HARPS-N: dai principi della spettroscopia alle osservazioni scientifiche

Metodi e osservazioni al Telescopio Nazionale Galileo



GIOVANI ASTRONOMI AL TNG · IV EDIZIONE

6 novembre 2026

Rosario Cosentino

TNG / INAF

Programma del webinar

A. Dalla luce ai pianeti

B. HARPS-N: lo spettrografo

C. Dall’osservazione alla misura

D. Preparare un’osservazione

E. Avviare e configurare il software

F. Una osservazione al TNG

G. Dai dati ai risultati

SEZIONE A

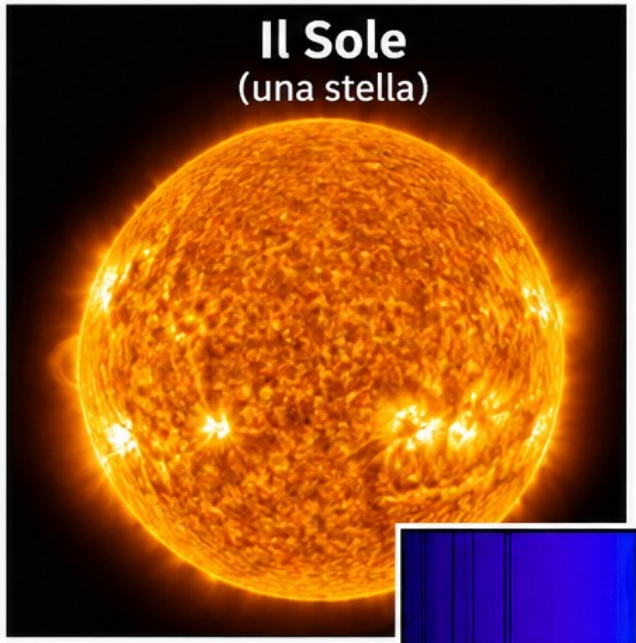
Dalla luce ai pianeti

In questa parte

- Spettro solare
- Effetto Doppler
- Velocità radiale e CCF
- Transiti



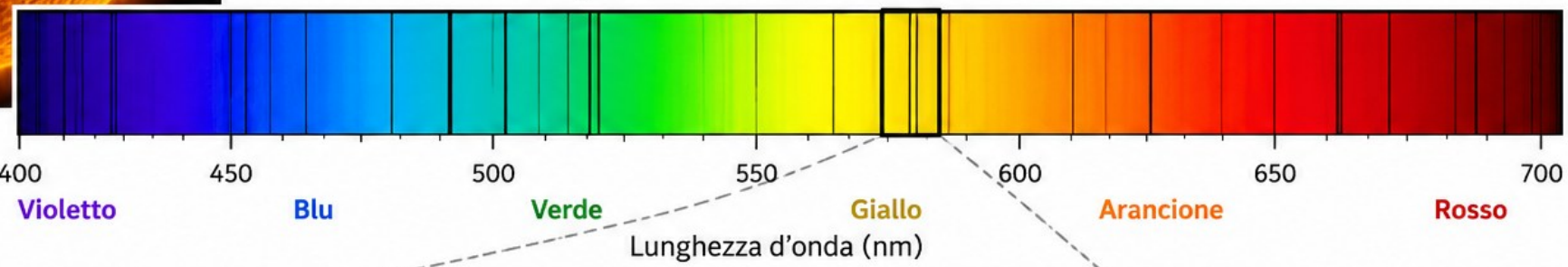
Dalla luce raccolta dal telescopio alla misura del moto della stella.

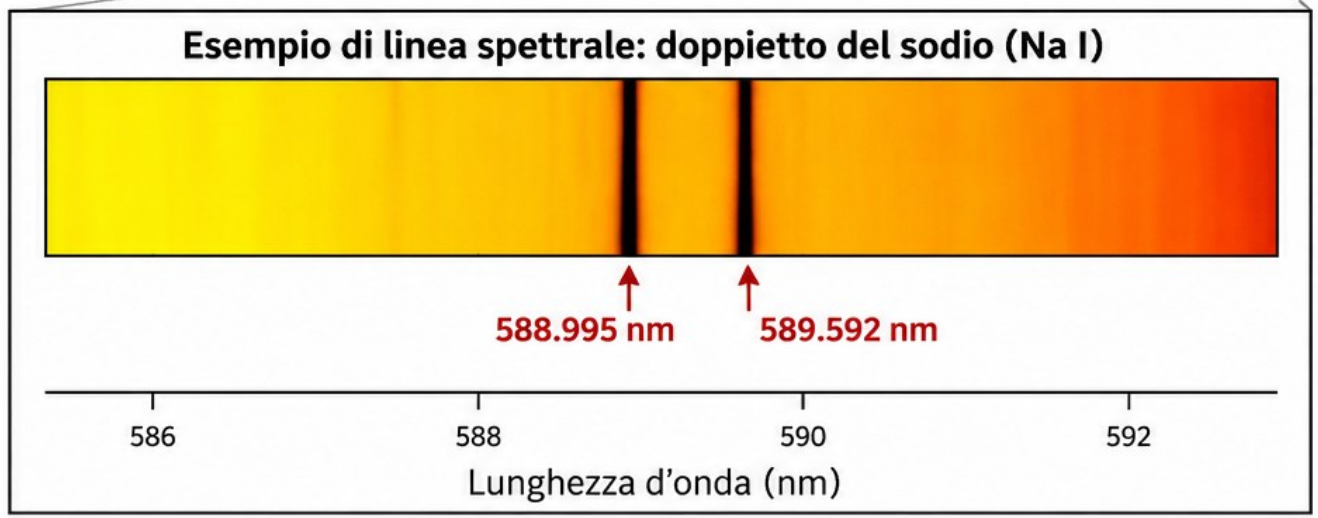


La luce di una stella ricopre lo spettro visibile

Il Sole, come tutte le stelle, emette luce a molte lunghezze d'onda.
Nel visibile (circa 400–700 nm) la sua luce forma uno spettro continuo,
cioè contiene tutti i colori, dal violetto al rosso.
Sovrapposte al continuo sono presenti delle linee spettrali,
che corrispondono a lunghezze d'onda specifiche emesse (o assorbite)
dagli atomi presenti nell'atmosfera della stella.

Spettro visibile del Sole





Il doppietto del sodio (Na I) è formato da due linee molto vicine a 589.0 nm e 589.6 nm. Queste linee sono prodotte dagli atomi di sodio presenti nell'atmosfera solare.

L’effetto Doppler: dal suono alla velocità radiale

Ascolta come cambia il tono quando una sorgente si muove. Poi vedrai lo stesso principio applicato alla luce di una stella.



▶ Avvia animazione con audio ■ Ferma Esempio acustico: avvicinamento e allontanamento

Audio sintetico a volume moderato. Puoi fermarlo in qualsiasi momento.

1. Il suono

Avvicinandosi, la sorgente "raccoglie" le onde davanti a sé: arriva un tono più acuto. Dopo il passaggio, le onde arrivano più distanziate e il tono è più grave.

2. La luce stellare

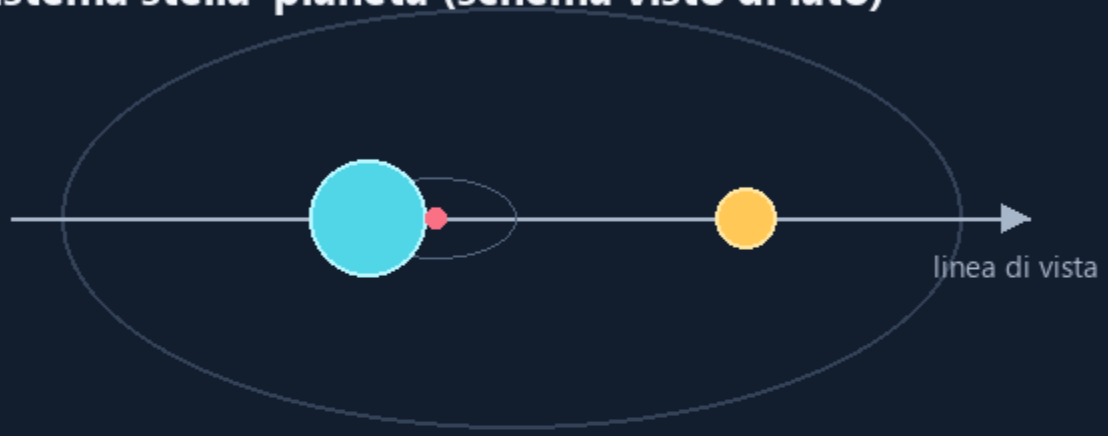
Le righe nello spettro si spostano verso il blu se la stella si avvicina e verso il rosso se si allontana. Misurando questo spostamento si ricava la velocità radiale (RV).

Nel caso degli esopianeti, il pianeta fa oscillare la stella con la propria gravità: osservazioni ripetute della RV possono rivelare il pianeta. Il suono è un'analogia intuitiva; la luce è un'onda elettromagnetica e non ha bisogno dell'aria per propagarsi.

La stella oscilla: la velocità radiale cambia

Un pianeta in orbita induce un moto riflesso della stella attorno al baricentro

Sistema stella–pianeta (schema visto di lato)



Stella: azzurro Pianeta: oro Baricentro: punto rosa

Moto lungo la linea di vista



La stella si avvicina: blueshift

La velocità radiale è la componente del moto nella direzione della nostra linea di vista.

Curva di velocità radiale nel tempo

RV: +1.00 × K



K è l'ampiezza della velocità radiale; il segno distingue avvicinamento e allontanamento.

Il transito: il pianeta attenua la luce della stella

Il passaggio davanti al disco stellare produce un calo periodico di luminosità

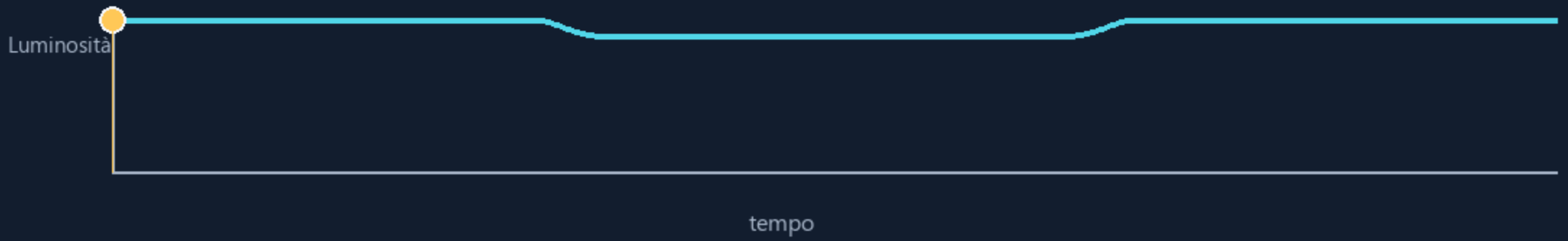
1 Transito planetario



Fuori dal transito, la luminosità torna al livello di riferimento.

2 Curva di luce: il calo rivela il transito

profondità relativa ~ (Rp/R*)^2



Schema illustrativo: profondità e durata dipendono dalle dimensioni e dall'orbita del pianeta.

Effetto Rossiter–McLaughlin

Il transito di un pianeta perturba la velocità radiale apparente della stella in rotazione

Durante il transito, il pianeta oscura in sequenza zone con velocità diverse



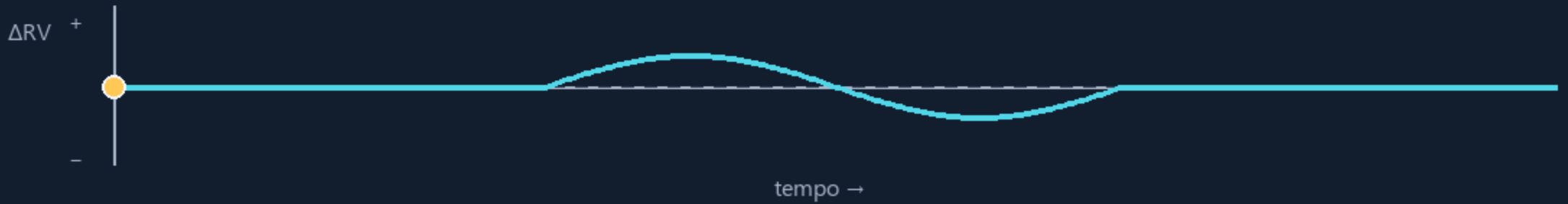
Ingresso: copre il lato blu

Restano più righe spostate verso il rosso.

Anomalia RV positiva (con questa geometria).

Il segnale dipende da rotazione e geometria del sistema.

Anomalia Rossiter–McLaughlin durante il transito



La forma e il segno dipendono dall'orientamento; qui il lato blu è occultato per primo.

Velocità radiale

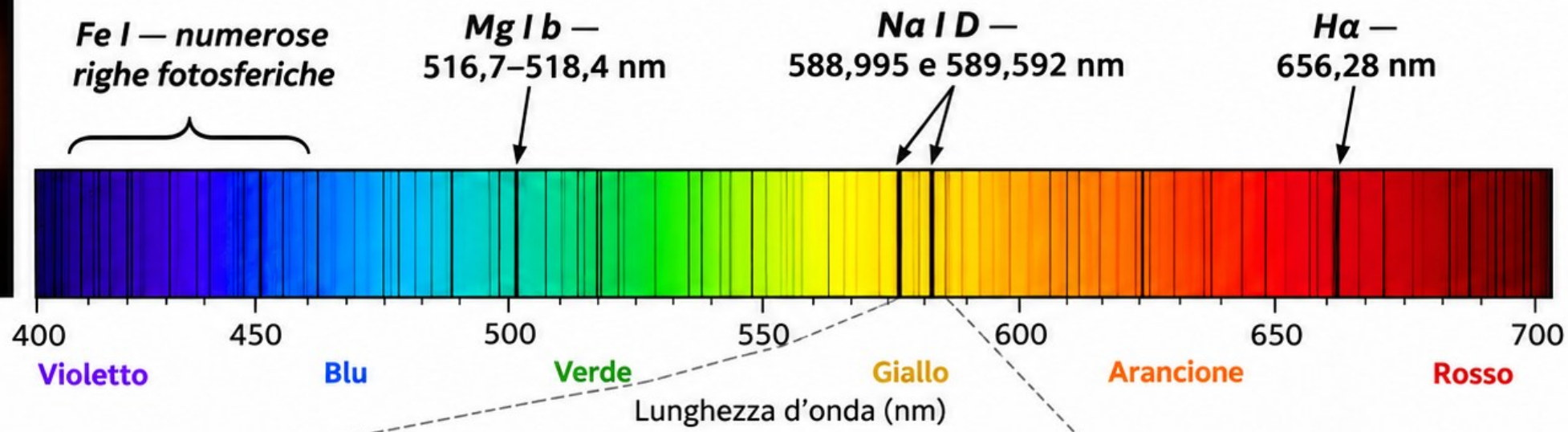
Il moto di una stella sposta le righe del suo spettro: verso il blu quando si avvicina, verso il rosso quando si allontana. Misurando questo spostamento si ricava la velocità radiale.



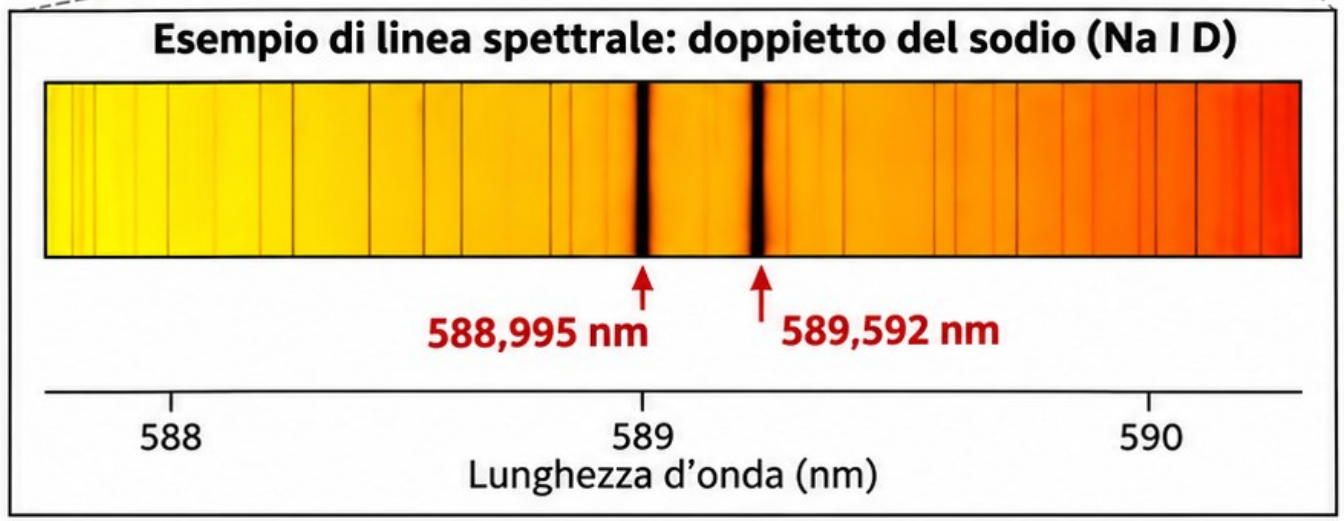
Misurare la velocità radiale con le righe stellari

Le righe di assorbimento fotosferiche si spostano insieme alla stella.





La velocità radiale si ricava dallo spostamento Doppler delle righe stellari. Si combinano molte righe (cross-correlazione) per una misura più robusta.

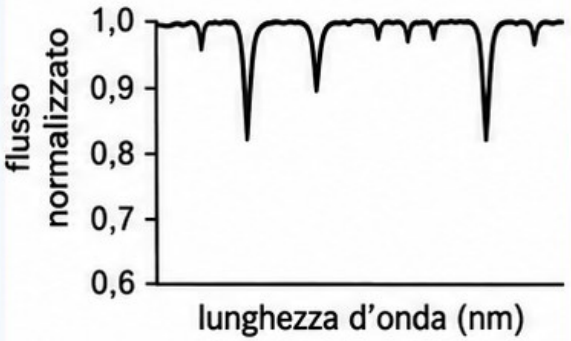


Righe telluriche: assorbimenti dell'atmosfera terrestre; contaminanti o riferimenti strumentali, non traccianti della velocità stellare.

Nota: *per il doppietto Na I' D occorre verificare l'eventuale contaminazione tellurica o del mezzo interstellare (ISM).*

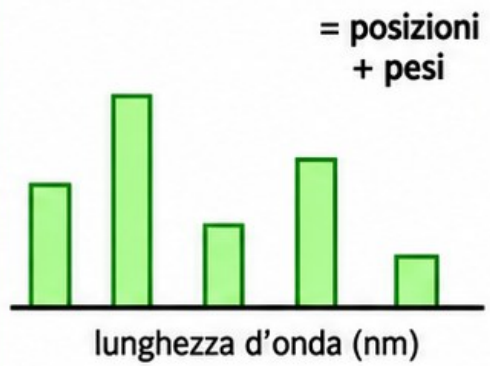
Come funziona la maschera nella cross-correlazione?

1 Spettro osservato



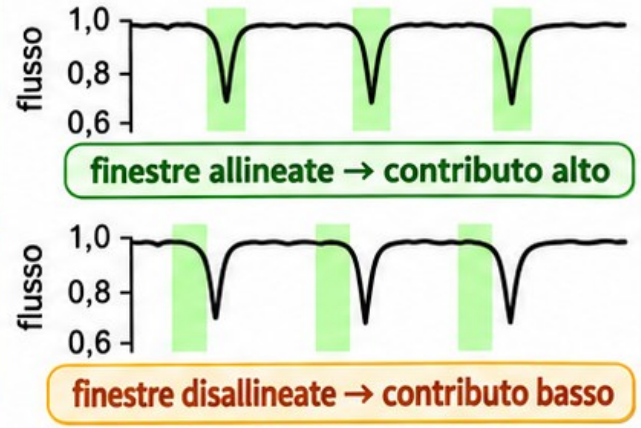
Spettro stellare normalizzato con righe di assorbimento strette.

2 Maschera stellare



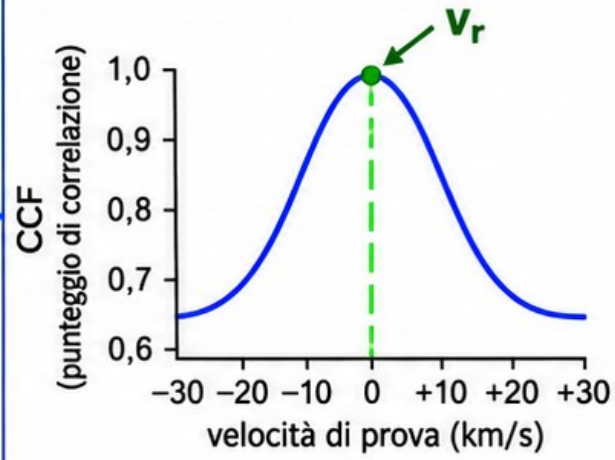
Insieme di finestre strette alle lunghezze d'onda attese delle righe, con un peso per ciascuna riga.

3 Scorrimento in velocità



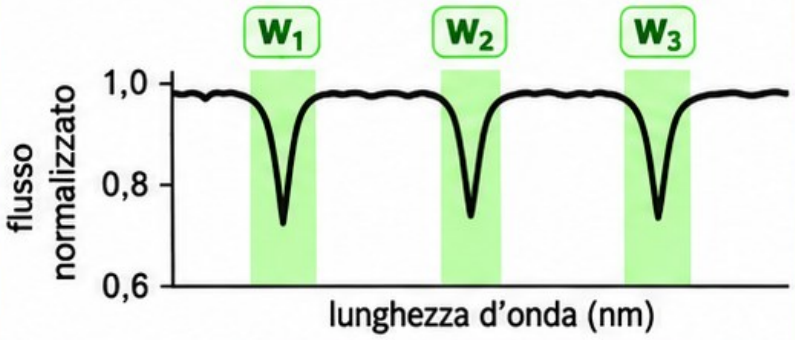
Si trasla la maschera per diverse velocità di prova v. A ogni traslazione si moltiplica il deficit di flusso nelle finestre per i rispettivi pesi e si somma.

4 Funzione CCF



Il massimo della CCF stima la RV (v_r) della stella.

Zoom: tre righe allineate con la maschera



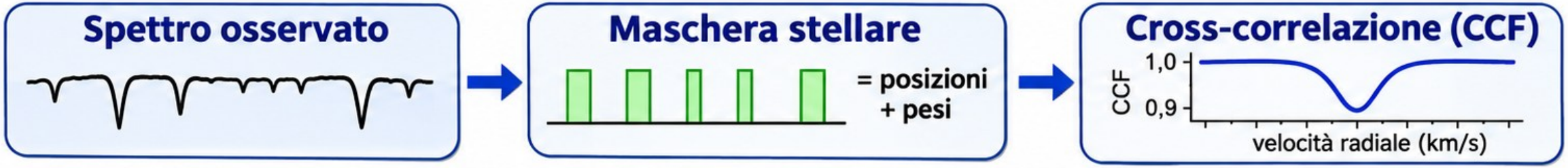
$CCF(v)$ = somma pesata dei contributi delle righe alla velocità di prova v.

La maschera non sposta le righe: viene traslata rispetto allo spettro per cercare l'allineamento migliore.

⚠ Prima si correggono calibrazione e moto dell'osservatore; le righe telluriche e le regioni difettose si escludono.

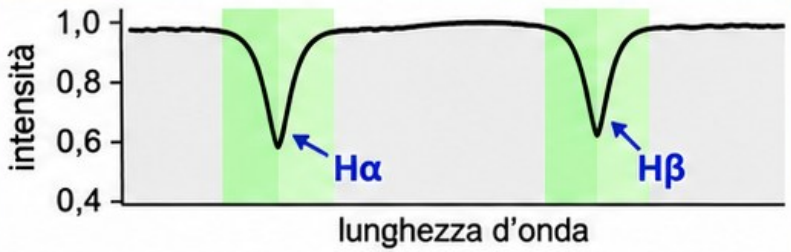
✓ **Molte righe allineate insieme rendono la misura più robusta di una singola riga.**

La maschera: quali righe entrano nella cross-correlazione?



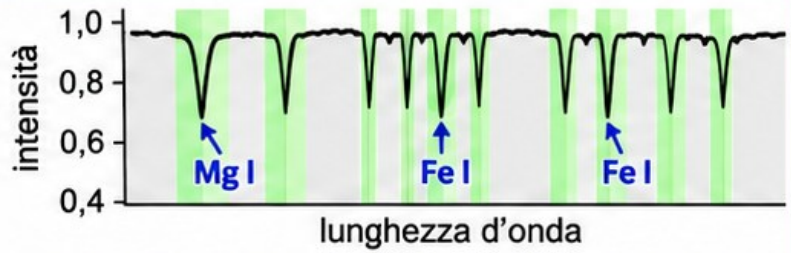
La **maschera** è un elenco di **posizioni e pesi** delle righe stellari attese. La **CCF** confronta il modello con lo spettro a diversi spostamenti Doppler: i pixel nelle finestre selezionate **contribuiscono**; quelli mascherati fuori **non contribuiscono**.

Stelle calde (O–A)



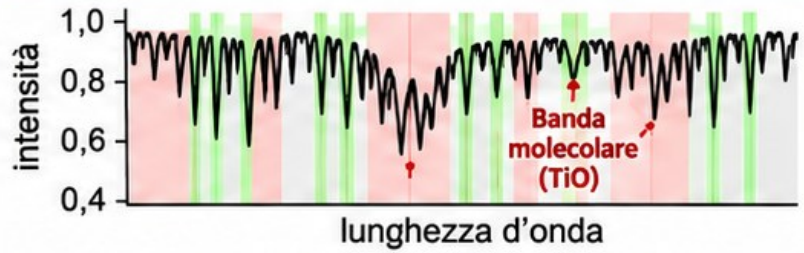
Poche righe utilizzabili; righe larghe → RV spesso meno precisa.

F–G–K



Molte righe fotosferiche (Fe I, Mg I) → maschera ricca, spesso efficace.

Stelle fredde (M)

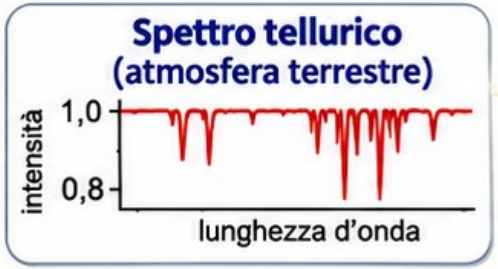


Molte righe e bande molecolari; maschera adattata allo spettro M.

INCLUDI: righe fotosferiche stellari pulite, non sature e ben risolte; scegli una maschera compatibile con il tipo spettrale.

ESCLUDI o maschera: righe telluriche, pixel difettosi, righe contaminate/ interstellari, emissioni e profili deformati.

⚠ Le righe Na I D si usano solo se non contaminate.

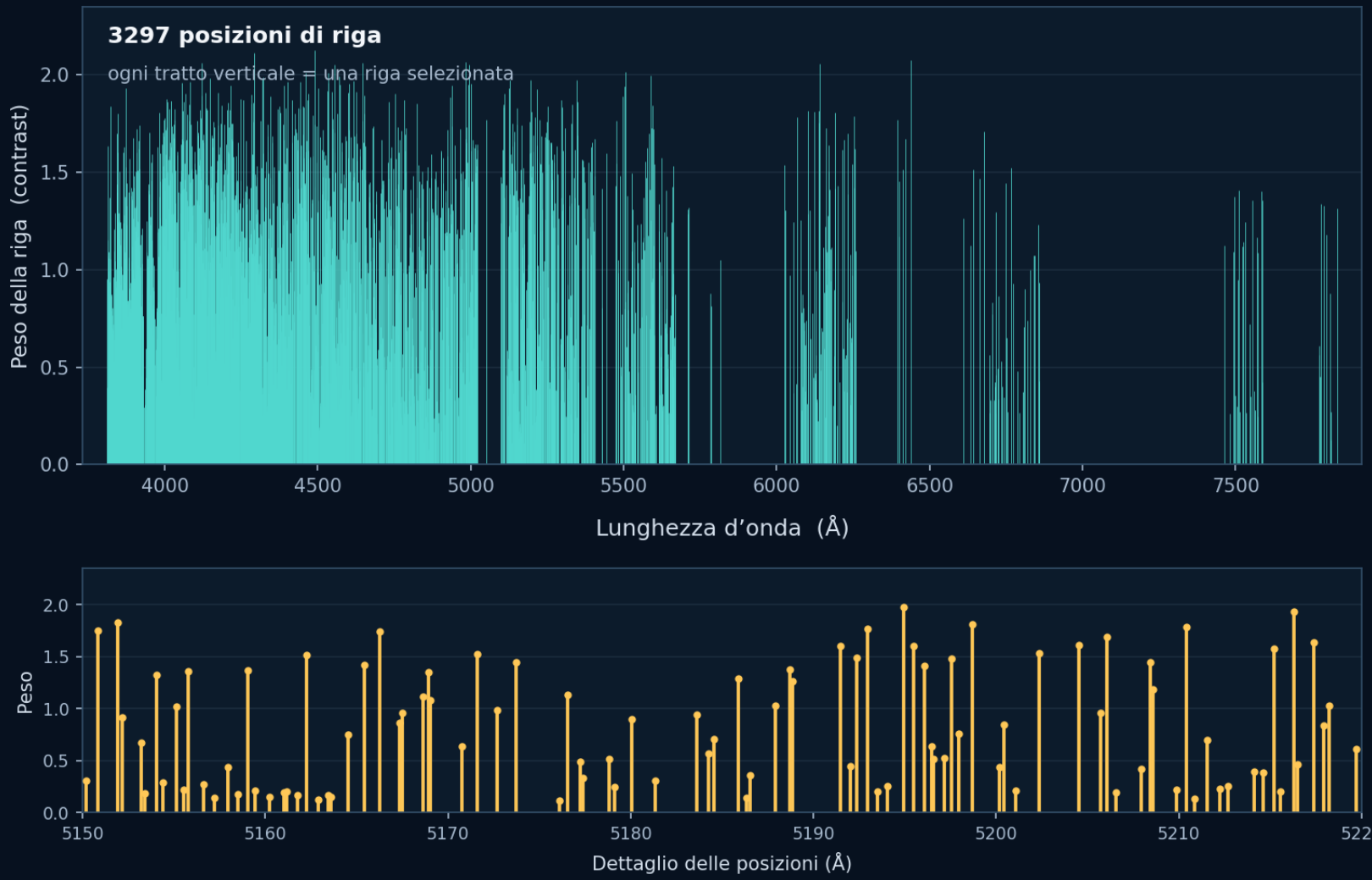


Le righe telluriche provengono dall'atmosfera terrestre e non sono un tracciante della velocità radiale stellare.

Una maschera adatta pesa le righe stellari utili e ignora le regioni che falserebbero la CCF.

COME APPARE UNA MASCHERA SPETTRALE?

Esempio reale: HARPN_new_G2.fits • maschera G2 per la cross-correlazione



HARPN • 3297 righe • 3811,30–7832,21 Å • dati estratti dalla tabella binaria del file FITS

CHE COS'È

Un elenco di righe stellari usato dalla pipeline come riferimento per confrontare lo spettro e calcolare la CCF.

COSA CONTIENE QUESTO FITS

lambda → posizione della riga (Å)
contrast → peso assegnato alla riga

COME LEGGERLA

Ogni tratto indica una posizione da cercare. L'altezza mostra il peso: una riga più alta contribuisce di più alla correlazione.

È una lista di posizioni e pesi, non lo spettro osservato.

SPETTRO STELLARE E MASCHERA G2

Stessa scala in lunghezza d’onda: il profilo continuo si confronta con posizioni discrete pesate



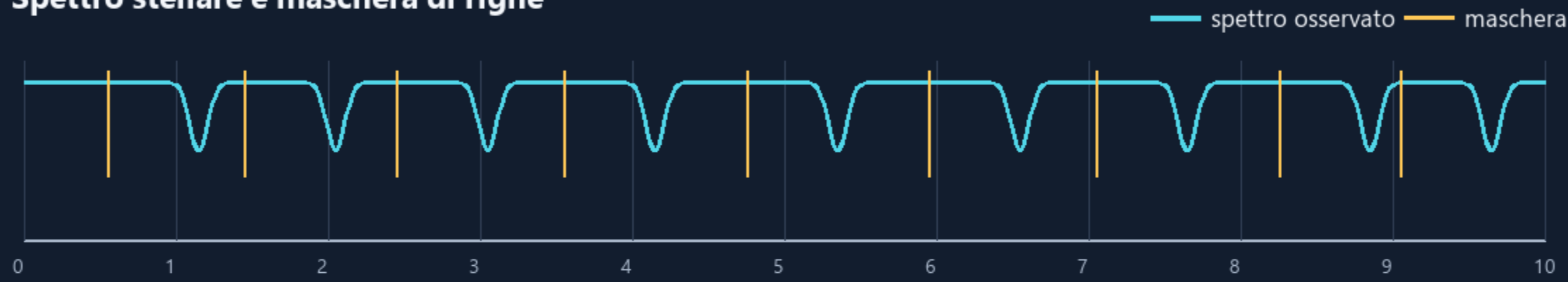
Le tacche della maschera indicano dove cercare le righe; l’altezza rappresenta il loro peso nella CCF.

Finestra 5180–5190 Å • righe e pesi dalla tabella del file HARPN_new_G2.fits • spettro illustrativo, non osservato

Dallo spettro alla velocità radiale

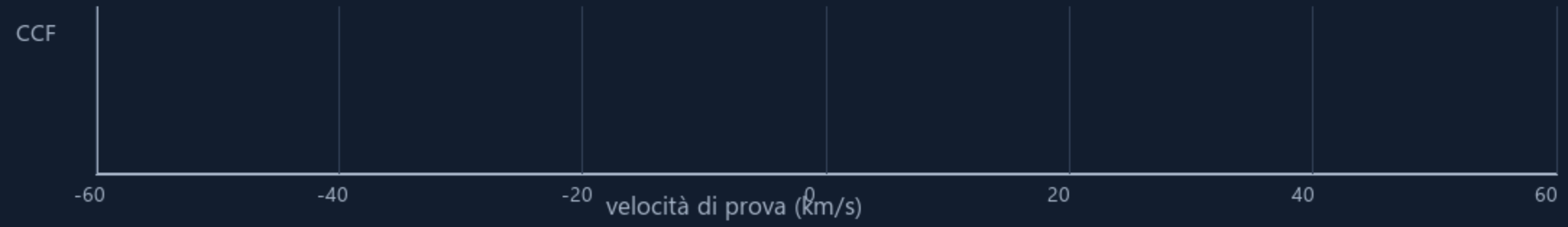
Esempio schematico del metodo CCF usato con HARPS-N

1 Spettro stellare e maschera di righe



La maschera scorre in velocità: la coincidenza delle righe massimizza la correlazione.

2 Funzione di correlazione incrociata (CCF)



Schema illustrativo: dati e valore di RV simulati.

SEZIONE B

HARPS-N: lo spettrografo

In questa parte

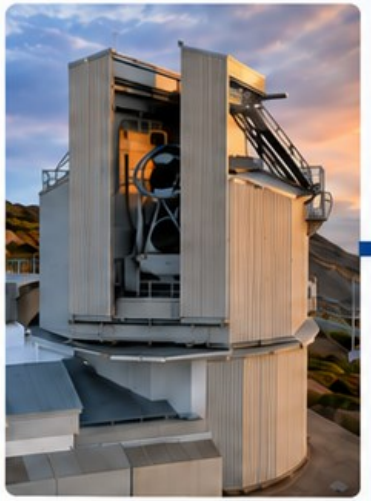
- Architettura e componenti
- Due fibre, due configurazioni
- Calibrazione simultanea
- Calibrazione standard separata (non simultanea)



Lo strumento trasforma la luce in uno spettro calibrato.

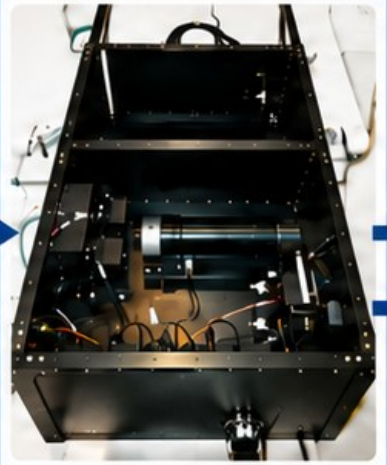
Architettura di HARPS-N

TNG



- Telescopio da 3,58 m
- Luce proveniente dalla stella

FEU



- Unità di iniezione delle fibre
- Sistema ADC e tip-tilt
- Rimescolamento dell'immagine
- Ingresso per la calibrazione

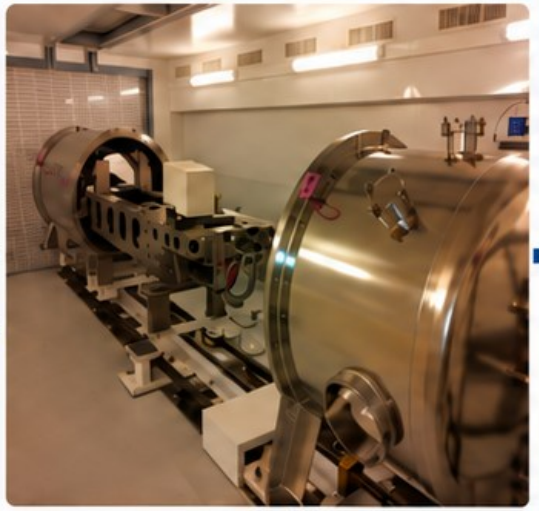
Collegamento in fibra di 26 m



Fibra dell'oggetto

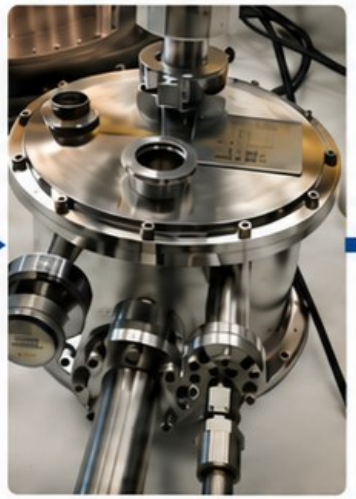
Fibra di riferimento simultanea

Spettrografo



- Spettrografo echelle ad alta risoluzione
- Camera a vuoto
- Stabilizzato in temperatura

CCD



- CCD 4k × 4k
- Raffreddato in profondità
- Lettura a basso rumore

DRS



- Sistema di riduzione dei dati
- Estrazione
- Calibrazione in lunghezza d'onda
- Calcolo della velocità radiale
- Prodotti scientifici

HARPS-N è uno spettrografo ad alta risoluzione, alimentato da fibre e stabilizzato, che fornisce velocità radiali ultraprecise.

Due fibre: oggetto + riferimento simultaneo

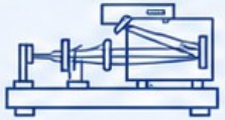
Dalla luce stellare ai dati pronti per la scienza

Panoramica del sistema HARPS-N

Hardware



- **Rivelatore** (CCD, CFC)



- **Spettrografo**



- **Unità front-end**



- **Unità di calibrazione** (lampade, Fabry-Pérot, pettine laser)



- **controllo termico**



- **Cluster di calcolo** (archiviazione ed elaborazione dei dati grezzi)



- **Interfaccia della cupola** (accoppiamento del percorso ottico)

Software



- **Sequencer** (sequenziatore delle osservazioni)



- **NSTS** (pianificatore a breve termine)



- **AG** (autoguida)



- **LCU** (unità di controllo delle lampade)



- **UCAM** (controllore del rivelatore)



- **DRS** (sistema di riduzione dei dati)

Calibrazione



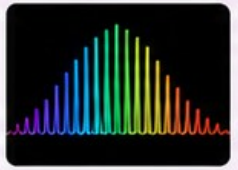
- **ThAr** (lampade torio-argon), standard Fabry-Pérot



- **UME** (lampada all'uranio), standard Fabry-Pérot



- **Fabry-Pérot** (interferenza dell'etalon laser)



- **Astro Comb** (pettine di frequenze laser)

Operazioni

- **messa a fuoco** (ottimizzazione della messa a fuoco)
- **acquisizione** (acquisizione del bersaglio)
- **autoguida**
- **manutenzione** (preventiva / correttiva)
- **ripristino** (gestione degli errori e recupero)
- **controllo qualità dei dati** (verifica in tempo reale)
- **accesso ai dati** (distribuzione e archiviazione dei dati)
- **operazioni da remoto** (osservazione e controllo remoti)

HARPS-N integra hardware, software e sistemi di calibrazione avanzati per fornire misure della velocità radiale ultraprecise.

Due modalità per la seconda fibra

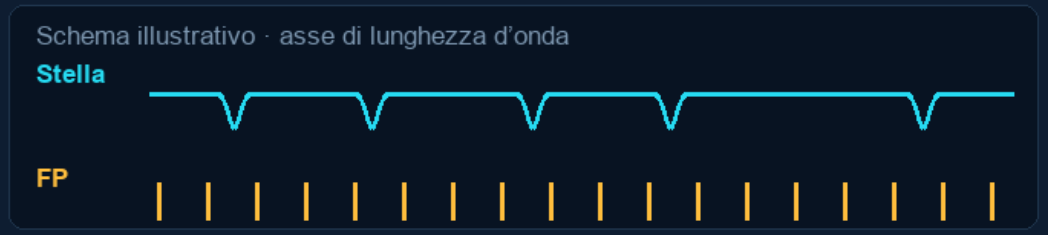
La fibra dell'oggetto registra la stella; la seconda fibra si configura in base alla misura.

STELLA + FABRY–PÉROT

Riferimento simultaneo

FIBRA 1 · STELLA | **FIBRA 2 · FP**

Spettri registrati nello stesso intervallo



Segue gli spostamenti strumentali durante l'esposizione.

Controlla la deriva della scala di lunghezza d'onda.

STELLA + CIELO

Per target deboli o RV meno precisa

FIBRA 1 · STELLA | **FIBRA 2 · CIELO**



La fibra cielo misura fondo e righe del cielo.

Con stelle deboli, una piccola luce parassita pesa di più;
se basta RV meno precisa, si può rinunciare al drift simultaneo.

La contaminazione FP è in genere ridotta; la scelta dipende dal programma.

Due obiettivi, due configurazioni

FP → seguire la deriva per RV precise · Cielo → misurare il fondo per target deboli

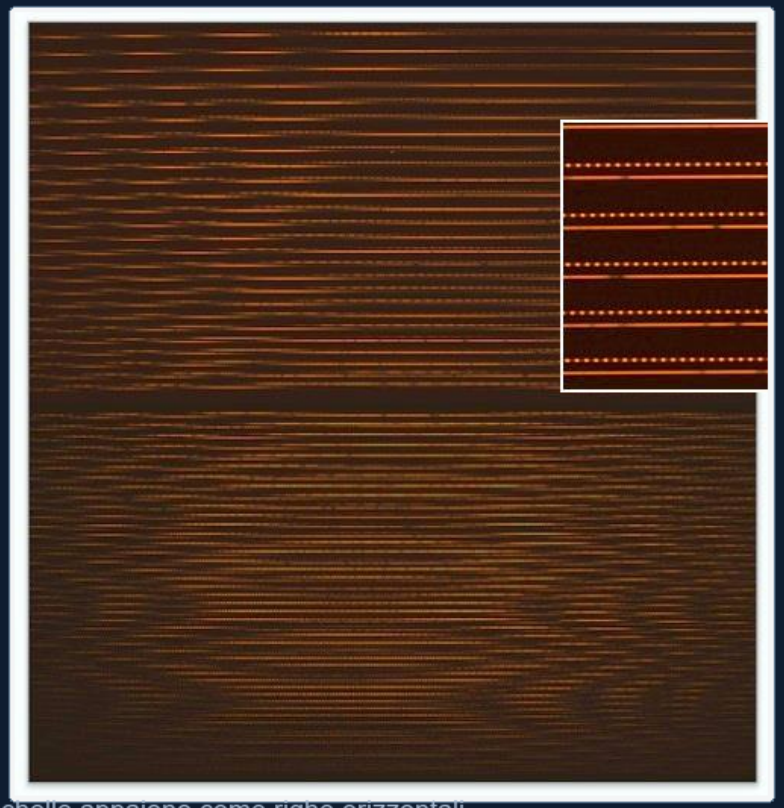
Astudillo-Defru et al. 2017 · Astronomy & Astrophysics, 602, A88

HARPS-N · SPETTROSCOPIA

La calibrazione simultanea sul rivelatore

Un’esposizione registra insieme la luce stellare e il riferimento Fabry–Pérot.

IMMAGINE REALE · RIVELATORE 2D



Gli ordini echelle appaiono come righe orizzontali.

DUE FIBRE, UNA SOLA ESPOSIZIONE

FIBRA A · STELLA
Spettro della stella, con righe di assorbimento.

FIBRA B · FABRY–PÉROT
Pettine di righe regolari: il riferimento simultaneo.

NEL DETTAGLIO

Le righe FP risultano fitte e regolarmente distanziate.
Nell’immagine: ingrandimento del pettine di calibrazione.

A COSA SERVE

Il FP viene confrontato con la calibrazione standard precedente: così si stima la deriva strumentale durante l’osservazione della stella.

In breve: spettro stellare + riferimento FP vengono registrati nello stesso intervallo.

SEZIONE C

Dall’osservazione alla misura

In questa parte

- Flusso di lavoro HARPS-N
- Dallo spettro alla velocità radiale
- Candidati: conferma e caratterizzazione



Una misura affidabile collega procedura, dato e interpretazione.

Flusso di lavoro delle osservazioni HARPS-N

Dalla lista dei bersagli ai prodotti scientifici

1. NSTS
Pianificatore

Piano di osservazione

- Obiettivi scientifici
- Calibrazioni
- Vincoli
- Priorità
- Condizioni di osservazione

Lista dei bersagli e calibrazioni

Richieste di osservazione →

← **Riscontro sullo stato**

2. Sequencer
Gestore dell'esecuzione

- Esegue il piano di osservazione
- Coordina tutti i sottosistemi
- Gestisce le sequenze (scienza, calibrazione, ...)
- Genera un file FITS (RAR) dopo ogni esposizione
- Comunica lo stato a NSTS

3. Sottosistemi dello strumento

- **FEU** — Unità di ingresso frontale (selettore di fibre, ecc.)
- **Unità di calibrazione** — Sorgenti di calibrazione (ThAr, Fabry-Pérot, ...)
- **Misuratore di esposizione** — Monitoraggio del flusso
- **Autoguida** — Puntamento sul bersaglio
- **UCam** — Rivelatore software
- **TCS** — Sistema di controllo del telescopio

4. UCam
Software del rivelatore

- Controlla il rivelatore
- Gestisce le esposizioni
- Legge le immagini
- Invia i dati grezzi al Sequencer

Nuova immagine grezza →

FITS (RAR) (dopo ogni esposizione)

5. Trigger
Gestore dei nuovi dati

- Rileva i nuovi file FITS
- Verifica l'integrità dei dati
- Avvia il DRS

6. DRS
Sistema di riduzione dei dati

- Il DRS riduce l'immagine e genera il prodotto scientifico
- I prodotti vengono archiviati e resi disponibili agli utenti

Prodotti dati ridotti (S2D, S1D, CCF, ...)



TNG — Telescopio Nazionale Galileo

1 **NSTS** contiene l'elenco degli oggetti da osservare (bersagli scientifici e calibrazioni) e comunica con il Sequencer.

2 Il **Sequencer** esegue il piano di osservazione, coordina tutti i sottosistemi e genera un file FITS (RAR) dopo ogni esposizione.

3 I sottosistemi dello strumento (FEU, Unità di calibrazione, Misuratore di esposizione, Autoguida, **UCam**, **TCS**) sono controllati dal Sequencer.

4 **UCam** controlla il rivelatore, acquisisce le immagini e invia i dati grezzi al Sequencer.

5 Il **Trigger** rileva un nuovo file FITS e avvia il DRS.

6 Il DRS riduce l'immagine e genera il prodotto scientifico.

Un sistema completamente integrato per osservazioni efficienti e affidabili

Dal candidato alla caratterizzazione

Transiti dallo spazio + velocità radiali da terra: un percorso per confermare e misurare un esopianeta

1 SCOPERTA

Telescopio spaziale

Kepler (esempio)



Misura la luminosità della stella nel tempo

Curva di luce



Cali periodici → candidato

Il transito fornisce periodo orbitale e rapporto raggio pianeta/stella.



2 FOLLOW-UP

Telescopio Nazionale Galileo

HARPS-N • spettroscopia



Osserva lo spettro della stella più volte

Velocità radiale (RV)



Il pianeta fa oscillare la stella: il Doppler rivela il moto lungo la linea di vista.

Ampiezza RV → massa minima

3 CARATTERIZZAZIONE

Combinando le misure



Transito → raggio del pianeta



RV → massa del pianeta

Massa + raggio → densità media

Indizi sulla composizione e sulla struttura interna.

Candidato selezionato

Schema didattico: non tutti i candidati di transito vengono confermati; serve un follow-up adeguato.

Dalla luce stellare alla velocità radiale

Il percorso dei fotoni in HARPS-N e l'elaborazione della DRS

1
TNG



Telescopio

Raccoglie la luce della stella.

2
FEU



Front End Unit

Accoppia la luce alla fibra.

3
FIBRA



Fibre ottiche

Trasportano la luce fino allo spettrografo.

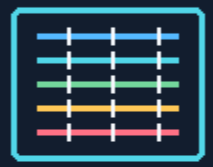
4
HARPS-N



Spettrografo

Separa la luce elle lunghezze d'onda.

5
CCD



Spettro registrato

Il rivelatore registra le righe spettrali.

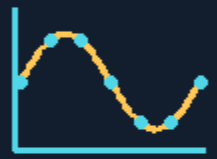
6
DRS



Riduzione dati

Estrae e calibra lo spettro; calcola la CCF.

7
RV



Velocità radiale

Il fit della CCF fornisce la velocità della stella.

Il TNG raccoglie la luce della stella e la invia alla strumentazione.

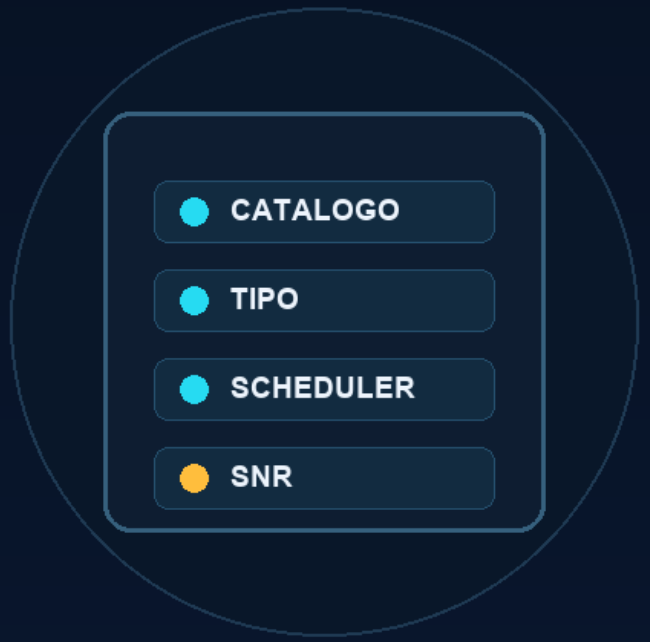
Schema funzionale semplificato; la DRS (Data Reduction Software) produce anche altri prodotti calibrati.

SEZIONE D

Preparare un’osservazione

In questa parte

- Parametri stellari e catalogo
- Scelta del tipo di osservazione
- Scheduler e pianificazione
- Tempo di esposizione e SNR



Una buona osservazione comincia da una pianificazione chiara.

Preparare un’osservazione

Dal catalogo alla verifica della qualità

1.
Inserisci i parametri della stella in un file catalogo



2.
Indica nel catalogo il tipo di osservazione



3.
Apri il catalogo con lo scheduler

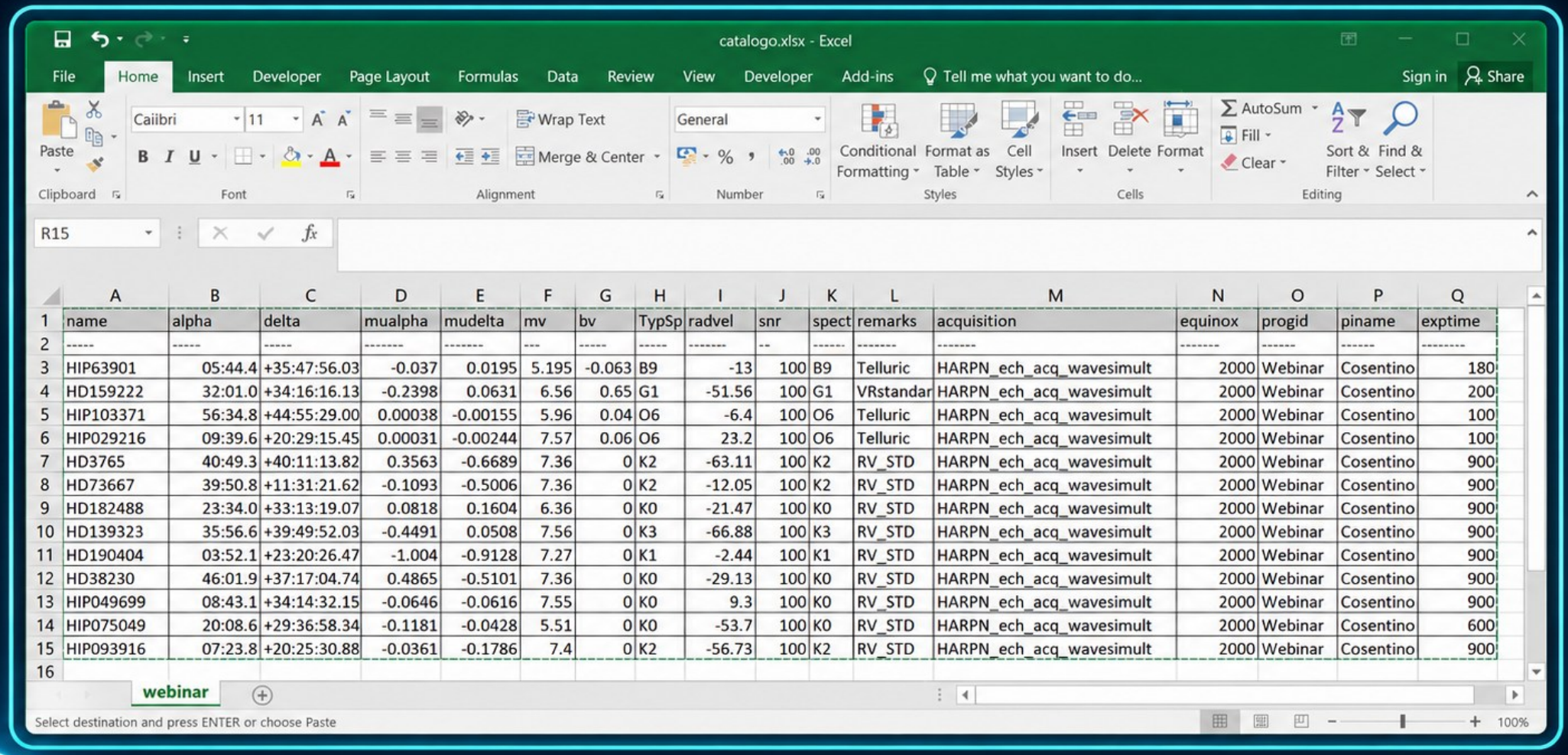


4.
Verifica il tempo di esposizione e il SNR dell’osservazione



Preparazione catalogo

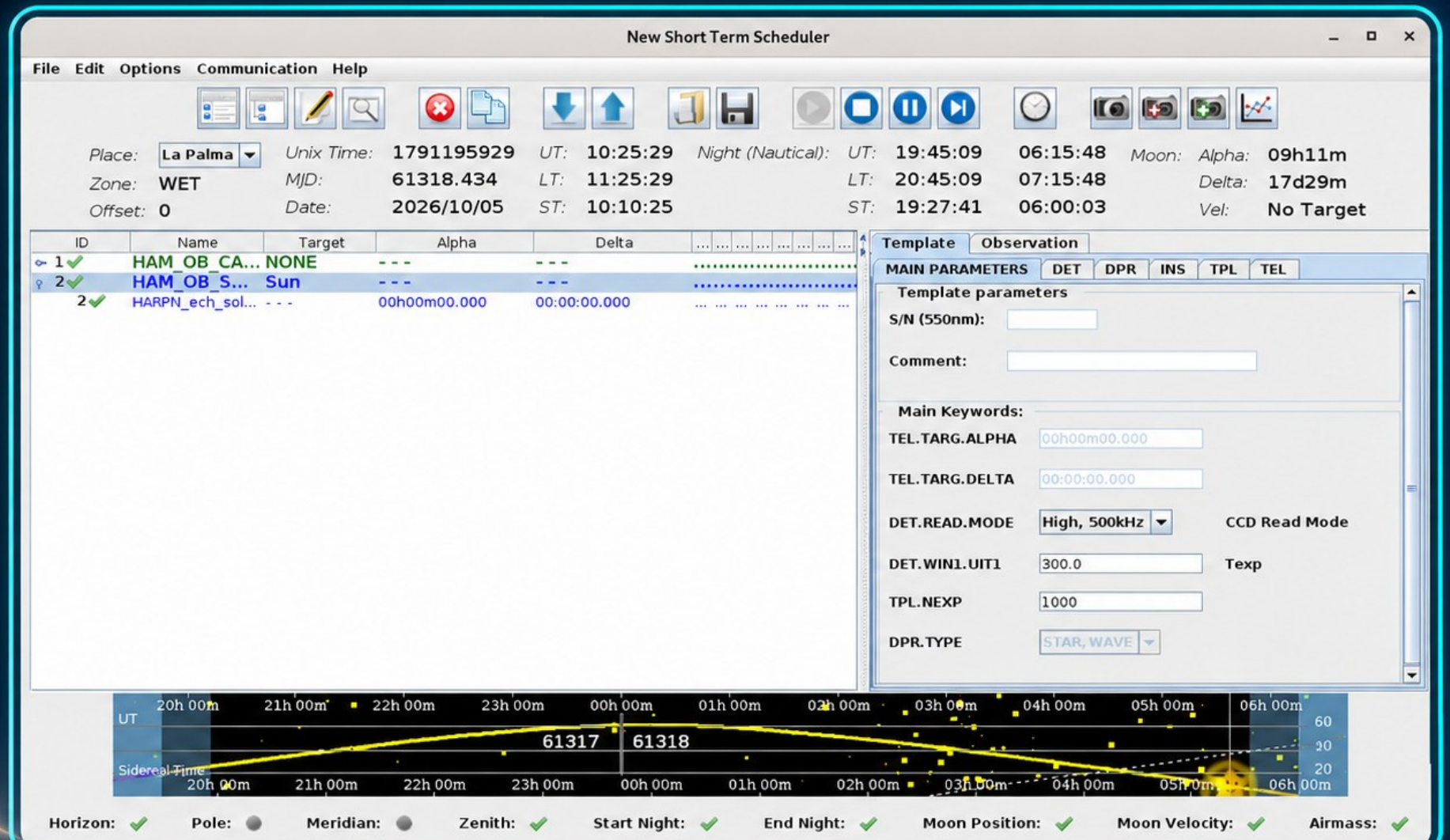
Inserire nel catalogo i parametri della stella e dell'osservazione



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	name	alpha	delta	mualpha	mudelta	mv	bv	TypSp	radvel	snr	spect	remarks	acquisition	equinox	progid	piname	exptime
2	-----	-----	-----	-------	-------	---	-----	-----	-------	--	------	-------	-------	-------	------	------	--------
3	HIP63901	05:44.4	+35:47:56.03	-0.037	0.0195	5.195	-0.063	B9	-13	100	B9	Telluric	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	180
4	HD159222	32:01.0	+34:16:16.13	-0.2398	0.0631	6.56	0.65	G1	-51.56	100	G1	VRstandar	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	200
5	HIP103371	56:34.8	+44:55:29.00	0.00038	-0.00155	5.96	0.04	O6	-6.4	100	O6	Telluric	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	100
6	HIP029216	09:39.6	+20:29:15.45	0.00031	-0.00244	7.57	0.06	O6	23.2	100	O6	Telluric	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	100
7	HD3765	40:49.3	+40:11:13.82	0.3563	-0.6689	7.36	0	K2	-63.11	100	K2	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
8	HD73667	39:50.8	+11:31:21.62	-0.1093	-0.5006	7.36	0	K2	-12.05	100	K2	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
9	HD182488	23:34.0	+33:13:19.07	0.0818	0.1604	6.36	0	K0	-21.47	100	K0	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
10	HD139323	35:56.6	+39:49:52.03	-0.4491	0.0508	7.56	0	K3	-66.88	100	K3	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
11	HD190404	03:52.1	+23:20:26.47	-1.004	-0.9128	7.27	0	K1	-2.44	100	K1	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
12	HD38230	46:01.9	+37:17:04.74	0.4865	-0.5101	7.36	0	K0	-29.13	100	K0	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
13	HIP049699	08:43.1	+34:14:32.15	-0.0646	-0.0616	7.55	0	K0	9.3	100	K0	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
14	HIP075049	20:08.6	+29:36:58.34	-0.1181	-0.0428	5.51	0	K0	-53.7	100	K0	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	600
15	HIP093916	07:23.8	+20:25:30.88	-0.0361	-0.1786	7.4	0	K2	-56.73	100	K2	RV_STD	HARPN_ech_acq_wavesimult	2000	Webinar	Cosentino	900
16																	

Uso dello scheduler

Caricare il catalogo e controllare la pianificazione delle osservazioni



SEZIONE E

Avviare e configurare il software

In questa parte

- Avvio e inizializzazione
- Sequencer e camera CCD
- Calibrazione e autoguida
- Pianificare e avviare le acquisizioni



Prima si inizializzano gli strumenti, poi si avviano le acquisizioni.

Avvio e inizializzazione del software di osservazione

Preparare tutti i sistemi prima di iniziare le osservazioni

1. Apri lo scheduler e seleziona gli oggetti
2. Apri il sequencer
3. Apri e inizializza il software della camera CCD
4. Apri l'Exposure Meter
5. Apri e inizializza l'unità di calibrazione
6. Prepara il software dell'autoguida
7. Avvia la DRS (software di riduzione dati)



SEZIONE F

Una osservazione al TNG

In questa parte

- Scelta dell’oggetto
- Controlli iniziali e configurazione
- Acquisizione e verifica dei dati
- Esempio con video



TNG · acquisizione

Seguiamo una sessione osservativa, dall’avvio ai dati registrati.

HARPS-N · OSSERVAZIONE REALE

Tre momenti di una sessione osservativa

Apri i filmati per seguire l’osservazione dall’acquisizione alla riduzione dei dati.

VIDEO 1

Puntamento



centrare l’oggetto nella fibra

Acquisizione

Individuare la stella e portarla nella posizione corretta.

VIDEO 2

Autoguida



la posizione viene controllata durante l’esposizione

Stabilità

La guida corregge piccoli spostamenti e mantiene stabile l’immagine.

VIDEO 3

Riduzione dei dati



dai frame grezzi ai prodotti calibrati

Analisi

La pipeline estrae e calibra lo spettro, poi calcola CCF e velocità radiale.

HARPS-N · RISULTATI DI UN'OSSERVAZIONE

Dallo spettro stellare alla CCF

La correlazione combina molte righe spettrali per misurare lo spostamento Doppler.

1 · SPETTRO STELLARE

Flusso relativo in funzione della lunghezza d'onda

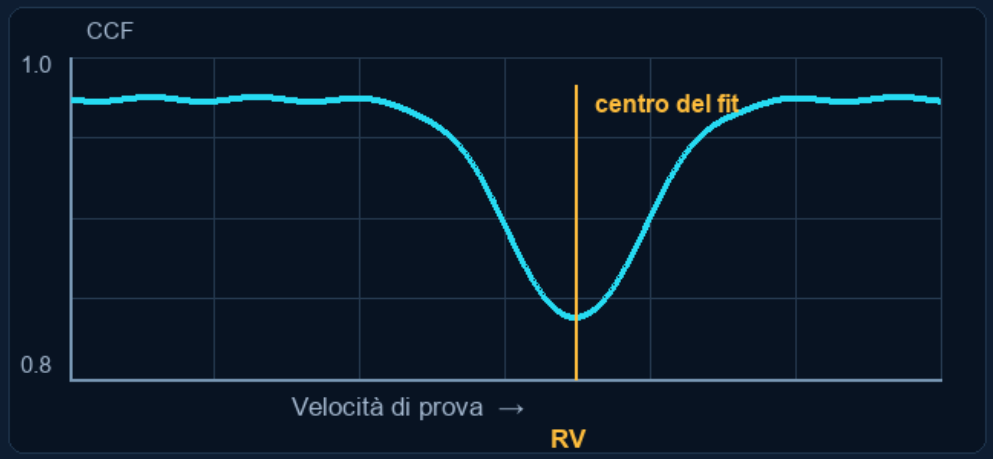


Linee di assorbimento

Le posizioni delle righe si spostano con la velocità della stella.

2 · FUNZIONE DI CORRELAZIONE (CCF)

Confronto dello spettro con una maschera stellare



La DRS adatta un profilo alla CCF

Il centro del fit fornisce la velocità radiale.

Dallo spettro a una misura

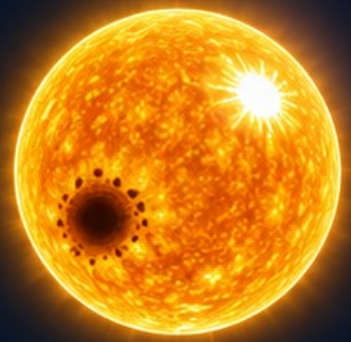
Molte righe → una CCF più leggibile → posizione del profilo = RV.

Schema illustrativo, non dati di una stella specifica. HARPS DRS User Manual.

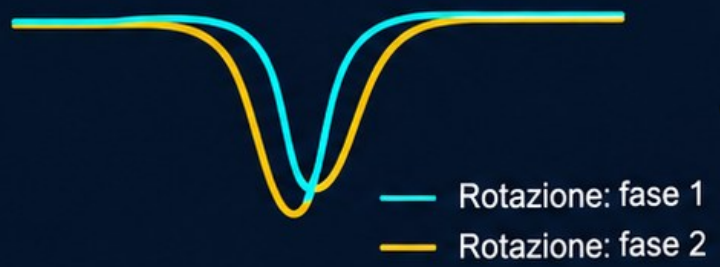
Anche la stella può imitare un pianeta

L'attività stellare può spostare le righe e simulare una variazione di velocità radiale.

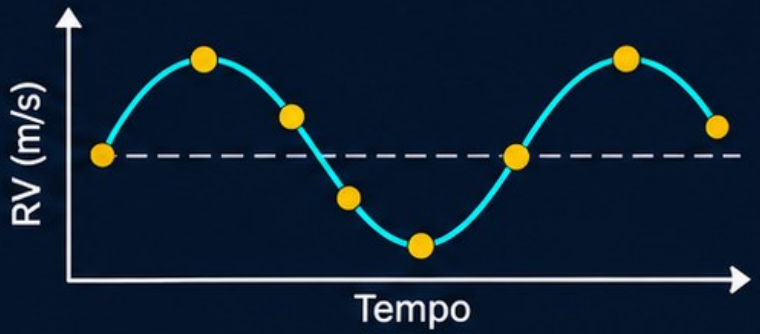
Macchie e facole



Le righe si deformano



Segnale RV apparente



Lo spostamento apparente può essere causato da profili di riga che cambiano **per l'attività stellare**, non solo dal richiamo gravitazionale di un pianeta.

1. **Conoscere la stella:** tipo spettrale e rotazione
   Aiutano a interpretare l'attività attesa della stella.
2. **Misurare indici di attività:** Ca II H&K, Hα e profilo della CCF
   Ricavati dagli spettri e dalle serie temporali per seguire l'attività e le variazioni del profilo di riga.
3. **Confrontare i segnali nel tempo**

Una periodicità RV da sola non basta: va confrontata con gli indicatori di attività.

HARPS-N · METODO DELLE VELOCITÀ RADIALI

Misurare la velocità radiale: quando emerge un pianeta

La gravità del pianeta fa oscillare la stella lungo la nostra linea di vista.

1 · DAL MOTO AL DOPPLER

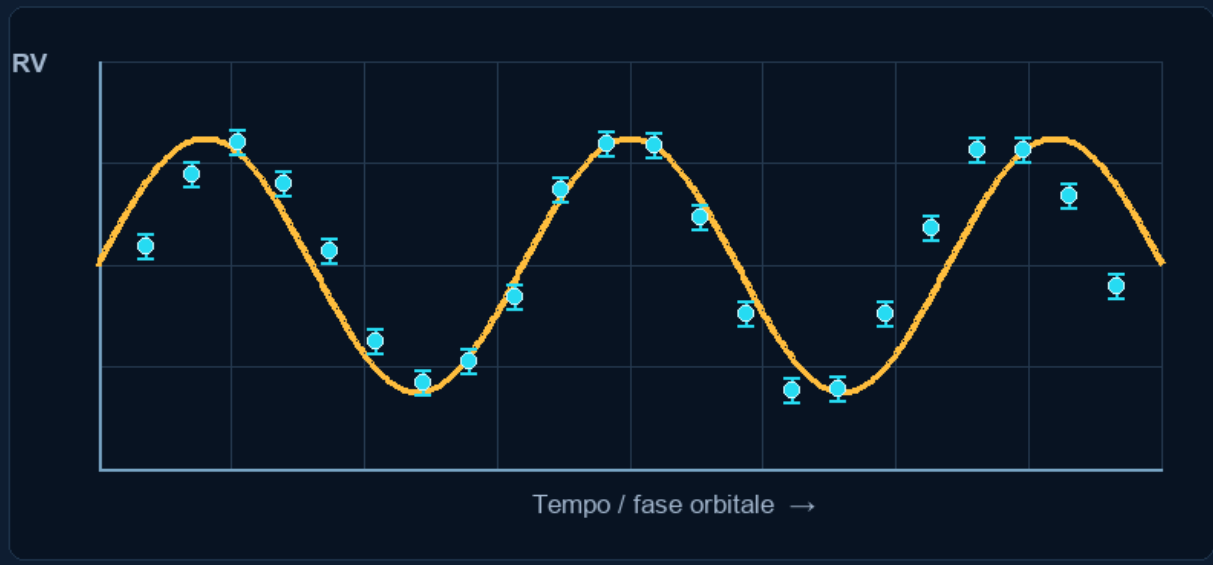
Stella e pianeta orbitano attorno al baricentro



Le righe spettrali si spostano tra due epoche



2 · LA SERIE DI VELOCITÀ RADIALI



Quando è una buona evidenza di un pianeta?

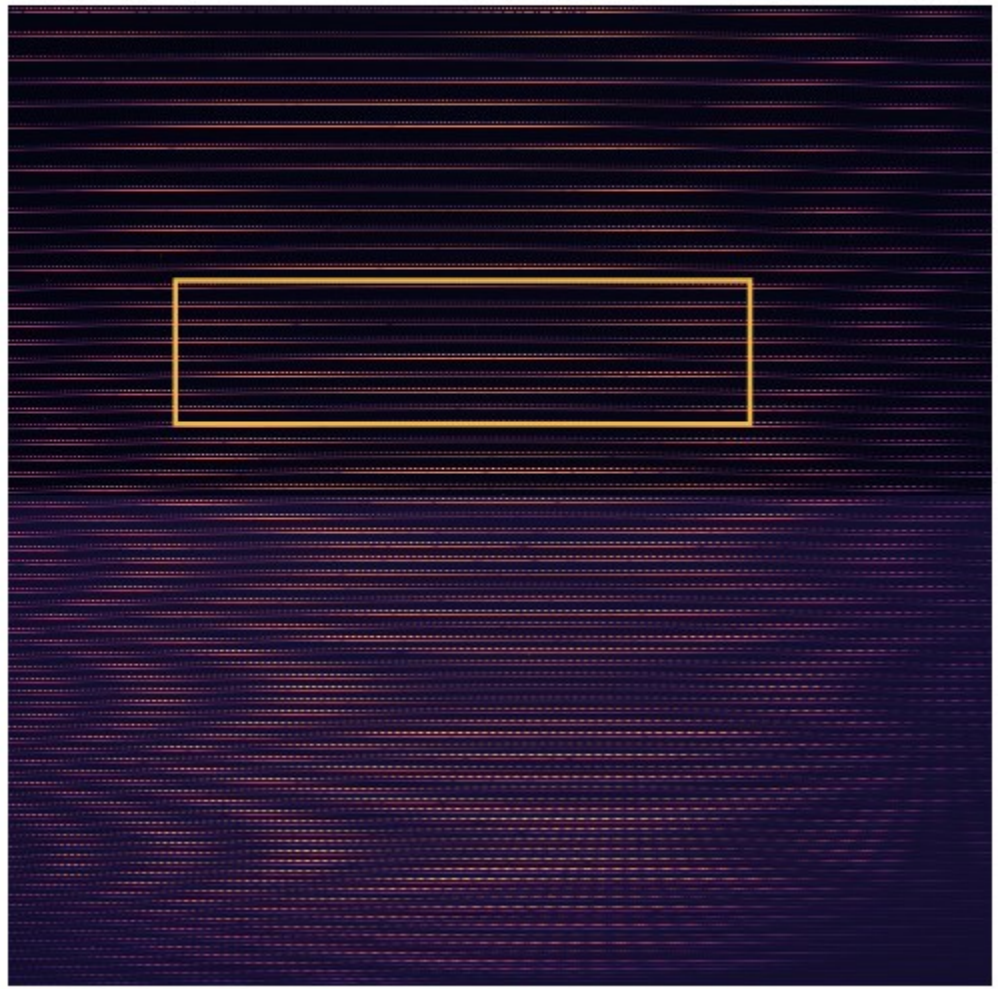
Il segnale si ripete con periodo e fase coerenti. Si controllano anche l'attività stellare e la stabilità strumentale, che possono imitare o alterare la variazione RV.

Schema illustrativo, con scala arbitraria; non sono dati di un sistema specifico.

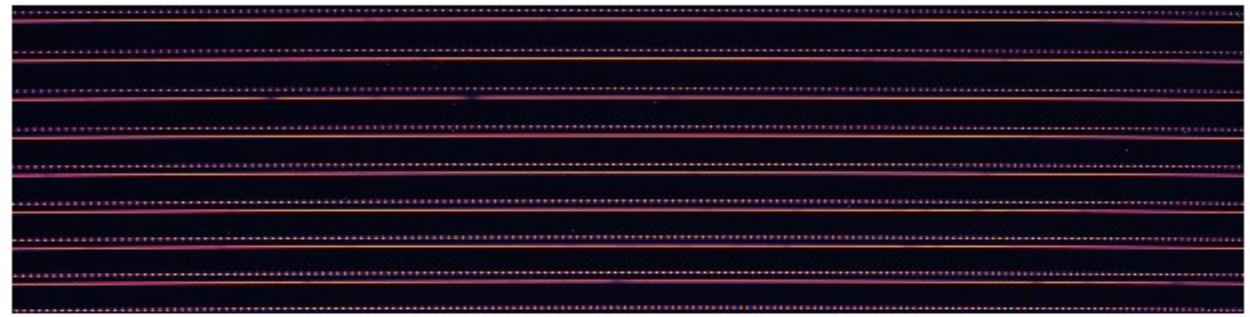
Gli ordini echelle nel FITS grezzo

HARPN · 5 febbraio 2020 · esposizione 600 s · guadagno 1,7 e^{-}/ADU

Zona attiva · ruotata per mostrare gli ordini



Dettaglio: ordini adiacenti sul CCD



Tracce luminose parallele = ordini echelle

Dal RAW ai prodotti spettrali

1 Nel RAW ogni ordine è una traccia di pixel sul CCD.

2 I conteggi includono fondo e risposta del rivelatore; qui λ non è ancora calibrata.

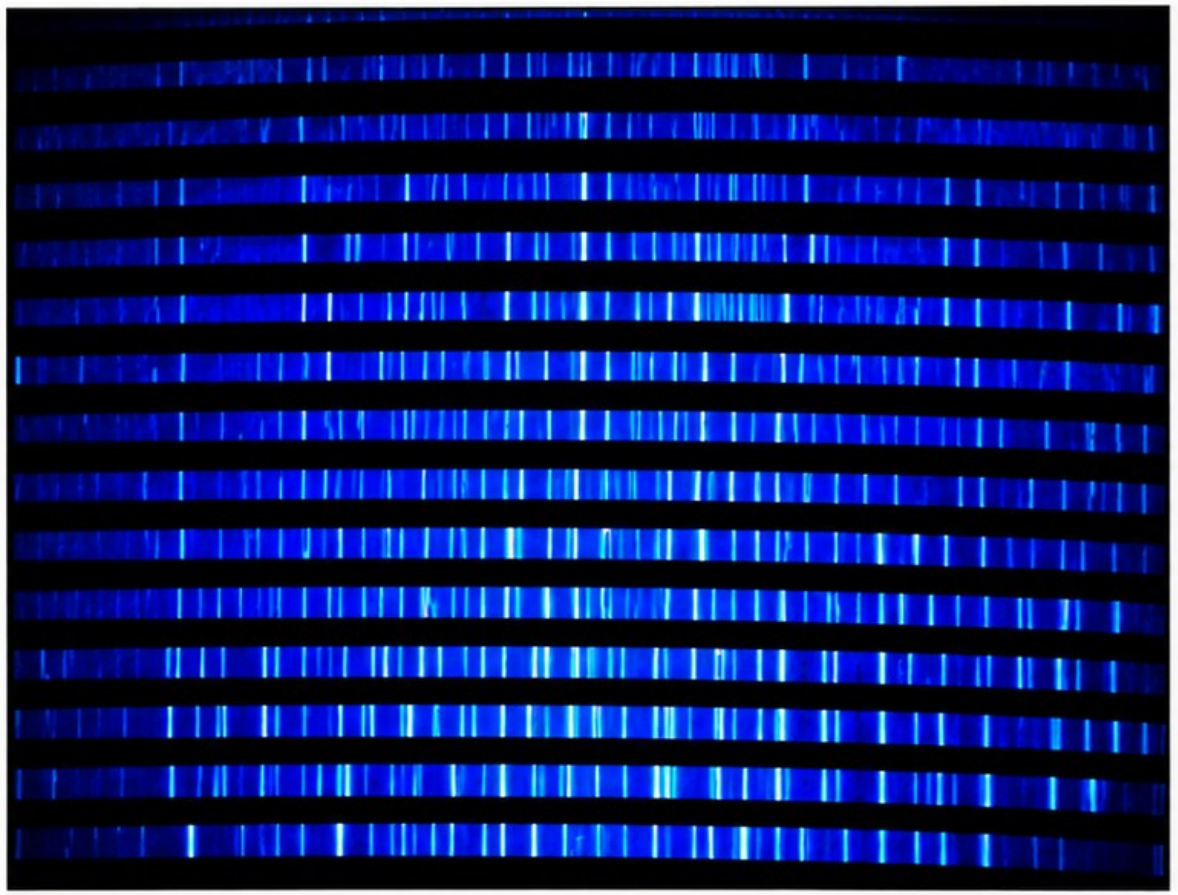
3 La pipeline corregge e calibra le tracce → S2D (ordini separati) → S1D (ordini uniti).

Falsi colori e scala logaritmica: solo per rendere visibile il contrasto.

Mostrata la zona attiva 4096 × 4112 px; prescan/overscan esclusi dalla visualizzazione.

L’header FITS: i metadati dell’osservazione e della riduzione

Un file FITS è composto da due parti: l’**header** (la prima parte del file) e i dati dell’immagine.
L’**header** è formato da una serie di **keyword** (parola chiave + valore) che contengono le informazioni dell’immagine, sia dell’acquisizione sia, per i file ridotti, della riduzione.



Esempio di spettro HARPS (immagine echelle, file RAW)

File RAW (non ridotti)

Contengono le informazioni generali dell’acquisizione, ad esempio:

Keyword	Significato
OBJECT	Nome dell’oggetto osservato
DATE-OBS	Data e ora di inizio esposizione (UTC)
EXPTIME	Tempo di esposizione [s]
INSTRUME	Strumento (es. HARPS)
OBSTYPE	Tipo di esposizione (SCIENCE, BIAS, FLAT, THAR, ...)
AIRMASS	Massa d’aria all’osservazione
BERV	Correzione baricentrica della velocità [km/s]

File ridotti

Contengono, oltre alle informazioni generali, i dettagli della riduzione, ad esempio:

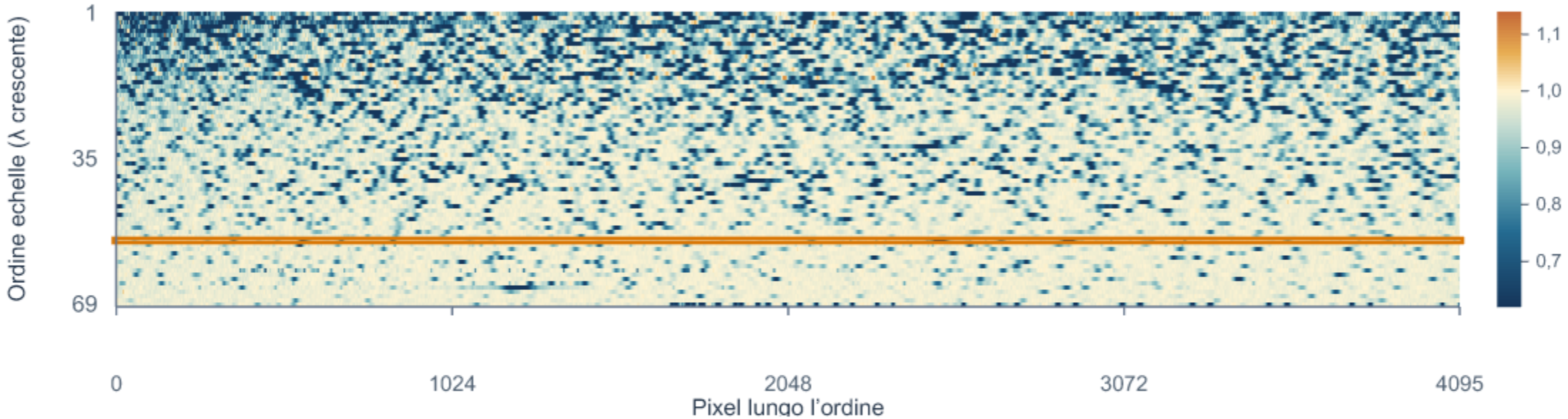
Keyword	Significato
DRSVER	Versione del pipeline di riduzione (es. DRS32)
PROCTYPE	Tipo di prodotto (es. 1D_SPECTRUM, CCF)
WAVEFILE	Soluzione di calibrazione in lunghezza d’onda utilizzata
RV	Velocità radiale misurata [km/s]
RV_ERR	Incertezza sulla velocità radiale [km/s]
SNR	Rapporto segnale/rumore (es. a 550 nm)

Spettro S2D

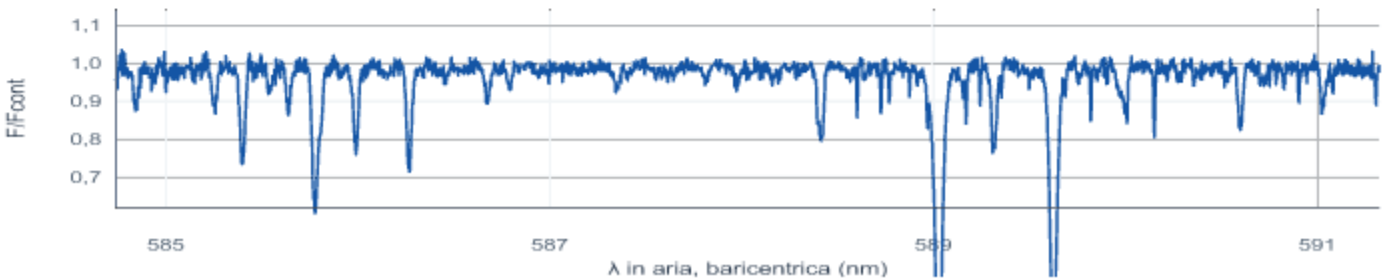
HARPS-N · 5 febbraio 2020 · 600 s · 69 ordini echelle × 4096 campioni

Matrice S2D: flusso normalizzato in 69 ordini × 4096 pixel

Ordine 54 evidenziato → zoom sotto



Zoom dell'ordine 54 · 584,7–591,3 nm



Come leggerlo

1 Ogni riga copre un intervallo di λ.

2 L'ordine 54 diventa il profilo 1D a sinistra.

3 Gli ordini calibrati e ricampionati formano lo S1D.

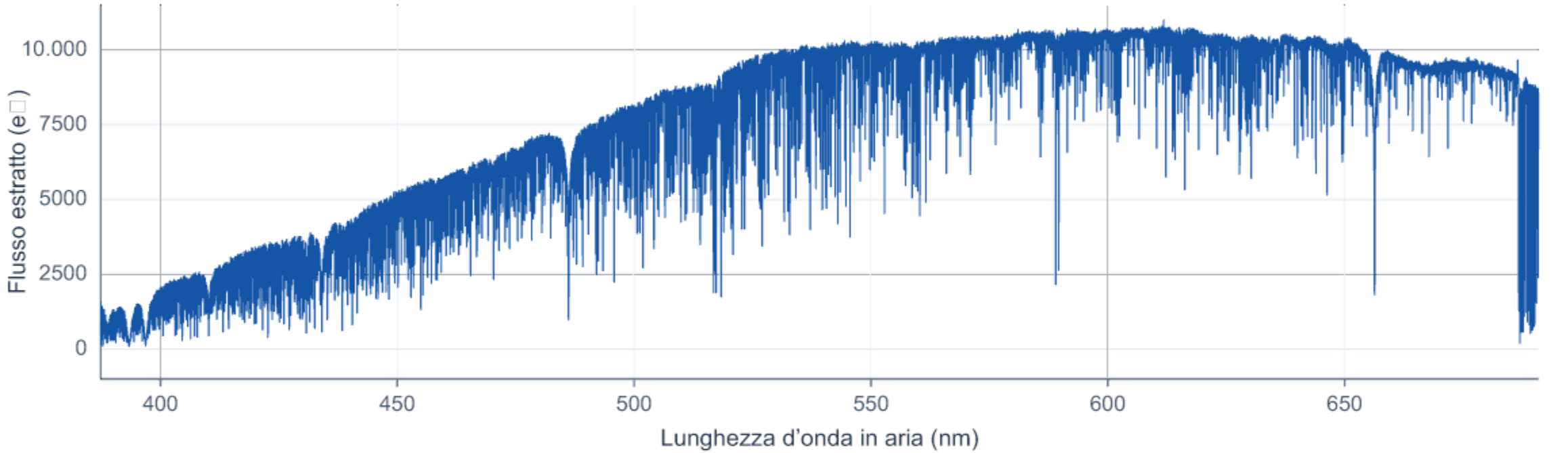
Colore = flusso normalizzato al continuo locale di ciascun ordine; le righe di assorbimento appaiono più scure.

Spettro S1D estratto

HARPS-N · 5 febbraio 2020 · esposizione 600 s

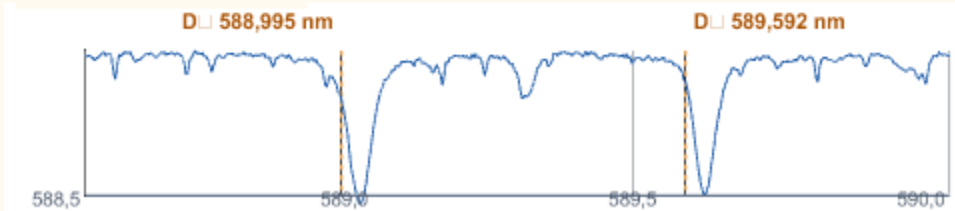
PRODOTTO S1D_A

Spettro completo



Copertura 387,4–690,9 nm · 211.525 campioni validi

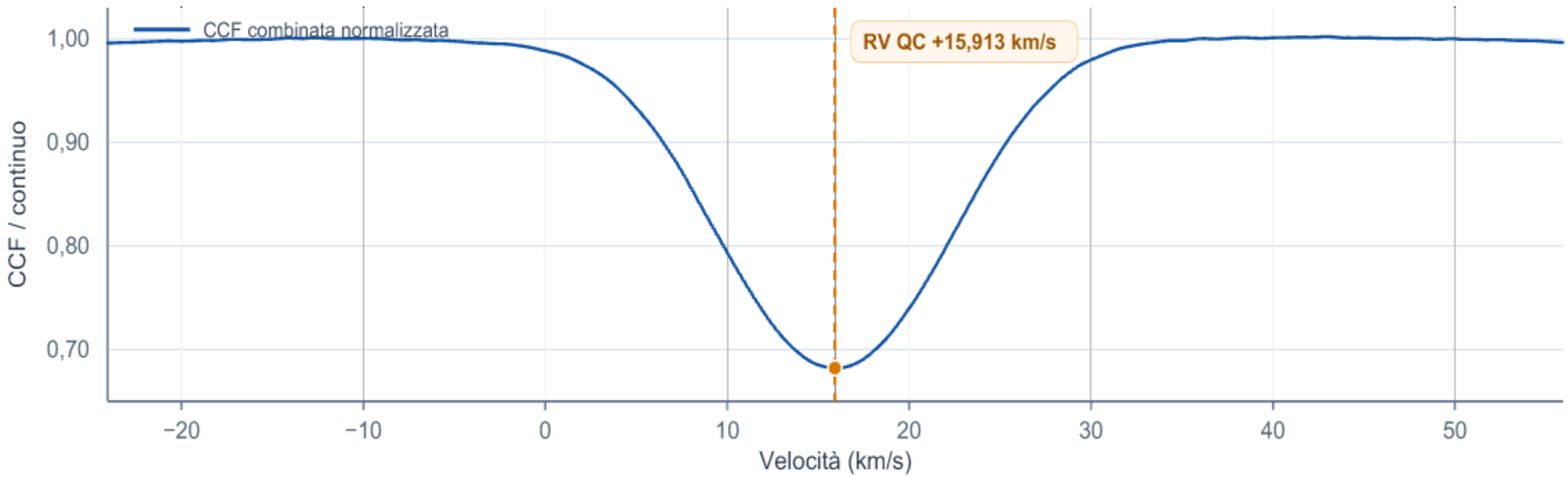
Flusso estratto in elettroni, non normalizzato · 682 campioni con quality ≠ 0 esclusi



CCF

HARPS-N · 5 febbraio 2020 · maschera F9 · griglia 321 punti, passo 0,25 km/s

Profilo CCF combinato, normalizzato al continuo



RV CCF riportata

+15,91317 km/s

Errore formale: ±1,685 m/s

FWHM CCF

14,56785 km/s

±0,00337 km/s

Contrasto CCF

32,1418 %

±0,00744 %

La linea tratteggiata indica la RV registrata nei metadati QC; il minimo della CCF individua la velocità stellare.

Parametri RV nel FITS

HARPS-N · 5 febbraio 2020 · esposizione 600 s · valori QC/CCF della pipeline

VELOCITÀ RADIALE · CCF

+15,913170

km/s

Errore formale della pipeline

± 1,685 m/s

FWHM CCF

14,56785

km/s

Incertezza

± 0,00337 km/s

Contrasto CCF

32,1418 %

Incertezza

± 0,00744 %

BIS span

–0,03202

km/s

Incertezza

± 0,00337 km/s

MASCHERA CCF	BERV riportata	OSSERVAZIONE
F9	+2,23820 km/s	05/02/2020 · 600 s

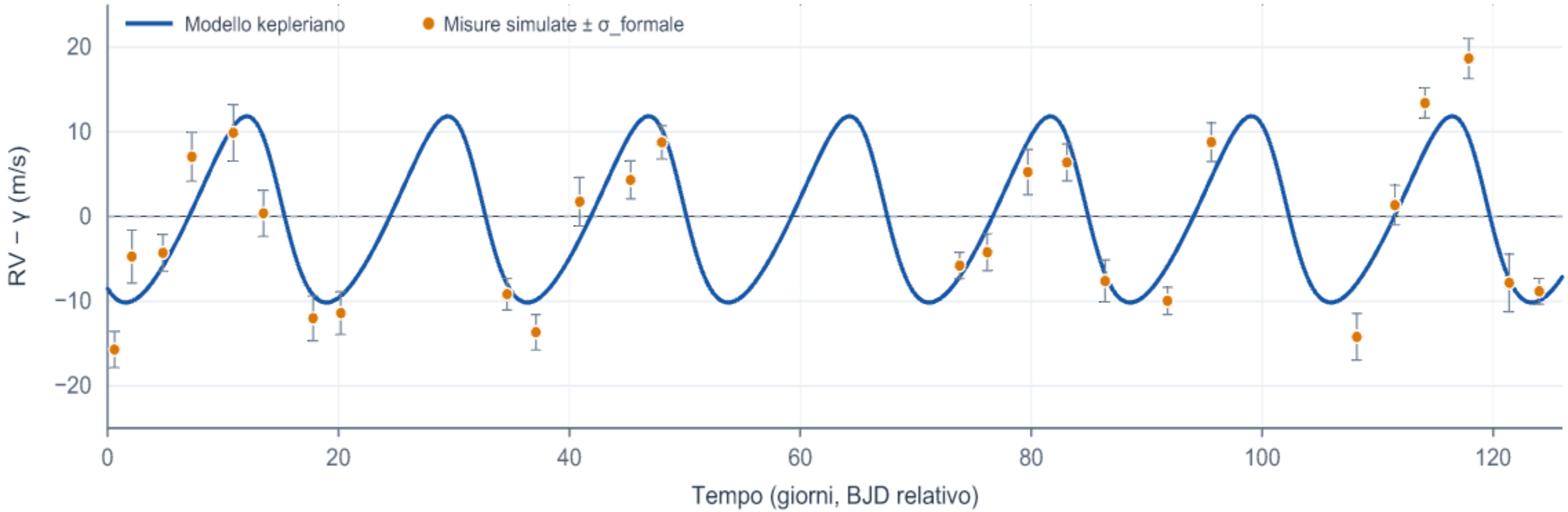
FWHM, contrasto e BIS descrivono la forma della CCF; non si sommano alla RV. La BERV è riportata separatamente nel FITS.

RV e incertezza sono i valori CCF registrati dalla pipeline; l'errore indicato è formale e non include eventuali sistematiche.

RV nel tempo: la firma di un pianeta

SIMULAZIONE

Serie sintetica · 26 visite irregolari · lacune osservative e jitter marcato



PERIODO P	SEMIAMPIEZZA K	ECCENTRICITÀ e	RUMORE STELLARE
17,4 giorni	11 m/s	0,18	jitter 3,5 m/s

Dati interamente simulati: pianeta ipotetico · linea = modello iniettato · σ formali 1,5–3,5 m/s; finestre osservative senza dati.

Dal fotone al pianeta



Dalle righe spettrali al moto della stella: un indizio della presenza di un pianeta.

Grazie per l’attenzione