太阳活动周中极强耀斑的发生率

谭宝林

合作者：黄静、张印、季凯帆（云南天文台）

中国科学院国家天文台

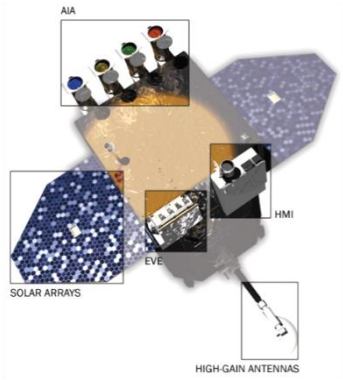
提 纲

1. 太阳物理的大数据时代
2. 基于小数据分析太阳周极强耀斑的发生率
3. 总结

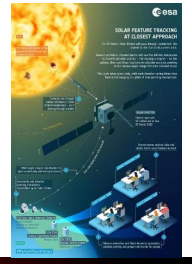
1. 太阳物理的大数据时代

太阳物理观测已经进入到了大数据时代

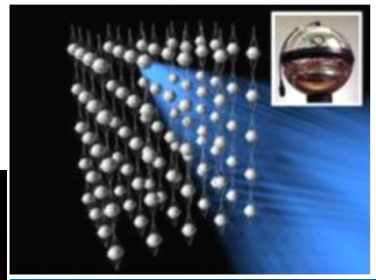
空间太阳望远镜

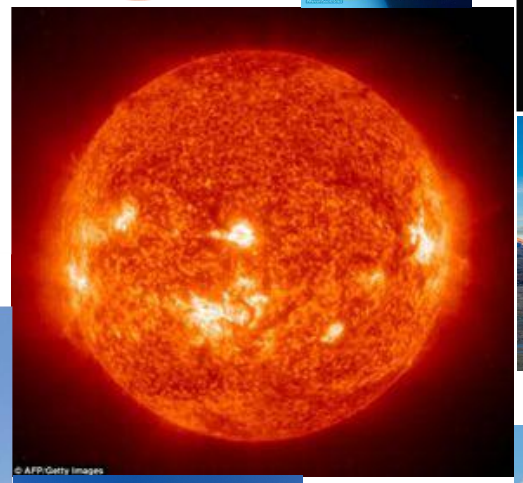






太阳中微子望远镜





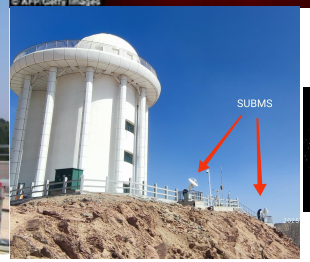


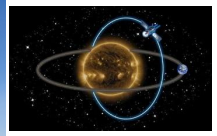
太阳射电望远镜



太阳光学望远镜







- 多波段
- 天地协同
- 谱-像结合
- 多视角
- 抵近观测
- 大装置
- 海量数据
- 大经费投入

在AI和大数据的时代潮流下，小数据分析还有前途吗?

杨振宁：“如果一个基础研究领域过度依赖大经费的投入，就很难发展了。”

——见孙昌璞忆杨振宁

如果我们能够从小数据中找到新的、有意思的科学结果，应该也是非常有意义的！

问题：每个太阳活动周中，耀斑事件成千上万，**极强耀斑**（Extremely strong flare, **ES-flare**）何时发生？

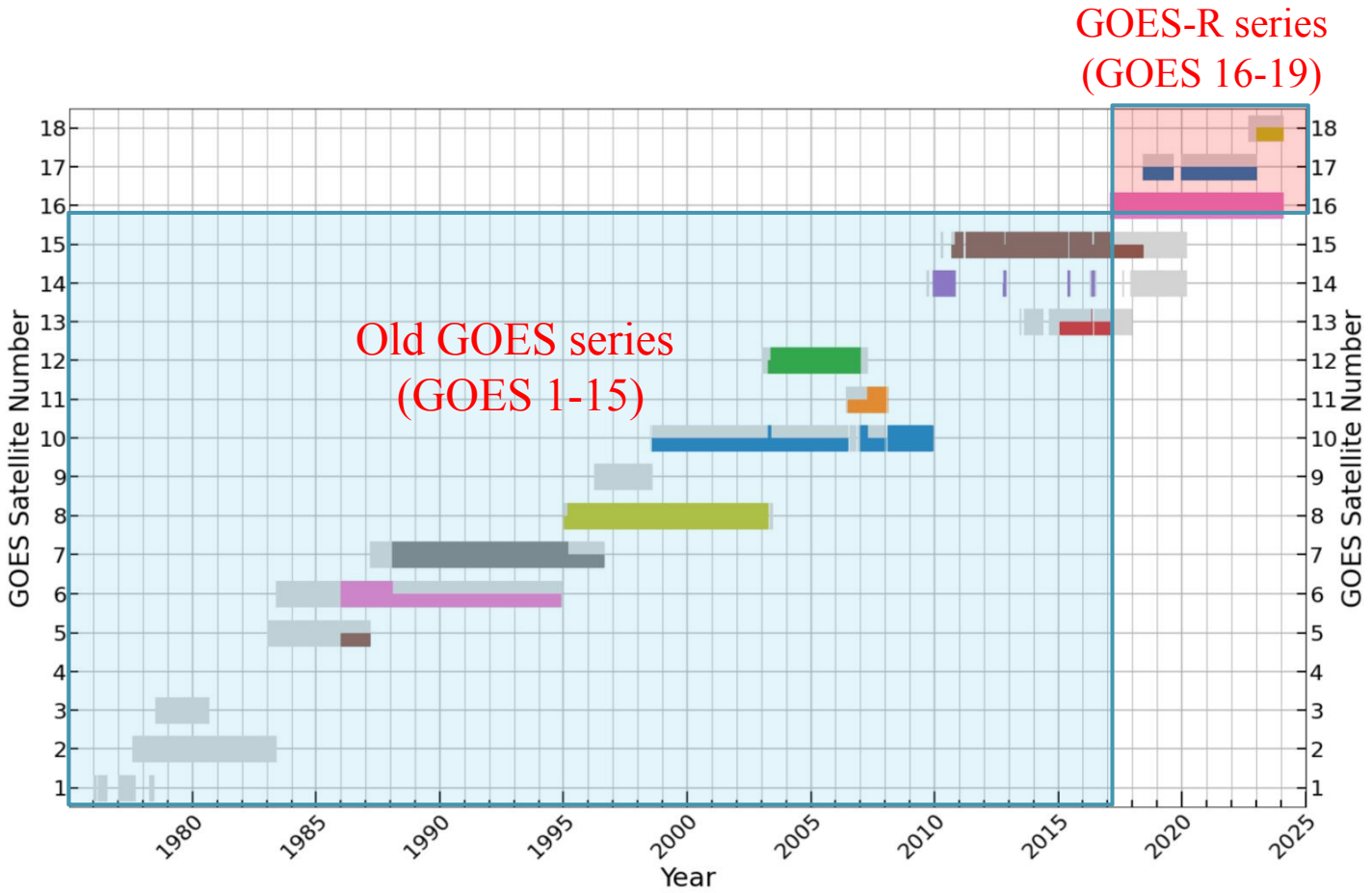
2. 基于小数据分析太阳周极强耀斑的发生

基于两个小数据的分析：

（1）1975年以来的太阳每日黑子相对数（DSN）观测数据（2.82 MB）

（2）1975年以来GOES-太阳软X射线（SXR）耀斑观测数据（5.91 MB）

GOES-SXR观测数据进行了去饱和性和一致性标定



SXR flux recorded by GOES1-15 series are about **1.43** times lower than by GOES-R series.

That is to say, any flares >M7.0 recorded by GOES1-15 satellites are actually X-class flares.

(Hudson et al. 2024, SoPh)

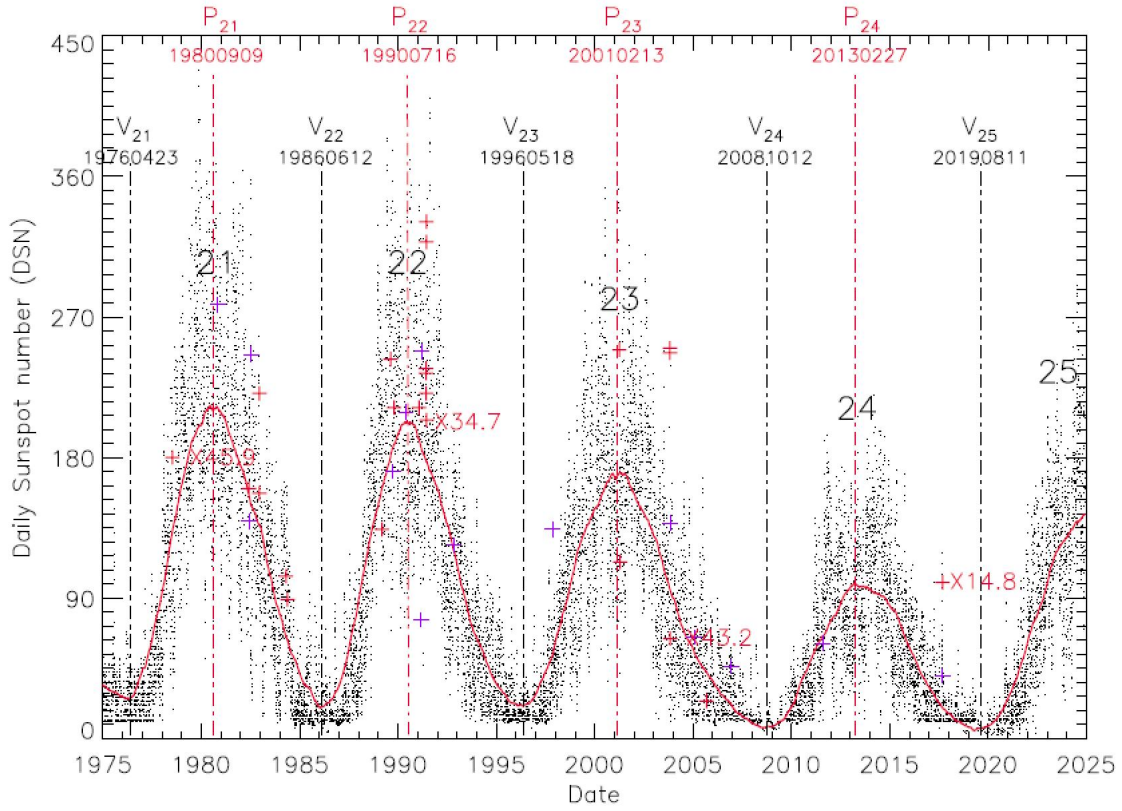
各太阳周不同等级耀斑数量统计

太阳周	C-flare	M-flare	X-flare	S-flare	ES-flare
21	13905	3174	252	9	6
22	11274	2932	213	15	10
23	12223	2224	169	10	6
24	7326	1109	73	3	1
25*	14905	1796	90	0	0

*第25周的数据截止到2025年11月15日

- C-flare: SXR峰值流量$(1.0-9.9)\times10^{-6}\mathrm{W/m^2}$
- M-flare: SXR峰值流量$(1.0-9.9)\times10^{-5}\mathrm{W/m^2}$
- X-flare: SXR峰值流量$(1.0-9.9)\times10^{-4}\mathrm{W/m^2}$
- S-flare：SXR峰值流量$>10^{-3}\mathrm{W/m^2}$
- ES-flare：>X14.3的耀斑，即峰值流量$>14.3\times10^{-3}\mathrm{W/m^2}$

S级耀斑和ES耀斑在太阳周中的分布



- 超过78%的强耀斑（S级和ES耀斑）发生在活动周的后相
- 超过70%的强耀斑发生在太阳低纬区域（≤ 20 °）
- 每个活动周仅有一个强耀斑群（源于一个活动区的多个S级强耀斑），且均发生在活动周后相

Table 1. List of the solar S-class flares during 1976-2024.

No.	Date	DSN	Class	AR	S_{AR}	Location	t(yr)
1	19780711	180	X45.9	1203	1370	N20E46	2.22
2	19801106	278	X12.8	2776	1440	S12E74	4.54
3	19820603	139	X12.8	3763	1250	S09E72	6.11
4	19820606	160	X14.7	3763	1250	S09E25	6.12
5	19820712	246	X10.1	3804	2870	N11E37	6.22
6	19821215	221	X19.0	4026	640	S10E24	6.64
7	19821217	157	X14.7	4025	–	S08W21	6.65
8	19840424	104	X19.7	4474	2590	S12E43	8.00
9	19840520	89	X14.8	4492	670	S09E52	8.07
10	19890306	134	X19.3	5395	3570	N35E69	3.14
11	19890816	243	X28.0	5629	1320	S18W84	3.58
12	19890929	171	X14.2	5698	1250	S20W90	3.70
13	19891019	212	X23.1	5747	1160	S27E10	3.76
14	19900524	209	X14.1	6063	940	N33W78	4.35
15	19910125	212	X15.7	6471	2210	S16E78	5.03
16	19910304	76	X10.4	6538	-	S20E88	5.13
17	19910322	248	X13.8	6555	2530	S26E28	5.18
18	19910601	234	X28.3	6659	2300	N25E90	5.38
19	19910604	237	X32.0	6659	2300	N30E70	5.38
20	19910606	221	X30.2	6659	2300	N33E44	5.39
21	19910609	318	X15.1	6659	2300	N34E04	5.40
22	19910611	331	X17.0	6659	2300	N31W17	5.40
23	19910615	204	X34.7	6659	2300	N33W69	5.41
24	19921102	124	X13.3	7321	1650	S26W87	6.80
25	19971106	134	X13.1	8100	1000	S18W63	1.47
26	20010402	249	X29.6	9393	2440	N19W72	4.87
27	20010415	113	X21.1	9415	880	S20W85	4.91
28	20031028	247	X25.7	10486	2610	S16E08	7.44
29	20031029	250	X15.5	10486	2610	S15W02	7.45
30	20031102	138	X13.3	10486	2610	S14W56	7.46
31	20031104	64	X43.2	10486	2610	S19W83	7.46
32	20050120	65	X10.2	10720	1630	N14W61	8.68
33	20050907	24	X24.6	10808	1430	S11E77	9.30
34	20061205	46	X13.1	10930	680	S07E68	10.55
35	20110809	61	X10.7	11263	1320	N17W69	2.82
36	20170906	100	X14.8	12673	2060	S08W33	8.90
37	20170910	40	X13.0	12673	2060	S08W88	8.91

各太阳周X、S、ES耀斑和最强耀斑的统计特征

Parameter	SC 21	SC 22	SC 23	SC 24	SC 25
P_c	10.13	9.93	12.40	10.83	…
L_a	4.38	4.09	4.74	4.38	…
L_d	5.75	5.84	7.66	6.45	…
M_{sn}	428	410	353	220	⩾290
P_m	214.1	192.2	152.1	84.7	…
P_d	61.8	64.4	51.0	33.8	…
V_m	16.8	14.6	10.6	2.5	3.4
V_d	15.3	17.6	11.3	5.1	7.1
N_x	243	205	167	71	(108 ± 5)
t_{x1}	0.02	1.56	0.14	1.34	1.89
t_{xm}	4.75	4.00	6.05	5.12	…
N_s	9	15	10	3	(5 ± 2)
t_{s1}	2.22	3.14	1.47	2.82	…
t_{sm}	6.06	4.87	6.96	6.88	…
N_{es}	6	10	6	1	(2 ± 1)
t_{es1}	2.22	3.14	4.87	8.90	(7.46 ± 1.13)
t_{esm}	6.28	4.79	6.91	8.90	(8.31 ± 0.41)
t_{stg}	2.22	5.41	7.46	8.90	(8.78 ± 1.12)

峰值相: 太阳周DSN峰点前后各150天，总计300天
谷年相: 太阳周DSN谷点前后各150天，总计300天

强耀斑参数：

(1) N，活动周耀斑数

(2) t_1，耀斑初发时间

(3) t_m，耀斑平均发生时间.

太阳周谷年相参数:

(1) V_m，谷年相平均每日黑子相对数

(2) V_d，谷年相每日黑子相对数均方差

太阳周参数:

(1) P_c，太阳周长度

(2) L_a，太阳周上升相时长

(3) L_d，太阳周下降相时长

(4) M_{sn}，太阳周最大DSN

(5) P_m，太阳周峰值相平均DSN

(6) P_d，太阳周峰值相DSN的均方差

(7) t_{stg}，最强耀斑发生时间

统计相关性

第21-24太阳周，X级耀斑、S级耀斑和ES耀斑的初发时间、平均发生时间、数量、最强耀斑的发生时间与太阳周参数之间的相关性

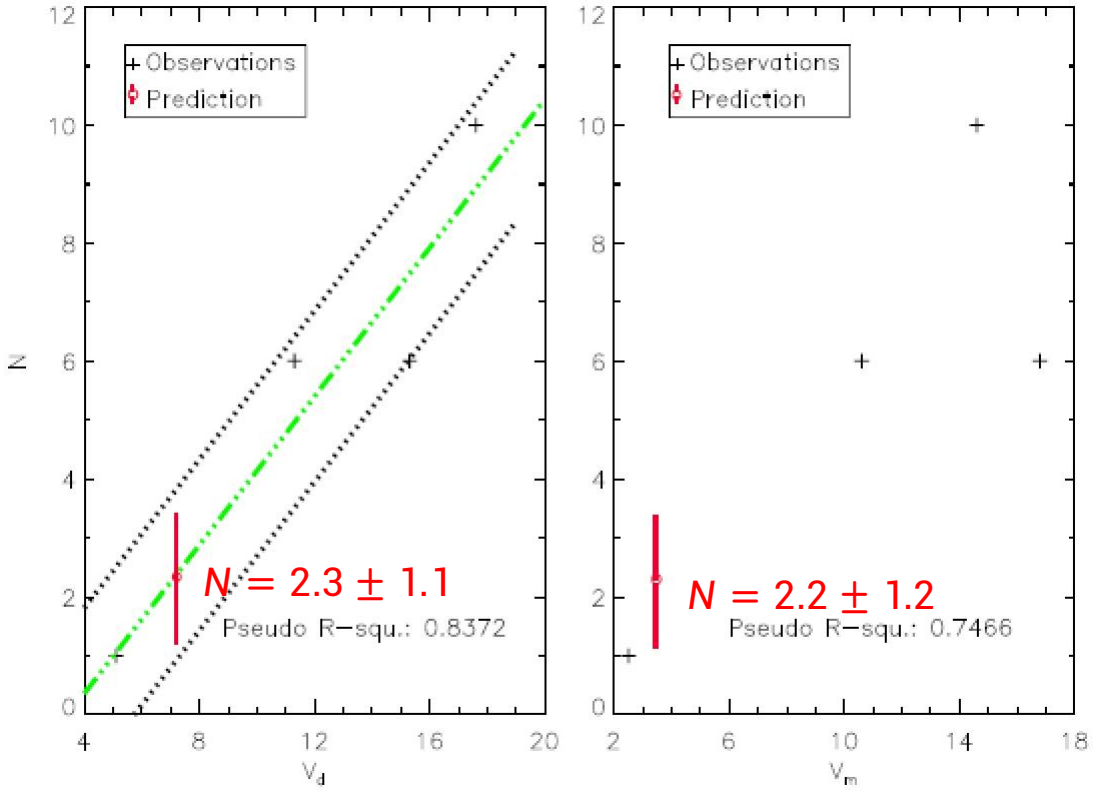
Parameter	t_{x1}	t_{xm}	N_x	t_{s1}	t_{sm}	N_s	t_{es1}	t_{esm}	N_{es}	t_{stg}
P_c	-0.44	0.95	-0.37	-0.81	0.76	-0.23	0.34	0.41	-0.29	0.56
L_a	-0.72	0.98	-0.23	-0.94	0.85	-0.36	0.22	0.45	-0.39	0.30
L_d	-0.32	0.91	-0.41	-0.75	0.71	-0.19	0.37	0.38	-0.25	0.62
M_{sn}	-0.39	-0.38	0.99	-0.13	-0.64	0.82	-1.00	0.90	0.86	-1.00
P_m	-0.39	-0.43	1.00	-0.08	-0.65	0.76	-1.00	0.87	0.81	-1.00
P_d	-0.22	-0.51	0.97	0.02	-0.76	0.89	-0.98	-0.96	0.92	-0.82
V_m	-0.40	-0.40	1.00	-0.11	-0.64	0.77	**-1.00**	-0.87	0.82	**-1.00**
V_d	-0.12	-0.57	0.94	0.11	-0.82	0.91	**-0.95**	**-0.98**	**0.95**	-0.77

X级耀斑　　S级耀斑　　ES级耀斑　　最强耀斑

强相关性

一个太阳活动周能发生多少个极强耀斑?

利用广义线性回归模型(generalized linear model, GLM)分析每个太阳周ES耀斑发生数与谷年相参数V_d和V_m存在显著的依赖关系



作为对比，还可以利用线性回归给出一个试探性的拟合函数

$$N \approx -2.16 + 0.63V_d \pm 1.05$$

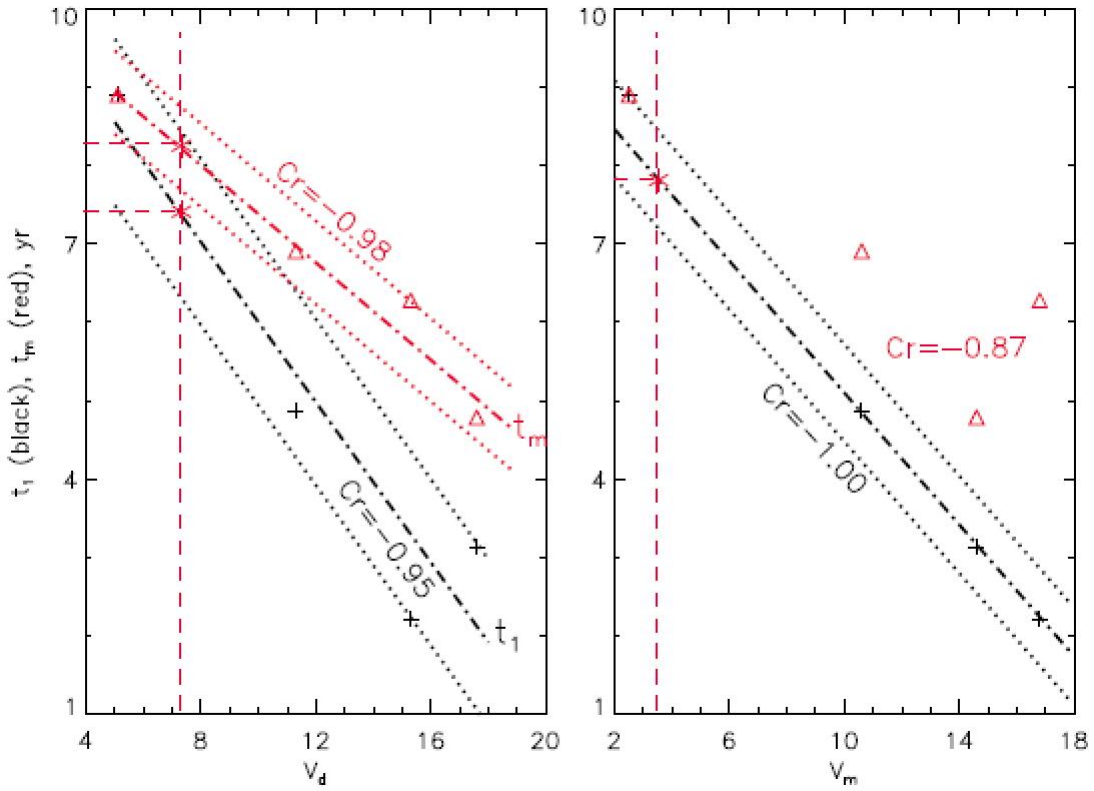
由此给出第25太阳周:

$$N \approx 2.31 \pm 1.05$$

两组结果是非常相近的.

推论: 第25太阳周可能会有2 ± 1次ES耀斑发生.

在一个活动周中，极强耀斑何时发生?



黑色 (+ 及直线)表示太阳周中ES耀斑的初发时间t_1，红色(Δ 及直线)表示太阳周中所有ES耀斑平均发生时间t_m

For t_1， 单参量线性回归：

$$t_1 \approx 9.33 - 0.47V_m \pm 0.69$$

SC 25: $t_1 \approx 7.73 \pm 0.14$ yr (2027年5月).

$$t_1 \approx 11.10 - 0.51V_d \pm 0.80$$

SC 25: $t_1 \approx 7.46 \pm 1.13$ yr (2027年2月)

双参量线性回归：

$$t_1 \approx 9.45 - 0.46V_m - 0.0125V_d \pm 0.62$$

SC 25: $t_1 \approx 7.80 \pm 0.14$ yr (2027年5月).

For t_m， 线性回归

$$t_m \approx 10.48 - 0.31V_m \pm 0.30$$

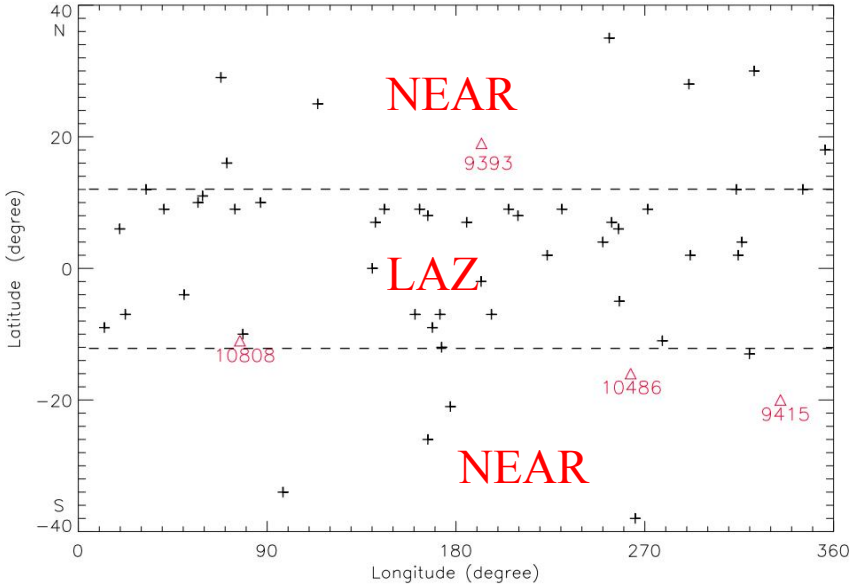
SC 25: $t_1 \approx 8.31 \pm 0.30$ yr.

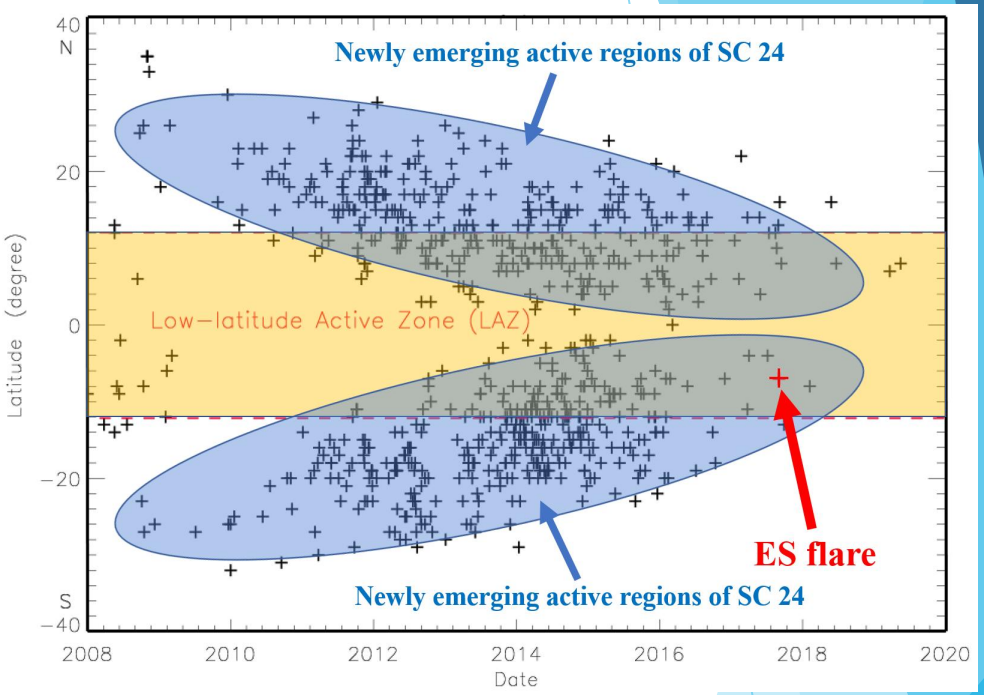
推论: 第25太阳周的ES耀斑将发生在2027年春季之后。

为什么强耀斑的发生依赖于V_d & V_m?

- 超级活动区（Super active regions, SARs）并不是产生极强耀斑的必须条件，许多SARs都没有极强耀斑发生如AR3776, 5669, 8100, 12192…
- 太阳上可能存在一个±12°**低纬活动带**（low-latitude active zone, **LAZ**）（类似于地球信风带）
- 太阳周中的极强耀斑可能是新浮活动区（NEAR）与LAZ相互作用的结果.

In valley phase of Solar Cycle 23





根据太阳发电机模型，每个太阳周前期，NEAR总是从高纬区产生，远离LAZ，它们之间的相互作用弱，很难产生极强耀斑.

而在太阳周后期，NEAR主要从中低纬区域浮现，靠近LAZ，它们之间的相互作用强，容易激发极强耀斑。

(Tan, Zhang, Huang, & Ji, ApJL, 2025)

3. 总结

- 超过78%的强耀斑（S级和ES耀斑）发生在太阳活动周**后相**；超过70%的强耀斑发生在太阳**低纬区域**（≤ 20 °）；
- 在太阳周开始前的**谷年相每日黑子相对数**的平均值（V_m）和均方差(V_d)直接与该活动周的ES耀斑数和发生时间密切相关：V_d越大，ES耀斑数越多；V_d和V_m越大，ES耀斑越早发生；
- 利用上述相关性，我们推断：第25太阳周大约会有2次ES耀斑，它们将于**2027年春季之后**发生；
- 太阳上可能存在一个**低纬活动带**（LAZ），ES耀斑是新浮活动区于低纬活动带相互作用的产物。
- AI和大数据是当今潮流，工程师们利用大数据能提供事件的精准信息；小数据蕴含事件的蛛丝马迹（从蛛丝马迹中寻找科学发现，是科学家的任务）。

谢 谢！