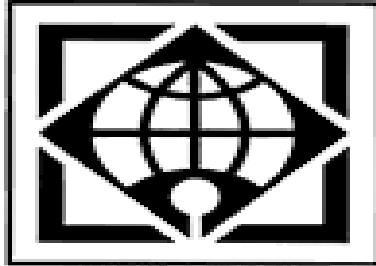


سید المرسلین

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

مطالعه‌ی مدل‌های نیم‌سایه‌ای لکه‌های خورشیدی

استاد راهنما:

دکتر هاشم حامدی‌وفا

نگارش:

زهرا عمارلو

تیر ۱۳۹۰

تقدیم به پدر و مادرم،

که از نگاهشان صلابت،

از رفتارشان محبت،

و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

چکیده

هدف این پایان‌نامه، مطالعه‌ی مدل‌های نیم‌سایه‌ای لکه‌های خورشیدی با استفاده از حل مسأله معکوس (معکوس‌سازی) پارامترهای استوکس تابش حاصل از قطبش‌سنجی با تفکیک بالاست. طیف استوکس کامل قطبش‌سنج طیفی ماهواره‌ی هینوده در طول موج 6302 \AA مربوط به آهن خنثی برای همه‌ی نقاط ۴ ناحیه روی قسمت‌های مختلف نیم‌سایه‌ی یک لکه‌ی خورشیدی نزدیک مرکز قرص خورشید، مورد تحلیل قرار گرفت. پارامترهای پلاسمایی مختلف از جمله دما، میدان مغناطیسی، سرعت خط دید و زاویه‌ی انحراف میدان مغناطیسی برای نقاط هر ناحیه، از معکوس‌سازی نمایه‌های کامل استوکس دو خط Fe I در طول موج 6302 \AA به‌وسیله‌ی کد SIR به‌دست آمد.

با بررسی نقاط در این ۴ ناحیه به این نتیجه رسیدیم که بعضی از نقاط ساختار تفکیک نشده (دومؤلفه‌ای) دارند. بنابراین برای تمییز دادن نقاط تک مؤلفه‌ای (نقاط دارای نمایه‌ی استوکس عادی) از نقاط دومؤلفه‌ای (نقاط دارای نمایه‌ی استوکس غیر عادی) از هم، از دو معیار ضریب پُری و اندازه‌ی مگنتوگرام در فاصله‌ی 280 mA° از مرکز خط اول استفاده کردیم. سپس برای جداسازی دو مؤلفه‌ی مدل دومؤلفه‌ای از هم، ۴ قید مختلف برمبنای اندازه‌ی میدان مغناطیسی، انحراف میدان مغناطیسی، سرعت خط دید و دما را در عمق اپتیکی 0.5 - با توجه به مشخصه‌های دو مؤلفه‌ی متفاوت شناخته شده در تحقیقات دیگران (spine و intraspine) به‌طور جداگانه به نواحی مورد مطالعه اعمال کردیم و دو مؤلفه‌ی زمینه‌ی اطراف (spine) و لوله‌ی شار مغناطیسی / شکاف میدان آزاد (ساختار نفوذی، intraspine) را به‌طور جداگانه رسم کردیم.

اعمال ۴ قید به ناحیه‌هایی که روی خط تقارن لکه قرار ندارند نتایجی متفاوت با هم را منجر می‌شوند. در مورد این نواحی همچنین می‌بینیم که دو مؤلفه به‌درستی با خصوصیات مربوط به خودشان از هم جدا نمی‌شوند. اما به‌کاربردن ۴ قید مورد نظر روی نواحی واقع بر و یا خیلی نزدیک به خط تقارن لکه نتایجی تقریباً مشابه را ایجاد می‌کند: به این صورت که مؤلفه‌ی زمینه همواره اندازه‌ی میدان مغناطیسی بیشتر، انحراف میدان مغناطیسی عمودی‌تر، سرعت خط دید کمتر و دمای بیشتری را نسبت به مؤلفه‌ی دیگر (ساختار نفوذی) دارد. از طرفی در تصاویر مربوط به ساختار نفوذی با توجه به تغییرات جهت انحراف میدان مغناطیسی و نیز وجود جریان و تغییر جهت آن در راستای طول رشته، ساختار نفوذی را یک لوله‌ی شار مغناطیسی استنتاج می‌کنیم نه شکاف میدان آزاد.

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید،

و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد،

و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود،

و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

سپاس خدایی را که هر چه دارم از اوست،

به امید آن که توفیق یابم جز خدمت به خلق او نکوشم.

با تشکر از:

راهنمای دلسوز و فرزانه، مشوق راه علم،

استاد ارجمند

دکتر هاشم حامدی وفا

فصل اول مقدمه	۸
۱-۱ معرفی لکه‌های خورشیدی	۹
۲-۱ خواص عمومی لکه‌ها	۱۰
۳-۱ نیم‌سایه	۱۳
۱-۳-۱ ساختار ریز نیم‌سایه	۱۳
۲-۳-۱ جریان پلاسما در نیم‌سایه: جریان اورشد شیدسپهری	۱۴
۳-۳-۱ میدان‌های مغناطیسی در نیم‌سایه: نیم‌سایه‌ی شیاری	۱۵
۴-۱ مدل‌های نیم‌سایه‌ای	۱۶
۱-۴-۱ مدل شانه نشده یا لوله‌ی شار جاسازی شده	۱۷
۱-۱-۴-۱ محدودیت مدل لوله‌ی شار جاسازی شده	۲۰
۲-۴-۱ مدل شکاف میدان آزاد یا نیم‌سایه‌ی شکاف‌دار	۲۱
۱-۲-۴-۱ محدودیت‌های مدل نیم‌سایه‌ی شکاف‌دار	۲۲
۲-۲-۴-۱ تاییدهای رصدی	۲۳
۵-۱ بررسی تغییرات شعاعی پارامترها در مدل لوله‌ی شار	۲۳
۱-۵-۱ نتایج حاصل از بررسی خطوط آهن در طول موج $1.56 \mu\text{m}$	۲۵
۲-۵-۱ نتایج حاصل از بررسی توسط خطوط طیفی مرئی آهن خنثی در $630.2 A^\circ$	۲۹
۶-۱ مشخصه‌های رشته‌های با هسته‌ی تاریک در نیم‌سایه	۳۱
۱-۶-۱ مشخصه‌های کلی	۳۲
۲-۶-۱ تفاوت رصد نیم‌سایه‌ی سمت لبه و سمت مرکز	۳۳
فصل دوم خصوصیات قطبش امواج الکترومغناطیسی ساختارهای نیم‌سایه‌ای	۳۹
۱-۲ مروری به خصوصیات قطبش ساده‌ترین موج الکترومغناطیسی	۴۰
۱-۱-۲ نور به‌عنوان یک موج الکترومغناطیسی	۴۰
۲-۱-۲ امواج تخت یا هماهنگ زمانی و تکفام	۴۱
۳-۱-۲ تانسور قطبش	۴۲
۴-۱-۲ پارامترهای استوکس یک موج تکفام	۴۴
۲-۲ خصوصیات قطبش نور شبه تکفام	۴۵
۱-۲-۲ نور غیر تکفام به‌صورت برهم‌نهی آماری از نور تکفام	۴۶

۴۶	..... موج تخت شبه تکفام
۴۶	..... تانسور قطبش و پارامترهای استوکس یک موج تخت شبه تکفام
۴۸	..... درجه‌ی قطبش و کره‌ی پوانکاره
۵۲	..... فصل سوم ماهواره‌ی هینوده، یک تلسکوپ خورشیدی
۵۳	..... ۱-۳ هینوده و ابزارهای رصدی آن
۵۵	..... ۲-۳ قطبش‌سنج طیفی (SP)
۵۶	..... ۱-۲-۳ مشاهده‌پذیرهای SP
۵۷	..... ۳-۳ محصولات داده‌ای SOT
۵۹	..... فصل چهارم کد معکوس‌سازی SIR
۶۰	..... ۱-۴ اثر زیمان و قطبش خط
۶۳	..... ۲-۴ معادله‌ی انتقال تابش (RTE)
۶۳	..... ۱-۲-۴ رابطه‌ی پارامترهای استوکس با خصوصیات فیزیکی محیط
۶۴	..... ۲-۲-۴ توابع پاسخ
۶۵	..... ۳-۲-۴ فرایند معکوس‌سازی
۶۶	..... ۴-۲-۴ روش Marquardt
۶۷	..... ۵-۲-۴ تقریب خطا
۶۸	..... ۳-۴ بازه‌های حساسیت خطوط
۶۹	..... ۴-۴ پارامترهای کد معکوس‌سازی SIR
۶۹	..... ۱-۴-۴ پارامترهای ورودی
۷۲	..... ۲-۴-۴ تعداد گره‌ها
۷۴	..... ۳-۴-۴ خروجی کد SIR
۷۶	..... فصل پنجم بازسازی ساختار مغناطیسی و حرارتی نیم‌سایه‌ی یک لکه‌ی خورشیدی
۷۷	..... ۱-۵ داده‌های رصدی مورد استفاده
۷۷	..... ۲-۵ لایه‌بندی اتمسفری بر اساس کد SIR
۷۸	..... ۱-۲-۵ انتخاب مدل اولیه‌ی ورودی کد
۸۱	..... ۲-۲-۵ بررسی نقاط با ساختارهای تفکیک نشده

۳-۵	چگونگی انتخاب ناحیه روی نیم سایه	۸۳
۴-۵	تمییز لوله‌ی شار مغناطیسی یا شکاف میدان آزاد از ساختار میدان زمینه‌ی اطراف در	
۸۵	مدل‌های سنتزی	۸۵
۵-۵	نتایج حاصل از اجرای کد SIR	۸۵
۱-۵-۵	ناحیه‌ی اول	۸۵
۲-۵-۵	ناحیه‌ی دوم	۹۲
۳-۵-۵	ناحیه‌ی سوم	۹۶
۴-۵-۵	ناحیه‌ی چهارم	۱۰۱
۱۰۷	فصل ششم نتیجه گیری	۱۰۷
۱۰۹	مراجع	۱۰۹

فهرست جدول‌ها

صفحه

۱-۲ بردارهای استوکس برای تعدادی از حالت‌های کاملاً قطبیده	۴۹
۱-۳ محدودیت‌های پراش برای نوارهای طیفی در مجموعه‌ی اپتیکی جانبی FPP	۵۵
۲-۳ ویژگی‌های نقشه‌برداری SP	۵۶
۳-۳ انواع داده‌های Hinode / SOT بر حسب سطح	۵۷
۴-۳ انواع داده‌های SOT بر حسب نوع رصد	۵۸
۱-۴ نمونه از یک فایل کنترل	۷۱
۲-۴ تعداد گره‌ها در پارامترهای پلاسمایی	۷۴

- ۱-۱ تصاویر در طول موج $A^\circ 4306$ از یک لکه‌ی خورشیدی نسبتاً عادی و یک لکه‌ی خورشیدی پیچیده‌تر ۹
- ۲-۱ نمودار پروانه و ثبت مساحت نسبی سطح خورشیدی پوشیده شده توسط لکه‌ها ۱۰
- ۳-۱ اندازه‌ی میدان مغناطیسی، انحراف میدان مغناطیسی و زاویه‌ی سمتی میدان مغناطیسی در یک لکه‌ی منظم ۱۲
- ۴-۱ طرحی از ساختار ریز مقیاس موضعی میدان مغناطیسی در نیم‌سایه‌ی لکه‌ی خورشیدی در مدل لوله‌ی شار جاسازی شده ۱۷
- ۵-۱ برش عمودی از یک نیم‌سایه‌ی مدل ۱۹
- ۶-۱ طرحی از یک لوله‌ی شار بالا آمده که توسط میدان مغناطیسی زمینه‌ی نیم‌سایه‌ای احاطه شده است ۱۹
- ۷-۱ طرحی از یک شکاف میدان آزاد که توسط میدان مغناطیسی زمینه‌ی نیم‌سایه‌ای احاطه شده است ۲۱
- ۸-۱ منطقه‌ی فعال NOAA ۸۷۰۶ که در ۲۱ و ۲۷ سپتامبر ۱۹۹۹ به ترتیب در زوایای خورشید مرکزی $\mu = 0.91$ و $\mu = 0.51$ رصد شده است ۲۴
- ۹-۱ اختلاف دما بین اتمسفر لوله‌ی شار و احاطه‌کننده‌های آن به‌عنوان تابعی از فاصله‌ی شعاعی از مرکز لکه، تغییرات شعاعی سرعت‌های خط دید درون و بیرون لوله شار، تغییر شعاعی ضریب پُری لوله‌های شار ۲۶
- ۱۰-۱ تغییر شعاعی زاویه‌ی سمت الراسی میدان مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی ۲۸
- ۱۱-۱ تغییر شعاعی فشار بین لوله‌ی شار و اتمسفر احاطه‌کننده‌ی آن ۲۸
- ۱۲-۱ تغییر شعاعی از ویژگی‌های احاطه‌کننده‌ی مغناطیسی و لوله‌ی شار نیم‌سایه‌ای ۳۰
- ۱۳-۱ منطقه فعال NOAA ۱۰۴۲۵ در ۸ آگوست ۲۰۰۳ در زاویه خورشید مرکزی 16° ۳۱
- ۱۴-۱ منطقه فعال NOAA ۱۰۴۲۵ در ۹ آگوست ۲۰۰۳ در زاویه خورشید مرکزی 28° ۳۳
- ۱۵-۱ رشته‌های با هسته‌ی تاریک در مکان‌های خورشید مرکزی متفاوت ۳۴
- ۱۶-۱ تغییرات شدت بهنجار شده در طول رشته‌های با هسته‌ی تاریک انتخاب شده در مکان‌های خورشید مرکزی متفاوت ۳۵
- ۱۷-۱ تغییرات علامت مگنتوگرام در طول رشته‌های با هسته‌ی تاریک انتخاب شده در مکان‌های خورشید مرکزی متفاوت ۳۶
- ۱۸-۱ تغییرات سرعت خط دید (در طول موج 5576 nm) در طول رشته‌های با هسته‌ی تاریک انتخاب شده در مکان‌های خورشید مرکزی متفاوت ۳۸
- ۱-۲ نور قطبیده‌ی بیضوی راستگرد و چپگرد ۴۴

- ۲-۲ حالت‌های ممکن تابش کاملاً قطبیده ۴۴
- ۱-۳ طرحی از مجموعه‌ی تلسکوپ اپتیکی SOT (OTA) ۵۴
- ۱-۴ شکافت زیمان خط FeI در ۶۳۰٫۲۵nm و طیف حاصل میدان مغناطیسی خارجی ۶۲
- ۲-۴ طرحی از رفتار کلاسیکی اثر زیمان، طیف حاصل برای رصد در طول میدان مغناطیسی و عمود بر میدان مغناطیسی، طیف رصد شده‌ی واقعی در پارامترهای استوکس V و Q ۶۳
- ۳-۴ طرح‌واره‌ای از چگونگی انتخاب گره‌ها برای دما در یک مدل فرضی ۷۴
- ۱-۵ تصویر شدت پیوستار منطقه‌ی فعال NOAA ۱۰۹۳۰ رصد شده در ۱۱ دسامبر ۲۰۰۶ در یک زاویه‌ی خورشید مرکزی 8° ۷۸
- ۲-۵ یک نمایه‌ی عادی و متقارن استوکس I, Q, U و V برای یک نقطه از لکه‌ی مورد مطالعه که قطبیت میدان این نقطه منفی است ۷۹
- ۳-۵ مقایسه‌ی نمایه‌های استوکس خروجی SIR با نمایه‌های استوکس رصدی مربوط به یک نقطه-ی دارای دو مؤلفه‌ی مغناطیسی ۸۰
- ۴-۵ تصاویر مگنتوگرام ساخته شده از لکه‌ی خورشیدی مورد مطالعه در فاصله 280 mA° از مرکز خط ۱۵٫۶۳۰ nm FeI از استوکس V ۸۱
- ۵-۵ نمونه‌هایی از نمایه‌های استوکس دیده شده در نیم‌سایه ۸۳
- ۶-۵ تصویری از ناحیه‌ی اول که به صورت مورب در نیم‌سایه‌ی بیرونی و در مکانی عمود بر خط تقارن قرار گرفته است ۸۶
- ۷-۵ تصویر پیوستار بزرگ شده‌ی مربوط به مستطیل انتخابی ناحیه‌ی اول و ماسک نهایی که تفکیکی از نقاط تک مؤلفه‌ای و دومؤلفه‌ای را نشان می‌دهد ۸۶
- ۸-۵ نتایج حاصل از اعمال قید انحراف میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی اول ۸۷
- ۹-۵ نتایج حاصل از اعمال قید اندازه‌ی میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی اول ۸۹
- ۱۰-۵ نتایج حاصل از اعمال قید سرعت خط دید بر ناحیه‌ی اول ۹۰
- ۱۱-۵ نتایج حاصل از اعمال قید دما بر ناحیه‌ی اول ۹۱
- ۱۲-۵ تصویری از ناحیه‌ی دوم که به صورت مورب در مکانی دور از خط تقارن و عمود بر آن قرار گرفته است ۹۳
- ۱۳-۵ تصویر پیوستار بزرگ شده‌ی مربوط به مستطیل انتخابی ناحیه‌ی دوم و ماسک نهایی که تفکیکی از نقاط تک مؤلفه‌ای و دومؤلفه‌ای را نشان می‌دهد ۹۳
- ۱۴-۵ نتایج حاصل از اعمال قید انحراف میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی دوم ۹۴
- ۱۵-۵ نتایج حاصل از اعمال قید اندازه‌ی میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی دوم ۹۵
- ۱۶-۵ نتایج حاصل از اعمال قید سرعت خط دید بر ناحیه‌ی دوم ۹۵
- ۱۷-۵ نتایج حاصل از اعمال قید دما بر ناحیه‌ی دوم ۹۶

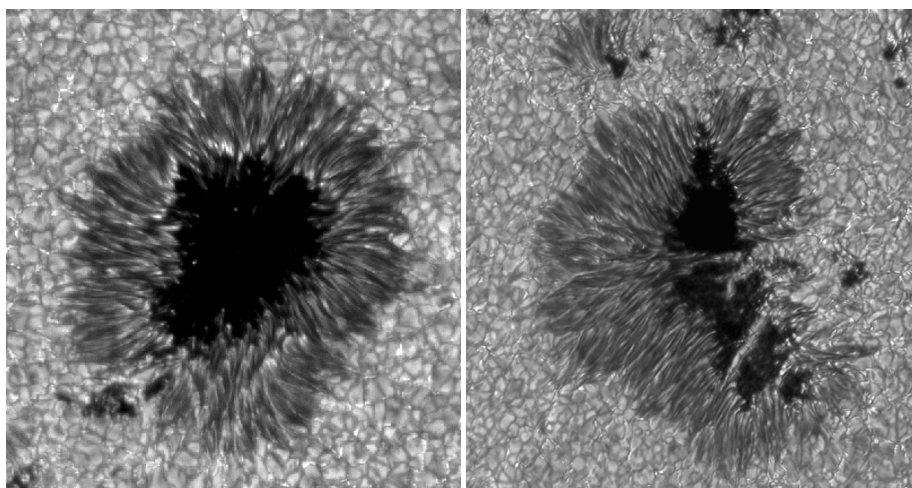
- ۱۸-۵ تصویری از ناحیه‌ی سوم که در نیم‌سایه‌ی سمت مرکز قرص خورشید و روی خط تقارن قرار گرفته است ۹۷
- ۱۹-۵ تصویر پیوستار بزرگ شده‌ی مربوط به مستطیل انتخابی ناحیه‌ی سوم و ماسک نهایی که تفکیکی از نقاط تک مؤلفه‌ای و دومؤلفه‌ای را نشان می‌دهد ۹۷
- ۲۰-۵ نتایج حاصل از اعمال قید زاویه‌ی انحراف میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی سوم ۹۸
- ۲۱-۵ نتایج حاصل از اعمال قید اندازه‌ی میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی سوم ۹۹
- ۲۲-۵ نتایج حاصل از اعمال قید سرعت خط دید بر ناحیه‌ی سوم ۱۰۰
- ۲۳-۵ نتایج حاصل از اعمال قید دما بر ناحیه‌ی سوم ۱۰۱
- ۲۴-۵ تصویری از ناحیه‌ی چهارم که در نیم‌سایه‌ی سمت لبه و نزدیک خط تقارن قرار دارد ۱۰۲
- ۲۵-۵ تصویر پیوستار بزرگ شده‌ی مربوط به مستطیل انتخابی ناحیه‌ی چهارم و ماسک نهایی که تفکیکی از نقاط تک مؤلفه‌ای و دومؤلفه‌ای را نشان می‌دهد ۱۰۲
- ۲۶-۵ نتایج حاصل از اعمال قید زاویه‌ی انحراف میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی چهارم ۱۰۳
- ۲۷-۵ نتایج حاصل از اعمال قید اندازه‌ی میدان مغناطیسی بر ناحیه‌ی چهارم ۱۰۴
- ۲۸-۵ نتایج حاصل از اعمال قید سرعت خط دید بر ناحیه‌ی چهارم ۱۰۵
- ۲۹-۵ نتایج حاصل از اعمال قید دما بر ناحیه‌ی چهارم ۱۰۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱ معرفی لکه‌های خورشیدی^۱

لکه‌های خورشیدی، ساختارهای مغناطیسی هستند که به صورت نواحی تاریک روی سطح خورشید ظاهر می‌شوند. هر لکه توسط یک بخش مرکزی تاریک به نام سایه^۲، و یک هاله‌ای که کمتر تاریک است به نام نیم‌سایه^۳، مشخص می‌شود. تصویری از دو لکه‌ی خورشیدی در شکل ۱-۱ نشان داده می‌شود.



شکل ۱-۱: تصاویر در طول موج 4306 \AA (در پهنای باند 10 \AA) از یک لکه‌ی خورشیدی نسبتاً عادی (تصویر سمت چپ) و یک لکه‌ی خورشیدی پیچیده‌تر (تصویر سمت راست) ثبت شده است. بخش تاریک مرکزی لکه‌ها سایه، و بخش احاطه‌کننده‌ی اطراف آن نیم‌سایه است. سلول‌های درخشان اطراف با مرزهای تاریک، سلول‌های همرفتی گرانولی هستند.

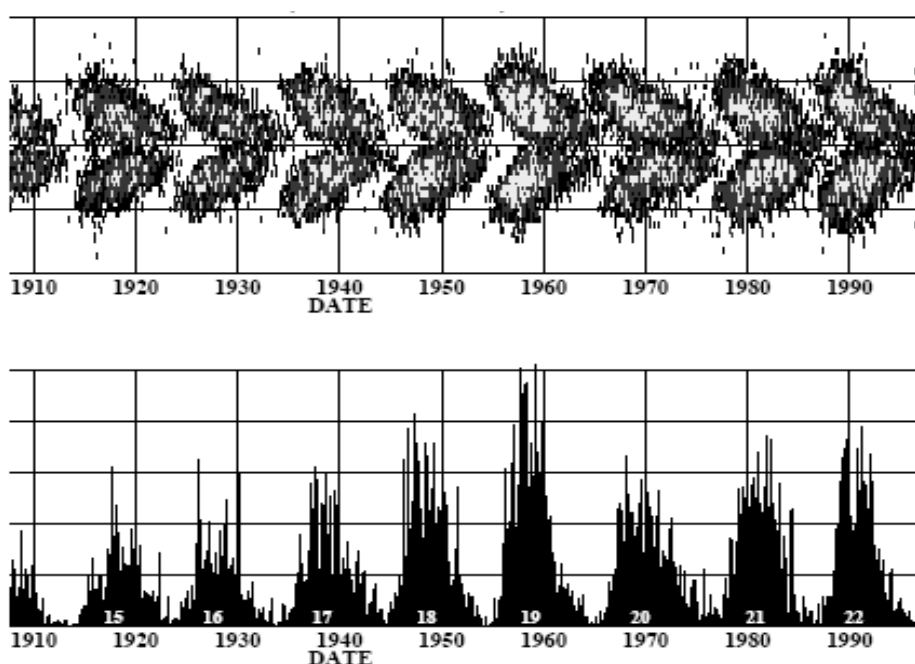
لکه‌های خورشیدی نمود مرئی تمرکز میدان مغناطیسی خورشیدی و برهمکنش آن‌ها با پلاسمای خورشیدی هستند. لکه‌های خورشیدی در نواحی فعال قرار گرفته‌اند، که ساختار دوقطبی مغناطیسی دارند. مکان لکه‌های خورشیدی به کمربند فعالی که پهنای آن به عرض 40° (ارتفاع) در هر دو طرف خط استوای خورشیدی می‌رسد، محدود شده‌اند. عرض جغرافیایی این لکه‌ها با چرخه‌ی فعالیت خورشیدی تغییر می‌کند. در ابتدای چرخه لکه‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالا (حدود 40°) از استوا ظاهر می‌شوند. لکه‌های بعدی در طول چرخه در عرض‌های پائین‌تر به وجود می‌آیند و آخرین لکه‌های هر چرخه نزدیک استوا قرار می‌گیرند. این رفتار اولین بار توسط کارینگتون [۱۹]، مورد توجه قرار گرفت و توسط نمودار به اصطلاح "پروانه" به تصویر کشیده شده است. نمودار پروانه را در شکل ۱-۲ می‌بینیم.

^۱ Sunspots

^۲ Umbra

^۳ Penumbra

لکه‌های خورشیدی با خروج یک لوله‌ی شار مغناطیسی بزرگ از سطح خورشید شکل گرفته‌اند و در واقع، سطح مقطع تقاطع آن لوله‌ی شار با شیدسپهر^۱ خورشید هستند. با افزایش شار مغناطیسی خروجی از سطح خورشید لکه‌ها (لکه‌های بدون نیم‌سایه) به وجود می‌آیند. با رشد و به هم پیوستن لکه‌ها، لکه‌های خورشیدی بزرگ‌تر تشکیل می‌شوند [۲۵،۳۸،۸۵،۸۶،۹۵]. زمان لازم برای شکل‌گیری یک لکه‌ی خورشیدی بزرگ بین چند ساعت تا چندین روز است. اگر قطر یک لکه از ۳۵ mM بزرگ‌تر شود ساختار نیم‌سایه می‌تواند شکل بگیرد. نیم‌سایه به صورت قطاع اطراف سایه تشکیل می‌شود تا به‌طور کامل آن را احاطه کند. برای بررسی لکه‌های خورشیدی، ابتدا به مطالعه‌ی خواص آن‌ها می‌پردازیم.



شکل ۲-۱: نمودار پروانه (قاب بالایی) و ثبت مساحت نسبی سطح خورشیدی پوشیده شده توسط لکه‌ها (قاب پائینی). در قاب بالایی محور عمودی عرض جغرافیایی خورشیدی و محور افقی زمان را نشان می‌دهد.

۲-۱- خواص عمومی لکه‌ها

خواص مهم مغناطیسی و دینامیکی لکه‌ها برحسب میدان‌های مغناطیسی و جریان‌ها در لایه‌های شیدسپهری در سال‌های اخیر به خوبی شناخته شده است: لکه‌ها میدان‌های مغناطیسی قوی دارند که از انتقال انرژی به‌صورت همرفتی جلوگیری می‌کند و در نتیجه در مقایسه با تابش خورشید آرام، سایه فقط ۲۰٪ شار تابشی خورشید آرام را تابش می‌کند و

^۱ Photosphere
^۲ Pore

نیم‌سایه که درخشان‌تر است حدود ۸۰٪ شار خورشید آرام را تابش می‌کند. درخشندگی و بنابراین دمای لکه‌ی خورشیدی، تابعی از مکان در سطح لکه است. به‌طور متوسط سایه K ۱۸۰۰-۱۰۰۰ و نیم‌سایه K ۳۰۰-۲۰۰ خنک‌تر از خورشید آرام هستند.

اولین بار ون‌کلوبر [۸۴]، گزارش کرد که مکان‌های درخشان‌تر (داغ‌تر) در لکه میدان‌های مغناطیسی ضعیف‌تر را دربردارند.

میدان مغناطیسی که مهم‌ترین مشخصه‌ی تعیین‌کننده‌ی خواص لکه‌ها است توسط اثر زیمان اندازه‌گیری می‌شود. شدت میدان مغناطیسی در شیدسپهر، تقریباً به‌طور میانگین $G = 1500 - 1000$ در کل لکه‌ی خورشیدی است، اما به‌طور آرام و یکنواخت، از تاریک‌ترین بخش سایه تا لبه‌ی بیرونی نیم‌سایه کاهش می‌یابد. شدت میدان همچنین با ارتفاع در جو کاهش می‌یابد.

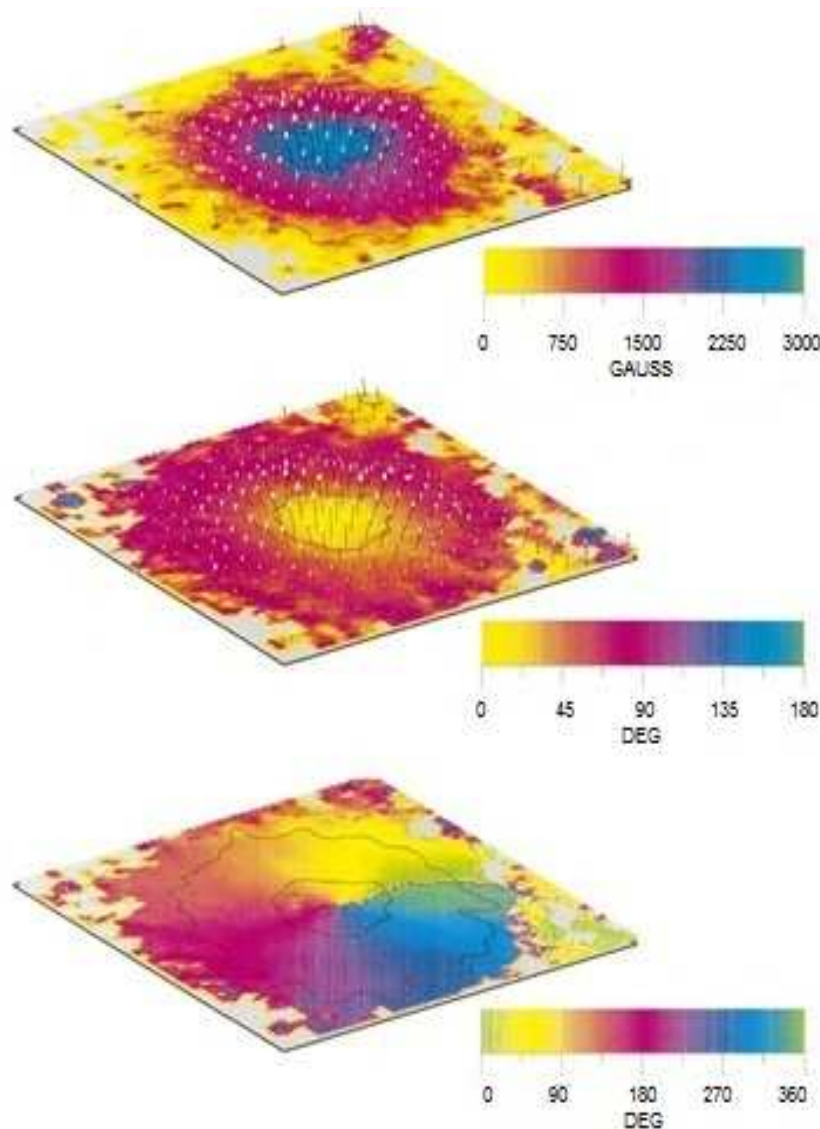
میدان مغناطیسی در سایه، تقریباً عمودی و قوی (با شدت‌های میدان حدود $G = 3500 - 2000$) است. لکه‌های بزرگ‌تر، بیشینه‌ی شدت میدان بزرگ‌تری دارند. میدان مغناطیسی در نیم‌سایه افقی‌تر و ضعیف‌تر می‌شود به‌طوری‌که شدت میدان در مرز بیرونی نیم‌سایه به $G = 1000 - 700$ کاهش می‌یابد. انحراف از خط عمود بر سطح خورشید با دور شدن از مرکز لکه، افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در مرز مرئی لکه زاویه‌ی انحراف به حدود $80^\circ - 70^\circ$ نسبت به خط عمود بر سطح لکه می‌رسد. ساختار میدان مغناطیسی در یک لکه‌ی منظم (عادی) در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. تصاویر از بالا به پائین اندازه‌ی میدان مغناطیسی، انحراف میدان مغناطیسی و زاویه‌ی سمتی میدان مغناطیسی هستند. پدیده‌های دینامیکی نیز در لکه‌ها دیده شده است. جریان‌های پلاسمایی در سایه، به‌جز در لکه‌های خیلی جوان عمدتاً ناچیز هستند [۶۷]. قوی‌ترین جریان‌های پلاسمایی در لکه، عمدتاً در نیم‌سایه مشاهده شده‌اند که همان جریان‌های اورشد^۱ هستند که به‌صورت یک جریان خروجی افقی در لایه‌های شیدسپهری، با سرعت‌های در محدوده‌ی ۶-۲ km/s تفسیر می‌شوند. در فام‌سپهر^۲ و لایه‌ی گذار، این جریان‌ها وارونه و به سمت داخل می‌شوند.

در اثر کاهش نمایی چگالی با ارتفاع و بقاء شار مغناطیسی، خطوط میدان با ارتفاع در فضا پهن می‌شود و میدان مغناطیسی فراتر از مرز روشن لکه‌ها می‌رود که موجب تشکیل یک سایه‌بان^۳ مغناطیسی می‌شود. بردارهای میدان مغناطیسی در سرتاسر منطقه‌ی سایه‌بان انحراف زیادی از خط عمود دارند ($\gamma \gtrsim 60^\circ$) و در لایه‌های پایین شیدسپهر تقریباً افقی هستند. بعضی مواقع میدان در لایه‌های پایین ($\log \tau = 0$)، حتی تغییر قطبیت هم می‌دهد (یعنی $90^\circ > \gamma$). این میدان‌های با قطبش معکوس در بیرونی‌ترین بخش نیم‌سایه هم رخ می‌دهند.

^۱ Evershed Flows

^۲ Chromosphere

^۳ Canopy



شکل ۳-۱ : اندازه‌ی میدان مغناطیسی (تصویر بالایی)، انحراف میدان مغناطیسی (تصویر میانی) و زاویه‌ی سمتی میدان مغناطیسی (تصویر پایینی) در یک لکه‌ی منظم.

علاوه بر آن می‌دانیم که نیم‌سایه، یک کسر قابل توجهی از کل شار مغناطیسی لکه را حمل می‌کند که این بیانگر یک ساختار عمیق (ریشه‌دار) برای نیم‌سایه است [۷۶]. این پیشنهاد نظری که لوله‌های شار نیم‌سایه، به پایین خم شده و به زیر سطح محدوده‌ی مرئی لکه‌ها برمی‌گردند [۲۸،۸۰]، توسط وستندراپ پلازا و همکاران [۹۱]، از نظر رصدی حمایت شده است. آن‌ها، وجود جریان‌های توده‌ای (جرمی) به سمت پایین را، درون و بیرون محدوده‌ی نیم‌سایه‌ی بیرونی گزارش دادند. این جریان‌های به سمت پایین که به‌نظر می‌آید ادامه‌ی جریان‌های اورشد نیم‌سایه‌ای باشند، از مدل شارش زانویی^۱

^۱ Siphon Flow Model

منتشنز و توماس [۴۰]، حمایت می‌کنند و با این اعتقاد که نیمسایه واقعا یک ساختار عمیق است که کسر قابل توجهی از کل شار مغناطیسی لکه در آن حمل می‌شود [۶۵]، سازگار است. در کنار ساختار بزرگ مقیاس لکه، که در مدت چند روز تا چند هفته ثابت است، نیمسایه و سایه‌ی لکه، به نظر می‌آیند که در مقیاس‌های خیلی کوچک (حدود ۰٫۱ ثانیه‌ی قوس)، پویا و دارای تحول هستند. می‌توان فرض کرد که میدان مغناطیسی و برهمکنش آن با جریان‌های پلاسما مهم‌ترین عامل در تولید و شکل دادن به این ساختارهای ریز است.

۳-۱ نیمسایه

۱-۳-۱ ساختار ریز نیمسایه

رشته‌های نیمسایه‌ای^۱، دانه‌های نیمسایه‌ای^۲، رشته‌های با هسته‌ی تاریک^۳، از ساختارهای ریز و بارز نیمسایه هستند.

مهم‌ترین ساختارها در نیمسایه، رشته‌های شعاعی هستند که دانه‌های نیمسایه‌ای درخشان شبه نقطه، در امتداد آن‌ها قرار می‌گیرند. رشته‌های نیمسایه‌ای ساختارهای تاریک و روشن تناوبی هستند که به صورت شعاعی در نیمسایه ردیف شده‌اند. با یک تحلیل مکانی خوب، رشته‌های روشن به صورت یک بدنه‌ی متصل به یک سر کشیده‌ی روشن‌تر (دانه‌های نیمسایه‌ای) ظاهر می‌شوند. رشته‌های روشن تقریباً ۲۰۰-۵۰۰ km پهنا و ۱۵۰۰-۴۰۰ km طول دارند که بسته به مکانشان در نیمسایه متغیر است [۲۰، ۴۱، ۶۹، ۸۲]. این رشته‌ها ۱۰ دقیقه تا ۴ ساعت عمر می‌کنند. رشته‌های پهن‌تر (با پهنای بیشتر از ۱۰۰۰ km) طول عمری بیشتر از ۲ ساعت دارند [۱، ۱۸، ۷۵]. دانه‌های نیمسایه‌ای طول عمرهایی بین ۲۰ دقیقه تا بیشتر از ۱ ساعت دارند [۲۰، ۴۱، ۶۹، ۷۰، ۸۲]. مشاهدات در پیوستار مرئی مولر [۴۲]، نشان داده‌اند که مولفه‌ی تاریک دارای شدتی بین ۰٫۳ تا ۰٫۷ شدت خورشید آرام است. ضریب پوشانندگی آن در سطح نیمسایه ۰٫۶ است. درحالی‌که مولفه‌ی روشن، شدتی بین ۰٫۷ تا ۱٫۰ برابر شدت خورشید آرام و ضریب پوشانندگی ۰٫۴ دارد. روشن و تاریک بودن این رشته‌ها مشخصه‌ای موضعی است. به این صورت که رشته‌های روشن در یک بخش از نیمسایه ممکن است که تاریک‌تر از رشته‌های تاریک در بخش دیگر باشند [۲۴، ۴۳، ۹۴]. دانه‌های نیمسایه‌ای و رشته‌های (بدنه) متصل به آن‌ها در نیمسایه‌ی داخلی یک مهاجرت رو به داخل به سمت سایه با سرعتی در محدوده‌ی ۱٫۵-۵ km/s را نشان می‌دهند. درحالی‌که در نیمسایه‌ی بیرونی، این دانه‌ها یک مهاجرت رو به بیرون دارند. می‌توان یک خط تقسیم‌بندی مشخص در نیمسایه‌ی میانی برای جداسازی این دو دسته از دانه‌های نیمسایه‌ای تعریف کرد.

^۱ Penumbra Filaments

^۲ Penumbra Grains

^۳ Dark-Cored Filaments

با یک توان تفکیک مکانی خیلی خوب، بدنه‌ی رشته‌های روشن، و همچنین دانه‌های نیم‌سایه‌ای یک ساختار درونی را آشکار می‌کنند. به این صورت که دانه‌ها به صورت شکافته یا پیوند شده ظاهر می‌شوند، [۴۹]، و بدنه‌ی این رشته‌ها یک رگه (هسته) باریک و تاریک مرکزی را نشان می‌دهند [۵۸]. ابعاد این ساختارها (رگه‌ها) حدود ۰٫۱۲ تا ۰٫۱۴ میکرومتر است. سوترلین و همکاران [۷۹]، اولین کسانی بودند که گزارش کردند که رشته‌های نیم‌سایه‌ای با هسته‌ی تاریک، عمدتاً در نیم‌سایه‌ی سمت مرکز قرص خورشید مشاهده می‌شوند. لانگانز و همکاران [۳۱]، کشف کردند که پدیداری رشته‌های با هسته‌ی تاریک، وابسته به فاصله از مرکز قرص خورشید است: به این صورت که با افزایش فاصله از مرکز قرص خورشید کاهش می‌یابد که این ناشی از یک اثر سه بعدی هندسی است و نه اثر ارتفاع تشکیل طیف. با این وجود در نیم‌سایه‌ی سمت مرکز، هسته‌های تاریک رشته‌های نیم‌سایه‌ای، برای همه‌ی فواصل از مرکز قرص خورشید دیده می‌شوند. رشته‌های نیم‌سایه‌ای با هسته‌ی تاریک در مرز سایه - نیم‌سایه، خیلی زود در سایه شکافته شده و شکل Y را تشکیل می‌دهند و بعد از مدتی (چند دقیقه) با باقی گذاشتن یک ساختار رشته‌ای کوتاه شده، و یک دانه درخشان در سایه، ناپدید می‌شوند.

۱-۳-۲ جریان پلازما در نیم‌سایه: جریان اورشد شیدسپهری

آشکارترین و قوی‌ترین جریان‌ها در لکه، جریان اورشد است [۲۳]. درون نیم‌سایه، خطوط طیفی به صورت انتقال به آبی روی نیم‌سایه‌ی سمت مرکز (قرص خورشید) و به صورت انتقال به سرخ روی نیم‌سایه‌ی سمت لبه (قرص خورشید) ظاهر می‌شوند. پس به این ترتیب در نگاه اول، جریان اورشد به عنوان یک جریان خروجی افقی و شعاعی تعبیر می‌شود. جریان اورشد، خودش را فقط به شکل انتقال‌های دوپلری آشکار نمی‌کند بلکه به شکل عدم تقارن‌های خطوط طیفی که به محدوده‌ی ارتفاع‌های شکل‌گیری خط بستگی دارند نیز بروز می‌دهد: خطوط ضعیف‌تر (قوی‌تر) انتقال‌های دوپلر مرکز خط بزرگ‌تر (کوچک‌تر)، اما عدم تقارن کمتر (بیشتر) را نشان می‌دهند. برای یک خط قوی‌تر، بزرگ‌ترین عدم تقارن‌ها و بنابراین بزرگ‌ترین سرعت‌ها، در جناح خط و نزدیک به پیوستار یافته می‌شوند. این خطوط نشان می‌دهند که اثر اورشد یک پدیده‌ی عمیق در نیم‌سایه است [۶۰]. بزرگی سرعت در راستای خط دید با ارتفاع کاهش می‌یابد [۹،۴۸]، و در هر ارتفاع معین، به سمت لبه‌ی بیرونی نیم‌سایه افزایش می‌یابد که در لبه‌ی بیرونی نیم‌سایه به صورتی ناگهانی‌تر متوقف می‌شود [۲۶]. علاوه بر آن مکان بیشینه‌ی سرعت، هنگامی که لایه‌های شیدسپهری بالاتری (مثلاً، مرکز خط) را بررسی می‌کنیم به فواصل شعاعی بزرگ‌تر انتقال می‌یابد.

در بررسی هندسه‌ی میدان جریان سرعت باید توجه کرد که عدم تقارن آشکار بین مکان‌های بزرگ‌ترین انتقال به آبی‌ها در نیم‌سایه‌ی سمت مرکز و انتقال به سرخ‌ها در نیم‌سایه‌ی سمت لبه، نشانه‌ای است که جریان باید دارای زاویه‌ی انحراف بزرگ (خمیده) باشد. از روش‌هایی که هندسه‌ی جریان

میانگین را تعیین می کند، استنتاج شده است که در لایه های عمیق، انحراف متوسط بردار جریان، با فاصله ی شعاعی تغییر می کند: در نیم سایه ی داخلی، کمی منحرف به سمت بالا است، سپس افقی می شود و در نیم سایه ی خارجی تر به سطح خورشید برمی گردد [۸۳]. در لایه های بالاتر، بخش هایی از شار جریان (حدود ۲۰-۱۰٪) به صورت بالارونده است و تا سایه بان مغناطیسی ادامه می یابد [۴۴، ۷۴]. رصدها نشان می دهند که بدنه ی مجراهای جریان رشته ای در نیم سایه ی سمت لبه، عمدتاً مرتبط با انتقال به سرخ (جریان خروجی اورشد) است. اما سر رشته (دانه نیم سایه ای)، مرتبط است با یک انتقال به آبی خیلی مشخص و از نظر فضایی محدود، که به عنوان یک جریان روبه بالا تعبیر می شود [۴۷]. وارونی جریان (ناحیه ی بین جریان روبه بالا و روبه بیرون) در مقیاس های فضایی کمتر از یک ثانیه قوس رخ می دهد. وجود جریان های روبه بالا و پایین، فقط محدود به نیم سایه ی داخلی و خارجی نمی شود: ساختارهای ریز کشیده شده که نشان دهنده ی یک جریان روبه بالای کوچک هستند، در سرتاسر نیم سایه مشاهده می شوند. تکه های^۱ جریان روبه پایین، ترجیحاً در مرز بیرونی یافت شده است، اما نه فقط در آنجا [۲۷]. بیشتر تکه های جریان روبه پایین، قطبیت مخالفی از لکه دارند.

۱-۳-۳ میدان های مغناطیسی در نیم سایه: نیم سایه ی شیاری

این طور نیست که لکه ها، ساختار رشته ای را فقط در درخشندگی و میدان سرعت نشان دهند، بلکه نور قطبیده ی تابش شده از آنها نیز ساختار رشته ای را نشان می دهد. شیار به معنای یک ناهمگنی (افت و خیز) سمتی در زاویه ی بردار میدان مغناطیسی در نیم سایه است. ناهمگنی سمتی میدان مغناطیسی نیم سایه ای در مقیاس های کوچک به یافته های بکرز و شروتر [۲]، برمی گردد و توسط تعدادی روش های رصدی متفاوت نیز بنا شده است [۲۱، ۳۴]. نیم سایه به صورت "شیاری" در مقیاس های فضایی کوچک ظاهر می شود [۳۳، ۸۱]. شیاری یا شانه نشده بودن میدان در نیم سایه به این معنی است که هنگام حرکت به دور مرکز سایه ی یک لکه ی منظم زاویه ی انحراف میدان از خط عمود بر سطح لکه، (۷)، بین ۱۰° تا ۴۰° افت و خیز می کند [۳۴، ۴۵]. به این نتیجه می رسیم که دو مولفه ی متفاوت می توانند از هم جدا شوند: یکی مولفه ای است که میدان های عمودی تر و قوی تر را دربردارد و دیگری میدان های ضعیف تر با زاویه ی انحراف بزرگ تر (افقی تر) را نشان می دهد، که به ترتیب spine و intraspine نامیده می شوند [۱۳، ۱۴، ۳۴]. توصیف کاملی از این دو مولفه در بلوت روبیو و همکاران [۴]، آمده است. علاوه بر آن، هسته های تاریک در رشته های نیم سایه ای گرایش دارند که میدان های ضعیف تر داشته باشند، و همچنین مکان هایی هستند که جریان اورشد در آنها متمرکز شده است [۸، ۳۱].

^۱ Patches