

Colpi di Sole

Il lungo letargo in cui è caduta la nostra stella sta volgendo al termine, e mentre il mondo scientifico si interroga sulle effettive difficoltà di riuscire a prevedere l'attività solare sia sul breve che sul lungo periodo, noi facciamo il punto sulla conoscenza del più spettacolare fra tutti i fenomeni tipici del Sole: le protuberanze.

Fra tutti i fenomeni osservabili sul Sole, le protuberanze sono certamente tra quelli più spettacolari e affascinanti per ricchezza morfologica ed evoluzione dinamica. Sebbene le prime interpretazioni corrette delle protuberanze, intese come "nubi nella corona solare", risalgano a circa metà Ottocento, la loro osservazione scientificamente documentata risale all'epoca medioevale, dove però non mancavano spiegazioni a dir poco esotiche.

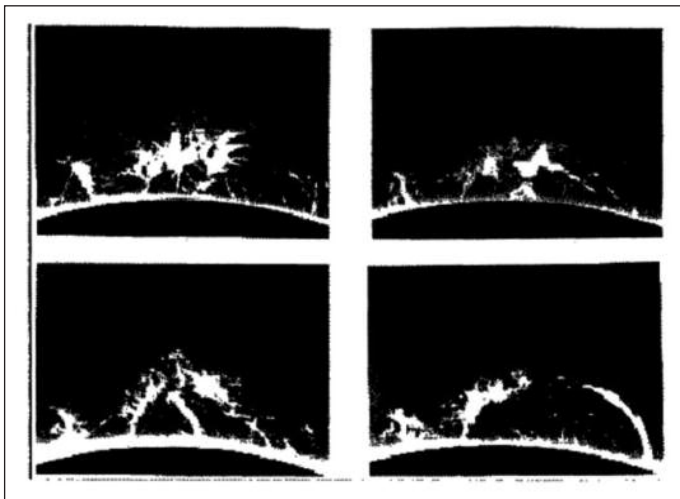
La storia dello studio delle protuberanze solari si tende, per convenienza, a suddividerla in tre periodi: 1) speculativo, antecedente il 1860; 2) fotografico e spettrografico, compreso tra il 1860 e il 1960; 3) polarimetrico, successivo al 1960 (Tandberg-Hanssen, 1995, 1998).

Nel periodo speculativo risulta evidente che l'unico modo per poter osservare il fenomeno delle protuberanze era quello di utilizzare le eclissi totali di Sole. Le ricerche di Chistyakov sulle eclissi storiche portano a datare al 1375 a.C. la prima annotazione su una possibile protuberanza ricavata da incisioni cinesi. Più prudentemente Wang e Siscoe, studiando diverse registrazioni archeologiche cinesi, suggeriscono il periodo compreso tra il 1339 a.C. e il 1280 a.C. come il più attendibile per la prima descrizione fenomenologica della corona solare e/o di protuberanze. Secondo Littmann, Willcox ed Espenak, il primo rapporto certo sulle protuberanze è più recente e risale al 334 d.C. a cura di Giulio Firmicio di Siracusa.

Secchi, nel 1875, riporta un'osservazione di Muratori del 1239 durante un'eclisse in cui si descrive un "buco infiammato" nella corona, che molto probabilmente non era altro che una protuberanza, forse inserita all'interno di una cavità. Vyssostky, nel 1949, riporta che diverse cronache russe di

epoca medioevale citano fenomeni associabili alle protuberanze; Sviatsky, infatti, nel 1923 cita come prima descrizione piuttosto affidabile di protuberanze quella contenuta nella cronaca di Novgorod dell'eclisse del 1° maggio 1185, ma gli storici concordano sul fatto che la prima descrizione su base scientifica di questi fenomeni risalga all'eclisse del 2 maggio 1733 a Göteborg in Svezia. In quell'occasione, Vassenius osserva tre o quattro protube-

ranze completamente separate dal disco lunare, interpretandole come "nubi rosastre nella atmosfera lunare", una spiegazione plausibile per l'epoca, tenendo conto anche delle circostanze dell'osservazione. Secchi (1875) riporta che *"...di tutte le osservazioni antiche la più dettagliata è quella che Vassenius fece a Göteborg il 2 maggio 1733. Nella corona che egli attribuisce all'atmosfera della Luna, vide fluttuare numerose nubi rosse; una di queste sembrava più*



Fotografie di protuberanze realizzate da Lyot con il suo coronografo nel 1937. [Osservatorio di Parigi, Meudon]

grande delle altre e sembrava composta da tre masse sovrapposte, completamente separate dal disco lunare".

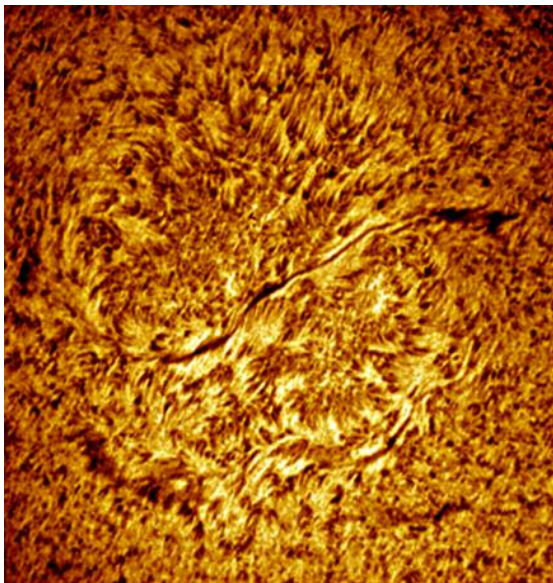
Ulloa, nel 1778, da una località imprecisata, riporta l'osservazione di una protuberanza attiva interpretandola come un "buco nella Luna".

Tutte queste osservazioni preliminari delle protuberanze sono state negli anni successivi dimenticate, fino all'osservazione dell'eclisse famosa dell'8 luglio 1842, visibile in Francia e in Italia. Final-

mente le osservazioni a cura di Baily, Airy, Arago, Struve e altri portarono a interpretare



Ripresa CCD del 23 aprile 2006 di una protuberanza quiescente (a sinistra) e attiva (a destra) utilizzando filtri interferenziali a banda stretta centrati sulla riga dell'H α . [HASO - Pisa]



Enorme protuberanza "attiva" (di tipo intermedio) (> 555 000 km, poco inferiore a 0.8 Rs) ripresa sul disco solare (filamento) il 10 ottobre 2005 associata alla grande regione attiva AR 10808 a seguito della sua fase di decadimento. Queste riprese consentono di studiare meglio le proprietà della cromosfera in prossimità dei filamenti. [HASO - Pisa]

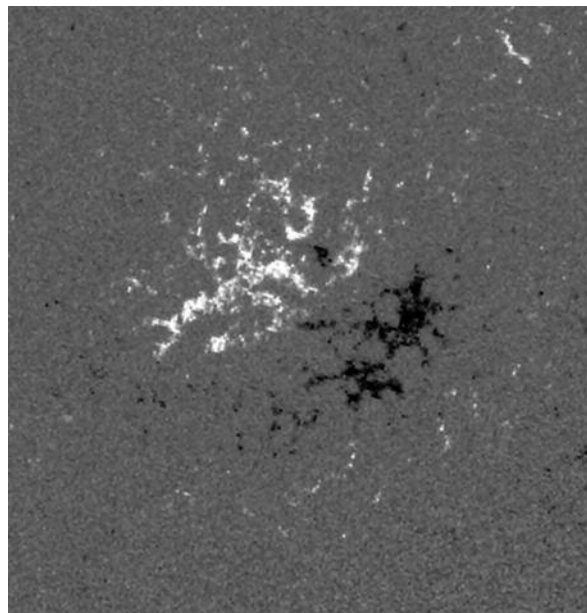
correttamente il fenomeno delle protuberanze come un fenomeno tipicamente solare, ma il consenso era tutt'altro che generale, a causa della imprecisa descrizione fatta delle forme

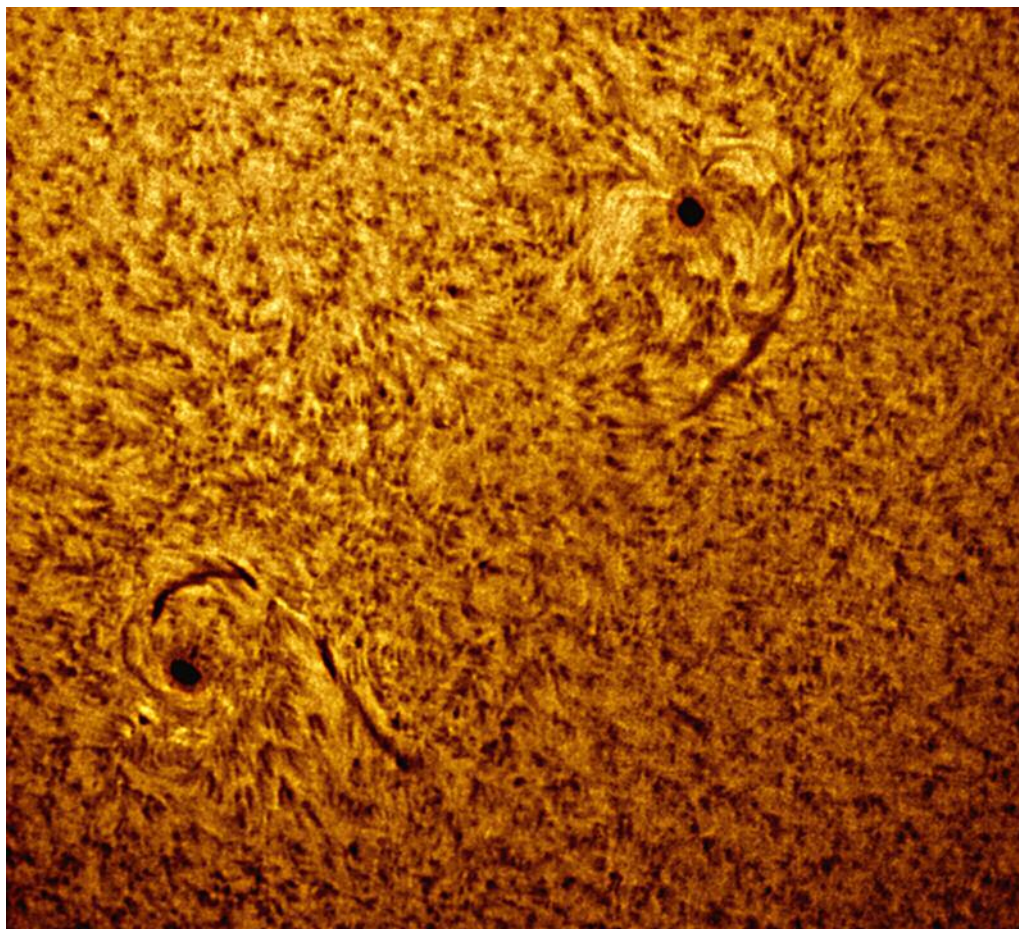
assunte dalle protuberanze e delle loro posizioni, principalmente dovuta ad un fenomeno spettacolare del tutto inatteso. Secchi (1875) riporta: *"Durante l'eclisse dell'8 luglio 1842, l'attenzione degli astronomi venne attratta dalle protuberanze che si stagliavano attorno alla Luna come delle fiamme gigantesche di colore rosa [...]* La sorpresa che causò questo fenomeno inatteso non permise di fare delle osservazioni precise, portando ad un disaccordo completo tra le differenti relazioni". Molti infatti ritenevano ancora che le protuberanze fossero fenomeni lunari, come nubi o montagne (Grant, 1852). È solo con l'eclisse del 28 luglio 1851, osservata in Norvegia e Svezia da parte di Airy e Carrington, che emerge un'interpretazione che sarà in seguito consolidata: "le protuberanze sono formazioni nebulari solari". La na-

tura fisica di queste nubi era naturalmente ancora tutta da definire. È di quell'anno la prima immagine di un'eclisse totale di Sole realizzata su dagherrotipo da parte di Berkovski.

Nel 1860 vi è una svolta decisiva nello studio e interpretazione delle protuberanze solari, con l'introduzione della tecnica moderna di ripresa fotografica durante l'eclisse del 1860 in Spagna. Secchi, a seguito delle osservazioni fotografiche e delle osservazioni visuali dell'eclisse del 1851, riporta le seguenti conclusioni: 1) le protuberanze non sono semplici apparenze prodotte da illusioni ottiche: sono fenomeni reali che hanno la loro sede sul Sole; 2) le protuberanze sono masse di materiale luminoso dotate di una grande vivacità e attività fotogenica molto rimarchevole; 3) vi sono masse di materia di protuberanze sospese e isolate come nubi nell'atmosfera;

Magnetogramma ripreso lo stesso giorno dell'immagine precedente, nel quale viene mostrato come il filamento suddivida regioni a polarità magnetica opposta (le aree nere sono a polarità negativa, mentre le aree bianche sono a polarità positiva). [SOHO MDI ESA-NASA]





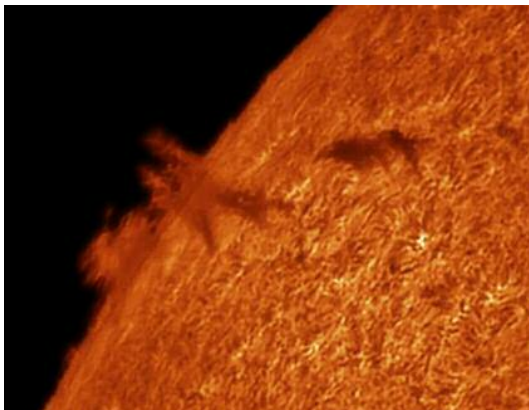
Filamenti associati alle regioni attive: AR10940, AR10941 ripresi il 4 febbraio 2007. Nel filamento in basso a sinistra è ben visibile una parte significativa in emissione, più luminosa della cromosfera circostante. [HASO - Pisa]

42

4) oltre alle protuberanze esiste uno strato della stessa materia che circonda il Sole da tutte le parti (qui Secchi ha intuito l'esistenza della cromosfera); 5) il numero delle protuberanze è incalcolabile; 6) l'altezza delle protuberanze è notevole (2 o 3 primi, ovvero da circa 90 000 km a oltre 130 000 km).

Le tecniche spettroscopiche, abbinate a quelle fotografiche si devono allo stesso Secchi e a de la Rue, che impiegarono per la prima volta **osservazioni spettrografiche** durante l'eclisse del 18 agosto 1868 in India e Malacca, allo scopo di studiare la "chimica delle protuberanze". Il risultato principale ottenuto allora era che lo spettro delle protuberanze consistesse in linee brillanti, il che supportava l'interpretazione fisica di queste come

masse di gas luminoso. A seguito di quest'ultima eclisse si ottenne uno sviluppo che risultò fondamentale: Janssen si rese conto che molte delle linee di emissione erano sufficientemente brillanti da poter essere rilevabili anche fuori eclisse. Il giorno seguente l'eclisse, posizionò la fenditura dello spettrografo al di là del limbo solare osservando le linee di emissione delle protuberanze in piena luce del giorno. Indipendentemente e contemporaneamente, lo stesso tipo di osservazioni venivano realizzate da Lockyer, che nel medesimo anno pubblica il famoso articolo in due parti *Spectroscopic Observations of the Sun*, dove, tra l'altro, conia con Sharpey il termine "**cromosfera**" per indicare l'involucro dinamico ad elevato cromatismo che circonda il Sole al di



Protuberanza quiescente vista contemporaneamente proiettata sul disco (in assorbimento) e al bordo (in emissione). Ripresa H α a banda stretta (<0.5 Å) del 1° maggio 2008. [Pete Lawrence, Selsey, West Sussex-UK]

sopra della fotosfera, fino al confine più esterno della **corona**, già notato da Secchi nel 1851.

Altra tappa fondamentale nello studio delle protuberanze si ha nel 1892, quando Hale mette a punto lo **spettroeliografo** e lo rende disponibile l'anno seguente anche in Francia a Deslandres. Ma probabilmente è il 1936 l'anno decisivo per lo studio moderno delle protuberanze, con l'introduzione da parte di Lyot dei **filtri bibrifrangenti** e del **coronografo**, i quali rendono possibile l'osservazione continua e sistematica delle protuberanze. A pag. 40 sono riprodotte alcune delle prime osservazioni di Lyot del giugno 1937, raccolte successivamente nel famoso lavoro di rassegna del 1948 di d'Azambuja, allievo

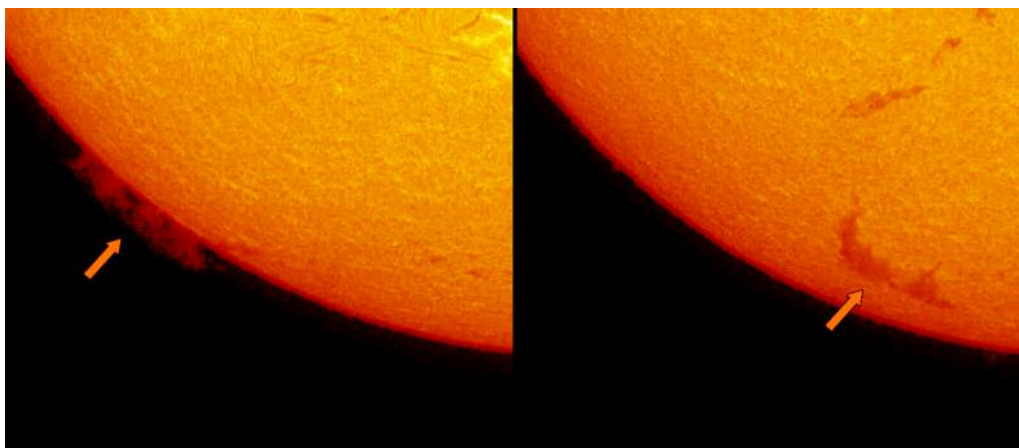
di Deslandres e pioniere nello studio moderno delle protuberanze solari. Il successivo periodo polarimetrico ha inizio nel 1961 quando i fisici solari Zirin e Severny effettuano le prime misure del campo magnetico dentro le protube-

ranze, usando il ben noto effetto di sdoppiamento delle linee spettrali all'interno di un campo magnetico, e chiamato "**effetto Zeeman**". In effetti, già nel 1908 Hale, utilizzando lo stesso principio, registrò i campi magnetici all'interno delle regioni attive e delle macchie, ma solamente grazie alle caratteristiche di **polarizzazione** dell'effetto Zeeman si è potuto successivamente misurare l'entità dei più deboli campi magnetici delle protuberanze, che variano da pochi gauss, per le protuberanze di tipo quiescente, a un centinaio di gauss per quelle attive.

La natura delle protuberanze

A partire dal 1951 iniziano a svilupparsi interpretazioni e modelli sulla natura fisica delle protuberanze e sulle loro caratteristiche principali: citiamo il primo modello di Menzel che mostra come il campo magnetico possa sostenere una

Protuberanza quiescente vista al bordo solare (sinistra) e proiettata sul disco (destra) dopo 4 giorni. Riprese H α del 26 e 30 agosto 2001. [Big Bear Solar Observatory]



protuberanza in equilibrio contro la forza gravitazionale. Seguono modelli più raffinati, come quello di Dangey del 1953, quello di Kippenhahn-Schluter del 1957 e successivi, tutti volti a spiegare, sulla base dei campi magnetici osservati, il so-

protuberanza in equilibrio contro la forza gravitazionale. Seguono modelli più raffinati, come quello di Dangey del 1953, quello di Kippenhahn-Schluter del 1957 e successivi, tutti volti a spiegare, sulla base dei campi magnetici osservati, il so-

stentamento delle protuberanze nella cromosfera e nella corona. Contemporaneamente, un altro fronte di studio era rivolto a capire la natura del plasma nelle protuberanze, inizialmente ignorando la presenza dei campi magnetici e considerando solamente i parametri di temperatura, densità e velocità (Jager, 1959, Jefferies e Orrall, 1963).

I modelli più recenti cercano di comprendere la struttura interna e la termodinamica delle protuberanze considerando anche i relativi meccanismi di supporto magnetico, all'interno di modelli tridimensionali che siano in grado di riprodurre la dinamica osservata mediante, ad esempio, i [processi di riconnessione magnetica](#) (tanto importanti per spiegare l'origine dei [brillamenti solari](#)), intimamente correlati alla struttura a grande scala del campo magnetico nella corona.

Seguendo Tandberg-Hanssen (1995) possiamo riassumere le tre caratteristiche essenziali delle protuberanze: 1) non esiste il concetto di protuberanza canonica, che risulti di riferimento per le altre, anche se in termini molto generali una protuberanza si può definire come un oggetto della cromosfera o della corona che è più denso e più freddo del-

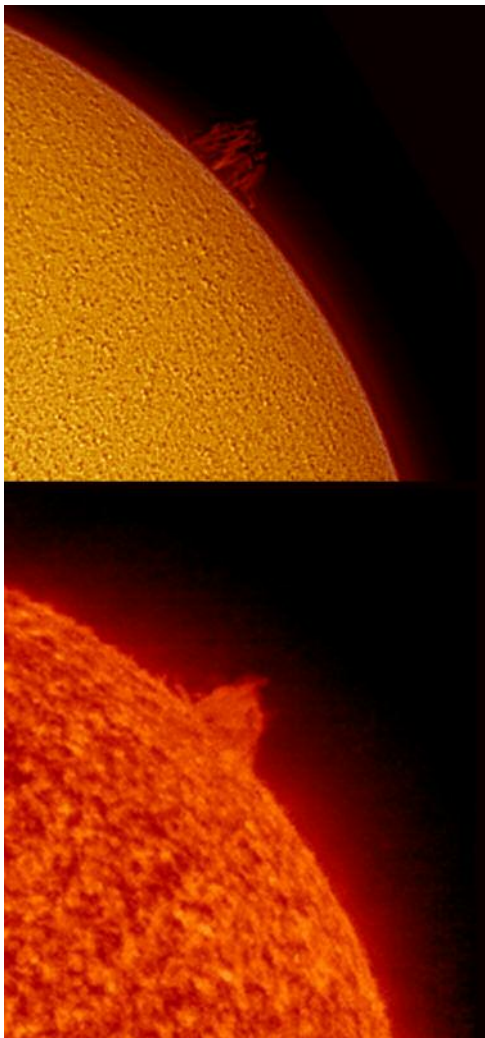
l'ambiente circostante; 2) nessuna struttura può considerarsi isolata dall'ambiente circostante, ma ha forti connessioni e interazioni con la cromosfera e la corona, e 3) nessuna protube-

ranza ha una struttura di tipo uniforme e omogenea, e inoltre tutte le protuberanze sono sistemi dinamici, sebbene su scale spaziali e temporali differenti.

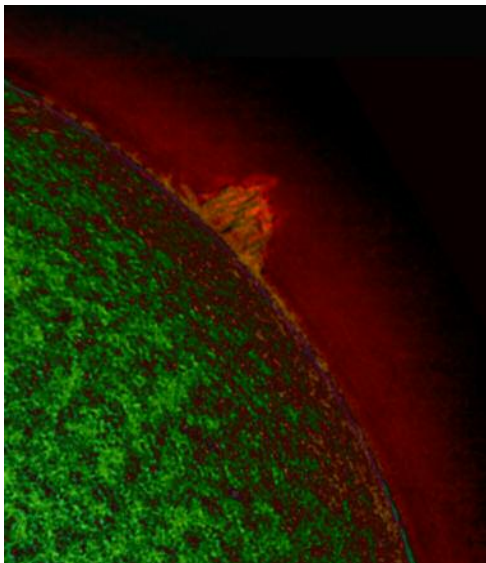
Anche tenendo conto delle suddette limitazioni, risulta comunque utile, per lo studio della natura fisica delle protuberanze, suddividerle in due grandi classi, comuni (con qualche variante) a tutte le classificazioni proposte: quelle quiescenti, ovvero associate a regioni cromosferiche calme, e quelle attive, ovvero associate a regioni attive fotosferiche e cromosferiche (Petit, 1925-1932; Newton, 1934; Menzel e Evans, 1953; Severny e Khoklova, 1953; de Jager, 1959; Zirin, 1966).

Un discorso a parte va invece rivolto ad una ulteriore terza classe, che è quella delle protuberanze eruttive (strutture quiescenti o attive che diventano instabili, vengono espulse

in tempi rapidi e scompaiono diffondendo nella corona), delle quali fanno parte anche i fenomeni coronali transienti fortemente esplosivi detti [eiezioni o espul-](#)



Confronto tra due immagini simultanee di una protuberanza quiescente riprese nel visibile in H α (sopra) e nell'ultravioletto in He II (sotto) il 26 agosto 2008 alle ore 07:19 TU. [HASO - Pisa, SOHO ESA-NASA]



Elaborazione digitale che consente di evidenziare le differenze esistenti nelle due immagini precedenti, fornendo informazioni utili sulla distribuzione spaziale di temperatura e densità all'interno della protuberanza. La colorazione tende al nero al tendere a zero delle differenze.
[HASO - Pisa, SOHO ESA-NASA]

sioni di massa coronale (in breve CME, da Coronal Mass Ejections).

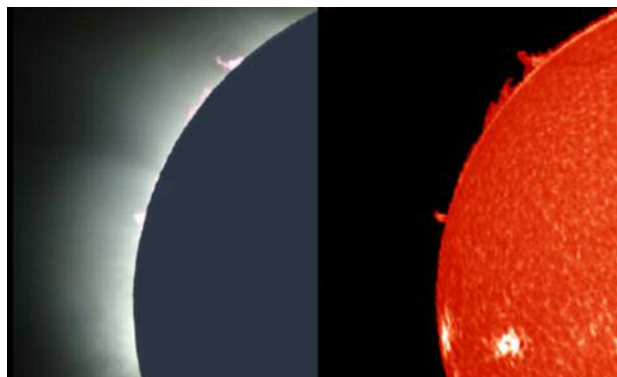
Le principali caratteristiche che distinguono le prime due classi sono: le dimensioni, maggiori nel caso delle quiescenti (da 60 000 a 600 000 km di lunghezza e da 4000 a 15 000 km di ampiezza); la temperatura, più bassa nelle quiescenti (da 5000 a 8000 K); il campo magnetico, minore nelle quiescenti (da

4 a 50 G); le velocità del plasma, più basse nelle quiescenti (da 0,5 a 5 km/s o da 10 a 20 km/s). Ancora a pag. 40 è mostrata una immagine ripresa in H α dove sono presenti contemporaneamente protuberanze quiescenti e attive, mentre a pag. 41 (in alto) abbiamo un esempio di enorme protuberanza attiva (o, meglio, intermedia secondo Zirin) ripresa sul disco solare (filamento) nell'ottobre 2005, associata alla regione attiva AR10808, una delle più grandi e dinamiche dell'appena concluso ciclo XXIII. Confrontando immagini del disco solare in H α con i relativi **magnetogrammi**, si è potuto stabilire che i filamenti e le protuberanze in genere seguono linee dotate di componente longitudinale del campo magnetico nulla e quindi hanno la particolare caratteristica di dividere, separare, le regioni a polarità magnetica opposta. I filamenti visti proiettati sul disco appaiono scuri, in assorbimento, rispetto alla cromosfera circostante; più raramente capita che alcuni filamenti associati a grandi regioni attive, appaiano in emissione anche proiettati sul disco e dunque più luminosi della cromo-

sfera circostante, come avviene nel caso dei brillamenti. Un esempio di questo tipo è mostrato a pag. 42, dove si vedono due ampi filamenti attivi incurvati e associati alle grandi regioni AR10940 e AR10941, ripresi il 4 febbraio 2007. Una parte significativa di uno dei filamenti appare in emissione e questo fenomeno ha una durata relativamente breve rispetto alla vita complessiva del filamento. La straordinaria immagine, con un effetto quasi 3D, di pag. 43 (in alto) mostra invece come una protuberanza vista proiettata sul disco appaia normalmente scura, in assorbimento; mentre la stessa, se vista contemporaneamente sul bordo, appaia chiara cioè in emissione. Un altro bell'esempio di come le protuberanze appaiano chiare, se viste al bordo del disco solare, ma anche scure, se viste sul disco, è mostrato ancora a pag. 43 (in basso), dove è ben visibile lo spostamento e il cambiamento di una grande protuberanza quiescente vista a distanza di quattro giorni.

Principali caratteristiche fisiche

Una diagnostica efficace delle protuberanze deve tener conto del fatto che esse hanno temperature centinaia di volte inferiori a quelle della corona circostante e densità centinaia o migliaia di volte su-

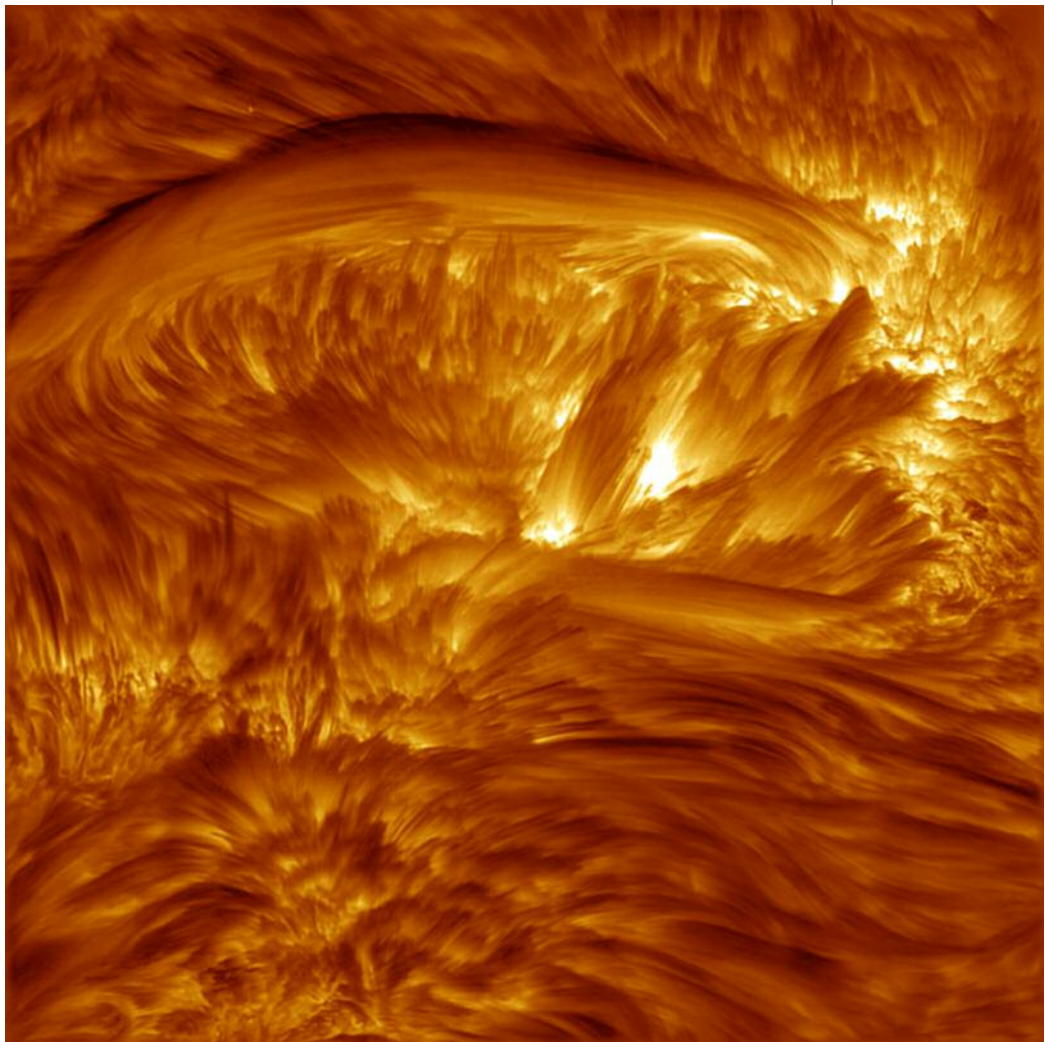


Confronto tra immagini contemporanee di protuberanze riprese durante l'eclisse totale di Sole del 29 marzo 2006: luce bianca a sinistra e nella banda H α a destra. [NAO Rozhen]

periori. Le due righe spettrali diagnostiche per eccellenza sono quella dell'**H α nel visibile a 656.28 nm** (linea C di Fraunhofer o prima transizione della **serie di Balmer**), che si forma a temperature di circa 10 000 K, e quella dell'**He II nell'ultravioletto**, a 30.4 nm, che si forma a temperature tra i 60 000 e gli 80 000 K nella più alta cromosfera.

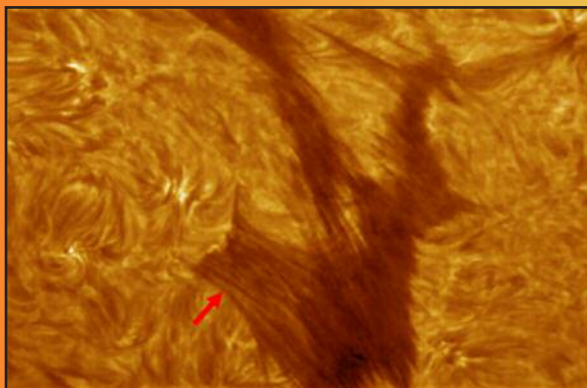
Le osservazioni negli anni Settanta dello Skylab, con risoluzione spaziale di 5 secondi d'arco (circa 3600 km), hanno mostrato che le dimensioni delle protuberanze rimangono praticamente invariate se osservate nelle linee spettrali formate nel range di temperatura compreso tra 10 000 K e 300 000 K, mentre al di sopra di questa temperatura le protuberanze iniziano a diffondere unendosi alla corona. Recenti studi a cura del **Big Bear Solar Observatory (BBSO)** e del **GSFC-NASA**, mettendo a confronto immagini di protuberanze sia quiescenti che eruttive nelle due righe spettrali suddette, hanno invece dimostrato differenze significative nella morfologia e dinamica delle protuberanze esaminate, evidenziando così l'esistenza di forti disomogeneità nelle temperature del plasma e

la non necessaria coesistenza di regioni calde e fredde nella stessa protuberanza. A pag. 44 troviamo un confronto tra due immagini simultanee di una imponente protuberanza quiescente ripresa il 26 agosto 2008, una nella banda H α (HASO - Pisa) e l'altra nella banda dell'He II (telescopio EIT a bordo della sonda **SOHO**). Come risulta evidente dalle immagini, la morfologia rispecchia la diffe-



Impressionante immagine di filamenti associati a una regione attiva e immersi nella struttura fine della cromosfera, ripresa nella banda H α il 4 ottobre 2005 con lo Swedish Solar Telescope (Lin e Engvold). [Institute for Solar Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias]

Filamento quiescente ad elevata risoluzione spaziale osservato nella banda H α il 25 agosto 2003 con lo Swedish Solar Telescope (Lin et al., 2005). La freccia indica una struttura peculiare ("barb"), un'appendice laterale del filamento, allineata con le linee



del campo magnetico e piegata verso il basso, in cui fluisce materiale cromosferico. [Institute for Solar Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias]

rente distribuzione di temperature e di densità della protuberanza, caratteristiche delle due bande di ripresa. Il confronto diretto multibanda tra immagini di questo tipo consentirà di studiare sempre più a fondo le condizioni fisiche all'interno delle varie tipologie di protuberanze. Come esempio, a pag. 45 (in alto) è mostrata un'elaborazione digitale delle precedenti immagini, che consente di evidenziare in modo chiaro le differenze esistenti nelle due riprese, consentendo così di caratterizzare la distribuzione spaziale di temperatura e densità all'interno della protuberanza.

Fino a questo punto abbiamo descritto e classificato le protuberanze tenendo conto degli aspetti morfologici e delle loro varie proprietà fisiche e dinamiche. Rimane comunque ancora da rispondere a una domanda fondamentale: come si formano le protuberanze? Sappiamo che il parametro più importante per lo studio delle protuberanze è il campo magnetico che governa il comportamento del plasma. Nonostante le osservazioni sistematiche compiute negli ultimi decenni, i meccanismi fisici di formazione delle protuberanze non sono ancora del tutto compresi. In particolare, non esiste ancora una teoria che spieghi la loro stabilità in un ambiente poco denso e ad alta

temperatura. Possiamo dire, per brevità, che esistono almeno due tipi principali di formazione delle protuberanze: uno dall'alto, con origine nella corona (processo di condensazione), e uno dal basso, governato dai campi magnetici fotosferici e cromosferici (processo di iniezione) (Tandberg-Hanssen, 1995). Poiché si pensa che il campo magnetico giochi comunque il ruolo principale per spiegare la formazione, la stabilità e anche l'eventuale insorgere di instabilità delle protuberanze che portano ai fenomeni eruttivi, lo sforzo maggiore si sta concentrando sullo studio dettagliato delle strutture e delle dinamiche dei campi magnetici correlati, ri-

correndo a tecniche sperimentali sofisticate come la [spettropolarimetria](#).

Utilizzando gli strumenti ottici e spettropolarimetrici a bordo del [satellite Hinode](#), un gruppo congiunto di ricercatori statunitensi e giapponesi ha recentemente indagato la formazione di protuberanze attive, studiando sia la dinamica della fotosfera sia la dinamica della cromosfera all'interno della regione attiva AR 10953. L'evoluzione del campo magnetico fotosferico suggerisce che la comparsa di [tubi di flusso](#) di forma elicoidale potrebbe essere sempre associata alla formazione e al mantenimento delle protuberanze in regioni attive.

Quando conosceremo la topologia 3D completa del campo magnetico all'interno delle protuberanze solari potremo rispondere con maggior accuratezza alle domande irrisolte sui meccanismi fisici che regolano la loro formazione nella cromosfera e nella corona. Una domanda, solo apparentemente banale, è la seguente: di che colore sono le protuberanze? Sappiamo che se osservate nella banda della forte linea di emissione H α le protuberanze appaiono di un rosso vivo, ma se osservate durante le eclissi totali di Sole, in luce bianca, appaiono di un colore rosato. Studi recenti hanno mostrato che l'emissione in luce bianca

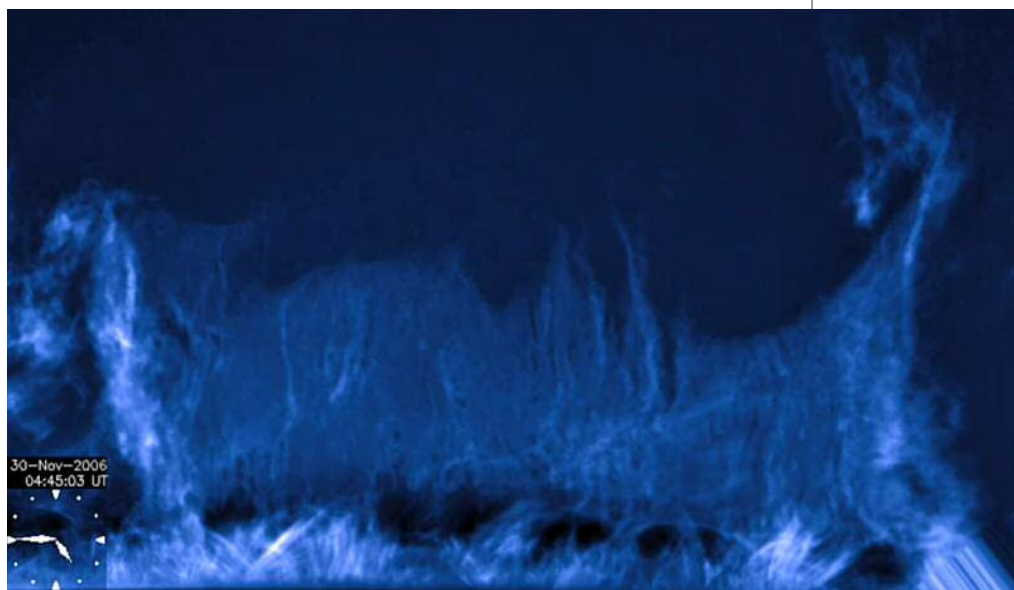
della maggior parte delle protuberanze è dovuto ad un [processo di scattering](#) (o diffusione) Thomson della radiazione proveniente dal disco solare sugli elettroni liberi nel plasma della protuberanza. La colorazione rosata è quindi il risultato di un miscuglio dell'emissione rossa in $H\alpha$ e di quella bianca (un esempio è a pag. 45). Il vero colore può comunque dipendere anche da altri fattori: l'emissione in luce bianca della corona posta davanti e dietro la protuberanza si sovrappone necessariamente all'emissione interna; inoltre anche l'emissione nel blu della riga $H\beta$ può contribuire all'emissione totale.

Gli studi più recenti sulla struttura fine delle protuberanze (e dei filamenti) raggiungono la risoluzione spaziale di 70-100 chilometri (ovvero 0,15"), grazie al nuovo telescopio dotato di ottica adattiva SST ([Swedish 1-m Solar Telescope](#)). Lo studio di queste straordinarie immagini (si vedano le pagg. 46 e 47) consentirà di approfondire il ruolo dei campi magnetici nella morfologia e struttura interna delle protuberanze.

Per la dinamica ci si aspetta di avere sequenze temporali omogenee con la stessa risoluzione grazie al SOT (Solar Optical Telescope) a bordo del satellite giapponese Hinode. Straordinarie sono le prime immagini già inviate da SOT sulla struttura e dinamica delle protuberanze, come ad esempio quelle quiescenti polari ad anello che

stanno forzando a rivedere le idee e le teorie correnti sul ruolo che i campi magnetici hanno nella formazione e comportamento dinamico di queste strutture. A questo proposito appaiono di grandissimo interesse i più recenti sviluppi nello studio della cosiddetta *sismologia di protuberanze*, un potente strumento diagnostico per derivare informazioni utili, non ottenibili in altri modi, sulle configurazioni magnetiche, i parametri del plasma e i meccanismi di stabilità nelle protuberanze, sia attive (ed eruttive) che quiescenti. Questa disciplina della fisica solare si avvale ora delle migliori osservazioni disponibili ad alta risoluzione in $H\alpha$, EUV e nelle microonde, ottenute grazie a varie sonde (SOHO, Hinode e [STEREO](#)), oltre che delle più sofisticate analisi di serie temporali nonlineari (come l'[analisi wavelet](#)). L'idea che sta alla base di questo approccio è studiare la struttura interna e la dinamica delle protuberanze, grazie alle oscillazioni di grande ampiezza (da 2 a 40000 km di spostamento e oltre i 20 km/s di velocità) innescate principalmente dall'interazione con onde d'urto prodotte da grandi brillamenti solari distanti (Tripathi e al., 2009).

Studiare la morfologia e la dinamica del-

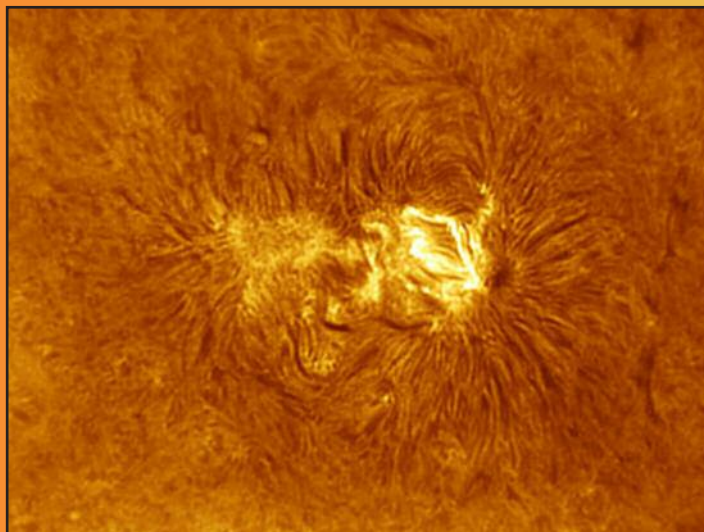


Spettacolare immagine di una protuberanza quiescente polare ad anello ripresa nella riga del calcio ionizzato, $Ca II H$, dal telescopio ottico solare (SOT) della sonda Hinode. [JAXA/NASA]

AR 1029: la più grande e attiva regione dell'anno e del nuovo ciclo solare

A fine settembre 2009 si poteva trarre il seguente bilancio parziale dell'attività solare: nel corso dell'anno, il Sole ha prodotto solamente 18 macchie solari, spesso così piccole che molti osservatori avevano dubbi sulla reale formazione di macchie fotosferiche all'interno delle regioni attive segnalate. Ormai ci si era abituati a questo regime di bassissima attività solare in un periodo di minimo storico, con pochissime eccezioni, come la "straordinaria" regione attiva AR1024, che nella prima settimana di luglio ha deliziato gli osservatori solari diventando in breve tempo la più grande regione attiva dopo un'attesa di almeno due anni,

raggiungendo l'estensione di 230 mes (milionesimi di emisfero solare; 1 mes corrisponde a circa 3 milioni di kmq), con **configurazione magnetica bipolare** (beta) e producendo **brillamenti solari di classe B e C**. La polarità magnetica della AR1024 la classifica come appartenente al nuovo ciclo solare 24. Dopo questo show tutto è ritornato come prima... o quasi. Una nuova sorpresa è però arrivata a fine ottobre: durante il week-end iniziato il giorno 24, una nuova regione, la AR1029, è emersa quasi improvvisamente facendosi notare subito con l'emissione di brillamenti di classe B e C. La sua dimensione e struttura erano già interessanti, ma nel corso della sua evoluzione è arrivata a raggiungere i 380 mes, il 29 ottobre, con una configurazione magnetica relativamente complessa (di **tipo beta-gamma**). Dopo cinque giorni di crescita continua la AR1029 è diventata la più grande e attiva regione dell'anno, con un'estensione lineare pari a 50000 km e producendo ben 10 brillamenti di classe C, più del triplo del numero di brillamenti di questa classe individuati nel corso dell'anno. Anche la polarità magnetica della AR1029 la classifica come appartenente al nuovo ciclo solare. Forse questi sono i segnali che aspettavamo per il risveglio dell'attività solare e la ripresa del ciclo 24.



Una delle prime immagini in H α della regione attiva AR1029, ripresa il 25 ottobre 2009 da Paul Haese - Blackwood, South Australia.

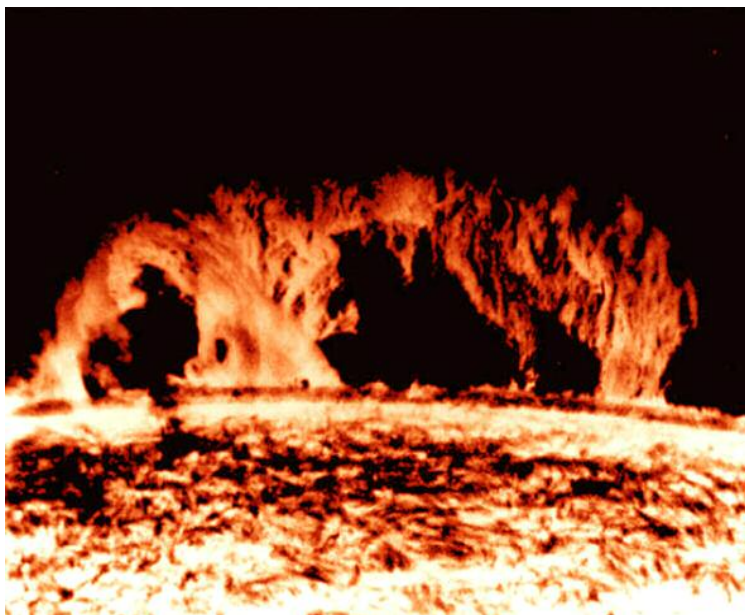
49

le protuberanze ad elevata risoluzione spaziale e temporale consentirà di raffinare i modelli teorici e le capacità diagnostiche attuali, non dimenticando comunque l'osservazione di Heinzel, fatta in un recente convegno sulla fisica della cromosfera (Coimbra, 2007), riprendendo una citazione di Tandberg-

Hannsen nella sua splendida monografia, il quale sottolinea come dopo 130 anni siano ancora validi i commenti di Secchi: *"Le protuberanze si presentano sotto forme così bizzarre e capricciose che è assolutamente impossibile descriverle con una certa esattezza"* (*Le Soleil*, 1877).

Conclusioni

Le possibilità osservative delle protuberanze solari (e più in generale della cromosfera) da parte dell'astrofilo sono grandemente migliorate negli anni recenti grazie all'ampia diffusione e commercializzazione di svariati sistemi di filtraggio a banda stretta ($< 0.7 \text{ \AA}$) di elevata qualità, principalmente centrati sulla riga dell'idrogeno, $H\alpha$ (656.28 nm), e dei relativi sistemi di ripresa digitale tramite CCD appositamente progettati per le riprese planetarie e solari. Quanto si sia in effetti semplificata l'attività di ripresa e la successiva elaborazione digitale delle immagini delle protuberanze solari appare evidente solo se si fa un confronto con le tecniche che si utilizzavano, ad esempio, all'inizio degli anni Novanta. Scorrendo infatti i diversi articoli di carattere divulgativo pubblicati in quegli anni, dove efficacemente il lettore veniva introdotto nell'affascinante mondo delle riprese delle protuberanze solari, ci si rende ben conto come all'epoca, non poi così tanto remota, per ottenere immagini significative fosse necessaria notevole dimestichezza sia con le tecniche tipicamente osservative (utili nella ripresa con strumentazione altamente specialistica) sia, e forse soprattutto, con le tecniche di trattamento delle lastre e delle pellicole fotografiche in camera oscura. Risulta quindi chiaro come le tecniche digitali ora disponibili abbiano notevolmente semplificato le fasi di processamento delle immagini e dei filmati. Pur restando comunque ancora oggi lo studio della fenomenologia cromosferica e coronale del Sole un settore di osservazione astronomica piuttosto speciali-



Una tipica protuberanza quiescente ripresa in $H\alpha$ dal telescopio del Big Bear Solar Observatory nel 2005. [BBSO, NJIT]

stico, soprattutto per la necessità di utilizzo di strumentazione altamente sofisticata e progettata ad hoc, l'evoluzione tecnologica dell'ultimo decennio consente ora, a chiunque sia seriamente motivato nello studio del Sole, di poter osservare e riprendere agevolmente, con elevata qualità, le protuberanze solari in tutta la loro maestosità, complessità morfologica e dinamismo.

Stefano Sello è nato nel 1959 a Codogno (MI). Consegue la laurea in Fisica Matematica nell'1986 presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Parma. Dal 1987 al 1998 è ricercatore al CISE di Milano, occupandosi di modellistica matematica e numerica dei mezzi continui. Dal 1998 occupa il ruolo di ricercatore senior nell'unità Modelli Matematici e Fisici presso il Centro Ricerche dell'ENEL di Pisa, con particolare riferimento allo sviluppo di metodologie numeriche avanzate per lo studio e la caratterizzazione dei sistemi dinamici complessi. In campo astronomico si interessa principalmente di fisica solare, con studi finalizzati alla caratterizzazione e alla previsione dell'evoluzione dei cicli solari.