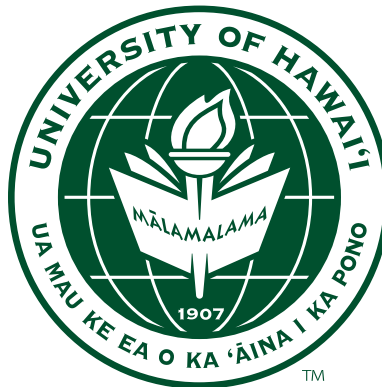


Development of a Pixelated Liquid Argon Time Projection Chamber Detector: Q-Pix

Dissertation by
Kevin Keefe

A DISSERTATION SUBMITTED TO THE GRADUATE DIVISION OF THE UNIVERSITY
OF HAWAI'I AT MĀNOA IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN
PHYSICS



KE KULANUI O HAWAI'I MA MĀNOA
Mānoa, Hawai'i

April 2023

Dissertation Committee:
Kurtis Nishimura

Chairpersons

Jason Kumar, John Learned, Scott Rowland, Peter Sadowski, Gary Varner

Keywords: Field Programmable Gate Array, Time Projection Chamber, Diffusion

© April 2023

Kevin Keefe
ORCID: 0000-0000

All rights reserved except where otherwise noted

ACKNOWLEDGEMENTS

ABSTRACT

The Standard Model (SM) of physics has proven remarkably successful in past decades, yet some measurements such as neutrino oscillations show that this model is still an incomplete description of nature. The hunt for New Physics (NP) continues at higher energies ($>> 1\text{GeV}$) with larger detectors ($\approx 10\text{kT}$); the data acquired continually hint at Beyond Standard Model (BSM) physics. One such future detector is The Deep Underground Neutrino (DUNE) detector, which has recently begun construction. This 40-kT scale detector requires high precision in both timing ($<< \mu\text{s}$) and spatial resolutions ($\approx 1\text{mm}$) for vertex reconstruction of interesting neutrino events. DUNE (as any beam detector) is a combination of two detectors, a near-detector (ND) and a far-detector (FD) for long-baseline neutrino oscillation measurements. In order to meet the required timing and spatial resolution the DUNE-FD is a Liquid Argon Time Projection Chamber (LArTPC) design. Recent work has been done to show that LArTPCs can transition from a traditional wire readout to a pixelated readout, and thus further improve vertex reconstruction. This dissertation discusses recent progress and characterizations of a novel implementation of new a pixelated LArTPC readout technology. This novel readout is based on a charge-integrate-reset circuit at the pixel level (Q-Pix). We present the basic pixel-level readout circuit and the implications such an implementation has when applied at DUNE-FD scales. Further, we demonstrate results from the first-prototype implementation based on Q-Pix has been successfully used with solely over-the-counter electronics to acquire new Liquid Argon diffusion measurements. One crucial problem of any pixelated readout is the the ability to handle a large number of unique data channels ($\approx 100\text{k}$). To address the scaling problem we developed and tested a modular digital back-end prototype, and implemented it within the first LArTPC prototype. Next, we discuss nominal DUNE-FD APA system level requirements to achieve a projected required sensitivity, remove backgrounds, pixel-level calibration techniques, and possible methods for particle-identification (PID). Simulation results are also performed based on projected background and high-energy neutrino beam-line events. Finally, based on these results of the prototypes and simulation we discuss the nominal digital back-end readout constraints of a fully realized QPix implementation for DUNE-FD APA.

TABLE OF CONTENTS

Acknowledgements	iii
Abstract	iv
Table of Contents	v
List of Illustrations	vii
List of Tables	viii
Chapter I: Introduction	1
1.1 Time Projection Chambers	1
1.2 DUNE	1
1.3 BSM Physics	1
Chapter II: A Novel Readout Technique for LArTPCs: QPix	2
2.1 Qpix Design	2
2.2 System Requirements	2
2.3 How QPix fits into a DUNE APA	2
2.4 Physical Simulation Studies	2
2.5 Background Rates and Calibration	2
2.6 Supernova Studies	2
2.7 Looking for Hadron Decay	2
2.8 Neutrino Beam High Energy Studies	2
2.9 Further Studies	2
Chapter III: Digital Back-end Characterization Studies	3
3.1 Digital Design Overview, System Requirements	3
3.2 A Review of the FSM outline	3
3.3 The Parameter Space of a Digital System.	3
3.4 Simulation Studies	3
3.5 QDB Design Overview	3
3.6 Power and Current Characteristics	3
3.7 Timing Stability	3
3.8 Analysis of Systematics for Different System Implementations	3
3.9 Summary	3
Chapter IV: New Diffusion Measurements: LArTPC Studies within SAQ	4
4.1 SAQ System Design	4
4.2 TPC Design	4
4.3 Measurements of Drift Current	4
4.4 LArTPC Diffusion background	4
4.5 Results	4
Chapter V: Summary and Outlook	5

Bibliography	6
Appendix A: SVSC OS1	17
Appendix B: SVSC OS2	18

LIST OF ILLUSTRATIONS

Number

Page

LIST OF TABLES

Number

Page

Chapter 1

INTRODUCTION

1.1 Time Projection Chambers

Time Projection Chambers ([1]) have been shown to be extremely useful in high energy physics experiments due, in part, to their high resolution in both timing and spatial dimensions.

A specific kind of TCP is a Liquid Argon Time Projection Chamber (LArTPC) [2].

recent work on LArTPCs ([3], [4], [5]).

Energy resolution of the LArTPCs within DUNE are still unknown to within a factor of 4 [6].

Additional work has been performed in recent years which show that LArTPCs can also utilized a pixel-based readout [7], [8].

1.2 DUNE

Conventional Horizontal Drift Detectors [9].

Conventional horizontal drift detection for foreseeable DUNE modules are already considered possible for lengths up to 6.5m [10].

Dune's interim Design report [11].

1.3 BSM Physics

Large Scale detectors hunting for New Physics (NP) have continued to grow in size, energy sensitivity, and importantly cost: [[12]].

Proton-Decay

Second generation proton decay studies in the icarus experiment: [13].

Supernova Studies

Neutrino Beam Studies

Chapter 2

A NOVEL READOUT TECHNIQUE FOR LARTPCS: QPIX

In this chapter we introduce a novel readout technology at the pixel level for LArTPCs. The basic readout circuit was first introduced by [14].

2.1 Qpix Design

Concept of this combined ASIC and reducing the number of channels relies on digital multiplexing. This differs from other concepts such as Genetic Multiplexing ([15]) and using only regions of interest (ROI).

Similar Designs: LArPix

2.2 System Requirements

2.3 How QPix fits into a DUNE APA

2.4 Physical Simulation Studies

2.5 Background Rates and Calibration

sources of backgrounds are taken from [9]

2.6 Supernova Studies

Work has been done to understand how a Q-Pix based DUNE-FD would measure core collapse supernovae [16].

Simulation studies which involved particle interactions were based on Geant4 [17].

2.7 Looking for Hadron Decay

2.8 Neutrino Beam High Energy Studies

2.9 Further Studies

Chapter 3

DIGITAL BACK-END CHARACTERIZATION STUDIES

- 3.1 Digital Design Overview, System Requirements**
- 3.2 A Review of the FSM outline**
- 3.3 The Parameter Space of a Digital System.**
- 3.4 Simulation Studies**
 - Buffer Depth Requirements**
- 3.5 QDB Design Overview**
- 3.6 Power and Current Characteristics**
- 3.7 Timing Stability**
- 3.8 Analysis of Systematics for Different System Implementations**
- 3.9 Summary**

Chapter 4

NEW DIFFUSION MEASUREMENTS: LARTPC STUDIES WITHIN SAQ

- 4.1 SAQ System Design**
- 4.2 TPC Design**
- 4.3 Measurements of Drift Current**
- 4.4 LArTPC Diffusion background**
- 4.5 Results**

Chapter 5

SUMMARY AND OUTLOOK

Recap of Qpix Requirements for DUNE APA here.

Recap of Qpix design concept testing within SAQ here.

Recap of QDB Results here

Recap of SAQ Results here

Discuss how combination of simulation / qdb / saq results motivate the next stage of development for QPix and incorporating the digital / analog ASICs for round two.

BIBLIOGRAPHY

- ¹J. N. Marx and D. R. Nygren, “The time projection chamber”, [Physics Today](#) **31**, 46–53 (1978).
- ²C. Rubbia, *The liquid-argon time projection chamber: a new concept for neutrino detectors*, tech. rep. (1977).
- ³R. Acciarri, C. Adams, J. Asaadi, B. Baller, T. Bolton, C. Bromberg, F. Cavanna, E. Church, D. Edmunds, A. Ereditato, S. Farooq, A. Ferrari, R. S. Fitzpatrick, B. Fleming, A. Hackenburg, G. Horton-Smith, C. James, K. Lang, M. Lantz, I. Lepetic, B. R. Littlejohn, X. Luo, R. Mehdiyev, B. Page, O. Palamara, B. Rebel, P. R. Sala, G. Scanavini, A. Schukraft, G. Smirnov, M. Soderberg, J. Spitz, A. M. Szec, M. Weber, W. Wu, T. Yang, and G. P. Zeller (ArgoNeuT Collaboration), “Demonstration of mev-scale physics in liquid argon time projection chambers using argoneut”, [Phys. Rev. D](#) **99**, 012002 (2019).
- ⁴R. Acciarri, C. Adams, R. An, A. Aparicio, S. Aponte, J. Asaadi, M. Auger, N. Ayoub, L. Bagby, B. Baller, R. Barger, G. Barr, M. Bass, F. Bay, K. Biery, M. Bishai, A. Blake, V. Bocean, D. Boehnlein, V. Bogert, T. Bolton, L. Bugel, C. Callahan, L. Camilleri, D. Caratelli, B. Carls, R. C. Fernandez, F. Cavanna, S. Chappa, H. Chen, K. Chen, C.-Y. Chi, C. Chiu, E. Church, D. Cianci, G. Collin, J. Conrad, M. Convery, J. Cornele, P. Cowan, J. Crespo-Anadón, G. Crutcher, C. Darve, R. Davis, M. D. Tutto, D. Devitt, S. Duffin, S. Dytman, B. Eberly, A. Ereditato, D. Erickson, L. E. Sanchez, J. Esquivel, S. Farooq, J. Farrell, D. Featherston, B. Fleming, W. Foreman, A. Furmanski, V. Genty, M. Geynisman, D. Goeldi, B. Goff, S. Gollapinni, N. Graf, E. Gramellini, J. Green, A. Greene, H. Greenlee, T. Griffin, R. Grosso, R. Guenette, A. Hackenburg, R. Haenni, P. Hamilton, P. Healey, O. Hen, E. Henderson, J. Hewes, C. Hill, K. Hill, L. Himes, J. Ho, G. Horton-Smith, D. Huffman, C. Ignarra, C. James, E. James, J. J. de Vries, W. Jaskierny, C.-M. Jen, L. Jiang, B. Johnson, M. Johnson, R. Johnson, B. Jones, J. Joshi, H. Jostlein, D. Kaleko, L. Kalousis, G. Karagiorgi, T. Katori, P. Kellogg, W. Ketchum, J. Kilmer, B. King, B. Kirby, M. Kirby, E. Klein, T. Kobilarcik, I. Kreslo, R. Krull, R. Kubinski, G. Lange, F. Lanni, A. Lathrop, A. Laube, W. Lee, Y. Li, D. Lissauer, A. Lister, B. Littlejohn, S. Lockwitz, D. Lorca, W. Louis, G. Lukhanin, M. Luethi, B. Lundberg, X. Luo, G. Mahler, I. Majoros, D. Makowiecki, A. Marchionni, C. Mariani, D. Markley, J. Marshall, D. M. Caicedo, K. McDonald, D. McKee, A. McLean, J. Mead, V. Meddage, T. Miceli, G. Mills, W. Miner, J. Moon, M. Mooney, C. Moore, Z. Moss, J. Mousseau, R. Murrells, D. Naples, P. Nienaber, B. Norris, N. Norton, J. Nowak, M. O’Boyle, T. Olszanowski, O. Palamara, V. Paolone, V. Papavassiliou, S. Pate, Z. Pavlovic, R. Pelkey, M. Phipps, S. Pordes, D. Porzio, G. Pulliam, X. Qian, J. Raaf, V. Radeka, A. Rafique,

R. A. Rameika, B. Rebel, R. Rechenmacher, S. Rescia, L. Rochester, C. R. von Rohr, A. Ruga, B. Russell, R. Sanders, W. S. III, M. Sarychev, D. Schmitz, A. Schukraft, R. Scott, W. Seligman, M. Shaevitz, M. Shoun, J. Sinclair, W. Sippach, T. Smidt, A. Smith, E. Snider, M. Soderberg, M. Solano-Gonzalez, S. Söldner-Rembold, S. Soleti, J. Sondericker, P. Spentzouris, J. Spitz, J. S. John, T. Strauss, K. Sutton, A. Szelc, K. Taheri, N. Tagg, K. Tatem, J. Teng, K. Terao, M. Thomson, C. Thorn, J. Tillman, M. Toups, Y.-T. Tsai, S. Tufanli, T. Usher, M. Utes, R. V. de Water, C. Vendetta, S. Vergani, E. Voirin, J. Voirin, B. Viren, P. Watkins, M. Weber, T. Wester, J. Weston, D. Wickremasinghe, S. Wolbers, T. Wongjirad, K. Woodruff, K. Wu, T. Yang, B. Yu, G. Zeller, J. Zennamo, C. Zhang, and M. Zuckerbrot, “Design and construction of the microboone detector”, [Journal of Instrumentation](#) **12**, P02017 (2017).

⁵R. Acciarri, C. Adams, J. Asaadi, M. Backfish, W. Badgett, B. Baller, O. B. Rodrigues, F. Blaszczyk, R. Bouabid, C. Bromberg, R. Carey, R. C. Fernandez, F. Cavanna, J. C. Aleman, A. Chatterjee, P. Dedin, M. dos Santos, D. Edmunds, M. Elkins, C. Escobar, J. Esquivel, J. Evans, A. Falcone, A. Farbin, W. Flanagan, B. Fleming, W. Foreman, D. Garcia-Gamez, D. Gastler, T. Ghosh, R. Gomes, E. Gramellini, R. Gran, D. Gratieri, P. Guzowski, A. Habig, A. Hahn, P. Hamilton, C. Hill, J. Ho, A. Holin, J. Hugon, E. Iwai, D. Jensen, R. Johnson, H. Jostlein, H. Kawai, E. Kearns, E. Kemp, M. Kirby, T. Kobilarcik, M. Kordosky, P. Kryczyński, K. Lang, R. Linehan, S. Lockwitz, X. Luo, A. Machado, A. Marchionni, T. Maruyama, L. M. Santos, W. Metcalf, C. Moura, R. Nichol, I. Nutini, A. Olivier, O. Palamara, J. Paley, I. Parmaksiz, B. P. Gelli, L. Paulucci, D. Phan, G. Pulliam, J. Raaf, B. Rebel, M. R. Guzzo, M. Ross-Lonergan, M. S. Nunes, D. W. Schmitz, E. Segreto, D. Sessumes, S. Shahsavarani, D. Shooltz, D. Smith, M. Soderberg, B. Soubasis, F. Spagliardi, J. S. John, M. Stancari, D. Stefan, M. Stephens, R. Sulej, A. Szelc, M. Tabata, D. Totani, M. Tzanov, G. Valdivieso, D. Walker, H. Wenzel, Z. Williams, T. Yang, J. Yu, G. Zeller, S. Zhang, and J. Zhu, “The liquid argon in a testbeam (lariat) experiment”, [Journal of Instrumentation](#) **15**, P04026 (2020).

⁶A. Friedland and S. W. Li, “Understanding the energy resolution of liquid argon neutrino detectors”, [Phys. Rev. D](#) **99**, 036009 (2019).

⁷D. Dwyer, M. Garcia-Sciveres, D. Gnani, C. Grace, S. Kohn, M. Kramer, A. Krieger, C. Lin, K. Luk, P. Madigan, C. Marshall, H. Steiner, and T. Stezelberger, “Larpix: demonstration of low-power 3d pixelated charge readout for liquid argon time projection chambers”, [Journal of Instrumentation](#) **13**, P10007 (2018).

- ⁸J. Asaadi, M. Auger, A. Ereditato, D. Goeldi, R. Hänni, U. Kose, I. Kreslo, D. Lorca, M. Luethi, C. R. von Rohr, J. Sinclair, F. Stocker, C. Tognina, and M. Weber, “A pixelated charge readout for liquid argon time projection chambers”, [Journal of Instrumentation](#) **13**, C02008 (2018).
- ⁹B. Abi, R. Acciarri, M. Acero, G. Adamov, D. Adams, M. Adinolfi, Z. Ahmad, J. Ahmed, T. Alion, S. A. Monsalve, C. Alt, J. Anderson, C. Andreopoulos, M. Andrews, F. Andrianala, S. Andringa, A. Ankowski, M. Antonova, S. Antusch, A. Aranda-Fernandez, A. Ariga, L. Arnold, M. Arroyave, J. Asaadi, A. Aurisano, V. Aushev, D. Autiero, F. Azfar, H. Back, J. Back, C. Backhouse, P. Baesso, L. Bagby, R. Bajou, S. Balasubramanian, P. Baldi, B. Bambah, F. Barao, G. Barenboim, G. Barker, W. Barkhouse, C. Barnes, G. Barr, J. B. Monarca, N. Barros, J. Barrow, A. Bashyal, V. Basque, F. Bay, J. B. Alba, J. Beacom, E. Bechetoille, B. Behera, L. Bellantoni, G. Bellettini, V. Bellini, O. Beltramello, D. Belver, N. Benekos, F. B. Neves, J. Berger, S. Berkman, P. Bernardini, R. Berner, H. Berns, S. Bertolucci, M. Betancourt, Y. Bezawada, M. Bhattacharjee, B. Bhuyan, S. Biagi, J. Bian, M. Biassoni, K. Biery, B. Bilki, M. Bishai, A. Bitadze, A. Blake, B. B. Siffert, F. Blaszczyk, G. Blazey, E. Blucher, J. Boissevain, S. Bolognesi, T. Bolton, M. Bonesini, M. Bongrand, F. Bonini, A. Booth, C. Booth, S. Bordonni, A. Borkum, T. Boschi, N. Bostan, P. Bour, S. Boyd, D. Boyden, J. Bracinik, D. Braga, D. Brailsford, A. Brandt, J. Bremer, C. Brew, E. Brienne, S. Brice, C. Brizzolari, C. Bromberg, G. Brooijmans, J. Brooke, A. Bross, G. Brunetti, N. Buchanan, H. Budd, D. Caiulo, P. Calafiura, J. Calcutt, M. Calin, S. Calvez, E. Calvo, L. Camilleri, A. Caminata, M. Campanelli, D. Caratelli, G. Carini, B. Carlus, P. Carniti, I. C. Terrazas, H. Carranza, A. Castillo, C. Castromonte, C. Cattadori, F. Cavalier, F. Cavanna, S. Centro, G. Cerati, A. Cervelli, A. C. Villanueva, M. Chalifour, C. Chang, E. Chardonnet, A. Chatterjee, S. Chattopadhyay, J. Chaves, H. Chen, M. Chen, Y. Chen, D. Cherdack, C. Chi, S. Childress, A. Chiriacescu, K. Cho, S. Choubey, A. Christensen, D. Christian, G. Christodoulou, E. Church, P. Clarke, T. Coan, A. Cocco, J. Coelho, E. Conley, J. Conrad, M. Convery, L. Corwin, P. Cotte, L. Cremaldi, L. Cremonesi, J. Crespo-Anadón, E. Cristaldo, R. Cross, C. Cuesta, Y. Cui, D. Cussans, M. Dabrowski, H. D. Motta, L. D. S. Peres, Q. David, G. Davies, S. Davini, J. Dawson, K. De, R. D. Almeida, P. Debbins, I. D. Bonis, M. Decowski, A. D. Gouvea, P. D. Holanda, I. D. I. Astiz, A. Deisting, P. D. Jong, A. Delbart, D. Delepine, M. Delgado, A. Dell’Acqua, P. D. Lurgio, J. D. M. Neto, D. DeMuth, S. Dennis, C. Densham, G. Deptuch, A. D. Roeck, V. D. Romeri, J. D. Vries, R. Dharmapalan, M. Dias, F. Diaz, J. Diaz, S. D. Domizio, L. D. Giulio, P. Ding, L. D. Noto, C. Distefano, R. Diurba, M. Diwan, Z. Djurcic, N. Dokania, M. Dolinski, L. Domine, D. Douglas, F. Drielsma, D. Duchesneau, K. Duffy, P. Dunne, T. Durkin, H. Duyang, O. Dvornikov, D. Dwyer, A. Dyshkant, M. Eads, D. Edmunds, J. Eisch, S. Emery, A. Ereditato, C. Escobar, L. E. Sanchez, J. Evans, E. Ewart, A. Ezeribe, K. Fahey, A. Falcone, C. Farnese, Y. Farzan, J. Felix, E.

Fernandez-Martinez, P. F. Menendez, F. Ferraro, L. Fields, A. Filkins, F. Filthaut, R. Fitzpatrick, W. Flanagan, B. Fleming, R. Flight, J. Fowler, W. Fox, J. Franc, K. Francis, D. Franco, J. Freeman, J. Freestone, J. Fried, A. Friedland, S. Fuess, I. Furic, A. Furmanski, A. Gago, H. Gallagher, A. Gallego-Ros, N. Gallice, V. Galymov, E. Gamberini, T. Gamble, R. Gandhi, R. Gandrajula, S. Gao, D. Garcia-Gamez, M. García-Peris, S. Gardiner, D. Gastler, G. Ge, B. Gelli, A. Gendotti, S. Gent, Z. Ghorbani-Moghaddam, D. Gibin, I. Gil-Botella, C. Girerd, A. Giri, D. Gnani, O. Gogota, M. Gold, S. Gollapinni, K. Gollwitzer, R. Gomes, L. G. Bermeo, L. G. Fajardo, F. Gonnella, J. Gonzalez-Cuevas, M. Goodman, O. Goodwin, S. Goswami, C. Gotti, E. Goudzovski, C. Grace, M. Graham, E. Gramellini, R. Gran, E. Granados, A. Grant, C. Grant, D. Gratieri, P. Green, S. Green, L. Greenler, M. Greenwood, J. Greer, C. Griffith, M. Groh, J. Grudzinski, K. Grzelak, W. Gu, V. Guarino, R. Guenette, A. Guglielmi, B. Guo, K. Guthikonda, R. Gutierrez, P. Guzowski, M. Guzzo, S. Gwon, A. Habig, A. Hackenburg, H. Hadavand, R. Haenni, A. Hahn, J. Haigh, J. Haiston, T. Hamernik, P. Hamilton, J. Han, K. Harder, D. Harris, J. Hartnell, T. Hasegawa, R. Hatcher, E. Hazen, A. Heavey, K. Heeger, K. Hennessy, S. Henry, M. H. Morquecho, K. Herner, L. Hertel, A. Hesam, J. Hewes, A. H. Pichardo, T. Hill, S. Hillier, A. Himmel, J. Hoff, C. Hohl, A. Holin, E. Hoppe, G. Horton-Smith, M. Hostert, A. Hourlier, B. Howard, R. Howell, J. Huang, J. Huang, J. Hugon, G. Iles, A. Iliescu, R. Illingworth, A. Ioannisian, R. Itay, A. Izmaylov, E. James, B. Jargowsky, F. Jediny, C. Jesús-Valls, X. Ji, L. Jiang, S. Jiménez, A. Jipa, A. Joglekar, C. Johnson, R. Johnson, B. Jones, S. Jones, C. Jung, T. Junk, Y. Jwa, M. Kabirnezhad, A. Kaboth, I. Kadenko, F. Kamiya, G. Karagiorgi, A. Karcher, M. Karolak, Y. Karyotakis, S. Kasai, S. Kasetti, L. Kashur, N. Kazaryan, E. Kearns, P. Keener, K. Kelly, E. Kemp, W. Ketchum, S. Kettell, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, A. Khvedelidze, D. Kim, B. King, B. Kirby, M. Kirby, J. Klein, K. Koehler, L. Koerner, S. Kohn, P. Koller, M. Kordosky, T. Kosc, U. Kose, V. Kosteletzky, K. Kothekar, F. Krennrich, I. Kreslo, Y. Kudenko, V. Kudryavtsev, S. Kulagin, J. Kumar, R. Kumar, C. Kuruppu, V. Kus, T. Kutter, A. Lambert, K. Lande, C. Lane, K. Lang, T. Langford, P. Lasorak, D. Last, C. Lastoria, A. Landrie, A. Lawrence, I. Lazanu, R. LaZur, T. Le, J. Learned, P. LeBrun, G. L. Miotto, R. Lehnert, M. L. de Oliveira, M. Leitner, M. Leyton, L. Li, S. Li, S. Li, T. Li, Y. Li, H. Liao, C. Lin, S. Lin, A. Lister, B. Littlejohn, J. Liu, S. Lockwitz, T. Loew, M. Lokajicek, I. Lomidze, K. Long, K. Loo, D. Lorca, T. Lord, J. LoSecco, W. Louis, K. Luk, X. Luo, N. Lurkin, T. Lux, V. Luzio, D. MacFarland, A. Machado, P. Machado, C. Macias, J. Macier, A. Maddalena, P. Madigan, S. Magill, K. Mahn, A. Maio, J. Maloney, G. Mandrioli, J. Maneira, L. Manenti, S. Manly, A. Mann, K. Manolopoulos, M. M. Plata, A. Marchionni, W. Marciano, D. Marfatia, C. Mariani, J. Maricic, F. Marinho, A. Marino, M. Marshak, C. Marshall, J. Marshall, J. Marteau, J. Martin-Albo, N. Martinez, D. M. Caicedo, S. Martynenko, K. Mason, A. Mastbaum, M. Masud,

S. Matsuno, J. Matthews, C. Mauger, N. Mauri, K. Mavrokoridis, R. Mazza, A. Mazzacane, E. Mazzucato, E. McCluskey, N. McConkey, K. McFarland, C. McGrew, A. McNab, A. Mefodiev, P. Mehta, P. Melas, M. Mellinato, O. Mena, S. Menary, H. Mendez, A. Menegolli, G. Meng, M. Messier, W. Metcalf, M. Mewes, H. Meyer, T. Miao, G. Michna, T. Miedema, J. Migenda, R. Milincic, W. Miller, J. Mills, C. Milne, O. Mineev, O. Miranda, S. Miryala, C. Mishra, S. Mishra, A. Mislivec, D. Mladenov, I. Mocioiu, K. Moffat, N. Moggi, R. Mohanta, T. Mohayai, N. Mokhov, J. Molina, L. M. Bueno, A. Montanari, C. Montanari, D. Montanari, L. M. Zetina, J. Moon, M. Mooney, A. Moor, D. Moreno, B. Morgan, C. Morris, C. Mossey, E. Motuk, C. Moura, J. Mousseau, W. Mu, L. Mualem, J. Mueller, M. Muether, S. Mufson, F. Muheim, A. Muir, M. Mulhearn, H. Muramatsu, S. Murphy, J. Musser, J. Nachtman, S. Nagu, M. Nalbandyan, R. Nandakumar, D. Naples, S. Narita, D. Navas-Nicolás, N. Nayak, M. Nebot-Guinot, L. Necib, K. Negishi, J. Nelson, J. Nesbit, M. Nessi, D. Newbold, M. Newcomer, D. Newhart, R. Nichol, E. Niner, K. Nishimura, A. Norman, R. Northrop, P. Novella, J. Nowak, M. Oberling, A. O. D. Campo, A. Olivier, Y. Onel, Y. Onishchuk, J. Ott, L. Pagani, S. Pakvasa, O. Palamara, S. Palestini, J. Paley, M. Pallavicini, C. Palomares, E. Pantic, V. Paolone, V. Papadimitriou, R. Papaleo, A. Papanestis, S. Paramesvaran, S. Parke, Z. Parsa, M. Parvu, S. Pascoli, L. Pasqualini, J. Pasternak, J. Pater, C. Patrick, L. Patrizii, R. Patterson, S. Patton, T. Patzak, A. Paudel, B. Paulos, L. Paulucci, Z. Pavlovic, G. Pawloski, D. Payne, V. Pec, S. Peeters, Y. Penichot, E. Pennacchio, A. Penzo, O. Peres, J. Perry, D. Pershey, G. Pessina, G. Petrillo, C. Petta, R. Petti, F. Piastra, L. Pickering, F. Pietropaolo, J. Pillow, R. Plunkett, R. Poling, X. Pons, N. Poonthottathil, S. Pordes, M. Potekhin, R. Potenza, B. Potukuchi, J. Pozimski, M. Pozzato, S. Prakash, T. Prakash, S. Prince, G. Prior, D. Pugnere, K. Qi, X. Qian, J. Raaf, R. Raboanary, V. Radeka, J. Rademacker, B. Radics, A. Rafique, E. Raguzin, M. Rai, M. Rajaoalisoa, I. Rakhno, H. Rakotondramanana, L. Rakotondravohitra, Y. Ramachers, R. Rameika, M. R. Delgado, B. Ramson, A. Rappoldi, G. Raselli, P. Ratoff, S. Ravat, H. Razafinime, J. Real, B. Rebel, D. Redondo, M. Reggiani-Guzzo, T. Rehak, J. Reichenbacher, S. Reitzner, A. Renshaw, S. Rescia, F. Resnati, A. Reynolds, G. Riccobene, L. Rice, K. Rielage, Y. Rigaut, D. Rivera, L. Rochester, M. Roda, P. Rodrigues, M. R. Alonso, J. R. Rondon, A. Roeth, H. Rogers, S. Rosauro-Alcaraz, M. Rossella, J. Rout, S. Roy, A. Rubbia, C. Rubbia, B. Russell, J. Russell, D. Ruterbories, R. Saakyan, S. Sacerdoti, T. Safford, N. Sahu, P. Sala, N. Samios, M. Sanchez, D. Sanders, D. Sankey, S. Santana, M. Santos-Maldonado, N. Saoulidou, P. Sapienza, C. Sarasty, I. Sarcevic, G. Savage, V. Savinov, A. Scaramelli, A. Scarff, A. Scarpelli, T. Schaffer, H. Schellman, P. Schlabach, D. Schmitz, K. Scholberg, A. Schukraft, E. Segreto, J. Sensenig, I. Seong, A. Sergi, F. Sergiampietri, D. Sgalaberna, M. Shaevitz, S. Shafaq, M. Shamma, H. Sharma, R. Sharma, T. Shaw, C. Shepherd-Themistocleous, S. Shin, D. Shooltz, R. Shrock, L.

Simard, N. Simos, J. Sinclair, G. Sinev, J. Singh, J. Singh, V. Singh, R. Sipos, F. Sippach, G. Sirri, A. Sitraka, K. Siyeon, D. Smargianaki, A. Smith, A. Smith, E. Smith, P. Smith, J. Smolik, M. Smy, P. Snopok, M. S. Nunes, H. Sobel, M. Soderberg, C. S. Salinas, S. Söldner-Rembold, N. Solomey, V. Solovov, W. Sondheim, M. Sorel, J. Soto-Oton, A. Sousa, K. Soustruznik, F. Spagliardi, M. Spanu, J. Spitz, N. Spooner, K. Spurgeon, R. Staley, M. Stancari, L. Stanco, H. Steiner, J. Stewart, B. Stillwell, J. Stock, F. Stocker, T. Stokes, M. Strait, T. Strauss, S. Striganov, A. Stuart, D. Summers, A. Surdo, V. Susic, L. Suter, C. Suter, R. Svoboda, B. Szczerbinska, A. Szcl, R. Talaga, H. Tanaka, B. T. Oregui, A. Tapper, S. Tariq, E. Tatar, R. Tayloe, A. Teklu, M. Tenti, K. Terao, C. Ternes, F. Terranova, G. Testera, A. Thea, J. Thompson, C. Thorn, S. Timm, A. Tonazzo, M. Torti, M. Tortola, F. Tortorici, D. Totani, M. Troups, C. Touramanis, J. Trevor, W. Trzaska, Y. Tsai, Z. Tsamalaidze, K. Tsang, N. Tsverava, S. Tufanli, C. Tull, E. Tyley, M. Tzanov, M. Uchida, J. Urheim, T. Usher, M. Vagins, P. Vahle, G. Valdivieso, E. Valencia, Z. Vallari, J. Valle, S. Vallecorsa, R. V. Berg, R. V. de Water, D. V. Forero, F. Varanini, D. Vargas, G. Varner, J. Vasel, G. Vasseur, K. Vaziri, S. Ventura, A. Verdugo, S. Vergani, M. Vermeulen, M. Verzocchi, H. V. de Souza, C. Vignoli, C. Vilela, B. Viren, T. Vrba, T. Wachala, A. Waldron, M. Wallbank, H. Wang, J. Wang, Y. Wang, Y. Wang, K. Warburton, D. Warner, M. Wascko, D. Waters, A. Watson, P. Weatherly, A. Weber, M. Weber, H. Wei, A. Weinstein, D. Wenman, M. Wetstein, M. While, A. White, L. Whitehead, D. Whittington, M. Wilking, C. Wilkinson, Z. Williams, F. Wilson, R. Wilson, J. Wolcott, T. Wongjirad, K. Wood, L. Wood, E. Worcester, M. Worcester, C. Wret, W. Wu, W. Wu, Y. Xiao, G. Yang, T. Yang, N. Yershov, K. Yonehara, T. Young, B. Yu, J. Yu, J. Zalesak, L. Zambelli, B. Zamorano, A. Zani, L. Zazueta, G. Zeller, J. Zennaro, K. Zeug, C. Zhang, M. Zhao, E. Zhivun, G. Zhu, E. Zimmerman, M. Zito, S. Zucchelli, J. Zuklin, V. Zutshi, and R. Zwaska, “Volume iv. the dune far detector single-phase technology”, [Journal of Instrumentation](#) **15**, T08010 (2020).

¹⁰L. Paulucci and on behalf of DUNE collaboration, “The dune vertical drift photon detection system”, [Journal of Instrumentation](#) **17**, C01067 (2022).

¹¹B. Abi, R. Acciarri, M. A. Acero, G. Adamov, D. Adams, M. Adinolfi, Z. Ahmad, J. Ahmed, T. Alion, S. A. Monsalve, C. Alt, J. Anderson, C. Andreopoulos, M. P. Andrews, F. Andrianala, S. Andringa, A. Ankowski, J. Anthony, M. Antonova, S. Antusch, A. A. Fernandez, A. Ariga, L. O. Arnold, M. A. Arroyave, J. Asaadi, A. Aurisano, V. Aushev, D. Autiero, F. Azfar, H. Back, J. J. Back, C. Backhouse, P. Baesso, L. Bagby, R. Bajou, S. Balasubramanian, P. Baldi, B. Bambah, F. Barao, G. Barenboim, G. J. Barker, W. Barkhouse, C. Barnes, G. Barr, J. B. Monarca, N. Barros, J. L. Barrow, A. Bashyal, V. Basque, F. Bay, J. L. B. Alba, J. F. Beacom, E. Bechetoille, B. Behera, L. Bellantoni, G. Bellettini, V. Bellini, O. Beltramello, D. Beller, N.

Benekos, F. B. Neves, J. Berger, S. Berkman, P. Bernardini, R. M. Berner, H. Berns, S. Bertolucci, M. Betancourt, Y. Bezawada, M. Bhattacharjee, B. Bhuyan, S. Biagi, J. Bian, M. Biassoni, K. Biery, B. Bilki, M. Bishai, A. Bitadze, A. Blake, B. B. Siffert, F. D. M. Blaszczyk, G. C. Blazey, E. Blucher, J. Boissevain, S. Bolognesi, T. Bolton, M. Bonesini, M. Bongrand, F. Bonini, A. Booth, C. Booth, S. Bordoni, A. Borkum, T. Boschi, N. Bostan, P. Bour, S. B. Boyd, D. Boyden, J. Bracinik, D. Braga, D. Brailsford, A. Brandt, J. Bremer, C. Brew, E. Brianne, S. J. Brice, C. Brizzolari, C. Bromberg, G. Brooijmans, J. Brooke, A. Bross, G. Brunetti, N. Buchanan, H. Budd, D. Caiulo, P. Calafiura, J. Calcutt, M. Calin, S. Calvez, E. Calvo, L. Camilleri, A. Caminata, M. Campanelli, D. Caratelli, G. Carini, B. Carlus, P. Carniti, I. C. Terrazas, H. Carranza, A. Castillo, C. Castromonte, C. Cattadori, F. Cavalier, F. Cavanna, S. Centro, G. Cerati, A. Cervelli, A. C. Villanueva, M. Chalifour, C. Chang, E. Chardonnet, A. Chatterjee, S. Chattopadhyay, J. Chaves, H. Chen, M. Chen, Y. Chen, D. Cherdack, C. Chi, S. Childress, A. Chiriacescu, K. Cho, S. Choubey, A. Christensen, D. Christian, G. Christodoulou, E. Church, P. Clarke, T. E. Coan, A. G. Cocco, J. A. B. Coelho, E. Conley, J. M. Conrad, M. Convery, L. Corwin, P. Cotte, L. Cremaldi, L. Cremonesi, J. I. Crespo-Anadon, E. Cristaldo, R. Cross, C. Cuesta, Y. Cui, D. Cussans, M. Dabrowski, H. da Motta, L. D. S. Peres, Q. David, G. S. Davies, S. Davini, J. Dawson, K. De, R. M. De Almeida, P. Debbins, I. De Bonis, M. P. Decowski, A. de Gouvea, P. C. De Holanda, I. L. D. I. Astiz, A. Deisting, P. De Jong, A. Delbart, D. Delepine, M. Delgado, A. Dell'Acqua, P. De Lurgio, J. R. T. d. M. Neto, D. M. DeMuth, S. Dennis, C. Densham, G. Deptuch, A. De Roeck, V. De Romeri, J. J. De Vries, R. Dharmapalan, F. Diaz, J. S. Diaz, S. Di Domizio, L. Di Giulio, P. Ding, L. Di Noto, C. Distefano, R. Diurba, M. Diwan, Z. Djurcic, N. Dokania, M. J. Dolinski, L. Domine, D. Douglas, F. Drielsma, D. Duchesneau, K. Duffy, P. Dunne, T. Durkin, H. Duyang, O. Dvornikov, D. A. Dwyer, A. S. Dyshkant, M. Eads, D. Edmunds, J. Eisch, S. Emery, A. Ereditato, C. O. Escobar, L. E. Sanchez, J. J. Evans, E. Ewart, A. C. Ezeribe, K. Fahey, A. Falcone, C. Farnese, Y. Farzan, J. Felix, E. Fernandez-Martinez, P. F. Menendez, F. Ferraro, L. Fields, A. Filkins, F. Filthaut, R. S. Fitzpatrick, W. Flanagan, B. Fleming, R. Flight, J. Fowler, W. Fox, J. Franc, K. Francis, D. Franco, J. Freeman, J. Freestone, J. Fried, A. Friedland, S. Fuess, I. Furic, A. P. Furmanski, A. Gago, H. Gallagher, A. Gallego-Ros, N. Gallice, V. Galymov, E. Gamberini, T. Gamble, R. Gandhi, R. Gandrajula, S. Gao, D. Garcia-Gamez, M. Á. Garcia-Peris, S. Gardiner, D. Gastler, G. Ge, B. Gelli, A. Gendotti, S. Gent, Z. Ghorbani-Moghaddam, D. Gibin, I. Gil-Botella, C. Girerd, A. K. Giri, D. Gnani, O. Gogota, M. Gold, S. Gollapinni, K. Gollwitzer, R. A. Gomes, L. V. G. Bermeo, L. S. G. Fajardo, F. Gonnella, J. A. Gonzalez-Cuevas, M. C. Goodman, O. Goodwin, S. Goswami, C. Gotti, E. Goudzovski, C. Grace, M. Graham, E. Gramellini, R. Gran, E. Granados, A. Grant, C. Grant, D. Gratieri, P. Green, S. Green, L.

Greenler, M. Greenwood, J. Greer, W. C. Griffith, M. Groh, J. Grudzinski, K. Grzelak, W. Gu, V. Guarino, R. Guenette, A. Guglielmi, B. Guo, K. K. Guthikonda, R. Gutierrez, P. Guzowski, M. M. Guzzo, S. Gwon, A. Habig, A. Hackenburg, H. Hadavand, R. Haenni, A. Hahn, J. Haigh, J. Haiston, T. Hamernik, P. Hamilton, J. Han, K. Harder, D. A. Harris, J. Hartnell, T. Hasegawa, R. Hatcher, E. Hazen, A. Heavey, K. M. Heeger, K. Hennessy, S. Henry, M. A. H. Morquecho, K. Herner, L. Hertel, A. S. Hesam, J. Hewes, A. Higuera, T. Hill, S. J. Hillier, A. Himmel, J. Hoff, C. Hohl, A. Holin, E. Hoppe, G. A. Horton-Smith, M. Hostert, A. Hourlier, B. Howard, R. Howell, J. Huang, J. Huang, J. Hugon, G. Iles, A. M. Iliescu, R. Illingworth, A. Ioannisian, R. Itay, A. Izmaylov, E. James, B. Jargowsky, F. Jediny, C. Jesus-Valls, X. Ji, L. Jiang, S. Jiménez, A. Jipa, A. Joglekar, C. Johnson, R. Johnson, B. Jones, S. Jones, C. K. Jung, T. Junk, Y. Jwa, M. Kabirnezhad, A. Kaboth, I. Kadenko, F. Kamiya, G. Karagiorgi, A. Karcher, M. Karolak, Y. Karyotakis, S. Kasai, S. P. Kasetti, L. Kashur, N. Kazaryan, E. Kearns, P. Keener, K. J. Kelly, E. Kemp, W. Ketchum, S. H. Kettell, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, A. Khvedelidze, D. Kim, B. King, B. Kirby, M. Kirby, J. Klein, K. Koehler, L. W. Koerner, S. Kohn, P. P. Koller, M. Kordosky, T. Kosc, U. Kose, V. A. Kostelecky, K. Kothekar, F. Krennrich, I. Kreslo, Y. Kudenko, V. A. Kudryavtsev, S. Kulagin, J. Kumar, R. Kumar, C. Kuruppu, V. Kus, T. Kutter, A. Lambert, K. Lande, C. E. Lane, K. Lang, T. Langford, P. Lasorak, D. Last, C. Lastoria, A. Laundrie, A. Lawrence, I. Lazanu, R. LaZur, T. Le, J. Learned, P. LeBrun, G. L. Miotto, R. Lehnert, M. A. L. de Oliveira, M. Leitner, M. Leyton, L. Li, S. Li, S. W. Li, T. Li, Y. Li, H. Liao, C. S. Lin, S. Lin, A. Lister, B. R. Littlejohn, J. Liu, S. Lockwitz, T. Loew, M. Lokajicek, I. Lomidze, K. Long, K. Loo, D. Lorca, T. Lord, J. M. LoSecco, W. C. Louis, K. B. Luk, X. Luo, N. Lurkin, T. Lux, V. P. Luzio, D. MacFarland, A. A. Machado, P. Machado, C. T. Macias, J. R. Macier, A. Maddalena, P. Madigan, S. Magill, K. Mahn, A. Maio, J. A. Maloney, G. Mandrioli, J. Maneira, L. Manenti, S. Manly, A. Mann, K. Manolopoulos, M. M. Plata, A. Marchionni, W. Marciano, D. Marfatia, C. Mariani, J. Maricic, F. Marinho, A. D. Marino, M. Marshak, C. Marshall, J. Marshall, J. Marteau, J. Martin-Albo, N. Martinez, D. A. M. Caicedo, S. Martynenko, K. Mason, A. T. Mastbaum, M. Masud, S. Matsuno, J. Matthews, C. Mauger, N. Mauri, K. Mavrokoridis, R. Mazza, A. Mazzacane, E. Mazzucato, E. McCluskey, N. McConkey, K. S. McFarland, C. McGrew, A. McNab, A. Mefodiev, P. Mehta, P. Melas, M. Mellinato, O. Mena, S. Menary, L. M. Santos, H. Mendez, A. Menegolli, G. Meng, M. D. Messier, W. Metcalf, M. Mewes, H. Meyer, T. Miao, G. Michna, T. Miedema, J. Migenda, R. Milincic, W. Miller, J. Mills, C. Milne, O. Mineev, O. G. Miranda, S. Miryala, C. S. Mishra, S. R. Mishra, A. Mislivec, D. Mladenov, I. Mocioiu, K. Moffat, N. Moggi, R. Mohanta, T. A. Mohayai, N. Mokhov, J. Molina, L. M. Bueno, A. Montanari, C. Montanari, D. Montanari, L. M. M. Zetina, J. Moon, M. Mooney, A. Moor,

D. Moreno, B. Morgan, C. Morris, C. Mossey, E. Motuk, C. A. Moura, J. Mousseau, W. Mu, L. Mualem, J. Mueller, M. Muether, S. Mufson, F. Muheim, A. Muir, M. Mulhearn, H. Muramatsu, S. Murphy, J. Musser, J. Nachtman, S. Nagu, M. Nalbandyan, R. Nandakumar, D. Naples, S. Narita, D. Navas-Nicolas, N. Nayak, M. Nebot-Guinot, L. Necib, K. Negishi, J. K. Nelson, J. Nesbit, M. Nessi, D. Newbold, M. Newcomer, D. Newhart, R. Nichol, E. Niner, K. Nishimura, A. Norman, R. Northrop, P. Novella, J. A. Nowak, M. Oberling, A. O. Del Campo, A. Olivier, Y. Onel, Y. Onishchuk, J. Ott, L. Pagani, S. Pakvasa, O. Palamara, S. Palestini, J. M. Paley, M. Pallavicini, C. Palomares, E. Pantic, V. Paolone, V. Papadimitriou, R. Papaleo, A. Papanestis, S. Paramesvaran, S. Parke, Z. Parsa, M. Parvu, S. Pascoli, L. Pasqualini, J. Pasternak, J. Pater, C. Patrick, L. Patrizii, R. B. Patterson, S. J. Patton, T. Patzak, A. Paudel, B. Paulos, L. Paulucci, Z. Pavlovic, G. Pawloski, D. Payne, V. Pec, S. J. M. Peeters, Y. Penichot, E. Pennacchio, A. Penzo, O. L. G. Peres, J. Perry, D. Pershey, G. Pessina, G. Petrillo, C. Petta, R. Petti, F. Piastra, L. Pickering, F. Pietropaolo, J. Pillow, R. Plunkett, R. Poling, X. Pons, N. Poonthottathil, S. Pordes, M. Potekhin, R. Potenza, B. V. K. S. Potukuchi, J. Pozimski, M. Pozzato, S. Prakash, T. Prakash, S. Prince, D. Pugnere, K. Qi, X. Qian, J. L. Raaf, R. Raboanary, V. Radeka, J. Rademacker, B. Radics, A. Rafique, E. Raguzin, M. Rai, M. Rajaoalisoa, I. Rakhno, H. T. Rakotondramanana, L. Rakotondravohitra, Y. A. Ramachers, R. Rameika, M. A. R. Delgado, B. Ramson, A. Rappoldi, G. Raselli, P. Ratoff, S. Ravat, H. Razafinime, J. S. Real, B. Rebel, D. Redondo, M. Reggiani-Guzzo, T. Rehak, J. Reichenbacher, S. D. Reitzner, A. Renshaw, S. Rescia, F. Resnati, A. Reynolds, G. Riccobene, L. C. J. Rice, K. Rielage, Y. Rigaut, D. Rivera, L. Rochester, M. Roda, P. Rodrigues, M. J. R. Alonso, J. R. Rondon, A. J. Roeth, H. Rogers, S. Rosauero-Alcaraz, M. Rossella, J. Rout, S. Roy, A. Rubbia, C. Rubbia, B. Russell, J. Russell, D. Ruterbories, R. Saakyan, S. Sacerdoti, T. Safford, N. Sahu, P. Sala, N. Samios, M. C. Sanchez, D. A. Sanders, D. Sankey, S. Santana, M. Santos-Maldonado, N. Saoulidou, P. Sapienza, C. Sarasty, I. Sarcevic, G. Savage, V. Savinov, A. Scaramelli, A. Scarff, A. Scarpelli, T. Schaffer, H. Schellman, P. Schlabach, D. Schmitz, K. Scholberg, A. Schukraft, E. Segreto, J. Sensenig, I. Seong, A. Sergi, F. Sergiampietri, D. Sgalaberna, M. H. Shaevitz, S. Shafaq, M. Shamma, H. R. Sharma, R. Sharma, T. Shaw, C. Shepherd-Themistocleous, S. Shin, D. Shooltz, R. Shrock, L. Simard, N. Simos, J. Sinclair, G. Sinev, J. Singh, J. Singh, R. Sipos, F. W. Sippach, G. Sirri, A. Sitraka, K. Siyeon, D. Smargianaki, A. Smith, A. Smith, E. Smith, P. Smith, J. Smolik, M. Smy, P. Snopok, M. S. Nunes, H. Sobel, M. Soderberg, C. J. S. Salinas, S. Soldner-Rembold, N. Solomey, V. Solovov, W. E. Sondheim, M. Sorel, J. Soto-Oton, A. Sousa, K. Soustruznik, F. Spaggiardi, M. Spanu, J. Spitz, N. J. Spooner, K. Spurgeon, R. Staley, M. Stancari, L. Stanco, H. M. Steiner, J. Stewart, B. Stillwell, J. Stock, F. Stocker, T. Stokes, M. Strait, T. Strauss, S. Striganov, A. Stuart, D. Summers, A. Surdo, V.

Susic, L. Suter, C. M. Suter, R. Svoboda, B. Szczerbinska, A. Szec, R. Talaga, H. A. Tanaka, B. T. Oregui, A. Tapper, S. Tariq, E. Tatar, R. Tayloe, A. M. Teklu, M. Tenti, K. Terao, C. A. Ternes, F. Terranova, G. Testera, A. Thea, J. L. Thompson, C. Thorn, S. C. Timm, A. Tonazzo, M. Torti, M. Tortola, F. Tortorici, D. Totani, M. Toups, C. Touramanis, J. Trevor, W. H. Trzaska, Y. T. Tsai, Z. Tsamalaidze, K. V. Tsang, N. Tsverava, S. Tufanli, C. Tull, E. Tyley, M. Tzanov, M. A. Uchida, J. Urheim, T. Usher, M. R. Vagins, P. Vahle, G. A. Valdivieso, E. Valencia, Z. Vallari, J. W. F. Valle, S. Vallecorsa, R. Van Berg, R. G. Van de Water, D. V. Forero, F. Varanini, D. Vargas, G. Varner, J. Vassel, G. Vasseur, K. Vaziri, S. Ventura, A. Verdugo, S. Vergani, M. A. Vermeulen, M. Verzocchi, H. V. de Souza, C. Vignoli, C. Vilela, B. Viren, T. Vrba, T. Wachala, A. V. Waldron, M. Wallbank, H. Wang, J. Wang, Y. Wang, Y. Wang, K. Warburton, D. Warner, M. Wascko, D. Waters, A. Watson, P. Weatherly, A. Weber, M. Weber, H. Wei, A. Weinstein, D. Wenman, M. Wetstein, M. R. While, A. White, L. H. Whitehead, D. Whittington, M. J. Wilking, C. Wilkinson, Z. Williams, F. Wilson, R. J. Wilson, J. Wolcott, T. Wongjirad, K. Wood, L. Wood, E. Worcester, M. Worcester, C. Wret, W. Wu, W. Wu, Y. Xiao, G. Yang, T. Yang, N. Yershov, K. Yonehara, T. Young, B. Yu, J. Yu, J. Zalesak, L. Zambelli, B. Zamorano, A. Zani, L. Zazueta, G. P. Zeller, J. Zennaro, K. Zeug, C. Zhang, M. Zhao, E. Zhivun, G. Zhu, E. D. Zimmerman, M. Zito, S. Zucchelli, J. Zuklin, V. Zutshi, and R. Zwaska, *Deep underground neutrino experiment (dune), far detector technical design report, volume ii: dune physics*, 2020.

¹²“Juno physics and detector”, [Progress in Particle and Nuclear Physics](#) **123**, 103927 (2022).

¹³F. Arneodo, *The icarus experiment, a second-generation proton decay experiment and neutrino observatory at the gran sasso laboratory*, 2001.

¹⁴D. Nygren and Y. Mei, *Q-pix: pixel-scale signal capture for kiloton liquid argon tpc detectors: time-to-charge waveform capture, local clocks, dynamic networks*, 2018.

¹⁵S. Procureur, R. Dupré, and S. Aune, “Genetic multiplexing and first results with a 50×50cm² micromegas”, [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#) **729**, 888–894 (2013).

¹⁶S. Kubota, J. Ho, A. D. McDonald, N. Tata, J. Asaadi, R. Guenette, J. B. R. Battat, D. Braga, M. Demarteau, Z. Djurcic, M. Febbraro, E. Gramellini, S. Kohani, C. Mauger, Y. Mei, F. M. Newcomer, K. Nishimura, D. Nygren, R. Van Berg, G. S. Varner, and K. Woodworth (Q-Pix Collaboration), “Enhanced low-energy supernova burst detection in large liquid argon time projection chambers enabled by q-pix”, [Phys. Rev. D](#) **106**, 032011 (2022).

- ¹⁷S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytrcek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell’Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O’Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J. Wellisch, T. Wenaus, D. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, and D. Zschesche, “Geant4—a simulation toolkit”, [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#) **506**, 250–303 (2003).

Appendix A

SVSC OS1

Appendix B

SVSC OS2