

2016年粒子物理学热点回眸

阮曼奇¹, 傅雪², 陈明水³, 周宁^{4,5}

1. 中国科学院高能物理研究所实验物理中心, 北京 100049
2. 《科技导报》编辑部, 北京 100081
3. 中国科学院高能物理研究所天体物理中心, 北京 100049
4. 上海交通大学物理与天文系粒子物理与核物理研究所, 上海 200240
5. 清华大学物理系, 北京 100084

摘要 盘点了2016年粒子物理学的研究热点,在希格斯物理、新物理直接搜索方面提高了测量精度,积累了大量数据;中微子物理方面 θ_{13} 的测量精度提高到了4%;低能强相互作用物理方面确认了5夸克态的存在,同时发现多个可能的4夸克态;暗物质搜索方向全面压低WIMP粒子及其他类型暗物质粒子同普通物质相互作用的截面。

关键词 粒子物理学;研究热点;希格斯玻色子;低能强相互作用;中微子;暗物质

粒子物理学关心的是“世界由什么组成”、“世界的基本运行规律是什么”这两个问题。随着科学技术的发展,人们对这些问题的理解也在不断深入。时至今日,粒子物理学对这两个问题的解答可由标准模型来概括。在标准模型看来,物质由自旋为半整数的费米子

组成,而物质间的相互作用则通过自旋为整数的玻色子来传递。通过规范相互作用的框架,标准模型解释了自然界中的电磁、弱和强这3种基本的相互作用。同时,在标准模型的框架中,基本粒子主要通过和希格斯粒子的相互作用获得质量。图1是标准模型中的基本粒子,包含12种费米子(外圈),分为夸克(红色部分)和轻子(绿色部分)两类;规范玻色子(内圈)以及质量起源——希格斯玻色子(中心)。

型以令人难以想象的精确度,准确预言、诠释了碰撞机实验中几乎所有可观测到的现象。但标准模型本身有大量的理论缺陷和自由参数,很难被视作一个终极理论。物理学界普遍认为,在标准模型背后存在更加基础的物理规律,而标准模型只是相对低能有效理论。因此,深入理解标准模型,搜索超出标准模型的新物理,是目前粒子物理乃至天体物理发展的核心任务。

目前,人们确知自然界中存在若干标准模型无法诠释的现象,因此这些方向便自然成为粒子物理下一步发展和人类寻找更基础的物理规律的突破口。这些方向包括:希格斯物理、新物理直接搜索,中微子物理,低能强相互作用物理,暗物质搜索等。本文简要介绍2016年上述方向的现状和进展。

1 希格斯物理、新物理直接搜索

位于欧洲核子研究中心(CERN)地下100 m处的大型强子对撞机(LHC)在2016年6月底运行亮度达到了当初的设计指标,即 $10^{34}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 对撞事例率。在2016年8月初于美国芝加

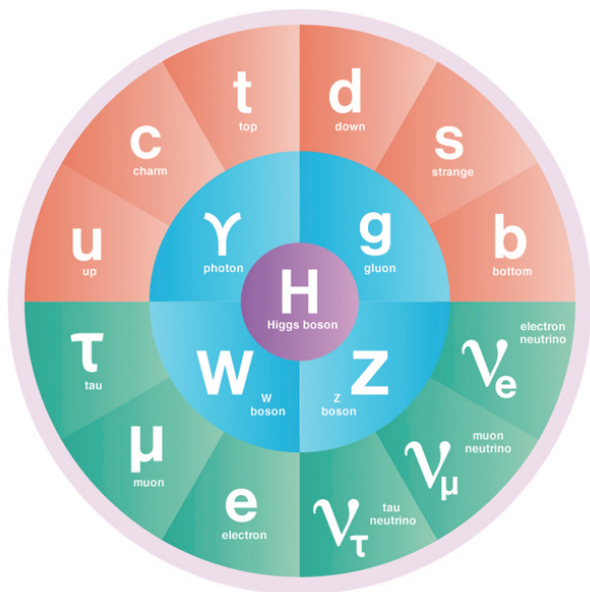


图1 基本粒子标准模型

收稿日期:2016-12-25;修回日期:2017-01-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0400400);中国科学院“百人计划”项目(Y3515540U1)

作者简介:阮曼奇,副研究员,研究方向为粒子物理及探测器物理,电子信箱:manqi.ruan@ihep.ac.cn

引用格式:阮曼奇,傅雪,陈明水,等. 2016年粒子物理学热点回眸[J]. 科技导报, 2017, 35(1): 16-20; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.01.002

哥举行的国际粒子物理大会上,公开了CERN2016上半年在LHC上进行的几个实验所获取的新数据的结果,对上帝粒子——希格斯玻色子的研究,其信号显著度已超过第一期运行的结果。

2015年底,LHC上出现了一个质量为750 GeV的新粒子的迹象,成为理论物理学家讨论的焦点。然而很可惜,最新数据表明该迹象只是统计涨落造成的假象^[1-2]。新物理信号的缺失,进一步压缩了包括超对称理论在内的各类新物理理论的生存空间。目前大量新物理模型可能存在的能区都被限制到1 TeV以上,个别模型的存在能区甚至达到20 TeV量级。2016年ATLAS和CMS两大探测器各采集了约 3.2×10^{15} 对撞事例(40/fb)的数据(图2),大幅超过2016年初设定的目标25/fb。预计2017年初将会有大量的新结果公布,届时有望在

进一步掀开上帝粒子面纱的同时,能够有额外的惊喜。

2 中微子物理

标准模型预言的中微子是无质量的,这与实验相悖。因此,中微子是寻找新物理的重要突破口。在标准模型中存在3代费米子,其中中微子和带电轻子——对应,分别称为电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子。事实上,中微子不仅有质量,它的质量本征态还和味道本征态不同,期间相差一个么正矩阵(PMNS矩阵):

$$U = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & -c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{13} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & c_{12} - s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}c_{13} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{13}e^{-i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

这意味着不同味道的中微子在运动过程中会互相转化,这种现象称为中微子震荡。

中微子震荡行为由PMNS矩阵和中微子质量差共同决定。PMNS矩阵有6个参数,包括3个混合角(θ_{12}, θ_{13} 和 θ_{23}),1个CP破坏相角(δ)和2个Majorana相角(α_1, α_2);Majorana相角仅在中微子是其自身的反粒子时方有物理意义,和中微子震荡行为无关。中微子质量

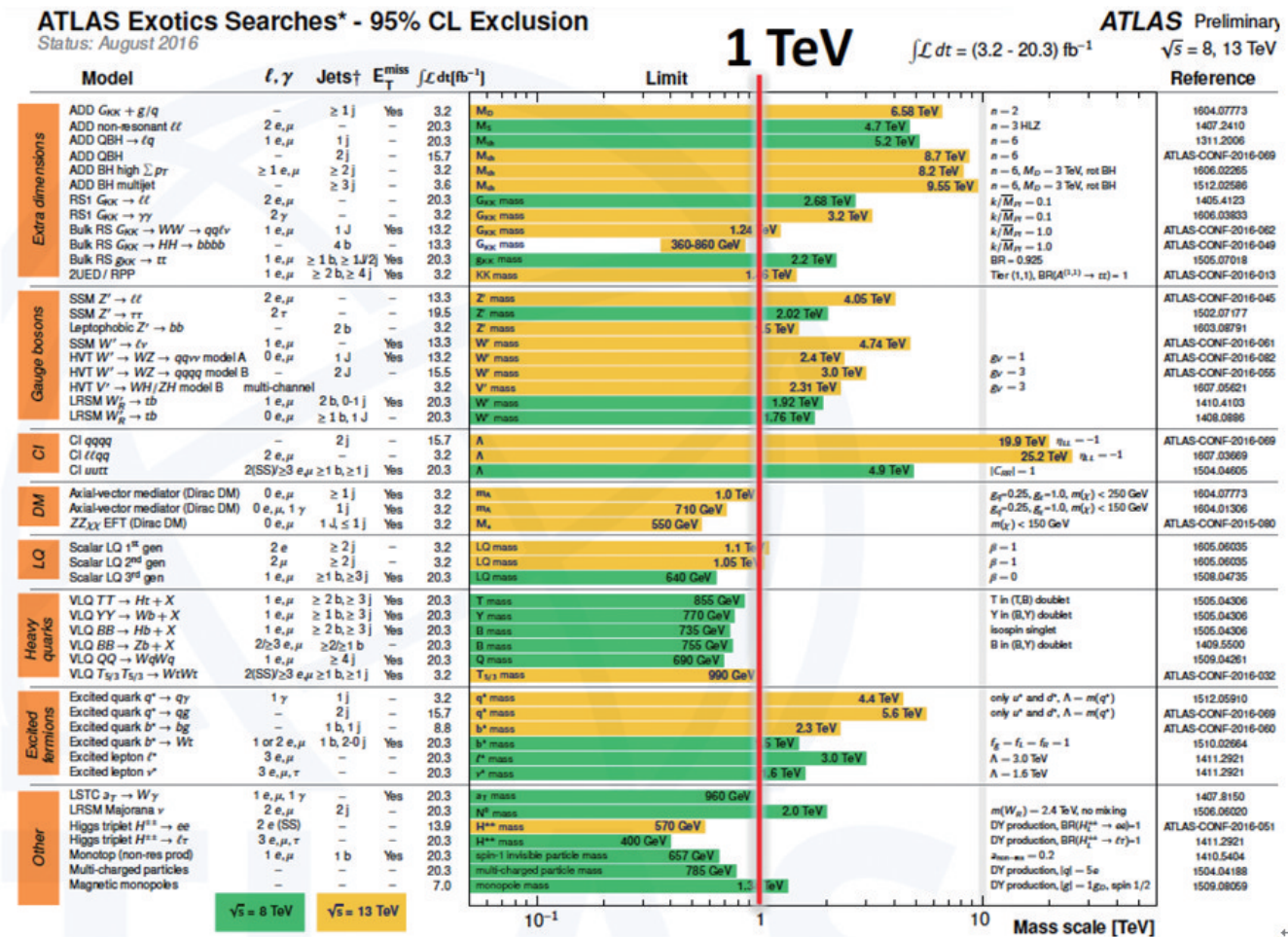


图2 LHC实验上ATLAS对新物理的搜索结果(95%置信度下新物理已被排除的能区)^[1]

一般记为 M_1 、 M_2 和 M_3 ，其质量差则通过 3 个参数 ΔM_{21}^2 、 ΔM_{31}^2 和 ΔM_{32}^2 表述。

目前，研究人员通过中微子实验，已经在 1%~10% 的相对精度下测得了 3 个混合角的数值，在 1% 量级精度下测得中微子质量差 ΔM_{21}^2 、 ΔM_{31}^2 和 ΔM_{32}^2 。然而，目前并不清楚中微子是否是 Majorana 粒子，也不清楚中微子质量顺序和中微子 CP 破坏相角。因此：目前中微子实验测量的前沿课题有，通过中微子震荡行为测定中微子质量顺序；通过无中微子的双 β 衰变实验搜索 Majorana 中微子，即验证中微子是否是自身的反粒子；搜索可能的惰性中微子和新物理。

2016 年，在中微子研究方面出现了很多新的实验结果，也有一些令人激动的实验迹象^[3-4]。大亚湾中微子实验的最新结果，把 θ_{13} 的测量精度从 6% 提高到了 4%。大亚湾中微子实验一直在积累数据，统计量比原来增加了 1 倍，因此精度有较大提高，在分析方法上也有改进。还有一些其他进展，如新的反应堆中微子能谱、寻找惰性中微子等（图 3）^[5]。

美国和日本的进展集中在中微子振荡的 CP 破坏和质量顺序上。对大部分粒子来说，粒子和对应的反粒子只是电荷符号不同，参加的反应都是对称的，称为“CP 对称”，但中微子或许并不遵循这种对称，称为“CP 破坏”。如果中微子 CP 破坏比较大的话，那么宇宙中正反物质的不对称性就有可能是中

微子造成的。日本的 T2K 实验和美国的 NOvA 实验都是长基线加速器中微子实验，他们报告的最新结果都倾向于最大的 CP 破坏。

质量顺序是指 3 种中微子到底哪个最轻、哪个最重，它跟中微子的基本性质和味道结构有关系。NOvA 和日本超级神冈实验的大气中微子数据都倾向于正的质量顺序 ($M_3 > M_2 > M_1$)。他们给出的结果不是很确凿，大概 2 倍标准偏差，只能叫“迹象”，出错的概率是 5%。CP 破坏也一样，但难得的是每个问题都有 2 个独立的实验，给出一致的结果，大家认为很可能是正确的。正的质量顺序下，CP 相位角大约是 $3\pi/2$ 。此外，NOvA 也指出 θ_{23} 可能偏离 45° ，意味着 μ 中微子在振荡中不会完全转化为 τ 中微子，这个结果与日本的 2 个实验不太一致，需要更多数据研究。这是中微子振荡的重要结果。

意大利 GERDA 实验报告没有探测到无中微子双 β 衰变，这个结果比以前的灵敏度更高。如果探测到这种衰变，就说明中微子是自己的反粒子，即 Majorana 粒子——这将是诺贝尔奖级的成果。

3 低能强相互作用物理

标准模型中仅有夸克和胶子参与强相互作用。强相互作用具有渐进自由的性质：在高能区时强相互作用的强度较弱，而在低能区时强相互作用很强，微扰论失效，同时也出现了大量丰

富的实验现象。渐进自由意味携带色荷的粒子，比如夸克，无法自由存在。因此，强子，即参与强相互作用且能相对稳定存在的粒子，必须是由夸克和/或胶子组成、本身不带静色荷的粒子。

人们最熟悉的强子包括由 3 个夸克或反夸克组成的重子，比如质子、中子及由一对正反夸克组成的介子，比如传递核力的 pion 介子（核力可以被看作是强相互作用的剩余相互作用力）。与此同时，由多个（4 个、5 个甚至 6 个）夸克组成的粒子也可能不携带色荷，因此可能稳定存在。

自 2013 年发现 Zc3900 粒子以来，研究人员陆续在 BESIII 实验、Belle 实验以及 LHCb 实验中发现了多种 4 夸克态。在 2015 年，在 LHCb 实验中发现了 5 夸克态。在 2016 年，LHCb 实验在较为稀有的衰变道上确认了 5 夸克态的存在，同时发现了多个可能的 4 夸克态（图 4）^[6]。

4 暗物质寻找

大量的天文观测证实宇宙中存在暗物质。最新的 Planck 卫星的观测结果显示宇宙中约 5% 的质量来自于可见物质，约 27% 的质量来自于暗物质，其余质量来自于暗能量。但是对暗物质粒子本身的属性仍然知之甚少。粒子物理标准模型无法解释宇宙中暗物质的存在，一定存在着某种超出标准模型的新物理粒子。因此，暗物质研究是天文学和粒子物理研究中非常前沿和热

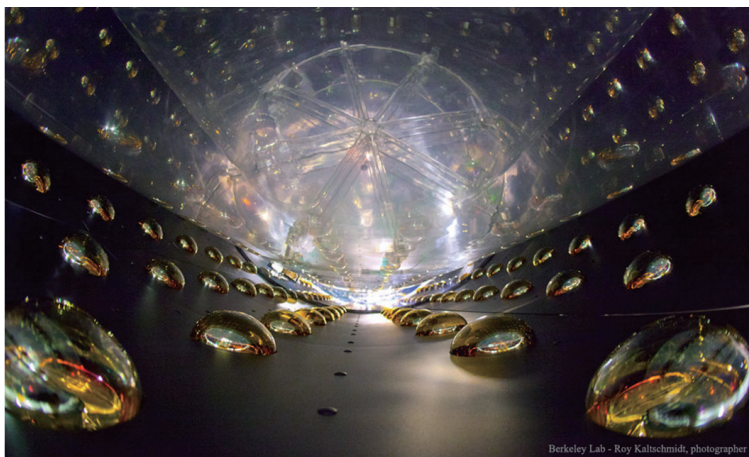


图 3 大亚湾反中微子探测器内部

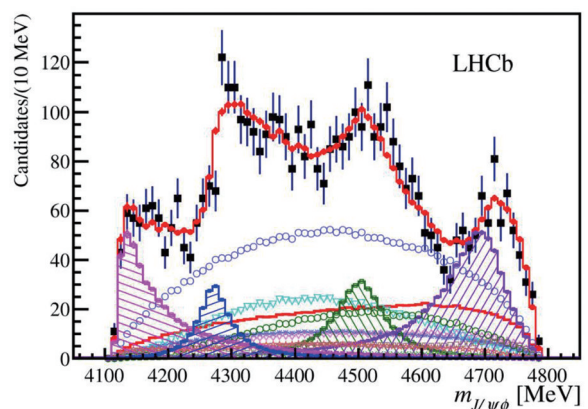


图 4 LHCb 实验于 2016 年发现的可能的四夸克态，由一对正反 c 夸克和一对正反 s 夸克组成

门的领域。

理论物理学家提出了大量的暗物质理论模型,其中弱作用重粒子(WIMP)理论非常值得关注,其与标准模型粒子之间存在的弱作用量级的相互作用不仅能够自然的符合现已观测到的暗物质密度,而且提供了粒子物理实验探测暗物质的途径。这种暗物质粒子的搜索可以通过对撞机探测(已知粒子对撞产生暗物质粒子,如LHC实验)、间接探测(探测宇宙中暗物质粒子湮灭或者衰变的产物,如AMS实验和

中国暗物质卫星“悟空”实验)以及直接探测(探测太阳系附近的暗物质粒子和已知粒子碰撞信号,如美国LUX实验^[7]、中国PandaX实验^[8]和CDEX实验^[9])等3种方式来进行。

在直接探测方面,美国LUX实验使用二相液氙作为探测单元,在WIMP探测上一一直处于领先地位^[10]。2016年,位于中国锦屏地下实验室的PandaX实验公布了近100天的曝光数据结果,将中高质量的暗物质和核子散射截面的探测灵敏度提高到 10^{-45} cm^2 ,刷新了由

美国LUX实验保持的纪录,在这一领域达到了世界领先的水平。这个结果被《Physical Review Letters》选为和封面文章(图5)^[11]。

在间接探测方面,丁肇中领导的AMS实验公布了5年实验数据分析结果(图6)^[12]。初步的分析显示了在高质量反电子谱的地方有明显的超出,而1 TeV的暗物质粒子是解释这个超出的可能之一。

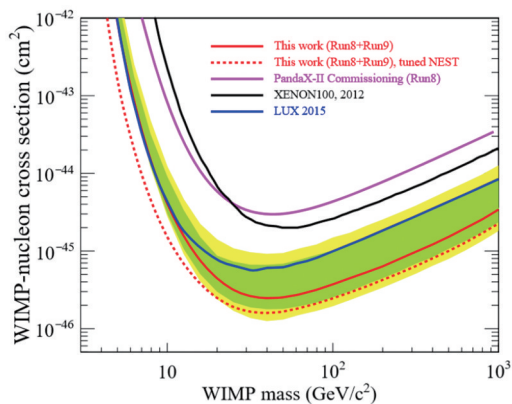


图5 90% 置信度下的WIMP-核子作用截面上限

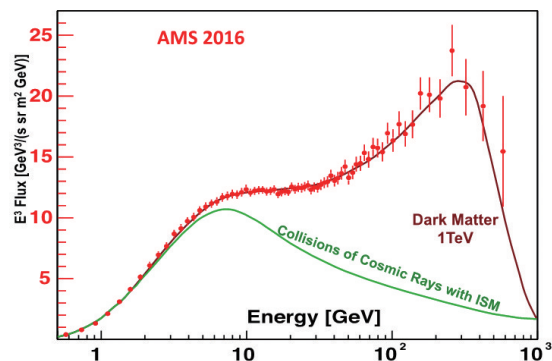


图6 AMS实验正电子谱测量结果

中国在2015年12月发射的暗物质探测卫星“悟空”已经采集了1年的数据,探测器的各项性能指标都达到设计标准,而且能够涵盖更高的电子能量区域。暗物质探测卫星的数据分析工作正在紧张进行中,期待观测到更多的反电子信息,揭示暗物质的秘密。

位于欧洲核子中心的大型强子对撞机LHC的2个探测器ATLAS和CMS正在继续推进对撞机上暗物质的探测。直接探测、间接探测和对撞机探测这3个方向相互独立又相互验证补充。一旦任一方向发现了疑似暗物质信号,其他两个方向将对疑似信号进行细致全面的寻找。

5 结论

2016年,粒子物理学在各个可能的探索方向进行了细致的搜索,推进了各方面的认知前沿。

在新物理搜索和希格斯粒子的精确测量方面,13 TeV的LHC质子对撞刷新了新物理可能存在的最低能标,也在更高的精度下检验了希格斯粒子的性质。暗物质搜索依然没有给出正面的信号,但在全面压低WIMP粒子及其他类型的暗物质粒子同普通物质相互作用的截面。LHCb实验上观测到了大量可能的新强子态。中微子研究呈现一片生机勃勃的姿态:大亚湾中微子实验的精度进一步提高;同时,中微子学

界在若干关键方向上观测到令人兴奋的迹象。预期下一代的中微子探测器将全面刷新人们对中微子物理的认识。

于此同时,物理学家针对未来的粒子物理对撞机进行了大量的预研。其中包括中国粒子物理学界所倡议的环形正负电子对撞机项目。此类项目以希格斯粒子的精确测量为核心物理目标,同时拥有强大的新物理搜索扫描能力。粒子物理学界在为实现未来的重大突破而积极准备着。

致谢:中国科学院高能物理研究所曹俊研究员提供支持和相关资料。

参考文献 (References)

- [1] CERN. ATLAS report at CERN council[EB/OL]. [2016-12-25]. <http://indico.cern.ch/event/595054>.
- [2] CERN. CMS report at CERN council[EB/OL]. [2016-12-25]. <http://indico.cern.ch/event/595054>.
- [3] Indico. International workshop on next generation nucleon decay and neutrino detectors (NNN16)[EB/OL]. [2016-12-25]. <http://indico.ihep.ac.cn/event/6156>.
- [4] 中国科学院高能物理研究所大亚湾反应堆中微子实验工程办公室. Daya Bay reactor neutrino experiment[EB/OL]. [2016-12-25]. <http://dayabay.ihep.ac.cn/twiki/bin/view/Public>.
- [5] 曹俊. 曹俊 IHEP[EB/OL]. [2016-12-27]. <http://www.weibo.com/caojun73>.
- [6] Indico. LHCb report at CERN council[EB/OL]. [2016-12-27]. <http://indico.cern.ch/event/595054>.
- [7] LUX. Large Underground Xenon (LUX) dark matter detector[EB/OL]. [2016-12-27]. <http://www.sanfordlab.org/science/lux>.
- [8] PandaX Dark Matter Experiment. PandaX Dark Matter Experiment[EB/OL]. [2016-12-27]. <https://pandax.physics.sjtu.edu.cn>.
- [9] Kang Kejun, Cheng Jianping, Li Jin, et al. Introduction of the CDEX experiment[EB/OL]. [2016-12-27]. <https://arxiv.org/abs/1303.0601>.
- [10] Akerib D S, Araújo H M, Bai X, Improved limits on scattering of weakly interacting massive particles from reanalysis of 2013 LUX data[EB/OL]. [2016-12-27]. <https://arxiv.org/abs/1512.03506>.
- [11] Tan A, Xiao M, Cui X, et al. Dark matter results from first 98.7 day data of PandaX-II experiment[J]. 2016, 117(12): 121303.
- [12] Samuel Ting. The first 5 years of AMS on the International Space Station[EB/OL]. [2016-12-27]. <https://cdsweb.cern.ch/record/2238506?ln=en>.

Looking back 2016 significant events in particle physics

RUAN Manqi¹, FU Xue², CHEN Mingshui³, ZHOU Ning^{4,5}

1. Division of Experimental Physics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
2. The Editorial Department of 《Science & Technology Review》, Beijing 100081, China
3. Division of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. INPAC, Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
5. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Review the research hotspots of particle physics, improve the measurement accuracy and accumulated a large number of data in Higgs physics and new physics. In Neutrino physics, the measurement accuracy of θ_{13} improved to 4%. low energy strong interaction physics confirmed 5 quark states, also found a number of possible 4 quark state dark matter search direction, and fully depressed WIMP particles and other types of cross section of dark matter particles with the interaction of ordinary matter.

Keywords particle physics; hotspots; higgs boson; low-energy feature of the strongly interactin; neutrino; dark matter

(责任编辑 陈广仁)