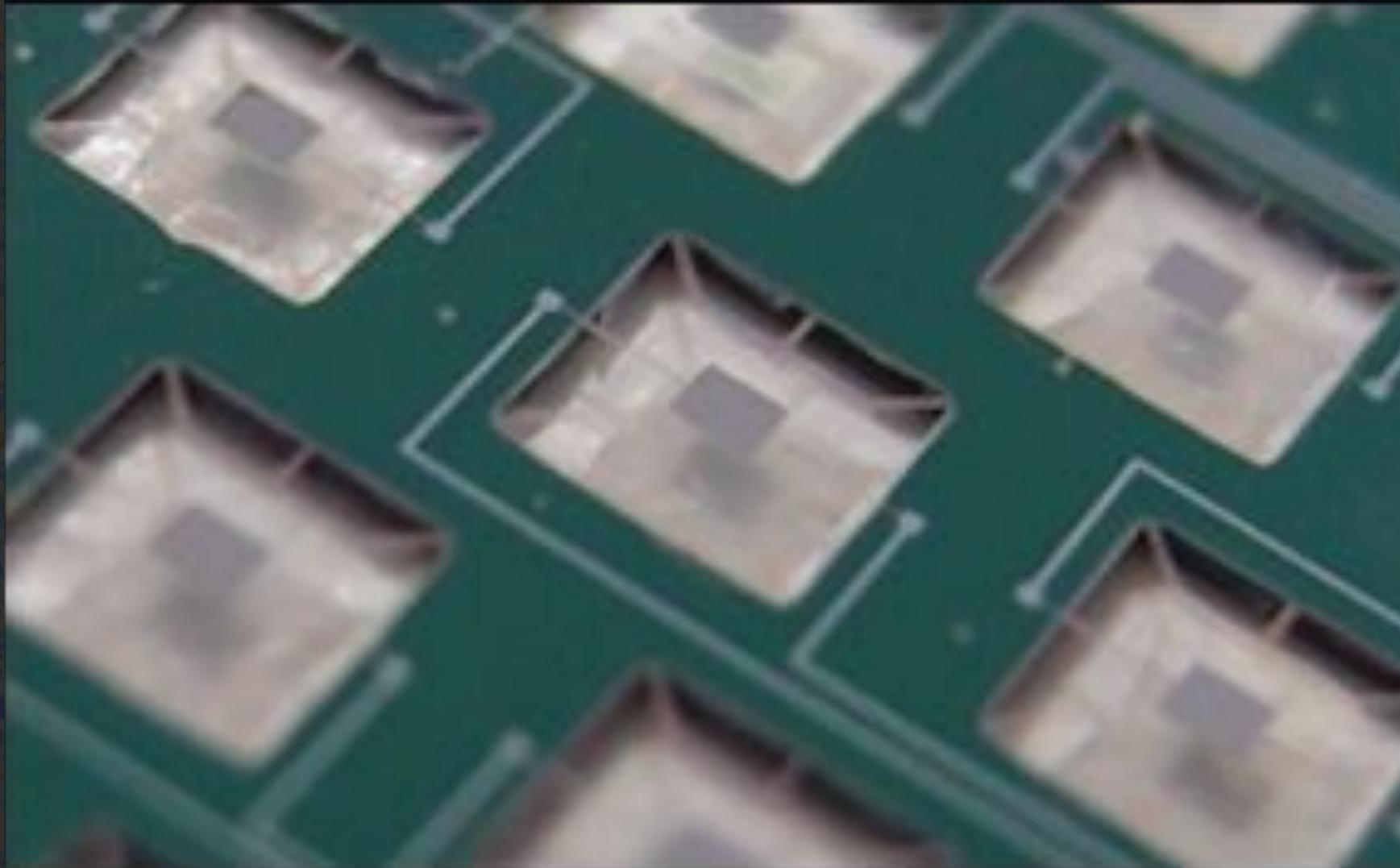


Bolómetros en Cosmología



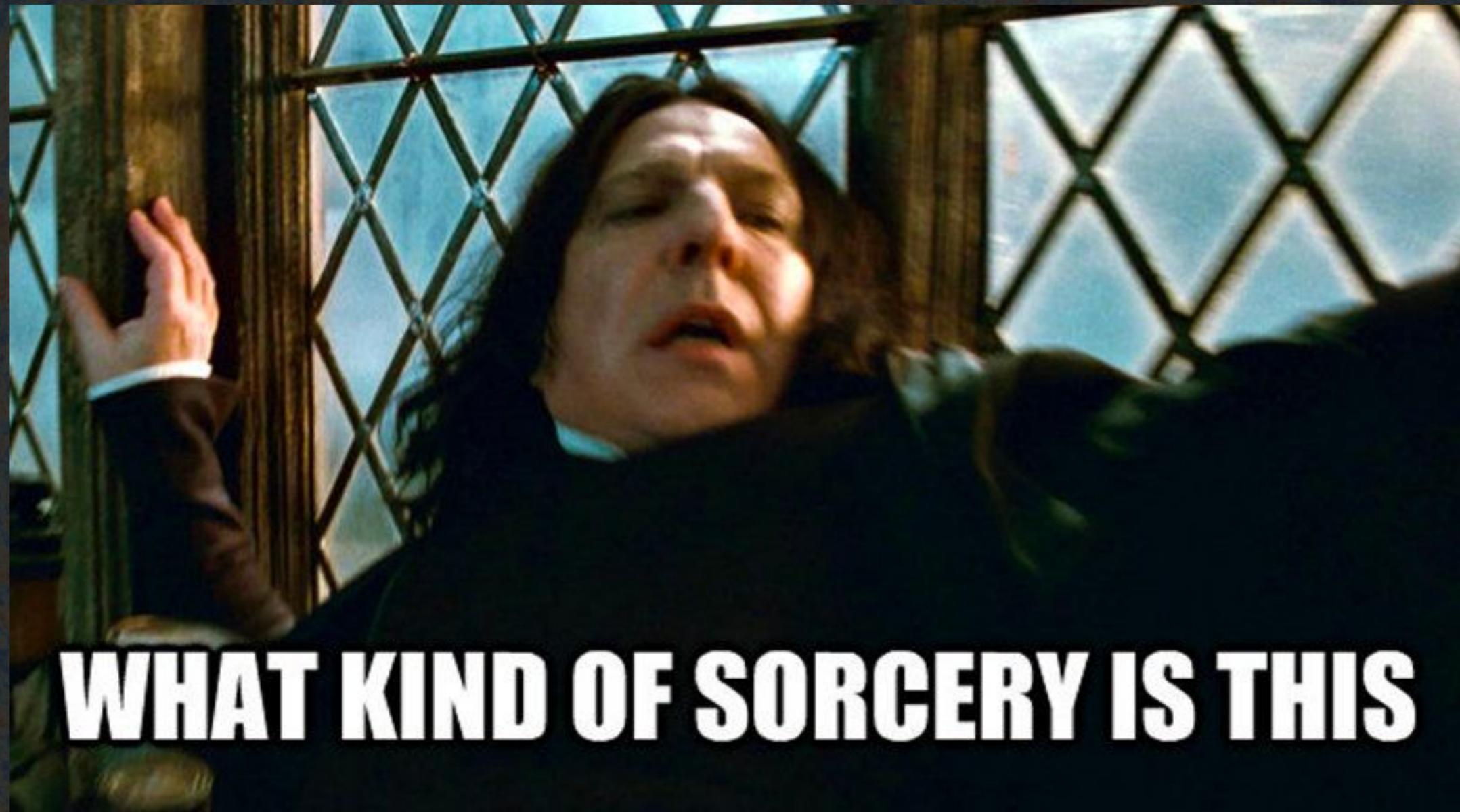
J.-Ch. Hamilton - APC, CNRS-IN2P3 - Paris - France
con mucha ayuda de Michel Piat y Clementina Medina

Resumen

- Qué es un bolómetro?
- Por qué los usamos en cosmología?
- Un poco más técnico...
 - Física de un TES
 - Microfabricación de un TES
 - Ruido en un TES
 - Lectura de un TES
- Algunos ejemplos
- Conclusión



¿Qué es un bolómetro?

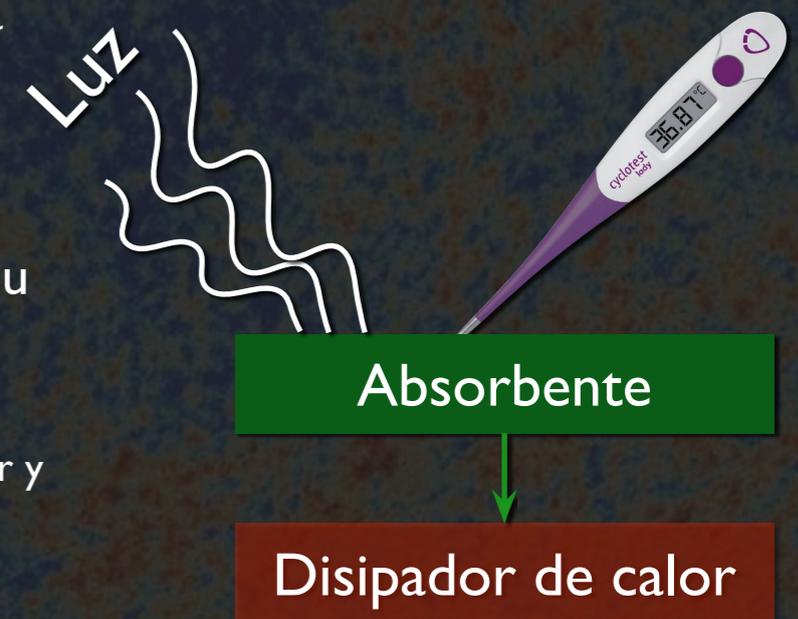


¿Qué es un bolómetro?

- Del griego antiguo « Bolē » (rayo de luz) y « Metron » (medida)
 - Dispositivo para medir la luz.
- Inventado por Langley en 1878 para estudiar la radiación proveniente del sol.
- Principio:
 - La radiación es absorbida por algún material conectado a través de un enlace térmico a un disipador de calor que se encuentra a temperatura constante.
 - La radiación absorbida “calienta” el material.
 - Se mide el aumento de temperatura del material, que pronto vuelve a su temperatura inicial gracias al disipador de calor.
 - Sensible a cualquier tipo de radiación (gran ancho de banda)
 - Constante de tiempo rápida (determinada por el enlace térmico con el disipador de calor y la masa del absorbente)
 - Propiedades del ruido: estabilidad del material (más frío \Leftrightarrow menos ruido)
 - Funcionan bien con background alto (sólo una temperatura de base más alta)



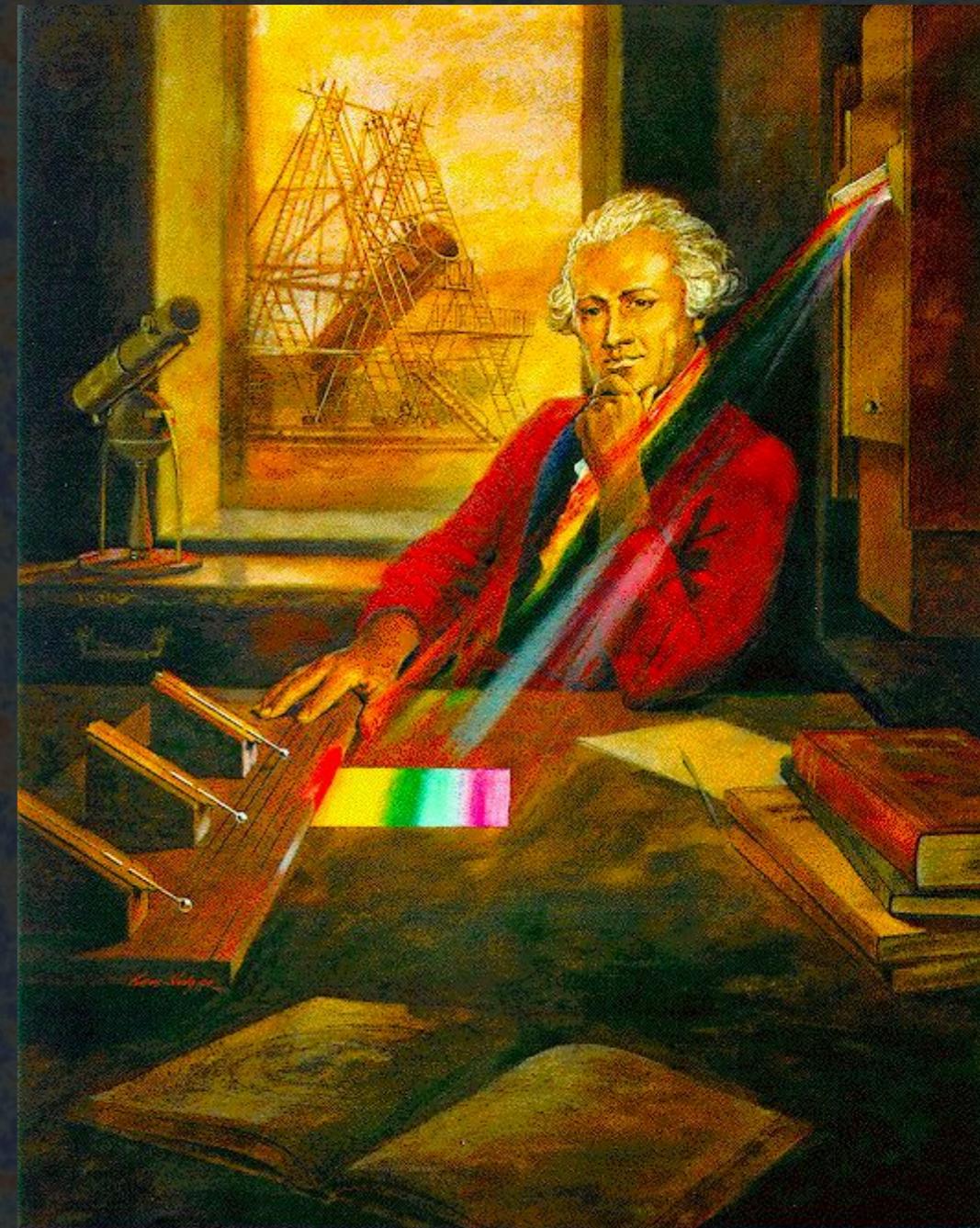
Samuel Langley



Pero, como siempre... Herschel...

● Herschel

- Compositor musical
- Constructor de telescopios
- Descubrimiento de Urano (+ Oberon y Titania), Enceladus y Mimas (lunas de Saturno), Casquetes polares de Marte variables con el tiempo, forma plana de la Via Lactea, catálogos de nebulosas (NGC)...
- ~1800: pionero de la espectroscopía astronómica
 - prismas y termómetros para medir la cantidad de luz de diferentes colores
 - El primer bolómetro!
 - El remarca que, más allá del rojo, la temperatura sigue aumentando.
 - Descubrimiento de la radiación infrarroja.



¿Por qué usarlos en cosmología ?



Ejemplos típicos

- **Detección directa de la Materia Oscura:**

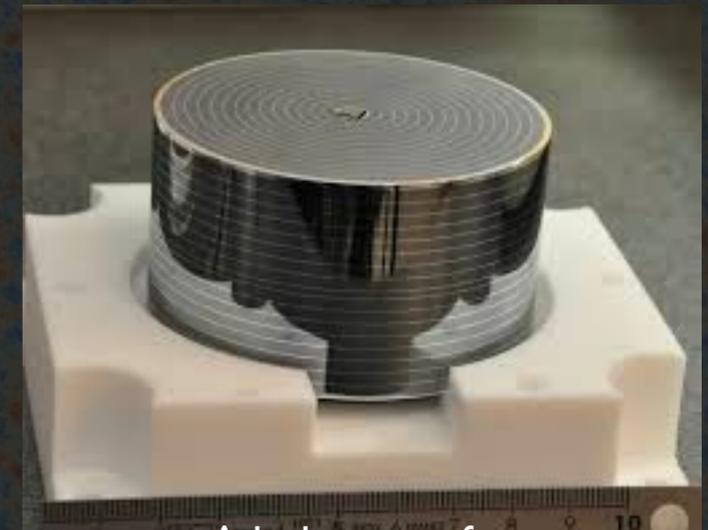
- 86% de la materia en el Universo?
- Difícil de detectar: la materia oscura no interactúa mucho con las partículas ordinarias.
 - La dispersión elástica con núcleos es posible.
 - Los núcleos impactados retroceden y disipan energía en el material.
 - Gran fondo producido por otras interacciones

→ Bolómetros masivos se usan para medir este tipo de señal (siguen buscando ...)

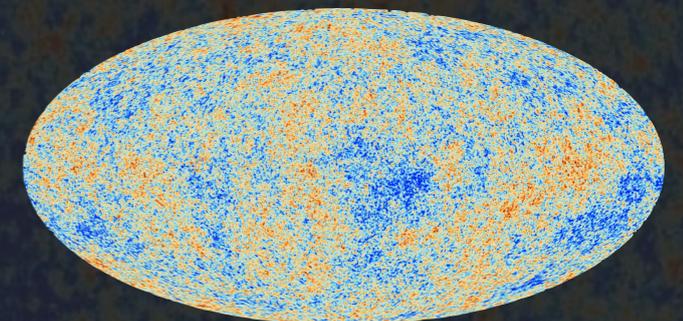
- **Cosmic Microwave Background (CMB)**

- Radiación reliquia del Big Bang
- Cuerpo negro a 2.7K => pico a 150 GHz (2mm)
 - Fotones con una fracción de meV de energía...
 - menos de un pW depositado en los detectores...
 - Fondo de radiación térmica alto en el instrumento
 - Sin características espectrales.

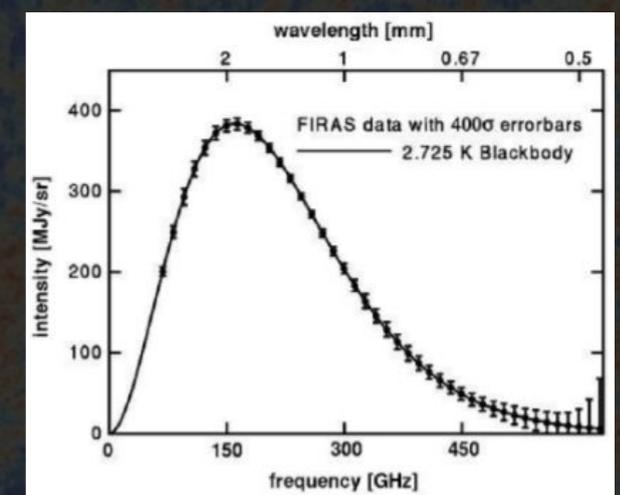
→ Necesita una gran sensibilidad y un gran ancho de banda
→ Los bolómetros son ampliamente utilizados por encima de ~70 GHz



A bolometer for EDELWEISS



CMB Full Sky Map and spectrum



Mensaje a retener:



- Los bolómetros son buenos para:
 - Detectar señales muy pequeñas
 - Si la temperatura de base es suficientemente baja, las fluctuaciones térmicas son pequeñas => menos ruido!
 - Detección en un amplio ancho de banda
 - Antenas y amplificadores usualmente tienen un pequeño ancho de banda
 - Los bolómetros pueden detectar cualquier cosa que entrega energía al material absorbente (luz, rayos cósmicos, ...)
 - Detección sobre un alto background
 - El background solo desplaza la temperatura de base
 - Pero el background fluctúa, lo que implica la presencia de ruido del background

Ahora nos volvemos un poco más
técnicos...

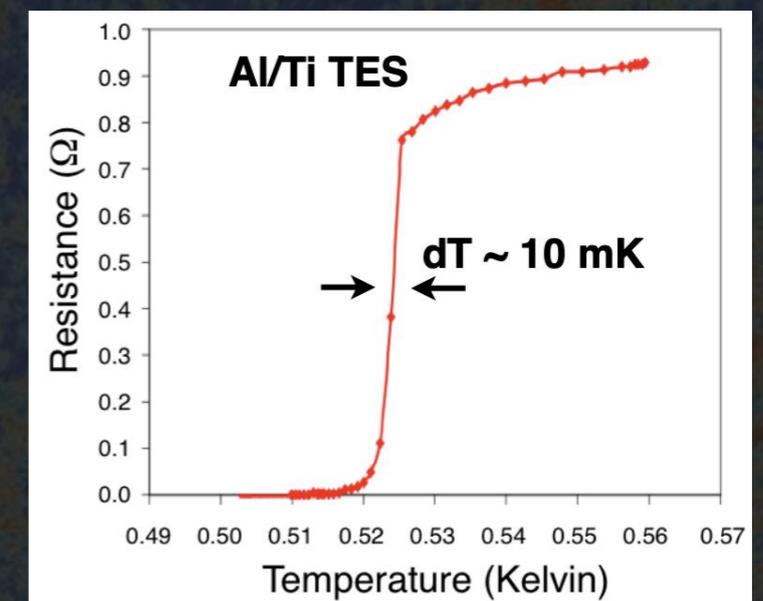
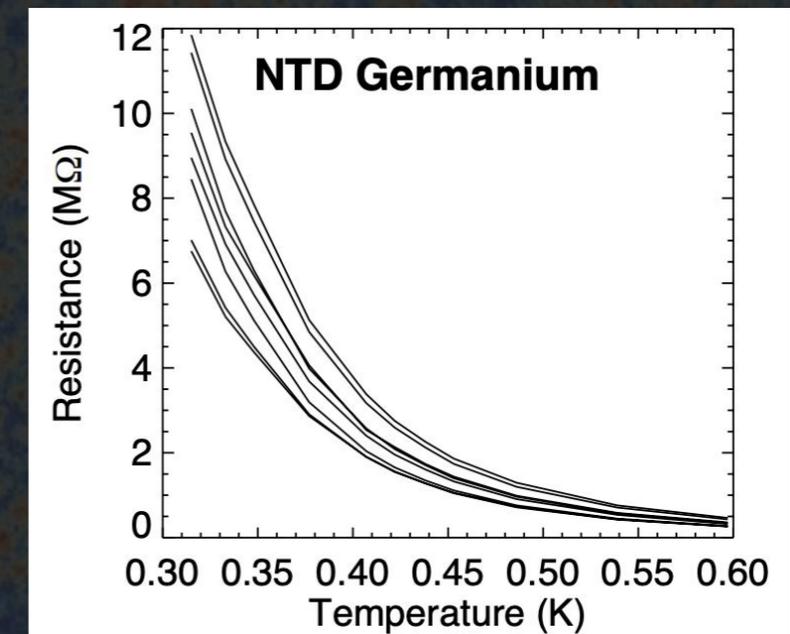
HOW I FEEL



WHEN I FINISH MY MATH HOMEWORK
BOLOMETRO

Focalicemos en los bolómetros para CMB

- Existen dos tipos principales:
 - En ambos casos uno mide la variación de R con T
 - Polarizar el bolómetro con un voltaje
 - Medir la intensidad
- Termistores
 - Semiconductor
 - estado del material “normal”
 - $(T/R)*dR/dT < 0$ [de -5 a -10]
 - No muy lineal...
- Transition-Edge-Sensors (TES)
 - Ajustar la temperatura a la transición a superconductor
 - Alta amplificación debido a la pendiente
 - $(T/R)*dR/dT \gg 0$ [100 - 1000]
 - Más lineal
 - Actualmente el “detector standard” por el CMB



Física de un TES (simplificada)

- Potencia disipada en el TES:

$$P_{bol} = P_{opt} + P_{elec}$$

- Que escapa a través del enlace térmico:

$$P_{bol} = G(T_{bolo} - T_{bath})$$

G es en W/K

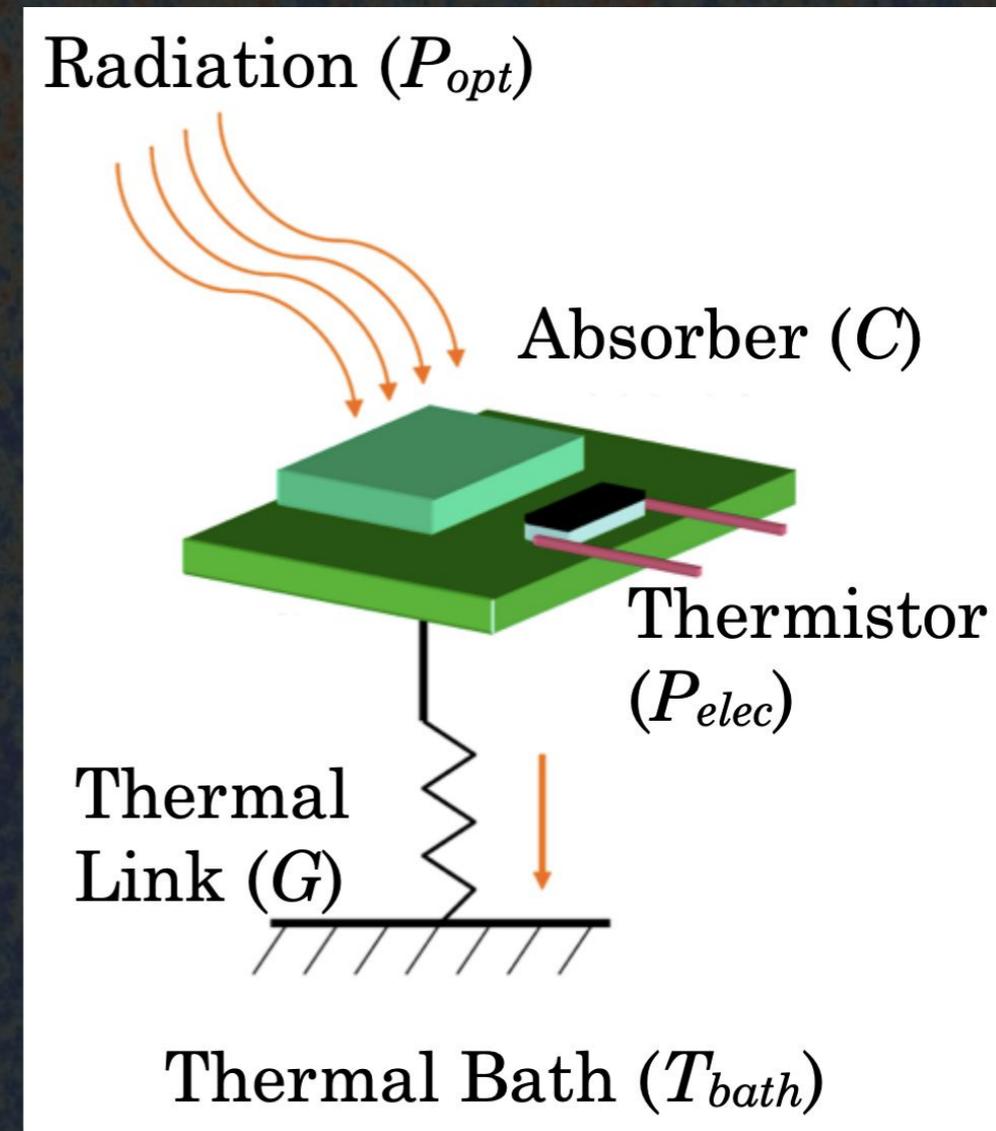
- El absorbente tiene una capacidad calorífica C [J/K]

- Entonces, el tiempo típico para disipar el calor entrante es:

$$\tau = C/G$$

Analogía con un circuito eléctrico RC:

- C es C y G sería la conductancia = $1/R$
=> constante de tiempo = $RC = C/G$



Física de un TES (simplificada)

- **Electro-Thermal Feedback (ETF)**

un TES necesita ser polarizado por voltaje!

- Cuando la radiación es absorbida: $T_{\text{bolo}} \nearrow$
 $\Rightarrow R \nearrow$ [en la transición]

pero $P_{\text{elec}} = V_{\text{bias}}^2 / R$
 $\Rightarrow P_{\text{elec}} \searrow$

- Esto compensa el incremento de P_{opt} de manera que $P_{\text{bol}} = \text{Cte}$

- G y T_{bath} son constantes:
 $\Rightarrow T_{\text{bolo}} = \text{Cte}$

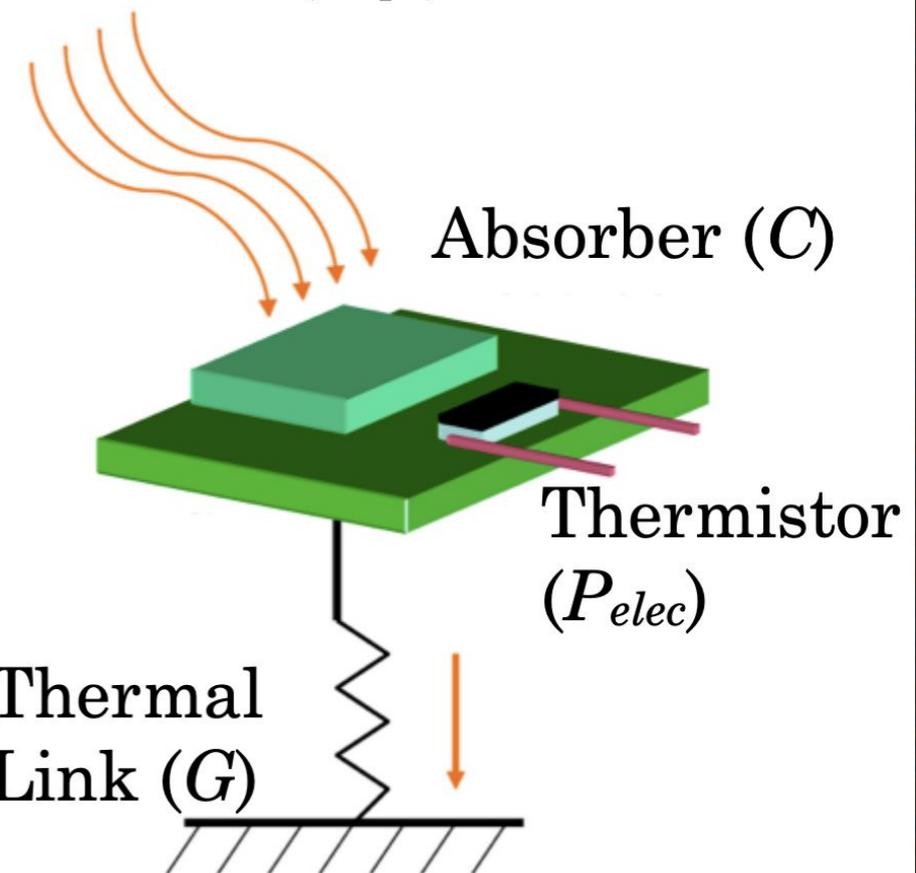
- Esto se conoce como « Electro-Thermal Feedback » (ETF)

- Cuando dentro de la transición, un TES tiene una temperatura constante para cualquier P_{opt}
- Esto tiene una limitación: si P_{opt} aumenta mucho, como P_{bol} es constante, P_{elec} tiende a 0
 \Rightarrow El bolómetro se satura!

$$P_{\text{bol}} = P_{\text{opt}} + P_{\text{elec}}$$

$$= G(T_{\text{bolo}} - T_{\text{bath}})$$

Radiation (P_{opt})



Thermal Bath (T_{bath})

Física de un TES (simplificada)

- Más sobre ETF

- Un bolómetro es un sistema que da una respuesta en corriente a una señal en potencia
- Su respuesta es entonces:

$$\mathcal{R} = \frac{dI}{dP_{opt}}$$

- En ETF tenemos $P_{bol} = Cte$

$$\frac{dP_{bol}}{dI} = \frac{dP_{opt}}{dI} + \frac{dP_{elec}}{dI} = 0$$

$$\frac{dP_{elec}}{dI} = V \text{ porque } P_{elec} = VI$$

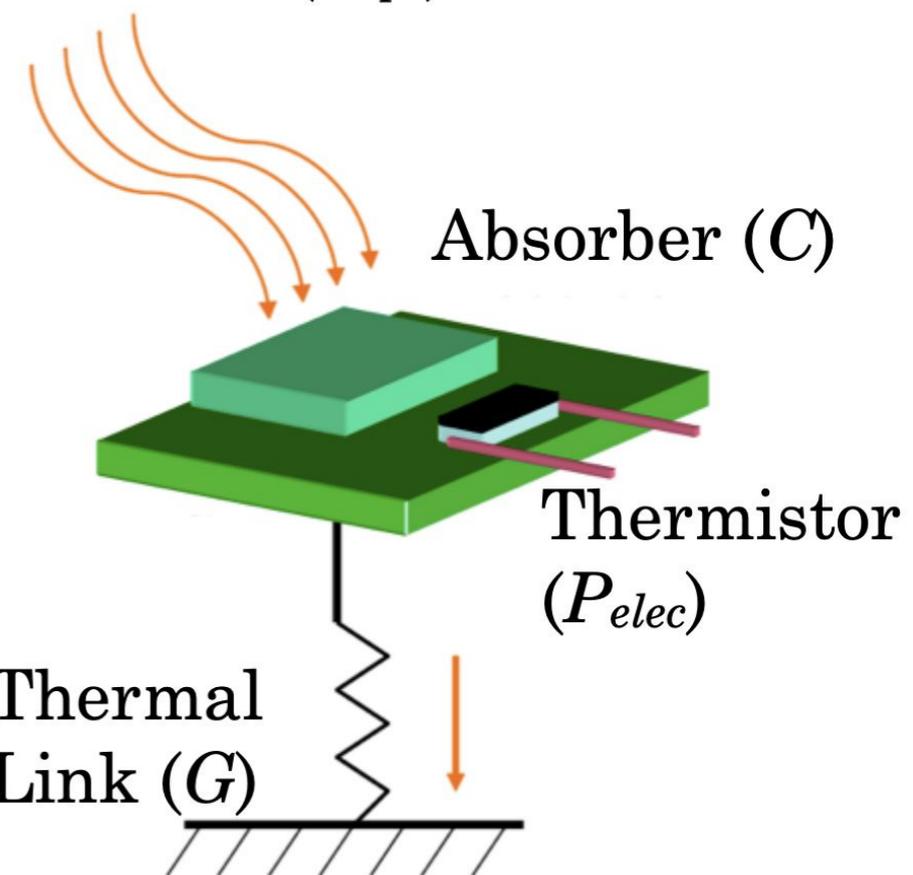
que resulta en: $\mathcal{R} = -1/V$

⇒ La respuesta es lineal y exactamente igual a la inversa de la tensión de polarización!

- ETF también reduce la constante de tiempo efectiva del TES en órdenes de magnitud.

$$\begin{aligned} P_{bol} &= P_{opt} + P_{elec} \\ &= G(T_{bolo} - T_{bath}) \end{aligned}$$

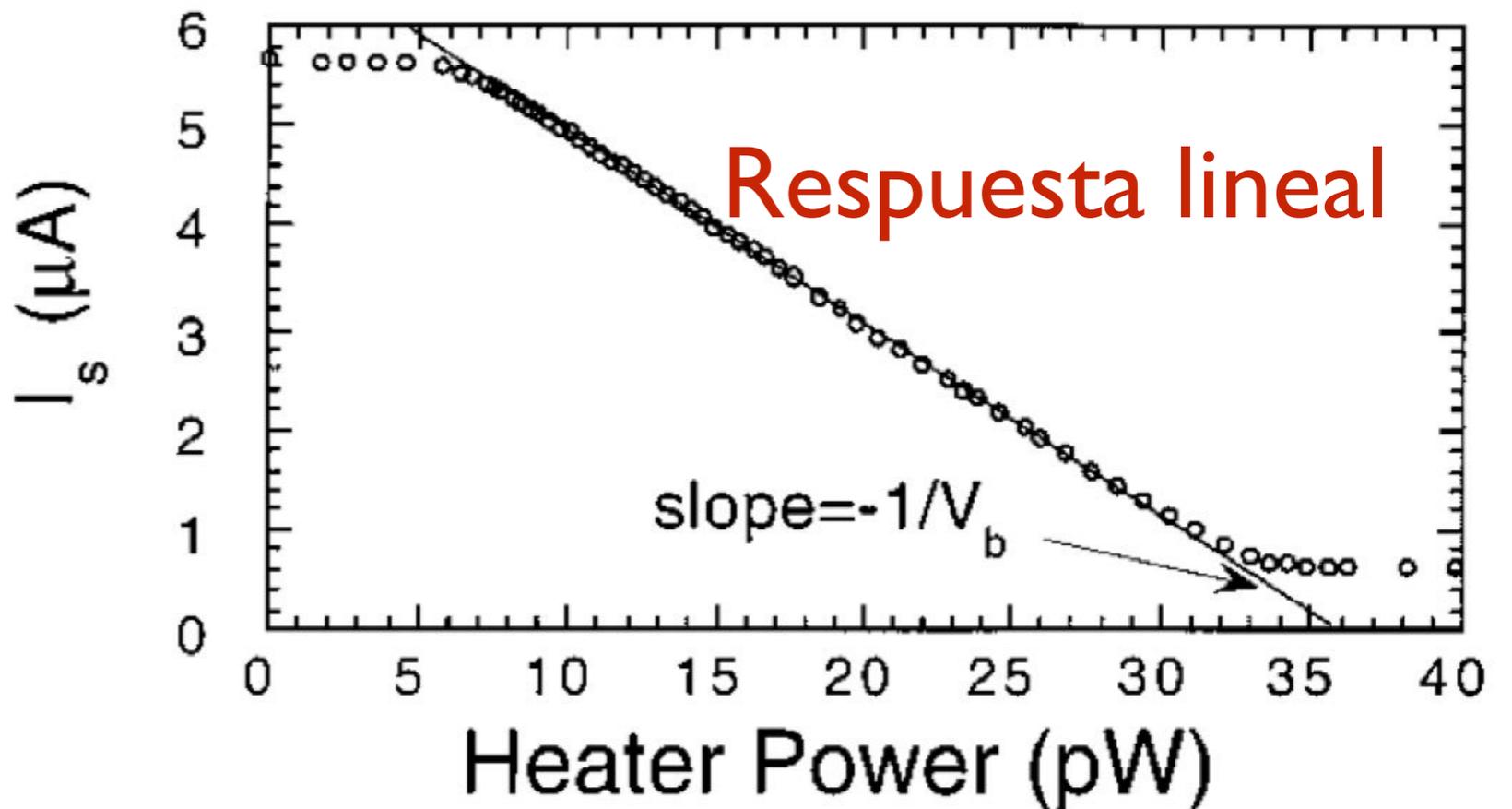
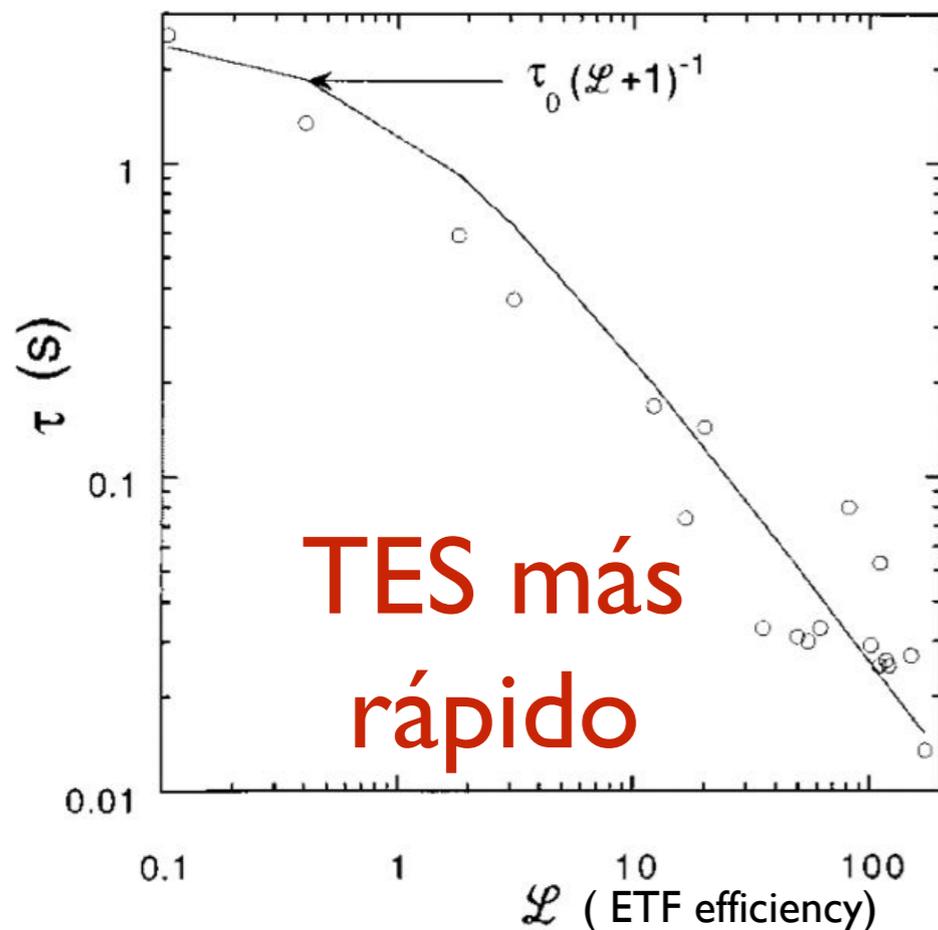
Radiation (P_{opt})



Thermal Bath (T_{bath})

Física de un TES (simplificada)

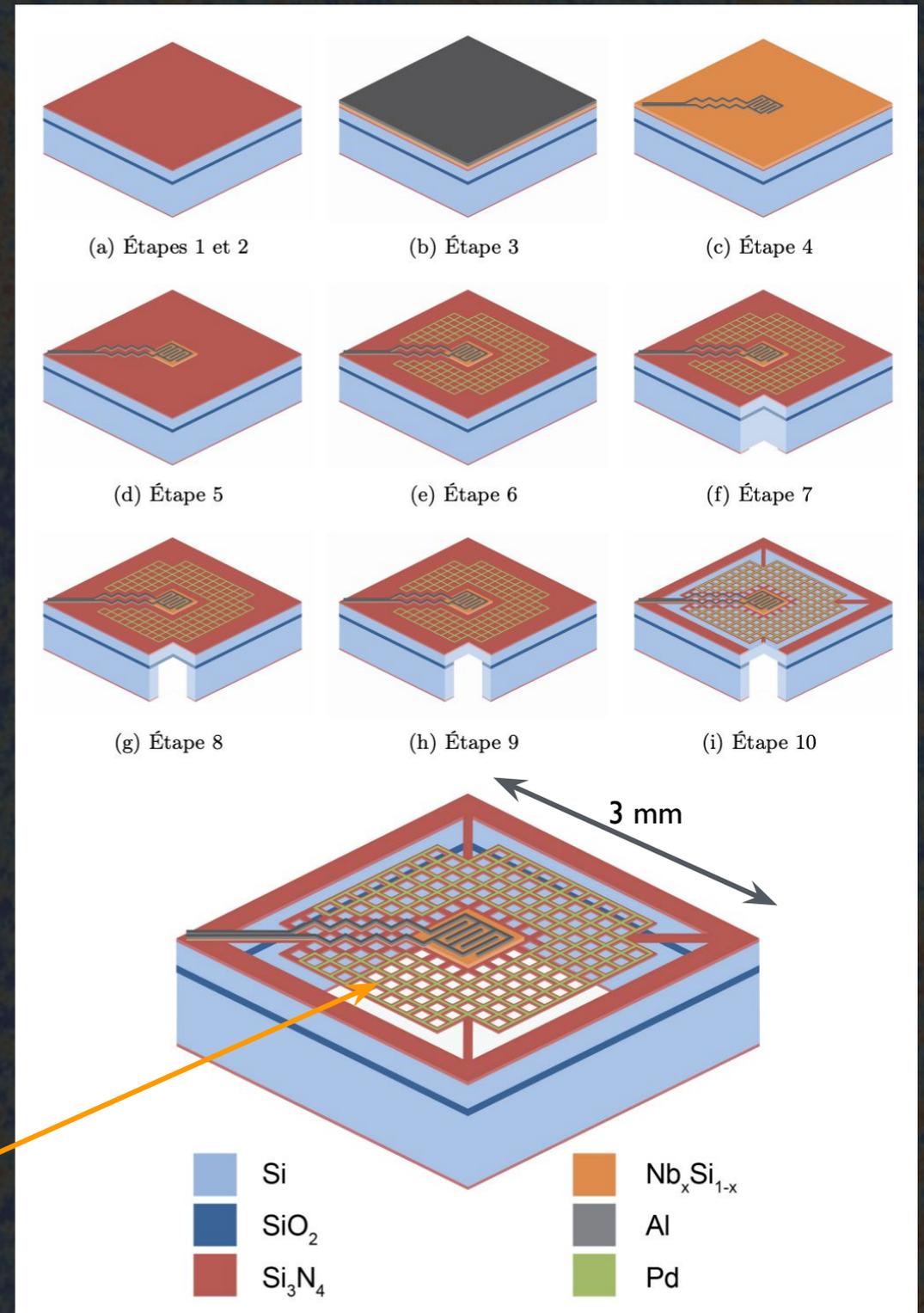
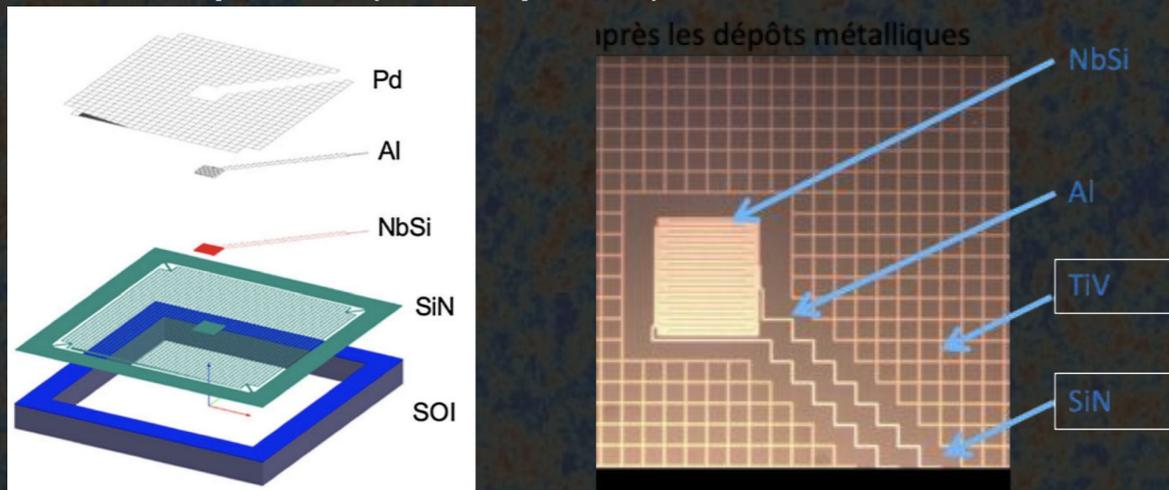
Publicación histórica A. Lee, P. Richards et al. 1998



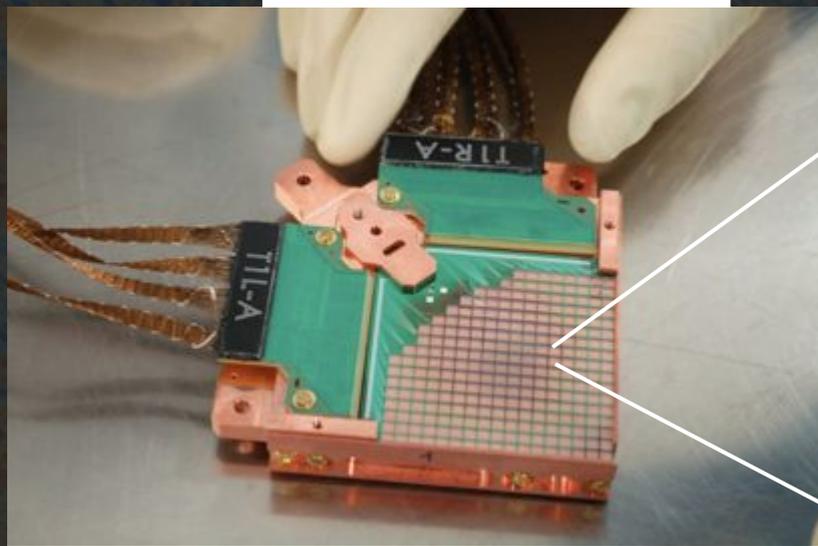
Podemos lograr constantes de tiempo de ~ 10 msec
[lo que es realmente bueno para escanear el cielo con un TES]

Micro-fabricación de TES

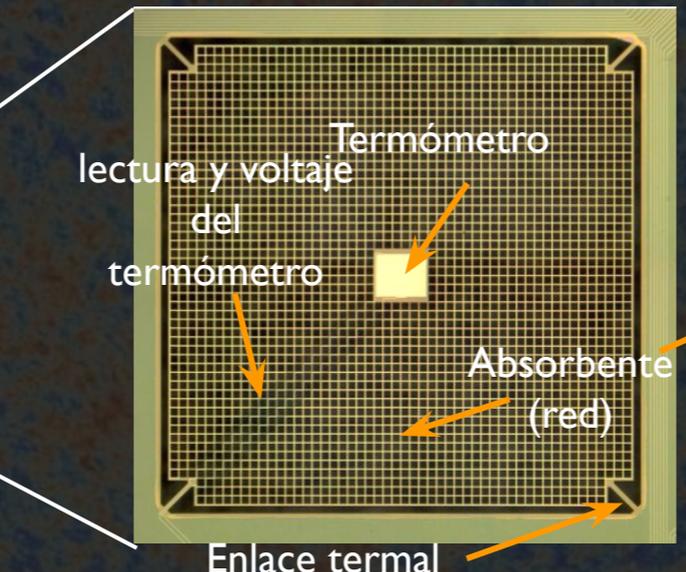
- Fabricados como matrices completas!
- Sucesión de pasos en el laboratorio de microfabricación (sala limpia)
 - Las capas tienen un ancho de 0.1 a 0.5 μm
 - Capas depositadas sucesivamente y “grabadas” usando varias máquinas (~100 pasos)



[C. Perbost, PhD, 2016]



Array of 256 QUBIC TESs



Ruido de un TES

- Cuantificamos el ruido a través de la “Potencia equivalente de ruido” NEP en $\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$
- Un bolómetro tiene dos contribuciones:

$$NEP_{\text{bolo}} = NEP_J^2 + NEP_P^2$$

- El ruido de Johnson [ruido térmico de los portadores eléctricos en el resistor]

$$NEP_J^2 = \frac{4kT}{RR^2}$$

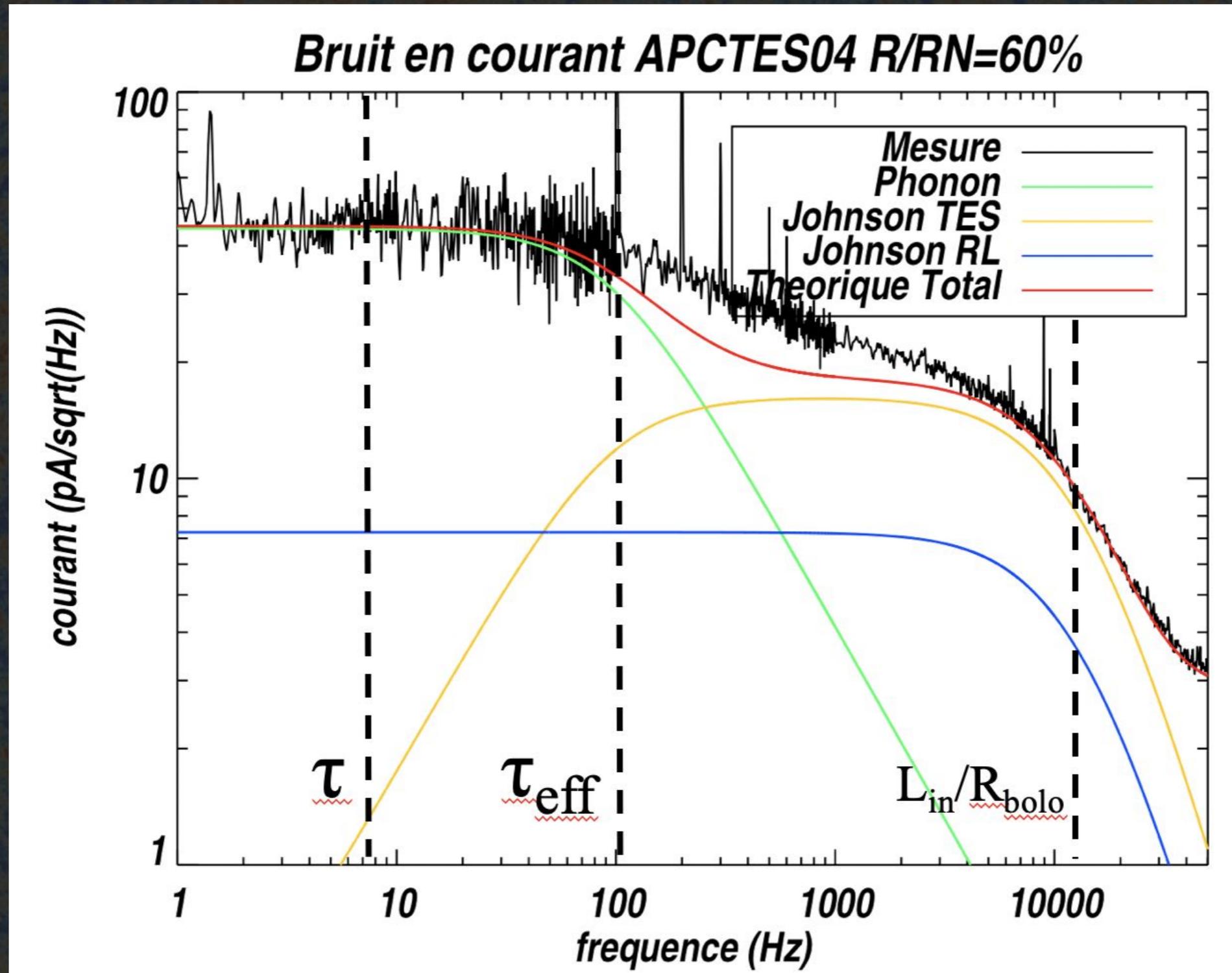
- El ruido fónico [intercambio térmico aleatorio de fonones con el baño]

$$NEP_P^2 = 4kGT^2$$

Ambos disminuyen con la temperatura T

→ Los bolómetros tienden a no tener ruido cuando T tiende a cero
→ Enfriamos nuestros planos focales hasta $\sim 100\text{-}300\text{ mK}$

Medidas con TES de QUBIC



[J. Martino, PhD]



Ruido en la observación del CMB

- Un instrumento CMB colecta energía del CMB más:
 - Radiación térmica del instrumento
 - Radiación térmica de la atmósfera
 - $P_{\text{opt}} = P_{\text{CMB}} + P_{\text{inst}} + P_{\text{atm}}$ ($P_{\text{opt}} \sim 10 \text{ pW} \gg P_{\text{CMB}} \sim 0.4 \text{ pW}$)
- Los fotones incidentes también fluctúan (fluctuaciones del background):
 - Número de fotones por segundo : $N = P/(h\nu) \sim 10^{10}$ (CMB)
 - Fluctuaciones de Poisson \sqrt{N}
 - Término de “bunching” agrupamiento (efecto cuántico relativo a la estadística de Bose-Einstein) [Lamarre 86]
 - Ruido total de photons : $NEP_{\gamma}^2 = 2h\nu P_{\text{opt}} + \frac{2P_{\text{opt}}^2}{\Delta\nu}$
- Finalmente el ruido total es: $NEP_{\text{tot}}^2 = NEP_{\text{bolo}}^2 + NEP_{\gamma}^2$



Bolómetros limitados por el Background

El ruido total es: $NEP_{\text{tot}}^2 = NEP_{\text{bolo}}^2 + NEP_{\gamma}^2$

(órdenes
de magnitud indicativos
para
instrumentos en tierra)

	P [pW]	N [γ/s]	NEP_{γ} [$W.Hz^{-1/2}$]
CMB	0.4	10^{10}	4×10^{-18}
Total	10	2.5×10^{11}	2×10^{-17}

Entonces, si los bolómetros están suficientemente fríos (o el background es suficientemente pequeño), uno puede tener un ruido de detector insignificante:

$$NEP_{\text{bolo}} < NEP_{\gamma}$$

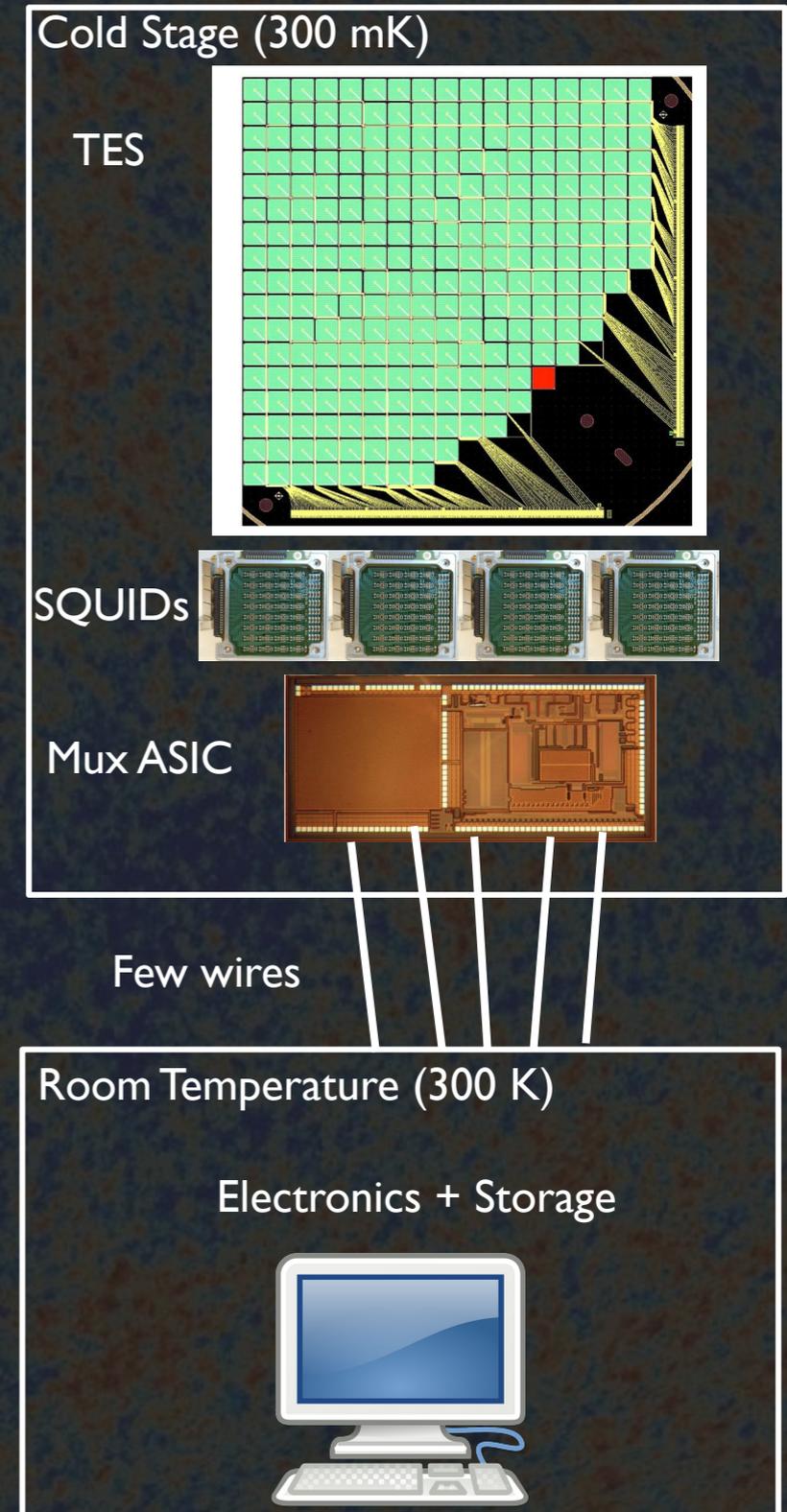
=> Esto se llama “Bolómetros limitados por el Background”

=> **No se puede tener menos ruido que este!**

Alcanzar dicho NEP_{bolo} implica que $T \lesssim 350$ mK

Lectura de los TES

- N TES => 2N cables de polarización conectados a 300K ($N \gtrsim 1000$)
- Esto produce una gran fuga térmica y no permitiría alcanzar 0.3K
- La lectura necesita multiplexarse!
 - Puede ser en el dominio del tiempo o de la frecuencia
 - El multiplexor debe enfriarse
 - La electrónica tradicional (CMOS) no funciona bien a bajas T
 - Necesidad de un ASIC específico (para QUBIC TDM basado en SiGe ASIC + SQUIDs, alcanzando un factor de multiplexaje de 128:1)

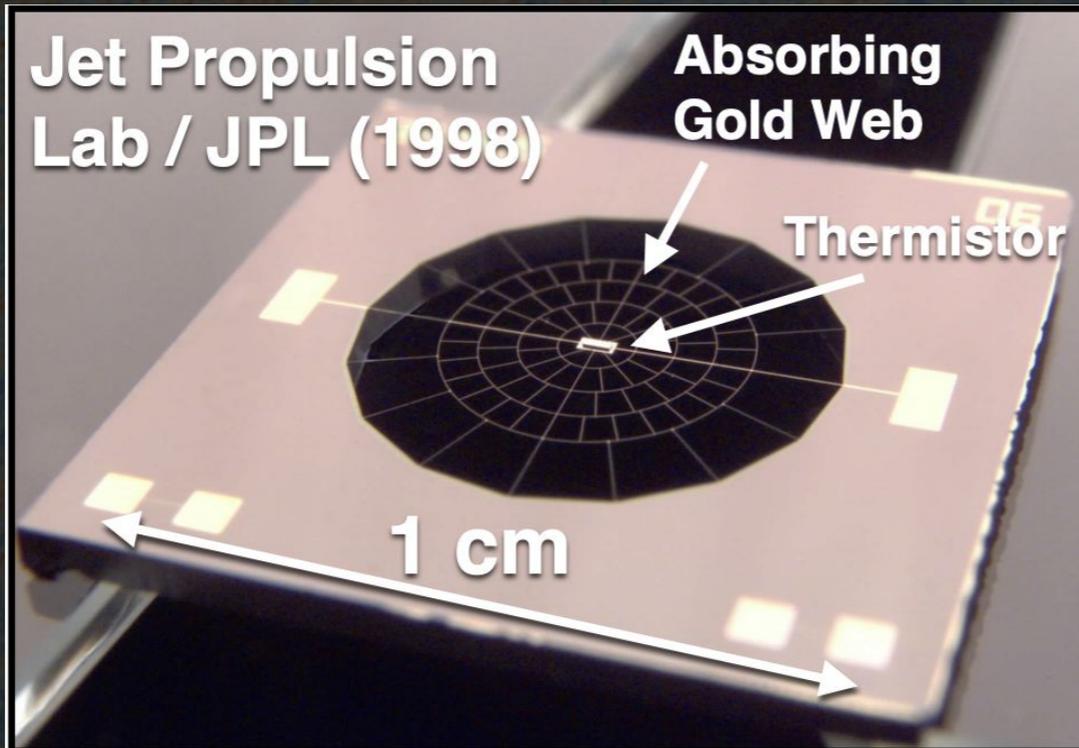


Algunos ejemplos

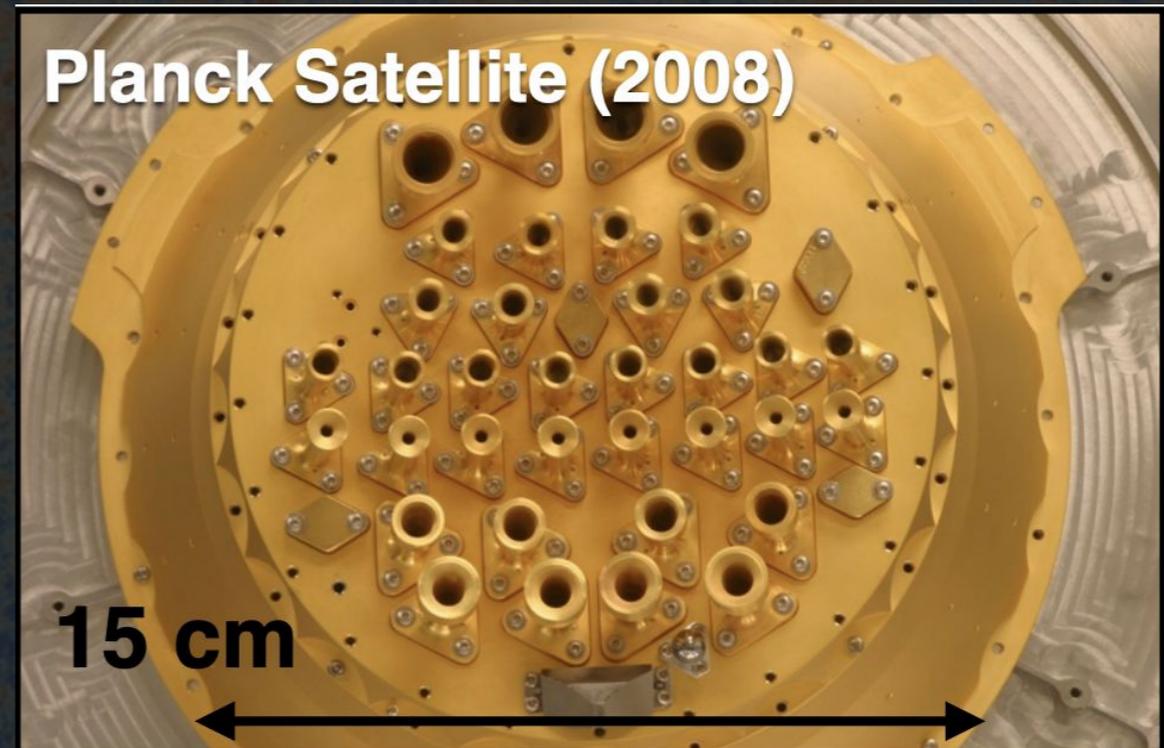


Bolómetros “Telaraña” (Planck ~1996)

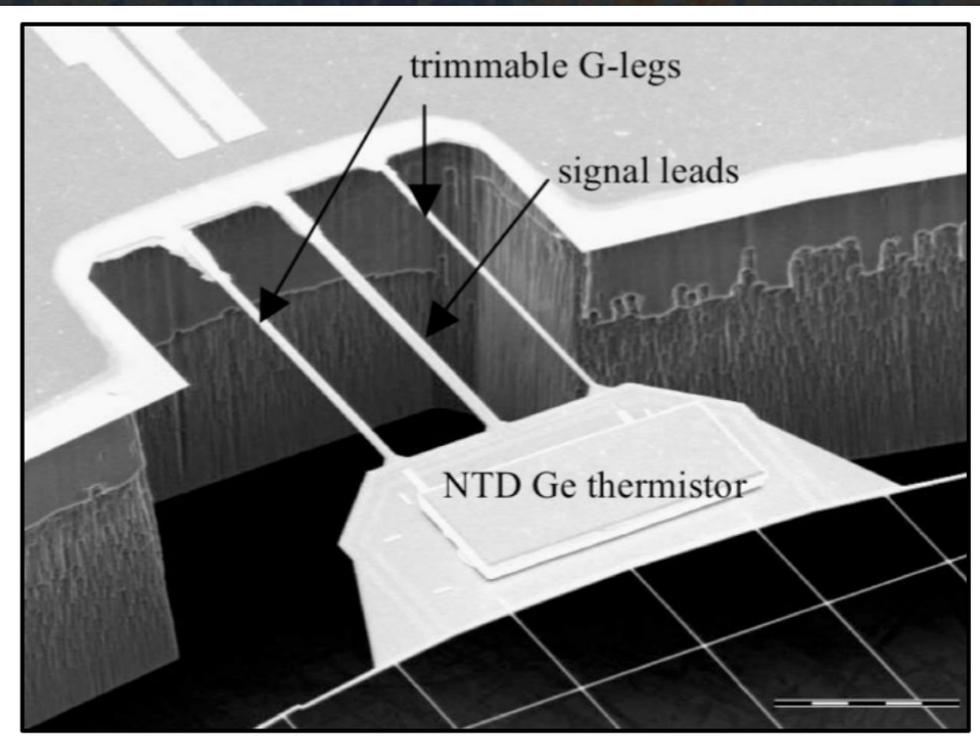
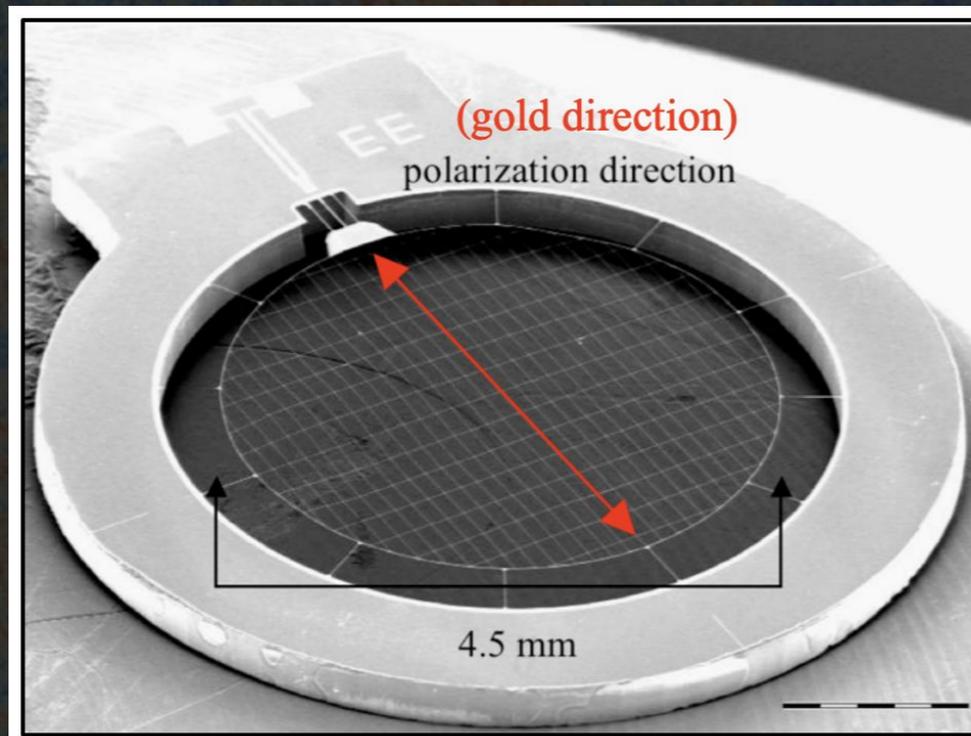
No sensible a la polarización



NB: El absorbedor es una rejilla para reducir la sensibilidad a los rayos cósmicos.

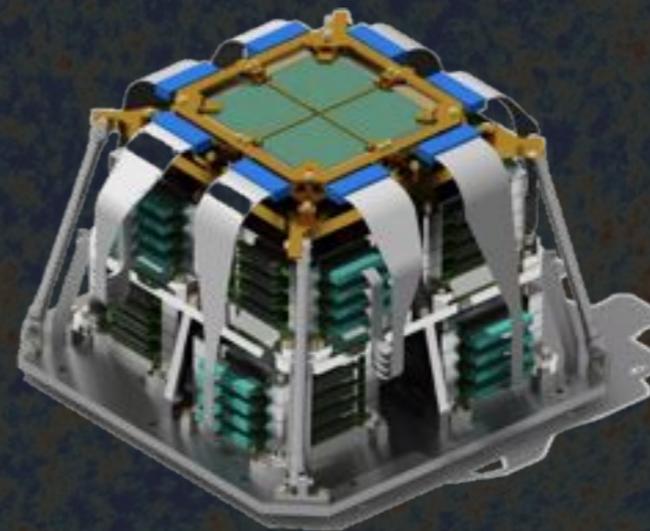
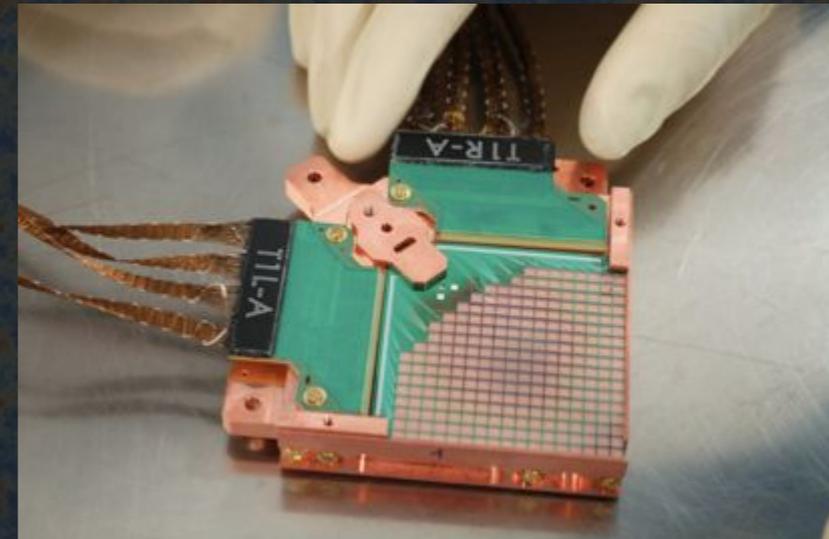
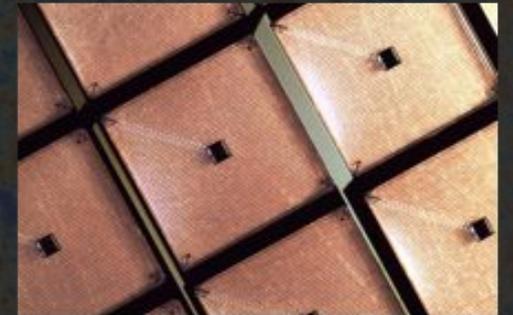
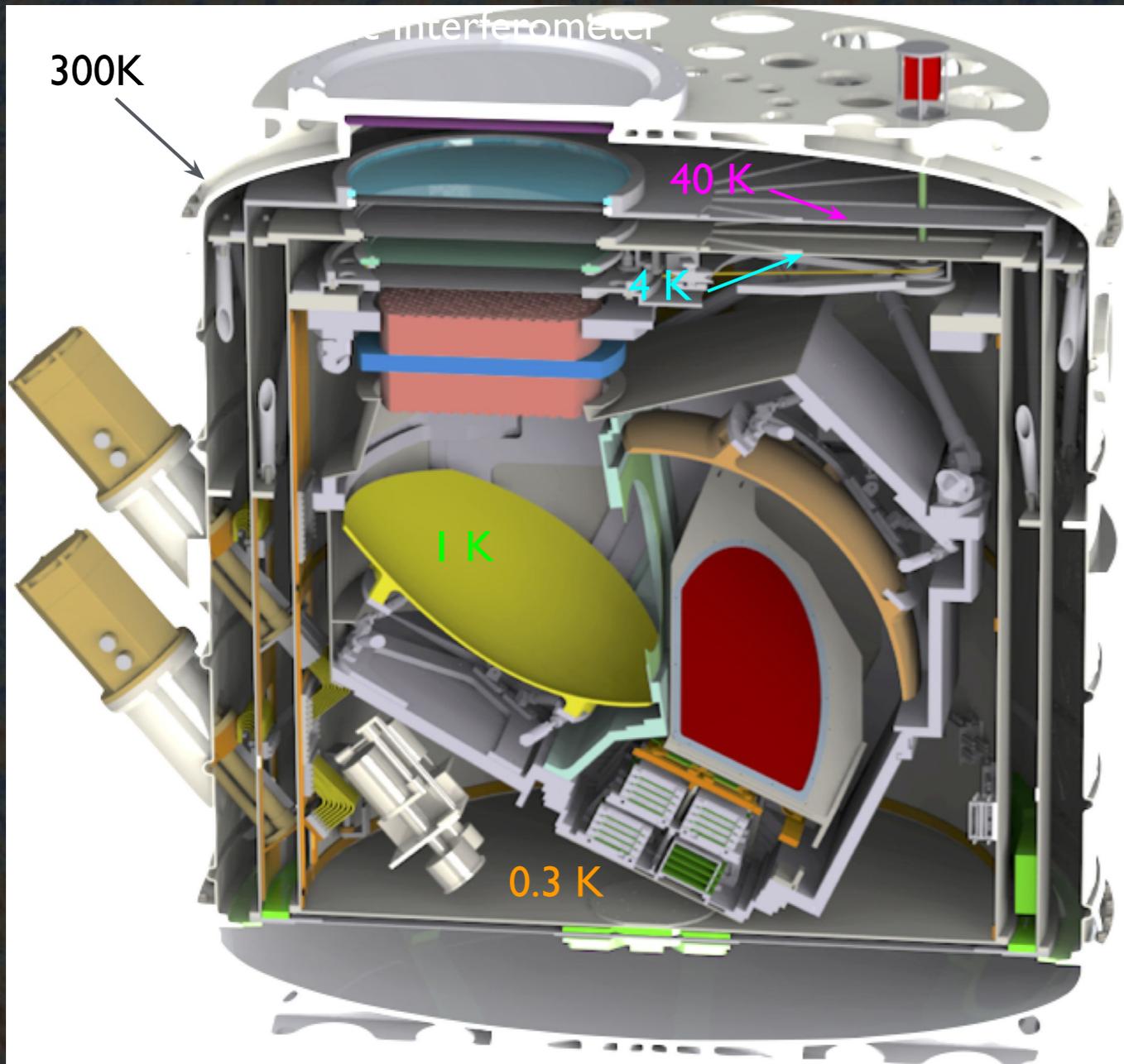


sensible a la polarización:
Oro depositado solo en una dirección



Instrumento QUBIC y TES (hoy)

El interferómetro bolométrico de QUBIC

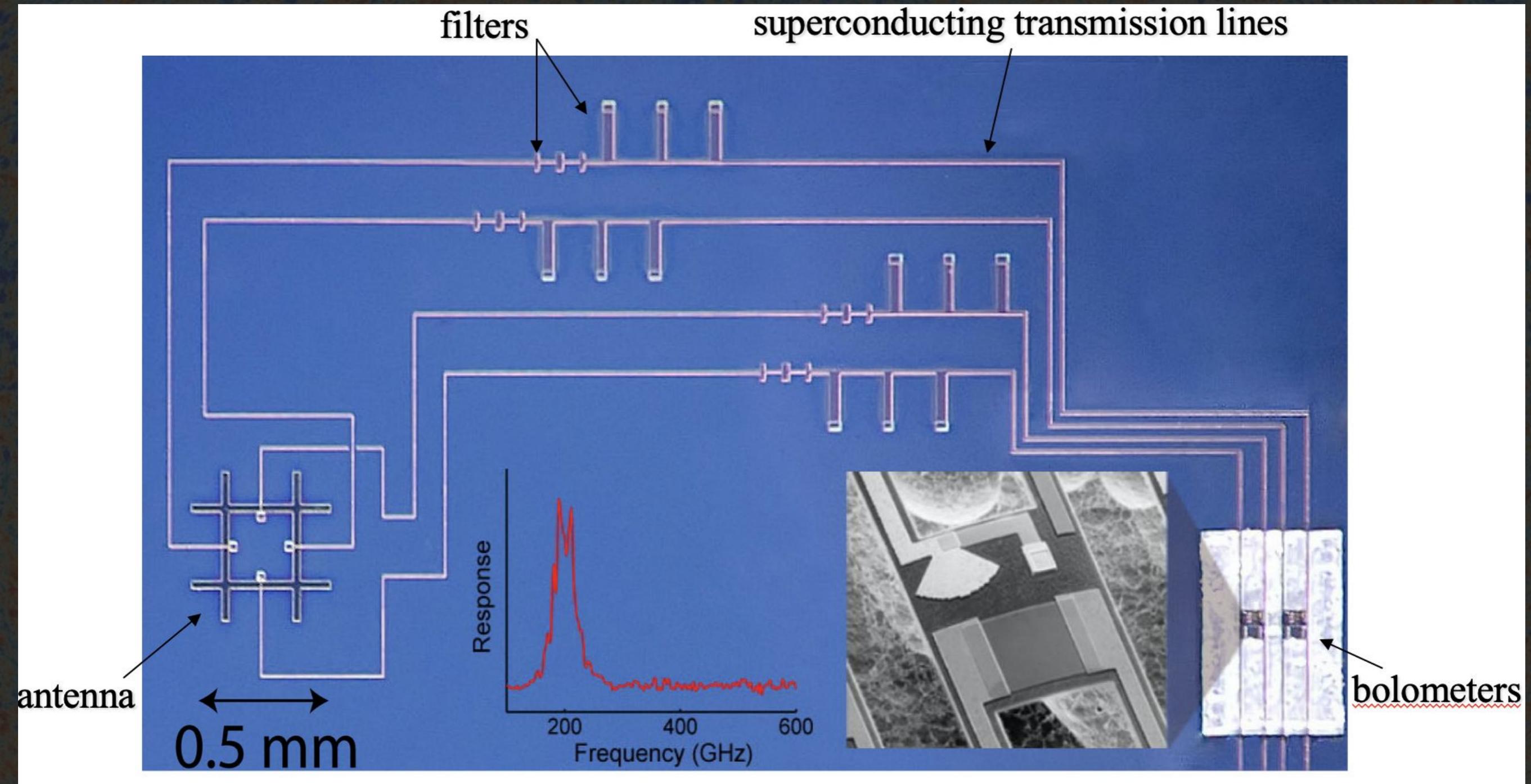


Plano focal de QUBIC::
4 x 256 TES
enfriado hasta 0.3 K

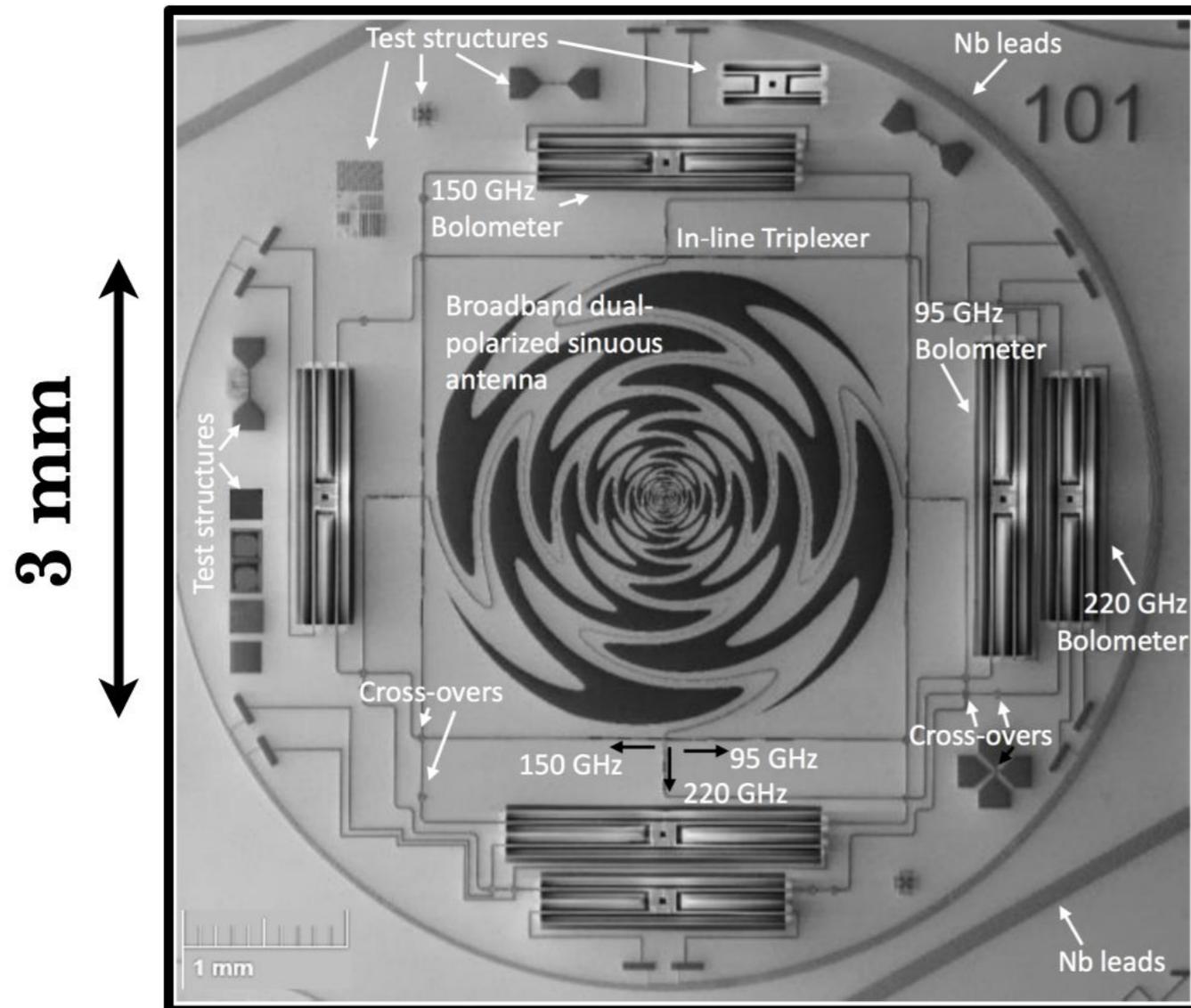
Factor Mux : 128:1

Antenas acopladas sensibles a la polarización

TES - PolarBEAR (UCB/LBNL ~2010)



SPT-3G TES - 3-bandas (~2015)





- Los bolómetros son detectores que miden la energía depositada por todo lo que entra en un absorbente.
 - Son detectores muy versátiles (Materia Oscura, CMB, X-ray, ...)
 - Ofrecen un amplio ancho de banda
 - Poco sensibles al nivel de background (fuerte ETF con TES)
 - Extremadamente sensible cuando se enfría a bajas temperaturas

Los impresionantes logros en el dominio del CMB durante la última década se deben en gran parte al progreso de los bolómetros.

- Pero !
 - La criogenia involucrada es muy restrictiva
 - La lectura también es complicada
 - Su microfabricación es compleja pero permite la producción de grandes matrices
- MKIDs son una nueva alternativa (más fácil de leer y fabricar)