

# Desarrollo de un Sistema para la Exposición Controlada de Sensores Skipper-CCD con Aplicaciones en la Búsqueda de Trampas

Estudiantes: Bruno Sivilotti y Agustín Brusco

Directora: Ana Botti

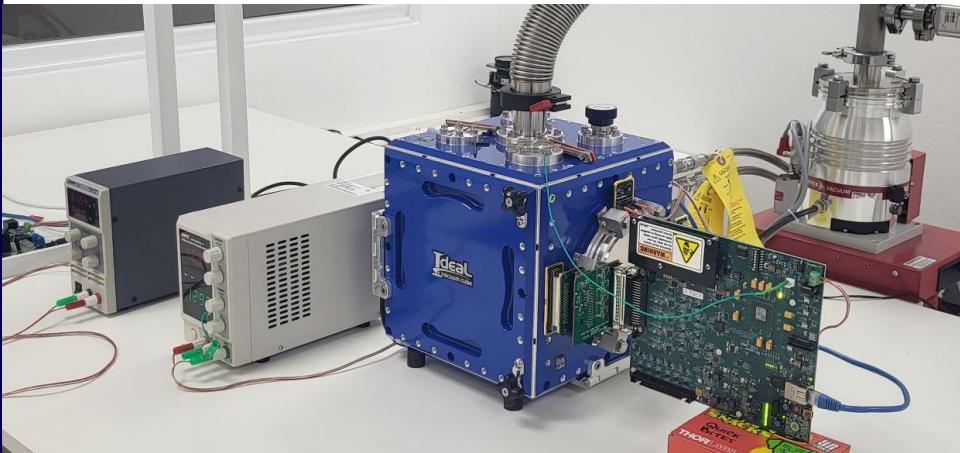
Codirector: Javier Tiffenberg

Colaborador: Santiago Perez

Agradecemos también la colaboración y apoyo de Carla Bonifazi, Agustina Magnoni & Darío Rodrigues

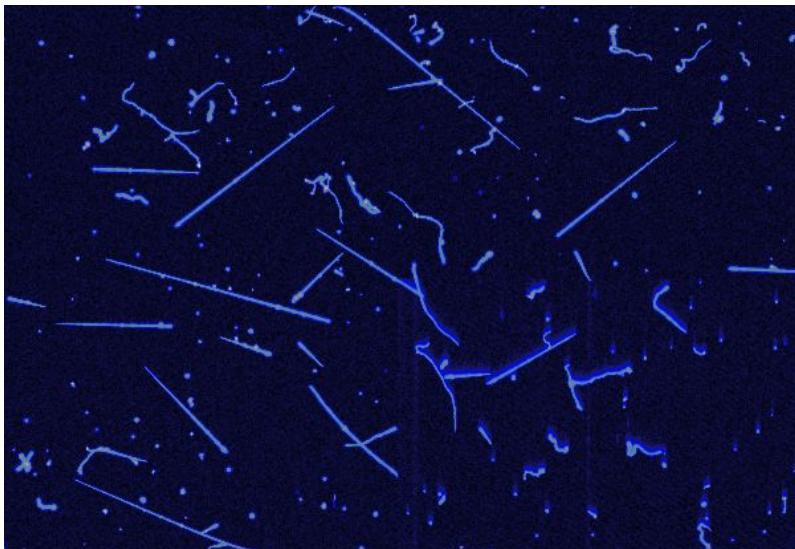
# Contenidos

- Sensores Skipper-CCD
- Trampas y Pocket Pumping
- El Experimento en LAMBDA
- Diseño del Módulo
- Mediciones de Fondo con Skipper-CCD
- Perspectivas para Laboratorio 7
- Conclusiones

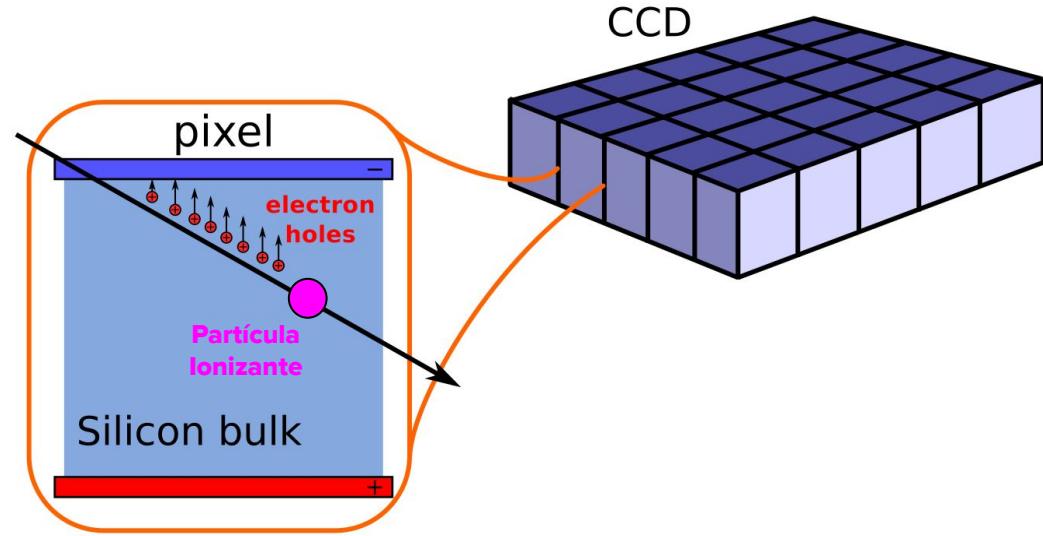


# Sensores Skipper-CCD

Son un tipo particular de *Charge Coupled Devices*  
(Dispositivos de Carga Acoplada)



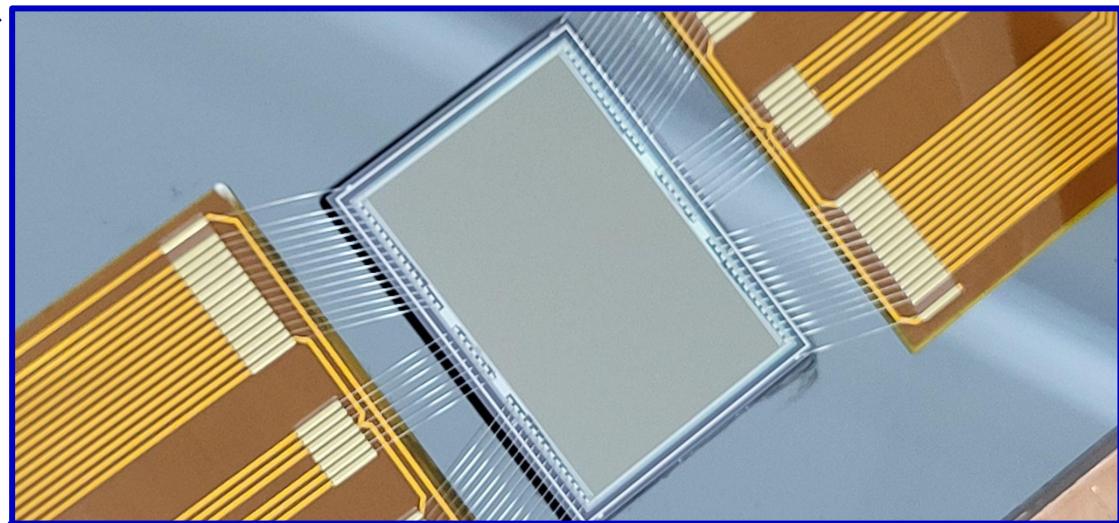
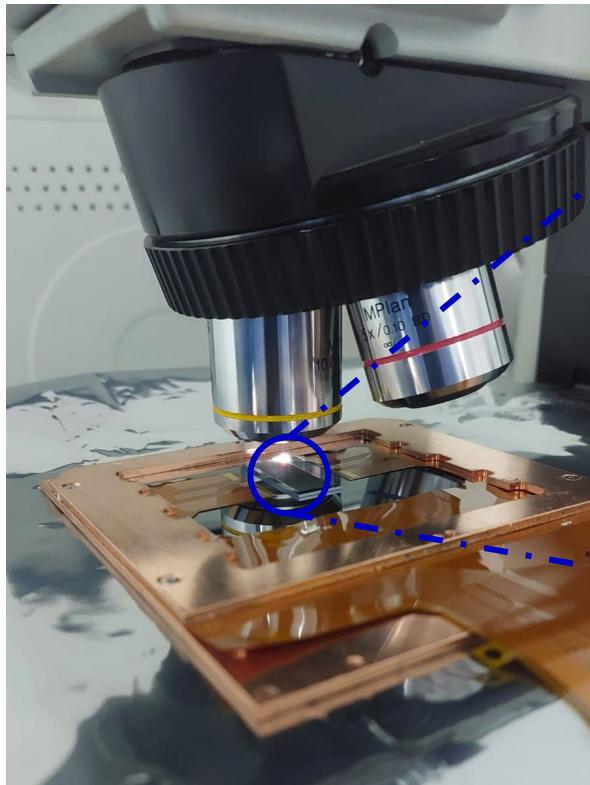
Recorte de Imagen tomada con Skipper-CCD  
en LAMBDA



Fuente: Senger, M. H., Fundamentos Teóricos y Experimentales de la Búsqueda de Materia Oscura a Través de la Óptica no Lineal, Tesis de Licenciatura, DF, FERMILAB, 2019

Dispositivos revolucionarios que permiten medir interacciones con niveles de ruido sub-electrónico

## Sensores Skipper-CCD



Sensor Skipper-CCD de  $588 \times 1658$  píxeles con el que trabajamos en LAMBDA

# Sensores Skipper-CCD

Son un tipo particular de ***Charge Coupled Devices***  
(Dispositivos de Carga Acoplada)

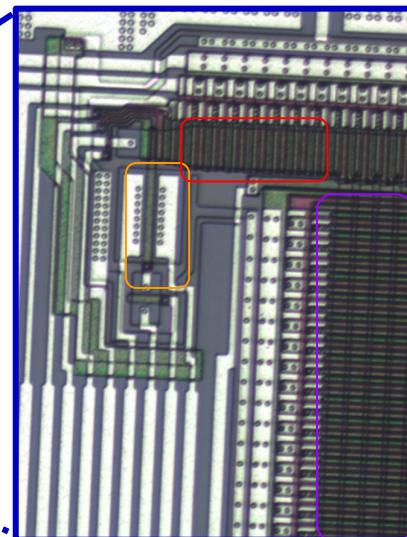
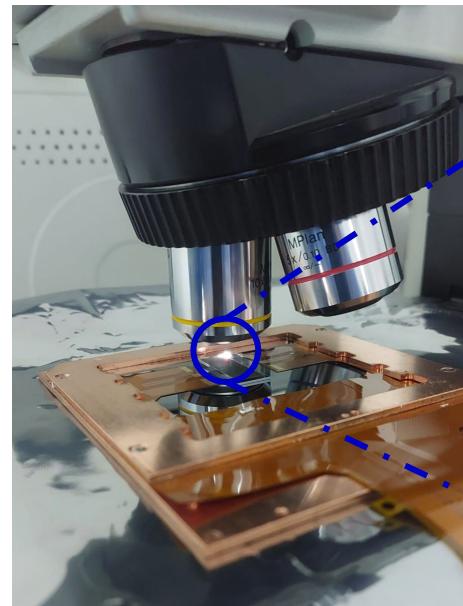
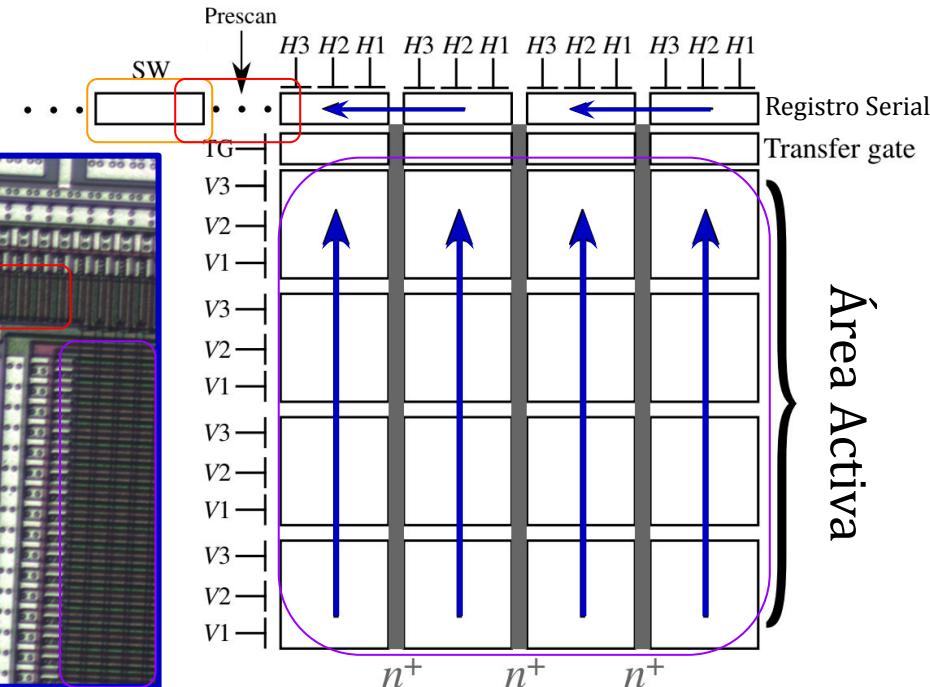


Diagrama simplificado de la estructura del sensor

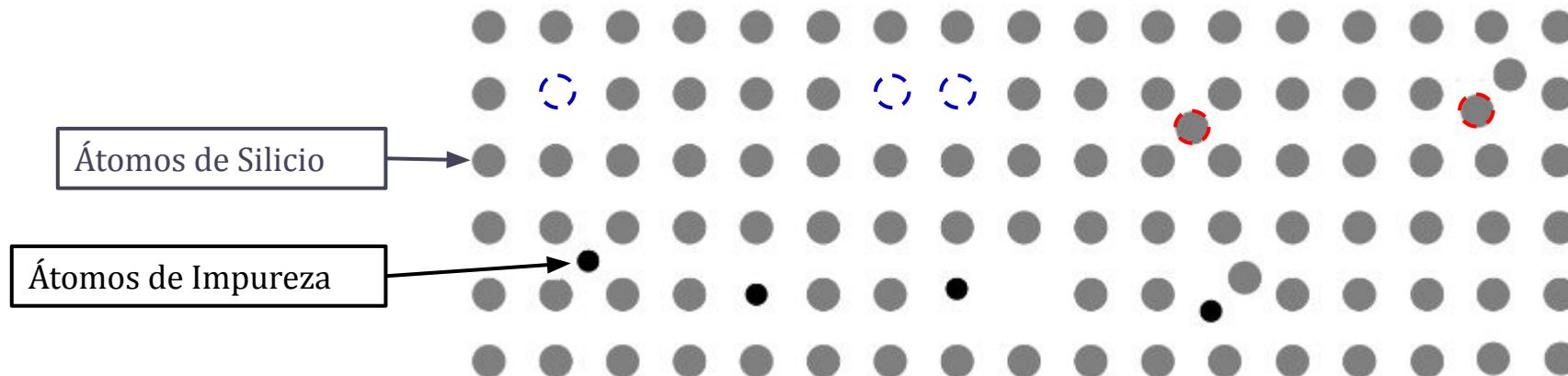


Fuente: L. Barak et al., SENSEI: Characterization of Single-Electron Events Using a Skipper Charge-Coupled Device, PHYSICAL REVIEW APPLIED 17, (2022).

Para identificar defectos en los sensores resulta útil iluminarlos homogéneamente

## Trampas y Pocket-Pumping

Las trampas son **defectos** en la estructura del silicio que **generan excesos de carga al momento de medir**



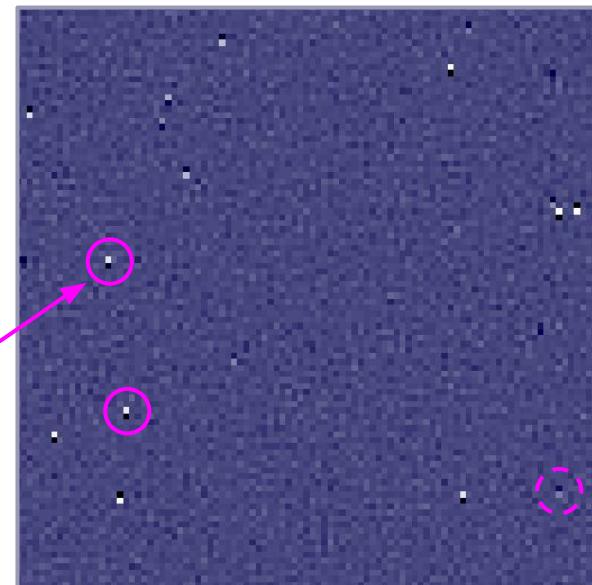
Para identificar defectos en los sensores resulta útil iluminarlos homogéneamente

## Trampas y Pocket-Pumping

Las trampas son **defectos** en la estructura del silicio que **generan excesos de carga al momento de medir**

**Pocket Pumping:** Es un método para la **detección de trampas** mediante el movimiento de cargas entre píxeles hasta formar **dipolos identificables**

Una implementación óptima del método requiere **iluminar al sensor homogéneamente**

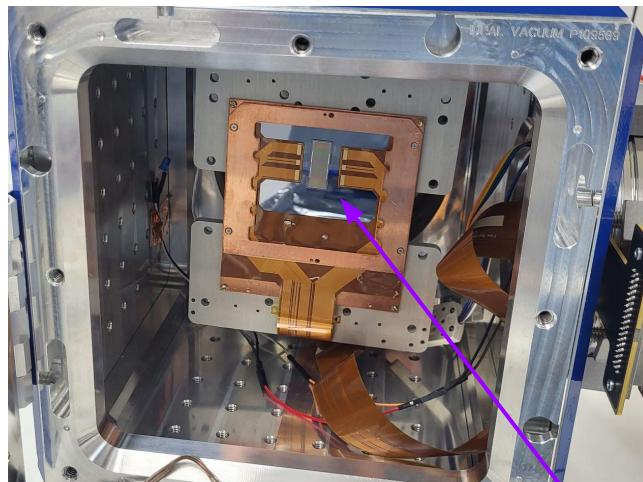


Fuente: Bilgi, P., Optimization of CCD charge transfer for ground and space-based astronomy, PHD Thesis, Caltech, 2019

Un cubo azul protege al Skipper-CCD de la luz del ambiente y lo mantiene en vacío

## El Experimento en LAMBDA: El Cubo

Detalle: los Skippers funcionan a muy bajas temperaturas (120 K a 150 K) y en vacío ( $10^{-4}$  Thor)



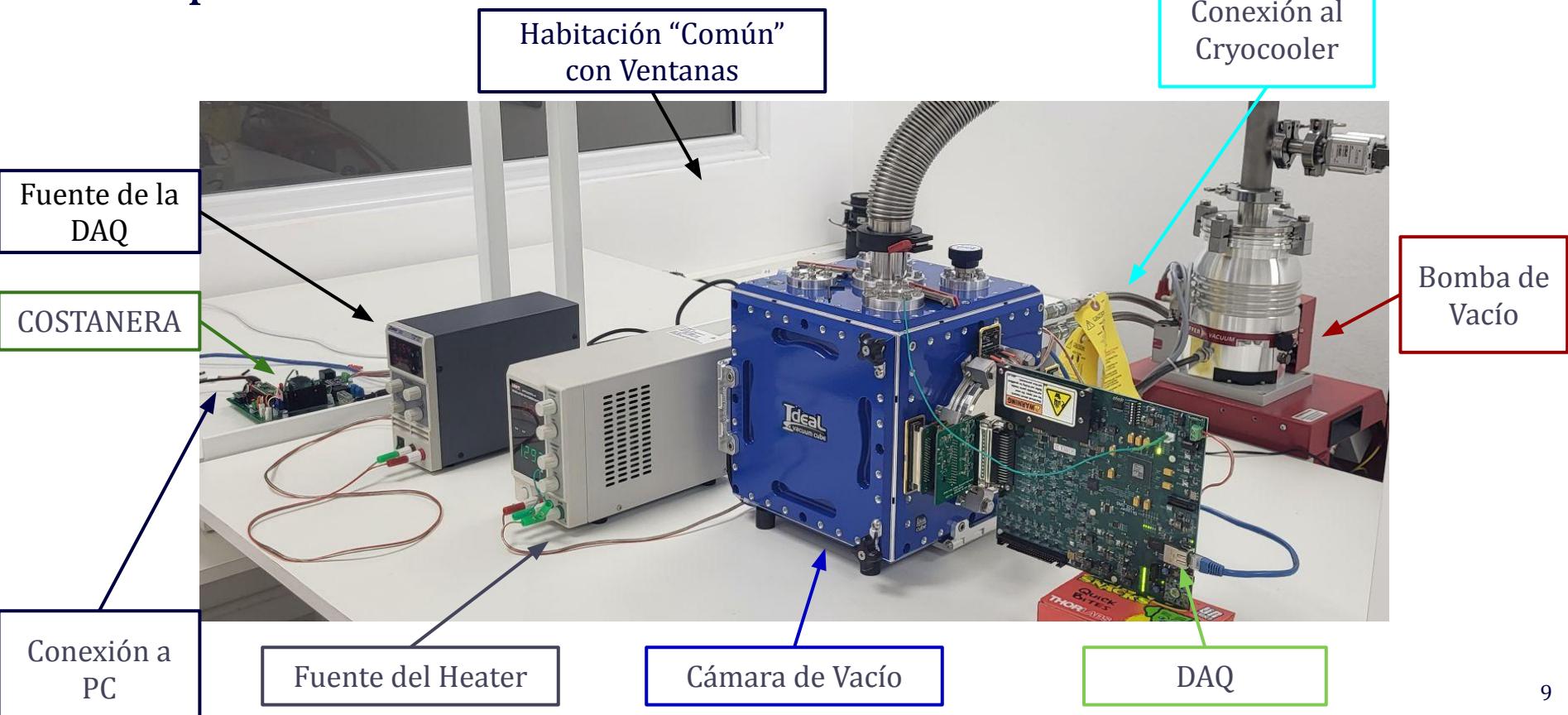
Skipper-CCD



Cámara de Vacío “Cubo Azul” en  
LAMBDA

Un cubo azul protege al Skipper-CCD de la luz del ambiente y lo mantiene en vacío

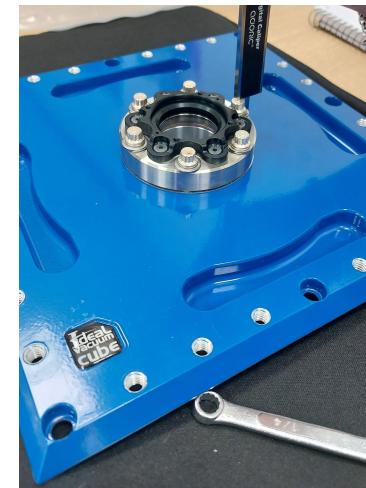
## El Experimento en LAMBDA: El Sistema



Un cubo azul protege al Skipper-CCD de la luz del ambiente y lo mantiene en vacío

## El Experimento en LAMBDA: La Ventana

Para poder iluminar al sensor desde el exterior, era necesario **instalar una nueva tapa** con una ventana **que deje entrar la luz...**



Un cubo azul protege al Skipper-CCD de la luz del ambiente y lo mantiene en vacío

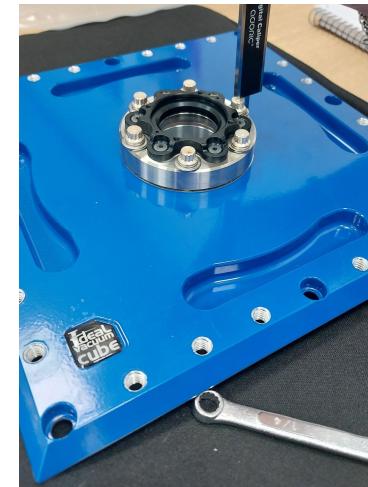
## El Experimento en LAMBDA: La Ventana

Para poder iluminar al sensor desde el exterior, era necesario **instalar una nueva tapa** con una ventana **que deje entrar la luz**... Pero el sistema no está en un cuarto oscuro:

Necesitamos un **sistema robusto para proteger al sensor** de la radiación ambiente ajena a los experimentos



Nueva tapa  
en su envoltorio



Nueva tapa  
con el vidrio  
instalado

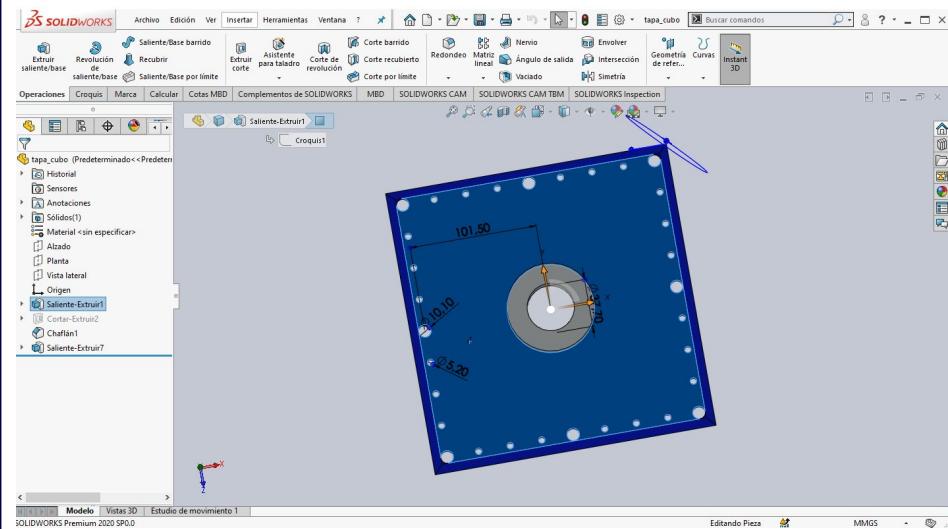
Tuvimos que diseñar un módulo que permita instalar la nueva tapa manteniendo protegido el sensor

## Diseño del Módulo

En todo el desarrollo mantuvimos dos enfoques: **Hermeticidad & Modularidad**

Esto nos llevó a pensar en dos piezas:

- **Shutter** como medida de seguridad para bloquear toda luz del exterior del cubo
- **Cavidad** como área de trabajo para contener la electrónica y óptica



Diseñamos un shutter que permite cubrir la ventana manualmente

## Diseño del Módulo: 1<sup>er</sup> Versión del Shutter

### Diseño

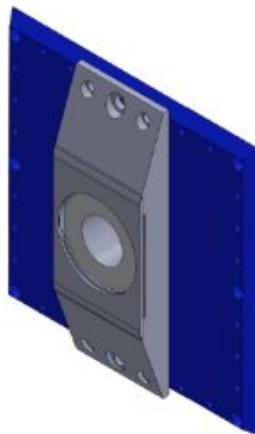
a) Vista superior



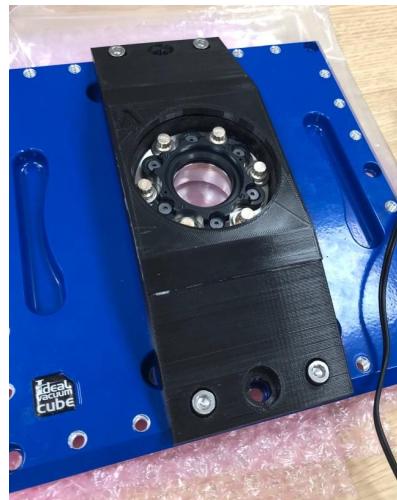
b) Vista lateral derecha



c) Perspectiva del dispositivo montado sobre la tapa

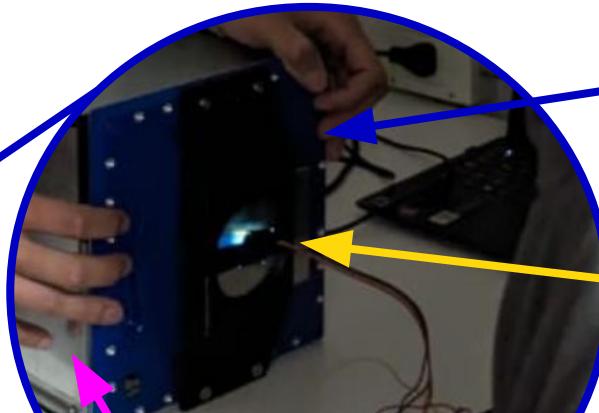
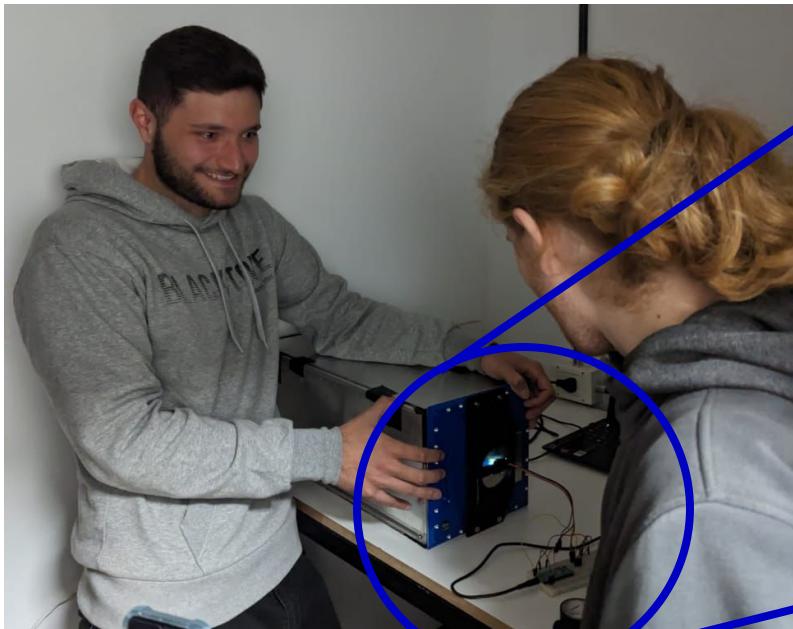


### Fabricación



Confirmamos a “1<sup>er</sup> orden” la opacidad del diseño

## Diseño del Módulo: Prueba de opacidad



Adentro un fotodiodo para medir la potencia lumínica que logra pasar por el shutter

1° iteración del shutter montada sobre la tapa a instalar

Pantalla OLED

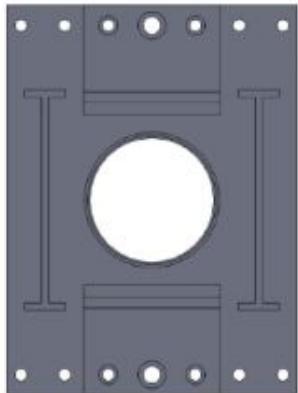
Raspberry Pi Pico y electrónica para controlar la pantalla

Diseñamos una segunda versión corrigiendo medidas y con encastres para la cavidad

## Diseño del Módulo: 2<sup>da</sup> Versión del Shutter

### Diseño

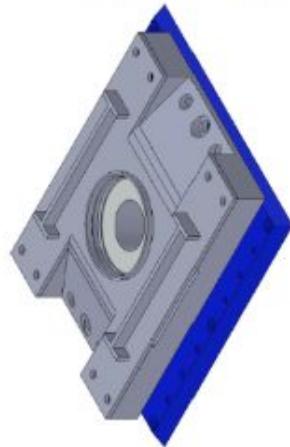
a) Vista superior



b) Vista lateral derecha



c) Perspectiva del dispositivo montado sobre la tapa



### Fabricación

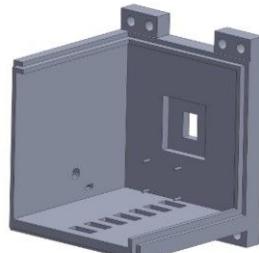
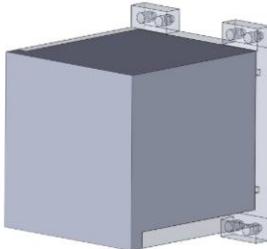


Diseñamos la cavidad donde se ubicará el experimento

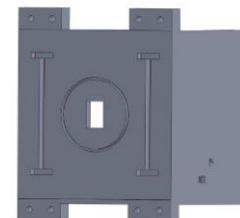
## Diseño del Módulo: 1<sup>er</sup> Versión de la Cavidad

### Diseño

a) Perspectiva de la cavidad con la tapa colocada

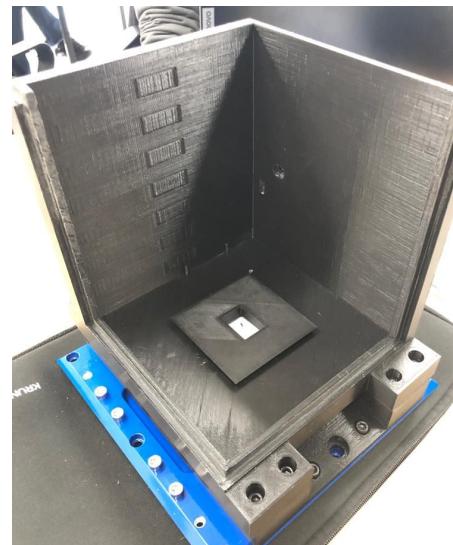


b) Perspectiva de la cavidad sin la tapa colocada



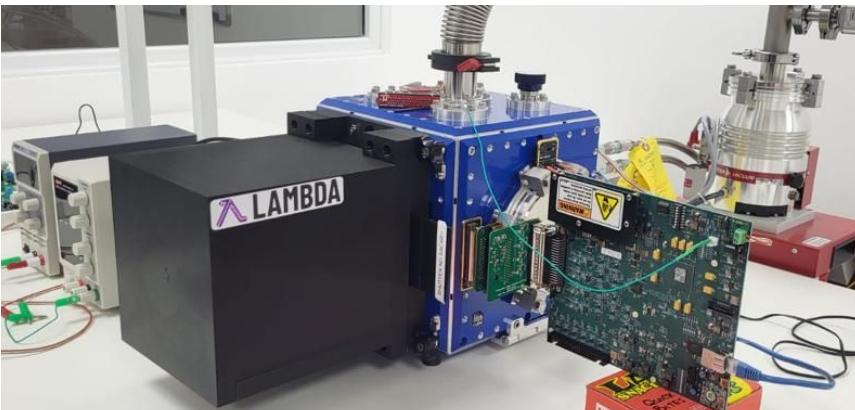
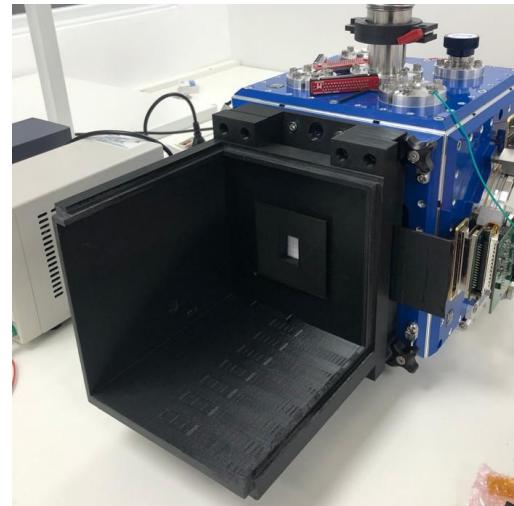
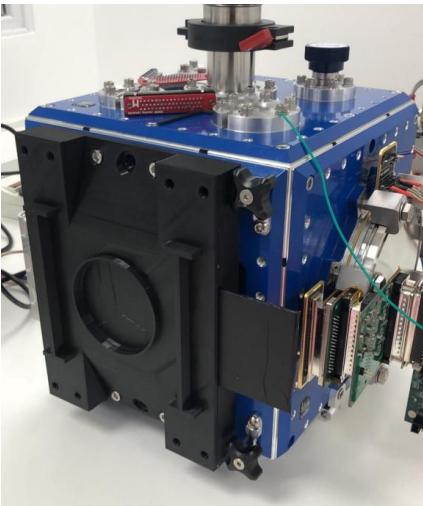
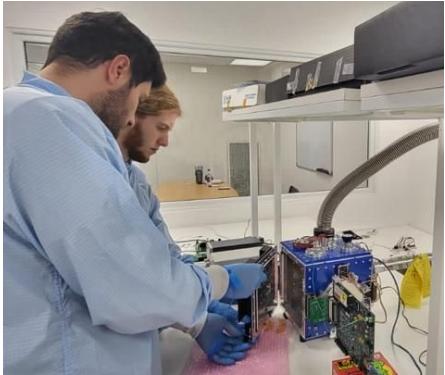
c) Perspectiva frontal de la cavidad sin la tapa colocada

### Fabricación



Instalamos la nueva tapa junto con el módulo que diseñamos

## Instalación del Módulo

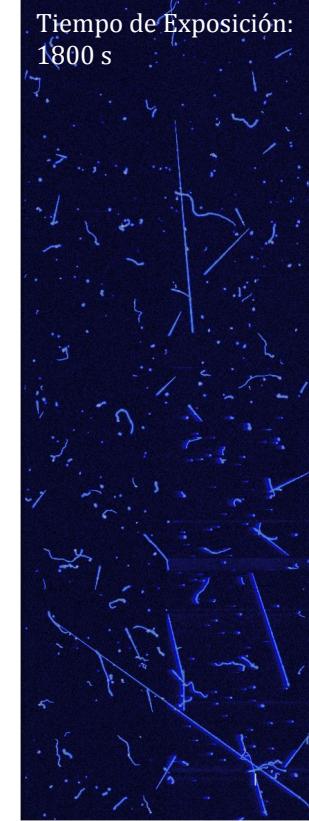
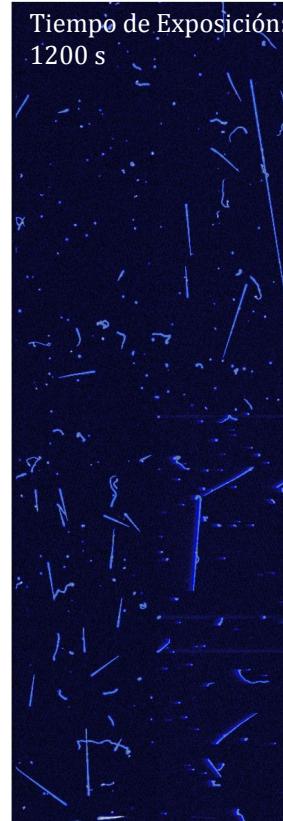
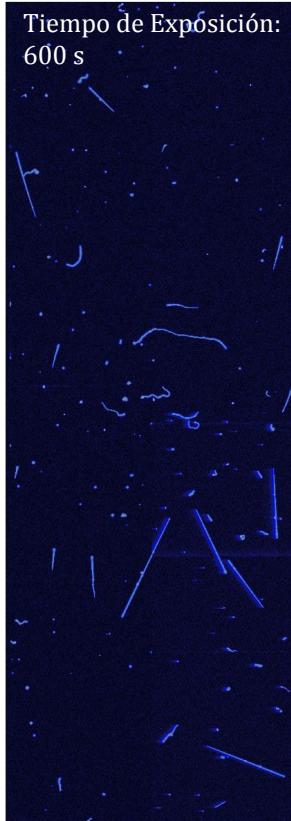


Realizamos múltiples mediciones con Skipper-CCD variando el tiempo de exposición

## Midiendo con Skipper

Tuvimos que aprender:

- Conexión remota por SSH a **MINILAMBDA** (la PC del experimento)
- Comunicación mediante comandos en terminal de **Linux** y scripts de **Bash**
- Efecto de los parámetros cómo el **número de muestras y tiempo de exposición**
- Análisis de imágenes de CCD en **Python**



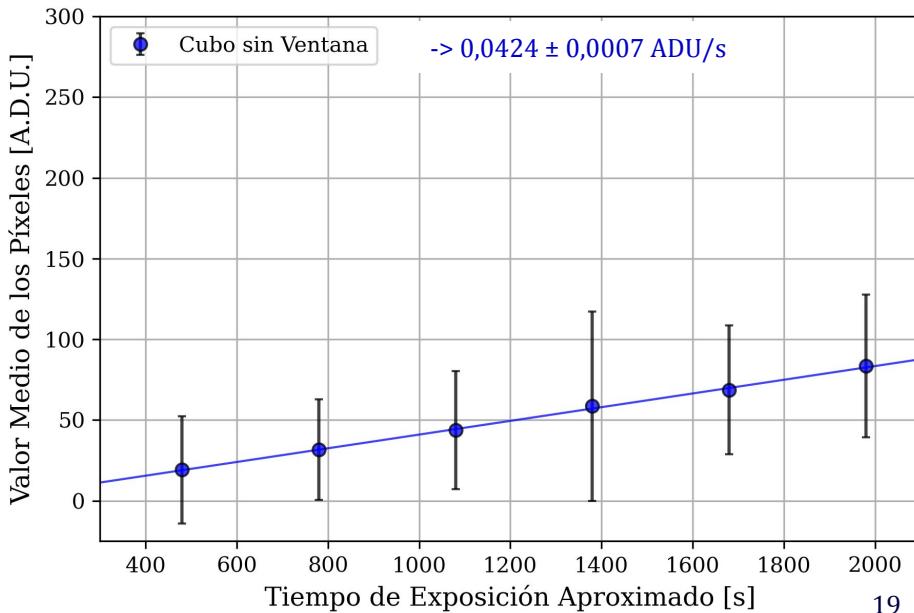
Ejemplos imágenes que obtuvimos con Skipper-CCD

Estudiamos el efecto de nuestra modificación en el nivel de fondo de las imágenes

## Efecto del Módulo en el Nivel de Fondo

Realizamos mediciones con el Skipper en distintas configuraciones para validar la hermeticidad el módulo.

Luego **calculamos la carga media por píxel por unidad de tiempo** en cada caso.



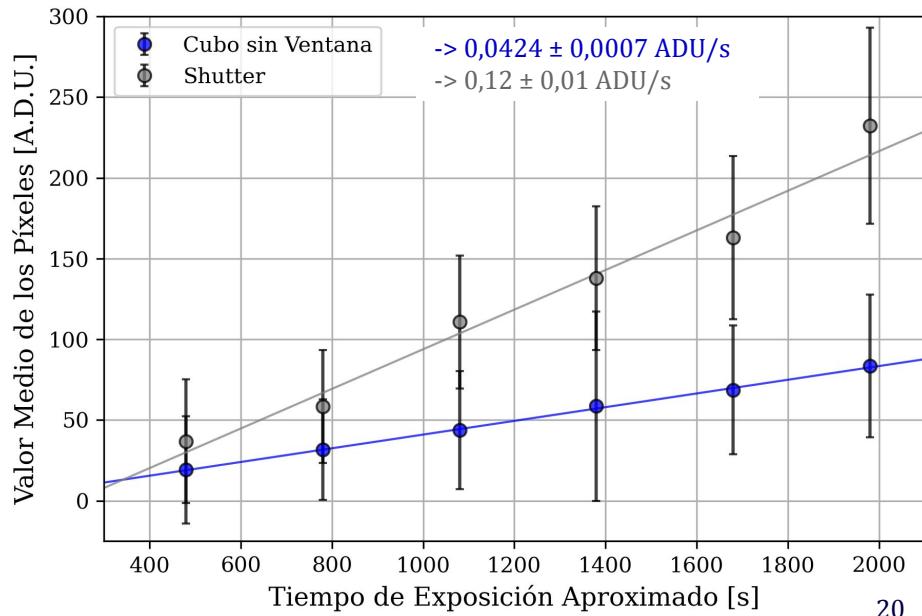
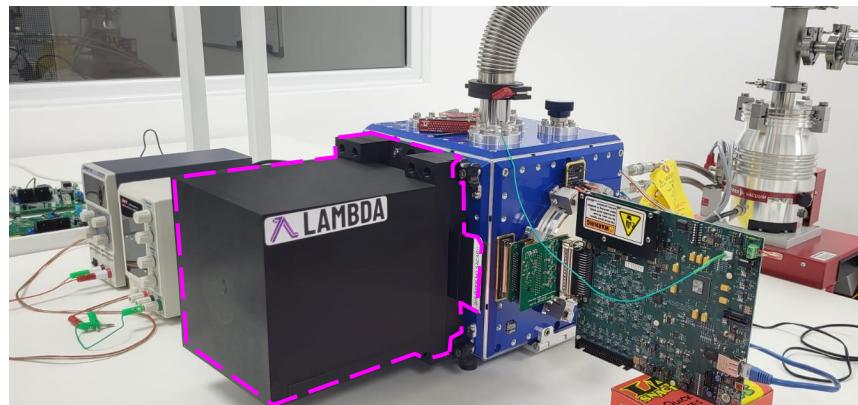
Estudiamos el efecto de nuestra modificación en el nivel de fondo de las imágenes

## Efecto del Módulo en el Nivel de Fondo

Realizamos mediciones con el Skipper en distintas configuraciones para validar la hermeticidad el módulo.

Luego **calculamos la carga media por píxel por unidad de tiempo** en cada caso.

Primero observamos que existían filtraciones significativas.



Estudiamos el efecto de nuestra modificación en el nivel de fondo de las imágenes

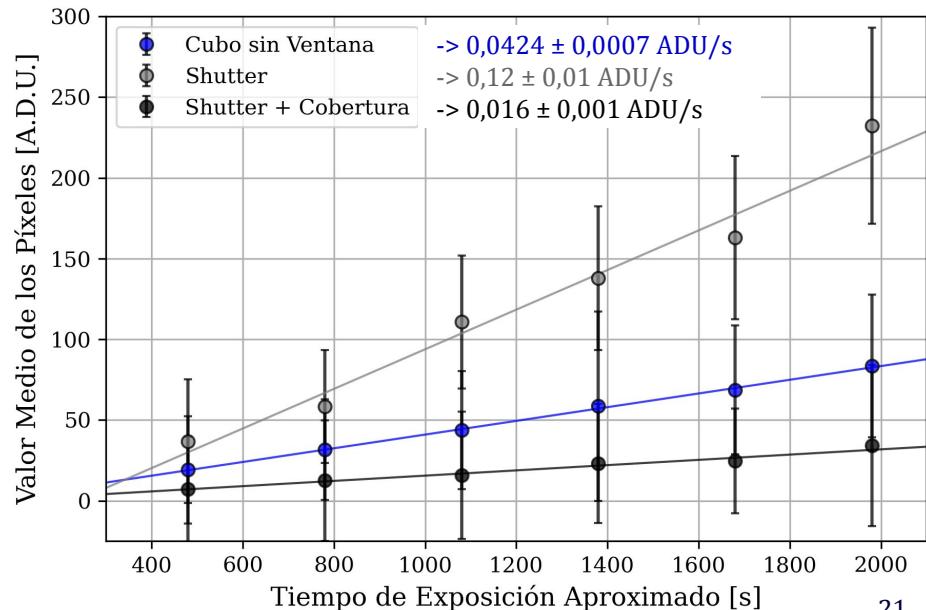
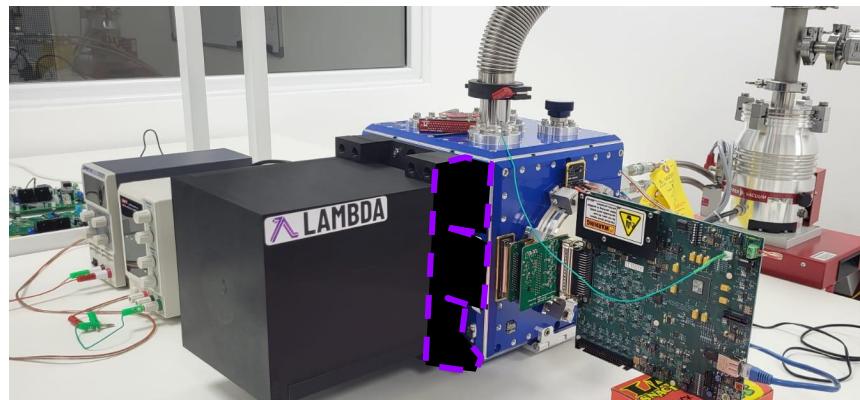
## Efecto del Módulo en el Nivel de Fondo

Realizamos mediciones con el Skipper en distintas configuraciones para validar la hermeticidad el módulo.

Luego **calculamos la carga media por píxel por unidad de tiempo** en cada caso.

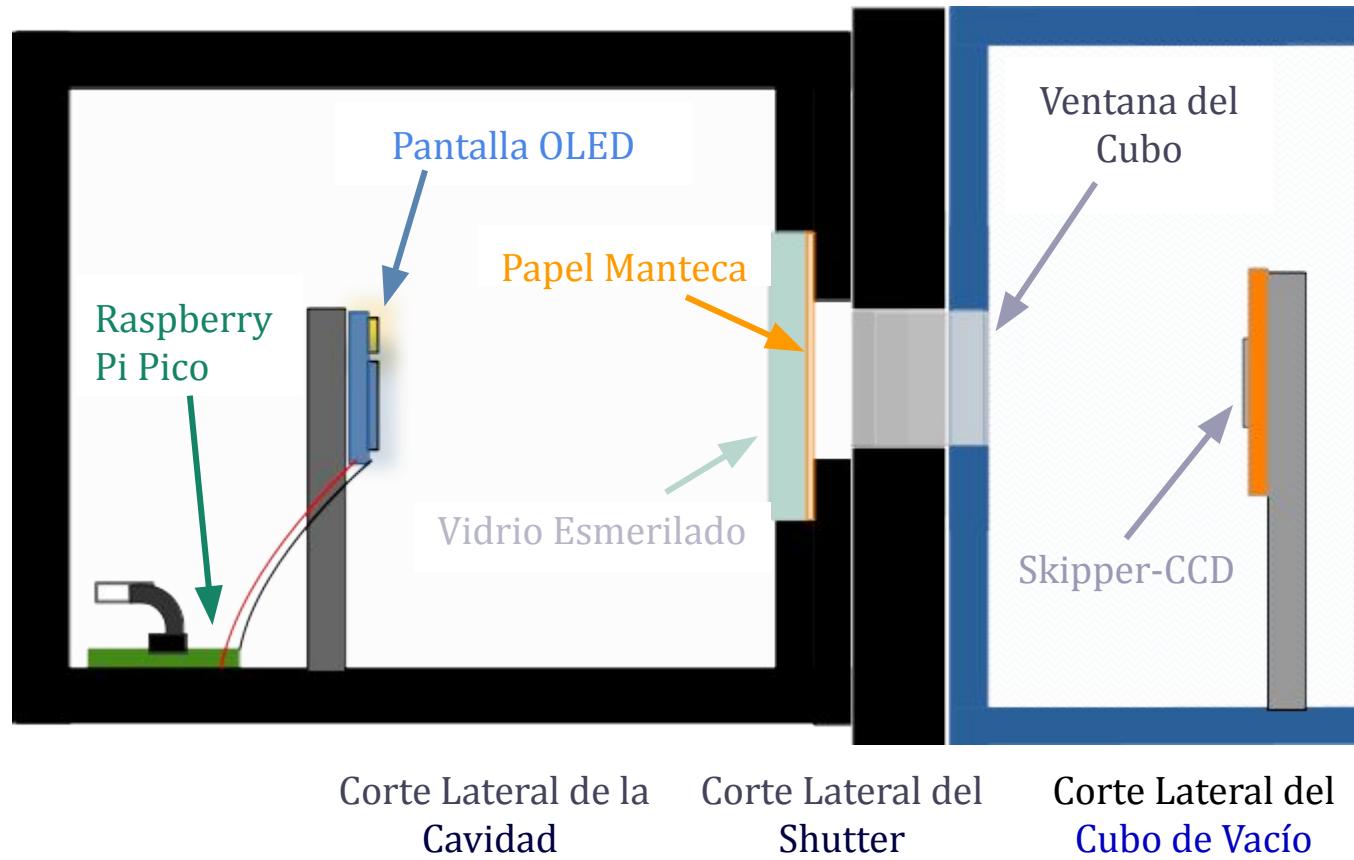
Primero observamos que existían filtraciones significativas.

Pero pudimos identificar su fuente y corregirlas.



Planeamos difuminar la luz de una pantalla OLED con papel manteca y/o vidrio esmerilado

## Homogeneidad mediante Dispersión



# Perspectivas

- **Implementar y caracterizar** el sistema de iluminación homogénea variando:
  - La fuente de luz (OLED monocanal, OLED RGB, LCD, etc)
  - Las obstrucciones (papel manteca, vidrio esmerilado, papel manteca y vidrio esmerilado, etc...)
- **Aplicar el método de Pocket-Pumping** con nuestro sistema instalado:
  - Reproducir el método con algoritmos pre-existentes
  - Analizar posibles alternativas
- **Caracterizar las trampas halladas** en el sensor:
  - Mediante algoritmos convencionales de procesamiento de imágenes
  - Optimizando algoritmos para la identificación de los dipolos en CCDs

En LAMBDA nos transfirieron conocimientos relevantes para la investigación en física experimental

# Capacitación Recibida

## Aspectos Teóricos:

- Funcionamiento, defectos, ventajas, limitaciones y aplicaciones de sensores **CCD** y **Skipper-CCD**
- Marco teórico del **modelo estándar, neutrinos y candidatos a materia oscura**

## Aspectos Experimentales:

- **Manejo de herramientas:** soldador, agujereadora de mano, lima, lija, etc
- **Desarrollo de piezas 3D** en Solidworks:
  - Técnicas de diseño hermético para sistemas ópticos
  - Diseño para impresión 3D
- Programación en **microcontroladores Raspberry Pi Pico** para:
  - Control de pantalla OLED
  - Control de obturador electrónico
- **Medición con Skipper-CCD:**
  - Manejo remoto de una PC mediante protocolo SSH
  - Análisis de imágenes de CCD

## Aspectos Administrativos y de comunicación de la ciencia:

- Confección de un resumen para su presentación en un congreso científico (RAFA 2023)
- Revisión en la práctica de la defensa doctoral de un miembro de LAMBDA

## Conclusiones

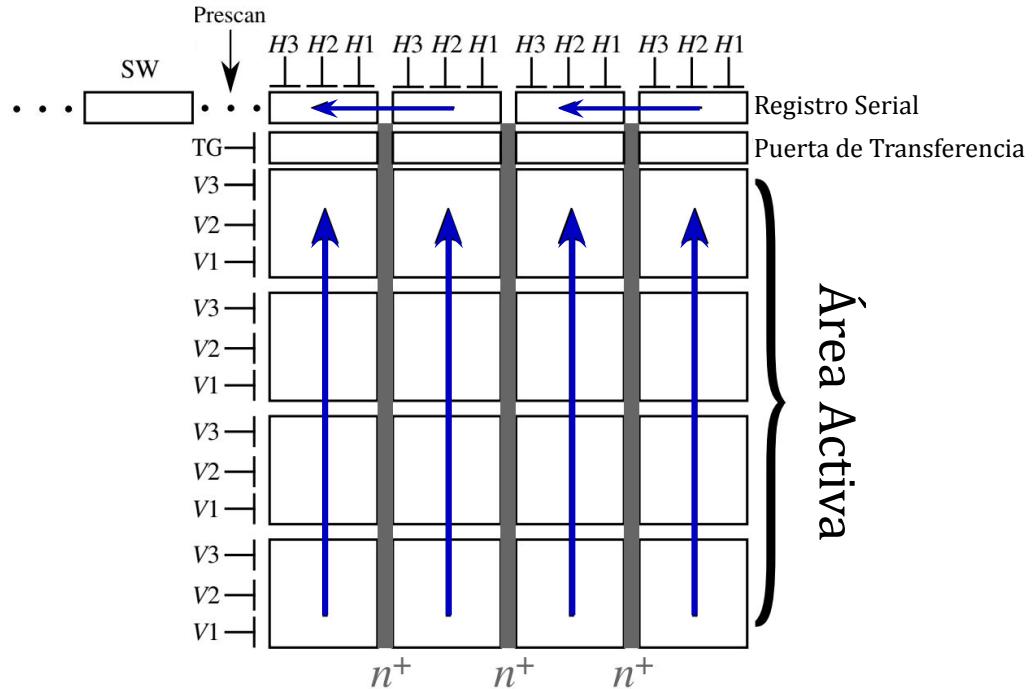
- **Desarrollamos e implementamos un nuevo módulo** para una configuración experimental previo del laboratorio **permitiendo realizar nuevos experimentos** de óptica y de caracterización de los Skipper-CCD.
- **Corroboramos la hermeticidad del nuevo set-up** observando que no aumenta significativamente el fondo en los sensores.
- **Desarrollamos la electrónica y código necesarios para iluminar homogéneamente** el sensor y optimizar el sistema para la aplicar Pocket-Pumping.
- **Nos integramos al día a día de un laboratorio** de investigación de frontera discutiendo ideas y procesos con sus miembros y con nuestros compañeros.



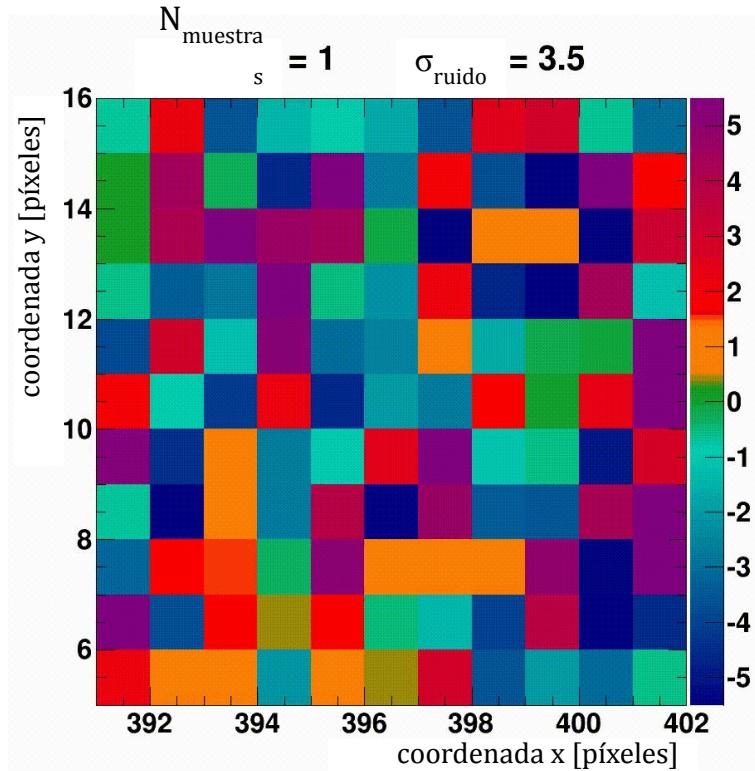
¡Muchas Gracias por Escucharnos!

---

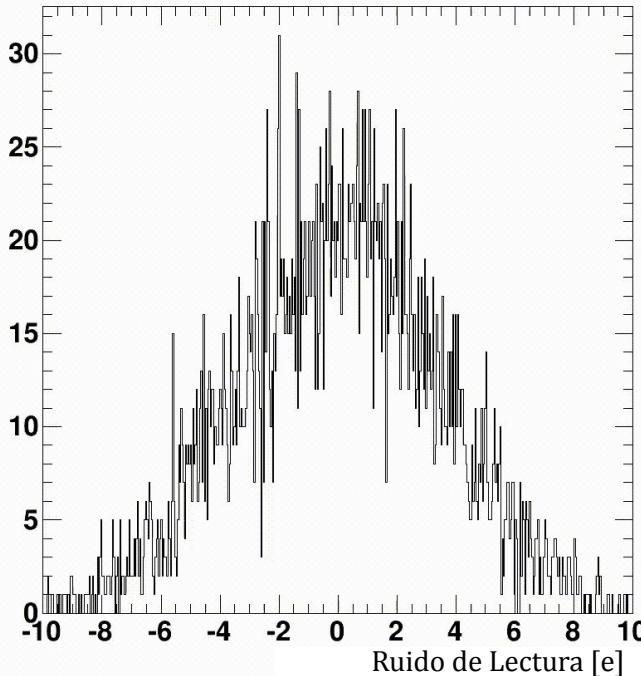
¿Preguntas?



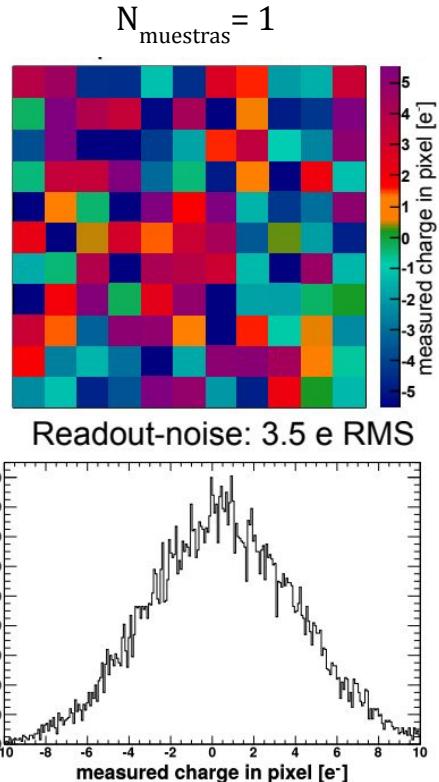
## Sensores Skipper-CCD



Mediante **repetidas lecturas no destructivas de la carga** en cada píxel se alcanzan **ruidos de lectura sub electrónicos**



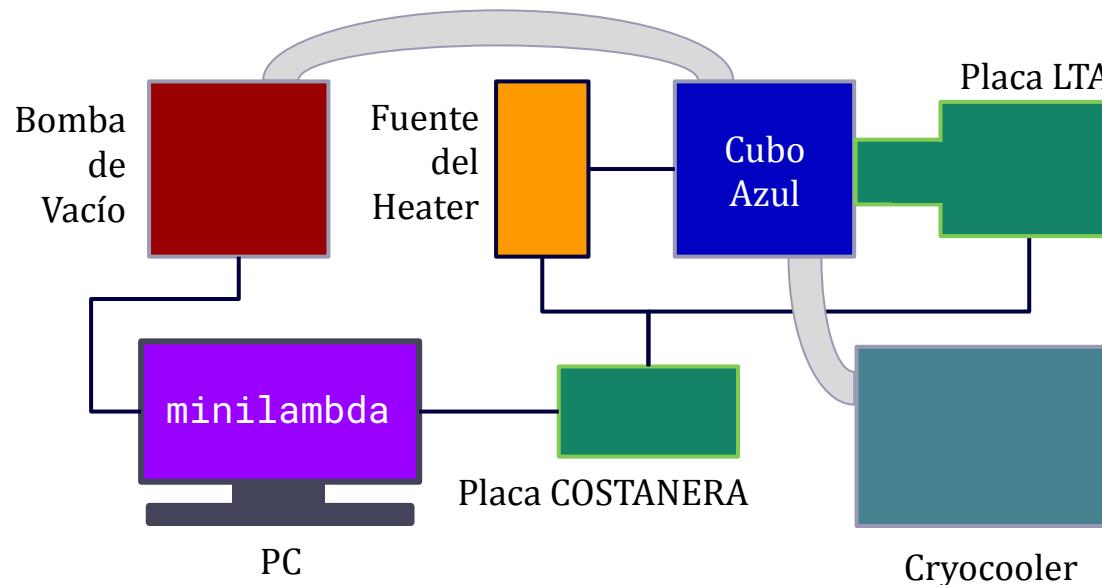
# Sensores Skipper-CCD



Mediante **repetidas lecturas no destructivas de la carga** en cada píxel se alcanzan **ruidos de lectura sub electrónicos**

Un cubo azul protege al Skipper-CCD de la luz del ambiente y lo mantiene en vacío

## El Experimento en LAMBDA



Esto quedó de la anterior.

# El Problema de las Trampas

En LAMBDA trabajan con sensores *Skipper-CCD*, capaces de medir con niveles de ruido *sub-electrón*.

Uno de los problemas que surgen al utilizar este tipo de detectores es la presencia de **trampas en el silicio** que generan excesos de carga al momento de medir.

Nuestro proyecto de Labo 6 consiste en **desarrollar un sistema que facilite la identificación de dichas trampas** mediante el método de Pocket-Pumping.

Sensor Skipper-CCD



Esto quedó de la anterior.

# El Objeto del Experimento

Para optimizar el proceso de identificación de las trampas **se requiere iluminar al sensor con una fuente de luz homogénea** sobre el mismo.

Queremos desarrollar un sistema que permita esto **manteniendo al sensor seguro** (ya que el mismo es extremadamente sensible y puede dañarse si se le ilumina con una intensidad mayor a un cierto umbral).

“Cubo Azul” que contiene un sensor



Esto quedó de la anterior.

# Los Pasos a Seguir

**Acondicionar una nueva compuerta con apertura para la cavidad del sensor que permita iluminarlo desde el exterior con extremo cuidado. Luego, montar un sistema óptico que ilumine de manera homogénea al sensor.** Todo esto implica:

- Diseño e impresión de piezas 3D
- Diseño de circuitos y mecanismos de control
- Medición con Skipper-CCD y análisis estadístico de las imágenes recuperadas

