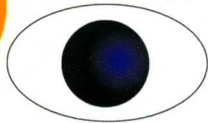




国家科学技术学术著作出版基金资助出版
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
长江科学技术文库



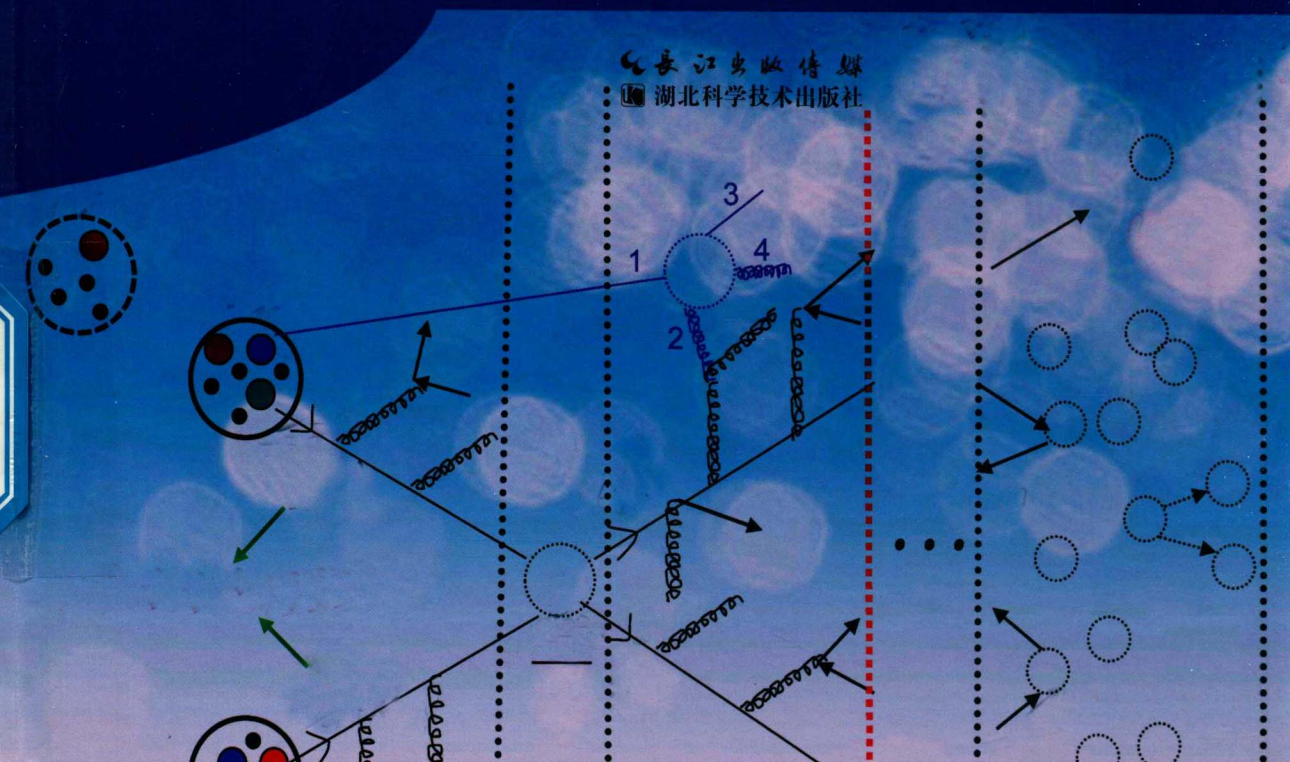
萨本豪 周代梅 王仲奇 闫玉良 程筠 著

高能核碰撞 模拟物理

SIMULATION PHYSICS FOR HIGH ENERGY NUCLEUS COLLISIONS

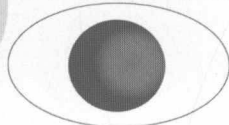
长江出版传媒

湖北科学技术出版社





国家科学技术学术著作出版基金
湖北省学术著作出版
长江科学技术文库



萨本豪 周代梅 王仲奇 闫玉良 程筠 著

高能核碰撞 模拟物理

SIMULATION PHYSICS FOR HIGH ENERGY NUCLEUS COLLISIONS

长江出版传媒
湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高能核碰撞模拟物理 / 萨本豪,周代梅,王仲奇等著.
—武汉:湖北科学技术出版社,2018.3
ISBN 978-7-5352-9491-3

I. ①高… II. ①萨… ②周… ③王… III. ①高能物理学—
动力学—研究 IV. ①O572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 170660 号

高能核碰撞模拟物理

GAONENG HE PENGZHUANG MONI WULI

萨本豪 周代梅 王仲奇 闫玉良 程 筠 著

策 划:李海宁

封面设计:王 梅 曾雅明

责任编辑:李海宁 刘 辉

责任校对:蒋 静 童桂清

出版发行:湖北科学技术出版社

电 话:027-87679468

地 址:武汉市雄楚大街 268 号

邮 编:430070

(湖北出版文化城 B 座 13-14 层)

网 址:<http://www.hbstp.com.cn>

印 刷:湖北新华印务有限公司

邮 编:430034

787×1092 1/16

11.5 印张 8 插页

210 千字

2018 年 3 月第 1 版

2018 年 3 月第 1 次印刷

定价:90.00 元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

内容提要

以高能核碰撞为内容的书籍在国内外并不罕见,但以高能核碰撞模拟物理为书名者,甚至包括类似书名的书籍,在国内外都极新鲜.因为模拟物理本身就是近年来随着计算机事业的飞速发展才成长为与实验物理及理论物理并行的第三支物理.

动力学模型是研究高能核碰撞的重要方法之一,本书以 PYTHIA 和 PACIAE 模型为例,系统地介绍了高能核碰撞的动力学模拟:从动力学模拟的建立到蒙特卡洛方法的应用,再到模拟诸多物理问题的结果,都作了详细的介绍.

本书与其他有关高能核碰撞书籍的区别在于:它除涵盖其他高能核碰撞书籍的内容外,还描述了核碰撞的原理和理论怎样化成概率统计的模式,然后又怎样用蒙特卡洛模拟来实现,等等.

本书作者从事高能核碰撞研究的历史,最短者也达 5 年以上,最长者已近 30 年.本书是作者结合自身的研究实践,经过更深入学习后的升华之作,具有理论与实际紧密结合的特点.

从书名的字面上看,此书似乎只限于高能核碰撞,其实这里赋予核字以更泛的范畴,它涵盖了粒子.因此,本书既描述高能核子-核碰撞、核-核碰撞,也描写粒子-粒子碰撞.本书突出一个用字,模拟高能粒子-粒子碰撞、核子-核碰撞和核-核碰撞需要哪些基本原理和理论,就写这些原理和理论,具有理论服务与指导实践的特点.

序

高能核—核碰撞是当今粒子物理和核物理交叉领域的一个国际研究前沿，是国际上最热门的一个学科研究领域。随着计算科学技术的飞速发展，应物理科学与技术发展的需要，模拟物理正从融于实验物理与理论物理之中脱颖而出，成为与实验物理和理论物理并列的第三支物理科学。但有关模拟物理的学术专著极为稀少；《高能核碰撞模拟物理》一书的出版具有重要的科学意义和普遍的参考价值。

本书在介绍了高能核—核碰撞研究领域的一些基本知识和蒙特卡洛基础后，详细叙述了基本粒子碰撞和核—核碰撞的物理模拟，包括模型的建立、模型涵盖的物理内容、描写它们的方法以及模型的蒙特卡洛实现等。本书由多年来专门从事有关研究工作的萨本豪、周代梅、王仲奇、闫玉良、程筠和李兴隆执笔，萨本豪是原子能科学研究院老一辈的专家，周代梅是华中师范大学粒子物理研究所的年轻学术骨干，王仲奇是国内颇有名气的蒙特卡洛中年专家，闫玉良和程筠也有多年从事有关研究的经验；他们合著是本书质量的一个保证。

中国原子能科学研究院是国内最早开展核物理研究的国家科研机构，华中师范大学粒子物理研究所是改革开放后迅速兴起的研究实体，是我国当今高能核碰撞研究一个重要中心；两个研究单位都承担着国家的重要研究任务，都参与了国际上相关重大项目的协作，有广泛的国际影响。本书是两单位合作的结晶，是来自两单位的作者结合切身研究经验而创作的专著，具有理论与实验密切结合的特点。全书框架清晰、逻辑严谨、条理分明、重点突出、表述清晰、文字简洁。故本书不仅可作为从事高能重离子碰撞及相关物理领域的研究和教学人员的入门指南和常备参考资料，也可供其他科学技术领域从事模拟工作的读者参考。



中国科学院院士、

中国自然科学基金委员会原副主任

2017年2月17日

前言

自 1986 年 AGS(Alternating Gradient Synchrotron)在美国 Brookhaven 国家实验室(BNL)建成并加速硅(Si)离子达 14GeV 以来,相对论性核碰撞一直是粒子物理和核物理交叉领域国际研究的前沿. 20 世纪 80—90 年代,WA80 和 WA98 以及 NA44 和 NA49 等国际实验协作组,在日内瓦欧洲核子研究中心(CERN)的 SPS(Super Proton Synchrotron)装置上做的实验,对极端条件(高温和高密)下核物质性质和夸克—胶子等离子体(QGP)相变的研究作了重要贡献. 他们在 2000 年的总结中宣称^[1]:SPS 固定靶实验结果表明,原束缚于核子中的夸克,似乎摆脱了束缚而自由徘徊,形成了物质新形态——QGP.

2000 年,在美国 BNL 的 RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)装置上首次实现了质心能量为 130GeV 的 Au+Au 碰撞,STAR、PHENIX、PHOBOS 和 BRAHMS 四个国际实验协作组相继作出了大量实验结果. 以有关高横动量粒子产额压低(喷注淬火),粒子很大的椭圆流(v_2 , 粒子横动量方位角分布 Fourier 展开第二项系数),粒子产生的度规(Scaling)行为,以及 A-A 碰撞几何初态效应等实验事实,发表白皮书^[2, 3, 4, 5],以各自表述方式宣称强耦合夸克—胶子等离子体(sQGP)的发现^[6].

2010 年年底,在 CERN 的 LHC(Large Hadron Collider)装置上实现了质心能量为 2.76TeV 的 Pb+Pb 对撞,ALICE、ATLAS 和 CMS 三个大型国际实验协作组不断作出大量的实验成果:在初始能量密度趋向平衡现象、初始温度、退禁闭相变和 QGP 透明度研究等方面都有新突破^[7]. 在 Higgs 粒子、暗物质和底(b)以及顶(t)夸克性质等新物理研究方面,他们的贡献更大,未来的结果将更辉煌.

早在 PHENIX 筹建时期,中国原子能科学研究所和北京大学就介入其中,迄今他们仍在 PHENIX 成员名单之列. 后在美籍华人许恕、王新年和黄焕中等的促进下,中国科学院上海应用物理研究所、中国科技大学、华中师范大学、清华大学以及山东大学等成为 STAR 实验协作组的重要成员,并在光子探测、QCD 临界点的寻找以及反物质探测等方面作出了突出贡献^[8, 9, 10, 11].

华中师范大学和中国原子能科学研究所等参加了 ALICE 的筹建、运行和实

验的全过程,并在光子探测方面作了重要贡献.中国科学院高能物理研究所和北京大学等则是 CMS 协作组的重要成员.

相对论性核碰撞的理论研究大致可划分为 5 支:

(1)有效场论方法^[12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

(2)统计(热)模型^[19, 20].

(3)流体力学方法^[21, 22].

(4)夸克重组模型^[23, 24].

(5)输运模型.

输运模型又分为:强子输运模型,部分子和强子输运模型,以及输运+流体+输运复合模型.强子输运模型计有:相对论性量子分子动力学(RQMD)^[25]、HIJING^[26]、VENUS^[27]、LUCIAE^[28](JPCIAE^[29])、强子弦动力学(HSD)^[30]、多相输运模型(AMPT)^[31]、UrQMD^[32]和 Glauber 蒙特卡洛^[33]等.部分子和强子输运模型则有:部分子级联模型(PCM)^[34]、AMPT(string melting)^[31]、PACIAE^[35]、部分子多次散射的玻尔兹曼方法(BAMPS)^[36]、夸克胶子弦模型(QGSM)^[37]、部分子强子弦动力学(PHSD)^[38]和 MARTINI^[39]等.输运+流体+输运复合模型有 RQMD+HYDRO+RQMD^[40]、UrQMD+HYDRO+UrQMD^[22, 41]和 PACIAE+HYDRO+PACIAE^[42]等.

在外籍华人孟大中、华家照、黄卓然和柯志明等人的帮助下,我国较早开展了相对论性核碰撞的理论研究,取得了丰硕成果^[43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50].本书作者多年来致力于建立和发展我国自己的描写相对论性量子碰撞(基本粒子碰撞、核子-核碰撞和核-核碰撞等)的模型,从强子输运模型 LUCIAEC(JPCIAE)发展到部分子和强子级联模型 PACIAE,又发展到 PACIAE+HYDRO+PACIAE 复合模型. LUCIAE 是建立在 FRITIOF^[51]基础上,但多考虑了末态强子再散射和弦碎裂的集体效应(鞭炮模型, fire cracker model). JPCIAE 则是建立在 JETSET7.4 和 PYTHIA5.7^[52]基础上,但弦没有打开,未明显包含部分子自由度,故 JPCIAE 是强子级联模型. PACIAE 则是建立在 PYTHIA6.4^[53]基础上,是部分子和强子级联模型,它包含了部分子初始化、部分子再散射、强子化和强子再散射四大阶段.2014 年 PACIAE 模型又进一步推广:包括轻子打核子和轻子打核的深度非弹性散射^[54].

20 世纪末以来,随着蒙特卡洛模拟在各科学技术领域应用的不断普及,特别是计算机技术的飞速进步,“模拟物理”正从原融于理论物理和实验物理之中脱颖而出,成了与理论和实验物理并行的第三种科学研究方法.本书描述如何用

输运模型模拟高能核碰撞:构建粒子(感兴趣研究对象的最小单元,如基本粒子、核子和核等)从“生”(产生)经“变”(迁移和散射)到“死”(转化、逃逸或能量低于阈值被忽略)的整个生命过程;从粒子生命过程中提取结果,用以与实验数据进行比较,或用来肯定或否定所作的理论假设,所选用的研究方法和所采取的研究途径。“生”、“变”和“死”,这些关键阶段中随机和复杂因素,显然用蒙特卡洛方法模拟是最佳选择,这正是本书取名为《高能核碰撞模拟物理》的渊源。

本书前言及第 1 章有关基本物理知识由萨本豪执笔,第 2 章模拟物理中的蒙特卡洛方法由王仲奇执笔,第 3 章基本粒子碰撞物理模拟由闫玉良执笔,第 4 章核—核碰撞物理模拟,除 4.12 节由李兴隆执笔外,其余由周代梅执笔。第 5 章流体和输运复合模型梗概由程筠和闫玉良执笔,后语由萨本豪执笔,全书由周代梅汇总整理。

感谢国家科学技术学术著作出版基金委员会对本书出版的资助。感谢蔡勛教授倡导本书的撰写,并建议本书的内容。他的关心和支持贯穿本书出版的始终。感谢本书申请国家科学技术学术著作出版基金资助时三位推荐专家马余刚院士、李家荣教授、张端明教授给予的帮助。感谢陈刚教授提供了用 PACIAE 模型研究反粒子和反物质产生的结果,感谢谭志光教授提供了有关工作的笔记。最后,本人衷心感谢刘艳明鼎力支持。

萨本豪

2017 年 12 月

参考文献

- [1] [http://press.web.cern.ch/press/Press Release/Releases 2000/ PR001. OOE Quark Gloun Matter. ht-
ml.](http://press.web.cern.ch/press/Press%20Release/Releases%202000/PR001.OOE%20Quark%20Gluon%20Matter.html)
- [2] BRAHMS Collaboration. Quark-gluon plasma and color glass condensate at RHIC. The perspective from
BRAHMS experiment [J]. Nucl Phys A, 2005(757): 1-27.
- [3] PHOBOS Collaboration. The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC [J]. Nucl Phys A, 2005
(757): 28-101.
- [4] STAR Collaboration. Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma:
The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions [J]. Nucl Phys A,
2005(757): 102-183.
- [5] PHENIX Collaboration. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at
RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration [J]. Nucl Phys A, 2005 (757):
184-283.
- [6] T A Trainor. A critical review of RHIC experimental results, arXiv: 1303.4774V1 [hep-ph].
- [7] G Martinez. Advances in quark gluon plasma, arXiv:1304.1452v1 [nucl-ex].
- [8] Y G Ma, J H Chen, L Xue. A brief review of antimatter production [J]. Frontier in Physics, 2012(7):
637-646.
- [9] B I Abelev, M M Aggarwal, Z Ahammed, et al (STAR Collaboration). Observation of an antimatter
hypernucleus [J]. Science, 2010(328): 58-62.
- [10] H Agakishiev, M M Aggarwal, Z Ahammed, et al (STAR Collaboration). Observation of the anti-
matter helium-4 nucleus [J]. Nature, 2011(473): 353-356.
- [11] L Adamczyk, J K Adkins, G Agakishiev, et al (STAR Collaboration). Measurement of interaction
between antiprotons [J]. Nature, 2015(527): 345-348.
- [12] X P Zheng, S H Yang, J R Li et al. Bulk viscosity of interacting strange quark matter [J]. Phys Lett
B, 2002(548): 29-34.
- [13] E K Wang, X N Wang. Parton energy loss with detailed balance [J]. Phys Rev Lett, 2001
(87):142301.
- [14] P Costa, C A De Sousa, M C Ruivo. The QCD critical end point in the context of the Polyakov-Nam-
bu-Jona-Lasinio Model [J]. Acta Phys Polon Supp, 2012(5): 523-528.
- [15] L Yan, P F Zhuang, N Xu. J/ψ production in quark-gluon plasma [J]. Phys Rev Lett, 2006
(97):232301.
- [16] S X Qin, L Chang, H Chen, et al. Phase diagram and critical end point for strongly interacting quarks
[J]. Phys Rev Lett, 2011(106): 172301.
- [17] C Shi, Y L Wang, Y Jiang, et al. Locate critical end point in a continuum model study [J]. JHEP
2014(07): 014.
- [18] H J Yin, J Yang, W N Zhang, et al. Two-particle interferometry for the sources undergoing a first-or-

- der QCD phase transition in high-energy heavy ion collisions [J]. Phys Rev C, 2012(86): 024914.
- [19] A Andronic, P Braun-Munzinger, J Stachel. Thermal hadron production in relativistic nuclear collisions: The hadron mass spectrum, the horn, and the QCD phase transition [J]. Phys Lett B, 2009(673):142-145.
- [20] J H Fu. Statistical interpretation of multiplicity distributions and forward-backward multiplicity correlations in relativistic heavy ion collisions [J]. Phys Rev C, 2008(77): 027902.
- [21] R J Fries, C Nonaka. Evaluating results from the relativistic heavy ion collider with perturbative QCD and hydrodynamics [J]. Prog Part Nucl Phys, 2011(66): 607-660.
- [22] H C Song, S A Bass, U Heinz. Viscus QCD matter in a hybrid hydro dynamic+ Boltzmann approach [J]. Phys Rev C, 2011(83): 024912.
- [23] R C Hwa, C B Yang. Recombination of shower partons at high p_T in heavy ion collisions [J]. Phys Rev C, 2004(70): 024905.
- [24] R Q Wang, F L Shao, J Song, et al. Hadron yield correlation in quark combination models in high energy AA collisions [J]. Phys Rev C, 2012(86):054906.
- [25] H Sorge. Flavor production in Pb (160A GeV) on Pb collisions; Effect of color ropes and hadronic rescattering[J]. Phys Rev C, 1995(52): 3291.
- [26] X N Wang, M Gyulassy. HIJING: A Monte Carlo model for multiple jet production in pp, pA, and AA collisions[J]. Phys Rev D, 1991(44): 3501.
- [27] K Werner. Multiparticle production in p-p, p-Ar, and p-Xe collisions at 200 GeV by the multistring model VENUS [J]. Phys Rev D, 1989(39): 780.
- [28] B H Sa, A Tai. An event generator for the firecracker model and the rescattering in high energy pA and AA collisions LUCIAE version 2.0[J]. Compt Phys Commun, 1995(90): 121-140.
- [29] B H Sa, A Tai, H Wang, et al. J/Ψ dynamical suppression in a hadron and string cascade model [J]. Phys Rev C, 1999(59):2728.
- [30] W Ehehalt, W Cassing. Relativistic transport approach for nucleus-nucleus collisions from SIS to SPS energies [J]. Nucl Phys A, 1996(602): 449-486.
- [31] Z W Lin, C M Ko, B A Li, et al. Multiphase transport model for relativistic heavy ion collisions [J]. Phys Rev C, 2005(72): 064901.
- [32] S A Bass, M Belkacem, M Bleicher, et al. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions [J]. Prog Part Nucl Phys, 1998(41): 225-370.
- [33] B Alver. Importance of correlations and fluctuations on the initial source eccentricity in high energy nucleus-nucleus collisions [J]. Phys Rev C, 2008(77): 014906.
- [34] K Geiger, B Müller. Dynamics of parton cascades in highly relativistic nuclear collisions [J]. Nucl Phys B, 1992(369):600-654; M Y-ounus, C E Coleman-Smith, S A Bass, D K Srivastav. Systematic study of charm quark energy loss using parton cascade model, arXiv: 1309.1276v2 (nucl-th).
- [35] B H Sa, D M Zhou, Y L Yan, et al. PACIAE 2.0: An updated parton and hadron cascade model (program) for the relativistic nuclear collisions [J]. Compt Phys Commun, 2012(183): 333-346.
- [36] Z Xu, C Greiner. Thermalization of gluons in ultrarelativistic heavy ion collisions by including three-body interactions in a parton cascade [J]. Phys Rev C, 2005(71): 064901.
- [37] N S Amelin, L V Brarina, L P Csernai, et al. Strangeness production in proton and heavy ion collisions

- sions at 200A GeV [J]. Phys Rev C, 1993(47): 2299.
- [38] W Cassing, E L Bratkovskaya. Parton-Hadron-String Dynamics: An off-shell transport approach for relativistic energies [J]. Nucl Phys A, 2009(831): 215-242.
- [39] B Schenke, C Gale, S Jeon. MARTINI event generator for heavy quarks: Initialization, parton evolution, and hadronization [J]. Phys Rev C, 2012(86): 034905.
- [40] D Teaney, J Lauret, E V Shuryak. Flow at the SPS and RHIC as a quark-gluon plasma signature [J]. Phys Rev Lett, 2001(86): 4783.
- [41] S A Bass, A Dumitru, M Bleicher, et al. Hadronic freeze-out following a first order hadronization phase transition in ultrarelativistic heavy ion collisions [J]. Phys Rev C, 1999(60): 021902.
- [42] Y L Yan, Y Cheng, D M Zhou, et al. HYDRO-PACIAE, a hydrodynamic and transport hybrid model for ultrarelativistic heavy ion collisions [J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 2013(40): 025102.
- [43] W Q Chao, C S Gao, Y L Zhu. Increase of K^+/π^+ ratio induced by secondary collisions in relativistic heavy ion collisions [J]. Nucl Phys A, 1990(514): 734-748.
- [44] S Wang, Y Z Jiang, Y M Liu, et al. Measurement of collective flow in heavy ion collisions using particle-pair correlations [J]. Phys Rev C, 1991(44): 1091.
- [45] Y H Zhu, Y G Ma, J H Chen, et al. Extraction of dihadron-jet correlations with rigorous flow-background subtraction in a multiphase transport model [J]. Phys Rev C, 2013(87): 024904.
- [46] L W Chen, V Greco, C M Ko, et al. Pseudorapidity dependence of anisotropic flows in relativistic heavy ion collisions [J]. Phys Lett B, 2005(605): 95-100.
- [47] K Xiao, F Liu, F Q Wang. Event-plane decorrelation over pseudorapidity and its effect on azimuthal anisotropy measurements in relativistic heavy ion collisions [J]. Phys Rev C, 2013(87): 011901.
- [48] L Z Chen, X Pan, F B Xiong, et al. Statistical and dynamical fluctuations in the ratios of higher net-proton cumulants in relativistic heavy ion collisions [J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 2011(38): 115004.
- [49] F M Liu, H J Drescher, S Ostapchenko, et al. Consistent treatment of soft and hard processes in hadronic interactions [J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 2002(28): 2597.
- [50] W T Deng, X N Wang, R Xu. Hadron production in p+p, p+Pb, and Pb+Pb collisions at the LHC energies with HIJING2.0 model [J]. Phys Rev C, 2011(83): 014915.
- [51] H Pi. An event generator for interactions between hadrons and nuclei FRITIOF version 7.0 [J]. Comput Phys Commun, 1992(71): 173-192.
- [52] T Sjöstrand. PYTHIA 5.7 and JETSET 7.4 physics and manual [J]. Comput Phys Commun, 1994(82): 74-89.
- [53] T Sjöstrand, S Mrenna, P Skands. PYTHIA 6.4 physics and manual [J]. JHEP, 2006(05): 026.
- [54] D M Zhou, Y L Yan, B G Dong, et al. PACIAE2.2: An updated issue of parton and hadron cascade model PACIAE 2.1 by inclusion of the lepton-nuclear collisions [J]. Computer Physics Communications, 2015(193): 89-94.

目 录

序	(1)
前言	(1)
参考文献	(4)
第 1 章 有关基本物理知识	(1)
1.1 自然单位制	(1)
1.2 夸克和胶子及其统称部分子	(2)
1.3 Lorentz 变换	(6)
1.4 四向量和不变量	(7)
1.5 运动学变量(观察量)	(12)
1.6 亮度和散射粒子数以及微分截面	(12)
参考文献	(14)
第 2 章 模拟物理中的蒙特卡洛方法	(15)
2.1 模拟计算——第三种科学研究方法	(15)
2.2 蒙特卡洛方法	(18)
2.2.1 统计抽样的数字化	(18)
2.2.2 蒙特卡洛方法的优势	(18)
2.3 随机数产生与已知分布抽样	(19)
2.3.1 随机数与随机数产生	(19)
2.3.2 已知分布抽样	(21)
2.3.3 自动抽样方法	(22)
2.3.4 若干常用分布抽样方法	(28)
2.4 蒙特卡洛方法的风险及其控制	(30)
2.4.1 模型化的风险及其控制	(30)
2.4.2 随机数引入的风险及其控制	(32)
2.4.3 随机抽样引入的风险及其控制	(32)
参考文献	(35)
第 3 章 基本粒子碰撞物理模拟	(36)
3.1 夸克禁闭和部分子碰撞截面的因子化	(37)
3.2 部分子分布函数	(41)
3.3 硬散射过程	(42)
3.4 末态部分子簇射	(45)
3.5 初态部分子簇射	(49)
3.6 PYTHIA 模型中的软散射过程	(52)
3.7 束剩余者和多重相互作用以及色重排	(54)
3.8 强子化和衰变	(60)
3.9 PYTHIA 模型中的物理过程	(67)
参考文献	(76)

第 4 章 核—核碰撞物理模拟	(82)
4.1 核—核碰撞的核子初始化	(83)
4.1.1 碰撞参数及其抽样	(83)
4.1.2 几何交叠区和参加者核子数	(83)
4.1.3 核子的初始坐标和动量以及初始核子表	(85)
4.2 粒子—粒子碰撞的判据	(86)
4.3 粒子—粒子碰撞截面	(88)
4.3.1 强子—强子碰撞截面	(88)
4.3.2 部分子—部分子碰撞截面	(89)
4.4 碰撞后粒子状态的确定	(90)
4.4.1 强子—强子碰撞	(90)
4.4.2 部分子—部分子碰撞	(92)
4.5 核—核碰撞部分子初态	(93)
4.6 双夸克的分解	(94)
4.7 高能夸克(反夸克)的退激发	(94)
4.8 奇异和重夸克压低的约化	(96)
4.9 核—核碰撞强子末态	(97)
4.10 核—核碰撞框架图	(98)
4.10.1 PACIAE 2.0a 框架图	(98)
4.10.2 PACIAE 2.0b 框架图	(100)
4.10.3 PACIAE 2.0c 框架图	(101)
4.11 新近实验及相关物理模拟结果	(103)
4.11.1 带电粒子多重数及横动量分布	(104)
4.11.2 能量损失	(107)
4.11.3 集体流与关联	(108)
4.11.4 相边界与 QCD 临界点	(116)
4.11.5 轻反核物质研究	(118)
4.12 轻子—核碰撞	(124)
4.12.1 轻子—核碰撞状态的初始化和碰撞判据	(125)
4.12.2 轻子—核子深度非弹性散射的微分截面	(126)
4.12.3 轻子—核子深度非弹性散射总截面的计算	(133)
4.12.4 轻子—核半单举深度非弹性散射	(137)
参考文献	(143)
第 5 章 流体和输运复合模型梗概	(149)
5.1 流体演化模型	(150)
5.2 流体原胞末态分布到粒子分布的转换	(154)
5.3 强子化的组合模型	(157)
5.4 复合模型研究核—核碰撞结果举例	(160)
参考文献	(164)
后语	(166)
跋	(167)

第 1 章 有关基本物理知识

本章简要叙述下面章节将要涉及的一些基本物理知识,诸如单位制、Lorentz 变换、四向量和运动学变量(观察量)等.读者若已熟悉这些内容可快速复习而过,不然须认真阅读,否则难以卒读.

1.1 自然单位制

若用 $[M]$ 、 $[L]$ 和 $[T]$ 表示质量、长度和时间的量纲(用中括号表示物理量的量纲),则在通常 CGS(米—m,克—g 和秒—s)单位制中三者互相独立,于是以下通用常数的量纲是:

$$\begin{aligned} c : [c] &= [L]/[T], \\ \hbar : \hbar &= \frac{h}{2\pi}, [\hbar] = [M][L]^2/[T], \\ \alpha_{\text{em}} : \alpha_{\text{em}} &= e^2/\hbar c \approx \frac{1}{137}, [e] = [1]. \end{aligned}$$

这里, α_{em} 是电磁耦合常数,亦即精细结构常数, e 是电子电荷.物理量能作加减乘除运算的前提是,它们的量纲要相同;物理量构成的方程成立的必要条件是,等号两边量纲相同.

本书采用自然单位制,即令 $\hbar=c=1$,于是有

$$[L] = [T], [M] = [L]^{-1}, [e^2] = [1].$$

所以在自然单位制中只有一个独立的量纲而不是三个,故采用自然单位制,物理规律(方程)的表示更简单些.若以 GeV 度量的质量(M)为基本量纲,则

能量(E):在 CGS 制中 $[E] = [Mc^2]$,而在自然单位制中 $[E] = [M]$,该用 GeV 度量;

动量(P):在 CGS 制中 $[P] = [Mc]$,而在自然单位制中 $[P] = [M]$,用 GeV 度量;

长度(L)和时间(T):在自然单位制中该用 GeV^{-1} 度量。

以上已经看出如下规律:在 CGS 单位制的量纲中令 $c=\hbar=1$,则得到自然单

位制中的相应量纲. 反之, 在自然单位制的量纲中, 放入 c 和 $\hbar$ 适当组合, 就得到 CGS 单位制中的相应量纲. 需要指出: 本书用毫巴 (mb) 度量碰撞截面 ($1\text{mb} = 10^{-3}\text{b} = 10^{-27}\text{cm}^2$), 特殊情形另作说明. 为了便于参考, 下面列出一些常用的换算关系:

$$\begin{aligned}
 1\text{TeV} &= 10^3\text{GeV} = 10^6\text{MeV} = 10^9\text{keV} = 10^{12}\text{eV}, \\
 1\text{fm} &= 10^{-13}\text{cm}, \\
 1\text{GeV}^{-1} &= 0.19733\text{fm}, \\
 1\text{GeV}^{-1} &= 6.5822 \times 10^{-25}\text{s}, \\
 1\text{GeV} &= 1.78266 \times 10^{-27}\text{kg}, \\
 1\text{fm}^2 &= 10\text{mb} = 10^4\mu\text{b} = 10^7\text{nb} = 10^{10}\text{pb}, \\
 1\text{GeV}^{-2} &= 0.389\text{mb}.
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

1.2 夸克和胶子及其统称部分子

众所周知, 宏观物质是由原子或分子构成, 分子又由原子构成. 原子的中心是原子核, 其外有壳层电子, 原子是电中性的. 若某一原子在外力的作用下, 有若干外层电子被剥离, 它就成了带若干正电子电荷的离子.

原子核由质子和中子构成, 譬如金核就含有 79 个质子和 118 个中子. 质子和中子同属于重子 (baryon), 除它们外重子还包括 Δ 、 Ξ 和 Ω 等. 与重子对应的是介子 (meson), 诸如 π 介子和 K 介子等. 重子的自旋是半整数, 统称费米子; 介子的自旋是整数, 统称玻色子 (详见表 1.1).

重子一般由三个夸克组成, 譬如质子就是 uud (这里 u 指上夸克也指其味, d 是下夸克), 而中子是 ddu . 介子一般由夸克和反夸克对组成, 譬如 π^+ 介子就是 $u\bar{d}$ ($\bar{d}$ 指反的下夸克), 而 K^+ 介子则是 $u\bar{s}$ ($\bar{s}$ 指反的奇异夸克). 一般约定: 反粒子用加有上横杠的相应粒子的记号标注, 反粒子量子数和相应粒子量子数相反.

表 1.1 粒子按自旋分类

类属	玻色子 (自旋为整数)		费米子 (自旋为半整数)	
	自旋 0	自旋 1	自旋 $\frac{1}{2}$	自旋 $\frac{3}{2}$
基本粒子	—	中间子 (如光子)	夸克, 轻子	—
复合粒子	赝标介子	矢量介子	重子八重态 (octet)	重子十重态 (decuplet)

表 1.2 四种基本作用力和相应的中间子

力	强度	理论	中间子
强作用力	10	量子味动力学(QCD)	胶子
电磁作用力	10^{-2}	量子电动力学(QED)	光子
弱作用力	10^{-13}	量子味动力学(QFD)	W 和 Z 子
重力	10^{-42}	重力动力学(GDM)	重力子

表 1.3 夸克的性质(自旋 1/2)

代	粒子	电荷	质量(MeV)			KF*
			裸质量 (流质量)	有效质量 重子中	(组分质量) 介子中	
一	<i>d</i>	-1/3	7.5	363	310	1
一	<i>u</i>	2/3	4.2	363	310	2
二	<i>s</i>	-1/3	150	538	483	3
二	<i>c</i>	2/3	1100	1500	1500	4
三	<i>b</i>	-1/3	4200	4700	4700	5
三	<i>t</i>	2/3		>23000		6

* 粒子的味码.

表 1.4 双夸克的性质

粒子	自旋	电荷	质量(MeV)	KF
<i>ud</i> ₀	0	1/3	579	2101
<i>sd</i> ₀	0	-2/3	805	3101
<i>su</i> ₀	0	1/3	805	3201
<i>dd</i> ₁	1	-2/3	771	1103
<i>ud</i> ₁	1	1/3	771	2103
<i>uu</i> ₁	1	4/3	771	2203
<i>sd</i> ₁	1	-2/3	930	3103
<i>su</i> ₁	1	1/3	930	3203
<i>ss</i> ₁	1	-2/3	1090	3303

表 1.5 介子的性质

粒子	质量(MeV)	寿命(s)	SU(3)	自旋 [%]	同位旋	<i>T</i> ₃	<i>Y</i> [†]	<i>C</i> [‡]	夸克波函数	KF
$\pi^\pm$	139.6	2.60×10^{-8}	8	0	1	±1	0	0	$u\bar{d}(d\bar{u})$	±211
π^0	135.0	8.7×10^{-17}	8	0	1	0	0	0	$(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$	111
$K^\pm$	493.7	1.24×10^{-8}	8	0	1/2	$\pm1/2$	±1	0	$u\bar{s}(s\bar{u})$	±321
$K^0(\bar{K}^0)$	497.7	0.892×10^{-10} *	8	0	1/2	$\mp1/2$	±1	0	$d\bar{s}(s\bar{d})$	±311

续表

粒子	质量(MeV)	寿命(s)	SU(3)	自旋 [%]	同位旋	T_3	$Y^†$	$C^‡$	夸克波函数	KF
$\eta(0)^{**}$	548	7×10^{-19}	8	0	0	0	0	0	$(2\bar{s}\bar{s} - u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{6}$	221
$\eta'(0)$	958	3×10^{-21}	1	0	0	0	0	0	$(\bar{s}\bar{s} + u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{3}$	331
$\rho^\pm$	776	4×10^{-24}	1	1	1	± 1	0	0	$u\bar{d} (d\bar{u})$	± 213
ρ^0	776	4×10^{-24}	1	1	1	0	0	0	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	113
$\omega(0)$	782	7×10^{-23}	$1 \oplus 8$	1	0	0	0	0	$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$	223
$K^{*\pm}$	892	1×10^{-23}	1	0	1/2	$\pm 1/2$	± 1	0	$u\bar{s} (s\bar{u})$	± 323
$K^{*0}(\bar{K}^{*0})$	899	1×10^{-23}	1	1	1/2	$\mp 1/2$	± 1	0	$d\bar{s} (s\bar{d})$	313
$\phi(0)$	1020	2×10^{-22}	$1 \oplus 8$	1	0	0	0	0	$s\bar{s}$	333
$D^\pm$	1868	9×10^{-13}	$\bar{3}(3)$	0	1/2	$\pm 1/2$	1/3	± 1	$c\bar{d} (d\bar{c})$	± 411
$D^0(\bar{D}^0)$	1863	4×10^{-13}	$\bar{3}(3)$	0	1/2	1/2	$\mp 1/3$	± 1	$c\bar{u} (d\bar{c})$	± 421
$D^{*\pm}$	2009	$> 1 \times 10^{-22}$	$\bar{3}(3)$	1	1/2	1/2	$\mp 1/3$	± 1	$c\bar{d} (d\bar{c})$	± 413
$D^{*0}(\bar{D}^{*0})$	2006	$> 1 \times 10^{-22}$	$\bar{3}(3)$	1	1/2	1/2	$\mp 1/3$	± 1	$c\bar{u} (u\bar{c})$	± 423
$\eta_c(0)$	2980	6×10^{-23}	1	0	0	0	0	0	$c\bar{c}$	441
$J/\psi(0)$	3097	1×10^{-20}	1	1	0	0	0	0	$c\bar{c}$	443
$\gamma(0)$	9460	2×10^{-20}	1	1	0	0	0	0	$b\bar{b}$	553

% 自旋为 0 者属赝标介子, 为 1 者属向量介子.

[†] 超荷 $Y=B+S$, B : 重子数, S : 奇异数.

[‡] 粲(Charm)数.

* 这是 K_S^0 的寿命, K_L^0 的寿命为 5.18×10^{-8} .

** 小括号内指电荷.

表 1.6 重子的性质

粒子	质量(MeV)	寿命(s)	SU(3)	自旋 [%]	同位旋	T_3	$Y^†$	$C^‡$	夸克组成	KF
p	938.3	∞	8	1/2	1/2	1/2	1	0	uud	2212
n	939.6	900	8	1/2	1/2	-1/2	1	0	ddu	2112
Λ^0	1115.6	263×10^{-10}	8	1/2	0	0	0	0	uds	3122
Σ^+	1189.4	0.80×10^{-10}	8	1/2	1	1	0	0	uus	3222
Σ^0	1192.5	6×10^{-20}	8	1/2	1	0	0	0	uds	3212
Σ^-	1197.3	1.48×10^{-10}	8	1/2	1	-1	0	0	dds	3112
Ξ^0	1314	2.90×10^{-10}	8	1/2	1/2	1/2	-1	0	uss	3322
Ξ^-	1321	1.64×10^{-10}	8	1/2	1/2	-1/2	-1	0	dss	3312
Δ^{++}	1234	0.6×10^{-23}	10	3/2	3/2	3/2	1	0	uuu	2224
Δ^+	1234	0.6×10^{-23}	10	3/2	3/2	1/2	1	0	uud	2214
Δ^0	1234	0.6×10^{-23}	10	3/2	3/2	-1/2	1	0	udd	2114