

## INDUSTRIAL ROBOTS

# High-tech guardians: Robotics at the heart of the Future Circular Collider

Hannes Gamper<sup>1\*</sup>, Andreas Mueller<sup>2</sup>, Mario Di Castro<sup>1</sup>

A holistic robotic concept for inspection, maintenance, and emergency interventions for the Future Circular Collider is presented.

Since its inception in 1954, the European Organization for Nuclear Research (CERN) has been a leading institution in the field of particle physics, making substantial contributions to the completion of the Standard Model of particle physics. The organization's consecutive particle accelerators—the Proton Synchrotron (PS), the Super Proton Synchrotron (SPS), and the Large Hadron Collider (LHC)—have played a crucial role in this success. These accelerators have increased center-of-mass collision energies from 50 GeV to 900 GeV to 14 TeV, with a corresponding increase in circumference from 628 m to 6.9 km to 27 km, and have led to the award of the Nobel Prize in 1979 (PS), 1984 (SPS), and 2013 (LHC). The discovery of the Higgs boson in 2013 completed the most precise model of our universe so far, the Standard Model of particle physics.

Despite its success, the Standard Model is still unable to explain certain phenomena such as dark matter, the excess of matter over antimatter, and the mass of neutrinos. This suggests that there must be concepts beyond the Standard Model that are yet to be found. One possibility for uncovering this unknown physics is through the study of particles with masses above 14 TeV, which cannot be produced by current machines at CERN. To access these high-energy ranges, it has been proposed that there is a need for an even bigger particle accelerator with a collision energy of 100 TeV and a circumference of 91 km, called the Future Circular Collider (FCC) (1, 2). To ensure the required availability of a machine at that scale, the proportion of days during which the machine can deliver data, it is necessary to integrate a holistic robotic concept for automated inspection and maintenance interventions.

Figure 1A shows the geographical location of the PS, SPS, LHC, and FCC. The FCC

tunnel will lie around 200 m underground and will be built across the borders of France and Switzerland, cross Lake Geneva in the north, and enclose the entire Mont Salève.

Figure 1B shows the current baseline design of the FCC machine. The blue ring symbolizes the machine tunnel, which, despite what the name Future Circular Collider would suggest, does not perfectly resemble a circle. The circular segments of the tunnel host dipole magnets, whose only purpose is to provide a magnetic field that creates the necessary radial acceleration to keep the particles on a circular path. In the straight sections, the four detectors within the experimental caverns, highlighted in red, capture the various subatomic particles emerging from the high-energy collisions.

Figure 1C shows the cross section of the FCC machine tunnel in the configuration for lepton (electron/positron) collisions. The center of the tunnel is occupied by the booster and magnets of the beam line (Fig. 1C, ii), and on top of the tunnel, a smoke and helium extraction duct (Fig. 1C, i) is installed for emergency scenarios. On the left side, cable trays and cryogenic installations (Fig. 1C, iii) will be placed. The right side of the cross section is kept clear for transportation of material and workers throughout the 91-km-long tunnel. This cross section resembles the main workspace for the robotic system with dimensions of 5.5 m by 3.4 m by 91 km.

A key parameter to demonstrate the efficiency of a particle accelerator is its luminosity, a metric that can be approximated as the volume of physics data it generates within a given time frame. To reach the luminosity targets (2) for the FCC, the machine availability must reach a minimum of 80% (3). Recent studies, on the basis of expert interviews and historical LHC data, have shown that this target can only

be achieved by a 15-fold increase in the mean time between failures of certain critical systems. Introducing a readily available robotic system in the accelerator and thus reducing the drive time to intervention locations allows for relaxation of this constraint by a factor of three (3).

To effectively reduce the intervention times, the robotic system must be capable of handling various procedures, ranging from simple inspection tasks to complex maintenance tasks that require adept mechanical interactions with the environment. Examples of lower-complexity procedures include monitoring of radiation and oxygen levels along the machine tunnel (4), monitoring tunnel health (5), and performing patrols to ensure that no person is present in the tunnel before starting the machine. Tasks that require a higher level of autonomy, such as the calibration of beam loss monitors (6), equipment replacement, and dipole magnet alignment (7), typically involve limited a priori knowledge and unforeseeable mission profiles. Although the robotic system should be fully autonomous for all foreseeable and repetitive interventions, we still expect the necessity of human cognition for intervention planning in some scenarios, and, therefore, intuitive teleoperation interfaces will be required (8).

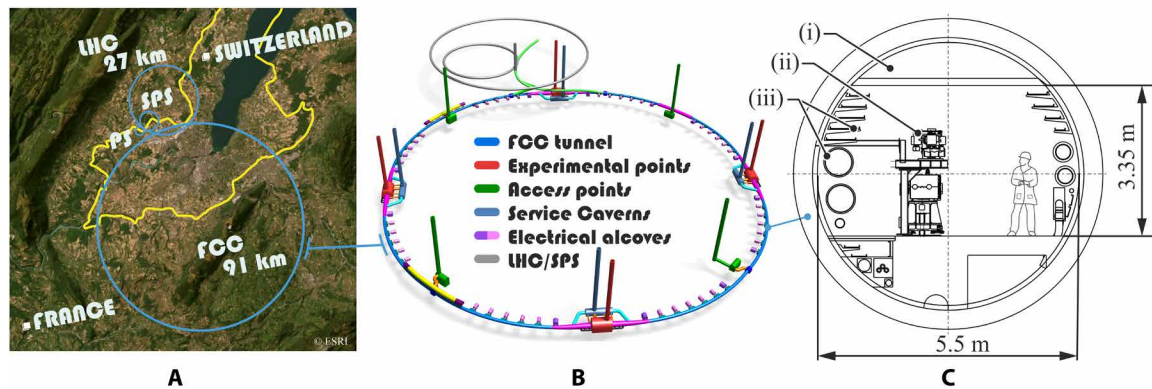
The robotic system is an integral part of the safety of the FCC. Ensuring the safety of the personnel has highest priority and requires substantial efforts considering a 91-km-long tunnel filled with high-power electronics, cryogenic installations, and radiation sources 200 m underground with access shafts only every 12 km. The robotic system must reach any point in the machine tunnel within a maximum of 10 min and must be able to detect hazards such as fire or gas leaks, detect and guide personnel, and support the CERN fire brigade with material, transport, or data from the incident location.

In 2020, the European Strategy for Particle Physics listed the development of the FCC as

<sup>1</sup>BE-CEM-MRO, CERN—European Organization for Nuclear Research, Espl. Des Particules 1, 1211 Meyrin, Switzerland.

<sup>2</sup>Institute of Robotics, Johannes Kepler University, Altenbergerstrasse 69, 4040 Linz, Austria.

\*Corresponding author. Email: hannes.gamper@cern.ch



**Fig. 1. Baseline design of the FCC.** (A) Location of the FCC in the greater Geneva area. (B) Design of the FCC complex including key features. (C) Cross section of the FCC machine tunnel in the lepton collider configuration.

one of its three main priorities (9). This also kicked off a feasibility study for the FCC at CERN including various work packages from physics simulations to verify hyperparameters of the accelerator to proof-of-concept studies with first prototypes. In 2025, a 30-m-long mock-up of the FCC machine tunnel will be assembled at CERN, including magnets, cryogenic installations, cabling, and the first prototype of the robotic system. We have compiled a work package for the robotic research and development activities for the upcoming 5 years, highlighting the expected main research activities, such as communication in the machine tunnel, cognition, sequential task planning, grasping techniques, human-robot collaboration, virtual reality user interfaces for teleoperation, digital twins, radiation tolerance, and robotic infrastructure and maintenance.

We would like to elevate awareness within the robotics community about this groundbreaking project, which has the potential to emerge as the largest of its kind in Europe. The robotics section at CERN actively engages in numerous collaborations with universities and external entities to optimize outcomes by drawing on expertise from established automated maintenance solutions in hazardous and semistructured environments. The robotic system will be part of a holistic machine automation initiative, ultimately enabling the FCC to achieve its required luminosity targets and increasing safety for personnel.

## REFERENCES

1. A. Abada, M. Abbrescia, S. S. AbdusSalam, I. Abdyukhanov, J. A. Fernandez, A. Abramov, M. Aburaia, A. O. Acar, P. R. Adzic, P. Agrawal, J. A. Aguilar-Saavedra, J. J. Aguilera-Verdugo, M. Aiba, I. Aichinger, G. Aielli, A. Akay, A. Akhundov, H. Aksakal, J. L. Albacete, S. Albergo, A. Alekou, M. Aleksa, R. Aleksan, R. M. A. Fernandez, Y. Alexahin, R. G. Alía,

- S. Alioli, N. A. Tehrani, B. C. Allanach, P. P. Allport, M. Altini, W. Altmannshofer, G. Ambrosio, D. Amorim, O. Amstutz, L. Anderlini, A. Andreazza, M. Andreini, A. Andriatis, C. Andris, A. Andronic, M. Angelucci, F. Antinori, S. A. Antipov, M. Antonelli, M. Antonello, P. Antonioli, S. Antusch, F. Anulli, L. Apollinário, G. Apollinari, A. Apollonio, D. Appelö, R. B. Appleby, A. Apyan, A. Apyan, A. Arbey, A. Arbuzov, G. Arduini, V. Ari, S. Arias, N. Armesto, R. Arnaldi, S. A. Arsenyev, M. Arzo, S. Asai, E. Aslanides, R. W. Aßmann, D. Astapovych, M. Atanasov, S. Atieh, D. Attié, B. Auchmann, A. Audurier, S. Aull, S. Aumon, S. Aune, F. Avino, G. Avrillaud, G. Aydin, A. Azatov, G. Azuelos, P. Azzi, O. Azzolini, P. Azzurri, N. Bacchetta, E. Bacchiocchi, H. Bachacou, Y. W. Baek, V. Baglin, Y. Bai, S. Baird, M. J. Baker, M. J. Baldwin, A. H. Ball, A. Ballarino, S. Banerjee, D. P. Barber, D. Barducci, P. Barjhoux, D. Barnea, G. G. Barnaföldi, M. J. Barnes, A. Barr, J. B. García, J. B. G. da Costa, W. Bartmann, V. Baryshevsky, E. Barzi, S. A. Bass, A. Bastianin, B. Baudouy, F. Bauer, M. Bauer, T. Baumgartner, I. Bautista-Guzmán, C. Bayindir, F. Baccetta, F. Bedeschi, M. Béguin, I. Bellafont, L. Bellagamba, N. Bellegarde, E. Belli, E. Bellingieri, F. Bellini, G. Bellomo, S. Belomestnykh, G. Bencivenni, M. Benedikt, G. Bernardi, J. Bernardi, C. Berner, J. M. Bernhardt, C. Bernini, C. Berriaud, A. Bertarelli, S. Bertolucci, M. I. Besana, M. Besançon, O. Beznosov, P. Bhat, C. Bhat, M. E. Biagini, J.-L. Biarrotte, A. B. Chevalier, E. R. Bielert, M. Biglietti, G. M. Bilei, B. Bilki, C. Biscari, F. Bishara, O. R. Blanco-García, F. R. Blázquez, F. Blekman, A. Blondel, J. Blümlein, T. Boccali, R. Boels, S. A. Bogacz, A. Bogomyagkov, O. Boine-Frankenheim, M. J. Boland, S. Bologna, O. Bolukbasi, M. Bomben, S. Bondarenko, M. Bonvini, E. Boos, B. Bordini, F. Bordry, G. Borghello, L. Borgonovi, S. Borowka, D. Bortoletto, D. Boscherini, M. Boscolo, S. Boselli, R. R. Bosley, F. Bossu, C. Botta, L. Bottura, R. Boughezal, D. Boutin, G. Bovone, I. B. Jelisavić, A. Bozday, C. Bozzi, D. Bozzini, V. Braccini, S. Braibant-Giacomelli, J. Bramante, P. Braun-Munzinger, J. A. Briffa, D. Britzger, S. J. Brodsky, J. J. Brooke, R. Bruce, P. B. De Renstrom, E. Bruna, O. Brüning, O. Brunner, K. Brunner, P. Bruzzone, X. Buffat, E. Bulyak, F. Burkart, H. Burkhardt, J.-P. Burnet, F. Butin, D. Buttazzo, A. Butterworth, M. Caccia, Y. Cai, B. Caiffi, V. Cairo, O. Cakir, R. Calaga, S. Calatroni, G. Calderini, G. Calderola, A. Caliskan, D. Calvet, M. Calviani, J. M. Camalich, P. Camarri, M. Campanelli, T. Camporesi, A. C. Canbay, A. Canepa, E. Cantergiani, D. Cantore-Cavalli, M. A. Capera, R. Cardarelli, U. Cardella, A. Cardini, C. M. C. Calame, F. Carra, S. Carra, A. Carvalho,

- S. Casalbuoni, J. Casas, M. Cascella, P. Castelnuovo, G. Castorina, G. Catalano, V. Cavasinni, E. Cazzato, E. Cennini, A. Cerri, F. Cerutti, J. Cervantes, I. Chaikovska, J. Chakraborty, M. Chala, M. Chamizo-Llatas, H. Chanal, D. Chanal, S. Chance, A. Chancé, P. Charitos, J. Charles, T. K. Charles, S. Chattopadhyay, R. Chehab, S. V. Chekanov, N. Chen, A. Chernodod, V. Chetvertkova, L. Chevalier, G. Chiarelli, G. Chiarello, M. Chiesa, P. Chiggiato, J. T. Childers, A. Chmieleńska, A. Cholakian, P. Chomaz, M. Chorowski, W. Chou, M. Chrzaszcz, E. Chyhyrnyets, G. Cibirnetto, A. K. Ciftci, R. Ciftci, R. Cimino, M. Ciuchini, P. J. Clark, Y. Coadou, M. Cobal, A. Coccaro, J. Cogan, E. Cogneras, F. Collamati, C. Colldelram, P. Collier, J. Collot, R. Contino, F. Conventi, C. T. A. Cook, L. Cooley, G. Corcella, A. S. Cornell, G. H. Corral, H. Correia-Rodrigues, F. Costanza, P. C. Pinto, F. Couderc, J. Coupard, N. Craig, I. C. Garrido, A. Crivellin, J. F. Croteau, M. Crouch, E. C. Alaniz, B. Curé, J. Curti, D. Curtin, M. Czech, C. Dachsauer, R. T. D'Agno, M. Daibo, A. Dainese, B. Dalena, A. Daljevec, W. Dallapiazza, L. D'Aloia Schwartzentruber, M. Dam, G. D'Ambrosio, S. P. Das, S. DasBakshi, W. da Silva, G. G. da Silveira, V. D'Auria, S. D'Auria, A. David, T. Davidek, A. Deandrea, J. de Blas, C. J. Debono, S. De Curtis, N. De Filippis, D. de Florian, S. Deghaye, S. J. de Jong, C. Del Bo, V. Del Duca, D. Delikaris, F. Deliot, A. Dell'Acqua, L. D. Rose, M. Delmastro, E. De Lucia, M. Demarteau, D. Denecri, L. Deniau, D. Denisov, H. Denizli, A. Denner, D. d'Enterria, G. de Rijk, A. De Roeck, F. Dzeu, O. Deschamps, S. Descotes-Genon, P. S. B. Dev, J. B. de Vivie de Régie, R. K. Dewanjee, A. Di Ciaccio, A. Di Cicco, B. M. Dillon, B. Di Micco, P. Di Nezza, S. Di Vita, A. Doblhammer, A. Dominjon, M. D'Onofrio, F. Dordai, A. Drago, P. Draper, Z. Drasal, M. Drewes, L. Duarte, I. Dubovyk, P. Duda, A. Dudarev, L. Dudko, D. Duellmann, M. Dünsen, T. du Pree, M. Durante, H. D. Yildiz, S. Dutta, F. Duval, J. M. Duval, Y. Dydyshka, B. Dziewit, S. Eisenhardt, M. Eisterer, T. Eklof, D. El Khechen, S. A. Ellis, J. Ellis, J. A. Ellison, K. Elsener, M. Elsing, Y. Enari, C. Englert, H. Eriksson, K. J. Eskola, L. S. Esposito, O. Etischen, E. Etzion, P. Fabricatore, A. Falkowski, A. Falou, J. Faltova, J. Fan, L. Fanò, A. Farilla, R. Farinelli, S. Farinon, D. A. Farroway, S. D. Fartoukh, A. Faus-Golfe, W. J. Fawcett, G. Felici, L. Felsberger, C. Ferdeghini, A. M. F. Navarro, A. Fernández-Télez, J. F. Troitino, G. Ferrara, R. Ferrari, L. Ferreira, P. F. da Silva, G. Ferrera, F. Ferro, M. Fiascaris, S. Fiorendi, C. Fiorio, O. Fischer, E. Fischer, W. Flegler, M. Florio, D. Fomesu, E. Fontanesi, N. Foppiani, K. Foraz, D. Forkel-Wirth, S. Forte, M. Foudaoui, D. Fournier, T. Fowler, J. Fox, P. Francavilla, R. Franceschini, S. Franchino, E. Franco,

- A. Freitas, B. Fuks, K. Furukawa, S. V. Furuseth, E. Gabrielli, A. Gaddi, M. Galanti, E. Gallo, S. Ganjour, J. Gao, J. Gao, V. G. Diaz, M. G. Pérez, L. G. Tabarés, C. Garion, M. V. Garzelli, I. Garzia, S. M. Gascon-Shotkin, G. Gaudio, P. Gay, S.-F. Ge, T. Gehrman, M. H. Genest, R. Gerard, F. Gerigk, H. Gerwig, P. Giacomelli, S. Giagu, E. Gianfelice-Wendt, F. Gianotti, F. Giffoni, S. S. Gilardoni, M. G. Costa, M. Giovannetti, M. Giovannozzi, P. Giubellino, G. F. Giudice, A. Giunta, L. K. Gladilin, S. Glukhov, J. Gluza, G. Gobbi, B. Goddard, F. Goertz, T. Golling, V. P. Goncalves, R. Gonçalo, L. A. G. Gomez, S. G. Zadeh, G. Gorine, E. Gorini, S. A. Gourlay, L. Gouskos, F. Grancagnolo, A. Grassellino, A. Grau, E. Graverini, H. M. Gray, M. Greco, M. Greco, J.-L. Grenard, O. Grimm, C. Grojean, V. A. Gromov, J. F. Grosse-Oetringhaus, A. Grudiev, K. Grzanek, J. Gu, D. Guadagnoli, V. Guidi, S. Guiducci, G. G. Canton, Y. O. Günaydin, R. Gupta, R. S. Gupta, J. Gutierrez, J. Gutleber, C. Guyot, V. Guzey, C. Gwenlan, C. Haberstroh, B. Hacıahinoğlu, B. Haerer, K. Hahn, T. Hahn, A. Hammad, C. Han, M. Hance, A. Hannah, P. C. Harris, C. Hati, S. Haug, J. Hauptman, V. Haurylavets, H.-J. He, A. Hegglin, B. Hegner, K. Heinemann, S. Heinemeyer, C. Helsens, A. Henriques, A. Henriques, P. Hernandez, R. J. Hernández-Pinto, J. Hernandez-Sanchez, T. Herzig, I. Hiekkänen, W. Hillert, T. Hoehn, M. Hofer, W. Höfle, F. Holdener, S. Holleis, B. Holzer, D. K. Hong, C. G. Honorato, S. C. Hopkins, J. Hrdinka, F. Hug, B. Humann, H. Humer, T. Hurth, A. Hutton, G. Iacobucci, N. Ibarrola, L. Iconomidou-Fayard, K. Ilyina-Brunner, J. Incandela, A. Infantino, V. Ippolito, M. Ishino, R. Islam, H. Ita, A. Ivanovs, S. Iwamoto, A. Iyer, S. I. Bermudez, S. Jadach, D. O. Jamin, P. Janot, P. Jarry, A. Jeff, P. Jenny, E. Jensen, M. Jensen, X. Jiang, J. M. Jiménez, M. A. Jones, O. R. Jones, J. M. Jowett, S. Jung, W. Kaabi, M. Kado, K. Kahle, L. Kalinovskaya, J. Kalinowski, J. F. Kamenik, K. Kannike, S. O. Kara, H. Karadeniz, V. Karaventzas, I. Karpov, S. Kartal, A. Karyukhin, V. Kashikhin, J. K. Behr, U. Kaya, J. Keintzel, P. A. Keinz, K. Keppel, R. Kersevan, K. Kershaw, H. Khanpour, S. Khatibi, S. I. Yanehsari, V. V. Khoze, J. Kieseler, A. Kilic, A. Kilpinen, Y.-K. Kim, D. W. Kim, U. Klein, M. Klein, F. Kling, N. Klinkenberg, S. Klöppel, M. Klute, V. I. Klyukhin, M. Knecht, B. Knieh, F. Kocak, C. Koeberl, A. M. Kolano, A. Kollegger, K. Kolodziej, A. A. Kolomoj, J. Kompula, I. Koop, P. Koppenburg, M. Koratzinos, M. Kordiaczyńska, M. Korjik, O. Kortner, P. Kostka, W. Kotlarski, C. Kotnig, T. Köttig, A. V. Kotwal, A. D. Kovalenko, S. Kowalski, J. Kozaczuk, G. A. Kozlov, S. S. Kozub, A. M. Krainer, T. Kramer, M. Krämer, M. Krammer, A. A. Krasnov, F. Krauss, K. Kravalis, L. Kretzschmar, R. M. Kriske, H. Kritscher, P. Krkotic, H. Kroha, M. Kucharczyk, S. Kuday, A. Kuendig, G. Kuhlmann, A. Kulesza, N. Kumar, M. Kumar, A. Kusina, S. Kuttimalai, M. Kuze, T. Kwon, F. Lackner, M. Lackner, E. La Francesca, M. Laine, G. Lamanna, S. La Mendola, E. Lançon, G. Landsberg, P. Langacker, C. Lange, A. Langner, A. J. Lankford, J. P. Lansberg, T. Lari, P. J. Laycock, P. Lebrun, A. Lechner, K. Lee, S. Lee, R. Lee, T. Lefevre, P. Le Guen, T. Lehtinen, S. B. Leith, P. Lenzi, E. Leogrande, C. Leonidopoulos, I. Leon-Monzon, G. Lerner, O. Leroy, T. Lesiak, P. Lévai, A. Leveratto, E. Levichev, G. Li, S. Li, R. Li, D. Liberati, M. Liepe, D. A. Lissauer, Z. Liu, A. Lobko, E. Locci, E. L. Agaliotis, M. P. Lombardo, A. J. Long, C. Lorin, R. Losito, A. Louzguiti, I. Low, D. Lucchesi, M. L. Lucchini, A. Luciani, M. Lueckhof, A. J. G. Lunt, M. Luzum, D. A. Lyubimov, M. Maggiora, N. Magnin, M. A. Mahmoud, F. Mahmoudi, J. Maitre, V. Makarenko, A. Malagoli, J. Malclés, L. Malgeri, P. J. Mallon, F. Maltoni, S. Malvezzi, O. B. Malyshev, G. Mancinelli, P. Mandrik, P. Manfrinetti, M. Mangano, P. Manil, M. Mannelli, G. Marchiori, F. Marhauser, V. Mariani, V. Mariotti, S. Mariotto, P. Marquet, C. Marquet, T. Marriott-Dodginton, R. Martin, O. Martin, J. M. Camalich, T. Martinez, H. M. Bruzual, M. I. Martínez-Hernández, D. E. Martins, S. Marzani, D. Marzocca, L. Marzola, S. Masciocchi, I. Masina, A. Massimiliano, A. Massironi, T. Masubuchi, V. A. Matveev, M. A. Mazzoni, M. McCullough, P. A. McIntosh, P. Meade, L. Medina, A. Meier, J. Meignan, B. Mele, J. G. M. Saraiva, F. Menez, M. Mentink, E. Meoni, P. Meridiani, M. Merk, P. Mermod, V. Mertens, L. Mether, E. Métral, M. Migliorati, A. Milanese, C. Milardi, G. Milhano, B. L. Militsyn, F. Millet, I. Minashvili, J. V. Minervini, L. S. Miralles, D. Mirarchi, S. Mishima, D. P. Missiaen, G. Mitselmakher, T. Mitshuhashi, J. Mnich, M. M. Najafabadi, R. N. Mohapatra, N. Mokhov, J. G. Molson, R. Monge, C. Montag, G. Montagna, S. Monteil, G. Montenero, E. Montesinos, F. Moortgat, N. Morange, G. Morello, M. M. Llácer, M. Moretti, S. Moretti, A. K. Morley, A. Moros, I. Morozov, V. Morretta, M. Morrone, A. Mostacci, S. Muanza, N. Muchnoi, M. Mühlegger, M. Mulder, M. Mulders, B. Müller, F. Müller, A.-S. Müller, J. Munilla, M. J. Murray, Y. Muttoni, S. Myers, M. Mylonia, J. Nachtman, T. Nakamoto, M. Nardecchia, G. Nardini, P. Nason, Z. Nergiz, A. V. Nesterenko, J. A. Netto, A. Netzsträter, C. Neubüser, J. Neundorfer, F. Niccoli, O. Nicosini, Y. Nie, U. Niedermayer, J. Niedziela, A. Niemi, S. A. Nikitin, A. Nisati, J. M. No, M. Nonis, Y. Nosochkov, M. Novák, A. Novokhatski, J. M. O'Callaghan, C. Ochando, S. Ogur, K. Ohmi, K. Oide, V. A. Okorokov, Y. Okumura, C. Oleari, F. I. Olness, Y. Onel, M. Ortino, J. Osborne, P. Osland, T. Otto, K. Y. Oyulmaz, A. Ozansoy, V. Özcan, K. Özdemir, C. E. Pagliarone, H. F. P. da Silva, E. Palmieri, L. Palumbo, A. Pampaloni, R.-Q. Pan, M. Panareo, O. Panella, G. Panico, G. Panizzo, A. A. Pankov, V. Pantyryn, C. G. Papadopoulos, A. Papaefstathiou, Y. Papaphilippou, M. A. Parker, V. Parma, M. Pasquali, S. K. Patra, R. Patterson, H. Paukkunen, F. Pauss, S. Peggs, J.-P. Penttinen, G. Peón, E. E. Pernelkin, E. Perez, J. C. Perez, G. Perez, F. Pérez, E. P. Codina, J. P. Morales, M. Perfilov, H. Pernegger, M. Peruzzi, C. Pes, K. Peters, S. Petracca, F. Petriello, L. Pezzotti, S. Pfeiffer, F. Piccinini, T. Pieloni, M. Pierini, H. Pikhartova, G. Pikurs, E. Pilicer, P. Piminov, C. Pira, R. Pittau, W. Placzek, M. Plagge, T. Plehn, M.-A. Pleier, M. Płoskoń, M. Pödeur, H. Podlech, T. Podzorny, L. Poggioli, A. Poiran, G. Polesello, M. P. Lener, A. Polini, J. Polinski, S. M. Polozov, L. Ponce, M. Pont, L. Pontecorvo, T. Portaluri, K. Potamianos, C. Prasse, M. Prausa, A. Preinerstorfer, E. Premat, T. Price, M. Primavera, F. Prino, M. Prioli, J. Proudfoot, A. Provino, T. Pugnati, N. Pukhaeva, S. Pulawski, D. Pulkowski, G. Punzi, M. Putti, A. Pyarelal, H. Quack, M. Quispe, A. Racioppi, H. Rafique, V. Ragainel, M. Raidal, N. S. Ramirez-Urbe, M. J. Ramsey-Musolf, R. Rata, P. Ratoff, F. Ravotti, P. R. Teles, M. Reboud, S. Redaelli, E. Renner, A. E. Renteria-Olivo, M. Rescigno, J. Reuter, A. Ribon, A. M. Ricci, W. Riegler, S. Riemann, B. Riemann, T. Riemann, J. M. Rifflet, R. A. Rimmer, R. Rinaldesi, L. Rinaldi, O. R. Rubiras, T. Risselada, A. Rivetti, L. Rivkin, T. Rizzo, T. Robens, F. Robert, A. J. Robson, E. Rochepault, C. Roda, G. Rodrigo, M. Rodríguez-Cahuantzi, C. Rogan, M. Roig, S. Rojas-Torres, J. Rojo, G. Rolandi, G. Rolando, P. Roloff, A. Romanenko, A. Romanov, F. Roncarolo, A. R. Sanchez, G. Rosaz, L. Rossi, A. Rossi, R. Rossmannith, B. Rousset, C. Royon, X. Ruan, I. Ruelh, V. Ruhlmann-Kleider, R. Ruiz, L. Rumyantsev, R. Ruprecht, A. I. Ryazanov, A. Saba, R. Sadykov, D. S. de Jauregui, M. Sahin, B. Sailer, M. Saito, F. Sala, R. A. Salam, J. Salfeld-Nebgen, C. A. Salgado, S. Salini, J. M. Sallese, T. Salmi, A. Salzburger, O. A. Sampayo, S. Sanfilippo, J. Santiago, E. Santopinto, R. Santoro, A. S. Ull, X. Sarasola, I. H. Sarpün, M. Sauvain, S. Saveleyeva, R. Sawada, G. F. R. Sborlini, A. Schaffer, M. Schaumann, M. Schenk, C. Scheuerlein, I. Schienbein, K. Schlenga, H. Schmickler, R. Schmidt, D. Schoerling, A. Schoning, T. Schörner-Sadenius, M. Schott, D. Schulte, P. Schwaller, C. Schwanenberger, P. Schwemling, N. Schwerg, L. Scibile, A. Sciuto, E. Scopinari, C. Sebastiani, B. Seeber, M. Segreti, P. Selva, M. Selvaggi, C. Senatore, A. Senol, L. Serin, M. Serluca, N. Serra, A. Seryi, L. Sestini, A. Sfyrla, M. Shaposhnikov, E. Shaposhnikova, B. Y. Sharkov, D. Shatilov, J. Shelton, V. Shiltsev, I. P. Shipsey, G. D. Shirkov, A. Shivaji, D. Shwartz, T. Sian, S. Sidorov, A. Siemko, L. Silvestri, N. Simand, F. Simon, B. K. Singh, A. Siodmok, Y. Sirois, E. Sirtori, R. Sirvinickova, B. Sitar, T. Sjöstrand, P. Skands, E. Skordis, K. Skovpen, M. Skrzypek, E. Slade, P. Slavich, R. Slovak, V. Smaluk, V. Smirnov, W. Snoeys, L. Soffi, P. Sollander, O. Solovyanov, H. K. Soltveit, H. Song, P. Sopicki, M. Sorbi, L. Spallino, M. Spannowsky, B. Spataro, P. Sphicas, H. Spiesberger, P. Spiller, M. Spira, T. Srivastava, J. Stachel, A. Stakia, J. L. Stanyard, E. Starchenko, A. Y. Starikov, A. M. Staśto, M. Statera, R. Steerenberg, J. Steggemann, A. Stenvall, F. Stivanello, D. Stöckinger, L. S. Stoel, M. Stöger-Pollach, B. Strauss, M. Stuart, G. Stupakov, S. Su, A. Sublet, K. Sugita, L. Sulak, M. K. Sullivan, S. Sultansoy, T. Sumida, K. Suzuki, G. Sylva, M. J. Syphers, A. Sznajder, M. Taborelli, N. A. Tahir, M. Takeuchi, E. T. Hod, C. Tambasco, J. Tanaka, K. Tang, I. Tapan, S. Taroni, G. F. Tartarelli, G. Tassielli, L. Taviani, T. M. Taylor, G. N. Taylor, A. M. Teixeira, G. Tejada-Muñoz, V. I. Telnov, R. Tenchini, H. H. J. ten Kate, K. Terashi, A. Tesi, M. Testa, C. Tetrel, D. Teytelman, J. Thaler, A. Thamm, S. Thomas, M. T. Tiirakarvi, V. Tikhomirov, D. Tikhonov, H. Timko, V. Tisserand, L. M. Tkachenko, J. Tkaczuk, J. P. Tock, B. Todd, E. Todesco, R. T. Garcia, D. Tommasini, G. Tonelli, F. Toral, T. Torims, R. Torre, Z. Townsend, R. Trant, D. Treille, L. Trentadue, A. Tricoli, A. Tricomi, W. Trischuk, I. S. Tropin, B. Tuchming, A. A. Tudora, B. Turbiar, I. T. Cakir, M. Turri, T. Tydecks, J. Usvoitsch, J. Uythoven, R. Vaglio, A. Valassi, F. Valchikova, M. A. V. Garcia, P. Valente, R. U. Valente, A.-M. Valente-Feliciano, G. Valentino, L. V. Silva, J. M. Valet, R. Valizadeh, J. W. Valle, S. Vallecorsa, G. Vallone, M. van Leeuwen, U. H. van Rienen, L. van Riesen-Haupt, M. Varasteh, L. Vecchi, P. Vedrine, G. Velev, R. Veness, A. Ventura, W. V. Delsolaro, M. Verducci, C. B. Verhaaren, C. Vernieri, A. P. Verweij, O. Verwilligen, O. Viazlo, A. Vicini, G. Viehhauser, N. Vignaroli, M. Vignolo, A. Vitrano, I. Vivarelli, S. Vlachos, M. Vogel, D. M. Vogt, V. Völk, P. Volkov, G. Volpini, J. von Ahnen, G. Vorotnikov, G. G. Voutsinas, V. Vysotsky, U. Wagner, R. Wallny, L.-T. Wang, R. Wang, K. Wang, B. F. L. Ward, T. P. Watson, N. K. Watson, Z. Ws, C. Weiland, S. Weinzierl, C. P. Welsch, J. Wenninger, M. Widderski, U. A. Wiedemann, H.-U. Wienands, G. Wilkinson, P. H. Williams, A. Winter, A. Wohlfahrt, T. Wojtoń, D. Wollmann, J. Womersley, D. Woog, X. Wu, A. Wulzer, M. K. Yanehsari, G. Yang, H. J. Yang, W.-M. Yao, E. Yazgan, Y. Yermolchik, A. Yilmaz, A. Yilmaz, H.-D. Yoo, S. A. Yost, T. C. Young, T.-T. Yu, F. Yu, A. Zaborowska, S. G. Zadeh, M. Zahnd, M. Zanetti, L. Zanutto, L. Zawiejski, P. Zeiler, M. Zerlauth, S. M. Zernov, G. Z. D. Porta, Z. Zhang, Y. Zhang, C. Zhang, H. Zhang, Z. Zhao, Y.-M. Zhong, J. Zhou, D. Zhou, P. Zhuang, G. Zick, F. Zimmermann, J. Zinn-Justin, L. Zivkovic, A. V. Zlobin, M. Zobel, J. Zupan, J. Zurita, the FCC Collaboration, FCC-ee: The lepton collider. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **228**, 261–623 (2019).
2. A. Abada, M. Abbrescia, S. S. AbdusSalam, I. Abdyukhanov, J. A. Fernandez, A. Abramov, M. Aburiga, A. O. Acar, P. R. Adzic, P. Agrawal, A. A. Aguilera-Saavedra, J. J. Aguilera-Verdugo, M. Aiba, I. Aichinger, G. Aielli, A. Akay, A. Akhundov, H. Aksakal, J. L. Albacete, S. Albergo, A. Alekou, M. Aleksa, R. Aleksan, R. M. A. Fernandez, Y. Alexahin, R. G. Alia, S. Alioli, N. A. Tehrani, B. C. Allanach, P. P. Allport, M. Altinli, W. Altmannshofer, G. Ambrosio, D. Amorim, O. Amstutz, L. Anderlini, A. Andreatta, M. Andreini, A. Andriati, C. Andris, A. Andronic, M. Angelucci, F. Antinori, S. A. Antipov, M. Antonelli, M. Antonello, P. Antonioli, S. Antusch, F. Anulli, L. Apolinário,

- G. Apollinari, A. Apollonio, D. Appelló, R. B. Appleby, A. Apyan, A. Apyan, A. Arbey, A. Arbutov, G. Arduini, V. Ari, S. Arias, N. Armesto, R. Arnaldi, S. A. Arsenyev, M. Arzeo, S. Asai, E. Aslanides, R. W. Aßmann, D. Astapovych, M. Atanasov, S. Atieh, D. Attié, B. Auchmann, A. Audurier, S. Aull, S. Aumon, S. Aune, F. Avino, G. Avrillaud, G. Aydin, A. Azatov, G. Azuelos, P. Azzi, O. Azzolini, P. Azzurri, N. Bacchetta, E. Bacchiocchi, H. Bachacou, Y. W. Baek, V. Baglin, Y. Bai, S. Baird, M. J. Baker, M. J. Baldwin, A. H. Ball, A. Ballarino, S. Banerjee, D. P. Barber, D. Barducci, P. Barjhoux, D. Barna, G. G. Barnaföldi, M. J. Barnes, A. Barr, J. B. García, J. B. G. da Costa, W. Bartmann, V. Baryshevsky, E. Barzi, S. A. Bass, A. Bastianin, B. Baudouy, F. Bauer, M. Bauer, T. Baumgartner, I. Bautista-Guzmán, C. Bayindir, F. Beaudette, F. Bedeschi, M. Béguin, I. Bellafont, L. Bellagamba, M. Bellegarde, E. Belli, E. Bellingeri, F. Bellini, G. Bellomo, S. Belomestnykh, G. Bencivenni, M. Benedikt, G. Bernardi, J. Bernardi, C. Bernet, J. M. Bernhardt, C. Bernini, C. Berriaud, A. Bertarelli, S. Bertolucci, M. I. Besana, M. Besançon, O. Beznosov, P. Bhat, C. Bhat, M. E. Biagini, J.-L. Biarrotte, A. B. Chevalier, E. R. Bielert, M. Biglietti, G. M. Bilei, B. Bilki, C. Biscari, F. Bishara, O. R. Blanco-García, F. R. Blánquez, F. Blekman, A. Blondel, J. Blümlein, T. Boccali, R. Boels, S. A. Bogacz, A. Bogomyakov, O. Boine-Frankenheim, M. J. Boland, S. Bologna, O. Bolukbasi, M. Bomben, S. Bondarenko, M. Bonvini, E. Boos, B. Bordini, F. Bordry, G. Borghello, L. Borgonovi, S. Borowka, D. Bortoletto, D. Boscherini, M. Boscolo, S. Boselli, R. R. Bosley, F. Bossu, C. Botta, L. Bottura, R. Boughezal, D. Boutin, G. Bovone, I. B. Jelisavić, A. Bozbey, C. Bozzi, D. Bozzini, V. Braccini, S. Braibant-Giacomelli, J. Bramante, P. Braun-Munzinger, J. A. Briffa, D. Britzger, S. J. Brodsky, J. J. Brooke, R. Bruce, P. B. De Renstrom, E. Bruna, O. Brüning, O. Brunner, K. Brunner, P. Bruzzone, X. Buffat, E. Bulyak, F. Burkart, H. Burkhardt, J.-P. Burnet, F. Butin, D. Buttazzo, A. Butterworth, M. Caccia, Y. Cai, B. Caiffi, V. Cairo, O. Cakir, R. Calaga, S. Calatroni, G. Calderini, G. Calderola, A. Caliskan, D. Calvet, M. Calviani, J. M. Camalich, P. Camarri, M. Campanelli, T. Camporesi, A. C. Canbay, A. Canepa, E. Cantergiani, D. Cantore-Cavalli, M. Capeans, R. Cardarelli, U. Cardella, A. Cardini, C. M. C. Calame, F. Carra, S. Carra, A. Carvalho, S. Casalbuoni, J. Casas, M. Cascella, P. Castellano, G. Castorina, G. Catalano, V. Cavasinni, E. Cazzato, E. Cennini, A. Cerri, F. Cerutti, J. Cervantes, I. Chaikovska, J. Chakraborty, M. Chala, M. Chamizo-Llatas, H. Chanal, D. Chanal, S. Chance, A. Chancé, P. Charitos, J. Charles, T. K. Charles, S. Chattopadhyay, R. Chehab, S. V. Chekanov, N. Chen, A. Chernoded, V. Chetvertkova, L. Chevalier, G. Chiarelli, G. Chiarello, M. Chiesa, P. Chiggiato, J. T. Childers, A. Chmielińska, A. Cholokian, P. Chomaz, M. Chorowski, W. Chou, M. Chruszcz, E. Chyhyrnyets, G. Cibinetto, A. K. Ciftci, R. Ciftci, R. Cimino, M. Ciuchini, P. J. Clark, Y. Coadou, M. Cokal, A. Coccaro, J. Cogan, E. Cogneras, F. Collamati, C. Colldelram, P. Collier, J. Collot, R. Contino, F. Conventi, C. T. A. Cook, L. Cooley, G. Corcella, A. S. Cornell, G. H. Corral, H. Correia-Rodrigues, F. Costanza, P. C. Pinto, F. Couderc, J. Coupard, N. Craig, I. C. Garrido, A. Crivellin, J. F. Croteau, M. Crouch, E. C. Alaniz, B. Curé, J. Curti, D. Curtin, M. Czech, C. Dachauer, R. T. D'Agno, M. Daibo, A. Dainese, B. Dalena, A. Daljev, W. Dallapiazza, L. D'Aloia Schwartzentruber, M. Dam, G. D'Ambrosio, S. P. Das, S. DasBakshi, B. da Silva, G. G. da Silva, V. D'Auria, S. D'Auria, A. David, T. Davidek, A. Deandrea, J. de Blas, C. J. Debono, S. De Curtis, N. De Filippis, D. de Florian, S. Deghay, S. J. de Jong, C. Del Bo, V. Del Duca, D. Delikaris, F. Deliot, A. Dell'Acqua, L. D. Rose, M. Delmastro, E. De Lucia, M. Demarteau, D. Denegri, L. Deniau, D. Denisov, H. Denizli, A. Denner, D. d'Enteria, G. de Rijk, A. De Roeck, F. Derue, O. Deschamps, S. Descotes-Genon, P. S. B. Dev, J. B. de Vivie de Régie, R. K. Dewanjee, A. Di Ciaccio, A. Di Cicco, B. M. Dillon, B. Di Micco, P. Di Nezza, S. Di Vita, A. Doblhammer, A. Dominjon, M. D'Onofrio, F. Dordei, A. Drago, P. Draper, Z. Drasl, M. Drewes, L. Duarte, I. Dubovyk, P. Duda, A. Dudarev, L. Dudko, D. Duellmann, M. Dünser, T. du Pree, M. Durante, H. D. Yildiz, S. Dutta, F. Duval, J. M. Duval, Y. Dydyshka, B. Dziewit, S. Eisenhardt, M. Eisterer, T. Ekelof, D. El Khechen, S. A. Ellis, J. Ellis, J. A. Ellison, K. Elsener, M. Elsing, Y. Enari, C. Englert, H. Eriksson, K. J. Eskola, L. S. Esposito, O. Etischen, E. Etzion, P. Fabbriatore, A. Falkowski, A. Falou, J. Faltova, J. Fan, L. Fanò, A. Farilla, R. Farinelli, S. Farinon, D. A. Faroughy, S. D. Fartoukh, A. Faus-Golfe, W. J. Fawcett, G. Felici, L. Felsberger, C. Ferdeghini, A. M. F. Navarro, A. Fernández-Téllez, J. F. Troitino, G. Ferrara, R. Ferrari, L. Ferreira, P. F. da Silva, G. Ferrera, F. Ferro, M. Fiascaris, S. Fiorendi, C. Fiorio, O. Fischer, E. Fischer, W. Fiegler, M. Florio, D. Fomes, E. Fontanesi, N. Foppiani, K. Foraz, D. Forkel-Wirth, S. Forte, M. Fouaidy, D. Fournier, T. Fowler, J. Fox, P. Francavilla, R. Franceschini, S. Franchino, E. Franco, A. Freitas, B. Fuks, K. Furukawa, S. V. Furuse, E. Gabrielli, A. Gaddi, M. Galanti, E. Gallo, S. Ganjour, J. Gao, J. Gao, V. G. Diaz, M. G. Pérez, L. G. Tabarés, C. Garion, M. V. Garzelli, I. Garzia, S. M. Gascon-Shotkin, G. Gaudio, P. Gay, S.-F. Ge, T. Gehrmann, M. H. Genest, R. Gerard, F. Gerigk, H. M. Gerwig, P. Giacomelli, S. Giagu, E. Gianfelice-Wendt, F. Gianotti, G. Giffoni, S. S. Gilardoni, M. G. Costa, M. Giovannetti, M. Giovannozzi, P. Giubellino, G. J. Giudice, A. Giunta, L. K. Gladiilin, S. Glukhov, J. L. M. Gray, G. Gobbli, B. Goddard, F. Goertz, T. Golling, V. P. Goncalves, R. Gonçalo, L. A. G. Gomez, S. G. Zadeh, G. Gorine, E. Gorini, S. A. Gourlay, L. Gouskos, F. Grancagnolo, A. Grassellino, A. Grau, E. Graverini, H. M. Gray, M. Greco, M. Greco, J.-L. Grenard, O. Grimm, C. Grojean, V. A. Gromov, J. F. Grosse-Oetringhaus, A. Grudiev, K. Grzanka, J. Gu, D. Guadagnoli, V. Guidi, S. Guiducci, G. G. Canton, Y. O. Günaydin, R. Gupta, R. S. Gupta, J. Gutierrez, J. Gutleber, C. Guyot, V. Guzey, C. Gwenlan, C. Haberstroh, B. Hacısahinoğlu, B. Haerer, K. Hahn, T. Hahn, A. Hammad, C. Han, M. Hance, A. Hannah, P. C. Harris, C. Hati, S. Haug, J. Hauptman, V. Haurlyavets, H.-J. He, A. Heggin, B. Hegner, K. Heinemann, S. Heinemeyer, C. Helsen, A. Henriques, A. Henriques, P. Hernandez, R. J. Hernández-Pinto, T. Hernandez-Sanchez, T. Herzog, I. Hiekkänen, W. Hillert, J. Hoehn, M. Hofer, W. Höfle, F. Holdener, S. Holleis, B. Holzer, D. K. Hong, C. G. Honorato, S. C. Hopkins, J. Hrdinka, F. Hug, B. Humann, H. Humer, T. Hurth, A. Hutton, G. Iacobucci, N. Ibarrola, L. Iconomidou-Fayard, K. Ilyina-Brunner, J. Incandela, A. Infantino, V. Ippolito, M. Ishino, R. Islam, H. Ita, A. Ivanovs, S. Iwamoto, A. Iyer, S. I. Bermudez, S. Jadach, D. O. Jamin, P. Janot, P. Jarry, A. Jeff, P. Jenny, E. Jensen, M. Jensen, X. Jiang, J. M. Jiménez, M. A. Jones, O. R. Jones, J. M. Jowett, S. Jung, W. Kaabi, M. Kado, K. Kahle, L. Kalinovskaya, J. Kalinowski, J. F. Kamenik, K. Kannike, S. O. Kara, H. Karadeniz, V. Karavantzias, I. Karpov, S. Kartal, A. Karyukhin, V. Kashikhin, J. K. Behr, U. Kaya, J. Keintzel, P. A. Keinz, K. Keppel, R. Kersevan, K. Kershaw, H. Khanpour, S. Khatibi, M. K. Yanehsari, V. V. Khoze, J. Kieseler, A. Kilic, A. Kilpinen, Y.-K. Kim, D. W. Kim, U. Klein, M. Klein, F. Kling, N. Klinkenberg, S. Klöppel, M. Klute, V. I. Klyukhin, M. Knecht, B. Kniehl, F. Kocak, C. Koeberl, A. M. Kolano, A. Kollegger, K. Kolodziej, A. A. Kolomiets, J. Komppula, I. Koop, P. Koppenburg, M. Koratzinos, M. Kordiaczyńska, M. Korjik, O. Kortner, P. Kostka, W. Kotlarski, C. Kotnick, T. Köttig, A. V. Kotwal, A. D. Kovalenko, S. Kowalski, J. Kozaczuk, G. A. Kozlov, S. S. Kozub, A. M. Krainer, T. Kramer, M. Krämer, M. Krammer, A. A. Krasnov, F. Krauss, K. Kravalis, L. Kretschmar, R. M. Kriske, H. Krietscher, P. Krkotic, H. Kroha, M. Kucharczyk, S. Kuday, A. Kuendig, G. Kuhlmann, A. Kulesza, M. Kumar, M. Kumar, A. Kusina, S. Kuttimalai, M. Kuze, T. Kwon, F. Lacker, M. Lacker, E. La Francesca, M. Laine, G. Lamanna, S. La Mendola, E. Lançon, G. Landsberg, P. Langacker, C. Lange, A. Langner, A. J. Lankford, J. P. Lansberg, T. Lari, P. J. Laycock, P. Lebrun, A. Lechner, K. Lee, S. Lee, R. Lee, T. Lefevre, P. Le Guen, T. Lehtinen, S. B. Leith, P. Lenzi, E. Leogrande, C. Leonidopoulos, I. Leon-Monzon, G. Lerner, O. Leroy, T. Lesiak, P. Lévai, A. Leveratto, E. Levichev, G. Li, S. Li, R. Li, D. Liberati, M. Liepe, D. A. Lissauer, Z. Liu, A. Lobko, E. Locci, E. L. Agaliotis, M. P. Lombardo, A. J. Long, C. Lorin, R. Losito, A. Louzguiti, I. Low, D. Lucchesi, M. T. Lucchini, A. Luciani, M. Lueckhoff, A. J. G. Lunt, M. Luzum, D. A. Lyubimtsev, M. Maggiora, M. Magnin, M. A. Mahmoud, F. Mahmoudi, J. Maitre, V. Makarenko, A. Malaolli, J. Malclés, L. Malgeri, P. J. Mallon, F. Maltoni, S. Malvezzi, O. B. Malyshev, G. Mancinelli, P. Mandrik, P. Manfinetti, M. Mangano, P. Manil, M. Mannelli, G. Marchiori, F. Marhauser, V. Mariani, V. Marinuzzi, S. Mariotto, P. Marquard, C. Marquet, T. Marriott-Dodington, R. Martin, O. Martin, J. M. Camalich, T. Martinez, H. M. Bruzual, M. I. Martinez-Hernández, D. E. Martins, S. Marzani, D. Marzocca, L. Marzola, S. Masciocchi, I. Masina, A. Massimiliano, A. Massironi, T. Masubuchi, V. A. Matveev, M. A. Mazzoni, M. McCullough, P. A. McIntosh, P. Meade, L. Medina, A. Meier, J. Meignan, B. Mele, J. G. M. Saraiva, F. Menez, M. Mentink, E. Meoni, P. Meridiani, M. Merk, P. Mermoud, V. Mertens, L. Mether, E. Métral, M. Migliorati, A. Milanese, C. Milardi, G. Milhano, B. L. Militsyn, F. Millet, I. Minashvili, J. V. Minervini, L. S. Miralles, D. Mirarchi, S. Mishima, D. P. Missaia, G. Mitselmakher, T. Mitsuhashi, J. Mnich, M. M. Najafabadi, R. N. Mohapatra, M. Mokhov, J. G. Molson, R. Monge, C. Montag, G. Montagna, S. Monteil, G. Montenero, E. Montesinos, F. Moortgat, N. Morange, G. Morello, M. M. Llácer, M. Moretti, S. Moretti, A. K. Morley, A. Moros, I. Morozov, V. Morretta, M. Morrone, A. Mostacci, S. Muanza, N. Muchnoi, M. Mühlegger, M. Mulder, M. Mulders, B. Müller, F. Müller, A.-S. Müller, J. Munilla, M. J. Murray, J. Muttoni, S. Myers, M. Mylonas, J. Nachtman, T. Nakamoto, M. Nardecchia, G. Nardini, P. Nason, Z. Nergiz, A. V. Nesterenko, J. A. Netto, A. Netzsträter, C. Neubüser, J. Neundorfer, F. Niccoli, O. Nicosini, Y. Nie, U. Niedermayer, J. Niedziela, A. Niemi, S. A. Nikitin, A. Nisati, J. M. No, M. Nonis, Y. Nosochkov, M. Novák, A. Novokhatskiy, J. M. O'Callaghan, C. Ochando, S. Ogur, K. Ohmi, K. Oide, V. A. Okorokov, Y. Okumura, C. Oleari, F. I. Olness, Y. Onel, M. Ortino, J. Osborne, P. Osland, T. Otto, K. Y. Oyulmaz, A. Ozansoy, V. Özcan, K. Özdemir, C. E. Pagliarone, H. F. P. da Silva, E. Palmieri, L. Palumbo, A. Pampaloni, R.-Q. Pan, M. Panareo, O. Panella, G. Panico, G. Panizzo, A. A. Pankov, V. Pansyrny, C. G. Papadopoulos, A. Papaefstathiou, Y. Papaphilippou, M. A. Parker, V. Parma, M. Pasquali, S. K. Patra, R. Patterson, H. Paukkunen, F. Pauss, S. Peggs, J.-P. Penttinen, G. Peón, E. E. Perepelkin, E. Perez, J. C. Perez, G. Perez, F. Pérez, E. P. Codina, J. P. Morales, M. Perflöv, H. Pernegger, M. Peruzzi, C. Pes, K. Peters, S. Petracca, F. Petriello, L. Pezzotti, S. Pfeiffer, F. Piccinini, T. Pieloni, M. Pierini, H. Pikhartova, G. Piskur, E. Pilicer, P. Piminov, C. Pira, R. Pittau, W. Placzek, M. Plagge, T. Plehn, M.-A. Pleier, M. Płoskoń, M. Pöder, H. Podleck, T. Podzorny, L. Poggioli, A. Poiran, G. Polese, M. P. Lener, A. Polini, J. Polinski, S. M. Polozov, L. Ponce, M. Pont, L. Pontecorvo, T. Portaluri, K. Potamianos,

- C. Prasse, M. Prausa, A. Preinerstorfer, E. Premat, T. Price, M. Primavera, F. Prino, M. Prioli, J. Proudfoot, A. Provino, T. Pugnaf, F. Pukhaeva, S. Pulawski, D. Pulikowski, G. Punzi, M. Putti, A. Pyarelal, H. Quack, M. Quispe, A. Racioppi, H. Rafique, V. Raginel, M. Raidal, N. S. Ramirez-Urbe, M. J. Ramsey-Musolf, R. Rata, P. Ratoff, F. Ravotti, P. R. Teles, M. Reboud, S. Redaelli, E. Renner, A. E. Rentería-Olivo, M. Rescigno, J. Reuter, A. Ribon, A. M. Ricci, W. Riegler, S. Riemann, B. Riemann, T. Riemann, J. M. Rifflet, R. A. Rimmer, R. Rinaldesi, L. Rinolfi, O. R. Rubiras, T. Risselada, A. Rivetti, L. Rivkin, T. Rizzo, T. Robens, F. Robert, A. J. Robson, E. Rochepault, C. Roda, G. Rodrigo, M. Rodríguez-Cahuantzi, C. Rogan, M. Roig, S. Rojas-Torres, J. Rojo, G. Rolandi, G. Rolando, P. Roloff, A. Romanenko, A. Romanov, F. Roncarolo, A. R. Sanchez, G. Rosaz, L. Rossi, A. Rossi, R. Rossmanith, B. Rousset, C. Royon, X. Ruan, I. Ruehl, V. Ruhlmann-Kleider, R. Ruiz, L. Rummyantsev, R. Ruprecht, A. I. Ryazanov, A. Saba, R. Sadykov, D. S. de Jauregui, M. Sahin, B. Sailer, M. Saito, F. Sala, G. P. Salam, J. Salfeld-Nebgen, C. A. Salgado, S. Salini, J. M. Sallèse, T. Salmi, A. Salzburger, O. A. Sampayo, S. Sanfilippo, J. Santiago, E. Santopinto, R. Santoro, A. S. Ull, X. Sarasola, I. H. Sarpün, M. Sauvain, S. Savel'yeva, R. Sawada, G. F. R. Sborlini, A. Schaffer, M. Schaumann, M. Schenk, C. Scheuerlein, I. Schienbein, K. Schlenga, H. Schmickler, R. Schmidt, D. Schoerling, A. Schoning, T. Schörner-Sadenius, M. Schott, D. Schulte, P. Schwaller, C. Schwanenberger, P. Schwemling, N. Schwerg, L. Scibile, A. Sciuto, E. Scomparin, C. Sebastiani, B. Seeber, M. Segreti, P. Selva, M. Selvaggi, C. Senatore, A. Senol, L. Serin, M. Serluca, N. Serra, A. Seryi, L. Sestini, A. Sfyrla, M. Shaposhnikov, E. Shaposhnikova, B. Y. Sharkov, D. Shatilov, J. Shelton, V. Shiltsev, I. P. Shipsey, G. D. Shirkov, A. Shivaji, D. Schwartz, T. Sian, S. Sidorov, A. Siemko, L. Silvestrini, N. Simand, F. Simon, B. K. Singh, A. Siódmok, Y. Sirois, E. Sirtori, R. Sirvinskaite, B. Sitar, T. Sjöstrand, P. Skands, E. Skordis, K. Skovpen, M. Skrzypek, E. Slade, P. Slavich, R. Slovak, V. Smaluk, V. Smirnov, W. Snoeys, L. Soffi, P. Sollander, O. Solovyanov, H. K. Soltveit, H. Song, P. Sopicki, M. Sorbi, L. Spallino, M. Spannowsky, B. Spataro, P. Sphicas, H. Spiesberger, P. Spiller, M. Spira, T. Srivastava, J. Stachel, A. Stakia, J. L. Stanyard, E. Starchenko, A. Y. Starikov, A. M. Staśto, M. Statera, R. Steerenberg, J. Steggemann, A. Stenvall, F. Stivanello, D. Stöckinger, L. S. Stoel, M. Stöger-Pollach, B. Strauss, M. Stuart, G. Stupakov, S. Su, A. Sublet, K. Sugita, L. Sulak, M. K. Sullivan, S. Sultansoy, T. Sumida, K. Suzuki, G. Sylva, M. J. Syphers, A. Sznajder, M. Tadorelli, N. A. Tahir, M. Takeuchi, E. T. Hod, C. Tambasco, J. Tanaka, K. Tang, I. Tapan, S. Taroni, G. F. Tartarelli, G. Tassielli, L. Taviani, T. M. Taylor, G. N. Taylor, A. M. Teixeira, G. Tejada-Muñoz, V. I. Telnov, R. Tenchini, H. H. J. ten Kate, K. Terashi, A. Tesi, M. Testa, C. Tetrel, D. Teytelman, J. Thaler, A. Thamm, S. Thomas, M. T. Tiirakari, V. Tikhomirov, D. Tikhonov, H. Timko, V. Tisserand, L. M. Tkachenko, J. Tkaczuk, J. P. Tock, B. Todd, E. Todesco, R. T. Garcia, D. Tommasini, G. Tonelli, F. Toral, T. Torims, R. Torre, Z. Townsend, R. Trant, D. Treille, L. Trentadue, A. Tricoli, A. Tricomi, W. Trischuk, I. S. Tropin, B. Tuchming, A. A. Tudora, B. Turbiar, I. T. Cakir, M. Turri, T. Tydecks, J. Usovitsch, J. Uythoven, R. Vaglio, A. Valassi, F. Valchova, M. A. V. Garcia, P. Valente, R. U. Valente, A.-M. Valente-Feliciano, G. Valentino, L. V. Silva, J. M. Valet, R. Valizadeh, J. W. F. Valle, S. Vallecorsa, G. Vallone, M. van Leeuwen, U. H. van Rienen, L. van Riesen-Haupt, M. Varasteh, L. Vecchi, P. Vedrine, G. Velev, R. Veness, A. Ventura, W. V. Delsolaro, M. Verducci, C. B. Verhaaren, C. Vernieri, A. P. Verweij, O. Verwilligen, O. Viaolo, A. Vicini, G. Viehhauser, N. Vignaroli, M. Vignolo, A. Vitrano, I. Vivarelli, S. Vlachos, M. Vogel, D. M. Vogt, V. Völk, P. Volkov, G. Volpini, J. von Ahnen, G. Vorotnikov, G. G. Voutsinas, V. Vysotsky, U. Wagner, R. Wallny, L.-T. Wang, R. Wang, K. Wang, B. F. L. Ward, T. P. Watson, N. K. Watson, Z. Ws, C. Weiland, S. Weinzierl, C. P. Welsch, J. Wenninger, M. Widorski, U. A. Wiedemann, H.-U. Wienands, G. Wilkinson, P. H. Williams, A. Winter, A. Wohlfahrt, T. Wojtoń, D. Wollmann, J. Womersley, D. Woog, X. Wu, A. Wulzer, M. K. Yanehsari, G. Yang, H. J. Yang, W.-M. Yao, E. Yazgan, V. Yermolchik, A. Yilmaz, A. Yilmaz, H.-D. Yoo, S. A. Yost, T. You, C. Young, T.-T. Yu, F. Yu, A. Zaborowska, S. G. Zadeh, M. Zahnd, M. Zanetti, L. Zanutto, L. Zawiejski, P. Zeiler, M. Zerlauth, S. M. Zernov, G. Z. D. Porta, Z. Zhang, Y. Zhang, C. Zhang, H. Zhang, Z. Zhao, Y.-M. Zhong, J. Zhou, D. Zhou, P. Zhuang, G. Zick, F. Zimmermann, J. Zinn-Justin, L. Zivkovic, A. V. Zlobin, M. Zobov, J. Zupan, J. Zurita, the FCC Collaboration, FCC-hh: The hadron collider, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **228**, 755–1107 (2019).
- J. Heron, L. Felsberger, C. Hernalsteens, C. Wiesner, D. Wollmann, J. Uythoven, F. Rodriguez Mateos, "Machine protection and availability in the FCC-ee" (CERN-ACC-NOTE-2023-0019, CERN, 13 November 2023); <https://cds.cern.ch/record/2880188>.
  - M. Di Castro, M. Ferre, A. Masi, CERNTAURO: A modular architecture for robotic inspection and telemanipulation in harsh and semi-structured environments. *IEEE Access* **6**, 37506–37522 (2018).
  - L. Attard, C. J. Debono, G. Valentino, M. Di Castro, Tunnel inspection using photogrammetric techniques and image processing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **144**, 180–188 (2018).
  - E. B. Holzer, B. Dehning, E. Effinger, J. Emery, V. Grishin, C. Hajdu, S. Jackson, C. Kurfuerst, A. Marsili, M. Misiowiec, M. Nagel, E. N. Del Busto, A. Nordt, C. Roderick, M. Sapinski, C. Zamantzas, Beam loss monitoring for LHC machine protection. *Phys. Procedia* **37**, 2055–2062 (2012).
  - M. Di Castro, M. L. B. Tambutti, M. Ferre, R. Losito, G. Lunghi, A. Masi, i-TIM: A robotic system for safety, measurements, inspection and maintenance in harsh environments, in *2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (IEEE, 2018), pp. 1–6.
  - K. A. Szczurek, R. M. Prades, E. Matheson, J. Rodriguez-Nogueira, M. Di Castro, Multimodal multi-user mixed reality human-robot interface for remote operations in hazardous environments. *IEEE Access* **11**, 17305–17333 (2023).
  - European Strategy Group, "2020 Update of the European Strategy for Particle Physics" (CERN, 2020); <https://cds.cern.ch/record/2720131>.

10.1126/scirobotics.adm7965

## High-tech guardians: Robotics at the heart of the Future Circular Collider

Hannes Gamper, Andreas Mueller, and Mario Di Castro

*Sci. Robot.* **9** (95), eadm7965. DOI: 10.1126/scirobotics.adm7965

### View the article online

<https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.adm7965>

### Permissions

<https://www.science.org/help/reprints-and-permissions>

Use of this article is subject to the [Terms of service](#)

---

*Science Robotics* (ISSN 2470-9476) is published by the American Association for the Advancement of Science, 1200 New York Avenue NW, Washington, DC 20005. The title *Science Robotics* is a registered trademark of AAAS.

Copyright © 2024 The Authors, some rights reserved; exclusive licensee American Association for the Advancement of Science. No claim to original U.S. Government Works