

Astrofizyka II

Spektroskopia

Pomiary prędkości radialnej

Definicja prędkości radialnej

Profile linii widmowych

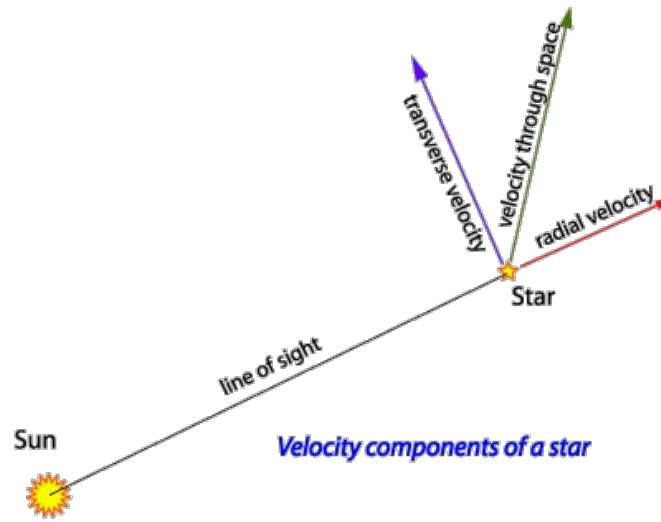
Przyczyny zmian prędkości radialnych

Metody pomiaru prędkości radialnych

Błędy w pomiarach prędkości radialnych

Prędkość radialna

efekt Dopplera



Prędkość radialna i transwersalna (astrowonjun.wordpress.com)

$$f = \left(1 - \frac{\Delta v_{rad}}{c} \right) f_0$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_{obs} - f_0}{f_0} = \frac{-\Delta v_{rad}}{c}$$

$$f_{rel} = \sqrt{\frac{1 - \Delta v/c}{1 + \Delta v/c}} f_0$$

$$f_{rel} = \frac{1}{z+1} f_0$$

Prędkość radialna

efekt Dopplera

$$f_{rel} = \frac{1}{z+1} f_0$$

$$\frac{\Delta f_{rel}}{f_0} = \frac{f_{obs} - f_0}{f_0} = \frac{\frac{1}{z+1} f_0 - f_0}{\frac{1}{z+1} f_0}$$

$$\frac{\Delta f_{rel}}{f_0} = -z$$

Prędkość radialna

efekt Dopplera

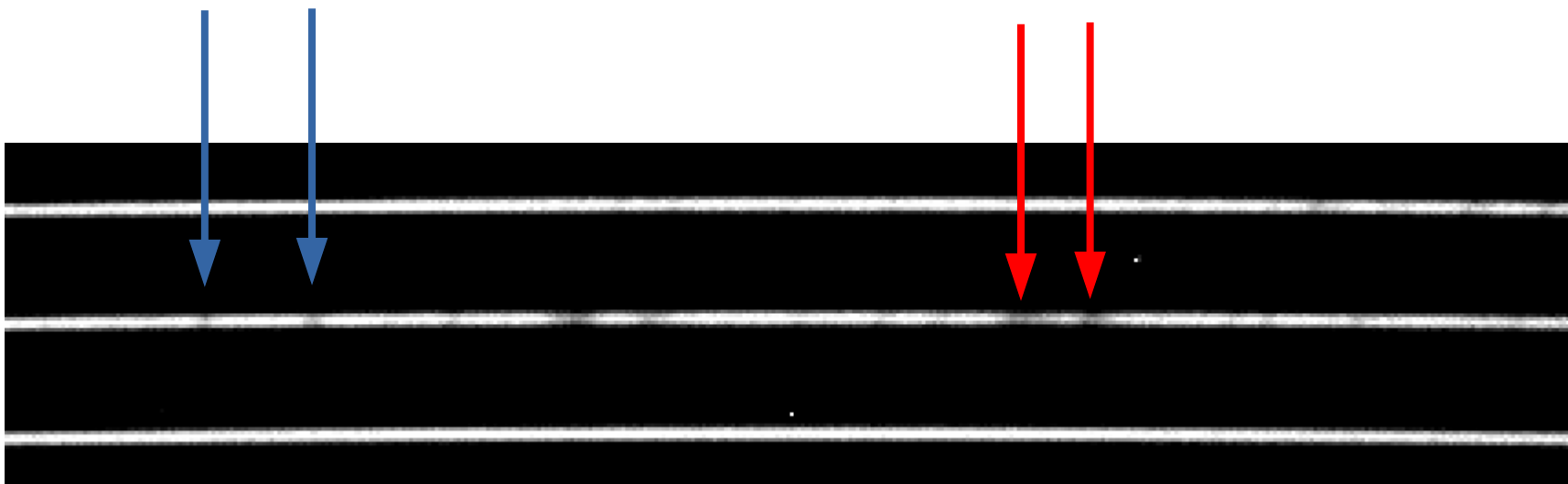
$$\Delta v_{rad} = 100 \text{ km/s} \quad -z = \frac{\Delta f_{rel}}{f_0} = -0.000333620 \quad \frac{\Delta f}{f_0} = -0.000333565$$

$$\Delta v_{rad} = 10000 \text{ km/s} \quad -z = \frac{\Delta f_{rel}}{f_0} = -0.0339318 \quad \frac{\Delta f}{f_0} = -0.0333565$$

$$\Delta v_{rad} = 100000 \text{ km/s} \quad -z = \frac{\Delta f_{rel}}{f_0} = -0.414582 \quad \frac{\Delta f}{f_0} = -0.333565$$

Prędkość radialna

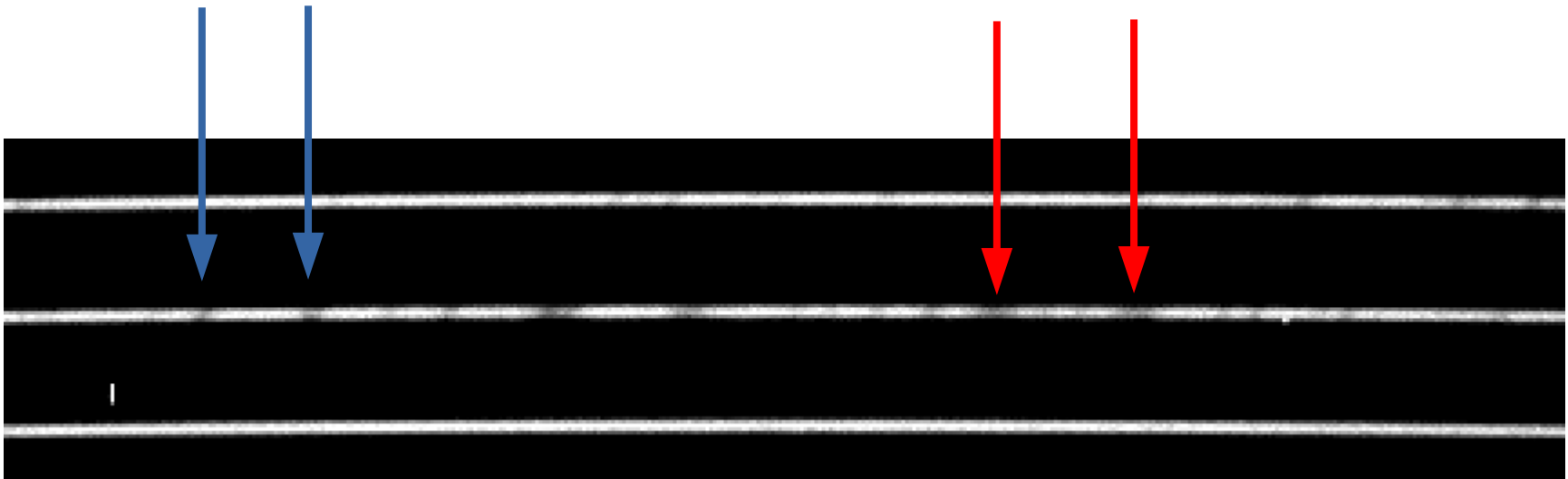
efekt Dopplera



Zmiany pozycji linii widmowych gwiazdy V2080 Cyg z PST1.

Prędkość radialna

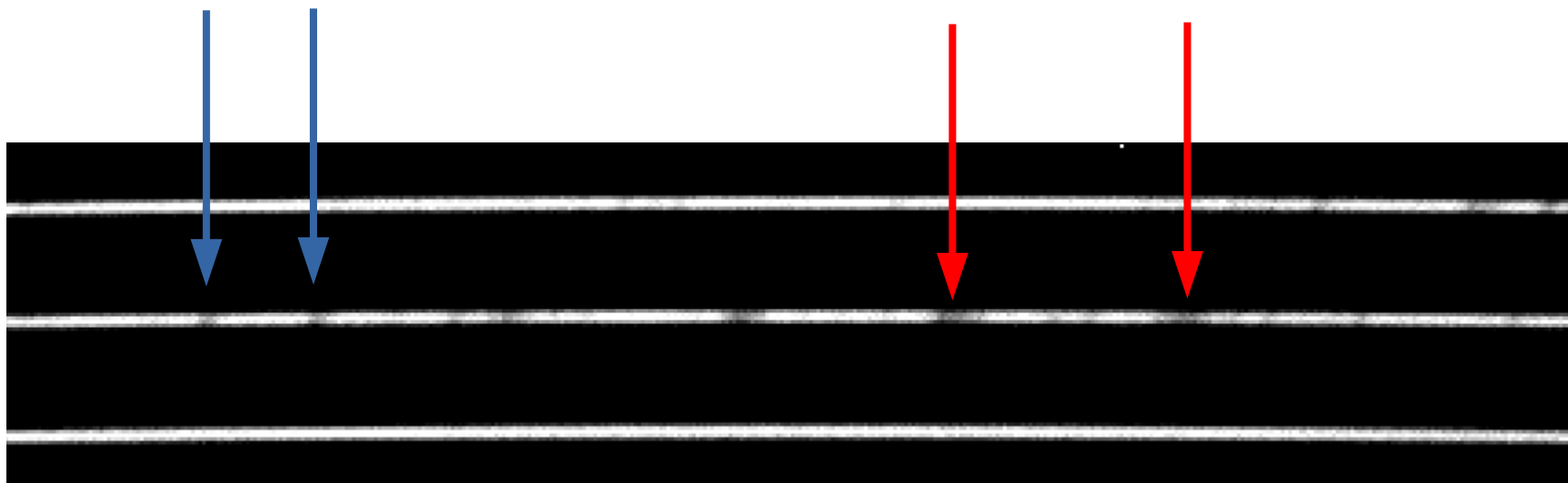
efekt Dopplera



Zmiany pozycji linii widmowych gwiazdy V2080 Cyg z PST1.

Prędkość radialna

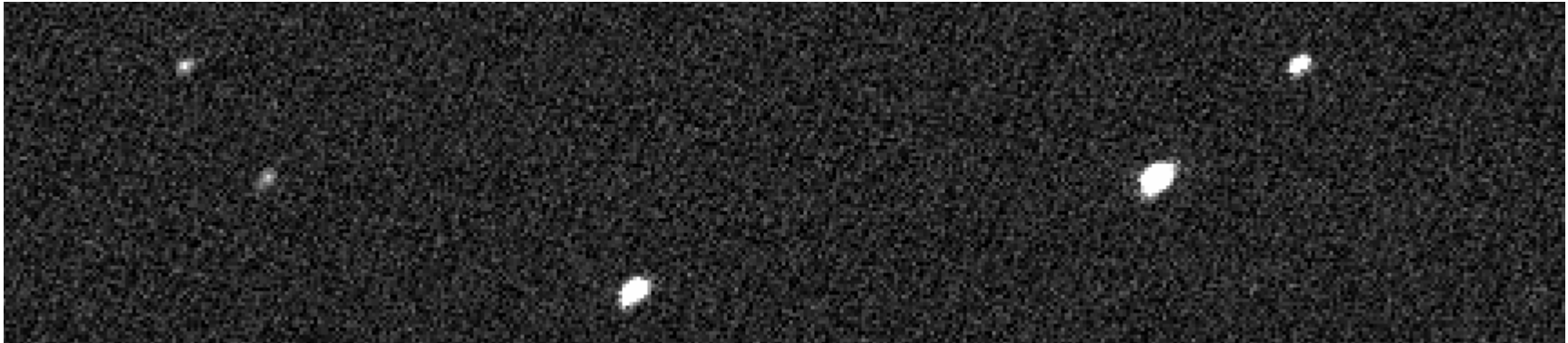
efekt Dopplera



Zmiany pozycji linii widmowych gwiazdy V2080 Cyg z PST1.

Prędkość radialna

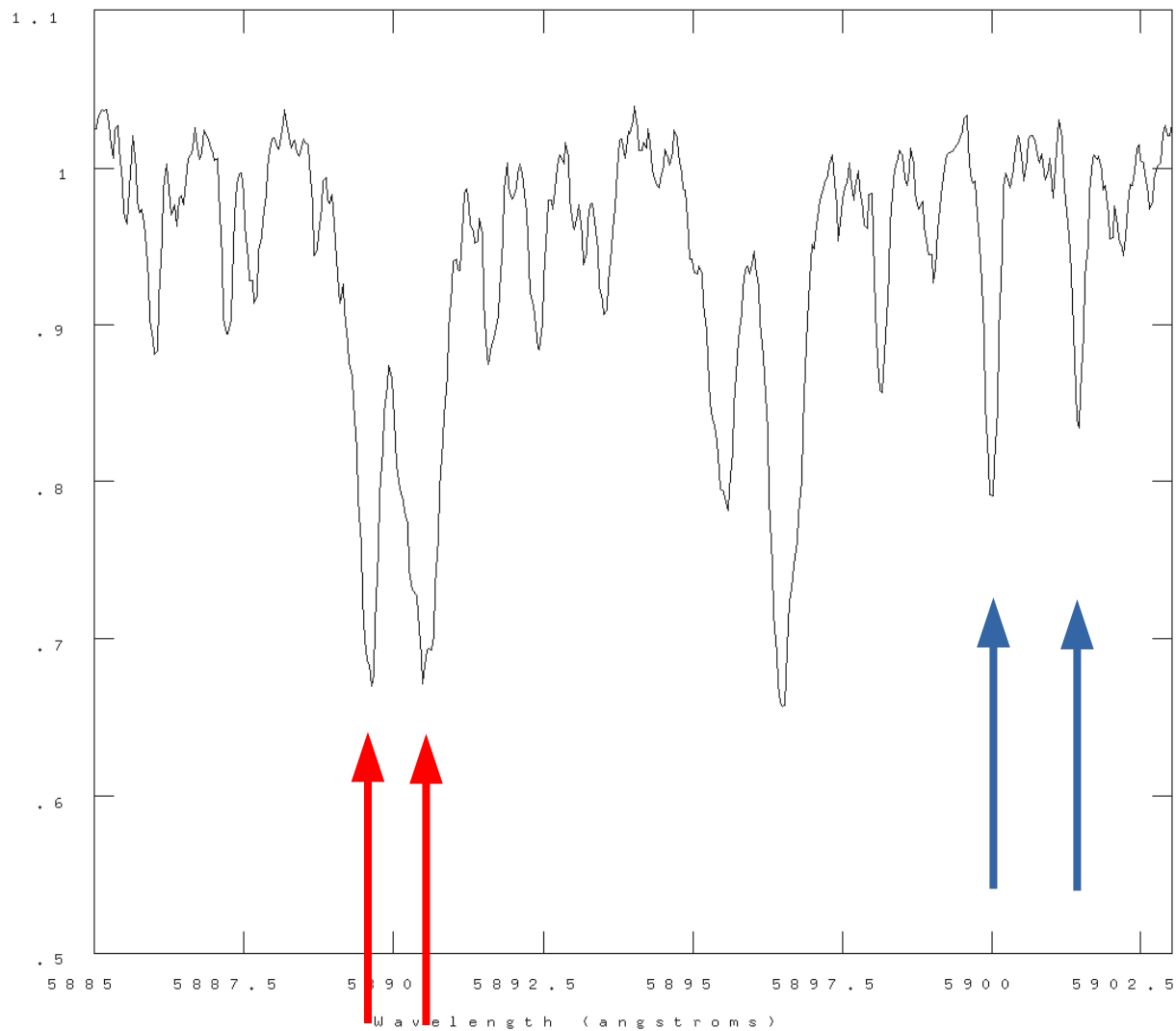
efekt Dopplera



Pozycji linii emisyjnych lampy kalibracyjnej Th-Ar.

Prędkość radialna

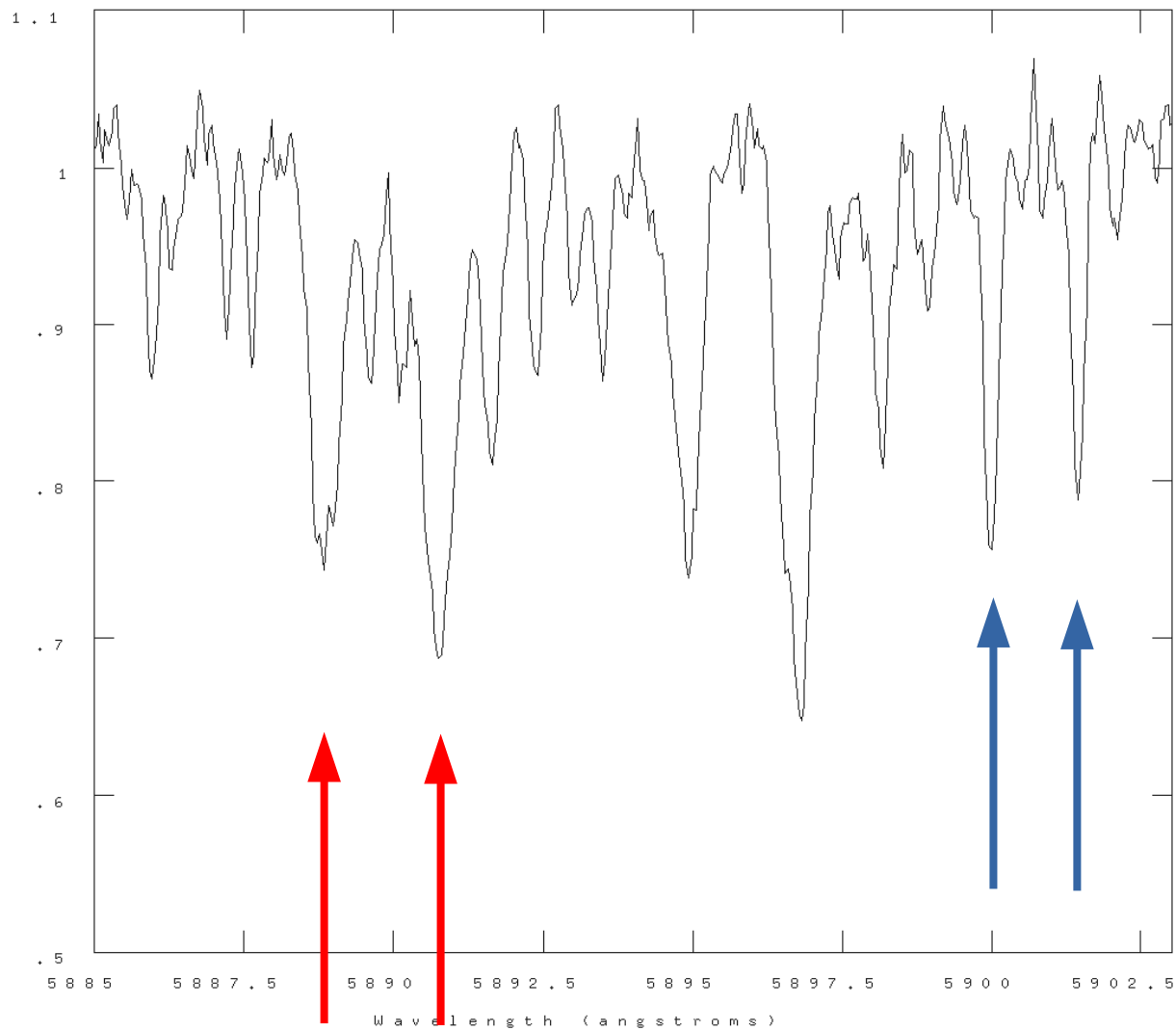
efekt Dopplera



Zmiany pozycji linii widmowych gwiazdy V2080 Cyg z PST1.

Prędkość radialna

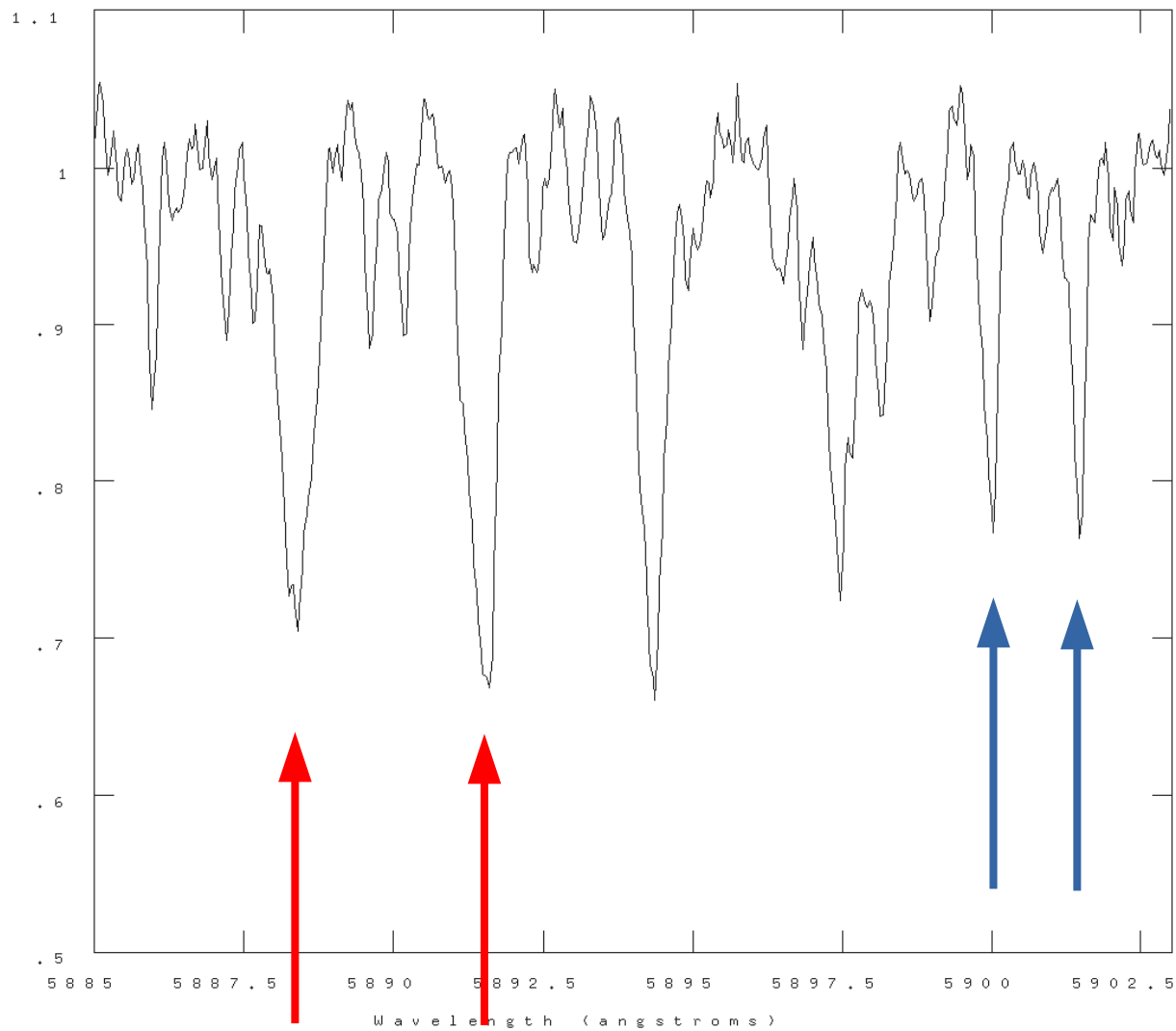
efekt Dopplera



Zmiany pozycji linii widmowych gwiazdy V2080 Cyg z PST1.

Prędkość radialna

efekt Dopplera



Zmiany pozycji linii widmowych gwiazdy V2080 Cyg z PST1.

Prędkość radialna

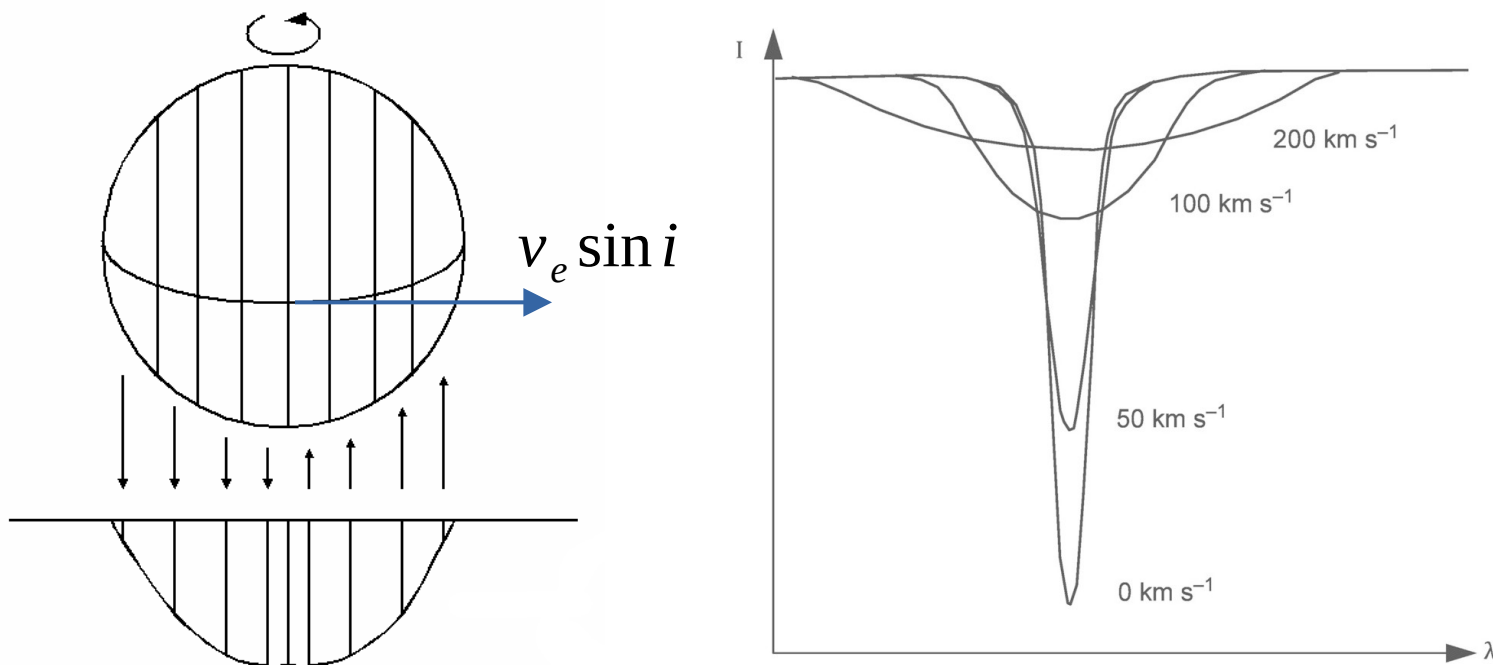
efekt Dopplera

Jedna i ta sama, stała prędkość radialna całego obiektu, którego widmo obserwujemy powoduje przesunięcie obserwowanych linii widmowych o różne wartości częstotliwości i różne wartości długości!

Podobnie prędkość radialna o stałej wartości przesuwa widmo na pikselach kamery CCD o nierówną liczbę pikseli.

Prędkość radialna

Rotacja, pulsacja, zaplamienie, granulacja gwiazdy



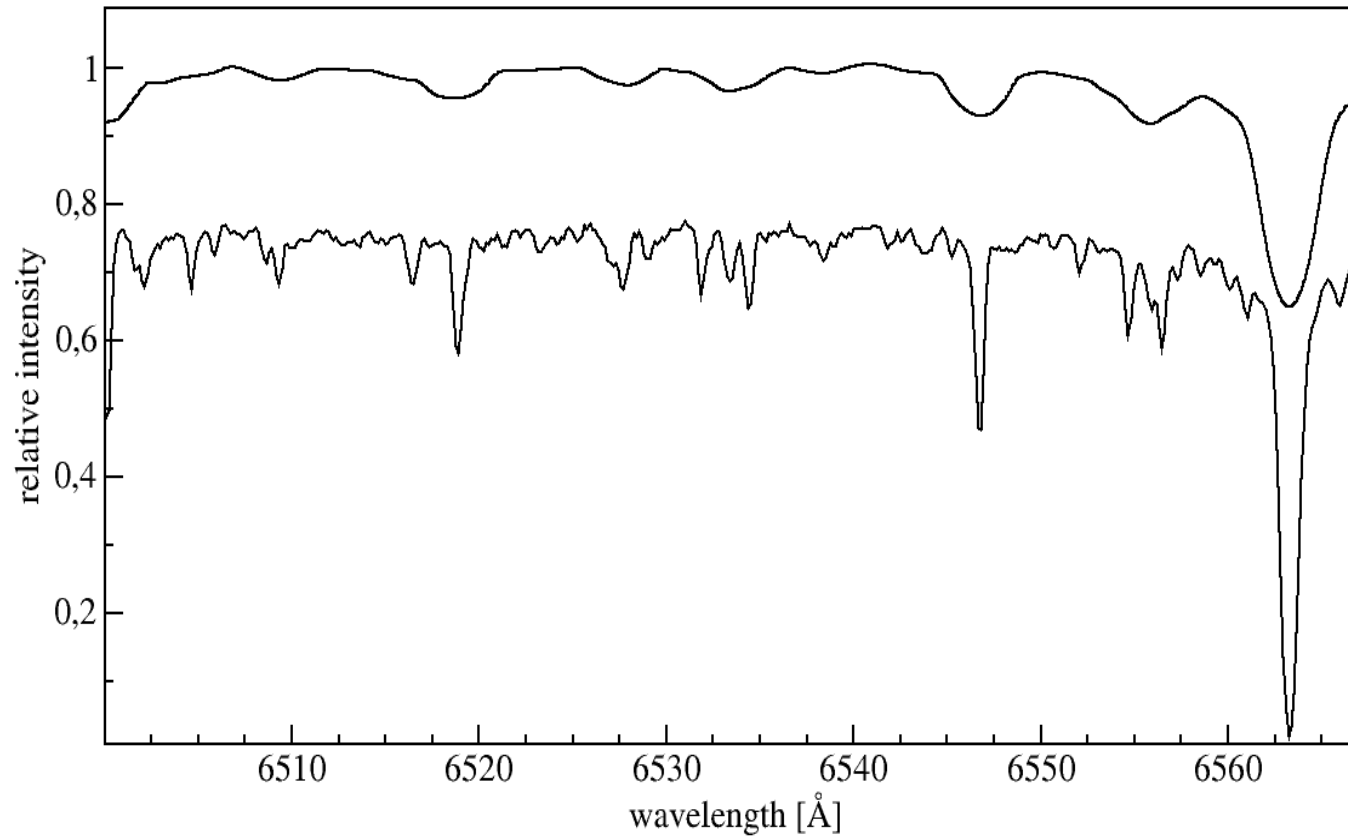
Poszerzenie rotacyjne linii widmowych (www.astro.uu.se)

$$\frac{I_{\lambda}^2(\Delta\lambda)}{I_{\lambda}^2(0)} = 1 - \frac{c^2}{v_e^2 \sin^2 i} \frac{(\Delta\lambda)^2}{\lambda^2}$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Prędkość radialna

Rotacja, pulsacja, zaplamienie, granulacja gwiazdy



Gwiazdy typu K2: szybko rotująca V471 Tau ($v_{\text{rot}} \sim 200$ km/s)
oraz inna gwiazda o znikomej prędkości rotacji.

Poszerzenie rotacyjne nie zmienia pozycji linii widmowych (v_r),
ale zmniejsza liczbę widocznych linii i zmniejsza dokładność pomiaru ich pozycji (v_r).

Prędkość radialna

Rotacja, pulsacja, zaplamienie, granulacja gwiazdy

Analizując poszerzenie (profil) linii widmowych można wyznaczyć:

$$v_e \sin i$$

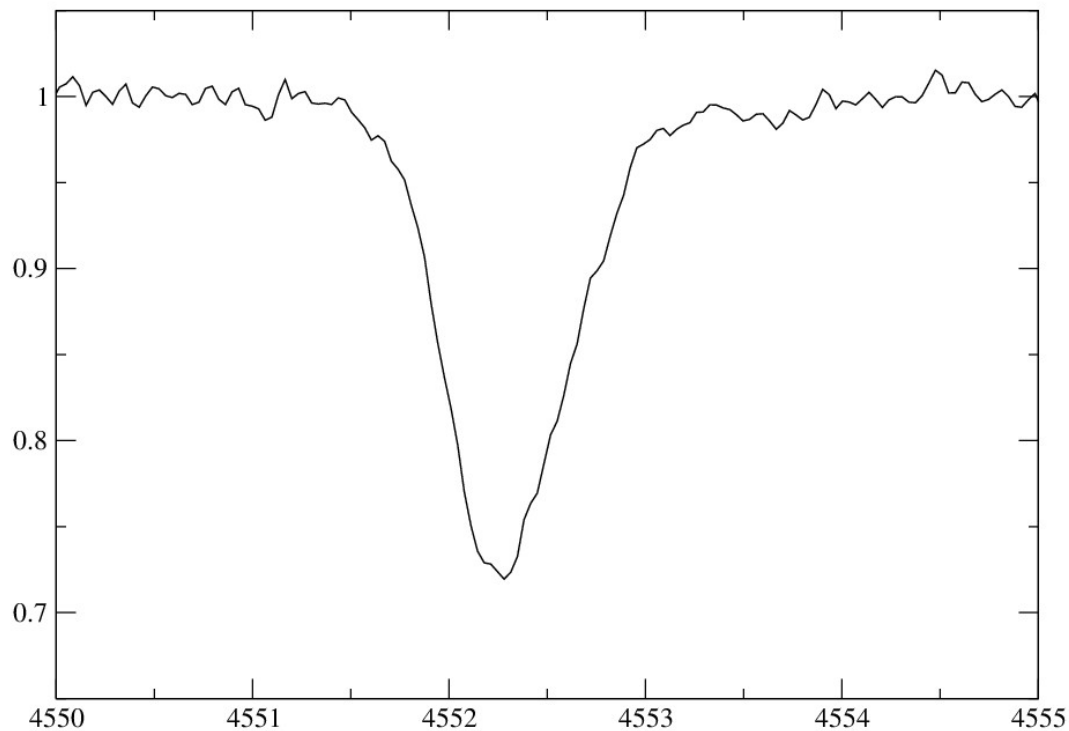
gdzie v_e jest równikową prędkością wirowania, a i kątem nachylenia osi rotacji.

Jak to zrobić w praktyce?

Dopasowując widmo symulowane (syntetyczne), czyli np. splot widma nieposzerzonego z profilem rotacyjnym, dla różnych wartości $v_e \sin i$.

Prędkość radialna

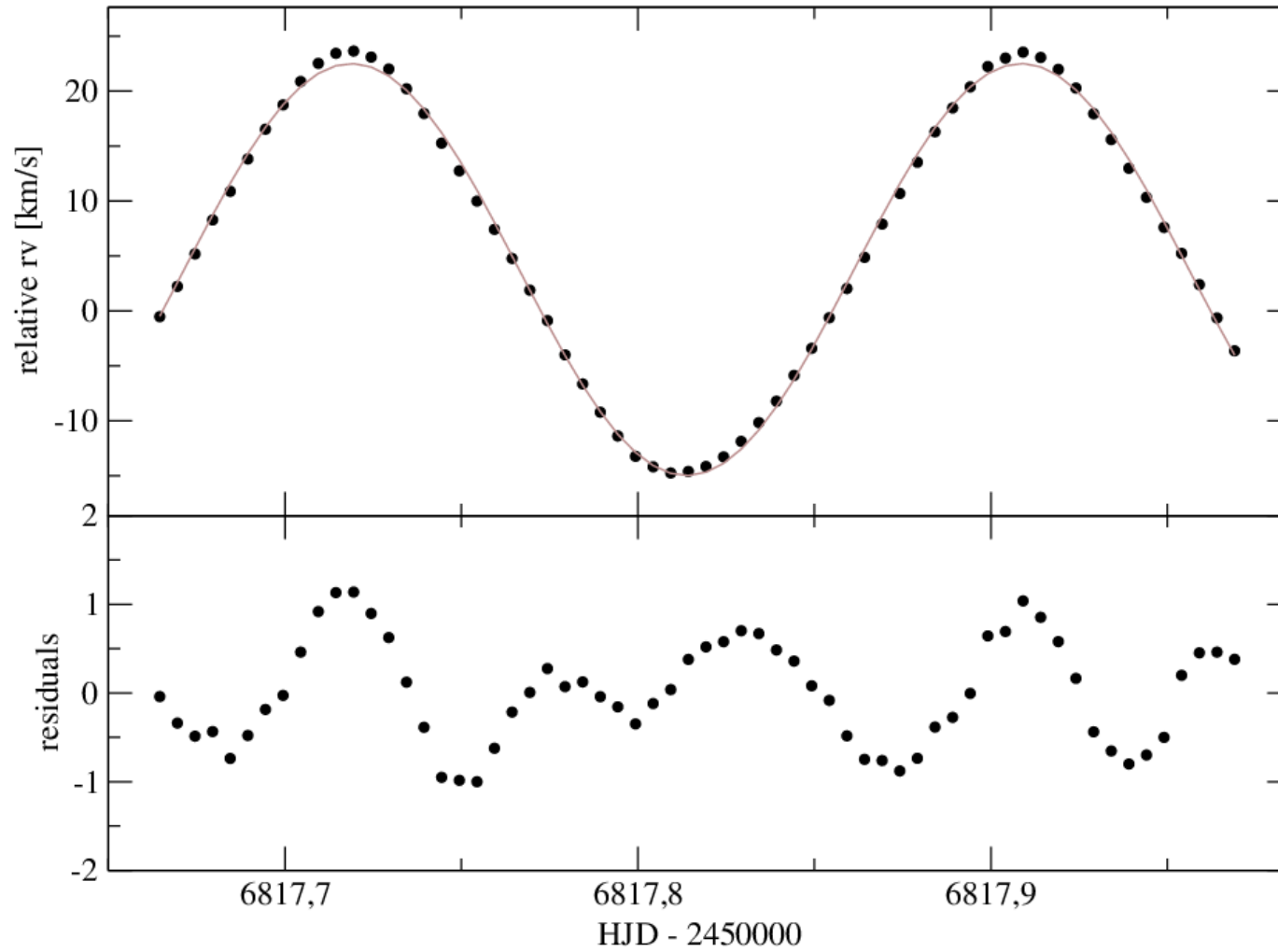
Rotacja, pulsacja, zaplamienie, granulacja gwiazdy



Zmiany pozycji i profilu linii widmowej gwiazdy pulsującej beta Cep.

Typowe prędkości radialne

Gwiazdy pulsujące

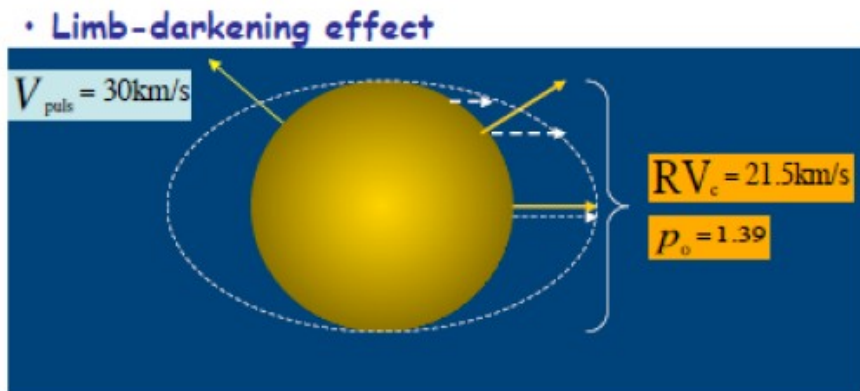
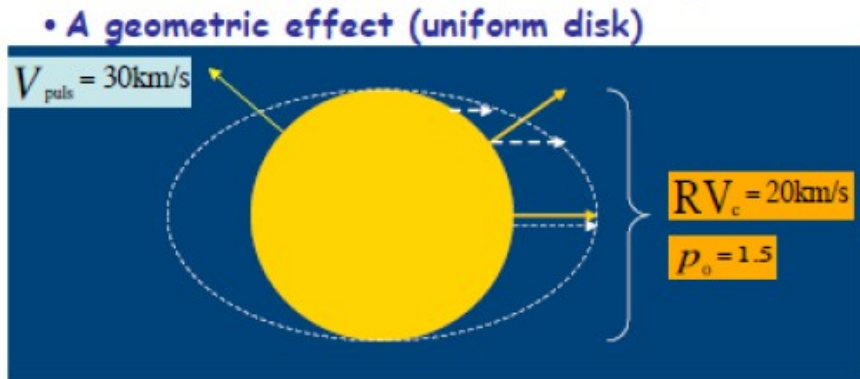


Zmiany prędkości radialnych gwiazdy pulsującej β Cep z PST2.

Typowe prędkości radialne

Współczynnik projekcji (p-factor)

$$p = \frac{V_{puls}}{V_{r,obs}} = p_0 f_{grad} f_{o-g}$$

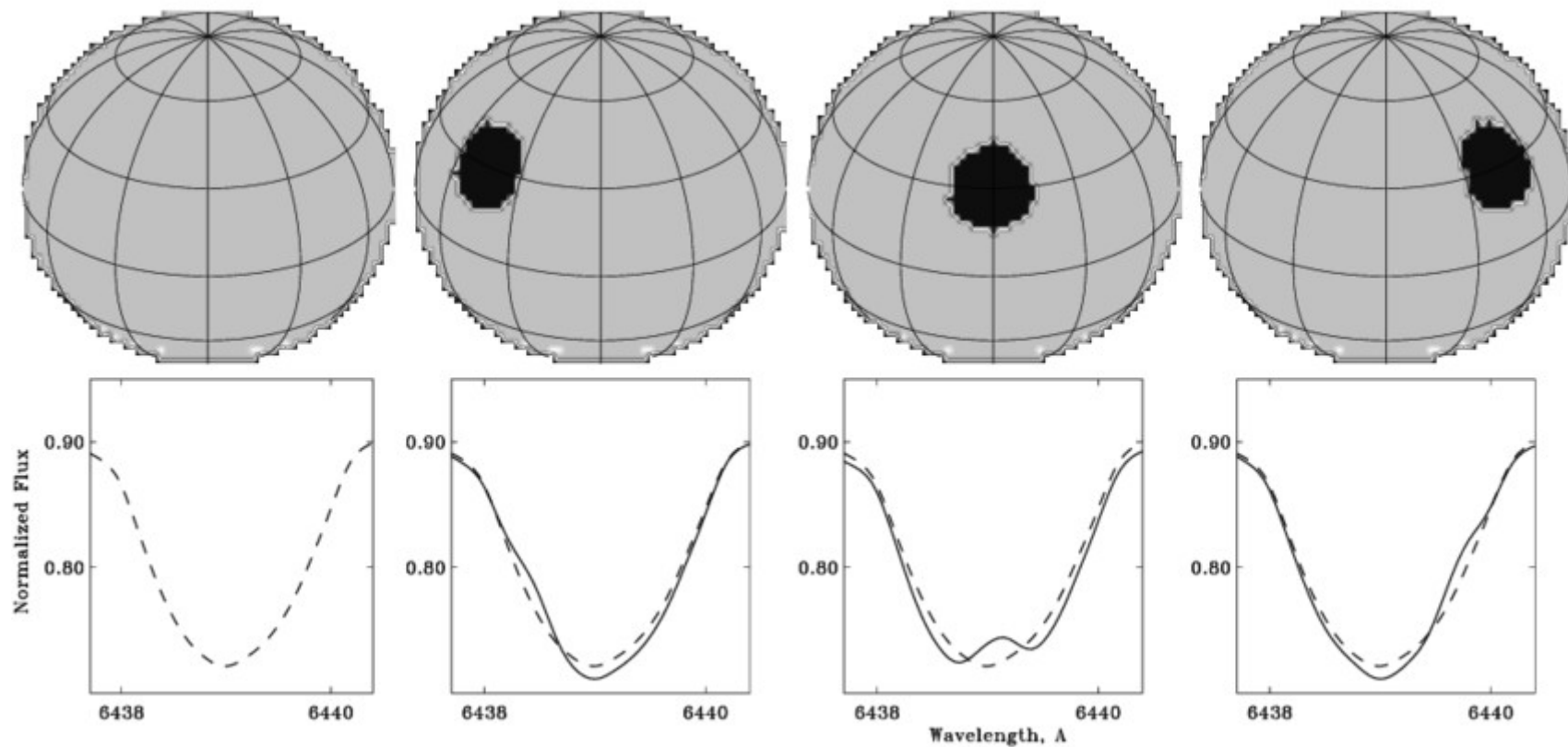


p zależy od:

- geometrii i pociemnienia brzegowego (tzw. geometryczne p_0),
- głębokości powstawania linii widmowych (tzw. gradient atmosferyczny f_{grad}),
- różnicy pomiędzy interferometrycznym, fotometrycznym i spektroskopowym promieniem gwiazdy (interpolacja do poziomu linii o zerowej głębokości),
- ruchy turbulentne gazu f_{o-g} (konwektywne przesunięcie ku fioletowi, patrz dalej).

Prędkość radialna

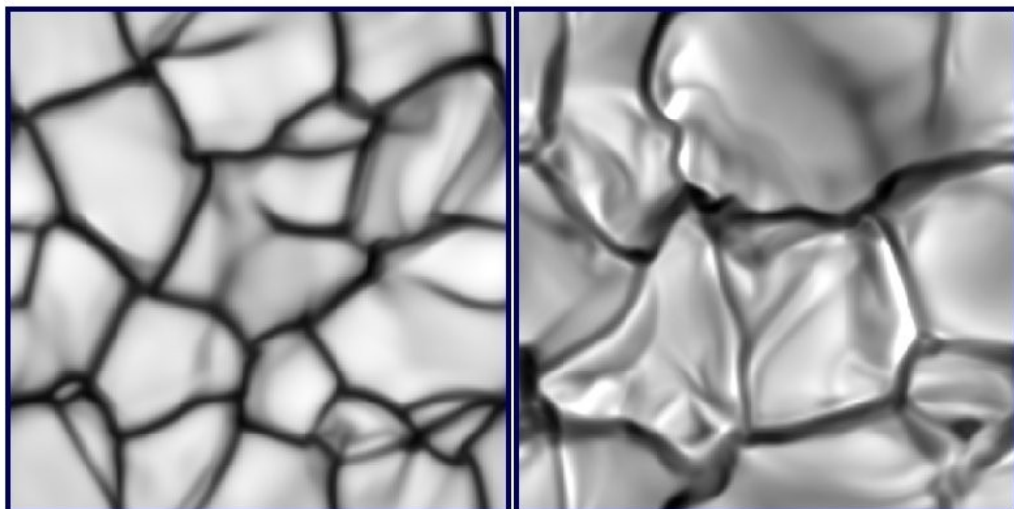
Rotacja, pulsacja, zaplamienie, granulacja gwiazdy



Symulacja szybko rotującej gwiazdy z plamą na powierzchni (Berdyugina, 2005).

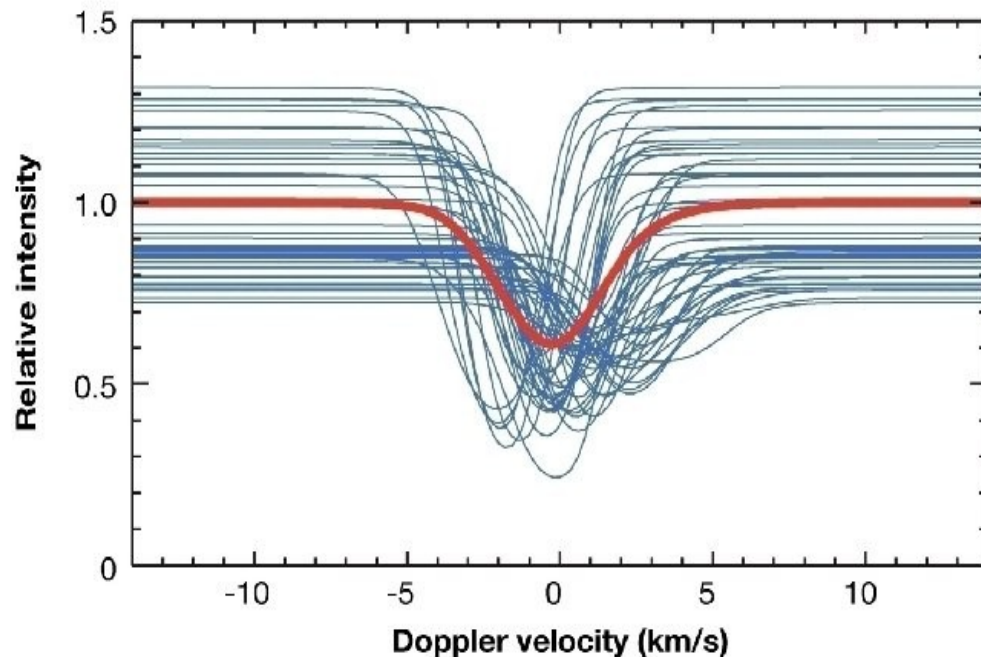
Prędkość radialna

Rotacja, pulsacja, zaplamienie, granulacja gwiazdy



Surface intensity during granular evolution on a 12,000 K white dwarf (left) and a 3,800 K red giant. Areas differ by orders of magnitude: $7 \times 7 \text{ km}^2$ for the white dwarf, and $23 \times 23 R_{\text{sun}}^2$ for the giant.

Symulacja granulacji na powierzchni białego karła ($7 \times 7 \text{ km}$) oraz czerwonego olbrzyma ($27 \times 27 R_{\text{sun}}$) (Dravins, 2017).



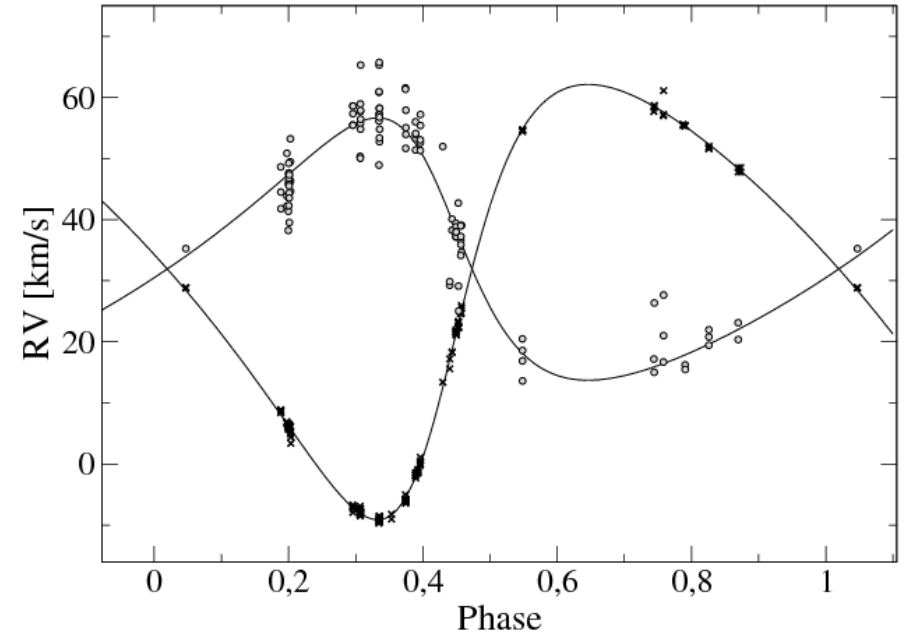
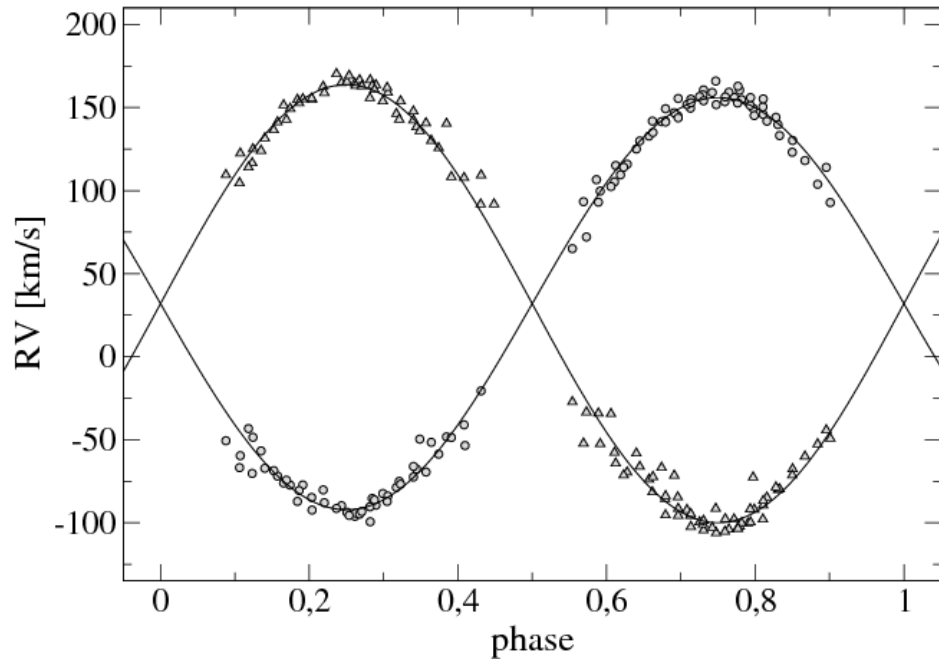
Symulowane profile linii widmowych w różnych miejscach granuli słonecznej (Asplund, 2005).

Największe poszerzenie i zmienność linii widmowych w czasie ze względu na turbulencję w atmosferze gwiazdowej występuje w olbrzymach.

Konwektywne przesunięcie ku fioletowi (ang. convective blueshift) jest to przesunięcie średniego profilu linii widmowej ze względu na to, że gorący, wznoszący się gaz w komórkach konwektywnych ma większy wkład w średnie widmo niż chłodniejszy gaz opadający.

Typowe prędkości radialne

Gwiazdy podwójne i wielokrotne



Ciasny układ podwójny o okresie ok 1 doby i układ podwójny o okresie ok 200 dni (DY Lyn).

Typowe prędkości radialne

Gwiazdy podwójne

Układ podwójny spektroskopowy dwuliniowy

$$v_r = K [\cos(\theta + \omega) + e \cos(\omega)] + \gamma \quad K = \frac{2\pi a \sin i}{P \sqrt{1 - e^2}}$$

Łącząc to z 3 prawem Keplera dostajemy

$$m_{1,2} \sin^3 i = \frac{1}{2\pi G} (1 - e^2)^{3/2} (K_1 + K_2)^2 K_{2,1} P$$

Dla układu podwójnego jednoliniowego mamy tylko funkcję masy:

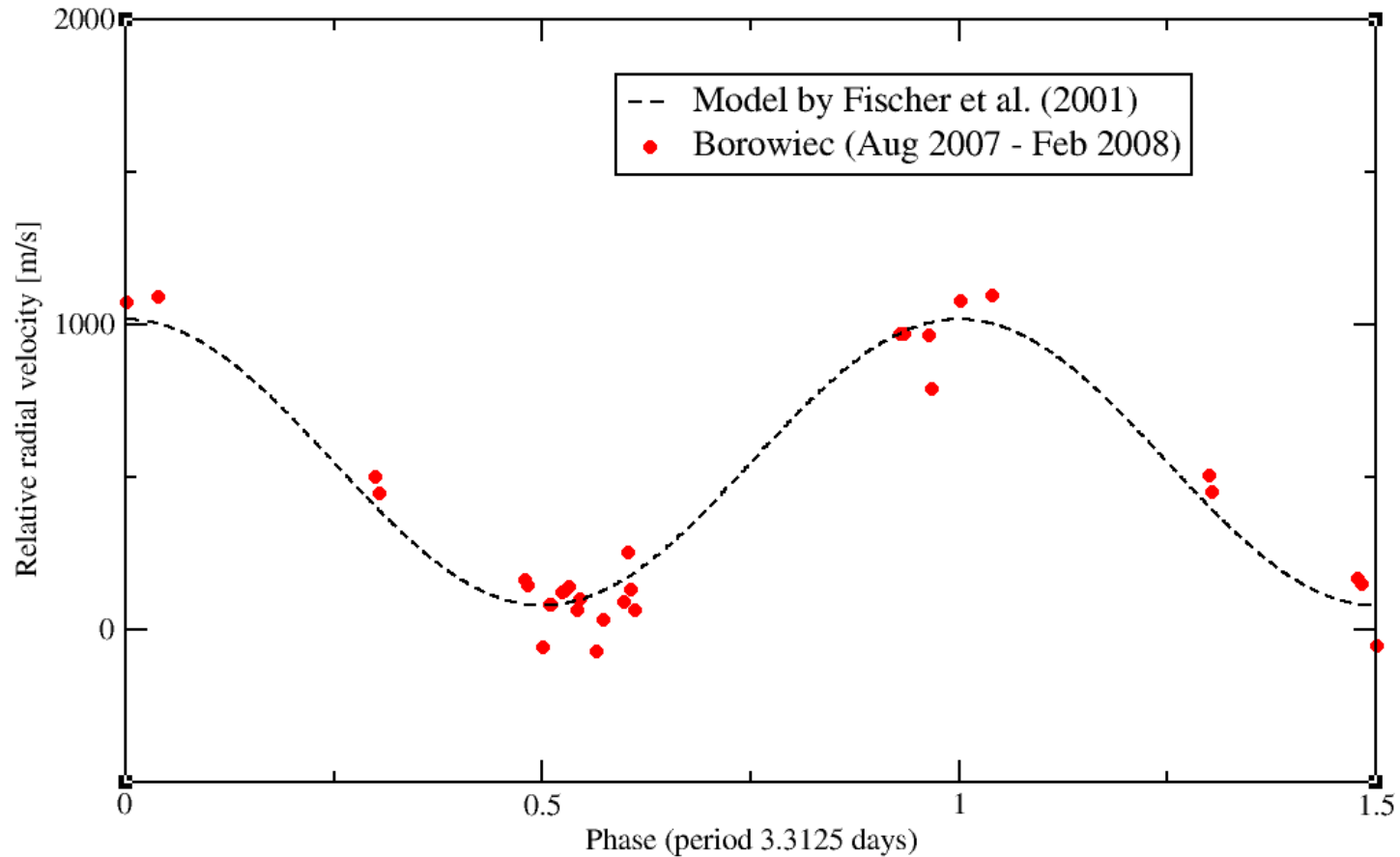
$$f = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{1}{2\pi G} (1 - e^2)^{3/2} K_1^3 P$$

Typowe prędkości radialne

Planety pozasłoneczne

tau Bootis, $V=4.5\text{mag}$, $\text{Spec}=F6IV$

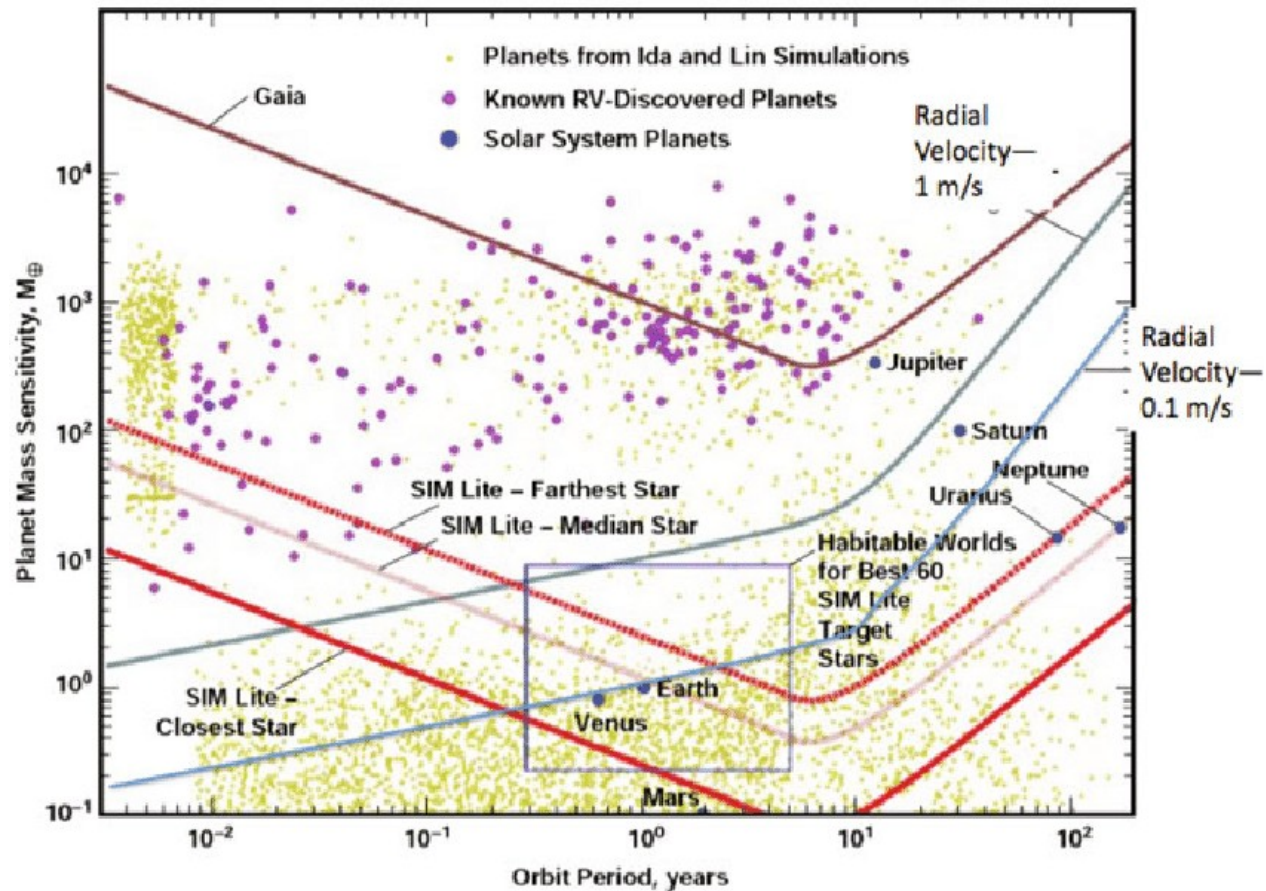
PST; $P = 3.3125\text{ d}$; $T_0 = 2454326.31044$



Zmiany prędkości radialnych gwiazdy tau Boo spowodowane obecnością planety.

Typowe prędkości radialne

Planety pozasłoneczne

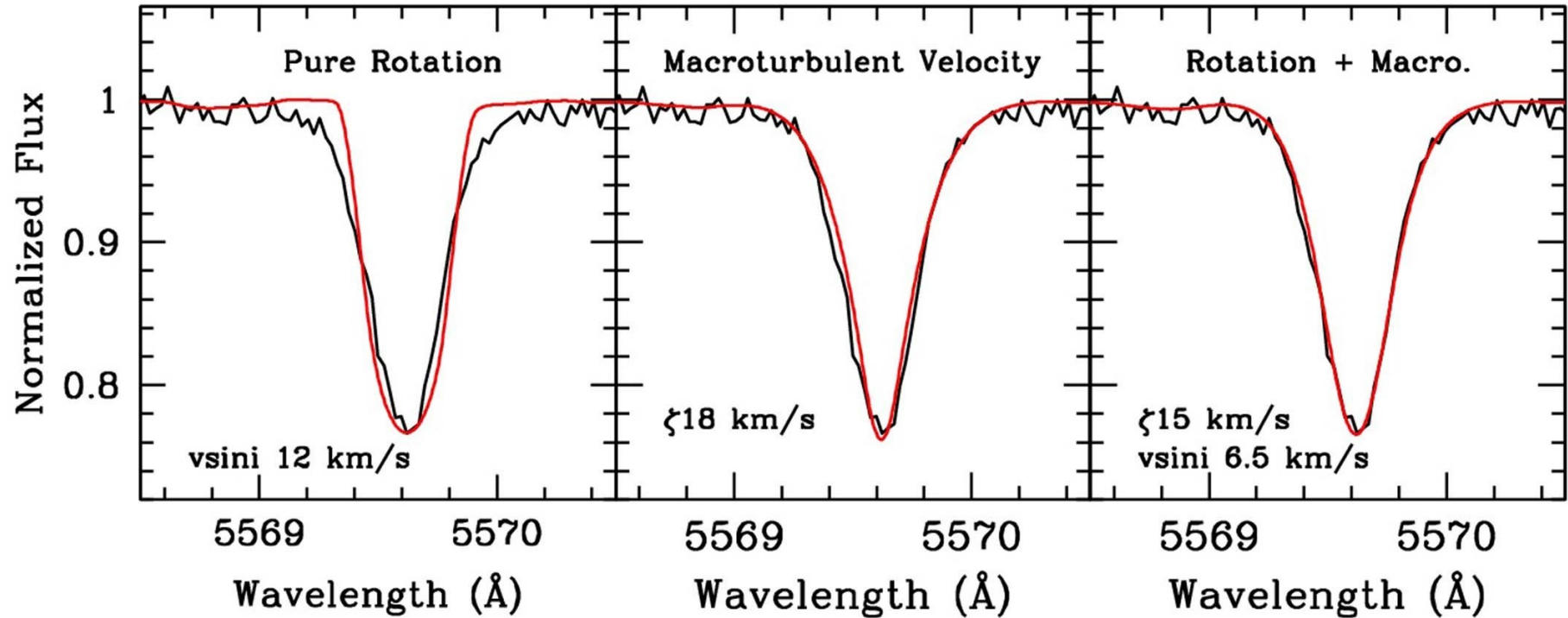


Limity detekcji planet pozasłonecznych metodami astrometryczną i prędkości radialnych (Lunine, 2010).

$$K_1 = \frac{28.4}{\sqrt{1-e^2}} \frac{m_2 \sin i}{M_{Jup}} \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{Sun}} \right)^{-2/3} \left(\frac{P}{1 y} \right)^{-1/3} \quad [ms^{-1}]$$

Pomiar prędkości radialnej

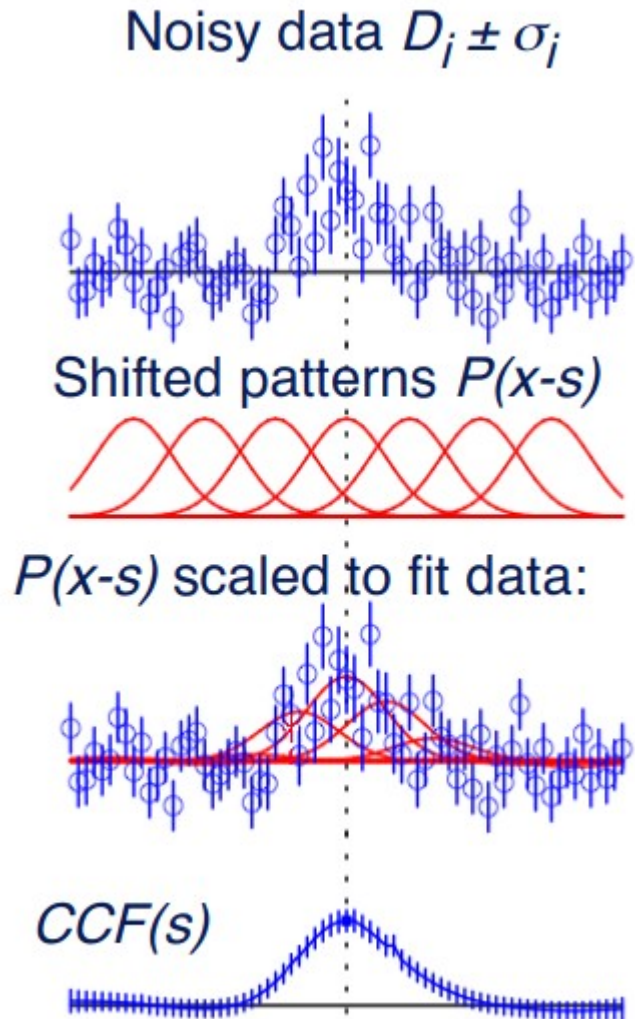
Dopasowanie profilu linii widmowej



Przykład dopasowania profilu linii widmowej do obserwacji (authors.library.caltech.edu).

Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa



$$CCF(s) = \frac{\sum_i P(x_i - s) D_i / \sigma_i^2}{\sum_i P^2(x_i - s) / \sigma_i^2}$$

Matematycznie korelacja krzyżowa jest bardzo bliska funkcji splotu.

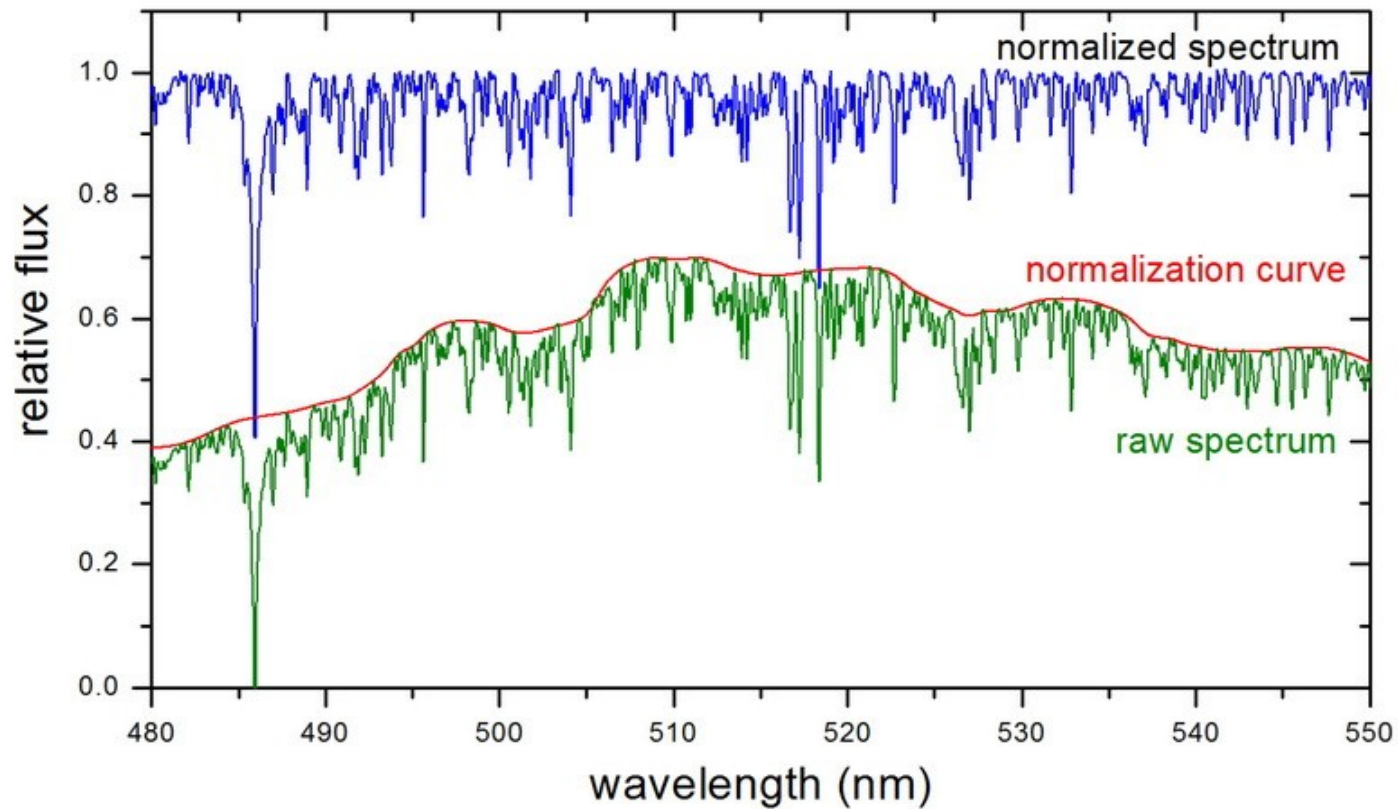
Ogólna ilustracja metody korelacji krzyżowej
(<http://star-www.st-and.ac.uk>).

Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa - przygotowania

Widmo gwiazdy:

- normalizacja
- selekcja zakresów



Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa - przygotowania

Widmo odniesienia:

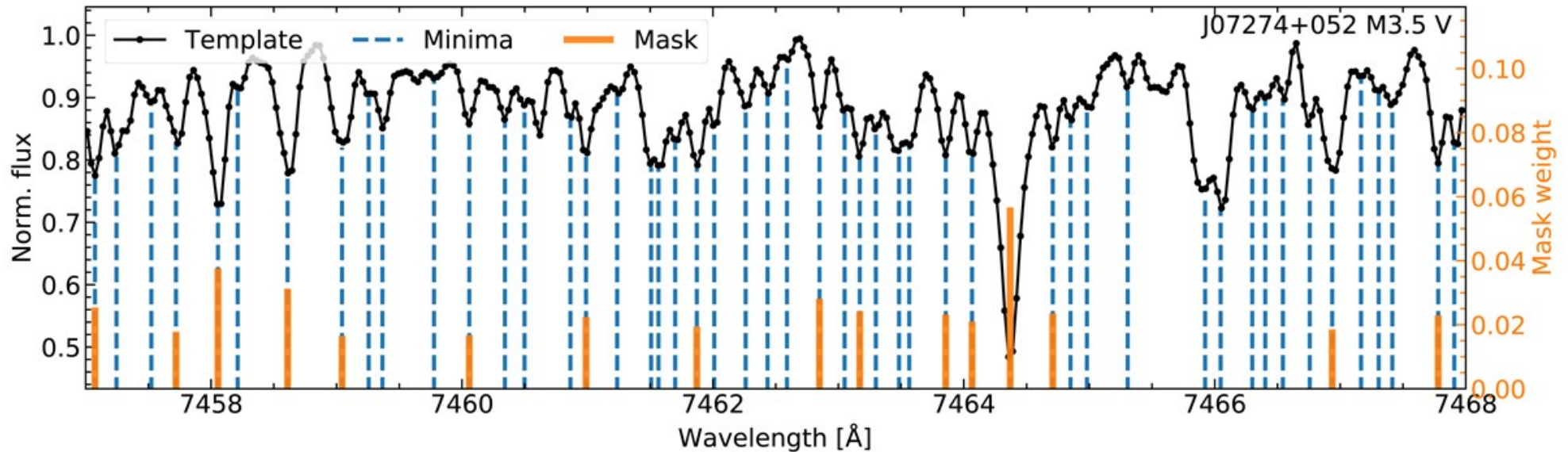
- znormalizowane widmo gwiazdy uznanej za standard (dokładność ~ 0.1 km/s)
- znormalizowane widmo symulowane (syntetyczne)
- maska

Katalog APOGEE (2018):

18080 gwiazd o medianie stabilności (3σ) ~ 240 m/s w ciągu >200 dni.

Katalog dla GAIA (2013):

1420 gwiazd o medianie stabilności 300 m/s w ciągu kilku lat.



Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa - przygotowania

Obydwa widma:

- resampling (przepróbkowanie) do współrzędnych w których przesunięcie nie zmienia rozkładu natężenia światła

piksel:

x=0

x=1

x=2

x=3

x=4

długość fali λ :

4000Å

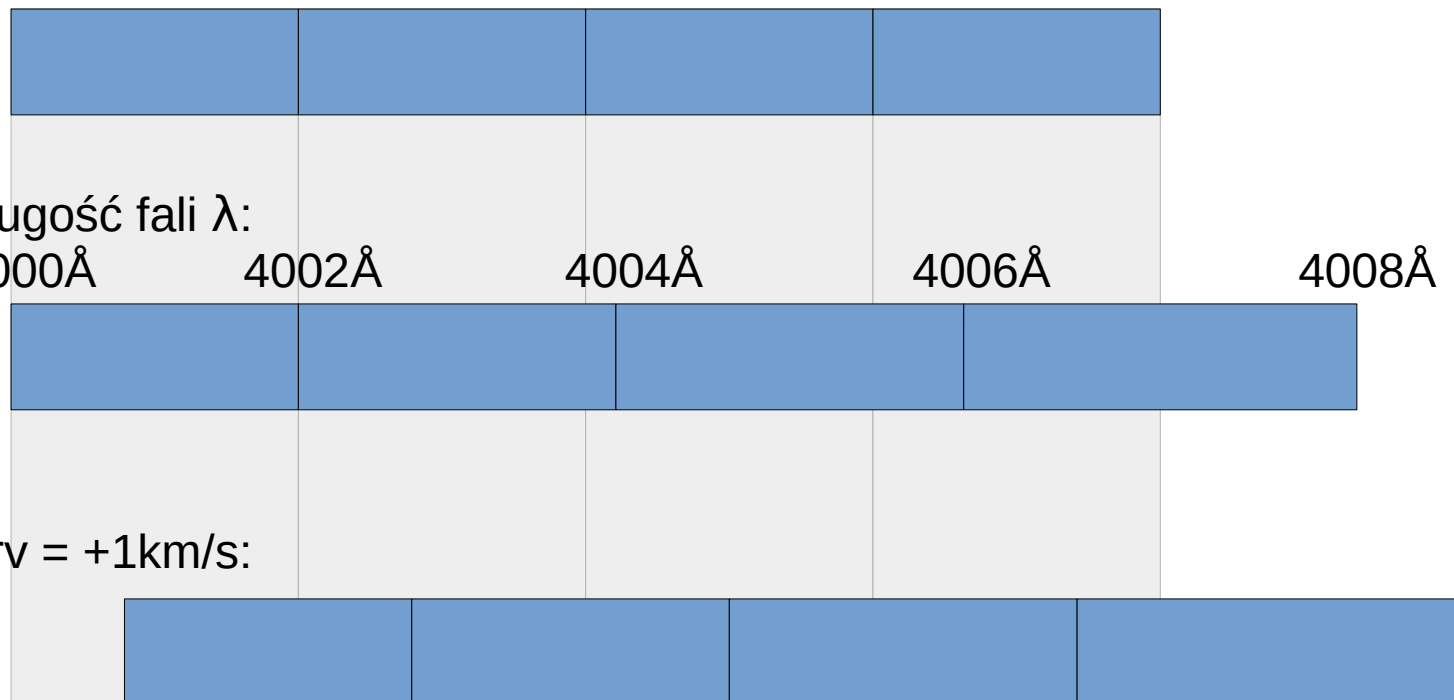
4002Å

4004Å

4006Å

4008Å

$\Delta v = +1\text{km/s}$:



Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa

Interpretacja profilu CCF

RV - prędkość radialna szczytu (peak) funkcji dopasowanej do profilu korelacji.

Kontrast – wysokość (lub głębokość) profilu korelacji znormalizowanego widma gwiazdy.

Powierzchnia – powierzchnia profilu korelacji znormalizowanego widma gwiazdy.

FWHM – szerokość połówkowa profilu korelacji znormalizowanego widma gwiazdy.

BIS – wskaźnik oparty o bisektor profilu korelacji znormalizowanego widma gwiazdy.

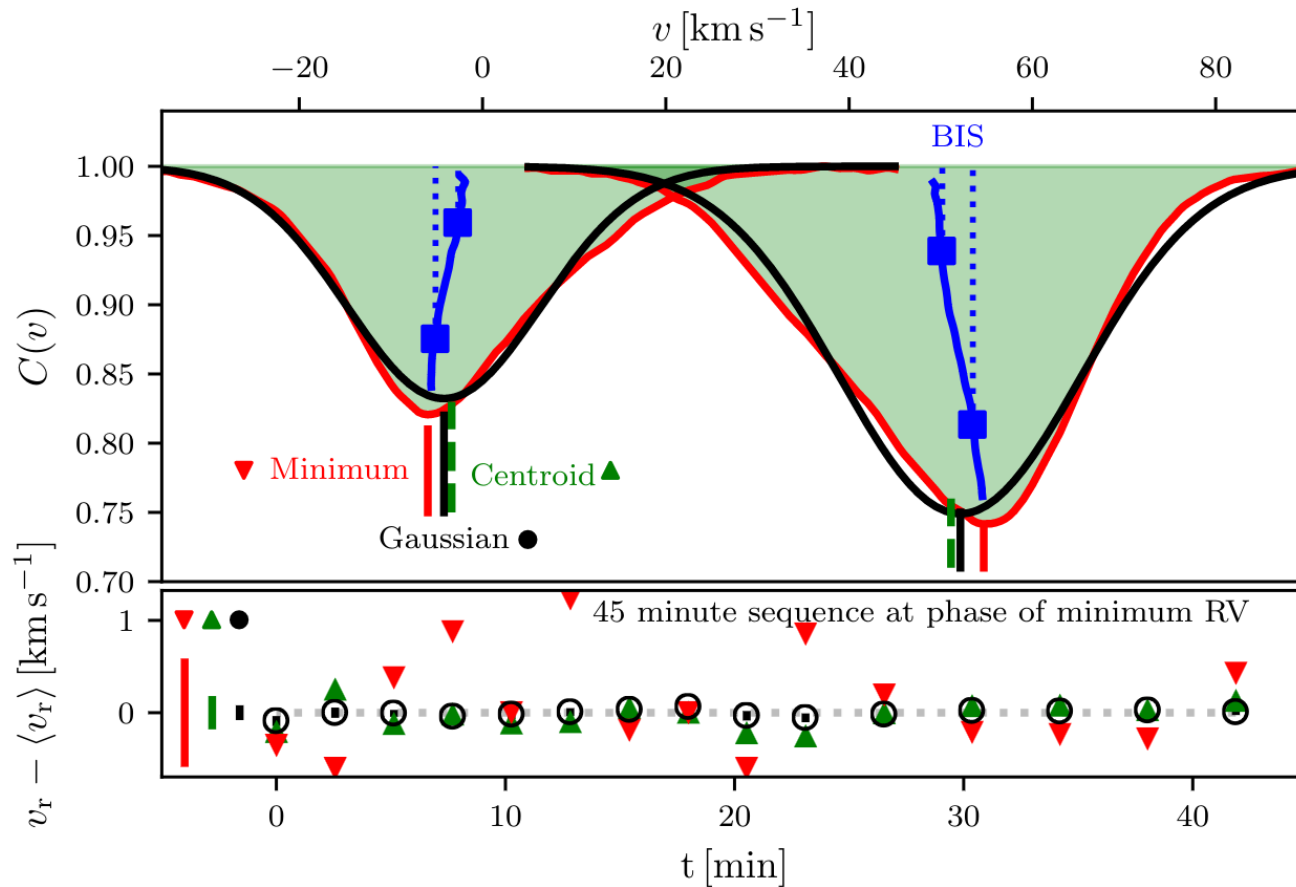
S-index – wskaźnik aktywności chromosferycznej gwiazdy.

Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa

Interpretacja profilu CCF

Trzy sposoby wyznaczenia prędkości radialnej:
minimum funkcji korelacji, minimum dopasowanej funkcji, centroid.

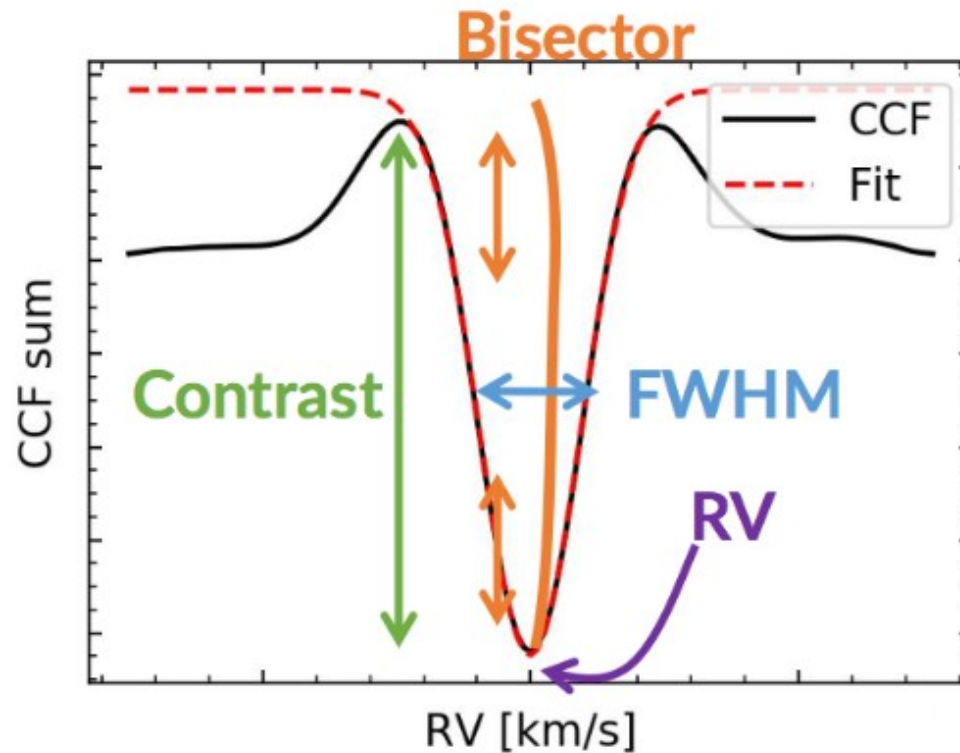


CCF dla cefeidy RZ Vel w okolicy minimum i maksimum prędkości radialnej.

Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa

Interpretacja profilu CCF

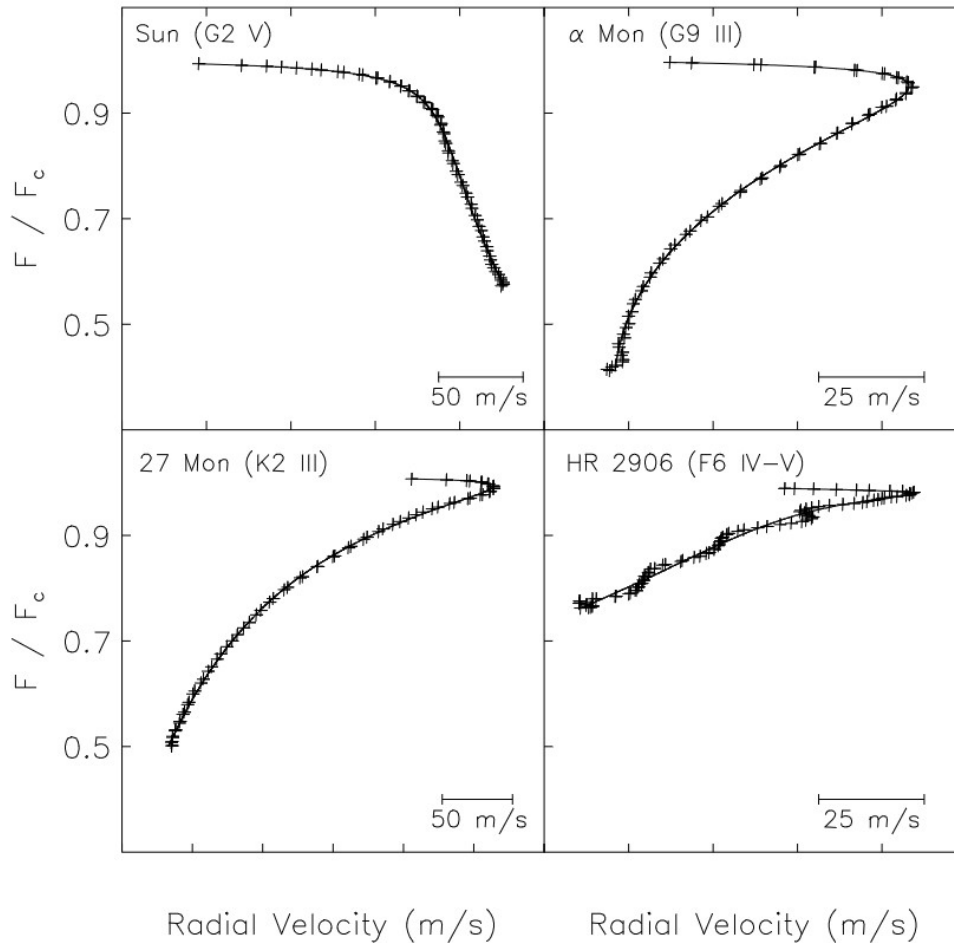


BIS (bisector inverse span) to różnica średniej prędkości radialnej w dwóch fragmentach bisektora funkcji korelacji.

Pomiar prędkości radialnej

Korelacja krzyżowa

Interpretacja profilu CCF



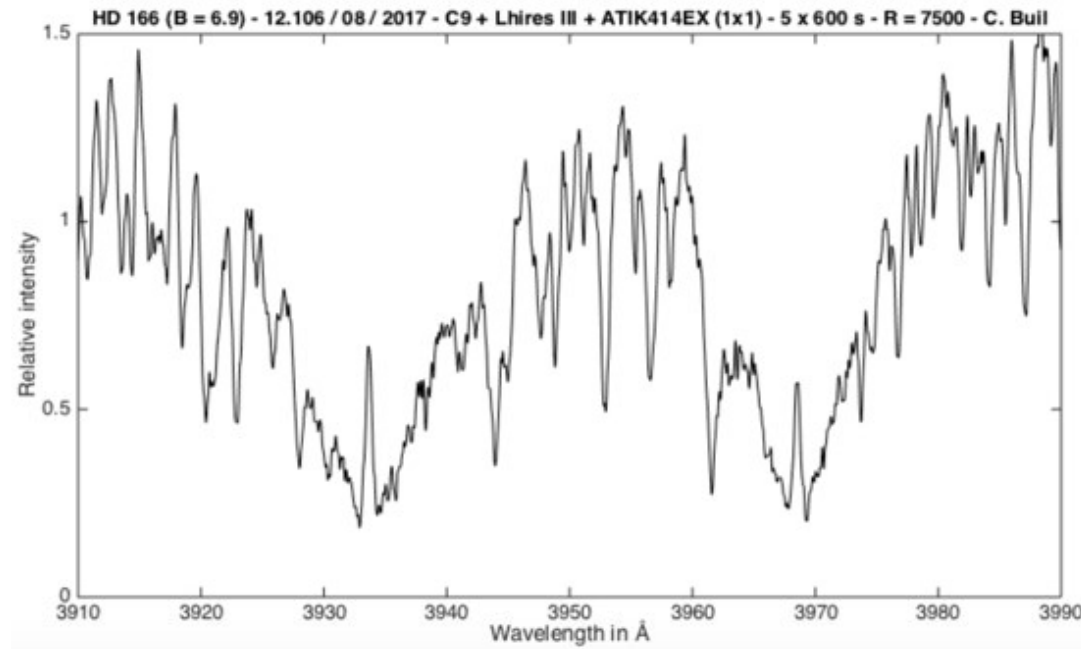
Przykładowe bisektory na podstawie obserwacji na spektrografie HARPS wraz z dopasowaną funkcją NIST-Hahn (Hahn 1979)

$$f_{\text{NIST-Hahn}}(x) = \frac{a + bx + cx^2 + dx^3}{1 + fx + gx^2 + hx^3}$$

Pomiar prędkości radialnej

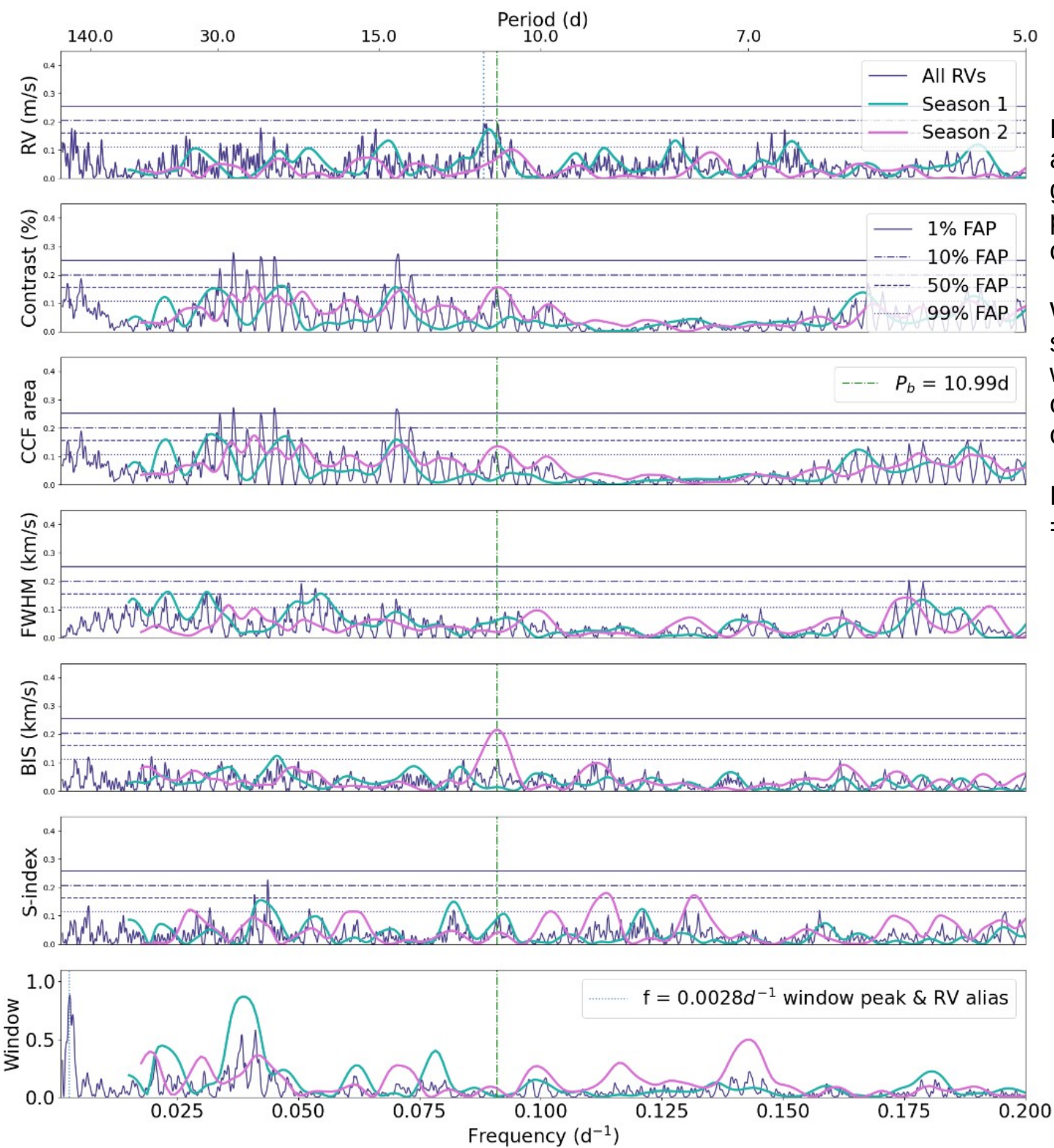
Korelacja krzyżowa

Interpretacja profilu CCF



$$S-index = \frac{H+K}{B+V}$$

H i K to natężenie w centralnych częściach linii CaII H i K (o szerokości 1.09Å)
B i V to natężenie w „kontinuum”, obszarach o szerokości 20Å
wycentrowanych na długości 3900Å i 4000Å (Wilson 1968).



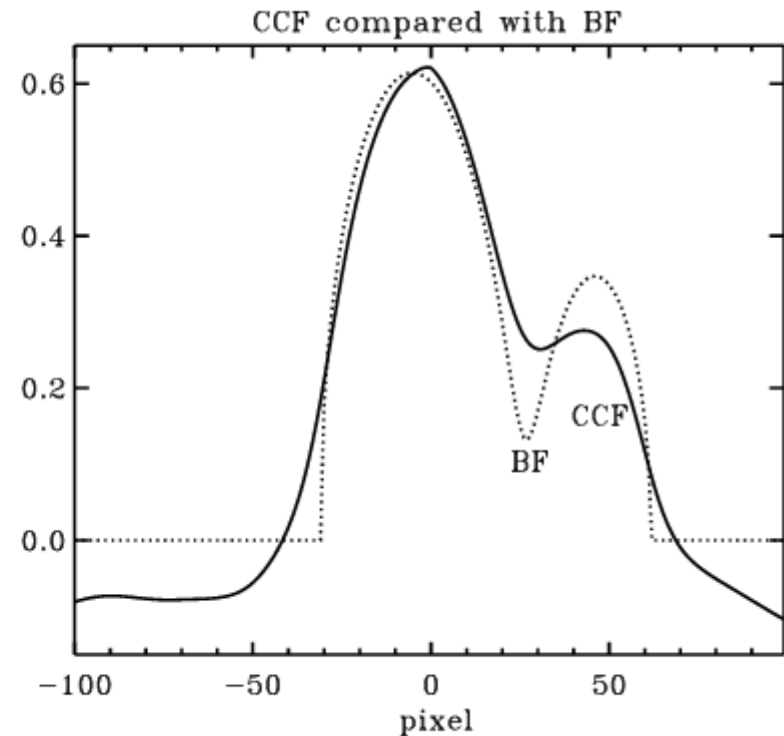
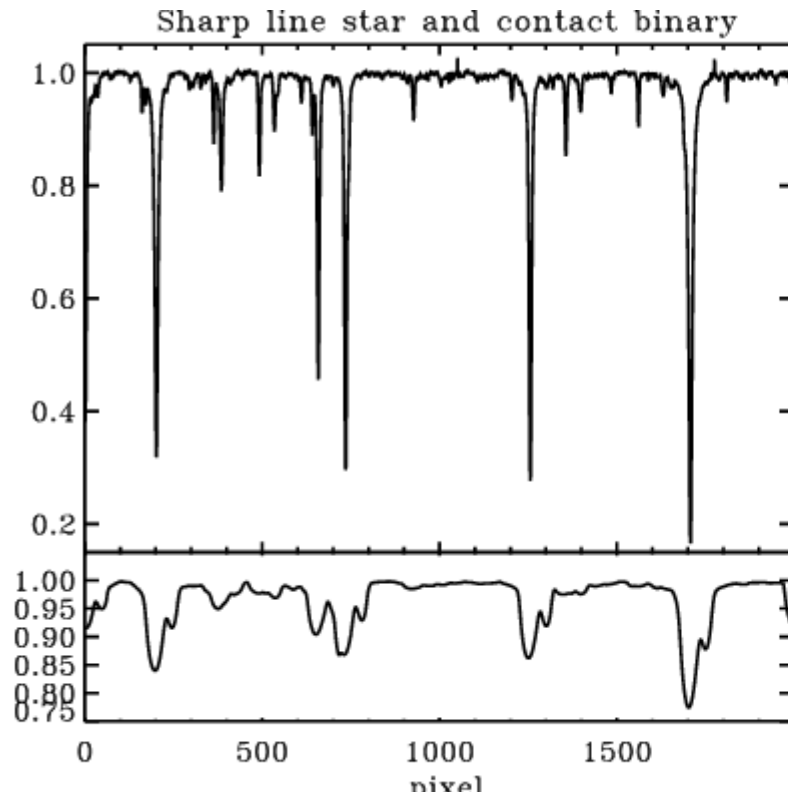
Przykład analizy wskaźników aktywności chromosferycznej gwiazdy K2-79 posiadającej planetę pozasłoneczną o okresie 10.99d (Kepler K2).

W sezonie 2 obserwowano słabe ale nie zaniedbywalne wskaźniki aktywności o okresie zbliżonym do okresu orbitalnego planety (Nava i in. 2021).

FAP – false alarm probability = poziom istotności

Pomiar prędkości radialnej

Broadening function



Porównanie działania metody BF i CCF (Ruciński, 1998)

Matematycznie metoda funkcji poszerzenia jest odwrotnością funkcji splotu, czyli jest funkcją rozplotu (dekonwolucji).

Pomiar prędkości radialnej

Least Square Deconvolution – LSD

Zbliżonym do BF wariantem analizy widma jest metoda LSD – rozplot metodą najmniejszych kwadratów.

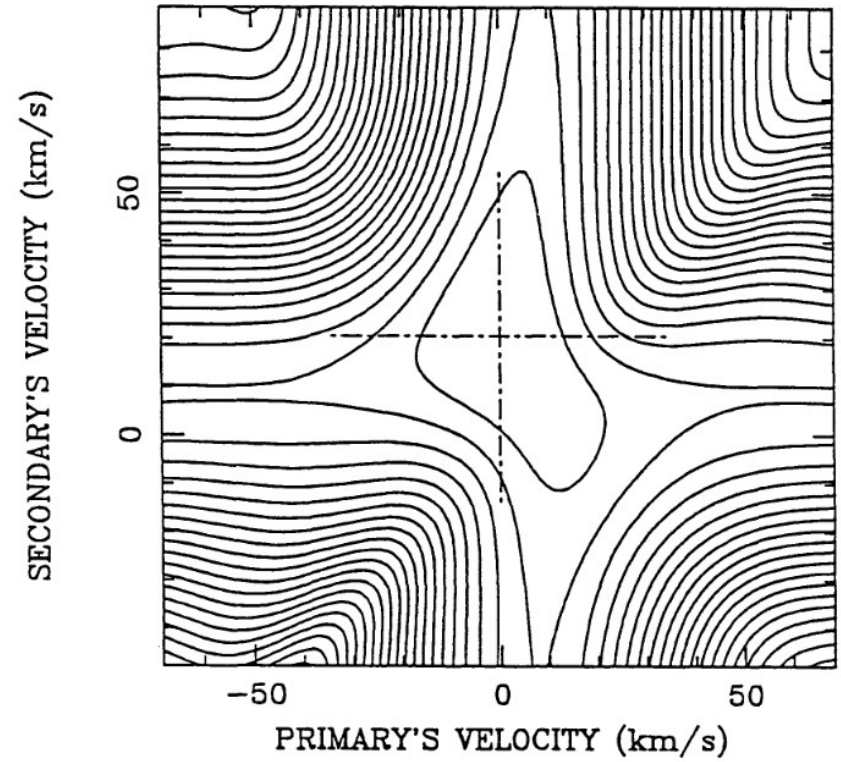
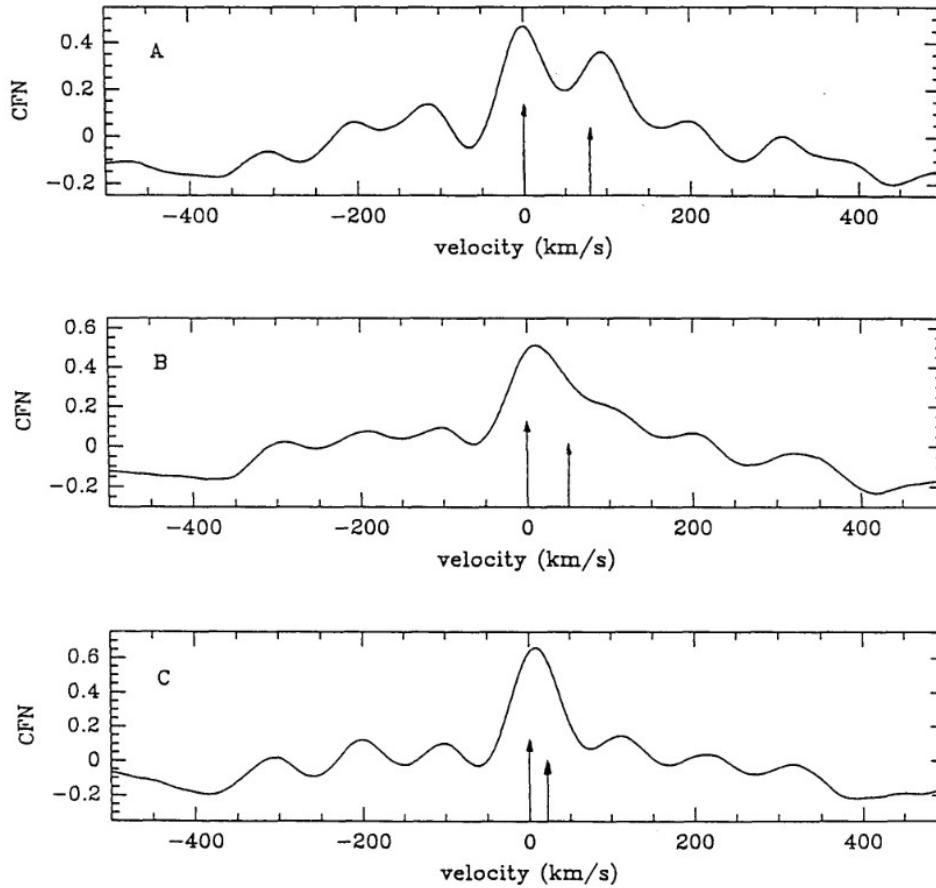
W przeciwieństwie do BF metoda LSD używa delt Diraka jako „widma” odniesienia, a nie realnych lub symulowanych widm gwiazd odniesienia.

Wyznaczany jest uśredniony profil widma, który jest poprawny przy założeniach:

- wszystkie badane linie mają ten sam profil;
- liniowe sumowanie zlanych linii widmowych (co jest w pełni spełnione tylko dla słabych linii);

Pomiar prędkości radialnej

Todcor



Porównanie korelacji jedno i dwuwymiarowej (Zucker i Mazeh, 1993).

Pomiar prędkości radialnej

Pozycja na ramce CCD a długość fali

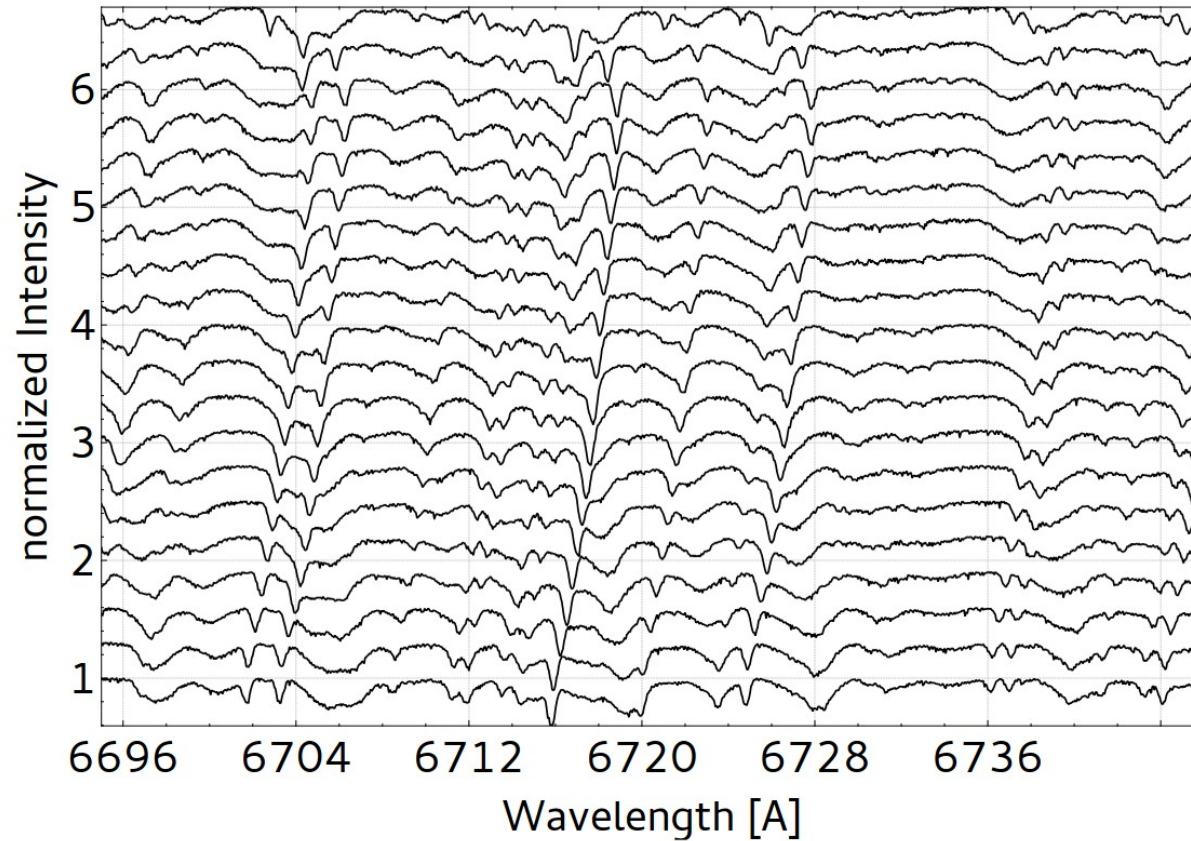
Przesunięcie linii widmowych w spektrografie dla długości fali światła 5000 Å, zakładając optymalne próbkowanie (2 piksele na $\Delta\lambda$).

R	rozmiar piksela [Å]	przesunięcie o 1 km/s [piksele]	przesunięcie o 1 m/s [piksele]
1000	2.5	0.0067	$7 \cdot 10^{-6}$
10000	0.25	0.067	$7 \cdot 10^{-5}$
100000	0.025	0.67	$7 \cdot 10^{-4}$

Porównanie przesunięcia widma w kamerze spektrografu.

Pomiar prędkości radialnej

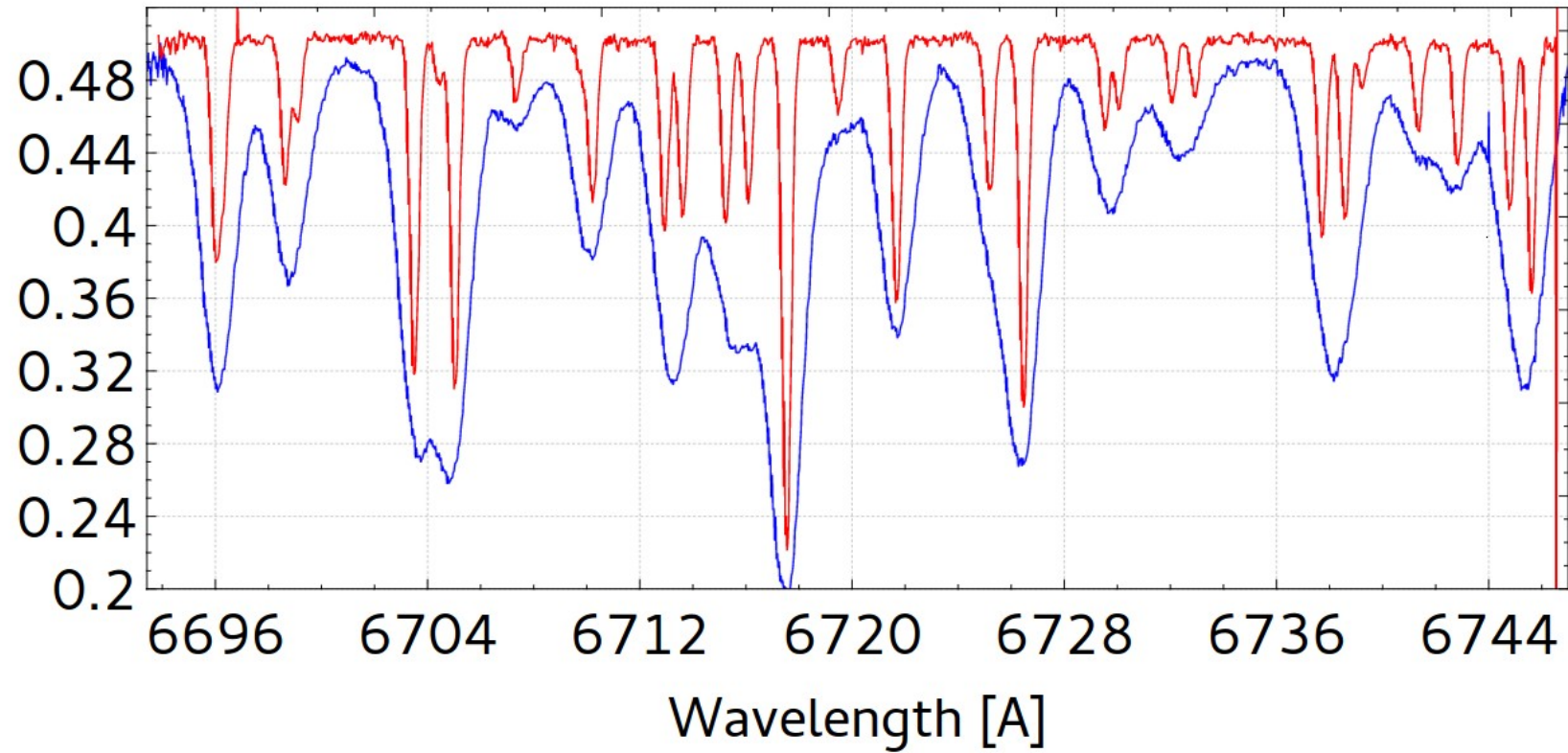
Rozplątywanie widm (spectral disentangling)



Zestaw symulowanych widm układu podwójnego.

Pomiar prędkości radialnej

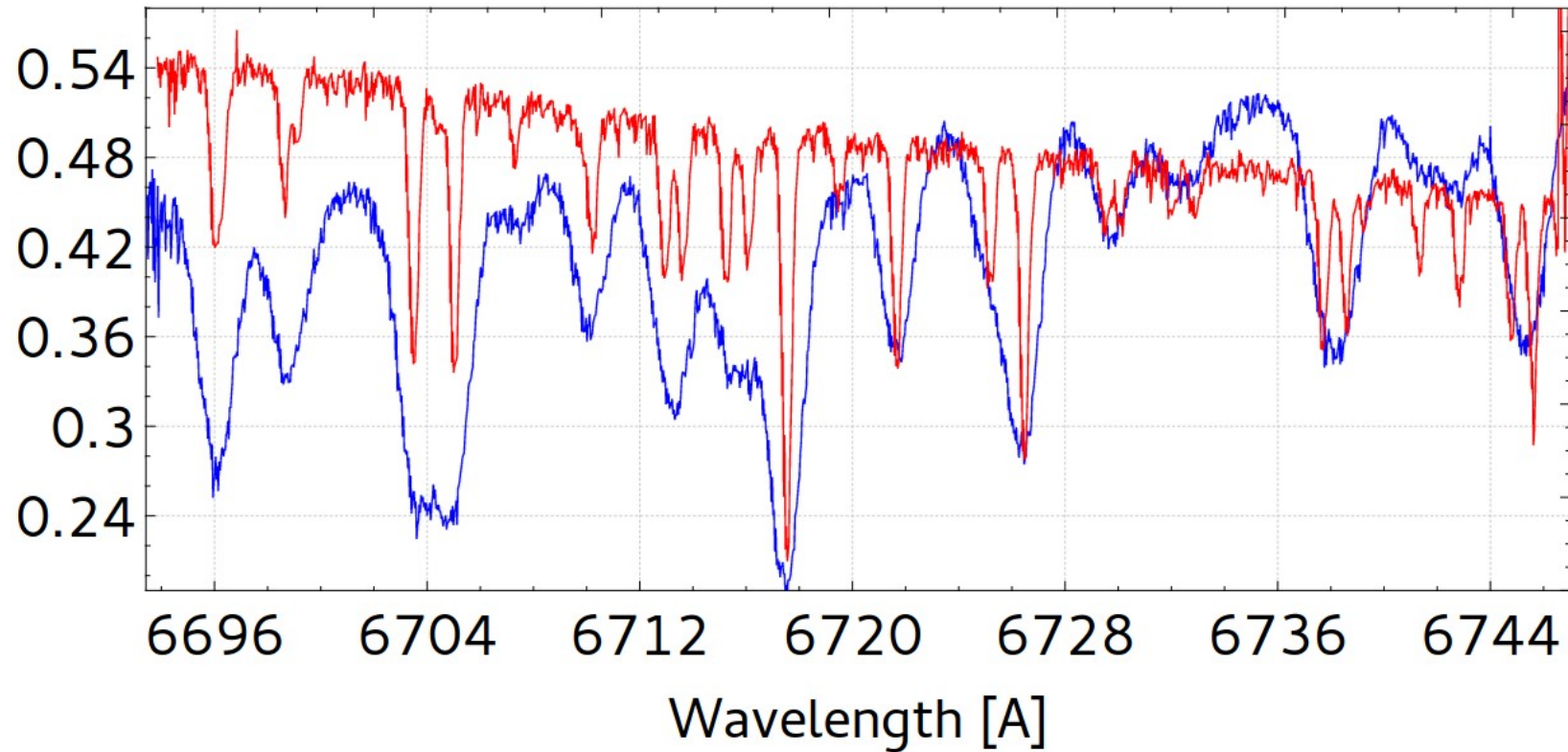
Rozplątywanie widm (spectral disentangling)



Rozplątane widma składników układu podwójnego przy SNR=100.

Pomiar prędkości radialnej

Rozplątywanie widm (spectral disentangling)



Rozplątane widma składników układu podwójnego przy SNR=10.

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Co jest ostatecznym (nieprzekraczalnym) limitem dokładności pomiaru prędkości radialnych?

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

Jeśli:

- rejestracja każdego fotonu jest niezależna od innych,
- średni strumień fotonów, czyli średni odstęp czasu pomiędzy kolejnymi rejestracjami jest stały,
- dwa fotony nie mogą być zarejestrowane w tym samym momencie czasu,

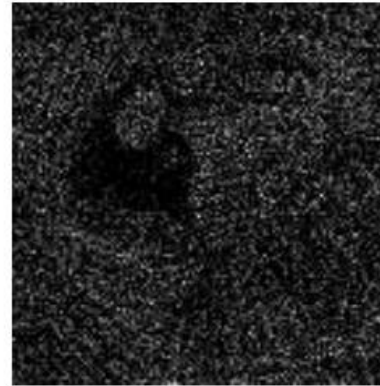
wówczas suma zarejestrowanych fotonów jest opisywana rozkładem Poissona:

$$P(n_{ph} \text{ w czasie } t) = e^{-N} \frac{N^{n_{ph}}}{n_{ph}!}$$

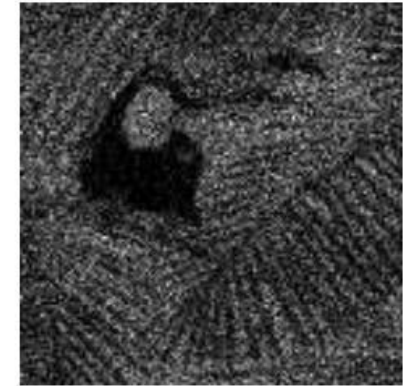
P – prawdopodobieństwo

N – średnia liczba fotonów
spodziewana w czasie t

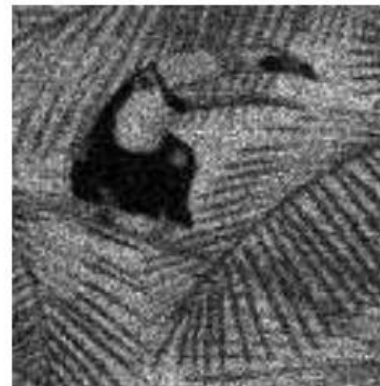
n_{ph} – zmienna (liczba fotonów w czasie t)



1 Photons/Pixel



4 Photons/Pixel



16 Photons/Pixel

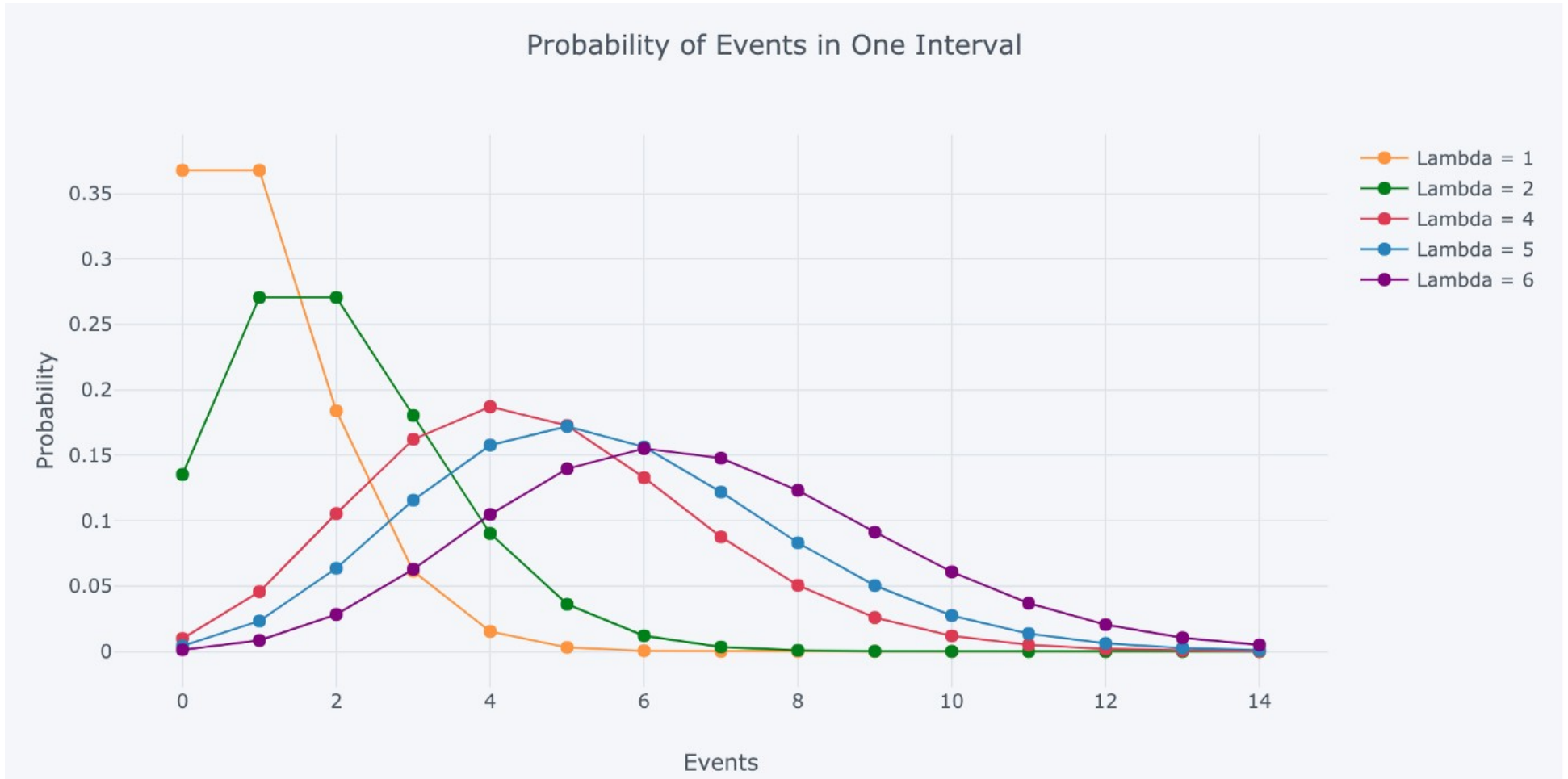


64 Photons/Pixel

Przykład szumu fotonowego (Erez Posner, 2019)

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy



Rozkład Poissona. $\lambda = N =$ spodziewana liczba zjawisk losowych (Will Koehrsen, 2019).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

Jedną z własności rozkładu Poissona jest to, że wartość oczekiwana liczby fotonów $E(n_{\text{ph}}) = N$ jest równa wariancji liczby fotonów $\text{Var}(n_{\text{ph}}) = N$

Odchylenie standardowe $\sigma = \text{RMS} = \text{pierwiastek wariancji} = \sqrt{N}$

Stosunek sygnału do szumu dla fotonów rejestrowanych przez kamerę, pomijając wszelkie inne szумы lub błędy systematyczne, wynosi więc:

$$SNR = \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}$$

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

Zależność między zmianą długości fali a zmianą prędkości radialnych jest znana i prosta:

$$\delta V = c \frac{\delta \lambda}{\lambda}$$

Problem polega na tym, że λ nie mierzymy bezpośrednio.

Pierwotnym pomiarem w spektrografie jest pomiar natężenia światła $A(i)$ w pikselach o indeksie i .

Zakładając niewielkie przesunięcie widma (o długość fali $\delta \lambda(i)$), zmiana natężenia światła względem idealnego widma odniesienia A_0 w i -tym pikselu wynosi:

$$A(i) - A_0(i) = \frac{\partial A_0(i)}{\partial \lambda(i)} \delta \lambda(i) \qquad A(i) - A_0(i) = \frac{\partial A_0(i)}{\partial \lambda(i)} \delta V(i) \frac{\lambda(i)}{c}$$

A więc zmiana prędkości radialnej $\delta V(i)$ wiąże się ze zmianą natężenia w pojedynczym pikselu następująco:

$$\delta V(i) = \frac{c}{\lambda(i)} \frac{A(i) - A_0(i)}{\partial A_0(i) / \partial \lambda(i)}$$

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

Nas jednak nie interesuje sama zmiana prędkości radialnej $\delta V(i)$, tylko dokładność (niepewność) jej wyznaczenia.

Jest ona określona przez rozrzut wyznaczeń $\delta V(i)$ w poszczególnych pikselach widma:

$$\delta V_{RMS}(i) = \frac{c}{\lambda(i)} \frac{A_{RMS}(i) - A_0(i)}{\partial A_0(i) / \partial \lambda(i)}$$

Powyższe równanie ma sens, gdyż wszystkie wielkości poza $A(i)$ uznajemy za perfekcyjnie wyznaczone (tzn. zakładamy, że tylko szum fotonowy dokłada się do niepewności, pomijamy np. błędy wyznaczenia skali długości fali światła $\lambda(i)$).

Z rozkładu Poissona wiemy, że:

$$A_{RMS}(i) = \sqrt{A(i)}$$

A ponieważ zakładamy małe przesunięcie w widmie:

$$A_{RMS}(i) = \sqrt{A_0(i)}$$

Co usuwając wszystkie stałe addytywne (i zostawiając jedynie czynniki skalujące) daje:

$$\delta V_{RMS}(i) = \frac{c}{\lambda(i)} \frac{\sqrt{A_0(i)}}{\partial A_0(i) / \partial \lambda(i)}$$

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

Zmiana prędkości radialnej δV w całym widmie jest średnią ważoną zmian $\delta V(i)$ we wszystkich pikselach w widmie:

$$\delta V = \frac{\sum_i \delta V(i) W(i)}{\sum_i W(i)}$$

gdzie waga $W(i)$ jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu dyspersji (niepewności) pomiaru zmiany prędkości w danym pikselu:

$$W(i) = \frac{1}{(\delta V_{RMS}(i))^2}$$

Niepewność (sigma, odchylenie standardowe) średniej ważonej dana jest wzorem:

$$\delta V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i W(i)}}$$

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

Łącząc niepewność średniej ważonej z niepewnością dla pojedynczych pikseli:

$$\delta V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i W(i)}} \quad \delta V_{RMS}(i) = \frac{c}{\lambda(i)} \frac{\sqrt{A_0(i)}}{\partial A_0(i)/\partial \lambda(i)}$$

Dostajemy wzór:

$$\delta V_{RMS} = \frac{c}{\sqrt{\sum_i \frac{\lambda^2(i) (\partial A_0(i)/\partial \lambda(i))^2}{A_0(i)}}} = \frac{c}{\sqrt{\sum_i A_0(i) \frac{\lambda^2(i)}{\partial \lambda^2(i)} \frac{\partial A_0^2(i)}{A_0^2(i)}}}$$

Który można przekształcić do postaci:

$$\delta V_{RMS} = \frac{c}{Q \sqrt{\sum_i A_0(i)}} = \frac{c}{Q \sqrt{N_e}}$$

gdzie Q jest niezależne od natężenia światła i opisuje udatność widma do pomiarów v_r , a N_e to całkowita liczba foto-elektronów w widmie.

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

$$\delta V_{RMS} = \frac{c}{Q \sqrt{N_e}}$$

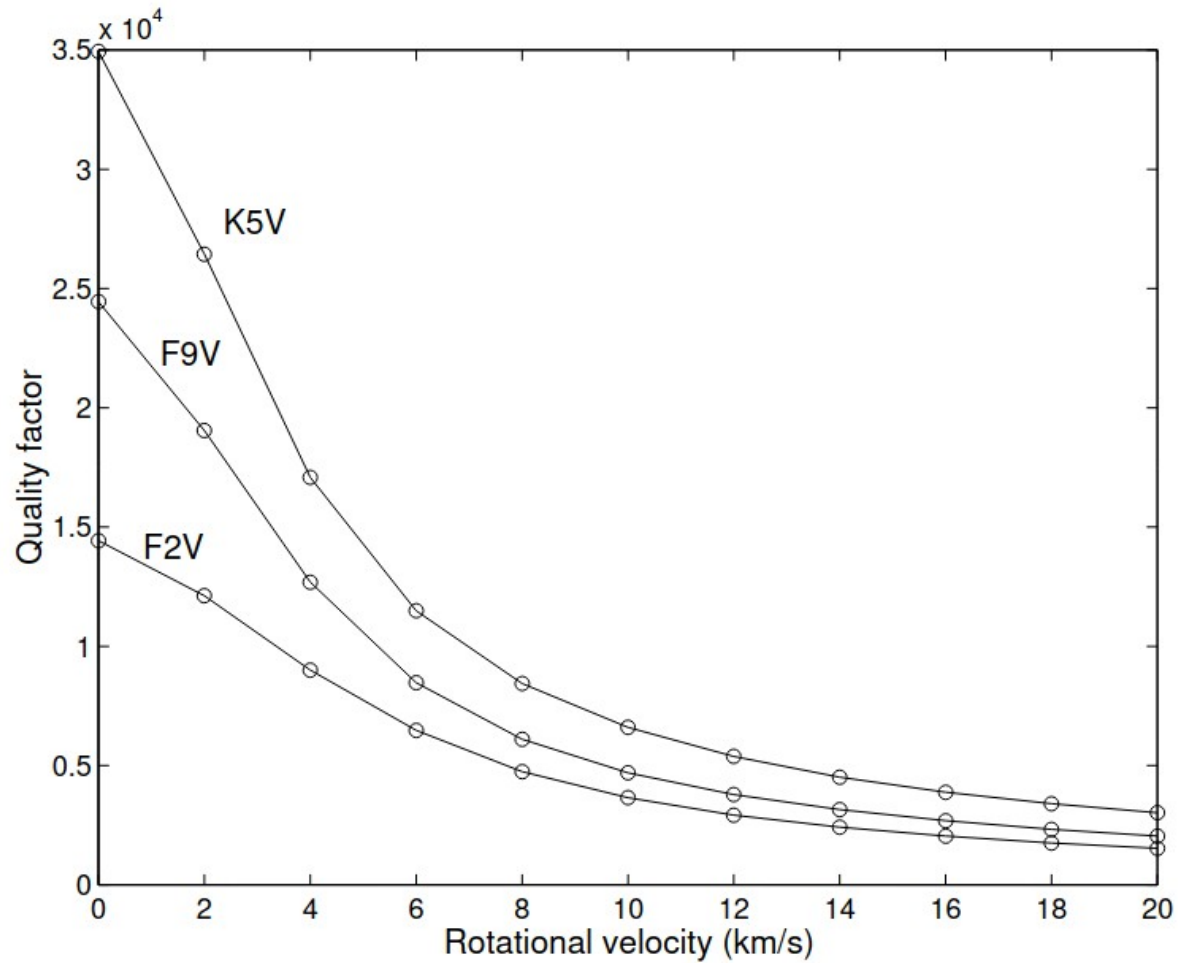
Za pomocą widm symulowanych można wyznaczyć Q , a znając parametry teleskopu, spektrografu, kamery i miejsca obserwacji można wyznaczyć N_e .

Spectral Type	T_{eff} (K)	$\log(g)$ (cm s^{-2})	V_{turb} (km s^{-1})	Quality Factor
K7V	4000	4.5	1.0	31 020
K5V	4500	4.5	1.0	34 940
K2V	5000	4.5	1.0	33 405
G8V	5500	4.5	1.0	30 375
F9V	6000	4.5	1.25	24 450
F5V	6500	4.5	1.5	19 250
F2V	7000	4.5	2.0	14 430

Parametr Q dla wybranych gwiazd (Bouchy i in., 2001).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

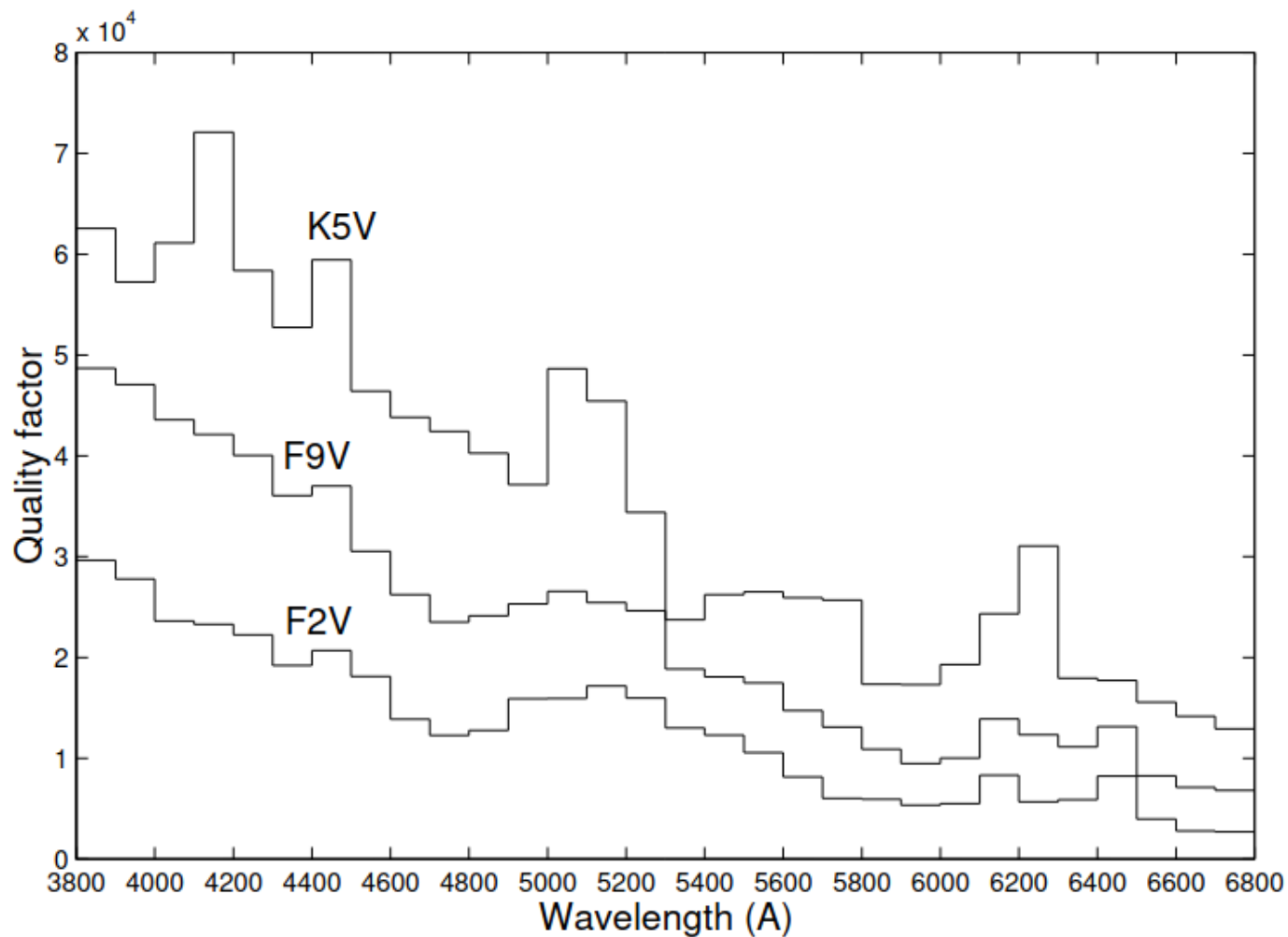
Szum fotonowy



Parametr Q dla wybranych prędkości rotacji gwiazd (Bouchy i in., 2001).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

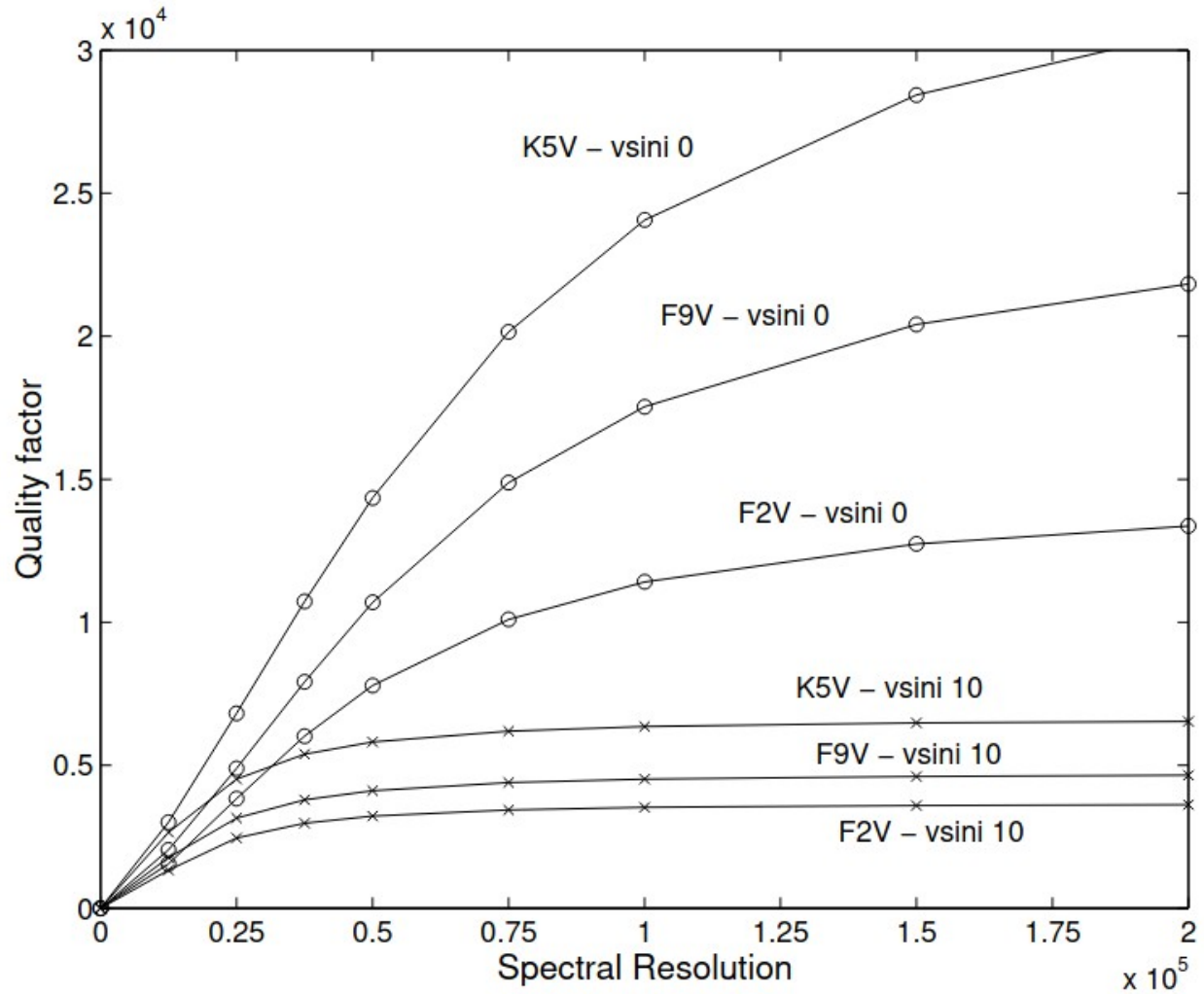
Szum fotonowy



Parametr Q dla wybranych gwiazd w zależności od zakresu widma (Bouchy i in., 2001).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

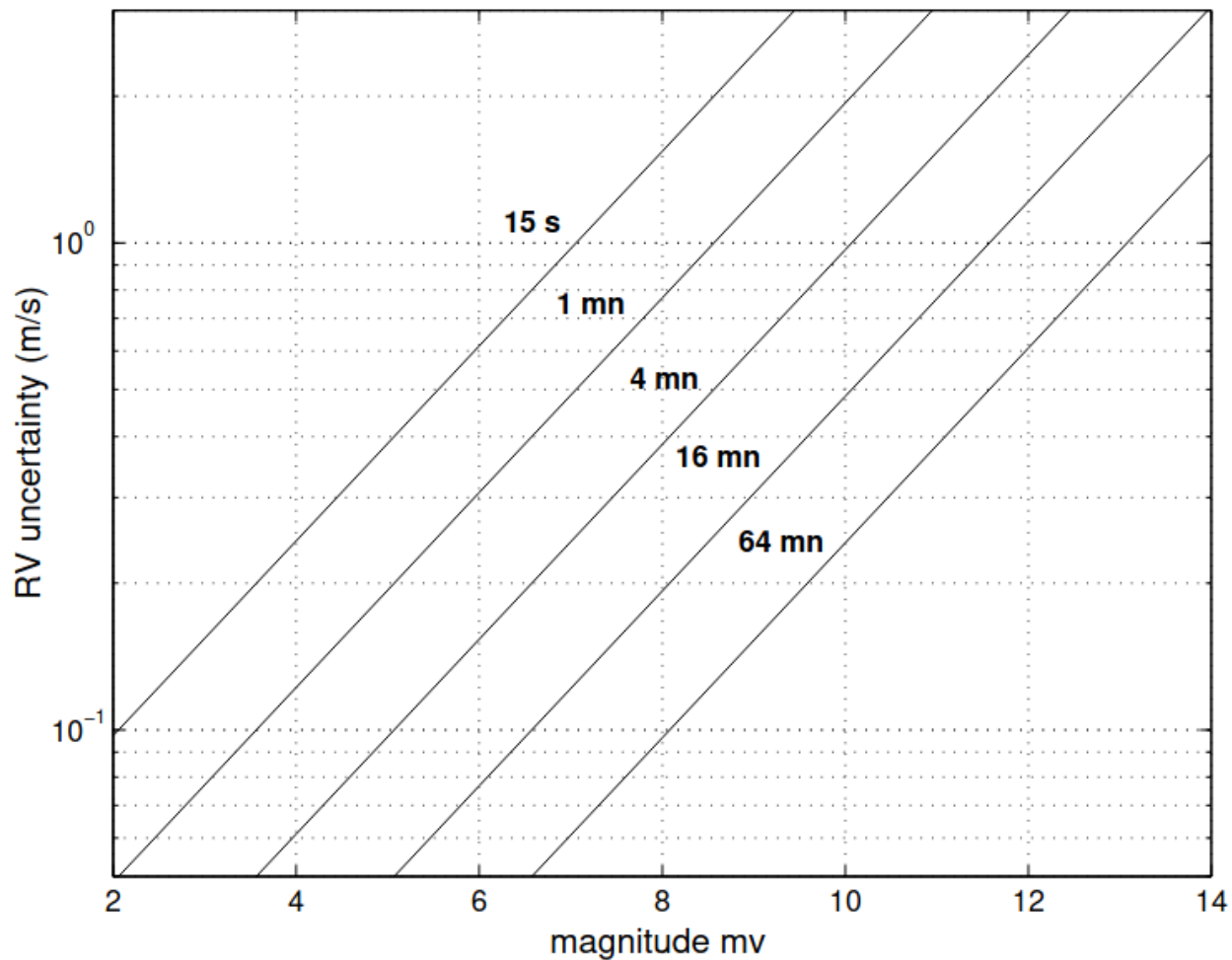
Szum fotonowy



Parametr Q dla wybranych gwiazd w zależności od mocy rozdzielczej spektrografu (Bouchy i in., 2001).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy



Limit fotonowy niepewności pomiaru prędkości radialnej dla spektrografu HARPS i gwiazdy o $T_{\text{eff}} = 4500$ K oraz $v \sin i = 0$ km s $^{-1}$ (Bouchy i in., 2001).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Szum fotonowy

Table 2
Grid of RV Precisions for Dwarf Stars at Visual and Infrared Wavelengths

	Wavelength Range (nm)									
	380	450	550	650	750	850	950	1150	1425	1980
T_{eff}	RV Photon Noise (m s^{-1})									
7000	33.08	52.75	115.48	138.96	148.73	100.72	110.38	94.35	117.58	168.04
6000	1.86	1.45	2.77	4.13	4.65	4.94	6.04	7.16	6.03	15.17
5000	1.37	0.88	1.52	2.31	2.75	3.16	3.27	4.74	3.64	6.53
4500	1.61	0.86	1.41	1.88	2.42	2.86	2.23	4.07	2.65	4.22
3700	5.55	0.93	0.87	0.52	1.04	2.30	2.21	3.55	1.85	1.85
3200	1.54	0.37	0.48	0.26	0.30	0.72	0.83	1.34	0.91	0.91
2800	0.52	0.20	0.61	0.17	0.13	0.21	0.20	0.31	0.26	0.26
2500	0.30	0.17	0.28	0.12	0.12	0.13	0.07	0.07	0.08	0.08

Note. Values are given for an S/N of 100 at $\lambda = 550$ nm (*V* band) and $R = 100,000$.

Limit fotonowy niepewności pomiaru prędkości radialnej dla fikcyjnego spektrografu dla różnych zakresów widma VISNIR (Reiners i Zechmeister, 2020).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Oświetlenie szczeliny spektrografu

Widmo jest obrazem szczeliny (spektrograf fotografuje szczelinę).
Jeśli szczelina nie jest równomiernie oświetlona wówczas całe widmo ulega przesunięciu o tyle pikseli ile wynosi rozmiar obrazu szczeliny.

R	rozmiar piksela [Å]	przesunięcie o 2 piksele [km/s]	przesunięcie o 0.01 piksela [km/s]
1000	2.5	298.5	1.5
10000	0.25	29.9	0.15
100000	0.025	3.0	0.015

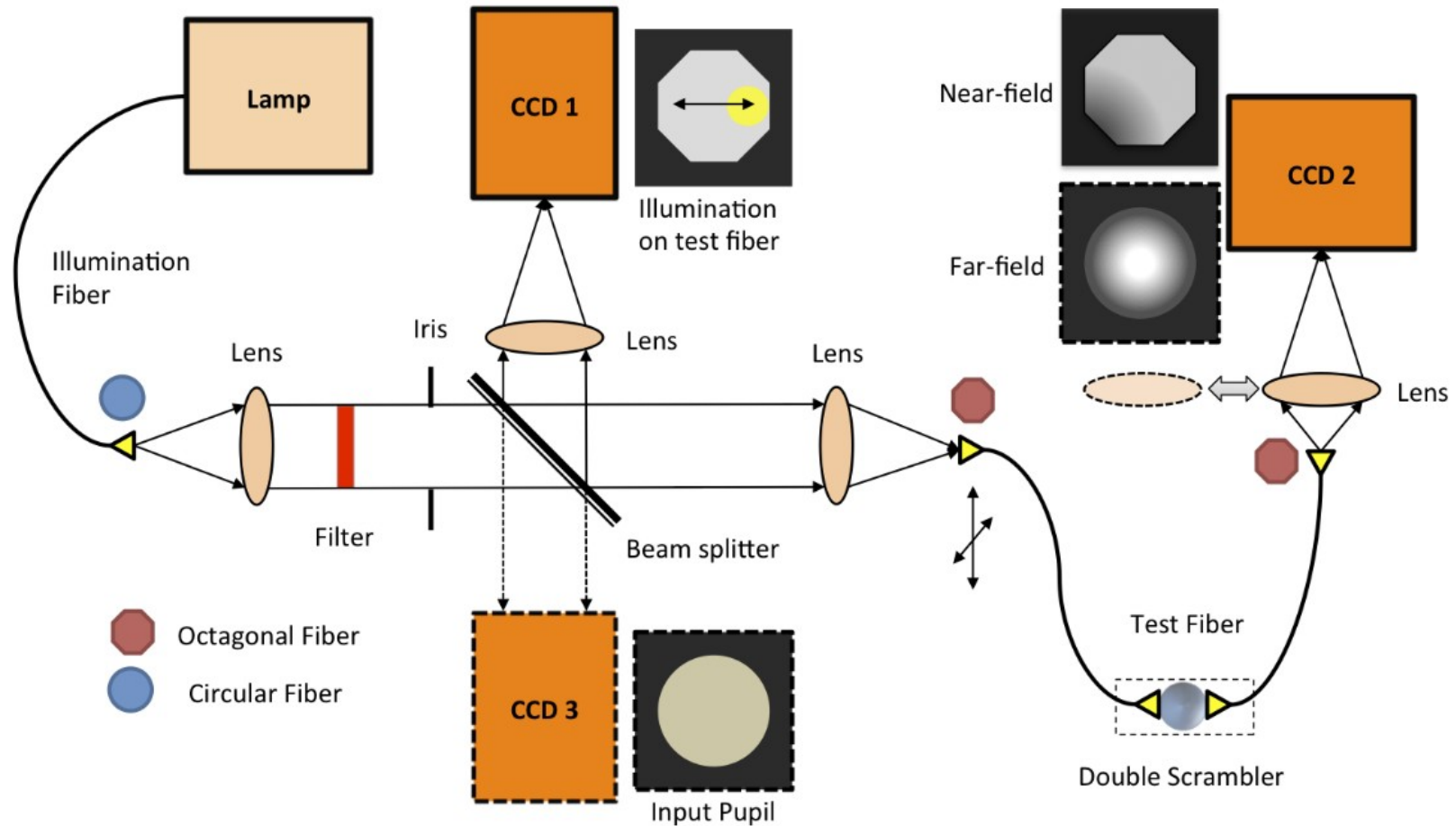
Porównanie przesunięcia widma w kamerze spektrografu.

Nierównomierne oświetlenie szczeliny wynika z:

- nierównomiernego rozkładu światła w obrazie gwiazdy
- zmiennego w czasie obrazu gwiazdy ze względu na seeing
- błędów śledzenia teleskopu powodujących przesuwanie się obrazu w szczelinie

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

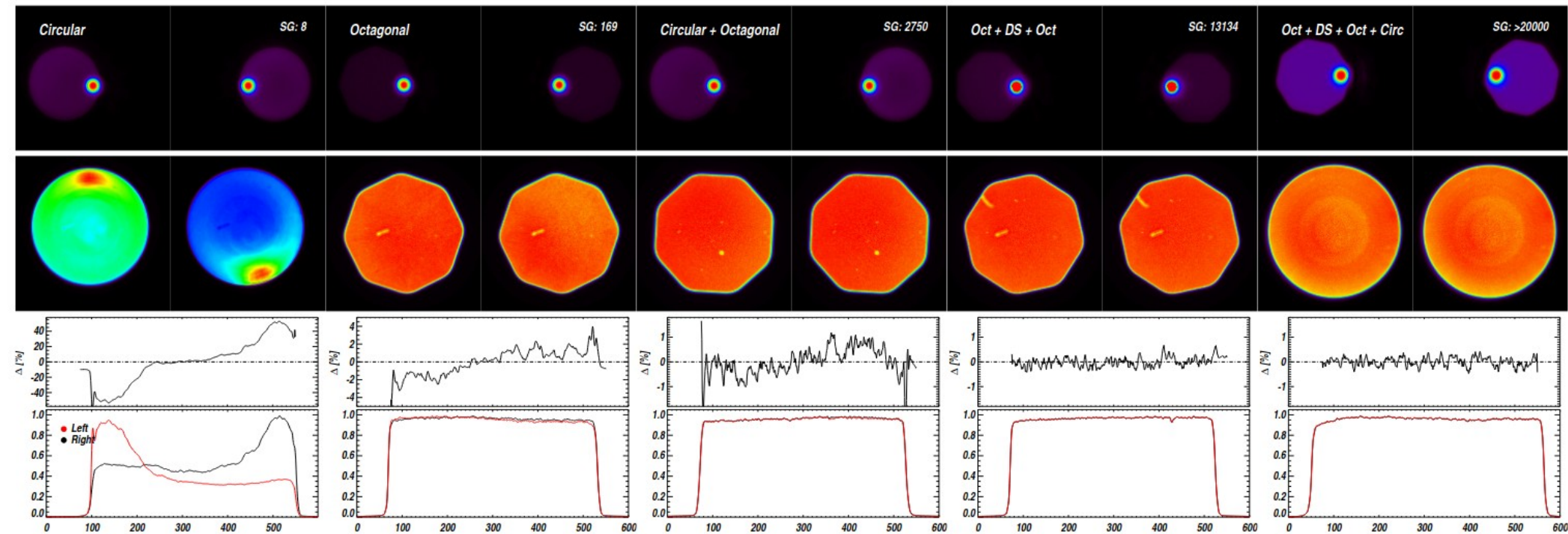
Oświetlenie szczeliny spektrografu



Schemat eksperymentu w którym mierzono równomierność oświetlenia światłowodu w różnych konfiguracjach (Halverson, 2015).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Oświetlenie szczeliny spektrografu



Zdjęcia końcówek światłowodów (na dole) oświetlonych z drugiej strony jedynie w niewielkim obszarze (na górze) (Halverson, 2015).

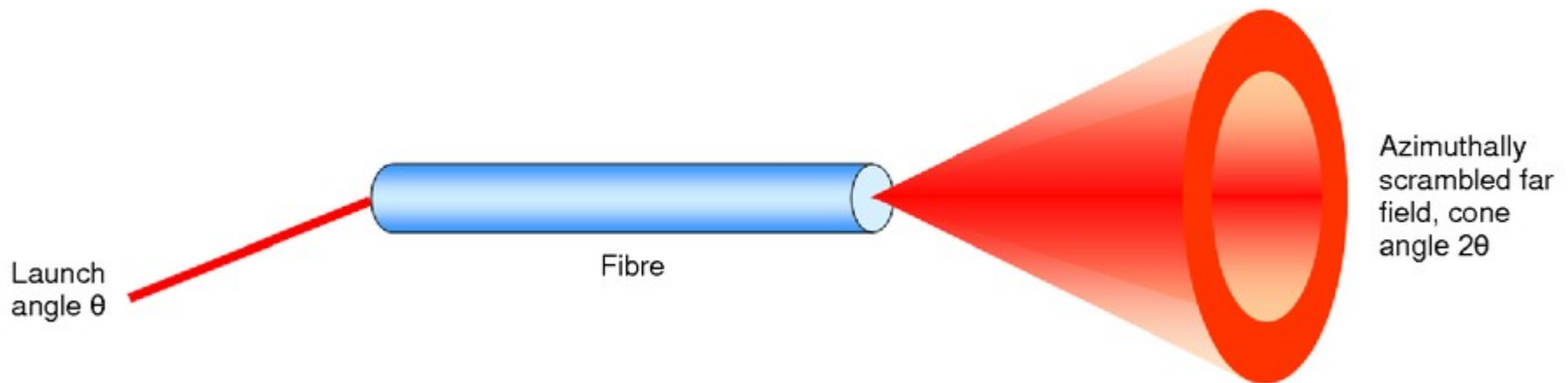
Fiber Configuration	Near-field	Far-field
Circular Fiber	8	21
Octagonal Fiber	169	370
Circular + Octagonal	2750	771
Octagonal + DS + Octagonal	13,134	10,176
Octagonal + DS + Octagonal + Circular	>20,000	>20,000

Zysk w mieszaniu światła w stosunku do klasycznej szczeliny (Halverson, 2015).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Mieszanie światła w światłowodzie

Okrągły światłowód całkiem dobrze miesza światło azymutalnie, ale słabo miesza w kierunku radialnym.



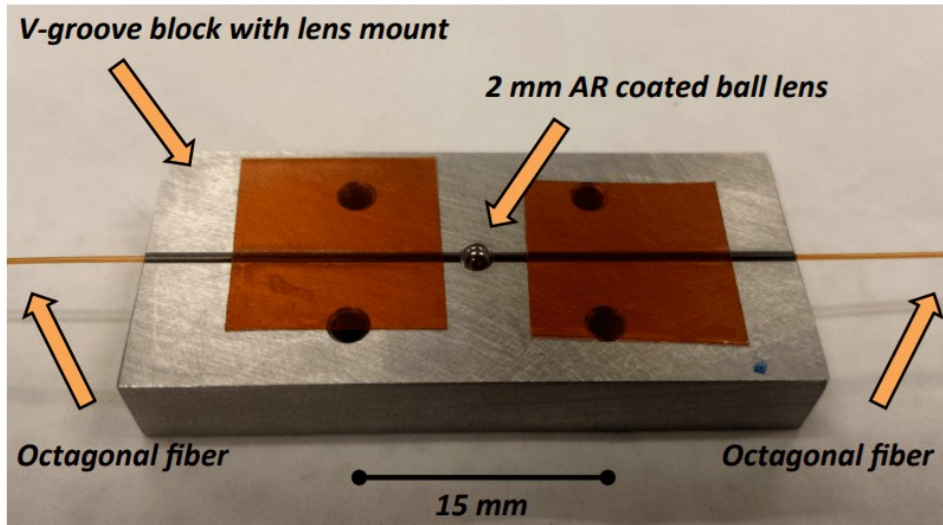
Mieszanie światła w światłowodzie podczas oświetlenia przez światłowód (Murray, 2017).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

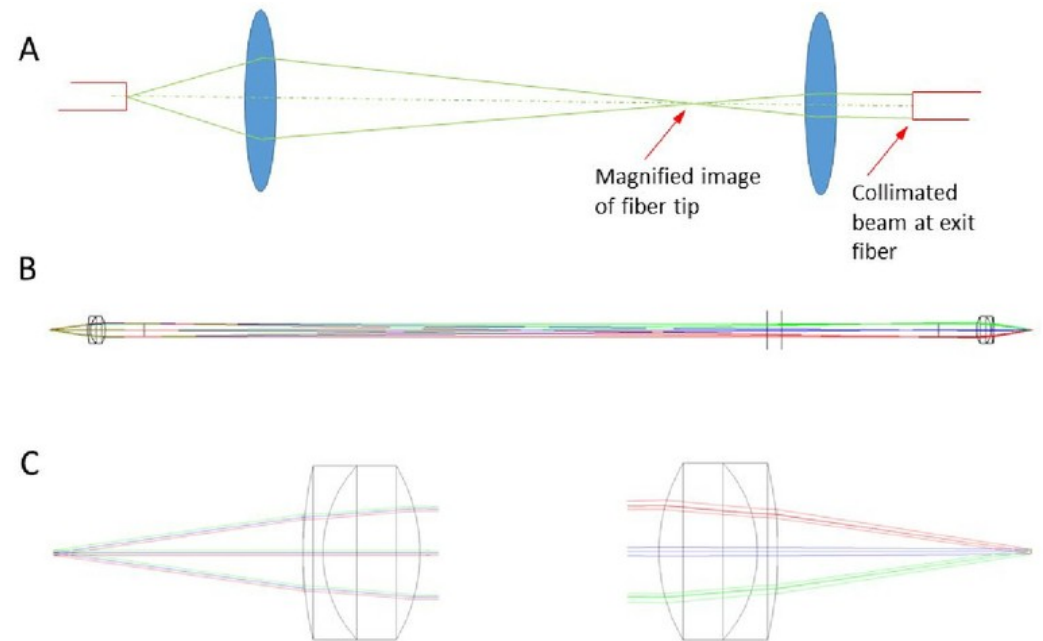
Mieszacze światła

Urządzenia wspomagające mieszanie światła w światłowodach:

- wielokątne światłowody,
- optyczne mieszacze światła (ang. optical scrambler),
- mechaniczne mieszacze światła (ang. agitator).



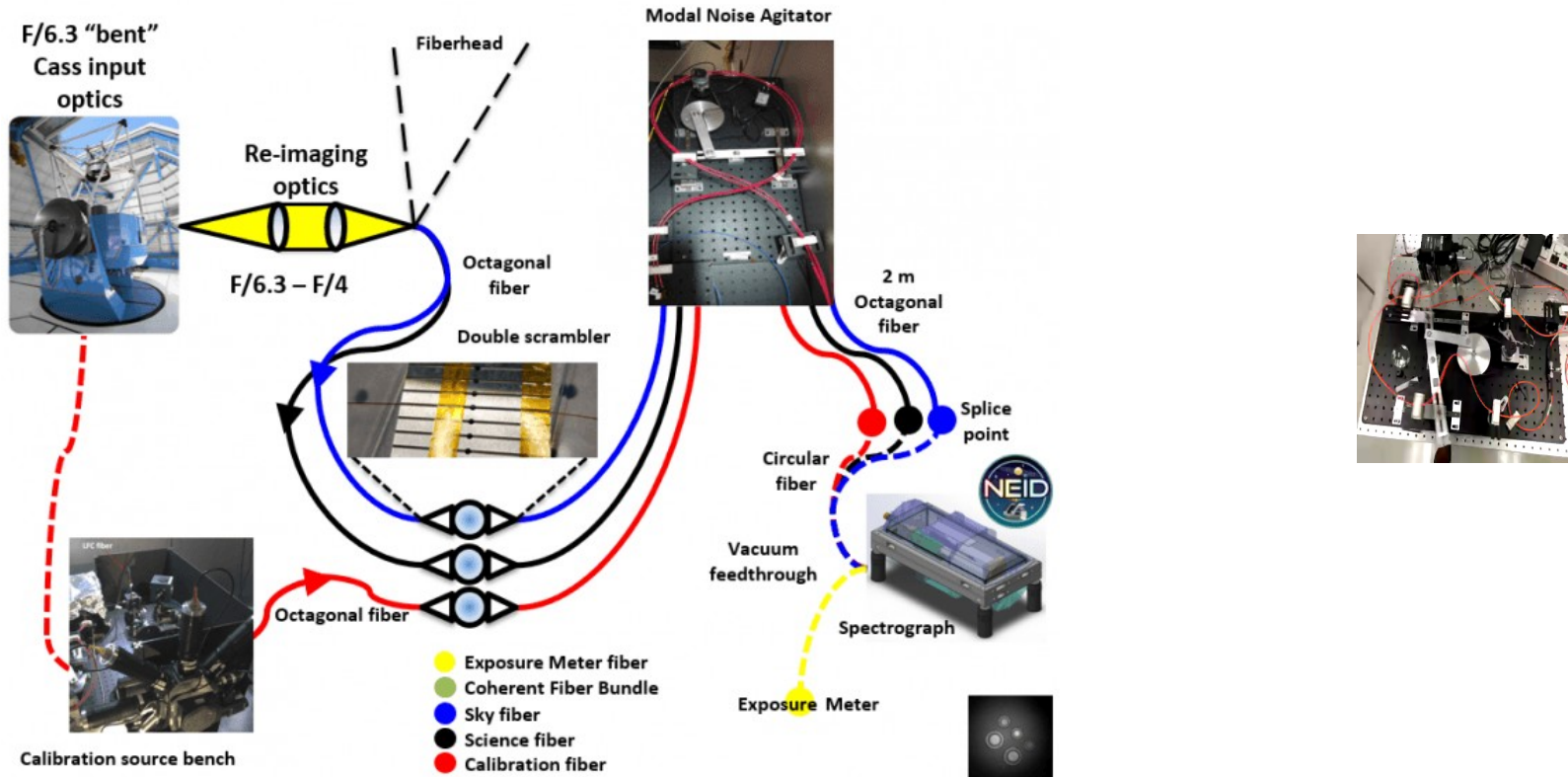
Kulisty mieszacz światła
(ang. optical ball scrambler)
zaproponowany przez
Hunter and Ramsey (1992)
(neid.psu.edu).



Dwusoczewkowy mieszacz światła
(ang. optical double scrambler)
dla teleskopu Keck
i spektrografu Keck planet finder
(Sirk i in. 2018).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Mechaniczne mieszacze światła (ang. agitator)

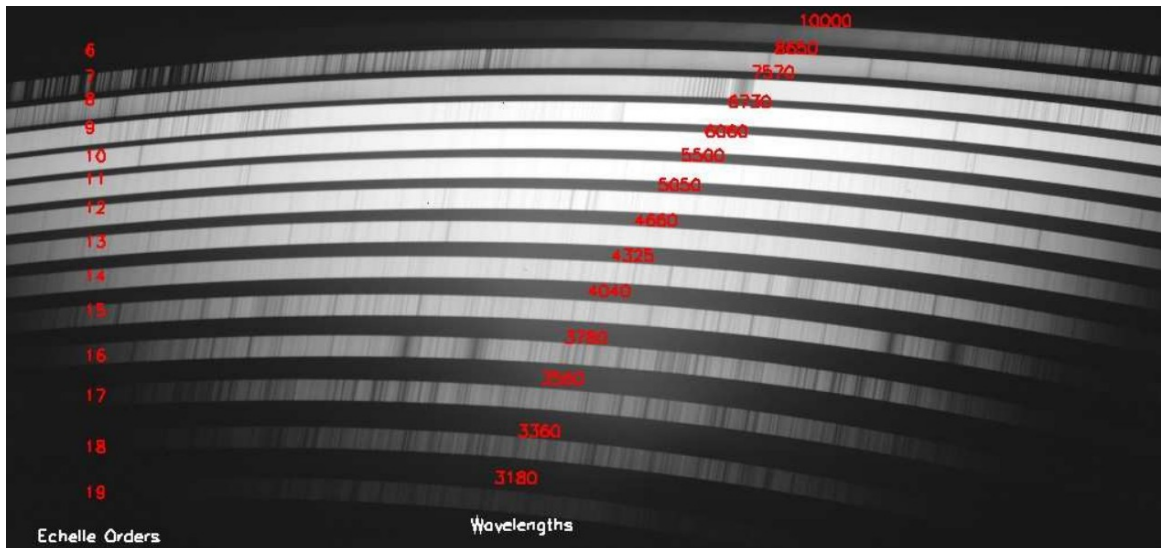
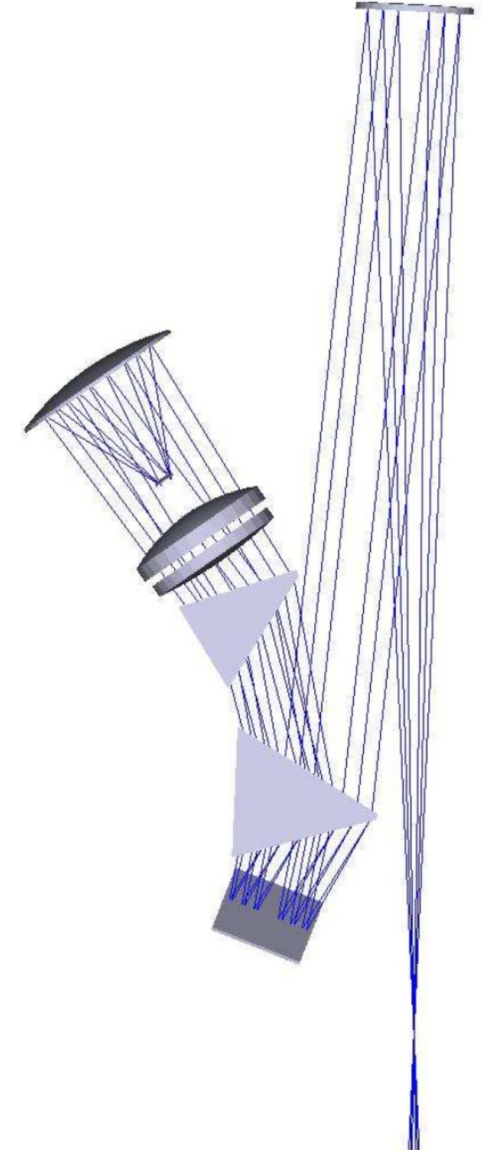
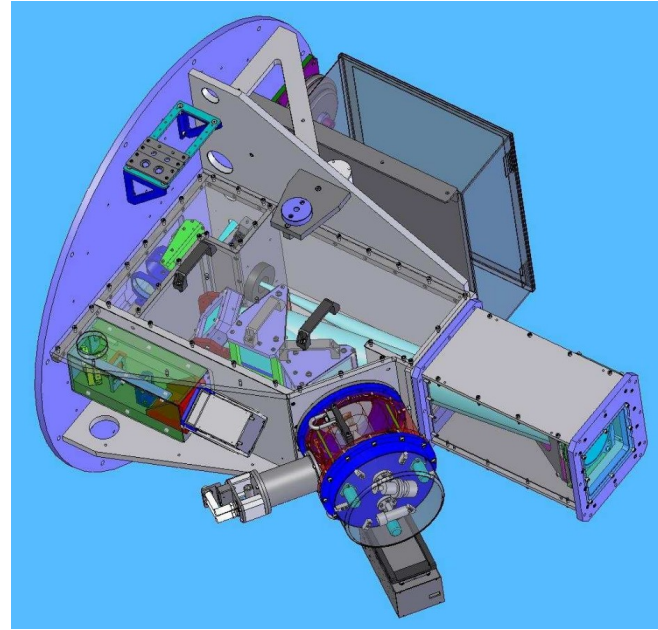
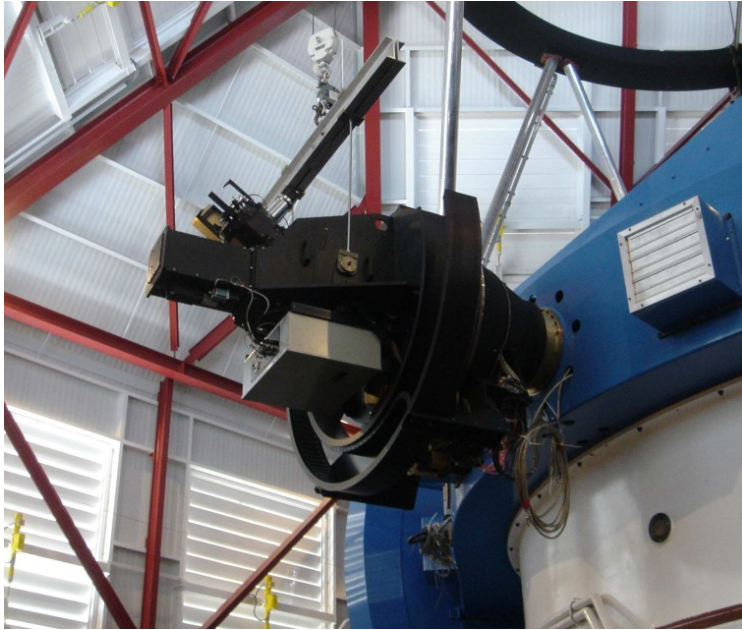


Mechaniczny mieszacz światła (z prawej) i schemat spektrografu NEID, 3.5m teleskopu WIYN w Kitt Peak (neid.psu.edu).

Planowana dokładność spektrografu NEID to 30 cm/s.

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

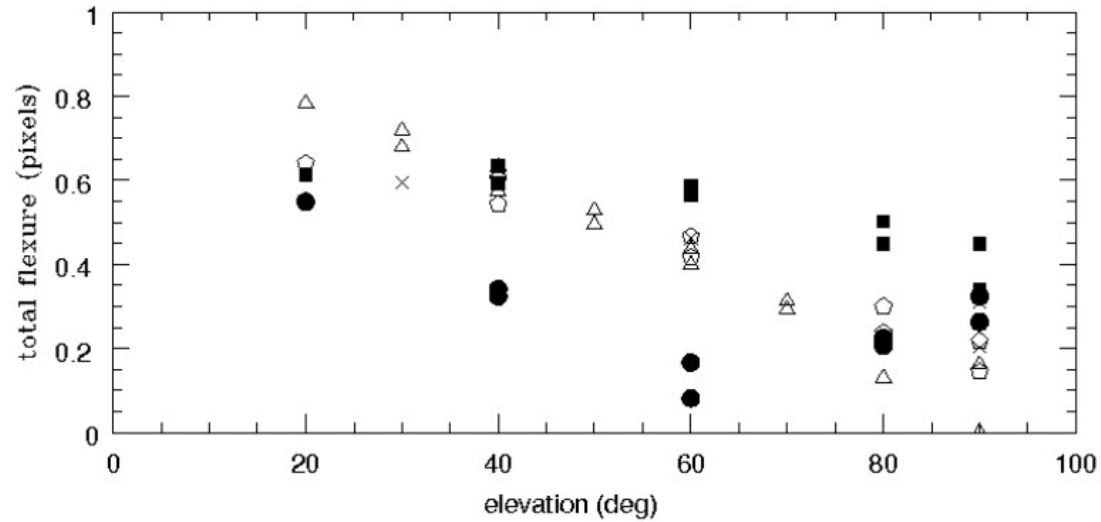
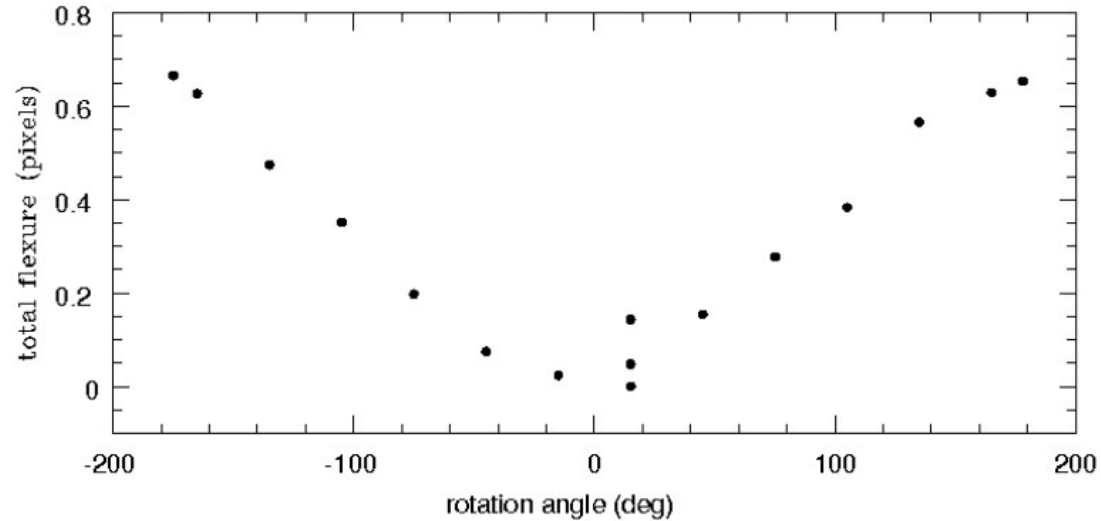
Gięcia i drgania mechaniczne



Szczelinowy spektrograf echelle MagE na 8m teleskopie Magellan (Marshall i in., 2008).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Gięcia i drgania mechaniczne



Przesunięcie widma echelle na zdjęciu kamery CCD w spektrografie MagE na teleskopie Magellan (Marshall i in., 2008).

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Temperatura i ciśnienie

Zmiany temperatury powodują:

- zmiany odległości między elementami spektrografu
- zmiany rozmiaru siatki dyfrakcyjnej
- zmiany współczynnika załamania światła w powietrzu
- zmiany współczynnika załamania w szkle

$$\frac{dn}{dT} = 0.87 \cdot 10^{-5} \quad \text{Zmiany } n \text{ dla szkła kwarcowego dla } 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (Waxler i Cleek, 1973).}$$

Zmiany ciśnienia powodują:

- zmiany współczynnika załamania światła w powietrzu

$$n_{atm} - 1 = (n_0 - 1) \frac{0.00138823 P [torr]}{1 + 0.003671 T [^\circ C]}$$

Zmiany n dla suchego powietrza w warunkach pokojowych (Edlen, 1966).
Torr jest jednostką ciśnienia zbliżoną do mm Hg.

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Skład chemiczny powietrza

Zmiany wilgotności i zawartości CO₂:

- współczynnik załamania światła dla CO₂ jest ok 50% większy niż standardowego powietrza, a więc wzrost zawartości CO₂ powoduje wzrost wypadkowego n ,
- współczynnik załamania światła dla pary wodnej jest ok 15% mniejszy niż standardowego powietrza, a więc wzrost zawartości pary wodnej powoduje spadek wypadkowego n ,

Linie telluryczne zaburzają widma gwiazd wprowadzając systematyczne błędy do mierzonych widm – zwykle po prostu się ich unika wybierając zakresy widma w których tych linii „nie ma”.

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Lampa kalibracyjna

Dokładność pomiaru prędkości radialnej zależy również od ilości linii widmowych. Zarówno linii w widmie badanej gwiazdy jak i linii w widmie lampy kalibracyjnej.

Najwięcej linii mają gwiazdy późnych typów widmowych oraz lampa Th-Ar. Aby zwiększyć liczbę linii kalibracyjnych stosuje się grzebienie laserowe.

Dodatkowo, stabilność linii widmowych lamp kalibracyjnych katodowych nie przekracza 1 m/s, ze względu m.in. na ruch cząstek gazu w lampie.

Lampa kalibracyjna jest zwykle naświetlana naprzemiennie z widmem gwiazdy, co sprawia, że jest wykonywana w nieco innej temperaturze itp.

Niektóre spektrografy wykonują widma lampy kalibracyjnej równocześnie z widmami badanych gwiazd wykorzystując np. podwójny światłowód. Wówczas pojawia się konieczność dostosowania jasności lampy do jasności obserwowanej gwiazdy.

Niedokładność pomiaru prędkości radialnej

Zestawienie

Widmo obiektu (SNR, typ widmowy, rotacja, zmienność, wymieszanie widm)

Atmosfera ziemi (linie telluryczne, ekstynkcja, dyspersja)

Szczelina (światłowody, mieszacze światła)

Spektrograf (rozdzielczość, zakres widmowy, zmiany T, ciśnienia, gięcia)

Lampa kalibracyjna (stabilność, długości linii, złane linie, równoczesne naświetlanie)

Kamera (szумы, niejednorodność rozmiarów i czułości pikseli)

Poszukiwania planet pozasłonecznych

Najdokładniejsze spektrografy

Spectrograph	slit or fiber	Temp Control	Spectral Resolution	Wavelength range [nm]	Wavelength calibrator	SMP [m s ⁻¹] SNR = 200	Number of stars	Duration of program
HARPS	f	Y	115,000	380 – 690	ThAr	0.8	2000	2003 –
HARPS-N	f	Y	115,000	380 – 690	ThAr	0.8	500	2012 –
PARAS	f	Y	67,000	380 – 690	ThAr	1.0	27	2012 –
CHIRON	f	Y	90,000	440 – 650	Iodine	1.0	35	2011 –
SOPHIE	f	Y	75,000	387 – 694	ThAr	1.1	190	2011 –
PFS	s	Y	76,000	390 – 670	Iodine	1.2	530	2010 –
HIRES	s	Y	55,000	364 – 800	Iodine	1.5	4000	1996 –
Levy (LCPS)	s	Y	110,000	376 – 970	Iodine	1.5	100	2013 –
Levy (CPS)	s	Y	100,000	376 – 940	Iodine	2.0	300	2013 –
SONG	s	N	90,000	440 – 690	Iodine	2.0	12	2014 –
HRS	s	Y	60,000	408 – 784	Iodine	3.0	100	2001 – 2013
Hamilton	s	N	50,000	390 – 800	Iodine	3.0	350	1987 - 2011
UCLES	s	N	45,000	478 – 871	Iodine	3.0	240	1998 –
Tull	s	N	60,000	345 – 980	Iodine	5.0	200	1998 –

Spektroskopowe programy poszukiwania planet pozasłonecznych
(Fischer i in., 2016).