高能多强子产生物理导论

冯笙琴　著

需要全本请访问 www.ertongbook

版权专有　侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

高能多强子产生物理导论/冯笙琴著.—北京:北京理工大学出版社,2005.9
ISBN 7-5640-0604-8

Ⅰ.高…　Ⅱ.冯…　Ⅲ.高能物理学　Ⅳ.O572

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第092972号

出版发行/北京理工大学出版社
社　　址/北京市海淀区中关村南大街5号
邮　　编/100081
电　　话/(010)68914775(办公室)　68944990(批销中心)
　　68911084(读者服务部)
网　　址/http://www.bitpress.com.cn
电子邮箱/chiefedit@bitpress.com.cn
经　　销/全国各地新华书店
印　　刷/北京圣瑞伦印刷厂
开　　本/850毫米×1168毫米　1/32
印　　张/7.625
字　　数/189千字
版　　次/2005年9月第1版　2005年9月第1次印刷
印　　数/1~1500册　　责任校对/郑兴玉
定　　价/15.00元　　责任印制/吴皓云

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前　言

高能重离子碰撞是 20 世纪 70 年代兴起的一个新的研究领域，碰撞后会产生大量的粒子，通过这些大量产生粒子的整体运动特征的研究，可以帮助我们认识物质更深层次的性质和特性，对于粒子物理、核物理和有关宇宙形成及演化都有非常重要的研究意义。

本书内容分为两大部分，一是高能物理多粒子产生的理论研究；二是高能物理实验研究。

理论部分包括高能核诱导反应机制与核几何的关联、高能重离子碰撞的纵向非均匀集体流理论、相对论重离子碰撞的粒子产生和集体运动特征、粒子物理与天文学；实验部分包括高能物理实验手段、高能物理实验混合事件方法、质子－铅作用中领头重子碎裂机制研究、高能全同粒子的 HBT 关联。

第一章高能核诱导反应机制与核几何的关联部分讨论了诱导核反应中与核几何的依赖关系，引入了在反应体质心系讨论核碰撞作用机制；并考虑到相空间分布的不对称特点，引入了椭球衰变理论，用一个椭度参量来反映横能和向前能的负关联特征，分析和研究了 AGS 和 SPS 能区的核－核作用的动力学机制。

第二章介绍了加速器和加速器的工作原理，并突出分析了在相对论重离子对撞机（RHIC）上工作的四个实验组 PHINEX、STAR、BRAHMS 和 PHOBOS 探测器的工作原理，以及这些实验组的研究范围和研究对象。

第三章所讨论的高能物理实验混合事件方法，是高能物理实

验中的一个基本方法，在这部分以 RQMD 产生器作为输入，研究了在比较复杂的背景情况下的一种新的方法——循环迭代方法。

第四章质子－铅作用中领头重子碎裂机制研究，利用了E-941的高能质子 (p) 与固定铅靶 (Pb) 碰撞的实验数据，研究领头重子的碎裂机制，为新的胶子弦结碎裂机制提供实验支持。

第五章高能全同粒子的 HBT 关联集中分析了全同 π 介子和质子的关联，并分析了高能重离子碰撞的时空演化特征。

第六章高能重离子碰撞的纵向非均匀集体流理论，讨论了核阻止本领与纵向非均匀分布程度的关系，并比较了 AGS、SPS 和 RHIC 能区的核阻止特性。RHIC 能区的净质子分布特征与 AGS 是完全不同的。定性地讲，高能重离子碰撞可以分为两个不同的能量区域：即每核子 $\sqrt{S}\geqslant 100$ GeV 的无重子夸克－胶子等离子体区域，和每核子 $\sqrt{S}\approx 5\sim 10$ GeV 的丰重子夸克－胶子等离子体区域。在无重子夸克－胶子等离子体区域，射弹重子与靶重子相互穿透，留下重子数很小的夸克－胶子等离子体；而在 AGS 能区，在核阻止区间，碰撞重子几乎完全阻止，粒子能量和重子数的不断堆积而形成重子数很大的夸克－胶子等离子体区域。

第七章相对论重离子碰撞的粒子产生和集体运动特征，着重介绍在 RHIC 运行以后，一些重要的实验和理论研究的新进展。在 RHIC 建成之前，理论上就已经在较大范围内对多粒子产生动力学机制和初始条件进行研究。但由于在讨论软强子产生以及软作用和硬过程相互影响等方面存在一些不确定性，因此讨论问题有一些不确定性。随着 RHIC 的运行，已经有许多关于带电多重数分布的新的结果出现，这种不确定性在逐渐减小。通过该部分介绍可以帮助我们了解该领域的最新的研究进展。

第八章介绍了与粒子物理有关的宇宙学研究部分，这是粒子物理研究与天文宇宙学研究交叉进行的科学研究。

在本书的完成过程中，真诚感谢许多帮助和鼓励我的人，首先感谢华中师范大学粒子物理研究所的刘连寿教授和蔡勖教授，是

他们把我引进高能物理这一深邃的研究领域，并长期关心、帮助和鼓励我，使我在学习和研究中不断进步和成长；感谢美国加州大学洛杉矶分校（UCLA）的国际著名高能物理实验专家黄焕中教授，为使我尽快进入高能物理实验这一前沿研究领域，并能在该领域的科研工作中取得成绩，黄焕中教授为我做了大量而卓有成效的工作；感谢德国科学院马克－普朗克物理研究所的 Nobert Schmitz 和 Peter Seyboth 两位教授，为我在德国 Max－Planck fuer Physik（Munich）做访问学者期间所从事的高能 HBT 实验研究所提供的许多指导和帮助，使我受益匪浅。中科院高能物理研究所的赵维勤研究员和清华大学的庄鹏飞教授多次邀请我参加在中国高科学技术研究中心（CCAST）举行的国际高能物理会议，使我有机会向国内外高水平的科学家学习并进行交流，在此一并表示感谢。

感谢多位研究合作者刘连寿教授、蔡勖教授、黄焕中教授、王正清教授、周代翠教授、刘峰教授、杨纯斌教授、台安博士、Rudi Ganz 博士和石亚非副教授等，许多工作的完成凝聚了他们的智慧和辛勤的工作；研究生袁显宝、明庭尧、熊伟和万兰芳为本书的打印和校对做了大量的工作，在此一道感谢。

本书所包括的研究成果得到了湖北省教育厅重大科研项目基金（鄂教科技 2003ZSD002）、三峡大学重大项目基金（三峡大学科技 2003KJC02）、三峡大学博士科研启动基金（2003KJB009）、三峡大学“新世纪本科教育教学改革工程”第三批立项项目基金（B 类，2005005）的资助，本书的出版得到了三峡大学重点学科“应用数学”建设基金的资助，在此一道表示真诚的感谢。

作　者

2005 年 5 月

需要全本请访问 www.ertongbook

目　录

绪论…… 1
第一章　高能核诱导反应机制与核几何的关联…… 8
§1.1　洛仑兹变换的快度描写 …… 8
§1.2　光锥变量…… 10
§1.3　赝快度变量…… 12
§1.4　实验室系和质心系…… 13
§1.5　高能核子－核子碰撞特征…… 15
§1.6　高能核－核碰撞的长程关联特征研究…… 19
§1.7　高能核－核作用中反应体质心系模型…… 24
§1.8　横能与零度能分布特征的核几何描述…… 30
参考文献 …… 39
第二章　高能物理实验手段 …… 41
§2.1　加速器原理…… 41
§2.2　高能粒子探测技术…… 44
§2.3　相对论重离子对撞机（RHIC）…… 50
§2.4　相对论重离子碰撞的核几何…… 57
参考文献 …… 63
第三章　高能物理实验混合事件方法 …… 66
§3.1　混合事件方法简介…… 66
§3.2　一种新的混合事件方法…… 67
§3.3　RQMD 模拟的关联的 $N-\pi$ 对分布 …… 76
参考文献 …… 79

第四章　质子－铅作用中领头重子碎裂机制研究 …… 81
§4.1　领头重子碎裂机制研究 …… 81
§4.2　E-941 实验 …… 84
§4.3　用混合事件方法找领头重子 Λ 和 Δ^{++} …… 85
§4.4　几何接收率和粒子分辨效率 …… 101
§4.5　实验结果和分析 …… 108
参考文献 …… 113
第五章　高能全同粒子的 HBT 关联 …… 115
§5.1　HBT 关联简介 …… 115
§5.2　NA49 实验简介 …… 118
§5.3　158 GeV/n 能量下质子－质子相互作用的 HBT 关联 …… 123
§5.4　高能质子－铅作用中的玻色－爱因斯坦关联研究 …… 128
§5.5　质子－质子、质子－铅、铅－铅作用 HBT 关联特征比较 …… 138
参考文献 …… 140
第六章　高能重离子碰撞的纵向非均匀集体流理论 …… 142
§6.1　非均匀集体流理论提出的背景 …… 142
§6.2　一维非均匀集体流理论 …… 144
§6.3　二维非均匀集体膨胀流理论 …… 155
参考文献 …… 165
第七章　相对论重离子碰撞的粒子产生和集体运动特征 …… 169
§7.1　粒子产生模型 …… 169
§7.2　多粒子产生的理论与实验比较 …… 174
§7.3　高能重离子碰撞的集体运动特征 …… 186
参考文献 …… 201
第八章　粒子物理与宇宙学 …… 206
§8.1　哈勃定律和膨胀宇宙 …… 207

§8.2 **费里德曼方程** …… 208
§8.3 **宇宙微波辐射** …… 211
§8.4 **辐射和物质年代** …… 215
§8.5 **大爆炸中的核合成** …… 217
§8.6 **重子－反重子非对称性** …… 219
§8.7 **早期宇宙相变机制的讨论** …… 221
参考文献…… 227
附录　粒子物理研究进展的大事记…… 228

绪　论

高能物理主要研究物质组成和它们之间的相互作用，实验研究主要是利用巨大的加速器和探测器对物质组成和它们之间的相互作用进行理论和数据实验。高能物理研究的必要性在于：

1. 为了研究非常小标度的粒子组成，必须研究出最小可能波长和最大可能能量。

2. 许多基本粒子有较大质量，需要找出较高能量才能使这些粒子产生。

50 年前，人们知道的仅仅只有几个“基本”粒子：质子、中子、电子、中微子和光子。为了认识在质子和中子之间的核力，了解在宇宙线中观察到的不稳定粒子特性，科学家们研制了更大的加速器，并运用加速器对“基本”粒子进行实验研究，从而观察到几百个称为强子物质的共振态。通过努力，从这些似乎繁杂的发现中，知道了宇宙是由几个最基本的粒子组成，并已经建立了比较清楚的物理图像：

⑴ 所有物质最基本的组成由自旋为 $1/2$ 的夸克和轻子（电子和中微子）组成，这些夸克带分数电荷（$+2/3e$ 和 $-1/3e$），轻子类的电子和中微子，带整数电荷。

⑵ 自然界中有强作用力、弱作用力、电磁作用力和引力四种相互作用的力，强作用力对应把强子中夸克结合在一起的力，还有原子核中质子和中子之间的核力；电磁作用力是一个长程力，由这种力形成了原子和分子的束缚态；弱作用力对应原子核的 β 射线辐射；引力是我们所熟知的力，但在粒子物理研究中，它是最不重要的力。传递这四种力的粒子被称为传播子，它一般为玻色子（自

旋量子数为整数)。

迄今为止,还没有发现带电的自由夸克,夸克似乎永远被禁闭在强子内部;夸克有六种味量子数,轻子也有六种,对应三种带电的和三种是电中性。我们既不知道夸克禁闭机制,也不知道为什么夸克和轻子"味"一样可分为三代。

夸克和轻子的味多重数在四种基本相互作用中是平行对称的,这方面的研究已取得了实质性进展。也许自然界的四种相互作用是统一的,我们现在观察到的所谓四种基本相互作用只不过是作用不同方面的特性。例:电磁作用和弱作用具有相同的费米组成耦合特性,但却有不同的转播力的中间玻色子,这对应电和弱相互作用的不同方面。与电磁作用比较(中间玻色子为光子,为长程力),电弱作用力表现为短程力,中间传播玻色子 $W^{\pm}$、Z^{0} 的质量大约为质子质量 100 倍。在足够高的能量和动量(大于弱作用传播子的质量标度)传输情况下,电磁作用与弱作用应该有相同作用强度。

为什么在高能时具有对称性的破坏在低能时也能破坏,为什么玻色子质量有这么大的变化范围,这些都是未解决的问题。重要的一点是:不同的作用它的强度并不是一成不变,而是依赖于能量标度。在高能时,强作用变弱,强作用和电弱作用耦合能量标度在 10^{15}GeV 附近。

QCD 理论是描述强子和核结构的夸克 - 胶子等离子体(QGP)强相互作用的基础理论,QCD 规范对称的非阿贝尔性质提出了夸克和胶子的禁闭特征,使得强子是唯一的参加强相互作用的稳定的真空激发态。在极端高温和高重子数密度的环境下,真空环境将可能发生变化,系统将经历由强子物质到 QGP 的相变[1]。格点 QCD 理论给出状态方程的数字计算,并发现在临界温度 $T = 170$ MeV 发生一级相变。这种产生的新物质称为夸克 - 胶子等离子体(QGP),仅仅在宇宙大爆炸的早期几微秒时间才可能存在;夸克物质还可能存在于中子星的核心部分,在中子星

的核心部分的重子数密度超出相变的临界密度。

高能重离子碰撞被认为是在可控制的实验室环境里,产生较大体积和较长时间的 QGP 的重要实验手段。利用高能重离子碰撞探索 QGP 已经经历了近 30 年时间,在 20 世纪 80 年代先后运行了 Berkely Bevalac、Brookhaven AGS 和 CERN SPS,已经在探索高能核物质和发现新物理做出了有突出意义的贡献。在 2000 年,世界首台高能重离子对撞机 (RHIC) 的运行,开辟了探索高能 QCD 理论和寻找 QGP 的新纪元;在欧洲核子物理研究中心 (CERN) 即将运行的大强子对撞机 (LHC),对撞的能量更高,将在更大范围内研究粒子物理和 QCD 理论。

粒子物理研究与宇宙的早期演化研究关系密切,宇宙起源于大爆炸,随着宇宙膨胀,所有类型的粒子如夸克、轻子和量子态在早期已形成。今天,所看到的是一个已膨胀,已冷却的宇宙。因此,今天的高能物理研究,可以帮助大家研究关于宇宙爆炸和膨胀的一些特性。

§0.1 高能重离子碰撞物理

高能重离子碰撞的主要研究目的是什么?为了回答这个问题,首先要注意到的是高能重离子碰撞的主要特征:在非常短的时间内,在一个很小的范围内产生巨大的能量[1]。例如,在美国布鲁克海汶国家实验室 (BNL) 建造的第一台相对论重离子对撞机 (RHIC),使被加速的原子核中的每个核子得到 100 GeV 的能量,对应每个核的能量 100×197 GeV,即 19.7 TeV。对撞机的质心系能量 $\sqrt{S}$ 为 $2\times19.7=38.4$ TeV,高能重离子碰撞确实能产生巨大的能量。RHIC 实验的一个主要目的是在极端高温和高密的环境中寻找夸克-胶子等离子体态 (QGP),它对应为夸克和胶子被解除了禁闭,发生了由图 0-1 显示的从核物质、强子到夸克物质相变图。最近的 RHIC 实验结果观察到"夸克喷注淬火",也即是

需要全本请访问 www.ertongbook

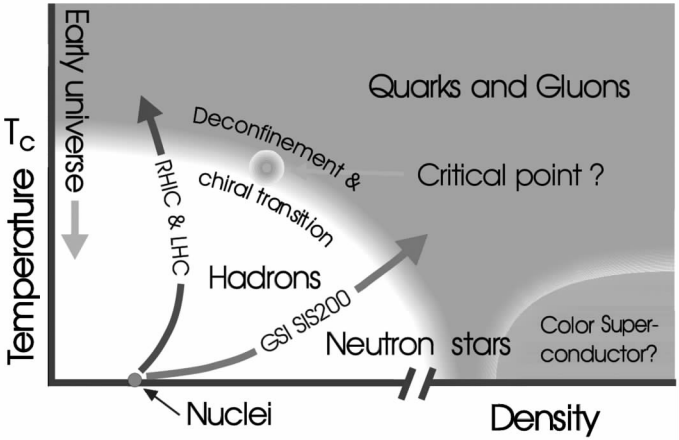


图 0－1　核物质相变图

在 QGP 中部分子能量损失现象，给出了在 RHIC 能区可能有 QGP 产生[2]。

为了获得更高的质心系能量，最近 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 1 262 TeV[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 π 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，由于洛仑兹收缩，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 GeV/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。

AGS 和 SPS 的固定靶实验已经给出了丰富的实验结果，证实了高能重离子碰撞能产生稠密的核物质，但是很难把强子分布和 QGP 形成的信号区分开，也很难在 AGS 和 SPS 的固定靶实验中产生长寿命的 QGP 信号。

RHIC 是世界上第一台重离子对撞机，开辟了在极端高温和高密条件下研究 QCD 物质的新纪元。RHIC 不仅能产生最大的核物质能量密度，而且能观察到一些原来不能探测的实验现象，这些现象将有利于我们加深对高温和高密核物质的理解和认识。RHIC 通过四年的运行，收集到的丰富实验数据结果已暗示在一些激烈的对头剧烈碰撞中，RHIC 已经产生了高密度的平衡系统。通过分析硬过程和整体测量结果，发现 RHIC 碰撞的初态能量密度将高出普通核物质能量密度的两个量级，远远超出格点 QCD 计算预言的解除禁闭相变的能量密度。

在理论方面，我们对现代物理的理解却被两个问题所困惑，这就是对称性的破缺，以及找不到孤立的夸克[3]。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]。

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，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 GeV/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，在高能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$\sqrt{S}\approx 5\sim 10$ GeV 碰撞能量下的“阻止”区域或“丰重子的夸克－胶子等离子体”区域，以及在每核子$\sqrt{S}\geqslant 100$ 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，可以设想由于阻止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，重子不能完全被阻止，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 。

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[5]。

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。

参 考 文 献

1 Bjorken J D. Highly relativistic nucleus－nucleus collisions：the central rapidity region. Phys Rev，1983，D27 (2) ：140～151

2 Harris J W，Muller M. The search for the quark － gluon plasma. Ann Rev Nucl Sci，1996，46 (1) ：77～107

3 Giubellino P. Experiments at the LHC. Nucl Phys，2003，A715 (3) ：441～450

4 Lee T D. Missing symmetries，unseen quarks and the physical vacuum. Nucl Phys，1992，A25 (1) ：3c～13c

5 黄卓然. 高能重离子碰撞导论. 张卫宁译. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2002

第一章　高能核诱导反应机制与核几何的关联

在具体讨论运动学问题之前，先讨论一下单位制。在粒子物理学中，一种常用的单位制是自然单位制。因此，经常要碰到光速 c 和普朗克常数 $\hbar$ 两个常数。在国际单位制中，它们的数值分别为：$c = 2.998 \times 10^8$ m/s，$\hbar = 1.055 \times 10^{-34}$ J·s。

在自然单位制中，令 $\hbar = c = 1$，这样，粒子物理中的公式便大为简化。在自然单位制中，长度 $[L]$ 和时间 $[T]$ 都是质量的倒数的量纲

$$[L] = [T] = [M]^{-1} \tag{1-1}$$

动量、能量均与质量的量纲相同，为 $[M]$。而电荷的纲量为1。由于光速 $c = 1$，自然单位制中的 1 s，相当于国际单位制的 3×10^8 m。

令 $\hbar = c = 1$ 并没有使自然单位制完全确定，还可以任意选定质量的单位。在高能物理中通常选 GeV (10^9 eV) 或 MeV 为能量单位，长度单位为 fm，而时间单位为 fm/c。其他物理量单位可以由这三个基本单位来表示，如动量单位为 GeV/c，在取了这个单位以后，

$$\hbar c = 0.197\ 3\ \text{GeV} \cdot \text{fm} = 197.7\ \text{MeV} \cdot \text{fm} \tag{1-2}$$

这是高能物理中经常用到的物理量。

§1.1　洛仑兹变换的快度描写

对于两平行运动惯性系之间的时空关系由洛仑兹变换给出

$$\left.\begin{aligned} x' &= \gamma(x - \beta t) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma(t - \beta x) \end{aligned}\right\} \tag{1-3}$$

为了方便，可以用快度 y 代替 β 来描写洛仑兹变换。

快度 y 的定义为

$$\left.\begin{aligned} \sinh y &= \frac{1}{2}(e^{y} - e^{-y}) = \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma\beta \\ \cosh y &= \frac{1}{2}(e^{y} + e^{-y}) = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma \end{aligned}\right\} \tag{1-4}$$

可以看到，这样定义的 y 是与 β 一一对应的，如下所示。

$$\beta : -1 \to 0 \to 1$$
$$y : -\infty \to 0 \to +\infty$$

或用矩阵写出

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh y & 0 & 0 & -\sinh y \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sinh y & 0 & 0 & \cosh y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} \tag{1-5}$$

下面来讨论速度合成问题。

设 s' 坐标系相对于 s 系以速度 β' 沿 x 方向运动，s'' 系相对于 s' 以速度 β'' 延 x' 方向运动，则根据相对论速度相加公式，s'' 系相对于 s 系速度 β 为

$$\beta = \frac{\beta' + \beta''}{1 + \beta'\beta''} \tag{1-6}$$

对应 $\beta = \tanh y$，所以式 (2-6) 变为

$$\tanh y = \frac{\tanh y' + \tanh y''}{1 + \tanh y' \tanh y''} = \tanh(y' + y'') \tag{1-7}$$

由此可得

$$y = y' + y'' \tag{1-8}$$

需要全本请访问 www.ertongbook