高能物理实验中的数据与计算技术

陈刚*

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

*联系人, E-mail: Gang.Chen@ihep.ac.cn

收稿日期: 2021-04-08; 接受日期: 2021-07-13; 网络出版日期: 2021-08-20

摘要 高能物理也称作粒子物理, 是研究物质微观结构与相互作用、宇宙起源的重要基础科学前沿分支. 高能物理实验装置非常复杂, 产生的实验数据规模巨大, 从20世纪后期的实验每年产生TB级发展到现在最新的实验每年产生近百PB. 过去数十年来高能物理一直对数据与计算技术提出挑战, 同时也充当数据与计算技术发展的推动者. 高能物理实验一方面在利用最新计算机技术实现对数据及计算的支撑, 同时也在推动计算机技术发展与突破. 本文首先介绍高能物理实验数据与计算的基本模式, 列举典型的高能物理实验说明数据规模及数据处理的挑战. 在此基础上介绍高能物理计算技术的发展过程, 特别就当前主流的网格计算、云计算技术及数据共享进行了讨论.

关键词 数据分析, 大数据, 网格计算, 高能物理实验, 离线数据

PACS: 07.05.Kf, 07.05.Bx, 29.90.+r

1 引言

高能物理(也称粒子物理)是研究物质微观性质及宇宙起源的基础科学, 是基础科学的最前沿. 高能物理分理论和实验两大分支, 其中理论物理的任务是提出理论预言或对实验结果进行解释, 实验物理的任务是依托实验对理论预言进行验证和寻找理论预言以外的新发现. 理论物理计算需利用超级计算机求解格点量子色动力学(Lattice QCD)模型和方程、矩阵求解重整化群、场方程等, 这类理论计算不是本文讨论的主题. 本文将要讨论的高能物理计算是指实验数据处理、模拟及分析所需的计算, 也称为离线计算(Offline Computing). 高能物理实验需要研究组成物质最小单元的

粒子, 探索其微观结构和现象, 因此需要建造对撞机、探测器、宇宙线观测站以及空间科学卫星等规模巨大、结构复杂的科学装置来开展实验研究. 大型的实验装置意味着产生海量的数据, 需用高性能的计算机进行数据处理. 过去数十年高能物理一直对科学计算技术提出挑战, 同时也推动计算技术的发展. 本文将介绍高能物理实验的数据与计算需求挑战, 讨论现代高能物理计算的解决方案及未来发展方向.

2 高能物理的计算任务

高能物理计算主要涉及三个主要任务, 即实验数据事例重建、物理模拟和物理分析.

引用格式: 陈刚. 高能物理实验中的数据与计算技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 092003

Chen G. Data and computing for high energy physics experiments (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 092003, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0108](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0108)

实验装置(探测器)采集到的数字信号经过在线数据处理系统的过滤形成原始数据被保存下来. 原始数据记录的是粒子穿过探测器介质时探测单元的响应. 原始数据不能直接用于物理分析, 需要使用重建软件依据实验装置的运行条件进行粒子径迹、能量沉积等物理参数的重建, 产生具有物理意义的所谓重建数据. 这个过程称为事例重建. 现代大型高能物理实验的探测器规模巨大, 产生的数据复杂且数据量极大, 事例重建常常是高能物理计算的最主要的计算任务.

与事例重建平行的另一个计算任务是物理模拟. 该过程用物理模拟软件描述粒子与粒子、粒子与探测器介质等的相互作用过程从而模拟出粒子穿过探测器时探测单元的响应. 由此产生的数据结构和内容上与实验产生的原始数据一样, 但这种数据是由计算机根据物理理论模拟出来的. 模拟数据一方面用来帮助科学家理解探测器的行为, 另一方面用来与实验数据进行比对从而更方便地理解实验数据. 物理模拟需要用计算机对粒子相互作用及粒子运动路径的所有细节进行计算, 因此常需要大量的CPU时间.

高能物理计算的第三类任务是物理分析. 该过程通过对重建数据进行分析, 从中找出感兴趣的特定物理过程(事例)并与物理模拟数据进行比对, 验证物理理论的正确性以及精确提取出物理参数. 另一方面也可以通过物理分析在实验数据中寻找出理论没有预言到的新的物理现象, 从而实现新的发现. 物理分析往往在科学家自己的计算机上进行, 计算任务有时候比较分散.

高能物理研究的对象基本是粒子对撞或粒子与物质碰撞过程中的物理现象, 一次对撞或碰撞称为一个事例. 尽管物理研究追求大统计量, 需要对无数的事例进行研究, 但是每个事例都是完全独立的, 只需要把计算按事例划分成批量的小的计算任务并用单个CPU或者单个CPU核进行计算即可. 这种计算不需要CPU与CPU之间的协同, 可以用廉价的松耦合分布式计算集群实现批量作业. 而超级计算机的特点是CPU之间协同处理大型的复杂计算任务(即并行计算), 所以大部分高能物理的批量作业无法发挥超级计算机的并行化特点. 随着超级计算机的不断发展, 高能物理开始将某些包括物理模拟在内的可以用并行计算的任务移植到超级计算机上.

3 高能物理的数据挑战

过去30多年是国内外高能物理相关大科学装置迅速发展的时期. 几乎所有依托大科学装置的高能物理实验都对数据和计算提出了挑战. 本节将介绍这一时期以及未来高能物理相关大科学装置和大科学项目的典型案例, 分析数据规模和挑战.

(1) LEP

欧洲核子中心的大型正负电子对撞机LEP (Large Electron Positron Collider, 周长27 km)是20世纪末世界上规模最大的高能物理实验装置. LEP上共有4个大型实验探测器开展 Z^0 能区和WW对能区的粒子物理研究^[1]. 1989–2000年, LEP共运行了10.5年的时间. 由于当时的计算机能力、数据存储能力还不够强大, 实验只能筛选出那些最为重要的数据并保留下来(对科学目标进行了取舍). 十年间LEP的4个实验总共积累了不到20 TB的数据. 即使如此, 这样规模的数据在当时也是对计算机技术极大的挑战. 为应对LEP实验, 科学家发明了WWW技术、研究出新的计算模式^[2], 推动了计算机技术的变革.

(2) BEPCII/BESIII

北京正负电子对撞机BEPC (Beijing Electron Positron Collider, 周长240 m)是一个运行在粲物理能区的高能物理实验装置, BEPC上配备有一个实验探测器——北京谱仪(Beijing Spectrometer, BES). BEPC第一期于1989年开始运行. 2004年BEPC进行了技术升级成为BEPCII^[3], 对撞机亮度提升了100倍, 成为世界上亮度最高的粲能区对撞机. 北京谱仪在此期间进行了两次升级, 成为现在的BESIII. BEPCII/BESIII的主要物理目标是精确检验粒子物理标准模型以及寻找标准模型之外的新物理. 尽管BESIII探测器的规模要比LEP的探测器小很多, 但是升级后的实验装置性能得到大幅提升, 仍能产生大量的数据, 每年积累的原始数据达200 TB, 一年的数据即超过LEP 4个实验十余年运行积累的数据总量的10倍. BESIII原始数据经过事例重建后产生重建数据也被保存下来. 至2020年底, BESIII的原始和重建数据量总和已达7.1 PB, 用于数据处理和分析的CPU核达到1万余个.

(3) 中国反应堆中微子实验

大亚湾反应堆中微子实验和江门中微子实验是我国最重要的两个反应堆中微子实验. 大亚湾反应堆中

微子实验(Daya Bay)是一个研究中微子振荡的实验^[4],其主要目标是利用核反应堆产生的电子反中微子测定一个具有重大物理意义的参数——中微子混合角 θ_{13} . 大亚湾反应堆中微子实验从2011年12月开始运行,每年采集的原始数据达200 TB. 原始数据进行事例重建形成大量的重建数据用于物理分析. 到2020年12月结束实验数据采集时,实验的原始数据和重建数据总和达3.2 PB. 由于大亚湾反应堆中微子实验是一个国际合作实验,来自欧美的科学家需要共享实验数据共同开展科学研究,同时还需要分担数据处理的任务,本文作者所在的技术团队为大亚湾反应堆中微子实验建立了高性能的数据管理与传输系统,依靠高速网络将数据从大亚湾自动传输到北京的中国科学院高能物理研究所(高能所),再分发到欧美科研机构 and 大学的数据中心. 我们还为实验建立了计算平台,支撑数据处理和数据分析.

江门中微子实验JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory)是另一个国际领先的中微子实验,目标是测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数,并进行其他多项科学前沿研究^[5]. JUNO实验于2015年开始建设,计划2022年建成并开始运行取数,每年采集的原始数据约为2 PB,需要2万个以上CPU核的计算资源对数据进行分析处理. 与大亚湾中微子实验类似,JUNO也需要依靠高速网络将数据从江门传输到高能所然后再分发到欧美科研机构 and 大学的数据中心. 我们将大亚湾实验的数据管理与传输系统移植应用到JUNO实验上,采用分布式计算技术的JUNO计算平台正在搭建之中.

(4) LHAASO

高海拔宇宙线观测站LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory)建于四川省稻城县海子山,占地面积达1.36 km²,海拔为4410 m. LHAASO的核心科学目标是探索高能宇宙线起源以及相关的宇宙演化、高能天体演化和暗物质的研究^[6]. LHAASO由1 km²电磁粒子探测器阵列和有效面积达42000 m²的缪子探测器阵列、78000 m²的切伦科夫探测器阵列以及12台广角切伦科夫望远镜阵列组成. 这是目前世界上海拔最高、规模最大、灵敏度最强的宇宙射线探测装置,每年产生的原始数据约9 PB,重建数据约1 PB,因此每年至少积累10 PB的数据. 预计LHAASO将运行数十年,产生数百PB的数据. LHAASO的数据处理相

对比较简单,但仍至少需要1万多个CPU核用于数据处理. LHAASO的挑战在于大规模的数据传输与长期保存. 我们已经为LHAASO建立了从稻城到高能所的网络专线,并在稻城和高能所分别建立了两个计算中心为LHAASO实验提供服务.

(5) LHC

LHC是欧洲核子研究中心(CERN)的一个大型强子对撞机(Large Hadron Collider)^[7]. 包括来自中国科研机构 and 大学在内的世界12000名科学家参加LHC的4个主要实验(这4个实验分别为ALICE, ATLAS, CMS, LHCb). LHC实验的主要科学目标包括希格斯粒子的研究、强子中的CP破坏和新物理以及重离子对撞的研究. LHC实验还将研究和寻找暗物质、超对称粒子等新奇粒子以及破解正反物质对称性破缺之谜. 2009年LHC开始运行时,4个实验每年产生的原始数据约15 PB. 到2016年,每年产生的数据达50 PB. LHC是强子对撞机,不仅数据规模大且数据复杂,同时与其他高能物理实验一样需要对积累的所有数据统一进行处理,所以2016年需要约50万个CPU核用于数据处理. 目前LHC对撞机和4个实验探测器正在升级改造. 2026年完成升级后,LHC将变成高亮度LHC (High Luminosity LHC, HL-LHC), HL-LHC实验每年产生的原始数据将达到600 PB,需要大于 1×10^7 个CPU核用于数据处理.

(6) CEPC

环形正负电子对撞机(Circular Electron Positron Collider, CEPC)是中国科学家于2012年提出的未来对撞机^[8]. CEPC的周长将达到100 km,其目标是探索和研究希格斯粒子性质、宇宙演化、正反物质对称性破缺或者反物质丢失、暗物质等关键科学问题并寻找新的物理规律. 如果按期建成的话,CEPC将于2035年开始运行于希格斯工厂和Z工厂模式,共运行10年,累计的数据预计超过1 EB. 在这为期10年的实验计划中,CEPC将生产超过 1×10^6 个希格斯玻色子、 1×10^8 个W玻色子和近 1×10^{12} 个Z玻色子. W和Z玻色子是弱相互作用力的媒介子,在Z玻色子的衰变中,还将生产出数十亿的底夸克、粲夸克和陶轻子^[9]. 这些数据被物理学家用来进一步精确理解希格斯粒子的性质、宇宙早期演化、反物质丢失、寻找暗物质、真空稳定性等一系列未解的关键科学问题和寻找新的物理规律.

由于CEPC是正负电子对撞,产生的事例比LHC的事例要干净得多,即本底噪声较小,数据处理相对简单

一些, 但是保守估计仍需要超过100万个CPU核来处理这些数据.

尽管高能物理计算的模式基本相同, 但不同实验的数据复杂度差别巨大, 数据处理与计算对CPU的需求也差别巨大. 每个实验需要根据实验数据的实际情况来规划计算资源.

4 计算解决方案及技术发展

上一节简单介绍了一些典型高能物理实验的数据挑战. 可以看到, 高能物理实验是产生最多数据的科学领域之一. 下面通过一些计算系统的案例介绍计算解决方案和技术的发展史.

4.1 本地计算系统

尽管像LEP这样的大型对撞机实验产生的数据在当时已经规模很大, 但CERN的计算中心本地计算系统基本满足需求. 20世纪90年代初期, 大型机(Main-frame)和小型机(Minicomputer)是当时计算机的主流, 工作站(Workstation)开始逐步普及. 1989年, CERN主要使用IBM和Cray大型机以及VAX-11系列小型机进行数据处理和物理模拟. 1990年CERN引入了当时最新的工作站Apollo DN10000 (每个工作站配备4个CPU, 112 MB内存和4 GB的磁盘存储)用来替代大型机^[10]. 工作站的性能和稳定性显示出极大的优势, 因此CERN开始研究利用市场上高性价比的部件建立分布式计算系统, 即利用高速网络及管理软件将服务器连成一个整体, 组成分布式的大型机. 该分布式计算系统首开利用廉价计算机建立分布式集群之先河. LEP对撞机实验均是大型国际合作, 来自世界各国的大批科学家参与实验, 这就要求数据能够共享. 当时的互联网还不够发达, 只有少数发达国家才可以利用互联网进行数据传输. 高能所于1986年用拨号上网的方式向CERN发出了中国的第一封电子邮件, 并于1993年正式接入互联网. 本文作者和高能所及中国科技大学等机构的一批科学家参加丁肇中领导的L3实验^[11](LEP上的4个实验之一), 由于网络带宽有限, 利用网络进行大量数据传输有困难. 实验数据全部靠科研人员用数据磁带(如图1)带回国内.

北京正负电子对撞机和北京谱仪建成于20世纪80年代后期, 高能所计算中心为北京正负电子对撞机而

图1 (网络版彩图) 3480型磁带, 容量210 MB, 1990年生产
Figure 1 (Color online) The Type 3480 data cartridge, 210 MB, manufactured in 1990.

建, 在国内率先引进国际先进的DEC VAX系列计算机组成了计算机集群, 根据北京谱仪的特点采用Fortran语言自主开发了事例重建、物理模拟及数据分析软件并部署在集群上用于支持实验数据的处理. 1995–1999年, 随着北京谱仪数据计算需求的不断增长, 计算中心陆续引进了计算能力更为强大的HP计算机组成HP计算机集群, 逐渐替代VAX成为北京谱仪数据计算主平台. 由于VAX和HP的操作系统完全不同, 需要将所有VAX上的物理软件移植到HP系统上. 而HP的UNIX操作系统和后来的Linux很接近, 这为后来将软件移植到PC集群上打下了基础.

20世纪末期, 以Intel和AMD为代表的X86架构CPU性能越来越强, PC机逐步替代小型机和工作站成为科学计算的重要基础架构. 1998年高能所计算中心开始研究性能价格比更高的PC集群, 以Linux为操作系统的PC集群替代HP集群成为北京谱仪新的计算主平台(图2). 这种集群式计算资源模式一直延续到今天, 只不过现在用高密度的机架式或刀片式服务器代替了以前的PC机.

20世纪80年代, 高能物理实验的规模越来越大, 因此越来越依赖于国际合作. LEP这一类实验成为大型的国际合作, 参加每个实验的科学家达数百人并遍布世界各地. 在世界范围内方便、直接地进行信息交换成为一种迫切需求. CERN的Tim Berners-Lee于1989年构想并开发了一种超媒体协议将计算机网络和信息整合成一个系统, 网络上的每一条信息都赋予全域统一资源定位符(Uniform Resource Locator, URL), 并以

图 2 (网络版彩图)基于集群的计算系统
Figure 2 (Color online) Computing cluster system.

超链接(Hyperlink)的方式呈现, 使全世界的科学家能够在一个统一的平台上访问各种信息而不用关心被访问的信息具体的存放地点. 该技术称为WWW (World Wide Web). Tim Berners-Lee设计的技术方案如图3所示.

1993年, 欧洲核子研究中心将WWW技术免费向社会开放. 由于WWW技术为信息共享和交流提供了极大的方便, WWW技术的应用得到爆炸式的发展. 现在互联网上的绝大部分应用均基于WWW技术. WWW引发了第五次信息革命, 彻底改变了人们的经济和生活, 成为对人类历史影响最深远、最广泛的技术之一. WWW的发明说明尽管高能物理这样的基础研究不一定立刻就有应用价值, 但是基础研究过程中发展起来的技术是推动社会变革的动力.

4.2 网络计算

20世纪的高能物理实验对数据和计算的需求问题往往靠本地的计算中心就可以解决, 科学计算只占实验工作的很小一部分, 因此在实验项目中往往得不到足够的重视. 21世纪开始, 以LHC为代表的大规模高能物理实验对数据和计算提出了前所未有的挑战, 计算技术成为高能物理实验成功的关键因素之一. LHC实验已经不能仅靠CERN的计算中心来支撑, 因此CERN于2002年开始牵头建设一个全新的分布式高能物理计算系统, 将全世界的计算资源整合形成一个大

型的计算平台, 让世界各国的计算中心分担LHC的数据存储分析及计算任务. 该分布式计算系统称为“全球LHC计算网格”(Worldwide LHC Computing Grid, WLCG)^[12].

WLCG采用了分级式平台结构(图4), 根据规模和角色不同将计算中心分成零级(Tier-0)到三级(Tier-3)的网格站点, 其中位于CERN的零级站点负责数据记录、事例重建以及向一级站点分发数据; 一级站点共有11个, 分布在全球各大洲, 负责数据长期保存、数据处理与分析; 二级站点共有160多个, 负责物理模拟计算以及用户数据分析; 三级站点为实验小组的私有计算资源. 除三级站点外, 其他所有网格站点实行全局统一调度、资源共享. WLCG网格使LHC的每个实验将数据和计算任务智能化地分发到世界各地的网格站点, 实现数据的分析处理. 所有的科研合作人员能够通过网格平台透明地访问数据和计算结果.

WLCG系统由4个主要的组件构成, 分别为网络、硬件资源、中间件和物理计算软件. 高性能的网络是WLCG的关键, 只有通过网络才能使分布式计算网格系统成为可能. 为了首先保证WLCG零级站点和11个一级站点之间的高速数据交换, WLCG建立了专用光纤网络LHCOPN (LHC Optical Private Network), 网络的带宽为10–100 Gbps. 一级站点、二级站点以及三级站点之间的数据传输使用另一个虚拟专网, 即LHCONE (LHC Open Network Environment).

图 3 WWW技术方案(图片来自CERN)

Figure 3 Original proposal of the WWW (Courtesy: CERN).

LHCONE的网络带宽从1 Gbps到100 Gbps不等, 取决于网络站点的规模. 连接在两个专用网络上的站点之间采用互信模式, 网络通讯省略了复杂的安全控制策略, 从而使网络传输的效率大幅提升, 保证了整个WLCG数据的稳定高效传输.

WLCG每个网络站点负责各自的硬件资源建设和运行, 同时按要求进行软件升级, 确保网络站点的安全稳定运行. 每个网络站点的资源信息和运行状态自动发布到WLCG平台上以便于计算任务的统一调度.

中间件是管理网格系统的软件基础, 是介于网格硬件资源与物理分析软件工具的一种软件系统, 用来管理调度网格资源, 同时为用户提供访问网格资源的工具. 网格中间件的工具有分成四大类: 第一类是安全工具, 利用虚拟组织机制进行用户访问控制, 利用数字证书进行用户认证, 确保网络资源的安全性; 第二类是网格数据管理工具, 负责在广域网上进行数据的全局管理和传输, 确保数据的可发现和可利用; 第三

类是作业管理工具, 负责在网格平台上进行作业的调度, 根据网格平台的数据资源和计算资源的情况将计算作业分发到世界各地的网络站点; 第四类是信息管理工具, 负责监控和发现网格平台的数据、网络及计算资源状态, 为数据管理及计算作业调度提供决策依据. WLCG的中间件主要有两个: 一个是欧洲开发的EMI (European Middleware Initiative)^[13]; 另一个是美国开放科学网格(Open Science Grid)^[14]开发的VDT (Virtual Data Toolkit)^[14].

网格平台的最后一个重要组件是物理计算软件. 为应对LHC实验产生的海量数据, 每个实验都需要建立针对各自实验探测器特点的物理计算软件. 网络站点针对其支持的实验部署相应的软件, 从而为相应的实验提供服务.

WLCG的每个用户被赋予一个数字证书, 该数字证书由具备认证资格的数字证书签发机构(如高能所计算中心)签发. 用户凭借数字证书以唯一身份访问网

图 4 (网络版彩图) WLCG的分级结构(图片来自CERN)
Figure 4 (Color online) Tier system of WLCG (Courtesy: CERN).

格资源并在WLCG上运行计算作业或进行物理分析. WLCG是当前高能物理主流计算系统, 也是世界上最成功的分布式科学计算平台. WLCG目前共有40个国家和地区的170个站点, 汇集了50万个CPU核, 500 PB的存储空间, 每天完成约200万个计算任务. WLCG不仅支持了LHC的实验, 同时也支持天文、生物医学等众多领域的科学计算.

2006年, 本文作者代表高能所计算中心与CERN签署合作协议, 参与网格中件的开发以及WLCG的建设与部署. 目前在高能所建立的WLCG二级站点为国内唯一网格站点, 配备的资源包括3000余个CPU核, 1.75 PB的磁盘存储空间, 以及分别到欧洲和美国的20 Gpbs的网络(10 Gpbs的IPv4和10 Gpbs的IPv6网络). 该网格站点为ATLAS, CMS和LHCb三个LHC实验等提供网格计算支持. 以2020年为例, 一年内完成1370万CPU小时、350万个计算作业, 与一级站点交换的数据接近20 PB.

5 云计算

近年来云计算得到飞速发展, 因此高能物理也在引入云计算技术. 云计算在高能物理中的应用有两层含义: 一个是虚拟化和私有云, 另一个是公有云.

云计算的基础是虚拟化, 即根据应用需求在物理机上快速部署特定的虚拟机并执行计算任务或提供服务. 当计算或服务结束后, 虚拟机被删除从而释放出物理机另作他用. 采用虚拟机技术可以大大缓解物理机任务不饱满造成的资源浪费. 几乎所有高能物理研究机构的计算中心都利用虚拟机技术部署私有云, 用于系统测试和专门应用等. CERN是应用私有云技术最好的研究机构之一. CERN私有云系统(CERN OpenStack Private Cloud)^[15]建立于2013年, 采用OpenStack管理虚拟机. 目前CERN 90%的计算资源部署在私有云上, 达1万个服务器, 37万个CPU核. 高能所从2015年开始利用OpenStack部署私有云, 目前有1万余个CPU核, 用来支持LHAASO等高能物理实验、理论计算及公共服务等应用, 未来会将更多应用迁移到私有云上.

公有云是指商业云提供的云计算服务. 多年来, 高能物理领域也在研究使用公有云的可能性^[16]. 在高能物理领域, 网格和私有云被证明是理想的计算解决方案, 效率和成本都要优于商业云. 研究表明, 公有云的计算机机时的整体价格与私有云的成本相当, 但是商业云的网络传输和存储的价格要比网格和私有云高很多. 因此高能物理计算目前全面依靠公有云是不现实的. 对于突发性的计算任务, 公有云是一个理想的解决方案.

为了推动云计算的发展, 欧盟通过Helix Nebula Science Cloud (HNSciCloud)计划引入商业云服务, 为高能物理等10个重要科学领域提供云计算服务. 其中的一个应用案例是CERN的TOTEM实验将其数据分析软件等部署到HNSciCloud公有云, 并与私有云进行比较^[17], 表明计算结果与TOTEM使用CERN私有云计算结果一致. 这一工作的计算作业采用交互方式, 测试的结果为未来采用批量作业方式积累了经验. HNSciCloud还需要解决许多公有云应用的问题, 包括公有云与私有云的无缝对接、组织与资助模式问题等.

6 数据共享

数据开放和数据共享越来越受到世界各国的重视. 高能物理数据是一个巨大的宝藏, 数据的再利用可促进新的科学发现. 2008年, 国际上发起了高能物理数据长期保存和再利用计划(DPHEP)^[18], 高能所是该计

划的发起单位之一. DPHEP积极开展数据长期保存与应用的技术和策略研究, 同时推动数据开放共享. 世界各国的高能物理实验都开始提供开放数据用于共享, 支持科学研究以及教育与科普.

CERN开放数据门户(CERN Open Data Portal)^[19]从2014年开始开放部分LHC实验的数据, 目前开放的数据达到2 PB, 同时提供了数据分析所需的工具及说明, 方便用户使用. 依照DPHEP的数据开放策略, CERN将开放的数据分成4个层次: (1) 已发表论文中的图表, 便于数据用户直接引用; (2) 简化的数据, 用于教学和科普; (3) 事例重建数据和模拟数据, 配合分析软件, 用于完整的物理分析; (4) 原始数据, 配合事例重建软件和模拟软件, 可用于事例再重建和再模拟. CERN的开放数据已得到广泛的应用.

作为中国高能物理数据共享服务平台, 依托高能所的国家高能物理科学数据中心以高能物理领域科研活动中产生的科学数据为核心实现数据资源、软件工具、数据分析等资源能力的汇交和共享. 数据中心面向全球的科研人员、学生等用户提供高能物理、中子科学、光子科学、天体物理等基础研究以及多学科交叉研究服务. 数据中心拥有先进的高能物理数据资源平台, 到2020年底已经汇集约17 PB的数据, 主要包括6个高能物理实验的数据、2个同步辐射光源平台的数据、1个散裂中子源平台的数据、2个空间科学卫星的数据以及3个宇宙线观测实验的数据. 根据数据共享政策, 这些数据大部分用于限定范围的开放, 少部分用于公开共享. 未来随着数据规模的扩大会不断增加公开共享的数据量.

7 展望

高能物理既推动了数据与计算技术的发展, 也得益于计算机技术的发展. 从数据规模来看, 高亮度LHC开始运行后, 会使高能物理实验数据的规模达到EB (1000 PB)级, 成为高能物理对计算技术最重要的

挑战. 但是目前的高能物理计算系统及可预见的计算机技术发展应该可以应付这样的挑战. 从计算技术角度来看, 本文作者认为未来的重要发展方向包括以下三点.

(1) 处理器向多核及众核(如GPU等)的方向发展将影响高能物理计算技术. 以数据密集型计算为代表的高能物理软件大部分建立在单核处理器的基础上, 并没有充分利用众核带来的好处. 近年来高能物理计算正在积极向众核架构转变, 以便能充分利用众核计算的优势.

(2) 处理器的多样化也是当前计算机技术发展的方向. 众核处理器不再是Intel, AMD等少数几个厂商的优势, 中国的处理器也在快速发展. 因此未来的高能物理计算需要能够在异构的计算机硬件平台上实现高效的部署和运行, 这涉及大量的算法库、软件工具等的移植和开发. 这些将是高能物理计算发展的方向. 高能所开始与国内厂商合作将高能物理计算软件部署到基于ARM的低功耗处理器的计算机上. 国际上也开始了这方面的研究工作, 这将有助于有效降低计算功耗, 实现节能减排.

(3) 云计算将与传统的网格计算等进行融合. 网格计算的底层技术已经开始用云计算来替代. 网格资源开始建立在云计算平台上. 私有云将为高能物理计算提供稳定保障, 而公有云提供更多灵活的资源.

从数据挑战的角度看, 更多科学领域的挑战将赶上和超过高能物理. 以加速器技术为基础的先进光源为例, 正在建设中的中国高能同步辐射光源(HEPS)第一期将于2025年建成运行, 每年将产生200 PB的实验数据^[20], 工程第二期建成后每年将产生600 PB的数据. 高能所研发的HEPS数据管理及服务系统目前已进入测试阶段. 国际上同类的光源也在建设之中, 并已经开始联合高能物理寻找数据与计算的解决方案. 由于光源的运行模式不能照搬高能物理国际合作模式, 光源需要寻找新的解决方案, 需要探索新技术新模式来应对这类数据挑战.

参考文献

- 1 Giacomelli G, Giacomelli R. The LEP legacy. In: Carrigan Jr. R A, Giacomelli G, Paver N, eds. *Non-Accelerator Astroparticle Physics*. Singapore: World Scientific, 2005. 218–232
- 2 Williams D O. Computing on the eve of LEP data-taking: Are we ready? *Comput Phys Commun*, 1989, 57: 8–14

- 3 Chen H S, Li W G, Zhang C. From BEPC to BEPCII (in Chinese). *Mod Phys*, 2018, 30: 57–61 [陈和生, 李卫国, 张闯. 从BEPC到BEPC II. 现代物理知识, 2018, 30: 57–61]
- 4 Cao J. Daya bay reactor neutrino experiment (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2011, 3: 353–355, 242, 363 [曹俊. 大亚湾反应堆中微子实验站. 中国科学院院刊, 2011, 3: 353–355, 242, 363]
- 5 Brugière T. The Jiangmen underground neutrino observatory experiment. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2017, 845: 326–329
- 6 Cao Z, Chen M J, Chen S Z, et al. Introduction to Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2019, 60: 1–16 [曹臻, 陈明君, 陈松战, 等. 高海拔宇宙线观测站LHAASO概况. 天文学报, 2019, 60: 1–16]
- 7 Brüning O, Burkhardt H, Myers S. The large hadron collider. *Prog Particle Nucl Phys*, 2012, 67: 705–734
- 8 Lou X C. The circular electron positron collider. *Nat Rev Phys*, 2019, 1: 232–234
- 9 The CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report, Volume II—Physics and Detector. arXiv: [1811.10545](https://arxiv.org/abs/1811.10545)
- 10 Segal B. A major SHIFT in outlook. *CERN Courier*, 2001, 41: 19–20
- 11 Adeva B, Aguilar-Benitez M, Akbari H, et al. The construction of the L3 experiment. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 1990, 289: 35–102
- 12 Kahle K, Gaillard M. The LHC's worldwide computer. *CERN Courier*, 2013, 53: 21–23
- 13 Aiftimiei C, Aimar A, Ceccanti A, et al. Towards next generations of software for distributed infrastructures: The European Middleware Initiative. In: *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on E-Science (e-Science 2012)*. Chicago: IEEE Computer Society, 2012. 1–12
- 14 Pordes R, Petravick D, Kramer B, et al. The open science grid. *J Phys-Conf Ser*, 2007, 78: 012057
- 15 Bell T, Bompastor B, Bukowiec S, et al. Scaling the CERN OpenStack cloud. *J Phys-Conf Ser*, 2015, 664: 022003
- 16 Buncic P, Aguado Sánchez C, Blomer J, et al. A practical approach to virtualization in HEP. *Eur Phys J Plus*, 2011, 126: 13
- 17 Avati V, Blaszkiewicz M, Bocchi E, et al. Big data tools and cloud services for high energy physics analysis in TOTEM experiment. In: *Proceedings of the 2018 IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing Companion (UCC Companion)*. Zurich, 2018
- 18 Akopov Z, et al. (DPHEP Study Group). Status report of the DPHEP study group: Towards a global effort for sustainable data preservation in high energy physics. arXiv: [1205.4667](https://arxiv.org/abs/1205.4667)
- 19 McCauley T. HEP data for everyone: CERN open data and the ATLAS and CMS experiments. In: *Proceedings of the 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2016)*. Chicago, 2016. 335
- 20 Qi F Z, Huang Q L, Hu H, et al. The design of science data platform for high energy photon source (in Chinese). *Front Data Comput*, 2020, 2: 40–58 [齐法制, 黄秋兰, 胡皓, 等. 高能同步辐射光源科学数据处理平台规划与设计. 数据与计算发展前沿, 2020, 2: 40–58]

Data and computing for high energy physics experiments

CHEN Gang^{*}

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

High energy physics (HEP), which is also known as particle physics, is the study of the fundamental building blocks of nature, the interactions of elementary particles, and the origin of the Universe. Large-scale HEP experiments can produce hundreds of petabytes of real and simulated data yearly. This capability has made HEP a major explorer of scientific computing in the last few decades. In this work, three computing tasks, i.e., event reconstruction, physics simulation, and data analysis, are introduced. Subsequently, data and computing challenges are demonstrated with different examples of HEP experiments. To address the challenges, the HEP community has been focusing on developing computing models in the last thirty years. The HEP-computing model has evolved from local centers with mainframes and workstations to distributed clusters and worldwide computing grids. Some technologies generated through HEP computing, such as WWW, have made a considerable impact on the world. In the concluding part of this work, the perspective of computing technologies in HEP is discussed.

data analytics, big data, grid computing, high energy physics experiment, offline data

PACS: 07.05.Kf, 07.05.Bx, 29.90.+r

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0108](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0108)