

中高能重离子碰撞

李俊生 著

中国原子能出版社

中高能重离子碰撞

李俊生 著



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中高能重离子碰撞/李俊生著. —北京:中国原子能出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5022-7701-7

I. ①中… II. ①李… III. ①重离子—离子碰撞 IV. ①0571.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 303106 号

内 容 简 介

本书主要从实验上介绍了中高能重离子的产生、碰撞及末态粒子的探测方法,中高能重离子诱发乳胶核反应弹核碎裂和靶核碎裂的特点与规律,及利用 CR-39 进行中高能重离子碎裂实验研究的进展。

本书可供粒子物理与原子核物理专业的教师、研究人员、研究生和高年级物理专业的本科生阅读与参考。

中高能重离子碰撞

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 肖 萍

装帧设计 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京厚诚则铭印刷科技有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 13.5

字 数 249 千字

版 次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-7701-7 定 价 48.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

原子核是自然界物质结构的一个层次。原子核物理学研究核力的本性、核物质的性质及其运动规律等问题。

人们研究原子核的主要方法,是利用加速的粒子或原子核轰击原子核,引起原子核反应。随着加速器技术的发展,现在已经可以把原子核加速到非常接近真空中的光速。人们利用中高能原子核轰击别的原子核,希望在核-核碰撞的极端条件下更深刻地了解核物质的性质,如核结构、核物质的相变、核反应动力学等。

在原子核反应中,入射的加速粒子犹如炮弹,称为弹核;被轰击的原子核犹如靶子,称为靶核。实验上研究中高能原子核碰撞的方法很多,例如用中高能原子核轰击靶核时,可用多粒子磁谱仪、 γ 谱仪、流光室等仪器测量反应产物。其中比较简单方便的方法是用中高能重离子轰击核乳胶,研究它们在核乳胶中的相互作用,或用 CR-39 固体核径迹探测器记录反应产物,研究电荷变化总截面、分截面及末态粒子发射等问题。

本书重点从实验上介绍了中高能重离子的产生、碰撞及末态粒子的探测方法,中高能重离子诱发乳胶核反应弹核碎裂和靶核碎裂的特点与规律,及利用 CR-39 进行中高能重离子碎裂实验研究的进展。

第一章 中高能重离子碰撞的基本概念,介绍了重离子碰撞能区的划分、核物质相图、重离子碰撞几何和时空图像、重离子碰撞有效能量及中高能重离子核反应方式和主要测量量等概念。

第二章 中高能重离子加速器,主要介绍了目前国际上运行和建设的中高能重离子加速器的基本情况。

第三章 固体核径迹探测器,重点介绍了原子核乳胶和 CR-39 的工作原理和应用、利用原子核乳胶和 CR-39 研究中高能重离子碎裂中末态粒子的鉴别方法等。

第四章 中高能重离子在核乳胶中的电磁离解,介绍了电磁离解理论、重离子诱发乳胶核反应中电磁离解事例的选取方法、并以 3.7 A GeV ^{16}O 诱发乳胶核反应为例,讨论了电磁离解事例中弹核碎片的电荷分布、电磁离解衰变模式、电磁离解作用平均自由程和反应截面及电磁离解作用下弹核碎片的多重数分布问题。

第五章 中高能重离子诱发乳胶核反应中的弹核碎裂,讨论了中高能重离子诱发乳胶核反应整体特征、弹核碎片多重数分布、弹核质子碎片多重数分布和单源发射及弹核 α 碎片多重数分布和双源发射等问题。

第六章 中高能重离子诱发乳胶核反应慢粒子产生,讨论了慢粒子多重数分布与关联、慢粒子前后发射问题和靶核碎片多重数分布的涨落问题。

第七章 利用 CR-39 进行中高能重离子碎裂研究,讨论了利用 CR-39 进行中高能重离子碎裂研究的实验方法、中高能重离子碰撞的电荷变化总截面和分截面及末态粒子发射角和分布特点。

本书完成过程中,得到山西师范大学现代物理研究所张东海教授、李惠玲教授的许多帮助和指导,现代物理研究所研究生石瑞、党英华为本书的打印和校对做了大量工作,在此对他们表示衷心的感谢!

本书所包含的研究成果得到了国家自然科学基金(10275042, 11075100)、山西省自然科学基金(2011011001-2)、山西省留学回国人员科研项目(2011-058)、山西省重点建设学科“粒子物理与原子核物理”、山西师范大学重点学科子项目“粒子物理与原子核物理”建设基金的资助,在此一并表示真诚的感谢!

由于本人水平所限,书中存在的不足之处在所难免,恳请大家批评指正。

李俊生

于山西师范大学

2016年9月

目 录

绪论	1
参考文献	4
第一章 中高能重离子碰撞的基本概念	6
1.1 重离子碰撞能区	6
1.2 核物质相图	7
1.3 运动学几何图像	7
1.4 核-核碰撞的时空图像	9
1.5 有效能量	10
1.6 中高能重离子核反应方式	11
1.7 中高能重离子核反应主要观测量	11
1.7.1 多重数	11
1.7.2 发射角	12
1.7.3 方位角	12
1.7.4 纵动量、横动量和横质量	12
1.7.5 快度	12
1.7.6 赝快度	13
1.8 理论模型概述	14
参考文献	14
第二章 中高能重离子加速器	16
2.1 引言	16
2.2 BNL-AGS 和 RHIC	17
2.3 CERN-SPS 和 LHC	19
2.4 兰州重离子加速器研究装置 HIRFL 及先进强流重离子装置 HIAF	20
2.5 法国国家大型重离子加速器实验室(GANIL)	23
2.6 德国重离子研究中心(GSI)	24

2.7	美国密歇安州立大学国家超导回旋加速器实验室(MSU-NSCL)	25
2.8	日本理化学研究所(RIKEN)	26
2.9	日本放射线医学综合研究所重离子医用加速器 NIRS-HIMAC	27
	参考文献	28
第三章	固体核径迹探测器	29
3.1	引言	29
3.2	原子核乳胶	29
3.2.1	原子核乳胶简介	29
3.2.2	原子核乳胶径迹形成原理	31
3.2.3	电离损失理论	33
3.2.4	原子核乳胶的特性	35
3.2.5	原子核乳胶的应用	36
3.2.6	中高能重离子诱发乳胶核反应末态粒子的鉴别	41
3.2.7	中高能重离子诱发乳胶核反应事例及末态粒子分类	43
3.3	CR-39	46
3.3.1	CR-39 简介	46
3.3.2	CR-39 探测器的径迹形成原理	48
3.3.3	CR-39 探测器中带电粒子的鉴别	55
3.3.4	CR-39 固体径迹探测器的应用	59
	参考文献	60
第四章	中高能重离子在核乳胶中的电磁离解	66
4.1	引言	66
4.2	电磁离解理论	67
4.2.1	Weizsäcker 和 Williams 电磁离解模型	67
4.2.2	Bertulani 和 Baur 电磁离解模型	68
4.2.3	^{16}O 光核作用截面	69
4.2.4	电磁作用截面	69
4.3	电磁离解作用事例的选取	70
4.4	实验结果	70
4.4.1	电荷分布	70
4.4.2	电磁离解衰变模式	72

4.4.3	核作用平均自由程 λ_{NUC} 和电磁离解平均自由程 λ_{ED}	75
4.4.4	核作用截面 σ_{NUC} 和电磁离解作用截面 σ_{ED}	77
4.4.5	弹核碎片多重数分布	80
4.5	结论	81
	参考文献	82
第五章	中高能重离子诱发乳胶核反应中的弹核碎裂	86
5.1	引言	86
5.2	中高能重离子诱发乳胶核反应整体特征	87
5.3	中高能重离子诱发乳胶核反应弹核碎片多重数分布	98
5.4	弹核质子碎片的发射	107
5.5	弹核 α 碎片发射	114
5.5.1	α 弹核碎片的分产生截面	114
5.5.2	弹核 α 碎片多重数分布	115
5.5.3	弹核 α 碎片的双温度发射	120
	参考文献	124
第六章	中高能重离子诱发乳胶核反应慢粒子产生	129
6.1	引言	129
6.2	慢粒子多重数分布与关联	129
6.2.1	多重数分布	129
6.2.2	靶核碎片的关联	133
6.2.3	靶碎片和弹核碎片的关联	136
6.2.4	靶核碎片的前后关联	140
6.3	靶核碎片多重数涨落	155
6.3.1	分析方法	156
6.3.2	实验结果	162
	参考文献	171
第七章	利用 CR-39 进行中高能重离子碎裂的研究	176
7.1	引言	176
7.2	实验设计	178
7.2.1	束流照射	178
7.2.2	蚀刻处理	179
7.2.3	径迹扫描	179

7.3 径迹重建	182
7.3.1 标准点选取	182
7.3.2 最小二乘法	183
7.3.3 径迹重建	188
7.3.4 径迹匹配	189
7.4 中高能重离子碰撞的电荷变化截面	191
7.4.1 电荷变化总截面	192
7.4.2 电荷变化分截面	195
7.5 中高能重离子碰撞碎片发射角及横动量	199
7.5.1 碰撞碎片发射角	199
7.5.2 横动量分布	203
参考文献	206

绪 论

目前,核物理界对重离子碰撞的研究主要集中在两个区域,一个是从强子物质到夸克-胶子等离子体(QGP)的相变区,另一个是液-汽相变区^[1]。

20世纪物理学的巨大成就是标准模型的建立,然而这个模型的基础即组成物质的基本成分夸克却是禁闭的。根据量子色动力学(QCD)预言,在很高的能量密度下,物质可能经过相转变变为一种全新的状态,即夸克-胶子等离子体(QGP)。相对论性重离子碰撞作为一种唯一人为可控制的产生 QGP 的实验环境,引起了广泛的关注。人们希望通过相对论性重离子碰撞的研究,得到有关 QGP 的信号,进一步检验现有理论——标准模型的正确性。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。

按照相变理论的预言,天体中存在的极高密度的中子星或者宇宙大爆炸初期的高温状态都可能是 QGP 状态,可惜它们在时空上距离我们太遥远了,无法进行仔细地研究。因此,人们希望寻找在实验室中形成 QGP 状态的现实可能性。

自 20 世纪 80 年代,美国 BNL 的 AGS 和西欧核子研究中心 CERN 的 SPS 两台相对论重离子加速器建成出束以来,在实验方面取得了很大的成就。在 AGS 能区已分别加速出 14.6 A GeV ^{16}O 、 ^{28}Si 和 11.6 A GeV ^{197}Au 束流;在 SPS 能区也分别加速出 60、200 A GeV ^{16}O , 200 A GeV ^{32}S , 158 A GeV ^{208}Pb 束流。大批的实验合作组利用各种探测器和靶核在两个加速器上进行了大量的研究工作,取得了许多有趣的结果。可惜的是,由于 QGP 相只可能在碰撞后极短的时间内存在,其后许多复杂的相互作用使原来的信号被模糊、减弱,甚至扭曲,其他作用造成的假象又会导致错误的判断。因此,没有一种理论预言的信号能够作为是否有 QGP 相在 高能重离子碰撞中存在的确定判据。为此美国于 2000 年建成了能量更高的相对论性重离子对撞机 RHIC,实现了 100 A GeV $^{197}\text{Au}+100\text{ A GeV }^{197}\text{Au}$ 对撞;欧洲核子中心也在 SPS 的基础上建造了能量更高的重离子对撞机——大型强子对撞机(LHC),可以实现碰撞能量达 1 150 TeV 的 Pb+Pb 碰撞。2012 年 7 月 4 日,欧洲核子中心宣布:大型强子对撞机上发现了一个新粒子,它很可能是

Higgs 粒子。它的产生和衰变特征与标准模型中的 Higgs 玻色子一致。

通过对高能重离子诱发乳胶核反应的研究,可以进一步认识高能核-核作用的多粒子产生机制,得到核子集体作用的信息,了解有关高激发、高压缩核物质的动力学性质,寻找由强子物质向夸克物质过度的相变信号^[2]。

在中高能重离子碰撞时会产生多个具有中等质量($z \geq 3$)的碎片,这种反应机制称为原子核多重碎裂。近年来,关于原子核多重碎裂的研究已成为中高能重离子碰撞的重要研究课题,因为高激发核物质的衰变不仅可以提供有关核物质状态方程的信息,而且携带有关低密核物质液-汽相变信号,是研究核物质状态方程和核-核碰撞机制及银河宇宙线粒子的起源、传播及演化的重要工具^[3],同时,为宇航员在空间舱内外所接受的剂量评估、空间舱及宇航服的辐射屏蔽设计和重离子辐射肿瘤治疗提供科学依据。

空间中的高能带电粒子主要有来自银河系的银河宇宙线、来自太阳爆发的太阳宇宙线、被地磁场捕获的带电粒子。高能宇宙线粒子大部分是质子(约占 87%),其次是氦(约占 12%),重离子约占 1%。宇宙线的起源和传播是高能天体物理学中一个重要的问题。宇宙线是各种天体演化过程的产物,特别是各种高能天体物理过程的产物,携带着这些过程的丰富信息。目前人们普遍认为大多数宇宙线粒子起源于银河系内。关于宇宙射线的起源与传播机制,虽已进行了很多研究,但仍没有定论^[4,5]。银河宇宙线里面 H、He,以及其他含量比较多的更重的元素,如 C、O、Ne、Mg、Si、Fe 等,它们的相对丰度与太阳系的情况一致,而 Li、Be、B、Sc、Ti、V 等的相对丰度在银河宇宙线中的值远大于在太阳宇宙线中的值。这种丰度的差异是宇宙线中重的原子核成分,即 C、N、O、Fe、Ni 等原子核,与星际物质碰撞时,它们分裂成较轻的原子核造成的^[6]。另外,虽然重离子的比例很小,却有很强的相对生物效应^[7,8]。这些带电粒子对航天器的材料、电子器件、太阳能电池、宇航员会造成辐射损伤效应,也会对大规模集成电路的微电子器件产生单粒子事件效应,从而影响航天器的正常运行,对宇航员的生命安全造成威胁。

重离子辐射肿瘤治疗是利用重离子在介质中接近停止时的巨大能量损失——Bragg 效应。研究发现,¹²C 对肿瘤的治疗效果最佳、副作用最小。所以,目前大部分肿瘤患者的治疗是利用¹²C 离子束来进行的。但重离子在接近 Bragg 峰以前将与人体组织发生核作用而碎裂,碎裂产生能量接近束流离子能量的次级离子的射程大于初级束流离子的射程,这些次级离子的 Bragg 峰位大于初级束流的 Bragg 峰位,将损伤人体的正常组织而产生副作用。研究发现,200 MeV/n ¹²C 在水中的 Bragg 峰位在射程约为 8.5 cm 处,在此之前约有 30%的¹²C 发生作用;同

样 400 MeV/n ^{12}C 在水中的 Bragg 峰位在射程约为 27.5 cm 处,在此之前约有 70% 的 ^{12}C 发生作用^[9]。另外重离子碎裂产生的碎片以一定的发射角发射,并且平均发射角随弹核碎片电荷数的减小而增加^[10],这将扩展束流的分布,也为重离子辐射肿瘤治疗产生副作用。因而,弹核碎片发射角分布的准确信息对重离子辐射肿瘤治疗是非常重要的。对于低于 500 MeV/n 的弹核碎片角分布的研究却较少^[10-14],从这些实验结果,也发展了半经验模型^[13]。但是,模型的合理性目前还没有充足的实验数据支持。

实验上首次是在高能重离子诱发乳胶核反应中观察到重离子的多重碎裂现象^[15,16],随后人们利用原子核乳胶^[17-20]、CR-39 塑料径迹探测器^[21-23]以及电子学探测器^[24-26]对中高能及高能重离子诱发核反应的多重碎裂现象进行了大量的研究。对于多重碎裂的产生机制,理论上进行了多方面的讨论,包括核统计模型^[27,28]、复合核的连续衰变模型^[29]和渗透模型^[30]等,但是到目前为止无法确定到底是哪一种过程在起作用。为了进一步认识重离子诱发核反应多重碎裂的本质,必须对重离子诱发核反应产生的多重碎片进行系统的实验分析和理论研究。

国内进行中高能重离子碎裂实验研究的基地是兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL CSR)。加速器已先后加速出 1 GeV/n ^{12}C 、1 GeV/n ^{36}Ar 、500 MeV/n ^{131}Xe 、480 MeV/n ^{58}Ni 、800 MeV/n ^{84}Kr 、170 MeV/n ^{209}Bi 等最高能量的束流离子,为我国的中高能核物理实验研究、核天体物理实验研究及重离子辐射医学应用跨入世界先进行列奠定了基础。

目前国际上关于中高能重离子碎裂实验研究所用的探测器主要为 CR-39 蚀刻径迹探测器和电子学探测器,电子学探测器的空间接受性受到探测器自身的限制,无法记录反应产生的全部粒子;CR-39 蚀刻径迹探测器体积小,对环境要求不高,可以长期保存,具有较大的能量范围和很宽的电荷分辨率,且其自动化扫描设备及分析软件较成熟,比较适合开展中高能重离子碎裂的实验研究。但是,CR-39 蚀刻径迹探测器对高能弹核碎片的电荷分辨有一定限制,它只能记录电荷数 $Z \geq 4$ 的核碎片,所以它们无法给出核反应的全部信息。

原子核乳胶作为一种空间分辨率最高的固体径迹探测器,可以在 4π 立体角范围记录反应产生的全部带电粒子,曾被广泛应用于核物理与高能实验物理研究中。目前原子核乳胶仍然大规模地利用到超核(JPARC-E07 实验)、中微子(OPERA 实验)实验研究中。对于中高能重离子束流平行于乳胶平面照射乳胶诱发核反应,末态粒子较少,各种粒子可以被清楚地进行分辨,且粒子径迹图像清晰,不需要进行径迹重建,这是原子核乳胶探测器与其他探测器相比具有的最大优

势。利用原子核乳胶进行中高能核反应研究的最大缺点是核径迹扫描工作量大, 所以它被电子学探测器所代替。原子核乳胶和 CR-39 相结合, 可以弥补 CR-39 无法记录电荷数 $Z < 4$ 的核碎片的缺陷。

参考文献

- [1] 张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] Lee T D. RHIC and QCD: an overview. Nucl. Phys. A, 1995, 590:11.
- [3] Bauer W. Fragmentation and the Nuclear Equation of State. Nucl. Phys. A, 2007, 787:595c.
- [4] Gaisser T K, Stanev T. High-energy cosmic rays. Nucl. Phys. A, 2006, 777:98.
- [5] Strong A W, Moskalenko I V, Ptuskin V. S. Cosmic-ray propagation and interactions in the Galaxy. Ann. Rev. Nucl. Sci., 2007, 57:285.
- [6] Yanasak N E, Wiedenbeek M E, Mewaldt R A, et al. Measurement of the secondary radionuclides ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{54}Mn , and ^{14}C and implications for the galactic cosmic-ray age. Ap. J., 2001, 563: 768-792.
- [7] Gupta R, Kumar A. Fragmentation cross-section of 600 A MeV Si^{14+} ions in thick polyethylene target. Eur. Phys. J. A, 2013, 49: 98.
- [8] O' Neill P M. Badhwar-O' Neill 2010 galactic cosmic ray flux model-revised. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2010, 57: 3148.
- [9] Sihver L. Benchmarking of the particle and heavy ion transport codes. NUFRA 2007, Kemer(Antalya), Turkey, 2007.
- [10] Li Yan-jing, Zhang Dong-hai, Yan Shi-wei, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of ^{56}Fe on C, Al and CH_2 targets at 471 A MeV. Chin. Phys. C, 2014, 37: 014001.
- [11] Giacomelli M, Skvarč J, Ilić R, et al. The measurement of the fragment emission angles in the reactions of < 135 MeV/u ^{12}C and ^{16}O in tissue equivalent targets. Rad. Meas., 2003, 36:329.
- [12] Momota S, Notani M, Ito S, et al. Production of projectile-like fragments at intermediate energies. Nucl. Phys. A, 2002, 701:150.
- [13] Giacomelli M, Sihver L, Skvarč J, et al. Projectile like fragment emission angles in fragmentation reactions of light heavy ions in the energy region < 200 MeV/nucleon: Modeling and simulations. Phys. Rev. C, 2004, 69: 064601.
- [14] Sihver L, Giacomelli M, Ota S, et al. Projectile fragment emission angles in fragmentation reactions of light heavy ions in the energy region < 200 MeV/nucleon: Experimental

study. *Rad. Meas.*, 2013, 48:73.

[15] Jakobsson B, Jönsson G, Lindkvist B, et al. The disintegration of nuclei in violent heavy ion interactions at 55 A MeV~110 A MeV. *Z. Phys. A*, 1982, 307: 293.

[16] Friedlander E M, Heckman H H, Karant Y J. Nuclear collisions of uranium nuclei up to 1 GeV/nucleon. *Phys. Rev. C*, 1983, 27: 2436.

[17] Cherry M L, Dabrowska A, Deines—Jones P, et al. Fragmentation and multifragmentation of 10.6 A GeV gold nuclei. *Phys. Rev. C*, 1995, 52: 2652.

[18] Adamovich M I, Agarwall M M, Alexandrov Y A, et al. (EMU—01 Collaboration). Angular distributions of light projectile fragments in deep inelastic Pb+Em interactions at 160 A GeV. *Eur. Phys. J. A*, 1999, 6: 421.

[19] Singh V, Tuli S K, Bhattacharjee B, et al. Multifragmentation Studies in ⁸⁴Kr Interactions with Nuclear Emulsion at around 1 A GeV. arXiv: Nucl—ex/0412049.

[20] Jilany M A. Nuclear fragmentation in interactions of 3.7 A GeV ²⁴Mg projectiles with emulsion targets. *Phys. Rev. C*, 2004, 70: 014901.

[21] Rusch G, Heinrich W, Wiegel B, et al. Charge correlations and transverse momenta observed in multifragmentation of 1 GeV/nucleon Au projectiles. *Phys. Rev. C*, 1994, 49: 901.

[22] Dekhissi H, Giacomelli G, Giorgini M, et al. Fragmentation studies of 158 A GeV Pb ions using CR-39 nuclear track detectors. *Nucl. Phys. A*, 2000, 662: 207.

[23] Qureshi I E, Ikram Shahzad M, Javed M T, et al. Study of projectile fragmentation in the reaction (158 A GeV) Pb+Pb using CR-39. *Rad. Meas.*, 2005, 40: 437.

[24] Schüttauf A, Kunze W D, Woerner A, et al. Universality of spectator fragmentation at relativistic bombarding energies. *Nucl. Phys. A*, 1996, 607: 457.

[25] Ogilvie C A, Adloff J C, Begemann-Blaich M, et al. Rise and fall of multifragment emission. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67: 1214.

[26] Stivatava B K, Scharenberg R P, Albergo S, et al. (EOS Collaboration). Multifragmentation and the phase transition: A systematic study of the multifragmentation of 1 A GeV Au, La, and Kr. *Phys. Rev. C*, 2002, 65: 054617.

[27] Gross D H E. Statistical decay of very hot nuclei—the production of large clusters, *Rep. Prog. Phys.*, 1990, 53: 605.

[28] Jaqaman H R, Gross D H E. Signals of the liquid—gas phase transition in the fragmentation of hot nuclei: Finite-size scaling, *Nucl. Phys. A*, 1991, 524: 321.

[29] Friedman W A. Rapid massive cluster formation. *Phys. Rev. C*, 1990, 42: 667.

[30] Bauer W. Extraction of signals of a phase transition from nuclear multifragmentation. *Phys. Rev. C*, 1988, 38: 1297.

第一章 中高能重离子碰撞的基本概念

1.1 重离子碰撞能区

比 α 粒子更重的离子叫做重离子。随着科技的发展,重离子碰撞的能量也在不断提高,目前已可把周期表中几乎所有的核素加速成“炮弹”来轰击靶核,根据碰撞的能量又可将重离子碰撞分为以下几个不同的能区^[1,2]。

(1) 低能重离子碰撞

能量范围为库仑势垒 ~ 10 MeV/n,库仑势垒是带正电荷的弹核与带正电荷的靶核之间静电斥力的表现。重离子与靶核之间的库仑势垒高度与重离子和靶核的电荷数和质量有关。一般当每核子具有几个 MeV 的能量时,弹核的能量即接近库仑势垒高度,接近库仑势垒的重离子碰撞由于能量很低,所以不会发生核子与核子的碰撞。

(2) 中能重离子碰撞

能量范围为 $10\sim 100$ MeV/n,此时弹核与靶核的相对速度可与核子在核内运动的费米速度(约每核子 40 MeV)相比拟,故将这一能区的重离子碰撞称为接近费米速度的重离子碰撞,其特点是核子之间的两体碰撞增强,而核子与其他核子平均场之间的作用逐渐减弱。这个能区是平均场、两体碰撞和泡利阻塞效应竞相起作用的区域。

(3) 相对论重离子碰撞

能量范围为 100 MeV/n ~ 10 GeV/n,此时弹核与靶核的相对速度达到 $0.5c\sim 0.95c$ (c 为光速)。弹核的每核子能量大于 1 GeV 时,弹核与靶核的碰撞将以核子与核子的碰撞为主。

(4) 超相对论重离子碰撞

把射弹核的能量提高到每核子 10 GeV 以上,称为超相对论重离子碰撞,理论预言,在此能区可能形成新的物质形态——夸克-胶子等离子体(QGP)。

对于相对论能区和超相对论能区的重离子碰撞,有时也统称为高能重离子碰撞。对于重离子碰撞能区的划分,有时并不明确。有人把 100 MeV/n \sim 几个 GeV/n 的范围称为中能区,而把 $10\sim 100$ MeV/n 能区范围称为中低能过渡区^[2]。

1.2 核物质相图

图 1-1 为核物质相图^[3],其中横坐标为重子数密度,纵坐标为温度。一般强子物质的温度约为 0 MeV,重子数密度 ρ_0 约为 $0.15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 。在 T 约为 10 MeV, ρ 接近 ρ_0 时,有可能存在液-汽相变;在 $\rho \sim (3 \sim 5)\rho_0$, $T \geq 50 \text{ MeV}$ 时,可能存在反常物质(如共振态物质、密度同质异能态物质);形成 QGP 有两种途径:一种是将强子物质不断压缩,使其密度不断增大,有一定大小的强子最终将互相重叠渗透,当核内核子之间的距离达到核子半径时,这时将夸克和胶子禁闭在每个强子中的“口袋”将不复存在,它们便可能在强子存在的空间内自由运动,形成新的物质形态——QGP,这时相应的密度约为 $\rho \sim (5 \sim 10)\rho_0$;第二种途径是将强子物质加热,在真空中激发产生大量的夸克对和胶子,它们在一定的空间内自由运动,也可能形成 QGP,理论计算表明产生 QGP 相变的温度大概在 150 MeV 附近。

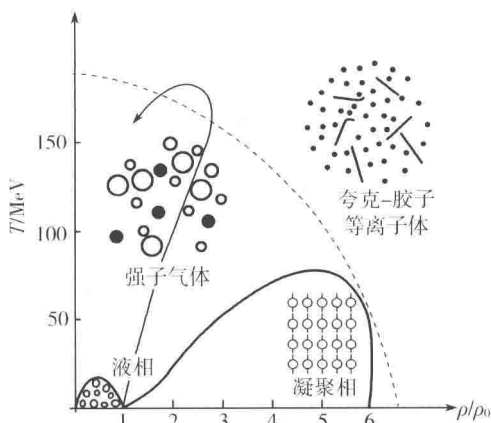


图 1-1 核物质相图

1.3 运动学几何图像

高能重离子碰撞的几何图像可以用反应体-旁观体模型来简单描述,通常选择入射核与靶核相向运动而总动量为零的参考系,即动量中心系,简称动心系。由于相对论动量 p 并不正比于速度 v ,动心系不是质心系。只是在牛顿近似下,动心系才近似成为质心系。通常在不会引起误解时,也把动心系称为质心系^[4]。

由于相对论效应,核在运动方向上有显著的洛伦兹收缩,如图 1-2 所示^[5],能量越高,收缩越大。另一方面,由于能量高,可忽略把核子束缚在核内的结合能,而把入射核与靶核看成两团自由核子体系。同时,由于能量高,核子运动的德布

罗意波长为核子半径的量级,甚至更短,经典轨道的图像和概念适用。于是,直接参与碰撞的,只是两核沿入射方向直线运动能够发生重叠的部分,称为反应体部分,重叠区域之外的部分不直接参与碰撞,称为旁观体部分。

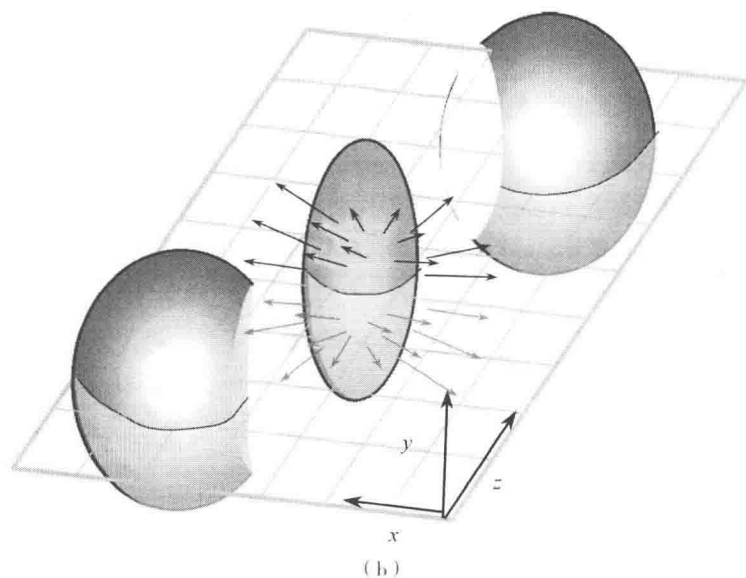
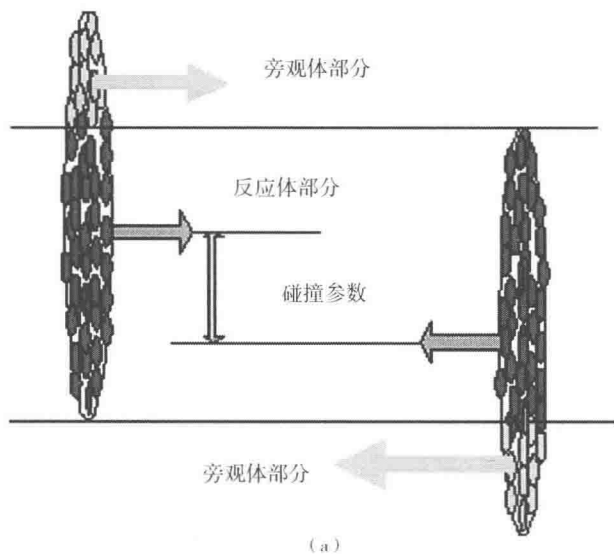


图 1-2 高能重离子碰撞的几何描述
(a)碰撞前;(b)碰撞后