

A FÍSICA DO TES

SENSOR DE BORDA DE TRANSIÇÃO

Bianca Teixeira, Fabrício Dias, Lucas Alves, Matheus
Dias e Rafael Reis



4 de Junho, 2025

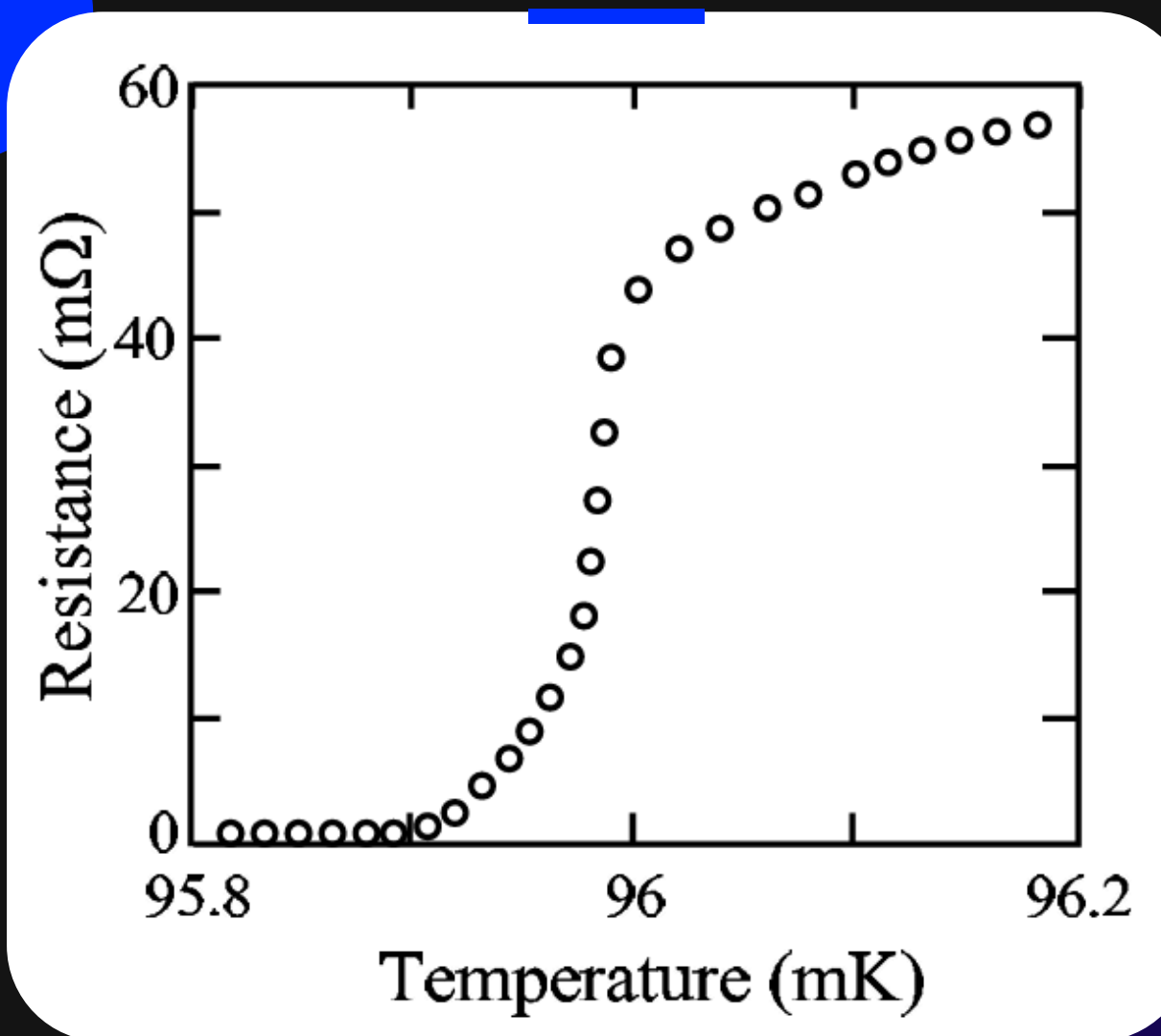
Introdução

O que são os TES?

Transition-edge Sensors (Sensores de Borda de Transição)

- Termômetros ultra-sensíveis feitos com filmes finos de supercondutores.
- O TES explora o fato de que, quando um material supercondutor é mantido na faixa de transição entre o estado supercondutor (resistência zero) e o estado normal (resistência finita), sua resistência elétrica varia de forma extremamente sensível com a temperatura.
- Pequenas variações de energia (como a absorção de um fóton, partícula ou radiação) causam mudanças detectáveis na resistência do material.

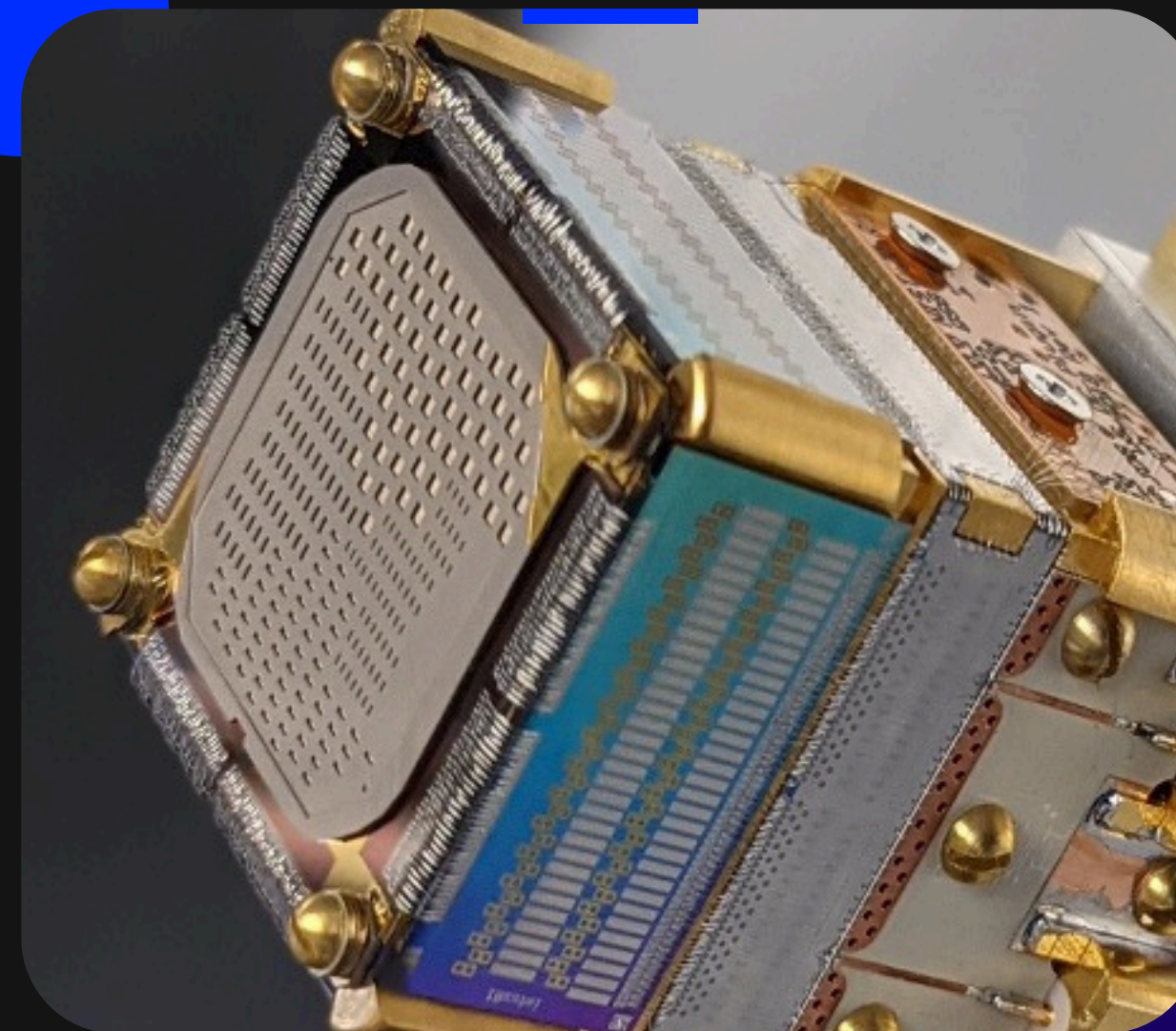
Fonte: IRWIN; HILTON, 2005



Funcionamento Básico

- O sensor é mantido em banho térmico a uma temperatura constante dentro da faixa de transição supercondutora (próximo a 0K).
- Quando o TES absorve energia, sua resistência varia bastante, e essa variação gera um sinal elétrico.
- Depois, o calor absorvido será dissipado para o banho térmico, e o sensor retorna a sua temperatura original, pronto para uma nova medição.
- Apesar do trabalho de manter esses sensores a temperaturas tão baixas, sua resolução energética é muito maior em comparação com sensores térmicos comuns como termistores.

Fonte: "Transition Edge Sensor | NIST", 2025

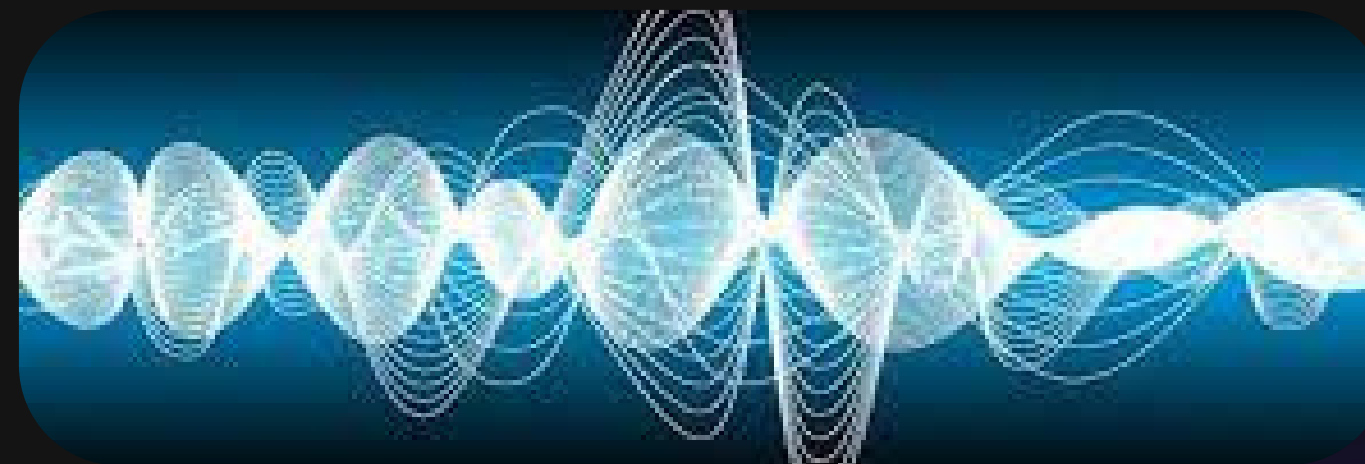


Tipos de sensores TES



Calorímetros de borda de transição

- Medem a energia total de uma partícula ou fóton absorvido.
- Absorvem toda a energia de um evento e medem o aumento de temperatura resultante.
- Ideal para detecção de partículas e fótons, usados na espectroscopia de altíssima resolução.



Bolômetros de borda de transição

- Medem a potência média de uma radiação contínua.
- Absorvem energia de forma constante e medem o fluxo de potência, geralmente de radiação (micro-ondas, infravermelho).
- Ideal para medir a radiação térmica vinda do espaço, como a radiação de fundo cósmico.

História

Supercondutividade

TES

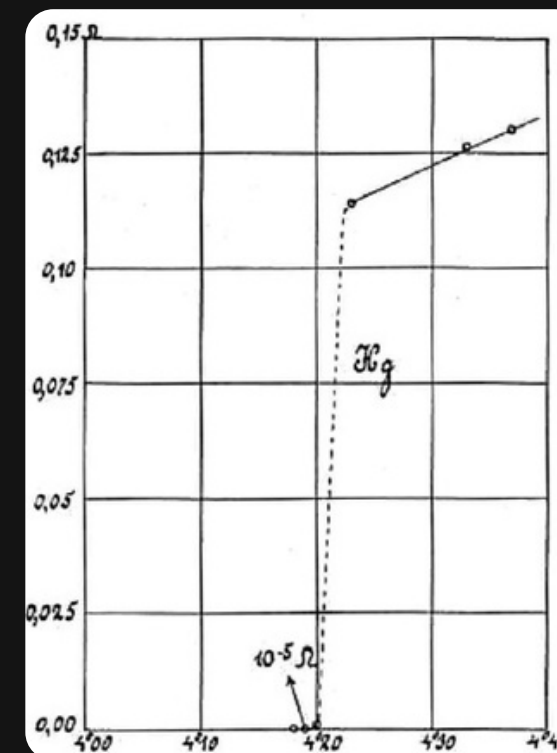
SQUIDs

1908

- Holandês Kammerlingh Onnes liquefaz o Hélio (4K).
- Laboratório de baixas temperaturas.

1911

- Onnes testa o mercúrio em baixas temperaturas.
- Resistência do mercúrio cai abruptamente para zero: supercondutividade.
- Onnes ganha o Prêmio Nobel de Física em 1913.



Fonte: "Centenary of the discovery of superconductivity", 2025

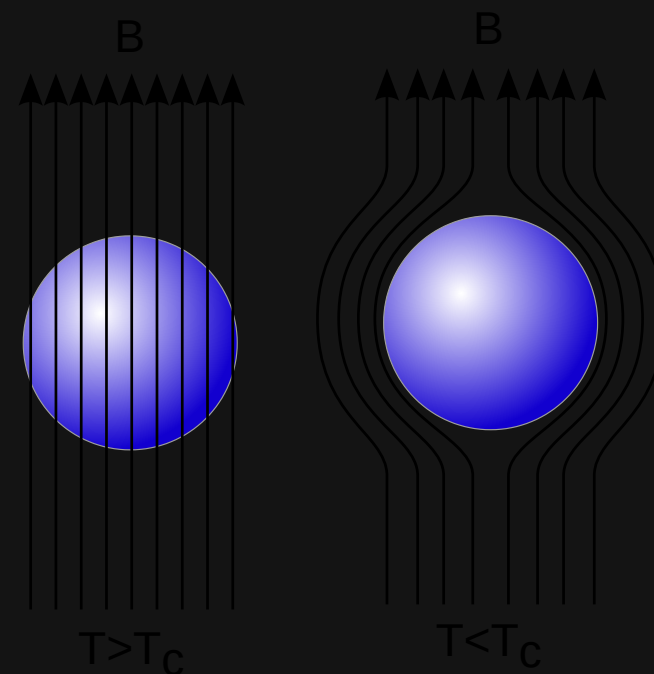
Supercondutividade

TES

SQUIDs

1933

- Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobrem expulsão do campo magnético no interior de supercondutores: efeito Meissner.



Fonte: DOS, 2009

1957

- John Bardeen, Leon Cooper e Robert Scribeffer apresentam a teoria BCS, a mais bem sucedida em explicar o fenômeno da supercondutividade.
- Nobel em 1972.

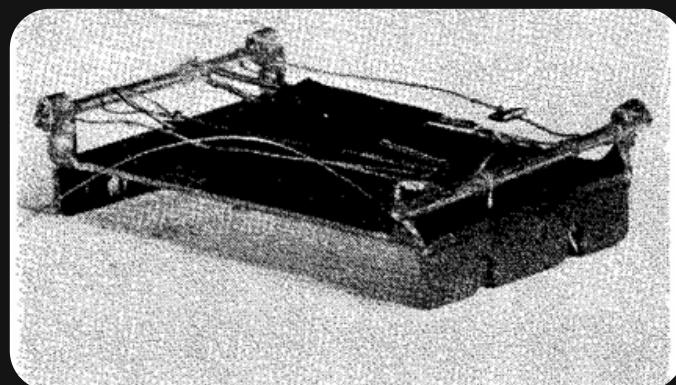
Supercondutividade

TES

SQUIDs

1941

- D. H. Andrews aplica corrente em um fio de tântalo na região de transição supercondutora e mede a mudança de resistência causada por um sinal infravermelho: primeiro bolômetro de borda de transição.



Fonte: ANDREWS et al, 1942

1949

- Andrews aplica corrente no nitreto de nióbio na faixa de transição supercondutora e mede pulsos de voltagem devido ao bombardeamento de partículas alfa: primeiro calorímetro de borda de transição.

1950-90

- Dificuldade de leitura do TES por conta da ausência de amplificador adequado e temperaturas criogênicas de funcionamento.
- Amplificadores FET eram os melhores da época mas funcionavam com alta impedância.

Supercondutividade

TES

SQUIDs

1964

- Pesquisadores dos Ford Research Labs, laboratórios de pesquisa da Ford, constroem um dispositivo capaz de medir campos magnéticos com extrema sensibilidade.
- Esse dispositivo é o SQUID: Superconducting Quantum Interference Device.
- Funciona a partir de um anel supercondutor que gera campo magnético a partir de correntes muito baixas. O SQUID tem grande sensibilidade a mudanças nesse campo magnético.

1990s

- SQUIDs foram usados por várias décadas para medir campos magnéticos muito pequenos, mas ainda era caros e instáveis, pois operam a temperaturas criogênicas.
- Na década de 90, avanços na criogenia e nas técnicas de fabricação do SQUID permitiram a construção de projetos de amplificadores SQUID para sensores TES.

2000s

- São desenvolvidas técnicas de multiplexação, que permitem a leitura de vários sensores TES ao mesmo tempo utilizando SQUIDs como amplificadores.
- Atualmente, os sensores TES juntamente com os SQUIDs são amplamente utilizados em diversas aplicações e continuam em desenvolvimento.

Fundamentação Teórica

Fundamentação Teórica do TES

O QUE SÃO SUPERCONDUTORES E COMO SÃO ORIGINADOS

Supercondutores são materiais que, em temperatura muito baixas, próximas ao zero Kelvin, possuem resistividade igual a zero.

Ou seja, supercondutores são materiais para os quais abaixo de uma certa temperatura, chamada de Temperatura crítica (T_c), não apresentam resistência elétrica advinda da rede ou espalhamento de elétrons.

Fonte:

<https://supercondutividade.blogspot.com/search/label/tipos%20de%20supercondutores>



Material no estado supercondutor.

Fundamentação Teórica do TES

O QUE SÃO SUPERCONDUTORES E COMO SÃO ORIGINADOS

Para entender a física por trás de um supercondutor, no entanto, precisamos entender alguns fenômenos e fatores que ocorrem nestes materiais quando estão no estado supercondutor, ou seja, abaixo de (T_c). Tais como:

1. Formação de Pares de Cooper.
2. Energia de Gap supercondutor.
3. Efeito Meissner.
4. Comprimento de Coerência.

Fundamentação Teórica do TES

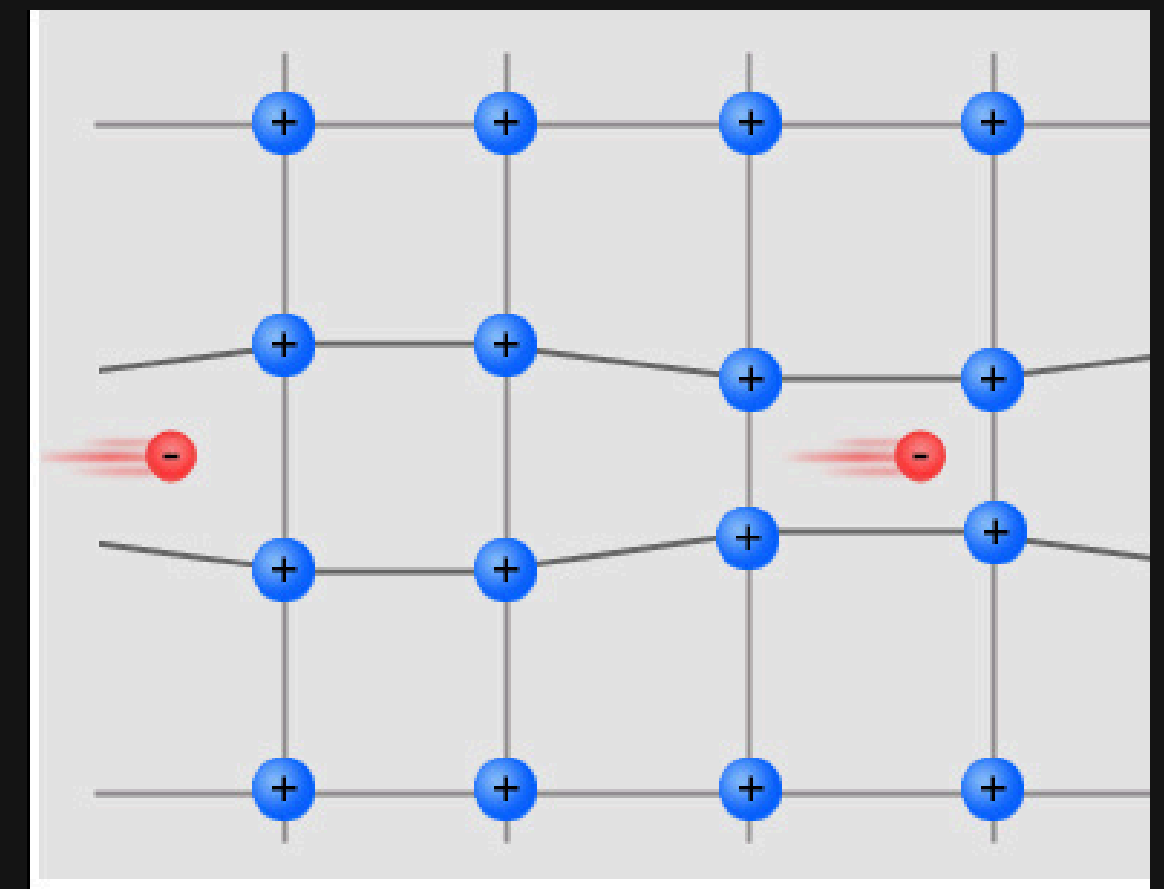
PARES DE COOPER:

Em um material supercondutor, no limite de baixas temperaturas, são formados pares de Cooper. Eles ocorrem da interação do elétron com íons positivos da rede, de forma que:

- Quando o primeiro elétron se move através da rede cristalina, ele atrai íons positivos, deformando levemente a rede.
- Essa deformação cria uma região de densidade positiva ao redor da trajetória do elétron.
- O segundo elétron é então atraído por essa região positiva, o que efetivamente os liga.

Fonte:

<https://www.abc.net.au/science/articles/2011/07/20/3273635.htm>



Formação de pares de Cooper na rede cristalina.

Fundamentação Teórica do TES

PARES DE COOPER E COMPRIMENTO DE COERÊNCIA:

- A teoria BCS mostra que os pares de Cooper têm uma função de onda coletiva e se comportam como um único fluido quântico.
- O tamanho dessa função de onda, conhecido como comprimento de coerência, é muito maior do que a distância média entre elétrons.

Na equação a seguir, vemos a definição de comprimento de coerência, sendo H_c o campo crítico (Campo aplicado o qual o material perde o efeito supercondutor):

$$\xi(T) = \frac{\hbar}{2 \mu_o e^* H_c(T) \lambda_L(T)}$$

Assim sendo, podemos definir comprimento de coerência como a distância média entre os elétrons formados pelos pares de Cooper.

Fundamentação Teórica do TES

ENERGIA DE GAP SUPERCONDUTOR:

Com a formação dos pares de Cooper, temos uma energia de ligação associada a estes pares, chamada de energia de gap supercondutor. Portanto, essa energia de gap supercondutor pode ser interpretada também como a energia necessária para “destruir” os pares de cooper e anular o efeito supercondutor.

$$\Delta = \frac{\hbar \cdot v_f}{\xi}$$

Fundamentação Teórica do TES

EFEITO MEISSNER E COMPRIMENTO DE LONDON:

Efeito Meissner é um fenômeno da supercondutividade, na qual o material repelo o campo magnético aplicado em sua direção. Em geral, os pares de cooper geram correntes na superfície do supercondutor. Estas correntes, por sua vez, criam um campo contrário ao campo aplicado, e impede que este campo adentre o material.

O comprimento máximo de penetração do campo magnético no material é definido por comprimento de London, sua função é dada pela equação a seguir, sendo “m” a massa dos pares de Cooper, n_s a densidade de pares de Cooper e “q” a carga dos pares:

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 \cdot n_s \cdot q^2}}$$

Princípio de funcionamento do TES

FASE DE TRANSIÇÃO SUPERCONDUTORA:

Desprezando efeitos de aplicação de campo magnético ou corrente, entende-se que, para um supercondutor ideal, sua resistência será igual a zero se a sua temperatura T estiver abaixo de sua temperatura crítica, ou seja, $R(T) = 0$ para qualquer $T < T_c$.

No entanto, para supercondutores reais, não é bem isso que observamos: Devido a diversos efeitos, como a criação de vórtices, o aquecimento Joule e flutuações térmicas, a mudança de resistência no supercondutor é gradual, e não abrupta como deveria ser em condições ideais.

Princípio de funcionamento do TES

EXEMPLO DE EFEITOS QUE COMPROMETEM A SENSIBILIDADE DE UM TES:

Em supercondutores do tipo II, temos dois campos críticos associados:

H_{c1} e H_{c2} .

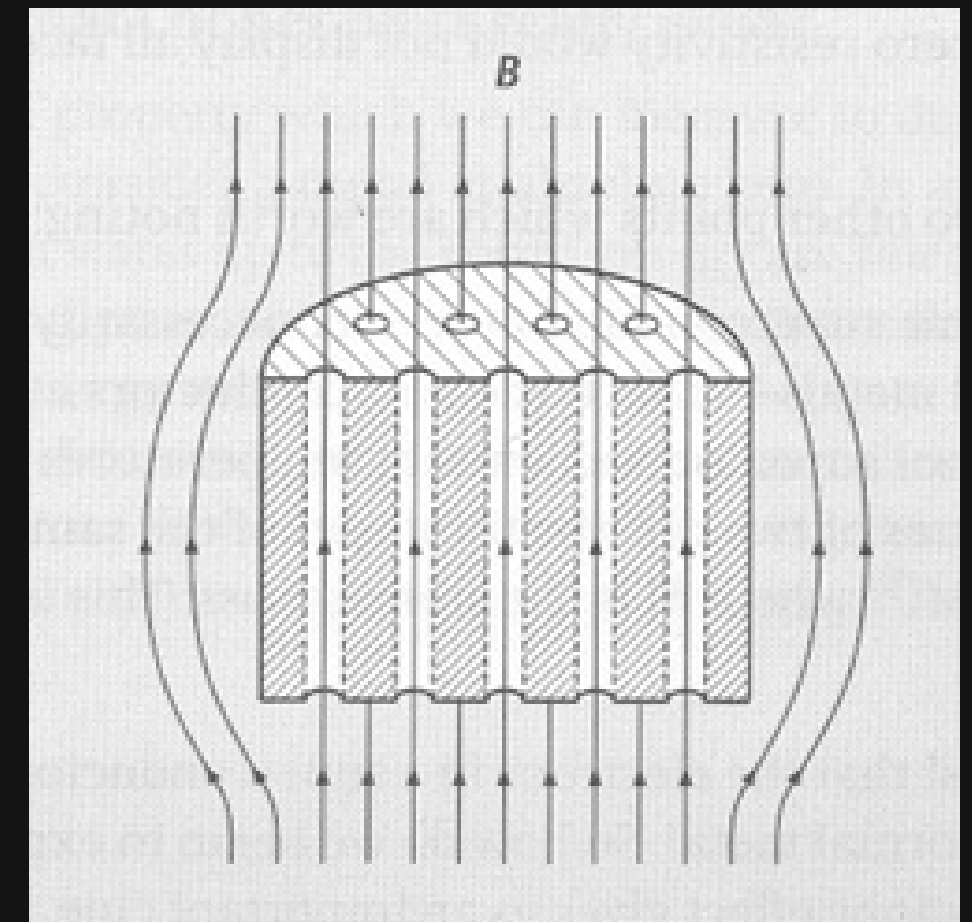
Para campos aplicados $H < H_{c1}$, o supercondutor funciona como um diamagnético perfeito e repele todos os campos aplicados contra o material.

Por outro lado, para campos aplicados $H_{c1} < H < H_{c2}$, o material está num estado misto (supercondutor + estado normal), devido à criação de vórtices.

Estes vórtices penetram o material em formato de filamento, como quantas de fluxo magnético, sendo que cada quantum de fluxo magnético possui:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2 \cdot e} \sim 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

Fonte: The Physics of solids



Quantas de fluxo magnético penetrando o material

Princípio de funcionamento do TES

EXEMPLO DE EFEITOS QUE COMPROMETEM A SENSIBILIDADE DE UM TES:

As impurezas e imperfeições do material aprisionam esses vórtices no que chamamos de “ponto de aprisionamento”, como visto na figura anterior.

No entanto, um aumento da temperatura próximas à T_c pode acabar libertando esses vórtices, fazendo com que eles se movimentem.

Assim, com a movimentação desses vórtices, há dissipação de energia, o que gera resistência elétrica no material.

Por fim, o material acaba por adquirir uma resistência que cresce gradualmente a medida que T se aproxima de T_c , mesmo na fase supercondutora.

E esse fenômeno faz com que a “largura de transição” da fase supercondutora para a fase normal fique maior (resistência varia gradualmente).

Isso é ruim, pois um TES ideal deveria funcionar a base de um supercondutor ideal, ou seja, uma mudança de resistência abrupta a partir de T_c .

Princípio de funcionamento do TES

COMO FAZER PARA MINIMIZAR ESTE EFEITO?

Para que um TES seja projetado da forma mais ideal possível, evitando uma largura de transição muito alta, o material deve seguir à seguinte regra:

$$R_n < \pi^2 \frac{L_0 \cdot T_c^n}{G \cdot \alpha}$$

Sendo R_n a resistência normal do material, L_0 a constante de Lorentz, n é o expoente de transferência de calor, G é a condutância do banho térmico e α é a sensibilidade logarítmica da resistência à temperatura.

Princípio de funcionamento do TES

PARÂMETRO DE SENSIBILIDADE TÉRMICA E ELÉTRICA:

O fator alfa descrito na equação de estabilidade do TES é o parâmetro de sensibilidade térmica, e ele define o quanto a resistência do TES varia com a temperatura.

Sua função, é dada por:

$$\alpha = \frac{T_0}{R_0} \cdot \left(\frac{\delta R}{\delta T} \right)_{I_0}$$

Sendo T_0 , I_0 e R_0 os valores destas variáveis no estado de equilíbrio, ou seja, antes da detecção.

Princípio de funcionamento do TES

PARÂMETRO DE SENSIBILIDADE TÉRMICA E ELÉTRICA:

Por outro lado, a corrente de polarização também pode alterar a resistência do material supercondutor no estado misto, de forma que:

- A corrente pode quebrar os pares de Cooper por efeito Joule.
- Induzir um campo magnético dentro do material.
- Modificar a distribuição de temperatura no material.

$$\beta = \frac{I_0}{R_0} \cdot \left(\frac{\delta R}{\delta I} \right)_{T_0}$$

Assim, além da resistência variar com a temperatura, também pode-se dizer que ela varia com a corrente de polarização do TES, sendo que o parâmetro beta define essa variação.

Princípio de funcionamento do TES

EXEMPLOS DE DISPOSITIVOS TES:

Os principais sensores supercondutores de transição de bordar podem se resumir em dois tipo:

1. Calorímetros: Dispositivos que detectam partículas pontuais, como um fóton.
2. Bolômetros: Dispositivos que captam feixes, ou seja, pulsos de energia contínuos.

Mais para frente, apresentaremos o exemplo de um calorímetro.

Princípio de funcionamento do TES

EFEITO DE FEEDBACK ELETROTÉRMICO NEGATIVO:

Em dispositivos TES convencionais, a temperatura do TES é autorregulada pelo próprio sistema, de forma que sua temperatura oscila e ganha um aumento, e depois retorna à sua temperatura de equilíbrio T_0 .

Para elucidar este conceito, imagine a seguinte situação:

- O TES absorve um fóton e ganha energia, logo a temperatura do sistema aumenta
- Como a temperatura do sistema aumentou, a resistência na fase de transição até a temperatura crítica, e além dela, também aumenta.
- Pela primeira lei de ohm:

$$V = R \cdot I$$

A ddp é mantida constante, enquanto a resistência aumenta. Logo, a corrente diminui.

Princípio de funcionamento do TES

EFEITO DE FEEDBACK ELETROTÉRMICO NEGATIVO:

A potência Joule dissipada no TES é dada por:

$$P = R \cdot I^2$$

Neste caso, R aumenta enquanto I diminui. No entanto, como a corrente está ao quadrado, a tendência é que a potência diminua com a diminuição da corrente.

Com essa perda de potência dissipada, o TES autorregula sua temperatura, de forma a estabilizar-se e retornar ao seu estado de equilíbrio T_0 , I_0 e R_0 .

Princípio de funcionamento do TES

EFEITO DE FEEDBACK ELETROTÉRMICO NEGATIVO:

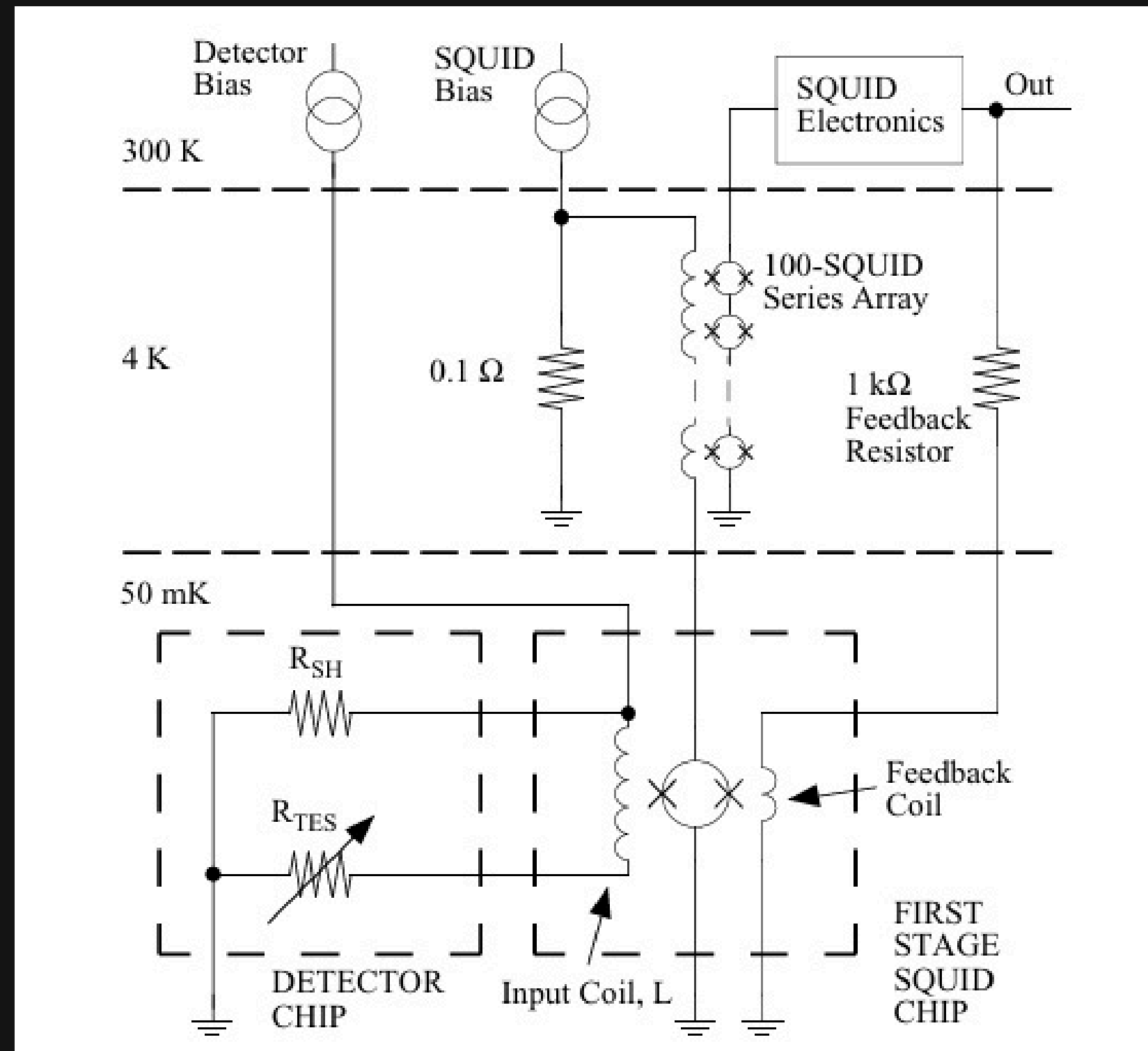
Assim como para a sensibilidade térmica e de corrente, o TES também possui um parâmetro adimensional que representa o ganho de feedback eletrotérmico negativo, dado pela seguinte expressão:

$$\mathcal{L} = \frac{P_0 \cdot \alpha}{G \cdot T_0}$$

Assim, quanto maior o fator de feedback eletrotérmico negativo, mais rápido e eficiente é o feedback, ou seja, mais rápido o sensor irá retornar ao seu estado de equilíbrio.

Princípio de funcionamento do TES

Fonte: Transition Edge Sensors



Esquema de um TES do tipo calorímetro.

Estrutura dos TES.

Bicamadas Supercondutoras

Composição

- Materiais supercondutores puros podem não apresentar a temperatura crítica (T_c) ideal. Por isso geralmente utiliza-se uma estrutura bicamada, composta por um material supercondutor acoplado a um metal normal.
- As camadas ultrafinas ficam em contato, fazendo com que o metal normal adquira propriedades supercondutoras na interface de proximidade. Isso resulta em uma $T_{c_{\text{efetiva}}}$ mais adequada para aplicações em TES.
- Exemplos de bicamadas (supercondutor/metal normal):
 - Mo/Cu
 - Mo/Au
 - Ti/Au

Efeito de Proximidade

- Este fenômeno ocorre quando um material supercondutor influencia as propriedades de um metal normal em contato com ele.
- Os pares de Cooper do supercondutor penetram no metal normal a uma distância característica conhecida como comprimento de coerência ξ . Como resultado, a região próxima à interface do metal normal adquire comportamento supercondutor.
- Através deste efeito, se obtém uma $T_{c_{\text{efetiva}}}$ menor que a do supercondutor puro. A $T_{c_{\text{efetiva}}}$ pode ser ajustada "sob medida" pela variação controlada das espessuras das camadas dos materiais.

Filmes Interdigitados

- Imperfeições no material podem gerar ruídos elétricos, reduzindo a precisão do dispositivo. Para reduzir este efeito, utilizam-se padrões entrelaçados de finíssimas faixas de metal normal depositadas sobre o filme supercondutor. Essa configuração provoca perturbações localizadas na ordem supercondutora promovendo uma transição supercondutora mais homogênea em todo o material.



TES com filmes interdigitados

Absorvedores de Energia

Funcionamento do Absorvedor de Energia

- Estes materiais capturam fótons e convertem sua energia em calor, que é rapidamente transferido para o TES. Essa transferência térmica induz uma variação de temperatura que leva o TES a sair do estado supercondutor alterando sua resistência elétrica. A variação de resistência é então medida por circuitos eletrônicos externos.

Características dos Absorvedores de Energia

- A escolha do material depende do tipo de fóton a ser detectados. Exemplos:
 - Bismuto (Bi) para baixa energia
 - Ouro (Au) para alta energia

Requisitos essenciais:

- Alta condutividade térmica para transferência eficiente e rápida de calor ao TES
- Compatibilidade com processos de microfabricação

Requisitos Térmicos

Baixa capacidade térmica:

- A capacidade térmica é a quantidade de energia necessária para causar uma variação de temperatura e para o TES é preciso que ela seja mínima para que até mesmo a energia de um único fóton seja suficiente para produzir uma variação perceptível.

Eficiência termal:

- Alta condutividade térmica para rápida e uniforme propagação de calor minimizando os gradientes térmicos que poderiam provocar distorções nas medições

Estrutura Típica de um Dispositivo TES

A estrutura básica de um TES é composta por três elementos principais:

Absorvedor de energia

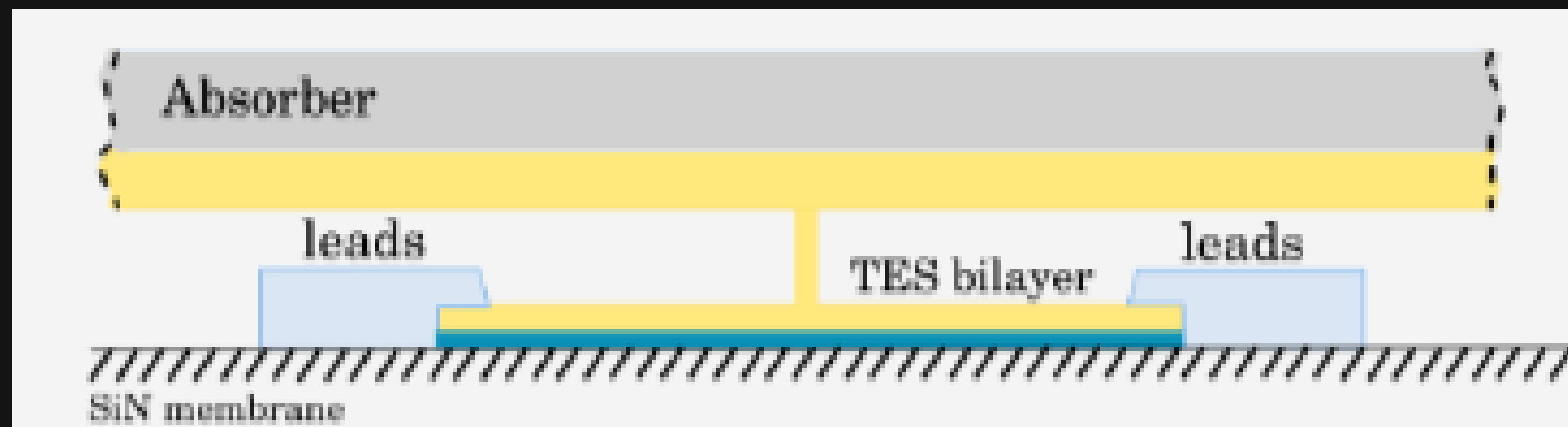
- Material varia conforme o tipo de fóton que se quer medir

Filme supercondutor

- Geralmente um filme bicamada, como o Mo/Au

Membrana suspensa de SiN

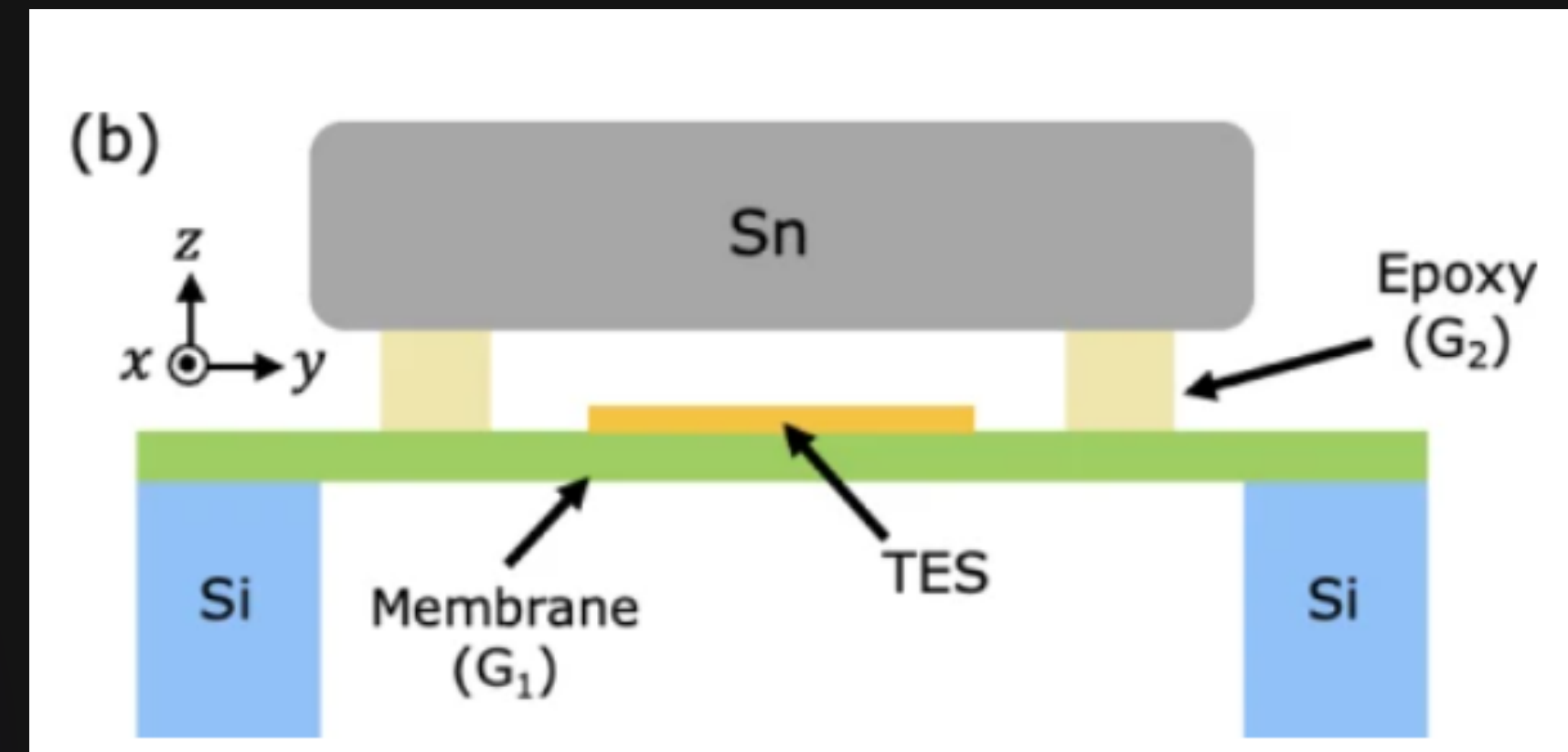
- Importante para o isolamento térmico evitando que o TES dissipe rapidamente o calor gerado pela absorção do fóton para o substrato permitindo uma precisa medição
- Escolha do SiN por ter baixa condutividade térmica e ser compatível com processos de microfabricação



Esquema da estrutura de um TES

Suportes de Epóxi e Plataformas Elevadas em TES

- O absorvedor de energia fica suspenso acima do TES por meio de suportes de epóxi, que fornecem sustentação mecânica enquanto conduzem calor. Esses suportes atuam como isolantes elétricos, garantindo um contato térmico eficiente e prevenindo curtos-circuitos, já que o absorvedor geralmente é metálico.
- Em alguns casos, a transferência principal de calor ocorre através de hastes metálicas em contato direto com o TES.



Esquema de um TES com o suporte de epóxi

Variações Geométricas em TES

Pixel isolado

- Um único TES como sensor individual, usado para medir com precisão a imagem de um único fóton.

Matrizes 2D

- Conjunto de TES são organizados em uma grade bidimensional.
- Utilizados para cobrir uma maior área de detecção e detectar muitos fótons simultaneamente

Arranjos com Absorvedores Sobrepostos

- Absorvedores de diferentes pixels dispostos com ligeira sobreposição assim maximizando a área de detecção ativa e evitando zonas mortas por onde fótons poderiam passar sem serem detectados.

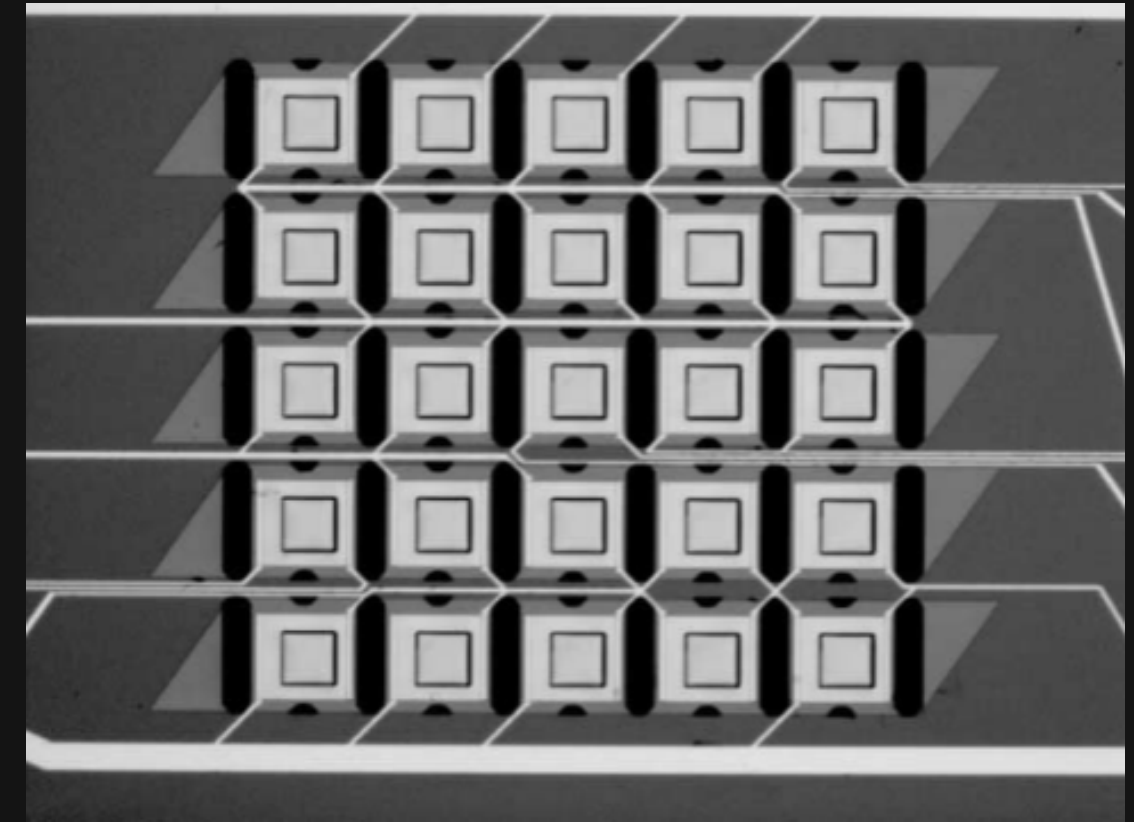
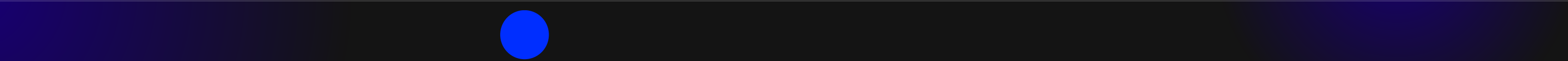
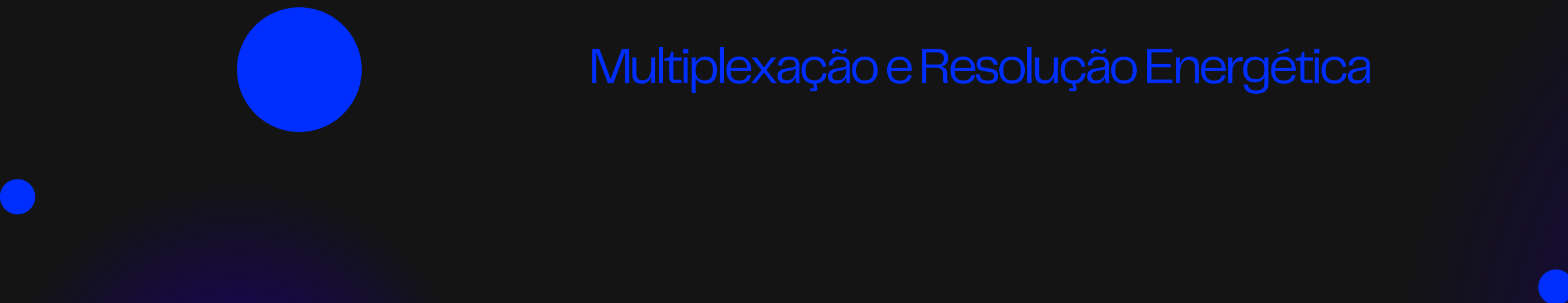


Imagem de uma Matriz 2D de 5x5 pixels



Arquitetura de leitura



Multiplexação e Resolução Energética

Leitura com SQUIDS:

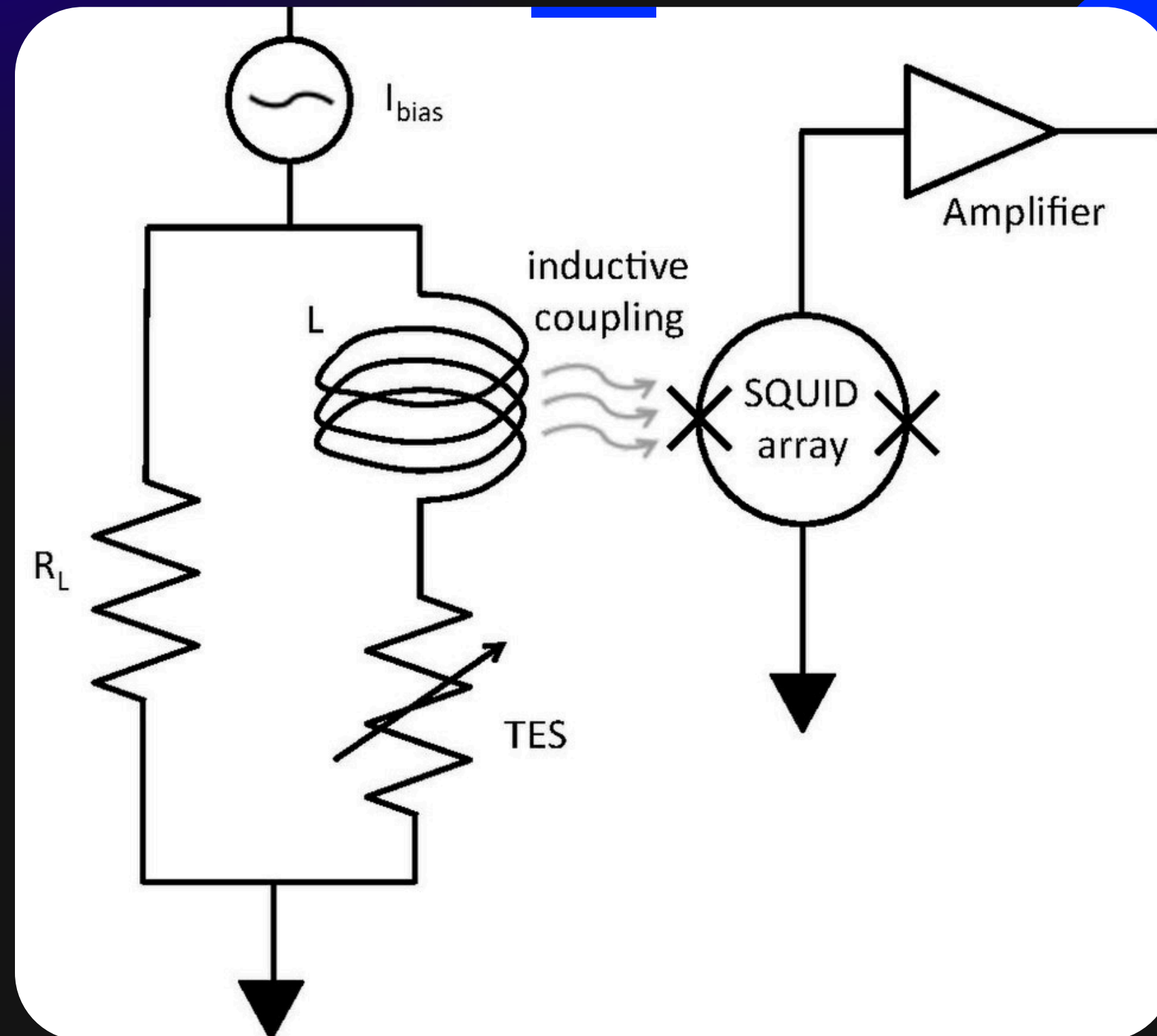


Fig X: TES schematic

Princípio e vantagens

- Altíssima sensibilidade
- Leitura linear e estável
- Multiplexação possível (TDM, CDM ou FDM)
- Baixo ruído de leitura
- Desacoplamento elétrico

A imagem ilustra a leitura de um sensor TES via SQUID, onde a absorção de energia pelo TES altera sua resistência, gerando uma variação de corrente que, ao passar por uma bobina indutora, induz um fluxo magnético detectado pelo SQUID; esse fluxo é convertido em sinal elétrico amplificado, permitindo leitura extremamente sensível, estável e com baixo ruído — ideal para espectroscopia de fótons em ambientes criogênicos.

Esse fluxo é chamado de flux-locked loop (loop de bloqueio de fluxo).

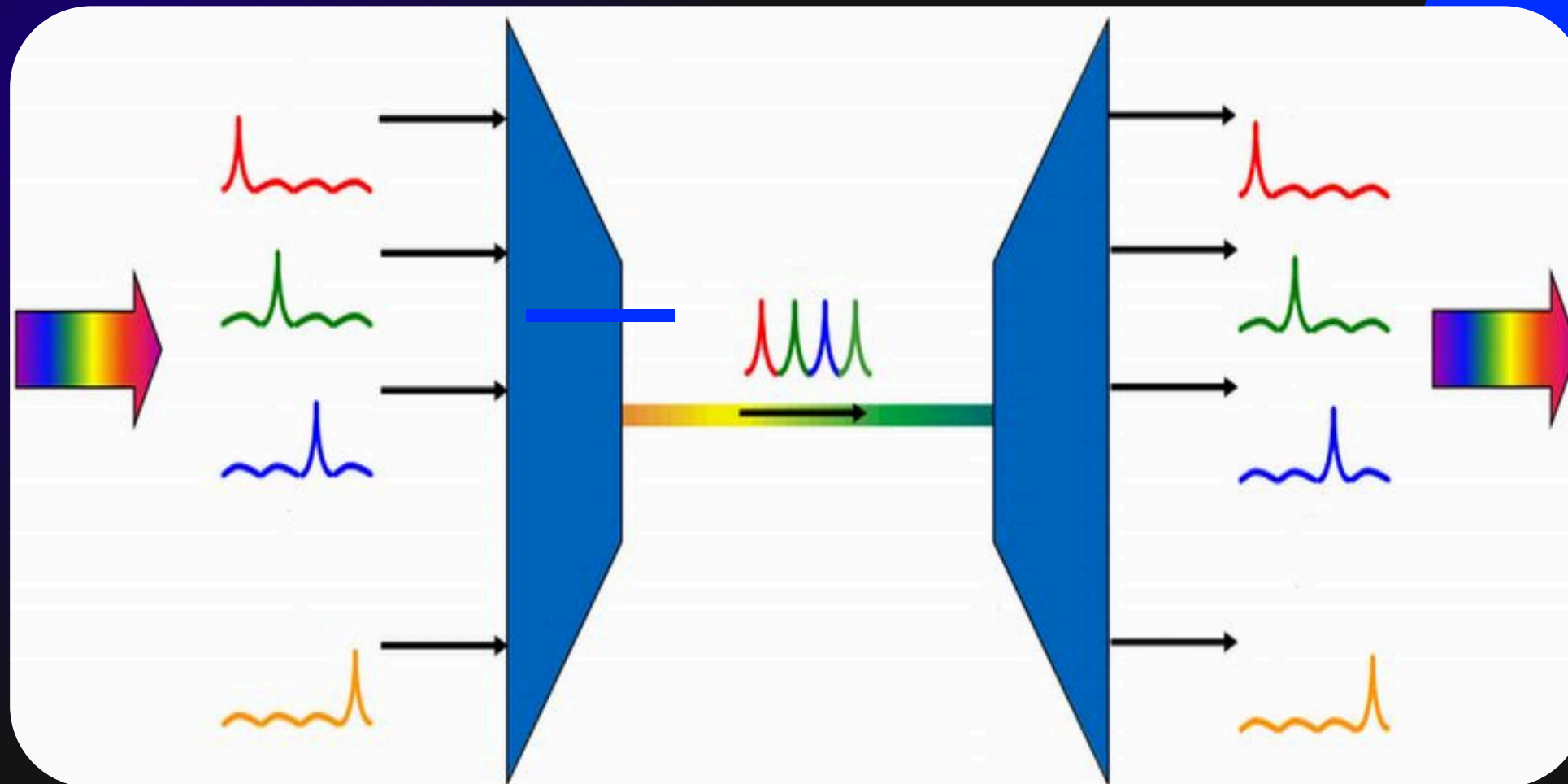


Fig X: Multiplexer e Demultiplexer Schematic

Multiplexação: TDM, CDM e FDM.

Com o avanço dos microcalorímetros baseados em TES (Transition-Edge Sensors), tornou-se essencial desenvolver técnicas de multiplexação para ler milhares de sensores com o mínimo de cabeamento criogênico.

A multiplexação permite reduzir calor parasita, reduzir cabos, simplificar o sistema e manter alta resolução energética. Três métodos principais são usados:

Code-Division
Multiplexing
(CDM)

Time-Division
Multiplexing
(TDM)

Frequency-
Division
Multiplexing
(FDM)

Time-Division Multiplexing

Dividindo o Tempo para Multiplexar

No TDM, cada transmissor usa o canal em turnos rápidos e sequenciais, como em um processador multitarefa. Isso permite a ilusão de simultaneidade, com eficiência controlada. Pode ser síncrono, com slots fixos, ou assíncrono, com uso sob demanda.

✓ Vantagens:

- Simplicidade e confiabilidade operacional.
- Permite leitura individual (útil para calibração).

⚠ Limitação:

- ruído cresce com $\sqrt{N}$, onde N é o número de canais multiplexados.

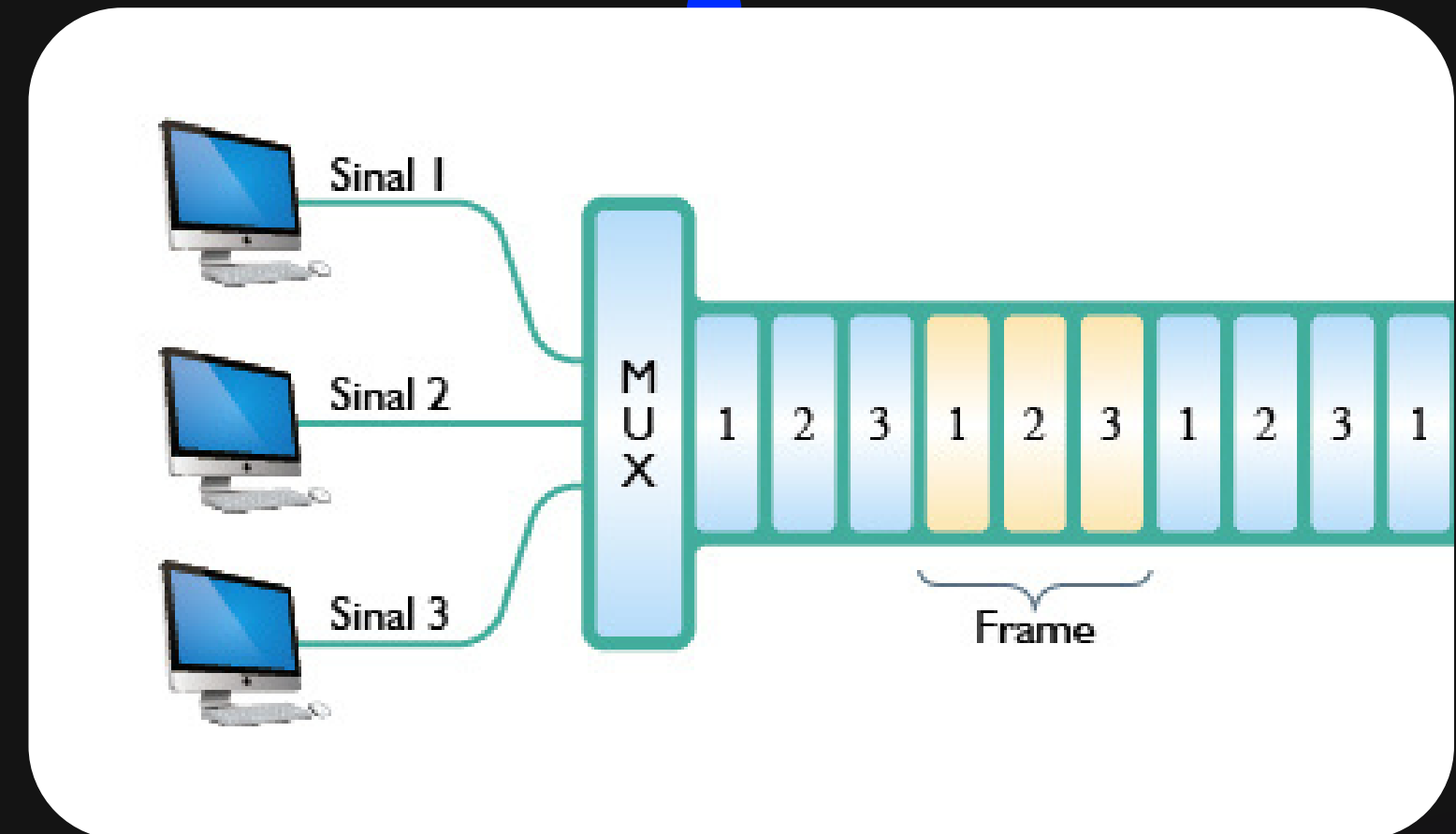


Fig X: TDM Schematic

Code-Division Multiplexing

Multiplexação por Código com Alta Eficiência

Code Division Multiplexing (CDM) permite que vários sinais compartilhem a mesma faixa de frequência simultaneamente, usando códigos únicos. Essa técnica oferece maior segurança, resistência à interferência e é amplamente usada em redes 3G, 4G e comunicações por satélite.

✓ Vantagens:

- Não sofre penalidade $\sqrt{N}$.
- Maior faixa dinâmica dos SQUIDS.

⚠ Limitação:

- Complexidade maior na fiação e controle de ruído de aliasing

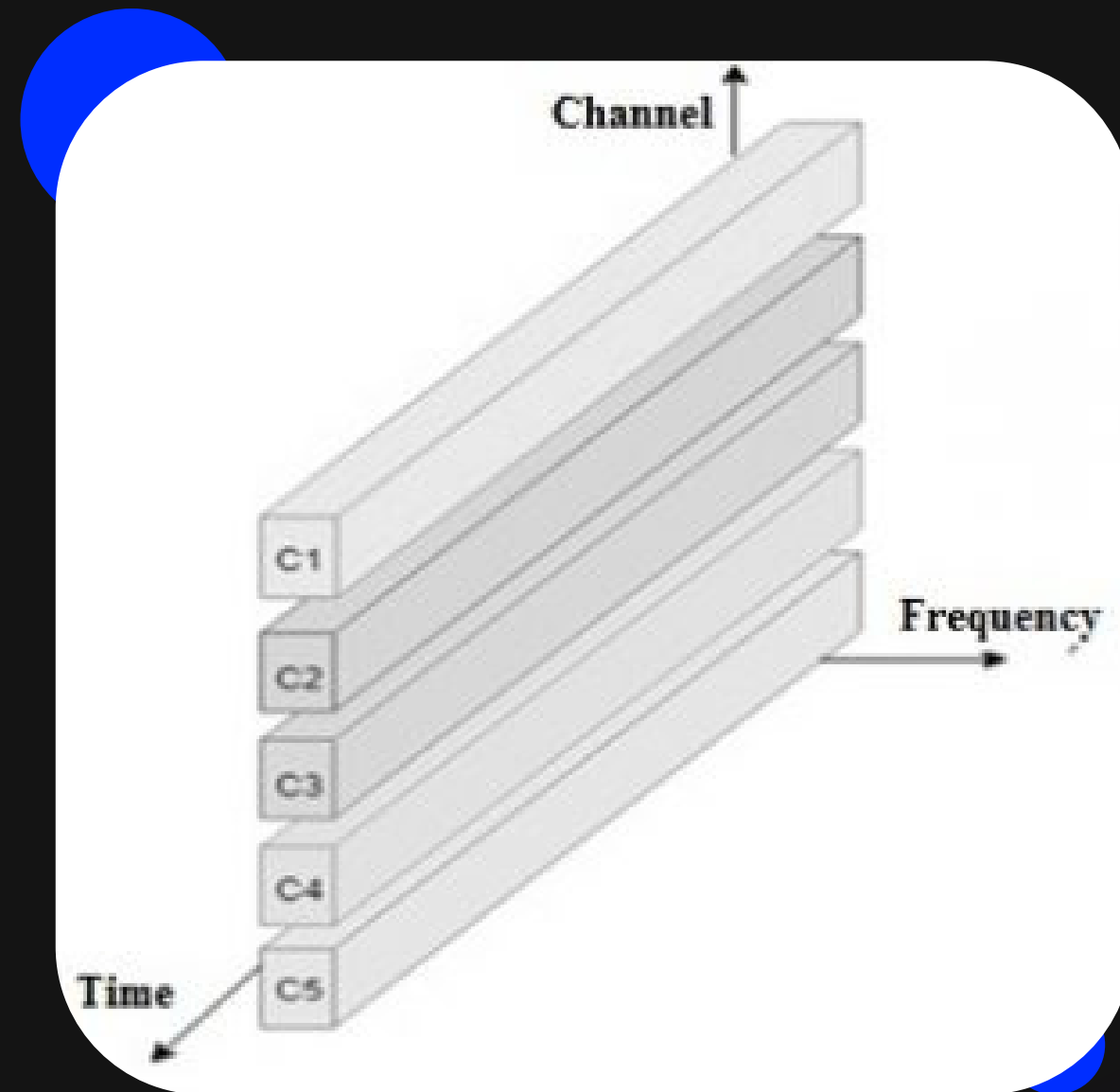


Fig X: CDM Schematic

Frequency-Division Multiplexing

Multiplexação por Frequência para Transmissão Simultânea e Eficiente

O Frequency Division Multiplexing (FDM) divide a largura de banda de um canal em faixas separadas, permitindo a transmissão simultânea de múltiplos sinais por frequências distintas, cada uma associada a um circuito LC ressonante ajustado. Esses circuitos LC atribuem a cada TES uma frequência própria, possibilitando a separação dos sinais sem sobreposição.

Essa técnica é amplamente usada em rádio, TV, telefonia, redes celulares e em detectores TES de alta contagem, como bolômetros.

✓ Vantagens:

- Alta eficiência de banda e leitura simultânea.
- Ideal para bolômetros e aplicações com alta taxa de contagem.

⚠ Limitação:

- Faixa dinâmica do SQUID é compartilhada.
- Suscetível a crosstalk e ruído de impedância parasita.

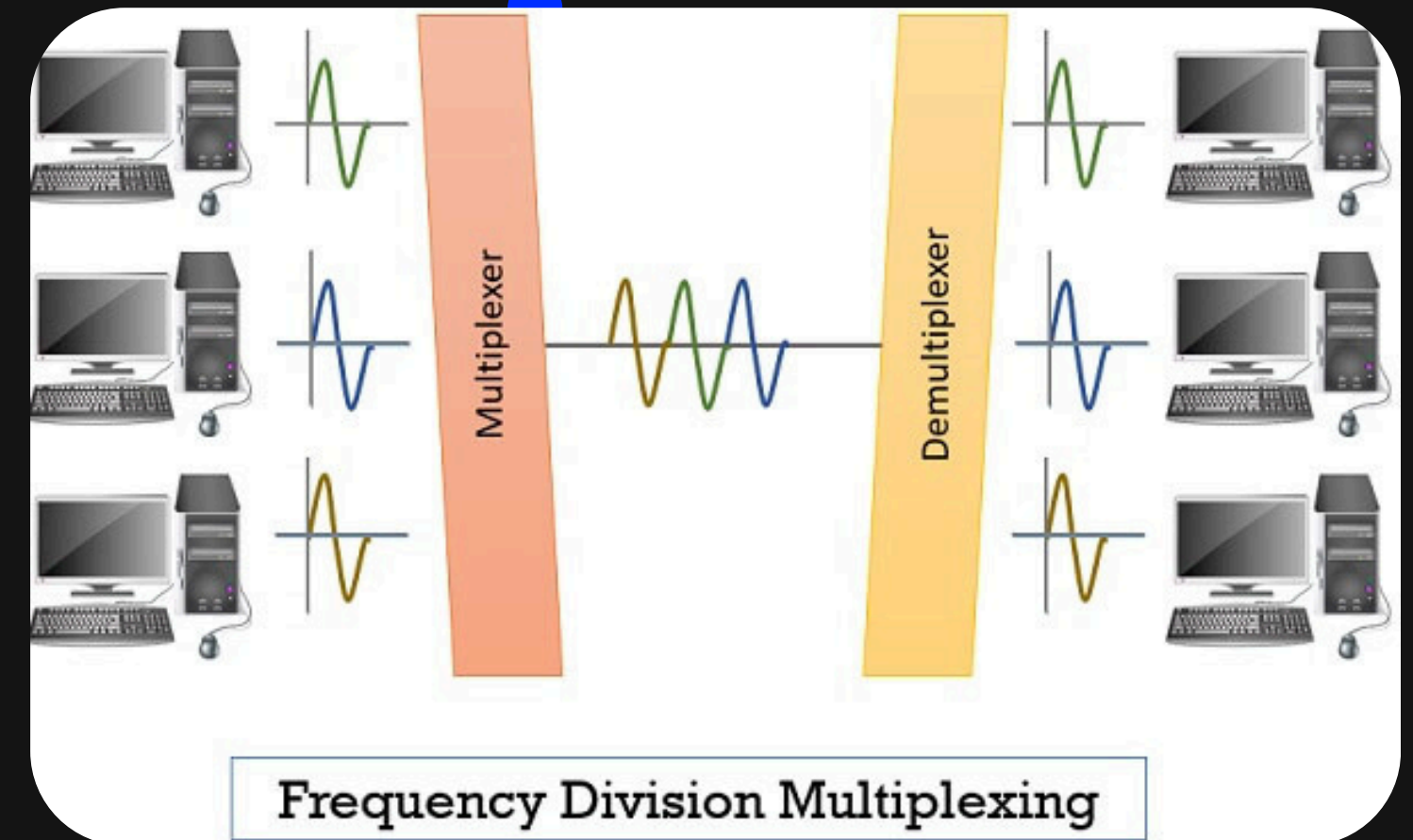


Fig X: FDM Schematic

Arquitetura de Leitura:

Fontes de Ruído

Sensores TES operam com variações muito pequenas de corrente ($\sim \text{nA}$), exigindo leitura extremamente sensível. Qualquer interferência térmica, elétrica ou estrutural pode impactar a resolução energética, que depende da estabilidade do sistema e da leitura precisa via SQUID.

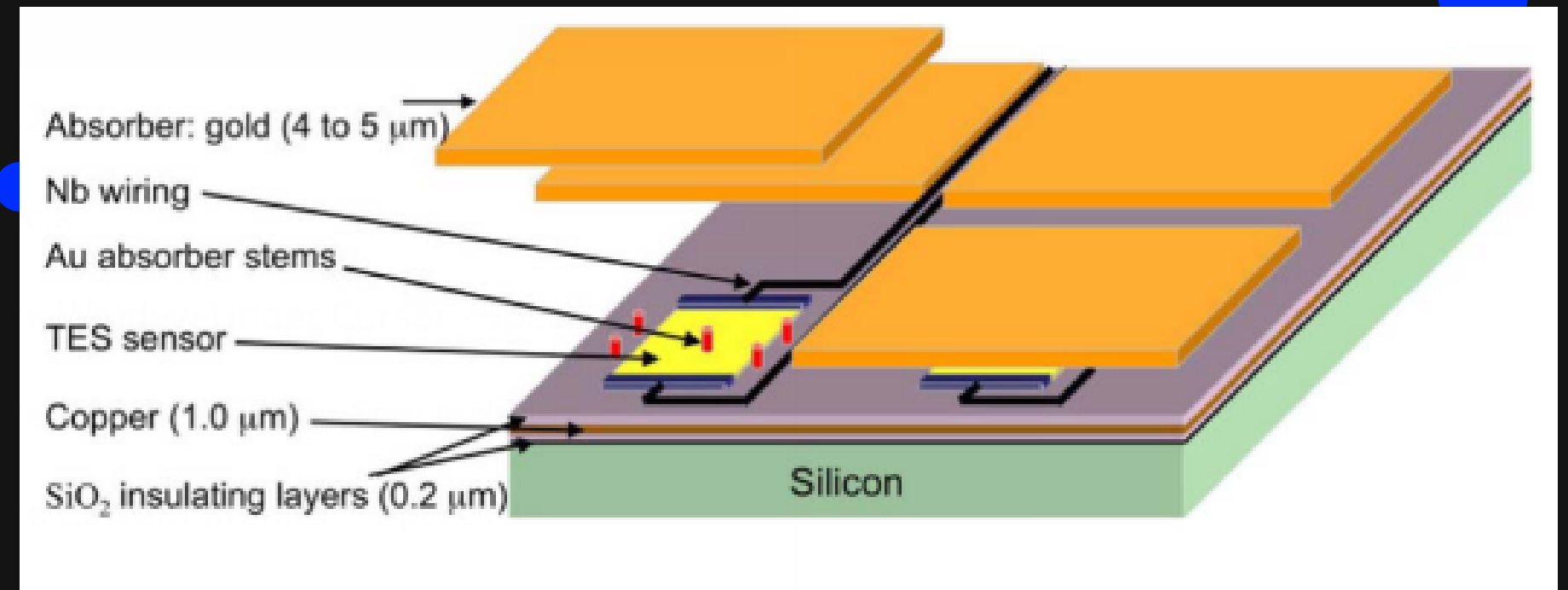


Fig X: Schematic depiction of small pixel array design. The front-left pixel is shown with its absorber removed for clarity.

Johnson–Nyquist

- Ruído térmico intrínseco a resistores (proporcional à temperatura T)
- Presente mesmo em condições estáticas

Ruído de Leitura (Readout)

- Introduzido pelo sistema de leitura: SQUID, amplificadores e fiação
- Aumenta com má impedância e ruído eletrônico do multiplexador

Thermal Fluctuation Noise

- Flutuações na troca de calor entre o TES e o banho criogênico
- Impacta diretamente a estabilidade térmica do sensor

Indutância Parasitária

- Surge em trilhas, fios e conectores entre TES ↔ SQUID
- Causa atraso de sinal, instabilidade eletrotérmica e redução de banda passante
- Degrada a performance da realimentação e aumenta ruído de leitura

Arquitetura de Leitura:

Estratégias para Mitigar Ruído

Para alcançar resoluções sub-eV, sensores TES exigem controle térmico, elétrico e estrutural de alta precisão. A redução de ruído envolve criogenia, eletrônica e microfabricação, sendo essencial para aplicações avançadas em astrofísica e física de partículas.

Equação da Resolução Real

$$\Delta E_{\text{real}}^2 = \Delta E_{\text{term}}^2 + \Delta E_{\text{Johnson}}^2 + \Delta E_{\text{readout}}^2 + \dots$$

Onde a resolução energética depende da soma quadrática de várias fontes de ruído

Controle Térmico Preciso

- Operação a ~50 mK com ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator)
- Membranas suspensas (SiN) reduzem condutância térmica com o substrato
- Camadas isolantes minimizam perda de calor e interferência externa

Geometria Otimizada

- Geometria Corbino elimina bordas e injeções laterais de corrente
- Minimiza contato com zonas com ruído de borda
- Redução de áreas parasitas melhora resposta térmica e elétrica

Materiais e Filmes Finos

- Bicamadas Mo/Au ou Ti/Au, com ajuste fino de T_c via efeito de proximidade
- Absorvedores de bismuto (Bi): alta eficiência e baixa capacidade térmica
- Filmes finos com homogeneidade controlada para evitar ruído em excesso

Multiplexação Otimizada

- Uso de FDM ou CDM para maior eficiência e menor ruído de leitura
- Aproveitamento máximo do range dinâmico do SQUID
- Leitura de milhares de TES com mínimo cabeamento e calor residual

Arquitetura de Leitura:

Resolução Energética

A resolução energética define o quão bem um sensor TES consegue distinguir fótons com energias próximas. Quanto menor o valor de ΔE , maior a capacidade de identificar estruturas finas no espectro — essencial para astrofísica e espectroscopia de precisão.

⚙️ Implicações Físicas:

✓ Reduzir T e C → melhora diretamente a resolução.

- ◆ T: Limitado pelo desempenho da criogenia (ex: ADR)
- ◆ C: Determinado por volume, material e estrutura do absorvedor

Quanto menor a capacidade térmica, maior o aumento de temperatura por fóton absorvido → maior variação de resistência → melhor leitura.

❄️ Limite Termodinâmico da Resolução

A resolução mínima teórica é dada por:

$$\Delta E_{FWHM} \approx \sqrt{4k_B T^2 C}$$

Onde:

- k_B : Constante de Boltzmann
- T: temperatura de operação (~50 mK)
- C: capacidade térmica do TES

📊 Exemplos Reais

A busca por resolução sub-eV impulsionou avanços em materiais, criogenia e leitura de sinais. Hoje, sensores TES representam o estado da arte em espectroscopia de raios-X.

- ◆ ~0.9 eV @ 158 keV – atingido em ambientes de laboratório com controle térmico ideal (TES.pdf)
- ◆ 15 – 2.5 eV – resoluções práticas obtidas em arranjos espaciais como o X-IFU da missão Athena

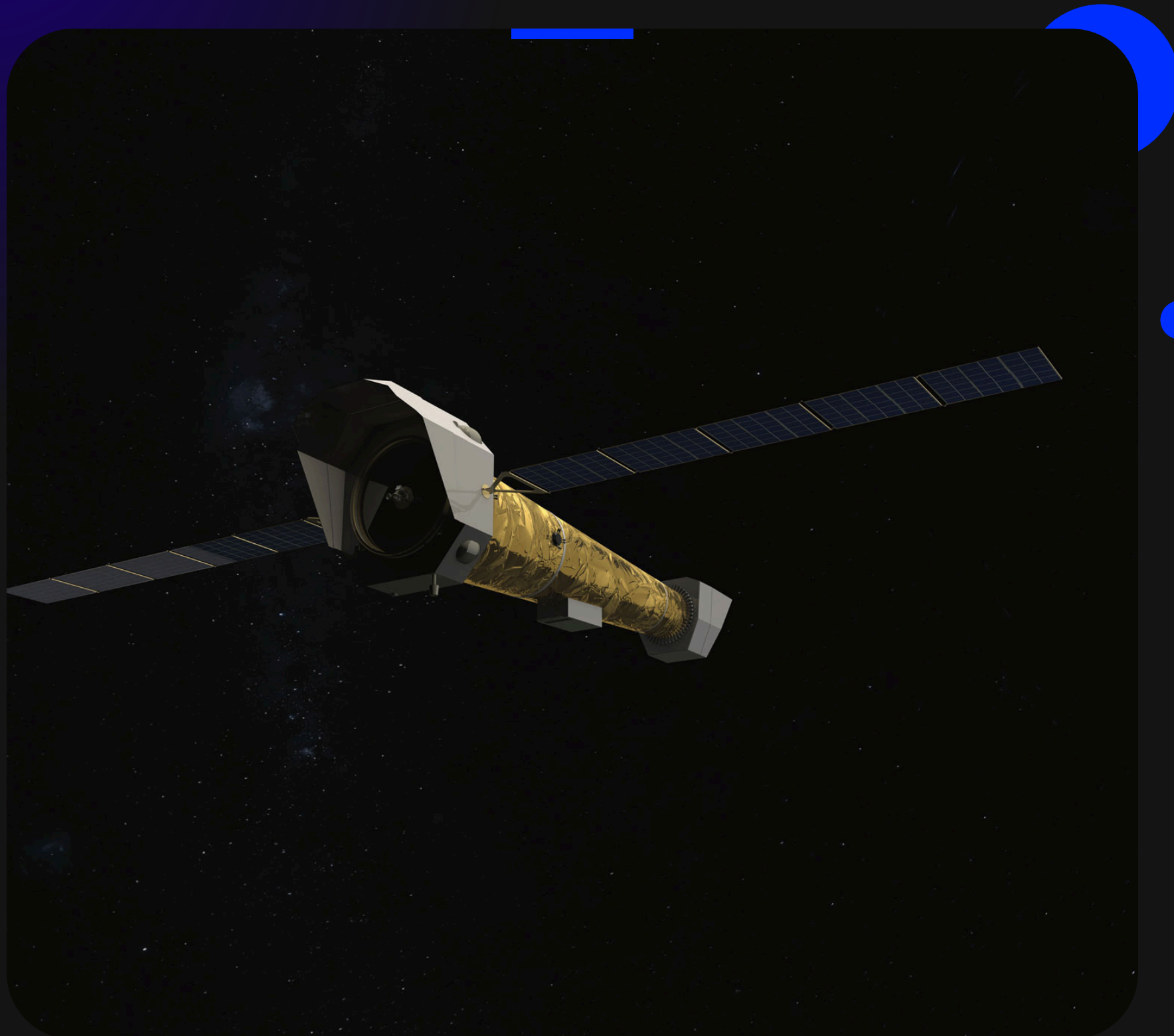


Fig X: Telescópio de raios X Athena.

Exemplo prático:

**No projeto X-IFU (Athena/ESA),
será usada multiplexação TDM
para 3840 pixels, com planos
futuros de migração parcial para
FDM e CDM visando arrays
maiores com melhor
desempenho**

Advances in Small Pixel TES-Based X-Ray Microcalorimeter Arrays for Solar Physics and Astrophysics

Simon R. Bandler, Joseph S. Adams, Catherine N. Bailey, Sarah E. Busch, James A. Chervenak,
Megan E. Eckart, Audrey E. Ewin, Fred M. Finkbeiner, Richard L. Kelley, Daniel P. Kelly, Caroline A. Kilbourne,
Jan-Patrick Porst, Frederick S. Porter, John E. Sadleir, Stephen J. Smith, and Edward J. Wassell

Arquitetura do X-IFU do telescópio espacial NewAthena



The Athena X-ray Integral Field Unit (X-IFU)

The X-ray Integral Field Unit (X-IFU) on board the Advanced Telescope for High-ENERgy Astrophysics (Athena) will provide spatially resolved high-resolution X-ray spectroscopy from 0.2 to 12 keV,...

arXiv.org

A imagem mostra um arranjo híbrido de sensores TES no X-IFU, combinando pixels grandes (LPA, 260 μm) e em alguns casos pequenos (SPA, 110 μm). Cada pixel contém um TES supercondutor que mede com alta precisão a energia de fótons de raios-X, adaptando resolução e cobertura conforme a região observada.

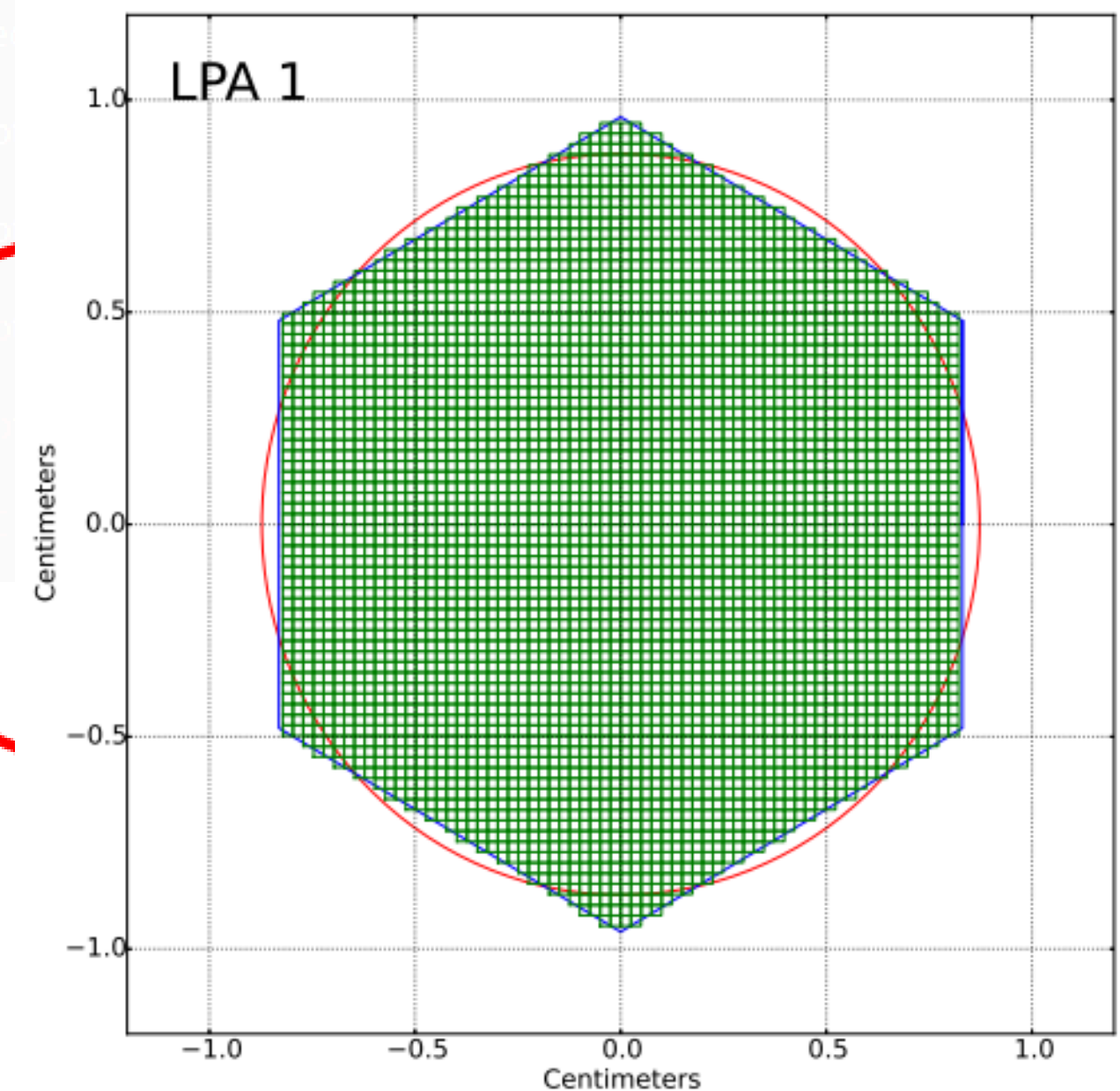
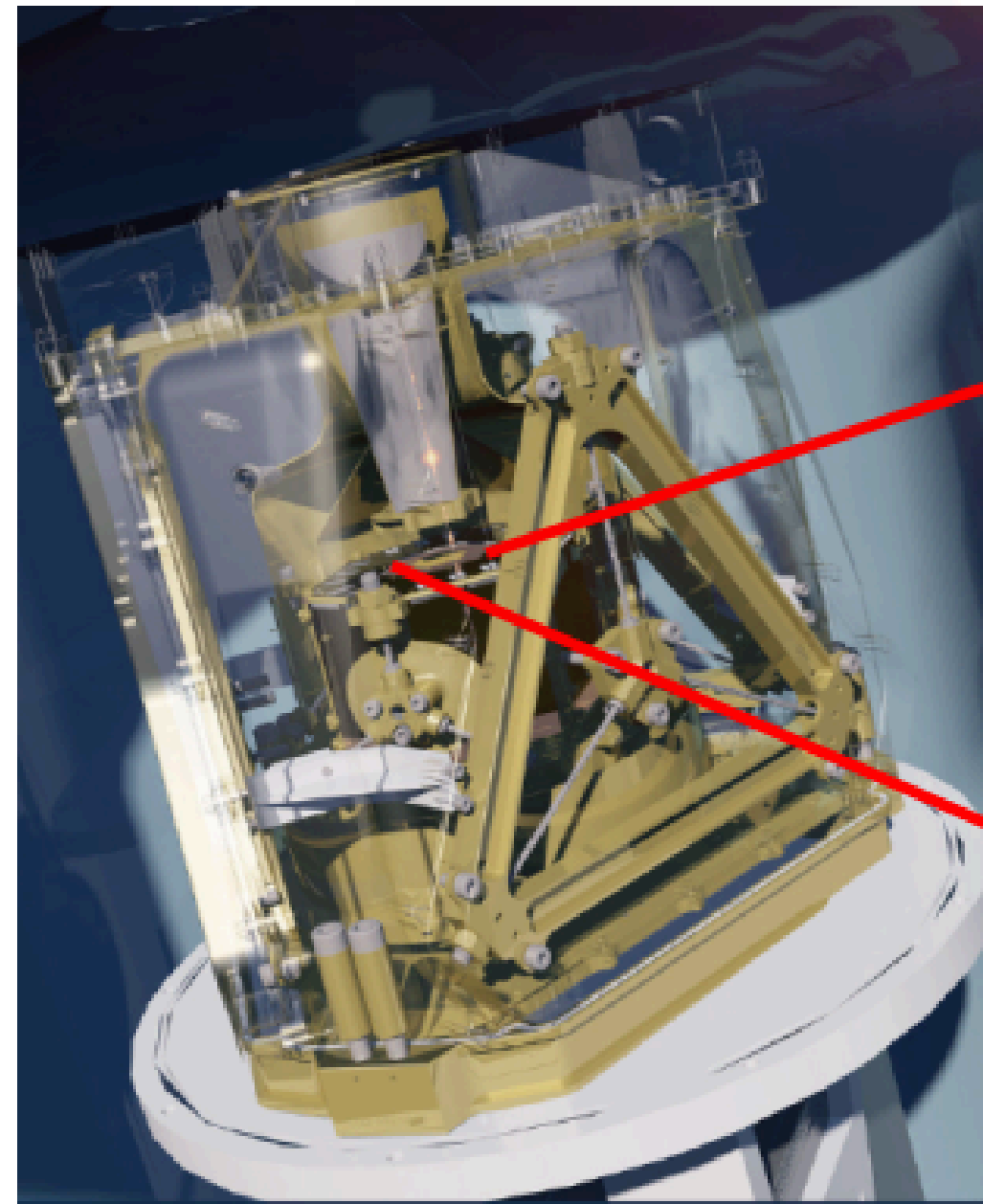


Fig X: X-IFU (Calorimeter) for high-spectral resolution imaging

Arquitetura do X-IFU do telescópio espacial NewAthena

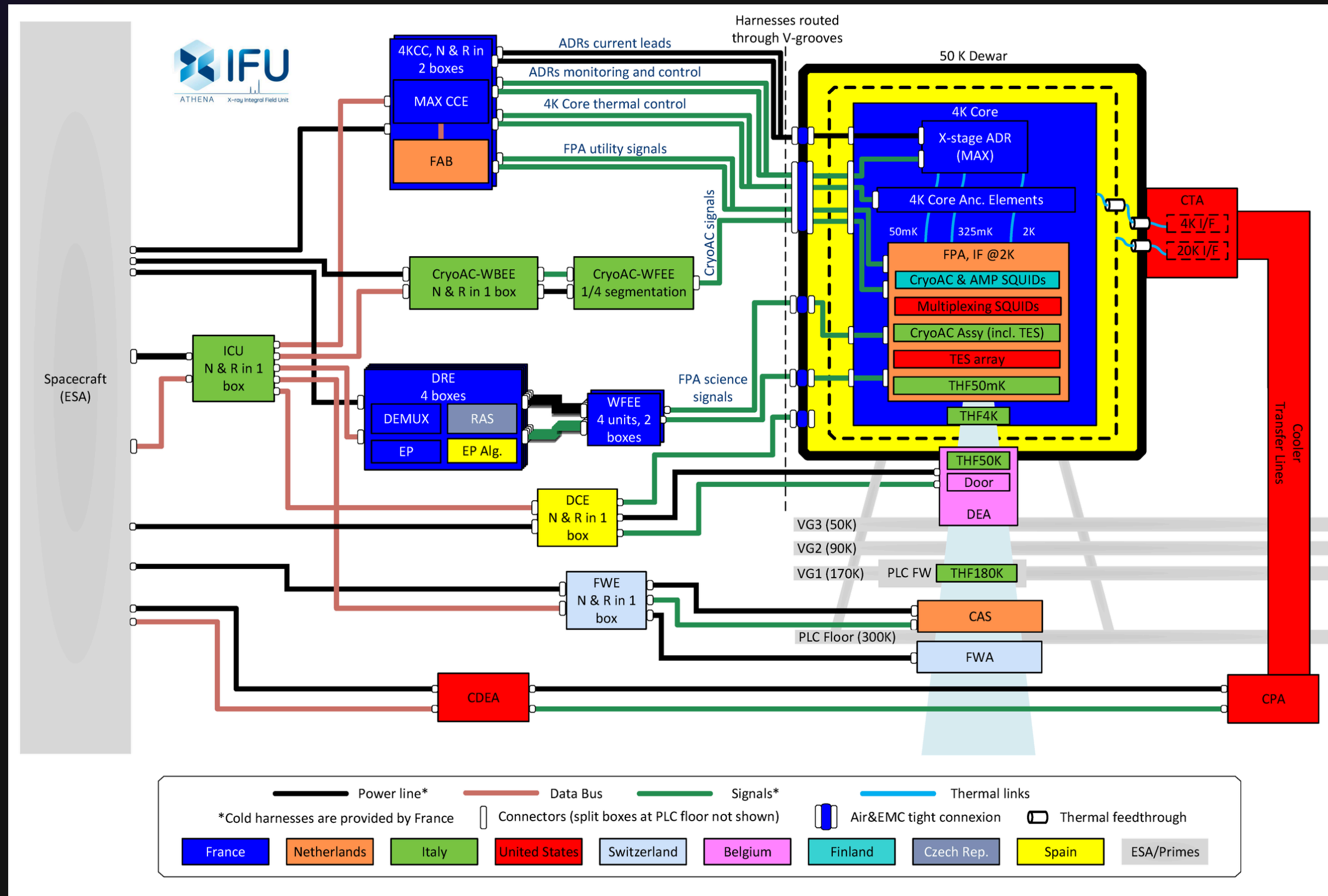


Fig X: Functional breakdown of the X-IFU. © DB/X-IFU



Images shows X-rays from Chandra, optical light data from Hubble, infrared data from the European Southern Observatory VISTA telescope, and ultraviolet data from GALEX of the Helix Nebula.

Fig X: The Helix Nebula.



Fig X: Centaurus A (NGC 5128)

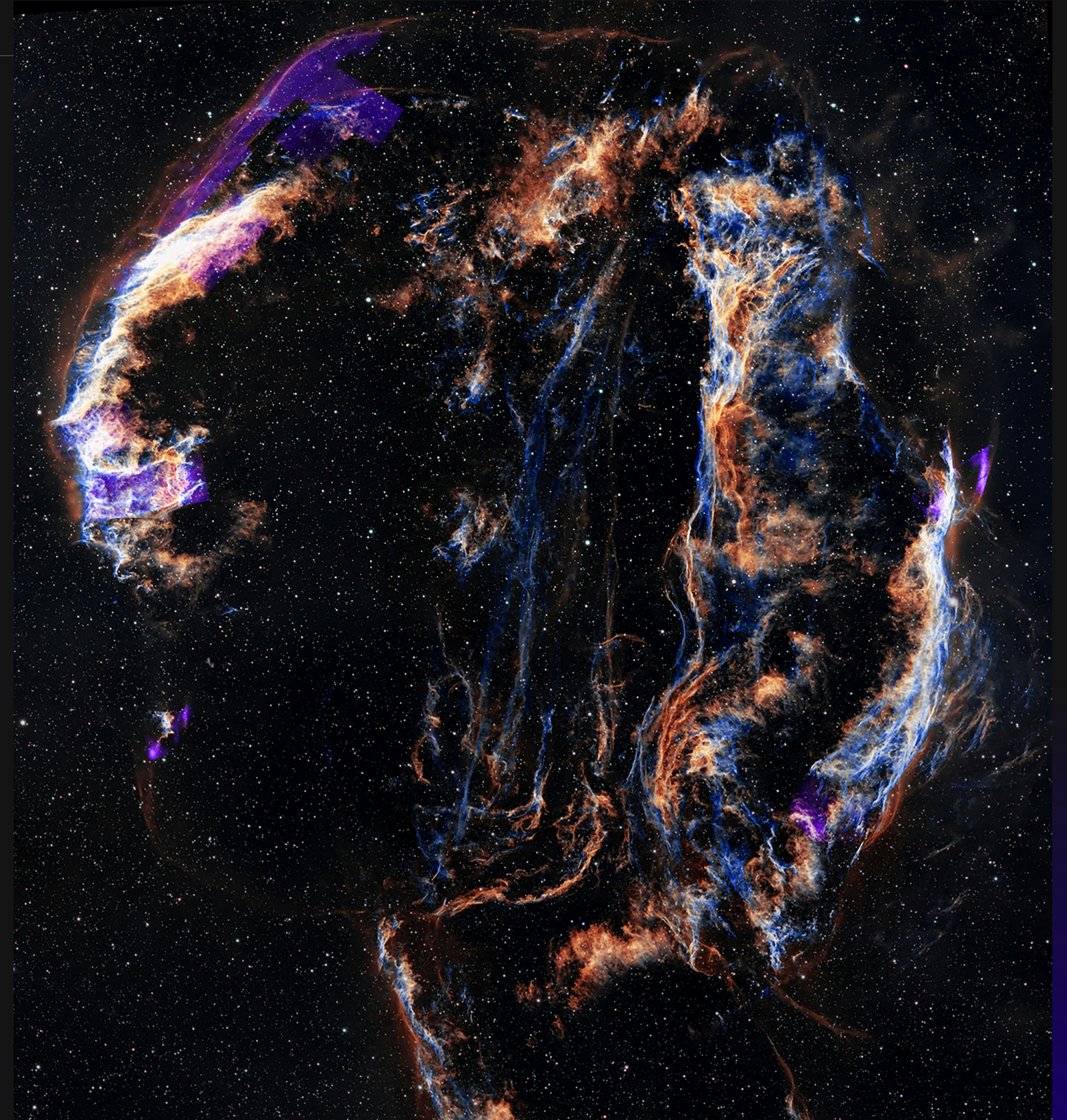


Fig X: Cygnus Loop Supernova Remnant

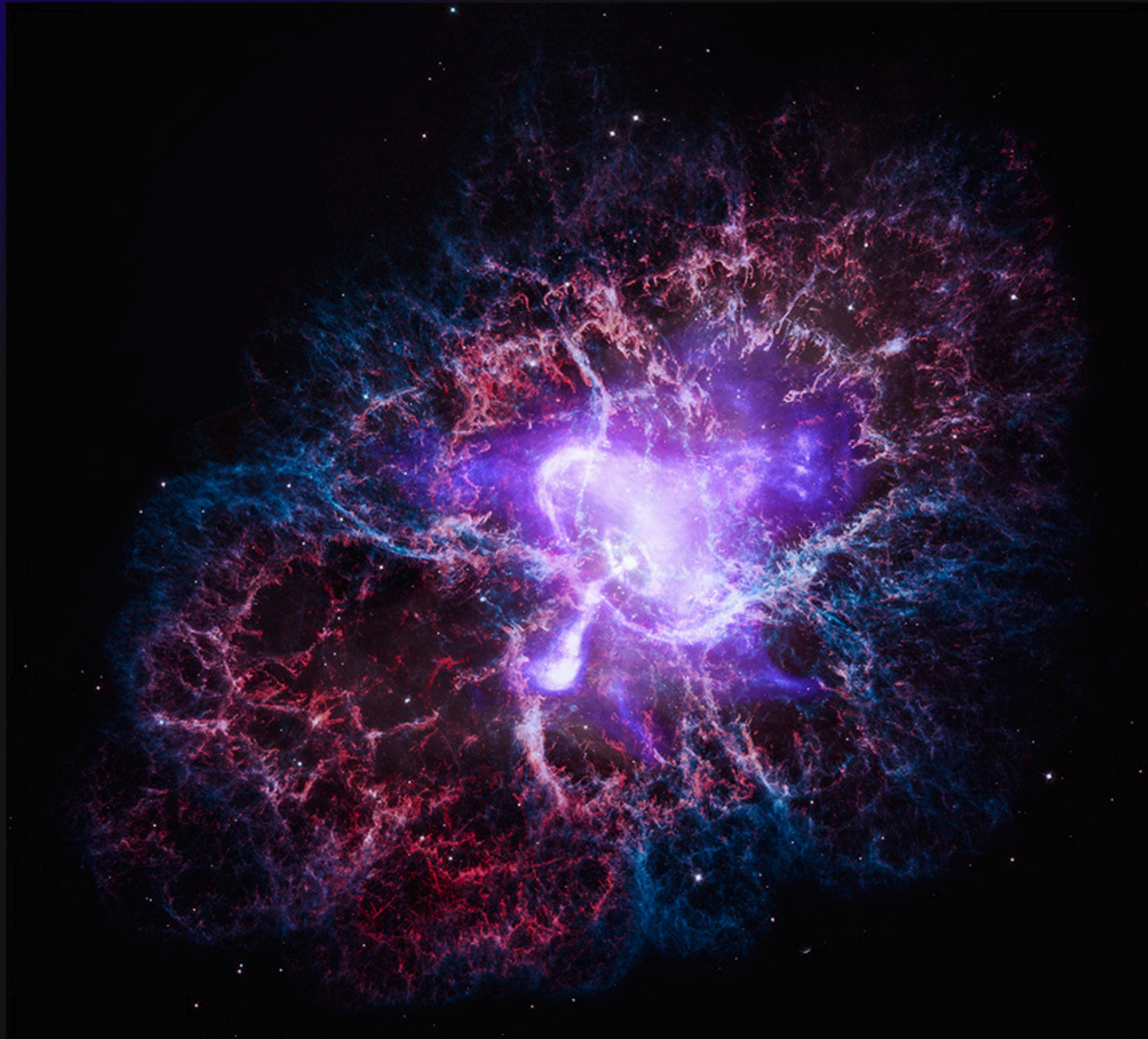


Fig X: The Crab Nebula



Fig X: The Pillars of Creation



The large-scale structure of the Universe

Research over the past 25 years has led to the view that the rich tapestry of present-day cosmic structure arose during the first instants of creation, where weak ripples were imposed on the...

 arXiv.org

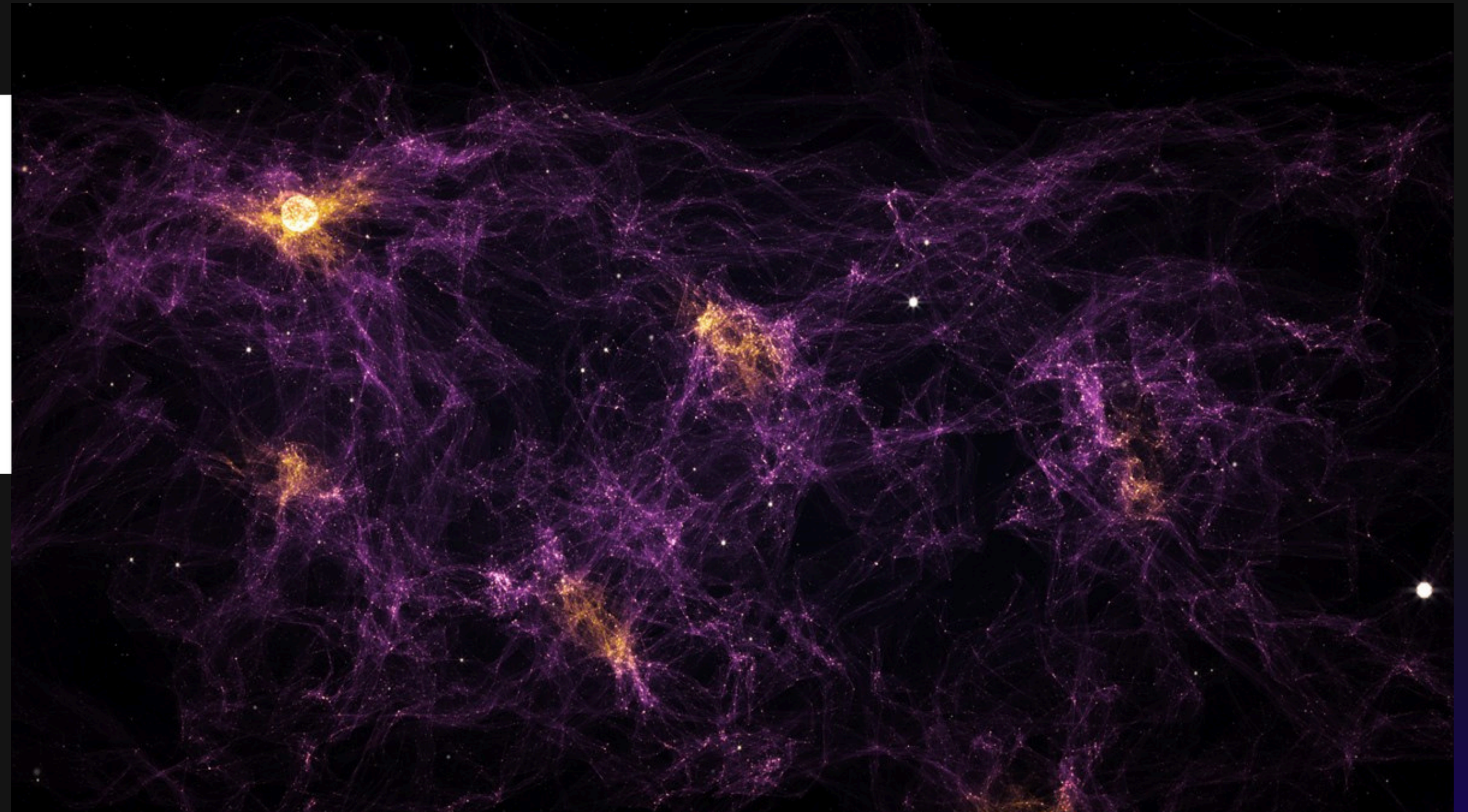


Fig X: the cosmic large-scale structure in dark matter and galaxies, obtained from cosmological simulations of the Λ CDM model.

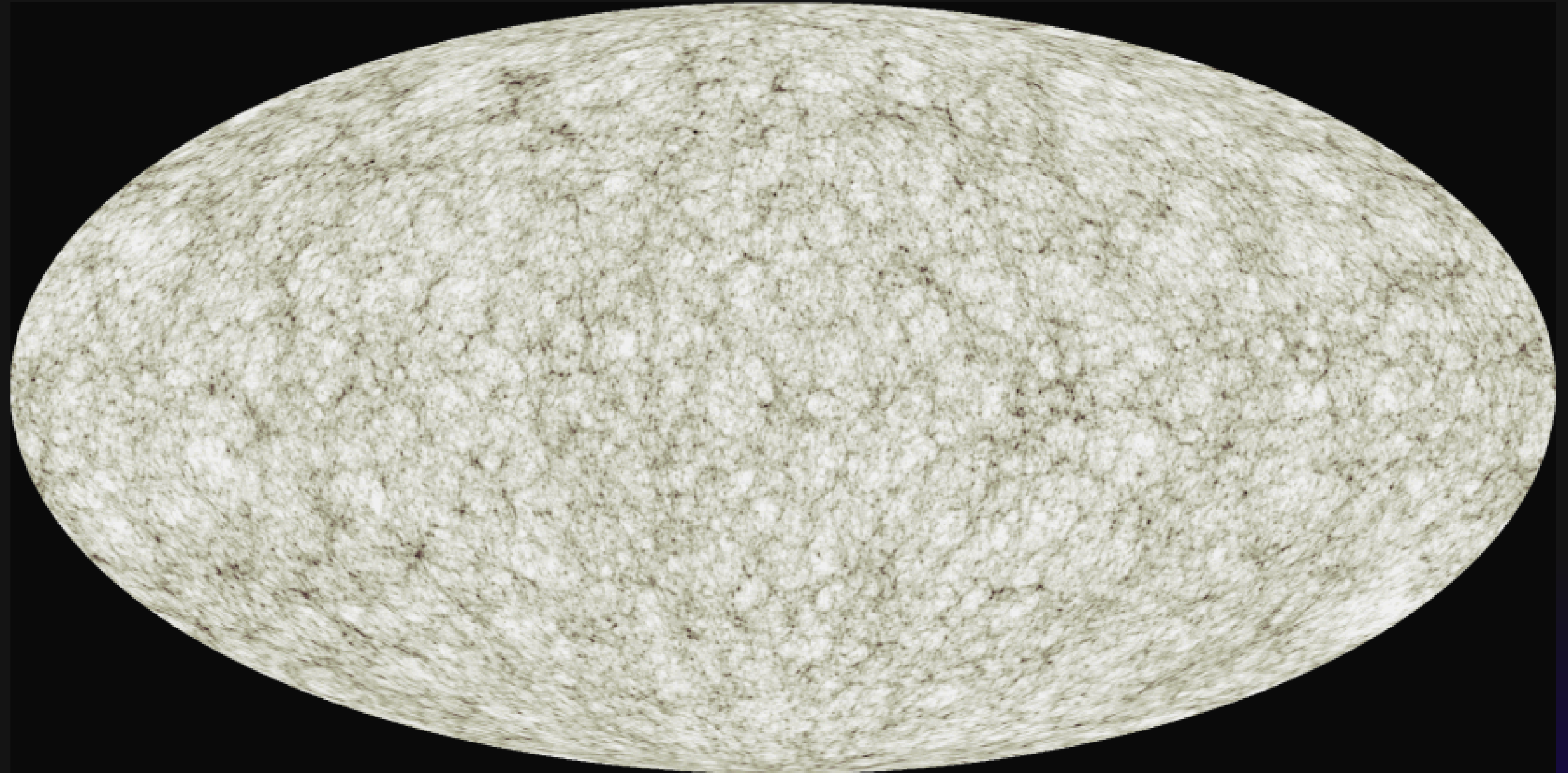
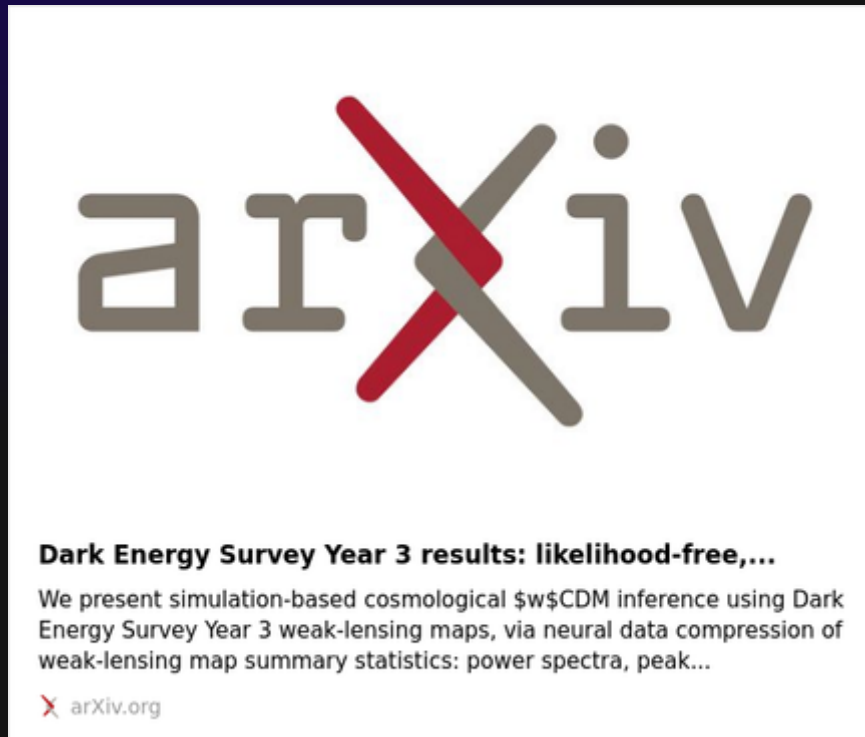


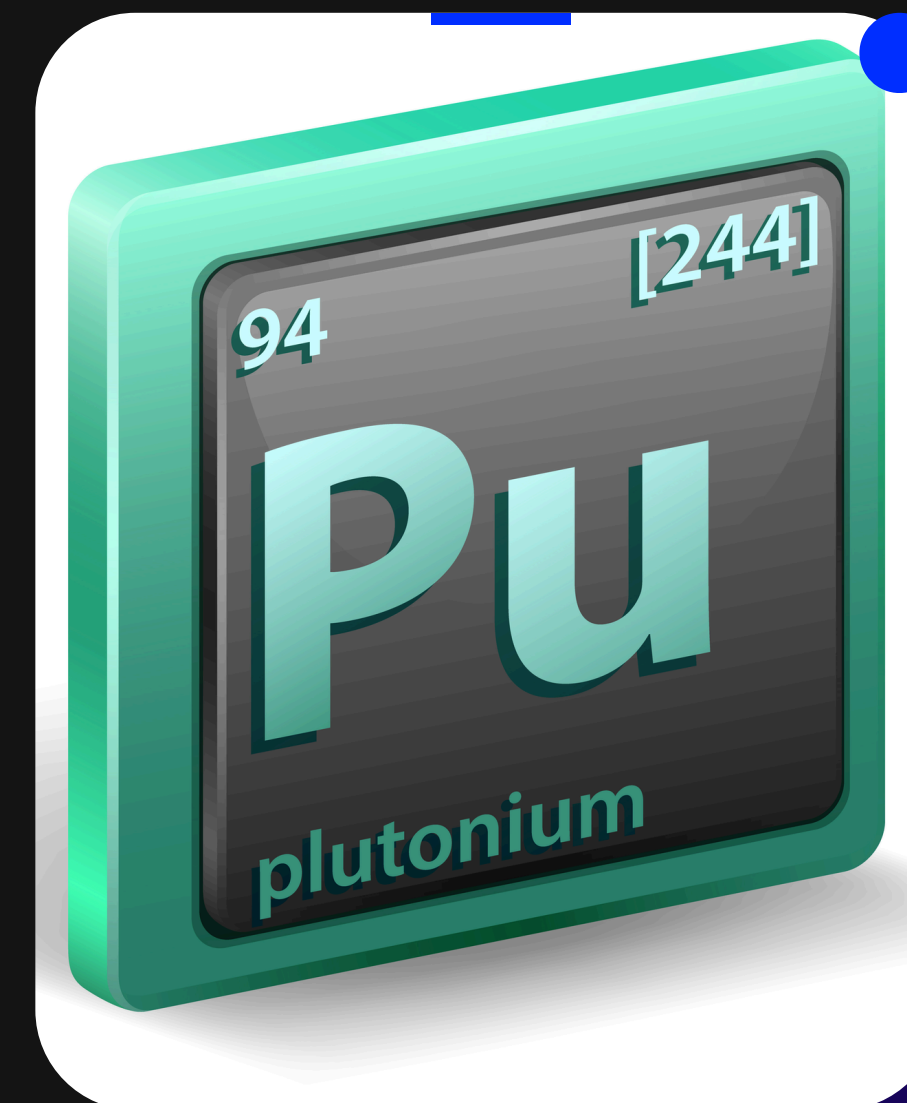
Fig X: Example dark matter simulation from the Gower Street simulation suite.

Aplicações e Limitações

Análise de Materiais Nucleares

Identificação de isótopos de plutônio

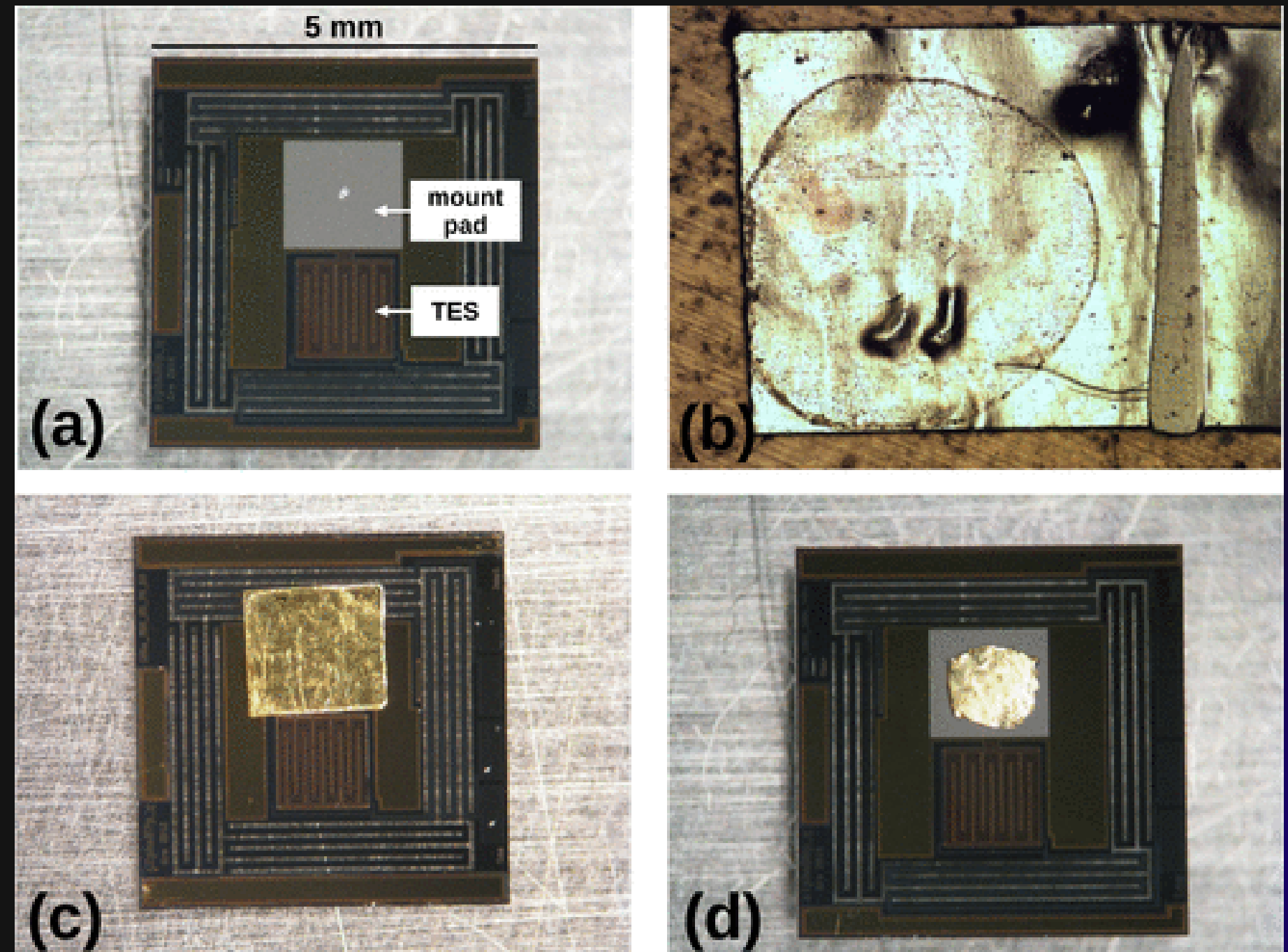
- Sensor baseado em TES capaz de identificar isótopos de plutônio com alta precisão;
- A capacidade de distinguir entre isótopos como Pu-239 e Pu-240 é uma medida essencial para esforços de não proliferação nuclear e perícias forenses relacionadas, bem como monitoramento ambiental, ensaios médicos e segurança industrial;
- O Pu altamente radioativo e amplamente utilizado em armas e reatores nucleares;
- A análise da proporção exata de massa dos dois em uma amostra revela informações importantes sobre a origem do material, histórico de processamento, segurança e possível uso pretendido.



Análise de Materiais Nucleares

Identificação de isótopos de plutônio

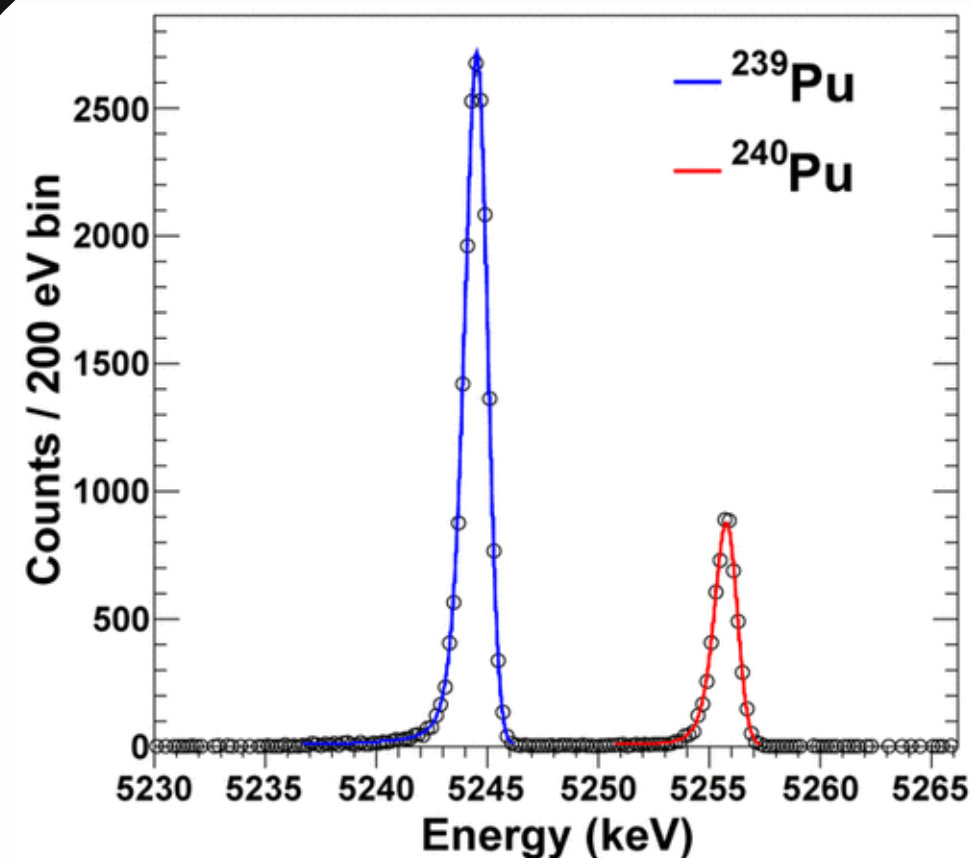
- Fóton ou partícula deposita energia no TES (ou superfície conectada a ele) → Temperatura do dispositivo aumento → A supercondutividade cessa → início repentino da resistência elétrica é registrado como um sinal elétrico.



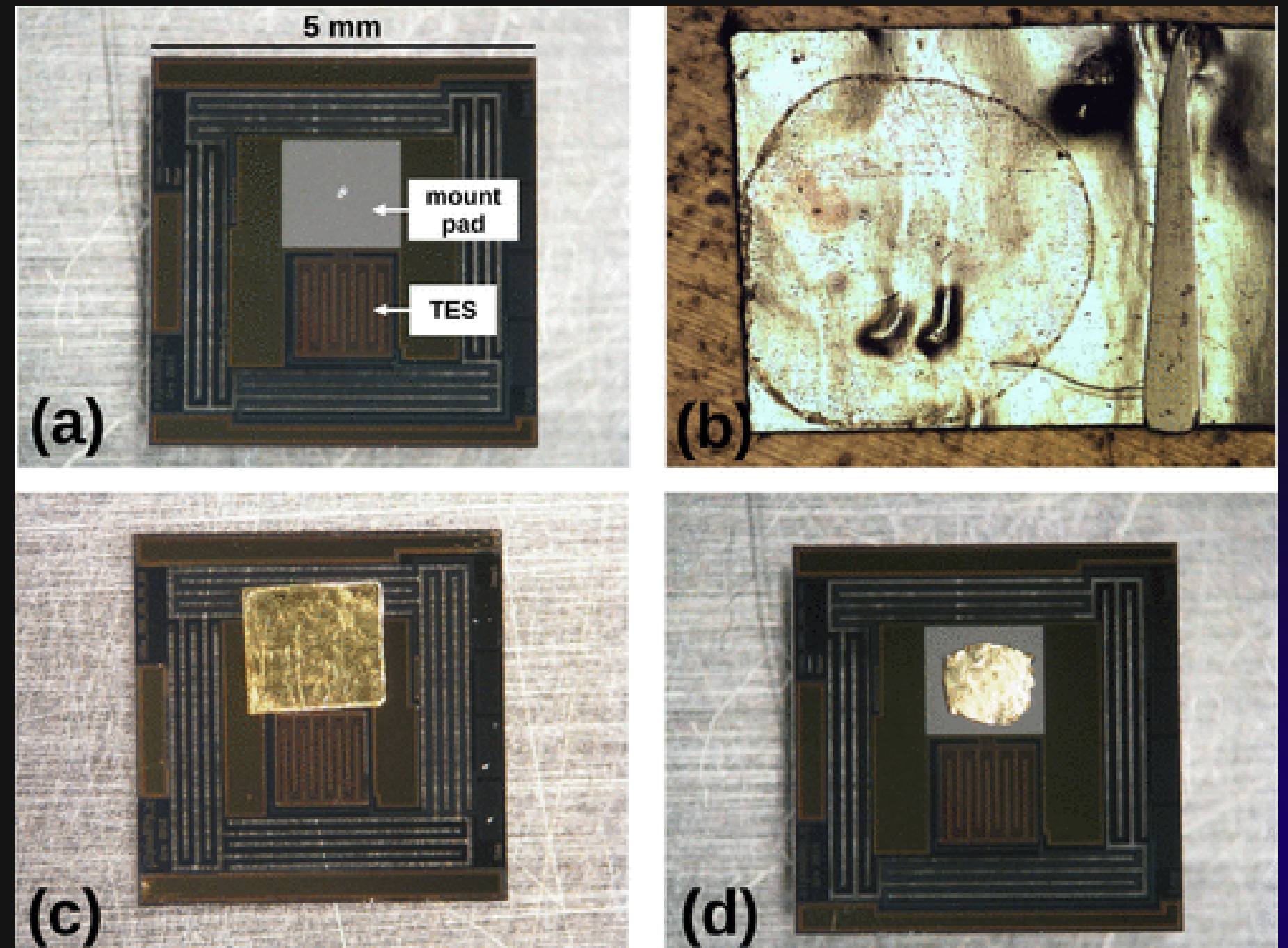
(Hoover et al., 2015)

Análise de Materiais Nucleares

Identificação de isótopos de plutônio

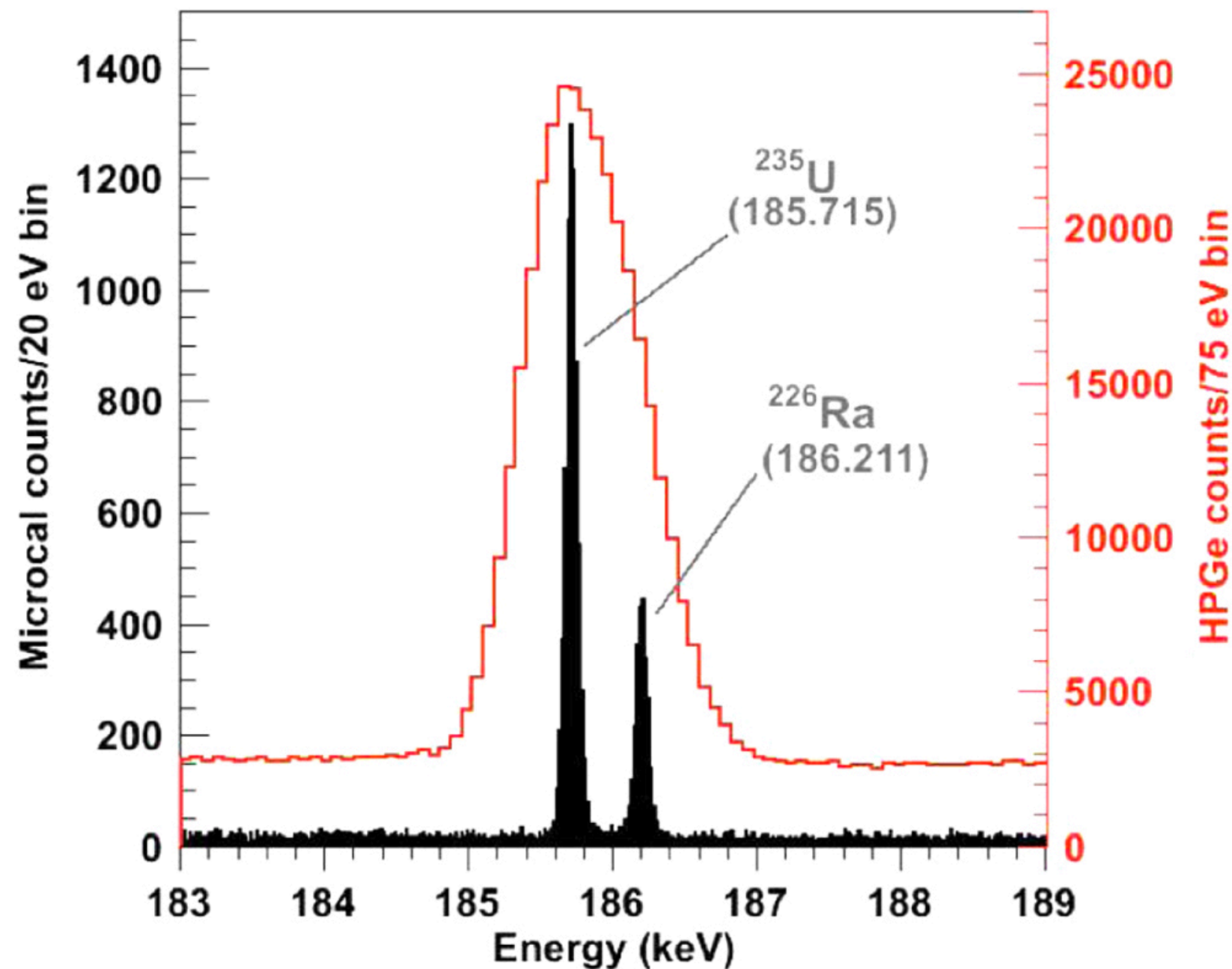


(Hoover et al, 2015)



(Hoover et al, 2015)

Análise de Materiais Nucleares



(Hoover et al, 2009)

Análise de materiais nucleares usando espectroscopia de raios X e raios gama

- Substituição do sensor HPGe (high-purity germanium – germânio de alta pureza) usado em espectroscopia precisa de raios gama e raios x (análise não destrutiva – NDA);
- Resolução espectral do HPGe limitada a 400 eV FWHM a 100 keV;
- As linhas espectrais de interesse mais brilhantes ficam entre cerca de 40 e 200 keV.

^{235}U

Geralmente usado em armas nucleares.

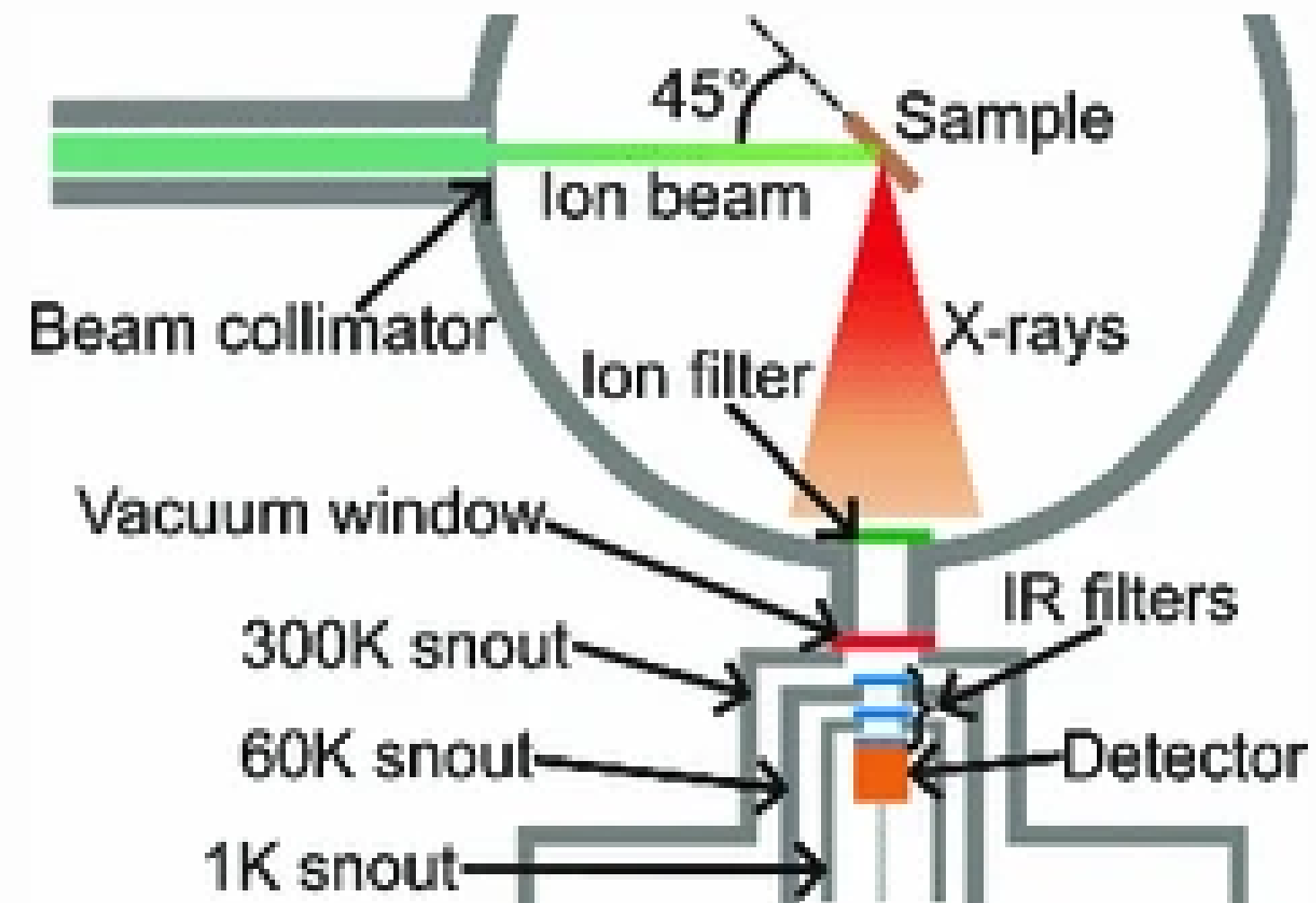
^{226}Ra

Geralmente encontrado em produtos comerciais (areia para gato e telhas).

• Análise PIXE

Sensores de transição de borda para medições de emissão de raios X induzida por partículas

- A técnica PIXE (Emissão de Raios X Induzida por Partículas) é amplamente utilizada para análise elementar de materiais.
- Recentemente, os TESs têm sido incorporados a essa técnica para aprimorar sua sensibilidade e resolução energética.
- Espectrômetro PIXE-TES instalado no acelerador Pelletron da Universidade de Jyväskylä, na Finlândia.



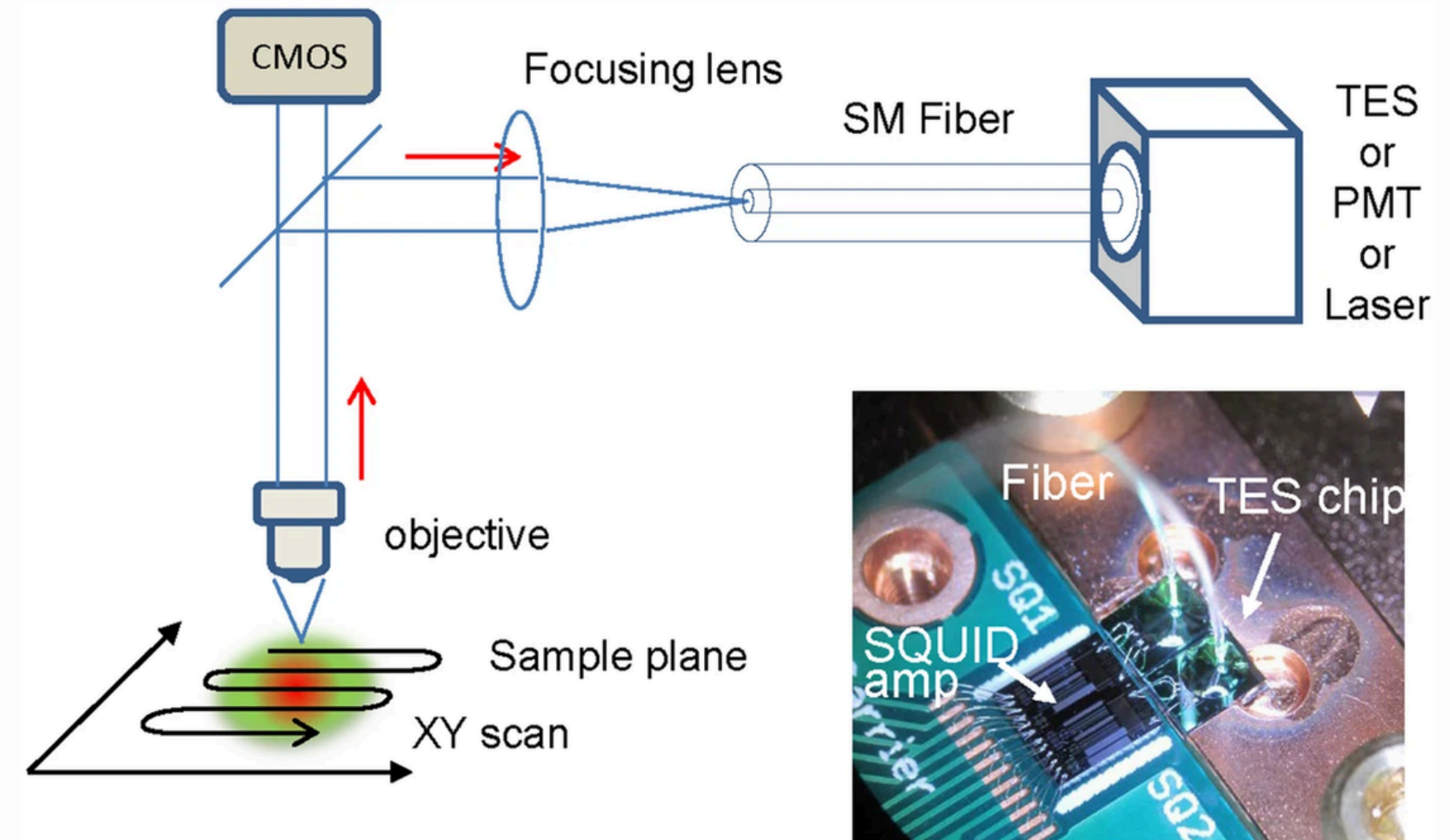
(Palosaari et al, 2014)



TES e biomoléculas

Aplicação de sensores de transição de borda (TES) na obtenção de imagens espectrais altamente sensíveis de biomoléculas

- Aplicação de TESs na obtenção de imagens espectrais altamente sensíveis, especialmente em condições de baixa luminosidade;
- Observação de biomoléculas em imagens espectrais para determinar os mecanismos moleculares dinâmicos por trás dos fenômenos biológicos.
- Foi construído um sistema de microscópio óptico de varredura acoplado a um TES como detector por meio de uma fibra óptica monomodo. O núcleo na extremidade da fibra atua como um orifício no microscópio confocal de varredura.

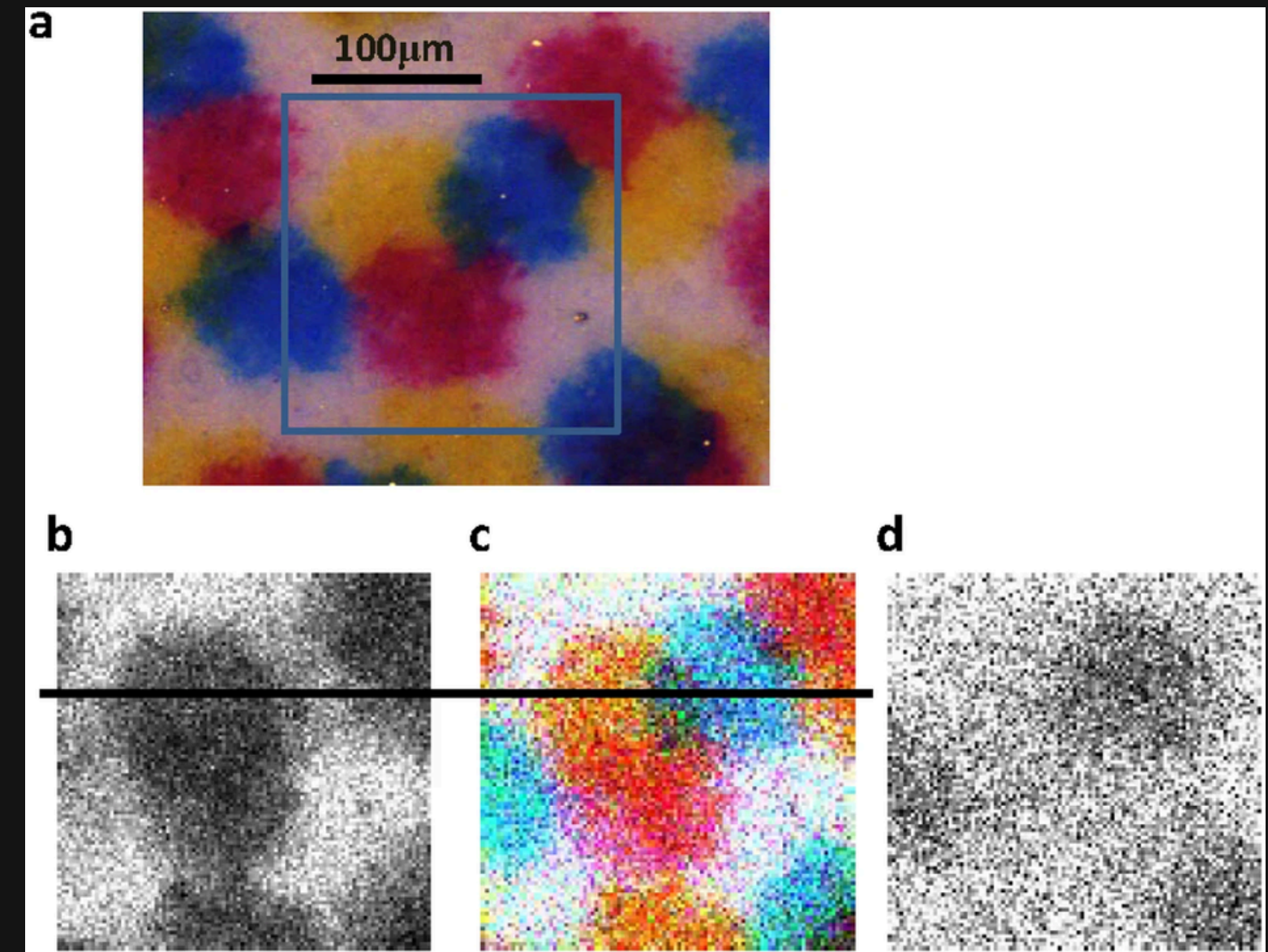


(Niwa et al., 2017)

TES e biomoléculas

Aplicação de sensores de transição de borda (TES) na obtenção de imagens espectrais altamente sensíveis de biomoléculas

- Integração de TES a um sistema de microscopia óptica de varredura acoplado por fibra para observar um padrão de tinta com três cores (vermelho, verde e azul – RGB).
- O sistema foi capaz de gerar imagens coloridas RGB e imagens no infravermelho próximo (IR), mesmo com poucos fótons incidentes, superando o desempenho de tubos fotomultiplicadores convencionais que, nas mesmas condições, produziram apenas imagens em preto e branco.
- A principal limitação destacada no estudo é a necessidade de operar os sensores TES em temperaturas extremamente baixas (próximas a 100 mK), o que requer sistemas de resfriamento complexos e infraestrutura especializada.



(Niwa et al., 2017)

TES em voos espaciais

Primeira operação dos microcalorímetros TES no espaço com o foguete de sondagem Micro-X

- O objetivo principal da missão era realizar espectroscopia de raios X de alta resolução da remanescente de supernova Cassiopeia A
- No entanto, devido a uma falha no sistema de controle de atitude do foguete, não foi possível apontar o instrumento para o alvo desejado, resultando na ausência de tempo de observação da fonte astronômica.

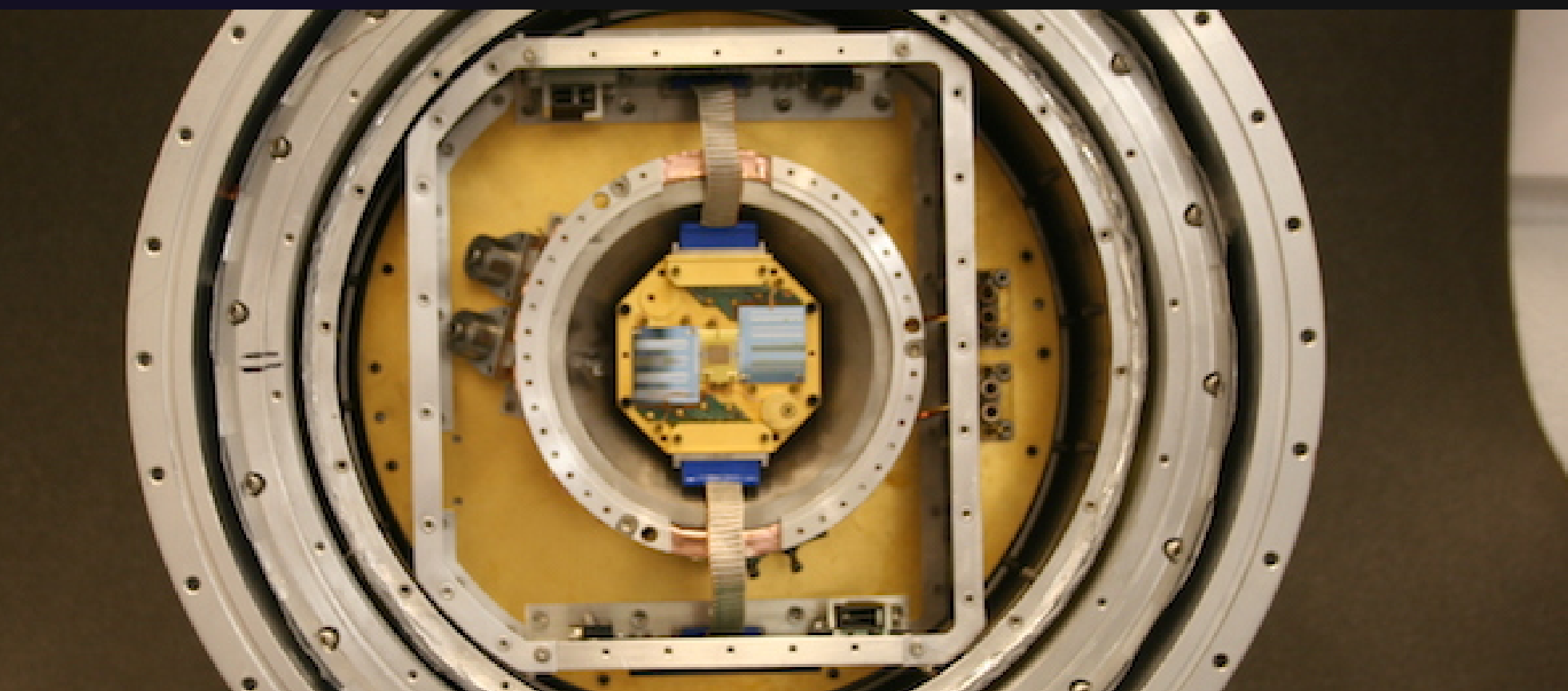


TES em voos espaciais

**Primeira operação dos microcalorímetros
TES no espaço com o foguete de sondagem
Micro-X**

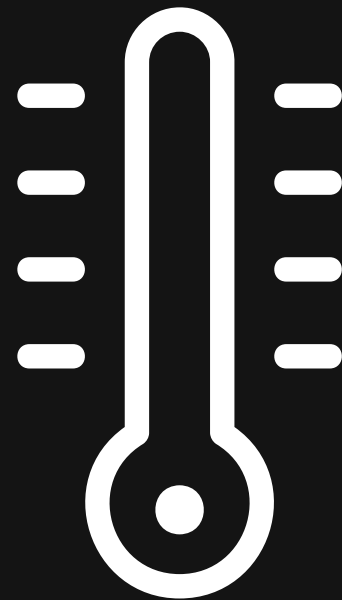
- Apesar dessa limitação, o voo permitiu a validação em ambiente espacial do desempenho dos microcalorímetros TES e do sistema de leitura multiplexado por divisão de tempo (TDM);
- Durante o voo, uma fonte de calibração a bordo forneceu raios X, que foram utilizados para comparar o desempenho dos detectores antes, durante e após o voo.



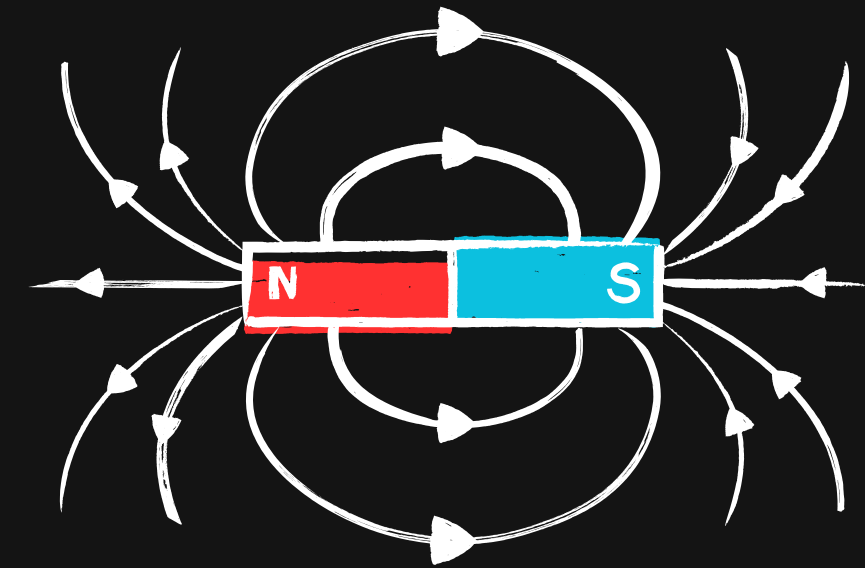


DESAFIOS ATUAIS E TECNOLOGIAS FUTURAS

Desafios atuais e tecnologias futuras



Necessidade de operar em temperaturas extremamente baixas

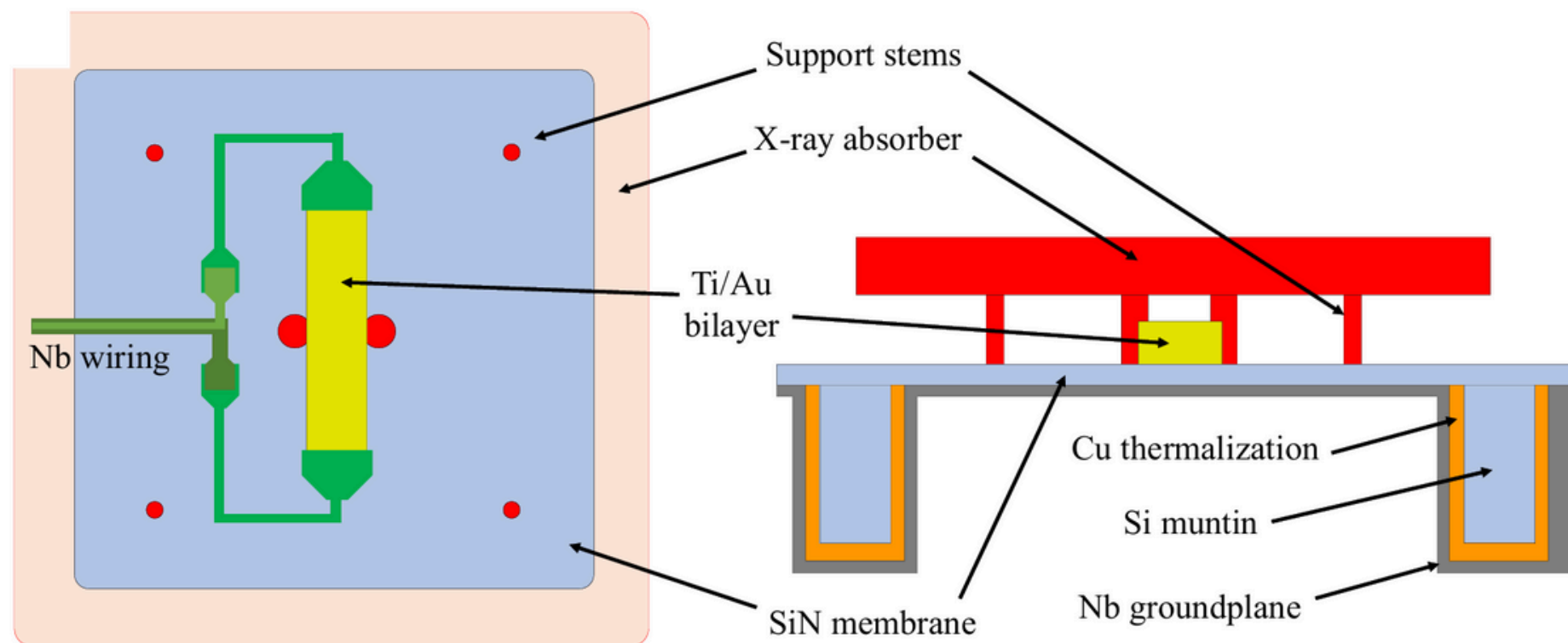


Sensibilidade dos TESs a campos magnéticos e elétricos externos, o que pode afetar sua precisão

Desafios atuais e tecnologias futuras

Uso de planos de aterramento supercondutores (Superconducting Ground Planes – SGPs) para proteger TESs contra interferências magnéticas

Os TESs são extremamente sensíveis a campos magnéticos, especialmente os perpendiculares ao seu plano, pois esses campos podem alterar a transição supercondutora dos sensores



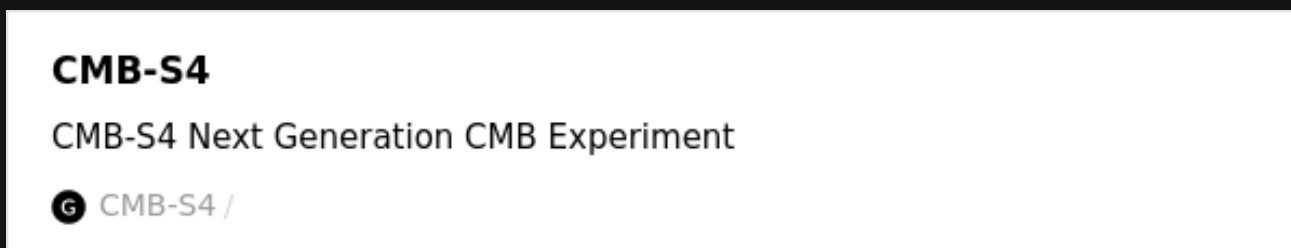
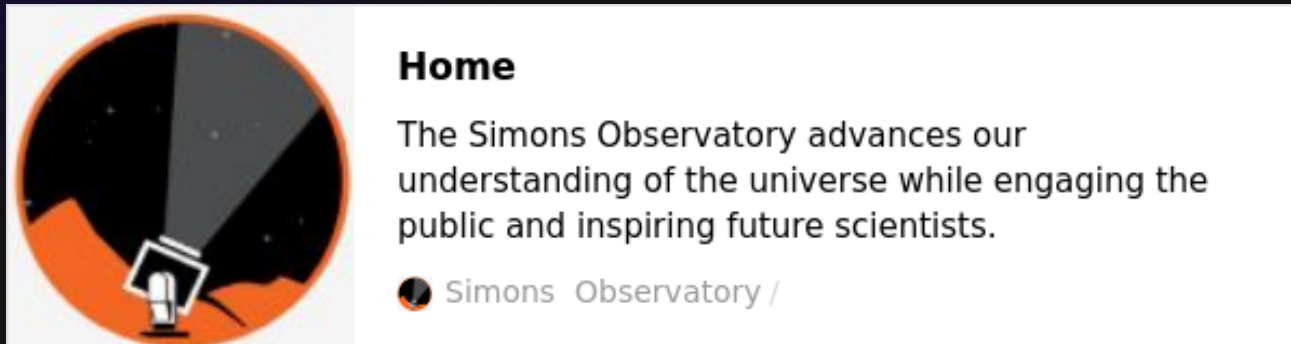
(de Wit et al, 2022)

Desafios atuais e tecnologias futuras



O desenvolvimento de materiais supercondutores com temperaturas críticas mais altas poderia permitir a operação dos sensores em condições menos extremas, reduzindo os custos e a complexidade dos sistemas de resfriamento

Referências e Bibliografia

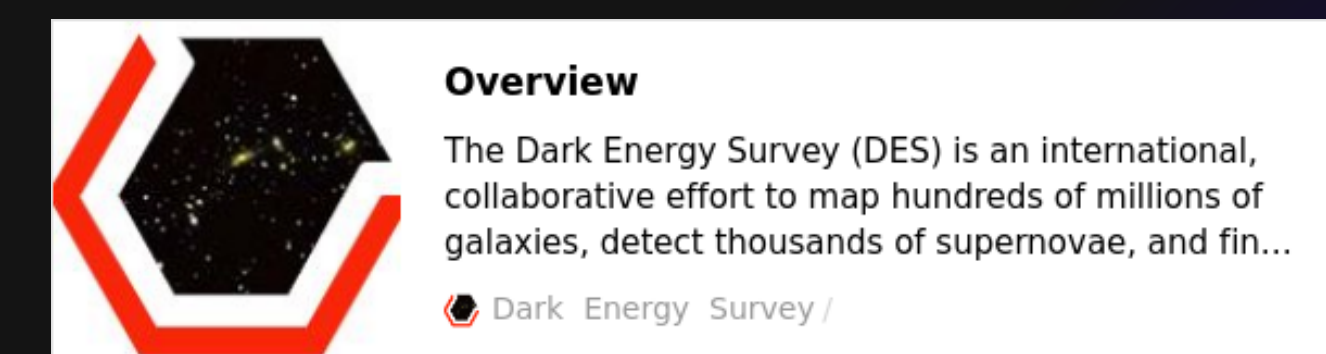
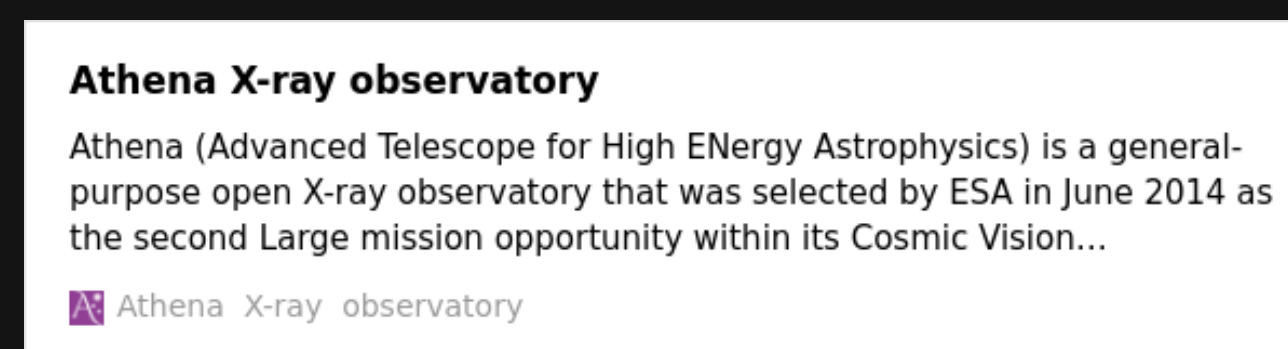
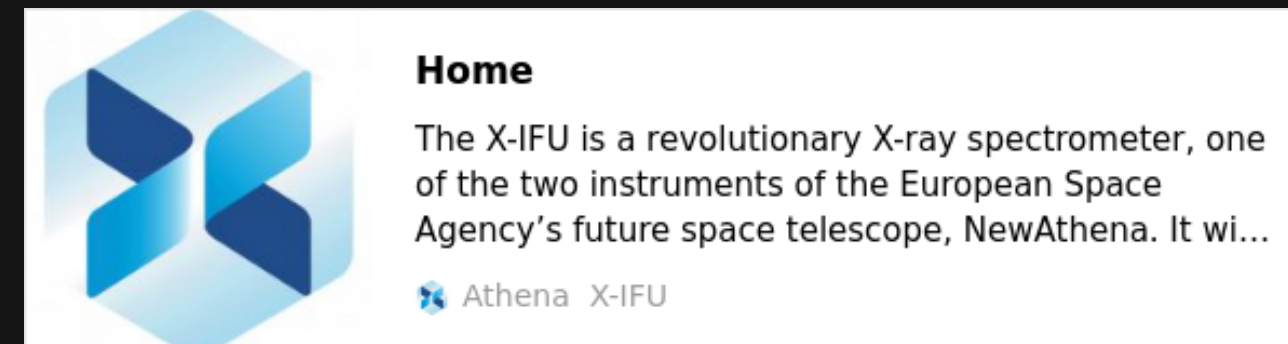


NIST

National Institute of Standards and Technology

NIST promotes U.S. innovation and industrial competitiveness by advancing measurement science, standards, and technology in ways that enhance economic security and improve our quality of life

NIST / May 28



Referências e Bibliografia

ADAMS, J. S. et al. First Operation of TES Microcalorimeters in Space with the Micro-X Sounding Rocket. *Journal of Low Temperature Physics*, v. 199, n. 3–4, p. 1062–1071, 1 maio 2020.

Bandler, S. R., Adams, J. S., Bailey, C. N., Busch, S. E., Chervenak, J. A., Eckart, M. E., ... Wassell, E. J. (2013). Advances in Small Pixel TES-Based X-Ray Microcalorimeter Arrays for Solar Physics and Astrophysics. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3), 2100705–2100705. <https://doi.org/10.1109/tasc.2013.2238752>

Barret, D., Lam Trong, T., den Herder, J.-W., et al. (2016). The Athena X-ray Integral Field Unit (X-IFU). In *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray* (Vol. 9905, p. 99052F). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2232432>

DE WIT, Martin et al. Mitigation of the Magnetic Field Susceptibility of Transition Edge Sensors using a Superconducting Groundplane. 23 ago. 2022.

Di Mitri, S., Bianco, A., & Lizzit, S. (2023). Non-equilibrium magnetic compression for picosecond-long X-ray pulses at a diffraction limited storage ring light source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1051, 168197. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168197>

Gottardi, L., & Nagayashi, K. (2021). A Review of X-ray Microcalorimeters Based on Superconducting Transition Edge Sensors for Astrophysics and Particle Physics. *Applied Sciences*, 11(9), 3793. <https://doi.org/10.3390/app11093793>.

HOOVER, A. S. et al. Microcalorimeter arrays for ultra-high energy resolution X- and gamma-ray detection. In: out. 2009.

HOOVER, Andrew S. et al. Measurement of the $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ Mass Ratio Using a Transition-Edge-Sensor Microcalorimeter for Total Decay Energy Spectroscopy. *Analytical Chemistry*, v. 87, n. 7, p. 3996–4000, 7 abr. 2015.

Referências e Bibliografia

Irwin, K. D. & Hilton, G. C. Transition-Edge Sensors. in 63–150 (2005). https://doi.org/10.1007/10933596_3

Irwin, K. D., & Lehnert, K. W. (2004). Microwave SQUID multiplexer. *Applied Physics Letters*, 85(11), 2107–2109. <https://doi.org/10.1063/1.1791733>

Jeffrey, N., Whiteway, L., Gatti, M., et al. (2024). Dark Energy Survey Year 3 results: likelihood-free, simulation-based Λ CDM inference with neural compression of weak-lensing map statistics. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2403.02314>

Keller, M.W., Wessels, A.L., Becker, D.T. et al. Effects of Stray Magnetic Field on Transition-Edge Sensors in Gamma-Ray Microcalorimeters. *J Low Temp Phys* 216, 336–343 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10909-024-03140-y>

Mujica-Schwahn, N. (2017). Position Dependence of High Efficiency Single Photon Detectors: A Route to Better Understanding of Transition Edge Sensors (Tese de doutorado).

NIWA, Kazuki et al. Few-photon color imaging using energy-dispersive superconducting transition-edge sensor spectrometry. *Scientific Reports*, v. 7, 4 abr. 2017.

PALOSAARI, M. R. J. et al. Transition-edge sensors for particle induced x-ray emission measurements. In: Springer New York LLC, 2014.

Sakai, K., Adams, J., Bandler, S., Beaumont, S., Chervenak, J., Datesman, A., et al. (2020). Demonstration of Fine-Pitch High-Resolution X-ray Transition-Edge Sensor Microcalorimeters Optimized for Energies below 1 keV. *Journal of Low Temperature Physics*, 199. <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02409-2>

Springel, V., Frenk, C. S., & White, S. D. M. (2006). The large-scale structure of the Universe. *Nature*, 440(7088), 1137–1144. <https://doi.org/10.1038/nature04805>

Ullom, J. N. & Bennett, D. A. Review of superconducting transition-edge sensors for x-ray and gamma-ray spectroscopy. *Superconductor Science and Technology* 28, 084003 (2015). <https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/8/084003>

Referências e Bibliografia

CLARKE, J.; BRAGINSKI, A. The SQUID Handbook Vol. I Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://web.pa.msu.edu/people/edmunds/SQUID_Controller/References/sq_hb.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2025.

JAKLEVIC, R. C. et al. Quantum Interference Effects in Josephson Tunneling. Physical Review Letters, v. 12, n. 7, p. 159–160, 17 fev. 1964.

ANDREWS, D. H. et al. Attenuated Superconductors I. For Measuring Infra-Red Radiation. Review of Scientific Instruments, v. 13, n. 7, p. 281–292, 1 jul. 1942.

Histórico da Supercondutividade. Disponível em: <https://wwwp.fc.unesp.br/~rafael/historico_supercondutividade.htm>.

TÓPICOS EM FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO –SUPERCONDUTIVIDADE. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://fisica.ufpr.br/grad/supercondutividade.pdf>>.

Supercondutividade. Disponível em: <<https://seara.ufc.br/pt/producoes/nossas-producoes-e-colaboracoes/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/supercondutividade/>>.

The Nobel Prize in Physics 1913. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1913/summary/>>.

Centenary of the discovery of superconductivity. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2011/15/News%20Articles/1342159>>.