Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro

ALPHA
Antihydrogen Laser Physics Apparatus

Relatório ALPHA

Rodrigo Lage Sacramento, Claudio Lenz Cesar, Daniel de Miranda Silveira

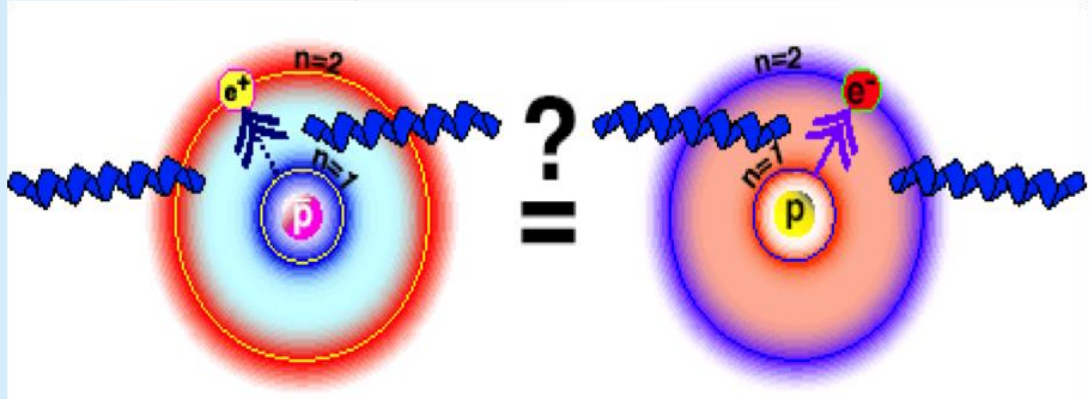
II Workshop INCT Brasil-CERN

São Paulo, 03 de julho de 2024

LASER – IF – UFRJ

Antihydrogen **L**aser **PH**yiscs **A**pparatus

- Objetivo principal do experimento ALPHA: realizar medidas espectroscópicas de anti-átomos de hidrogênio confinados em armadilhas magnéticas para comparação com medidas realizadas em hidrogênio.



Antihydrogen ($\bar{H}$) Hydrogen (H)

- Preciso teste para procurar quebra de simetria de CPT: espectrosocopia de ultra alta resolução.

- Testes para o Princípio de Equivalência?
- **Antigravidade? No…**

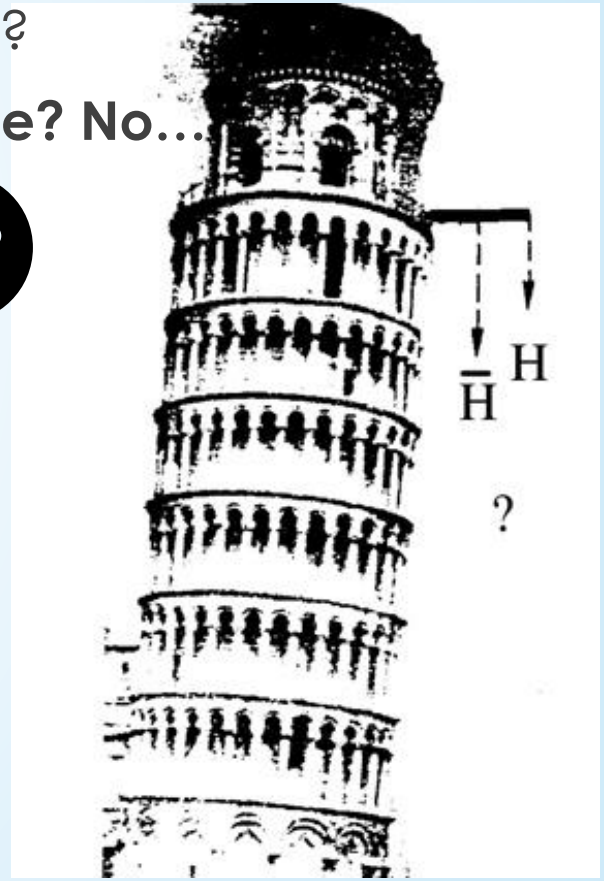


Image source:http://aegis.web.cern.ch

Antihydrogen **L**aser **PH**yiscs **A**pparatus

- Cerca de 50 pesquisadores/estudantes de aproximadamente 15 instituições de 7 diferentes países (Brasil, Canadá, Dinamarca, Estados Unidos, Israel, reino Unido e Suécia)

The ALPHA collaboration

Antihydrogen **L**aser **PH**yiscs **A**pparatus

- ALPHA- Brasil: Todos sediados na UFRJ, trabalho no laboratório LASER

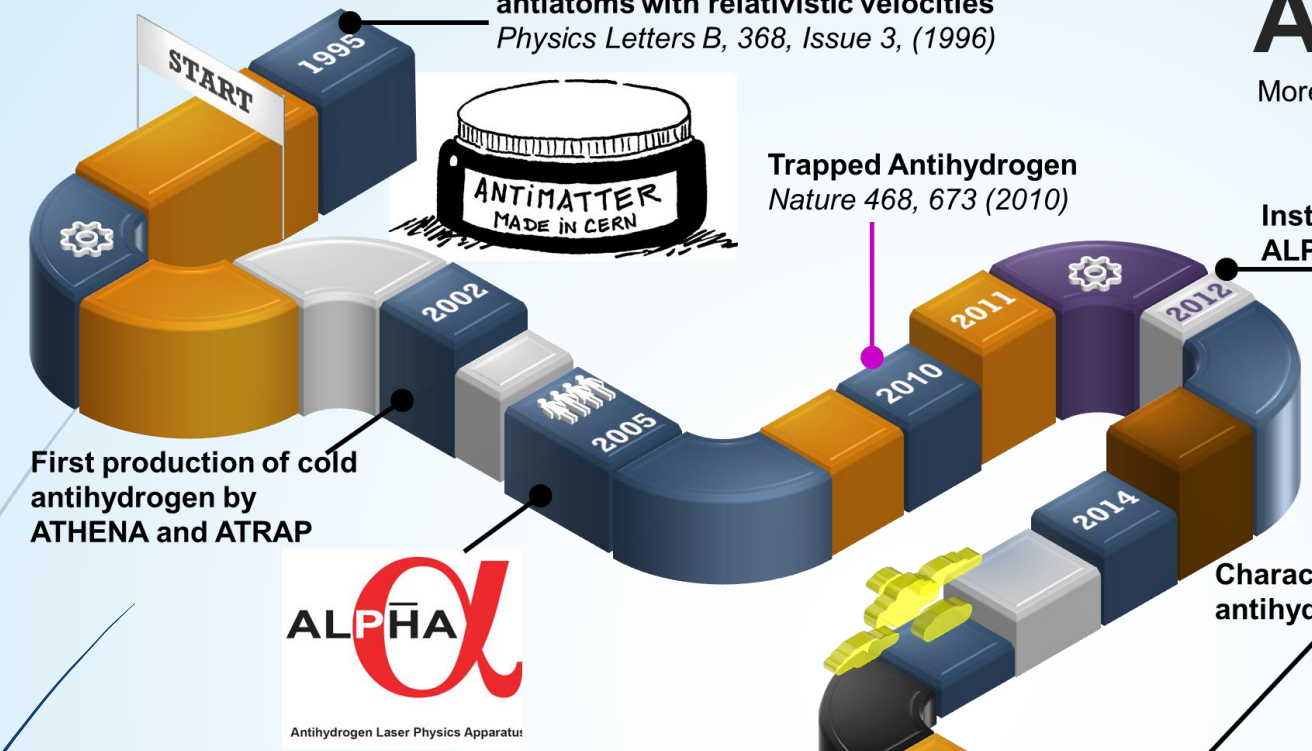
Prof. Claudio Lenz Cesar
Prof. Daniel de Miranda Silveira
Prof. Rodrigo Lage Sacramento
Dr. Alvaro Nunes de Oliveira (Inmetro)
Doutorando Levi Oliveira de Araújo Azevedo

- Já no grupo do LASER...

3 alunos de mestrado (Miguel, Ozzy, Patrick)
6 alunos de IC (Julio Queiroz foi agora para o CERN – Summer student)
+ 2 mestrandos iniciando agora em 2024/2

The tale of the Antihydrogen

More the twenty years for the first spectrum



First production of antihydrogen. Nine antiatoms with relativistic velocities
Physics Letters B, 368, Issue 3, (1996)

Trapped Antihydrogen
Nature 468, 673 (2010)

Installation new generation of the apparatus. ALPHA-2

First production of cold antihydrogen by ATHENA and ATRAP

Characterization of the 1S–2S transition in antihydrogen *Nature 557, 71 (2018)*

Observation of the 1S–2P Lyman-α transition in antihydrogen
Nature 561, 211 (2018)

Installation of ALPHAg

Observation of the 1S – 2S transition in trapped antihydrogen *Nature 541, 506 (2017)*

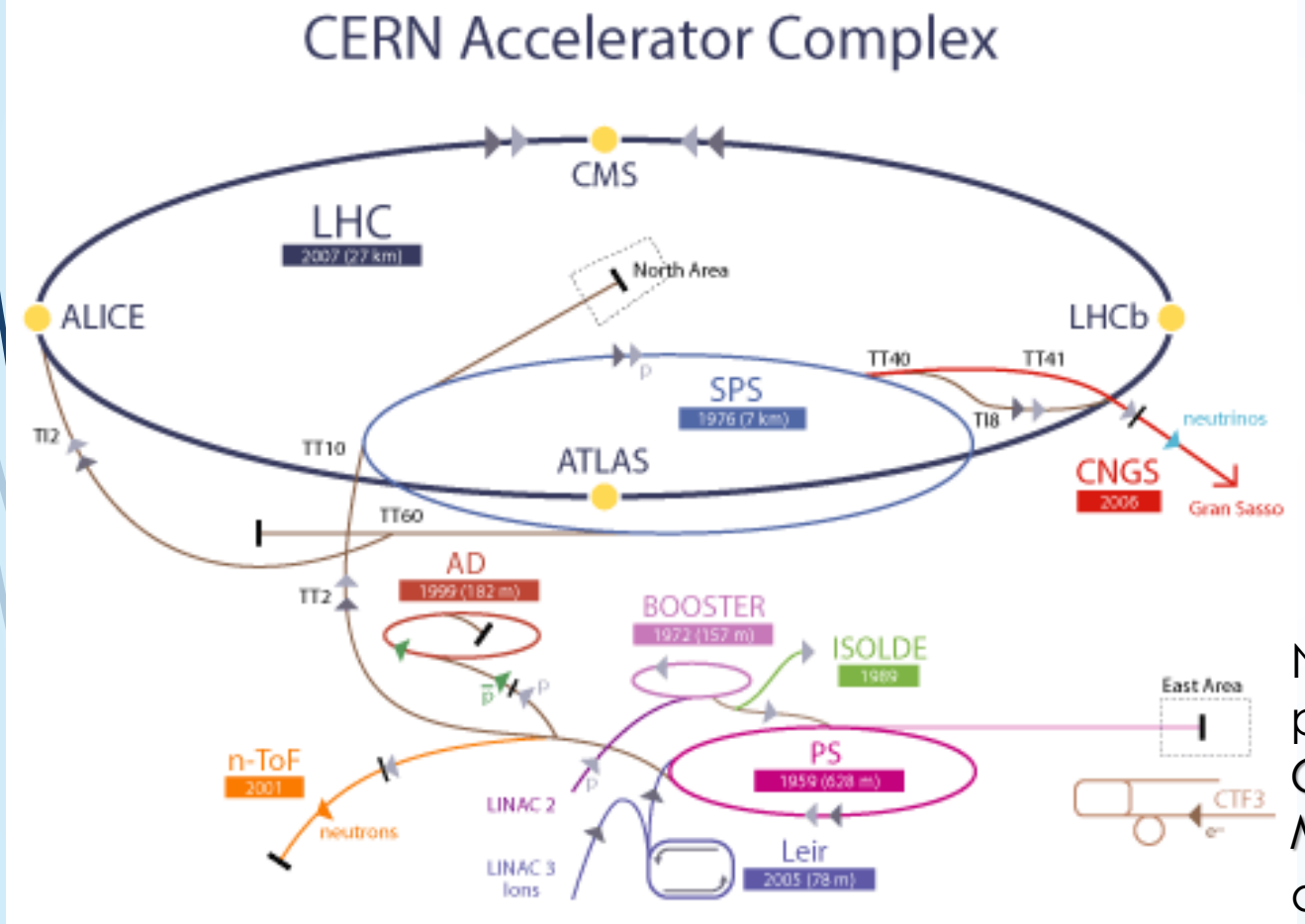
Observation of the hyperfine spectrum of antihydrogen *Nature 548, 66 (2017)*

Laser cooling of antihydrogen atoms
Nature 592, 35 (2021)

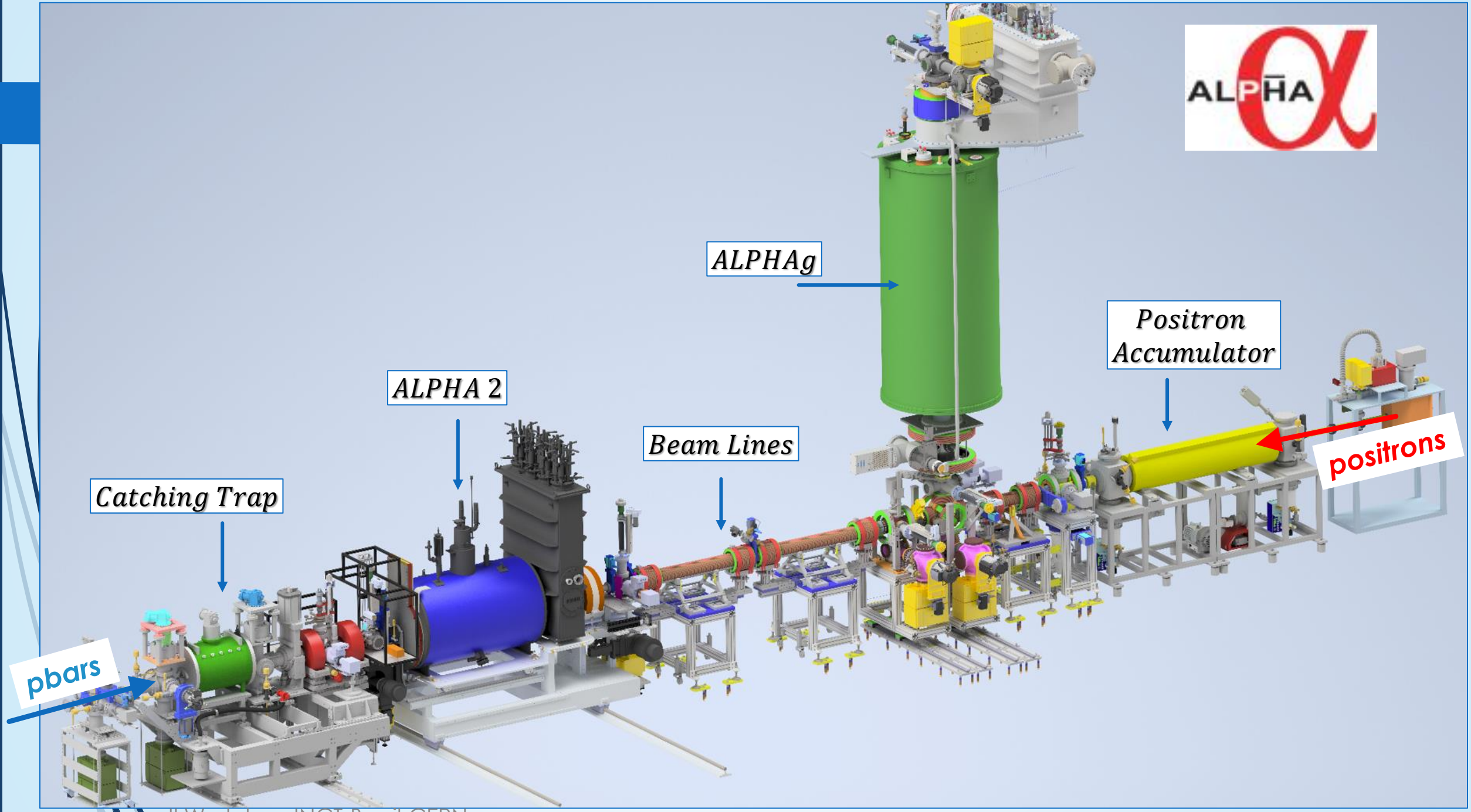
Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter
Nature 621, 716 (2023)

Como produzir antihidrogênio?

Primeiro precisamos de antiprotons ($\bar{p}$)….



No *Antiproton Decelerator (AD)*- antiprotons são produzidos ~26 GeV, chegam no AD com 3.6 GeV. Chegam para os experimentos com 5.3 MeV ($n_{\bar{p}}$~$3-4\times10^{7}$) capturados em uma armadilha de Penning com *4 keV (1 eV ~ 10000K)*


ALPHAg
Positron Accumulator
ALPHA 2
Beam Lines
Catching Trap
positrons
pbars

Article

Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter

https://doi.org/10.1038/s41586-023-06527-1

Received: 6 May 2023

Accepted: 9 August 2023

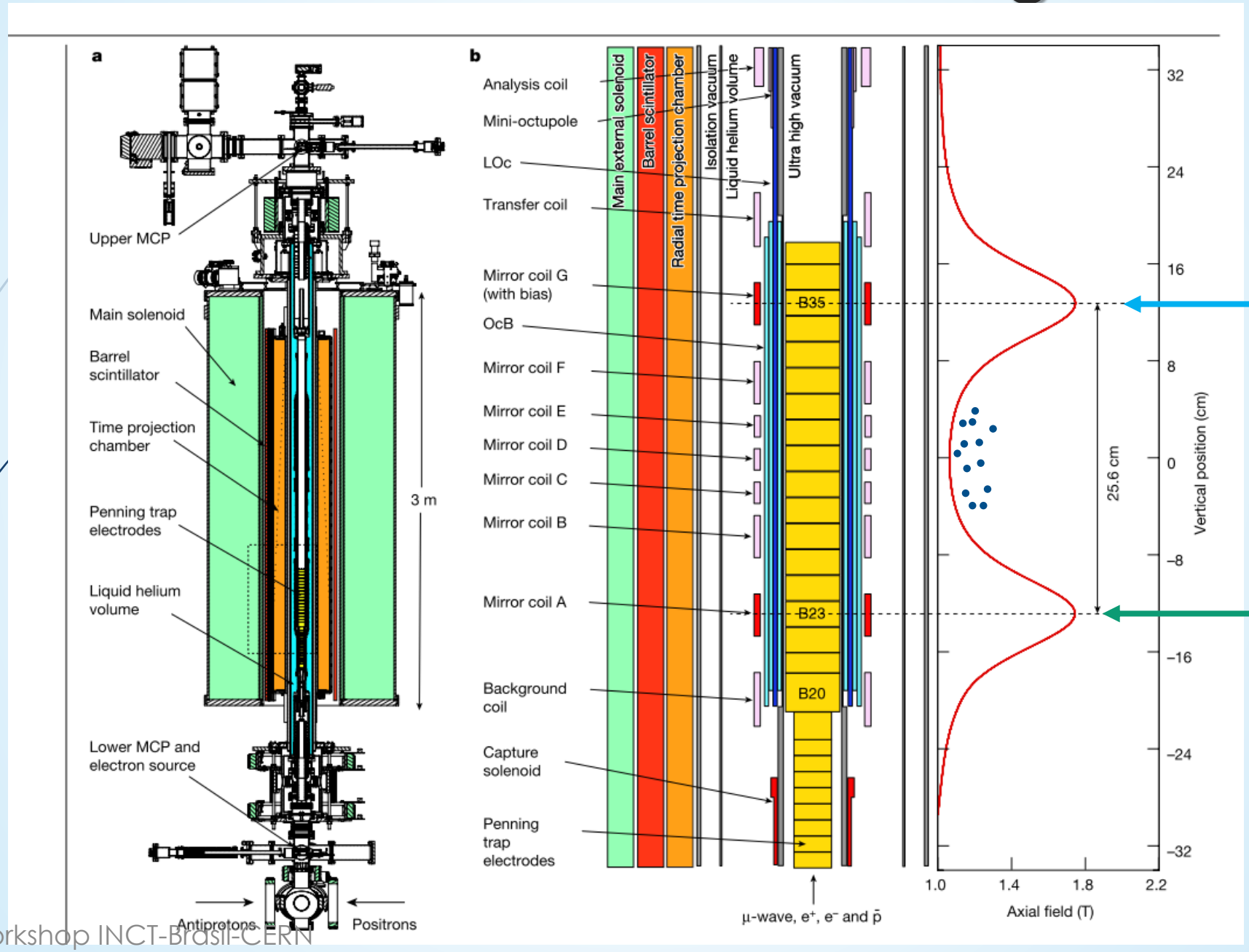
Published online: 27 September 2023

Open access

Check for updates

E. K. Anderson[1], C. J. Baker[2], W. Bertsche[3,4]✉, N. M. Bhatt[2], G. Bonomi[5], A. Capra[6], I. Carli[6], C. L. Cesar[7], M. Charlton[2], A. Christensen[8], R. Collister[6,9], A. Cridland Mathad[2], D. Duque Quiceno[6,9], S. Eriksson[2], A. Evans[6,9], N. Evetts[9], S. Fabbri[3,10], J. Fajans[8]✉, A. Ferwerda[11], T. Friesen[12], M. C. Fujiwara[6], D. R. Gill[6], L. M. Golino[2], M. B. Gomes Gonçalves[2], P. Grandemange[6], P. Granum[1], J. S. Hangst[1]✉, M. E. Hayden[13], D. Hodgkinson[3,8], E. D. Hunter[8], C. A. Isaac[2], A. J. U. Jimenez[6], M. A. Johnson[3,4], J. M. Jones[2], S. A. Jones[14], S. Jonsell[15], A. Khramov[6,9,16], N. Madsen[2], L. Martin[6], N. Massacret[6], D. Maxwell[2], J. T. K. McKenna[1,3], S. Menary[11], T. Momose[6,9,17], M. Mostamand[6,17], P. S. Mullan[2,18], J. Nauta[2], K. Olchanski[6], A. N. Oliveira[1], J. Peszka[2,18], A. Powell[12], C. Ø. Rasmussen[19], F. Robicheaux[20], R. L. Sacramento[7], M. Sameed[3,21], E. Sarid[22,23], J. Schoonwater[2], D. M. Silveira[7], J. Singh[3], G. Smith[6,9], C. So[6], S. Stracka[24], G. Stutter[1,25], T. D. Tharp[26], K. A. Thompson[2], R. I. Thompson[6,12], E. Thorpe-Woods[2], C. Torkzaban[8], M. Urioni[5], P. Woosaree[12] & J. S. Wurtele[8]

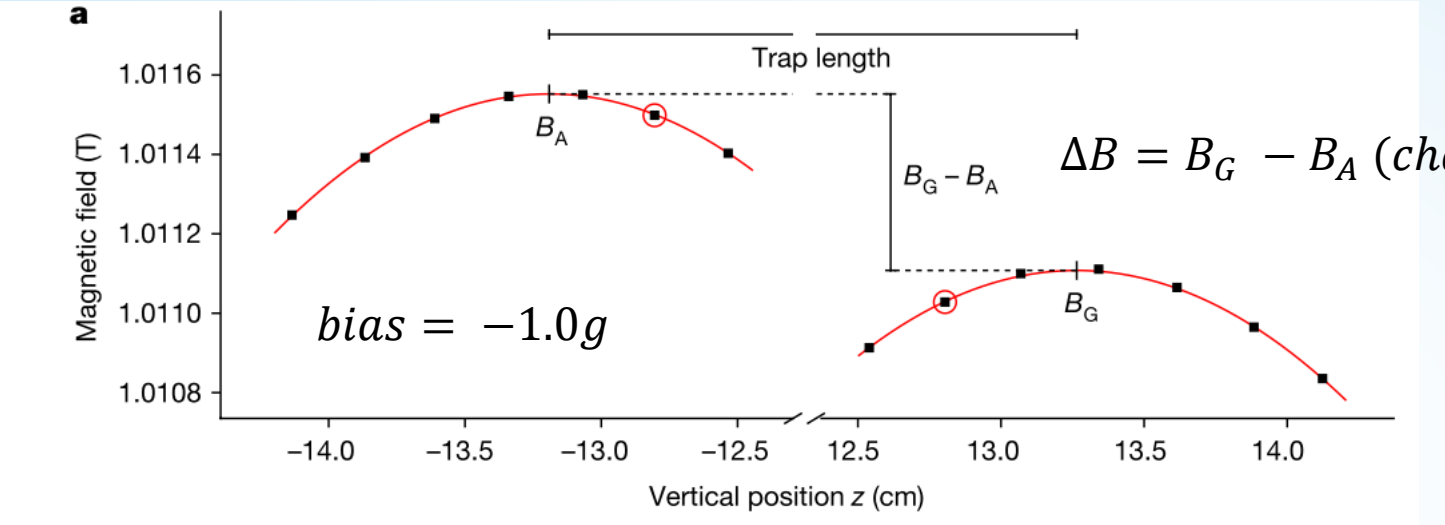
Como funciona o ALPHAg?



Mirror G
(z > 0)

Mirror A
(z < 0)

Como funciona o ALPHAg?

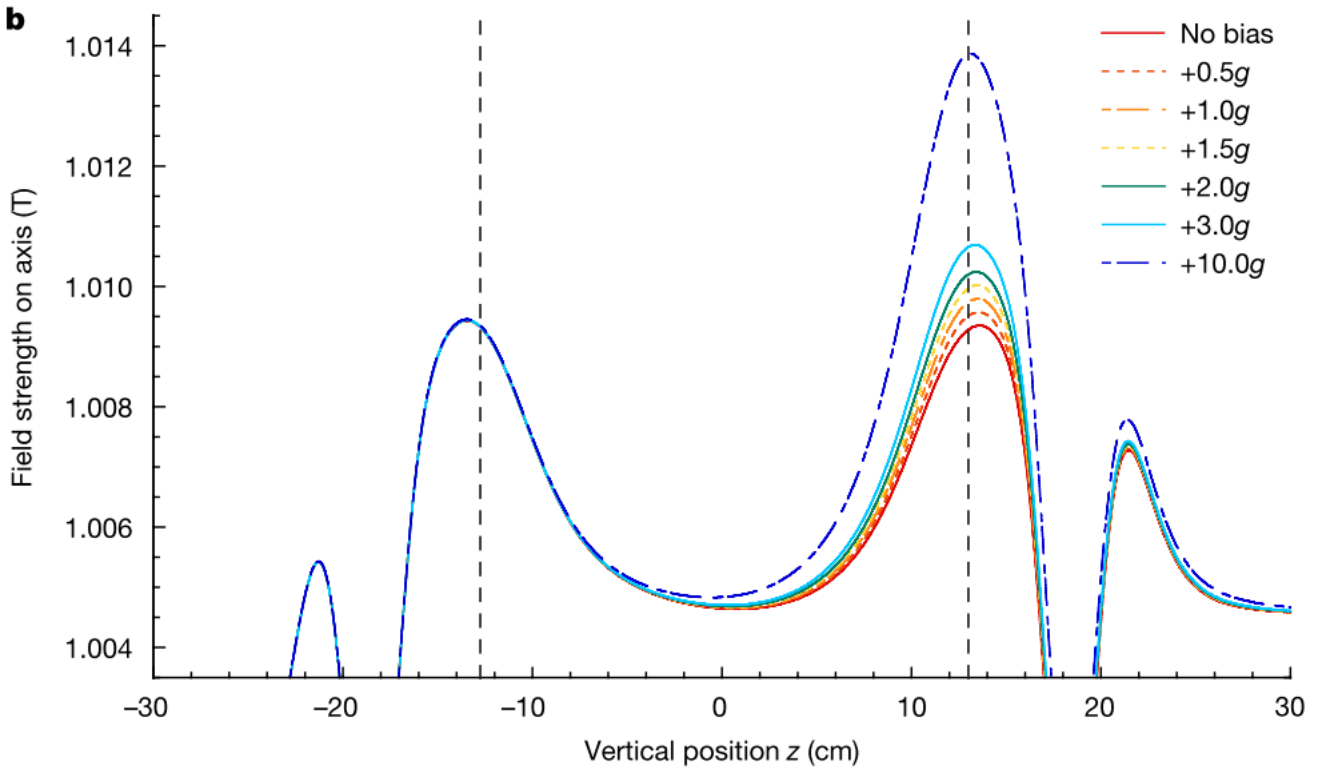


$bias = -1.0g$

$\Delta B = B_G - B_A$ (chamado de "bias")

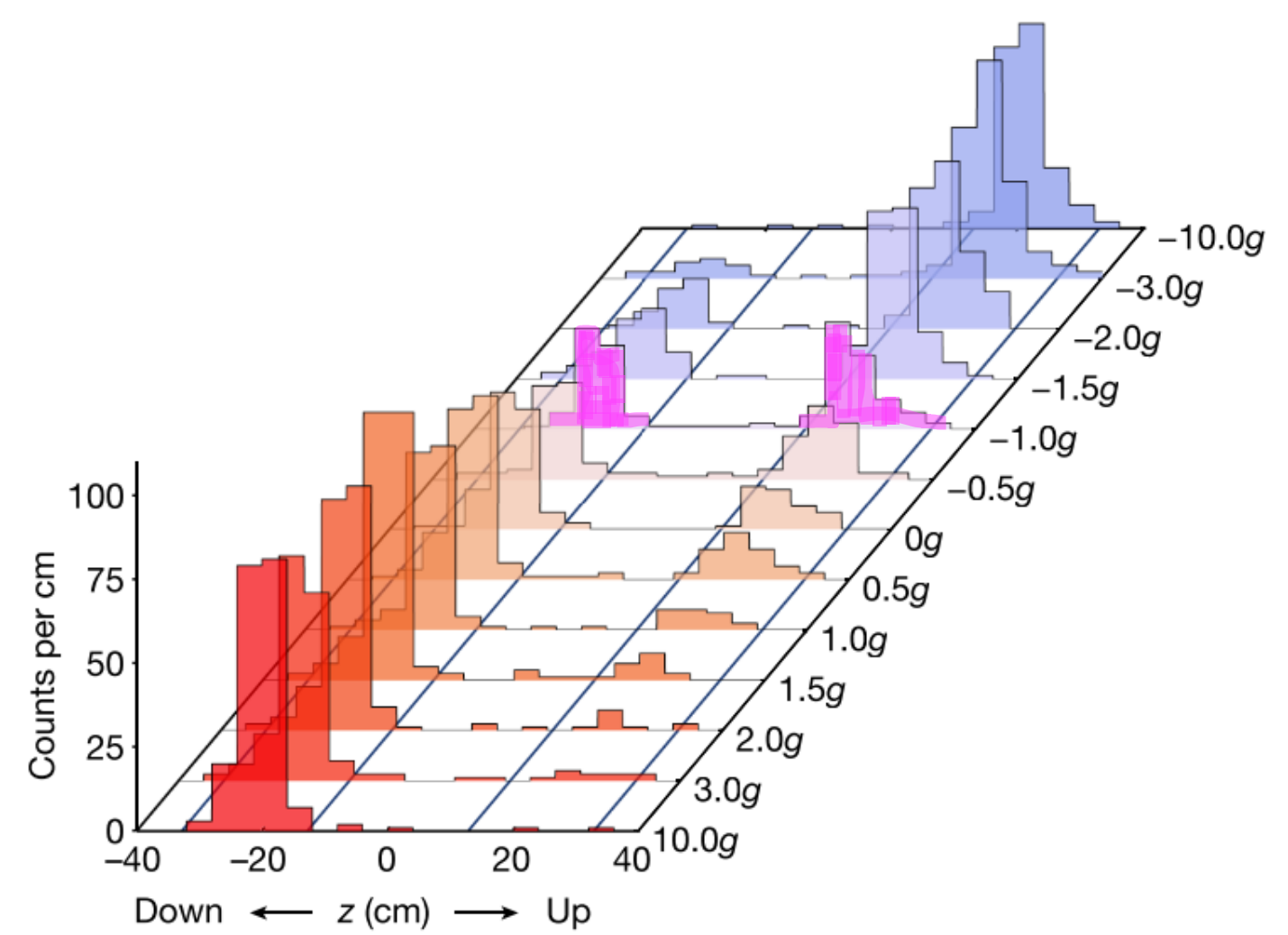
Logo, como as bobinas estão separadas por $\mathbf{25.6\ cm}$ isso é equivalente a um $\boldsymbol{\Delta B = 4,5 \times 10^{-4} T}$

Para $B_G = B_A$ cerca de ~80% dos $\bar{\mathrm{H}}$ escapariam pela parte de baixo da armadilha.
Com $1\mathrm{g} = 9{,}81 m/s^2$ é o equivalente a um gradiente de campo igual $\sim 1.77 \times 10^{-3}\ T/m$



Como funciona o ALPHAg?

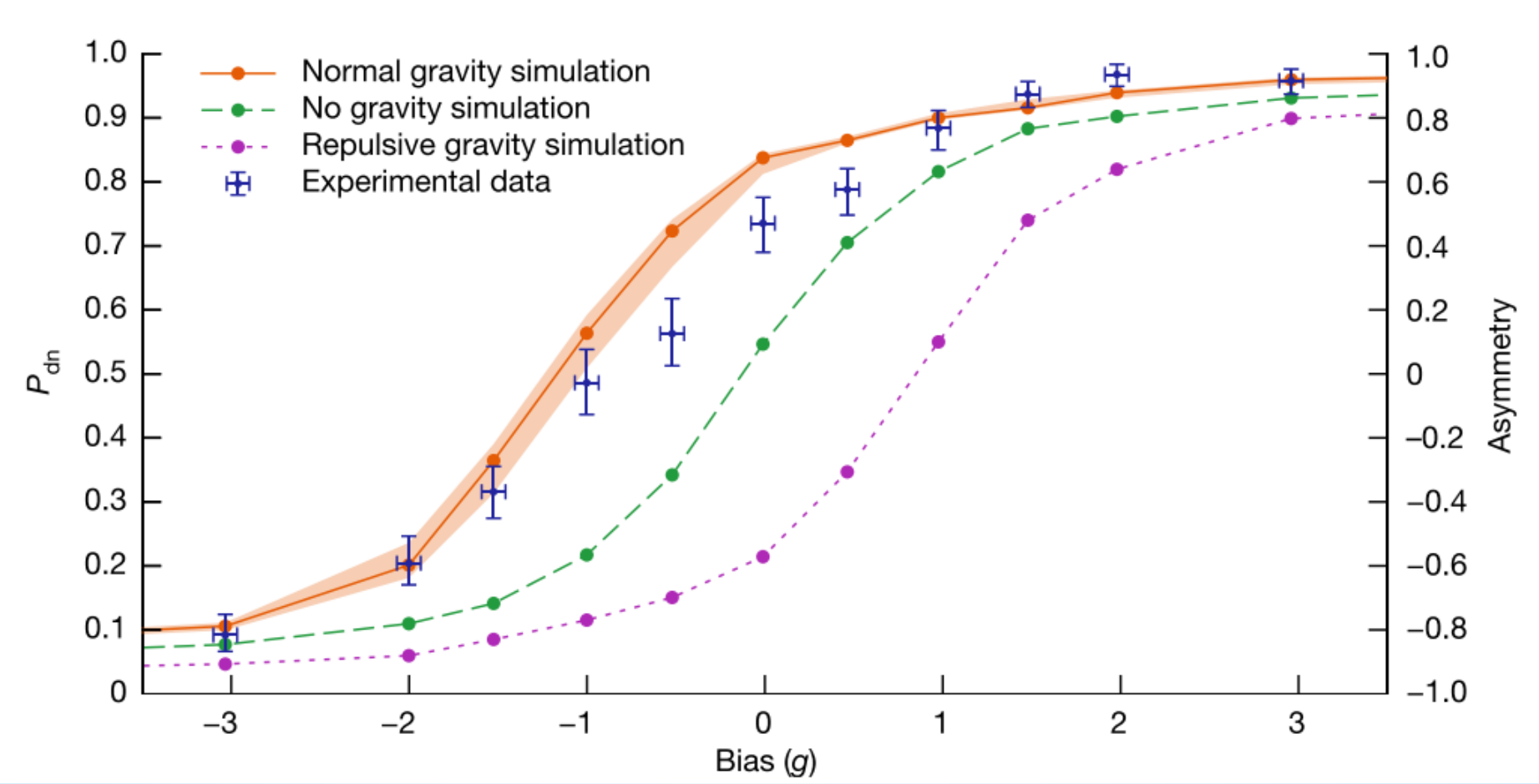
Com esse controle do campo magnético $\boldsymbol{\Delta B = 4,5 \times 10^{-4} T}$ podemos igualar o "desnível" gravitacional – e observar como os anti-átomos se comportam



$$\Delta B = B_G - B_A$$

Como funciona o ALPHAg?

Assim realizamos diversos experimentos, com diferentes bias do campo magnético, podendo assim contar o número de átomos que escapam da armadilha. Construindo assim uma *curva de "fuga"* em termos da diferença de campo magnético!



Como funciona o ALPHAg?

Quanto vale g para $\bar{H}$?

Incertezas na determinação do bias

Uncertainty	Magnitude (g)
ECR spectrum width	0.07
Repeatability of $(B_G - B_A)$	0.014
Peak field size and z-location fit	0.009
Field decay asymmetry (A to G) after ramp	0.02
Bias variation in time	0.02
Field modelling	0.05

Incertezas na determinação de $g_{\bar{H}}$:

	Uncertainty	Magnitude (g)
Statistical and systematic	Finite data size	0.06
	Calibration of the detector efficiencies in the up and down regions	0.12
	Other minor sources	0.01
Simulation model	Modelling of the magnetic fields (on-axis and off-axis)	0.16
	Antihydrogen initial energy distribution	0.03

$$a_{\bar{g}} = (0{,}75 \pm 0.13 \pm 0.16)g$$

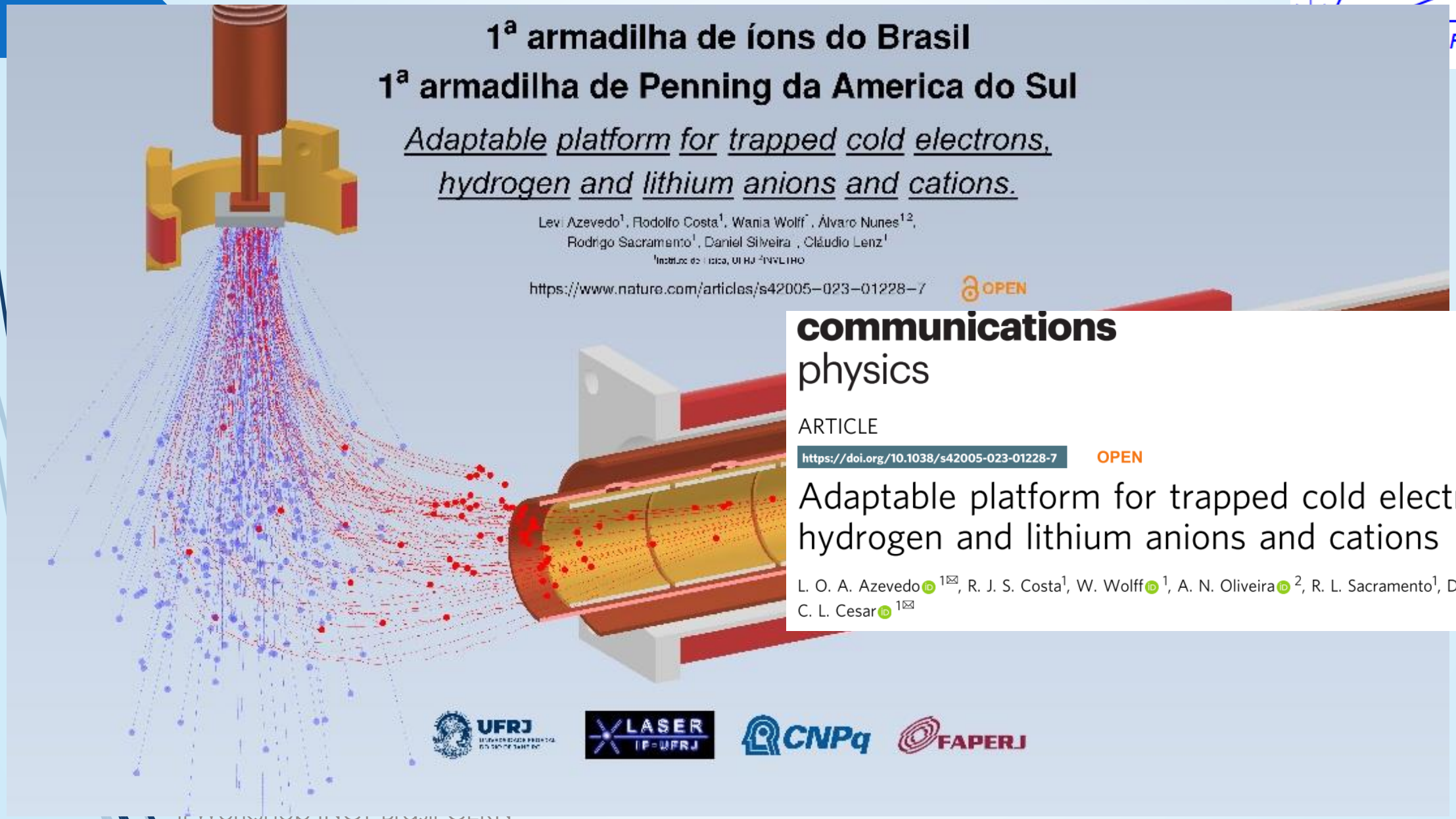
Sistemáticos + estatísticos

Detecção de eventos: contagem, background, eficiência do detector

Simulação

devido a uma variedade de coisas que não podem ser simuladas: enrolamento das bobinas, campos fora do eixo, campos magnéticos persistentes, incertezas na distribuição de energia inicial dos anti-átomos

ALPHA-Brasil



communications physics

ARTICLE

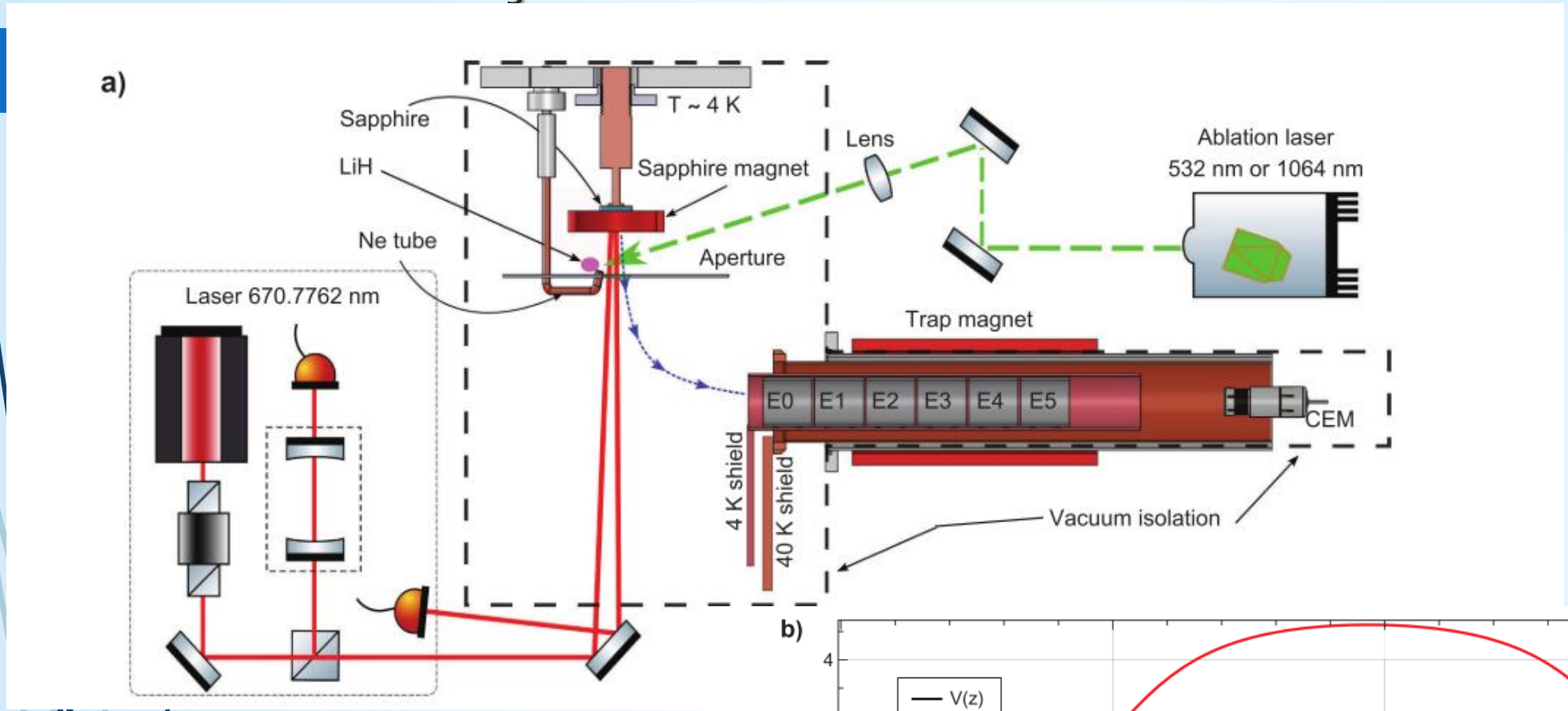
Check for updates

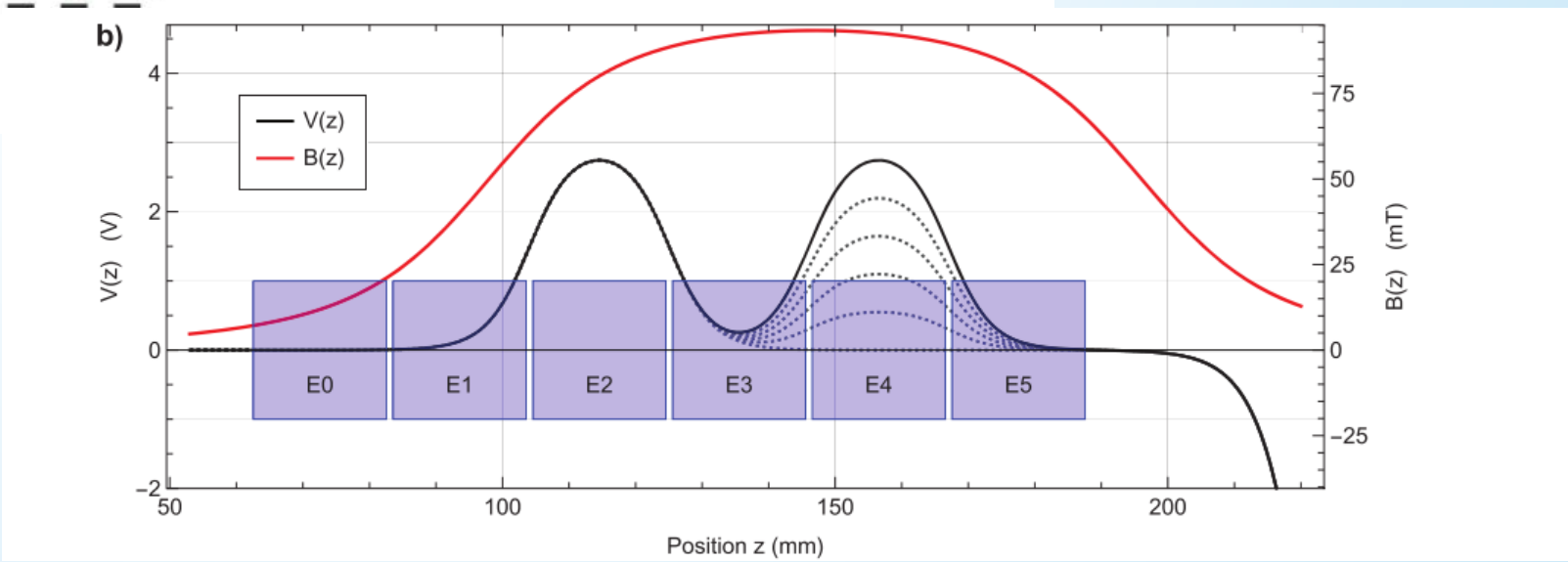
https://doi.org/10.1038/s42005-023-01228-7 OPEN

Adaptable platform for trapped cold electrons, hydrogen and lithium anions and cations

L. O. A. Azevedo[1✉], R. J. S. Costa[1], W. Wolff[1], A. N. Oliveira[2], R. L. Sacramento[1], D. M. Silveira[1] & C. L. Cesar[1✉]

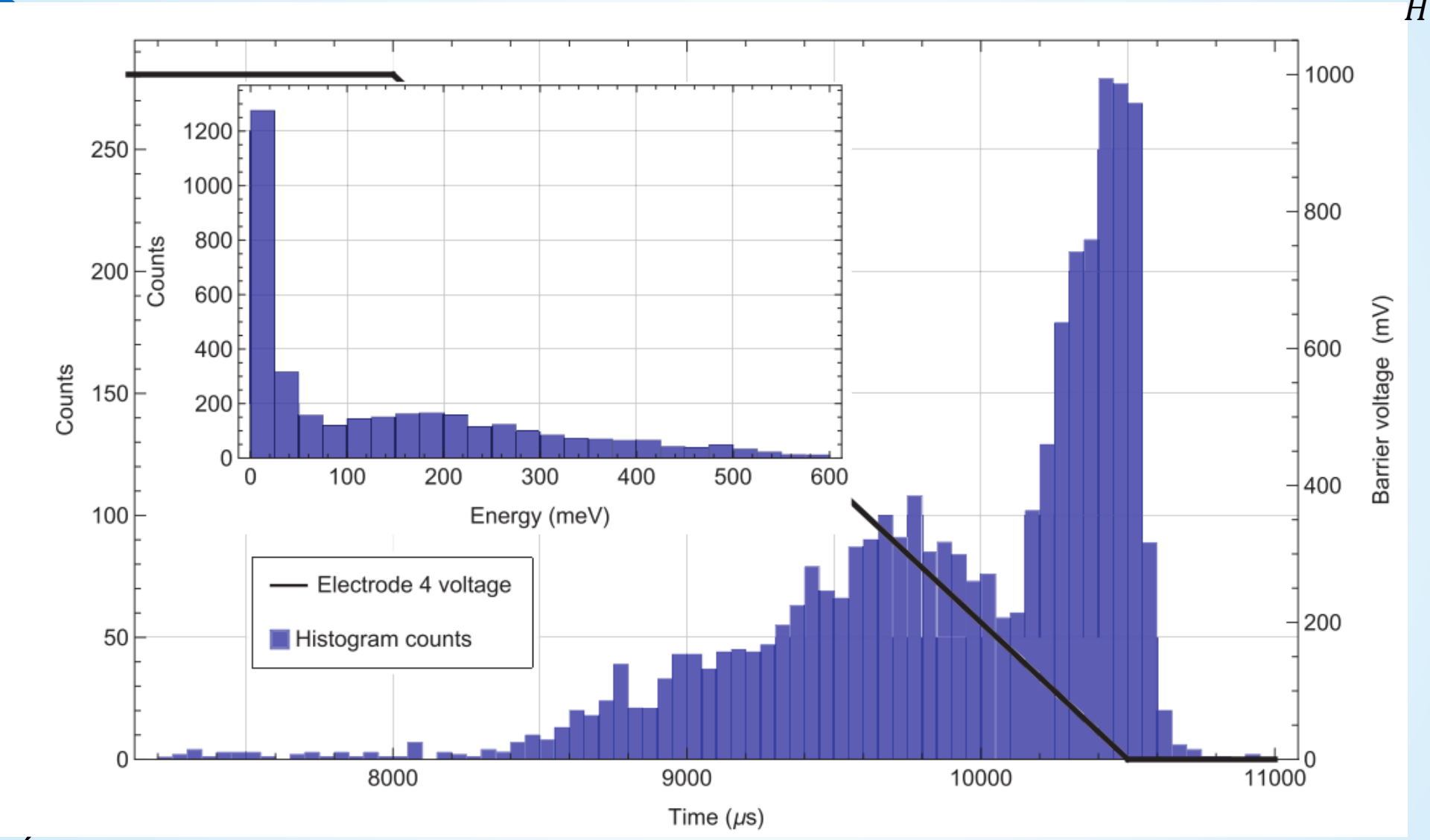
Sublimação da Matriz de Isolamento





Aprisionamento de íons e MISu

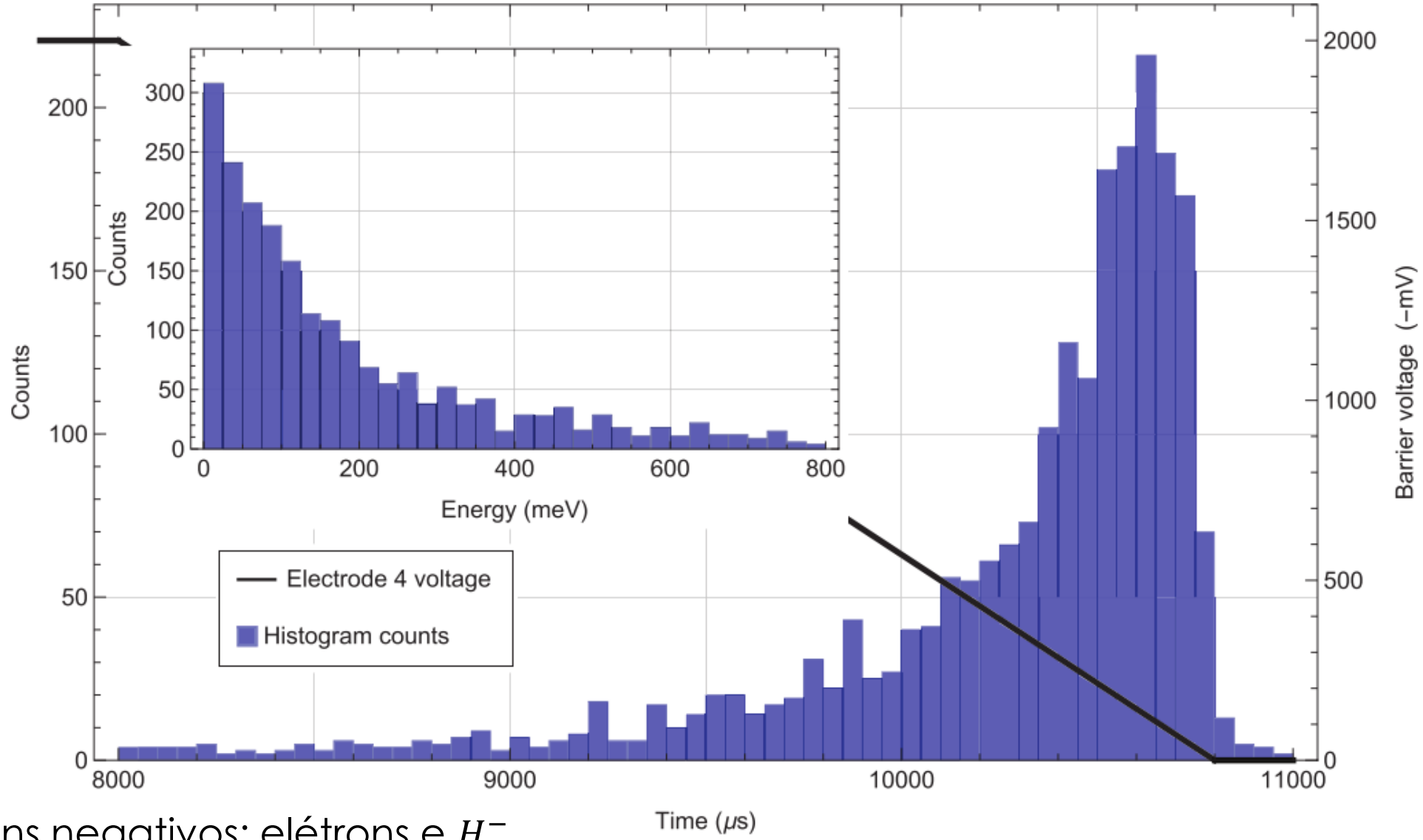
$aprisionamento\ de\ cations$
$H^{+}\ e\ Li^{+}$



Íons positivos de Li e H aprisionados. O gráfico mostra o acumulo de 5 rodadas experimentais.

Aprisionamento de íons e MISu

aprisionamento de ânions H^- e^-

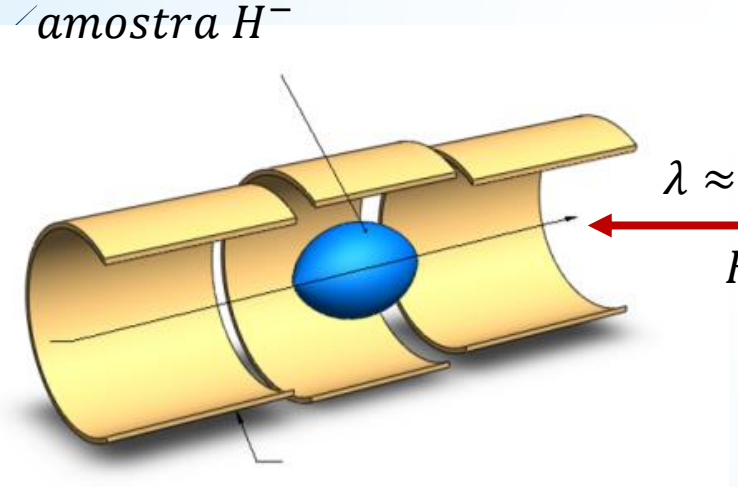


Íons negativos: elétrons e H^-

Perspectivas para 2024

- *Aumentar o tempo de meia vida dos íons na armadilha*
- *Aumentar a quantidade de íons aprisionados*
- *Demonstrar o "photodetachment" dos anions de H:*

Isso iria no deixar uma amostra bastante fria de de H neutros, que poderiam então vir a ser aprisionados por uma campo magnético (uma armadilha unicamente magnética)



- *Este sistema poderia ser incorporado ao aparato da colaboração ALPHA*

ALPHA 2024

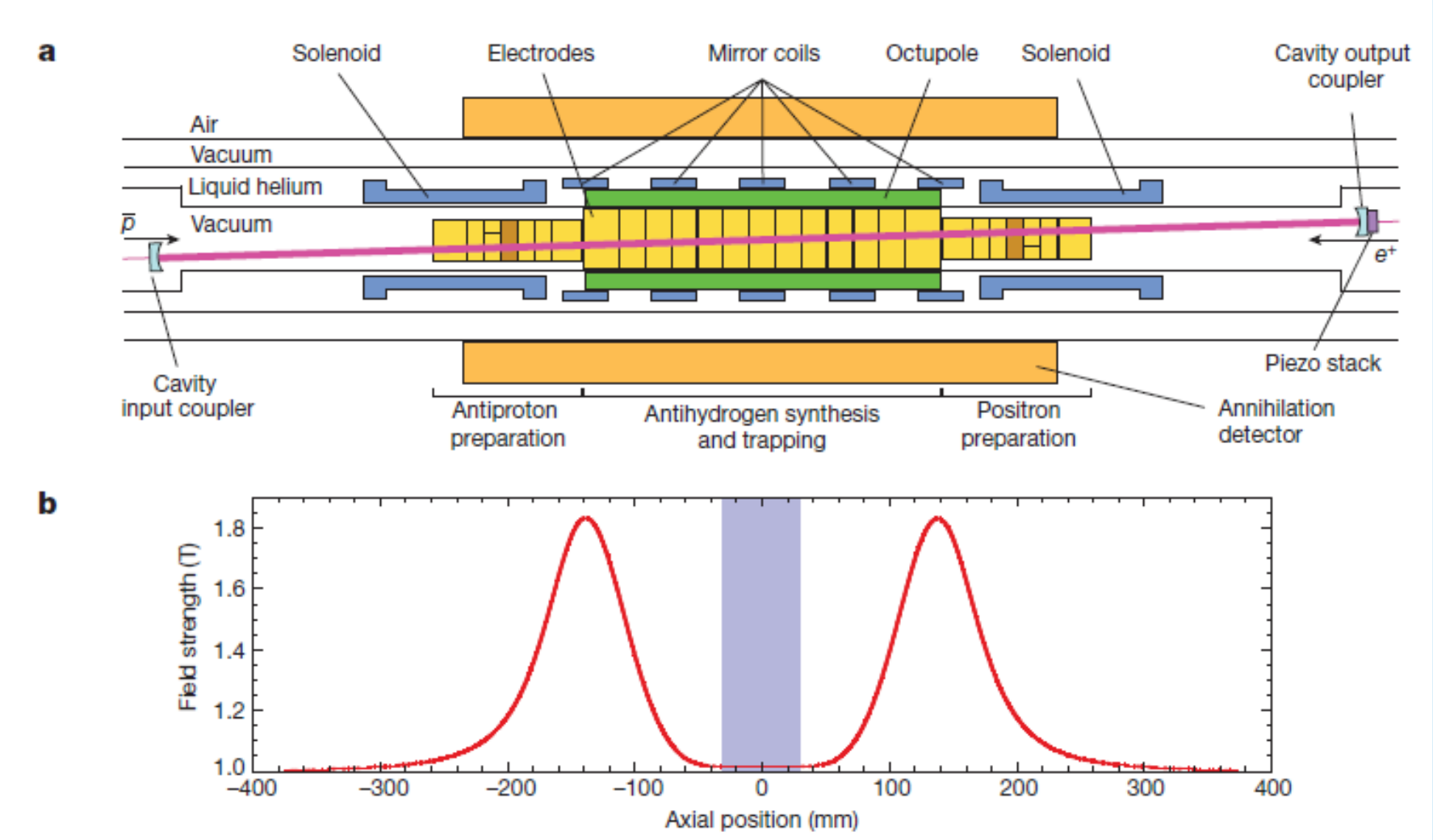
- *Análise dos dados/experimentos de 2023 – em andamento*

Interpretação dos dados de espectroscopia da transição 1S-2S -> Levi e Claudio

- *Levi vai apresentar um nova proposta de aprisionamento na Early Career Conference in Trapped Ions "Hybrid Penning-Linear-Paul trap for ion recapture in a near-zero bias magnetic trap for hydrogen/antihydrogen spectroscopy"*
- *Finalização da instalação da armadilha no ALPHAg (feito)*

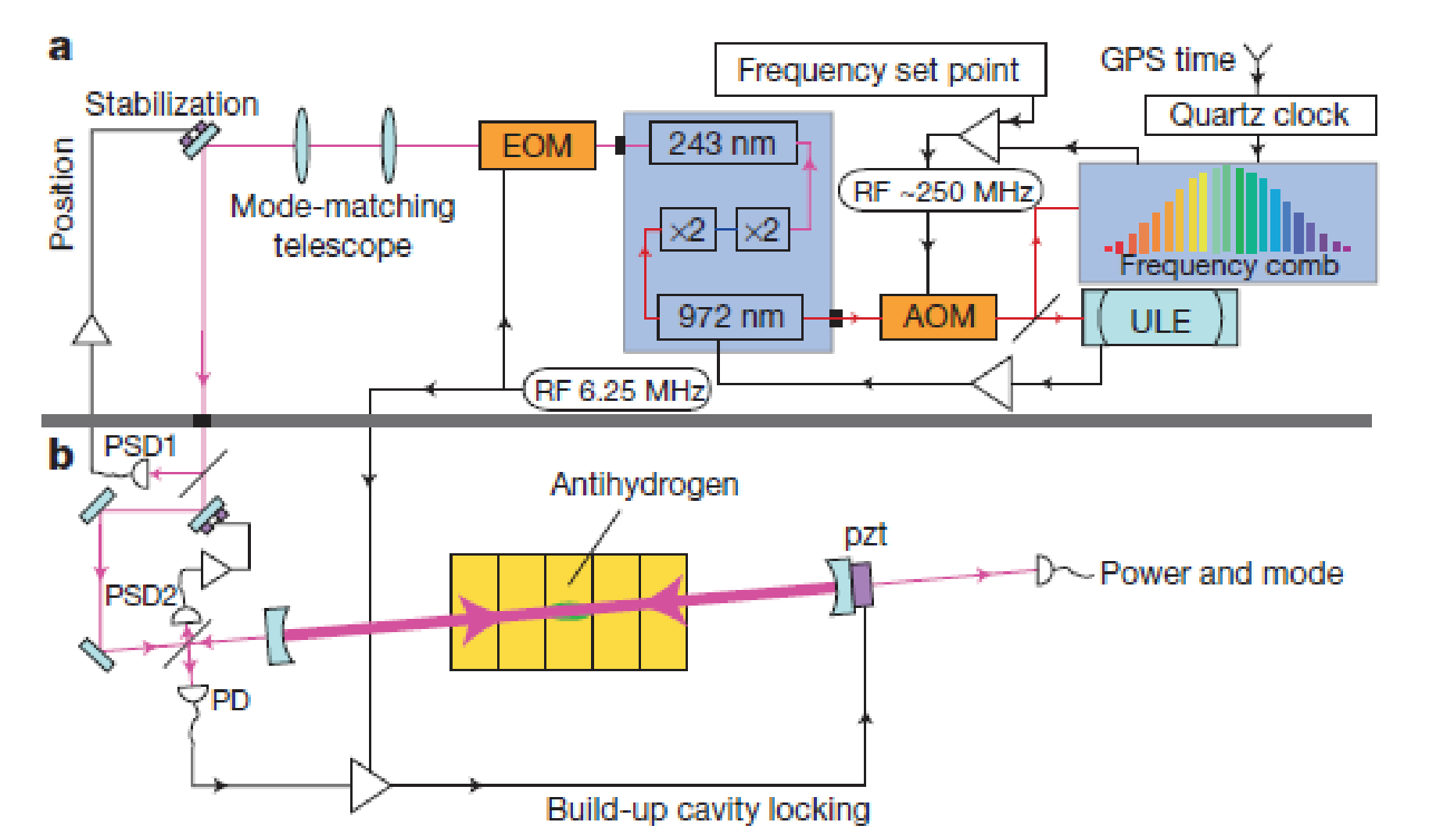
ALPHA 2024

- *Time Rio ainda tem a preparação para a instalação de novas suportes para os espelhos da cavidade ótica para a rodada de 2025.*



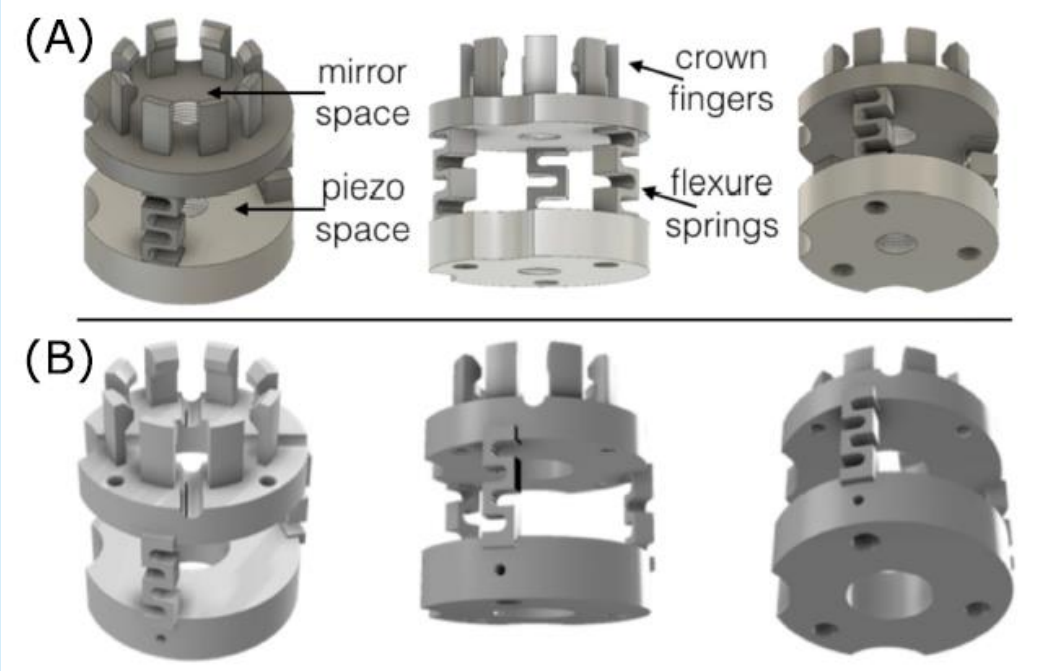
ALPHA 2024

- *Time Rio ainda tem a preparação para a instalação de novas suportes para os espelhos da cavidade ótica para a rodada de 2025.*



ALPHA 2024

- *Time Rio ainda tem a preparação para a instalação de novas suportes para os espelhos da cavidade ótica para a rodada de 2025.*



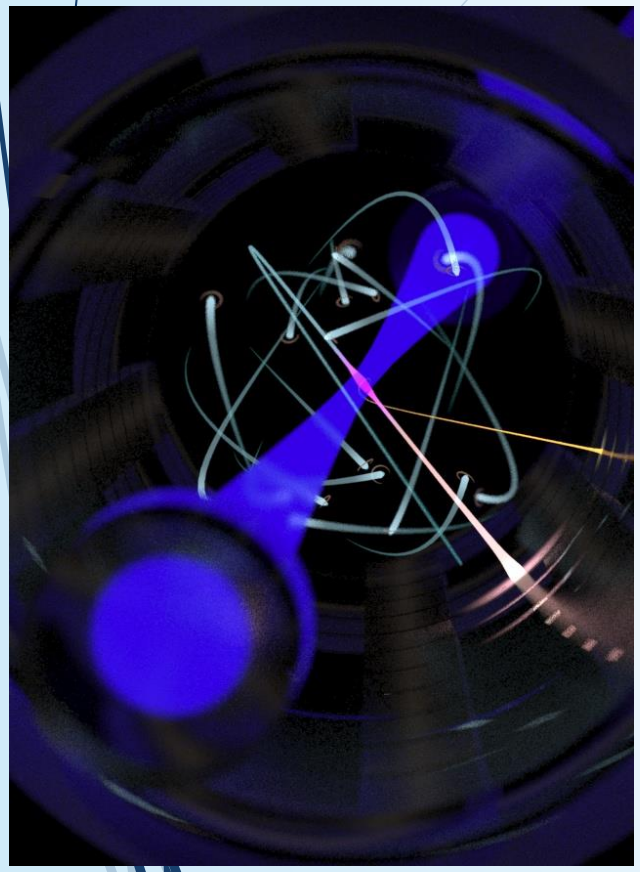
REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **88**, 063104 (2017)

Cryogenic mount for mirror and piezoelectric actuator for an optical cavity

A. N. Oliveira,[1,2] L. S. Moreira,[1] R. L. Sacramento,[1] L. Kosulic,[3] V. B. Brasil,[1] W. Wolff,[1] and C. L. Cesar[1]

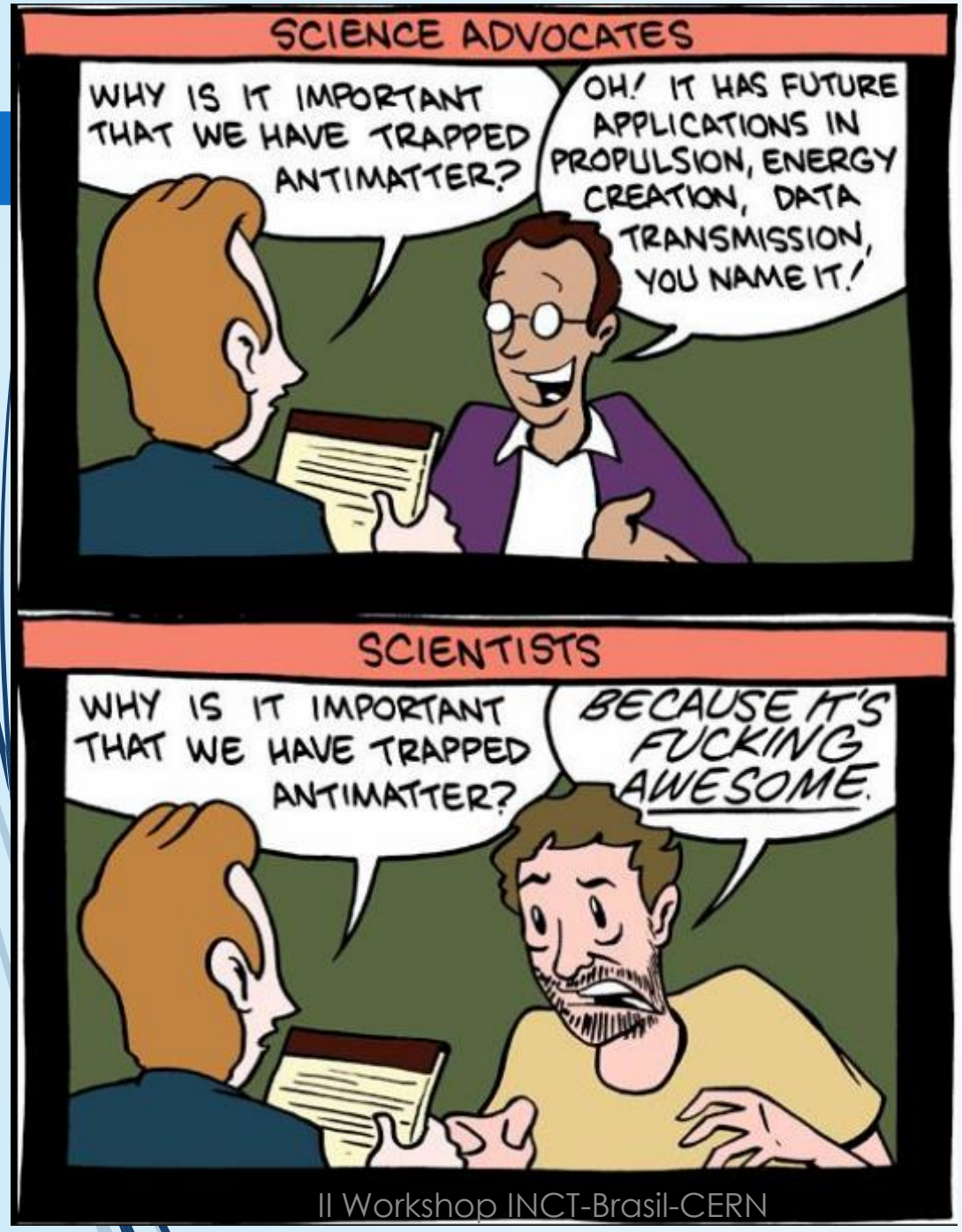
ALPHA 2024

- *Time Rio ainda tem a preparação para a instalação de novas suportes para os espelhos da cavidade ótica para a rodada de 2025.*



- *Peças projetadas finalizando a fabricação ~15 de julho*
- *Montagem e testes em 300K ~ até o final de agosto*
- *Testes em baixa temperatura (~4K) ~ setembro/outubro*
- *Pronto para enviar para o ALPHA em dezembro/24, janeiro de 25*

Novo LASER 2023/2024



Mais informações sobre o experimento ALPHA:
http://alpha.web.cern.ch/

Perdido na vida? Procurando uma Iniciação Cientifica? um mestrado, doutorado?
Entre em contato!

Prof. Rodrigo L. Sacramento
rlagesacramento@if.ufrj.br

Obrigado!

Alta precisão em hidrogênio...

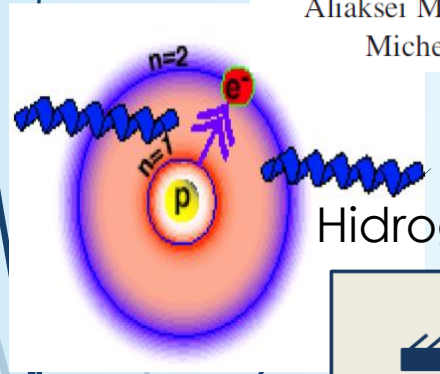
Uma história de precisão

PRL **107**, 203001 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 11 NOVEMBER 2011

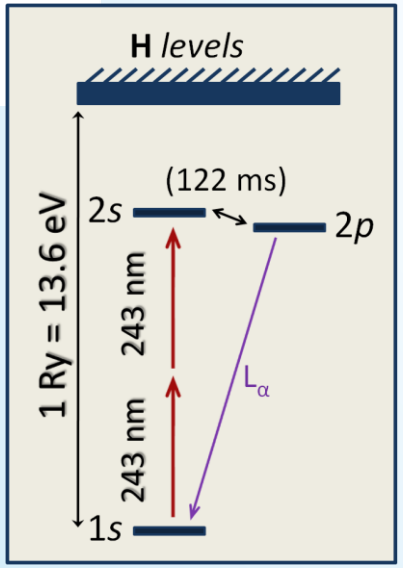
Improved Measurement of the Hydrogen 1*S*–2*S* Transition Frequency

Christian G. Parthey,[1] Arthur Matveev,[1] Janis Alnis,[1] Birgitta Bernhardt,[1] Axel Beyer,[1] Ronald Holzwarth,[1,*] Aliaksei Maistrou,[1] Randolf Pohl,[1] Katharina Predehl,[1] Thomas Udem,[1] Tobias Wilken,[1] Nikolai Kolachevsky,[1,†] Michel Abgrall,[2] Daniele Rovera,[2] Christophe Salomon,[3] Philippe Laurent,[2] and Theodor W. Hänsch[1,‡]

$$f_{1S-2S} = 2\,466\,061\,413\,187\,035\,(10)\ \text{Hz}$$



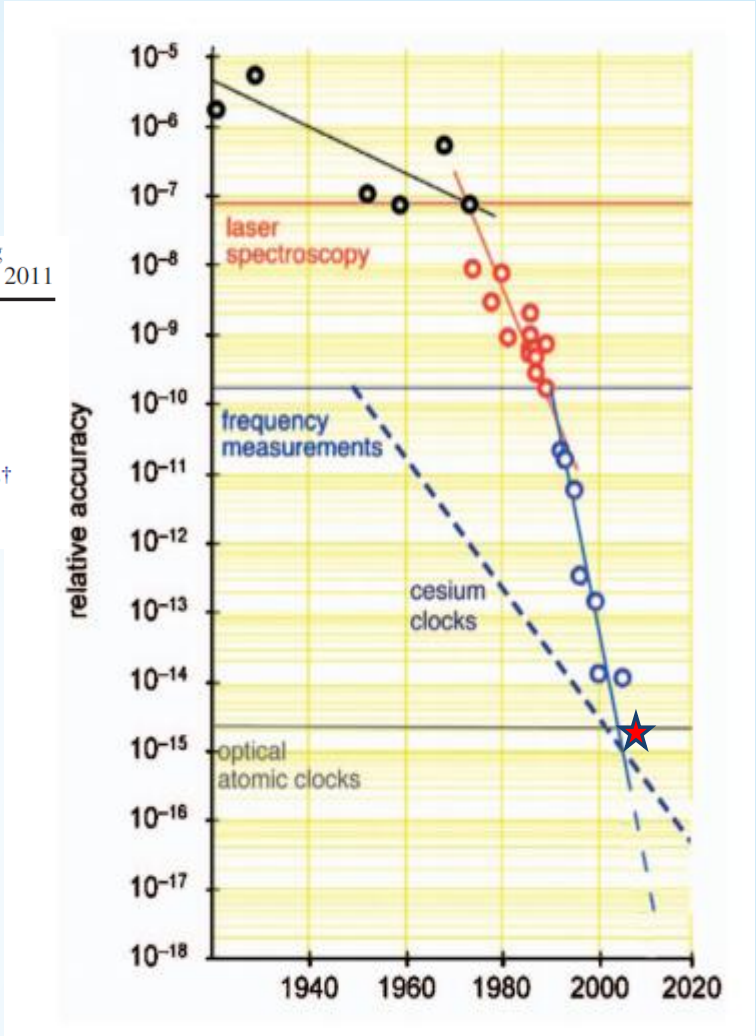
Hidrogênio (H)



$$Incerteza \sim 4{,}2 \times 10^{-15}$$

Medidas com esse nível de precisão podem levar a novas ideias:

- Variação das constantes fundamentais?
- Discussão sobre o tamanho do próton ("proton puzzle")?

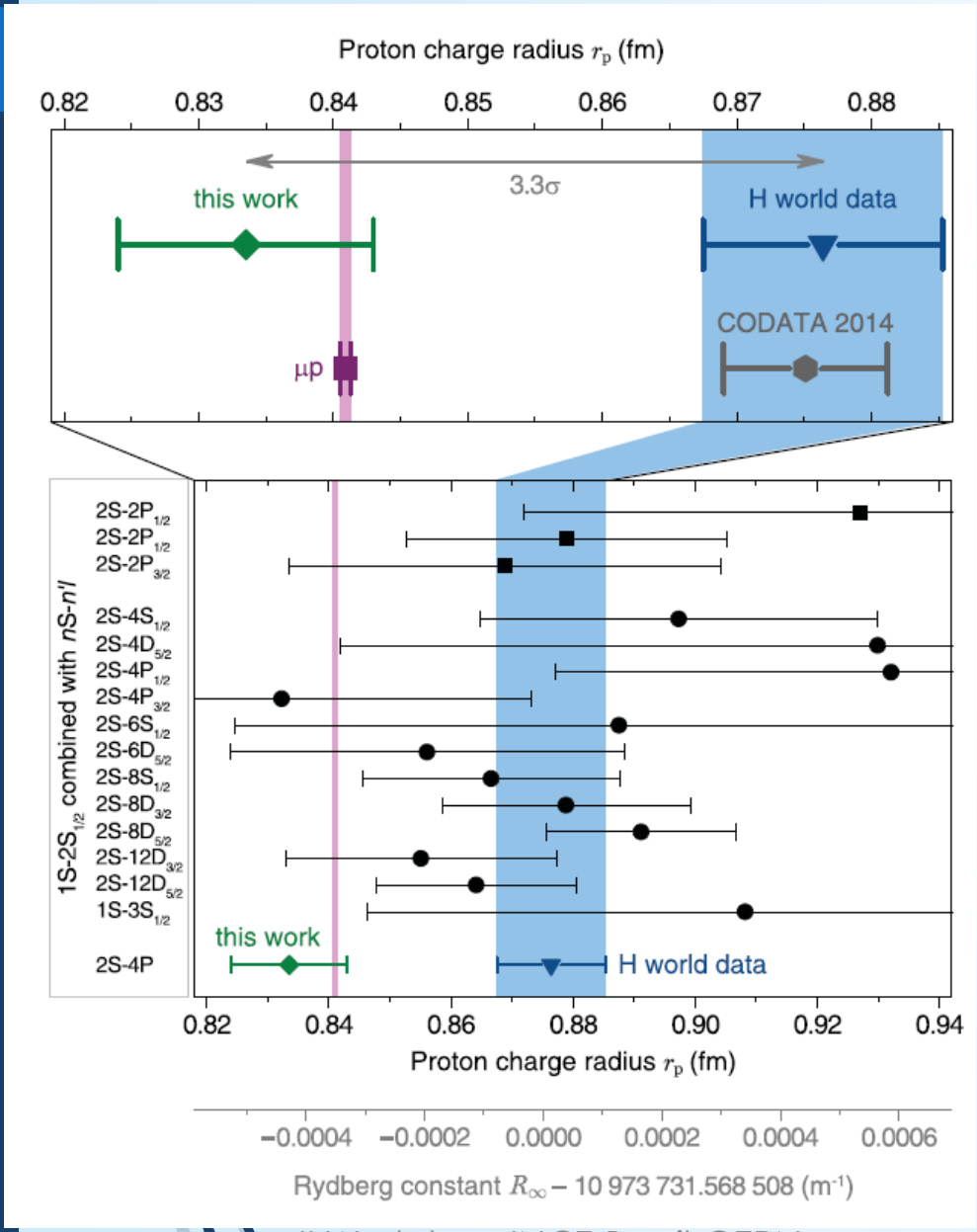


Theodor W. Hänsch: "Nobel lecture: passion for precision" - Rev. Mod. Phys., Vol. 78, No. 4, October–December 2006

Alta precisão em hidrogênio...

R_∞ = 10973731.568076(96) m^{-1}

r_p = 0.8335(95) fm



ATOMIC PHYSICS

Beyer et al., *Science* 358, 79–85 (2017) 6 October 2017

The Rydberg constant and proton size from atomic hydrogen

Axel Beyer,[1] Lothar Maisenbacher,[1*] Arthur Matveev,[1] Randolf Pohl,[1†] Ksenia Khabarova,[2,3] Alexey Grinin,[1] Tobias Lamour,[1] Dylan C. Yost,[1‡] Theodor W. Hänsch,[1,4] Nikolai Kolachevsky,[2,3] Thomas Udem[1,4]

Podemos escrever os níveis energéticos do átomo de H:

$$E_{nlj} = R_\infty \left(-\frac{1}{n^2} + f_{nlj}\left(\alpha, \frac{m_e}{m_p}, \cdots\right) + \delta_{l0}\frac{C_{NS}}{n^3} r_p^2 \right)$$

$$R_\infty = \frac{m_e \alpha^2 c}{2h} \rightarrow constante\ de\ Rydberg$$

$$f_{nlj}\left(\alpha, \frac{m_e}{m_p}, \cdots\right) = X_{20}\alpha^2 + X_{30}\alpha^3 + X_{31}\alpha^3 \ln(\alpha) + X_{40}\alpha^4 + \cdots$$

$\rightarrow$ *correção relativísticas, QED.*

$$\delta_{l0}\frac{C_{NS}}{n^3} \rightarrow correção\ para\ o\ tamanho\ finito\ do\ próton$$