



C A S L E O

# Informe de la prueba del fotopolarímetro CasPol con cámara PIXIS: 2048

Sergio A. Cellone

16 de febrero de 2024

## Resumen

Se presentan resultados de las pruebas efectuadas en el turno 2024-01-02 con el fotopolarímetro CasPol en el foco Cassegrain del TJS + cámara PIXIS: 2048 (reparada).

Los resultados son aceptables, al menos para el conjunto de estándares de cero y de ángulo observadas, reproduciéndose correctamente los valores de polarización y EVPA publicados, con errores razonablemente bajos.

Se recomienda terminar de ponerla a punto (velocidad de lectura, *overscan*, *headers*) y luego destinar a la cámara PIXIS: 2048 como detector dedicado al CasPol.

## 1. Setup instrumental, observaciones y procesamiento

Se testeó la cámara PIXIS: 2048 (reparada) en el fotopolarímetro CasPol instalado en el foco Cassegrain del TJS.

Las observaciones estuvieron a cargo del Dr. Pablo Ostrov (JTT: Germán Fernández).

Con un pixel de  $13.5\mu\text{m}$  la escala (sin binnear) es de 0.153 arcsec/pix.

Se utilizó binning  $2 \times 2$ , resultando una escala de 0.305 arcsec/pix.

Se trabajó con 4 ángulos de la lámina de media onda (HWP): 0.0; 22.5; 45.0; y 67.5 grados.

Se obtuvieron las siguientes calibraciones:

- 20 bias;
- 10 flats, filtro *R*, por cada ángulo de la HWP;

y se observaron las estrellas de la Tabla 1 (cada ciclo corresponde a una imagen por c/u de las 4 posiciones de la HWP).

Las 2 últimas de la Tabla 1 son estándares polarimétricas de [Turnshek et al. \(1990\)](#), pero las 3 primeras son estrellas brillantes presumiblemente no polarizadas (hasta ahora no encontré una publicación que las recopile como estándares, aunque están mencionadas en varias publicaciones; le estoy consultando a Ostrov).

Tabla 1: Estándares observadas.

Nombre	Ciclos	V (mag)	Filtro color	Filtro neutro (mag)	Tipo std. (%)	$P_V$ (deg)	$\Theta_V$
HD 38393	2	3.60	R	1	cero		
HD 94851	2	9.29	R	—	cero		
HD 98161	2	6.24	R	—	cero		
HD 110984	2	8.95	R	—	ángulo	5.70	91.6
HD 111579	2	9.50	R	—	ángulo	6.46	103.1

Todo el procesamiento se hizo con IRAF. Desplegadas en el SAOimage, la orientación de las imágenes es: Norte a la izquierda, Este arriba.

El rango de FWHM estuvo entre 1.98 y 3.68 arcsec, aunque los valores más altos corresponden a imágenes bastante desenfocadas, seguramente debido a lo difícil que resulta enfocar con el software de adquisición.

En una imagen (`stda4-450.fit`) se ven dos “rayas” verticales paralelas (Fig. 1).

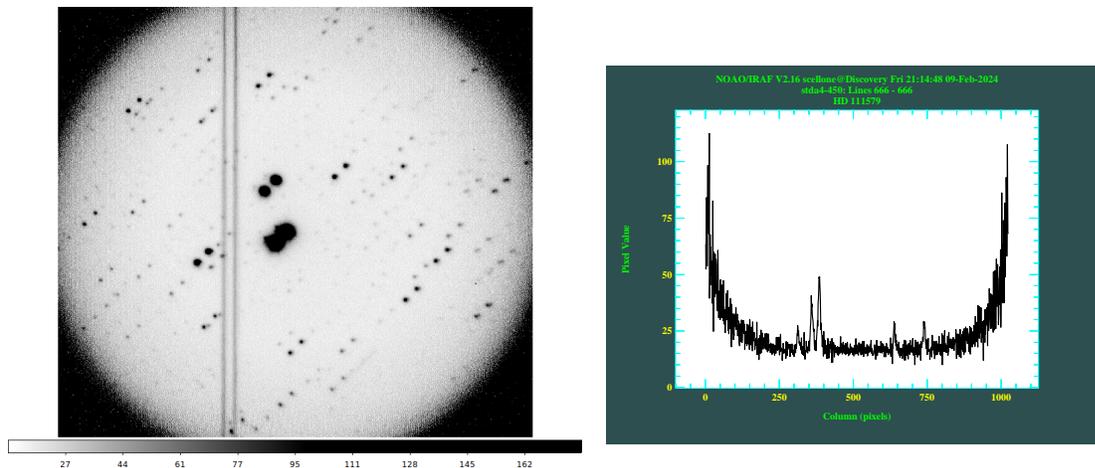


Figura 1: Las dos “rayas” verticales paralelas en la imagen `stda4-450.fit`. Imagen (*izq.*) y corte horizontal (*der.*).

### 1.1. Overscan, bias, flats

Los bias y flats son de  $1024 \times 1024$  pix, sin que exista una zona de overscan.

Se generó un masterbias (Zero) y un masterflat por cada ángulo de la HWP (Flat000, Flat225, Flat450, Flat675).

Las imágenes de las estrellas, por su parte, son de  $1024 \times 1029$ , correspondiendo las filas 1026 a 1029 al *overscan* (la fila 1025 está algo iluminada, no debe usarse para medir el *overscan*).

Pero dado que los bias no tenían overscan, las imágenes de las estrellas no se corrigieron por esa señal, solamente se les restó el masterbias y luego se corrigieron por flat (previo recorte a  $1024 \times 1024$  pix).

## 1.2. Ganancia y ruido de lectura

Usando 5 pares de bias y 5 pares de flats, y promediando resultados, se obtuvo con `findgain`:

**Ganancia:** 3.84 e<sup>-</sup>/ADU

**Ruido de lectura:** 12.04 e<sup>-</sup>

Para evitar la parte de los flats vigneteada por la óptica, se usó la siguiente caja de estadísticas (en pixeles binneados): [345:670,345:700].

El valor de ganancia medido concuerda con el valor más bajo para *high capacity output* (3.5 e<sup>-</sup>/ADU), mientras que el ruido de lectura (RON) concuerda con el valor para 2 MHz (12 e<sup>-</sup>), según la hoja de especificaciones técnicas (se adjunta como Apéndice).

## 2. Foto-polarimetría

Se hizo fotometría de las imágenes ordinaria y extraordinaria de cada estrella con `phot` (IRAF), usando los siguientes parámetros:

```
datapars.scale = 0.305
datapars.fwhmpsf = 2.5
datapars.emission = yes
datapars.sigma = INDEF
datapars.datamin = INDEF
datapars.datamax = INDEF
datapars.noise = "poisson"
datapars.ccdread = "RDNOISE"
datapars.gain = "EPADU"
datapars.readnoise = 0.
datapars.epadu = 1.
datapars.exposure = "EXPTIME"
datapars.airmass = "AIRMASS"
datapars.filter = "FILTER02"
datapars.obstime = "UT"
datapars.itime = 1.
datapars.xairmass = INDEF
datapars.ifilter = "INDEF"
datapars.otime = "INDEF"

centerpars.calgorithm = "centroid"
centerpars.cbox = 6.
centerpars.cthreshold = 0.
centerpars.minsnratio = 1.
centerpars.cmaxiter = 10
centerpars.maxshift = 7.
centerpars.clean = no
```

```
centerpars.rclean = 1.
centerpars.rclip = 2.
centerpars.kclean = 3.
centerpars.mkcenter = yes
```

```
fitskypars.salgorithm = "mode"
fitskypars.annulus = 20.
fitskypars.dannulus = 5.
fitskypars.skyvalue = 0.
fitskypars.smaxiter = 10
fitskypars.sloclip = 0.
fitskypars.shiclip = 0.
fitskypars.snreject = 50
fitskypars.sloreject = 3.
fitskypars.shireject = 3.
fitskypars.khist = 3.
fitskypars.binsize = 0.1
fitskypars.smooth = no
fitskypars.rgrow = 0.
fitskypars.mksky = yes
```

```
photpars.weighting = "constant"
photpars.apertures = "1.,2.,3.,4.,5.,6.,7.,8.,9.,10."
photpars.zmag = 22.5
photpars.mkapert = yes
```

Las magnitudes para la polarimetría que se eligieron corresponden a una abertura de  $r = 5$  arc-sec (Sosa et al., 2019), y se aplicaron las tareas polarimétricas del paquete LP-IRAF, desarrollado por el grupo CONGA (Caracterización Observacional de Núcleos de Galaxias Activos, FCAG, UNLP).

La Tabla 2 muestra los resultados instrumentales de polarización (en %) de las estándares. Para cada estrella, las 2 primeras filas son valores individuales, y la tercera (en negrita) son promedios. Suponiendo que las std de cero tienen polarización nula, los valores medios de polarización instrumental son los de las primeras 2 columnas de la Tabla 3.

Con estos valores corrijo la polarización de las estándares de ángulo, obteniendo los valores de las columnas 2, 3 y 4 de la Tabla 4.

Promediando para las dos std de ángulo, se obtiene el valor de corrección al EVPA (*electric vector position angle*)  $\langle \Delta\theta \rangle$  que se muestra en la 3er columna de la Tabla 3. Con todo esto se corrigen los parámetros de Stokes de las std de ángulo, obteniendo los valores que están en las columnas 6 y 7 de la Tabla 4.

La polarización estándar de las dos estándares de ángulo da  $\sim 0.35\%$  menor que la publicada, aunque esto se puede deber a la diferencia de banda ( $R$  en nuestras observaciones,  $V$  en Turnshek et al. 1990). Los EVPA dan casi exactamente igual a los publicados (aunque esto es fruto de la metodología usada).

En la Fig. 2 se muestran los pseudo-vectores de polarización para las estándares de ángulo (en ambos casos marcadas con "1") y algunas estrellas más débiles de cada campo. Los valores de

Tabla 2: Resultados instrumentales de polarización de las estándares. Valores en porcentaje. Para cada estrella, las 2 primeras filas son valores individuales, y la tercera (en negrita) son promedios.

Nombre	$Q$	$\epsilon Q$	$U$	$\epsilon U$	$P$	$\epsilon P$	$\Theta$	$\epsilon \Theta$
HD 38393	-0.135	0.000	-0.077	0.000	0.156	0.000	-75.141	0.000
	-0.159	0.000	-0.108	0.000	0.193	0.000	-72.905	0.000
	<b>-0.147</b>	<b>0.012</b>	<b>-0.093</b>	<b>0.015</b>	<b>0.174</b>	<b>0.018</b>	<b>-73.90</b>	<b>3.02</b>
HD 94851	-0.097	0.046	-0.002	0.046	0.097	0.046	-89.532	13.566
	-0.140	0.046	-0.009	0.046	0.140	0.046	-88.209	9.399
	<b>-0.119</b>	<b>0.021</b>	<b>-0.005</b>	<b>0.004</b>	<b>0.119</b>	<b>0.022</b>	<b>-88.75</b>	<b>5.14</b>
HD 98161	-0.037	0.000	-0.080	0.000	0.088	0.000	-57.310	0.000
	-0.105	0.000	-0.078	0.000	0.131	0.000	-71.658	0.000
	<b>-0.071</b>	<b>0.034</b>	<b>-0.079</b>	<b>0.001</b>	<b>0.106</b>	<b>0.023</b>	<b>-65.93</b>	<b>6.22</b>
HD 110984	-5.281	0.040	-1.223	0.046	5.421	0.040	-83.478	0.242
	-5.339	0.023	-1.205	0.023	5.473	0.023	-83.643	0.120
	<b>-5.310</b>	<b>0.029</b>	<b>-1.214</b>	<b>0.009</b>	<b>5.447</b>	<b>0.030</b>	<b>-83.56</b>	<b>0.16</b>
HD 111579	-5.083	0.032	-3.626	0.000	6.244	0.026	-72.246	0.087
	-5.023	0.000	-3.672	0.000	6.222	0.000	-71.914	0.000
	<b>-5.053</b>	<b>0.030</b>	<b>-3.649</b>	<b>0.023</b>	<b>6.233</b>	<b>0.038</b>	<b>-72.08</b>	<b>0.17</b>

Tabla 3: Polarización instrumental y corrección al EVPA.

$\langle Q_i \rangle$	$\langle U_i \rangle$	$\langle \Delta \Theta \rangle$
(%)	(%)	(deg)
$-0.112 \pm 0.013$	$-0.059 \pm 0.016$	$-4.783 \pm 0.084$

Tabla 4: Parámetros de Stokes de las std de ángulo corregidos por  $P$  instrumental.

Nombre	$Q_0$	$U_0$	$\Theta_0$	$\Delta \Theta$	$P_s$	$\Theta_s$
	(%)	(%)	(deg)	(deg)	(%)	(deg)
HD 110984	$-5.198 \pm 0.020$	$-1.155 \pm 0.007$	$96.264 \pm 0.059$	-4.664	5.32	91.5
HD 111579	$-4.941 \pm 0.021$	$-3.590 \pm 0.016$	$108.001 \pm 0.120$	-4.901	6.11	103.2

$P_s$  y  $\Theta_s$  para las estrellas de campo parecen razonables, mostrando un patrón compatible con polvo interestelar, como se espera.

### 3. Conclusiones - recomendaciones

Los resultados de usar la cámara PIXIS: 2048 en el fotopolarímetro CasPol instalado en el foco Cassegrain del TJS son aceptables, al menos para el conjunto de estándares de cero y de ángulo observadas, reproduciéndose correctamente los valores de polarización y EVPA publicados, con errores razonablemente bajos.

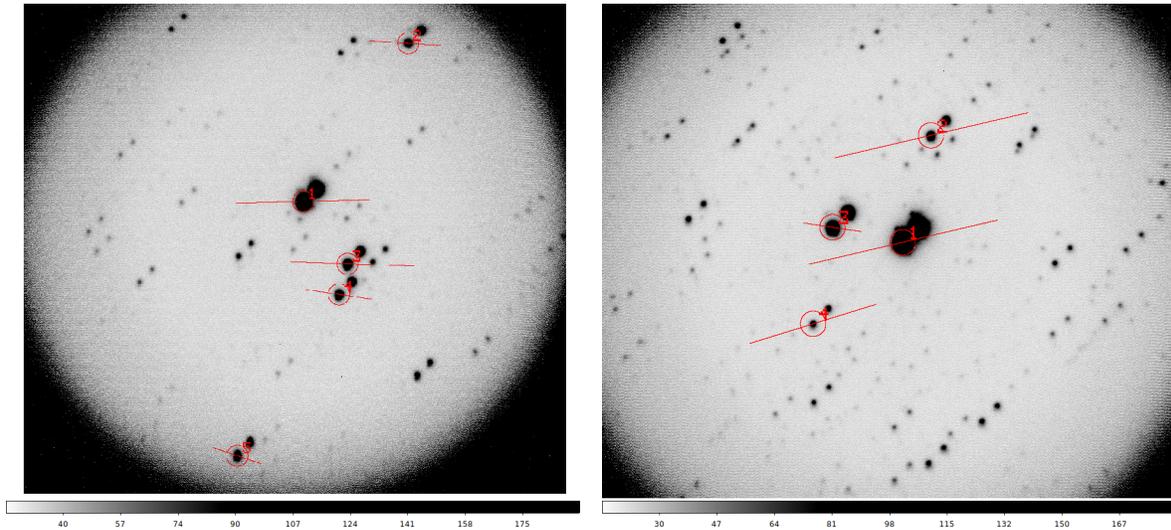


Figura 2: Pseudo-vectores de polarización para las estándares de ángulo y algunas estrellas más débiles del campo. HD 110984 (*izq.*) y HD 111579 (*der.*). En ambas imágenes: Norte arriba, Este a la izquierda.

Antes de establecer definitivamente a la PIXIS:2048 como detector del CasPol, se debería:

- repetir pruebas con estándares más débiles y/u objetos de programa ya observados con la cámara CCD Tek-1024, evaluando los errores en los parámetros de Stokes;
- revisar valores de ganancia usados, particularmente si se puede usar el modo *low noise input*;
- testear si se puede usar la velocidad de lectura a 100 kHz;
- lograr que bias y flats contengan el overscan;
- establecer un sistema eficaz de enfoque;
- modificar los encabezamientos (*headers*) de las imágenes, conteniendo las mismos *keywords* que en el caso del CasPol + cámara Tek-1024.

## Referencias

Sosa, M., von Essen, C., Andruchow, I., Cellone, S. A., & Mammana, L. A. 2019, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 5, 028002

Turnshek, D. A., Bohlin, R. C., Williamson, R. L., et al. 1990, *AJ*, 99, 1243

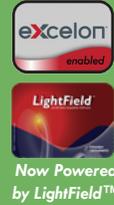
## **A. Especificaciones técnicas**



# TELEDYNE PRINCETON INSTRUMENTS

Everywhere you look™

Part of the Teledyne Imaging Group



## PIXIS: 2048

The PIXIS: 2048 series of cameras from Princeton Instruments (PI) are fully integrated, low noise cameras designed expressly for quantitative scientific imaging applications. Choose front-illuminated (F), back-illuminated (B/BUV), eXcelon® or back-illuminated deep depletion (BR) versions of the 2048 x 2048 CCD for optimized performance from UV to NIR. Designed utilizing PI's exclusive XP cooling technology, PIXIS are the only cameras that offer cooling up to -70°C, while the all-metal, hermetically sealed design, with the industry's only lifetime vacuum guarantee, ensures maintenance free operation. High QE and ultra low-noise electronics make the PIXIS: 2048 series of cameras ideal for demanding, low light applications such as astronomy, Bose-Einstein Condensate (BEC), solar cell inspection, chemiluminescence and fluorescence imaging. The eXcelon and back-illuminated, deep depletion technology of the PIXIS:2048 delivers the highest sensitivity in the NIR while suppressing the etaloning that occurs in standard back illuminated CCDs. Dual speed operation at 100 kHz or 2 MHz allow these cameras to be used for steady state as well as fast kinetics studies.

FEATURE	BENEFITS
eXcelon® technology	Higher QE in the UV and near IR regions; Extremely low etaloning: 100x lower dark charge than back-illuminated deep depletion.
2048 x 2048 imaging array; 13.5µm x 13.5µm pixels Scientific grade CCD	High spatial resolution and large field of view Low noise, few defects, linear response.
All-metal, hermetic vacuum seals; Lifetime vacuum guarantee	No out-gassing (as in epoxy seals) which can compromise vacuum performance; Worry free operation.
Deep cooling	Low dark noise allows detection of faint signals; CoolCUBE II, a compact room temperature coolant circulator, is available for vibration sensitive environments.
Single fused silica vacuum window	Minimizes reflection losses from UV to IR; No optical losses due to multiple optical surfaces; Optional AR coating and wedge windows available.
Optional UV phosphor coatings	Enhances sensitivity throughout the UV to below 200 nm.
Large 45 mm integrated shutter	No vignetting even at low f-numbers. Easily acquire bias and dark reference.
Low noise electronics	Best performance for low light level applications.
Dual digitizers	Dual-speed digitization allows complete freedom to select between "slow operation" for low noise and highest SNR or "fast operation" for rapid image acquisition.
Software selectable system gains	Flexibility to optimize signal-to-noise ratio and dynamic range.
Kinetics	Custom readout mode offers microsecond resolution.
USB2.0 data interface	Plug-and-play operation with desktops or laptops; Optional fiber optic interface for remote operation.
<b>Optional:</b> LightField® (for Windows 8/7, 64-bit) Or WinView/Spec (for Windows 8/7/XP, 32-bit)	Flexible software packages for data acquisition, display and analysis; LightField offers intuitive, cutting edge user interface, IntelliCal® and more.
PICAM (64-bit) / PVCAM (32-bit) software development kits (SDKs)	Compatible with Windows 8/7/XP, and Linux; Universal programming interfaces for easy custom programming.

### Applications:

semiconductor failure analysis, astronomy, photometry, laser beam profiling, luminescence and fluorescence imaging, and Bose-Einstein Condensate (BEC)



# TELEDYNE PRINCETON INSTRUMENTS

Everywhere you look™

Part of the Teledyne Imaging Group



## SPECIFICATIONS

	PIXIS: 2048F	PIXIS: 2048B_eXcelon	PIXIS: 2048B	PIXIS: 2048BUV/BR*
Features	Front-illuminated CCD. Affordable technology for moderate light level applications. No etaloning.	Back-illuminated CCD. Highest sensitivity in the visible region. High sensitivity in the NIR. Extremely low etaloning. 100x lower dark charge than the BR.	Back-illuminated CCD. Highest sensitivity in the visible region.	UV enhanced, back-illuminated (BUV) and back-illuminated, deep depletion (BR) CCDs. BUV has highest sensitivity in 200 - 375nm range and is ideal for UV applications. BR CCD has highest sensitivity & extremely low etaloning, and is ideal for NIR applications.
CCD Image Sensor	e2v CCD42-40 front-illuminated, grade 1, AIMO	Princeton Instruments' proprietary CCD, grade 1, AIMO	e2v CCD42-40 back-illuminated, grade 1, AIMO	e2v CCD42-40 back-illuminated and back-illuminated deep depletion, grade 1, NIMO
Dark current e-/p/s @ -60°C	0.002 (typical) 0.006 (max)	0.005 (typical) 0.02 (max)	0.005 (typical) 0.02 (max)	0.2 (typical) 2 (max)
CCD UV coating	Optional UV coating			
Quantum efficiency	See graph, next page			
CCD format	2048 x 2048 imaging pixels; 13.5 x 13.5-µm pixels; 100% fill factor			
Imaging area	27.6 x 27.6 mm (optically centered)			
Lens mount	F-mount with integral 45 mm shutter			
Deepest cooling temperature	< -70°C (typical), -60°C (guaranteed) with CoolCUBE II liquid circulator < -65°C (typical), -55°C (guaranteed) with air			
Thermostating precision	±0.05°C			
Cooling method	Thermoelectric air or liquid cooling (CoolCUBE II required)			
Full well: Single pixel Output node	100 ke- (typical), 80 ke- (min) 1000 ke- (typical), 800 ke- (min)			
ADC speed/bits	100kHz/16-bit and 2MHz/16-bit			
System read noise @ 100 kHz @ 2 MHz	3.5 e- rms (typical), 5 e- rms (max) 12 e- rms (typical), 16 e- rms (max)			
Vertical shift speed	32.2 µsec/row (programmable)			
Non-linearity	<2% @ 100 kHz			
Software selectable gains	1, 2, 4 e-/ADU (low noise input); 3.5, 7, 14 e-/ADU (high capacity output)			
Operating systems supported	Windows 8/7 (64-bit) and Linux (64-bit), Windows 8/7/XP (32-bit)			
Data interface	USB2.0 (5m interface cable provided); Optional Fiberoptic interface is available for remote operation			
I/O signals	Two MCX connectors for programmable frame readout, shutter, trigger in			
Operating environment	+5 to +30°C non-condensing			
Certification	CE			
Dimensions / Weight	19.51 cm (7.67") x 11.81 cm (4.65") x 11.38 cm (4.48") (L x W x H) / 2.5 kg (5.5 lbs)			

All specifications subject to change

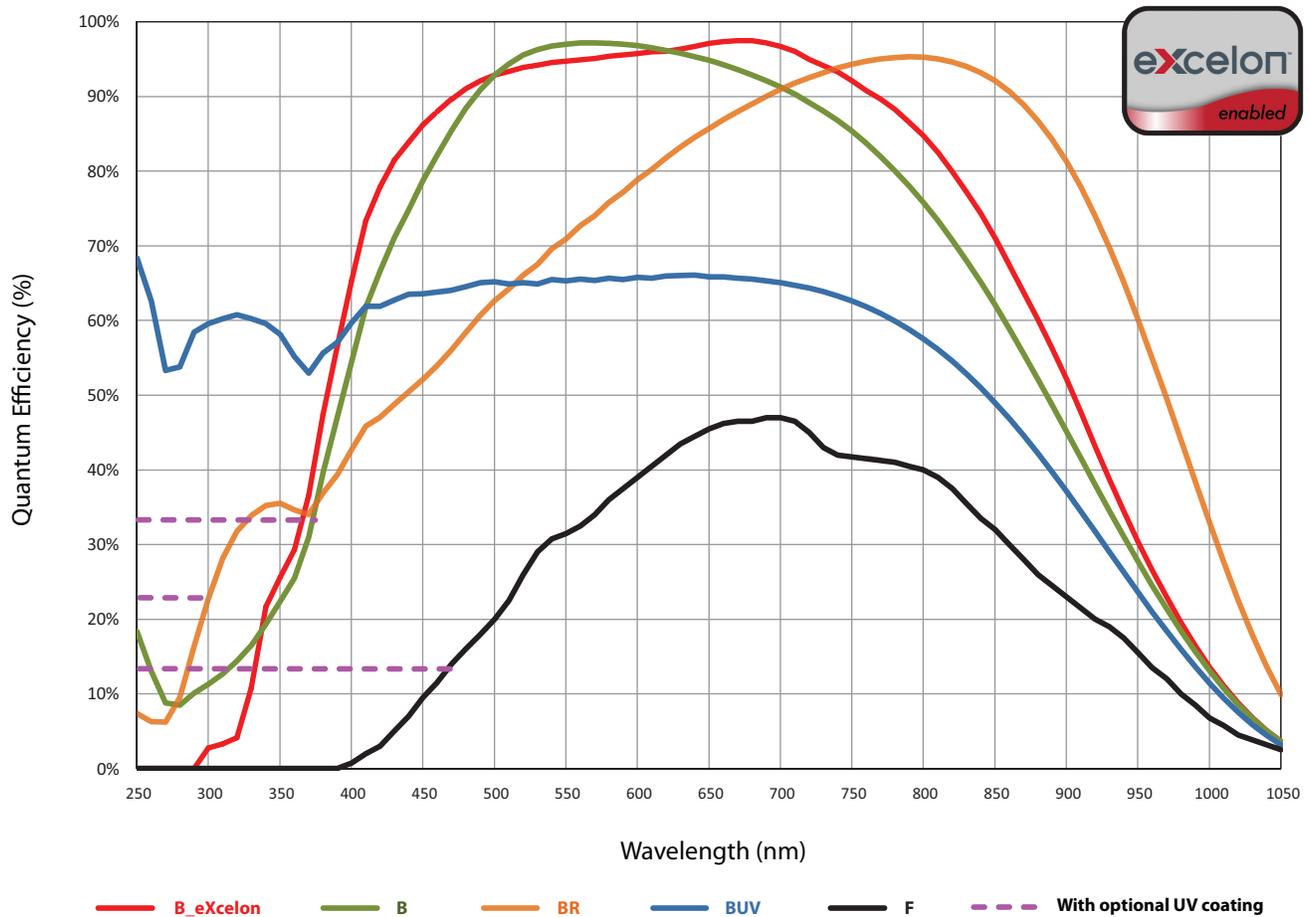
\* Contact your local sales representative for information on the availability of the BR model.

### FRAME RATE

Binning	Readout Time	
	@ 2 MHz	@ 100 kHz
1 x 1	2.265 sec	36.45 sec
2 x 2	0.956 sec	9.521 sec
4 x 4	0.458 sec	2.595 sec
8 x 8	0.249 sec	0.738 sec
16 x 16	0.154 sec	0.288 sec



**QE DATA**

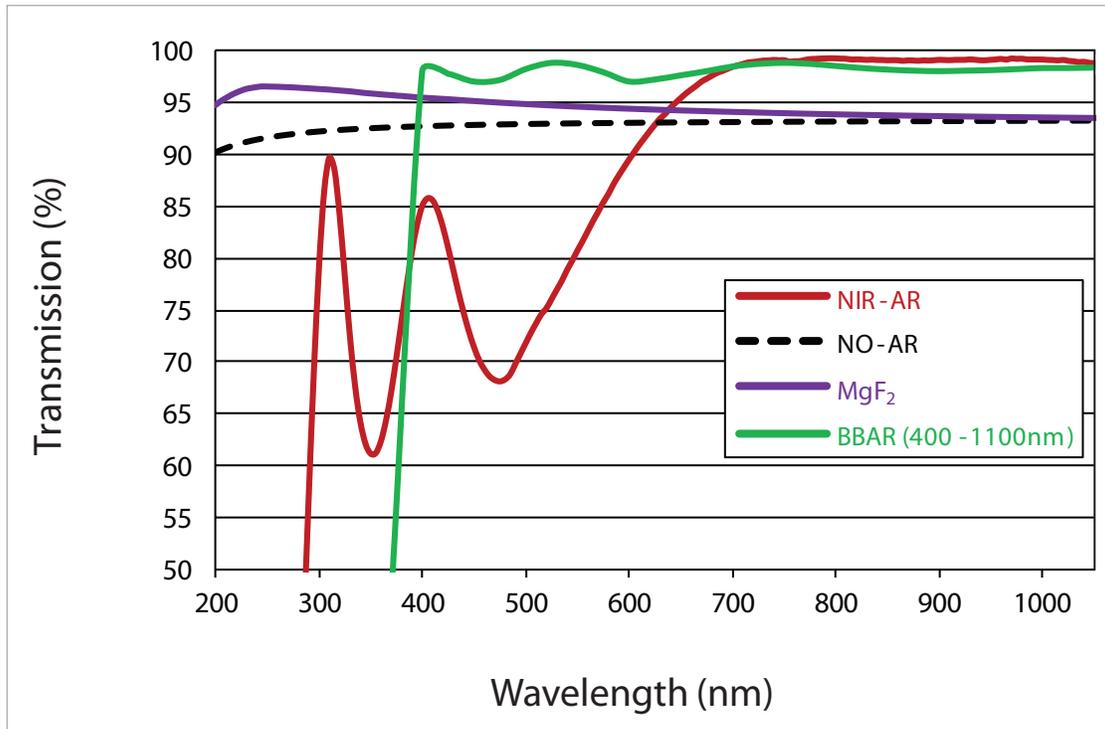


**NOTE:**

Graph shows typical Quantum Efficiency (QE) data measured at + 25°C. QE decreases at normal operating temperatures. For the best results for your application, please discuss the specific parameters of your experiment with your sales representative.



## VACUUM WINDOW AR COATINGS



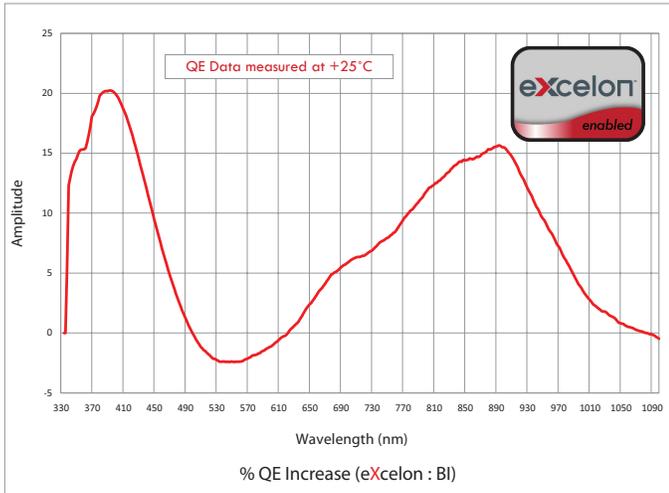
**NOTES:**

- Standard anti-reflection (AR) coating options shown on graph
- Designed by Acton Optics, our BBAR coating offers unmatched performance for 400 nm - 1100 nm
- Custom wedge window options and other AR coatings are also available

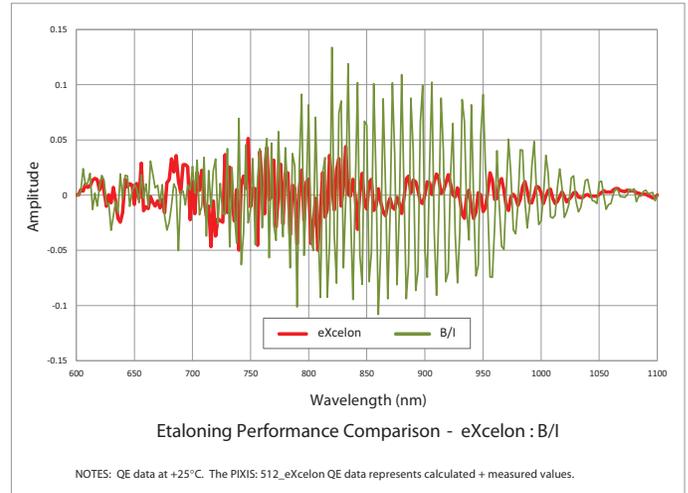
Contact your local sales representative for more information



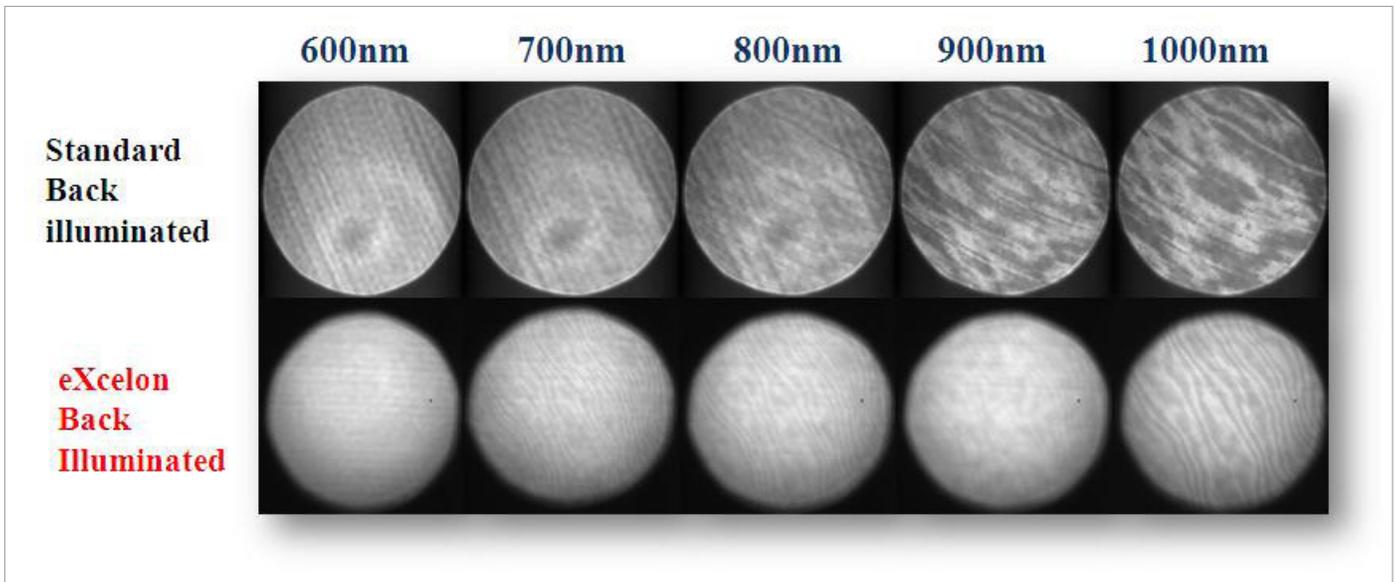
## eXcelon Performance



B\_eXcelon provides superior QE over the standard back illuminated ("B") version in the UV-NIR range.



B\_eXcelon provides significantly lower etaloning (unwanted fringes) compared to standard back illuminated ("B") version.



Data taken with white light source through a monochromator comparing etaloning performance of eXcelon vs. back-illuminated CCDs.



**PIXIS: 2048 (AIR COOLED)**

