

1962.11.17.寄

# 高能加速器

M. S. 里文斯頓

科学出版社

# HIGH-ENERGY ACCELERATORS

by

M. S. LIVINGSTON

Interscience Publishers, Inc., New York.

1954

## 內 容 簡 介

本书討論現代高能帶電粒子加速器的設計及工作原理。书中首先說明加速器對原子核研究的重要性，並對加速原理作一般性的討論和數學分析，然後對現有的幾種加速器進行具體的討論。此外，本書還簡介了加速器的發展史，並對其未來的發展作了有根據的預測。

本書基本上是依據美國學者的工作寫成的，因此它主要只反映了美國加速器的研究工作情況，而沒有把蘇聯在這一方面的巨大成就包括進去，這是本書的一大缺陷。不過，中文譯本中，在這些地方已據俄文譯本加了註，介紹了一些蘇聯學者的工作。

## 高 能 加 速 器

M. S. 林文斯頓著

李 為 元 譯

科學出版社出版（北京朝陽門大街117號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第061號

中國科學院印刷廠印刷 新華書店總經售

1959年7月第一版

1959年7月第一次印刷

（京）0001—5,500

書號：1811 字數：98,000

開本：250×1168 1/32

印張：4 5/16

定價：0.64元

## 中譯本校者序

加速器是以飞跃的速度在发展着的。看来，正象作者里文斯頓所指出的，每隔6年，加速器的极限能量就要增长一个数量级。本书原著出版于1954年初（那时加速器的极限能量是6千兆电子伏），以后，1957年，苏联建成了10千兆电子伏的同步稳相加速器。目前，美国正在建造25千兆电子伏的强聚焦加速器，苏联的50千兆电子伏强聚焦加速器也已开始设计建造。

近年来，又提出了好几种加速粒子的新方法，例如，粒子对冲、有恒定磁场的强聚焦加速器、用等离子区波导的加速器、利用相干原理的加速方法等。其中一些方法如能实现，加速器不论在能量与束流或经济方面，都会大大地跃进一步。

我国已在1958年建成了25兆电子伏的回旋加速器，许多小加速器已在全国遍地开花。相信很快地，我们也能有各种最新式和强大的高能加速器。

本书对于复杂的加速器，是用了比较简短的语言来叙述的。作者写本书的目的是为那些对于加速器只需作一般了解的物理学家、工程师与大学生提供一本参考书，因此只对高能加速器作了一般的介绍，而对于能量较低的各种加速器，如静电加速器、高压倍加器、回旋加速器、电子加速器、微波加速器等，没有专门讨论。本书主要取材于美国各期刊与报告，遗憾的是，它未包括苏联等国的重大成就。我们根据俄文译本在第二章、第三章、第四章、第七章等处加了注，介绍一些苏联工作者的工作。另外，并加注修正原著个别不确切之处。

本书中的名词大多是根据中国科学院编“物理学名词”翻

譯的，但另外還有許多名詞至今沒有確切的譯名，因此，一部分譯名或有不當之處，希望讀者指正。

## 原 序

有关加速器发展的历史至今还没有成书。几乎所有关于这一问题的文献都曾发表在研究期刊或实验室报告上。除相当简短的总结性文章外,还没有一种书籍能让科学家、工程师或学生找到对粒子加速的物理原理的阐明,或者各种类型加速器的成功的设计与技术。这种著述和研究显然是十分需要的。很多学生需要更多地知晓这一领域内的知识,以指导他们进一步进行研究工作。原子核物理学家也必须了解加速器,以对实验数据作正确估价。各边界领域内的科学家和工程师对作为原子核数据源泉的加速器,同样也感到新奇。有时,筹建实验室的领导者也必须对几类加速器的相对优缺点作出鉴定,以便作为将来计划的基础。

本书企图叙述一部分加速器,即最新、最大和能量最高的加速器的历史,因为这些加速器在飞速发展的核力和高能粒子的领域内是非常重要的。加速器的早期发展,象 1930 年的直流电压加速器、静电起电机、回旋加速器等,不包括在这本小书内。对于某些读者,这可能是很大的但不可避免的缺陷。然而,其中高能加速器的历史几乎是完整的。

本书的重点放在运转的物理原理、粒子轨道的性质和基本元件的设计原理上。本书不企图把一切装置搜罗无遗,只选取某些典型以作较详细的阐述,并指明它们的特殊效用及合适的机件装置。著者也力求阐明几类加速器原理的相似性,特别是粒子在电场和磁场内的基本运动方程方面。为了强调这种类似性,专章讨论了适用于绝大部分加速器的数学分析,在这一章中,加速过程的一般特点、聚焦以及稳定性,是从运动方程推导出来的。

加速器(尤其是設計最高能量的加速器)正在繼續發展。最動人心的最近的发展还没有完成。因此,最后一章完全帶有推斷的性質。可以預料,在這些新加速器的進展過程中,這里所陳述的一些概念和設計會有所變更。不過,對這種新型加速器發展最初階段的探討,却是加速器技術的最好說明。比起對現有裝置的實際描述來,它更清楚地顯示出新概念是如何發展的、新問題是怎樣產生的,應該如何應用智慧和技術來解決這些問題,以達到能量的新記錄及建成一種新的研究原子核的工具。

里文斯頓

1954年5月18日,馬薩諸塞,劍橋

# 目 录

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 中譯本校者序 .....                     | i   |
| 原序 .....                         | iii |
| 第一章 作为原子核物理研究的工具的高能加<br>速器 ..... | 1   |
| 1-1 引言 .....                     | 1   |
| 1-2 不稳定粒子和阈能 .....               | 2   |
| 1-3 产生介子的加速器 .....               | 11  |
| 1-4 多倍千兆电子伏级加速器 .....            | 12  |
| 第二章 粒子加速到高能的原则 .....             | 14  |
| 2-1 运动的相对论性方程式 .....             | 15  |
| 2-2 轨道的稳定性 .....                 | 20  |
| 2-3 自由振荡 .....                   | 24  |
| 2-4 粒子的能量 .....                  | 27  |
| 2-5 圆周运动中相的稳定性 .....             | 30  |
| 2-6 振荡间的耦合 .....                 | 35  |
| 2-7 粒子运动的描繪 .....                | 37  |
| 第三章 电子同步加速器 .....                | 39  |
| 3-1 早期的发展 .....                  | 39  |
| 3-2 工作原理 .....                   | 41  |
| 3-3 磁铁 .....                     | 43  |
| 3-4 注入 .....                     | 45  |
| 3-5 射频加速装置 .....                 | 47  |
| 3-6 靶子 .....                     | 48  |
| 第四章 同步回旋加速器 .....                | 51  |
| 4-1 早期的发展 .....                  | 51  |
| 4-2 工作原理 .....                   | 54  |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 4-3 磁場                      | 56         |
| 4-4 俘获效率                    | 59         |
| 4-5 射頻振盪器                   | 60         |
| 4-6 真空室                     | 62         |
| 4-7 靶端設備和粒子束的性質             | 64         |
| <b>第五章 直綫加速器</b>            | <b>67</b>  |
| 5-1 直綫加速器的特征                | 67         |
| 5-2 早期的設計                   | 69         |
| 5-3 相穩定性                    | 71         |
| 5-4 質子直綫加速器——林耐克            | 73         |
| 5-5 聚焦問題                    | 77         |
| 5-6 电子直綫加速器                 | 79         |
| <b>第六章 質子同步加速器(同步穩相加速器)</b> | <b>82</b>  |
| 6-1 發展历史                    | 84         |
| 6-2 工作原理                    | 86         |
| 6-3 設計的特点                   | 88         |
| 6-4 环形磁鉄                    | 92         |
| 6-5 射頻加速裝置                  | 96         |
| 6-6 真空室                     | 99         |
| 6-7 靶和屏蔽                    | 101        |
| <b>第七章 交变梯度聚焦</b>           | <b>104</b> |
| 7-1 穩定性原理                   | 104        |
| 7-2 交变梯度磁透鏡                 | 107        |
| 7-3 交变梯度同步加速器               | 111        |
| 7-4 多倍千兆电子伏級加速器的設計研究        | 117        |
| 7-5 設計原理                    | 120        |
| 7-6 結論                      | 126        |
| <b>参考文献</b>                 | <b>129</b> |

## 第一章

### 作为原子核物理研究的工具的高能加速器

#### 1-1 引言

粒子加速器是原子核物理学中最有用的工具之一。加速器所产生的高速粒子能够贯穿核的力场，从而得以在核力场中把必要的能量传递给核，使它蜕变；它也能起研究核力属性的探针的作用。原子核是由借短程力束缚在一起的质子和中子所组成的，核的密度近似为常量。核的半径可以表示为  $r = r_0 A^{1/3}$  ( $A$  是核子数)。一个核子的半径为  $r_0 \sim 1.4 \times 10^{-13}$  厘米，这个数值可以作为核力程的量度。

当用带正电的粒子来轰击原子核时，粒子会受到库仑力的排斥。对于  $1 < A < 200$  的原子核，在半径  $r$  处带单位电荷的粒子的位能（即位垒的值）是在 1 到 10 兆电子伏之间。粒子必须具有这样大小的动能，才能够接近核的“表面”，在“表面”处粒子有很大的几率激发核反应。在较低的能量下，观察到的核过程是用波动力学的穿透位垒的几率来理解的。

可获得几兆电子伏能量的早期加速器，如电压倍加器、静电起电机、回旋加速器等，已经应用了多年。在这样能量下的实验曾用来探寻原子核的粗略结构，用来测量蜕变阈和核内较低的激发能级，对核的稳定条件也曾进行了研究，并在不稳定放射性核素的性质方面做了很多测量。在蜕变和散射的过程中，产物的角分布证明了核力的非弹性特性。在稍高的能量下（超过 10 兆电子伏），蜕变过程变得更加复杂；大多数原子核的多粒子特性表明，在很多互相竞争的反应之中，时常形成

多粒子的发射。

在更高的能量下,原子核现象的特性就改变了,这时我們便进入基本粒子性质的領域。过程本身归结为基元核子間的相互作用,并給出在极短程的核力的性质的直接証据。这种相互作用特性的改变,用波动力学的話来表示,就是轰击粒子的波长变得小于核的大小。在千兆电子伏范围内,粒子的波长甚至比起一个核子的大小来还小。举例來說,具有1千兆电子伏能量的质子的波长是  $\lambda = 1 \times 10^{-14}$  厘米。一个这样能量(或更高能量)的质子在穿过原子核时,被認為会和一个(或至多几个)个别的核子发生反应。重核的多粒子特性之所以具有重要的意义,首先是由于它表示核物质有更大密度,从而增加了相互作用的几率。

現在認為核子間的基本核力是与介子的产生和吸收相連的。理論上的解释決不算完滿,但是很多的实验都証明,当用相当高能量的粒子或輻射来轰击靶时有介子产生。介子是在宇宙射綫的观察中所发现的,很大一部分关于介子性质的現有情报是用宇宙射綫(高能的、但不可控制的粒子源)得到的。而且,近来已經得到最重要的更重而不稳定粒子的証据,这些証据是从上升到高空的气球上用照象乳胶对原初宇宙射綫曝光,以及从高山实验室的云室照片得到的。

### 1-2 不稳定粒子和閾能

許多或者可以說全部基本粒子能够通过具有足够大能量的粒子相互作用而产生出来。由 $\gamma$ 射綫产生的电子偶是現在了解得比較清楚的現象:  $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 。这个过程发生在有原子核或电子电場存在的情况下, $\gamma$ 射綫的最小能量应等于电子和正电子的静止能量之和(1.02 兆电子伏)。超过这个閾, $\gamma$ 輻射因偶的产生而被吸收的截面便迅速增长,到了很高的能量,它成为主要的过程。

相反的过程是正电子和負电子“湮沒”而产生两个 $\gamma$ 輻射

量子,每一个量子的能量为0.51兆电子伏,反应如下: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ 。有时在特殊情况下,也会产生三个量子或一个能量为1.02兆电子伏的单一量子。当正电子被周围的媒质被散射和使媒质电离而减慢到热能时,电子偶的“湮没”过程发生得最为有效。

电子偶产生和“湮没”的过程为我们提供了关于轻的基本粒子和电磁场相互作用的基本知识。可以预料到,由介子产生和吸收的研究,可以在重的基本粒子的性质方面得到具有同等的重要性的发现。

要查明产生已知的不稳定粒子所需的阈能,并了解加速器是研究这种粒子性质的工具的意义,对已知不稳定粒子作一简单的概述是需要的。限于篇幅,不能对高能粒子的领域作全面的叙述,著者也不能充分陈述这一领域到目前为止的发展,并解释迅速累积的新事实。底下的讨论仅限于已经完全肯定了的粒子;读者应随时在别处<sup>[1]</sup>参考高能物理的更完全和详尽的分析<sup>1)</sup>。

$\mu$ 介子 最初在宇宙射线实验中发现的介子现在称为 $\mu$ 介子。在有附加磁场的云室中,按径迹曲率的方向的不同,观察到带正负电荷的 $\mu$ 介子。任何时候发现 $\mu^+$ 介子在云室中停止,就可观察到带相同符号电荷的电子的产生。电子的径迹常与 $\mu$ 介子的径迹成一锐角,并显示出电子能量有高达50兆电子伏的连续分布,这说明这是一个产生三个粒子的过程,其中两个不引起电离的辐射也被发射了。这种中性的粒子称为中微子:



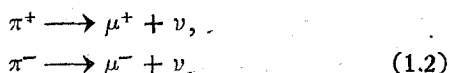
利用电子学仪器进行的实验表明,介子衰变为电子的半

1) 右上角方括号中的数字为书后参考文献的号码。

衰期为  $2.1 \times 10^{-6}$  秒。这一相当长的寿命和绝大部分  $\mu$  介子得以在衰变前减速的事实证明，它们与核的反应并不强烈。这个很小的核相互作用截面值与在核的相互作用中产生介子的大截面值是矛盾的，从而导致假设并发现别的类型的介子—— $\pi$  介子， $\pi$  介子具有很大的介子产生截面。

借电子学的延时装置观测到的  $2.1 \times 10^{-6}$  秒本征半衰期，可以用来识别  $\mu$  介子。能量为 0.51 兆电子伏的正电子“湮没”的延发辐射，在识别正  $\mu$  介子上也很有用。 $\mu$  介子的质量是  $(209.6 \pm 2.4) m_e$ ， $m_e$  是电子的静止质量<sup>[1]</sup>。

$\pi$  介子 在核的相互作用中所产生和吸收的介子称为  $\pi$  介子。在其他过程不存在时， $\pi$  介子以特有的平均寿命  $2.65 \times 10^{-8}$  秒衰变为  $\mu$  介子。反应如下：

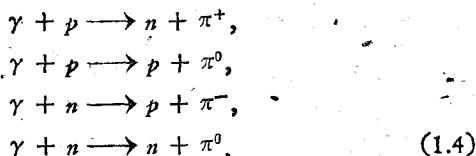


这个衰变週期的观测是  $\pi$  介子存在的证据。静止的中性  $\pi$  介子衰变为两个  $\gamma$  射线光子，每一个  $\gamma$  射线光子的能量为 68 兆电子伏：

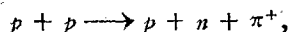


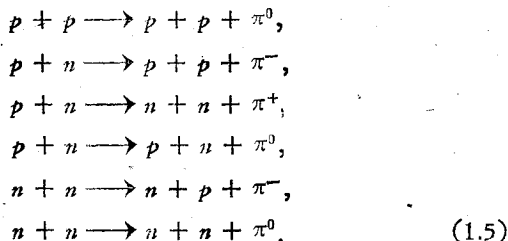
$\pi^0$  介子的平均寿命很短，估计为  $10^{-14}$  秒。蜕变所产生的  $\gamma$  射线可由其所形成的电子偶发现。

$\pi$  介子可由加速器经各种各样的反应产生，形成带正负电荷或中性的介子。概念上最简单的反应为光核反应，即光子直接轰击一个核子。下列的反应已经得到了证明：



核子和核子间的反应有更多种，方式如下：





如果能量足够大,可以加上另一些反应,在其中产生多个 $\pi$ 介子。在200—500兆电子伏范围内的加速器起初的应用是为了产生 $\pi$ 介子,并且大部分实验是用这样的加速器来研究 $\pi$ 介子的性质和测量在用介子作轰击能源的次级反应中相互作用的截面。

在任何有新粒子产生的反应中,所供给的能量必须和粒子的静止能量相等。现在的实验结果表明,带电的及中性的 $\pi$ 介子的静止能量为<sup>[1]</sup>

$$m_{\pi^+} = (276.1 \pm 2.3)m_e = 141 \text{ 兆电子伏},$$

$$m_{\pi^-} = (276.1 \pm 1.3)m_e = 141 \text{ 兆电子伏},$$

$$m_{\pi^0} = (264.6 \pm 3.2)m_e = 135 \text{ 兆电子伏}.$$

产生介子的阈能由产生的粒子的相对动能(对质心坐标系)为零的条件所定出。这就是说,产物以质心的速度运动。同时,在碰撞过程中,动量必须守恒。在 $\gamma$ 射线的反应中(1.4式),入射的动量很小,所以 $\gamma$ 射线的阈能仅略大于 $\pi$ 介子的静止能量,或约为151兆电子伏。在重粒子的碰撞过程中,入射粒子必须供给运动的质心以动能。阈能由下式给出<sup>[1]</sup>:

$$E_0 = 2m_{\pi}c^2 \left(1 + \frac{m_{\pi}}{4M}\right), \tag{1.6}$$

其中 $m_{\pi}$ 为 $\pi$ 介子的质量, $M$ 为核子的质量。对于质子-核子反应[式(1.5)],这一公式给出产生 $\pi^{\pm}$ 介子的阈能为293兆电子伏,产生 $\pi^0$ 介子的阈能为280兆电子伏。

轰击粒子的能量必须远超过阈能,才能产生足够强的介

子。这种过程的激发函数表明,随着超过阈能的能量的增大,截面也迅速增大。此外,轰击粒子在靶的物质中会因电离而损失能量,所以靶的有效厚度决定于超过阈能的大小,并且介子的总产额是能量的更陡的函数。为了说明这一点,用同样的粒子流,芝加哥大学的同步回旋加速器(450兆电子伏的质子)所产生的全部介子通量约为罗彻斯特大学加速器(240兆电子伏)所产生的50倍。随着介子强度的增大,实验变得简单,准确度也增大了。不仅如此,形成的介子的剩余动能,也决定于超过阈能的能量;十分明显,为了全面了解介子的性质,需要研究广阔能量范围内的介子。在加速器的设计中,必须很好地了解,粒子能量要远超过所要研究的反应的阈能。

当靶的原子核或者轰击粒子所含核子不止一个时,阈能低于由式(1.6)所算出的数值。这可以从由几个粒子形成的原子核内部的费米能 $T_F$ 及这样的核内一个核子的平均位能 $V$ 来理解,产生介子的阈能可以近似表示为<sup>[1]</sup>  $T_0 = m_\pi C^2 + T_F + V$ 。对比氮重的核,可用能量低到180兆电子伏的入射核子来产生 $\pi$ 介子。研究这种复杂核的反应阈,对核内核子间力的性质的揭示比 $\pi$ 介子的过程还要多。目前在许多巨大的加速器都用来加速质子,以使实验的解释简单化,而且在实际可能的情况下,氢靶也正在被发展起来,以减小和靶相互作用的复杂性。

重介子 在高空,应用原初宇宙射线对照象乳胶曝光的技术,观察到在高速宇宙射线中的几种其他粒子。起初,按照这些粒子和原子核相互作用的机制而予以分类,并被称为 $V$ 介子、 $K$ 介子、 $\kappa$ 介子、 $\tau$ 介子等等。它们每一个都明显地重于 $\pi$ 介子,需用更高的轰击能量才能使它们产生。其中一些仅在原初粒子的能量极高的过程中观察到,这些粒子形成星裂,从星裂所发出“溅射物”行进的角度及交叉的数目,可以辨别这种粒子。现在的估计及早期的实验结果表明,需要几千

兆电子伏特的原初能量，才能形成足够强的这种“奇异的”粒子，使得在更多普通的  $\pi$  介子存在的情况下能观察到它们。

中性的  $V$  介子在乳胶或云室中具倒置的  $V$  形径迹，它也正是按照这个性质而命名的，电离强烈而散射很小的一支是质子，另一粒子具有  $\pi$  介子的特性，衰变为这样产物且不致电离的中性粒子的静止能量应远大于中子的静止能量。从云室中的踪迹得到的更详细的资料证实，在某些时候， $V$  介子的产物是质子及负的  $\pi$  介子。

但是，在一些早期宇宙射线的观察中，对  $V$  形径迹交叉的分析表明，与两个叉子相对应的质量都小于核子的质量；所以又作了一次更细的分类，即用  $V_1, V_2, V_4$  等来表示。此外，某些带电粒子的方向和轨迹粗细发生突然的改变的解释为：粒子变成了一个带电的和一個中性的分叉；在这种情况下，原初的辐射称为“带电的  $V$  粒子”。于是，原来的类型就称为  $V_1^0$  粒子了。

根据 1953 年 7 月在巴格内尔 (Bagnères) 会议上提出而修正的名词，重于核子的粒子(超子)称为  $\Lambda$  粒子，质量中等的粒子称为  $K$  介子，轻的  $\mu$  介子及  $\pi$  介子仍沿用原来的符号。

加速器也可用来产生并研究重的不稳定粒子。现在引用一个简单的例子作为说明。过去布鲁海文 (Brookhaven) 的宇宙射线能级加速器(见第六章)，所产生的  $\pi$  介子流，在充满氢气的云室中，应用照象所得的资料说明，两种不同的中性  $V$  粒子可成对产生。所获得的少数照片及当时分析的结果表明，发生下述类型过程的几率很大：

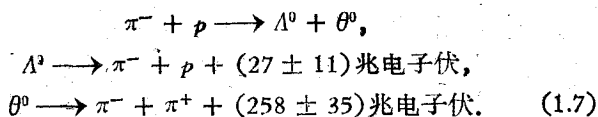


图 1-1 为一草图，采自否勒 (Fowler)、叔特 (Shutt)、桑迪克 (Thorndike) 和惠特莫 (Whittemore) 在 1953 年底所摄的照

片<sup>[2]</sup>。原初  $\pi$  介子径迹 (1.5 千兆电子伏) 的末端表明第一个反应发生的地点。在形成了的两个 V 形径迹中, 一个是质子和负介子, 另一个是两个  $\pi$  介子, 为 (1.7) 的后两个次级反应式所描述。测量径迹间的角度, 并从磁场中径迹的曲率半径得出动量, 便得出上述的  $Q$  值。从这些资料得到两种中性粒子

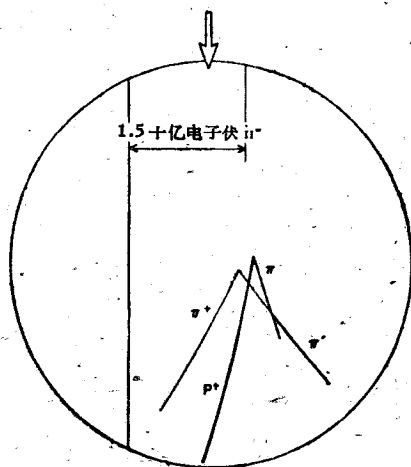


图 1-1 双 V 事例照片的示意图, 发生于充满氢气的云室中, 采用布鲁海文宇宙射线能被加速器中 1.5 千兆电子伏的介子照射的, 产生两个中性粒子, 其一衰变与  $p^+$  和  $\pi^-$  介子, 另一衰变为两个  $\pi$  介子

质量分别为:  $m(\Delta^0) = (1100 \pm 12)$  兆电子伏,  $m(\theta^0) = (538 \pm 40)$  兆电子伏。这样,  $\Delta^0$  的质量大于核子,  $\theta^0$  的质量则处在  $\pi$  介子和核子的质量之间。估计产生这个反应所需入射质子的阈能为 1.0 千兆电子伏。需要更高的能量才得到合适的强度和过程作更详尽的研究。

图解的总结 现在把我们所了解的一些最熟知的核子和辐射之间的关系总结于图 1.2 中, 在图中, 粒子按以千兆电子伏为单位的质能或静止能量排列。每一粒子用一横线及相应

的符号标明，符号的上标表示其电荷。图中所示的状态中只有两个与无限长的寿命相对应，即质子  $p^+$  和电子  $e^-$ 。所有其他粒子在自由状态中是不稳定的，已知的半衰期都已注明；几个已经证实的衰变过程用指向产生的粒子的箭头标明。伴随着衰变过程产生的具有零静质量、同时又不致电离的辐射用  $\gamma$  或  $\nu$  标记在箭头的旁边；放出的能量 ( $Q$  值) 也在括号内给出。在宇宙射线中所观察到的其他粒子 ( $\tau, K, \kappa$ ) 未特别标出。 $\tau$  介子的质量非常接近  $\theta^0$  粒子的质量，看来，其他粒

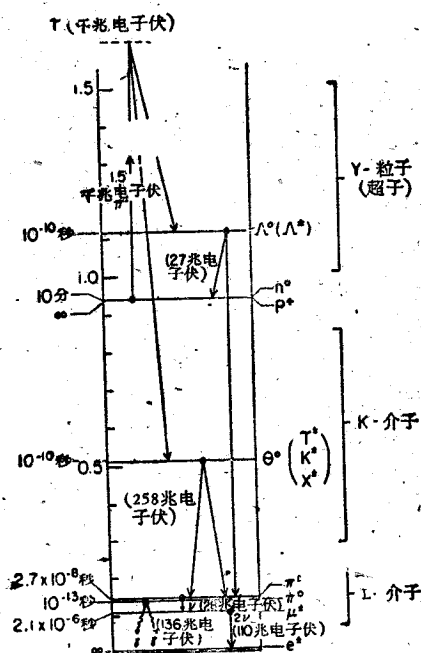


图 1-2 一些熟知粒子的质量-能量图解。每一粒子用一横线表示，并注明以千兆电子伏为单位的相应的静止能量。符号和半衰期也同时标出，箭号示明衰变过程及其产物。布鲁海文双  $V$  事件的反应也于图中述明