

太阳系行星对宇宙线的遮挡效应分析

学生姓名：李军

指导教师：

培养单位：中国科学院紫金山天文台

学科专业：天体物理

目录

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 摘要..... | II |
| 引言..... | III |
| A. 天体视半径的变化规律..... | IV |
| B. 遮挡率..... | IV |
| C. PyEphem 程序包..... | V |
| 第一章 月球对宇宙线的遮挡作用..... | 1 |
| 1.1 月球基本参数及其变化..... | 1 |
| 1.2 月球遮挡率分析..... | 2 |
| 第二章 行星对宇宙线的遮挡作用..... | 2 |
| 2.1 月球视半径、天顶角和遮挡率随时间的变化..... | 2 |
| 2.2 太阳系行星大小分布..... | 4 |
| 2.3 行星参数分析..... | 6 |
| 2.4 小行星的分类和活动规律以及对宇宙线的遮挡情况..... | 9 |
| 第三章 结论..... | 11 |
| 结束语..... | 错误！未定义书签。 |
| 参考文献..... | 12 |

摘要

宇宙线是来自宇宙的高能粒子[1]，是天体过程的一种间接表现，对宇宙线的研究都对我们了解天体的形成和演化有着至关重要的作用。但是宇宙线并不是总能顺利地到达地球并被人类观测到，影响宇宙线到达人类可观测区域内的诸多因素中，天体的遮挡作用占其中很大的比重。

经研究，月球对于宇宙线有明显的遮挡效果，本文类比月影，分析太阳系的其他行星对于宇宙线是否有类似的遮挡效应。

经过分析在，2020 年 1 月 1 日 00:00 至 2024 年 12 月 30 日 00:00 这段时间里，金星和木星对于宇宙线的遮挡相对于其他行星显著一些，分别可以达到月球的 0.018% 和 0.039%；太阳系其他小行星的遮挡效应可以达到月球的 0.04%：同月影相比，这些天体对于宇宙线遮挡效果可以被忽略。

关键词：宇宙线，行星，月影，遮挡率

引言

一般来说，宇宙线是来自宇宙的高能粒子[1]，也是人类能获得的来自太阳系外的直接样本[2]。每秒钟每平方米的面积上大约有 1000 多个粒子轰击到大气层上[3]。而且宇宙线是天体过程的一种直观的表现，对宇宙线的研究工作可以追溯到 1929 年。每秒钟每平方米的面积上约有 1000 个宇宙线粒子轰击到地球大气层上[1]。但是宇宙线并不是总能顺利地到达地球并被人类观测到，影响宇宙线到达人类可观测区域内的诸多因素中，天体的遮挡作用占其中很大的比重。

在这当中，日影和月影由于对宇宙线的遮挡作用比较明显，因此自人们开始注意到天体对宇宙线的遮挡作用时，日影和月影变成了被首要研究的对象，于是我们通常可以通过对月影和日影的对比，来估计不同天体对宇宙线遮挡作用的大小。

月影和日影已经经过了天文学家的多次讨论。本文的目的是仿照月影作用的分析 and 计算，对太阳系中的行星进行分析，通过将分析结果和月影作用进行对比，指出相对于月影，太阳系中的行星对宇宙线的能否被忽略。

在一些工作开始之前，我们先介绍一些概念性的知识。

A. 天体视半径的变化规律

天体的视半径是指观测者的眼睛到天体中心的连线与观测者的眼睛到天体切线所形成的夹角度数（本文为了能和[2]中保持统一，在对月球的分析阶段使用角度制，其他地方统一使用弧度制）。但是由于天体运动产生影响，天体的视半径往往是一个动态的值，在以下分析中，本文认为在 100s 的时间内，天体的视半径是保持不变的。

B. 遮挡率

定义某个天体对宇宙线的遮挡率

$$\eta = \sum \Delta t r^2 \varepsilon(\theta)$$

其中， r 为天体的视半径， Δt 为测量时间间隔（本文认为在此时间间隔内的天体视半径是定值）， $\varepsilon(\theta)$ 为探测阵列的探测效率。（为了简化计算，本文对于探测率的计算并没有考虑阵列的探测面积）。 $\varepsilon(\theta)$ 的形式，由以下拟合过程得到：

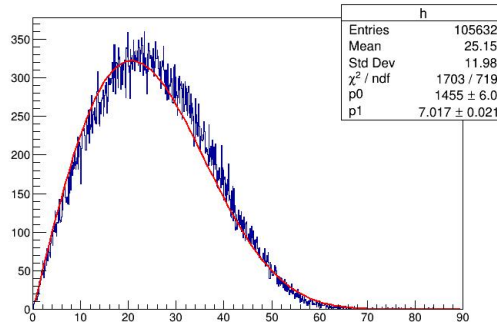


图 a 探测效率和月球天顶角的拟合过程

可以看到拟合给出的指数为 7.017 ± 0.021 . 为了简化之后的计算过程，这里取指数值为 7，可以得到探测效率的解析式为

$$\varepsilon(\theta) = \cos^7 \theta$$

因此，我们可以得到遮挡率为：

$$\eta = \sum \Delta t r^2 \cos^7 \theta$$

C. PyEphem 程序包

本文的一切天文计算、数据处理均通过 PyEphem 进行，PyEphem 是 python 的一个程序包，对于一般的天文计算，该程序包拥有很高的精度。它的主要功能包括：

由于 Ephem 的预测功能，可以精确地定位任意时刻行星和彗星等天体的位置；

可以将不同格式的日期距离等单位互相转换；

用户可以提供观察位置的经度、纬度和海拔等信息，PyEphem 可以根据这些信息确定在特定观察点的天体信息。

Ephem 的功能不止以上这些，但是本文只用到这三个功能。

第一章 月球对宇宙线的遮挡作用

1.1 月球基本参数及其变化

月球是地球唯一的卫星，也是离我们最近的天体，图 1.1 是月球视半径变化规律，在大约 280 个儒略日期间，筛选条件为天顶角小于 40° ，观测站坐标为 90.52° E ， 30.11° N ，海拔 4300 米，月球的_{最大}视半径为 0.29° ，视半径均值为 0.26° 。

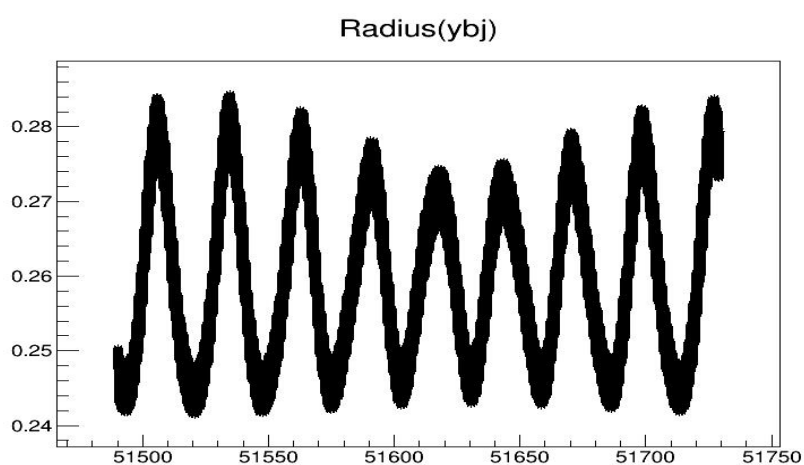


图 1.1 月球视半径随时间变化规律

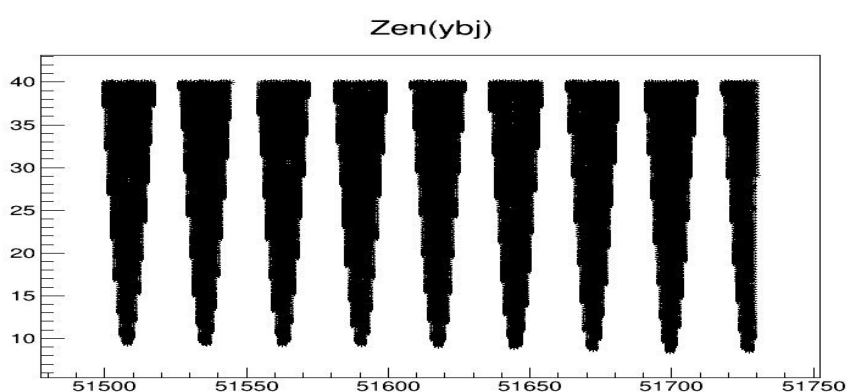


图 1.2 月球天顶角随时间的变化

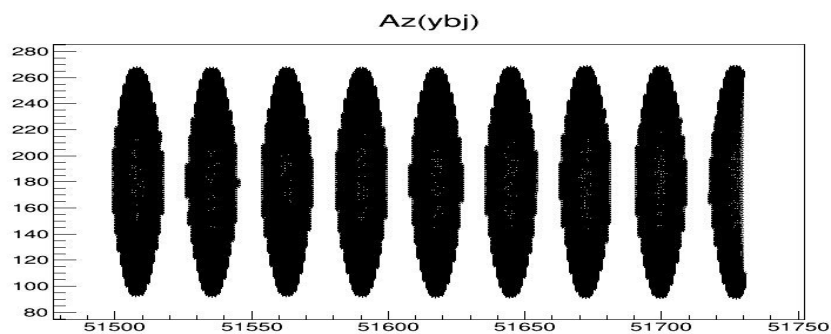


图 1.3 月球方位角随时间的变化

从以上图表我们可以看出，月球的视半径、天顶角和方位角都是根据时间变化而变的动态值。

1.2 月球遮挡率分析

根据 1.1 中的参数变化，我们可以得到一个衡量天体遮挡宇宙线程度的标准 η ，经过计算，我们可以得到，月球对宇宙线的遮挡率 η 的值为 207.120064025 。

第二章 行星对宇宙线的遮挡作用

根据以上分析，我们可以知道月亮对宇宙线的遮挡情况。用同样的方法，更改数据为 2020 年 1 月 1 日之后五年的数据，我们可以得到太阳系其他行星的视半径、天顶角、以及其他参数的变化情况。

2.1 月球视半径、天顶角和遮挡率随时间的变化

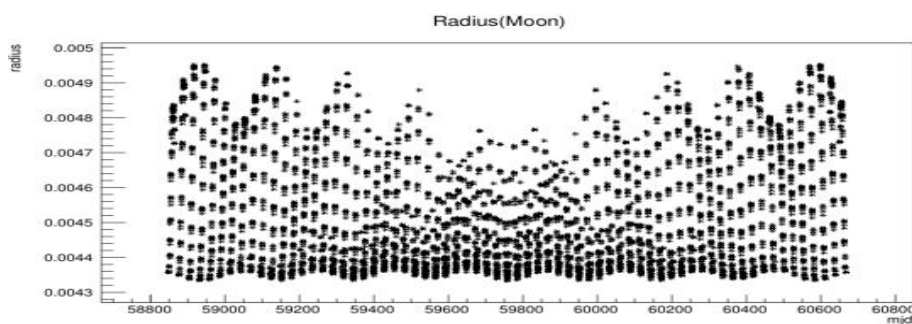


图 2.1 月球视半径随时间的变化

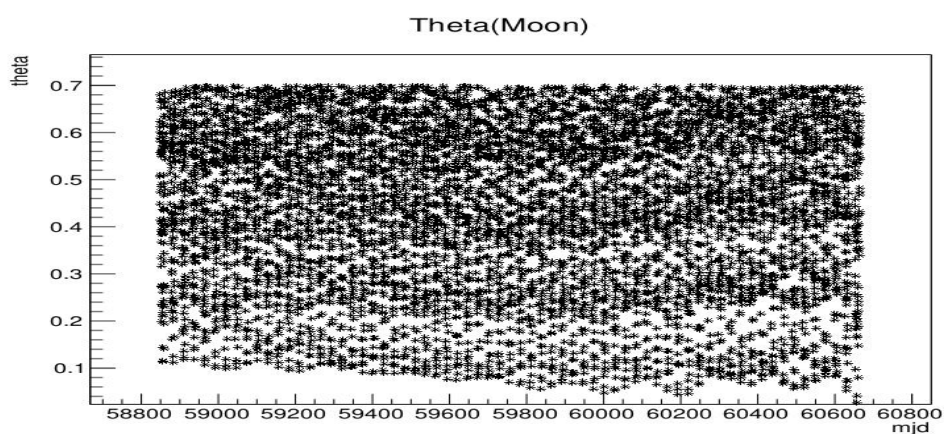


图 2.2 月球天顶角随时间的变化

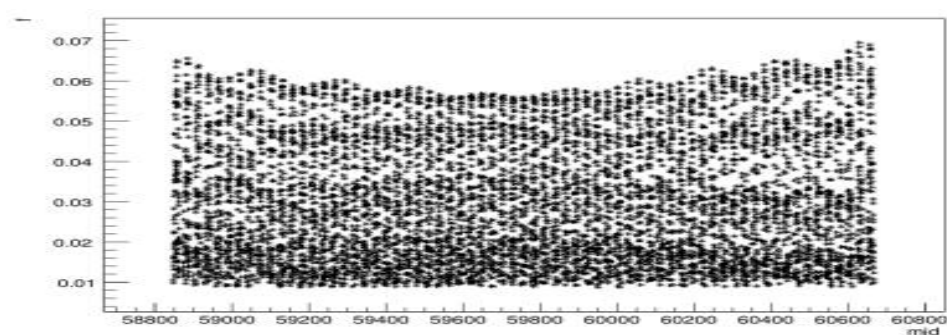


图 2.3 月球遮挡率随时间的变化

上图是月球各参数随时间的变化，时间为 2020 年 1 月 1 日 00:00 之后的 1825 个儒略日。

2.2 太阳系行星大小分布

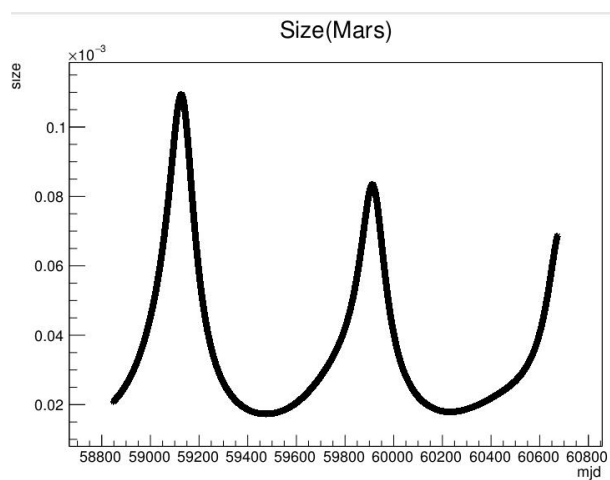


图 2.4 火星视半径随时间的变化

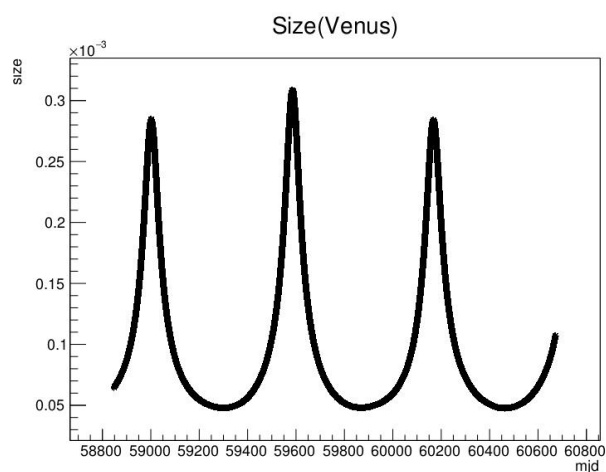


图 2.5 金星随时间的变化

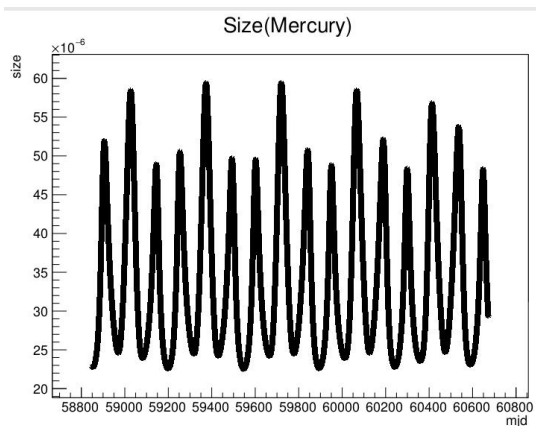


图 2.6 水星视半径随时间的变化

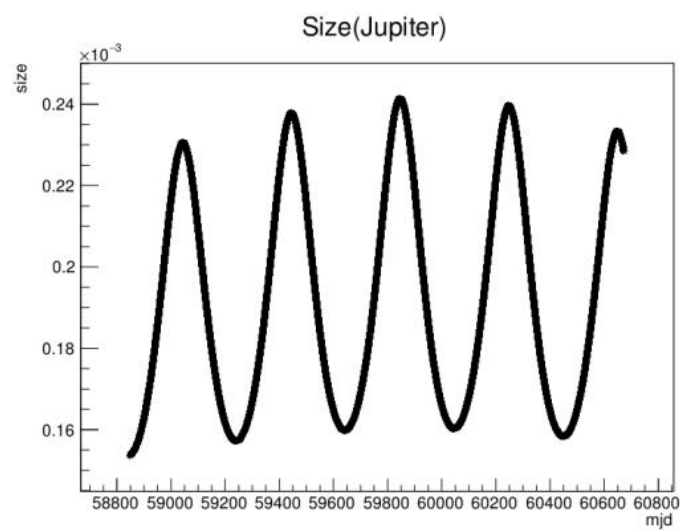


图 2.7 木星视半径随时间的变化

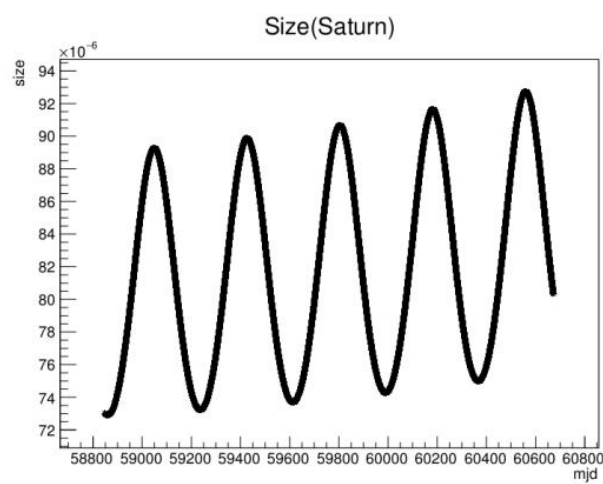


图 2.8 土星视半径随时间的变化

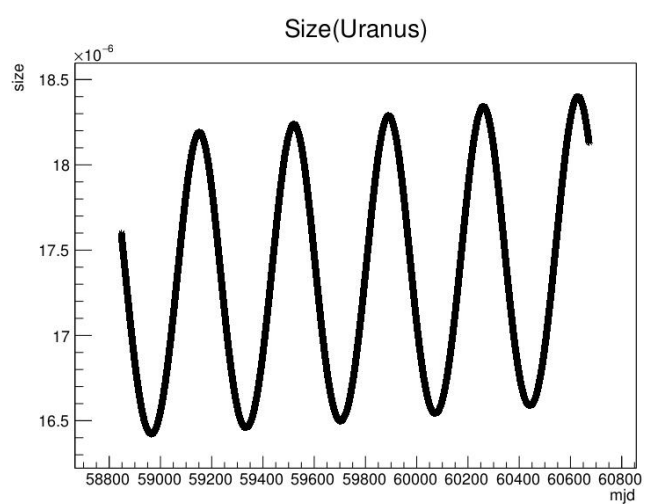


图 2.9 天王星视半径随时间的变化

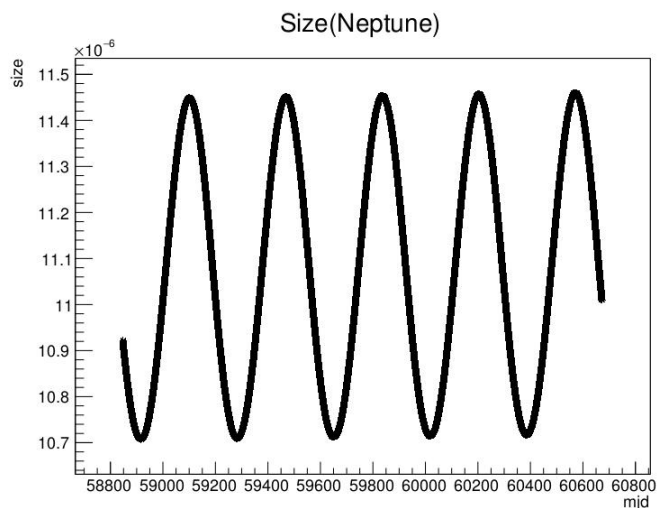


图 2.10 海王星视半径随时间的变化

从以上结果可以看出，行星的视半径是一个随着时间变化的动态值，而且具有一定的周期性.在太阳系各大行星的半径变换中，由于要考虑到行星运行时太阳的状态和行星相对于地球的位置，因此某些行星的视半径随时间的分布不是一个严格的周期分布。但是我们可以模拟出在 2020 年 1 月 1 日 00: 00 到 2024 年 12 月 30 日 00: 00 太阳系主要行星的视半径分布供本次分析使用。

2.3 行星参数分析

在筛选条件为天顶角小于 40° ，筛选时间为 2020 年 1 月 1 日 00: 00 至 2024 年 12 月 30 日 00: 00，我们可以到的各行星的参数变化如下：

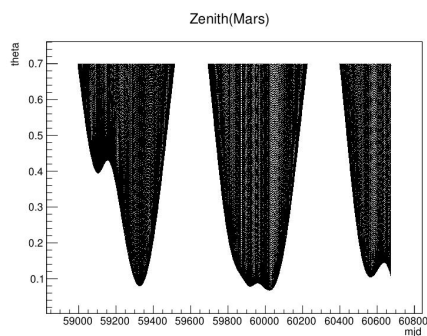


图 2.11 火星天顶角随时间的变化

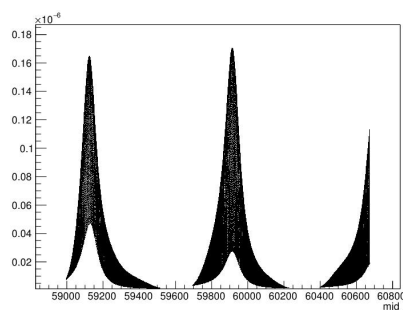


图 2.12 火星方位角随时间的变化

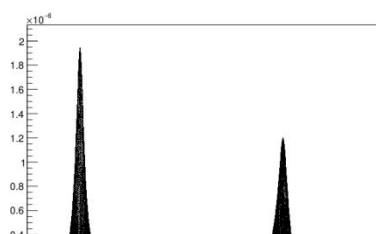
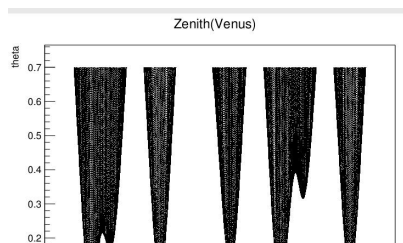


图 2.13 金星天顶角随时间的变化

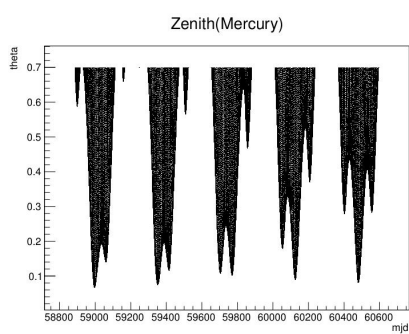


图 2.15 水星天顶角随时间的变化

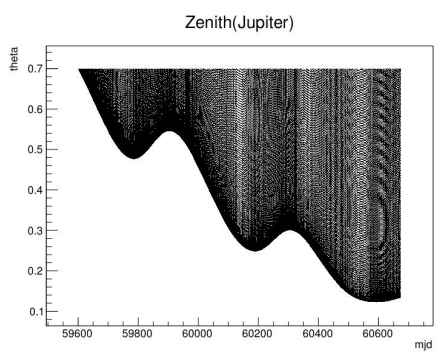


图 2.17 木星天顶角随时间的变化

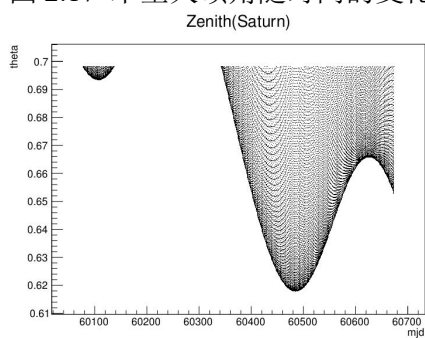


图 2.19 土星天顶角随时间的变化

图 2.14 金星方位角随时间的变化

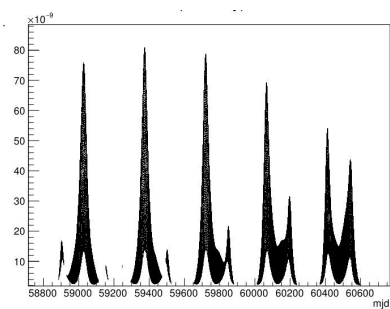


图 2.16 水星方位角随时间的变化

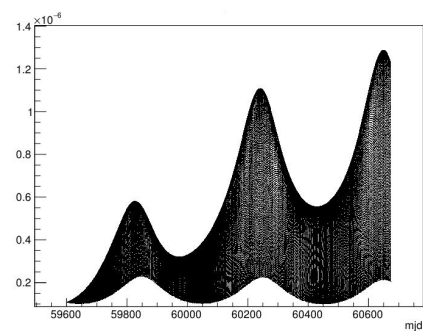


图 2.18 木星方位角随时间的变化

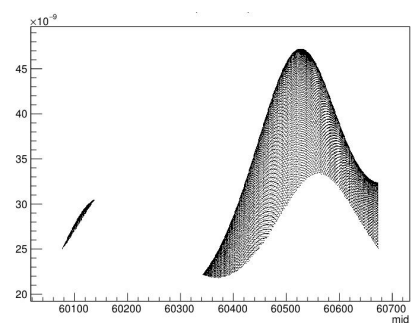


图 2.20 土星方位角随时间的变化

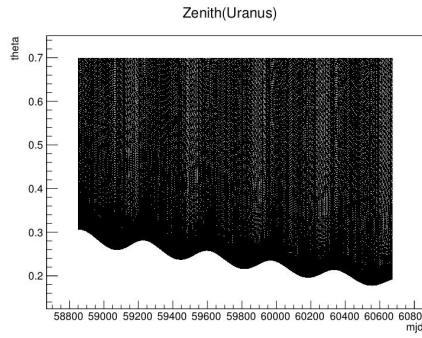


图 2.21 天王星天顶角随时间的变化

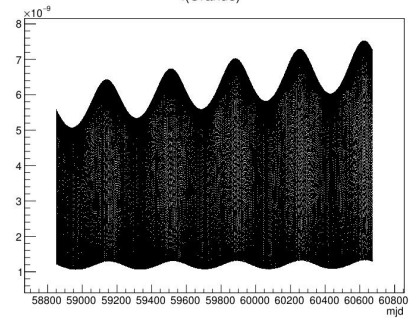


图 2.22 天王星方位角随时间的变化

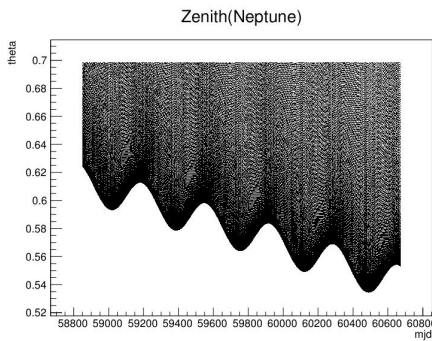


图 2.23 海王星天顶角随时间的变化

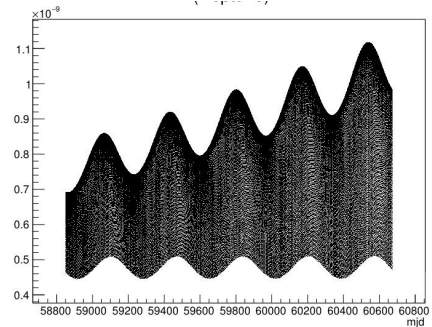


图 2.24 海王星方位角随时间的变化

经过计算，我们可以得到太阳系主要行星对于宇宙线的遮挡情况如下：

| 天体 | 遮挡率 | 与月球遮挡率的比值 |
|-----|-------------------|------------------------|
| 火星 | 0.00689729430695 | 3.330094715554683e-05 |
| 金星 | 0.0381211310996 | 0.00018405329912894708 |
| 水星 | 0.00318853988725 | 1.5394645141018947e-05 |
| 木星 | 0.0803391225414 | 0.0003878867212579793 |
| 土星 | 0.000861242620965 | 4.1581805462412636e-06 |
| 天王星 | 0.00145070563109 | 7.0041772047487175e-06 |
| 海王星 | 0.000153157267836 | 7.394612808612953e-07 |

表 2.1 太阳系主要行星对宇宙线的遮挡情况

可以看出，在 2020 年 1 月 1 日 00:00 至 2024 年 12 月 30 日 00:00 这段时间里，金星和木星对于宇宙线的遮挡相对于其他行星显著一些，分别可以达到月球的 0.018% 和 0.039% 。

2.4 小行星的分类和活动规律以及对宇宙线的遮挡情况

截至 2006 年，人类已经发现超过数十万颗小行星，预估计太阳系中的小行星会超过百万颗[4]。本文研究的小行星是太阳系内比行星更小的天体，这些小行星大多分布在火星和木星之间的“小行星带”上。小行星距离太阳大约 2.2~3.6 个天文单位之间，公转周期一般在 3.5~6 年[5]。本文的分析根据 Ephem 数据库的标准，把所有能观测到的小行星分为主要小行星（Critical-list numbered minor planets）、远距离小行星（Distant minor planets）和奇异行星（Unusual minor planets），这些行星的视半径信息如下（截止到 2018 年 6 月 28 日）：

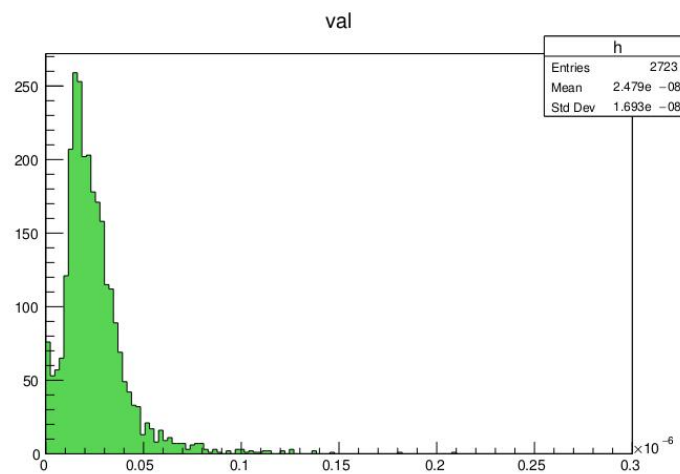


图 3.1 主要小行星视半径分布

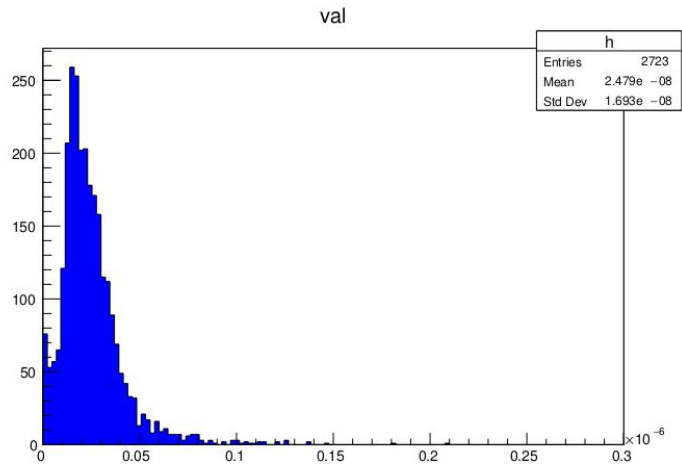


图 3.2 远距离小行星视半径分布

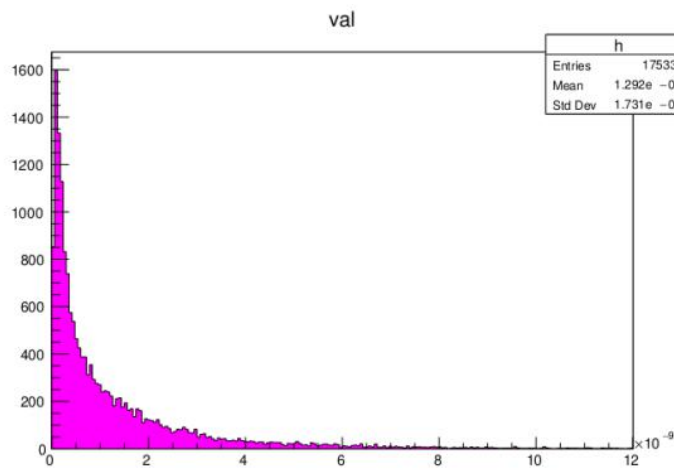


图 3.3 奇异行星视半径分布

经过计算，我们可以得到太阳系小行星对于宇宙线的遮挡情况如下：

| 天体 | 数量 | 遮挡率 | 与月球遮挡率的比值 |
|--------------------------------------|-------|----------------|------------------------|
| Critical-list numbered minor planets | 650 | 6.98885e-07 | 3.374298879685758e-09 |
| Distant minor planets | 3747 | 3.55714e-05 | 1.7174289785709234e-07 |
| Unusual minor planets | 18169 | 0.0857058 | 0.0004137976704644851 |
| All minor planets | 22166 | 0.085742070285 | 0.00041397278766122186 |

表 3.1 太阳系主要行星对宇宙线的遮挡情况

可以看出，在 2020 年 1 月 1 日 00:00 至 2024 年 12 月 30 日 00:00 这段时间里，在不考虑重叠和磁场作用的情况下，可以达到月球的 0.04%。

第三章 结论

在本工作开展之前，我们可以对太阳系除了太阳和月球之外的天体对于宇宙线的遮挡作用有一个感官上的猜测，同月球相比，这些天体的遮挡效应并不是很显著。跟据本文的分析，在太阳系的主要行星之中，除了金星和木星的遮挡效应能分别达到月球的 0.018% 和 0.039% 外，其余的天体的遮挡效应可以忽略不计。

在太阳系众多小行星中，本文涉及到的有 22166 颗。如果不计算重叠情况的话这些小行星对于宇宙线的遮挡可以达到月球的 0.04% 。

致谢

非常感谢张毅老师在这次工作中对我的指导，从课题的选择到项目的最终完成，张老师都始终给予我细心的指导和不懈的支持。也很感谢黄晓渊老师在论文拟写和修改过程中给予的帮助和支持。两位老师不仅在工作和学习上给予学生指导和帮助，在我们每个学生的成长过程中也付出了极大的关怀。他们严谨的治学精神影响了项目组的每一名学生，向两位老师致以崇高的敬意。

参考文献

- [1] 日影模拟程序的开发及相关数据分析算法的研究 南云程
- [2] ARGO-YBJ 实验的宇宙线月影及“膝”区能谱唯象研究 王博
- [3]《Cosmic Rays and Particle Physics》托马斯 K. 盖瑟 剑桥大学出版社 1990
- [4] 《小行星主带上单个行星的质量上限》 李培俊 周济林
- [5] 《太阳系的小天体——小行星》 何国山