



UNIVERSIDAD DE BROWN

HIGH-LUMINOSITY OUTER TRACKER UPDATE, CMS EXPERIMENT

---

## Prácticas Verano 2024

---

*Autor:*

Raúl Penagos Solórzano

*Supervisor:*

Ulrich Heintz

*Tutor :*

Pablo Martínez Ruiz del Árbol

18 de junio a 2 de agosto de  
2024

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Grupo CMS, Universidad de Brown . . . . .	2
1.2. CERN y CMS . . . . .	2
1.3. Tracker y Outer Tracker . . . . .	3
<b>2. Los módulos del Outer Tracker: PS y 2S</b>	<b>5</b>
2.1. Módulos PS . . . . .	6
2.2. Módulos 2S . . . . .	6
2.3. Obleas: ' <i>wafers</i> ' . . . . .	6
2.4. <i>Baby Sensors</i> . . . . .	7
2.5. Recocido: ' <i>Annealing</i> ' . . . . .	8
<b>3. Mi trabajo:</b>	<b>9</b>
3.1. Pruebas a sensores y diodos . . . . .	9
3.1.1. Método experimental . . . . .	9
3.2. Quality check . . . . .	12
3.3. Montando módulos PS . . . . .	13
3.4. El transporte de módulos . . . . .	14
3.4.1. <i>Carrier plates</i> . . . . .	14
3.4.2. <i>Carrier boxes</i> . . . . .	14
3.5. <i>Probe Station</i> . . . . .	15
<b>4. Conclusiones</b>	<b>17</b>
<b>5. Referencias</b>	<b>19</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Grupo CMS, Universidad de Brown

Durante seis semanas he trabajado junto al grupo CMS bajo la dirección de Ulrich Heintz en la Universidad de Brown. Este grupo de investigación centra su labor en la actualización de alta luminosidad del 'outer tracker' del *Compact Muon Solenoid*.

Este grupo está formado por varios Phd, estudiantes de doctorado y técnicos muy especializados. Los físicos con los que más he colaborado han sido Eric Spencer, Philipp Wagenknecht, Yarelis Acebedo y el Phd Andrei L Korotkov.

El trabajo realizado se ha llevado a cabo en dos de los Laboratorio de Física de Altas Energías y un *Clean Room* en el edificio *Barus and Holley* de la Universidad de Brown. Además de una visita puntual al RINSC (*Rhode Island Nuclear Science Center*) perteneciente a la Universidad de Rhode Island. Esta labor se ha centrado principalmente en el estudio de las propiedades de los detectores de silicio radiados con el fin de conocer la variación en su rendimiento con el paso del tiempo.

### 1.2. CERN y CMS

Para tener una visión general del trabajo realizado, es necesario entender la función del CERN (*European Organization for Nuclear Research*), situado en Ginebra. En este centro de investigación, uno de los más grandes y mejor dotados económicamente del mundo, multitud de centros de investigación y universidades europeas, americanas y asiáticas, entre otras, colaboran en la medida de sus posibilidades en diversos experimentos, especialmente en el campo de la Física de Partículas.

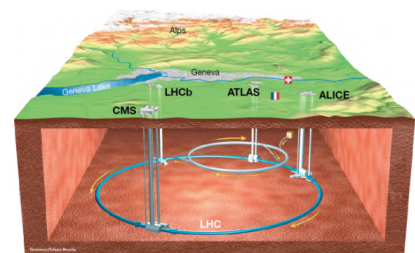


Figura 1.1: Diagrama de los cuatro detectores del LHC.

las.

Además de una inmensa red de ordenadores y un servidor que ofrece capacidad de computación a investigadores alrededor del globo, cuenta con el acelerador de partículas más poderoso actualmente, el LHC (*Large Hadron Collider*) Fig. (1.1). En este, un sistema de varios aceleradores e imanes superconductores acelera dos haces de partículas altamente energéticas que se acaban haciendo girar en sentidos opuestos por dos conductos en un toroide de 27 km de diámetro. Finalmente, se cruzan ambos haces en uno de los cuatro detectores y se estudia el resultado de estas colisiones. Estos detectores son CMS, ALICE, ATLAS y LHC-b.

El primero de estos grandes detectores, CMS (Compact Muon Solenoid), es un detector multipropósito que realiza experimentos en campos muy diversos, desde verificar el Modelo Estándar hasta estudiar la materia oscura. Teniendo los mismos objetivos que ATLAS, utiliza tecnologías distintas y trabaja de forma totalmente independiente. En la imagen Fig. (1.2) se ve su estructura interna: las cámaras de muones (rojo y blanco), el solenoide superconductor (cilindro blanco), el calorímetro de hadrones (amarillo), el calorímetro electromagnético (turquesa) y el 'Silicon Tracker' (azul).

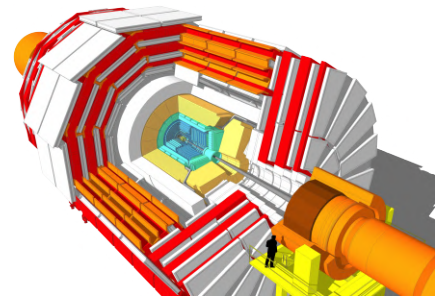


Figura 1.2: Sección del detector CMS.

Los detectores funcionan durante un periodo de unos pocos años de forma continua, con a penas posibilidad de realizar mantenimiento. Por esto, pasados unos años, se llevan a cabo actualizaciones a gran escala, como es la programada para 2028 'High Luminosity update'. En esta, se reemplazarán los módulos dañados y, en general, todos los detectores por unos con mayor resolución, especialmente en el *Tracker* y calorímetro.

### 1.3. Tracker y Outer Tracker

La estructura conocida como *tracker* tiene la capacidad de seguir la trayectoria de muones altamente energéticos, electrones y hadrones producidos en los distintos eventos estudiados. Esto es posible gracias a una red de sensores de silicio de tipo *pixel* y *strip*, los cuales se describirán más adelante. Tratándose de la parte del detector CMS más cercana al conducto donde se producen las colisiones, es la más expuesta a radiación. Con la actualización se espera que los detectores de las partes más lejanas del *tracker* reciba una exposición a neutrones superior a la recibida por los módulos actuales situados a tan solo 20 cm del *barrel* [3]. Por tanto, todas sus

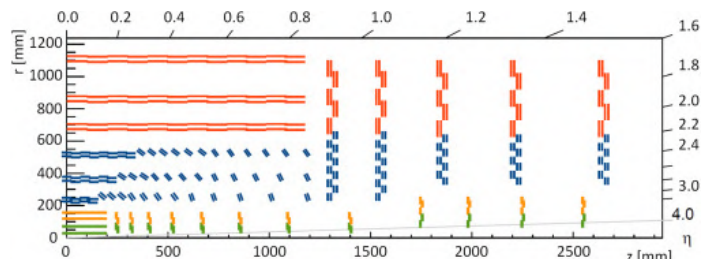


Figura 1.3: Disposición de los sensores en el Tracker.



partes han de ser estudiadas para asegurar un correcto funcionamiento en estas condiciones.

El grupo CMS de la Universidad de Brown trabaja en la actualización del *outter tracker*, la parte más externa del tracker. Con forma de barril, tiene un cilindro y dos tapas cubiertas con detectores posicionados que se superponen con inclinación óptima para permitir que los eventos de interés no pasen desapercibidos con el sistema de trigger actual, Fig. (1.3).



Figura 1.4: Imagen del detector CMS

## Capítulo 2

# Los módulos del Outter Tracker: PS y 2S

Como se ha mencionado, existen dos tipos de módulos que permiten seguir la trayectoria de las partículas de estudio, estos son los módulos PS (*pixel-strip*) y 2S (*strip-strip*). Estos *sandwiches* de distinto tamaño están compuestos por una pareja de sensores de silicio del tipo indicados por su nombre, los cuales se conectan a chips de alimentación y lectura. De este modo permiten conocer la posición por la que pasan partículas en un determinado momento de tiempo, pudiendo reconstruir así su trayectoria.

Estos componentes electrónicos son increíblemente frágiles a la humedad y electricidad estática, razón por la cual se trabaja con ellos en un ambiente muy controlado en un *Clean Room*. En este, todos los aparatos y científicos están conectados a tierra para evitar dañar los sensores durante su manipulación por descargas estáticas. Igualmente, los componentes se almacenan en cajas alimentadas con aire seco y se evita su exposición a ambientes con alta humedad, pues esta también empeora su funcionamiento. Razón por la cual este tipo laboratorio cuenta con un sistema de filtrado y deshumidificación del aire. Además, para entrar al mismo es necesario vestir bata, cubre zapatos, redecilla de pelo y guantes, con el fin de evitar introducir suciedad, polvo y poder trabajar con los sensores de una forma más segura.

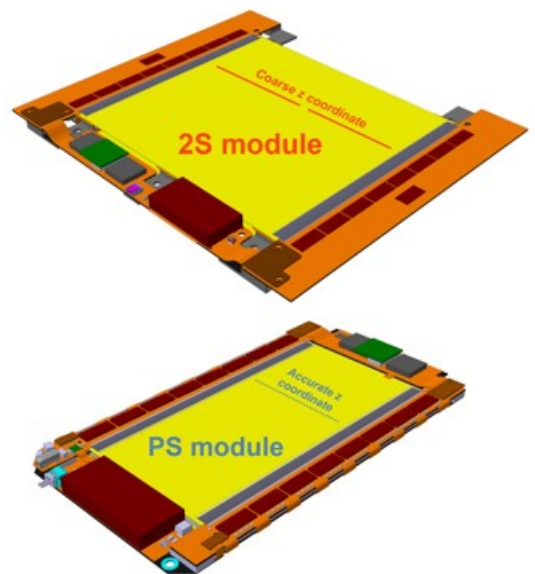


Figura 2.1: Diagrama de un módulo 2S y PS.

## 2.1. Módulos PS

Estos módulos contienen un sensor *microstrip* y otro de tipo *pixel*. Combinando ambos, se consigue una resolución superior a la obtenida con dos *microstrip*, razón por la cual se colocan en la parte más cercana a las colisiones. Tienen unas dimensiones de 5x10 cm, Fig. (2.1, inf).

Están compuestos por una base de fibra de carbono, utilizada por su buena conductividad térmica. También, un sensor de Macro Píxeles con su chip de lectura incorporado (MAPSA), y otro de tipo Strip con 960 bandas, con unos espaciadores cerámicos de por medio. Además, cuenta con cuatro *hybrids*: un chip POHv2 que le suministra energía y dos chips en los laterales PS-FEH-L y PS-FEH-R que permiten realizar la lectura de información cuando están conectados al último chip ROVv2. El ensamblaje de estos módulos es uno de los procesos que se describirá más adelante.

## 2.2. Módulos 2S

Estos módulos, con el doble de superficie, 10x10 cm, son el resultado de combinar dos sensores *microstrip*. Los sensores se fijan a una distancia conocida pegándose con espaciadores intermedios, sobre los cuales se montan los *hybrids*, con funciones similares a las descritas en el PS. Cada uno de los dos sensores cuenta con dos columnas de 1016 tiras de 90  $\mu\text{m}$  cada una. Fig. (2.1, sup).

## 2.3. Obleas: '*wafers*'

La parte principal de estos módulos, y con la que más he trabajado es el detector de silicio. Estos son fabricados por la empresa japonesa Hamamatsu en forma de obleas circulares de Si. Mediante un proceso complejo que incluye grabados químicos, recocido, pulverización catódica y la metalización con aluminio, se obtienen sensores con estructuras de prueba adicionales como son los *Baby sensors* y los diferentes diodos. Previo a su envío hasta los distintos laboratorios, Hamamatsu rompe las *wafers* para separar el sensor del resto de estructuras, las cuales se conocen como *halfmoons*, Fig. (2.2). Cuando las obleas no se encuentran divididas, cuentan con un corte que indica una de las direcciones cristalinas del silicio, esta facilita el *cleaving*. Esta técnica consiste en romper el silicio de una forma limpia, utilizando una punta de diamante en las direcciones cristalinas.

El interés de estas *halfmoons* es enorme, al ser exactamente del mismo material que el detector de Silicio con el mismo número identificador. Por tanto, estudiando las propiedades de esos diodos o *baby sensors*, que no dejan de ser sensores del mismo tipo (micro strip sensors) con un menor tamaño y número de tiras, se pueden conocer las propiedades y evolución con el tiempo y radiación de los sensores reales sin ponerlos en riesgo.

Cada detector fabricado por Hamamatsu está identificado por un número, por ejemplo:

$$48234\_049\_2 - S\_HM\_XX \quad (2.1)$$



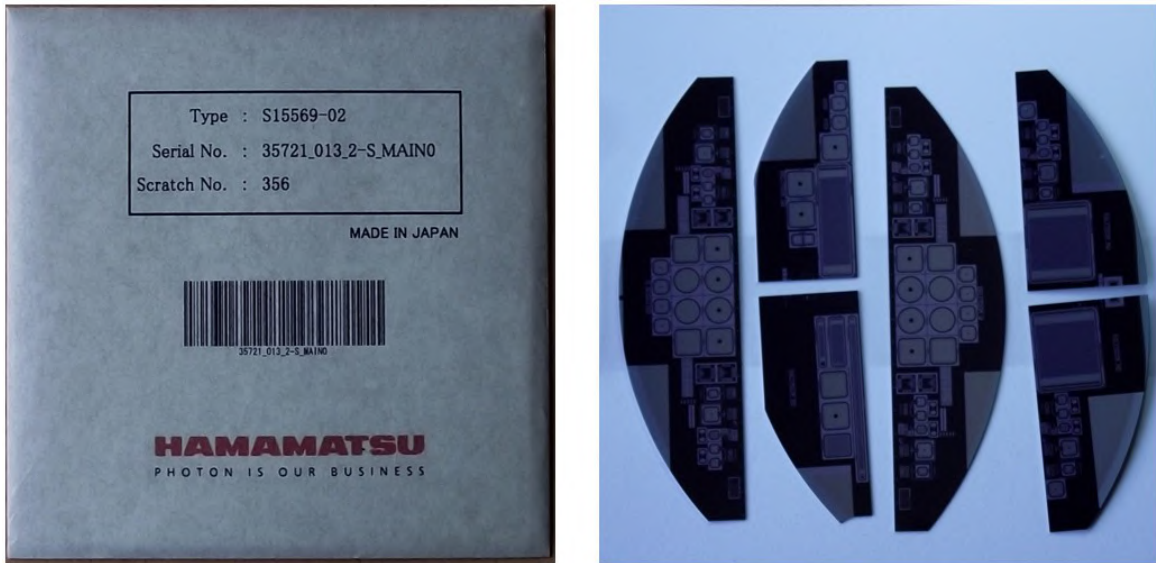


Figura 2.2: Sobre de Hamamatsu y halfmoons que contiene, de un antiguo sensor PS.

Donde las primeras seis cifras identifican el lote (*batch number*), dando información sobre su antigüedad, siendo 50... los más recientes y 30... más antiguos. El siguiente número '049' identifica el número del sensor dentro de los 49 de ese lote. Por último, 2 – S identifica el tipo de sensor, un sensor microstrip 10x10 en este caso, y HM indica que en este sobre encontramos los recortes con estructuras de test o *halfmoons*.

Puesto que solo se ha trabajado comprobando *strip sensors*, y no de tipo *Pixel*, pues estos se analizaban en otro centro. La única diferencia entre los sensores marcados como PS o 2 – S es si el sensor de bandas está dividido en dos, para un par de módulos PS, o es uno del doble de superficie y cuadrado para los 2-S. En el primer caso, dos de las *halfmoons* estarán también divididas en mitades.

## 2.4. Baby Sensors

Como se ha comentado, los *Baby sensors* son uno de los elementos de verificación de los detectores y consisten en un pequeño sensor de silicio del mismo tipo que el real de esa oblea. Es decir, un microstrip sensor, justo a lado de cuatro diodos de distintos tamaños: 'Diode', 'Diode half', 'Diode halfPSTOP' y 'Diode Quarter'.



Figura 2.3: Baby Sensor y cuatro diodos.

A cada una de estas estructuras, Fig. (2.3), se les realizan medidas previas y posteriores a recibir radiación con neutrones, de forma que podemos definir si el sensor real será apto para el nivel de radiación que recibirá en el LHC.



## 2.5. Recocido: '*Annealing*'

El *annealing* es un concepto importante una vez los diodos y sensores han sido radiados. De forma general, hace referencia a un tratamiento térmico por el cual se ablanda un material, recuperando así su estructura y eliminando tensiones internas.

Cuando se irradian los sensores y diodos de Si, algunos átomos se desplazan de su posición original en la red cristalina como resultado de la interacción con neutrones energéticos, aumentando su conductividad. El objeto de estudio es el comportamiento de los componentes cuando su red está dañada, por tanto, se quiere evitar que los daños realizados por la radiación se reviertan. Para frenar el *annealing* se enfrían los componentes, pues esto ralentiza fuertemente el proceso. Por ejemplo 1min@60C (1 minuto de *annealing* a 60 C) es equivalente a 100min@20C o 1000min@0C.

En el detector real, el annealing se utiliza para reparar parte del daño que reciben los sensores tras una ronda de medidas. Para esto se les calienta durante un determinado periodo de tiempo, lo que mejora su rendimiento. La función del *depletion voltage*  $V_{dep}$  (el voltage para el cual no se tiene ningún portador de carga en la unión pn) en función del tiempo de annealing aplicado a un sensor radiado se puede optimizar, llegando a 80min@60C.

# Capítulo 3

## Mi trabajo:

### 3.1. Pruebas a sensores y diodos

El método empleado para analizar el comportamiento de los sensores parte de una idea simple: medir las características de los Baby sensor radiados y comprobar como varía, utilizando además elementos adicionales para medir la cantidad de partículas energéticas que recibe o *fluence*.

#### 3.1.1. Método experimental

Primero, los Baby sensors se obtienen de los *halfmoons* mediante la técnica de *wafer cleaving*. Para esto, se araña el borde de la oblea en la dirección de una de las direcciones cristalinas, logrando así crear secciones rectangulares. Estos se etiquetan y almacenan.

Para medir el flujo al que se expone cada Baby Sensor se utilizan dos tipos de diodo: Diodos pin y diodos  $D\emptyset$ , además de láminas de Fe. Estos tres métodos se combinan y corrigen para obtener un valor medio más fiable.

#### Medidas de dosis de radiación

Como se ha comentado, se cuenta con tres métodos independientes:

- El primero emplea diodos *p-i-n*, Fig. ((3.1)), estos son muy utilizados como foto-interruptores y en mandos de IR. Además, se pueden utilizar como dosímetros de hadrones rápidos [4]. Para esto se mide el voltaje  $V_f$ , es decir la tensión que se ha de aplicar con polaridad opuesta para obtener una corriente de 0,001 A. Para diodos no irradiados, nuevos, toma un valor de  $V_f \approx 0,56$  V. Sin embargo, en función de la dosis de radiación recibida, varía sustancialmente, resultando un buen método de medida.

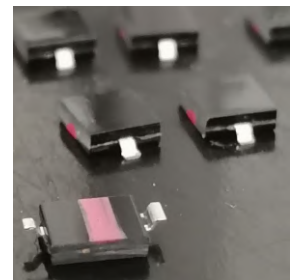


Figura 3.1: Diodo *p-i-n*.

- El segundo método utiliza diodos  $D\emptyset$ , toma su nombre del antiguo experimento  $Dzero$  del laboratorio *Fermilab*. Estos dispositivos, ver Fig. (3.2), pueden ser reutilizados años después para realizar medidas de flujo. De una forma similar, se miden las curvas CV e IV del mayor de los dos diodos de la Fig. (3.2). Conociendo la capacitancia e intensidad en función del voltaje, se calcula la corriente y voltaje de agotamiento (*depletion voltage*). Así, se puede calcular la cantidad de neutrones que lo han atravesado.



Figura 3.2: Estructura de un diodo  $D\emptyset$ . Large Diode y Small Diode

- Por último, las láminas de hierro, que en la práctica resultan el método más preciso. Este material se activa al recibir radiación, de forma que en el centro RINSC pueden medir y calcular la cantidad de neutrones recibidos.

### Medidas pre-irradiación

Los dos tipos de diodos y los baby sensors de interés se someten a medidas previas a la radiación para caracterizarlos:

- En los diodos pin se realiza una medida con una estación de puntas, para obtener el voltaje  $V_f$ . Este se espera que tenga un valor  $V_f \approx 0,65$ , en caso contrario se descartarán, debido al bajo coste de producción y la alta disponibilidad de estos componentes.
- En el caso de los diodos  $D\emptyset$ , se obtienen las curvas iv y cv en la estación de puntas. Se mide la variación de la intensidad y capacitancia al aplicar diferentes voltajes de hasta 1000 V sobre la base del diodo, midiendo con dos puntas sobre el '*bias ring*' y '*ground ring*' de la estructura '*Large diode*'. Con dichas curvas y mediante análisis vía *software* con el programa *comet*, se obtiene el valor del *Depletion Voltage*. La variación del cual permite calcular la dosis de radiación.
- Para los Baby Sensors, se realizan medidas por separado en los diodos y el sensor, en función de si alguno está dañado. Para los cuatro diodos, se toman las curvas iv y cv, todas las medidas con solo la aguja *bias*, con una medida adicional en el *diode halfPSTOP* empleando el *guard ring*. Además, en el propio sensor se realizan varios *strip tests* en una estación de puntas semiautomática Tesla 200.

### Envío de muestras al reactor

Con estos componentes se prepara un *rabbit stick*, esto es un taco alargado de madera donde se pegan con cinta antiestática algunos de estos componentes, correctamente sellados y etiquetados uno a uno. En cada cara lateral del *stick* se pegan, en general, un *pin diode* cerca de cada extremo, un  $D\emptyset$  y un *Baby sensor* más o menos centrados y una lámina de Fe.

Cada *rabbit stick*, después de ser fotografiado, se introduce en una bolsa sellada y se coloca dentro de un tubo de plástico como el de la Fig. (3.3). En el reactor nuclear experimental del RINSC, los tubos de plástico se introducen en un sistema neumático que los envía a centímetros del core de Uranio-235. Tras el tiempo de radiación deseado, se recuperan aplicando succión. Tras dejarlos en una nevera una temporada hasta que su actividad sea manejable, se retiran las láminas de Fe, que se analizan en el reactor, y se envía el resto de los *sticks* refrigerados con hielo seco a Brown para su análisis.



Figura 3.3: Tubos de plástico donde se introducen los *rabbit sticks*.

### Análisis post-irradiación

Como se ha explicado en la introducción en relación al *annealing*, se quiere evitar que los componentes se recuperen del daño recibido por la radiación, razón por la que se almacenan en una nevera. A continuación, se realizan las mismas medidas a todos los componentes, es decir, se obtienen las curvas cv e iv para todos ellos. Además, para los Baby Sensors y los diodos  $D\emptyset$  se realiza un proceso de recocido (*annealing*), obteniendo de esta forma un mayor número de puntos experimentales. Para esto, se les introduce en un horno de precisión sobre un bloque de aluminio y se calientan durante el tiempo deseado. Una vez sacados del horno, se colocan inmediatamente sobre un bloque a  $0^\circ$ , frenando bruscamente el proceso de *annealing*.

Contando con todos los datos iniciales y finales se lleva a cabo un análisis para calcular la fluencia. Para esto se utiliza el programa *Excell*, siendo Eric Spencer el principal encargado de realizar esta operación. El cálculo se puede dividir en diodos *pin* y  $D\emptyset$  y sus respectivas correcciones, de forma resumida:

- Diodos *pin*: conociendo el tiempo de radiación y *annealing*, los valores de  $V_f$  y la posición del diodo en el *stick* (cara, distancia al extremo y si se introdujo invertido en el reactor). Se calcula:

$$V_f(V) = V_f^{irrad}(V) - V_f^{preirrad}(V) \quad (3.1)$$

Donde generalmente  $V_f^{irrad}(V) \gg V_f^{preirrad}(V)$ . Con este valor se calcula el *fluence* acorde a [5], como:

$$fluence = (V_f(V - 0,0059)) / (9,5 \cdot 10^{-14}) \quad (3.2)$$

Valor al que se aplican tres correcciones. En primer lugar una corrección cuadrática en función de un ajuste realizado a todos los datos medidos anteriormente, con coeficientes:

$$quad \quad corr = fluence + 5,89 \cdot 10^{10} \cdot Irrad \quad time(min)^2 \quad (3.3)$$

Una corrección en función de la cara del bloque en la que se encuentra situado. Y por último, una corrección en función de la posición (mm) en la que se encontraba y si el *stick* se introdujo invertido.

- Diodos  $D\emptyset$ : se realiza un cálculo similar con los mismos datos y el volumen del diodo. Para estos diodos, se realiza un ajuste a 20 °C de las corrientes medidas a 0 °C y -20 °C, [6]. Se calcula la fluencia y también se corrige en función de la posición del diodo sobre el *rabbit stick*.

Los resultados que se obtienen de este extenso análisis miden la cantidad de radiación que los *Baby sensors* han recibido, la cual se espera del orden de  $10^{14}$ . Esta es la cantidad esperada para las partes situadas en el *outer tracker*, por tanto, si los *Baby sensors* funcionan correctamente después de este proceso, se esperará lo mismo de los detectores colocados en el LHC.

### 3.2. Quality check

Otra de las partes importantes para agilizar el proceso de construcción de los módulos y evitar problemas en su funcionamiento es la comprobación de que, además del sensor de silicio, todas las otras piezas: separadores, conectores, hybrids... cumplan con los estándares exigidos.

En el caso de las placas base, sensores de silicio... Se utiliza el dispositivo de la Fig. (3.4) para medir distancias relativas entre todas sus partes y así conocer si se ajustan a lo esperado, son un *marginal pass* o son inaceptables. Para esto, son imprescindibles los *fiducials* o marcadores de referencia, que permiten establecer orígenes relativos para realizar las medidas y orientar los componentes.

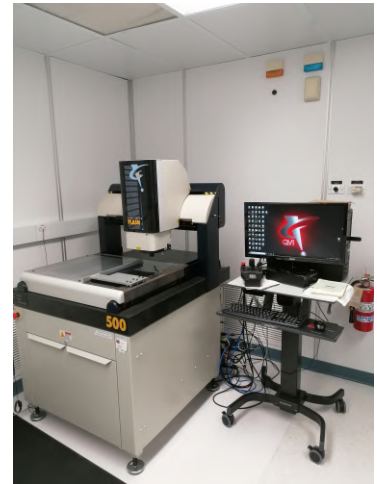


Figura 3.4: Smartscope 500.

Otro tipo de testing es el que se realiza en los *main bridges*, *stump bridges* y demás espaciadores. Estos componentes son piezas de fibra de carbono y aluminio, material utilizado por su gran conductividad térmica, que se colocan en los *sandwiches* de los módulos para asegurar que la separación entre las piezas sea la correcta. En el caso de los módulos 2S, se instalan dos de cada uno de los espaciadores mencionados. Como esta pieza determina un factor clave: la separación entre los sensores de silicio, es necesario asegurarse de que cumplan el estándar y su grosor sea el adecuado. Para esto se han de realizar varias medidas, para empezar, se miden todas sus dimensiones utilizando un calibre, luego se comprueba que los orificios sean del diámetro adecuado, con un *go-no go test*, y finalmente se utilizan dos aberturas de referencia para hacer otro *go-no go test* al ancho del espaciador, Fig. (3.5). Estos calibradores se fabrican en Brown, a razón de uno por día en el laboratorio de mecanizado, desde donde se distribuyen a otros centros.



Figura 3.5: Go-no go gauge utilizado para comprobar el grosor de los espaciadores de módulos 2S.



Tras haber testeado más de cien de estos componentes, se comprueba que si bien sus dimensiones suelen ser las correctas, es posible realizar una selección y dejar aquellos que están cerca de los márgenes de error para la construcción de módulos de prueba o *dummies*.

### 3.3. Montando módulos PS

Uno de los pasos más vitales para llegar a tener un módulo funcional es montar las diferentes partes con precisión y sin dañar las mismas. En este caso se resumirá el proceso para un módulo ps. Se parte de un Mapsa (sensor *macropixel* con *read out*), una placa base de fibra de carbono, unos espaciadores, y un sensor PSS (*microstrip*).

El proceso se lleva a cabo utilizando un brazo mecánico, Fig. (3.6) cuyo papel principal es orientar los componentes tomando sus *fiducials* como referencia. Se sujetan los componentes con una bomba de vacío y se utiliza como adhesivo Epoxy 601-LV. Primero, se aplica una capa uniforme de epoxy sobre la placa y se pega el Mapsa. A continuación, se instalan los espaciadores cerámicos bajo el detector PSS con el mismo adhesivo. Finalmente, se une el PSS con los espaciadores sobre el Mapsa.

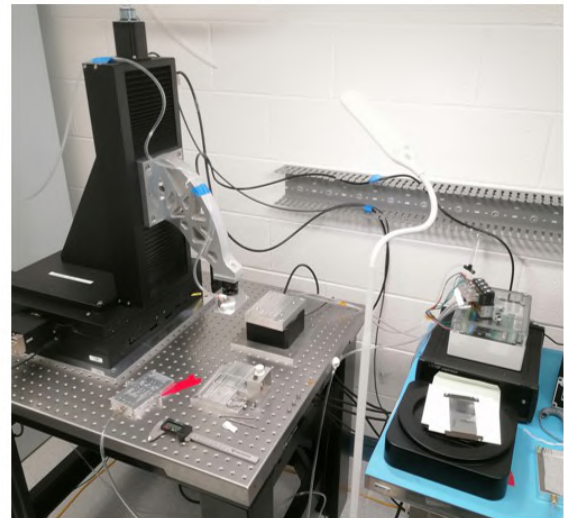
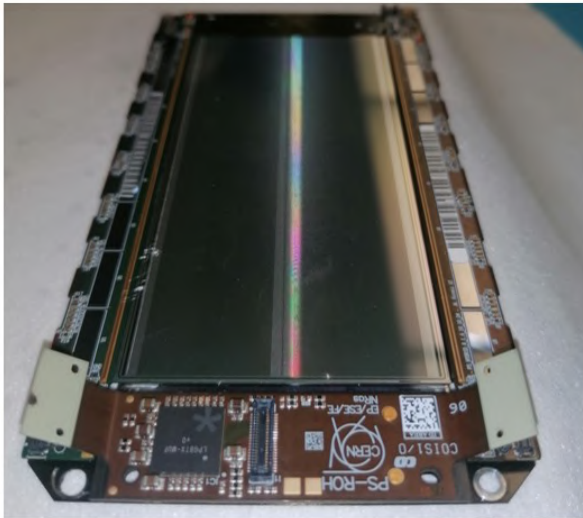


Figura 3.6: Izq: Imagen de un módulo PS parcialmente montado (a falta del power supply). Dcha: Brazo mecánico utilizado para montar los módulos.

Una vez comprobado que los dos detectores se solapan correctamente (posición y ángulo), se puede realizar el siguiente paso. Este es, instalar los *hybrids* sobre la placa base. Se empieza pegando los dos módulos laterales de *read out* del PSS, la separación entre estos y el detector de silicio es crítica, pues condiciona el *wire bonding* que se debe realizar para conectar ambos. Si las dos partes están demasiado separadas, no será posible soldar. Luego, se instala el *POHv2*, que alimenta el módulo, y se conecta con el *hybrid* lateral derecho. Por último, se coloca el híbrido ROV2, que se conecta a los dos laterales y tiene la función de transmitir toda la información registrada.

Si este paso se realiza correctamente, los módulos se envían desde la Universidad de Brown hasta Princeton, donde se termina de realizar las conexiones y un experto realiza el *wire bonding*.

## 3.4. El transporte de módulos

### 3.4.1. *Carrier plates*

Se ha insistido en que los módulos pueden pasar por varios centros de investigación antes de llegar al CMS. Para asegurar un viaje seguro se envían en *carrier plates*, como la de la Fig. (3.7). Estas placas de aluminio fabricadas a medida protegen los módulos de impactos y los tapan por ambas caras con placas de metacrilato. De esta forma, es posible apilarlos y guardarlos en contenedores de mayor tamaño sin miedo a dañar sus componentes. Muchas de estas placas son montadas con componentes de acero inoxidable, aluminio e impresión 3D en Brown.

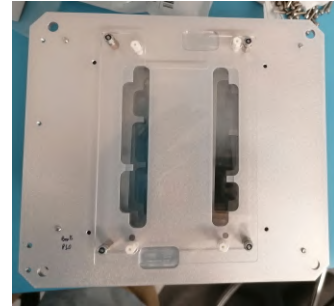


Figura 3.7: *Carrier plate*

### 3.4.2. *Carrier boxes*

Para transportar los módulos en sus *carrier plates* se introducen de 10 en 10 en cajas selladas para lograr un entorno con las condiciones adecuadas. Para esto se utiliza el tipo de cajón de la Fig. (3.8). Sin embargo, ya que no resultan estancos de manera efectiva, y las juntas suelen presentar problemas, se me encargó buscar un método para lograr que las cajas sean un método fiable.



Figura 3.8: *Carrier box*.

Durante más de un mes se han realizado tests comprobando diferentes alternativas para mantener la humedad baja asegurando la seguridad de los módulos. Utilizando un sensor de humedad se fue comprobando si las ideas resultaban efectivas. De esta forma se llegó a un protocolo que de forma resumida consta de cinco pasos:

1. Aplicar silicona anticorrosiva en la junta de la caja, solucionando problemas de fugas.
2. Introducir bolsas deshumidificantes (2 de tamaño pequeño son suficientes para varios días), pegadas en el interior de la caja con nanotape, que al carecer de ningún adhesivo químico no resulta oxidante.
3. Introducir los módulos y tapar la caja (sin los ganchos), y apretar dos cintas, en ambos sentidos de la caja. Actuarán como cierre adicional.
4. Rellenar la caja con gas de nitrógeno, 5' con presión relativa mínima bastarán para reducir la humedad al 5 %.
5. Cerrar la válvula de gas y los ganchos de la caja.

En la referencia [7], se puede encontrar una guía que he redactado y traducido a formato web, para que el resto del grupo CMS pueda seguir estas instrucciones. Estas aseguran una mejora del 20 % respecto al uso de una caja normal. Para la creación de la web, me he basado en una plantilla de *ekyll* en html y para publicar la página he utilizado *git brachning*.

### 3.5. *Probe Station*

La estación de puntas utilizada para muchos de los tests a los diodos se puede ver en la Fig. (3.9). Se divide en dos partes principalmente: por un lado la caja con control ambiental y microscopio, y por otro todos los lectores que conectados al ordenador permiten realizar medidas.

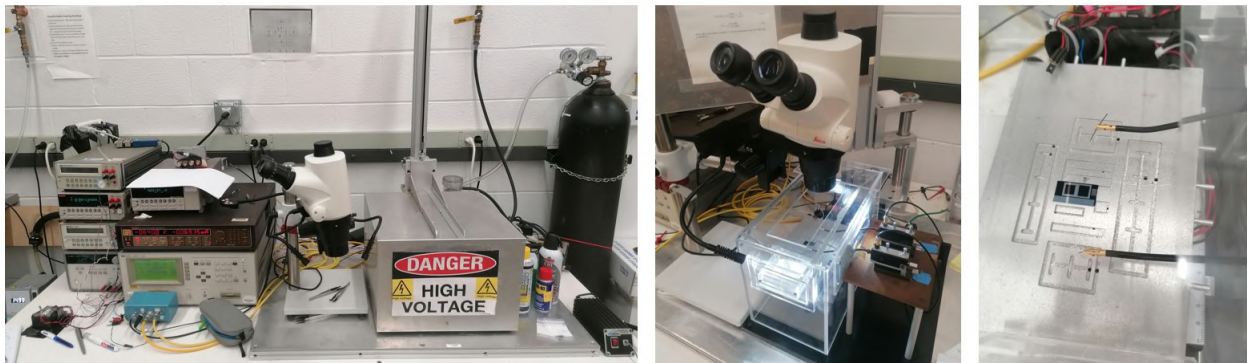


Figura 3.9: *Simple Probe station set up.*

Los componentes electrónicos se colocan sobre un bloque de aluminio, al cual se aplica un alto voltaje, y cuya temperatura se controla con conductos que circulan por su interior con refrigerante. Este fluye gracias a un *chiller* que permite ajustar la temperatura, para una mayor precisión se utilizan dos *peltiers*, de forma que automáticamente enfrían o calientan la placa hasta llegar a un equilibrio. Además, en la caja se introduce continuamente aire seco con el objetivo de reducir el punto de rocío, de tal forma que al enfriar los componentes no se produzca condensación. Dentro de la 'pecera' hay tres sensores, dos de humedad y temperatura del aire, y otro de temperatura para el bloque. También cuenta con dos controladores de tres ejes para puntas para realizar medidas. Para colocar las puntas con mayor precisión se cuenta con un microscopio con fuente de luz. Por último, a la hora de hacer medidas, por seguridad y debido

a las fotocorrientes no deseadas se oscurece la 'pecera' con una tapa metálica.

Para manipular los componentes se cuenta con pinzas antiestáticas, una pinza de vacío y una pulsera conectada a tierra para evitar descargas de estática en los componentes cuando se manipulan.

Por otro lado, los numerosos dispositivos situados a la izquierda del microscopio tienen diversas funciones. En la torre de la derecha, para realizar las medidas, una fuente de alta tensión, voltímetro y un medidor de capacitancia. En la torre de la izquierda, con 4 y 2 conexiones respectivamente, se encuentran tres óhmetros conectados a los sensores de temperatura y humedad. Debajo, está la fuente de corriente que activa los *peltiers*, con el interruptor de la caja negra se selecciona entre dos modos: calentar o enfriar. Para mantener la temperatura constante, aún oscilando, se ha comprobado que en general es efectivo establecer el refrigerador dos grados por debajo del objetivo y activar los peltiers en modo *heat*. La caja azul, conectada al capacímetro, permite cambiar con otro interruptor el setup para medir las curvas cv o iv.

Por último, en un ordenador con una interfaz en LabView, se pueden monitorizar los valores de temperatura, humedad y punto de rocío, a la vez que se toman las medidas. Dependiendo del dispositivo a medir se puede seleccionar entre distintos programas que optimizan el número y tiempo de medidas en específico.



Figura 3.10: *Edificio Barus and Holley.*



# Capítulo 4

## Conclusiones

El trabajo realizado en Brown junto al grupo CMS me ha mostrado como, con coordinación y comunicación, se organiza un gran experimento de física de partículas. Siento que mis conocimientos, ideas y puntos de vista se han enriquecido y renovado en múltiples aspectos más allá del académico. El poder aprender de primera mano de científicos y técnicos curtidos me ha motivado a tener iniciativa e intentar objetivos que de otro modo habrían parecido remotos.

En cuanto a las habilidades técnicas, además de aprender acerca del acelerador LHC y detector CMS en profundidad, he ganado habilidades como soldar con estaño, cortar obleas de silicio, analizar grandes cantidades de datos en excell, realizar tests de calidad de forma rigurosa, trabajar de forma autónoma para encontrar una forma de aislar las *carrier cages*, trabajar de forma coordinada para montar un gran número de *carrier plates* en un período corto de tiempo, utilizar una estación de puntas, entender las precauciones a tomar al trabajar con componentes electrónicos, seguir el protocolo de un *clean room*, tomar medidas de seguridad contra incendios, asistir a meetings regulares con el resto del equipo, crear una página web, buscar fugas de agua, montar una cámara de niebla...

Igualmente, he podido asistir y aprender en primera persona sobre el funcionamiento de un reactor nuclear experimental, montar módulos, realizar tests semiautomáticos, pegar *hybrids* en los módulos, impresión 3D, *wire bonding*...

Más allá de todo lo mencionado, el conocer cómo es el día a día de estos científicos y poder aprender de sus diversas culturas es por lejos lo que más valor da a esta experiencia, motivándome así a continuar mi carrera profesional con los valores aprendidos.



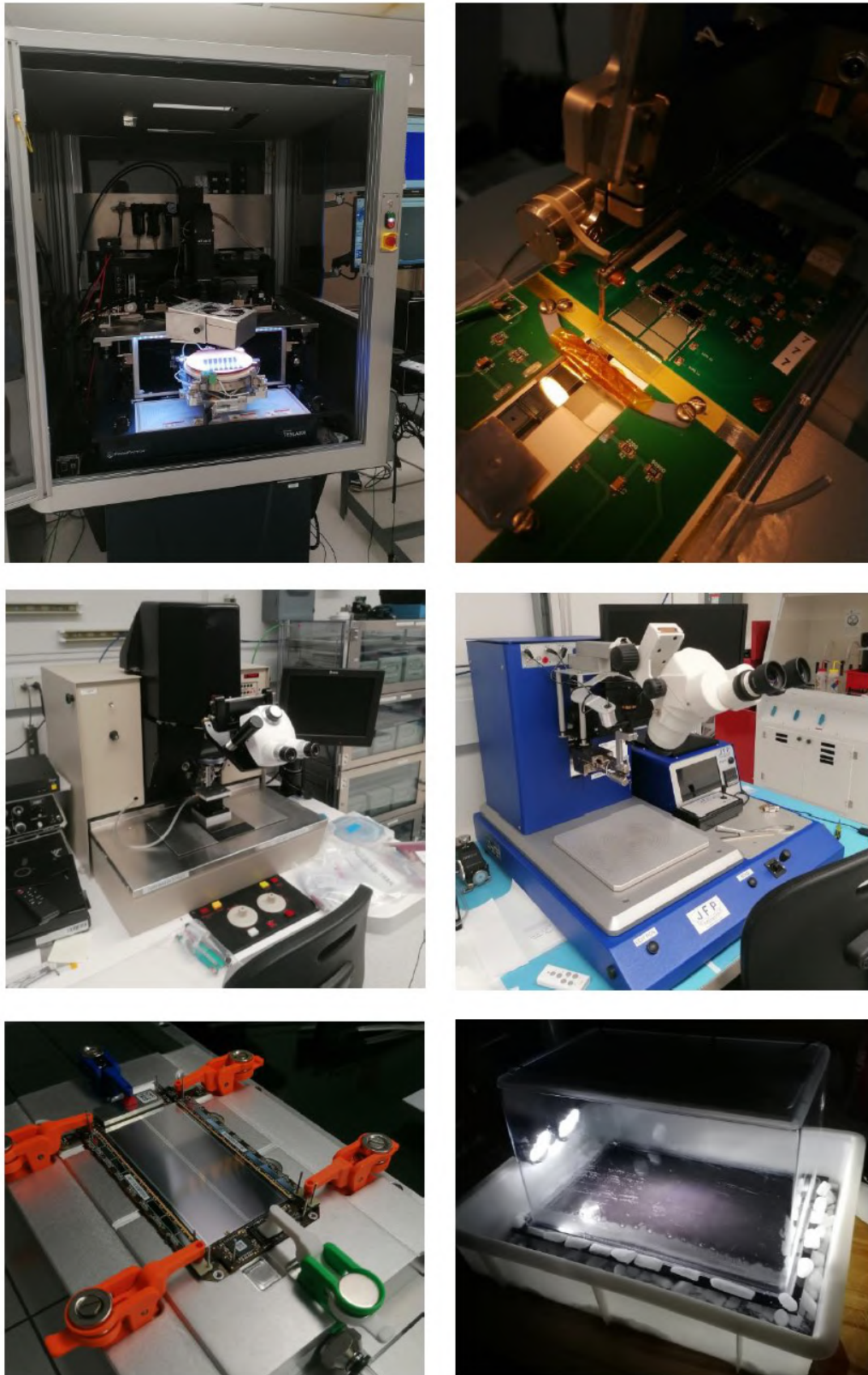


Figura 4.1: 1: Estación de puntas semi-automática Tesla 200, con ventilador desionizante sobre detector 2S. 2: wire bonding de un baby sensor a una placa Alibava para realizar pruebas de radiación. 3 y 4: Estaciones de wire bonding. 5: gluing jig, soporte para el pegado de híbridos en un módulo PS.. 6: Cámara de niebla utilizada para una experiencia.

# Capítulo 5

## Referencias

### *Bibliografía:*

- 1 Raúl Penagos Solórzano, Cuaderno de Trabajo y Laboratorio, (2024)
- 2 Raúl Penagos Solórzano, Diario de trabajo, (2024)
- 3 V.Mariani for the CMS Collaboration, (2020) 'THE CMS OUTER TRACKER UPGRADE FOR THE HIGH LUMINOSITY LHC'
- 4 Federico Ravotti, Member, IEEE, Maurice Glaser, Michael Moll, and Frédéric Saigné. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 55, NO. 4, AUGUST (2008). 'BPW34 Commercial p-i-n Diodes for High-Level 1-MeV Neutron Equivalent Fluence Monitoring'
- 5 Chibuzo Onwukaeme, Bohae Lee and Han-Youl Ryu. Nanomaterials (2022), 12, 2405.  
<https://doi.org/10.3390/nano12142405>. 'Temperature Dependence of Electron Leakage Current in InGaN Blue Light-Emitting Diode Structures'
- 6 F. Wizemann<sup>1</sup>, A. Gisen<sup>1</sup>, K. Kröninger<sup>1</sup> and J. Weingarten. (2019). 'Temperature scaling of reverse current generated in proton irradiated silicon bulk'
- 7 Raúl Penagos Solórzano, URL:  
[https://brownhep.github.io/assemblyfiles/2024/07/22/carrier\\_box.html](https://brownhep.github.io/assemblyfiles/2024/07/22/carrier_box.html)

### *Imágenes:*

- 1.1 CERN, RTU, schematic depiction of the LHC
- 2.2 CERN Document Server, Tai Sakuma, Cutaway diagrams of CMS detector
- 1.3 CMS TRacker Collaboration, Alexander Dierlamm, The CMS Outer Tracker Upgrade for the HL-LHC.
- 2.1 CERN Document Server. The CMS Tracker Upgrade for the High-Luminosity LHC - Migliore, Ernesto