



《中国工程物理研究院科技丛书》第 025 号

实验核物理测量中的 粒子分辨

段绍节 编著

1.1

工业出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》第 025 号

实验核物理测量中的 粒子分辨

段绍节 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

实验核物理测量中的粒子分辨/段绍节编著. —北京:
国防工业出版社, 1999. 6

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-02046-X

I. 实… II. 段… III. 原子核-粒子探测 IV. 0571.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 38023 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{8}$ 152 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 10.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前 言

在核物理实验中,粒子分辨测量是重要的。因为核反应在很多情况下并不只有一个反应道,每一反应道的测量只能通过对反应产物的分辨选择测量,才能获得正确的结果。同时,在测量中,探测器对很多粒子或射线都是灵敏的,而有些粒子或射线之间常常是伴生的,如中子与 γ 射线就是这样,故测量中就有一个分辨测量的问题。

目前国内在核物理实验测量方法方面,已出版了几本较好的教科书,但对核物理实验测量中的粒子分辨问题,尚未见到有专著出版,此类内容只散见于文献中。笔者多年来一直从事实验核物理的测量研究工作,积累了一些有关核物理测量中粒子分辨的成果与经验、体会,如其中的频域粒子分辨技术,就是笔者为完成具体实验时,新提出的分辨方法。现将其总结、汇集成书。对有关探测介质与入射粒子相互作用方面及探测器粒子分辨的具体作法上,都作了较多的阐述。

编写本书为的是给实验科技工作者提供一本关于核物理实验中粒子分辨方法的实用参考书。同时还想通过本书介绍核物理测量中粒子分辨方法的发展过程及认识方法,从而促进核物理测量方法的进一步发展。

要想干成一件事,没有社会的支持是极其困难的,甚至不可能。故笔者诚挚感谢中国工程物理研究院科技丛书编委会的领导及同志们,因为没有他们的支持,也就不可能有这本书问世。同时还要感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所二〇四室的领导和同志们对这一工作的支持。

在编写过程中王建中先生对一、二章进行了仔细审阅。尤其是

中国原子能研究院的陈泉博士、北京大学技术物理系的刘洪涛教授对本书进行了详细审校,对书稿的安排及内容提出了许多宝贵意见,在此特致谢忱。

由于书中很多问题是自己的理解、认识,疏漏之处在所难免,敬请同仁及后来者不吝指正。

段 绍 节

1998 年于绵阳科学城

第一章 绪 论

1.1 历史发展的足迹

人类始终对自然界有着极大的好奇。这也正适应人类自身发展和利用、改造自然,得以生息繁衍下去的需要。这样人类社会通过不断探索自然物质的运动规律,才逐渐发展了科学与技术。

自然界的物质是由什么组成的?这是个自古以来一直令人困惑的问题。早在我国春秋时期,百家争鸣时先哲们就对这一问题提出了各种设想,如墨子提出“端”的设想,认为物质是由端组成的,而这里的端是指极端、极点,不能再分割下去的最小单元。这与几乎同时在西方古希腊的德莫克里特学派提出的原子设想是不谋而合,只是说法不同而已。老子更提出了迄今为止独一无二的见解,认为“无,名天地之始,有,名天地之母。故常无,以观其妙,常有,以观其徼。”“天下万物生于有,有生于无。”而徼乃终极也。这里关于有、无概念的内涵及深广范畴至今尚未被后人参悟透。当然那时对物质本性的认识只是臆测,并没有任何直接的客观依据。

原子核物理是一门实验科学,它是建立在人类实践基础上的。由古代人类智慧的臆测到现今达到一定的认识水平,人类走过了漫长的路程,而认识的迅速发展也只是近代的事。

最早 J. 道尔顿(1803 年)首先将原子的概念用来定性和定量地解释化学现象获得成功。但原子、分子究竟是多大、质量是多少呢?直到 1811 年 A. 阿伏伽德罗引入克原子、克分子(摩尔)的概念,认识才得到进一步加深。1833 年, M. 法拉第提出的电解定律,证明电荷具有最小单位,从而使原子学说的可信度大大增加。1867 年, Д. И. 门捷列夫按照原子量排出了元素周期表,进一步表明原

子学说的可信性。然而这一切都没能确证原子的存在。

使原子结构真正显示出来的是人类实践的进一步发展,很多学者进行了大量的探索。1895年,W. K. 伦琴发现了X射线;1896年,A. H. 贝可勒尔发现了放射性,接着J. J. 汤姆逊证实了电子的存在;最终E. 卢瑟福提出了原子模型。从而逐渐揭开了原子的神秘面纱,原子核物理作为人类的科学认识,也就应运而生了。

与此同时,由G. 伽利略、J. 开普勒、I. 牛顿所逐步建立起来的经典物理学,也发生了革命性的突破与前进,这就是A. 爱因斯坦相对论体系的建立。这使得人对物质运动的时间与空间,及运动物质的相互作用、物质的能量、动量、质量等等概念,有了更深入的认识,为原子核物理的发展奠定了坚实的基础。

1896年,法国物理学家A. H. 贝可勒尔发现铀的化合物能使附近包在黑纸里的照相底片感光。他由此断定,铀不断地自发放出某种看不见的然而穿透力很强的射线。这就是天然放射现象,而物质的这种性质叫天然放射性。后来,M. 居里发现大多数含铀矿石的放射性强度和矿石内铀含量成正比,但有一种沥青铀矿的放射性却比按照其含铀量计算的放射性强度要高四倍。经过艰苦的工作,终于发现并提取出了新的放射性元素镭。同时居里夫妇还发现了放射性元素钋。这样人类经过一步步探索,终于发现了铀系元素。

放射性现象的发现,使人类的认识开始深入到原子核内,从而促成了原子核物理的诞生。

放射性物质放出来的是什么?通过镭在磁场中的放射蜕变说明(如图1.1.1),镭发射出来的射线被分为三种成分,一种是 α 粒子,一种是电子,称 β 射线,还有一种是 γ 射线,是电磁辐射。

1913年,拉塞尔、索迪、法相发表了位移定律,概括了放射性物质由于发射粒子而引起的化学变化。1919年,E. 卢瑟福成功地用 α 粒子轰击氮核使其发生分裂,证明有氢核发射出来,并定名为质子。同时他还进行了 α 粒子散射实验,证实了正电荷在原子中集中在中心,从而建立了卢瑟福原子模型。从此,核物理实验进入了

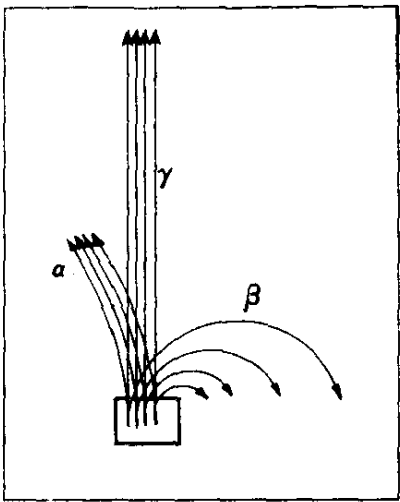


图 1.1.1 在磁场中镭的放射性蜕变图

人类实践活动范围。

需要是发明之母。由于实验的需要,观测放射性辐射的仪器设备也在研究中被制造出来。1896 年,C. T. R 威尔逊设计制造了能观测 α 、 β 等带电粒子径迹的威尔逊云室。1903 年,克鲁克斯制成了能观察 α 粒子的目测闪烁镜。他发现 α 粒子能使荧光物质发光,由此观察 α 粒子打在荧光物质上的闪光,就可间接目测 α 粒子了。图 1.1.2 为克鲁克斯目测闪烁镜的示意图。1911 年,E. 卢瑟福又用改进了的目测闪烁镜进行了 α 轰击氮原子核的实验。目测显然存在很多弊端,故 1928 年 H. 盖革制成了盖革计数器,它利用带电粒子在探测器中产生的电离电流,可以方便地对带电粒子进行测量。由于射线打到照相底片上,能引起照相底片感光,显示出粒子的径迹,1911 年,莱格尼姆制造出能显示

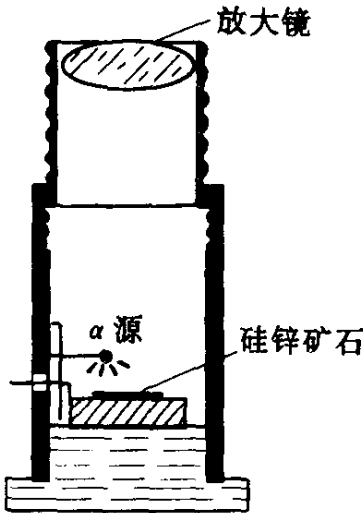


图 1.1.2 克鲁克斯目测闪烁镜示意图

出单个 α 径迹的原子核乳胶。在核乳胶中可根据粒子射程的长短确定出粒子的能量,根据径迹粗细,求出粒子的电离本领,可估计出粒子的速度及质量等。这些观测手段的发展既适应了当时实验的需要,也促进了人类认识的发展。

在初步实践的基础上,人们曾设想原子核是由电子和质子组成的,后来在进一步实践中发现这是错误的。1932 年 J. 查德威克发现了中子,随后 W. K. 海森堡和 Д. Д. 伊万年科分别独立发表了原子核是由质子和中子组成的假说。1934 年 I. 居里和 F. 约里奥发现,许多元素在 α 粒子轰击下,能变成另一种稳定元素的放射性同位素。此后 E. 费米等人发现中子可被减速,且低能中子能特别有效地引发核蜕变。1938 年, O. 哈恩和 F. 斯特拉斯曼,证明了在中子照射下铀可发生裂变,从而为人类利用原子能揭开了序幕。最后在 1942 年由 E. 费米主持在美国建成了第一座裂变反应堆。美国并在 1945 年实现了人类第一次核爆炸。

同时,为了进行核研究,人类还研制建造了加速器。从 1930 年开始,人们从直流加速器、回旋加速器直到现今的对撞机,加速器已成为一个独立的分支学科。加速器给核物理和粒子物理开拓出了广阔的新天地。加速器给出的粒子强度和能量比一般天然源更高,且可随人的意愿而加以控制。同时还可提供天然无法提供的粒子源,以适应人们实验研究的需要。

在人类实践的基础上,理论发展也十分迅速,物理思想达到空前神速的发展。1900 年 M. 普朗克提出了量子化假说。1905 年 A. 爱因斯坦提出光量子假说。1911 年 E. 卢瑟福提出原子模型。1913 年 N. 玻尔提出氢原子结构理论。1924 年 L. V. 德布罗意提出粒子波粒二象性假说。1925 年 W. 泡利发表不相容原理,同年 W. K. 海森堡创立了矩阵力学。1926 年 E. 薛定谔发表了波动力学,并证明矩阵力学与波动力学的等价性。1927 年 W. K. 海森堡发表了测不准关系, N. 玻尔提出量子力学的互补原理。1928 年 G. 伽莫夫等人利用波动力学导出描述放射性的盖革努塔耳定律,证明量子力学可用于原子核问题中。1929 年 W. K. 海森堡、W.

泡利等提出相对论量子场论。从而在经典物理基础上，又发展出量子力学的现代物理理论，这无疑是人类认识自然的发展，也为人类进一步利用自然、改造自然提供了认识基础和有力的工具。

人的认识归根结底来自实践，而认识的正确与否也只能通过实践才能检验。核物理研究的对象是人的感觉器官所不能感受的细微事物，因此实验设备、仪器作为人感官的延伸，就变得十分重要了，没有好的实验设备、仪器和好的测量手段，很难达到认识目的。这正是核探测技术随核物理发展而发展的原因。同时核测量技术也成为重要的分支学科，而被人专门研究，以制造出更为精良的帮助人类认识自然的工具。

1.2 一些基本概念及定义

放射性元素的原子核并不是一下子全部蜕变掉，而是平均每单位时间的核衰变服从指数规律为

$$dN = -\lambda N dt$$

其积分结果为

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

式中： $N(t)$ 为 t 时刻衰变后所剩的原子核数； λ 为衰变常数，是放射性的特征量； $N(0)$ 为零时刻的原子核数。该式表明放射性原子核 $N(t)$ 随时间 t 按指数衰减。定义平均寿命 τ 为放射性原子核平均生存时间，可以证明平均寿命 τ 为衰变常数的倒数，即 $\tau=1/\lambda$ 。定义放射性核数衰减一半所需要的时间为半衰期 $T_{1/2}$ ，则有 $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ 。

核衰变是随机现象，我们不可能确定某一个原子核将在何时发生衰变。但随机现象服从统计规律，放射性的衰变就服从泊松分布规律。对在一定的时间内发生衰变的原子核数的平均值或者期

望值 $E(n)$, 是围绕 $E(n)$ 的几率分布 P_n , P_n 可由泊松分布表示, 为

$$P_n = \frac{1}{n!} [E(n)]^n e^{-E(n)} \quad (1.2.1)$$

若 $E(n)$ 足够大, $E(n)$ 是整数 n 的唯一分布参数, 则泊松分布可用对称的高斯(正则)连续分布表示

$$P(x) = [2\pi E(n)]^{-1/2} e^{-[x-E(n)]^2/2E(n)} \quad (1.2.2)$$

高斯分布见图 1.2.1, 高斯分布与泊松分布的比较如图 1.2.2。

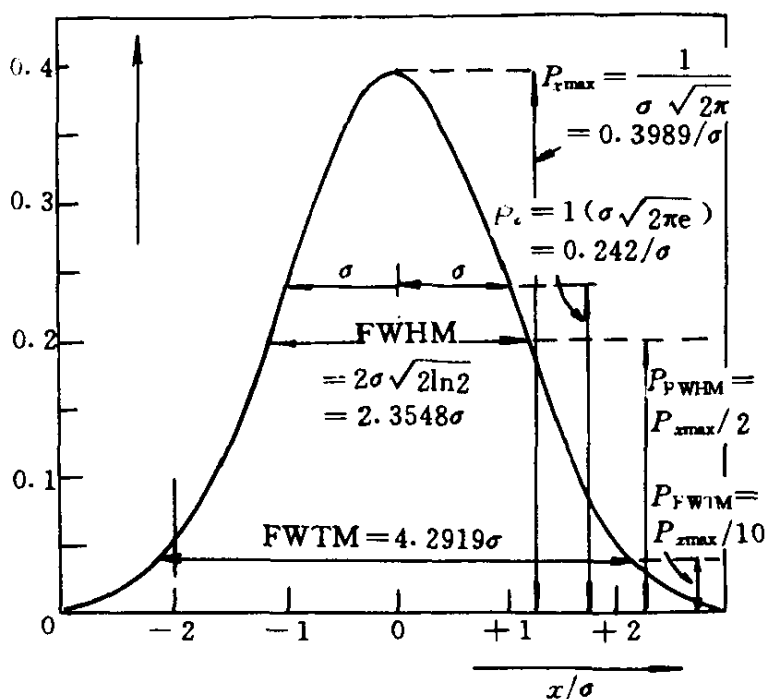


图 1.2.1 高斯分布(平均值 $\mu=E(n)=1$, 标准误差 $\sigma=1$)

FWHM 为半高全宽, FWTM 为半时全宽。

核物理测量中, 每次测得的核事件也是在某一平均值上涨落的。这种涨落也是随机的, 同样服从统计规律, 即也是服从泊松分布。测量核事件标准误差值的计算, 也是根据统计运算规律进行的。

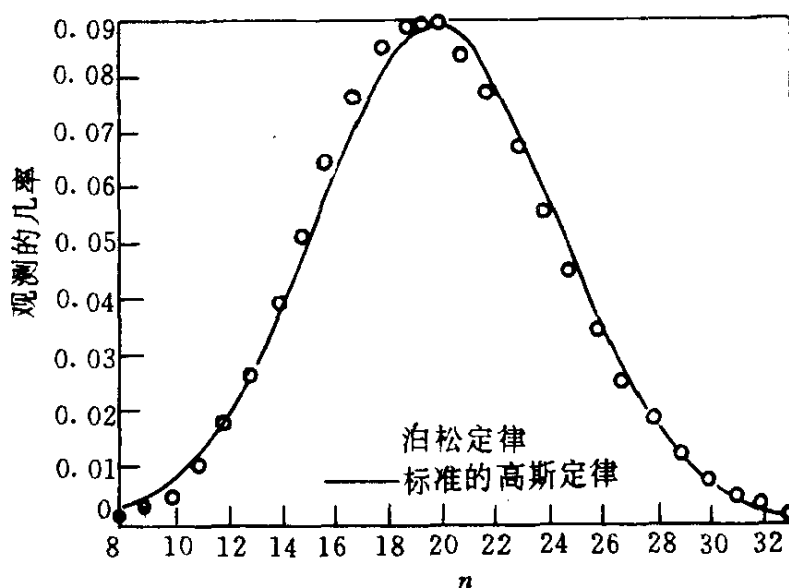


图 1.2.2 泊松分布(圆圈)与高斯分布(曲线)的比较(平均值等于 20)

实验核物理中一个重要的概念是**截面**。**截面**的定义是：一个粒子垂直入射到单位面积(1cm^2)，经过单位长度(1cm)，与此单位立方体(1cm^3)内的靶原子核相互作用几率，称这个粒子与靶原子核的作用截面，简称截面(截面为面积的量纲)。由于相互作用的随机性，截面是这样体现的：一束强度为 I 的粒子，即每平方厘米每秒有 I 个粒子，垂直通过单位体积(1cm^3)有 N 个原子核的靶，通过厚度为 dx ，粒子强度变化 dI 为

$$dI = -I\sigma N dx \quad (1.2.3)$$

式中 σ 为比例常数是入射粒子与靶原子核的相互作用截面。这里的相互作用是指一切相互作用，即作用后入射粒子或改变运动方向或改变能量。对(1.2.3)式积分则有

$$I(x) = I(0)e^{-N\sigma x} \quad (1.2.4)$$

这就是入射粒子强度为 $I(0)$ ，穿透物质厚度为 x 时粒子强度的变化规律。一般称 $N\sigma = \mu$ 为该物质对粒子的吸收系数，而称 $1/\mu$ 为该物质对该粒子的平均自由程。当然，并不是所有的辐射强度衰减

都满足式(1.2.4),如连续能量粒子穿过物质时,测量时很难分辨哪些粒子能量发生了变化,即哪些粒子与原子核发生了相互作用,在这种情况下吸收系数就不是常数了。截面可细致地区分,将不同的相互作用分成不同的截面,如弹性散射截面,非弹性散射截面等。还有与次级粒子的空间分布特性相对应的微分截面等。

在核物理中,辐射粒子的能量是粒子的重要性质之一,它是分辨粒子相互作用的重要因素。因此,实验测量粒子的能谱往往是很重要的。由于粒子相互作用后可能结合在一起,也可能将核分解出部分物质,而结合在一起有结合能。粒子在自由状态时所具有的能量大于它们结合在一起的能,这种结合能反映在质量亏损上,正如爱因斯坦质能关系式 $\Delta E = \Delta mc^2$ 所表达的。核物理实验中不可避免地要通过能量、动量守恒来描述作用前后粒子运动过程和质能变化的关系,从而达到认识相互作用过程的目的。

由于粒子质量十分小,如电子静质量为 $9.1095 \times 10^{-28} \text{g}$,质子静质量为 $1.6726 \times 10^{-24} \text{g}$,故在其获得一定的能量后,其运动速度可能很大,由此在一定情况下,就必须考虑相对论效应,即其质量会随速度变化而变化。

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

式中 $\beta = v/c$, c 为光速, v 为粒子运动速度。而此时粒子存在的时空也是按洛伦兹变换而变化的。由此,在计算粒子运动关系时,其总能量 E 与动量 p 之间的关系为

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

核物理的很多重要发现,都是通过精细计算作用前后的能量值差异而获得的。

在实验核物理的实验结果处理中,应特别注意到单位制的统一与方便。有时它采用了特别适于它的单位制。

1.3 实验核物理测量的特点及分辨的必要

实验核物理是研究各种原子核的性质,及原子核与其它物质相互作用的科学。实验核物理的研究目的是寻找原子核内部的物质结构、运动规律及其组成规律,以发现其可被人类社会利用的可能性,及利用的方法,从而为人类社会的生存、发展服务。显然研究成果会成为利用自然建设人类社会的有力工具,是社会生产力的重要组成部分。

认识的目的在于应用,实验核物理研究的目的也不例外。其实,实验核物理就是人类以认识物质世界为目的的实践活动。但这种实践活动的特点是已远离了人用杠杆移动重物的人与物质直接接触的实践。因为随着人类认识的发展,已经深入到更小的时空范围。由此为了实践的需要,人类创造出了各种仪器设备,使之成为感官的延续和发展,来完成人实践的要求。当然,与此同时人类也不断创造出分析、综合等认识方法,从而达到认识的目的。

正是由此,仪器设备在实验核物理中越来越受到重视,已成为研究的对象,成为人类社会研究领域的重要部分。事实已经证明,人类在核物理研究中的任何一种突破性的发现,都与一种新的实验手段联系在一起。并且也只有被实验验证的认识,才可能成为理论,一种在实验条件范围内成立的正确理论。可见实验仪器、设备在人类实践中的重要性。从一定意义上讲,没有相应核物理的实验仪器设备,也就没有了核物理的正确认识及其发展。

认识只能在相互作用中获得。如果不发生相互作用,孤立的东西是不可能被认识的。正如有要看见东西,必须光与该物相互作用,而后才能看到。这正是探测仪器之所以是感官延续的基础。即实际上探测器是接收到物质与其作用的信息,并把它转化成人可感觉到的东西。而要达到正确的感觉,分辨能力是重要的,因为只有能将不同对象分开,我们才能获得正确的认识。正如人若不能分辨红绿灯,就不可能确定车是否能通过路口一样。可见仪器的分辨能

力是仪器的十分重要的性能指标之一。这正是人们不断提高仪器分辨能力的原因。

自然界的事物是复杂的,纯净的事件是不存在的,因为自然本身就是复杂的多元巨系统,在同一实验过程中不可能只存在我们需要的那种事物,更何况被观测对象又是在不停运动变化着,因此必须在复杂的事物变化过程中正确地挑选我们需要的事件,这便是粒子鉴别。在实验核物理测量中,要测某种单纯的射线或粒子,但同时有别的射线或粒子夹杂其中。要获得正确的结果,就必须能将各种射线或粒子分开。如进行中子测量时,无一例外地都有 γ 射线的存在(中子源的伴随 γ 射线或中子与介质物质核反应生成的次级 γ 射线),必须进行中子 γ 分辨测量。又如在核反应中,可能有多个反应道,而每道反应中产物也往往很复杂,可能有多种粒子出现,这时也必须进行粒子分辨测量,否则就无法正确认识被观测的物质相互作用过程。这些都是实验测量中的重要问题。粒子分辨技术要解决的正是这类问题。

参 考 文 献

- 1 中国大百科全书编委会. 中国大百科全书 物理学. 北京:中国大百科全书出版社,1987
- 2 Mann W B, Rytz A, Spornol A. 放射性测量—原理与实践 卞祖和等译. 合肥:中国科学技术大学出版社,1992
- 3 Segre. E 核与粒子. 沈子威、张日清等译. 北京:科学出版社,1984

第二章 实验核物理测量基础

人是通过物质间的相互作用来认识物质世界的,也只有通过相互作用才能认识世界。

对于微观粒子或射线,要认识它们,只有通过它们与物质的相互作用才能达到目的。人正是从粒子或射线与物质的相互作用过程中所产生的一系列现象,来认识粒子或射线及其性质的。如果粒子或射线不与其它物质发生相互作用,或这种相互作用结果被认为是已知的事物,那么就不仅不能知道该粒子或射线的新性质,就是粒子或射线本身也不会被发现了。

也正为此,人们设计出了多种探测仪器设备,使粒子或射线与这些探测物质发生相互作用,从而探知粒子或射线的存在及其性质,达到认识的目的。

这样,粒子或射线与物质的相互作用,就成为实验核物理测量的基础了。本章就是讨论粒子或射线与物质的相互作用问题。

宇宙间相互作用大体可归纳为四种基本类型,即引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用。在核物理探测过程中,主要是电磁相互作用。

2.1 荷电粒子与物质的相互作用

荷电粒子与物质的相互作用,主要是发生电磁相互作用。当然当荷电粒子能量足够大时,也可能突破原子核的库仑位垒,发生核力相互作用,即发生核反应。荷电粒子与物质的电磁相互作用,首先可能与核外电子发生电磁相互作用,这表现为与核外电子发生弹性或非弹性碰撞,其结果是引起原子核外电子电离或激发,而入

射荷电粒子被散射或发生各种形式的能量辐射,从而使入射荷电粒子改变运动方向和损失能量。入射荷电粒子也可能与原子核发生电磁相互作用即发生弹性或非弹性碰撞,从而使原子核获得碰撞能量(反冲),入射荷电粒子被散射或放出辐射能量,并改变运动方向和损失能量。荷电粒子与物质相互作用的结果,是入射荷电粒子逐渐损失能量,而最终停留下来。对荷电粒子在物质中沉积能量的收集及观测,正是所有探测器之所以能获知核事件的根本原因。

荷电粒子与原子核外电子的非弹性碰撞,是当荷电粒子在物质原子附近掠过时,入射荷电粒子与核外电子发生相互作用,从而使核外电子受到吸引或排斥,而从入射荷电粒子上获得部分能量。当这部分能量大于核外电子的电离能时,核外电子就可能克服原子核的束缚而脱离原子,成为自由电子,而形成电离。由于原子核最外层电子电离能最小,也就最易发生电离。电离过程发射的电子能量足够大时,还可能继续与其它原子发生作用。若内层电子被击出后,则外层电子要向内层跃迁,同时放出特征 X 射线或俄歇电子。当核外电子获得的能量小于电离能时,则可能使电子从低能级态跃迁到高能级态,从而使原子处于激发态。原子的激发态是不稳定的,在短暂的停留后,即从激发态退激回基态,发射出光子以释放出能量,这就是退激发光。荷电粒子与物质原子核外电子的非弹性碰撞,导致物质原子电离或激发,而入射荷电粒子损失能量。入射荷电粒子的这种能量损失称电离损失。

入射荷电粒子与核外电子的弹性碰撞,也是电磁相互作用。实际上这是入射荷电粒子与整个原子的相互作用,由于要满足动量守恒,入射荷电粒子损失能量很少,比原子中电子的最低激发能还小。故这种相互作用只有极低能量(100eV)的 β 粒子入射到物质中时方需要考虑,其它情况可忽略。

荷电粒子与原子核的非弹性碰撞,是荷电粒子在靠近原子核时,由库仑力使入射荷电粒子受到吸引或排斥,从而改变了入射荷电粒子的方向。这种运动状态的改变会使运动荷电粒子发射电磁辐射,损失入射荷电粒子的能量。对质量较大的粒子,这种辐射由