Efeitos de radiação em qubits supercondutores: perspectivas e impactos em computação quântica

Saulo Gabriel Alberton
Departamento de Física Nuclear, Universidade de São Paulo (USP)
Departamento de Física da Matéria Condensada, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Apresentação

2012-2025

- **Departamento de Física Nuclear, USP**

Bacharel em Física

Mestre em Física

Doutor em Física

- **Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, UNIPD, Itália**

Doutor em Engenharia de Informação, Università degli Studi di Padova, Itália

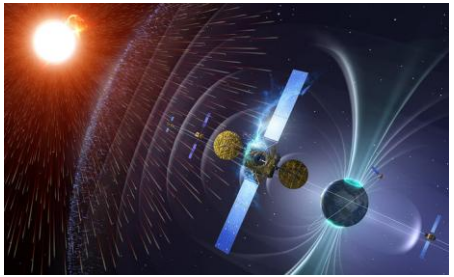
2025

- **Departamento de Física da Matéria Condensada, Unicamp**

Pesquisador de pós-doutorado, Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos

- **Departamento de Física Nuclear, USP**

Professor contratado MS-3.1



Apresentação

2012-2025

- **Departamento de Física Nuclear, USP**

Bacharel em Física

Mestre em Física

Doutor em Física

- **Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, UNIPD, Itália**

Doutor em Engenharia de Informação, Università degli Studi di Padova, Itália

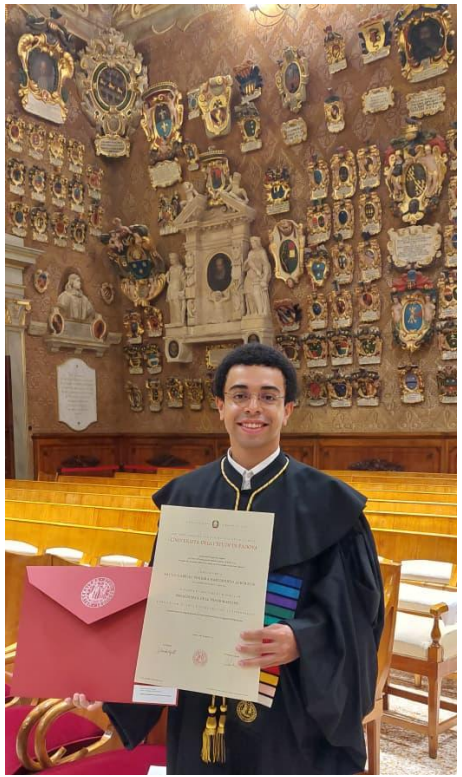
2025

- **Departamento de Física da Matéria Condensada, Unicamp**

Pesquisador de pós-doutorado, Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos

- **Departamento de Física Nuclear, USP**

Professor contratado MS-3.1



Apresentação

2012-2025

- **Departamento de Física Nuclear, USP**

Bacharel em Física

Mestre em Física

Doutor em Física

- **Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, UNIPD, Itália**

Doutor em Engenharia de Informação, Università degli Studi di Padova, Itália

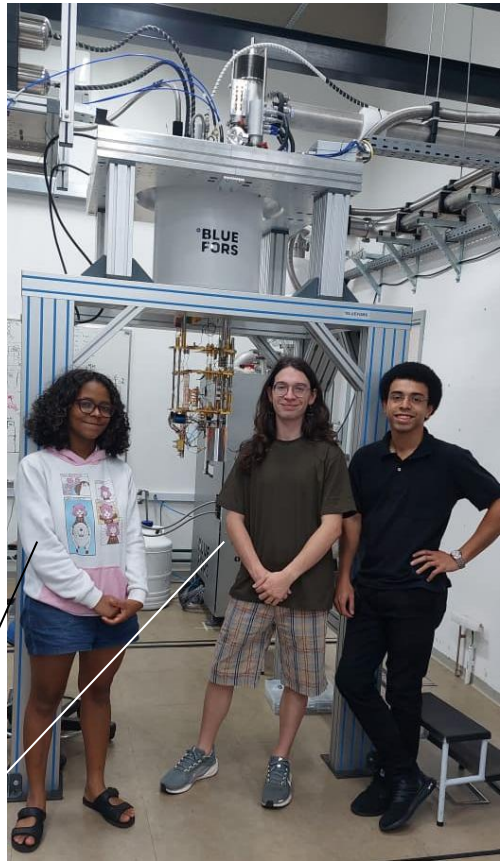
2025

- **Departamento de Física da Matéria Condensada, Unicamp**

Pesquisador de pós-doutorado, Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos

- **Departamento de Física Nuclear, USP**

Professor contratado MS-3.1



Isabelli F.

Vinicius B.

PGF5429 – Interação de Radiação com Dispositivos Quânticos

- **Aula 01 – Ambientes de radiação natural**
  - Motivação
  - Espaço sideral
  - Atmosfera terrestre
  - Alguns desafios atuais
- **Aula 02 – Interação da radiação com a matéria**
  - Nêutrons
  - Partículas carregadas
  - Fótons
  - Simulação de transporte de radiação
- **Aula 03 – Dispositivos semicondutores**
  - Junção pn
  - Transistores
  - Processamento de informação e aplicações
  - Confiabilidade em ambientes de radiação
- **Aula 04 – Dispositivos supercondutores**
  - Junção Josephson
  - Qubit supercondutor
  - Eletrodinâmica quântica de circuitos
  - Processamento de informação e aplicações
- **Aula 05 – Confiabilidade de dispositivos supercondutores em ambientes de radiação**
  - Revisão bibliográfica de estudos recentes (2020-2025)
  - Alguns desafios

MOTIVAÇÃO

Processadores quânticos supercondutores (T ~10 mK)

QPU: 5 minutos (Google Willow)
CPU: 10^{25} anos (supercomputador Frontier)
Fonte: H. Neven, "Meet Willow, our state-of-the-art quantum chip", Google blog, 9 Dec. 2024.

Problema:

- Tipicamente, o tempo de coerência dos melhores bits quânticos (qubits) supercondutores disponíveis atualmente permanece limitado a $\sim 100\ \mu s$

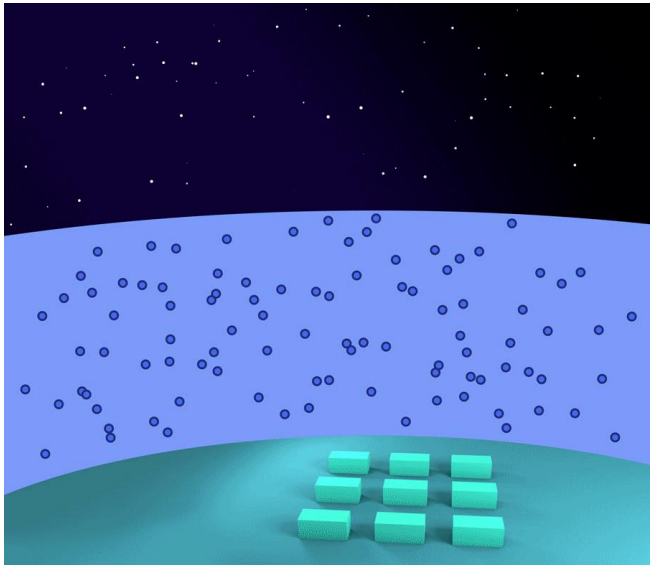
Unidade de processamento quântico Google Willow, com 105 qubits supercondutores
Fonte: Google

MOTIVAÇÃO

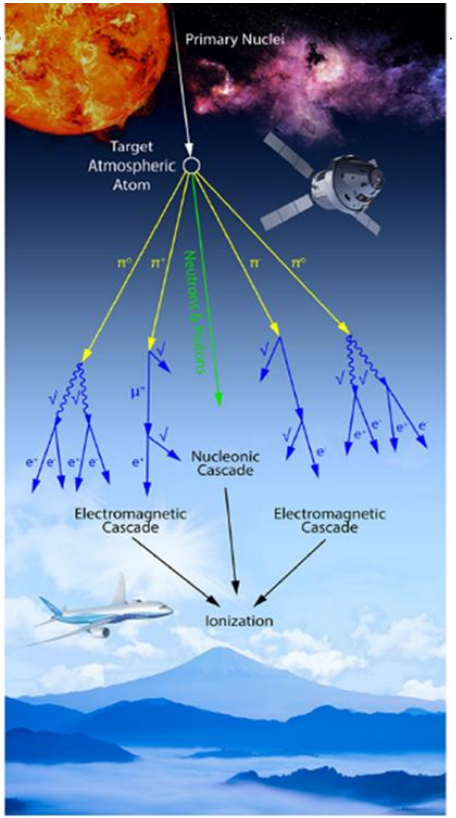
COMPONENTES DE RADIAÇÃO TERRESTRE

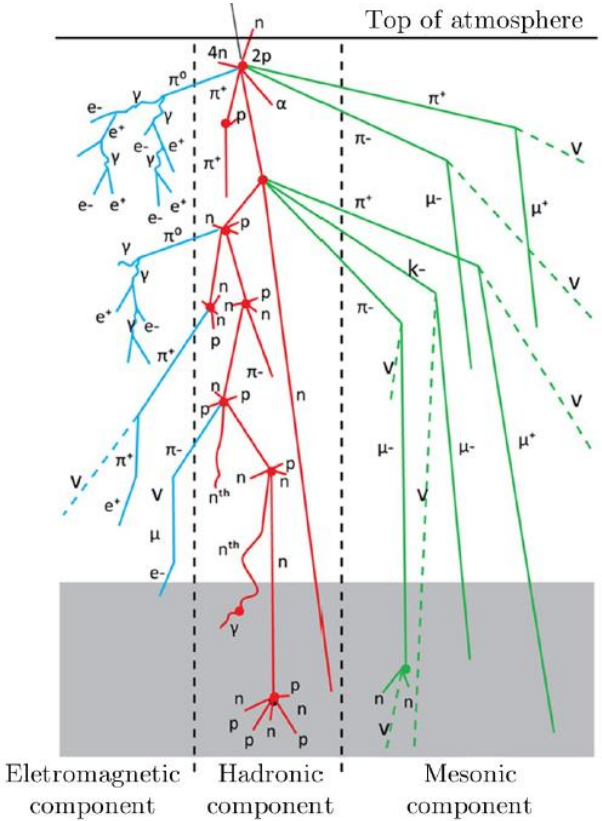
- **Radiação cósmica secundária**

Reações nucleares em cascata entre radiação cósmica e solar com os constituintes da atmosfera terrestre



Formação de chuveiros atmosféricos de 2ª geração





Formação de raios cósmicos secundários na atmosfera terrestre e diagrama esquemático de cascatas de partículas (chuveiros atmosféricos).

Fonte: J. C. Gosse and F. M. Phillips, "Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application," Quaternary Science Reviews, vol. 20, no. 14, pp. 1475–1560, 2001.

MOTIVAÇÃO

Como podemos solucionar esses problemas?

Article

Impact of ionizing radiation on superconducting qubit coherence

https://doi.org/10.1038/s41586-020-2619-8
Received: 25 January 2020
Accepted: 5 June 2020

Antti P. Vepsäläinen[1], Amir H. Karamlou[1], John L. Orrell[2], Akshunna S. Dogra[1,4], Ben Loer[2], Francisca Vasconcelos[1], David K. Kim[3], Alexander J. Melville[3], Bethany M. Niedzielski[3], Jonilyn L. Yoder[3], Simon Gustavsson[1], Joseph A. Formaggio[1], Brent A. VanDevender[2] & William D. Oliver[1,3]

FEATURES / ARTICLE

Quasiparticle poisoning in superconducting quantum computers

AUG 01, 2023

Recent research has uncovered new insights into how some errors in superconducting qubits are generated and the best ways to mitigate them.

DOI: 10.1063/PT.3.5291

José Aumentado · Gianluigi Catelani · Kyle Serniak

Article

https://doi.org/10.1038/s41467-025-61385-x

Synchronous detection of cosmic rays and correlated errors in superconducting qubit arrays

Received: 4 July 2024
Accepted: 19 June 2025
Published online: 11 July 2025
Check for updates

Patrick M. Harrington[1], Mingyu Li[2], Max Hays[1], Wouter Van De Pontseele[2], Daniel Mayer[2], H. Douglas Pinckney[1,2], Felipe Contipelli[3], Michael Gingras[3], Bethany M. Niedzielski[3], Hannah Stickler[3], Jonilyn L. Yoder[3], Mollie E. Schwartz[3], Jeffrey A. Grover[1], Kyle Serniak[1,3], William D. Oliver[1,2,4] & Joseph A. Formaggio[2]

npj | Quantum Information
www.nature.com/npjqi

ARTICLE OPEN

Check for updates

Saving superconducting quantum processors from decay and correlated errors generated by gamma and cosmic rays

John M. Martinis[1]

nature communications

Article

https://doi.org/10.1038/s41467-025-59778-z

Cosmic-ray-induced correlated errors in superconducting qubit array

Received: 29 June 2024
Accepted: 2 May 2025
Published online: 20 May 2025

Xuegang Li[1,7], Junhua Wang[1,7], Yao-Yao Jiang[1,2,3], Guang-Ming Xue[1,4], Xiaoxia Cai[1,5], Jun Zhou[6], Ming Gong[5], Zhao-Feng Liu[5], Shuang-Yu Zheng[6], Deng-Ke Ma[6], Mo Chen[1], Wei-Jie Sun[1], Shuang Yang[1], Fei Yan[1], Yi-Rong Jin[1], S. P. Zhao[1,2], Xue-Feng Ding[5] & Hai-Feng Yu[1,4]

Article

Correlated charge noise and relaxation errors in superconducting qubits

https://doi.org/10.1038/s41586-021-03557-5
Received: 14 December 2020
Accepted: 15 April 2021

C. D. Wilen[1], S. Abdullah[1], N. A. Kurinsky[2,3], C. Stanford[4], L. Cardani[5], G. D'Imperio[5], C. Tomei[5], L. Faoro[1,6], L. B. Ioffe[7], C. H. Liu[1], A. Opremcak[1], B. G. Christensen[1], J. L. DuBois[8] & R. McDermott[1]

REVIEW SUMMARY

QUANTUM COMPUTING

Materials challenges and opportunities for quantum computing hardware

Nathalie P. de Leon, Kohei M. Itoh, Dohun Kim, Karan K. Mehta, Tracy E. Northup, Hanhee Paik*, B. S. Palmer, N. Samarth, Sorawis Sangtawesin, D. W. Steuerman

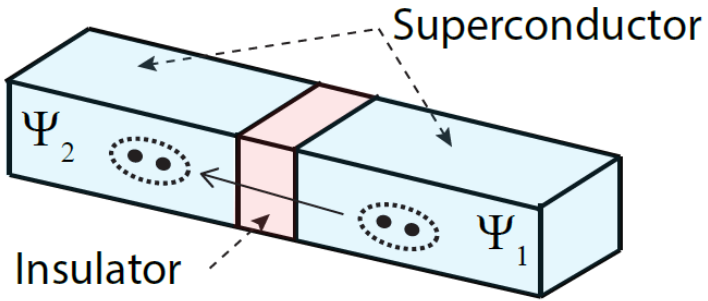
QUBITS SUPERCONDUTORES

ARMAZENAMENTO DE INFORMAÇÃO QUÂNTICA

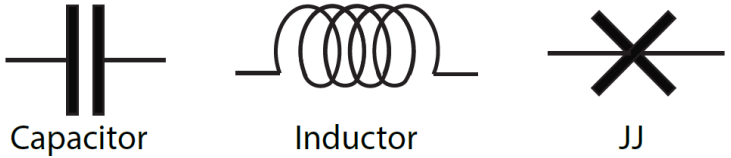
Evitar dissipação de energia, que leva à perda de informação

- Materiais supercondutores
- Indutores + Capacitores + Junção Josephson

- **Junção Josephson (indutor não-linear)**

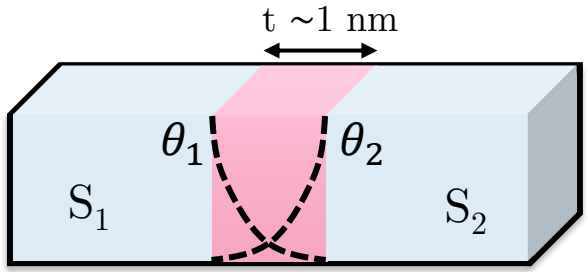


Representação de Junção Josephson (JJ). Notavelmente, a corrente pode ser não-nula para $V = 0$ V.
From: M. Naghiloo, "Introduction to Experimental Quantum Measurement with Superconducting Qubits", 2019.



Elementos de circuitos quantum-eletrodinâmicos (QED).
From: M. Naghiloo, "Introduction to Experimental Quantum Measurement with Superconducting Qubits", 2019.

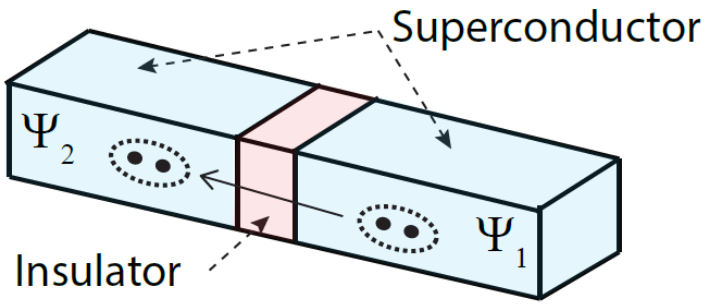
$$\left.\begin{aligned} I &= I_c \sin\delta \\ V &= \frac{\hbar}{2e}\frac{\partial\delta}{\partial t} \end{aligned}\right\} \quad L_J = \frac{\hbar}{4\pi e\, I_c \cos\delta}$$



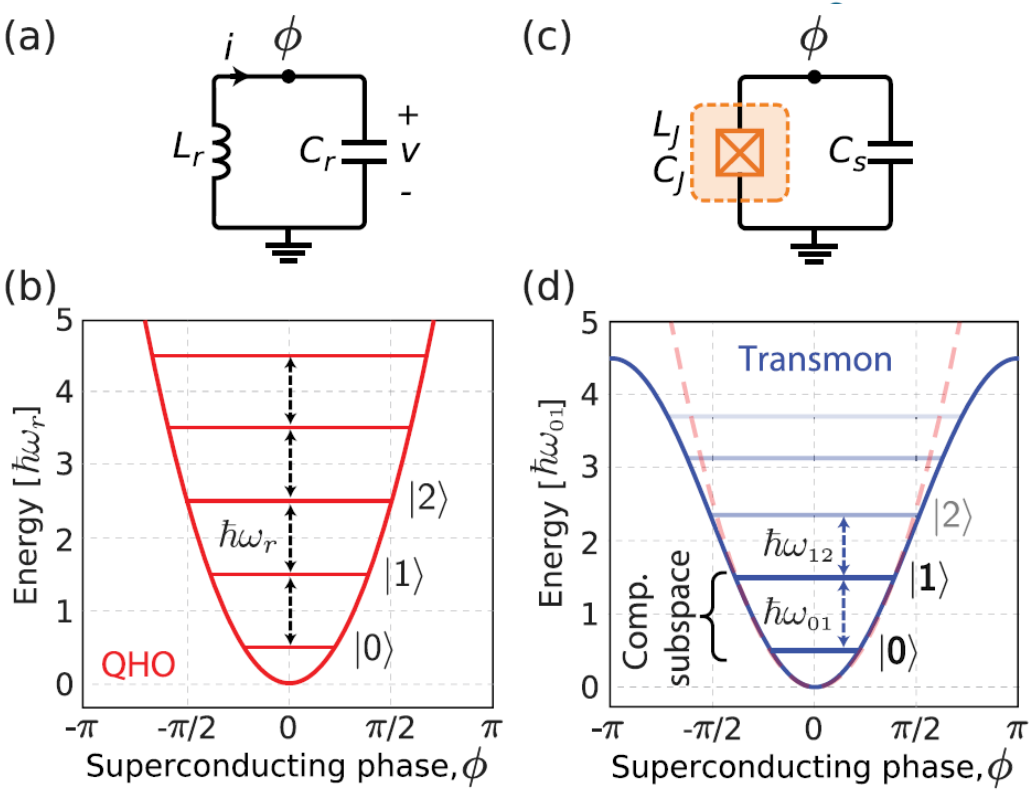
$\delta = \theta_2 - \theta_1 \equiv$ diferença de fase entre os dois supercondutores da junção
$I_c \equiv$ corrente crítica a partir da qual a JJ se torna uma junção dissipativa

QUBITS SUPERCONDUTORES

QUBIT TRANSMON



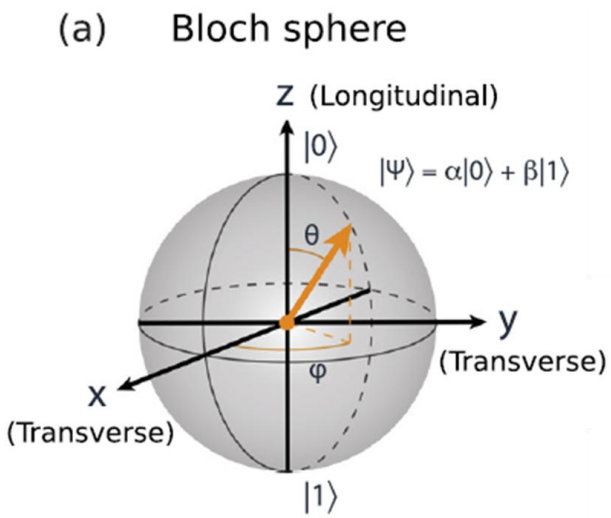
Representação de Junção Josephson (JJ). Notavelmente, a corrente pode ser não-nula para $V = 0$ V.
From: M. Naghiloo, "Introduction to Experimental Quantum Measurement with Superconducting Qubits", 2019.



a) Circuito Oscilador-LC, produzindo um Oscilador Harmônico Quântico (QHO)
b) Circuito de Transmon qubit, produzindo um oscilador anarmônico quântico (QAO)
From: P. Krantz, *et al.*, "A quantum engineer's guide to superconducting qubits", 2019.

QUBITS SUPERCONDUTORES

RUÍDO E DECOERÊNCIA



Estados quânticos na esfera de Bloch
From: P. Krantz, *et al.*, "A quantum engineer's guide to superconducting qubits", 2019.

a) Preparação de estado:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta\,|1\rangle$$

Probabilidades de medição de estados $|0\rangle$ ou $|1\rangle$
(i) $P_{|0\rangle} = |\alpha|^2$
(ii) $P_{|1\rangle} = |\beta|^2$
(iii) $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

Se o estado $|1\rangle$ possui energia maior que o estado $|0\rangle$, o vetor de Bloch precessa com frequência

$$\omega_q = (E_1 - E_0)/\hbar \sim 3 - 6 \text{ GHZ}$$

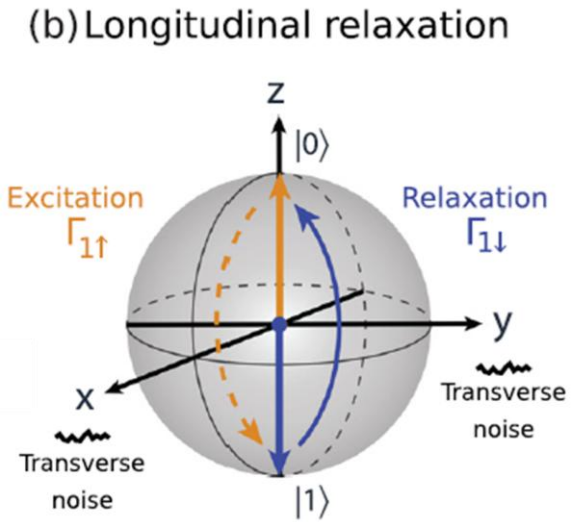
em torno do eixo de quantização z.

No sistema de referência estacionário (que rotaciona com o vetor de Bloch):

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \cos\theta/2 \cdot|0\rangle + e^{i\phi}\sin\theta/2 \cdot |1\rangle$$

QUBITS SUPERCONDUTORES

RUÍDO E DECOERÊNCIA



Estados quânticos na esfera de Bloch
From: P. Krantz, *et al.*, "A quantum engineer's guide to superconducting qubits", 2019.

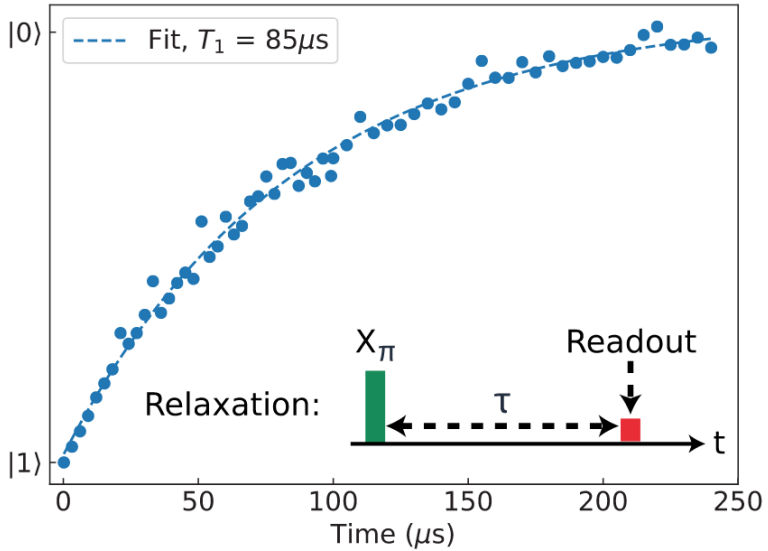
a) Preparação de estado:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \cos\theta/2 \cdot |0\rangle + e^{i\phi}\sin\theta/2 \cdot |1\rangle$$

b) Relaxação longitudinal:

$$\Gamma_1 = \frac{1}{T_1} \approx \Gamma_{1\downarrow}$$

Descreve a despolarização ao longo do eixo de quantização.



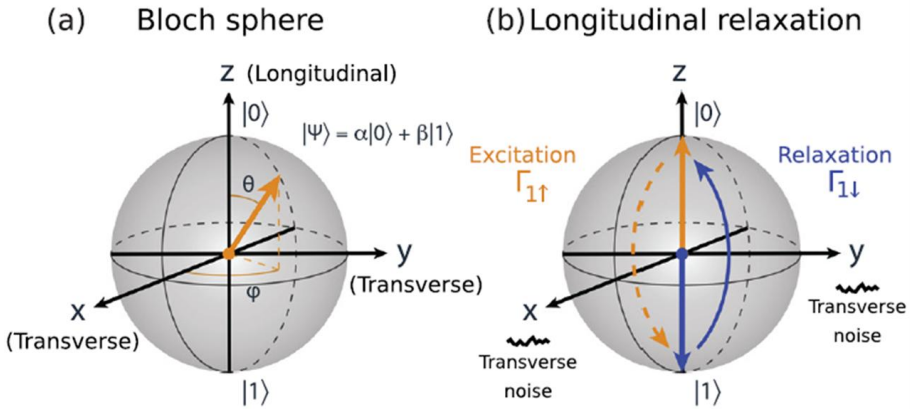
QUBITS SUPERCONDUTORES

RUÍDO E DECOERÊNCIA

a) Preparação de estado:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \cos\theta/2 \cdot |0\rangle + e^{i\phi}\sin\theta/2 \cdot |1\rangle$$

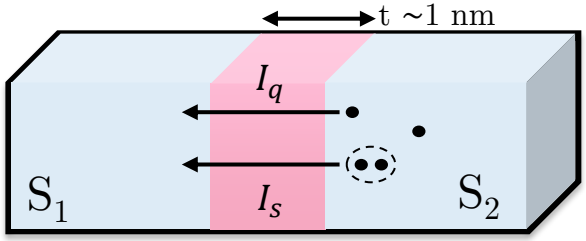
b) Relaxação longitudinal: $\Gamma_1 = \frac{1}{T_1} \approx \Gamma_{1\downarrow}$



Estados quânticos na esfera de Bloch
From: P. Krantz, *et al.*, "A quantum engineer's guide to superconducting qubits", 2019.

Quasi-partícula: Par de Cooper "despareado"
O tunelamento de quasi-partículas através da JJ (corrente dissipativa) favorece a perda de coerência/relaxação longitudinal

- Exitação de quasipartículas: térmica, radiação, etc.



QUBITS SUPERCONDUTORES

DECOERÊNCIA POR EXCITAÇÕES TÉRMICAS

Teoria BCS

Energia de banda proibida para supercondutores convencionais à temperatura zero:

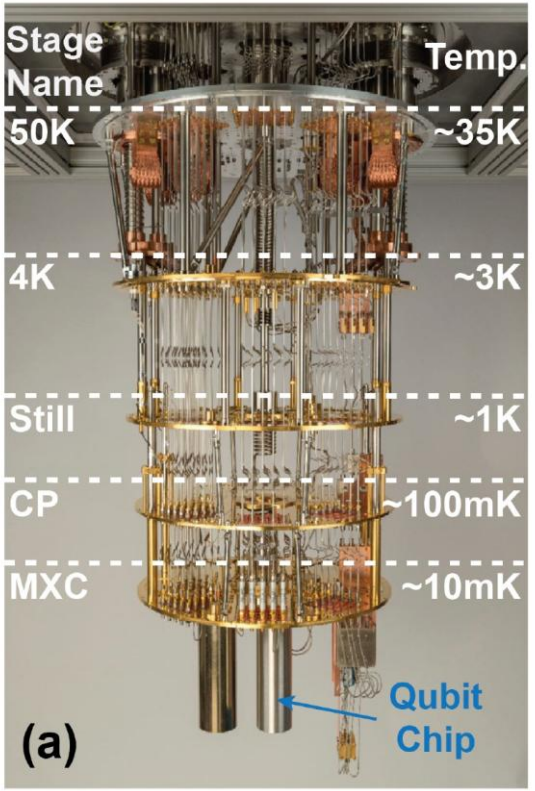
$$\Delta(T = 0) = 1.764\, k_B\, T_c$$

Fração de quasi-partículas geradas termicamente:

$$x_{qp} = \frac{n_{qp}}{n_{cp}} = \sqrt{2\pi \frac{k_B T}{\Delta}}\, e^{-\frac{\Delta}{k_B T}}$$

Previsão teoria BCS (20 mK): $x_{qp} \sim 10^{-46}$

Experimentos (<150 mK): $x_{qp} \sim 10^{-8}$ a 10^{-6}



From: https://www.analogictips.com/why-use-attenuators-in-quantum-computers-faq/

EFEITOS DE RADIAÇÃO EM QUBITS SUPERCONDUTORES

DECOERÊNCIA POR EXCITAÇÕES DE QUASI-PARTÍCULAS

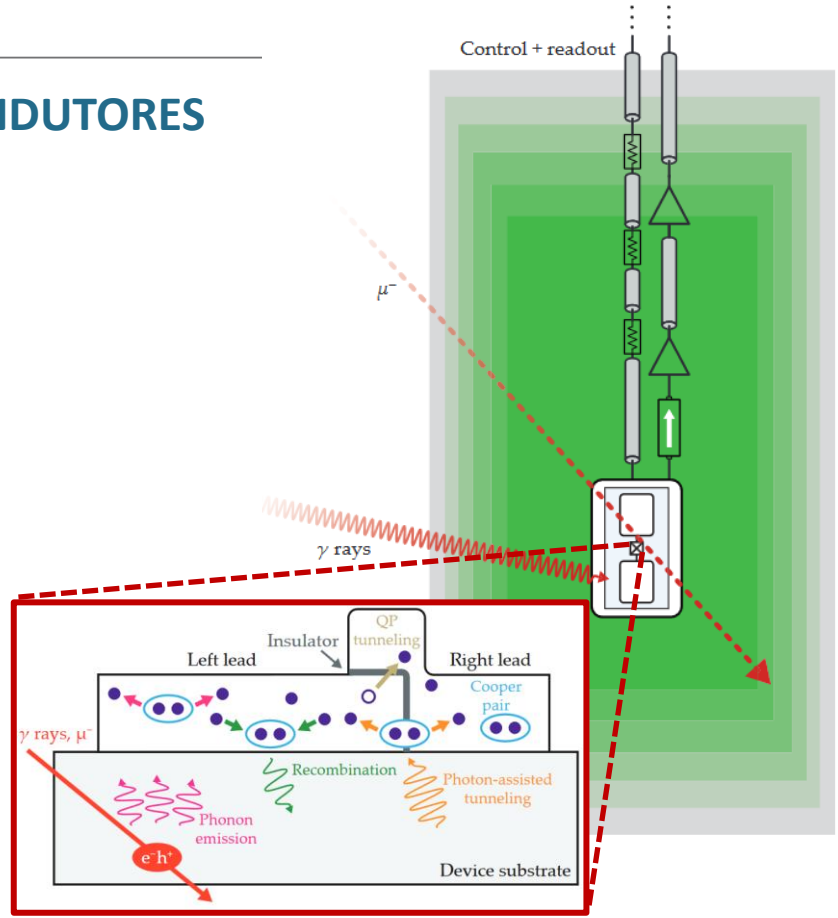
Se um fônon ou fóton com energia $E > 2\Delta$ se acopla ao supercondutor, os pares de quasi-partículas gerados o "envenenam" (perda de coerência)

Os dois estados que as quasi-partículas ocupam são fixos e não participam na superposição coerente do condensado supercondutor.

Exemplo: para qubits baseados em filmes finos de alumínio, 2Δ corresponde a aproximadamente 400 μeV (100 GHz ou 5 K).

Problema/Desafio:

- Radiação ionizante altamente penetrante: radiação cósmica e produtos de decaimento radioativo



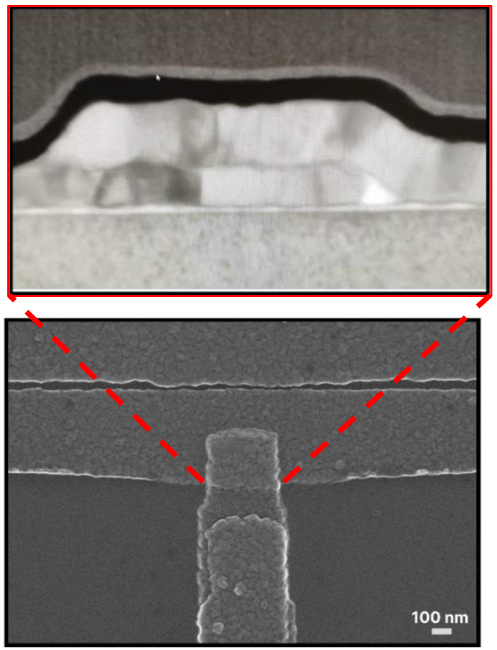
From: J. Aumentado, *et al.*, "Quasiparticle poisoning in superconducting quantum computers," 2023.

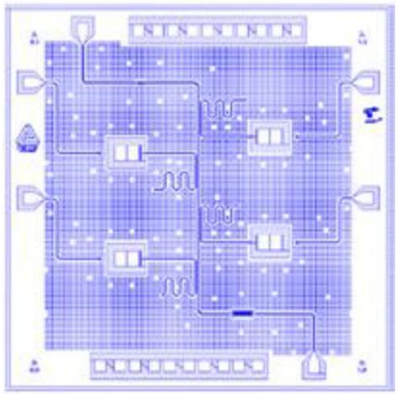
PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

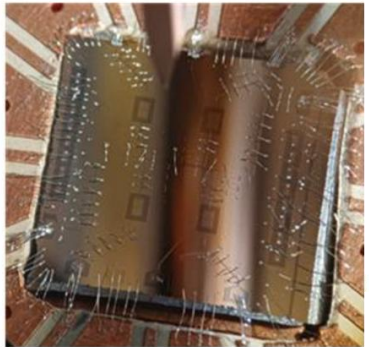
PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

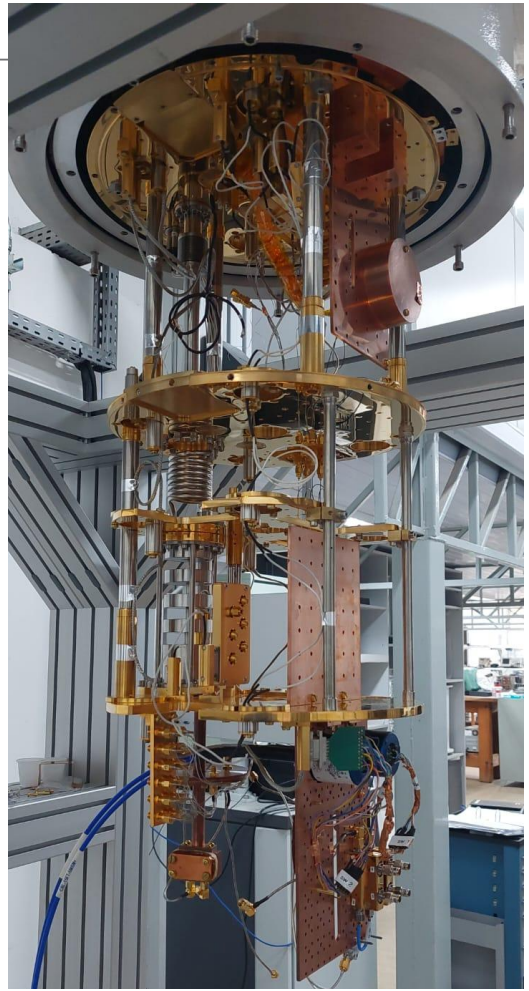
LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

- **Projeto e fabricação de chips supercondutores**





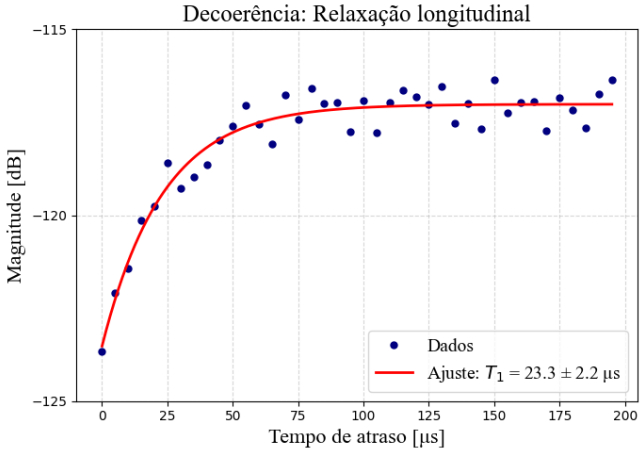


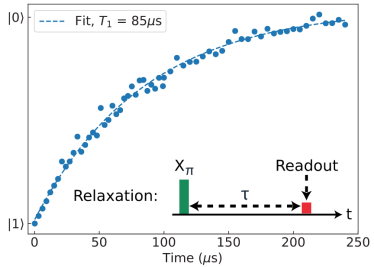


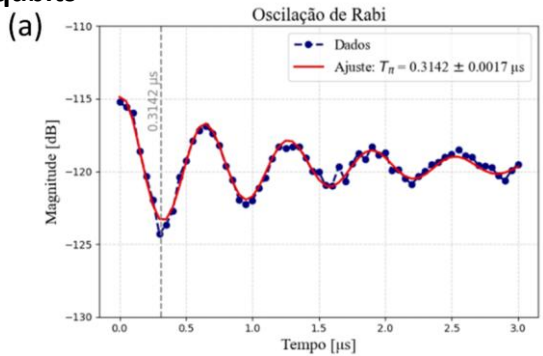
PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

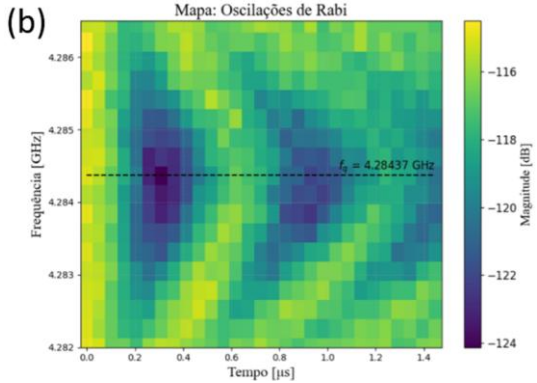
LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

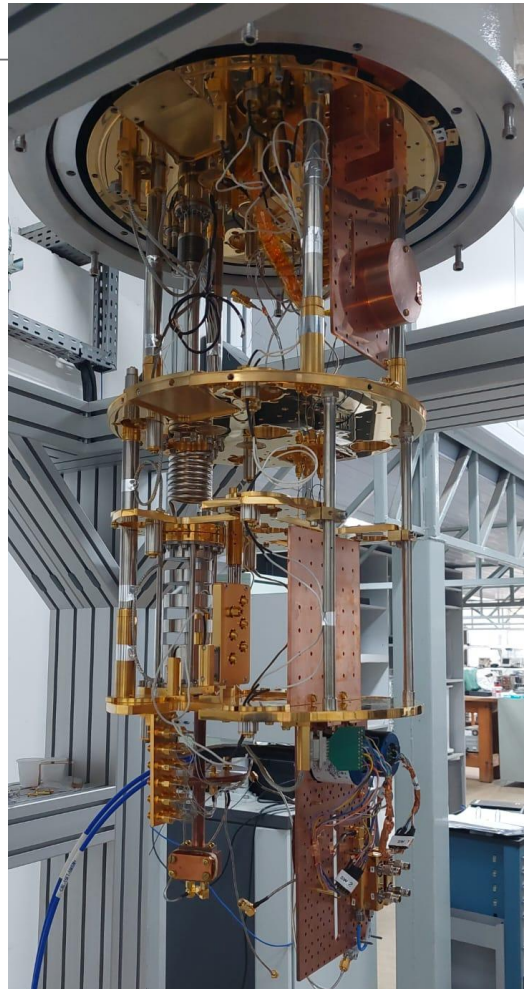
- **Medidas de precisão e caracterização de qubits**











PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

- **Contribuição do substrato no mecanismo de decoerência**

Queremos estimar o número médio de fônons (r) criados pelo impacto de radiação ionizante através da medida de energia média de geração de par elétron-lacuna (ϵ) em função da temperatura

$$\epsilon = a\,E_g + r\,\hbar\,\omega_r$$

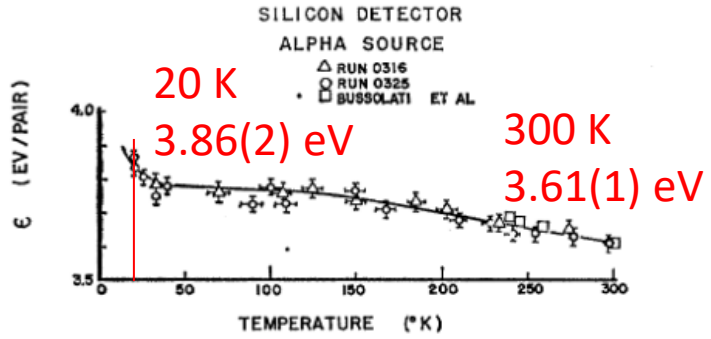
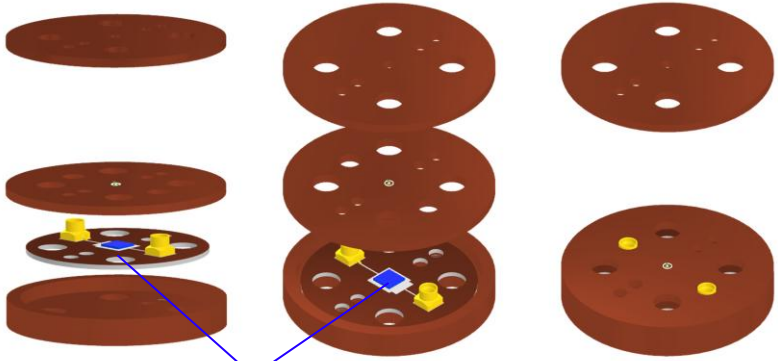
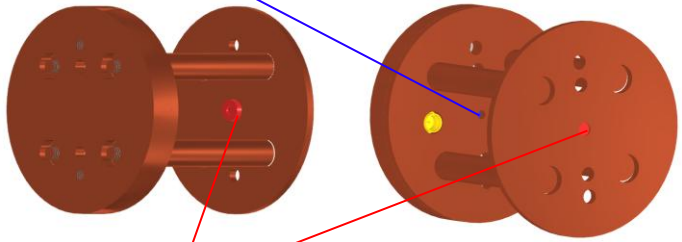


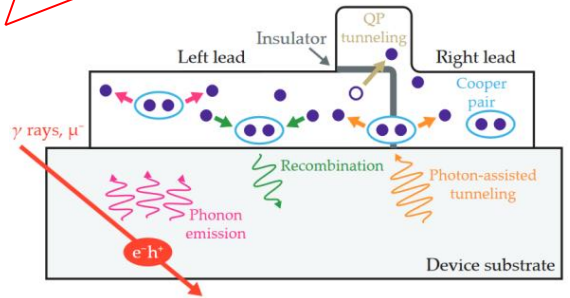
FIG. 5. Plot of ϵ versus temperature for 5.477-MeV α particles incident upon silicon detector. Solid-line equation given by: $\epsilon = 2.2E_g(T) + 0.96\,E_g^{3/2}(T)\exp(0.75\,E_g(T)/T)$. $E_g(T)$ data are from Smith.



Silicon particle detector



Radiation source

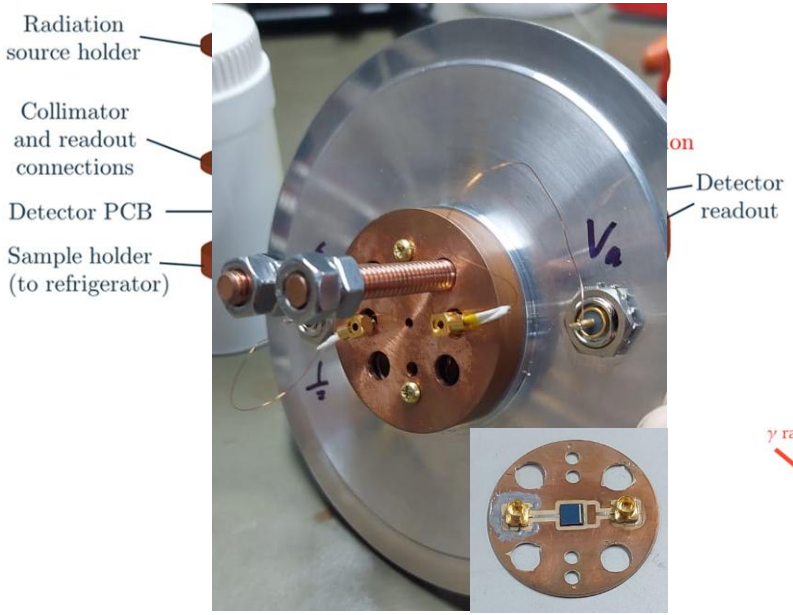


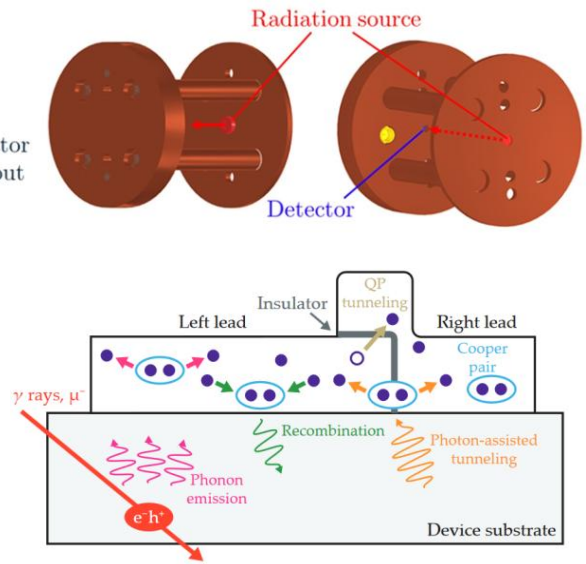
PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

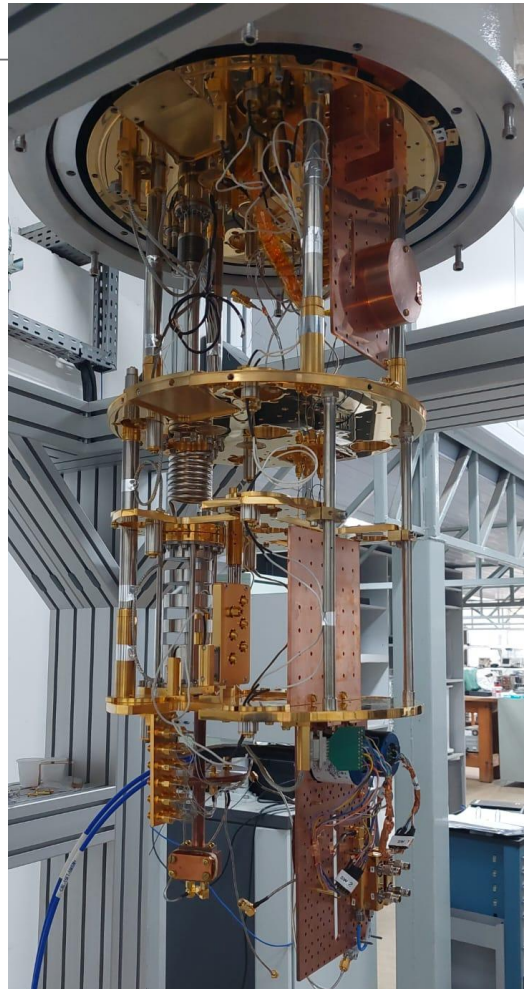
LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

- **Contribuição do substrato no mecanismo de decoerência**

Queremos estimar o número médio de fônons (r) criados pelo impacto de radiação ionizante através da medida de energia média de geração de par elétron-lacuna (ϵ) em função da temperatura







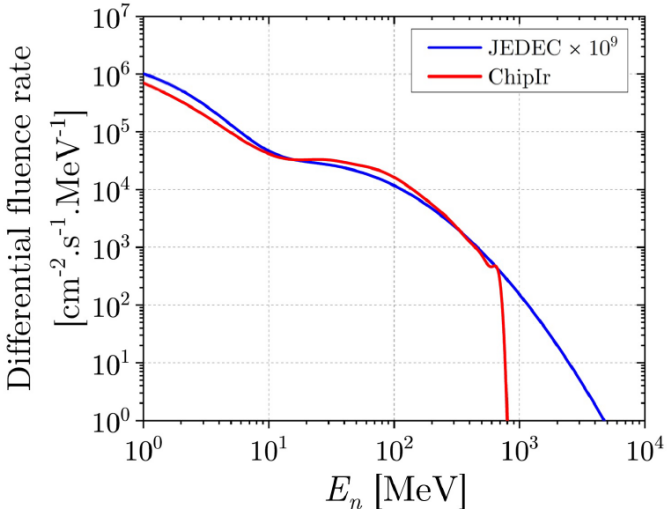
PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

FUTURO PRÓXIMO

- **Impactos de defeitos induzidos por radiação atmosférica na relaxação longitudinal (T_1)**

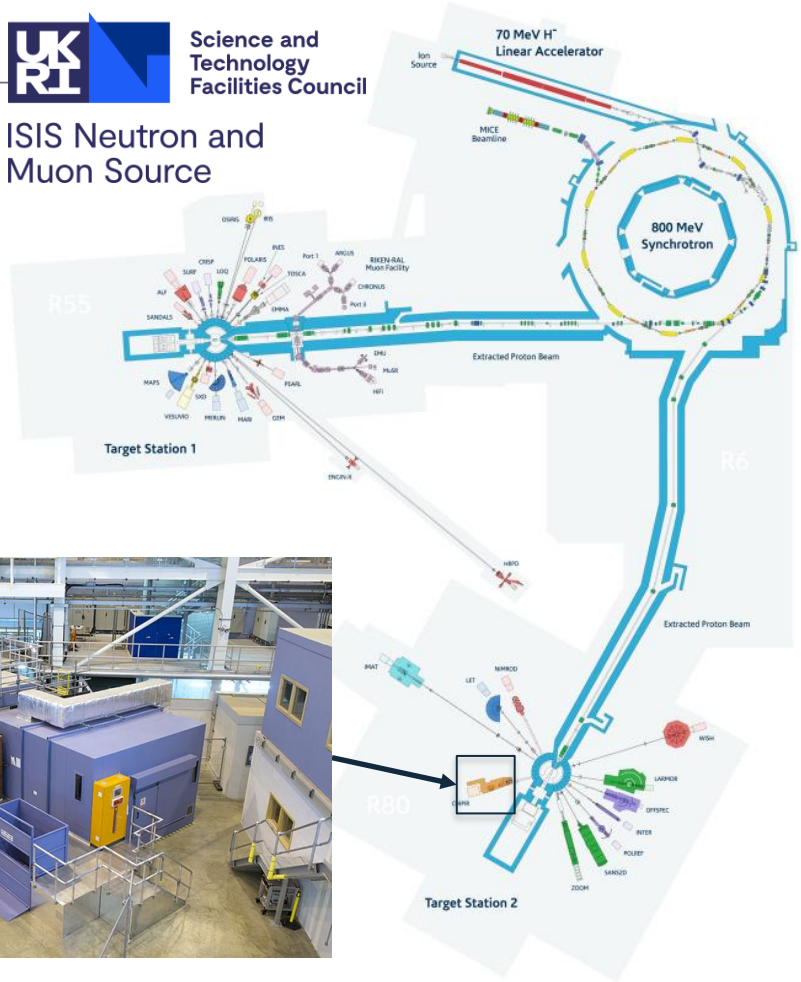
ChipIr instrument: intensity: up to 10^9 higher than the reference atmospheric fluence rate



The ChipIr neutron flux (with E_n>10 MeV) has been measured to be 5×10^6 cm^{-2}s^{-1}.

Science and Technology Facilities Council

ISIS Neutron and Muon Source



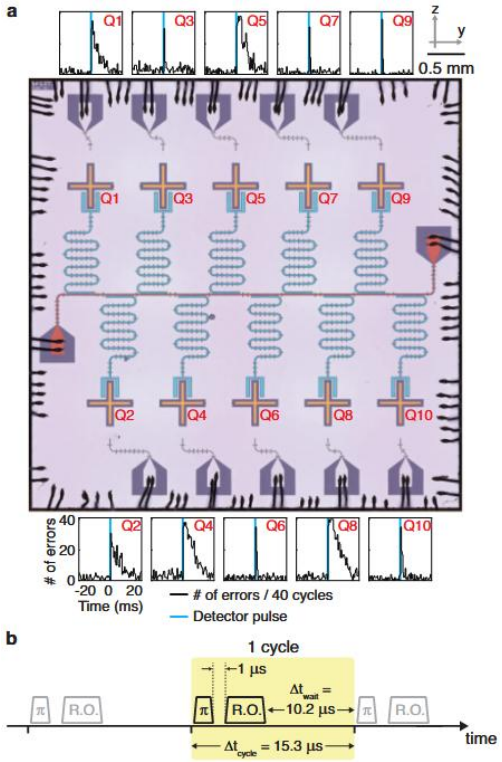
PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

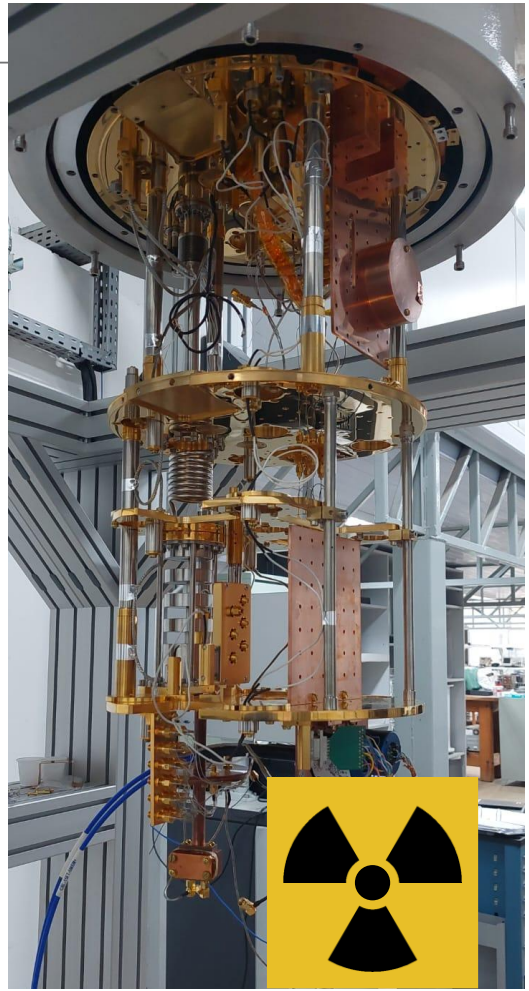
FUTURO PRÓXIMO

- **Efeitos de radiação ionizante em qubits supercondutores**

Desafio: desenvolvimento de novos protocolos de controle e leitura



Fonte: P. M. Harrington et al. “Synchronous detection of cosmic rays and correlated errors in superconducting qubit arrays”. Nature Communications, v. 16, n. 1, p. 6428, 2025.



PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

- **Simulação computacional de chuveiros atmosféricos**

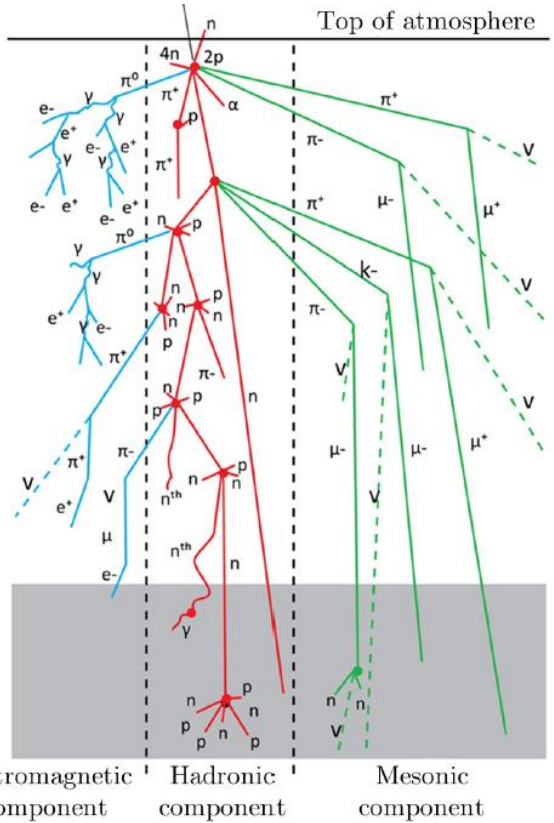


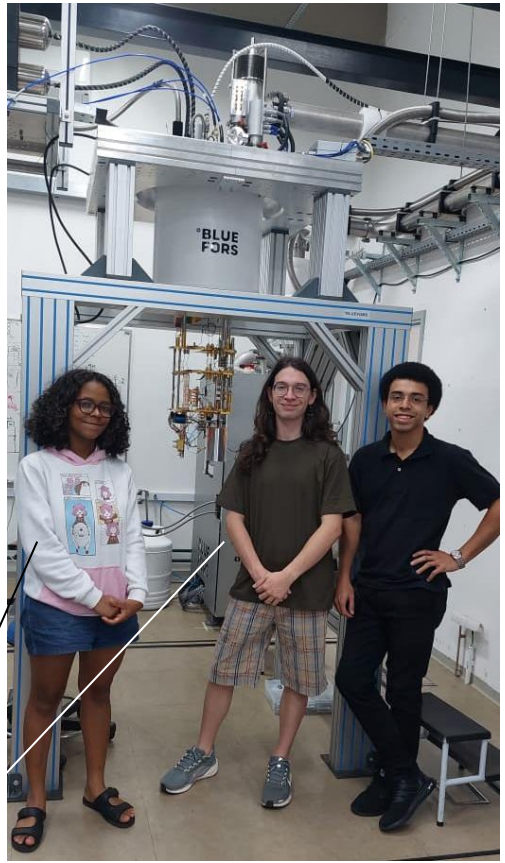
Diagrama de cascatas de partículas (chuveiros atmosféricos).

Fonte: J. C. Gosse and F. M. Phillips, "Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application," Quaternary Science Reviews, vol. 20, no. 14, pp. 1475–1560, 2001.

PESQUISA EM DESENVOLVIMENTO

LFDQ – Laboratório de Física de Dispositivos Quânticos (Unicamp)

- **Simulação computacional de chuveiros atmosféricos**



Isabelli F.

Vinicius B.

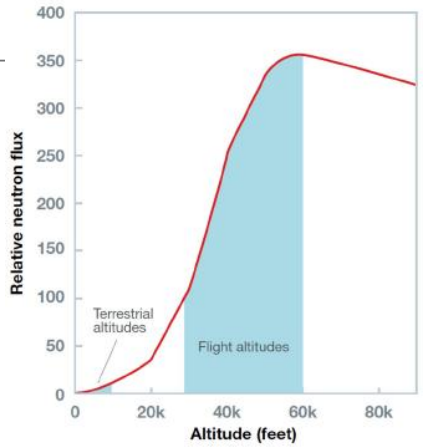
RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE

COMPONENTES DE RADIAÇÃO TERRESTRE

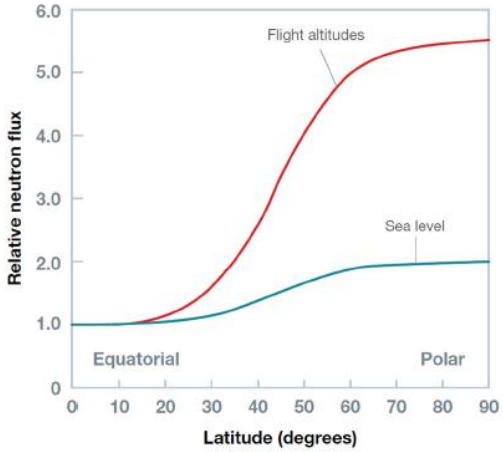
- **Radiação cósmica secundária**

Reações nucleares em cascata entre radiação cósmica e solar com os constituintes da atmosfera terrestre

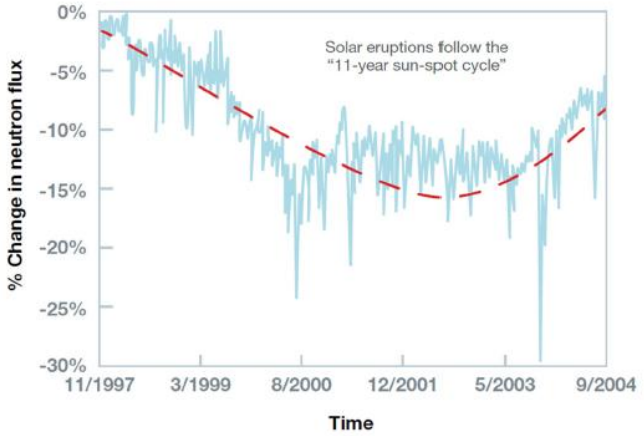
- Altitude → **profundidade atmosférica**
- Latitude/Longitude → **rigidez geomagnética de corte**
- Atividade solar



(a)



(b)



(c)

Principais fatores de modulação do fluxo de nêutrons atmosféricos: (a) altitude, (b) latitude/longitude, (c) atividade solar
Fonte: R. Baumann and K. Kruckmeyer, "Radiation Handbook for Electronics," tech. rep., Texas Instruments, 2019.

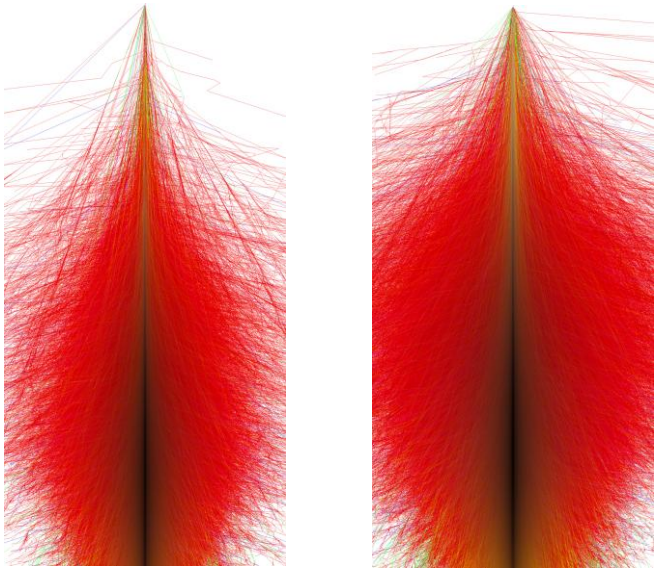
RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE

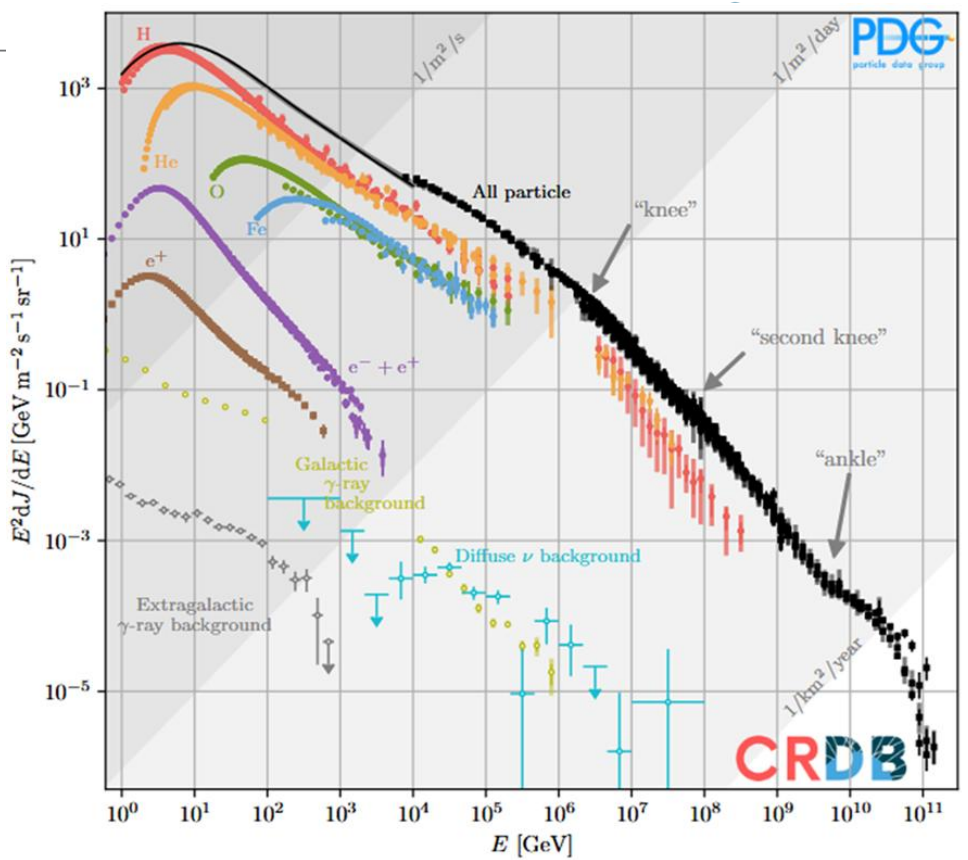
CORSIKA (COsmic **R**ay **SI**mulations for **KA**scade)

Radiação cósmica secundária

- Comparação: $E = 10^{15}$ eV, Ângulo zenital = 0°

Próton ($Z = 1$) Ferro ($Z = 56$)





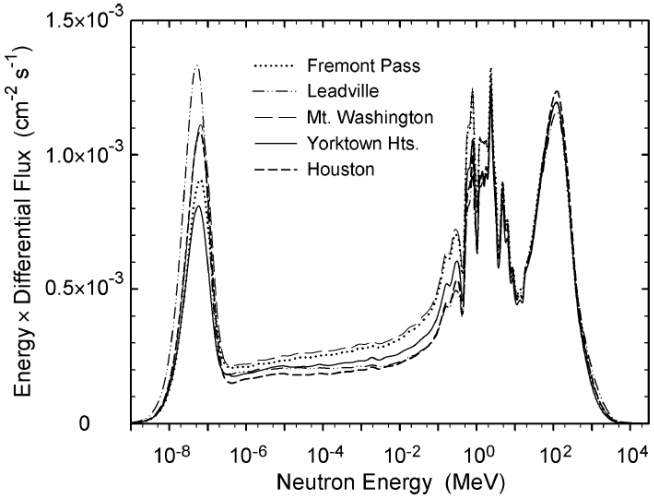
Espectro de energia de GCRs

Fonte: J. Beringer et al. "Review of particle physics". Physical Review D, v. 86, n. 1, p. 010001, 2012.

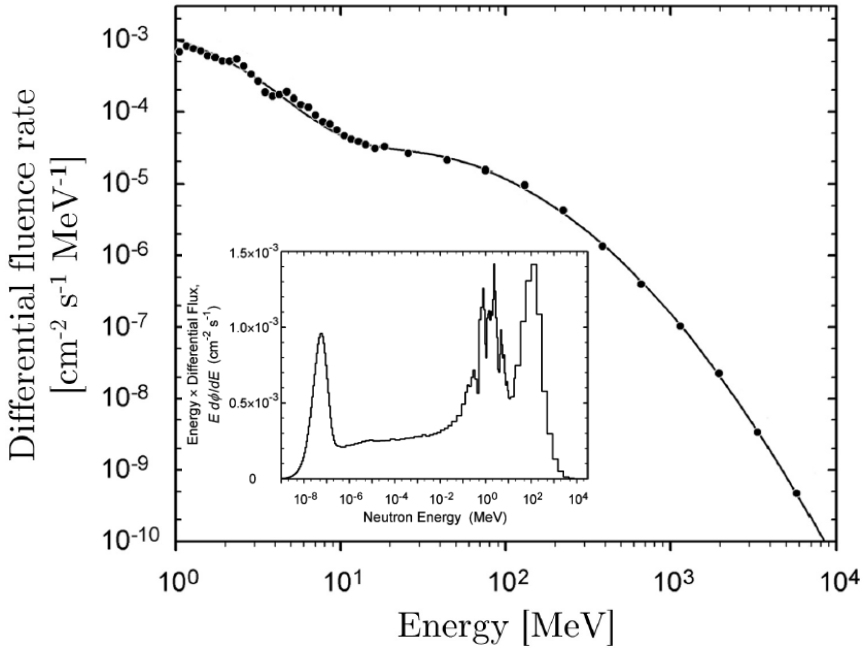
RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE

NÊUTRONS ATMOSFÉRICOS

- A **forma** do espectro de nêutrons atmosféricos varia pouco com a geolocalidade e atividade solar ($E > 10$ MeV).
- Por essa razão, podemos reescalar o fluxo de nêutrons rápidos para **qualquer localidade da Terra** a partir de uma medida em condições de referência



Espectro de nêutrons medidos em cinco diferentes localidades, reescalados para condições de referência (Nova Iorque).



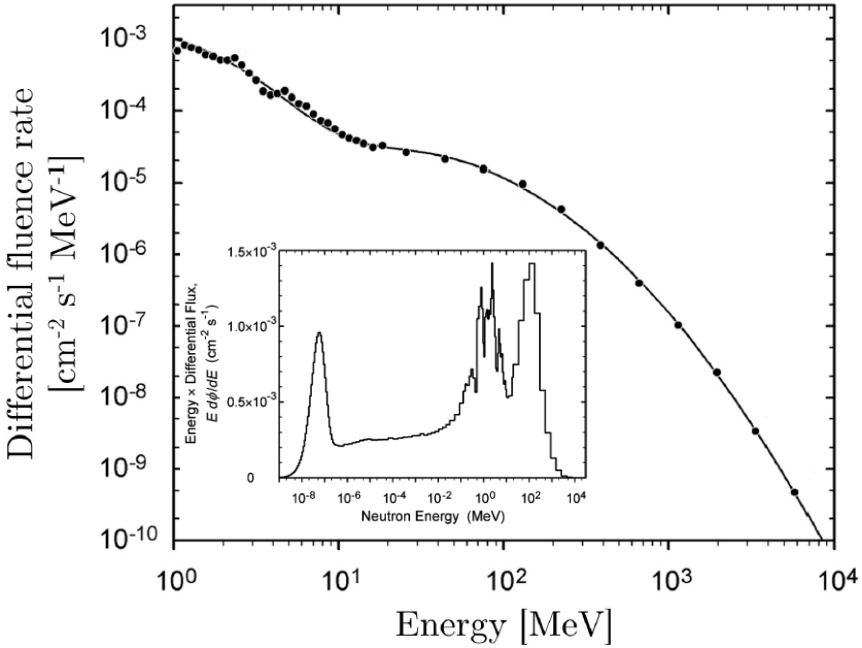
Medidas (pontos) do fluxo diferencial de nêutrons em condições de referência, de acordo com o padrão JEDEC JESD89B (linha).
Fonte: M. S. Gordon et al. "Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground". IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 51, n. 6, p. 3427-3434, 2004.

RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE

NÊUTRONS ATMOSFÉRICOS

- A **forma** do espectro de nêutrons atmosféricos varia pouco com a geolocalidade e atividade solar ($E > 10$ MeV).
- Por essa razão, podemos reescalar o fluxo de nêutrons rápidos para **qualquer localidade da Terra** a partir de uma medida em condições de referência

Espectrômetro com 14 esferas de Bonner localizados no teto do IBM T. J. Watson Research Center

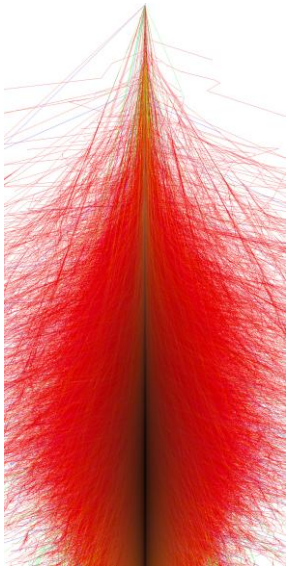


Medidas (pontos) do fluxo diferencial de nêutrons em condições de referência, de acordo com o padrão JEDEC JESD89B (linha).
Fonte: M. S. Gordon et al. "Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground". IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 51, n. 6, p. 3427-3434, 2004.

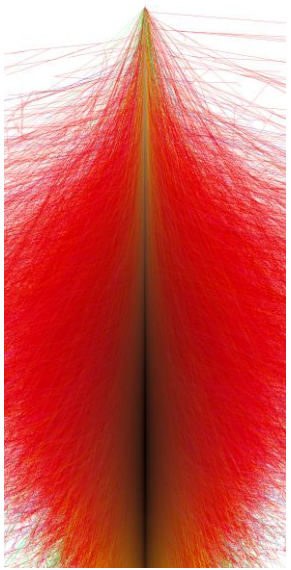
RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE

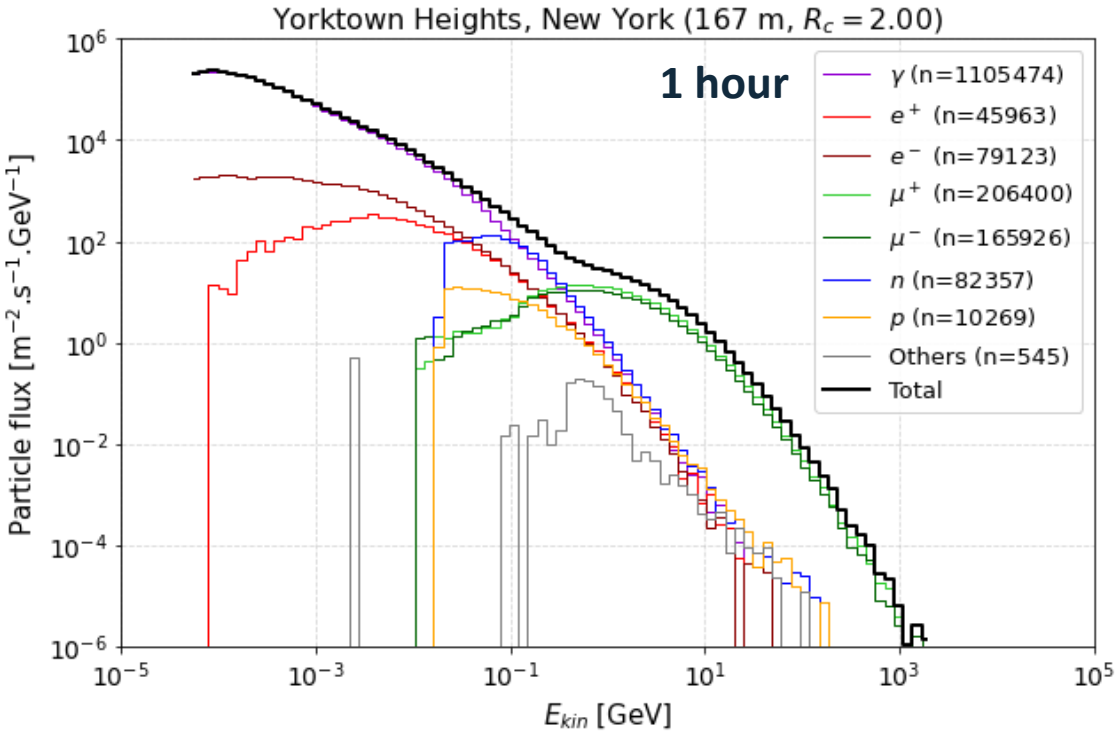
NÊUTRONS ATMOSFÉRICOS

Próton ($Z = 1$)

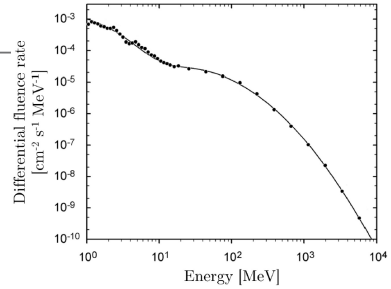


Ferro ($Z = 56$)



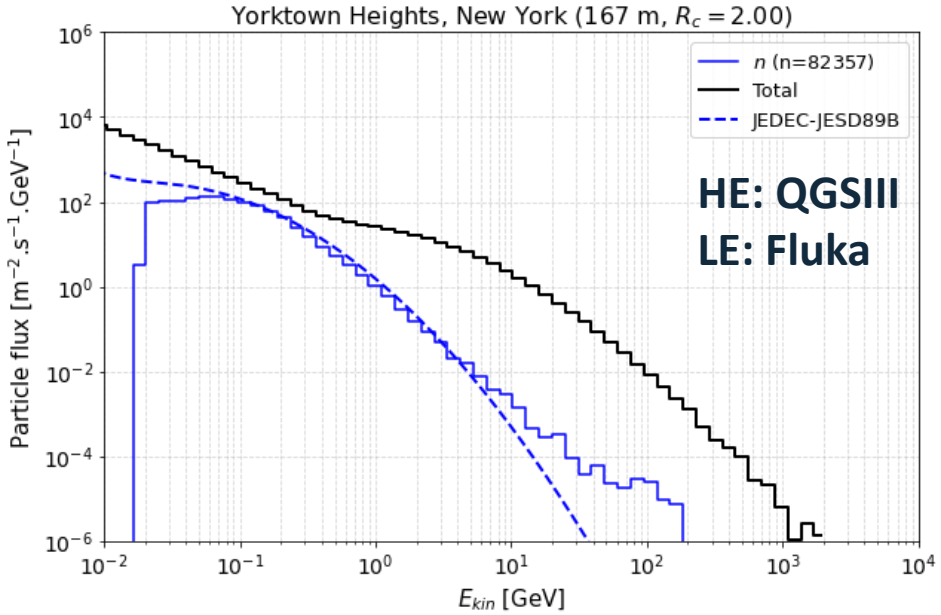


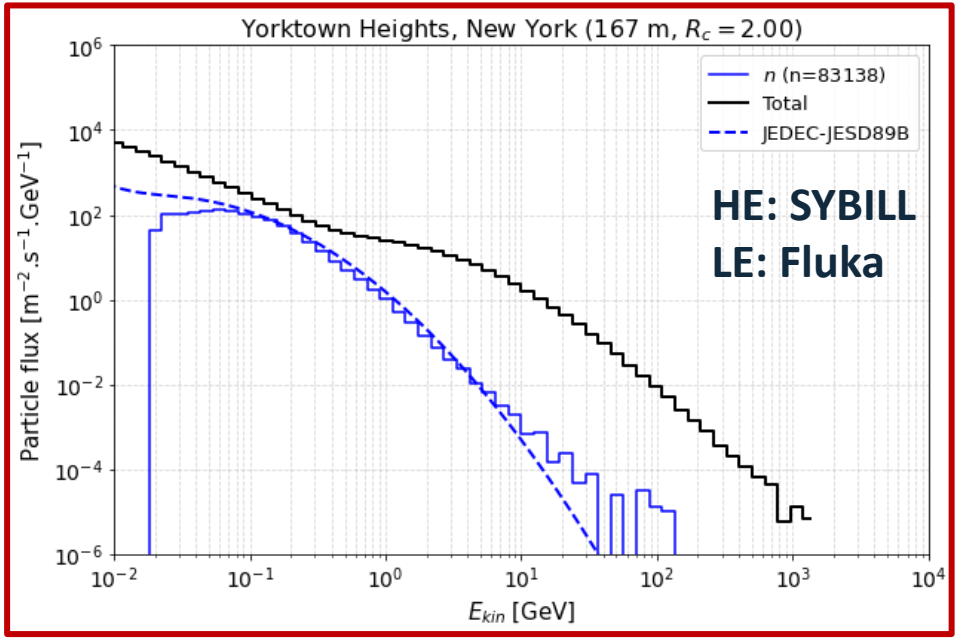
RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE



NÊUTRONS ATMOSFÉRICOS

- **Diferentes modelos físicos: validação da componente hadrônica**

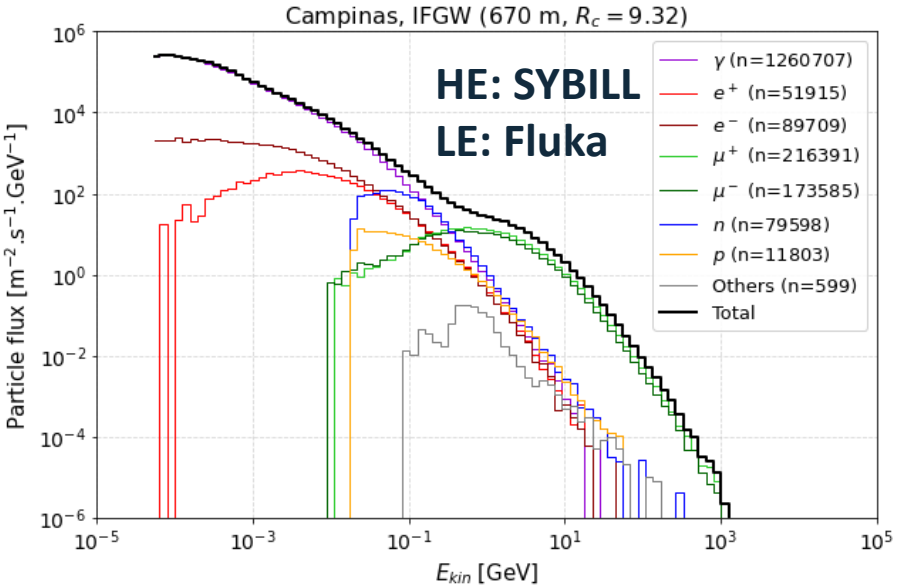


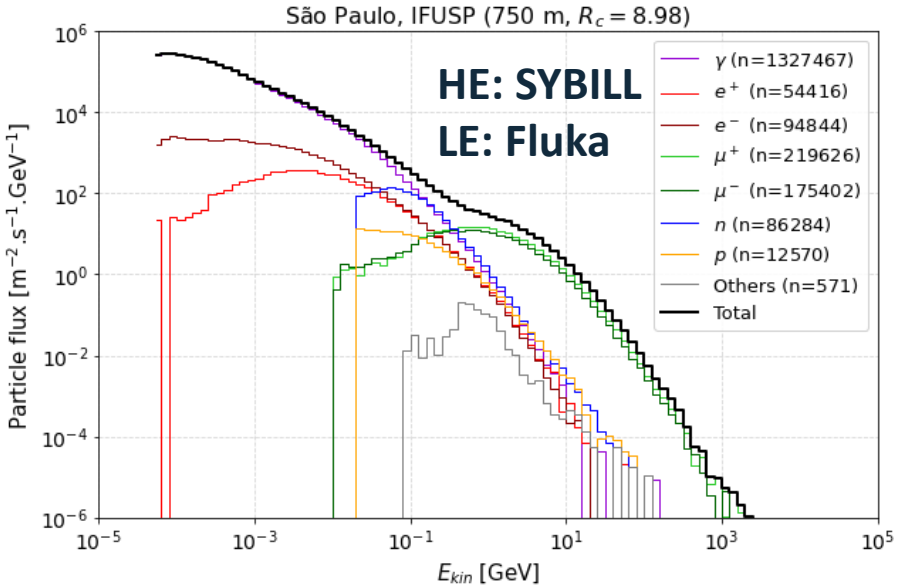


RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE

NÊUTRONS ATMOSFÉRICOS

- **Unicamp e USP**

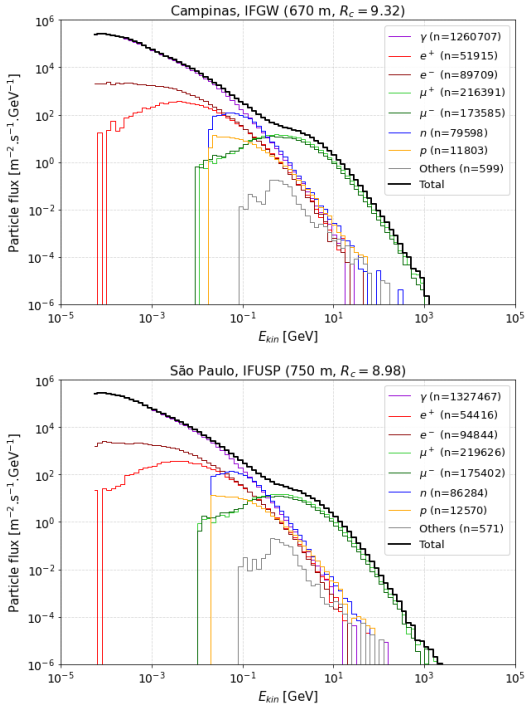


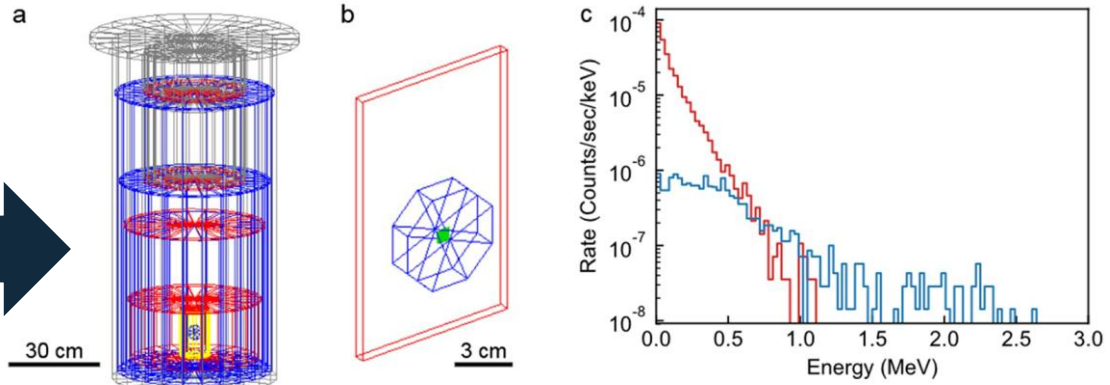


RADIAÇÃO CÓSMICA TERRESTRE

NÊUTRONS ATMOSFÉRICOS

- **Unicamp e USP**





Exemplo de modelagem computacional de sistemas quânticos baseados em qubits supercondutores. (a) Criostato de diluição. (b) Porta-amostra do chip de Si. (c) Espectro de energia depositada no substrato do qubit por raios gama de fundo (vermelho) e múons cósmicos (azul). A distribuição angular dos raios gama é considerada isotrópica, enquanto a dos múons atmosféricos é obtida por meio de parametrizações analíticas.

Fonte: C. D. Wilen, et al., "Correlated charge noise and relaxation errors in superconducting qubits," Nature, vol. 594, no. 7863, pp. 369–373, 2021.

ACKNOWLEDGMENTS

UNICAMP

USP 90 ANOS 1934 2024

ELDORADO
Brazil Tech Innovation Institute

INCT-FNA

Pôster do estudante Adauto (Unicamp)
FNA01 - Modelagem 3D da interação de feixe de elétrons e fotoresiste para fabricação de ressonadores mecânicos supercondutores.

OBRIGADO

Saulo Gabriel Alberton
Departamento de Física Nuclear, Universidade de São Paulo (USP)
Departamento de Física da Matéria Condensada, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)