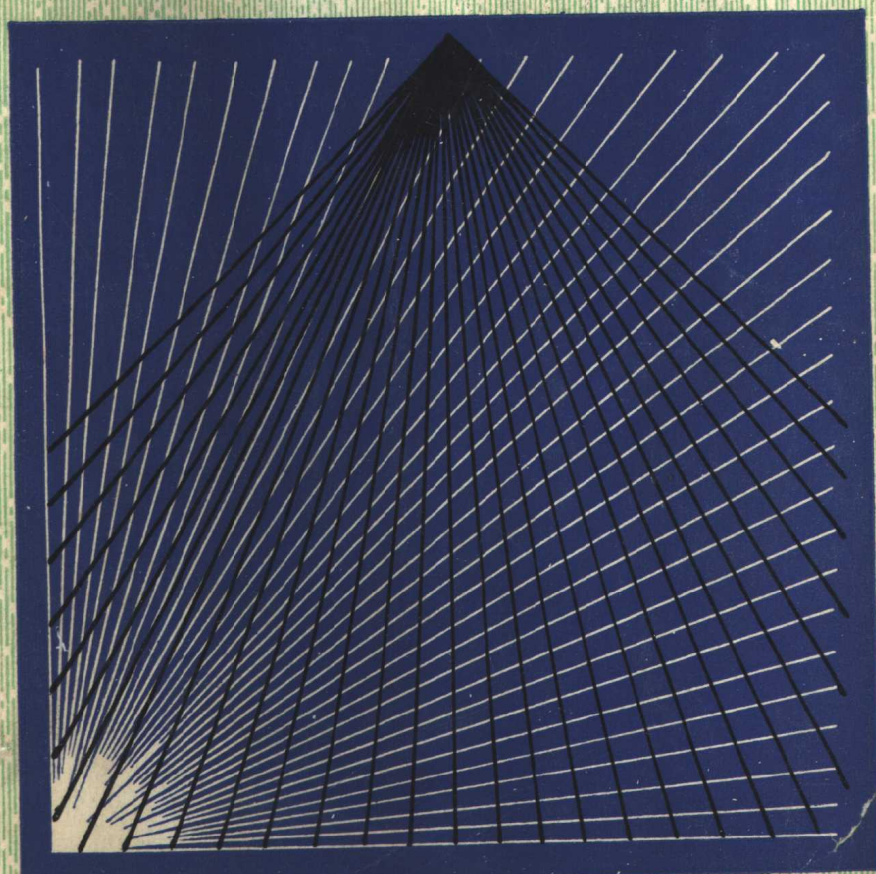


辐射剂量学

〔美〕

F.H.阿蒂克斯 主编
E.托契林

第三卷 辐射源 辐射场 辐射的测量和应用 (下)



原子能出版社

辐 射 剂 量 学

第三卷 辐射源 辐射场 辐射的测量和应用 (下)

〔美〕 F.H. 阿蒂克斯 主编
E. 托契林
于耀明 沈 恂 等译
潘自强 陈丽姝 校

原 子 能 出 版 社

Radiation Dosimetry (Second Edition)

Volume I: Sources, Fields, Measurements, and Applications

Frank H. Attix Eugene Tochilin

Academic Press, New York and London, 1969

辐 射 剂 量 学

第三卷 辐射源 辐射场 辐射的测量和应用

(下)

于耀明 沈 恂 等译

潘自强 陈丽姝 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

沈阳新华印刷厂印刷

(沈阳市兴顺街二段十号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168 1/32·印张15³/₄·字数436千字

1981年8月第一版·1981年8月第一次印刷

印数001—·统一书号：15175·272

定价：2.40元

内 容 简 介

本卷为《辐射剂量学》的应用部分，共有十七章，主要论述医学、工业和科研部门涉及的辐射剂量学问题。内容包括X射线和远距同位素 γ 射线，放射性核素分布源，电子束，重带电粒子束，反应堆，中子和 $n-\gamma$ 混合场，加速器和辐射源，核爆炸产生的起始和剩余辐射，天然和人工辐射本底，空间辐射，超高能辐射和稀有型粒子，辐射防护，放射生物学，辐射治疗学，植入治疗，“过渡区”和工业加工等方面的辐射剂量问题。书中列出了一些有用的数据、公式、图表。

可供医学、工业、农业、科研部门从事辐射工作的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

目 录

第二十六章 宇宙飞行的辐射剂量学	503
I. 引言	503
A. 地球外的辐射源	504
B. 高能带电粒子与物质的相互作用	512
II. 空间剂量学中的物理学和放射生物学因素	519
A. 放射生物学中物理参数的评述	520
B. 与放射生物学有关的实验	530
III. 宇宙飞行的实验	550
A. 宇宙放射生物学实验	550
B. 空间剂量学实验	551
参考文献	562
第二十七章 超高能辐射和稀有型粒子	584
I. 引言	584
II. 超高能辐射的来源	587
III. 超高能辐射的生物物理学	590
A. 亚原子粒子的特性	590
B. 超高能辐射与物质的相互作用	591
C. 相对论性粒子动力学	593
D. 质量阻止本领和线质因数	595
IV. 超高能加速器辐射场的描述	599
A. 外部的原射线束	599
B. 来自靶的散射辐射束	601
C. 散射辐射场	601
D. μ 介子辐射场	602
E. 加速器部件的活化	603
V. 使用电离室对超高能辐射进行剂量测量	603
A. 吸收剂量或吸收剂量率的测量	603
B. 确定辐射组成的电离室测量方法	607
C. 用电离室测量LET	607
VI. 计数管, 箔和阈探测器	609

Ⅵ. 深部剂量的测量	609
Ⅶ. 个人剂量监测	611
参考文献	614
第二十八章 辐射防护剂量学	620
I. 引言	620
Ⅰ. 辐射防护标准的发展	623
A. 早期的发展	623
B. 国际放射防护委员会的建立	624
C. 反应堆和核武器出现以后的发展	625
D. 1950年以来国际放射防护委员会的建议	626
E. 其他国际组织	629
Ⅱ. 辐射防护标准的现行数值	630
A. 可接受的危险度	630
B. 剂量当量与线质因子	632
C. 对个人的照射	634
D. 放射性核素的最大容许浓度	635
E. 全人口的照射	636
F. 辐射防护法制	637
Ⅳ. 外照射剂量学	638
A. 场所剂量学	638
B. 个人剂量学	645
C. 辐射事故剂量学	654
Ⅴ. 内照射剂量学	661
A. 工作场所放射性的控制	661
B. 体内放射性的控制	664
Ⅵ. 全人口防护剂量学	665
A. 遗传剂量	665
B. 核设施附近的环境监测	668
C. 紧急情况时的环境监测	671
参考文献	673
第二十九章 放射生物剂量学	691
I. 放射生物学的物理学问题	691
A. 引言	691

B. 辐射的质	692
C. 吸收剂量	696
D. 剂量-响应关系	706
E. 相对生物学效应	711
I. 吸收剂量表述的实际问题	719
A. 总论	719
B. 样品中剂量的非均匀性	723
C. 非均匀分布中剂量的表述和平均	736
D. 放射生物学中剂量测量的方法	743
参考文献	749
第三十章 X射线和γ射线在辐射治疗中的应用	757
I. 射线与散射介质的相互作用	757
A. 表面反散射	758
B. 百分深部剂量	762
C. 散射函数	767
D. 组织-空气比 ($T_{\text{空气}}$)	781
E. 散射-空气比 ($S_{\text{空气}}$)	789
F. 等剂量分布	796
II. 辐射治疗中的剂量计算	800
A. 固定照射野治疗	800
B. 旋转治疗	805
C. 线束修整方法	810
III. 辐射治疗中的积分剂量	814
A. 积分剂量的意义	814
B. 由等剂量曲线计算积分剂量	815
C. 由能量注量计算积分剂量	816
D. 积分剂量与肿瘤剂量比	818
IV. 人体不均匀性对剂量计算的影响	820
参考文献	821
第三十一章 植入治疗中的剂量学	826
I. 引言	826
II. 镭的物理特性	828
A. 铀系	828

B. 镭与氡的放射性平衡	829
C. 比 γ 射线常数 (I')	829
D. α 和 β 粒子的吸收	830
E. 源盒壁中产生的次级电子	830
F. 镭的安全密封时间	831
Ⅲ. 其他放射性核素的物理特性	832
Ⅳ. 腔内治疗和间质治疗用的辐射源	835
A. 源的类型	835
B. 源周围辐射分布的计算	836
C. 源周围辐射分布的测量	850
Ⅴ. 腔内治疗	853
A. 子宫颈	853
B. 子宫体	857
C. 其他的腔内位置	858
Ⅵ. 外用治疗器	858
Ⅶ. 间质治疗	858
A. 射线照相在剂量计算中的应用	859
B. 插植计算系统	867
Ⅷ. 间质治疗和腔内治疗的发展趋势	885
参考文献	886
第三十二章 过渡区剂量学	897
I. 引言	897
I. 人体内过渡区的某些生物学特点	898
A. 骨的构造	898
B. 某些其它过渡区的特征	905
II. 组织中的能量吸收和次级电子的释放	907
A. 能量吸收	907
B. 次级电子的初始能量	910
IV. 过渡区中剂量的计算	913
A. 对平面、球形和圆柱形边界情况的计算	913
B. 对能量损失沿粒子径迹变化的考虑	921
V. 小梁骨中剂量的确定	926
A. 与小梁骨构造有关的剂量	926

B. 剂量计算的方法	928
VI. 过渡区剂量的实验研究	936
A. 外照射	936
B. 内照射	943
C. 讨论	946
VII. 过渡区剂量学的一些特殊应用	946
A. 300kVp以下的X射线对骨的照射	946
B. 高能X和 γ 射线对骨的照射	947
C. 骨近傍过渡区以外的一些过渡区	950
参考文献	954
第三十三章 工业加工中的剂量学	959
I. 引言	959
II. 电子加速器装置的剂量学	961
A. 电子加速器的类型	961
B. 直线加速器装置	963
C. 低能加速器装置	980
III. ^{60}Co γ 射线装置的剂量学	987
参考文献	994

第二十六章 宇宙飞行的辐射 剂量学

C. A. Sondhaus R.D. Evans

I. 引言

人类开始进行空间探索时所面临的许多危险之一，是关于在银河系中处处皆是电离辐射照射的复杂问题。根据现有的知识我们知道，这种辐射的平均水平超过地球表面的辐射水平，而人只要一离开地球生物圈的保护就必须考虑这种情况。此外，这种电离辐射在空间和时间上是可变的，所以目前还很难可靠地预测可能受到的照射。因而，辐射危险是计划和实施载人空间飞行中的一个重要因素。本章试图对在空间所遇到的电离辐射和较熟悉的地球上的辐射源之间的区别，以及由此产生的对空间辐射剂量学提出一系列特别要求的物理学和生物学因素作一概述。

对空间的主要天然电离辐射源我们已有相当清楚的了解。这在一些书籍和著作中已有详尽的论述(Tobias和Wallace, 1961; Simpson, 1961; Hess, 1964; McDonald, 1965),因而在此只作简略概述。这种辐射大都是由高能带电粒子产生的，它与物质的相互作用是当前集中研究的一个课题。适合探测这种辐射的仪器必须满足(a)相互作用的物理性质，(b)重量和体积的限制，以及(c)空间辐射照射的特殊的物理、时间和几何特性所产生的生物学后果所提出的要求。在推导和复制由高能带电粒子辐射所引起的组织内能量吸收的模式方面已做了相当多的工作。为了估计空间飞行中危险的性质和程度，已用哺乳动物、昆虫和培养细胞做了实验。辐射剂量问题可能会影响将来的宇宙飞船的设计，它

的分析要求对所有过去在人的放射生物学上的经验作仔细的评述。预测、减小、测定和说明辐射照射的大小，无疑将会增加未来的远距离宇宙飞行成功的可能性。

关于宇宙飞船飞行中的放射生物学和辐射环境因素的一般评述，可以参考几篇新近发表的文章(Simons, 1960; Bobkov等, 1964; Langham等, 1965; NAS-NRC, 1967)。

A. 地球外的辐射源

在地球表面，天然本底辐射水平（参阅第二十五章）是小而可变的。它主要来自地壳内放射性核素的 γ *辐射，机体组织内痕量元素的 β 和 α *辐射，以及宇宙射线所组成。所有这三种辐射源的剂量约为每年100—200毫拉德(Morgan和Turner, 1968)，其中宇宙辐射约占此总量的一半，而另一半大致为其他两种辐射平分。在离开地球表面并到达轨道高度时，地球上的 γ 射线成分消失了，而来自身体组织的辐射仍旧存在。这时第三种成分——宇宙射线就突出出来了，但它由于高度、纬度和太阳活动周期的相位不同而变化很大。在宇宙航行期间还可能碰到两个新的辐射源：飞船上的核动力辐射源和在其他行星表面或附近可能存在的放射性。这些可能是超出了本章所论的范围，因为它们可以通过适当应用通常的剂量测量技术来解决。

1. 银河系宇宙射线

银河系的宇宙射线主要是质子，但也包括多电荷的电离重核，所有这些都发源于太阳系以外^①。它们被加速到很高的能量，而且在星际空间作了长时期的飞行（例如参阅Fermi, 1949; Peters, 1952; Morrison, 1961; Ginzburg和Syrovatski, 1964）。它们的原子序数可大至50左右，而大约85%是H核（质

* 原文有误——校者注。

① 我们把中微子排除在外，虽也遇到它，但不是为生物学所关心。

子)，约14%是He核(α 粒子)(Waddington, 1961)。它们的能量范围可到 10^{20} 电子伏(Linsley, 1963)，其能谱能够用衰减的指数函数来表示(Simpson, 1963)。银河系宇宙射线粒子自各个方向来到地球附近，它们通过导致末端吸收的电离(对于高Z粒子的“细化”)和可以在组织里造成局部区域非常强烈电离的非弹性碰撞(“星裂形成”)这两种形式向物质传递能量(Tobias, 1952; Schaefer, 1954, 1958; Yagoda, 1956, 1962)。在大气层中，由于这些相互作用而产生的次级粒子一直到海平面都有作用。先驱者V空间探测器的测量结果表明，除耀斑之外，在太阳最活动期间，自由空间中大约1克/厘米²的物质后面各向同性的粒子通量密度为2.5粒子/厘米²·秒，空气电离率为 0.6×10^3 静电单位/厘米³·小时(Winckler, 1961)。在太阳最不活动期间，由于行星际磁场对低能粒子的屏蔽减小，粒子通量密度增加到原来的2或3倍。自由空间宇宙射线强度，看来在离太阳1.0和1.5天文单位之间是相当恒定的；由于地球的总吸收使宇宙射线的强度在地表附近减至其值的一半。

在靠近地球表面的地磁场内，银河系宇宙射线的能谱受地球磁场的影响而使其随纬度而变化。在磁赤道上的低卫星轨道高度时，由于地磁场的屏蔽作用仅容许具有最小动量约 $15\text{GeV}/c$ ($E_{\text{动}} = 14\text{GeV}$)的质子进入近地区。在 30° 磁纬度上最小动量值大约是 $7\text{GeV}/c$ ($E_{\text{动}} = 6.1\text{GeV}$)，接近极区时动量阈值趋向零，它是磁纬度余弦的四次幂减小的。因地磁场的缘故，正带电粒子自西到达地球表面要比从东到达容易，观察到的效应也支持初级宇宙射线主要是带正电荷的观点。在太阳最活动的周期内(下次在1970年出现)，行星际的磁屏蔽场将最大限度地叠加在地球的磁场上，使得由磁纬度 54° 到 90° 之间进入近地区所必须的最小动量是一个常数。图1(ICRP, 1965)表示在最近的两次太阳最大(1958)和最小(1954)的活动期附近的几年期间，在90000英尺高度上作为地磁纬度的函数所计算的剂量率。对上层大气层里由于初级宇宙射线粒子与 N_2 和 O_2 的碰撞产生的中子所造成的

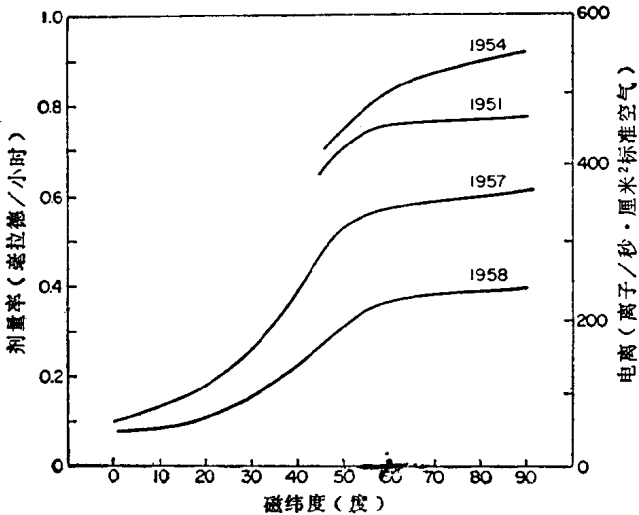


图1 在1951, 1954, 1957及1958年期间, 在90000英尺高度上, 作为地磁纬度函数计算的银河系宇宙辐射的剂量率(ICRP, 1965)

次级中子剂量也做了计算 (Hess 等, 1959, 1961; Hess, 1965; Flamm和Lingenfelter, 1964; Foelsche, 1964; ICRP, 1965)。

2. 地磁捕集辐射

一个进入波动的地球磁场的带电粒子, 如果发生一定的能量损失, 而且它的入射能量和角度值适合于在该点进入地球磁偶极子场时, 那它就可能进入一个封闭的轨道。这些被捕捉到的粒子的贮集使得在一定高度范围内质子和电子的通量密度增加到很高的水平。人们预言过这个区域并在1958年用实验作了证实, 该区域包含的天然辐射也已详细地研究过 (Christofilos, 1958; Van Allen, 1958, 1959, 1961, 1963; Van Allen等, 1959; Yagoda, 1960)。

地磁捕集辐射的范艾伦带现已知是由在一双重环面区域内捕捉的质子和电子构成, 带中的质子注量有两个最大值 (Freden和White, 1960, 1962; Singer, 1960, 1961; O'Brien, 1964)。带的内层相当稳定, 而外层随时间而变化很大。此带从不到1000公里

的高度开始，内层强度最大值在大约3000公里处，能量大于30兆电子伏的各向同性的质子通量密度超过 2×10^4 /厘米²·秒，而外层最大值是在赤道上空7000公里高处，其强度约有内层的三分之一。此带延伸至约70000公里的高度。所捕捉的电子的能量可达几百万电子伏特；质子能量至几亿电子伏特。在2000公里处电子强度最大，具有大约0.5兆电子伏能量的各向同性的通量密度超过 10^4 /厘米²·秒，该值受到磁暴的强烈影响。在1958及1962年的Argus和Starfish核爆炸产生了人工带：后者在地磁圈内释放了

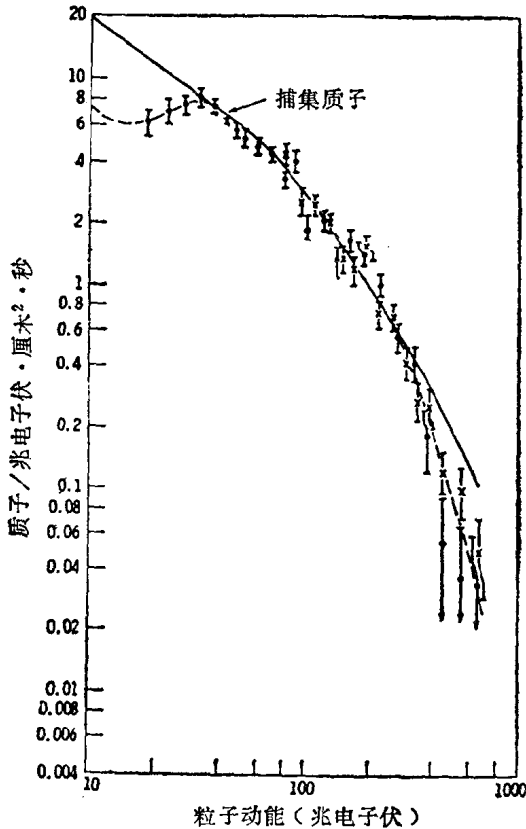


图2a 在地磁捕集辐射内层区域各向同性的微分质子通量密度 (兆电子伏⁻¹·厘米⁻²·秒⁻¹) 与能量 (兆电子伏) 的关系 (Frenden和 White, 1962)

大约 10^{27} 电子，其中大多数被捕捉住 (Christofilos, 1959; McIlwain, 1963; Hess, 1963a, 1964; Van Allen, 1963)。地球磁场的不对称性在南大西洋上面造成一个异常低的磁场区，在那儿被捕捉的质子轨道比在其他地方都更接近地球；从双子座-4飞行中所得到的实验资料表明，在200公里高度，在1.5克/厘米²屏蔽层后面峰值组织剂量率约为100毫拉德/小时。

综合迄今大多数人造卫星实验的资料，已经建立了一个该辐射带的模型。现在已经有了作为能谱和通量密度图的用计算机法广泛类比分析的结果。图2 (a)表示内层区域各向同性的质子通量密度的微分能谱(Freden和White, 1962)；图2 (b)和(c)都是有代表性的质子和电子各向同性的通量密度图 (Vette, 1967)。这些图利用了基于磁场强度 B 、到地球中心的径向距离 L 和磁纬度 λ 的座标系统的各种组合 (McIlwain, 1961, 1966)。现在已有很

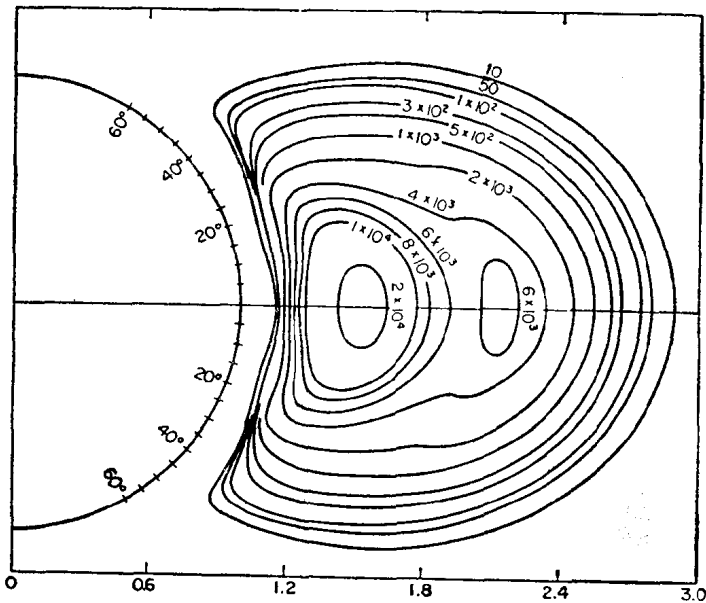


图2b 1963年9月，作为磁纬度 λ (度) 和距地球中心的径向距离 L (地球半径) 的函数，能量大于34兆电子伏的各向同性的质子通量密度 (厘米⁻²·秒⁻¹) (Vette, 1967)

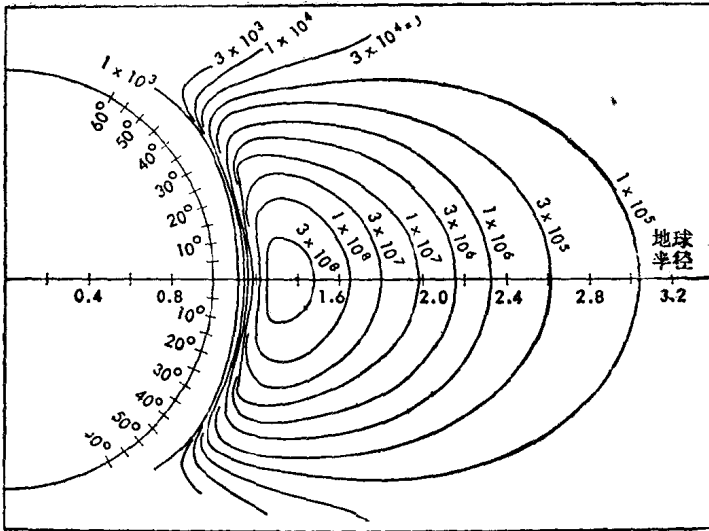


图2c 1963年1月到9月，作为磁纬度 λ （度）和距地球中心的径向距离 L （地球半径）的函数，能量大于0.5兆电子伏的各向同性的电子通量密度（厘米⁻²·秒⁻¹）（Vette, 1967）

多制成的表格（Vette, 1966, 1967）。由于这些分析的结果，质子和电子的通量密度以及能谱数值在模式环境中的任何一点都可以得到，从而就能对典型轨道的人造卫星作轨道剂量的估算。这些数据是近似的，粒子能量和总剂量这两个平均值当然必须是在整个轨道上的平均。能量范围不超过7兆电子伏的电子能谱可以用指数衰减函数来表示。捕捉的质子能谱与银河系的辐射相似，是一个陡峭的衰减指数函数，但最大能量较低（约100兆电子伏）。在内层高强度区域的中心，在2克/厘米²屏蔽后面体表的质子剂量率约10拉德/小时，这是一个有代表性的值；在屏蔽层内受阻的电子所产生的韧致辐射可能造成10倍于它的剂量率。更详细的资料读者可查阅其他文献（Van Allen, 1963; McIlwain, 1963; McCormac, 1966; Vette, 1967）。

3. 太阳耀斑

在太阳强烈活动的时期（即大量太阳黑子的出现），由于在

太阳表面邻近黑点簇的区域内磁场扰动而可能发射等离子体射流或“耀斑”。黑子比太阳表面的平均温度低 1000—2000°，它们是磁极化的，并出现于太阳纬度 $\pm 8-30^\circ$ 之间。耀斑发生在某些一定构型的黑子附近，迅速扩大，一般用光学方法可以看到的时间不到一小时。耀斑的能量似乎是来自邻近黑子的磁场。耀斑的大小从经常出现的很少注意到的最小耀斑到每11年太阳周期内太阳最活动的几年期间只出现几次的巨大的耀斑。一些较大的耀斑发射带电粒子和紫外线、X射线和射频辐射，它们在地球附近是可以探测到的，并且引起地球的磁场扰动、无线电噪声和极光。虽然电磁辐射仅在明显的活动时期内发射，但是在明显的活动终止后的几小时至几天内，太阳粒子仍然继续到达地球附近。在初级太阳耀斑辐射中没有探测到中子。在耀斑活动期间发射的高能质子束（通常占85%以上）、 α 粒子及重核束，对捕集辐射带外的空间旅行者构成最大的辐射威胁。

有实验证据表明，耀斑活动产生两类质子。第一种（或“直接的”）成分在可见耀斑发生之后 5—20分钟内到达，它由离开太阳以弯曲路径飞行的高速粒子（约为光速的0.6倍）所组成。最高能量的粒子（高至200—300兆电子伏）首先到达；半小时之后平均能量就降至100兆电子伏以下。在耀斑发生后的第一小时内，辐射源区域逐渐地扩展开来；在这个时期结束之时第二种（或“间接的”）粒子成分就几乎是各向同性地到达。捕集喷射的太阳等离子体的磁场以及行星际的磁场引起带电粒子按照弯曲的轨道飞行而明显地造成这种效应，于是提供了部分粒子的来源。从耀斑开始后的半小时到一天达到最大的强度，然后在持续几天的一段时期内强度慢慢地减小。

从辐射剂量学和对人的辐射学危险评价的观点来看，耀斑产生的质子或 α 粒子场的基本特征是能谱分布和通量密度随时间而变化。

用磁刚度 P （每单位电荷的相对论性动量）而不是用能量作为能谱的参数，得到 $\Phi(>P) = \Phi_{0,exp}(-P/P_0)$ 形式的简单积分谱，