

# 深空目视极限的量化

丁烨、刀锋

人眼的极限观察能力很强，那么在天文目视观测时，观测极限在哪里？可以量化吗？答案是肯定的，有极限，能量化。本文分以下几部分内容来讨论

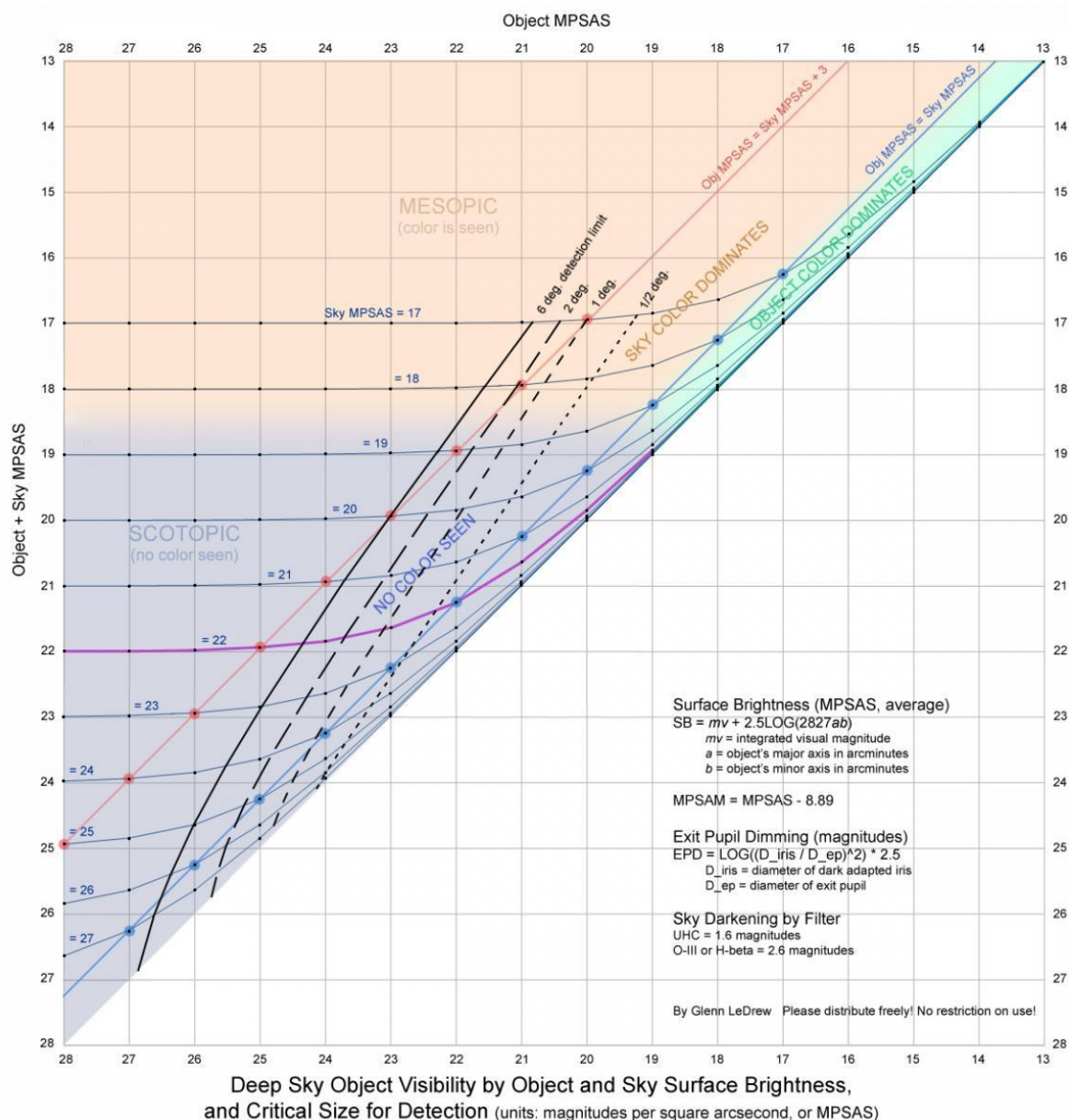
- 理论探索介绍
- 分析计算
- 观测验证
- 探究与推测
- 结论与建议
- 后续研究方向

## 一、理论探索介绍

从 Blackwell 1946 年关于士兵夜间视觉的研究开始，到 Clark 的《Visual Astronomy of the Deep Sky》，深空目视领域暗视觉极限的理论探索基本成型。2 年前 Cloudynights 论坛上的 Glenn LeDrew 根据前人的经验制作发布了一张深空天体可视性图表（图一），至此深空观测的极限有了较简便的估算方法。

详细的理论探讨可下载阅读丁烨在 2017 年所写的《如何预测自己的设备能否看到某深空天体》

图一、深空天体可视性计算图



## 二、分析计算

本人居住在杭州，就以长三角的观测环境为例进行简单计算，计算绘图结果可作为华东华中地区的参考。在其他地区观测需调整相应参数，结果会略有不同。

### 1、光害及气象条件

长三角一带城市密集，光污染严重，唯有浙西和皖南还保留了一大片光害深蓝区和灰区，海拔1200米以上轿车可以直达的观测点有牵牛岗（1470m）、太子尖（1320m）等，交通便利，几次 SQM-L 天顶实测数据在 21.5-21.7 之间，这算是杭州附近最佳的观测点了。其次查 Meteoblue 预报的大气垂直透明度 AOD 平均值，浙西一带在 0.4 左右，极品天 AOD 低于 0.1。此外选择了萧山富阳等郊区所在的光害黄区和市区边缘的光害红区做对比。夜天光背景亮度典型值见下表：

夜天光背景亮度 (星等/角秒 <sup>2</sup> )	深蓝区	黄区	红区
	21.7	20.5	19.0

注：夜天光背景亮度各方向差异明显，一般用天顶数据作为当地的典型值判断所处光害等级

### 2、基本假设

- A、用平均表面亮度（SB）作为特征值，亮度均匀分布，忽略亮核心与暗边缘的差异。
- B、大气透明度 AOD 值对应大气消光比率，0.1 对应消光 10%，0.5 对应消光 50%，以此类推。
- C、天望主镜通光损失按 5%考虑，折算成天体面亮度损失 0.06 星等，如用双目另需单独计算。
- D、人眼的瞳孔直径最大可以放大到 7mm。

### 3、计算绘图过程

最初做这个计算的目的在于寻找 20×80 双筒镜的观测极限，它的出瞳直径为 4mm，可算做深空观测的中间值，市区中心和郊外观测都能适用。且小口径双筒中 4mm 出瞳的主镜规格挺多，天文主镜除折反射镜外折射镜和反射镜配出 4mm 出瞳还是挺轻松的。因此接下来做的第一项内容为不同的光害环境下，出瞳为 4mm 的主镜观测极限计算。

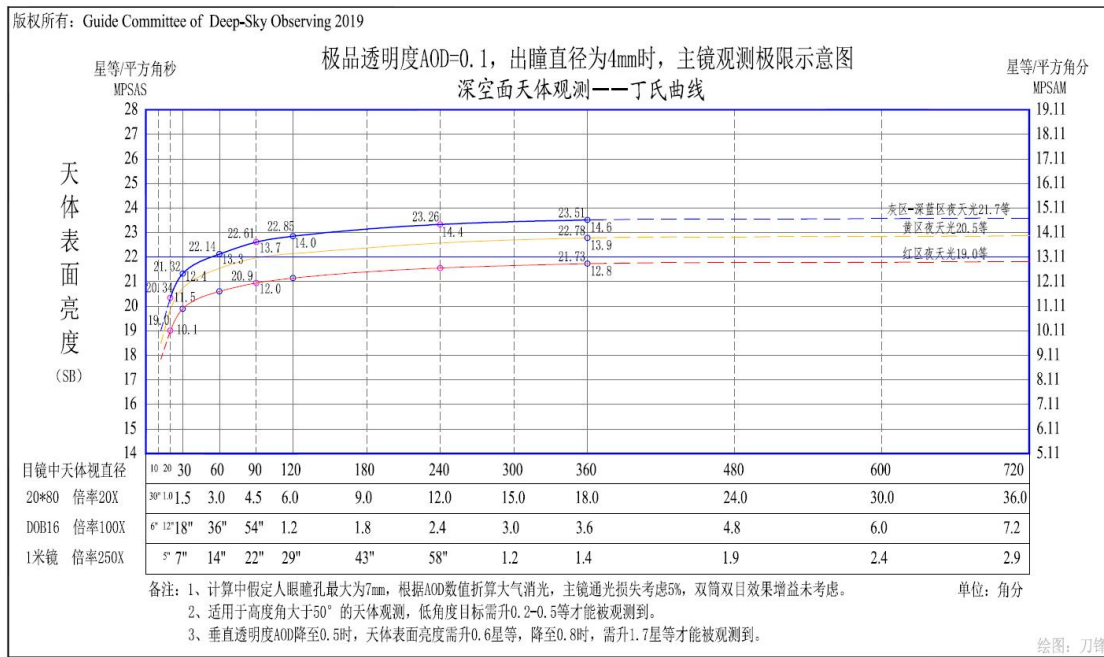
计算查图流程：先计算 4mm 出瞳时，目镜里天光背景亮度值，然后分别画出对应的天光亮度+天体亮度曲线，再从曲线与不同视直径亮度阈值线的交点处读取目镜里天体可视的最低表面亮度值，最后计算各种减光因素，还原至真实的天体表面亮度阈值。按表二数据绘制了三条曲线，这类曲线都取名为丁氏曲线（详见图二），作为对丁焱兄所做研究的肯定。

表二、出瞳 4mm 时不同视面大小的天体表面亮度阈值表（目镜中大小）

主观视直径 (角分)	深蓝区		黄区		红区	
	角秒计	角分计	角秒计	角分计	角秒计	角分计
20	20.34	11.5	19.85	11.0	19.00	10.1
30	21.32	12.4	20.73	11.8	19.89	11.0
60	22.14	13.3	21.54	12.7	20.61	11.7
90	22.61	13.7	21.93	13.0	20.89	12.0
120	22.85	14.0	22.14	13.3	21.14	12.3
240	23.26	14.4	22.54	13.7	21.46	12.6
360	23.51	14.6	22.78	13.9	21.73	12.8

注：主观视直径为天体通过主镜放大后在目镜里呈现的视面大小

图二、出瞳 4mm 的主镜观测极限示意图（天体亮于阈值为可见，暗于为不可见）



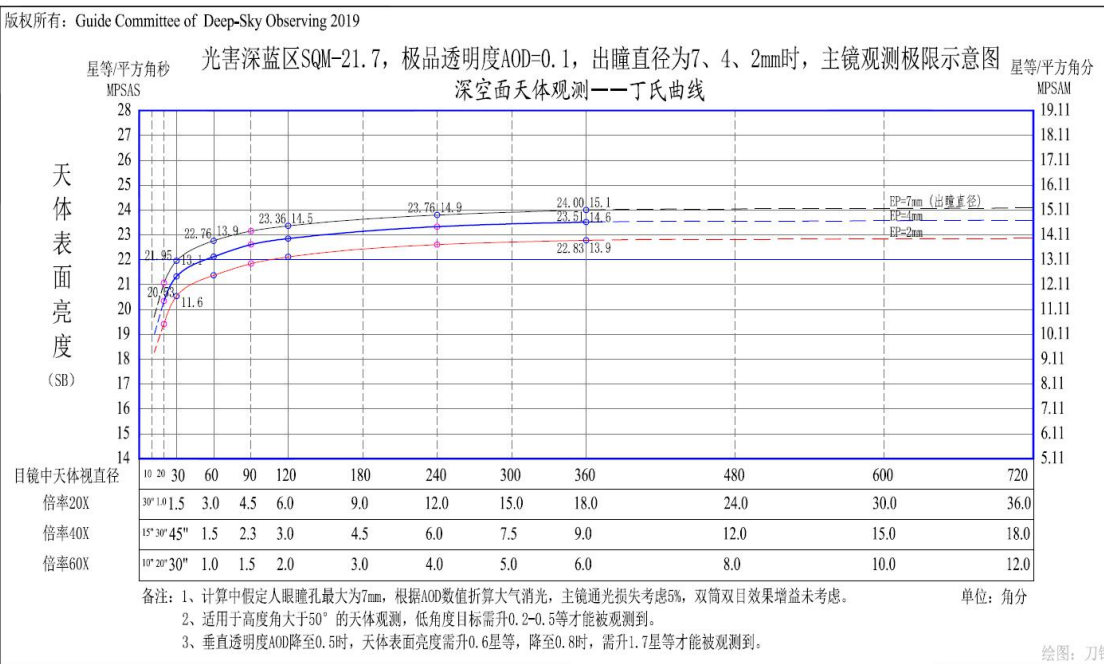
双筒镜其他规格也挺多的，天文主镜配不同的目镜出瞳直径也不尽相同，那么配置不同的出瞳直径会有哪些变化呢？下面以 2mm、4mm 和 7mm 为出瞳典型值，分别计算，结果详见表三。根据数据绘制 2、4、7mm 出瞳直径下天体表面亮度可见性阈值图，详见图三。

表三、深蓝区极品天出瞳 2、4、7mm 时不同视面大小的天体表面亮度阈值表（目镜中大小）

主观视直径 (角分)	出瞳2mm		出瞳4mm		出瞳7mm	
	角秒计	角分计	角秒计	角分计	角秒计	角分计
20	19.41	10.5	20.34	11.5	21.07	12.2
30	20.53	11.6	21.32	12.4	21.95	13.1
60	21.37	12.5	22.14	13.3	22.76	13.9
90	21.84	13.0	22.61	13.7	23.15	14.3
120	22.11	13.2	22.85	14.0	23.36	14.5
240	22.61	13.7	23.26	14.4	23.76	14.9
360	22.83	13.9	23.51	14.6	24.00	15.1

注：主观视直径为天体通过主镜放大后在目镜里呈现的视面大小，SQM=21.7，AOD=0.1

图三、不同出瞳直径观测极限示意图（天体亮于阈值为可见，暗于为不可见）



#### 4、大气透明度对观测极限的影响

根据星等亮度差的计算公式 $\Delta M = 2.5 \times \text{LOG}(1/(1-A0D))$ 量化不同透明度条件下天体变暗的程度。

大气透明度对应天体减光值					
透明度	深绿	绿	浅绿	黄	
	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
减光星等	0.11	0.24	0.55	0.99	1.75

#### 5、使用滤镜时观测极限下探程度

Glenn 在深空天体可视性计算图中标明了 UHC 滤镜可以减光 1.6 星等，O-III 和 H- $\beta$  滤镜减光 2.6 星等，那是不是就是说计算图表中的亮度阈值可以直接增加 1.6 或 2.5 个星等就是用滤镜所能达到的观测下限呢？看原图中各条视张角阈值曲线的斜率都大于 1:1，也就是说天体可视表面亮度阈值降低没有天光背景亮度降低那么快，大约是 0.6 倍的关系，即使用 UHC 滤镜可以比不使用滤镜观测到暗 1 个星等的天体细节，使用 O-III 和 H- $\beta$  能看到暗 1.6 个星等的天体细节。

### 三、观测验证

A、先来验证一个又暗又大的目标——NGC281 吃豆人星云/小精灵星云（IC11、sh2-184）

2019 年国庆上海大 F 携哈勃 16 寸在海拔 1300 的太子尖龙池水库收获了这个目标，当时使用的观测设备 UL16 寸焦比 F4.5 目镜为 N31，通过计算得倍率为 58 倍，目镜视场约  $1.4^\circ$ ，出瞳直径 6.9mm。国庆期间，NGC281 上中天的时间在午夜 0 点后，中天时高度角  $72^\circ$ 。

观测报告链接：<http://bbs.imufu.cn/thread-787767-1-1.html>

NGC281 的基本参数：SIZE 为  $35 \times 30'$ ，是个 HII 区发射星云，表面亮度远低于 M33（查各类星表 SB 列里大都是空白，无数据，推测 SB 暗于  $25 \text{ mag/arcsec}^2$ ），核心处有个疏散星团 IC1590（4 角分），目镜里天体见下图。



从图三中查询 60X 那一行中天体大小为 30 角分，对应 EP=7mm 曲线上的天体可视阈值表面亮度，发现 30 角分已经在图外了，图中当天体大于 6 角分时表面亮度阈值曲线趋于平缓，推测到 30 角分也仅略高于 24.0 等，暂定为  $24.2 \text{ mag/arcsec}^2$ ，可距 25 等还有接近 1 等的差距，应该不可见呀，可是观测报告里又没提用滤镜观测，于是立马找大 F 求证，大 F 回复说当时用 UHC 滤镜观测



的，但文章里没写。按使用 UHC 滤镜观测极限亮度还能再暗 1 个星等估算即 24.2+1=25.2 等，这个结论和观测结果就比较接近了。

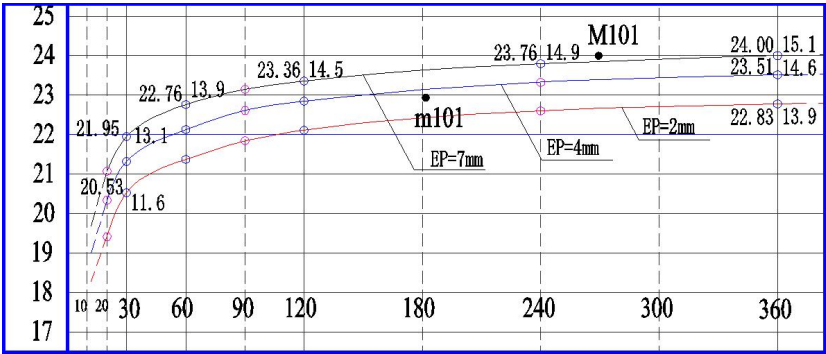
验证的第一个目标就差点推翻所有的计算结果，还好只是虚惊一场，看来还得补充使用 UHN 和 OIII 滤镜观测的极限图。

B、下一个 M101 风车星系

2017 年五一节，探栓怪在皖南海拔 1700 米的牯牛降（光害灰区）用 70SA 毫不费力的收获了这个目标。当时配的 30ed 目镜，组合成 11.6×70 的单筒镜，视场 6°，出瞳直径 6mm。五一期间 M101 中天时高度 66°。观测报告链接：<http://bbs.imufu.cn/thread-413962-1-12.html>。

	NGC 号	SIZE	SB	SurfBr	PosAng	星系类型	V-MAG	可见性
M101	5457	23.99×23.07	14.9	23.97	28	SABc	7.86	√

目镜中 M101 大小有 24×11.6 约 270 角分，查表三，7mm 出瞳时表面亮度阈值在 23.90 左右，按理 6mm 出瞳表面亮度阈值需更亮一些，插值计算约 23.6 等，探栓怪的观测体验是“不费劲，一眼可见的一团圆形棉球”应该算基本看全了整体，似乎亮度比较均匀，毕竟是看到了，可能阈值曲线保守了些低估了 0.4 等，也有可能灰区山顶极品环境加持突破了这 0.4 等。放一放先吧往后继续。



C、找一些小视面的星系试试



第一张图里是鲸鱼座的星系，上中天时高度也就 50° 左右。

第二张图里是长蛇座的星系，上中天时高度 40° 不到点。

在大佬以前用 2080 双筒观测的记录里，曾经确认看到过第一张图里的 584，596，615，636 和第二张图里的 2835 与 2784。我把这些星系的参数都列出来想看看有没规律可寻。

	NGC 编号	SIZE	SB	SurfBr	PosAng	星系类型	V-MAG	可见性
1	584	3.78×2.51	12.9	23.06	104	E4	10.36	√
2	586	1.61×0.78	13.2	23.57	179	Sa	13.14	×
3	596	2.14×1.58	13.0	22.36	36	E2	10.89	√
4	600	2.63×2.65	14.6	23.83	25	SBcd	12.46	×
5	615	3.18×1.16	13.3	22.98	164	Sb	11.56	√
6	636	2.7×2.3	13.4	23.38	6	E1	11.39	√
7	2784	4.82×1.85	12.8	23.34	73	S0	10.19	√
8	2815	3.51×1.41	13.2	23.60	13	SBb	11.84	×
9	2835	6.43×3.72	14.0	23.39	179	SBc	10.56	√
10	2865	2.44×2.03	13.3	23.24	155	E4	11.53	×
11	6140	2.09×1.78	14.8	22.46	83	Sc	11.72	√
12	4236-C3	23.4×6.8	15.0	24.58	161	Sbd	9.64	√

注：SB 数据来源于《DEEP SKY HUNTER》星表，V-MAG 数据来源于 Skysarfri 6 pro 星图软件，其他数据来源于 NGC 天体开源数据库。

然后把上表中的星系按长轴大小和表面亮度数据做成散点放到图二中（见图四），一看傻眼了，都在深蓝区阈值曲线上方离的还挺远，意味着理论上都是不可见的，要知道大佬在江苏盱眙观测，既没高山又不是光害深蓝区，看这些目标都是 50° 以下的中低空，星系观测又不用滤镜，难道大佬视力超常观测经验已提升到突破理论极限了？还是这理论极限不准确？抑或天体参数不对？思索良久，感觉问题并不是出在这些地方，特别是当大佬提到“SB14.8 等的 NGC6140 与 SB15 等的 C3 都曾观测到，很多星系都是由于核心亮度高才容易被观测到”时才豁然开朗，星系这类天体与理论计算的理想面光源不一致，计算基本假设面光源是均匀的，而星系却是核心亮边缘暗的亮度不均匀体。

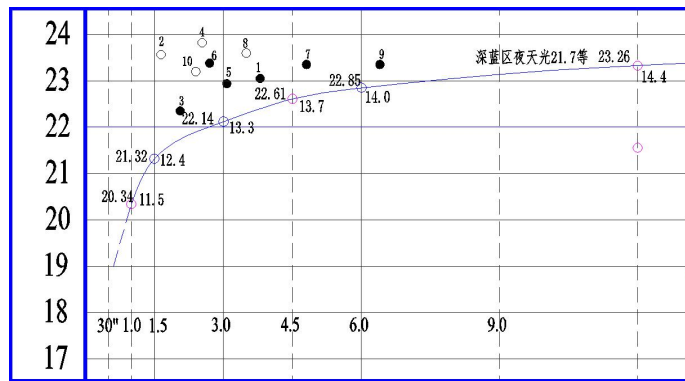


图 四

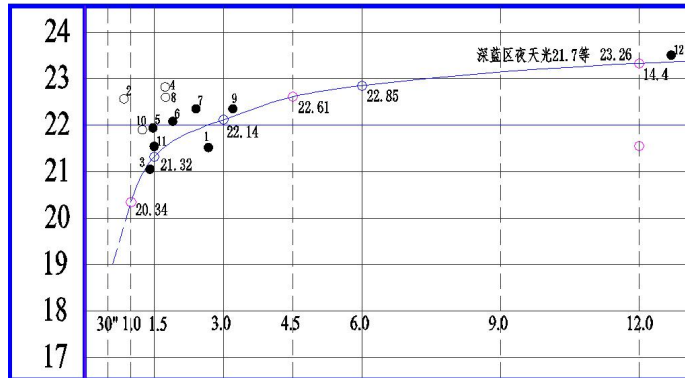


图 五

正好手头有梅西耶天体的峰值 PB 与平均 SB 表面亮度的数据，一查发现螺旋星系的峰值表面亮度要普遍比平均表面亮度高 2 个星等，椭圆星系峰值比平均高 2.5 个星等。那么把星系的参数重新调整下，视面扁长型的螺旋棒旋星系大小取长轴一半，SB 亮 1 等；视面接近圆型的椭圆星系大小取长轴的 70%，SB 亮 1.3 等来考虑，从新布置散点位置（见图五）。考虑到双筒观测比单目有所增益，部分暗于阈值（暗 0.5 等左右）的星系亮核心能被看到还是有可能的，理论计算值与观测实践结果接近吻合了。反观探栓怪在牯牛降收获的 M101 如法泡制，图中调整点 m101 已经进入出瞳 4mm 阈值线以内了，就是说 12×50 规格的镜子也能观测到了，至于“棉球”是星系整体还是中间的亮核心可能探栓怪自己也不能确定吧。

#### D、最后看看裸眼目视是否也能符合

元旦大 F 三人木里黑区观星报告中提到 3 人均裸眼目视到了 M81、M51，群里有人对裸眼看到 M51 表示怀疑，那就测算下看看到底能不能看到。

	NGC 号	SIZE	SB	SurfBr	峰值 PB	星系类型	V-MAG	裸眼可见
M51	5194	13.71×11.67	12.9	22.9	19.3	SABb	8.01	√
M81	3031	21.63×11.25	13.2	22.78	17.8	Sab	6.84	√

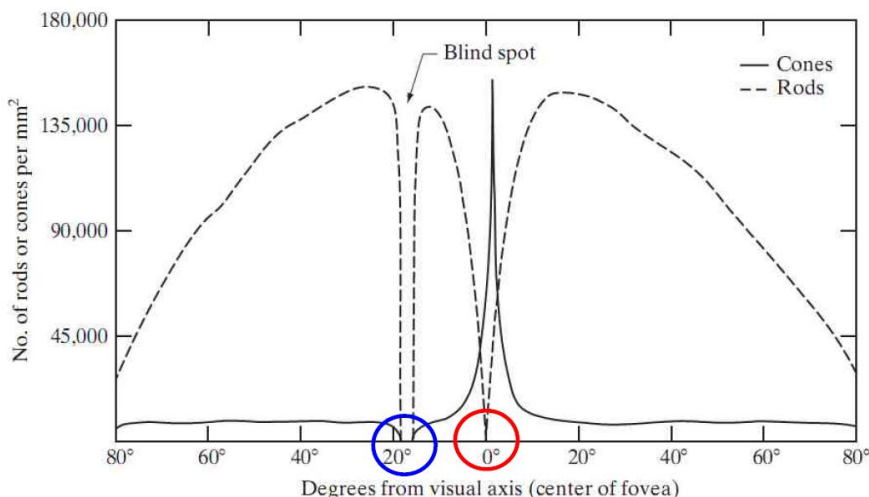


M81 按长轴大小从表三中可以查到的表面亮度阈值是 21.2 等左右，M81 的峰值与平均表面亮度差异比较大，达到 5 等左右，推测半直径处核心表面亮度应该亮于 20.5 等，按半直径 11 角分计正好在阈值线（比虚线暗 0.5 等）附近，对照大佬的观测结果推理深蓝区是有可能直接裸眼目视到的，木里高原黑区天光再暗 0.3 等、空气稀薄、透明度好应该更没问题。

M51 比 M81 小一半左右 13'，峰值与平均亮度差距没有 M81 大，奇怪的是来源于两种星表的表面亮度并不一致，理论上  $\text{Mag}/\text{arcsec}^2 = \text{Mag}/\text{arcmin}^2 + 8.89$ ，但是 22.9 与 12.9 差了 10，不知道哪个准确点了。M51 形状更接近圆形，亮核心区域估算有 9 角分，按 21 等面亮度计的话，偏离阈值曲线较远（暗 1 等），推理深蓝区应该是裸眼不可见了，在木里 3500 米高原又是光害黑区空气干净各种 BUFF 加持下，阈值曲线偏暗 0.5 等左右的话，基本可以肯定 M51 裸眼目视可能性非常大。从大 F 一行三人都能看到一团模糊的暗斑，并用 1550 确认过，且当天 SQM 读数为 22.0，裸眼收获 M51 应该属实。倒是绘制的图三左侧虚线部分有点过于保守，10 角分时阈值曲线偏低。

#### 四、探究与推测

1、老外制作的图一是所有计算的源头，这张图中最重要的就是那 4 条不同大小的天体视面曲线，分别是  $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$  和  $6^\circ$ ，在丁烨的《如何预测自己的设备能否看到某深空天体》中提到作者之所以没有画出更大视角的曲线是由于“二十度的曲线与六度离的更近”，那更小的也没有（我自己添了条 20 角分的曲线用于计算）是不是同样不重要呢？这个问题丁烨用暗视觉能识别的天体大小有“甜区”来理解，我觉得从暗视觉的生理基础来解释或许更明白一些。





决定暗视觉能力的是视杆细胞，从视网膜上视杆细胞密度分布来看，在视轴周围  $20^\circ$  视角这一圈环形区域的视杆细胞密度最大，峰值宽度约为  $6^\circ$ ，此外视轴中心（红圈）和盲点（蓝圈）处无视杆细胞。暗视觉里有种转移视线法或称侧视法——当目标朝着鼻子方向，偏离视线中心  $8^\circ$  到  $16^\circ$  时，眼睛对暗淡物体最敏感。向上偏离视线中心  $6^\circ$  到  $12^\circ$  时，也同样敏感。要避免将目标朝着耳朵方向偏离太远，这样影像会移到视网膜的盲点上，就完全看不见目标了。由此我认为图一中的 4 条曲线应与侧视法的观测结果对应才比较合理，那么  $6^\circ$  视角的环形区可称为暗视觉“甜区”，30-100 角分的最敏感大小正好对应“甜区”内侧视杆细胞高密度峰值带。实践中大佬也提到过，观测时直视和侧视法无缝衔接算是一种有观测经验的本能反应吧。超过  $6^\circ$  之所以增益不大是因为  $6^\circ$  以外的区域视杆细胞密度降低了，视面越大，平均下来单位面积参与感光的视杆细胞数量是降低了。另外在低至 21 等的环境下人眼的分辨力已经下降到只有 10 个角分了，因此放大后还不到  $0.5^\circ$  大小的目标应该不是观测重点，对追求极限能力或进行极限挑战的人还有点意义吧。

2、阈值的计算结果是表面亮度值，代表的含义值得思索。按基本假设面天体是亮度均匀的，那么亮于阈值的能看到视面，暗于阈值的融于背景啥也看不见。在观测暗弱的星云时就是这样，但在看 M8、M42 等明暗跨度大的亮星云和星系的时候却不是这样了。经验告诉我们光害大的环境下天体可视面积小，光害少的环境天体视面显得大多了，这时候阈值是不是就代表天体可视面积边界的表面亮度值呢？我觉得从人眼靠对比度差异来察觉明暗边界这一原理来说，应该肯定这一判断是合理的，亮核心可见，暗于阈值的边缘部分不可见。记得以前丁爷说在 CN 上了解到很多玩大口径牛反的老外判断目标天体可见不可见有个简单标准，表面亮度亮于夜天光数值+3 等的基本没问题，极限是能看到+5 等的暗天体，这类“看到”我感觉不见得都是看到整体八九不离十，估计有部分发现亮核心就算是看到了（亮于阈值的核心区）。

## 五、结论与建议

理论来源于实践，并能指导实践。码了那么多字最后还真不知道算不算找到了目视观测的一种规律。这个观测极限的结论不好下，夸大了就是谬论保守了就变得无效，还会误导观测实践。所以还是等待同好们用自己的观测体验来检验一下，看看能得出怎样的结论吧。晚点我再写结论与建议。

## 六、后续研究方向

高家堡堡主曾经表达过一种天文目视倾向，“要看得清晰、精致和完整”，赵北旅同志对目镜里什么才是“清晰”孜孜以求，这算是目视领域里一种更高的追求，放到深空目视里也值得探究一下，如何选用合适的器材搭配获得最佳的深空目视观测体验？……………未完待续