

每秒有多少宇宙线穿过我们的身体



赵 静 马玲玲

(中国科学院高能物理研究所 100049)

上期文章《空气电离之谜》^①指出了空气电离除了来自于地表可能存在的放射性物质之外,主要来自于宇宙线;探测器计数率越高,说明单位时间内打在探测器上的宇宙线粒子越多,那会有多少粒子打到人体上呢?

手机上时不时就会出现如图1的短信通知:

这类垃圾信息时不时就会出现,这些消息借助着类似“电视播报中央13台新闻”这样的权威媒体,试图蒙蔽大家,但是这些信息来源并不靠谱,是谣传。但是这类消息还是会勾起大家的好奇心,到底宇宙射线是什么?宇宙射线真的会损坏手机,损伤身体吗?宇宙线对我们的生活有帮助吗?下面我们将设计一个实验来解答我们的生活环境中有多

提醒家人今晚 12:30 - 3:30请务必关机:电视已经宣布了这一消息。请仔细阅读一下和照顾好自己。告诉你其他的亲爱的亲人和朋友:今天晚上从12:30 - 凌晨 3:30,极度危险的、高辐射的宇宙射线将会贴近地球而通过。所以,请关掉你的手机,不要让你的手机靠近你的身体,可能会造成伤亡或者损坏。请告知这条消息给你关心的人,晚上记得关机,记得群发给你的朋友,关爱身边的每一个人~群发,电视播报中央13台新闻!

图1 宇宙线辐射短信谣言消息截图

少宇宙线?有多少宇宙线正在穿过我们的身体?

宇宙线粒子是高能粒子,遍布在我们银河系中。当它们到达地球,首先撞击地球外层大气,它们与空气中的原子核相互作用产生新的粒子,一变二,十变百,产生级联效应,这种过程称为广延大气簇射(英文 Extensive Air Shower, 简称 EAS, 本系列后续文章会详细介绍),而产生的粒子被称为次级粒子,这些次级粒子像雨点一样打到地面上,被称为“粒子雨”,所以我们无时无刻不生活在“粒子雨”中,如图2所示。

在这些“粒子雨”中,有一种粒子叫做缪子(英文 muon, 简称 μ)^①。缪子是一种带电的基本粒子,质量是电子的 207 倍,静止寿命为 2.2 微秒。自 Carl D. Anderson 和 Seth Neddermeyer 等人于 1936 年在观察宇宙射线过程中发现缪子以来,缪子科学取得了长足的发展。世界上的缪子源有两种,一种是依靠人工加速器产生的,主要应用于材料科学、化学、生物以及核物理等领域。另外一种缪子源便是宇宙射线引起的“粒子雨”。“粒子雨”中的缪子能量较高,属于相对论性粒子,一方面其寿命受到相对论的时钟变慢效应而延长,另一方面缪子在介质中的电离能损很小,韧致辐射和直接产生 γ 光子几率极小而可以忽略不计,而且是弱作用粒子,因此缪子能够穿透大量物质而到达地面。所以我们这里所说的“每秒有多少宇宙线穿过我们的身体”中的宇宙线其实主要是指“粒子雨”中的缪子。

那么每秒有多少缪子打到人体上呢?这个物理量的计算,类似于雨量器的工作原理。

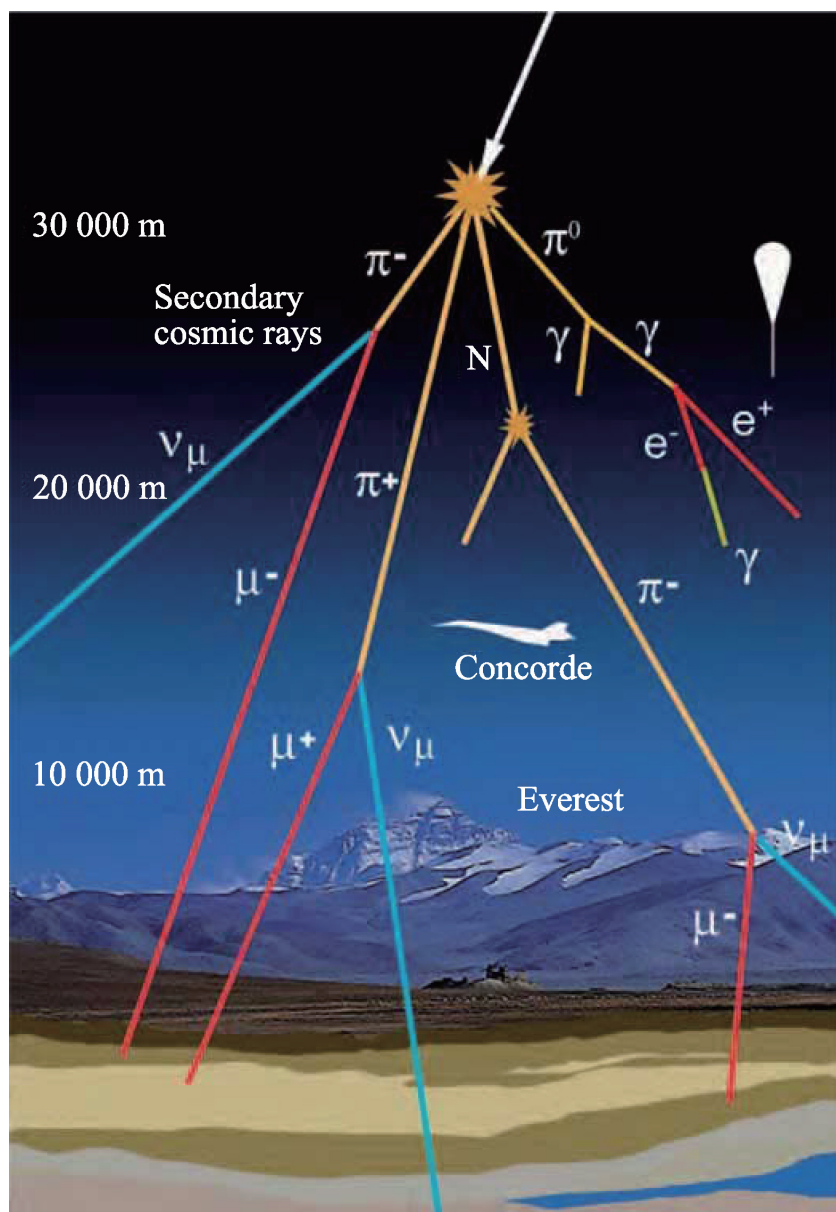


图2 宇宙线缪子产生过程(图片来源: <http://physicsopenlab.org/>)

这里要先回忆一下小学课程中的雨量器是怎么测量雨量的。下雨了,雨时大时小,我们怎么来表征雨的大小呢?可以用雨量器测量雨量大小。

图3中雨量器顶部有个圆形漏斗,其上表面面积为 A ,雨量计漏斗确定一个选定的水平面。雨量器经过时间 T ,收集到了体积为 V 的雨水。用收集的雨量除以收集的开放面(就是那个漏斗的圆形的面积)就是雨的大小为:

$$F = V / (A \times T) \text{ (ml/m}^2\text{/s)} \quad (1)$$

如果 F 大就说明雨下得越急,如果 F 小就说明

雨下得缓。

一、实验设计

1. 宇宙线流强

类似于雨量器的计算方式,每秒钟缪子的个数也可以通过这样的方式进行测量。这里要引入一个新的概念:流强,流强定义为单位时间内某方向单位立体角内通过单位面积的粒子数。所以类比于雨量器,需要知道实验设备的面积(A),收集“粒子

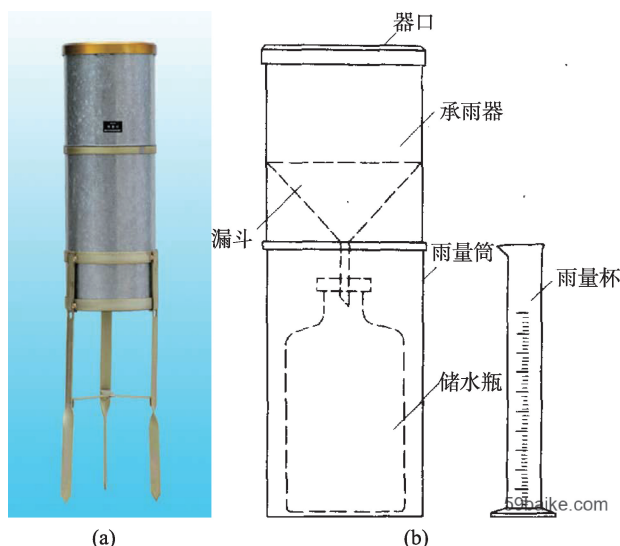


图3 雨量器(a)雨量器的外观;(b)雨量器的内部结构示意图

雨”的时间(T)以及实验设备所指方向(天顶角 θ)和张开的立体角 sr ,以及收集了多少缪子(N)。宇宙线在这段时间(T)内的平均流强为:

$$F = N / (A \times T \times Sr) \text{ (l / (m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr))} \quad (2)$$

2. 实验设备

如图4所示,由上下两个闪烁体探测器构成的缪子探测装置^⑥。不同于雨量测量,缪子流强测量需要两台探测器作为测量装置,用于排除噪声。这是因为空气中还有一些游离的粒子,比如地面的放射性物质,这些物质也可以触发探测器,但这并非我们想要的缪子,被称为“噪声”。那么如何保证测量到的信号是真实的宇宙线,而不是噪声呢?可以

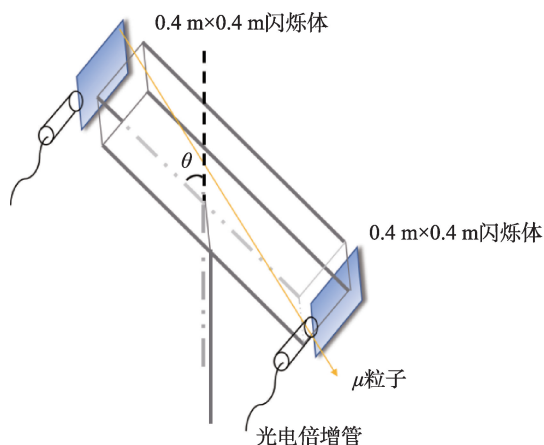


图4 测量缪子流强的实验设备^⑥

利用宇宙线“粒子雨”中缪子和噪声的差异进行区分,缪子是来自于天上且速度接近光速,而地面放射性物质是来自于地面,且不可能同时触发2个探测器。两台探测器一上一下,一前一后测量到的信号,即上面的探测器测量到的时间比下面一台测量到的时间早,并且时间差与探测器距离除以光速相当,才说明是缪子先后穿过了两台探测器,这样保证测量到的信号是天上来的,而且是同一个缪子。

当我们把图4中的实验设备叠放在一起(即两台探测器的距离为0,此时探测器张开的立体角约为 2π),并水平放置在地面上时得到的计数率为23 Hz,考虑到探测器的面积,我们可以得到缪子流强大约为150个/ m^2/s 。

二、缪子流强是各向同性的吗

“粒子雨”中的缪子流强测量和雨量测量不同的地方在于缪子来自于各个方向,而天上的雨只是来自一个方向。那来自不同方向的缪子流强相同吗?

缪子在大气中飞行的时候在不断地以电离的方式损失能量,其损失能量的速度为2 MeV/g,即缪子穿过1g物质所损失的能量为2 MeV($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳)(下面用J表示焦耳),我们称之为电离能损率。当缪子的能量损失到一定程度后就会在大气中停止或者因为速度低导致寿命短(相对论效应)而衰变掉。因此当缪子穿过的物质质量越多时,衰变掉的缪子数就会越多。如图5所示,大角度的缪子到达地面前穿过大气的物质质量要比正头顶来的缪子穿过的厚度多。大气越厚,大气对缪子的吸收越

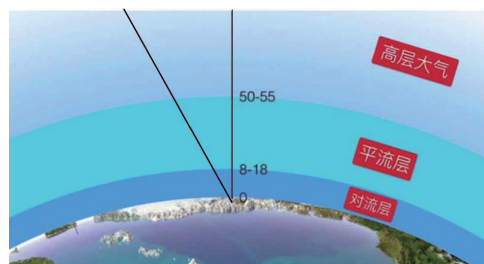


图5 不同的方向的宇宙线穿过的大气径迹

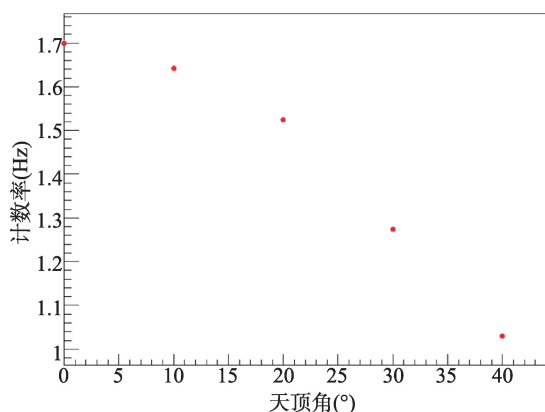


图6 两台探测器拉开1米后,
探测器计数率随探测器天顶角的变化

多,使得缪子的强度越弱,因此大天顶角的缪子流强要比小天顶角的缪子流强小。

将两个探测器拉开(如1米的距离)就可以选出来自不同方向的缪子,然后改变两个探测器的倾斜度可以测量缪子流强随着倾斜角 θ 的变化。我们分别对天顶角为10度,20度,30度和40度的四个方向进行了测量,得到的探测器缪子计数率如图6所示。一般有 $F(\theta)=F(0)\cos^n\theta$ (θ 为天顶角),其中 $F(0)$ 为垂直方向的缪子流强。对海平面 $n=2$ ②。

三、宇宙线辐射对人体是否有影响

“粒子雨”中的缪子穿过人体时和X射线一样发生的都是电离辐射,电离辐射会使缪子或X射线有部分能量沉积在人体内。电离辐射都会对人体产生影响,影响的大小取决于沉积在人体内能量的多少。那“粒子雨”中的缪子穿过人体时引起的电离辐射对人体有多大的影响呢?我们可以根据缪子的流强、缪子的电离能损率以及人体特点来估计“粒子雨”中的缪子对人体的影响。

首先,缪子的电离能损率为 $2 \text{ MeV/g}(1 \text{ eV}=1.6 \times 10^{-19} \text{ J})$,意思是,缪子每穿过 1 g 物质所损失的能量为 $3.2 \times 10^{-13} \text{ J}$,也就是沉积在物质中的能量。

其次,人体的密度为 1 g/cm^3 (人在游泳池水中吸足气就能浮起,呼出气就会下沉,表明人体的平均密度约为水的密度 1 g/cm^3)。对于正常体重的人来说身体的厚度为 30 cm ,那么一个缪子穿过人的

身体时,所沉积在体内的能量约为 $9.6 \times 10^{-12} \text{ J}$ 。

接下来的问题就是每秒有多少缪子穿过人的身体呢?回答这个问题,我们需要知道缪子的流强和人体的面积。根据测量我们知道海平面上缪子的流强约为 $150 \text{ 个/m}^2/\text{s}$,人平躺时的面积大约在 1 m^2 。有了这些数据,可以得到每秒穿过人体的缪子个数约为 150 个/s ,相应沉积的能量约为 $1.5 \times 10^{-9} \text{ J/s}$ 。

我们把这个数字的单位转化为衡量辐射剂量常用的单位希沃特(Sv)(1希沃特等于 1 kg 的物质吸收 1 J 的能量)。假设我们人的平均重量为 50 kg ,就可以得到“粒子雨”中缪子对人的辐射剂量约为 $3 \times 10^{-11} \text{ Sv/s}$,相当于 0.9 mSv/年 。该结果和辐射强度网站③所提及的海平面地区的宇宙辐射强度 0.27 mSv/年 较为接近,但有差别。之所以有差别,是因为我们所考虑的模型过于简单,首先我们不是一直处于平

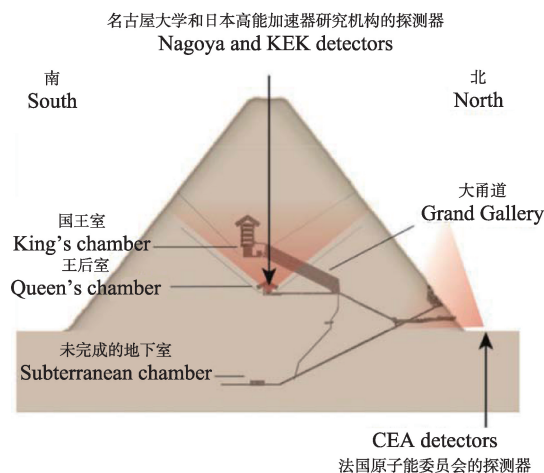


图7 已知的金字塔内部结构及方向灵敏的宇宙线探测器的摆放位置④



图8 通过缪子成像技术测量的到金字塔内部的密室⑤

躺状态,当我们站立时缪子的流强会减小;其次我们的身体不是每个位置都是30 cm,比方说胳膊等的厚度都远小于30 cm所以在我们的计算中高估了宇宙线所引起的辐射。对于我们普通人来说对0.9 mSv/年的辐射强度仍然是没有感觉的,为此我们可以和在医疗上做一次胸部CT的辐射剂量(8 mSv)进行对比。通过对比发现“粒子雨”中缪子累计九年引起的辐射剂量和一次胸部CT的辐射剂量相同。因此我们可以得出结论,“粒子雨”中的缪子对人的影响非常小。

四、“粒子雨”中缪子的应用

利用X射线的穿透性,结合人体组织间密度和厚度的差异,当X射线穿过人体不同组织时,被吸收的程度不同,据此根据X射线强度的变化可以实现对人体组织的成像。医院中所用的X射线透视和CT就是利用这一原理。X射线的能量在124 KeV~1.24 MeV之间,不能穿透非常厚的物体,当要扫描比人体更厚的物体时就需要更高能量的射线。“粒子雨”中的缪子,到达海平面时平均能量为4 GeV^②,在X射线能量的1000倍以上,是自然界为我们提供的可以穿透厚重物体的高能射线。利用“粒子雨”中的缪子,法国科学家发起了“扫描金字塔”项目^④,旨在利用在金字塔外部不同位置处测量到的穿过金字塔方向缪子流强的变化实现对金字塔内部结构的成像,即给金字塔做一次大型的缪子CT。图7给出了方向灵敏的缪子探测器的放置地点。当缪子通过金字塔时,会同在空气中,人体中一样发生电离能损而损失能量,穿过的物质越多损失的能量越多,缪子的流强也会随之变小,据此可推算出金字塔内部的物质分布情况。“扫描金字塔”项目利用缪子成像技术对金字塔内部结构进行了透视,发现了胡夫金字塔内部存在一个大型密室(图8),该文章发表在《自然》杂志上^④。此发现是现代科学技术

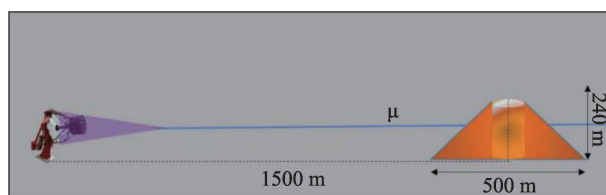


图9 利用缪子成像技术监测火山内部物质变化的原理图^⑥

在考古上的一次完美应用。

缪子成像技术还可以应用于地球物理学,类似于“扫描金字塔”的方式,利用缪子成像技术测量火山内部结构如图9所示,可以实时地测量火山内部物质的变化,以起到更好地监测火山活动,预测火山喷发等,被誉为“看穿大地的眼镜”。

五、小结

1. 我们无时无刻不生活在“宇宙线雨”中。
2. 宇宙线流强是指单位时间内单位立体角内打在单位面积上的宇宙线的数量。
3. 缪子的计数率会随着天顶角而变化,这个是由于不同天顶角大气厚度不一样,导致宇宙线“粒子雨”被“吸收”和“散射”的程度不一样。
4. 宇宙线辐射对人体的影响非常小。
5. 可以利用缪子成像技术扫描金字塔,监测火山活动。

参考文献

- ① 空气电离之谜,刘佳,《现代物理知识》上期文章
- ② P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020),DOI: 10.1093/ptep/ptaa104
- ③ https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Dose_Cosmic.htm
- ④ Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature, doi:10.1038/nature24647
- ⑤ <http://www.hip.institute/#press>
- ⑥ Imaging the density profile of a volcano interior with cosmic-ray muon radiography combined with classical gravimetry, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/4/042001>