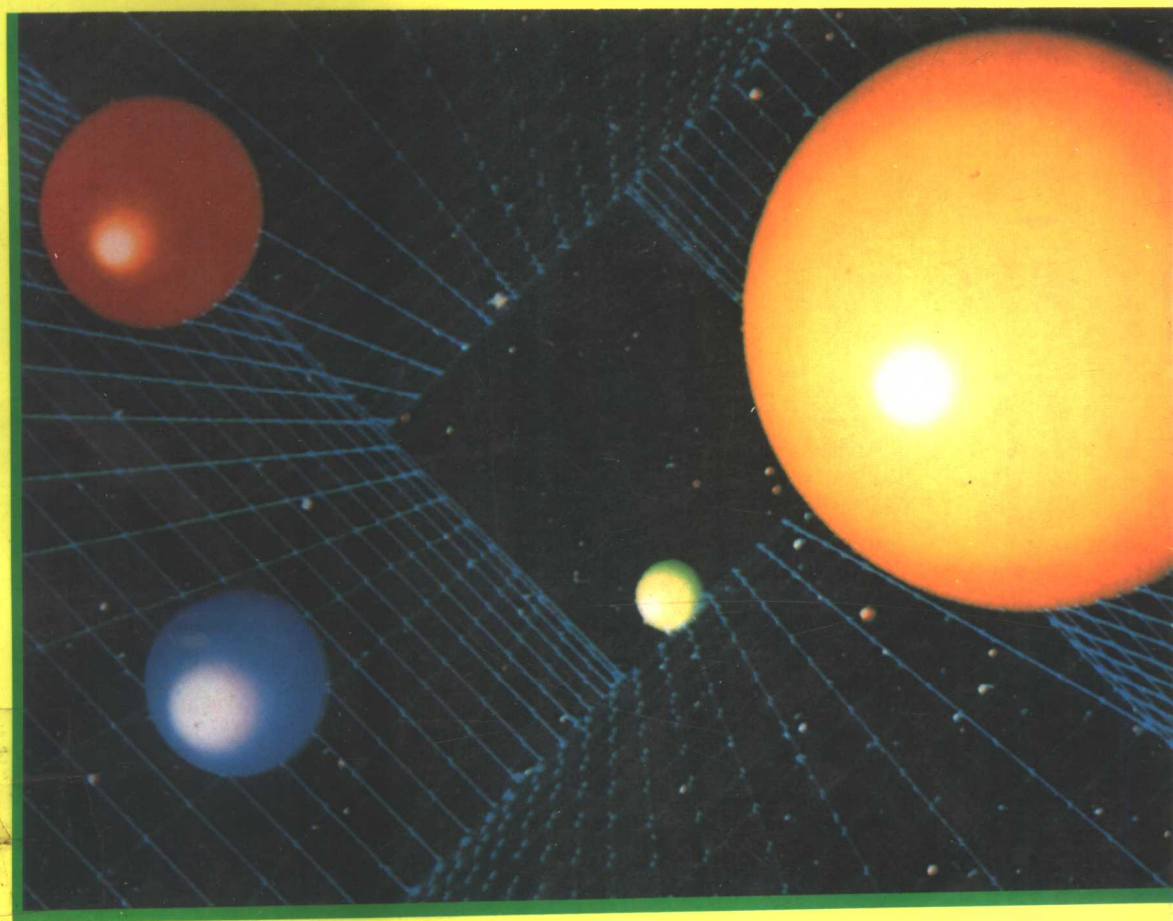


亚原子物理学手册

戴能雄 李际周 高良俊 编著



科学出版社

亚原子物理学手册

戴能雄 李际周 高良俊 编著

孙汉城 审

科学出版社

1995

内 容 简 介

本手册汇集了亚原子物理学(核物理学与粒子物理学)绝大部分常用数据和图表,全书共分四章:第一章全面介绍亚原子物理学的度规;第二章扼要介绍亚原子物理学的理论背景知识;第三章是本手册的核心内容——核素表和粒子表,其数据资料新而且全面;第四章较为详细地讨论了核反应运动学(两体及多体问题)和粒子物理的相对论运动学。本手册是大学核物理和粒子物理专业的师生、从事核物理和粒子物理研究的科研人员以及一般核技术应用人员的一本很好的参考书和工具书。

亚原子物理学手册

戴能雄 李际周 高良俊 编著

孙汉城 审

责任编辑 鄢德平

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1995 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1995 年 8 月第一次印刷 印张:63 3/4

印数:1—400 字数:1 495 000

ISBN 7-03-003843-6/O·676

定价 116.00 元

前 言

1896年放射性的发现和1897年电子的发现揭开了20世纪物理学最前沿的领域——核物理和粒子物理(统称为亚原子物理)的序幕,从此人类对微观世界的认识深入到比原子更深的层次,取得了辉煌的成就。近100年来,浩瀚的文献海洋常常使初学者望而却步,甚至使专家、学者也感到跟不上形势的发展。广大核物理和粒子物理研究领域的科研人员以及大学核物理和粒子物理专业的师生都非常渴望有一本内容广泛、数据新颖的亚原子物理学手册,本书作者以此为动力,不避艰辛,历时八载,终成此册。

8年来,本书作者在科学实践中收集了大量的亚原子物理领域中最实用的规律、公式、图表和数据,其中有些内容来自国内外已经发表的资料,但大部分则是从众多资料中编评优选出来的结果,还有一些则是本书作者根据多年科研实践中积累的知识和经验编写而成,另外一些数据则是由系统学计算而得。由于数据、资料的不断更新,8年来好多内容曾数易其稿,以便力求保持该手册具新颖性、广泛性和实用性。

本手册的编写分工如下:

第一章 李际周 戴能雄

第二章 戴能雄,高良俊

第三章 戴能雄,李际周

第四章 戴能雄,李际周,高良俊

初稿写成后,第一章和第三章由李际周定稿,第二章由高良俊定稿,而第四章特请中国原子能科学研究院孙汉城教授定稿。

本手册汇集了亚原子物理学绝大部分的常用数据和图表,其特点在于:(1)所收集的数据资料较新,其中篇幅最大的“核素表”不仅内容丰富(甚至包括核内电荷半径和核矩这些不易得到的数据),而且编排新颖便于查找,而“粒子表”和“夸克模型”内容也很丰富。(2)对核反应运动学(两体及多体)和轻子物理的相对论运动学作了详细讨论。(3)对亚原子物理学各种符号与单位作了系统的统一约定。(4)对学习亚原子物理学需要具备的“四大力学”、统计物理以及相对论等基础学科作了精练而简明扼要的描述。(5)从实用性出发,本手册还摘录了常用 γ 源和活化分析常用核素的衰变纲图以及中子活化常数,以便从事放射性和中子活化工作的技术人员查找。本手册兼有工具性和知识性,是大学核物理和粒子物理专业的师生、从事核物理和粒子物理研究的科研人员以及一般核技术应用人员一本有用的参考书和工具书。

最后作者感谢中国科学院院士,高能物理所唐孝威教授对本书的推荐和支持,感谢中国原子能科学研究院孙汉城教授对本书的审阅。感谢深圳大学王豫生教授对本书的关心和支持。本手册在编写“核素表”中“生成方式”一栏时得到了赵葵先生的帮助,在编写“夸克模型和粒子的夸克表示”一节时得到了李祝霞先生的帮助,本书在整个编写过程中得到了深圳大学和中国原子能科学研究院各级领导和同事们、朋友们的大力支持和帮助,为此本书作者借此机会,向大家表示衷心的感谢。

本书难免挂一漏万,如有错误和不当之处,欢迎读者指正。

作者

1994.2.28

目 录

第一章 亚原子物理学度规	1
一、物理量度量的初级标准	1
二、物理学常用的单位制	2
(一)国际单位制 (SI)	2
(二) 中华人民共和国法定计量单位	6
(三) 厘米·克·秒制 (CGS 制)	6
(四) 自然单位	6
(五) 原子单位	9
(六) “实验”单位	10
(七) 物理量 SI 单位制表示	11
(八) SI 制与制外单位换算法	16
三、物理学基本常数	24
四、量纲理论	31
五、两种通用度规及其习惯	31
(一) 比约肯·德雷尔度规和 γ 矩阵习惯	31
(二) 同位旋和 SU_c 矩阵	33
(三) 求和习惯	34
(四) 泡利度规和对照表	34
参考文献	36
第二章 亚原子物理学背景理论	37
一、理论力学	37
(一) 质点力学	37
(二) 质点组力学	42
(三) 刚体力学	44
(四) 动坐标系	48
(五) 分析力学	49
二、电动力学	53
(一) 矢量分析	53
(二) 电磁现象的普遍规律	55
(三) 静电场和稳恒电流磁场	56
(四) 电磁波的传播	57
(五) 电磁波的辐射	61
(六) 带电粒子和电磁场相互作用	65
(七) 辐射场的量子理论	67
三、热力学	74
(一) 温度、物态方程	74

(二) 热力学第一定律	75
(三) 热力学第二定律	78
(四) 均匀物质的热力学函数	79
(五) 相平衡与化学平衡	84
(六) 热力学第三定律	89
(七) 不可逆过程热力学	91
四、统计物理学	94
(一) 气体分子运动论	94
(二) 玻耳兹曼统计理论	95
(三) 系综理论	98
(四) 量子统计理论	102
(五) 涨落理论	105
(六) 非平衡态的统计理论	107
(七) 有关的数学问题	110
五、量子力学	115
(一) 量子力学的形成	115
(二) 量子力学的数学形式	117
(三) 简单量子体系	120
(四) 平均值和不确定关系	122
(五) 半经典近似	124
(六) 绘景和表象	126
(七) 轨道角动量与自旋	128
(八) 全同粒子系·二次量子化	131
(九) 微扰理论·变分法	133
(十) 与时间有关的微扰理论·辐射理论	134
(十一) 碰撞理论	137
(十二) 相对论量子力学	142
(十三) 量子力学中用到的一些函数	150
六、相对论	156
(一) 狭义相对论	156
(二) 广义相对论	174
参考文献	179
第三章 亚原子——核和粒子表	181
一、亚原子分类	181
(一) 亚原子层次与数量	181
(二) 亚原子按相互作用分类	181
(三) 粒子数量分布	182
(四) 亚原子尺度量级	182
(五) 亚原子结合能和静能举例	183
(六) 亚原子层次的认识图	184
(七) 粒子和真空的关系	184
二、亚原子量子数	184

三、核素表.....	185
(一) 元素周期表	185
(二) 核素表使用说明	187
(三) 核素表	192
四、粒子性质表.....	797
(一) 稳定粒子表	797
(二) 介子表	821
(三) 重子表	839
五、夸克模型和粒子的夸克表示.....	847
(一) 夸克模型	847
(二) 强子的 $SU(6)$ 模型波函数.....	853
(三) 截面和相关量的图表	855
六、核衰变.....	868
(一) 放射性	868
(二) 衰变纲图与活化常数	874
参考文献.....	942
第四章 亚原子运动学	944
一、核反应运动学.....	944
(一) 核反应运动学基础	944
(二) 二体反应运动学	946
(三) 三体反应运动学	951
(四) 四体反应运动学	970
二、粒子运动学——相对论运动学.....	975
(一) 相对论运动学基础	975
(二) 相对论运动学基本公式	980
(三) 微分截面的变换; 雅可比行列式	984
(四) 相空间	987
(五) 衰变	991
(六) 弹性散射	994
(七) 反应	999
(八) 其他变量	1004
(九) 单举反应	1007
参考文献.....	1009

第一章 亚原子物理学度规

一、物理量度量的初级标准

表 1.1 初级计量单位

量名	单位名	中文符号	单位符号	单位的定义
长度	米	米	m	1m = 1650763.73λ λ 是 ⁸⁶ Kr 原子在 2P _{1/2} 和 5d ₅ 能级间跃迁的辐射在真空中的波长 SI 制把光在真空中 1/299 792 458 秒所经过的行程定义为 1 米
质量	千克 (公斤)	千克	kg	1kg ≡ 国际千克原器的质量
时间	秒	秒	s	1 秒是 ¹³³ Cs 原子的基态两个超精细结构能级间共振频率跃迁 9 192 631 770 次所需的时间
电流	安培	安	A	恒定电流流过真空中相距 1 米的两根无限长而截面极小的直导线时, 使导线每米长度上产生的力为 2×10 ⁻⁷ 牛顿, 这个电流强度就定义为 1 安培 SI 制定义真空导磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$; 还定义真空电容率 $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2 \text{ F/m}$, 式中 $c = 299792458 \text{ m/s}$ 为真空中的光速
电压	伏特	伏	V	一导线上两点之间通过 1 安培电流时, 如果所消耗的功率为 1 瓦, 则定义这两点间的电压为 1 伏特
热力学温度	开尔文	开	K	1 开尔文等于水的三相点热力学温度的 1/273.16
摄氏温度	摄氏温度	摄氏度	°C	零摄氏度(0°C)是纯水在 1 个标准大气压下的结冰温度, 100°C 则是纯水在 1 个标准大气压下的沸腾温度
原子量	统一原子质量单位	碳 12 单位	u	规定碳 12 原子量的 12 分之 1 为 1 个碳 12 原子质量单位, 即 $u = ^{12}\text{C}$ 原子量/12, 这样 ^{12}C 原子量等于 12.000...u
物质的量	摩尔	摩	mol	1 摩尔是指一系统所含的元结构粒子(如原子、分子、离子等)的数目等于 12×10 ⁻³ 千克 ^{12}C 所含的 ^{12}C 原子数目的物质的量, 它是物质数量的单位
大气压	标准大气压	标准大气压	atm	1 标准大气压 = 760 毫米汞柱 (mmHg) 的气压
热功当量	卡 热力学卡 国际卡	卡 热力学卡 国际卡	cal cal _{th} cal _{IT}	1cal = 4.18605J 1cal _{th} = 4.1840J 1cal _{IT} = 4.1868J
重力加速度	标准重力加速度	标准重力加速度	g _n	1g _n = 9.80665m/s ²
发光强度	坎德拉 (烛光)	坎	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为 540×10 ¹² Hz 的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为 (1/683)W/sr
平面角	弧度	弧度	rad	当圆周上某段圆弧的弧长等于该圆的半径时, 称此圆弧所对的圆心角为 1 弧度
立体角	球面度	球面度	sr	1 球面度相当于顶点位于球心, 在球面上截取面积等于以球半径为边长的正方形面积的球面对球心所张的角

二、物理学常用的单位制

没有量值的量度,很难说是一门精确的科学,科学离不开测量和量度。欲进行有意义的量度,必须对每个物理量规定(定义)单位,用来度量长度、时间和质量等的标准长度、标准时间和标准质量等称为单位,不同方式的组合可以构成很多不同的单位制。

(一) 国际单位制 (SI)

1. SI 单位制

1960年第11届国际计量大会通过了使用国际单位制的决议,国际单位制的国际简称为 SI。国际单位制中规定了7个基本单位和2个辅助单位,其它均由这9个单位导出。

表 1.2 国际单位制的基本单位

量 名	单 位 名	中 文 符 号	单 位 符 号
长 度	米	米	m
质 量	千克(公斤)	千克(公斤)	kg
时 间	秒	秒	s
电 流	安培	安	A
热力学温度	开尔文(绝对温度)	开	K
物质的量	摩尔	摩	mol
发光强度	坎德拉	坎	cd

表 1.3 国际单位制的辅助单位

量 名	单 位 名	中 文 符 号	单 位 符 号
平面角	弧 度	弧 度	rad
立体角	球面度	球面度	sr

表 1.4 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量 名	单 位 名	中 文 符 号	单 位 符 号	SI 制基本单位量纲式	SI 制其它单位量纲式
频率	赫兹	赫	Hz	s^{-1}	
力, 重力	牛顿	牛	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	
压力(压强)、应力	帕斯卡	帕	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	N/m^2
能, 功, 热量	焦耳	焦	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	$N \cdot m$
功率、辐(射)通量	瓦特	瓦	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	J/s
电量、电荷	库仑	库	C	$s \cdot A$	
电势、电压、电动势	伏特	伏	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	W/A
电容	法拉	法	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	C/V
电阻	欧姆	欧	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	V/A
电导	西门子	西	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	A/V
磁通(量)	韦伯	韦	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	$V \cdot s$
磁感应(强度)	特斯拉	特	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	Wb/m^2
电感	亨利	亨	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	Wb/A
光通(量)	流明	流	lm	$cd \cdot sr$	
光照度	勒克斯	勒	lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$	lm/m^2
放射性活度	贝可勒尔	贝可	Bq	s^{-1}	
吸收剂量	戈瑞	戈	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$	J/kg
剂量当量	希沃特	希	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$	J/kg

表 1.5 SI 制外的并用单位

量 名	并用单 位 名	中文符号	单位符号	与 SI 制的换算关系式
时 间	分	分	min	$1\text{min} = 60\text{s}$
	小时	时	h	$1\text{h} = 60\text{min} = 3600\text{s}$
	日(天)	日	d	$1\text{d} = 24\text{h} = 86400\text{s}$
平面角	度	度	°	$1^\circ = (\pi/180)\text{rad}$
	分	分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800)\text{rad}$
	秒	秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000)\text{rad}$
体 积	升	升	L	$1\text{L} = 10^{-3}\text{m}^3$
质量、重量	吨	吨	t	$1\text{t} = 10^3\text{kg}$
能 量	电子伏	电子伏	eV	$1\text{eV} = 1.6021892(46) \times 10^{-19}\text{J}$
原子质量	统一原子 质量单位	统一原子质 量或碳单位	u	$1\text{u} = 1.6605655(86) \times 10^{-27}\text{kg}$
长 度	天文单位	天文单位	A	$1\text{A} = 1.49597870 \times 10^{11}\text{m}$
	秒差距	秒差距	pc	$1\text{pc} = 206256\text{A} = 3.0857 \times 10^{16}\text{m}$
(长度)	埃	埃	Å	$1\text{Å} = 10^{-8}\text{cm} = 10^{-10}\text{m}$
(长度)	海里	浬	n mile	$1\text{n mile} = 1852\text{m}$
速 度	节	节	kn	$1\text{kn} = (1852/3600)\text{m/s}$
流体压力	巴	巴	bar	$1\text{bar} = 0.1\text{MPa} = 10^5\text{Pa}$
面 积	公 亩	公 亩	a	$1\text{a} = 10^2\text{m}^2$
	公 顷	公 顷	ha	$1\text{ha} = 10^4\text{m}^2$
	靶 恩	靶(恩)	b	$1\text{b} = 10^{-28}\text{m}^2$
压 力	标准大气压	标准大气压	atm	$1\text{atm} = 1.01325 \times 10^5\text{Pa}$
加速度	加速度单位	伽	Gal	$1\text{Gal} = 10^{-2}\text{m/s}^2$
放射性活度	居 里	居 里	Ci	$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$
照射量	伦 琴	伦 琴	R	$1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$
吸收剂量	拉 德	拉 德	rad(rd)	$1\text{rad} = 10^{-2}\text{Gy}$

表 1.6 用于构成十进倍数和分数单位的词头

因 数	词 头 符 号		符 号
	英 文	中 文	
10^{24}	yotta	尧[它]	Y
10^{21}	zetta	泽它	Z
10^{18}	exa	艾[可萨]	E
10^{15}	peta	拍[它]	P
10^{12}	tera	太[拉]	T
10^9	giga	吉[咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{-24}	yocto	幺[科托]	y

注: []内的字,在不致混淆的情况下,可以省略。

2.SI 制使用规则

1) 符号形式 国际单位制的符号有两种形式,一是国际符号(如 m, cm, kg, s), 另一是中文符号(如安、焦、米、厘米、千克、秒),在科技书刊中使用的单位和词头, 大多采用国际符号,而在科普书刊中,一般可使用中文符号。无论采用哪种符号, 均应做到全书前后一致。

2) 复合单位

(1) 由两个或两个以上单位相乘所构成的组合单位,其符号间既可加中圆点,也可不加。例如,力矩单位“牛顿米”的符号可写成“N·m”或“Nm”,其顺序无原则规定,但要注意避免引起含义混淆,例如“Nm”不可写成“mN”,以免误解为“毫牛顿”。

(2) 由两个单位相除所构成的组合单位可用三种形式,例如“kg/m³”,“kg·m⁻³”或“kgm⁻³”,是否加中圆点要看能否引起混淆,如“m·s⁻¹”不可写成“ms⁻¹”,以免误解为“每毫秒”。

(3) 当分母中包含两个或两个以上符号时,整个分母加圆括号,斜线不得多于一条。例如,热导率单位“瓦特每米开尔文”应是“W/(m·K)”而不是“W/m/K”。

(4) 分子无量纲而分母有量纲时,一般不用分式而用负数幂形式。例如,波数用“m⁻¹”而不用“1/m”。

(5) 一个单位最多只允许使用一个词头,例如,“10⁻⁹m”可以写作“nm”(“纳米”),不能写作“m μ m”(“毫微米”)。十进词头搭配紧接符号,不加间隔,如用 μ m 而不用

μm . 质量单位 kg 前不能再加其他十进词头。除 kg 外, 十进词头一般不用于分母。

3) 单位读法

(1) 组合单位的名称应与其符号所表示的顺序一致。符号中的乘号没有对应的名称, 除号的对应名称为“每”字。书写单位名称时, 中间不加任何符号, 例如, 力矩单位的符号是“ $\text{N}\cdot\text{m}$ ”, 其名称是“牛顿米”, 而不是“牛顿·米”; 密度单位的符号是“ kg/m^3 ”, 其名称是“千克每立方米”, 而不是“千克/立方米”。

(2) 无论分母为几个单位, “每”字只许出现一次。例如, 热导率单位的符号是“ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ”, 其名称是“瓦特每米开尔文”, 而不是“瓦特每米每开尔文”。

(3) 乘方形式的单位名称, 其顺序是指数名称在前, 单位名称在后。例如, 体积单位“ dm^3 ”的名称是“立方分米”。

(4) 单位的名称或符号必须作为一个整体使用, 不得拆开。例如, “ 20°C ”应读成“20摄氏度”, 不得读成“摄氏 20 度”。

(二) 中华人民共和国法定计量单位

科学活动是世界范围的活动, 要求有统一的单位。现在各国都趋向于使用国际单位制 (SI)。我国已于 1984 年 2 月 27 日公布以国际单位制为基础的《中华人民共和国法定计量单位》。其内容包括:

1. 国际单位制的基本单位(见表 1.2);
2. 国际单位制的辅助单位(见表 1.3);
3. 国际单位制中具有专门名称的导出单位(见表 1.4);
4. 国家选定的非国际单位制单位(部分可见表 1.5);
5. 由以上单位构成的组合形式的单位;
6. 由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位(词头见表 1.6)。

(三) 厘米·克·秒制 (CGS 制) (见表 1.7 和 1.8)

表 1.7 CGS 制基本单位

单 位 名	中 文 符 号	单 位 符 号	CGS 制 量纲式	SI 制量纲式
长 度	厘米	cm	cm	10^{-2}m
质 量	克	g	g	10^{-3}kg
时 间	秒	s	s	s

(四) 自然单位 (NU—Natural Units)^[1,2]

自然单位是指当用它们来表示任何物理量时, 它们的数值是合理的, 其意义在于容易掌握这些数值的含义。这些数值的变化范围在 10^{-6} — 10^6 而不会出现 10^{-27} 之类的数。我们熟悉的米·千克·秒制特别适用于日常遇到的物理现象, 它们是以容易得到的宏观标准为基础的。我们看到它们是真正的“人类单位制”, 像米、千克、秒这些单位能正确地

表 1.8 CGS 制辅助单位

单 位 名	中文符号	单位符号	CGS 制量纲式	SI 制量纲式
热力学温度	开尔文	K	K	K
物质的量	摩尔	mol	mol	mol
发光强度(烛光)	坎德拉	cd	cd	cd
力	达因	dyn	$\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}$	10^{-5}N
能量	尔格	erg	$\text{cm}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}$	10^{-7}J
粘度(动力)	泊	P	$\text{cm}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	$10^{-1}\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
粘度(运动)	斯[托克斯]	St	$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$
自由落体加速度	伽	Gal	cm/s^2	$10^{-2}\text{m}/\text{s}^2$
亮度	熙提	Sb	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{cd}$	$10^4\text{cd}/\text{m}^2$
照度	辐透	Ph	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{cd} \cdot \text{Sr}$	10^4Lx
磁通密度	高斯	Gs, G	G	10^{-4}T
磁场强度	奥斯特	Oe		$(10^3/4\pi)\text{A}/\text{m}$
磁通量	麦克斯威	Mx	10^{-8}Wb	10^{-8}Wb

指出人类的特征。所谓“科学的”单位制，即厘米·克·秒制更适用于像硬壳虫之类的小动物。在亚原子物理领域中所讨论的不限于人类单位制或硬壳虫单位制所取的标准，而是采用自然单位制。

1. 自然单位

自然单位就是取 $\hbar = c = 1$ 的一种单位制。它相当于取 c 为速度的单位， $\hbar$ 为作用量的单位，第三个单位可任选，但它的量纲要独立于 c 和 $\hbar$ 的量纲。常选取能量单位为 GeV，在这个单位制里并不失去任何有关量纲的信息。在最后结果中只需把 $c, \hbar$ 的适当组合放进去，就可以回到常规单位制。同样在常规单位制中取 $c = \hbar = 1$ 就得到自然单位制。自然单位制的优点是方程表列简单，运算过程简单。

1) $c = 1$ c 是光速

速度有量纲 $\text{dim} c = [\text{L}][\text{T}]^{-1}$ ，这意味着长度和时间有等价量纲：

$$[\text{L}] = [\text{T}]$$

类似地，据狭义相对论的能量-动量关系

$$E^2 = P^2 c^2 + m^2 c^4$$

则表示能量、质量和动量都有等价量纲，事实上，通常动量采用“MeV/c”或“GeV/c”单位，而质量(不是经常的)用单位“MeV/c²”或“GeV/c²”。

2) $\hbar = 1$

普朗克常量的数值是

表 1.9 自然单位制和 CGS 单位制对比

CGS 单位			NU 单位		
量 名	单位符	量纲符	量 名	单位符	量纲符
长度	厘米(cm)	L	速 度	c	V
时间	秒(s)	T	作用量	$\hbar$	A
质量	克(g)	M	能 量	GeV	E

$$\hbar \simeq 6.6 \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot \text{s}$$

量纲为能量乘时间,即

$$\dim \hbar = [M][L]^2[T]^{-1}$$

因为, [L] 和 [T] 是等价的,再选 $\hbar = 1$, 则有

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

3) 两单位换算的实用表格

表 1.10 两种单位制量纲的转换关系

CGS 制 $\leftrightarrow$ NU 制	NU 制 $\leftrightarrow$ CGS 制
$\dim L = V A E^{-1}$	$\dim V = L T^{-1}$
$\dim T = A E^{-1}$	$\dim A = M L^2 T^{-1}$
$\dim M = V^{-2} E$	$\dim E = M L^2 T^{-2}$

表 1.11 两种单位的转换关系(取三位有效数字)

$1c = (c) \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ $1\hbar = (\hbar) \text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $1\text{GeV} = (e) \text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ $1\text{cm} = (e)(c)^{-1}(\hbar)^{-1} \text{GeV}^{-1} \cdot \text{c} \cdot \hbar$ $\quad = 5.05 \times 10^{13} \text{GeV}^{-1} \cdot \text{c} \cdot \hbar,$ $1\text{s} = (e)(\hbar)^{-1} \text{GeV}^{-1} \cdot \hbar$ $\quad = 1.52 \times 10^{24} \text{GeV}^{-1} \cdot \hbar$ $1\text{g} = (e)^{-1}(c)^2 \text{GeV} \cdot \text{c}^{-2}$ $\quad = 0.562 \times 10^{24} \text{GeV} \cdot \text{c}^{-2}$	$(c) = 3.00 \times 10^{10}$ $(\hbar) = 1.05 \times 10^{-27}$ $(e) = 1.60 \times 10^{-3}$
--	--

表 1.12 NU 单位与 CGS 单位的转换关系

量 名	NU 单位符	CGS 单位符	数 值
长度 (L)	$1\text{GeV}^{-1} \cdot \text{c} \cdot \hbar$	cm	$(e)^{-1}(c)(\hbar)$ $= 0.198 \times 10^{-13}$
时间 (T)	$1\text{GeV}^{-1} \cdot \hbar$	s	$(e)^{-1}(\hbar)$ $= 0.658 \times 10^{-24}$
质量 (M)	$1\text{GeV}^{-1} \cdot \text{c}^{-2}$	g	$(e)(c)^{-2}$ $= 1.78 \times 10^{-24}$

表 1.13 NU 单位基本常数

取 $\hbar = c = 1$, 则

- (1) 质量、能量和动量用 cm^{-1} 作单位
- (2) 角动量是无量纲的
- (3) $e = 1/\sqrt{137}$
- (4) $1\text{MeV} = 0.506 \times 10^{11} \text{cm}^{-1}$
- (5) $\hbar \simeq 6.6 \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot \text{s}$
 $\hbar c \simeq 197.328 \text{MeV} \cdot \text{fm}$
 $1\text{GeV}^{-2} = 0.38939 \text{mb}$

取 $\hbar = c = m_e = 1$

- (1) $1\text{s} = 7.764 \times 10^{26} \text{natural units}$
- (2) $1\text{cm} = 2.58 \times 10^{10} \text{natural units}$
- (3) $1\text{MeV} = 1.96 \text{natural units}$

2. 自然单位的使用

1) 在这个单位制中,只须把 $c, \hbar$ 及 m_e 的适当组合放到要进行数值计算的自然单位制数学表达式中去,就可以化到普通单位制(如 SI 制,CGS 制等)中去。同样,在普通单位制的公式中取 $c = \hbar = 1$ 或 $c = \hbar = m_e = 1$ 就变到了自然单位制。例:取 m_e 为参加作用的任一粒子质量,则自然单位 ($\hbar = c = m_e = 1$) 和通用单位的转换为:

$$\text{碰撞截面 } \sigma (\text{通用单位}) = \sigma (\text{自然单位}) \times \left(\frac{\hbar}{mc} \right)^2,$$

$$\text{寿命 } \tau (\text{通用单位}) = \tau (\text{自然单位}) \times \hbar / mc^2,$$

$$\text{衰变概率 } W (\text{通用单位}) = W (\text{自然单位}) \times mc^2 / \hbar.$$

2) 用基本常数计算

如: π 介子康普顿波长自然单位制公式:

$$\lambda_{\pi^\pm} = 1/M_{\pi^\pm} = 1/139.57 \times 1.96(\text{NU}) = 0.003656(\text{NU})$$

$$\lambda_{\pi^\pm} = 1/M_{\pi^\pm} = 1/(m_{\pi^\pm}/m_e)m_e = \left(\frac{m_e}{m_{\pi^\pm}} \right) / m_e = \left(\frac{m_e}{m_{\pi^\pm}} \right) = \frac{0.511}{139.57} \\ = 0.00366(\text{NU})$$

$$\lambda_{\pi^\pm} = 0.00366/2.58 \times 10^{10}(\text{cm}) = 1.42 \times 10^{-13}\text{cm} = 1.42\text{fm}$$

$$\lambda_\pi = \frac{1}{M_\pi} = \frac{1}{M_\pi} \left(\frac{\hbar}{c} \right) = \frac{1}{140 \left(\frac{\text{MeV}}{c^2} \right)} \left(\frac{\hbar}{c} \right) = \frac{\hbar}{140 \frac{\text{MeV}}{c}}$$

$$= \frac{6.6 \times 10^{-22} \text{MeVs}}{140 \text{MeV}} \times 3.00 \times 10^8 \text{m/s} = 1.41 \text{fm}$$

$$\sigma_\pi = \lambda_\pi^2 = \frac{1}{M_\pi^2} = \frac{1}{(139.57 \text{MeV})^2} = \frac{1}{(.13957 \text{GeV})^2} = 51.34 \text{GeV}^{-2}$$

$$= 51.34 \times 0.38939 \text{mb}$$

$$= 19.99 \approx 20 \text{mb}$$

(五) 原子单位^[3]

表 1.14 原子基本单位定义

物理量	质 量	长 度	时 间	速 度	动 量	能 量
单 位	m_e (电子质量)	$a = \hbar^2/m_e e^2$ (玻尔半径)	$\hbar^3/m_e e^4$	$c^2/\hbar$	$m_e c^2/\hbar$	$\frac{m_e c^4}{\hbar^2} = \frac{e^2}{a}$

原子单位用法:

在计算过程中,形式上可以令 $c = \hbar = m_e = 1$,而在最后结果中,根据物理量的量纲而加上相应的单位。例如氢原子能级,在原子单位中表成

$$E_n = -\frac{1}{2n^2}$$

若乘以能量单位 $\left(\frac{m_e c^4}{\hbar^2} \right)$,就变成平常的单位制中的表示式。

(六) “实验”单位

表 1.15 实验基本单位定义

物理量	长 度	时 间	能 量	动 量	质 量
单 位	米(m)	秒 (s)	电子伏 (eV)	eV/c	eV/c ² , MeV/c ²

1. “实验”制优点

加速器加速的粒子能量通常用 eV 或 MeV 或 GeV 等表示。磁铁可以用来选择一定动量的粒子。因此，如果粒子静质量 m 已知，这些粒子的能量由相对论质能关系求出，即

$$E = \sqrt{(Pc)^2 + (mc^2)^2}$$

2. 实验单位的比例系数计算技术

1) 核反应 $P + T \rightarrow 1 + 2 + \dots$ 的入射道波数 k

$$\begin{aligned}
 k &= \sqrt{2\mu E/\hbar} = \sqrt{2\left(\frac{m_P m_T}{m_P + m_T}\right)\left(\frac{m_T}{m_P + m_T}\right) E_L/\hbar} \\
 &= \underbrace{\left(\frac{m_T}{m_P + m_T}\right)}_{\text{无量纲}} \sqrt{2m_P E_L/\hbar} = \left(\frac{m_T}{m_P + m_T}\right) \sqrt{2m_P c^2 E_L/\hbar c} \\
 &= \left(\frac{A_T}{A_P + A_T}\right) \sqrt{2A_P \times 931.501626 E_L (\text{MeV}^2)/197.3285851 (\text{MeV} \cdot \text{fm})} \\
 &= 0.218734256 \left(\frac{A_T}{A_P + A_T}\right) \sqrt{A_P E_L (\text{u} \cdot \text{MeV})}, (\text{fm}^{-1})
 \end{aligned}$$

2) 卢瑟福散射截面(库仑散射)

$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \left(\frac{Z'Z e^2}{2\mu v^2}\right)^2 \csc^4 \frac{\theta}{2} \\
 &= \left(\frac{Z'Z e^2}{2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \mu v^2}\right)^2 \csc^4 \frac{\theta}{2} \\
 &= \frac{1}{16} \left(\frac{Z'Z e^2}{E}\right)^2 \csc^4 \frac{\theta}{2} \\
 &= \frac{1}{16} \left(\frac{Z'Z \hbar c}{E \frac{\hbar c}{e^2}}\right)^2 \csc^4 \frac{\theta}{2} \\
 &= \frac{1}{16} \left(\frac{Z'Z}{E} \frac{197.32858}{137.03604} \text{MeV} \cdot \text{fm}\right)^2 \csc^4 \frac{\theta}{2} \\
 &= 0.1295956 \left(\frac{Z'Z}{E(\text{MeV})}\right)^2 \csc^4 \frac{\theta}{2} (\text{fm}^2)
 \end{aligned}$$

其中 E 为粒子相对运动能量， θ 为粒子在质心系的散射角。