 superconducting magnets of all types, most of which are operated at 1.9 K in some 100 tons of superfluid helium. It is therefore useful to first describe how these disciplines evolved from the laboratory bench top to the industrial plant.

Superconductivity and superfluidity from the laboratory to the field

A century ago next year, H.K. Onnes succeeded in liquefying helium for the first time in his Leyden laboratory [2]. This was both an end and a beginning. It ended the long quest for the liquefaction of “non-condensable” gases, i.e. those with a critical temperature below room temperature which could therefore not be liquefied by simple compression. The equation of state for gases and liquids of J. van der Waals and his derived “law of corresponding states” had provided the theoretical framework to guide and inspire experimentalists [3]. L. Cailletet in Châtillon-sur-Seine and R. Pictet in Geneva independently obtained liquid oxygen mist in 1877, Z. Wroblewski and K. Olszewski in Cracow produced and kept liquid oxygen in 1883, J. Dewar in London invented the evacuated flask which bears his name and thus could liquefy hydrogen in 1898 [4]. H.K. Onnes had done his thesis work with J. van der Waals on the law of corresponding states and was thus well prepared to tackle the final challenge of helium liquefaction. He also realized that this endeavor would require a level of resources, organization and planning unprecedented in the research circles of the time, and therefore can be credited with the invention of “big science”.

The recurrent liquefaction of helium in significant quantities in Onnes' laboratory soon became a unique research tool which opened the way for the systematic study of condensed matter at low temperature, thus attracting many visiting scientists and prompting publication of the *Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden*. In this way H.K. Onnes also pioneered two essential features of modern science, internationalism and open communication. Superconductivity was discovered in mercury by H.K. Onnes and G. Holst in 1911, and the phase transition of liquid helium (helium II) by W.H. Keesom in 1928, still in Leyden. It is interesting to note that, although the investigation of electrical

properties of metals at low temperature which triggered the discovery of superconductivity was clearly a piece of basic science, H.K. Onnes immediately saw the potential of superconductors for making powerful magnets enabling to produce high field with no power dissipation. His views however could not materialize due to the low critical field of “soft” (type I) superconductors available at the time.

Seventy years ago, the superfluidity of helium II was discovered independently by J.F. Allen and A.D. Misener [5] in Cambridge and P. Kapitza [6] in Moscow, and later explained through a multiplicity of theoretical approaches by F. London (Bose-Einstein condensation), L. Tisza (two-fluid model) and L. Landau (quasiparticle description) [7]. While still today an important research topic in condensed matter physics, superfluid helium has also become a technical coolant following the pioneering work of G. Bon Mardion *et al.* [8] in Grenoble. It is used in high-field magnets for condensed-matter research and nuclear magnetic resonance studies, for magnetic confinement fusion in the Tore Supra tokamak, and for large particle accelerators such as the LHC [9]. It also cools RF acceleration cavities in linear accelerators for condensed-matter, nuclear and particle physics research.

Fifty years ago, J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer formulated the microscopic theory of superconductivity [10], an elegant application of quantum mechanics to the electron gas in metals in presence of interactions with phonons of the atomic lattice. Shortly after this theoretical breakthrough came an essential advance in practical superconductivity. In 1961, J.E. Kunzler *et al.* observed superconductivity at high field in Nb₃Sn, the first type-II superconductor [11]. Almost at the same time, J.K. Hulm and R.D. Blaugher, through a systematic study of the transition element alloys inspired by B.T. Matthias [12], discovered what was to become the workhorse of applied superconductivity for the following decades, namely Nb-Ti alloys with near 50 at.% Nb. It is interesting to note that type-II superconductors had been theoretically foreseen by A.A. Abrikosov as early as 1954, but the vortex lattice which renders them magnetically “hard” could only be observed a decade later [13]. Today, the LHC uses some 1250 tons of conductor made from 400 tons of Nb-Ti alloy, and even higher quantities are produced annually in industry to make superconducting magnets for magnetic resonance imaging in hospitals worldwide.

Twenty-one years ago, J.G. Bednorz and K.A. Müller discovered high-temperature superconductivity in compound copper oxides with a strongly anisotropic perovskite-like structure [14]. The consequences of this “revolution” are still developing today, with approaches to the understanding of these materials and progress in the preparation of technical conductors [15]. Applications begin to emerge in the electro-technical industry, for rotating machinery, superconducting power lines and fault-current limiters; the LHC uses 31 km of Bi-2223 high-Tc superconductor tape in the 1182 current leads which enable to power the superconducting magnet strings from the room-temperature power converters.

Thus while remaining important research topics *per se*, superconductivity and superfluidity have come out of the laboratory and developed over the years to become enabling technologies in engineering projects of industrial scale, particularly high-energy particle accelerators.

Particle accelerators from Lawrence & Livingston to LHC

The history of particle accelerators is a race towards high energies, as illustrated on the diagram first introduced by Livingston [16], showing a sustained quasi-exponential development in performance over the past 70 years. While the first circular accelerator, the cyclotron of E.O. Lawrence and M.S. Livingston (Berkeley 1930) fits in one hand, the footprint of modern machines compares with the size of a regional capital. In spite of this spectacular development in size, the increase in performance is even more impressive, thanks

to the opportune adoption of emerging concepts producing performance jumps above the saturating state-of-the-art. It is this mechanism which has permitted to contain the increase in size and cost of machines producing particle collisions with center-of-mass energies spanning twelve orders of magnitude.

Among these emerging technologies, superconductivity and its corollary helium cryogenics have rapidly become essential to high-energy accelerators over the last three decades [17]. For a given beam energy, the diameter of a circular hadron accelerator scales inversely with the field in the bending magnets: making the latter superconducting thus renders the machine more compact, allowing substantial savings in real estate and infrastructure. A hypothetical normal-conducting LHC with a magnet field of 1.8 T, limited by saturation of the iron yoke, would have been 100 km in circumference. Moreover, compactness has other virtues than lower capital cost: it also reduces the stored energy for a given beam current, an important issue in high-energy, high-luminosity machines. The nominal LHC beams will store an energy of 362 MJ – enough to melt half a ton of copper – thus requiring a very elaborate and reliable beam discharge and dump system. In a larger machine, this problem would be even more acute. Finally, superconductivity is also a means of reducing power consumption and thus operating costs of accelerators through two compounding processes, by enabling to make them smaller (the compactness argument above), and by reducing power per unit length of electromagnet: the power consumption of a superconducting synchrotron is essentially that of cryogenic refrigeration, which scales with the circumference of the machine irrespective of the field in the magnets. The hypothetical normal-conducting LHC mentioned earlier would require some 900 MW of electrical power, dissipated by Joule heating in the magnet coils, instead of the 40 MW used by the cryogenic refrigeration system of the superconducting machine [18].

The first superconducting magnets to be routinely operated in an accelerator were the eight quadrupoles of the high-luminosity insertion at the CERN ISR [19]. In prefiguration of the large projects to come, the magnets, designed in the laboratory, were built and assembled in their cryostats by industry. They used epoxy-impregnated coils of the “cos 2 θ ” type, wound with Nb-Ti wire. Housed in independent cryostats equipped with vapour-cooled current leads, they operated in saturated baths of liquid helium at 4.3 K, fed in closed-circuit from a dedicated helium liquefier.

The first fully superconducting accelerator was the Tevatron at Fermilab near Chicago [20]. This proton synchrotron with a circumference of 6.3 km comprises 774 superconducting dipoles and 216 superconducting quadrupoles, wound with Nb-Ti Rutherford-type cable, and operated in forced-flow supercritical helium at 4.4 K. The magnetic circuits are at room temperature outside the cryostat, which minimizes the cold mass, but requires a very stiff supporting system to keep the coil assembly centered in the yoke. This machine was later converted into a proton-antiproton collider and is still in operation, holding the world record of collision energy at 1.8 TeV in the center of mass.

Another superconducting synchrotron of comparable size is the 820 GeV proton ring of the electron-proton collider HERA at DESY, Hamburg [21]. Its 416 superconducting dipoles (with a field of 4.68 T) and 224 quadrupoles are also wound with Nb-Ti Rutherford-type cable and operated in forced-flow supercritical helium at 4.4 K. Unlike those of the Tevatron, the magnets of HERA have a close-fitting yoke inside the helium vessel of the cryostat. They were all produced by European industry.

The first high-energy accelerator cooled by superfluid helium is CEBAF at the Jefferson Laboratory, Newport News [22], an ensemble of two electron re-circulating linear accelerators using 318 superconducting acceleration cavities operating at 1.5 GHz in saturated helium at 2 K. The 4.8 kW refrigeration power needed at this temperature is entirely produced by a train of cold centrifugal compressors up to atmospheric pressure.

These pioneering projects, as well as the development work undertaken for the ill-fated Superconducting Supercollider (SSC) in the USA, provided a solid background and technical reference for the unprecedented superconducting magnet and superfluid helium systems of the LHC [23].

High-field superconducting magnets by the thousands

The main technological stake of the LHC is the development, industrialization and production of 1232 superconducting dipoles with a field of 8.3 T, 400 superconducting quadrupoles with a gradient of 223 T.m^{-1} , and several thousand other superconducting magnets for correcting main field errors, tuning beam parameters and bringing beams into collision at high luminosity [24]. All these magnets have been manufactured by industry and reproducibly produce field of the correct strength and uniformity with a precision of up to 10^{-4} .

The main dipoles feature twin apertures with equal and opposite fields in order to bend the two counter-rotating proton or ion beams along parallel paths. Two identical sets of coils are assembled in a common mechanical and magnetic structure, housed in a single cryostat. This solution is both compact in terms of transverse space occupancy and efficient, as the stray field of one aperture, channeled by the magnetic yoke, contributes to the field in the neighboring one. Overall, the yoke contributes 15 % to the total field. The coils in each aperture are wound with Rutherford-type Nb-Ti cable, in two layers with current density grading, following a “ $\cos \theta$ ” geometry. The enormous electromagnetic forces which tend to open the structure when the magnet is powered are reacted by stiff collars of non-magnetic austenitic steel, resting on the magnetic steel yoke. The whole assembly is contained in an austenitic stainless steel pressure vessel which acts as helium enclosure.

The decrease in critical current of superconductors as the magnetic field increases restricts their use for high-field applications. This strongly limits the use of the well known Nb-Ti alloys in normal boiling helium at 4.2 K. More advanced superconductors, such as Nb₃Sn were found inadequate in view of their difficult technological implementation, limited industrial availability and high cost. CERN therefore decided to base the LHC project on Nb-Ti operated in superfluid helium at 1.9 K. At this lower temperature, it exhibits sufficient current-carrying capacity to produce fields up to about 10 T. This technical choice, successfully implemented in the Tore Supra tokamak in Cadarache, is used for the first time in a large particle accelerator.

After a decade of development on models and prototypes in partnership with national institutes and industry, the fabrication was industrialized on a pre-series, and series contracts finally adjudicated to several companies on a “build-to-print” basis. To meet the demanding technical requirements, an exhaustive quality assurance program was established, based on thorough checks and tests at all stages of production, so as to intercept and correct non-conformities as early as possible in the production chain. Final verification of the production was performed through integral cold tests of complete magnets in their cryostats at CERN, in a dedicated test facility.

High-temperature superconductors at work

Powering the 1720 electrical circuits of the LHC magnets requires to bring currents ranging from 60 A to 13 kA from room temperature into the cryogenic environment. This is conventionally done by “current leads”, i.e. copper conductors cooled by escaping helium vapor which thus intercepts the largest fraction of the conductive and Joule heat loads before they reach the liquid helium bath. Still, the remaining heat in-leak – about 1.1 W.kA^{-1} for optimized current leads – would result in a prohibitively high load for the whole machine. The

emergence of practical wires and ribbons made of high-Tc superconductors has made it possible to design, test and validate their use in the lower section of current leads, where they reduce significantly the residual heat load. This technique yields an overall reduction of the refrigeration load by a factor three, thus saving several MW of refrigeration compressor power at the scale of the LHC project. The 1182 high-Tc current leads equipping the LHC were produced by industry and they have started to operate in the machine [25]. This project represents the largest high-current application of high-Tc superconductors to-date.

Superfluid helium as a cooling medium

The main reason for superfluid helium cooling of the LHC magnets is the lower temperature which extends the operating range of the Nb-Ti superconductor. However, the rapid drop in specific heat of the cable at low temperature also requires to take advantage of the very peculiar transport properties of superfluid helium for thermal stabilization, heat extraction from the magnet windings and heat transport to the cold source [26]. With its low viscosity, superfluid helium can permeate the windings and buffer thermal transients thanks to its high specific heat – 2000 times that of the conductor per unit volume. The excellent thermal conductivity of the fluid – peaking at 1000 times that of OFHC copper at 1.9 K for moderate heat flux – enables it to conduct heat without mass transport. In order to benefit from these unique properties, the electrical insulation of the cable must exhibit sufficient porosity and percolation, while preserving its main functions of mechanical resistance and dielectric strength. These conflicting requirements are met by a multilayer wrapping of polyimide film with partial overlap.

Thermal conductivity of superfluid helium remains finite, and thus insufficient to transport refrigeration power along a full LHC sector, the 3.3 km long stretch of tunnel cooled from one refrigerator. Moreover, in order to limit the thermodynamic penalty of operating at 1.9 K, the total temperature gradient allocated for this is only 0.1 K, so that refrigeration is produced at 1.8 K. The LHC magnets operate in static baths of pressurized superfluid helium close to atmospheric pressure. This high-conductivity mono-phase liquid is continuously cooled by heat exchange with saturated two-phase helium flowing in a heat exchanger tube extending over the length of the magnet string. The deposited heat is eventually absorbed quasi-isothermally by the latent heat of vaporization of the flowing helium. Other benefits of this cooling scheme are the absence of convective flow in normal operation and corresponding pumps, the limited transverse space it occupies in the magnet cross-section, the capacity to absorb magnet resistive transitions and to limit their propagation [27]. This unconventional cooling scheme was investigated and tested experimentally for flow stability and heat transfer limitations, and finally implemented in a prototype magnet string for final validation. It is now operating on several kilometers of the LHC circumference.

In view of the low saturation pressure of helium at 1.8 K, refrigeration by vapor compression at this temperature requires a pressure ratio of 80 to bring the helium back up to atmospheric pressure. To limit volume flow-rate and hence size of machinery, the large mass flow-rate in a high-power refrigerator must then be processed at its highest density, i.e. cold. This can only be done with contact-less, vane-less, non-lubricated compressors of the hydrodynamic type [28]. The LHC uses eight 1.8 K refrigeration units, each with a refrigeration power of 2.4 kW, based on multistage axial-centrifugal cold compressors operating at high rotational speed on active magnetic bearings. This technology was developed by specialized industry following CERN's specifications, and validated in the laboratory. It is now fully operational, with measured overall coefficient of performance below 950 (ratio of electrical power to cooling power at 1.8 K).

Conclusion

Superconductivity and helium cryogenics, about as old as particle accelerators, have become key enabling technologies of high-energy machines. Moreover, superfluid helium cooling has brought higher performance and economy by enhancing the properties of the superconductors and thus optimizing their use. Like accelerators of the previous generations, the Large Hadron Collider has both benefited from the development of these technologies and stimulated it, through R&D conducted with industry and national institutes as well as through the industrial-scale market it constituted in these domains. The LHC project has also represented an important training ground, with more than 50 doctoral theses, 120 diploma theses and 800 scientific papers on superconducting magnets and cryogenics over the past twenty years. The competencies and know-how developed at academic, technical and managerial levels can now migrate to new scientific projects based on these technologies.

References

- [1] O. Brüning, P. Collier, Ph. Lebrun, S. Myers, R. Ostojic, J. Poole, P. Proudlock ed., *LHC design report*, CERN-2004-003 (2004)
- [2] H.K. Onnes, *Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things to the preparation of liquid helium*, Nobel lecture (1913)
- [3] J. van der Waals, *The equation of state for gases and liquids*, Nobel lecture (1910)
- [4] K. Mendelssohn, *The quest for absolute zero*, World University Library, London (1966)
- [5] J.F. Allen & A.D. Misener, *Flow of liquid helium II*, Nature **141**, 75 (1938)
- [6] P. Kapitza, *Viscosity of liquid helium below the λ point*, Nature **141**, 74 (1938)
- [7] S. Balibar, *The discovery of superfluidity*, J. Low Temp. Phys. **146**, 441 (2007)
- [8] G. Bon Mardion, G. Claudet & J. C. Vallier, *Superfluid helium bath for superconducting magnets*, Proc. ICEC6, IPC Science & Technology Press, Guildford (1976)
- [9] R. Aymar & G. Claudet, *Tore Supra and He II cooling of large high-field magnets*, Adv. Cryo. Eng. **35A**, 55 (1990)
- [10] J. Bardeen, L.N. Cooper & J.R. Schrieffer, *Theory of superconductivity*, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957)
- [11] J.E. Kunzler, E. Buehler, F.S.L. Hsu & J.H. Wernick, *Superconductivity in Nb_3Sn at high current density in a magnetic field of 88 kgauss*, Phys. Rev. Letters **6**, 89 (1961)
- [12] J.K. Hulm & R.D. Blaugher, *Superconducting solid solution alloys of the transition elements*, Phys. Rev. **123**, 1569 (1961)
- [13] A.A. Abrikosov, *Type II superconductors and the vortex lattice*, Nobel lecture (2003)
- [14] J.G. Bednorz & K.A. Müller, *Possible high- T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system*, Z. Phys. B **64**, 189 (1986)
- [15] D. Larbalestier, A. Gurevich, M. Feldmann & A. Polyanskii, *High- T_c superconducting materials for electric power applications*, Nature **414**, 368 (2001)

- [16] M.S. Livingston, *High-energy accelerators*, Interscience Publishers Inc., New York (1954)
- [17] M. Wilson, *Superconductivity and accelerators: the good companions*, IEEE Trans. Appl. Superconductivity **9**, 111 (1999)
- [18] Ph. Lebrun, *Superconductivity and cryogenics for future high-energy accelerators*, invited plenary lecture at ICEC21, Prague, CERN-AT-2007-004 (2007)
- [19] J. Billan, K.N. Henrichsen, H. Laeger, Ph. Lebrun, R. Perin, S. Pichler, P. Pugin, L. Resegotti, P. Rohmig, T. Tortschanoff, A. Verdier, L. Walckiers, R. Wolf, *The eight superconducting quadrupoles for the ISR high-luminosity insertion*, Proc. 11th Int. Conf. on High-Energy Accelerators, Birkhäuser, Basel, 848 (1980)
- [20] H.T. Edwards, *The Tevatron energy doubler: a superconducting accelerator*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **35**, 605 (1985)
- [21] B.H. Wiik, *Progress with HERA*, IEEE Trans. Nucl. Sc. **NS-32**, 1587 (1985)
- [22] H.A. Grunder, J.J. Bisognano, W.I. Diamond, B.K. Hartline, C.W. Leemann, J. Mougey, R.M. Sundelin & R.C. York, *The Continuous Electron Beam Accelerator Facility*, Proc. IEEE PAC'87, 13 (1987)
- [23] Ph. Lebrun, *Industrial technology for unprecedented energy and luminosity: the Large Hadron Collider*, Proc. EPAC 2004 Lucerne, 6 (2004), JACoW web site
- [24] L. Rossi, *Experience with LHC magnets, from prototyping to large-scale industrial production*, Proc. EPAC 2004 Lucerne, 118 (2004), JACoW web site
- [25] A. Ballarino, *High-temperature superconducting current leads for the Large Hadron Collider*, IEEE Trans. Appl. Superconductivity **9**, 523 (1999)
- [26] Ph. Lebrun, *Cryogenics for the Large Hadron Collider*, IEEE Trans. Appl. Superconductivity **10**, 1500 (2000)
- [27] M. Chorowski, Ph. Lebrun, L. Serio & R. van Weelden, *Thermohydraulics of quenches and helium recovery in the LHC prototype magnet strings*, Cryogenics **38**, 533 (1998)
- [28] Ph. Lebrun & L. Taviani, *The technology of superfluid helium*, in Proc. CAS "Superconductivity and cryogenics for accelerators and detectors", CERN-2004-008, 375 (2004)

ZAAWANSOWANA TECHNOLOGIA Z I DLA NAUK PODSTAWOWYCH: NADPRZEWODNICTWO I NADCIEKŁY HEL W AKCELERATORZE LARGE HADRON COLLIDER

Wstęp

Mając przywilej i zaszczyt wystąpienia przed tak zaszczytnym gronem, chciałbym najpierw wyrazić moje podziękowania Senatowi Politechniki Wrocławskiej za wyróżnienie mnie w ten sposób i umożliwienie przedstawienia efektów pracy mojej i moich współpracowników z CERN z ponad dwudziestoletniego okresu, stanowiącego połowę mojej aktywności zawodowej. W moim wystąpieniu dokonam próby pokazania jak nadprzewodnictwo, nadciekłość oraz fizyka akceleratorów cząstek, wszystkie będące wynikami odkryć początku dwudziestego wieku, rozwijały się przez lata, aby połączyć swoje możliwości w latach siedemdziesiątych i umożliwić rozwój bardzo dużych projektów inżynierskich. Najlepszym przykładem tego połączenia jest największy naukowy instrument jaki kiedykolwiek zbudowano, akcelerator Large Hadron Collider będący kołowym zderzaczem wysokoenergetycznych protonów i jonów, o obwodzie 26,7 km, obecnie konstruowany w CERN, aby służyć światowej społeczności fizyków [1]. Po swoim uruchomieniu w roku 2008, LHC będzie zdolny do badania materii w tera-skali, tzn. skali kwarków i gluonów będących konstytuentami nukleonów, oraz eksperymentalnie odnieść się do fundamentalnych problemów takich jak brak równowagi pomiędzy materią i antymaterią, naturą „ciemnej materii” i „ciemnej energii” stanowiącej 96% energii i masy wszechświata, jak również unifikacji grawitacji z innymi siłami natury. Akcelerator LHC ze swoimi 8310 nadprzewodzącymi magnesami, z których większość utrzymywana jest w temperaturze 1,9 K dzięki ponad 100 tonom nadciekłego helu, jest również największą dotychczasową aplikacją nadprzewodnictwa i nadciekłości. Jest wszelako użyteczne najpierw opisać jak te dyscypliny ewoluowały ze stołów laboratoryjnych na szczyty zastosowań przemysłowych.

Droga nadprzewodnictwa i nadciekłości z laboratoriów do zastosowań

W przyszłym roku mija stulecie odkąd H. Kamerlingh-Onnes z sukcesem skroplił hel w swoim laboratorium w Lejdzie [2]. Oznaczało to zarówno zakończenie jak i rozpoczęcie pewnych etapów. Ukończone zostały długotrwałe wysiłki zmierzające do skroplenia gazów uważanych za trwałe, tzn. takich, których temperatury krytyczne są niższe od temperatury otoczenia i które nie mogą zostać skroplone przez ich sprężenie. Podstawy teoretyczne skraplania takich gazów, będące inspiracją dla eksperymentatorów, wynikały z równania stanu J. van der Waalsa oraz wynikającej z niego zasady stanów odpowiadających sobie [3]. L. Cailletet w Châtillon-sur-Seine oraz R. Pictet w Genewie niezależnie od siebie uzyskali mgłą tlenu w roku 1877, Z. Wróblewski i K. Olszewski w Krakowie wytworzyli i zdołali przechowywać ciekły tlen w roku 1883, J. Dewar w Londynie wynalazł naczynie próżniowe, dziś noszące jego imię, i dzięki temu mógł skroplić wodór w roku 1898 [4].

H. Kamerlingh-Onnes w swojej rozprawie opracowanej we współpracy z J. van der Waalsem rozważał prawo stanów odpowiadających sobie i był dobrze przygotowany teoretycznie, aby zmierzyć się z końcowym wyzwaniem jakim było skroplenie helu. Zdawał sobie również sprawę z tego, że to zadanie będzie wymagało takiego poziomu organizacji eksperymentu, zasobów i planowania, które były bez precedensu w ośrodkach badawczych tamtego okresu i stąd może być uznany za prekursora prac naukowych o dużej skali i inicjatora „dużej nauki”. Hel skraplany w znaczących ilościach w laboratorium Onnesa szybko stał się unikalnym narzędziem umożliwiającym rozpoczęcie systematycznych badań skondensowanej materii w niskich temperaturach, rozpoczęto wydawanie *Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden*, a laboratorium w Lejdzie stało się celem wizyt wielu naukowców. W ten sposób H. Kamerlingh-Onnes wprowadził nowoczesny styl prowadzenia badań

naukowych charakteryzujący się umiędzynarodowieniem i swobodną wymianą informacji. Nadprzewodnictwo rtęci zostało odkryte w roku 1911 przez H. Kamerlingh-Onnesa oraz G. Holsta, natomiast w roku 1928 W.H. Keesom stwierdził przejście fazowe w ciekłym helu (hel II) - odkrycia te dokonane zostały w laboratorium w Lejdzie. Jest rzeczą interesującą, że chociaż własności elektryczne metali w niskich temperaturach, których badanie spowodowało odkrycie nadprzewodnictwa, leżały ówczynie w obszarze badań podstawowych, to H. Kamerlingh-Onnes natychmiast dojrzał możliwości wykorzystania nadprzewodników do budowy silnych magnesów, które będą wytwarzały wysokie pola magnetyczne bez rozpraszania mocy. Jego wizje nie mogły się jednakże zmaterializować ze względu na niskie pola krytyczne osiągalnych ówczynie „miękkich” (należących do I typu) nadprzewodników.

Przed siedemdziesięcioma laty J.F. Allen i A.D. Misener w Cambridge [5] oraz P. Kapica w Moskwie [6] odkryli niezależnie od siebie nadciekłość w helu II, zjawisko to zostało następnie wyjaśnione w oparciu o różnorodne teoretyczne założenia przez F. Londona (kondensat Bosego-Einsteina), L. Tiszę (model dwu-płynowy) i L. Landaua (opis quasicząstkowy) [7]. Chociaż nadciekły hel stanowi ciągle ważny przedmiot badań w dziedzinie fizyki materii skondensowanej, substancja stała się wykorzystywaną technicznie cieczą chłodzącą dzięki pionierskim pracom G. Bon Mardiona i jego współpracowników z Grenoble [8]. Jest wykorzystywana w wysoko-polowych magnesach służących do badań materii skondensowanej oraz w jądrowym rezonansie magnetycznym, w magnetycznej pułapce umożliwiającej reakcje fuzji w tokamaku Tore Supra i w dużych akceleratorach cząstek takich jak LHC [9]. Nadciekły hel chłodzi również wnęki rezonansowe w liniowych akceleratorach służących badaniom materii skondensowanej oraz wykorzystywanych w fizyce jądrowej i fizyce cząstek.

Przed pięćdziesięcioma laty J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer sformułowali mikroskopową teorię nadprzewodnictwa [10], będącą eleganckim zastosowaniem mechaniki kwantowej w odniesieniu do gazu elektronowego w metalu w obecności oddziaływań z fononami sieci krystalicznej. Wkrótce po tym teoretycznym przełomie nastąpił istotny postęp w praktycznym wykorzystaniu nadprzewodnictwa. W roku 1961 J.E. Kunzler i jego współpracownicy zaobserwowali nadprzewodnictwo przy wysokich polach magnetycznych w związku Nb_3Sn , będącym pierwszym nadprzewodnikiem typu II [11]. Prawie równocześnie J.K. Hulm i R.D. Blaugher, zainspirowani przez prace B.T. Matthiasa [12], dzięki systematycznym studiom stopów pierwiastków przejściowych odkryli materiał, który miał stać się podstawowym narzędziem nadprzewodnictwa stosowanego w następnych dekadach, czyli stop Nb-Ti o zawartości Nb bliskiej 50% atomowo. Jest rzeczą interesującą, że nadprzewodniki II typu zostały teoretycznie przewidziane przez A. A. Abrikosova już w roku 1954, ale dopiero po dziesięciu latach możliwe stało się zaobserwowanie sieci wirów „utwardzających” magnetycznie te substancje [13]. Dzisiaj w akceleratorze LHC wykorzystuje się około 1250 ton przewodów, do których wykonania zużyto 400 ton stopu Nb-Ti, a jeszcze większe ilości są wytwarzane rocznie przez przemysł na potrzeby nadprzewodzących magnesów stosowanych w obrazowaniu rezonansem magnetycznym w szpitalach na całym świecie.

Dwadzieścia jeden lat temu J.G. Bednorz oraz K.A. Müller odkryli nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe w złożonych tlenkach miedzi o silnie anizotropowej strukturze przypominającej perowskit [14]. Owoce tego rewolucyjnego odkrycia podlegają ciągłemu rozwojowi, zarówno pod względem zrozumienia własności tych materiałów jak i postępu w wytwarzaniu przewodników o znaczeniu praktycznym [15]. Zaczęły się pojawiać zastosowania w przemyśle elektromaszynowym, maszynach wirujących, nadprzewodzących liniach energetycznych i ogranicznikach prądu. Akcelerator LHC wykorzystuje 31 km taśmy wykonanej z wysokotemperaturowego nadprzewodnika Bi-2223 w 1182 doprowadzeniach prądowych, umożliwiających zasilanie ciągów magnesów nadprzewodzących z przetwornic mocy pracujących w temperaturze pokojowej.

Tak więc, nadal pozostając ważnym przedmiotem badań same w sobie, nadprzewodnictwo i nadciekłość wyszły z laboratoriów badawczych i przez lata rozwinęły się w technologie umożliwiające inżynierską realizację projektów badawczych o przemysłowej skali, szczególnie budowę wysokoenergetycznych akceleratorów cząstek.

Od akceleratorów cząstek Lawrence'a i Livingstona do LHC

Historia akceleratorów cząstek jest wyścigiem w kierunku coraz to wyższych energii, co trafnie ilustruje wykres po raz pierwszy zaproponowany przez Livingstona [16], pokazujący stały, bliski wykładniczemu rozwój parametrów tych urządzeń na przestrzeni ostatnich 70 lat. Podczas gdy pierwszy kołowy akcelerator, cyklotron wykonany przez E.O. Lawrence'a i M.S. Livingstona (Berkeley 1930) mieścił się w jednej dłoni, rozmiar współczesnych maszyn jest porównywalny z obszarem średniego miasta. Obok spektakularnego wzrostu rozmiaru akceleratorów, poprawa ich parametrów czyni jeszcze większe wrażenie, co było możliwe dzięki udanym wyborom nowatorskich idei umożliwiających skokowy rozwój, po osiągnięciu kresu możliwości najlepszych dotychczasowych konstrukcji. W ten sposób możliwe stało się utrzymanie rosnących rozmiarów i kosztów akceleratorów w rozsądnych granicach, przy równoczesnym wzroście energii w centrum mas zderzanych cząstek o dwanaście rzędów wielkości.

Wśród tych nowatorskich technologii nadprzewodnictwo i nieodłączna od niego kriogenika helowa szybko nabrały krytycznego znaczenia dla akceleratorów wysokich energii budowanych w ostatnich trzydziestu latach [17]. Dla zadanej energii wiązki, średnica kołowego akceleratora hadronów jest odwrotnie proporcjonalna do pola magnesów odchylających, stąd zastosowanie w nich nadprzewodnictwa czyni maszynę bardziej kompaktową i umożliwia istotne oszczędności terenu oraz niezbędnej infrastruktury. Gdyby w akceleratorze LHC zastosowano klasyczne elektromagnesy o polu 1,8 T, wynikającym z magnetycznego nasycenia żelaznego rdzenia, jego obwód wyniósłby 100 km zamiast 26,7 km. Ponadto zmniejszenie rozmiaru ma inne zalety poza redukcją nakładów kapitałowych: ogranicza ono również sumaryczną energię wiązki przy zadanym jej prądzie, co jest ważnym czynnikiem w maszynach o wysokich energiach i świetlnościach. Nominalne wiązki przyspieszone w akceleratorze LHC będą magazynować energię wynoszącą 362 MJ – wystarczającą do stopienia pół tony miedzi, tak więc wymagającą bardzo dopracowanych i niezawodnych systemów rozładowywania i tłumienia wiązki. W większej maszynie ten problem byłby jeszcze bardziej istotny.

W końcu nadprzewodnictwo umożliwia również ograniczenie zużycia mocy i przez to kosztów działania akceleratorów w dwojaki sposób: poprzez redukcję ich rozmiarów (jak to napisano powyżej) oraz poprzez zmniejszenie pobieranej mocy przypadającej na jednostkę długości akceleratora. Zużycie mocy przez nadprzewodzący synchrotron wynika przede wszystkim z kriogenicznego chłodzenia i skaluje się z obwodem maszyny bez względu na wytwarzane pole magnetyczne. W akceleratorze LHC wykonanym przy użyciu klasycznych magnesów pobór mocy elektrycznej wyniósłby około 900 MW rozpraszanym w ciepło Joule'a w cewkach elektromagnesów, w przeciwieństwie do 40 MW zużywanych przez system kriogeniczny akceleratora wykorzystującym magnesy nadprzewodzące [18].

Pierwszymi rutynowo zastosowanymi nadprzewodzącymi magnesami w akceleratorach było osiem kwadrupoli w segmencie akceleratora CERN ISR charakteryzującym się wysoką świetlnością wiązki [19]. W przewidywaniu nadejścia dużych projektów magnesy, mimo że zostały zaprojektowane w laboratorium, zostały wykonane i zamontowane w kriostatach w warunkach przemysłowych. W magnesach tych zastosowano impregnowane żywicą cewki typu „cos 2 θ ”, nawinięte z drutu Nb-Ti. Umieszczone w niezależnych kriostatach wypełnionych helem w stanie nasycenia, wyposażone w chłodzone parami helu doprowadzenia prądu, magnesy były utrzymywane w temperaturze 4,3 K, zaś zasilanie

magnesów helum odbywało się w układzie zamkniętym z przeznaczonej do tego celu skraplarki helu.

Pierwszym w pełni nadprzewodzącym akceleratorem był Tevatron zbudowany w Fermilab w pobliżu Chicago [20]. Ten przyspieszający protony synchrotron o obwodzie wynoszącym 6,3 km zawiera 774 nadprzewodzące magnesy dipolowe i 216 magnesów kwadrupolowych o cewkach nawiniętych z kabla typu Rutherforda wykonanego ze stopu Nb-Ti i utrzymywanych w temperaturze 4,4 K dzięki wymuszonemu przepływowi nadkrytycznego helu. Obwody magnetyczne są utrzymywane w temperaturze otoczenia poza kriostatami, co minimalizuje masę, która musi pozostawać w niskiej temperaturze, ale wymaga bardzo sztywnego systemu podparć, aby cewki pozostawały stale w centrum rdzenia magnetycznego. Ten akcelerator został następnie przekształcony w zderzacz protonów i antyprotonów, jest w dalszym ciągu użytkowany i do niego nadal należy światowy rekord energii zderzeń wynoszący 1,8 TeV w centrum masy zderzających się cząstek.

Innym nadprzewodzącym synchrotronem o porównywalnej skali jest protonowy pierścień o energii cząstek 820 GeV będący częścią zderzacza elektronów i protonów HERA w DESY w Hamburgu [21]. Cewki jego 416 nadprzewodzących dipoli o polu 4,68 T oraz 224 kwadrupoli są również nawinięte z kabla Rutherforda wykorzystującego stop Nb-Ti i utrzymywane w temperaturze 4,4 K poprzez wymuszony przepływ przez kriostaty nadkrytycznego helu. W przeciwieństwie do magnesów akceleratora Tevatron, magnesy HERA mają ściśle dopasowane rdzenie magnetyczne umieszczone w naczyniach helowych kriostatów. Wszystkie zostały wytworzone przez europejski przemysł.

Pierwszym akceleratorem o wysokiej energii chłodzonym nadkrytycznym helum jest CEBAF w Jefferson Laboratory w Newport News [22], stanowiący zespół dwóch liniowych recyrkulujących akceleratorów wykorzystujących 318 nadprzewodzących wnek rezonansowych działających przy częstotliwości 1,5 GHz i umieszczonych w nasyconym nadkrytycznym helum o temperaturze 2 K. Wynosząca 4,8 kW moc chłodnicza konieczna do utrzymywania akceleratora w tej temperaturze jest w całości wytwarzana przez szereg odśrodkowych kompresorów sprężających parę helu aż do ciśnienia atmosferycznego.

Te pionierskie projekty jak również prace badawcze wykonane na rzecz pechowego akceleratora Superconducting Supercollider (SSC) w Stanach Zjednoczonych zapewniły solidne podstawy i niezbędne doświadczenie techniczne dla budowy bezprecedensowych pod względem skali nadprzewodzących i nadkrytycznych systemów akceleratora LHC [23].

Wysokopolowe nadprzewodzące magnesy liczone w tysiącach

Głównym technologicznym wyzwaniem o dużym ryzyku akceleratora LHC był rozwój, industrializacja i wyprodukowanie 1232 nadprzewodzących dipoli o polu 8,3 T, 400 nadprzewodzących kwadrupoli o gradiencie $223 \text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$ oraz kilku tysięcy innych nadprzewodzących magnesów pozwalających na korektę błędów pola, dostrojenie parametrów wiązki i doprowadzenie do zderzenia wiązek przy dużej świetlności [24]. Wszystkie te magnesy zostały wytworzone przemysłowo i w sposób powtarzalny pozwalają na osiągnięcie pól magnetycznych o pożądanym natężeniu i jednorodności z precyzją dochodzącą do 10^{-4} .

Główne magnesy dipolowe charakteryzują dwie bliźniacze apertury z jednakowymi, ale przeciwnie skierowanymi, polami magnetycznymi, pozwalającymi na odchylenie dwóch równoległych, przeciwbieżnych wiązek protonów lub jonów. Dwa identyczne zestawy cewek tworzą wspólną mechaniczną i magnetyczną strukturę, umieszczoną w pojedynczym kriostacie. Takie rozwiązanie jest zarówno korzystne pod względem przestrzennym ze względu na niewielkie rozmiary poprzeczne akceleratora jak i jego efektywności, jako że

resztkowe pole z jednej apertury, ukierunkowane przez jarzmo magnesu, wspomaga pole odchylające sąsiednią wiązkę - w sumie jarzmo zwiększa pole o 15%. Ponadto dzięki otoczeniu apertur przez jarzmo całkowite pole wzrasta o 15%. Dwuwarstwowe cewki w obu aperturach są nawinięte z kabla typu Rutherforda wykonanego ze stopu Nb-Ti, z gradientem gęstości prądu wynikającym z geometrii "cos θ ". Reakcją na olbrzymie siły elektromagnetyczne, które mogłyby spowodować rozerwanie struktury magnesu w trakcie jego pracy, są naprężenia mechaniczne występujące w sztywnych kołnierzach obejmujących cewki i wykonanych z niemagnetycznej stali nierdzewnej. Cały zmontowany magnes jest umieszczony naczyniu ciśnieniowym wykonanym ze stali nierdzewnej służącym jednocześnie jako zbiornik helu.

Spadek prądu krytycznego nadprzewodników towarzyszący wzrostowi pola magnetycznego ogranicza ich zastosowania w wysokich polach magnetycznych, w szczególności nie pozwala na użycie dobrze znanych stopów Nb-Ti kriostatowanych hellem wrzącym pod ciśnieniem normalnym w temperaturze 4,2 K. Jednocześnie nadprzewodniki o lepszych własnościach, takie jak Nb₃Sn, stwarzają trudności technologiczne, nie są dostępne w ilościach przemysłowych i są bardzo kosztowne. Stąd w CERN podjęto decyzję, aby w akceleratorze LHC zastosować nadprzewodnik Nb-Ti, ale chłodzony nadciekłym hellem w temperaturze 1,9 K. Przy tak niskiej temperaturze stop ten charakteryzuje się gęstością prądu w stanie nadprzewodzącym wystarczającą do osiągnięcia pól magnetycznych dochodzących do 10 T. Takie rozwiązanie techniczne, z sukcesem wprowadzone w tokamaku Tore Supra w Cadarache, jest zastosowane po raz pierwszy w dużym akceleratorze cząstek.

Po dziesięcioleciu prac rozwojowych związanych z budową modeli i prototypów magnesów, prowadzonych we współpracy z narodowymi instytutami i firmami przemysłowymi, możliwe stało się wytwarzanie magnesów w warunkach przemysłowych i zlecenie kilku firmom ich produkcji wg dokumentacji technicznej dostarczonej przez CERN. Aby zapewnić spełnienie wszystkich wymagań technicznych, wdrożony został pełny program kontroli jakości produkcji, zakładający szczegółowe testy i pomiary wykonywane we wszystkich fazach produkcji, tak aby stwierdzić i skorygować niezgodności w możliwie wczesnej fazie wytwarzania magnesu. Ostateczna weryfikacja jakości magnesów polegała na pomiarach ich parametrów po umieszczeniu w kriostatach i wychłodzeniu na specjalnym stanowisku badawczym zbudowanym w CERN.

Zastosowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych

Zasilenie 1720 obwodów elektrycznych magnesów akceleratora LHC wymaga doprowadzenia prądu o natężeniu wynoszącym od 60 A do 13 kA od temperatury otoczenia do obszarów kriogenicznych. W konwencjonalnych rozwiązaniach stosuje się tzw. „doprowadzenia prądowe” będące miedzianymi szynami chłodzonymi przez opuszczające kriostat pary helu, które w ten sposób odbierają większość ciepła przewodzonego i ciepła Joule’a, zanim ciepło to zostałoby rozproszone w ciekłym helu. Niemniej jednak pewne resztkowe ciepło wynoszące w przypadku zoptymalizowanych doprowadzeń prądowych około 1,1 W/kA w dalszym ciągu dopływa do helu, i w przypadku LHC powodowałoby niedopuszczalne obciążenie cieplne całej maszyny. Pojawienie się dopracowanych technicznie drutów i taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych umożliwiło zaprojektowanie, przetestowanie i ostateczne zweryfikowanie możliwości ich zastosowania w dolnych partiach doprowadzeń prądowych, gdzie dzięki temu uzyskano istotną redukcję rezydualnych dopływów ciepła. Dzięki zastosowaniu tej technologii osiągnięto trzykrotne zmniejszenie dopływów ciepła przez doprowadzenia prądowe, obniżając moc napędową kompresorów chłodziarek kriogenicznych o kilka MW w skali całego LHC. Łącznie 1182 doprowadzeń prądowych zostało wykonanych przez przemysł i zamontowanych w maszynie [25]. Jest to największe dotychczasowe zastosowanie wysokoprądowych przewodów wykonanych z nadprzewodników wysokotemperaturowych.

Nadciekły hel jako czynnik chłodzący

Podstawowym powodem zastosowania do chłodzenia akceleratora LHC nadciekłego helu jest jego niższa temperatura rozszerzająca zakres pracy nadprzewodnika Nb-Ti. Niemniej jednak gwałtowny spadek pojemności cieplnej kabla przy tej temperaturze wymaga aby wykorzystać bardzo specyficzne własności transportowe nadciekłego helu dla stabilizacji termicznej, odbioru ciepła od uzwojeń magnesów i jego transportu do niskotemperaturowego źródła ciepła [26]. Charakteryzujący się znikomą lepkością nadciekły hel może przenikać przez uzwojenia i buforować wahania cieplne dzięki wysokiej pojemności cieplnej – objętościowo 2000 razy większej od pojemności cieplnej przewodnika. Doskonała przewodność cieplna tego płynu – przekraczająca 1000 razy przewodność czystej miedzi w temperaturze 1,9 K i przy umiarkowanych strumieniach ciepła – umożliwi transport ciepła bez transportu masy. Aby w pełni wykorzystać te unikalne własności nadciekłego helu, elektryczna izolacja kabla musi wykazywać wystarczającą porowatość i przenikalność przy zachowaniu odporności mechanicznej i wytrzymałości dielektrycznej. Spełnienie tych sprzecznych warunków osiągnięto przez nawinięcie kilku warstw poliamidu częściowo na siebie nachodzących.

Przewodność cieplna nadciekłego helu chociaż bardzo duża, to pozostaje skończona i jest niewystarczająca do transportu mocy chłodniczej wzdłuż całego sektora akceleratora LHC umieszczonego w odcinku tunelu o długości 3,3 km i zasilanego helem z pojedynczej chłodziarki. Ponadto aby ograniczyć termodynamiczny koszt kriostatowania magnesów, dopuszczalny całkowity gradient temperatury wynosi jedynie 0,1 K, tak że moc chłodnicza jest wytwarzana przy temperaturze 1,8 K. Magnesy akceleratora LHC są umieszczone w kriostatach wypełnionych statycznym nadciekłym helem znajdującym się pod ciśnieniem bliskim ciśnieniu otoczenia. Ta jednofazowa ciecz o wysokiej przewodności cieplnej jest w sposób ciągły dochładzana dzięki wymianie ciepła z dwufazowym nadciekłym helem znajdującym się w stanie nasycenia i przepływającym przez wymiennik ciepła rozciągający się wzdłuż całego szeregu magnesów. Dopływające ciepło jest pochłaniane w warunkach prawie izotermicznych dzięki odparowaniu helu przepływającego przez wymiennik ciepła. Innymi zaletami zastosowanego systemu chłodzenia magnesów jest nieobecność konwekcyjnego przepływu helu w trakcie normalnej pracy magnesów i brak pomp, ograniczony przekrój poprzeczny kriostatów, zdolność do absorpcji ciepła wydzielanego w trakcie przejścia rezystywnego magnesów i ograniczenie skali propagacji tego zjawiska [27]. Ten niekonwencjonalny schemat chłodzenia był badany i przetestowany eksperymentalnie pod względem stabilności przepływu dwufazowego nadciekłego helu i ograniczeń w wymianie ciepła oraz zastosowany w prototypowych szeregach magnesów w celu ostatecznej walidacji. Obecnie działa skutecznie na długości kilku kilometrów, gdzie już nastąpiło schłodzenie magnesów LHC.

Ze względu na niskie ciśnienie nasycenia helu w temperaturze 1,8 K, jego odparowanie wymaga następnie 80-krotnego podniesienia ciśnienia par, aby osiągnąć ciśnienie atmosferyczne. Aby ograniczyć objętościowy przepływ par helu przez kompresory i w ten sposób uniknąć bardzo dużych urządzeń, duży przepływ masowy par helu powinien być realizowany przy możliwie dużej ich gęstości a więc przy niskiej temperaturze. Może być to zrealizowane jedynie przy użyciu bezkontaktowych, bezłopatkowych i wolnych od smarów, hydrodynamicznych kompresorów [28]. LHC wykorzystuje osiem jednostek chłodniczych zapewniających temperaturę 1,8 K i o mocy 2,4 kW każda, których podstawę stanowią osiowe kompresory o dużych prędkościach obrotowych i wyposażonych w aktywne łożyska magnetyczne. Ta technologia została rozwinięta przez specjalistyczny przemysł w oparciu o przygotowane w CERN techniczne specyfikacje, a następnie przetestowana w laboratorium. Obecnie jest w pełni działająca, a zmierzony całkowity współczynnik sprawności będący stosunkiem mocy elektrycznej do mocy chłodniczej w temperaturze 1,8 K, jest niższy od 950.

Podsumowanie

Nadprzewodnictwo i kriogenika helowa, pochodzące z podobnego okresu co akceleratory cząstek, stały się kluczowymi technologiami umożliwiającymi rozwój maszyn o wysokich energiach. Ponadto zastosowanie nadciekłego helu przyniosło wzrost parametrów i poprawę ekonomii akceleratorów przez pełniejsze wykorzystanie własności nadprzewodników i przez to optymalizację maszyn. Podobnie jak akceleratory poprzednich generacji, Large Hadron Collider był zarówno beneficjentem rozwoju tych technologii jak przyczynił się do ich wzrostu poprzez prace badawczo-rozwojowe wykonywane razem z przemysłem i narodowymi instytucjami, jak również dzięki wytworzeniu na te technologie rynku o skali przemysłowej. Budowa akceleratora LHC stanowiła również istotne pole edukacyjne z więcej niż 50 rozprawami doktorskimi, 120 pracami dyplomowymi i ponad 800 pracami naukowymi dotyczącymi nadprzewodzących magnesów i kriogeniki, napisanymi w okresie ostatnich 20 lat. Te kompetencje oraz know-how rozwinięte w nauce, technice i zarządzaniu mogą teraz być przenoszone do nowych naukowych projektów opartych na tych technologiach.

Referencje

- [1] O. Brüning, P. Collier, Ph. Lebrun, S. Myers, R. Ostojic, J. Poole, P. Proudlock ed., *LHC design report*, CERN-2004-003 (2004)
- [2] H.K. Onnes, *Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things to the preparation of liquid helium*, Nobel lecture (1913)
- [3] J. van der Waals, *The equation of state for gases and liquids*, Nobel lecture (1910)
- [4] K. Mendelssohn, *The quest for absolute zero*, World University Library, London (1966)
- [5] J.F. Allen & A.D. Misener, *Flow of liquid helium II*, Nature **141**, 75 (1938)
- [6] P. Kapitza, *Viscosity of liquid helium below the λ point*, Nature **141**, 74 (1938)
- [7] S. Balibar, *The discovery of superfluidity*, J. Low Temp. Phys. **146**, 441 (2007)
- [8] G. Bon Mardion, G. Claudet & J. C. Vallier, *Superfluid helium bath for superconducting magnets*, Proc. ICEC6, IPC Science & Technology Press, Guildford (1976)
- [9] R. Aymar & G. Claudet, *Tore Supra and He II cooling of large high-field magnets*, Adv. Cryo. Eng. **35A**, 55 (1990)
- [10] J. Bardeen, L.N. Cooper & J.R. Schrieffer, *Theory of superconductivity*, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957)
- [11] J.E. Kunzler, E. Buehler, F.S.L. Hsu & J.H. Wernick, *Superconductivity in Nb_3Sn at high current density in a magnetic field of 88 kgauss*, Phys. Rev. Letters **6**, 89 (1961)
- [12] J.K. Hulm & R.D. Blaugher, *Superconducting solid solution alloys of the transition elements*, Phys. Rev. **123**, 1569 (1961)
- [13] A.A. Abrikosov, *Type II superconductors and the vortex lattice*, Nobel lecture (2003)
- [14] J.G. Bednorz & K.A. Müller, *Possible high- T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system*, Z. Phys. B **64**, 189 (1986)

- [15] D. Larbalestier, A. Gurevich, M. Feldmann & A. Polyanskii, *High-Tc superconducting materials for electric power applications*, Nature **414**, 368 (2001)
- [16] M.S. Livingston, *High-energy accelerators*, Interscience Publishers Inc., New York (1954)
- [17] M. Wilson, *Superconductivity and accelerators: the good companions*, IEEE Trans. Appl. Superconductivity **9**, 111 (1999)
- [18] Ph. Lebrun, *Superconductivity and cryogenics for future high-energy accelerators*, invited plenary lecture at ICEC21, Prague, CERN-AT-2007-004 (2007)
- [19] J. Billan, K.N. Henrichsen, H. Laeger, Ph. Lebrun, R. Perin, S. Pichler, P. Pugin, L. Resegotti, P. Rohmig, T. Tortschanoff, A. Verdier, L. Walckiers, R. Wolf, *The eight superconducting quadrupoles for the ISR high-luminosity insertion*, Proc. 11th Int. Conf. on High-Energy Accelerators, Birkhäuser, Basel, 848 (1980)
- [20] H.T. Edwards, *The Tevatron energy doubler: a superconducting accelerator*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **35**, 605 (1985)
- [21] B.H. Wiik, *Progress with HERA*, IEEE Trans. Nucl. Sc. **NS-32**, 1587 (1985)
- [22] H.A. Grunder, J.J. Bisognano, W.I. Diamond, B.K. Hartline, C.W. Leemann, J. Mougey, R.M. Sundelin & R.C. York, *The Continuous Electron Beam Accelerator Facility*, Proc. IEEE PAC'87, 13 (1987)
- [23] Ph. Lebrun, *Industrial technology for unprecedented energy and luminosity: the Large Hadron Collider*, Proc. EPAC 2004 Lucerne, 6 (2004), JACoW web site
- [24] L. Rossi, *Experience with LHC magnets, from prototyping to large-scale industrial production*, Proc. EPAC 2004 Lucerne, 118 (2004), JACoW web site
- [25] A. Ballarino, *High-temperature superconducting current leads for the Large Hadron Collider*, IEEE Trans. Appl. Superconductivity **9**, 523 (1999)
- [26] Ph. Lebrun, *Cryogenics for the Large Hadron Collider*, IEEE Trans. Appl. Superconductivity **10**, 1500 (2000)
- [27] M. Chorowski, Ph. Lebrun, L. Serio & R. van Weelden, *Thermohydraulics of quenches and helium recovery in the LHC prototype magnet strings*, Cryogenics **38**, 533 (1998)
- [28] Ph. Lebrun & L. Taviani, *The technology of superfluid helium*, in Proc. CAS "Superconductivity and cryogenics for accelerators and detectors", CERN-2004-008, 375 (2004)