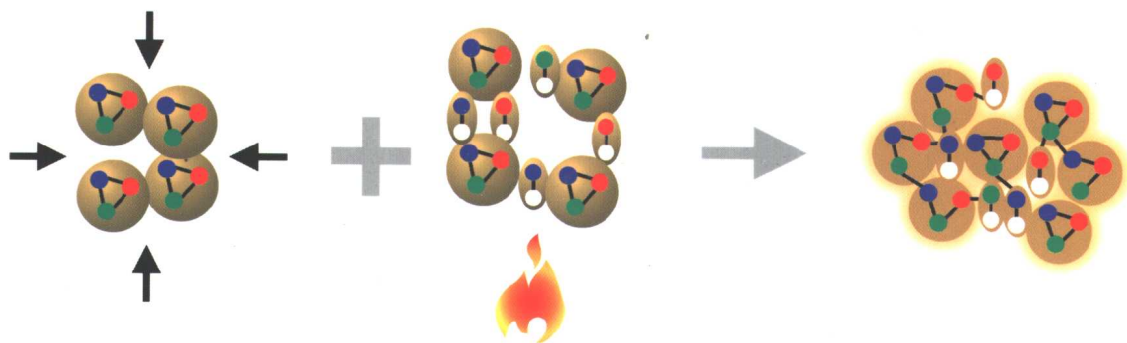




# 高能重离子碰撞导论

[美] 黄卓然(Cheuk-Yin Wong) 著

张卫宁 译

哈尔滨工业大学出版社

# 高能重离子碰撞导论

[美]黄卓然(Cheuk-Yin Wong)著 张卫宁 译

哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨

## 内 容 提 要

本书全面阐述了高能重离子碰撞的基础理论和各主要研究方向的形成、发展,以及所取得的成果。包括:高能重离子碰撞研究中的常用变量;高能碰撞下各种过程中粒子产生的理论和模型,以及实验结果;夸克-胶子等离子体系统的性质;格点规范理论的基础和主要结果;核-核多重碰撞;高能重离子碰撞中夸克-胶子等离子体形成的条件;夸克-胶子等离子体的各种信号以及实验数据分析结果等。

本书可作为粒子物理、原子核物理、理论物理、高能物理及相关专业高年级本科生、研究生教材和教学参考书,也可作为相关专业科研人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

高能重离子碰撞导论/[美]黄卓然著;张卫宁译.

哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.1

ISBN 7-5603-1628-X

I. 高… II. ①黄…②张… III. 高能重离子反应-核碰撞-研究 IV. 0571.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 095187 号

感谢新加坡世界科学出版公司提供给我社本书英文原著的中文版权.

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451—6414749

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 30.5 字数 510 千字

版 次 2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1628-X/O·120

印 数 1~2 000

定 价 34.00 元

## 中文版序

物理学的进展有如长江后浪推前浪，滔滔不绝。自从指南针发现以来，物理上新现象和新理论的发现真是层出不穷。今后也必定有许多新的物理现象和新的知识有待人们去发现，去认识。在这个渊源深远不断发展的物理学长流中，今日的学子们不少人将会是未来乘风破浪的风云人物，也就是未来新物理现象和新物理理论的发现者和开创人。他们对人类知识宝藏的重大贡献必将把人类对大自然的了解带到一个新的境界。

为了发掘这个宏大而有待发现的物理学新知识的宝库，今日的学子们要努力充实自己，尽量吸收物理学知识。然而，近代物理学的发展突飞猛进，要学习的东西越来越多，越来越新。这就要求同学们和从事物理学研究的工作者要训练自学能力，掌握学习新技术和新概念的本领。在这个过程中，增加自己的基本知识和增进自己对物理概念的深刻理解是十分重要的。有了新的技术和充实的物理基础知识，在未来对物理学奥秘的探索之中就会事半功倍。因此，作为教科书或教学参考书应该尽量把新的基本知识介绍给大家。

在高能物理和核物理交界方面，高能重离子碰撞是一个新的重要领域。它所涉及的概念和范围相当广泛，包括了很多近代物理前沿的课题。本书对这些新的概念和研究方向做了详尽的介绍和引导，这对于学习高能核物理的基本知识会有所帮助。

我很高兴这本书能够被译成中文出版。我也很高兴对本书的中文初稿进行了校对。与原版相比中文版只在个别地方有很小的改动。另外，增加了有关自然单位和费曼图规则的两个补充，这样会更方便初学者。译者张卫宁教授为本书中文译本的出版花了很大的功夫，做出了细心和准确的翻译。为此，我对张教授的工作表示衷心的感谢。我还要感谢新加坡世界科学出版公司主席潘国驹教授对本书英文原版和中文版在物质和精神上的支持。潘教授对物理学的发展和推动不遗余力，我十分感谢。感谢哈尔滨工业大学研究生院和哈尔滨工业大学出版社对本书中文译本出版的支持。

希望各位读者能够开卷有益。祝大家在物理学长流中奋进。

黄卓然

2001年7月于美国橡树岭

## 译者的话

高能重离子碰撞是20世纪70年代以来形成的一个新的研究领域;其目的是研究在相对论和极端相对论能量下,由核-核碰撞所产生的极端高温、高密度的核物质的性质,探测新的核物质相.这种研究对人们了解物质更深层次的性质,对于粒子物理、核物理和有关宇宙形成及演化的研究都有非常重要的意义.

在国内,目前还没有介绍高能重离子碰撞的书籍.黄卓然(Cheuk-Yin Wong)先生所著的“Introduction to High-Energy Heavy-Ion Collisions”一书1994年由新加坡世界科学出版公司出版.这也是目前世界上有关高能重离子碰撞方面为数不多的教科书之一.这本书从相对较低的起点出发,系统地介绍了高能重离子碰撞研究的各主要方面,内容深入浅出,数学推导完备.书中穿插有补充和练习,非常适合做教材供有关专业的研究生使用.本书也很适合有大学本科物理基础的高年级学生以及研究人员阅读和自学.我们希望此书的翻译出版能够为国内的大学生、研究生和有关科研人员了解、熟悉和进入高能重离子碰撞这个新的研究领域会有所帮助.

黄卓然先生1941年出生于广东梅县,1951年移居香港,后留学美国.1966年获普林斯顿大学物理学博士,随后在美国橡树岭国家实验室担任理论物理研究工作.他多年从事高能重离子碰撞研究,成果丰硕,1998年至1999年出任全球华人物理学会会长.黄先生十分关注国内高能重离子碰撞的研究工作,对本书的翻译和出版给予了极大的支持.他亲自校对了本书的全部初稿,专门为中文版加写了有关自然单位和费曼图规则的两个补充,并欣然为中文版作序.在此,谨表示真诚的感谢.

感谢新加坡世界科学出版公司提供本书在中国大陆的版权.感谢哈尔滨工业大学研究生院和哈尔滨工业大学出版社的大力支持.

由于译者水平有限,译文中不妥或错误之处,恳请读者和专家指正.

张卫宁

2001年10月于哈尔滨

## 英文版序

高能重离子碰撞是一个新兴的研究领域。作为粒子物理与原子核物理的交叉学科,它所涉及的许多课题虽然对在某一方向的研究工作者可能是熟悉的,但是对在另外方向的研究工作者却是新奇而陌生的。对于要进入这个领域的学生和研究人员来说,有很多属于不同学科,在不同教科书中的东西要学习。更为困难的是,它所研究的许多问题都要涉及到非微扰量子色动力学。由于缺少非微扰量子色动力学的解,很多问题根本上讲要从基本理论方面搞清楚是很困难的。这也使得大量的模型得以存在,同样的物理现象经常会有用不同的概念和运算模型来描述。

本书是为那些正在进入高能重离子碰撞这一诱人领域的学生和初学者而写的,其目的是对本领域文献中所涉及到的主要课题做一个基本的介绍。本书侧重于基本的方法和概念,讲授的进度是经过周密的考虑和循序渐进的,对数学公式的推导尽可能的完备,以便使读者能够对不同概念和模型的来龙去脉有所了解。

为了进一步对读者有所帮助,本书从头至尾包含有“补充”和“练习”的内容,它们对新的概念和数学结果给出了尽可能详细的描述和简明完备的推导,以便使读者能够不太困难地跟上本书的逻辑和数学思路。这些补充和练习对于一些专家可能是过于详细了,对于熟悉这方面内容的读者,这些可一带而过。它们在书中的目的是希望读者能够全面地了解一些相关概念的形成过程,这样将有助于读者自己在有关方面的进一步研究。如下历年夸克物质会议大量而优秀的论文是这些方面研究的例子:

1. *Quark Matter '80*, Proceedings of the Workshop on Future Relativistic Heavy Ion Experiments, GSI, Darmstadt, Germany, (1980).
2. *Quark Matter '82, Quark Matter Formation and Heavy Ion Collisions*, Proceedings of the Bielefeld Workshop at Bielefeld, Germany, edited by M. Jacob and H. Satz, World Scientific Publishing Company, (1982).
3. *Quark Matter '83*, Proceedings of the Third International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Brookhaven, New York, U. S. A., edited by T. W. Ludlam, and H. E. Wegener, published in Nucl. Phys. A418, (1984).
4. *Quark Matter '84*, Proceedings of the Fourth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Helsinki, Finland, edited by K. Kajantie, published by Springer-Verlag, Berlin, (1984).

5. *Quark Matter '86*, Proceedings of the Fifth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Asilomar, California, U. S. A., edited by L S Schroeder, and M Gyulassy, published in Nucl. Phys. A461, (1987).
6. *Quark Matter '87*, Proceedings of the Sixth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Asilomar, California, U. S. A., edited by H Satz, H J Specht, and R Stock, published in Zeit. Physik. C38, (1988).
7. *Quark Matter '88*, Proceedings of the Seventh International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Lenox, Massachusetts, U. S. A., edited by G Baym, P Braun-Munzinger and S Nagamiya, published in Nucl. Phys. A498, (1989).
8. *Quark Matter '90*, Proceedings of the Eighth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Menton, France, edited by J P Blaizot, C Gerschel, B Pire, and A Romana, published in Nucl. Phys. A525, (1991).
9. *Quark Matter '91*, Proceedings of the Ninth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Gatlinburg, Tennessee, U. S. A., edited by T C Awes, F E Obenshain, F Plasil, M R Strayer, and C Y Wong, published in Nucl. Phys. A544, (1992).
10. *Quark Matter '93*, Proceedings of the Tenth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Borlänge, Sweden, edited by E Stenlund, H-Å Gustafsson, A Oskarsson, and I Otterlund, published in Nucl. Phys. A566, (1994).

本书是对有一定量子力学和统计力学基础的读者而写的,个别章节要求读者对量子场论有一些简单的了解.对于那些对某个问题更有兴趣的读者,本书的内容可以再分,一些章节能够独立地学习.读者从目录和最后总结一章中能够了解到本书的内容体系.

作者衷心地感谢 T C Awes 博士仔细地阅读了本书的全部原稿,包括所有数学推导和公式,感谢他对本书所给予的积极评价和提出的很多有见地的修改意见.他的帮助对本书的改进极为重要.作者感谢 E C Halbert 博士阅读了本书的原稿并提出了有价值的建议.作者感谢 J Kapusta 教授,柯治明 (Che-Ming Ko) 教授, F Plasil 博士, Y Sharon 教授, T Udagawa 教授, R Vogt 博士, 王仁川 (Ren-Chuen Wang) 教授, 吴健时 (Jian-Shi Wu) 教授和 Stephan Hass 先生有意义的讨论和建议.感谢 H Gutbrod 博士和 WA80 合作组同意采用他们探测器的彩色图作为本书的

封面以展示高能重离子碰撞实验的优美图像。作者感谢 Karen Barry 女士提供了很多 TEX 排版的宏程序，也感谢 A Tate 女士和 E H Chionh 女士帮助修正了很多打印错误。

尽管已做出了很大的努力，但是笔误和错误在所难免。欢迎读者来信提出指正和改进意见，以便在本书的再版中给予修改。作者的网址是：[wongc@ornl.gov](mailto:wongc@ornl.gov)，传真是：(865)-574-4745。

本书的写作和出版得到美国能源部核物理处的资助，项目编号：DE-AC05-84OR21400。

黄卓然 (Cheuk-Yin Wong)  
Oak Ridge, 1994

# 目 录

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 中文版序 .....                 | i     |
| 译者的话 .....                 | ii    |
| 英文版序 .....                 | iii   |
| <br>1. 引言 .....            | <br>1 |
| 2. 运动变量 .....              | 6     |
| 2.1 符号与约定 .....            | 6     |
| 2.2 光锥变量 .....             | 9     |
| 2.3 快度变量 .....             | 16    |
| 2.4 赝快度变量 .....            | 22    |
| 3. 核子-核子碰撞 .....           | 24    |
| 3.1 核子-核子碰撞中粒子的产生 .....    | 24    |
| 3.2 非弹性碰撞中重子能量的损失 .....    | 30    |
| 4. 核子-核子碰撞中的硬过程 .....      | 36    |
| 4.1 无限动量参照系 .....          | 36    |
| 4.2 相对论硬散射模型 .....         | 38    |
| 4.3 结构函数的计数规则 .....        | 44    |
| 4.4 硬散射模型的应用 .....         | 48    |
| 4.5 直接碎裂过程 .....           | 52    |
| 5. 在强场中粒子的产生 .....         | 56    |
| 5.1 Schwinger 粒子产生机制 ..... | 56    |

|                                                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|
| 5.2 粒子产率 .....                                     | 62         |
| <b>6. 二维量子电动力学中的粒子产生 .....</b>                     | <b>68</b>  |
| 6.1 QED <sub>2</sub> 的定性描述 .....                   | 68         |
| 6.2 QED <sub>2</sub> 中 $j^\mu$ 与 $A^\mu$ 的关系 ..... | 73         |
| 6.3 内外级联 .....                                     | 82         |
| 6.4 由 QED <sub>2</sub> 得到的快度分布 .....               | 91         |
| <b>7. 经典弦模型 .....</b>                              | <b>94</b>  |
| 7.1 强子的弦模型 .....                                   | 94         |
| 7.2 稳定粒子的 Yo-Yo 模型 .....                           | 98         |
| 7.3 运动的 Yo-Yo 态 .....                              | 101        |
| 7.4 对称的 Lund 模型 .....                              | 103        |
| 7.5 核碰撞的 Lund 模型 .....                             | 111        |
| <b>8. 双重部分子模型 .....</b>                            | <b>116</b> |
| 8.1 双重共振态模型 .....                                  | 116        |
| 8.2 坡密子交换 .....                                    | 124        |
| 8.3 粒子产生过程 .....                                   | 126        |
| <b>9. 夸克 胶子 夸克-胶子等离子体 .....</b>                    | <b>137</b> |
| 9.1 夸克和胶子 .....                                    | 137        |
| 9.2 强子的袋模型 .....                                   | 140        |
| 9.3 夸克-胶子等离子体 .....                                | 142        |
| 9.3.1 高温下的夸克-胶子等离子体 .....                          | 143        |
| 9.3.2 高重子密度的夸克-胶子等离子体 .....                        | 149        |
| <b>10. 格点规范理论 .....</b>                            | <b>154</b> |
| 10.1 单粒子系统的路径积分方法 .....                            | 155        |
| 10.2 单粒子系统的配分函数 .....                              | 157        |
| 10.3 标量场的路径积分方法 .....                              | 159        |
| 10.4 标量场的配分函数 .....                                | 162        |
| 10.5 格点规范理论中的基本量 .....                             | 165        |

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| 10.6 QCD 的拉格朗日和欧几里得作用量 .....                                 | 171        |
| 10.7 欧几里得空间和闵可夫斯基空间的对比 .....                                 | 180        |
| 10.8 欧几里得作用量的费米子部分 .....                                     | 182        |
| <b>11. 格点规范理论的结果 .....</b>                                   | <b>185</b> |
| 11.1 Wilson 圈 .....                                          | 185        |
| 11.2 相变的级 .....                                              | 193        |
| 11.3 平均场近似 .....                                             | 197        |
| 11.4 格点规范理论的数值结果 .....                                       | 209        |
| 11.5 有费米子的格点规范计算 .....                                       | 211        |
| <b>12. 核-核碰撞 .....</b>                                       | <b>220</b> |
| 12.1 多重碰撞与核阻塞 .....                                          | 220        |
| 12.2 核-核碰撞的 Glauber 模型 .....                                 | 222        |
| 12.3 解析型的例子 .....                                            | 230        |
| <b>13. 高能重离子碰撞与夸克-胶子等离子体 .....</b>                           | <b>235</b> |
| 13.1 核阻塞能力与重子量 .....                                         | 235        |
| 13.2 高能核-核碰撞初始能量密度的 Bjorken 估计 .....                         | 240        |
| 13.3 夸克-胶子等离子体的流体动力学 .....                                   | 249        |
| <b>14. 夸克-胶子等离子体的特征 (I) 双轻子信息 .....</b>                      | <b>259</b> |
| 14.1 夸克-胶子等离子体中双轻子的产生 .....                                  | 259        |
| 14.2 其它过程的双轻子产生 .....                                        | 285        |
| 14.2.1 Drell-Yan 过程 .....                                    | 285        |
| 14.2.2 核-核碰撞中的 Drell-Yan 过程 .....                            | 295        |
| 14.2.3 强子和共振态的双轻子产生 .....                                    | 297        |
| 14.2.4 粲粒子衰变的双轻子 .....                                       | 303        |
| 14.3 双轻子谱 .....                                              | 305        |
| <b>15. 夸克-胶子等离子体的特征 (II) <math>J/\psi</math> 产生的抑制 .....</b> | <b>310</b> |
| 15.1 夸克-胶子等离子体中的德拜屏蔽 .....                                   | 310        |
| 15.2 夸克-胶子等离子体中的 $J/\psi$ 抑制 .....                           | 319        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 15.3 有关 $J/\psi$ 产生和 $J/\psi$ 抑制的实验信息 .....  | 322        |
| 15.4. 强子环境下的 $J/\psi$ 抑制 .....               | 324        |
| 15.5. $J/\psi$ 粒子的横向动量分布 .....               | 340        |
| <b>16. 夸克-胶子等离子体的特征 (III) 光子信号 .....</b>     | <b>345</b> |
| 16.1 夸克-胶子等离子体中光子的产生 .....                   | 345        |
| 16.2 夸克-反夸克湮灭的光子产生 .....                     | 347        |
| 16.3 等离子体中 $q\bar{q}$ 湮灭的光子产生 .....          | 354        |
| 16.4 康普顿过程的光子产生 .....                        | 364        |
| 16.5 等离子体中康普顿过程的光子产生 .....                   | 370        |
| 16.6 强子的光子产生 .....                           | 382        |
| 16.7 部分子碰撞导致的光子产生 .....                      | 385        |
| 16.8 有关光子产生的实验信息 .....                       | 387        |
| <b>17. 夸克-胶子等离子体的特征 (IV) 玻色-爱因斯坦关联 .....</b> | <b>390</b> |
| 17.1 强度干涉学的 HBT 效应 .....                     | 390        |
| 17.2 混沌源发出的 $\pi$ 介子的动量关联 .....              | 391        |
| 17.3 相干和部分相干源 .....                          | 408        |
| 17.4 $\pi$ 干涉学的实验结果 .....                    | 414        |
| <b>18. 夸克-胶子等离子体的特征 (V) 奇异性产生 .....</b>      | <b>430</b> |
| 18.1 热和化学平衡时物质的奇异含量 .....                    | 430        |
| 18.2 夸克-胶子等离子体中趋于化学平衡的变化率 .....              | 440        |
| 18.3 有关奇异性产生的实验结果 .....                      | 451        |
| <b>总结 .....</b>                              | <b>457</b> |
| <b>索引及中英术语对照 .....</b>                       | <b>462</b> |

## 1. 引言

高能重离子碰撞, 或高能核-核碰撞所研究的物理现象是什么? 要回答这个问题, 必须注意到高能核-核碰撞的最重要的特征之一就是涉及的能量巨大, 而在短时间内将巨大的能量沉积在一个小的空间范围会产生非常高的能量密度[1]. 举一个实例, 在美国布鲁海温国家实验室(BNL)的相对论重离子对撞机(RHIC)能够将原子核加速到约每核子 100 GeV 的能量, 在这样的对撞机上进行的金核与金核的碰撞, 每个核所携带的能量大约是  $100 \times 197$  GeV, 或 19.7 TeV, 在质心系中的能量  $\sqrt{s}$  约为  $2 \times 19.7 = 39.4$  TeV. 我们看到, 在这样的核-核碰撞中的能量确实是巨大的. 为了获得更高的质心系能量, 最近在 CERN (欧洲核研究中心) 正计划建造大型强子对撞机(LHC), 它可将重离子加速到每核子质心系能量大约为 3 TeV, 对于铅核与铅核的碰撞, 质心系的总能量将达到 1262 TeV [2, 3].

那么, 在如此高能量的核-核碰撞之后, 能量又是如何分布的呢? 让我们来考虑质心系中的对头碰撞, 如果碰撞很“透明”使得两个核在碰撞后只损失了一小部分的能量, 则它们将保持着大部分的初始能量继续向前运动, 而只有很少的能量沉积在碰撞系统的中间区域. 果真如此的话, 高能核-核碰撞将不会有什么重要的结果. 幸好事实不是这样, 从过去 20 年积累的实验数据来看, 非弹性核碰撞有很大的截面, 而且高能核-核碰撞是高度非弹性的. 我们先来看高能核子-核子的非弹性碰撞, 这时核子-核子非弹性碰撞的截面占了总反应截面的主要部分, 两个碰撞的核子平均要损失相当大的一部分 (大约一半) 的能量. 这些核子损失的能量沉积在质心附近, 后来被产生的  $\pi$  介子和其他介子带走. 在核-核中心碰撞中, 有很多这样的核子-核子非弹性碰撞. 就沉积在质心附近的能量而言, 定性地说, 核-核反应中的诸多核子-核子非弹性碰撞的影响大致上具有可加性. 也就是说, 核子-核子非弹性碰撞越多, 沉积在质心附近的能量就越大. 另外, 由于洛伦兹收缩, 两个碰撞的核在碰撞前的形状如同两个薄的圆盘. 这样, 在两个核中核子-核子的初次碰撞几乎同时发生, 并且其空间距离很近. 因此, 随着碰撞的重子物质在碰撞后互相离去 (如果它们没有因为碰撞而停止的话), 大量的能量在短时间内被沉积在一个小的空间

区域里. 在这个区域内, 能量密度非常高, 可以达到几个  $\text{GeV}/\text{fm}^3$  的量级 [1]. 这样的能量密度要高于平衡态下核物质能量密度的量级, 因而可能会有助于形成新的物质形态, 如夸克-胶子等离子体. 研究在高能量密度和高温度的极端条件下的新的物质形态是高能重离子碰撞的重要目的.

在理论方面, 我们对现代物理的理解为两个问题所困惑, 这就是对称性的破缺, 以及找不到孤立的夸克 [4, 5]. 正如李政道所强调的, 高能重离子碰撞可以为考察在强相互作用的夸克-胶子系统中的对称性破缺和夸克囚禁提供重要的工具 [4].

对称性破缺的现象在很多物理系统中都会发生, 例如在铁磁体, 电弱相互作用和强相互作用系统中. 我们将以铁磁性为例解释对称性破缺的概念. 在一个铁磁系统中, 描述在不同位置的原子自旋相互作用的哈密顿是旋转不变的. 在简单的海森伯铁磁性模型下, 我们将系统看做是在格点  $\{i\}$  上的自旋  $\{s_i\}$  的集合, 系统的哈密顿取为对  $-Js_i \cdot s_j$  的求和, 其中  $J(>0)$  是相互作用的强度, 求和对所有最近邻的  $i$  和  $j$  进行. 由于标量积  $s_i \cdot s_j$  与坐标系的方向无关, 从而使得系统的哈密顿具有旋转对称性. 同样由于标量积  $s_i \cdot s_j$ , 当两个最近邻的自旋取向相同时, 系统的能量最低, 并且这个自旋的取向对所有的方向是完全对称的. 显然, 当系统内在各个格点上的自旋大部分取向相同时, 系统的能量是低的, 这时的位形是优势位形. 系统内自旋的这种排列出现在低温下, 导致形成宏观上的铁磁系统. 由于在铁磁体内部有一个特殊的方向, 在不同格点上的原子的自旋都趋于这个方向, 因而不存在旋转对称性, 这时我们称对于铁磁系统旋转对称性自发破缺. 这里的情况是系统的哈密顿是旋转对称的, 但系统的状态没有旋转对称性. 由于在铁磁体内的宏观系统中, 自旋的指向趋于一个特殊的方向, 因而系统哈密顿的旋转对称性是隐对称性, 而不是显对称性. 对于一个在铁磁体内的观察者, 只有通过仔细的分析, 在彻底搞清铁磁体中自旋取向的原因后, 才能了解到系统哈密顿的这种隐旋转对称性的原因. 随着温度的增加, 系统的热运动将使这种不同格点上自旋的有向排列趋于瓦解. 当温度超过临界居里温度时, 自旋取向混乱的趋势将压倒自旋有向排列的趋势, 系统的基态恢复到对不同方向完全对称的态. 这时在系统内各点上的自旋将没有一个优势的排列取向, 系统保持在具有旋转对称的状态. 我们称在低温下铁磁系统破缺的对称性在高温下得到恢复. 从低温下

自旋有向排列的铁磁相到高温下自旋混乱取向的非铁磁相, 系统经历了一个相变的过程。

人们普遍认为, 对称性破缺的现象也发生在强相互作用系统中, 并且它与人们无法观测到孤立的夸克这一困惑有关. 通过把一个强相互作用系统放到时空格点的空间里去描述, 我们能够和铁磁系统做一个类比. 在这样的格点空间里, 最近邻的格点通过格键相连, 任意四个最近邻的格键组成一个基块, 称为方块[6]. 在格点空间里有很多这种由最邻近的四个格键构成的方块.

在强相互作用系统中, 场量子是夸克和胶子, 描述系统的位形就是确定在所有时空点上的夸克场和胶子场. 在格点空间中, 夸克-胶子强相互作用系统的位形是由一组位于格点上的夸克场和位于格键上的胶子场来描述, 而与夸克场和胶子场相联系的是一个抽象的色空间. 通常, 利用作为胶子场函数的键变量代替直接应用胶子场来描述格键上的场是方便的. 类似于自旋空间中的泡利自旋矩阵, 键变量是色空间中的一个矩阵. 系统中胶子场的拉格朗日是通过对一个方块的四个键变量的乘积取迹, 并对所有方块键变量乘积的迹求和而得到的. 根据拉格朗日量的形式, 当一个方块上的四个键变量在色空间中是相关的时候, 系统的能量最低.

为了便于理解, 我们可以大致地把色空间中的键变量类比为铁磁系统中自旋空间里的自旋变量. 相应地, 一个方块上四个最近邻格键上的键变量之间的关联可类比为铁磁体中两个最近邻格点上自旋的有向排列. 因此, 为了降低系统的能量, 位于一个方块的四个格键上的键变量, 在色空间有趋于关联的倾向, 而且不同方块上的键变量也有在色空间彼此关联的趋势. 当系统中在各空间位置格键上的键变量大部分彼此关联时, 系统的能量很低, 这时的位形是优势位形. 另一方面, 由热运动引起的熵增加效应将瓦解键变量之间的关联. 在低温下, 关联的趋势会压倒破坏关联的趋势, 系统的键变量有非零的平均值. 由于各格键上的键变量在色空间中相互关联, 键变量在色空间中的各向同性对称性自发破缺. 如果计算在这样的相中一个夸克和一个反夸克间的相互作用, 就会发现这种相互作用是吸引的, 其大小与夸克和反夸克间的距离成正比. 这样要把夸克和反夸克分开需要无穷大的能量, 因而夸克是囚禁的. 这时的系统是胶子、夸克和反夸克的凝聚态, 具有强相互作用的粒子——强子就是这样的例子, 夸克和胶子被囚禁于其中.

随着温度的上升,破坏关联的趋势会超过关联的趋势,系统的基态恢复到对称的状态,夸克和胶子将解除囚禁,形成夸克-胶子等离子体.从低温的囚禁相到高温的解禁相存在一个相变[6],人们估计相变的温度大约在200 MeV,夸克-胶子等离子体的能量密度在几个  $\text{GeV}/\text{fm}^3$ . 这样的温度和能量密度的范围是高能重离子碰撞能够达到的,因此可以通过高能重离子碰撞来探索是否有夸克-胶子等离子体存在.对夸克-胶子等离子体的实验研究和鉴别有可能为夸克囚禁问题提供新的思路.另外,在重离子碰撞中产生的非常高的能量密度,虽然是在很小的时间和空间范围内,但仍有助于人们研究在某些极端条件下,如宇宙形成早期物质的性质.

人们预计高能量密度的区域会在下面两种不同的情况下产生,这就是在每核子  $\sqrt{s} \approx 5 - 10 \text{ GeV}$  碰撞能量下的“阻塞”区域或“丰重子的夸克-胶子等离子体”区域,以及在每核子  $\sqrt{s} \geq 100 \text{ GeV}$  碰撞能量下的“无重子夸克-胶子等离子体”区域.在第一种情况下,我们可以设想由于阻塞使得在质心系中重子被减速,以至于核物质在质心系中几乎停止运动,在这个区域中形成的夸克-胶子等离子体属于丰重子夸克-胶子等离子体.但在更高的能量下,重子不能完全被阻塞,在碰撞后它们虽然被减速,但还是远离了非弹性碰撞的中心.当它们充分分开时,参与碰撞的核子将能量沉积在相互远离的重子之间的中间快度区域,大量的这种核子-核子碰撞效果的叠加会产生重子含量很少的夸克-胶子等离子体.因为在早期宇宙中净重子含量很少,所以天体物理学家对这类夸克-胶子等离子体很感兴趣[7].

对有关核-核碰撞动力学细节的定量理解将有助于人们估计夸克-胶子等离子体形成的可能性,这些知识也有助于区分实验中来自强子相的信号和来自夸克-胶子等离子体的信号.我们想知道的是一个重子是怎样在穿过核时被减速,以及在核物质中粒子是怎样产生的,重离子碰撞的过程到底是怎样的?这些都是前沿的研究课题.

总之,高能重离子碰撞无论在理论上还是在实验方面都是新兴的学科,它仍处在动态的发展之中.人们已经提出了很多的模型,并且由于很多问题没有被完全解决,还会有更多的模型出现.因此,对这一领域当前的研究状态进行回顾,为初学者进入这一领域工作提供一系列必备的工具是非常值得的.

## 第一章参考文献

- 1 J D Bjorken, Phys. Rev. D27, 140 (1983).
- 2 C Rubbia, in Proceedings of the XXVI International Conference on High Energy Physics, Dallas, Texas, August, 1992, edited by R Sanford, AIP Conference Proceedings No. 272, Vol. I, p. 321.
- 3 H Satz, Nucl. Phys. A544, 371c (1992).
- 4 T D Lee, Nucl. Phys. A538, 3c (1992).
- 5 有关介绍对称性破缺和夸克囚禁现象的优秀入门参考书有: K Gottfried and V F Weisskopf, *Concepts of Particle Physics*, Vols. I and II, Oxford University Press, Oxford, 1984, 以及 T D Lee, *Particle Physics and Introduction to Field Theory*, Harwood Academic Publisher, Chur, Switzerland, 1981.
- 6 有关有限温度格点 QCD 结果的评述文献可参见 J B Kogut, Nucl. Phys. A461, 327c (1987), A Ukawa, Nucl. Phys. A498, 227c (1989), B Petersson, Nucl. Phys. A525, 237c (1991), T Hatsuda, Nucl. Phys. A544, 27c (1992), 以及其所引用的参考文献.
- 7 S Weinberg, *The First Three Minutes*, Basic Books, NY, 1977.