# JUNO实验顶部径迹探测器

Angel Abusleme[f,e], Thomas Adam[as], Shakeel Ahmad[bq], Rizwan Ahmed[bq], Sebastiano Aiello[bf], Muhammad Akram[bq], Abid Aleem[bq], Tsagkarakis Alexandros[ay], Fengpeng An[u], Qi An[w], Giuseppe Andronico[bf], Nikolay Anfimov[br], Vito Antonelli[bh], Tatiana Antoshkina[br], Burin Asavapibhop[bv], João Pedro Athayde Marcondes de André[as,*], Didier Auguste[aq], Weidong Bai[u], Nikita Balashov[br], Wander Baldini[bg], Andrea Barresi[bi], Davide Basilico[bh], Eric Baussan[as], Marco Bellato[bk], Marco Beretta[bh], Antonio Bergnoli[bk], Daniel Bick[az], Thilo Birkenfeld[ay], Sylvie Blin[av], David Blum[be], Simon Blyth[k], Anastasia Bolshakova[br], Mathieu Bongrand[au], Clément Bordereau[ar,an], Dominique Breton[aq], Augusto Brigatti[bh], Riccardo Brugnera[bl], Riccardo Bruno[bf], Antonio Budano[bo], Jose Busto[at], Anatael Cabrera[aq], Barbara Caccianiga[bh], Hao Cai[ah], Xiao Cai[k], Yanke Cai[k], Zhiyan Cai[k], Stéphane Callier[ar], Antonio Cammi[bj], Agustin Campeny[f,e], Chuanya Cao[k], Guofu Cao[k], Jun Cao[k], Rossella Caruso[bf], Cédric Cerna[ar], Vanessa Cerrone[bl,bk], Chi Chan[al], Jinfan Chang[k], Yun Chang[am], Chao Chen[k], Guoming Chen[ab], Pingping Chen[s], Shaomin Chen[n], Yixue Chen[l], Yu Chen[u], Zhiyuan Chen[k], Zikang Chen[u], Jie Cheng[l], Yaping Cheng[h], Yu Chin Cheng[an], Alexander Chepurnov[bt], Alexey Chetverikov[br], Davide Chiesa[bi], Pietro Chimenti[c], Ziliang Chu[k], Artem Chukanov[br], Gérard Claverie[ar], Catia Clementi[bm], Barbara Clerbaux[b], Marta Colomer Molla[b], Selma Conforti Di Lorenzo[ax], Alberto Coppi[bl,bk], Daniele Corti[bk], Flavio Dal Corso[bk], Olivia Dalager[by], Christophe De La Taille[ax], Zhi Deng[n], Ziyan Deng[k], Wilfried Depnering[bb], Marco Diaz[f], Xuefeng Ding[k], Yayun Ding[k], Bayu Dirgantara[bx], Sergey Dmitrievsky[br], Tadeas Dohnal[ao], Dmitry Dolzhikov[br], Georgy Donchenko[bt], Jianmeng Dong[n], Evgeny Doroshkevich[bs], Wei Dou[n], Marcos Dracos[as,*], Olivier Drapier[aw], Frédéric Druillole[ar], Ran Du[k], Shuxian Du[ak], Katherine Dugas[by], Stefano Dusini[bk], Hongyue Duyang[z], Jessica Eck[be], Timo Enqvist[ap], Andrea Fabbri[bo], Ulrike Fahrendholz[bc], Lei Fan[k], Jian Fang[k], Wenxing Fang[k], Marco Fargetta[bf], Dmitry Fedoseev[br], Zhengyong Fei[k], Giulietto Felici[bn], Li-Cheng Feng[al], Qichun Feng[v], Federico Ferraro[bh], Amélie Fournier[ar], Haonan Gan[af], Feng Gao[ay], Alberto Garfagnini[bl], Arsenii Gavrikov[bl,bk], Vladimir Gerasimov[br], Marco Giammarchi[bh], Nunzio Giudice[bf], Maxim Gonchar[br], Guanghua Gong[n], Hui Gong[n], Yuri Gornushkin[br], Alexandre Göttel[ba,ay], Marco Grassi[bl], Maxim Gromov[bt], Vasily Gromov[br], Minghao Gu[k], Xiaofei Gu[ak], Yu Gu[t], Mengyun Guan[k], Yuduo Guan[k], Nunzio Guardone[bf], Cong Guo[k], Wanlei Guo[k], Xinheng Guo[i], Yuhang Guo[ai], Semen Gursky[br], Caren Hagner[az], Ran Han[h], Yang Han[u], Miao He[k], Wei He[k], Tobias Heinz[be], Patrick Hellmuth[ar], Yuekun Heng[k], Rafael Herrera[f,e], YuenKeung Hor[u], Shaojing Hou[k], Yee Hsiung[an], Bei-Zhen Hu[an], Hang Hu[u], Jianrun Hu[k], Jun Hu[k], Shouyang Hu[j], Tao Hu[k], Yuxiang Hu[k], Zhuojun Hu[u], Guihong Huang[y], Hanxiong Huang[j], Jinhao Huang[k], Kaixuan Huang[u], Wenhao Huang[z], Qinhua Huang[aw,as], Xin Huang[k], XingtaoHuang[z], Yongbo Huang[ab], Jiaqi Hui[ad],Lei Huo[v],Wenju Huo[w],CédricHuss[ar],SafeerHussain[bq],AraIoannisian[a], Roberto Isocrate[bk], Beatrice Jelmini[bl], Ignacio Jeria[f], Xiaolu Ji[k], Huihui Jia[ag], Junji Jia[ah], Siyu Jian[j], Di Jiang[w], Wei Jiang[k], Xiaoshan Jiang[k], Xiaoping Jing[k], Cécile Jollet[ar], Leonidas Kalousis[as], Philipp Kampmann[bd,ba], Li Kang[s], Rebin Karaparambil[as], Narine Kazarian[a], Ali Khan[bq], Amina Khatun[bu], Khanchai Khosonthongkee[bx], Denis Korablev[br], Konstantin Kouzakov[bt], Alexey Krasnoperov[br], Sergey Kuleshov[e], Nikolay Kutovskiy[br], Pasi Kuusiniemi[ap], Tobias Lachenmaier[be], Cecilia Landini[bh], Sébastien Leblanc[ar], Victor Lebrin[au], Frederic Lefevre[au], Ruiting Lei[s], Rupert Leitner[ao], Jason Leung[al], Demin Li[ak], Fei Li[k], Fule Li[n], Gaosong Li[k], Huiling Li[k], Mengzhao Li[k], Min Li[k], Nan Li[q], Qingjiang Li[q], Ruhui Li[k], Rui Li[ad], Shanfeng Li[s], Tao Li[u], Teng Li[z], Weidong Li[k,o], Weiguo Li[k], Xiaomei Li[j], Xiaonan Li[k], Xinglong Li[j], Yi Li[s], Yichen Li[k], Yufeng Li[k], Zepeng Li[k], Zhaohan Li[k], Zhibing Li[u], Ziyuan Li[u], Zonghai Li[ah], Hao Liang[j], Hao Liang[w], Jiajun Liao[u], Ayut Limphirat[bx], Guey-Lin Lin[al], Shengxin Lin[s], Tao Lin[k], Jiajie Ling[u], Ivano Lippi[bk], Caimei Liu[k], Fang Liu[l], Haidong Liu[ak], Haotian Liu[ah], Hongbang Liu[ab], Hongjuan Liu[x], Hongtao Liu[u], Hui Liu[t], Jianglai Liu[ad,ae], Jiaxi Liu[k], Jinchang Liu[k], Min Liu[x], Qian Liu[o], Qin Liu[w], Runxuan Liu[ba,ay], Shenghui Liu[k], Shubin Liu[w], Shulin Liu[k], Xiaowei Liu[u], Xiwen Liu[ab], Yankai Liu[ai], Yunzhe Liu[k], Alexey Lokhov[bt,bs], Paolo Lombardi[bh], Claudio Lombardo[bf], Kai Loo[bb], Chuan Lu[af], Haoqi Lu[k], Jingbin Lu[p], Junguang Lu[k], Peizhi Lu[u], Shuxiang Lu[ak], Bayarto Lubsandorzhiev[bs], Sultim Lubsandorzhiev[bs], Livia Ludhova[ba,ay], Arslan Lukanov[bs], Daibin Luo[k], Fengjiao Luo[x], Guang Luo[u], Jianyi Luo[u], Shu Luo[aj], Wuming Luo[k], Xiaojie Luo[k], Vladimir Lyashuk[bs], Bangzheng Ma[z], Bing Ma[ak], Qiumei Ma[k], Si Ma[k], Xiaoyan Ma[k], Xubo Ma[l], Jihane Maalmi[aq], Marco Magoni[bh], Jingyu Mai[u], Yury Malyshkin[bd,ba], Roberto Carlos Mandujano[by], Fabio Mantovani[bg], Xin Mao[h], Yajun Mao[m], Stefano M. Mari[bo], Filippo Marini[bl], Agnese Martini[bn], Matthias Mayer[bc], Davit Mayilyan[a], Ints Mednieks[bp], Yue Meng[ad], Anita Meraviglia[bd,ba,ay], Anselmo Meregaglia[ar], Emanuela Meroni[bh], David Meyhöfer[az], Jonathan Miller[g], Lino Miramonti[bh], Paolo Montini[bo], Michele Montuschi[bg], Axel Müller[be], Massimiliano Nastasi[bi], Dmitry V. Naumov[br], Elena Naumova[br], Diana Navas-Nicolas[aq], Igor Nemchenok[br], Minh Thuan Nguyen Thi[al], Alexey Nikolaev[bt], Feipeng Ning[k], Zhe Ning[k], Hiroshi Nunokawa[d], Lothar Oberauer[bc], Juan Pedro Ochoa-Ricoux[by,f,e], Alexander Olshevskiy[br], Domizia Orestano[bo], Fausto Ortica[bm], Rainer Othegraven[bb], Alessandro Paoloni[bn], Sergio Parmeggiano[bh], Yatian Pei[k], Luca Pelicci[ba,ay], Anguo Peng[x], Haiping Peng[w], Yu Peng[k], Zhaoyuan Peng[k], Frédéric Perrot[ar], Pierre-Alexandre Petitjean[b], Fabrizio Petrucci[bo], Oliver Pilarczyk[bb], Luis Felipe Piñeres Rico[as], Artyom Popov[bt], Pascal Poussot[as], Ezio Previtali[bi], Fazhi Qi[k], Ming Qi[aa], Sen Qian[k], Xiaohui Qian[k], Zhen Qian[u], Hao Qiao[m], Zhonghua Qin[k], Shoukang Qiu[x], Gioacchino Ranucci[bh], Reem Rasheed[ar], Alessandra Re[bh], Abdel Rebii[ar], Mariia Redchuk[bk], Bin Ren[s], Jie Ren[j], Barbara Ricci[bg], Mariam Rifai[ba,ay], Mathieu Roche[ar], Narongkiat Rodphai[k], Aldo Romani[bm], Victor Romanov[br], Bedˇrich Roskovec[ao], Xichao Ruan[j], Arseniy Rybnikov[br], Andrey Sadovsky[br], Paolo Saggese[bh], Deshan Sandanayake[as], Simone Sanfilippo[bo], Anut Sangka[bw], Utane Sawangwit[bw], Julia Sawatzki[bc], Michaela Schever[ba,ay], Jacky Schuler[as], Cédric Schwab[as], Konstantin Schweizer[bc], Alexandr Selyunin[br], Andrea Serafini[bl], Giulio Settanta[ba], Mariangela Settimo[au], Vladislav Sharov[br], Arina Shaydurova[br], Jingyan Shi[k], Yanan Shi[k], Vitaly Shutov[br], Andrey

arXiv:2303.05172v1 [hep-ex] 9 Mar 2023

Sidorenkov[bs], Fedor Šimkovic[bu], Chiara Sirignano[bl], Jaruchit Siripak[bx], Monica Sisti[bi], Maciej Slupecki[ap], Mikhail Smirnov[u], Oleg Smirnov[br], Thiago Sogo-Bezerra[au], Sergey Sokolov[br], Julanan Songwadhana[bx], Boonrucksar Soonthornthum[bw], Albert Sotnikov[br], Ondˇrej Šrámek[ao], Warintorn Sreethawong[bx], Achim Stahl[ay], Luca Stanco[bk], Konstantin Stankevich[bt], Dušan Štefánik[bu], Hans Steiger[bb,bc], Jochen Steinmann[ay], Tobias Sterr[be], Matthias Raphael Stock[bc], Virginia Strati[bg], Alexander Studenikin[bt], Jun Su[u], Shifeng Sun[l], Xilei Sun[k], Yongjie Sun[w], Yongzhao Sun[k], Zhengyang Sun[ae], Narumon Suwonjandee[bv], Michal Szelezniak[as], Akira Takenaka[ae], Jian Tang[u], Qiang Tang[u], Quan Tang[x], Xiao Tang[k], Vidhya Thara Hariharan[az], Eric Theisen[bb], Alexander Tietzsch[be], Igor Tkachev[bs], Tomas Tmej[ao], Marco Danilo Claudio Torri[bh], Francesco Tortorici[bf], Konstantin Treskov[br], Andrea Triossi[bl], Riccardo Triozzi[bl,bk], Giancarlo Troni[f], Wladyslaw Trzaska[ap], Yu-Chen Tung[an], Cristina Tuve[bf], Nikita Ushakov[bs], Vadim Vedin[bp], Giuseppe Verde[bf], Maxim Vialkov[bt], Benoit Viaud[au], Cornelius Moritz Vollbrecht[ba,ay], Katharina von Sturm[bl], Vit Vorobel[ao], Dmitriy Voronin[bs], Lucia Votano[bn], Pablo Walker[f,e], Caishen Wang[s], Chung-Hsiang Wang[am], En Wang[ak], Guoli Wang[v], Jian Wang[w], Jun Wang[u], Lu Wang[k], Meng Wang[x], Meng Wang[z], Ruiguang Wang[k], Siguang Wang[m], Wei Wang[u], Wenshuai Wang[k], Xi Wang[q], Xiangyue Wang[u], Yangfu Wang[k], Yaoguang Wang[k], Yi Wang[k], Yi Wang[n], Yifang Wang[k], Yuanqing Wang[n], Zhe Wang[n], Zheng Wang[k], Zhimin Wang[k], Apimook Watcharangkool[bw], Wei Wei[k], Wei Wei[z], Wenlu Wei[k], Yadong Wei[s], Kaile Wen[k], Liangjian Wen[k], Jun Weng[n], Christopher Wiebusch[ay], Rosmarie Wirth[az], Bjoern Wonsak[az], Diru Wu[k], Qun Wu[z], Zhi Wu[k], Michael Wurm[bb], Jacques Wurtz[as], Christian Wysotzki[ay], Yufei Xi[af], Dongmei Xia[r], Xiang Xiao[u], Xiaochuan Xie[ab], Yuguang Xie[k], Zhangquan Xie[k], Zhao Xin[k], Zhizhong Xing[k], Benda Xu[n], Cheng Xu[x], Donglian Xu[ae,ad], Fanrong Xu[t], Hangkun Xu[k], Jilei Xu[k], Jing Xu[j], Meihang Xu[k], Yin Xu[ag], Yu Xu[u], Baojun Yan[k], Qiyu Yan[o], Taylor Yan[bx], Xiongbo Yan[k], Yupeng Yan[bx], Changgen Yang[k], Chengfeng Yang[ab], Jie Yang[ak], Lei Yang[s], Xiaoyu Yang[k], Yifan Yang[k], Yifan Yang[b], Haifeng Yao[k], Jiaxuan Ye[k], Mei Ye[k], Ziping Ye[ae], Frédéric Yermia[au], Zhengyun You[u], Boxiang Yu[k], Chiye Yu[s], Chunxu Yu[ag], Guojun Yu[aa], Hongzhao Yu[u], Miao Yu[ah], Xianghui Yu[ag], Zeyuan Yu[k], Zezhong Yu[k], Cenxi Yuan[u], Chengzhuo Yuan[k], Ying Yuan[m], Zhenxiong Yuan[n], Baobiao Yue[u], Noman Zafar[bq], Vitalii Zavadskyi[br], Shan Zeng[k], Tingxuan Zeng[k], Yuda Zeng[u], Liang Zhan[k], Aiqiang Zhang[n], Bin Zhang[ak], Binting Zhang[k], Feiyang Zhang[ad], Haosen Zhang[k], Honghao Zhang[u], Jialiang Zhang[aa], Jiawen Zhang[k], Jie Zhang[k], Jin Zhang[ab], Jingbo Zhang[v], Jinnan Zhang[k], Mohan Zhang[k], Peng Zhang[k], Qingmin Zhang[ai], Shiqi Zhang[u], Shu Zhang[u], Shuihan Zhang[k], Tao Zhang[ad], Xiaomei Zhang[k], Xin Zhang[k], Xuantong Zhang[k], Yinhong Zhang[k], Yiyu Zhang[k], Yongpeng Zhang[k], Yu Zhang[k], Yuanyuan Zhang[ae], Yumei Zhang[u], Zhenyu Zhang[ah], Zhijian Zhang[s], Jie Zhao[k], Rong Zhao[u], Runze Zhao[k], Shujun Zhao[ak], Dongqin Zheng[t], Hua Zheng[s], Yangheng Zheng[o], Weirong Zhong[t], Jing Zhou[j], Li Zhou[k], Nan Zhou[w], Shun Zhou[k], Tong Zhou[k], Xiang Zhou[ah], Jingsen Zhu[ac], Kangfu Zhu[ai], Kejun Zhu[k], Zhihang Zhu[k], Bo Zhuang[k], Honglin Zhuang[k], Liang Zong[n], Jiaheng Zou[k], Sebastian Zwickel[bc]

[a]埃里温物理研究所，埃里温，亚美尼亚[b]布鲁塞尔自由大学，布鲁塞尔，比利时[c]隆德里纳州立大学，隆德里纳，巴西[d]里约热内卢天主教宗座大学，里约热内卢，巴西[e]高能前沿亚原子物理千年研究所（*SAPHIR*），*ANID*，智利[f]智利天主教宗座大学，圣地亚哥，智利[g]费德里科·圣玛丽亚技术大学，瓦尔帕莱索，智利[h]北京航天器环境工程研究所，北京，中国[i]北京师范大学，北京，中国[j]中国原子能科学研究院，北京，中国[k]高能物理研究所，北京，中国[l]华北电力大学，北京，中国[m]北京大学物理学院，北京，中国[n]清华大学，北京，中国[o]中国科学院大学，北京，中国[p]吉林大学，长春，中国[q]国防科技大学电子科学与工程学院，长沙，中国[r]重庆大学，重庆，中国[s]东莞理工学院，东莞，中国[t]暨南大学，广州，中国[u]中山大学，广州，中国[v]哈尔滨工业大学，哈尔滨，中国[w]中国科学技术大学，合肥，中国[x]南华大学放射化学与核化学研究组，衡阳，中国[y]五邑大学，江门，中国[z]山东大学，济南，中国，以及山东大学教育部粒子物理与粒子辐照重点实验室，青岛，中国 *aa*南京大学，南京，中国 *ab*广西大学，南宁，中国 *ac*华东理工大学，上海，中国 *ad*上海交通大学物理与天文学院，上海，中国 *ae*上海交通大学李政道研究所，上海，中国 *af*中国地质科学院水文地质与环境地质研究所，石家庄，中国 *ag*南开大学，天津，中国 *ah*武汉大学，武汉，中国

*ai*西安交通大学，西安，中国 *aj*厦门大学，厦门，中国 *ak*郑州大学物理与微电子学院，郑州，中国 *al*国立阳明交通大学物理研究所，新竹 *am*国立联合大学，苗栗 *an*国立台湾大学物理系，台北 *ao*查理大学数学与物理学院，布拉格，捷克共和国 *ap*于韦斯屈莱大学物理系，于韦斯屈莱，芬兰 *aqIJCLab*，巴黎萨克雷大学，法国国家科学研究中心/*IN2P3*，*91405* 奥赛，法国 *ar*波尔多大学，法国国家科学研究中心，*LP2i*，*UMR5797*，*F-33170* 格拉迪尼昂，*F-33170* 格拉迪尼昂，法国 *asIPHC*，斯特拉斯堡大学，法国国家科学研究中心/*IN2P3*，*F-67037* 斯特拉斯堡，法国 *at*马赛粒子物理中心，马赛，法国 *auSUBATECH*，南特大学，*IMTAtlantique*，*CNRS-IN2P3*，南特，法国 *avAPC*，巴黎大学，法国国家科学研究中心/*IN2P3*，*F-75013* 巴黎，法国 *awLLR*，巴黎综合理工学院，法国国家科学研究中心/*IN2P3*，*F-91120* 帕莱索，法国 *axOMEGA*，巴黎综合理工学院，法国国家科学研究中心/*IN2P3*，*F-91120* 帕莱索，法国 *ayIII.* 亚琛工业大学*B*物理研究所，亚琛，德国 *az*汉堡大学实验物理研究所，汉堡，德国 *ba*于利希研究中心，核物理研究所*IKP-2*，于利希，德国 *bb*美因茨约翰内斯·古腾堡大学物理研究所和*EC PRISMA*⁺，美因茨，德国 *bc*慕尼黑工业大学，慕尼黑，德国 *bd*亥姆霍兹重离子研究中心，普朗克街*1*号，*D-64291* 达姆施塔特，德国 *be*蒂宾根埃伯哈德·卡尔斯大学，物理研究所，蒂宾根，德国 *bf*卡塔尼亚国家核物理研究所和卡塔尼亚大学物理与天文系，卡塔尼亚，意大利 *bg*费拉拉大学物理与地球科学系和帕多瓦国家核物理研究所分部，费拉拉，意大利 *bh*米兰国家核物理研究所分部和米兰大学物理系，米兰，意大利 *bi*米兰比可卡国家核物理研究所和米兰比可卡大学，米兰，意大利 *bj*米兰比可卡国家核物理研究所和米兰理工大学，米兰，意大利 *bk*帕多瓦国家核物理研究所分部，帕多瓦，意大利 *bl*帕多瓦大学物理与天文系和帕多瓦国家核物理研究所分部，帕多瓦，意大利 *bm*佩鲁贾国家核物理研究所分部和佩鲁贾大学化学、生物学与生物技术系，佩鲁贾，意大利 *bn*意大利国家核物理研究所弗拉斯卡蒂国家实验室，罗马，意大利 *bo*罗马第三大学和罗马第三大学国家核物理研究所分部，罗马，意大利 *bp*电子与计算机科学研究所，里加，拉脱维亚 *bq*巴基斯坦核科学与技术研究所，伊斯兰堡，巴基斯坦 *br*联合核研究所，杜布纳，俄罗斯 *bs*俄罗斯科学院核研究所，莫斯科，俄罗斯 *bt*莫斯科国立罗蒙诺索夫大学，莫斯科，俄罗斯 *bu*布拉迪斯拉发夸美纽斯大学数学、物理与信息学院，布拉迪斯拉发，斯洛伐克 *bv*朱拉隆功大学理学院物理系，曼谷，泰国 *bw*泰国国家天文研究所，清迈，泰国 *bx*素兰拉工业大学，呵叻，泰国 *by*加利福尼亚大学欧文分校物理与天文系，加利福尼亚，美国

**摘要**

江门地下中微子实验（JUNO）这一中微子反应堆实验的顶部径迹探测器，主要用于重建大气缪子径迹并将其向下外推至中心探测器。该缪子径迹探测器将有助于评估宇宙成因本底对信号的贡献。顶部径迹探测器位于江门地下中微子实验的水切伦科夫探测器和中心探测器上方，覆盖其上方约 60% 的区域。江门地下中微子实验的顶部径迹探测器由已退役的 OPERA 实验靶跟踪器模块构成。所采用的技术包括由两个平面组成的墙，每个平面由塑料闪烁体条构成，分别沿一个横向方向排列。波长转换光纤收集闪烁体条发出的光信号，并将其传导至两端，由多阳极光电倍增管读取。与 OPERA 靶跟踪器相比，江门地下中微子实验的顶部径迹探测器采用了新型电子学，以应对高岩石放射性所产生的高计数率；格兰萨索地下实验室的岩石放射性则相对较低。本文将介绍为江门地下中微子实验顶部径迹探测器研发的新型电子学和机械结构，并基于当前的探测器模拟展示其预期性能。

关键词：J 江门中微子实验、顶部径迹探测器、塑料闪烁体、光电倍增管、光电倍增管、多阳极、波长转换光纤、中微子、缪子 ns

*通讯作者电子邮箱地址：jpandre@iphc.cnrs.fr (João Pedro Athayde Marcondes de André), marcos.dracos@in2p3.fr (Marcos Dracos)

## 1. 引言

江门地下中微子实验（江门中微子实验） [1, 2], 正在中国南部安装，距两座核电站约 53 km。该实验是一项多用途实验，主要目标是确定中微子质量排序。为此，实验将使用一台 20 kt 液体闪烁体探测器，其能量分辨率非常出色。同时，江门中微子实验还将以亚百分比精度测量振荡参数 $\theta_{12}$, $\Delta m^2_{21}$ 和 $\Delta m^2_{31}$。江门中微子实验还能够探测来自其他自然源的中微子，例如地球中微子和超新星爆发 [2, 3]。

JUNO探测器由一个中心探测器组成，其中包含一个丙烯酸球体，球内装有液体闪烁体，周围布置了17612个大型（20英寸）和25600个小型（3英寸）光电倍增管（PMT）。中心探测器浸没在配备了2400个大型PMT的水切伦科夫探测器中。一个称为顶部径迹探测器（TT）的缪子径迹探测器布置在这些探测器的顶部。水切伦科夫探测器与顶部径迹探测器共同构成江门中微子实验的反符合系统，旨在追踪并 veto 几乎所有穿过探测器的缪子。实验设备的详细描述见 [2]，上述各组成部分也展示在图1中。图中还标出了校准厅的位置，该厅用于中心探测器校准，并通过烟囱与探测器相连。为容纳烟囱和校准厅，顶部径迹探测器的中央层被移至较高位置，如图1所示。探测器将安置在地下实验室中，覆盖层相当于约700米深（1800米水当量）。在这一深度，预计每小时每平方米仍有约15个大气缪子，其均值能量为207 GeV。这些μ子径迹可能产生与反应堆中微子引发的反贝塔衰变（IBD）相似的本底。

这些大气缪子引发的最危险本底，源于探测器内或周围岩石中产生的 $^9$Li和 $^8$He不稳定元素，以及快中子。这些本底贡献如图1所示。主要贡献来自中心探测器和水切伦科夫探测器中直接产生的 $^9$Li和 $^8$He，而最后一种情况涉及

周围岩石中的中子产生。

目前的模拟表明，反贝塔衰变相互作用与模拟这类相互作用的宇宙成因本底具有相近的发生率。因此，抑制这类本底贡献并研究其对系统误差的影响，对于江门中微子实验至关重要。这正是顶部径迹探测器的主要作用。OPERA实验的所有 [4] 靶跟踪器 [5] 塑料闪烁模块均已回收并运往中国，将用于组建江门中微子实验的顶部径迹探测器。

在 OPERA实验中，靶跟踪器模块由乳胶/铅砖屏蔽；而在江门中微子实验地下洞室中，靶跟踪器将直接暴露于岩石放射性之下。此外，测得江门中微子实验地下洞室的放射性比位于地下的格兰萨索国家实验室（LNGS）高约两个数量级

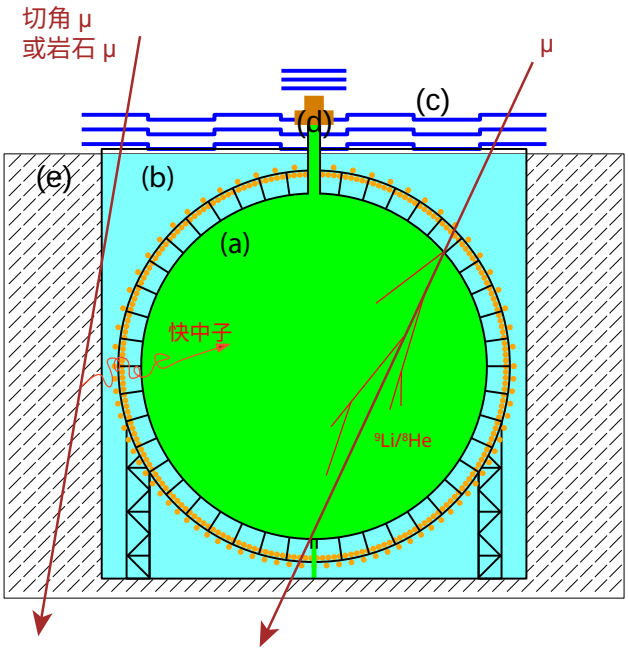


图1：江门中微子实验探测器示意图，包括(a)中心探测器、(b)水切伦科夫探测器和(c)顶部径迹探测器。图中还展示了(d)标定室及其与中心探测器相连的烟囱。图中也示意了中心探测器、水切伦科夫探测器以及(e)周围岩层中由快中子或宇宙成因同位素引起的诱发噪声所对应的配置。

OPERA实验就设在格兰萨索国家实验室。因此，OPERA靶跟踪器的电子学必须更换为速度显著更快的版本。

496个OPERA靶跟踪器模块仅够覆盖JUNO中心探测器顶部表面约60%的面积，因此只能追踪总缪子通量的30%。因此，靶跟踪器将参与JUNO反符合系统，对穿过其中的缪子进行反符合标记。值得注意的是，约有一半的大气缪子从水切伦科夫探测器侧面经过，并未穿过靶跟踪器所在的顶部表面。包围整个JUNO中心探测器的水切伦科夫探测器将用作反符合探测器，以排除来自各个方向的事例，包括靶跟踪器未探测到的事例。

大量带有可靠标记的 $^9$Li和 $^8$He事例将有助于准确测量这一类本底的能谱和发生率。靶跟踪器还可用于筛选并准确重建一组μ子径迹样本，以便调优和验证基于中心探测器及水切伦科夫探测器信息的重建算法。这得益于靶跟踪器对穿过其中的μ子径迹位置具有厘米级的测量精度。

本文在第2节介绍探测原理和靶跟踪器几何结构，随后在第3节描述探测器在不同触发级别下的预期计数率。第4节详细介绍了顶部径迹探测器电子学的设计，该设计旨在预期的本底条件下实现数据读出和触发。第5节介绍了当前的顶部径迹探测器重建方法及其性能。有关

顶部径迹探测器运行模式的详情见第6节，随后第7节介绍了顶部径迹探测器原型，并对这些模式进行了广泛测试。第8节介绍了顶部径迹探测器模块支撑结构及安装的相关内容。第9节介绍了顶部径迹探测器模块的长期稳定性监测。最后，第10节给出了总结和结论。

## 2. TopTracker 的描述

如 [5] 介绍 OPERA靶跟踪器时所述，靶跟踪器使用长 6.86 米、厚 10.6 毫米、宽 26.4 毫米的闪烁体条带，条带两侧均通过波长转换（WLS）光纤和滨松[1] 8 × 8 通道多阳极光电倍增管（MA-PMT）H7546 进行读出。由于组件坚固耐用，靶跟踪器所采用的技术非常可靠。电子学和多阳极光电倍增管等精密元件位于灵敏区之外，便于检修。

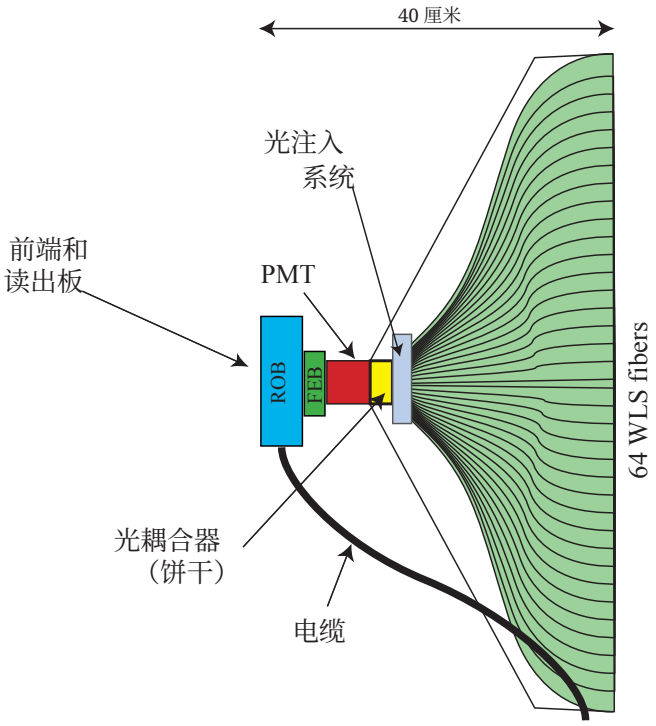


图 2：闪烁体条模块端盖的示意图。

靶跟踪器（TT）的基本单元（模块）由64条条带组成，通过波长转换光纤从两端读出，并连接至置于端盖内的两个 8×8通道光探测器（图2）。将4个模块组装在一起，可构成一个覆盖6.7 × 6.7 m$^2$ 灵敏表面的跟踪器平面。每组4个模块的两个平面相互垂直放置，构成一面跟踪器墙，提供二维径迹信息（图3）。继承自OPERA靶跟踪器

[1]滨松光子学株式会社，电子管中心，静冈县磐田郡丰冈村下神增 314–5，邮编 438–0193，日本。

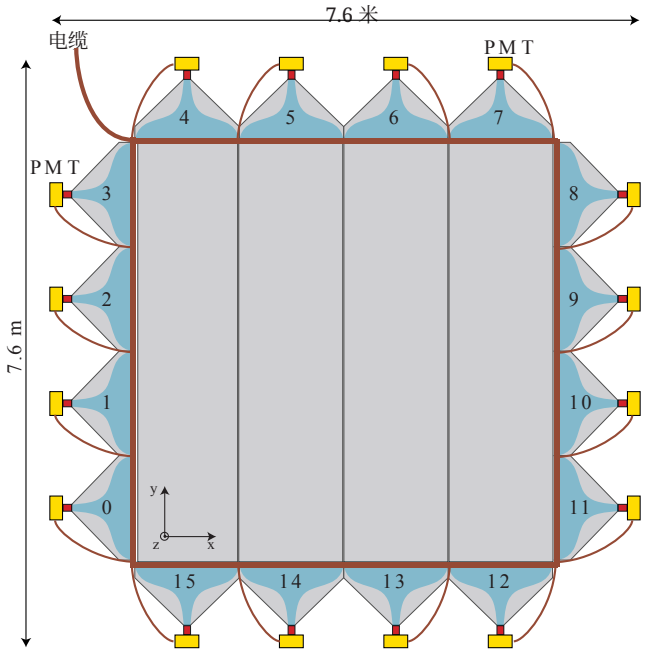


图 3：塑料闪烁体条墙的示意图。除图中清晰可见的 4 个模块外，其下方还垂直放置了另外 4 个模块，例如连接编号为 0–11 的光电倍增管之间的区域。

跟踪器包含62面墙，共有31744条闪烁条带和63488个电子学通道。

与在 OPERA 中的用途不同，JUNO 顶部径迹探测器的墙必须水平放置，如图 4 所示。JUNO 中心探测器顶部设有桥架，用于支撑靶跟踪器结构。靶跟踪器的三层放置在桥架上，各层的墙相互重叠，以减少盲区。层间距为 1.5 m，这是缪子径迹重建精度与所需支撑机械结构总体尺寸之间的折中。底层的位置由水切伦科夫 veto 探测器水面与靶跟踪器之间的最小距离决定。在一个水平方向上，沿 21 m 的距离放置 3 面墙；在另一个方向上，沿 40 m 的距离放置 7 面墙，并在中间为 JUNO 烟囱留出一个孔洞（每层 20 面墙）。这样共使用 60 面墙，其余两面墙的模块则重新排列并放置在烟囱顶部；烟囱所在的 JUNO 探测器部分没有被水切伦科夫 veto 探测器包围。为使烟囱正上方形成完整的三层结构，最下部放置一面完整的靶跟踪器墙，中部和上部各放置一面部分靶跟踪器墙，两者各自相隔 23 cm。烟囱上方的部分墙每层仅包含 2 个中央模块，每面墙共 4 个模块，因此只能完全覆盖烟囱的中央区域。

根据位置的不同，每面墙上的模块分别朝向顶部或底部放置，以便从外部接触其端盖，尤其是其电子学。

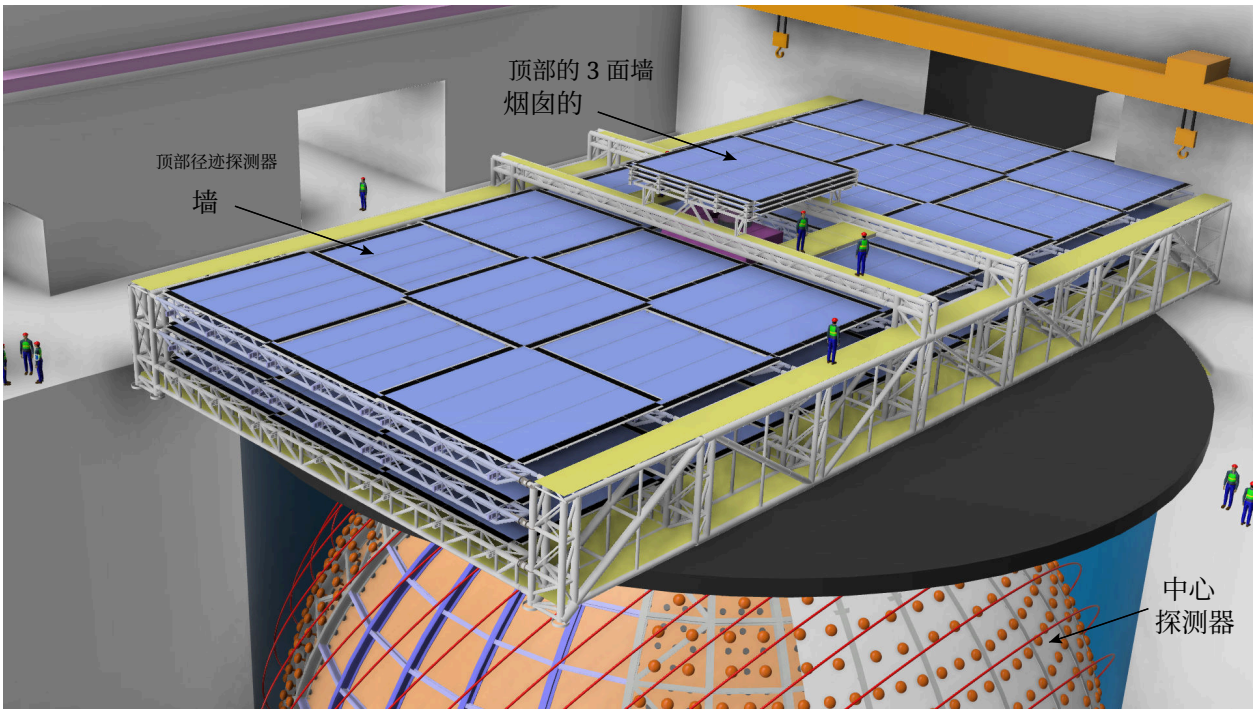


图 4：江门中微子实验中心探测器顶部的顶部径迹探测器示意图。

### 3. 触发率

如前所述，靶跟踪器（TT）的目标是探测大气缪子，但到达靶跟踪器的粒子中，缪子并非数量最多的。事实上，组成靶跟踪器的元件所产生的天然放射性（每条带 0.29 ± 0.05 Hz，或整个探测器中 ~ 9 千赫兹） [5] 高于预期的 ~ 4 Hz——穿过整个顶部径迹探测器的缪子数。 然而，这种天然放射性产生的计数率仍比探测器安装所在地下洞室的岩石放射性所引发的靶跟踪器事例低约三个数量级。靶跟踪器的触发率将直接取决于这种岩石放射性，本节将对此进行介绍。为应对这一情况，需要使用第 4 节所述的专用电子学。鉴于探测器天然放射性与地下洞室放射性所致计数率之间存在显著差异，且两者的特征预计相似，本文其余部分将忽略探测器的天然放射性。

在勘察 JUNO 场址期间，采集了岩石样品以确定放射性同位素含量。研究确定[2]，JUNO 场址的岩石放射性比此前使用该探测器的 LNGS 高约两个数量级，如表 1 所示。除了地下洞室本身较高的放射性外，JUNO 的靶跟踪器还将直接暴露于岩石中，而 OPERA 的顶部径迹探测器模块则由铅乳胶砖屏蔽。

使用 JUNO官方模拟软件 [6], 估算岩石放射性引起的多阳极光电倍增管触发率

[2]测量由 Ph. Hubert（波尔多核研究中心）使用锗探测器完成。

表 1：LNGS 和 JUNO 场址的岩石放射性。

| 同位素 | 活度（贝可/千克） | |
|---|---|---|
| | LNGS | JUNO场址 |
| $^{40}$K | 26 ± 2 | 1340 ± 50 |
| $^{238}$U | 1.8 ± 1 | 110 ± 10 |
| $^{232}$Th | 1.5 ± 1 | 105 ± 10 |

其中，TT 模块按前文所述放置。本研究对周围岩石（距岩石表面 50 cm 厚度范围内）的衰变逐个进行模拟，并使用 GEANT4 [7] 传播衰变粒子。随后，根据 [5] 中的探测器描述，将塑料闪烁体中的所有能量沉积转换为多阳极光电倍增管处的预期信号。当收集到的信号高于 1/3 光电子（p.e.）的阈值时，多阳极光电倍增管便会触发。根据这些模拟结果，如图 5 所示，每个多阳极光电倍增管的平均触发率在 20 千赫兹至 60 千赫兹之间。每个通道的平均触发率约为 670 Hz，部分通道超过 1 kHz；相比之下，LNGS 的 TT 运行触发率约为 20 Hz。如图 5 所示，各多阳极光电倍增管的触发率取决于其位置，因为靠近岩石的模块比位置更居中的模块受到更多辐射，而上层则会对下层起到一定的屏蔽作用。

岩石放射性预计会导致多阳极光电倍增管层级的触发率很高，这对新的 TT 数据采集系统提出了严格要求。鉴于由 $^{40}$K、$^{232}$Th、$^{238}$U 及其衰变产物的衰变所产生的放射性通常不会穿透超过一层闪烁体，因此可

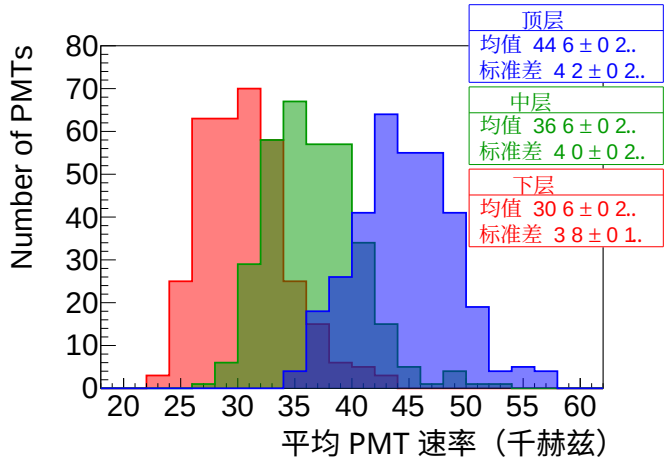


图 5：三个靶跟踪器层中每个多阳极光电倍增管的触发率。纵轴表示具有横轴所示预期平均触发率的多阳极光电倍增管数量。假设多阳极光电倍增管触发阈值为 1/3 个光电子。

以通过要求同一面墙内垂直模块上的多阳极光电倍增管相关触发之间满足时间符合，来减少 JUNO 实验期间产生的数据量。此外，为进一步减少数据，还要求在不同层的三面对齐的 TT 墙上都找到这些时间符合。采用这些符合标准后，整个探测器的事件率可从约 8 兆赫降低至约 2 千赫兹，如图6所示；前者根据图5所示的各光电倍增管事件率计算得出，代表整个探测器的总事件率，而后者则在数据采集系统的处理能力范围内。上述两级时间符合分别对应一级触发和 L2触发。一级触发针对单面墙内的时间符合，而 L2触发则在整个 TT 的层级上执行相同操作。以下各节将讨论在电子学中实现这些符合标准的方法。

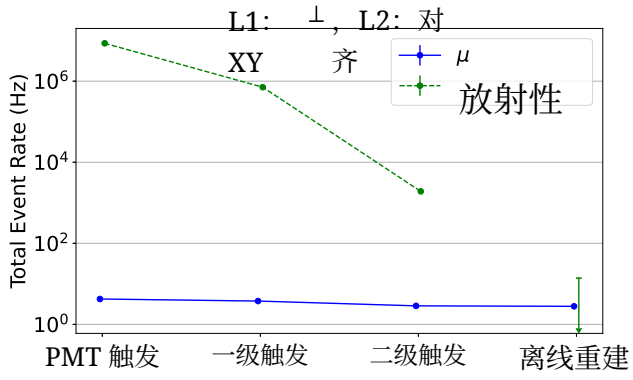


图6：在不同触发级别下，整个探测器的总事件率；从多阳极光电倍增管触发率，到经顶部径迹仪离线软件重建事例后的事件率。绿色表示由周围岩石中的放射性引起，蓝色表示由大气缪子引起。L1筛选标准要求在垂直的X和Y方向上，对相应模块末端的4个多阳极光电倍增管中任意3个产生的信号进行X和Y符合。二级触发筛选标准要求L1符合发生在顶部径迹探测器不同层上的3面墙上。

值得注意的是，图6中选取了最有可能用于顶部径迹探测器的L1和二级触发算法，但最终方案尚未确定。第4.3节讨论的L1触发要求在任意一面墙的两个垂直平面上，多阳极光电倍增管触发信号在100纳秒内符合；并且至少有一个平面上的模块两侧均有多阳极光电倍增管触发。该L1触发可使事件率降低约一个数量级。第4.4节讨论的二级触发要求探测器不同层上至少3面彼此对齐的墙，在300纳秒滑动时间窗内产生L1触发，从而使事件率再降低约400倍。若由于实现困难而在L1和二级触发电子学卡中采用替代算法，且数据削减效率不如本文所述，预计数据采集系统能够在线应用额外的筛选标准，将事件率降低至上述水平。

还需指出，如图6所示，通过对μ子径迹进行完整的三维重建（而非仅要求墙体对齐），可以在离线处理中进一步降低放射性率。该重建见第5节，对应于上述图中的“离线重建”级别；图中仅给出了放射性率的68%上限。重建后可能残留的放射性诱发事例，还可以通过要求顶部径迹探测器与中心探测器或水切伦科夫 veto 探测器之间存在关联信号来进一步减少。此后，放射性的影响相较于大气μ子率便可忽略不计。

## 4. 电子学

全局电子学概念读出链如图7所示。如前所述，靶跟踪器（TT）由63面相同的墙组成，每面墙具有相似的机械约束，因此需要为每面墙单独开发电子学。该电子学链在TT墙级实现，如图8所示。由于模块端盖厚度有限（3 cm），光电倍增管读出必须分置于两块电路板上：直接连接多阳极光电倍增管的前端板（FEB），以及连接前端板和墙级集中器板（CB）的读出板（ROB）。前端板和读出板均安装在模块端盖内，紧邻多阳极光电倍增管。位于每面墙中心的CB负责配置和控制墙内的16个前端板和读出板，并对整面墙进行数据读出；随后，CB将数据传输至数据采集系统。多阳极光电倍增管由安装在前端板上的64通道MAROC3 [8] 专用集成电路读出。读出板安装在前端板之后，用于接收多阳极光电倍增管的数据，并将其发送至CB；CB汇集来自TT墙上16个传感器的数据。CB所在位置安装的分路电源为多阳极光电倍增管、前端板、读出板和CB供电。

电荷和命中信息由 MAROC3 芯片提供，同时还会提供一个供控制板进行时间戳标记的“或”触发信号。控制板在墙级别（一级触发）以 100纳秒的滑动时间窗识别 x–y 相关性。如果墙内不存在相关性，控制板将发回

一个复位信号给 ROB，以缩短前端板 MAROC3 的死时间（7–14 µs）。如果检测到符合事件，控制板会将该信息发送到全局触发板（GTB），后者进一步在全部三个靶跟踪器层（L2触发）范围内，以 300 ns 的滑动窗口搜索相关性。GTB 会向各控制板发回确认或拒绝信号；相应地，控制板要么将相关数据发送到江门中微子实验数据采集系统，要么在约 1 µs 内向相关 ROBs 发出复位信号。如前所述，这两个触发级别对于大幅降低 TT 数据率以及缩短前端板 MAROC3 的探测器死时间都至关重要。

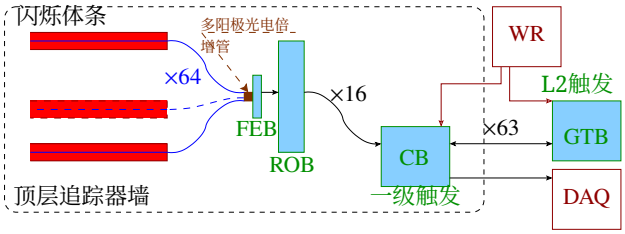


图 7：TT电子学链路。图中以蓝色标示了为TT开发的所有电子学卡，包括前端板（FEB）、读出板（ROB）、集中器板（CB）和全局触发板（GTB）。FEB和ROB安装在各模块端盖中。FEB连接到多阳极光电倍增管（MA-PMT），后者观测由每个模块的64条闪烁体条中的波长位移光纤收集的光；FEB还连接到ROB。ROB连接到FEB以及对应墙体的CB。CB位于墙体中央，并连接到该墙体的全部16块ROB。CB还连接到白兔（WR）交换机、数据采集系统（DAQ）和GTB。除了连接TT的63块CB外，GTB还将连接到WR交换机。

### *4.1.* 前端板（*FEB*）

FEB 是一块 8 层印制电路板，尺寸为 3 cm × 13c m，搭载了 MAROC3 和一颗小型 Spartan6 FPGA，用于将 64 路并行输出的命中信号串行化为 8 路串行链路。这样，ROB 就能获取哪些通道已触发的信息，并在数据采集模式设为相应模式时，用于在线零抑制。该电路板直接插接在多阳极光电倍增管上，如图 9 所示。多阳极光电倍增管至 MAROC3 输入端的线路彼此充分分隔，并由印制电路板中的四个接地平面保护，以免受外部噪声源干扰。

顶部径迹探测器的读出电子学基于一款 64 通道专用集成电路，即由 Omega 实验室设计的 MAROC3 [8]。该芯片采用 12 mm × 12 mm TFBGA 封装，共有 353 个引脚。该芯片的主要特性如下：

- 可配置的增益补偿（下文称为增益均衡因子，g.e.f.），范围为 0 至 3.9，用于均衡阳极间的增益
  多阳极光电倍增管通道 [5] 的差异。
  MAROC3 在前置放大器级中集成了可调增益系统，为每个通道的快速成形器（触发支路）和慢整形器（电荷测量支路）提供相同的放大倍数。

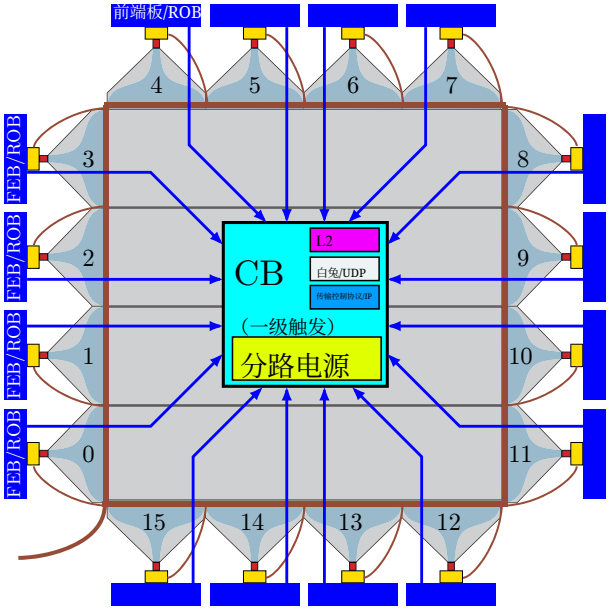


图 8：TT 墙电子学示意图。每个端盖处的前端板和 ROB 都连接到执行一级触发的控制板。控制板框右上角的方框表示控制板的连接。具体而言，控制板通过 UDP 连接到二级触发，通过 TCP 连接到数据采集系统，并连接到白兔（WR）交换机。墙内控制板旁边还设有分电源板，为每面墙上的所有 ROB 和控制板供电。

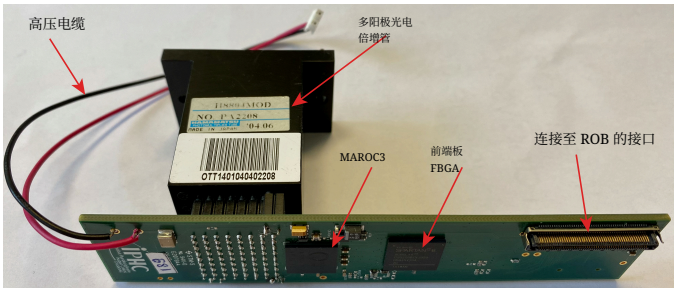


图 9：连接到多阳极光电倍增管的前端板。

- 为实现全局低噪声自动触发，在总增益为 $10_6$ 时，采用低至 1/3 光电子（对应 53 飞库仑）的阈值，即可对最小电离粒子实现 100% 的触发效率。

- 输出与每个多阳极光电倍增管通道检测到的信号成正比的电荷，动态范围最高可达 5 皮库仑（~ 30光电子[3]）。

如上文列表所述，64个通道中的每一个都包含一个低噪声可变增益前置放大器，该放大器同时连接触发支路和电荷测量支路（图10）。自动触发包括一个快速成形器，后接一个比较器。该信号与可调阈值进行比较，为每个通道生成触发信号。触发判定由

[3]本文所有电荷到光电子的换算均假设增益为 $10^6$ 。

所有64个通道的逻辑“或”产生。发生故障的通道可通过掩码寄存器从触发判定中禁用。

电荷测量支路由慢整形器和其后的跟踪保持缓冲器组成。慢整形器的增益为 121 毫伏/皮库仑（相当于 19 毫伏/光电子），且峰值时间较长，以尽量降低其对信号到达时间的敏感度。作出触发判定后，电荷会存储在电容器中，64个通道以 10 兆赫的频率通过单个模拟输出依次读出，该输出称为 OutQ。电荷输出也可通过内部 8、10 或 12 位威尔金森模数转换器直接读取。对于靶跟踪器，选择使用威尔金森模数转换器进行 8 位读出，以缩短读出死时间。输出时钟频率为 80 兆赫。在 8 位模式下，所有 64个通道可在不到 14 μs 的时间内读出；读出期间，MAROC3 无法测量其他电荷，因此会造成探测器死时间。如果控制板通过 ROB 发出复位信号，则可缩短这段时间；此时读出和传输过程会停止，MAROC3 随即准备再次开始电荷测量。值得注意的是，这段死时间不会影响上一段讨论的触发系统。

MAROC3芯片的功耗约为 220 毫瓦（每通道 3.5 毫瓦），具体数值会因增益校正设置和范围略有变化。

可变增益系统由八个开关控制，可将增益均衡因子设置为 0 至 3.9。关闭某个通道的所有电流开关后，该通道的增益均衡因子将归零，通道也会被禁用。增益均衡因子为 1 时，开关设置为 64。

可以测量每个通道的触发效率随注入电荷的变化情况。当输入电荷低至 0.1 光电子时，触发效率即可达到 100%，且不受增益均衡因子的影响。触发阈值由外部设置并对所有通道通用，因此可以精确控制 64 个通道之间的输出离散度。测得的输出离散度约为 0.01 光电子，比有效阈值低一个数量级。

作出触发判定后，所有用于存储电荷的电容器都会通过由 D 触发器构成的移位寄存器依次读取。基线电平低于 1/3 光电子，并被视为靶跟踪器（TT）的最终触发电平。

已对同一芯片所有通道的电荷测量重复性进行测定，结果发现，在 1–10 皮库仑的全量程范围内，当增益均衡因子为 1 时，重复性优于 2%；该范围对应 1–35 光电子（图11）。

已仔细考虑与专用集成电路相关的串扰，并确定了两个主要来源。第一个来源是触发支路与电荷测量支路之间的耦合，其串扰低于 0.1%。第二个来源影响命中通道的最近邻通道，测得的串扰约为 1%。这种效应主要由电路板上的走线布线导致，对于较远的通道可以忽略不计。

前端板包含用于 MAROC3 差分电荷输出信号的缓冲放大器，以及用于数字信号的逻辑电平转换器。前端板通过一个 100 针同轴连接器与读出板相连。这种双电路板布局符合 TT 模块端盖几何结构的机械约束。

*4.2.* 读出板（*ROB*）

ROB负责管理FEB的供电、数据采集和慢控制。它是一块8层印制电路板，由CAEN（型号A1703）合作开发，基于ALTERA Cyclone V GX FPGA。图12展示了该印制电路板的正反面照片。

在标准数据采集模式下，FPGA状态机等待探测到FEB的“或”信号。探测到该信号后，会发出保持信号，以便在MAROC3芯片中进行电荷测量；保持信号的延迟可调，时间抖动低于1 ns。这样可实现优于1%的电荷测量精度。系统还会采集触发通道模式，并将其用于零抑制，如前文所述。ROB配备了一台由Analog Devices生产的12位闪速模数转换器AD9629BCPZ-65 [9] ，用于读出MAROC3芯片的OutQ信号（该模拟输出与待测电荷成正比）。采用这种方式，读出一个事件约需7 μs。也可以读出由前文所述的内置威尔金森模数转换器转换的电荷，但这最多需要前文提到的14 μs。鉴于两种电荷读出方式所需时间不同，预计数据采集期间将使用闪速模数转换器进行电荷测量。

ROB还配有一个高压模块，为多阳极光电倍增管供电；其工作电压范围为 –1000 至 –800 V，电流低于500 μA。此外，还配有一个用于校准的测试脉冲单元。

高压模块是CAEN的A7511N直流-直流转换器 [10] ，纹波低于10 mV。在探测器原型上进行的测试表明，直流-直流转换器产生的噪声对多阳极光电倍增管输出信号的贡献低于1 mV。

用于照射靶跟踪器模块端盖内光纤的测试脉冲发生器，与OPERA中使用的相同 [5]。发生器会产生宽度为20 ns、幅度可调的短脉冲，为蓝色LED供电；蓝色LED激发从闪烁体条中引出的波长位移光纤。在标定流程中，脉冲幅度设定为可模拟多阳极光电倍增管上的单光电子信号；同时，相对于LED驱动脉冲，以可调延迟发出保持信号，从而模拟标准信号的数据采集。通过在ROB内随机发出保持信号，可以测量基线。这些不同的数据采集模式将在第6节中进一步说明。

在探测器原型的标称工作条件下，测得 ROB 在 12 V 标称工作电压下的工作电流为 350 mA，同时为前端板和多阳极光电倍增管供电。

最后，ROB 支持远程重新烧录前端板 Spartan6 FPGA，以便远程操作系统。

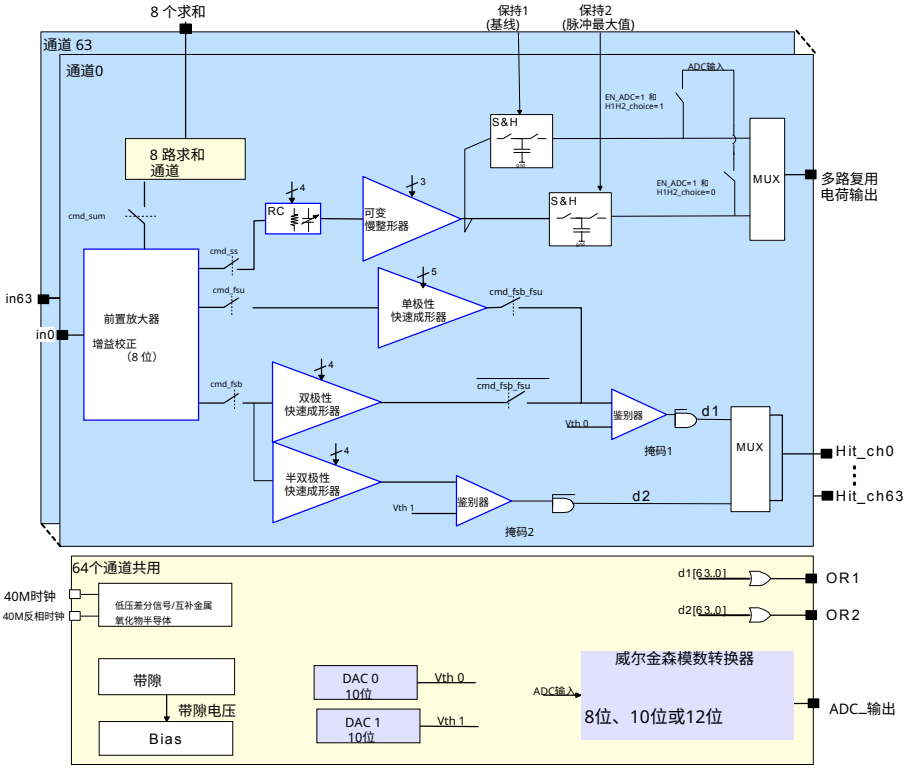


图 10：MAROC3 专用集成电路的架构 [8]。

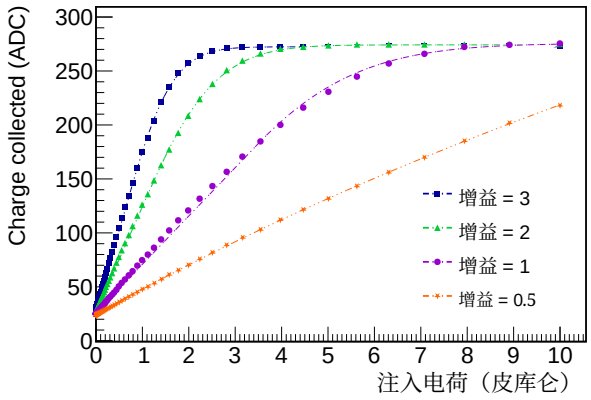


图 11：当增益均衡因子设为 0.5、1、2 和 3 时，电荷测量的线性度与输入电荷的关系。

### *4.3.* 集中器板（控制板）

如图8所示，每面靶跟踪器墙的中央是控制板。控制板的主要作用是汇总 16 路输入的 ROB 数据流，进行数据筛选（一级触发），并将精简后的数据流转发至数据采集系统。探测器中的全部 63 块控制板均并行且完全独立地运行，同时采用基于 White-Rabbit (WR) 标准的时序分配系统，实现良好的同步 [11]。

#### *4.3.1.* 连接 *16* 个 *ROBs*

在每面墙上放置控制板，可以将连接到数据采集系统的数量从 992 个（每个 ROB 计为一个连接）减少到整个探测器仅需 63 个连接。图 8 展示了这种以墙为中心的布局。

该电路板提供四个远程连接：一根用于在 +12 V 下为系统供电的铜缆（PWR），以及三根用于长距离数据链路的光纤。控制板中实现的一条光链路用于通过用户数据报协议（UDP）连接到探测器控制系统，并用于白兔时间同步系统。另一条光链路实现了与数据采集系统的专用以太网连接（TCP），最后一条链路将控制板连接到 GTB（见第 4.4 节），用于二级触发选择。

ROBs 与控制板之间的所有本地连接均使用 Cat5e 网线实现。与控制板配套的是一块小型配电卡，称为分电源板，将在第 4.3.4 节中简要介绍。

#### *4.3.2.* 一级触发选择

如第 3 节所述，ROB 卡产生的数据流主要由放射性诱发的本底事件构成。在预期的 50 千赫兹 ROB 平均触发率下，数千个 ROB 产生的数据速率在数据采集层面将难以应对。

如前所述，利用控制板仅选择

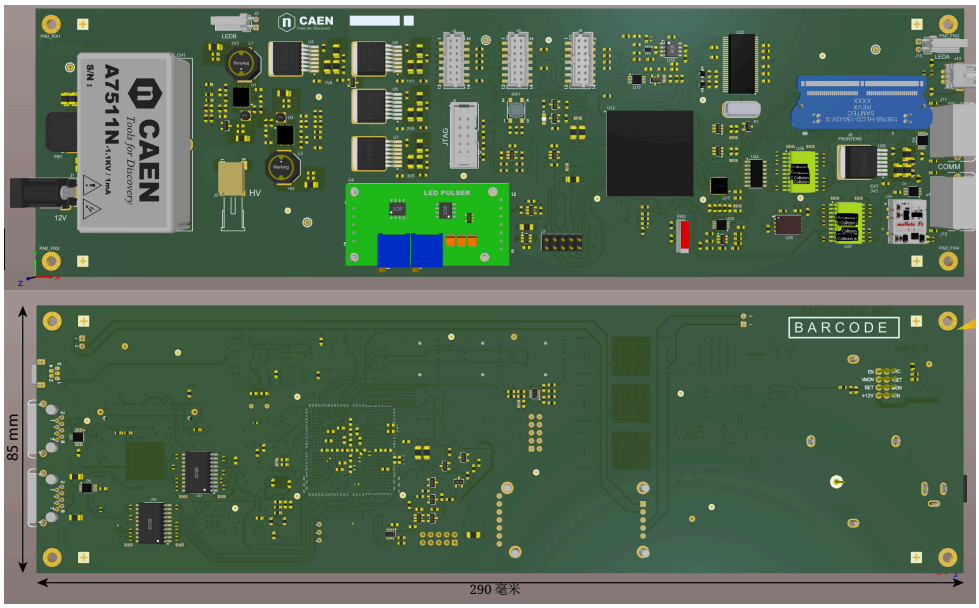


图 12：ROB 的顶面和底面。

x–y符合的事例（L1触发级），可将数据速率降低一个数量级。此处将符合定义为：同一时间窗（100纳秒）内到达的一组 2、3 或 4 个 FEB/ROB触发，且这些触发与同一墙内的两个垂直模块相关联。L1选择算法通过对来自全部 16 个 ROBs 的信号进行滑动窗口处理来实现。为避免分类歧义，只要在该窗口内检测到任何符合，就会接受窗口内的所有 ROB数据，即使其中一些信号与该事例无关。

到达控制板的触发会使用控制板中实现的 WR节点提供的绝对时间基准进行时间戳标记，分辨率为 1 ns。对于发现符合的 FEB/ROB触发，控制板会等待相关的 ROB数据包，其中包含信号位置及其电荷值。合并时间信息和电荷信息后，如果二级触发未拒绝该一级触发，修改后的数据包便会传送至数据采集系统。对于未产生一级触发或被二级触发拒绝的 FEB/ROB触发，则予以拒绝，并向相应的 ROB 发送复位信号，以中止电荷数字化以及向控制板传输相关数据。

WR协议提供的整个系统同步，对于数据采集系统中的正确数据重建和数据分析都是必要的。它还用于将符合信息传达给 GTB（控制板向 GTB 发送一级触发的部分时间戳）；GTB 将根据探测器级应用的二级触发选择，确认或拒绝这些符合。

### *4.3.3.* 控制板实现

控制板采用以FPGA为核心的读出系统实现，由一块母板构成，母板上安装了搭载处理单元的子卡（系统级模块，SOM）。控制板的框图如图13所示，生产用原型如图14所示。

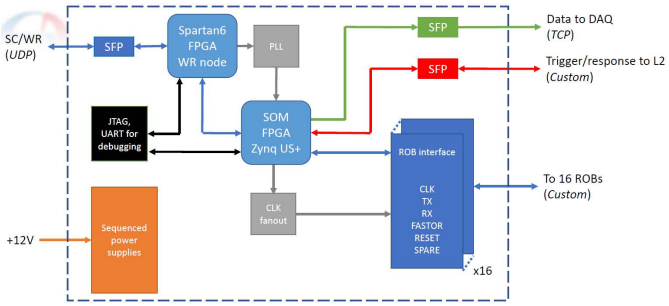


图13：控制板框图。

控制板母板是一块34 cm × 20 cm、8层的电路板，提供所有接口专用电子学组件，以支持前文所述与16个ROBs之间基于LVDS[4]的连接以及光连接。它提供所有必需的电源电压，并按顺序启用这些电压，以满足该FPGA读出系统的要求。该电路板还搭载了一个集成的白兔节点，由一块Spartan6 FPGA [12]实现。该FPGA还负责在子卡上的主FPGA与控制板之间传输慢控制UDP流量。

子卡是一种嵌入式高性能 FPGA 模块化系统，基于FPGA，可控制并处理所有传入和传出的数据流。它是一块 10 cm × 7cm、16 层的印制电路板，搭载了最新一代的赛灵思片上系统（SoC）Zynq Ultrascale+CG [13]，，并配有 2 GB 板载 DDR4内存。该 FPGA 的可编程逻辑部分负责与 16 个 ROBs 通信以及连接到 GTB，两者均基于定制协议。四个专用硬件CPU中有两个

[4]低电压差分信号。

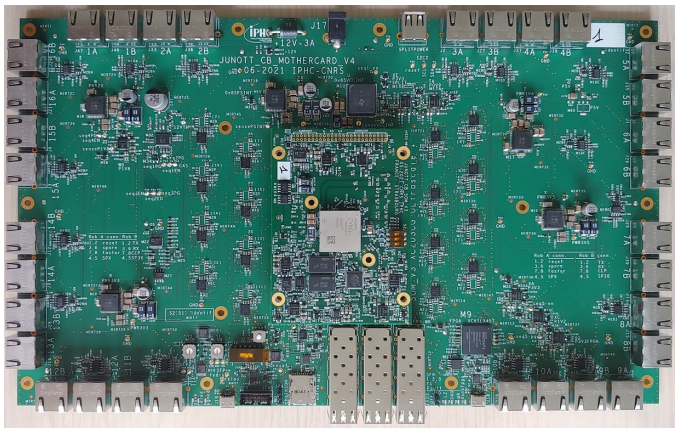

图 14：控制板母板和子卡。

片上系统中的两个CPU并行管理传输控制协议流量，分别将其发送至数据采集系统和慢控制系统。

*4.3.4.* 分电源板

图 15 所示的分电源板是一块专用印制电路板，用于向 TT 墙的所有组件分配电源。这块电路板的尺寸约为 15 cm × 15cm，采用 2 层铜层设计。远程电源提供的电力被分配至 16 个 ROB 和一个控制板。该电路板配备可复位保险丝、分流电阻，以及位于所有输出电源支路上的 16 位精度 $I^2C$[5] 电流 / 电压监测器。该印制电路板与控制板之间连接了一条 $I^2C$ 总线，使控制板能够监测所有这些读出组件的功耗。

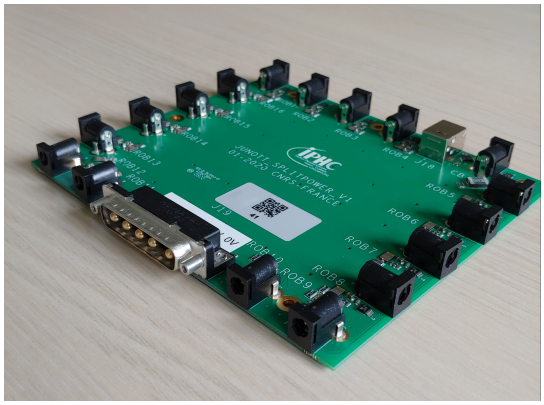

图 15：分电源板。

*4.4.* 全局触发板（*GTB*）

GTB 的主要作用是对各 TT 墙的一级触发所选出的 x–y 符合执行二级（L2）触发。其目的是根据穿越缪子经过时所涉及墙的位置，接受有意义的事例。GTB 中实现的算法需要找到给定时间窗口内三个 TT 层上的 x–y 符合。第二项要求是，该算法必须非常快速，以便提供在线反馈。如前所述，这一级触发能够进一步去除由放射性、相关电子噪声或 MA-PMT 暗噪声造成的背景噪声。

GTB 将位于触发链的顶端，作为所有触发请求的最终接收端，以及所有触发验证的唯一来源。凭借这一最高位置，GTB 还能够执行触发根节点的典型辅助任务，例如注入技术触发（定期或随机生成）、在探测器部分区域受到更多噪声影响等异常情况下对触发进行限流，或为调试研究对触发进行预分频。GTB 必须仅根据传入请求的空间位置及其关联的触发时间信息，作出确认/拒绝决定。实际上，每个触发请求都会关联一个时间戳，用于标明相应命中在前端板中产生的时间。

目前，尚未确定用于在三个 TT 层中寻找对齐的 x–y 关联的算法。已有几种
相关方案已通过模拟进行研究。最有前景的方案是让位于不同层上的三面墙彼此对准并形成符合；不过，也考虑了只要求三面墙符合、而不要求对准的可能性。图6展示了在最有前景的方案下，L2触发对总事件率的削减效果。如果只要求三面墙符合而不要求对准，GTB的表现会差约20倍。这既凸显了对准的重要性，也表明即便在GTB上采用资源需求显著更低的算法，也能使通过一级触发的放射性率降低一个数量级以上。利用FPGA上的神经网络实现的其他方案也在研究之中。事实上，这类工具广泛用于解决模式识别问题；与解析求解相比，它们能够以有限的资源在硬件上实现。探测器的几何结构并非均匀，尤其是为了在探测器中央容纳烟囱而错开的墙体，因此，通过模式匹配近似解决对准问题，可能更容易实现，同时在效率方面仍能很好地媲美对所有触发墙中心位置进行线性拟合的方案。

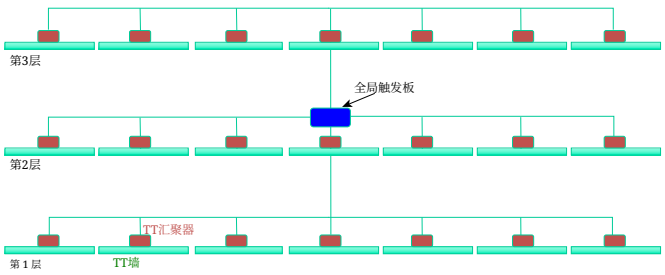


图16：TT全局触发策略示意图。

[5]集成电路间总线。

GTB的硬件实现依靠一台设备，通过双向光链路连接到所有控制板（见第4.3节）。每块控制板都应发送触发请求，并接收确认/拒绝信息，用于复位前端板和数据采集缓冲区。图16展示了连接方案示意图，其中GTB位于探测器中央。GTB还应接入白兔网络，以确保与控制板同步，并用于配置GTB。此外，GTB还需要一条光链路，以便接收来自江门中微子实验其他系统的外部触发。因此，GTB总共需要65条光链路，如图17所示。后两条链路是Gb连接；而由于随触发请求发送的只有部分时间戳，预计来自控制板的63条链路所需带宽不会超过400 Mbps。这是可行的，因为GTB属于公共时钟分发系统，因此能从白兔网络获取完整时间戳。

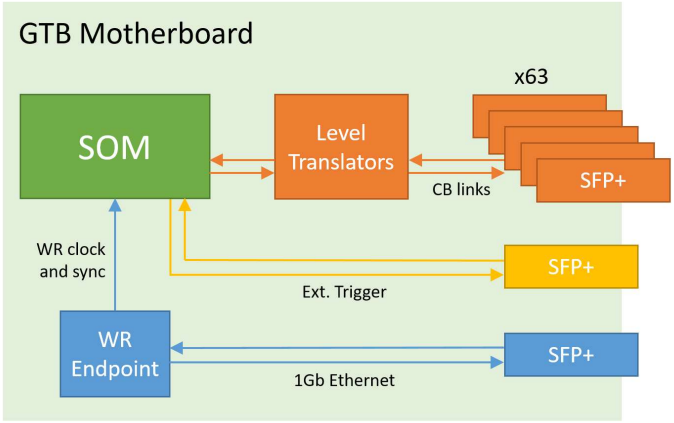


图 17：GTB主板的框图。GTB主板搭载一个 SOM、一个用于时钟分配和同步的白兔端点，以及 65 个双向光收发器（SFP+）。

目前的方案是将 GTB 实现为一块搭载 SOM 的母板。图 17 展示了 GTB 主板的框图，图 18 展示了该电路板的照片。它将容纳光模块，并为 SOM 提供所需的供电。SOM 将搭载一块 FPGA，能够通过高速收发器接收两条网络链路，并通过普通引脚接收 63 条控制板链路，以尽可能降低链路延迟。为与系统其余部分保持一致，我们选择了赛灵思 FPGA。具体而言，GTB 的 SOM 选用了市售现成模块 Origami B20 [14]，其搭载一块 Kintex Ultrascale XCKU060 FPGA [15]，并有 150 多个单端输入/输出端口连接至 Z-Ray连接器。

## 5. 重建

TT重建的主要目标是确定穿过探测器的大气缪子的方向。为实现这一目标，径迹重建分为三个

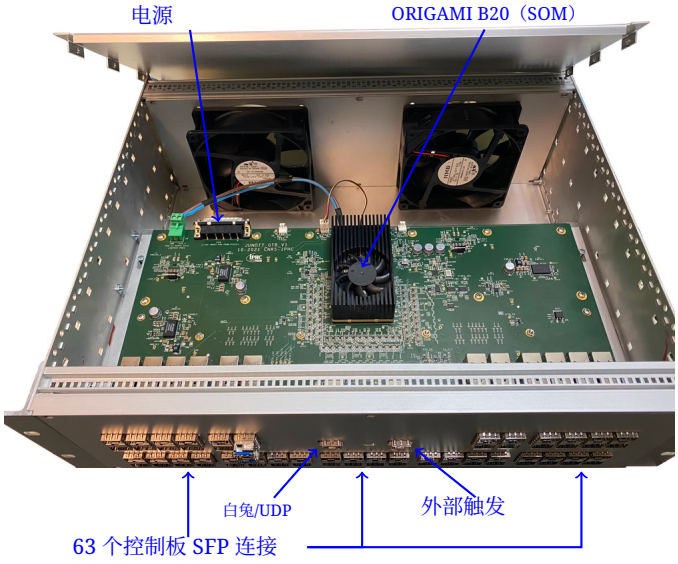


图18：GTB主板和SOM。

连续步骤。第一步，对每个多阳极光电倍增管，将相邻的触发通道聚类，以减小串扰对重建的影响。第二步，根据参与x–y符合的每面墙上两个垂直探测平面提供的信息，重建缪子的三维穿越点。最后一步，通过 $\chi^2$ 最小化拟合这些三维点，得到一条三维直线。此步骤针对每组垂直位置不同且包含三个以上三维点的点集独立执行，并剔除 $\chi^2$ 较差的拟合。

这种径迹重建能够将探测器中残余放射性噪声的速率至少降低两个数量级，如图6所示，使其达到与靶跟踪器中预期的大气缪子速率相当的水平。该算法在剔除放射性导致的本底事件方面非常高效，同时也能够重建几乎所有穿过探测器的缪子。在一个模拟样本中，将单个缪子[6] 与其周围±15 μs时间窗内预期的放射性噪声合并；在通过二级触发条件的缪子中，有 ~ 97%被成功重建。

得益于靶跟踪器的高粒度以及其各层间距所提供的力臂，探测器的角分辨率中位数约为0.2°，如图19所示。将模拟和重建的径迹投影到水切伦科夫探测器底部（该位置仍在JUNO探测器内，且对应于重建误差最大处），其中位分辨率约为20 cm，如图20所示。

这些分辨率中的长尾约占所有重建事例的 1%，这是由于串扰和噪声未得到充分滤除，导致重建出的径迹与模拟缪子不对应。目前正在评估针对 TT重建的更严格质量标准，这些标准可以显著缩短

[6]缪子的模拟采用了江门中微子实验地下实验大厅中预期的能量和角度分布。

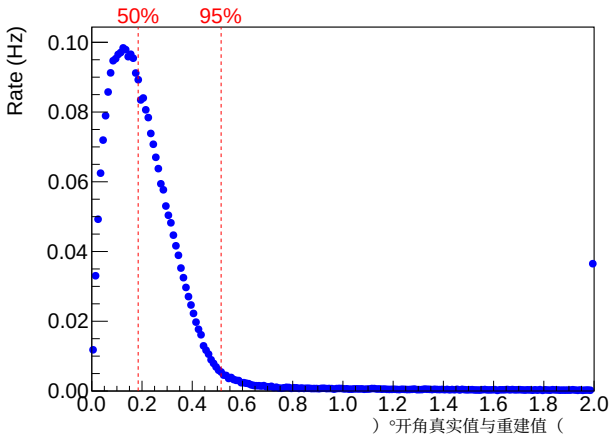


图 19：TT重建的预期角分辨率。最后一个点还包括角分辨率大于 2° 的所有事例。

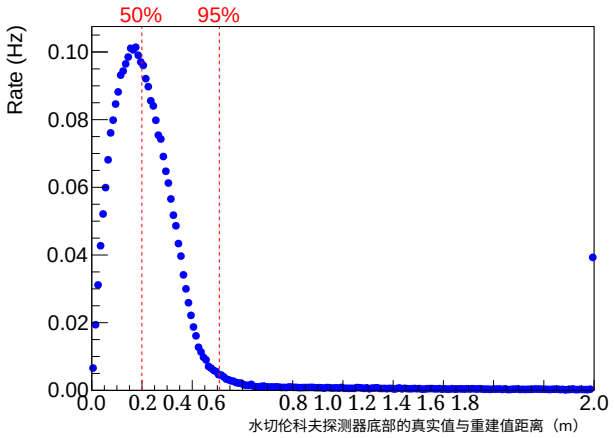


图 20：由水切伦科夫探测器（WCD）底部所在平面与模拟缪子轨迹、重建缪子轨迹的交点所确定的两点之间的距离。请注意，WCD底部位于TT底部以下45 m，对应于江门中微子实验中TT跟踪的最大投影误差。最后一个点还包括距离大于2 m的所有事例。

这一长尾；然而，目前它们也会使重建缪子的比例降低三分之一，这是不理想的。其他重建算法也在评估中。若不局限于 TT 数据，采用 TT、 水切伦科夫探测器和中央探测器进行联合重建，预计能够轻松识别所有 TT 单独重建时将虚假缪子径迹判定为真实径迹的情况，从而缩短 TT 分辨率中的长尾，并消除 TT 中所有残留的噪声诱发事例，同时不会对重建效率产生负面影响。这种联合重建仍在研究中。

## 6. TT 运行模式

靶跟踪器（TT）的运行预设了四种不同模式。这些模式旨在实现对 TT 稳定性的监测、校准以及数据采集。每种模式还可以配置额外选项，以提高灵活性，同时保持相同的总体目标。以下小节将详细介绍这四种预设模式：触发率测试（TRT）、基线测量（PED）、LED 光注入（LED）和正常数据采集模式。表 2 展示了这四种模式的一些特征。

表 2：TT 运行模式特性

| | TRT | PED | LED | 正常 |
|---|---|---|---|---|
| 触发 | auto | 外部 | 外部 | auto |
| 测量电荷 | no | yes | yes | 可选 |
| 零抑制 | – | no | no | 可选 |
| 固定数据大小 | yes | yes | yes | no |

### *6.1.* 触发率测试模式

此模式用于测量每个通道的触发率。此模式的主要目标是表征电子噪声、确定触发阈值，并搜索 TT 模块中的漏光。在 TRT 模式下，数据采集设置为自动触发模式，不进行电荷采集，只返回各通道在给定时间窗（通常为 1 秒）内的触发次数。此外，计划在数据采集期间自动监测所有通道的触发率，作为此数据采集模式的补充。能够请求此数据的主要优势在于，可降低此项测量的延迟，从而直接用于上述校准和漏光搜索。

图 21 展示了一个示例：使用 TRT 模式进行多次数据采集，并改变前端板上的阈值，从而确定前端板某个特定通道的阈值和电子噪声。确定电子噪声时不注入电荷；确定阈值时，则向受测通道注入已知电荷（对应 1/3 光电子）。为验证前端板的生产，已使用测试装置对所有前端板卡的所有通道进行了这两项测量。在所有验收合格的卡上，都能清楚地区分电子噪声（红色）和 1/3 光电子注入电荷（蓝色）；如图 21 所示，50% 阈值从 357 DAC 单位变为 420 DAC 单位。每块前端板的确切阈值并非都对应相同的 DAC 数值，必须根据测试期间获得的数值逐块设置。对于所有验收合格的前端板，电路板上 64个通道的阈值标准差平均为 6.5 DAC 单位，且始终低于 10 DAC 单位。

除了确定所需的工作阈值外，TRT 模式还可用于在正常运行期间检查噪声通道。探测器内部的漏光等因素可能会导致出现噪声通道。图 22 展示了在修复因 ROB 安装不当而导致的接地问题之前和之后，对靶跟踪器原型（见第 7 节）进行此类测量的示例。

### *6.2.* 基线模式

此模式用于确定无信号时测得的电荷。实现方法是测量电荷

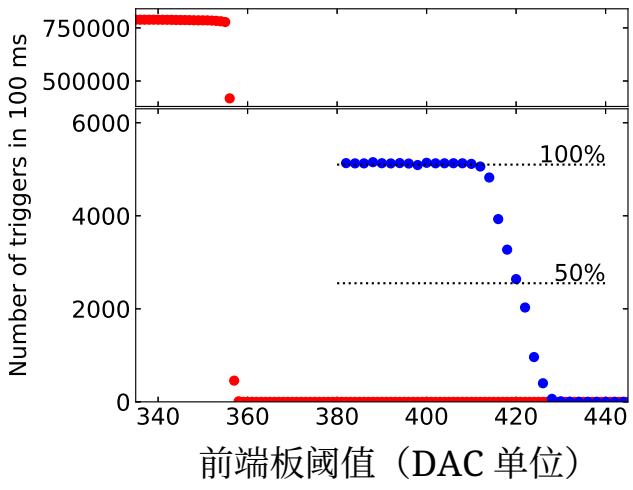


图 21：未注入电荷（红色）和在50 kHz下注入 ≈ 53 fC电荷（蓝色）时，MAROC3某一通道中 TRT 测量值随所设阈值的变化。

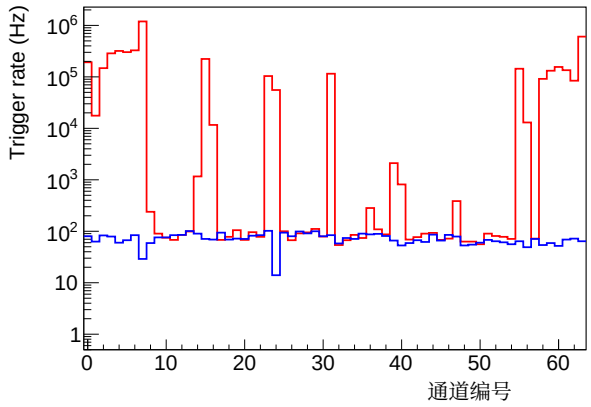


图 22：TT 原型其中一块电路板的某个传感器，在修复噪声通道前（红色）和修复后（蓝色）的触发频率与通道的关系。

，采用固定触发频率，而不是使用多阳极光电倍增管信号触发探测。部分固定触发可能会偶然与多阳极光电倍增管的常规触发在时间上符合。这些罕见的符合会产生电荷偏离基线峰的事例，在分析基线运行时，可轻松将其从基线分布中剔除。图23展示了一个传感器64个通道的基线值（左）及其标准差值（右）。采用8位Wilkinson电荷读出模式时，基线标准差的均值约为0.3 ADC计数，相当于约0.04光电子。

### *6.3. LED* 光注入模式

此模式的工作方式与前文所述的基线模式类似，但测量时间与注入光的时间基本一致。与基线模式一样，在 LED 模式下，数据以固定的触发频率采集；LED 按此频率脉冲，不受 MA-PMT 触发控制。

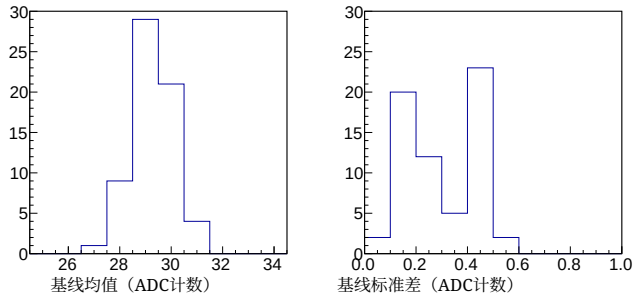


图23：TT 原型中一只多阳极光电倍增管基线数据的均值（左）和标准差（右）。采用 Wilkinson 电荷读出。

系统中的光采用与 [5] 中所述相同的系统注入。在该系统中，如图 24 所示，借助两个蓝色LED、直 PMMA光导和一个涂白的漫射盒，在每个端盖处将光注入到光纤–MA-PMT 光耦合器正前方的波长转换光纤中。

发光二极管由来自 ROB 的信号驱动脉冲，该 ROB 配备了专为此应用设计的驱动器，如前文所述。在发光二极管脉冲之后经过一段可配置的延迟（用于补偿发光二极管闪光所需的时间），系统会生成外部触发，以便在 MAROC3 中进行电荷测量。发光二极管强度可配置为产生平均强度约为单光电子的信号，如图25所示，该图展示了 8位威尔金森模式下的数字化电荷读出。图中还绘出了使用 [16]中所述函数对单光电子分布进行的拟合。在该分布中，与基线对应的峰仍清晰可见，此外还有一组分布，对应于

该多阳极光电倍增管通道检测到 1 至 5 个光电子。在这种情况下，光的测得平均强度（μ）对应于 1.92 ± 0.02 个光电子，而测得的 1 个光电子电荷（$Q1$）为 11.29 ± 0.09 ADC单位。由于光电倍增管增益已设置为 $10^6$，因此使用该测得电荷来校准 ADC单位与电荷之间的转换关系。

尽管该系统旨在使所有光纤获得近乎均匀的照明，但由于采用侧向照明，光耦合器边缘的光纤会接收到更多光线，并遮挡较靠近中心的光纤。由于这些几何效应，

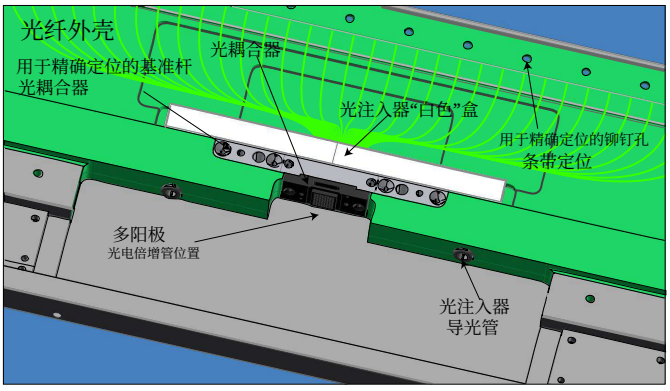


图 24：端盖中央部分的三维视图。

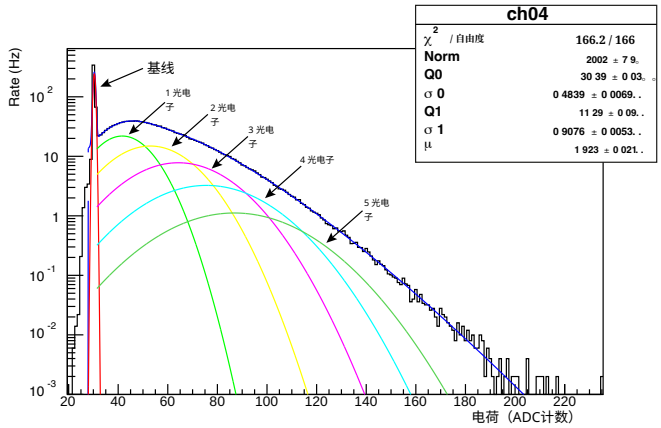


图25：使用光注入系统测得的电荷分布。

不同光纤的照明强度可能相差 3 倍，如图26所示。为了使前文所述的拟合达到最佳效果，宜调节光强度，使观测到的平均光子数处于 1–2 光电子范围内 [17]。在此范围内，基线和单光电子峰都清晰可见。

随后可使用光注入系统确定 MAROC3 中使用的增益均衡因子（g.e.f.），以均衡多阳极光电倍增管所有通道的增益。图27显示了使用这些增益均衡因子进行增益均衡前（红色）和均衡后（蓝色）测得的各通道增益。均衡前，增益最大相差可达3倍；经过此程序后，增益差异仅为30%。

预计在整个实验期间定期使用此 LED模式，主要用于监测多阳极光电倍增管增益。

### *6.4.* 正常运行模式

此模式用于常规数据采集。在这种情况下，超过阈值的 MA-PMT信号会按照前文所述产生 MAROC3 触发。此外，

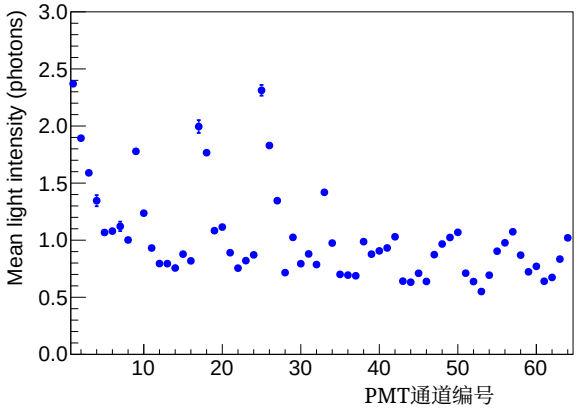


图26：使用光注入系统测得的单个多阳极光电倍增管各通道平均光强度。平均强度的变化是由几何效应导致的。

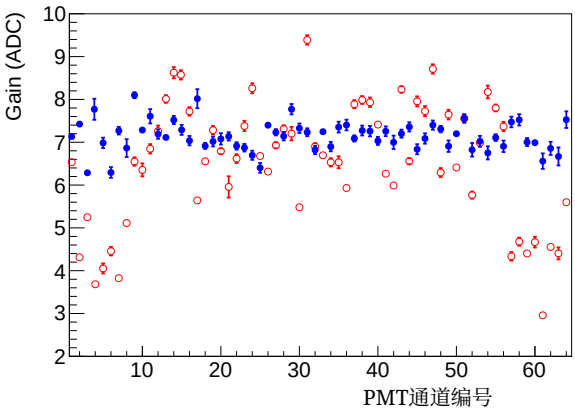


图27：使用光注入系统测得的各通道增益。红色空心（蓝色实心）标记表示增益均衡程序前（后）的增益。

在此模式下，可以启用 ROB 中的零抑制以减小数据量。

为防止出现意外的高计数率，也可以完全禁用电荷读出，这样既能缩短探测器死时间、显著减小数据量，又能保留触发通道的信息。目前正在研究一种同时采用和不采用电荷读出的混合数据采集方案。在这种方案下，如果数据采集系统未在处理其他触发的电荷读出，新触发便会启动电荷读出。但如果数据采集系统正忙，则不会执行电荷读出，只保存触发通道和触发时间。

正常模式下，靶跟踪器读出系统产生的数据包含控制板提供的多阳极光电倍增管触发时间戳、用于标识多阳极光电倍增管上哪些通道被触发的触发寄存器，以及在启用电荷读出时测得的电荷。

## 7. 靶跟踪器原型

为测试正在开发的电子学，IPHC[7] 使用为OPERA实验生产的性能最差的模块，建造了一个靶跟踪器原型。该原型还配备了与靶跟踪器相同的电子学卡，用于测试。

该原型如图28所示，由4层组成。与 TT 一样，每层由两个相互垂直的平面构成。原型中的每个平面均通过将一个 TT 模块在距两端约1.7米处切割成3段制成，其中左右两端盖分别构成 x 向和 y 向平面，用于实现与 TT 相同的 x–y 符合。这意味着，原型的每层均由单个 TT 模块制成，其表面积约为一个 TT 墙表面积的1/16。与两侧均可读出的 TT 模块不同，原型模块仅能从一侧读出。

[7]Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien，斯特拉斯堡，法国。

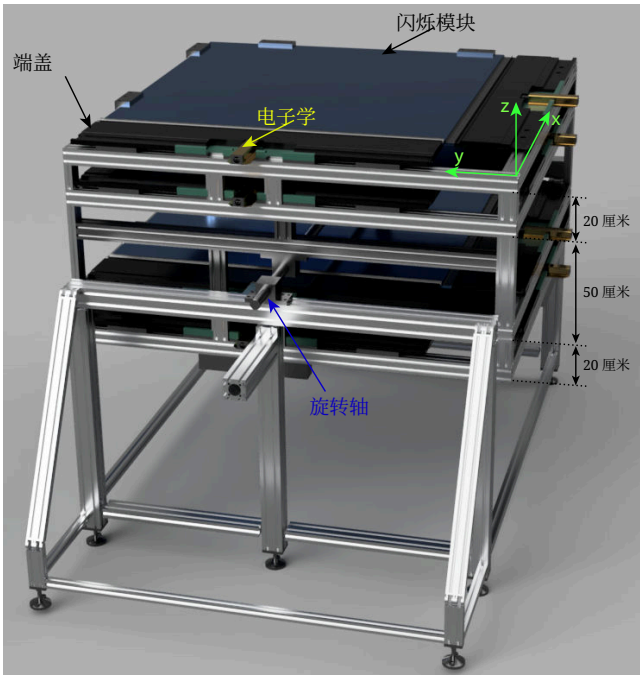


图 28：TT 原型示意图。

在8个模块的每个端盖中，均安装了一个多阳极光电倍增管、一个前端板和一个 ROB。全部8个 ROB 均连接到一个控制板，该控制板安装在支撑原型的金属框架上。出于测试目的，也可以使用专门为此设计的另一版本 ROB，直接从 ROB 读取原型数据，而无需经过控制板。利用该原型，已经能够验证校准流程，并使用自然信号测试各种电子学卡之间的接口；不过，由于缺少预期来自岩石放射性的高事例率，信号率低于江门中微子实验中的预期值。值得注意的是，第6节中的大多数图均根据该原型的数据绘制。

使用 TT 原型连续采集了数天的数据。这些数据使我们能够检查诸如同一层两个平面之间符合时间差异等情况，如图 29 所示。该图展示了左右两块卡上的 MA-PMT 触发平均时间差与各卡中被触发通道的关系。这一分布反映了从各个相互作用点到 x 和 y 方向的 MA-PMT 的光纤长度差异。

利用 TT 原型的数据，可以通过要求原型的 3 层或 4 层之间产生符合，并重建 μ子径迹，测量 IPHC 处的大气 μ子通量分布。图 30 展示了使用莫尔威德投影得到的重建 μ子方向。由于重建要求 3 层或 4 层符合，望远镜的视场被限制在距垂直方向约 70° 的范围内。如图 28 所示，在原型的旋转轴上加装了一个电机，通过旋转整个装置来扩大视场。

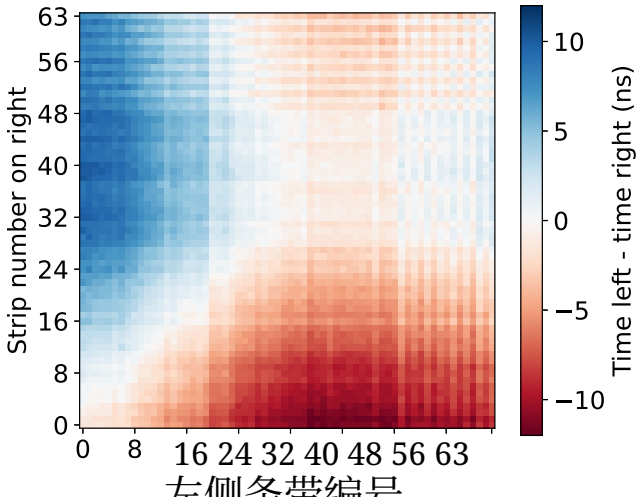


图 29：在“正常”数据采集期间，左右两块卡中的信号平均时间差随各卡中触发 MA-PMT 的条带变化的分布。

为了准确评估原型的定时性能，将其置于竖直位置（即相对于图 28 所示位置旋转 a 90°），以记录水平大气 μ子。在此位置，预计从两侧入射的缪子数量大致相同。图 31 展示了原型首层和末层记录到的命中之间的时间差。这两层相距 90 cm，假设所有缪子均以光速传播，预计观测到的时间差约为 3 ns。图 31 中观测到的两个峰分别对应从探测器两侧入射的缪子。两峰中心约位于 ±3 ns 处，其中 0 表示两个层同时观测到事例。时间离散约为 2 ns，其中包括闪烁体（2.3 ns）和波长转换光纤（7.6 ns）中的衰变时间，以及电子学阈值引起的时间游走。其他所有延迟，例如不同通道光纤长度的差异，均已校正。本次数据采集期间，用于为触发信号添加时间戳的时钟时间仓为 1.04 ns。两个峰略有不对称，这可能是由原型周围的其他物体造成的。

## 8. 安装

2017年，496个 TT 模块从 LNGS 运抵 JUNO场址。根据计划，TT 的安装将在中心探测器组装完成后开始，预计于2023年底完成。

为提供必要的刚度，设计了一种专用支撑结构（图4）。该结构包括两根横跨实验大厅、长48米的主梁，三层彼此间距为20米的横向桁架、一个用于支撑 JUNO 标定系统的支架，以及用于支撑 TT墙的支撑框架。

墙将安装在其支撑框架上，这些框架称为“台架”。台架上将沿一个方向放置 4 个模块

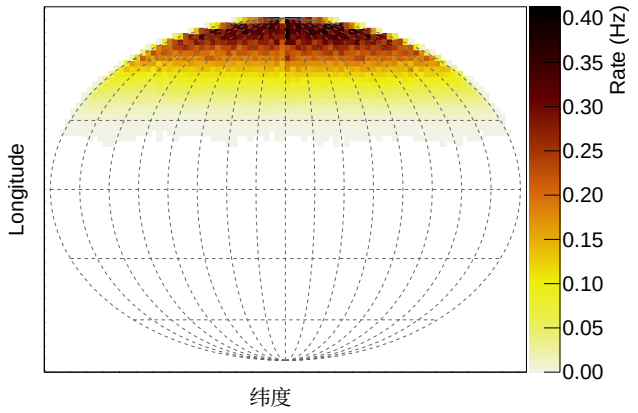


图 30：原型中观测到的缪子方向分布。使用莫尔威德投影将三维球面投影到一个平面上。经度线间隔为 30°，纬度线间隔为 22.5°。此次数据采集期间，原型朝上。颜色表示观测到的缪子率。

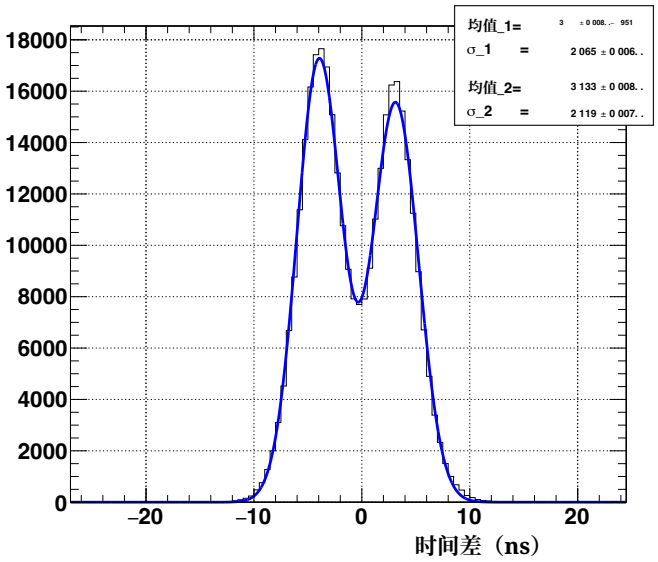


图 31：原型处于垂直位置时，大气缪子在原型首层与末层之间的时间差。

（x），另外 4 个模块则沿垂直方向（y）放置，如图 32 所示。

所有模块在安装前都将配备前端板和 ROB，并完成调试。随后，每面墙将配备控制板及电缆，用于将所有 ROBs 连接到控制板。按此方式组装后，将对墙进行调试（每个多阳极光电倍增管的计数率应相近，并与当地大气缪子和放射性率相符），然后用起重机将其移至探测器中的最终位置。支撑台足够坚固，可在起重机搬运期间以及安装后墙放置在横向桁架上时保持墙面平整，如图 33 所示。

总共将安装 60 面墙，分为 3 层，各层之间的高度间隔为 150 cm。为避免探测穿过相邻墙之间区域的大气缪子时效率降低，墙的所有边缘均相互重叠 150 mm。因此，彼此重叠的墙在安装位置的高度略有不同，必须按正确顺序安装。此外，烟囱上方三面墙的“支撑台”设计不同，其垂直位置间距仅为 21 cm。安装期间，将使用测量仪器测量墙的位置，精度约为 1 mm。在数据采集期间，还可借助大气缪子进一步验证墙之间的相对对准情况。

根据安装计划，每天将在探测器中组装并安装一面墙。该时间还包括对模块进行固化所需的时间，以修复运输或储存条件可能导致的任何漏光。

## 9. 老化监测

TT条由 AMCRYS-H 公司于 2004 至 2006 年间历时两年生产。预计在 TT 用于 JUNO实验之前，塑料闪烁体会出现一定程度的老化，而且这种老化会在探测器的整个生命周期内持续发生。

从 2006 年 8 月至 2013 年 4 月，在 OPERA 束流（欧洲核子研究中心至格兰萨索中微子实验，CNGS）运行期间，OPERA实验的电子卡几乎一直在记录大气缪子以及由 $\nu_\mu$ CC 相互作用产生的缪子。在整个数据采集期间，靶跟踪器探测器中重建了超过 $10^6$ 条直线 μ子径迹。这些径迹尤其用于测量 TT 模块探测效率，并监测 TT 对最小电离粒子的响应稳定性。在 1/3 p.e. 阈值下测得，TT 模块在“或”模式下的探测效率为 (98.5 ± 0.3)%（即要求闪烁体条至少一侧的信号高于阈值）[19]。塑料闪烁体的老化程度通过图 34 所示 TT 响应分布的最概然值随时间的变化进行估算，图中结果取自

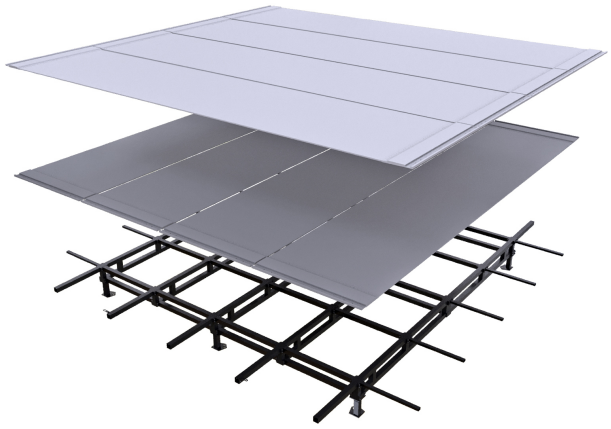

图 32：尺寸为 $7.6 \times 7.6$ m$^2$，的 TT 墙组件，安装在称为“台架”的支撑框架上。

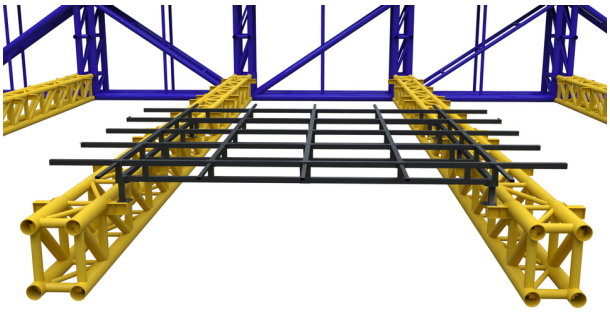

图33：靶跟踪器支撑结构中 TT“台架”的安装示意图。

CNGS 为期五年的运行周期（2008–2012） [20]。

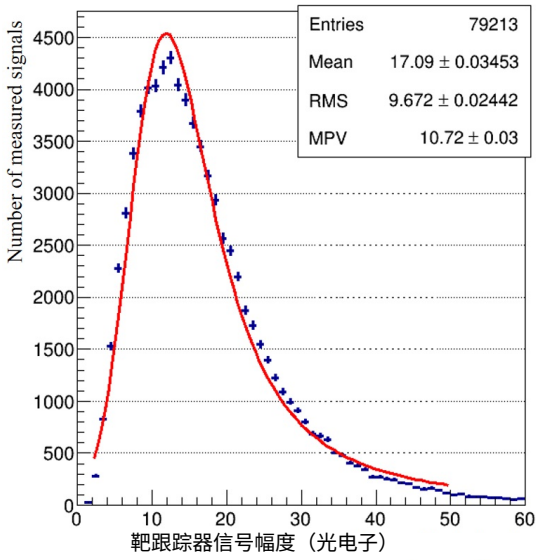


图34：OPERA靶跟踪器信号幅度的分布，拟合曲线为朗道分布。该分布所用数据采集自 CNGS 运行期间（2008–2012）。

测得老化的特征值为每年光产额损失 (1.7 ± 0.2)%，这与塑料闪烁体制造商给出的间接估算值（11.9 年内损失 ~20%） [21]一致。事实上，这一评估反映的是整个系统的老化，其中还包括 TT 条其他组件和材料（如 WLS 光纤、胶水等）的特性可能发生的变化。

为了跟踪OPERA探测器拆卸后至其用于江门中微子实验（JUNO）期间靶跟踪器（TT）敏感材料的老化情况，运输至中国并随后储存期间，部分模块仍配备着原有的OPERA电子设备。在这些模块安装到JUNO之前，它们被用于记录探测器储存期间穿过探测器的大气缪子。这样，即使模块数量减少，仍然可以记录大气缪子。尽管靶跟踪器储存期间，装有模块的集装箱布局曾多次改变，但每个时期采集的数据都表明，缪子穿过时的平均信号幅度保持稳定。值得注意的是，集装箱布局的改变可能会导致各时期的信号幅度出现系统性变化——

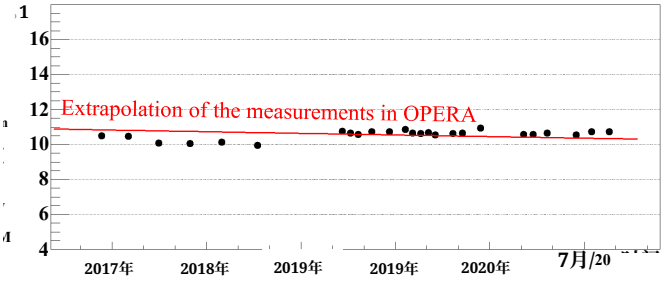


图35：TT 幅度的最概然值（MPV）随时间的变化。此数据采集时期对应于 TT 模块在中国存放、尚未组装到江门中微子实验之前的阶段。2019年初，TT 从中山的一处仓库运至 JUNO场址。红线表示根据 CNGS 运行期间测得的幅度损失外推得到的预期幅度。

正如2019年初移动集装箱时所观察到的那样，这种变化会使各时期的信号幅度产生系统性偏移；不过，各时期内部的相对比较会受到相同的系统偏移影响，因此仍可用于测量相对性能退化。对采集数据的分析表明，与前文所述的老化相比，塑料闪烁体的性能没有进一步退化（图35）。

最后，从约20年前生产至江门中微子实验开始数据采集，光电子数预计会减少约20%。生产后在每条条带中部（最不利位置）观测到6个光电子，因此预计在江门中微子实验开始时为4.8个光电子。采用1/3光电子阈值时，缪子探测效率仍与初始水平相当。如果江门中微子实验数据采集期间需要更多光电子，可以在光纤光耦合器与多阳极光电倍增管玻璃之间加入光学润滑脂；此前未采用这一做法，是因为没有必要。测试表明，这样可使探测到的光电子数增加约15%，从而弥补老化造成的大部分损失。

## 10. 总结与结论

OPERA实验靶跟踪器于2006年至2013年间利用CNGS中微子束和大气缪子运行。退役后，它被送往中国，作为中微子振荡江门中微子实验的顶部径迹探测器（TT）。现有的$6.7 \times 6.7$ m$^2$ TT墙将分布在水切伦科夫探测器上方水平网格的3层中。TT将有助于研究大气缪子穿过时产生的本底，从而降低因 $^{9}$Li和 $^{8}$He衰变模拟江门中微子实验中心探测器中的反贝塔衰变而产生的系统误差。尽管TT未覆盖中心探测器上方的整个区域，它仍将帮助探测器的其他部分调整算法，以便更准确地重建大气缪子，并对受影响区域实施 veto。

为此，靶跟踪器的电子学经过了改造，以应对岩石放射性引起的高本底——

性。这些电子学包括每个传感器对应的一块前端板和一块读出板。TT 墙上的全部 16 个传感器都连接到一块集中器板，其作用是在同一 TT 墙内进行 x–y符合，以产生第一级触发。集中器板与全局触发板通信，由后者提供三层 TT 触发；同时，集中器板也与江门中微子实验的数据采集系统通信。经过全局触发板后，靶跟踪器的触发率预计约为 2 千赫兹，通过离线缪子径迹重建可降至每秒几次。

为验证整套电子学链路和触发策略，我们采用与TopTracker相同的元件构建了一个原型。

靶跟踪器于2017年运往中国，并存放在温度低于 25 ℃的大厅中，以将塑料闪烁体的老化控制在合理水平。预计这种老化会导致闪烁光每年损失约1%。在等待靶跟踪器安装到地下江门中微子实验场址期间，我们利用大气缪子监测闪烁体的老化情况。迄今为止，观测到的老化程度与预期相符。

靶跟踪器预计将于2023年年底安装。评估认为，安装时间将少于六个月。

## 致谢

我们衷心感谢中国广核集团持续开展合作。我们感谢中国科学院、国家重点研发计划、中国科学院粒子物理卓越中心、五邑大学以及中国上海交通大学李政道研究所的支持；感谢法国国家核物理与粒子物理研究所（IN2P3）、意大利国家核物理研究所（INFN）、意大利—中国合作研究计划 MAECI-NSFC、比利时科学研究基金会（F.R.S-FNRS）和卓越科学计划（EOS）框架下的 FWO、巴西国家科学技术发展委员会、智利国家研究与发展署、查理大学研究中心和捷克共和国教育、青年和体育部、德国科学基金会（DFG）、亥姆霍兹联合会和 PRISMA 卓越集群+ 、俄罗斯联合核研究所（JINR）和莫斯科国立大学、俄罗斯科学基金会（RSF）与中国国家自然科学基金委员会（NSFC）联合研究计划、中国台湾科技部和教育部、泰国朱拉隆功大学和素兰拉工业大学，以及美国加州大学欧文分校的支持。特别是，本研究获得了法国国家计划“未来投资”倡议下卓越计划 IDEX-Unistra（ANR-10-IDEX-0002-02）和 EUR-QMat（ANR-17-EURE-0024）的支持，也获得了中国科学院战略性先导科技专项（项目编号 XDA10010300）的支持。

我们谨向所有与我们的研究机构合作开发并提供材料的私营公司表示感谢材料。我们尤其感谢 OPERA 合作组向江门中微子实验合作组捐赠所有靶跟踪器模块。最后，我们感谢所有在过去这些年里给予我们帮助的技术人员，他们并非本文作者。

## 参考文献

[1] Z. Djurcic 等，JUNO 概念设计报告（2015）。arXiv: 1508.07166。[2] A. Abusleme 等，JUNO 物理与探测器，Prog. Part. Nucl. Phys. 123 (2022) 103927。arXiv:2104.02565, doi:10.1016/j.ppnp. 2021.103927。[3] F. An 等，JUNO 中微子物理，J. Phys. G 43 (3) (2016) 030401。arXiv:1507.05613, doi:10.1088/0954-3899/43/ 3/030401。[4] M. Guler 等，OPERA：在 CNGS 中微子束中寻找 nu/mu <–> nu/tau 振荡的外观实验。实验提案（2000）。[5] T. Adam 等，OPERA 实验靶跟踪器，Nucl. Instrum. Meth. A 577 (2007) 523–539。arXiv:physics/0701153，doi:10. 1016/j.nima.2007.04.147。[6] K. Li 等，基于 GDML 的江门中微子实验离线软件几何管理系统，Nucl. Instrum. Meth. A 908 (2018) 43–48。doi: 10.1016/j.nima.2018.08.008。[7] S. Agostinelli 等，GEANT4——一款模拟工具包，Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250–303。doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8。[8] S. Blin 等，MAROC，一款通用光电倍增管读出芯片，IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. 2010 ( 2010) 1690–1693。doi:10.1109/ NSSMIC.2010.5874062。[9] ANALOG DEVICES，AD9629 数据手册。网址：https://www.analog.com/en/products/ad9629.html# product-overview [10] CAEN，A7511 网页。网址：https://www.caen.it/products/a7511/ [11] M. Lipi´nski 等，White Rabbit：一种用于实现稳健亚纳秒同步的 PTP 应用，载于：2011 IEEE 国际测量、控制与通信精密时钟同步研讨会，2011，第 25–30 页。doi:10.1109/ISPCS.2011.6070148。[12] M. Lipinski 等，White-Rabbit 节点。网址：https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/Node [13] AMD XILINX, Zynq UltraScale+ MPSoC。网址：https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/ soc/zynq-ultrascale-mpsoc.html [14] Image Matters，Origami B20 模块（2018）。网址：https://solutions.inreviu m.com/products/pdf/ ORIGAMI_数据手册_A4_2018Mar.pdf [15] AMD XILINX，UltraScale 架构与产品数据手册：概述。网址：https://www.xilinx.com/content/dam/xilinx/support/ documentation/data_sheets/ds890-ultrascale-overview. pdf [16] E. H. Bellamy 等，使用光电倍增管对光谱通道进行绝对校准和监测，Nucl. Instrum. Meth. A 339 (1994) 468–476。doi:10.1016/0168-9002(94)90183-X。[17] N. Anfimov 等，优化光探测器校准的光强度，Nucl. Instrum. Meth. A 939 (2019) 61–65。arXiv:1802. 05437，doi:10.1016/j.nima.2019.05.070。[18] AMCRYS-H，闪烁材料、探测器与电子学。网址：https://www.amcrys.com [19] S. Dmitrievsky，《在 OPERA 实验中利用电子探测器搜寻中微子相互作用并研究中微子性质》（Search for neutrino interactions and investigation of neutrino properties with the help of electronics at the OPERA experiment），博士论文（2015）。网址：http://operaweb.lngs.infn.it/Opera/ptb/theses/ theses/Dmitrievsky-Sergey-PhD-thesis.pdf [20] 欧洲核子研究中心，CNGS 网页。网址：http://proj-cngs.web.cern.ch/proj-cngs [21] B. V. Grinev，V. G. Senchyshyn，《塑料闪烁体》（Plastic scintillators），Acta，哈尔科夫，2003，ISBN: 966-7021-67-X。