Antihydrogen Laser Physics Apparatus

Aarhus University, Denmark

University of Brescia, Italy

University of British Columbia, Canada

University of California Berkeley, USA

University of Calgary, Canada

University of Groningen, Holland

Pisa and Pavia Italy

University of Manchester, UK

NRCN - Nuclear Res. Center Negev, Israel

Purdue University, USA

Federal University of Rio de Janeiro, Brazil

Stockholm University, Sweden

Simon Fraser University, Canada `

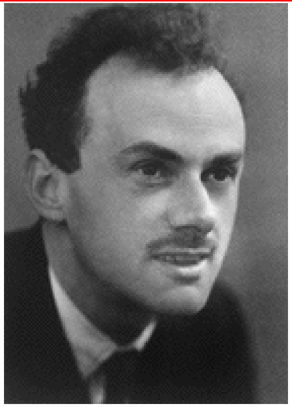
TRIUMF, Canada

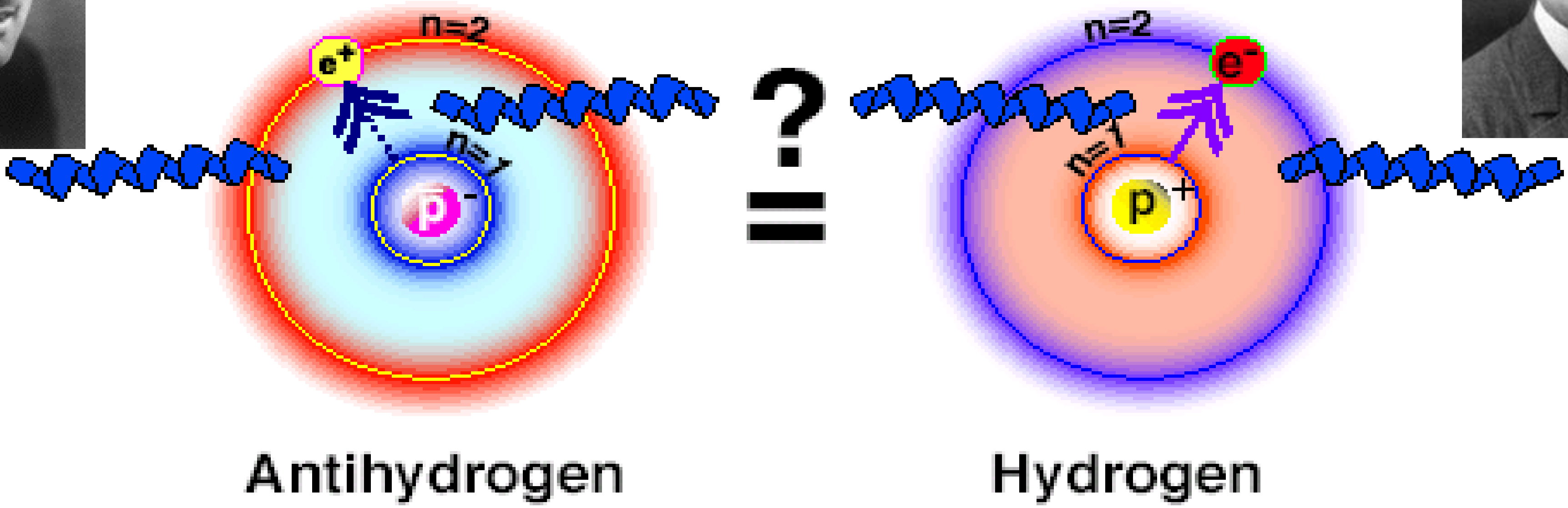
University of Wales Swansea, UK

Cockcroft Institute, UK

York University, Canada

The Physics Question





How could you possibly work in Denmark and *not* want to know the answer to this?

Motivations in Brief

- Tests of fundamental symmetries by applying ***precision*** atomic physics techniques to anti-atoms:
    - CPT violation?
    - Lorentz invariance violation?

        Physics beyond the Standard Model?

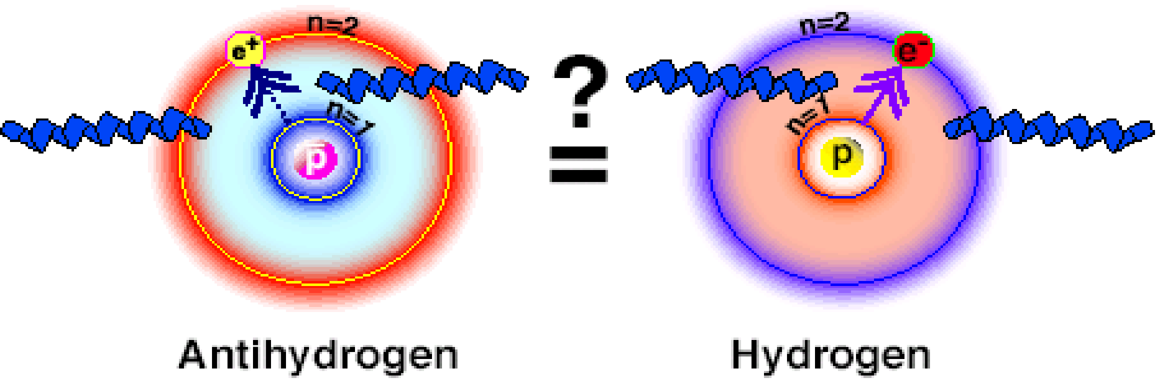
The initial physics goal of ALPHA was to TRAP antihydrogen atoms, so that they can be studied in detail.

- (Anti)-Gravity – three approved experiments at CERN; AEGIS Gbar, ALPHA-g – first measurement published in 2023

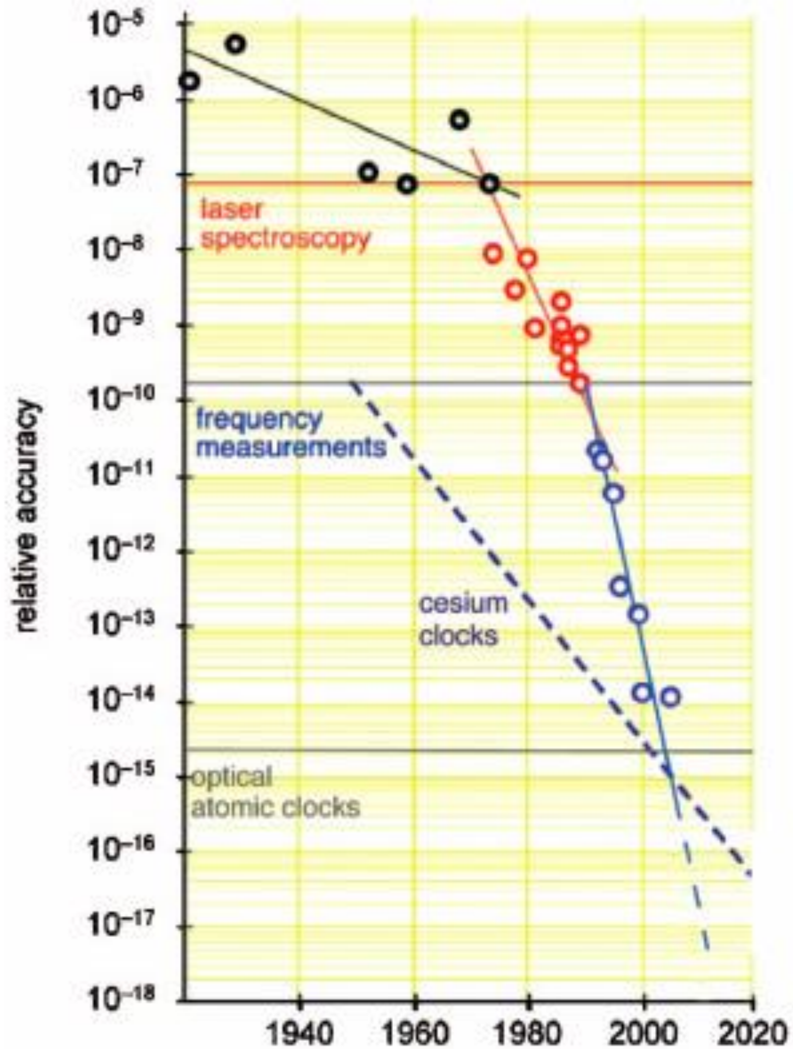
- … of course this is all partially motivated by the apparent baryon asymmetry in the universe

The dream - Antihydrogen Spectroscopy

1s-2s two-photon spectroscopy

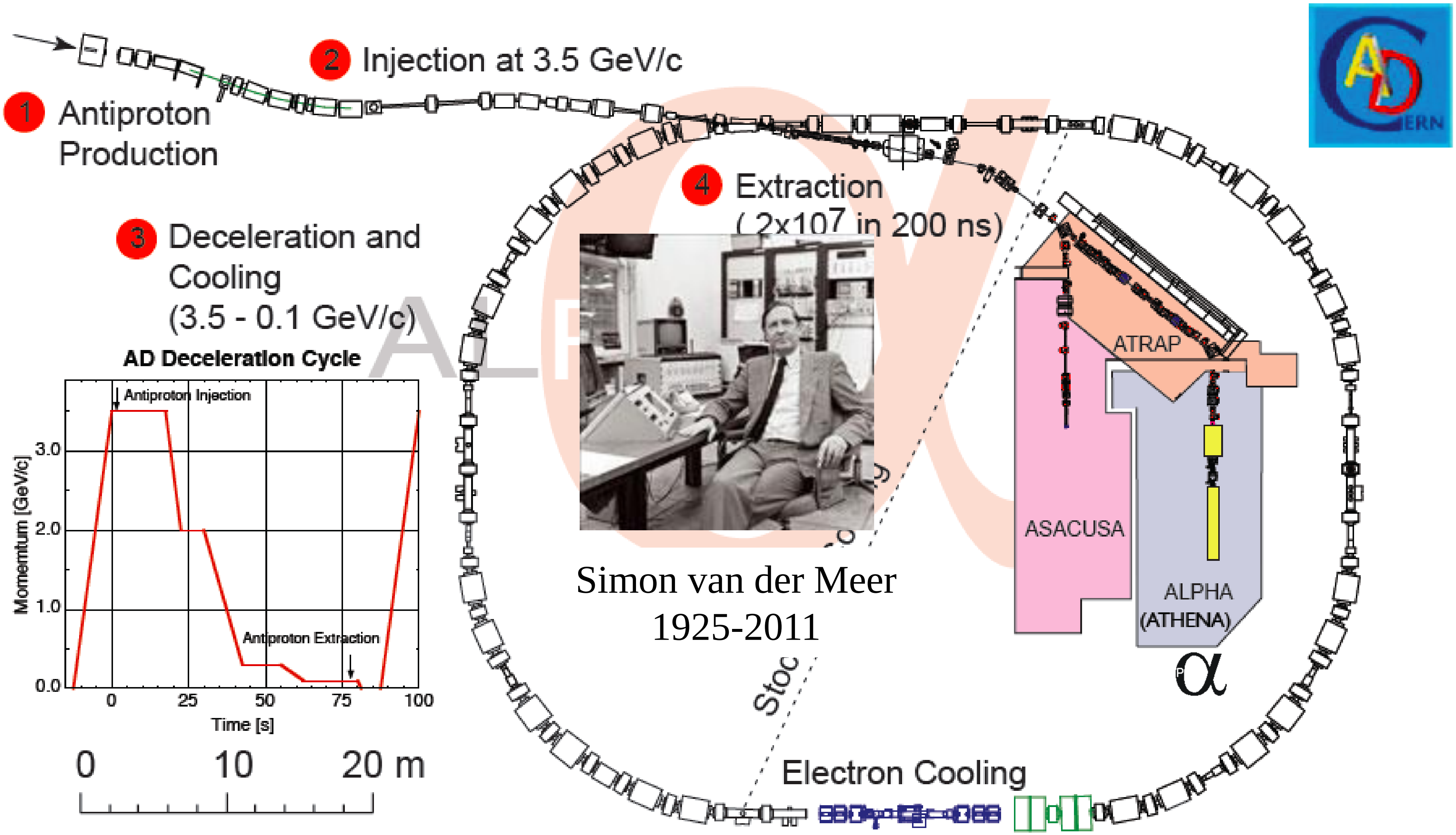


- **Doppler effect cancels**
- **High precision in matter sector**
- **test of CPT theorem**



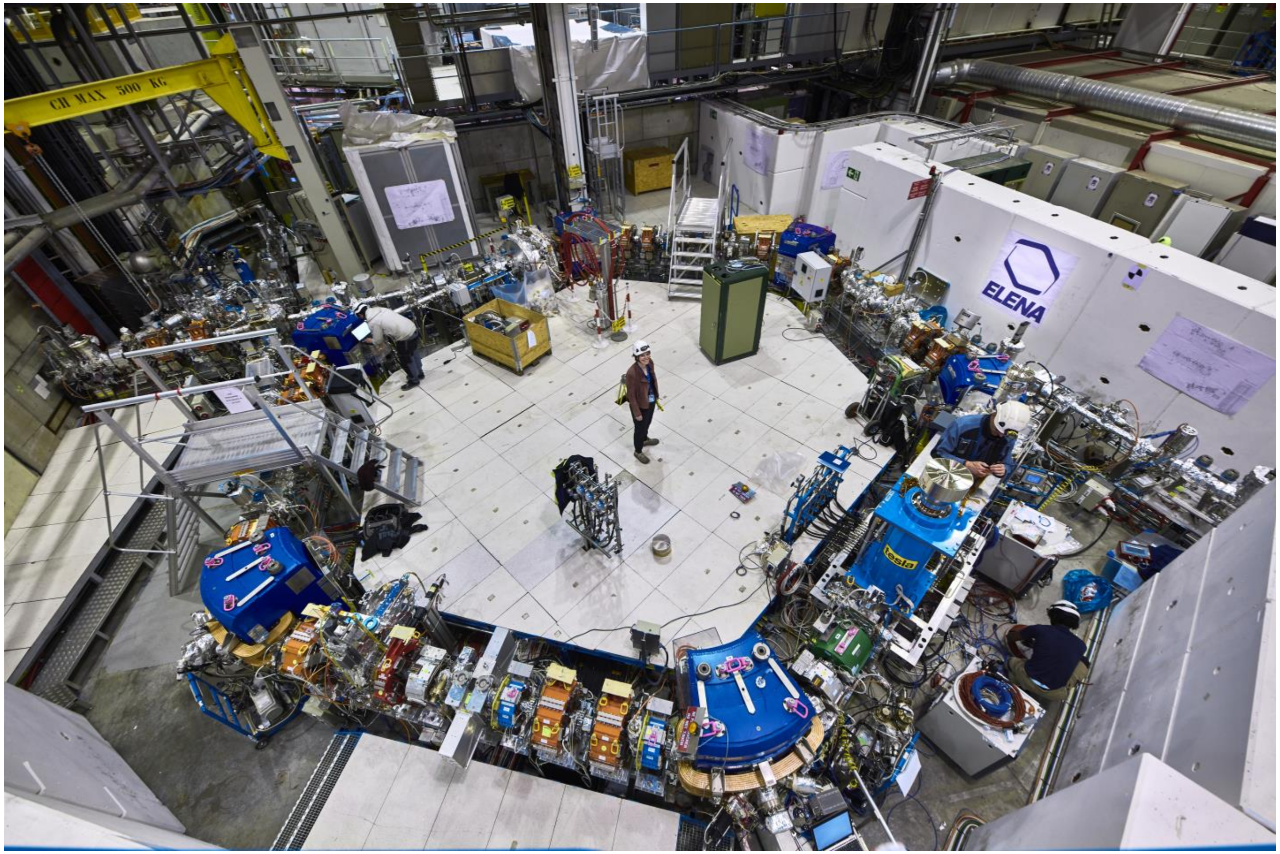
f(1S-2S) = 2 466 061 413 187 035 (10) Hz - Hänsch group (2011)

The CERN AD



1 Antiproton Production
2 Injection at 3.5 GeV/c
3 Deceleration and Cooling (3.5 - 0.1 GeV/c)
4 Extraction (2x10^7 in 200 ns)
AD Deceleration Cycle
Antiproton Injection
Antiproton Extraction
Momentum [GeV/c]
Time [s]
0 10 20 m
Stoc
Electron Cooling
ATRAP
ASACUSA
ALPHA (ATHENA)
Simon van der Meer
1925-2011

ELENA Ring



Reduce pbar energy from
5 MeV to 100 keV

Up to10 times more pbars captured

Electrostatic switching allows
delivery to multiple experiments;
24 hour operation

Sent first pbars to Gbar in 2018

Operation for other experiments
in August 2021

Worked on the very first shot
to ALPHA in 2021!

Total paradigm shift: 24 hour pbars!

Capture and Cooling of Antiprotons

Penning Trap (charged particles)

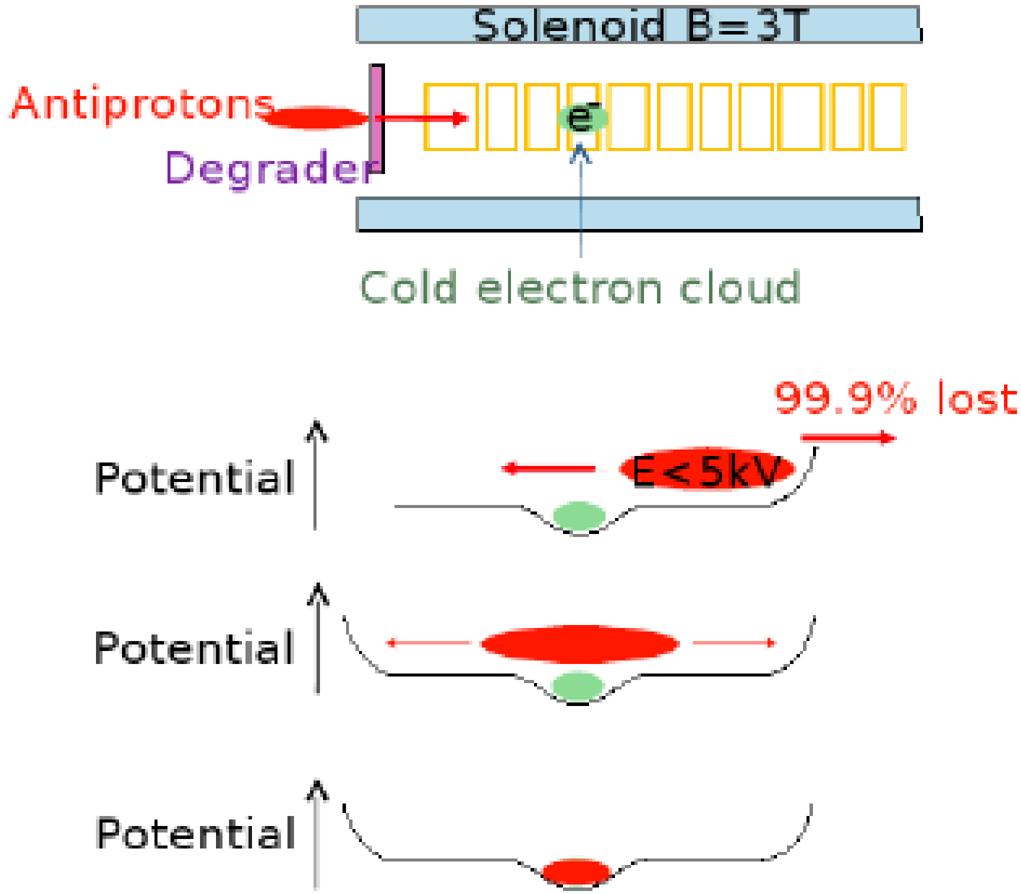
1) Degrading
(t = 0s)

5 MeV – AD
100 keV - ELENA

2) Reflecting
(t = 200ns)

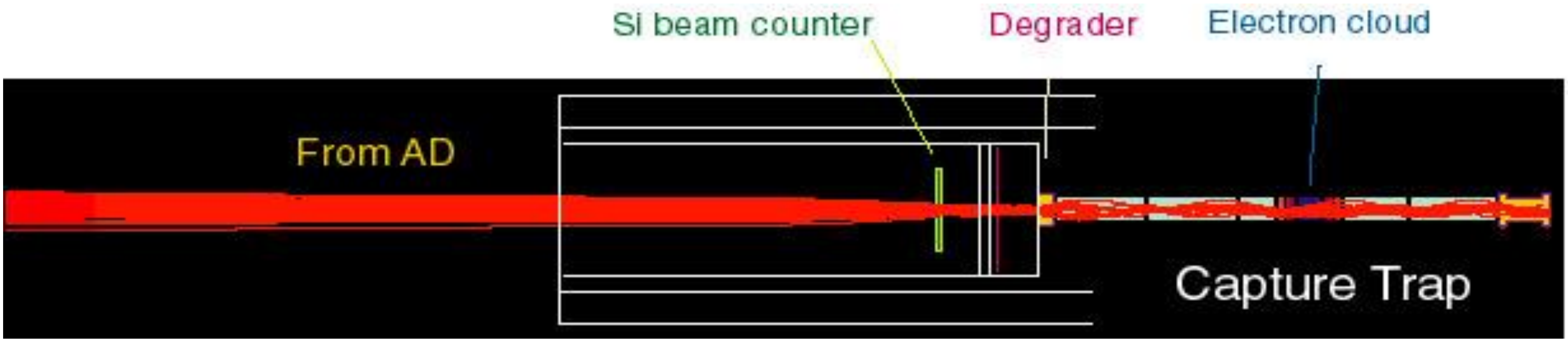
3) Trapping
(t = 500ns)

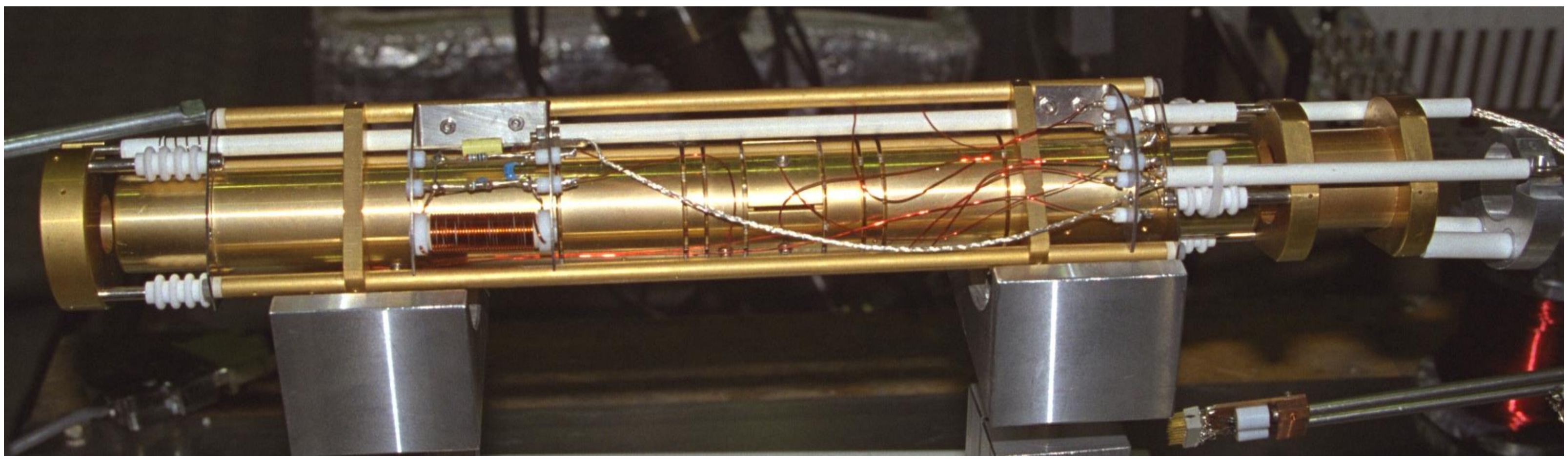
4) Cooling
(t = ~20s)



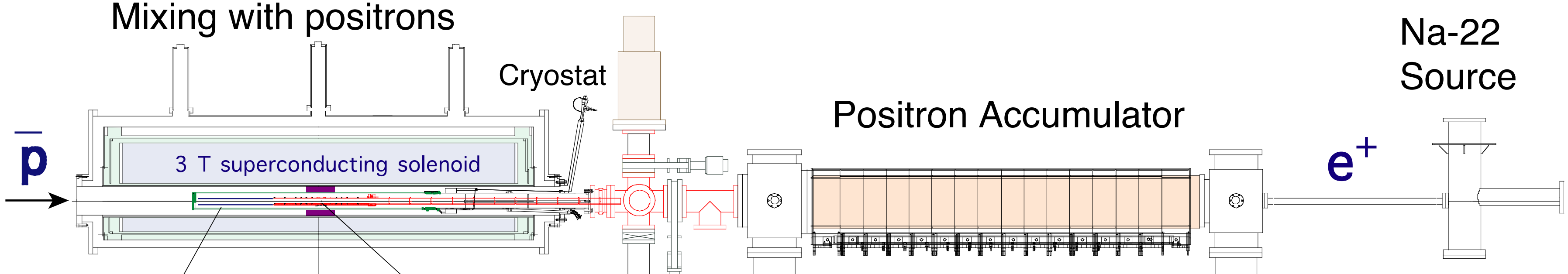
Technique developed by the *TRAP* collaboration at LEAR

Antiproton Slowing and Catching

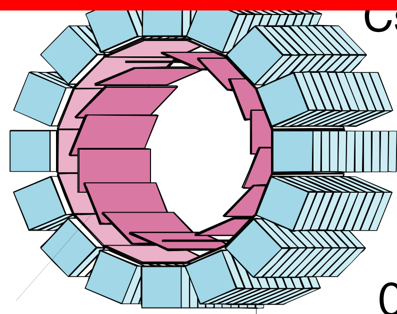


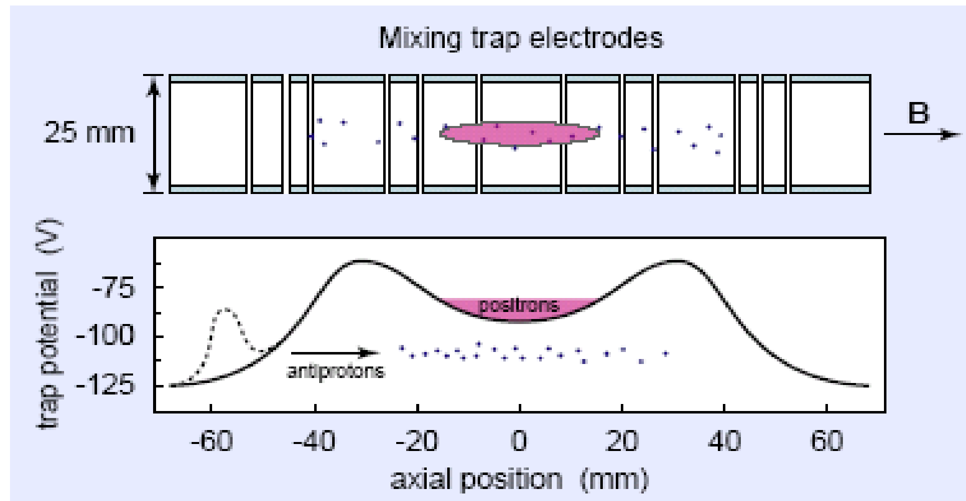


How do you make a lot of antihydrogen? - ATHENA 2002

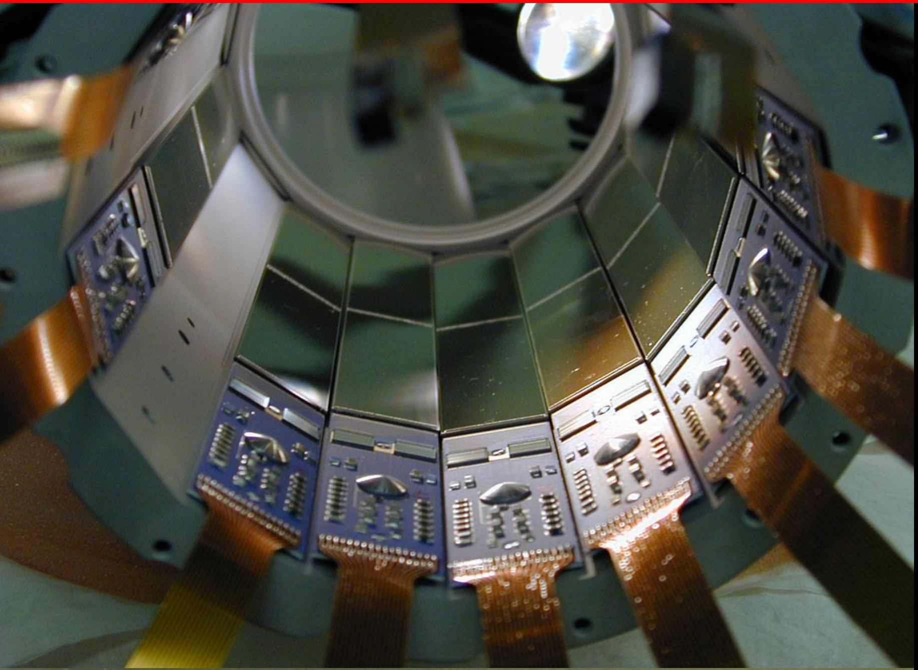


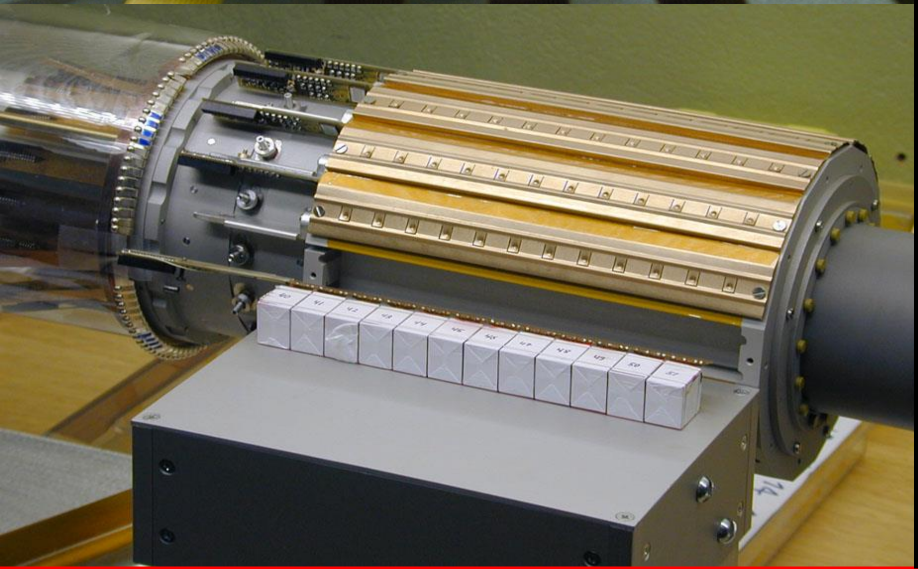
BTW: this is the experiment that inspired Dan Brown's: *Angels and Demons*

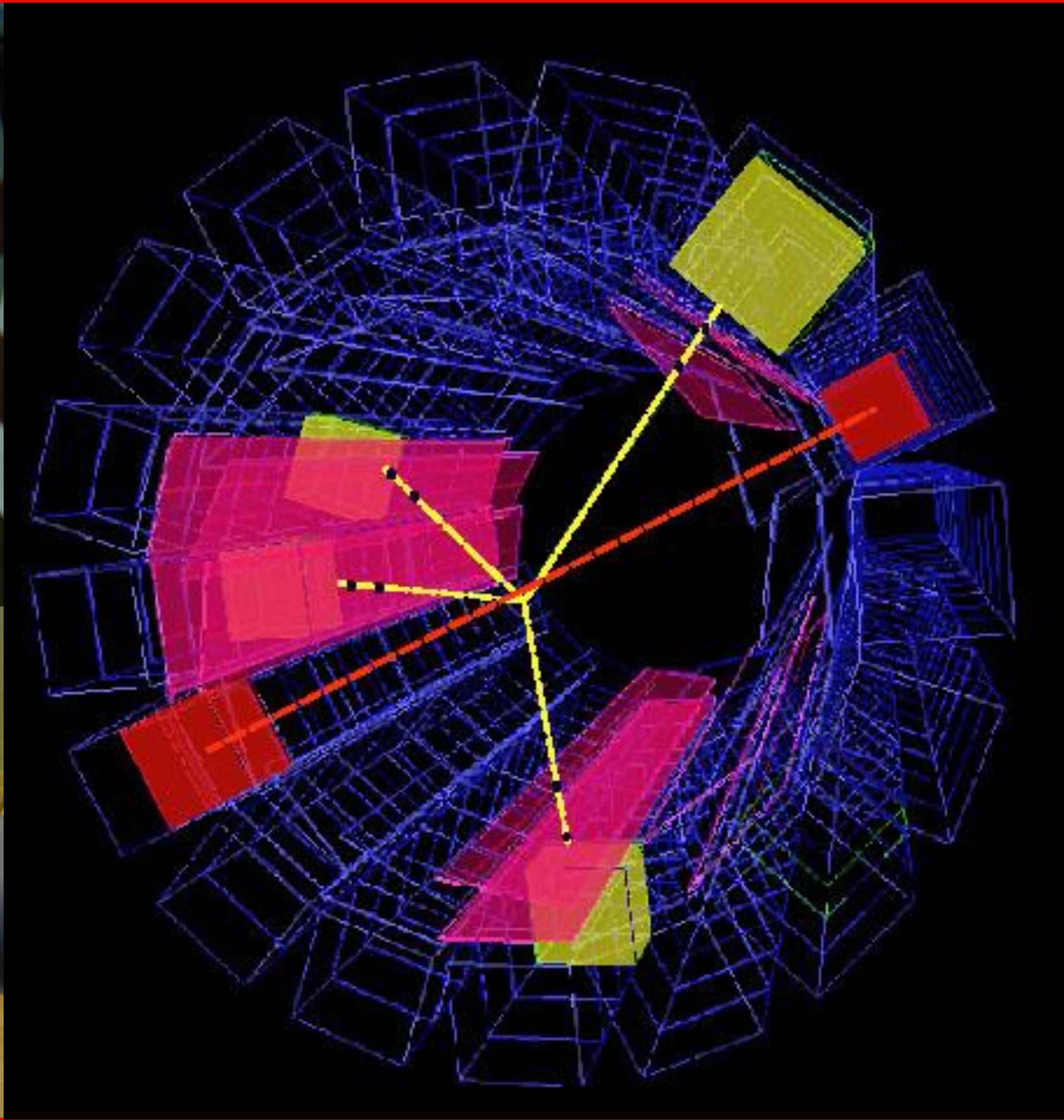




ATHENA Detector

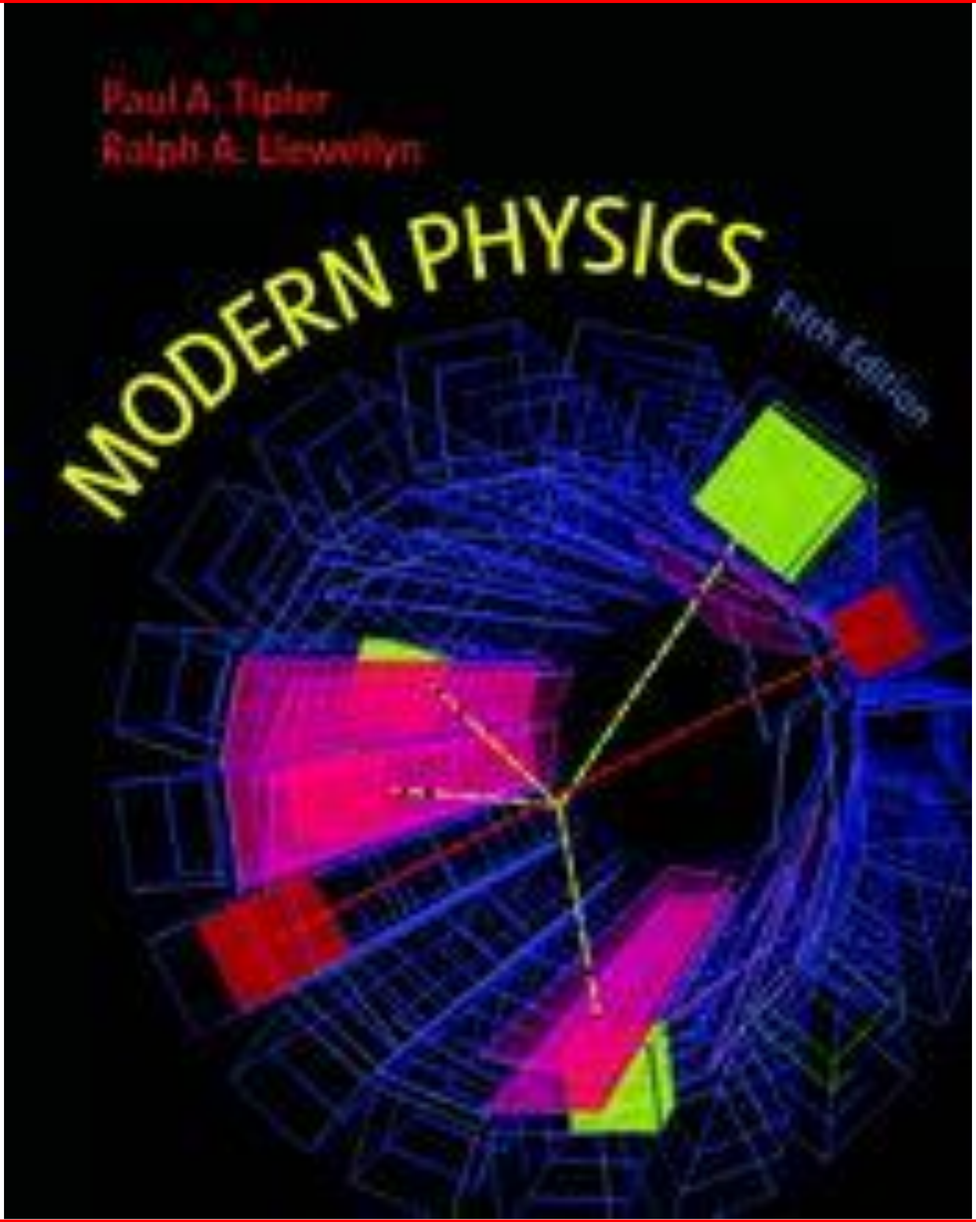


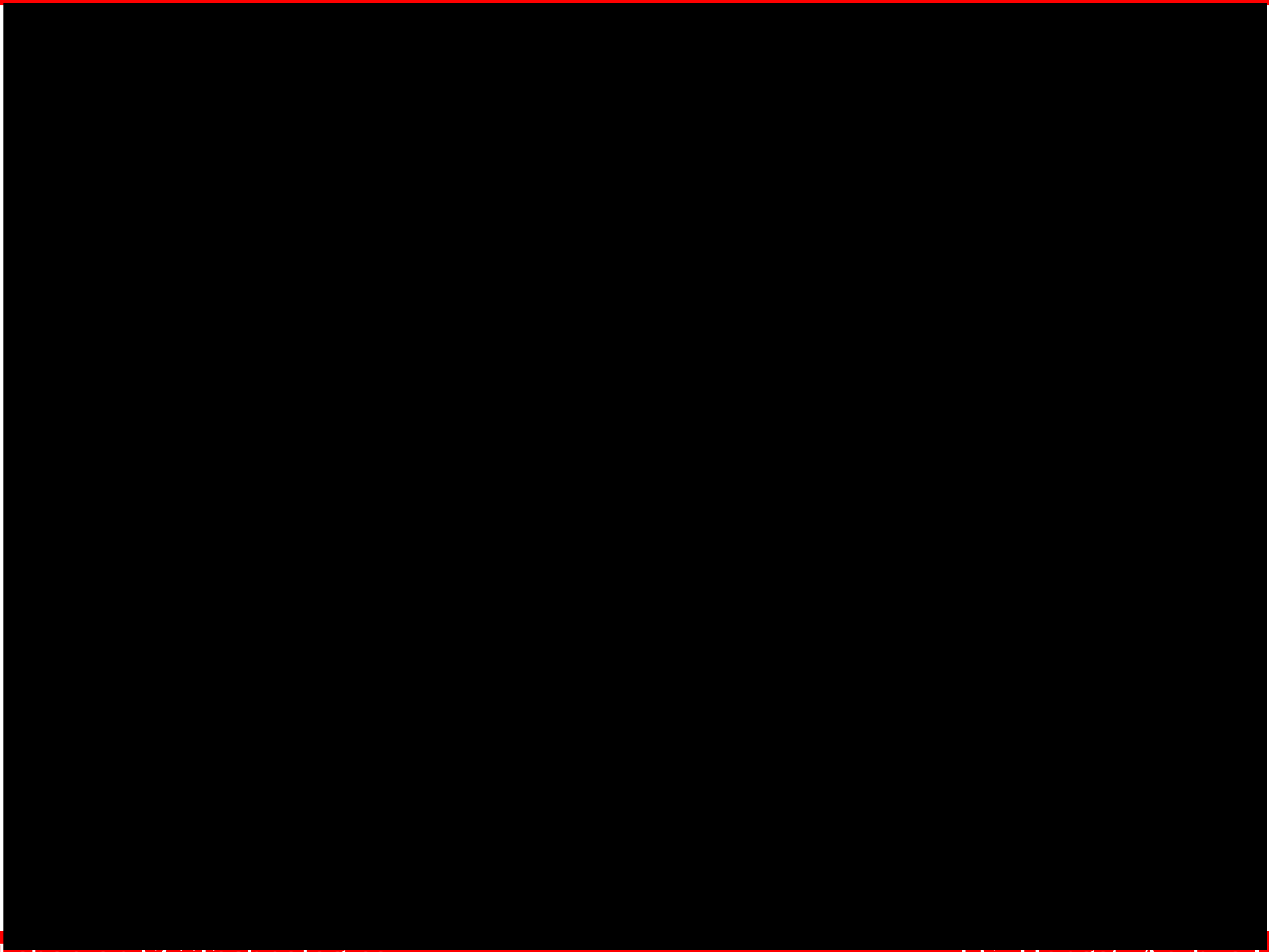




ALPHA

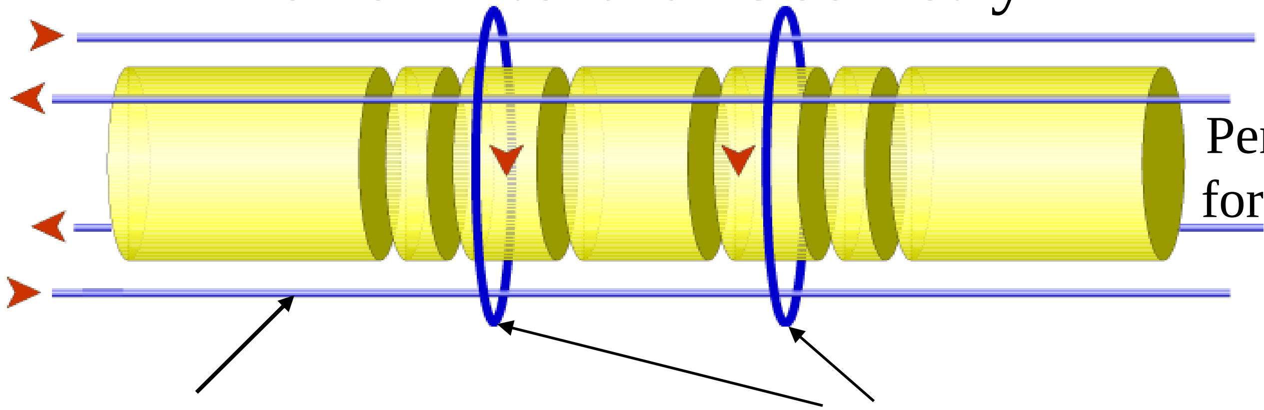
ATHENA 2002


Paul A. Tipler
Ralph A. Llewellyn
MODERN PHYSICS
Fifth Edition



Trapping Neutral Anti-atoms?

‘Ioffe-Pritchard’ Geometry



$$U = -\overline{\mu} \cdot \overline{\mathbf{B}}$$

Atoms are polarised at these fields, so this is a scalar potential proportional to |**B**|

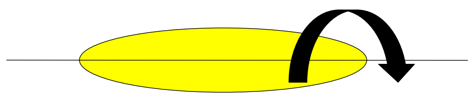
Well depth for ground state hydrogen ~ 0.7 K/T

Need to produce the atoms so they are *born trapped*

Broken rotational symmetry: Can we superpose this on a Penning trap?

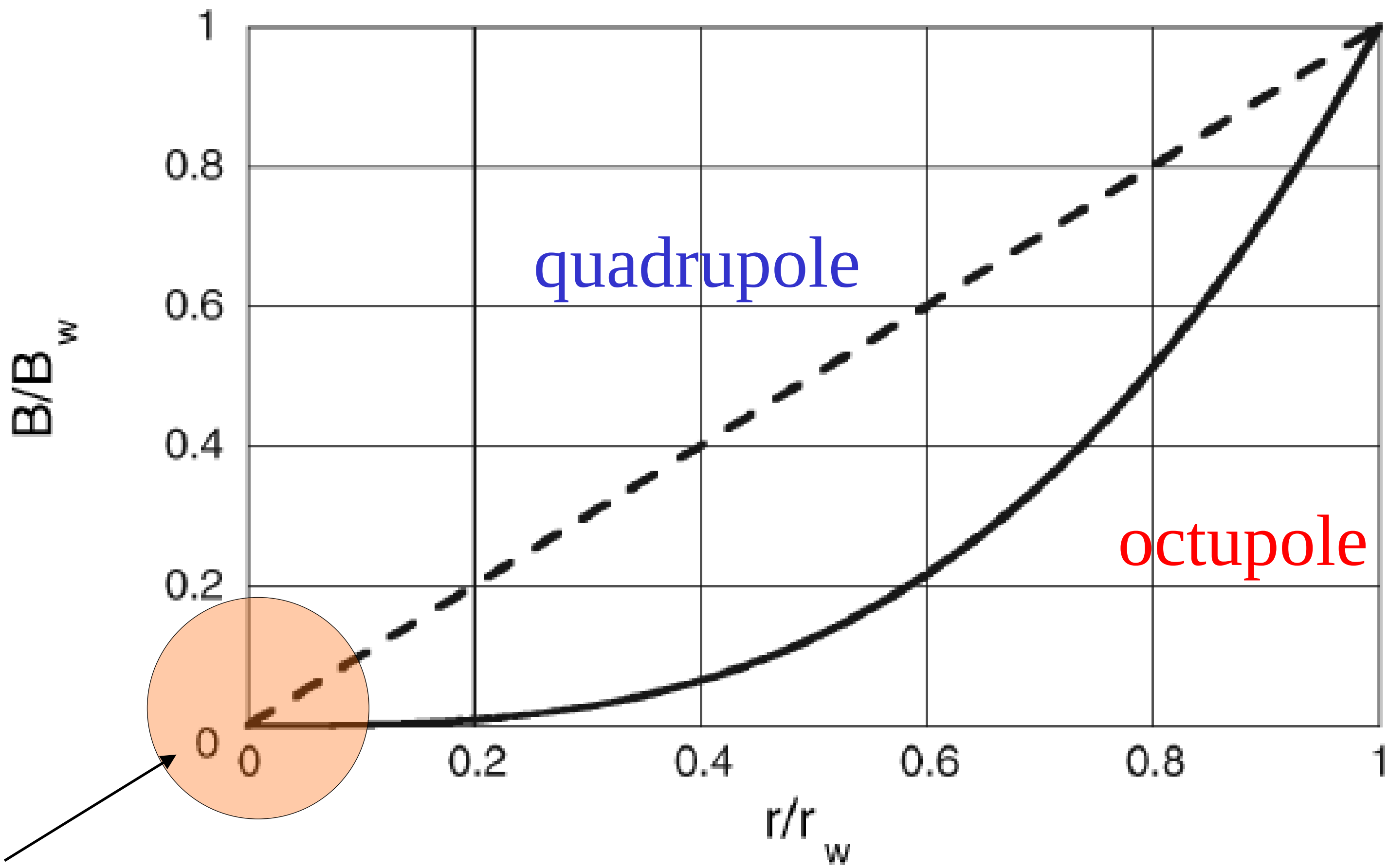
Why is this difficult?

- Keep in mind: 1eV of kinetic energy is about *12000 K*
- The antiprotons are captured at 5 keV (60MK)
- Typical spacecharge energies of plasmas are a few eV at zero temperature
- A trap for neutral antihydrogen can be about *0.5 K deep*
- Need large B-fields for catching pbars, cooling, etc. – but need a large delta-B for trapping



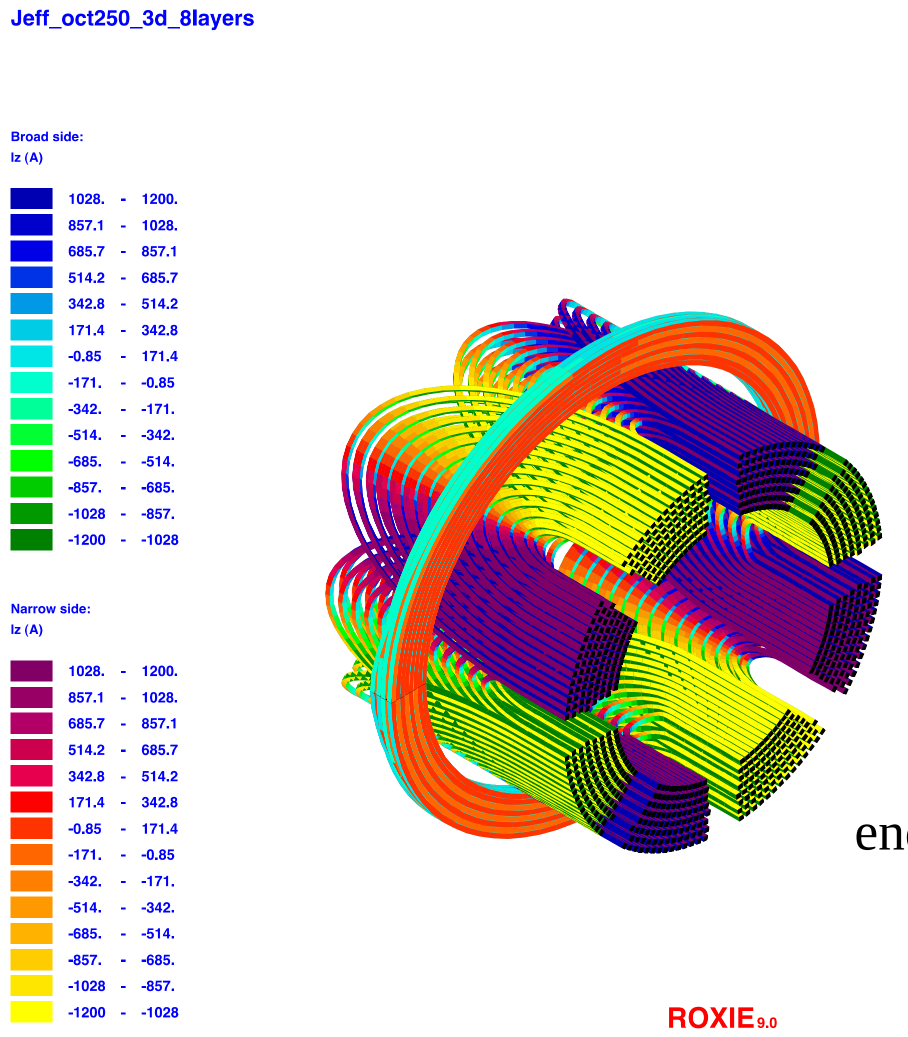
One-component plasmas in equilibrium rotate at a constant angular frequency. The velocities associated with this rotation are of just as much concern as thermal velocities, as far as trapping is concerned. **Not obvious that high positron number and density are desirable - sometimes less is more.**

Broken symmetry: use a higher-order multipole



keep your plasmas at small radius

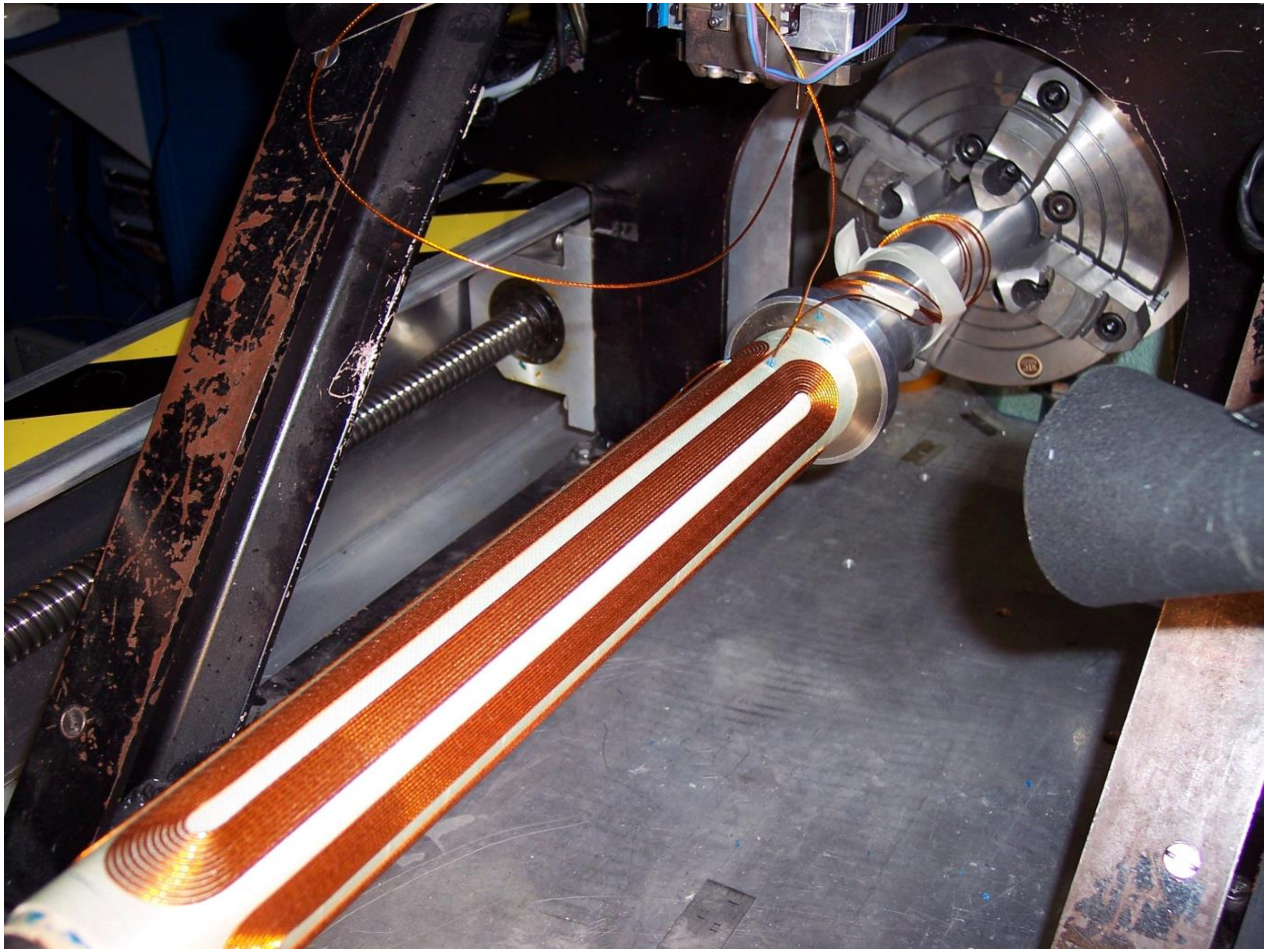
Field calculations with Roxie



ALPHA was really made possible due to help from Stephan Russenschuck!

Note the cancellation of the solenoidal end field due to staggered windings – B. Parker (BNL)

BNL Direct-Wind Technology



- Magnets wound directly on vacuum chamber (1.25 mm wall)
- No metals in support structure: epoxy/fiber
- Cu:SC ratio 0.9:1
- Can wind solenoids on top of finished multipoles

J. Escalier
B. Parker
A. Marone
M. Anerella
M. Harrison
P. Wanderer
A. Ghosh

NbTi cable from Supercon

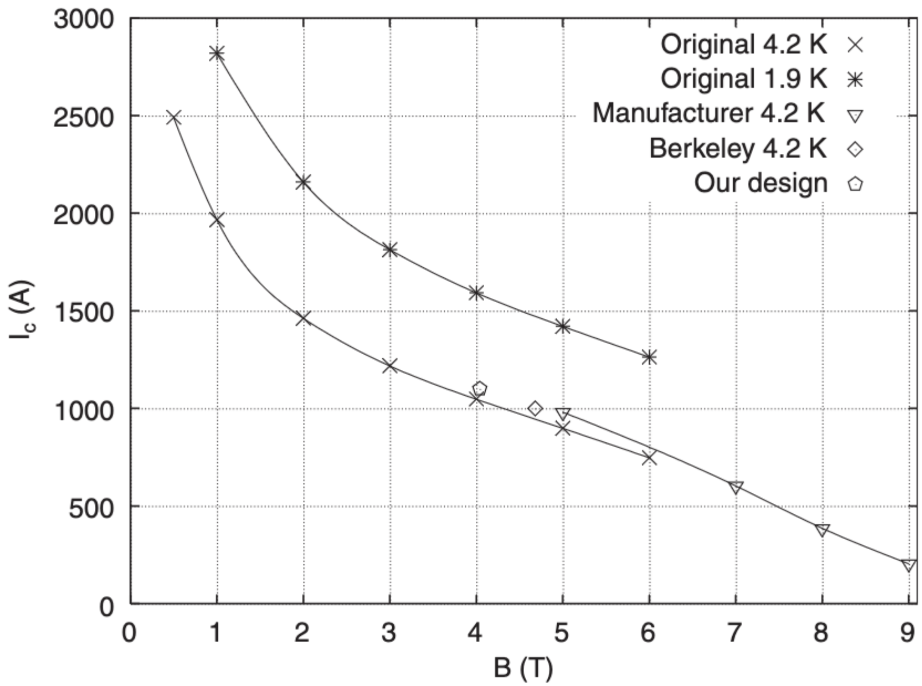


Fig. 2. Critical current at various magnetic fields for the 0.9:1 seven stranded Supercon wire cable bundle. The points marked "Berkeley" and "Our design" were taken with 0.33 mm wire; the remaining points were taken with very similar 0.303 mm wire. The two "Original" data sets were taken at the Brookhaven National Laboratory, while the "Manufacturer" data set was taken by Supercon. These three sets were taken with short wire samples, and set likely upper bounds on the performance of the wire when incorporated into a magnet. The "Berkeley" point comes from measurements of the prototype magnet at U.C. Berkeley, and is very close to the short sample performance when adjusted for the increased radius. The "Our design" point is located at ALPHA's intended operation point.

Cu:SC ratio 0.9:1

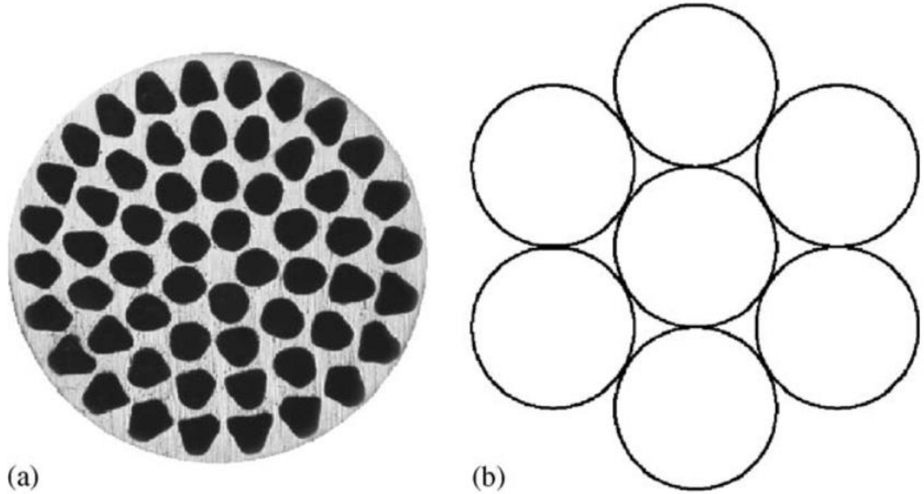


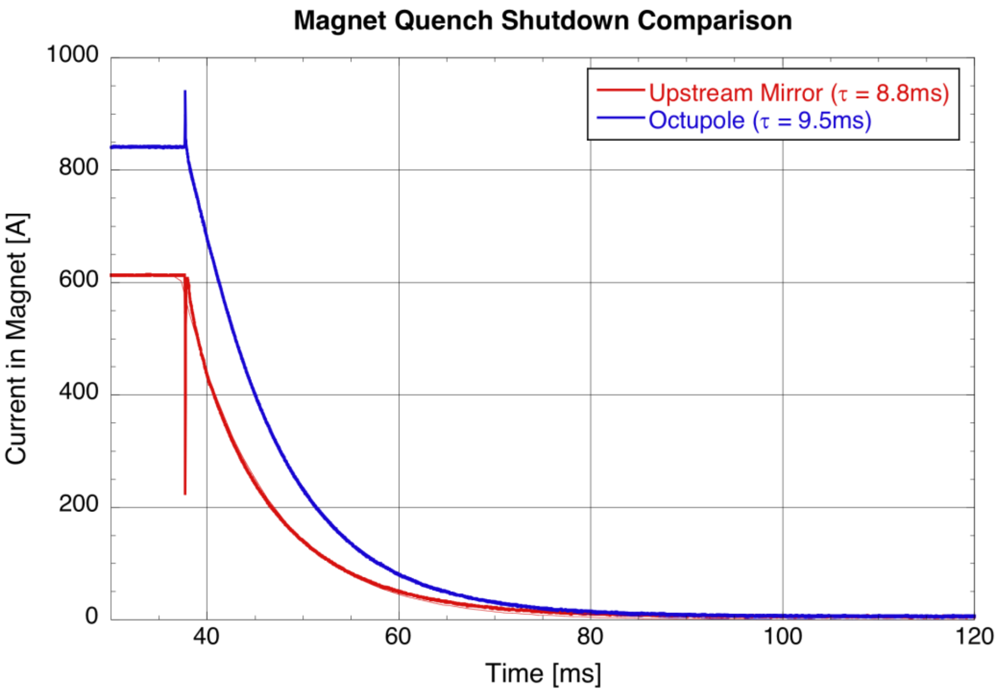
Fig. 3. Wire and cable configuration used in our magnets: (a) the superconducting wire showing the NbTi embedded in the copper matrix (photograph strand 56S53, courtesy of Supercon) [31] and (b) seven stranded cable configuration. The overall diameter of the cable, including insulation and *B*-stage epoxy, is 1.156 mm.

A magnetic trap for antihydrogen confinement

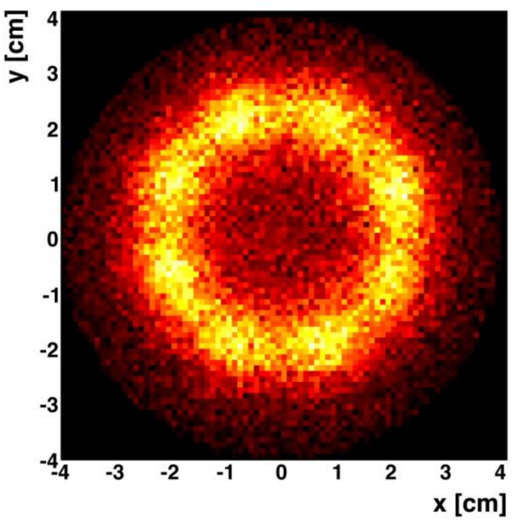
W. Bertsche[a], A. Boston[b], P.D. Bowe[c], C.L. Cesar[d], S. Chapman[a], M. Charlton[e], M. Chartier[b], A. Deutsch[a,f], J. Fajans[a,f], M.C. Fujiwara[g], R. Funakoshi[h], K. Gomberoff[a,f], J.S. Hangst[c], R.S. Hayano[h], M.J. Jenkins[e], L.V. Jørgensen[e], P. Ko[a], N. Madsen[e], P. Nolan[b], R.D. Page[b], L.G.C. Posada[h], A. Povilus[a], E. Sarid[i], D.M. Silveira[d], D.P. van der Werf[e,*], Y. Yamazaki[j] (ALPHA Collaboration) , B.Parker[k], J.Escallier[k], A.Ghosh[k]

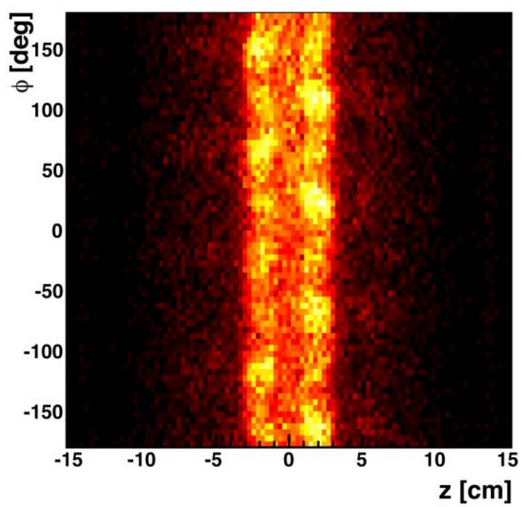
Detection of trapped antihydrogen: Rapid Shutdown

- Hardware patterned after G. Ganetis – IGBT switch to dump resistors
- Signal conditioning hardware from CERN LHC test chain
- Home-made FPGA QPS
- Taps on magnets, vapor cooled leads, and SC leads
- Magnets quench when shutting down – have survived several 10^4 cycles of this



ALPHA Silicon Vertex Detector

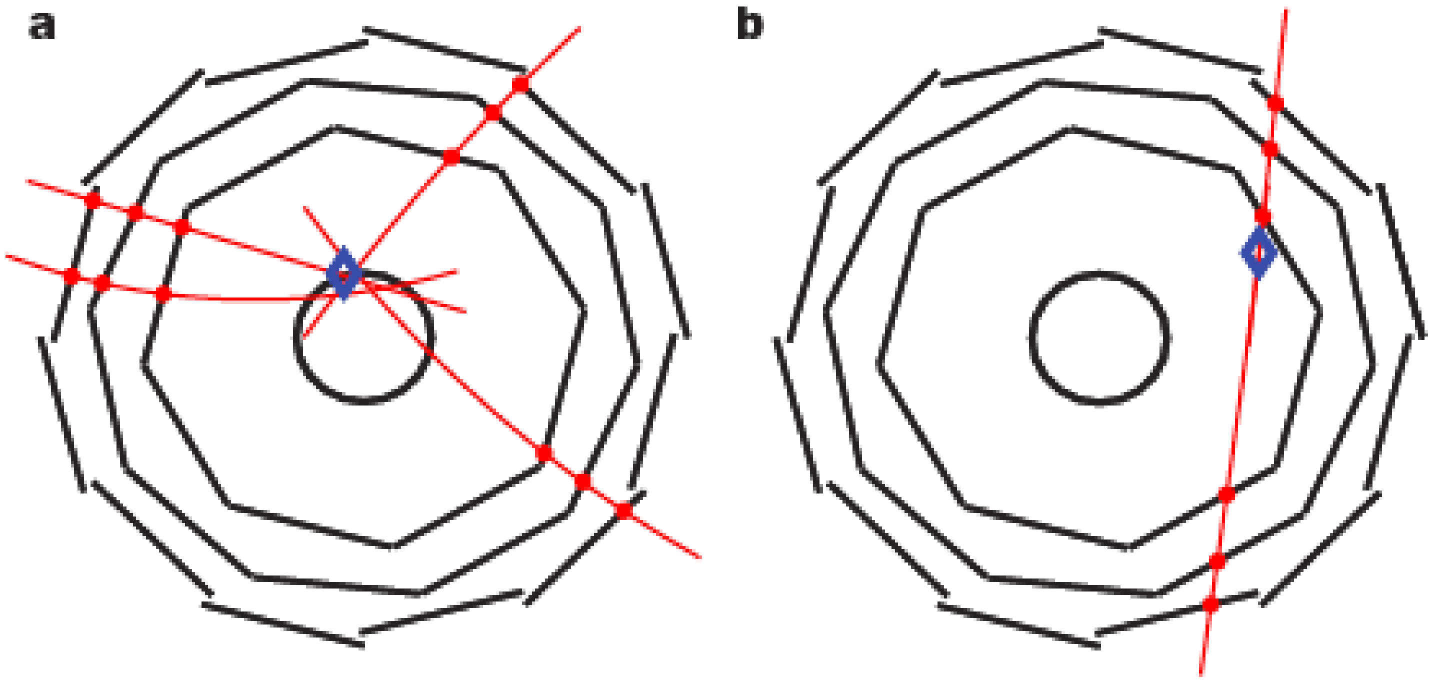




3-layer, double-sided modules
Detect antiproton anihilation (not e^+)
Fabricated by U. Liverpool

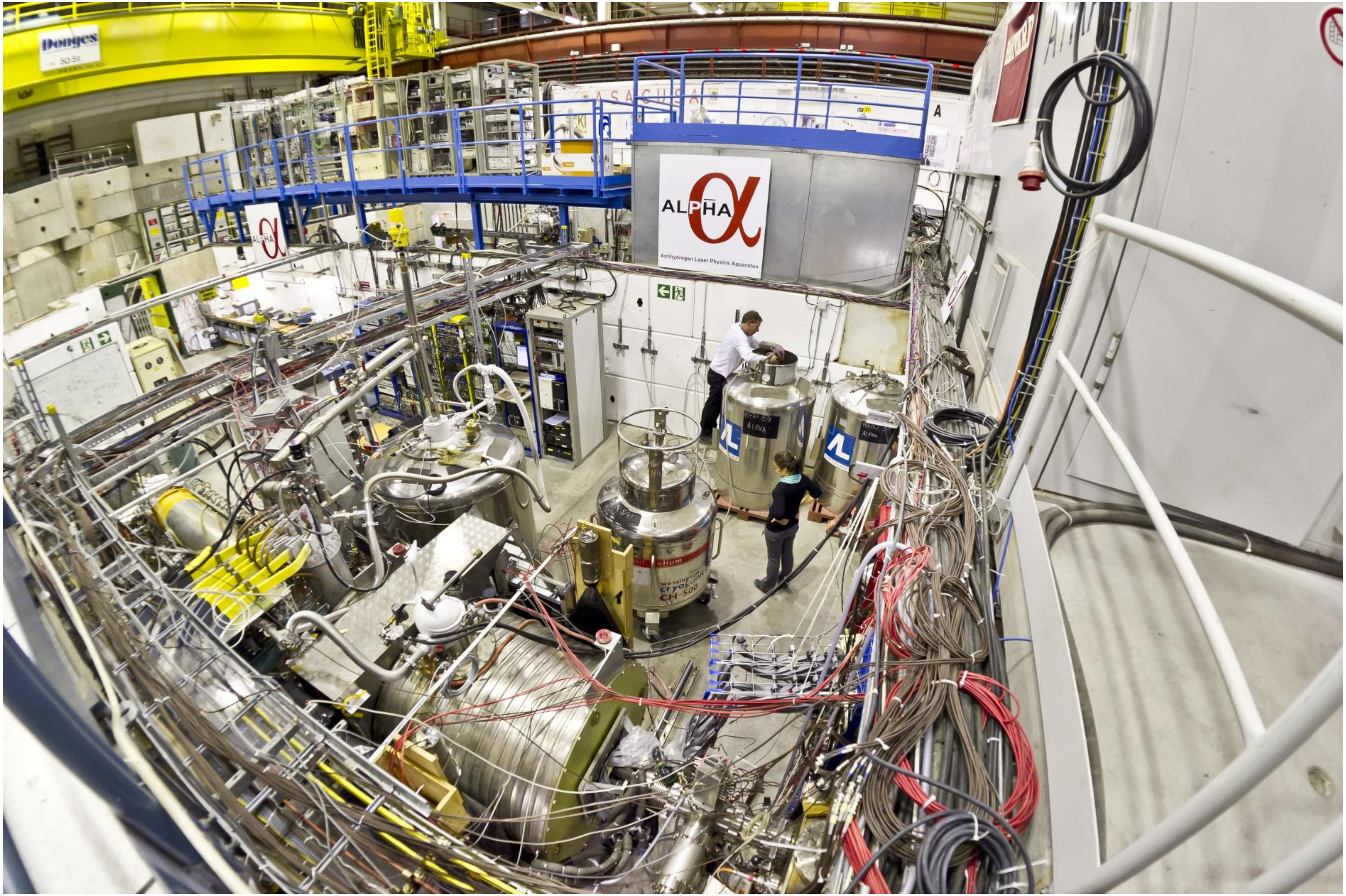
Event Topology

Typical antiproton annihilation | Typical cosmic ray

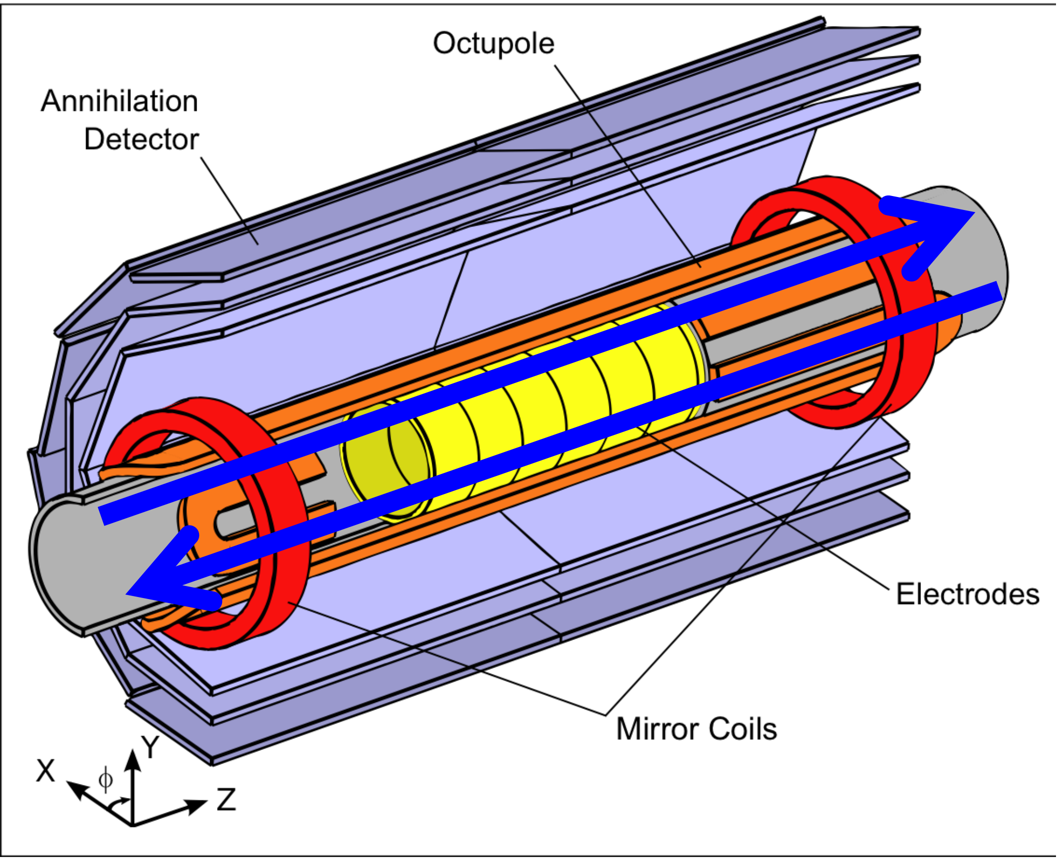


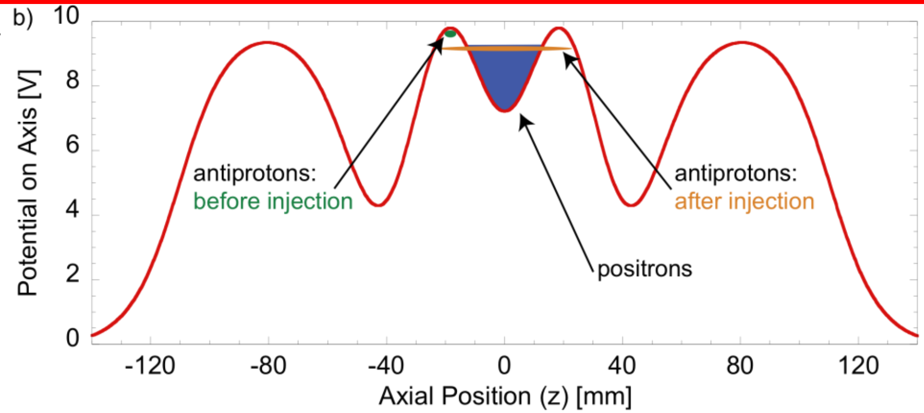
… not much going on here

The Original ALPHA - 2006



The Experiment -2010

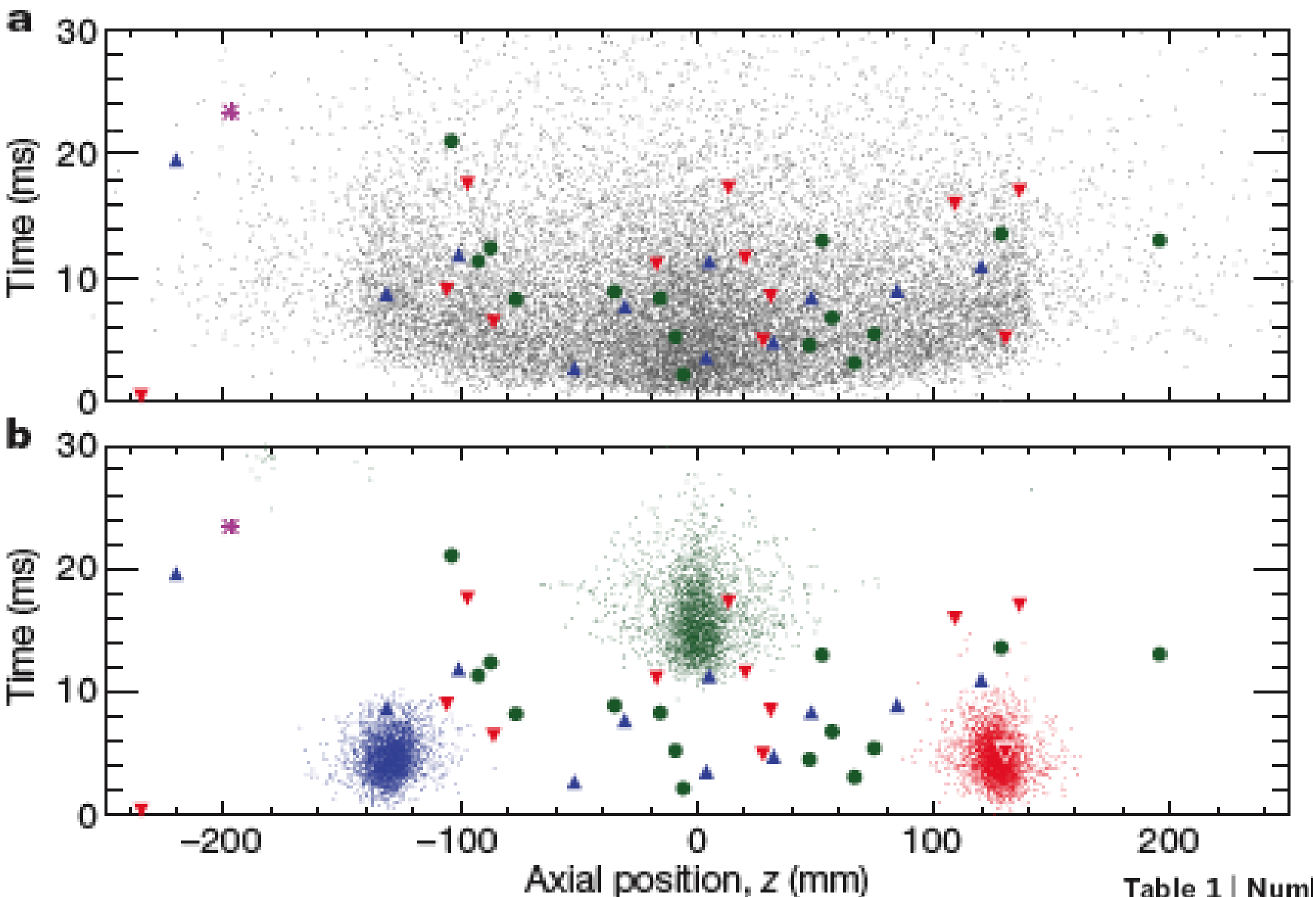




- 30000 antiprotons at 200 K
- 2 M positrons at 40 K, evaporatively cooled
- Inject antiprotons autoresonantly
- Mix for 1 s
- Eject trapped charged particles
- Pulsed fields to clear any mirror-trapped pbars
- Fast shutdown of trap magnets (9 ms)
- Look for annihilating pbar from hbar
- Was it really a neutral? Apply bias electric fields during shutdown.

Trap antihydrogen in magnetic minimum trap
Trap depth ~ 0.5 K

The First Trapping Result



HBAR simulation

left bias
right bias
no bias

PBAR simulations

1 event with heated positrons

Table 1 | Number of annihilations identified in the 30 ms following the trap shutdown

Type of attempt	Number of attempts	Antiproton annihilation events
No bias	137	15
Left bias	101	11
Right bias	97	12
No bias, heated positrons	132	1
Left bias, heated positrons	60	0
Right bias, heated positrons	54	0

LETTER

doi:10.1038/nature09610

Trapped antihydrogen

G. B. Andresen[1], M. D. Ashkezari[2], M. Baquero-Ruiz[3], W. Bertsche[4], P. D. Bowe[1], E. Butler[4], C. L. Cesar[5], S. Chapman[3], M. Charlton[4], A. Deller[4], S. Eriksson[4], J. Fajans[3,6], T. Friesen[7], M. C. Fujiwara[8,7], D. R. Gill[8], A. Gutierrez[9], J. S. Hangst[1], W. N. Hardy[9], M. E. Hayden[2], A. J. Humphries[4], R. Hydomako[7], M. J. Jenkins[4], S. Jonsell[10], L. V. Jørgensen[4], L. Kurchaninov[8], N. Madsen[4], S. Menary[11], P. Nolan[12], K. Olchanski[8], A. Olin[8], A. Povilus[3], P. Pusa[12], F. Robicheaux[13], E. Sarid[14], S. Seif el Nasr[9], D. M. Silveira[15], C. So[3], J. W. Storey[8]†, R. I. Thompson[7], D. P. van der Werf[4], J. S. Wurtele[3,6] & Y. Yamazaki[15,16]

Published online in *Nature*, 17 November 2010

Physics Breakthrough of the Year - with ASACUSA group , 2010 *Physics World* (UK)

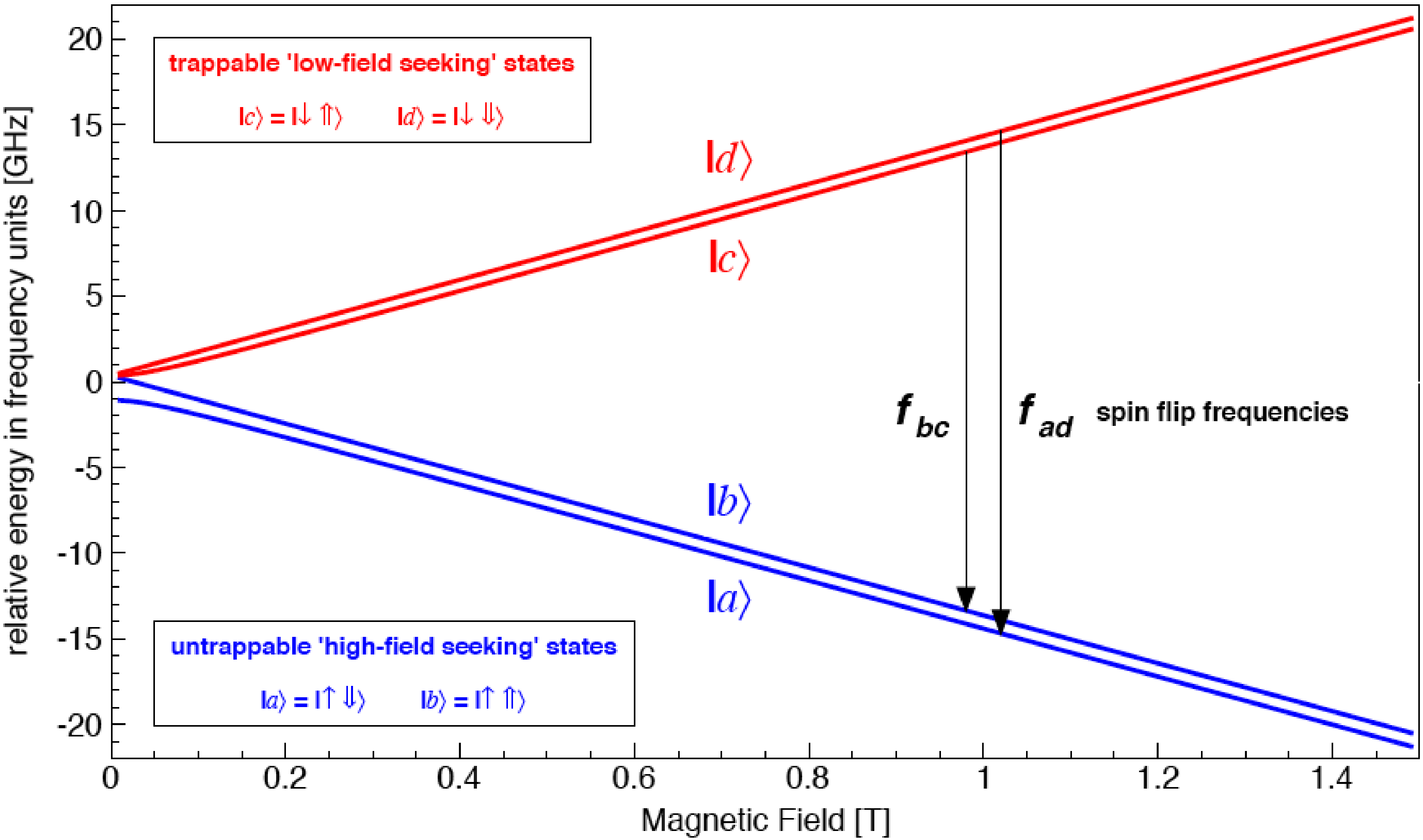
One of the top ten physics stories of 2010 - American Institute of Physics

Most clicked-on story on *Nature* website for all of 2010

Nature Referee:

"The very fact of a proof-of-principle demonstration of wall-free confinement of even a small number of antimatter atoms has an intrinsic philosophical value."

Breit-Rabi Diagram (assumed)



ALPHA

LETTER

doi:10.1038/nature10942

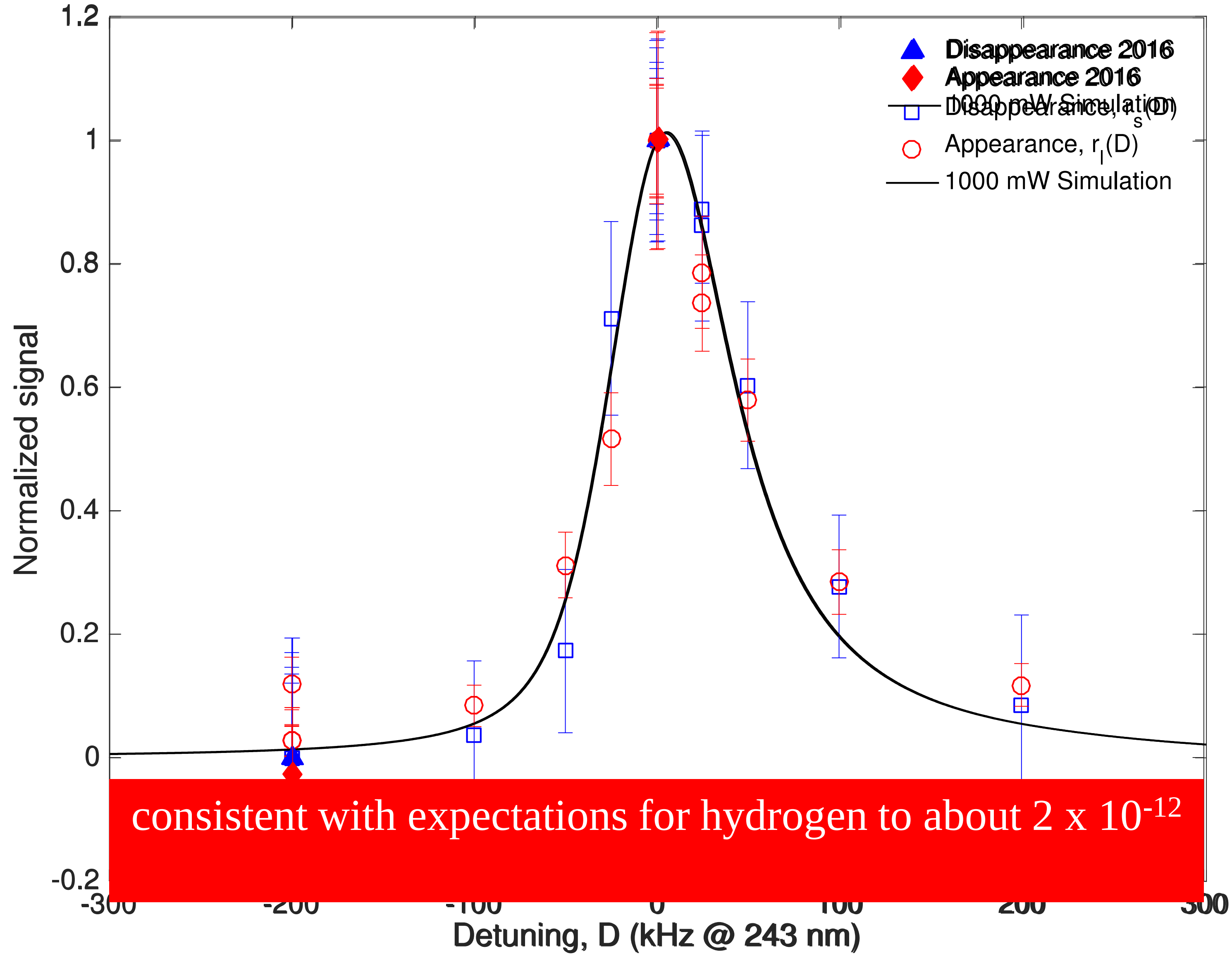
Resonant quantum transitions in trapped antihydrogen atoms

C. Amole[1], M. D. Ashkezari[2], M. Baquero-Ruiz[3], W. Bertsche[4,5,6], P. D. Bowe[7], E. Butler[8], A. Capra[1], C. L. Cesar[9], M. Charlton[4], A. Deller[4], P. H. Donnan[10], S. Eriksson[4], J. Fajans[3,11], T. Friesen[12], M. C. Fujiwara[12,13], D. R. Gill[13], A. Gutierrez[14], J. S. Hangst[7], W. N. Hardy[14,15], M. E. Hayden[2], A. J. Humphries[4], C. A. Isaac[4], S. Jonsell[16], L. Kurchaninov[13], A. Little[3], N. Madsen[4], J. T. K. McKenna[17], S. Menary[1], S. C. Napoli[4], P. Nolan[17], K. Olchanski[13], A. Olin[13,18], P. Pusa[17], C. Ø. Rasmussen[7], F. Robicheaux[10], E. Sarid[19], C. R. Shields[4], D. M. Silveira[20]†, S. Stracka[13], C. So[3], R. I. Thompson[12], D. P. van der Werf[4] & J. S. Wurtele[3,11]

- Published in *nature* online 7 March, 2012
- First measurement on an antimatter atom – precision: few parts in 10^3
- Shows that it is possible to do physics with few atoms

2016 Result: 1S-2S line

2017 Data



consistent with expectations for hydrogen to about 2 x 10^{-12}

ALPHA

LETTER

OPEN
doi:10.1038/nature21040

Observation of the 1S–2S transition in trapped antihydrogen

M. Ahmadi[1], B. X. R. Alves[2], C. J. Baker[3], W. Bertsche[4,5], E. Butler[6], A. Capra[7], C. Carruth[8], C. L. Cesar[9], M. Charlton[3], S. Cohen[10], R. Collister[7], S. Eriksson[3], A. Evans[11], N. Evetts[12], J. Fajans[8], T. Friesen[2], M. C. Fujiwara[7], D. R. Gill[7], A. Gutierrez[13], J. S. Hangst[2], W. N. Hardy[12], M. E. Hayden[14], C. A. Isaac[3], A. Ishida[15], M. A. Johnson[4,5], S. A. Jones[3], S. Jonsell[16], L. Kurchaninov[7], N. Madsen[3], M. Mathers[17], D. Maxwell[3], J. T. K. McKenna[7], S. Menary[17], J. M. Michan[7,18], T. Momose[12], J. J. Munich[14], P. Nolan[1], K. Olchanski[7], A. Olin[7,19], P. Pusa[1], C. Ø. Rasmussen[2], F. Robicheaux[20], R. L. Sacramento[9], M. Sameed[3], E. Sarid[21], D. M. Silveira[9], S. Stracka[22], G. Stutter[2], C. So[11], T. D. Tharp[23], J. E. Thompson[17], R. I. Thompson[11], D. P. van der Werf[3,24] & J. S. Wurtele[8]

Published online 19 December 2016; print version 26 January 2017

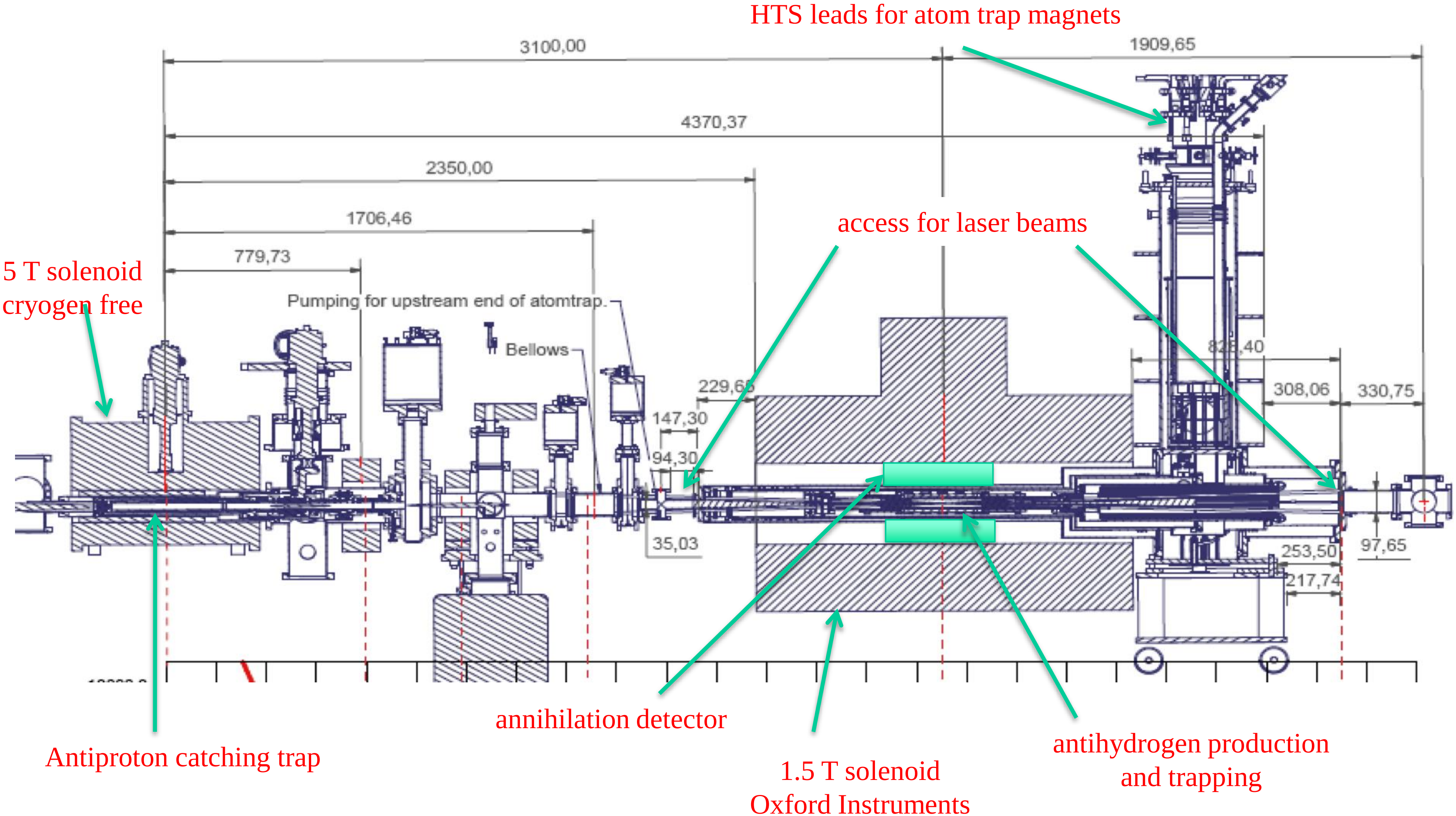
CPT tested to 2 x 10^{-10}

~15 atoms trapped at a time

2016 – 1s-2s spectroscopy

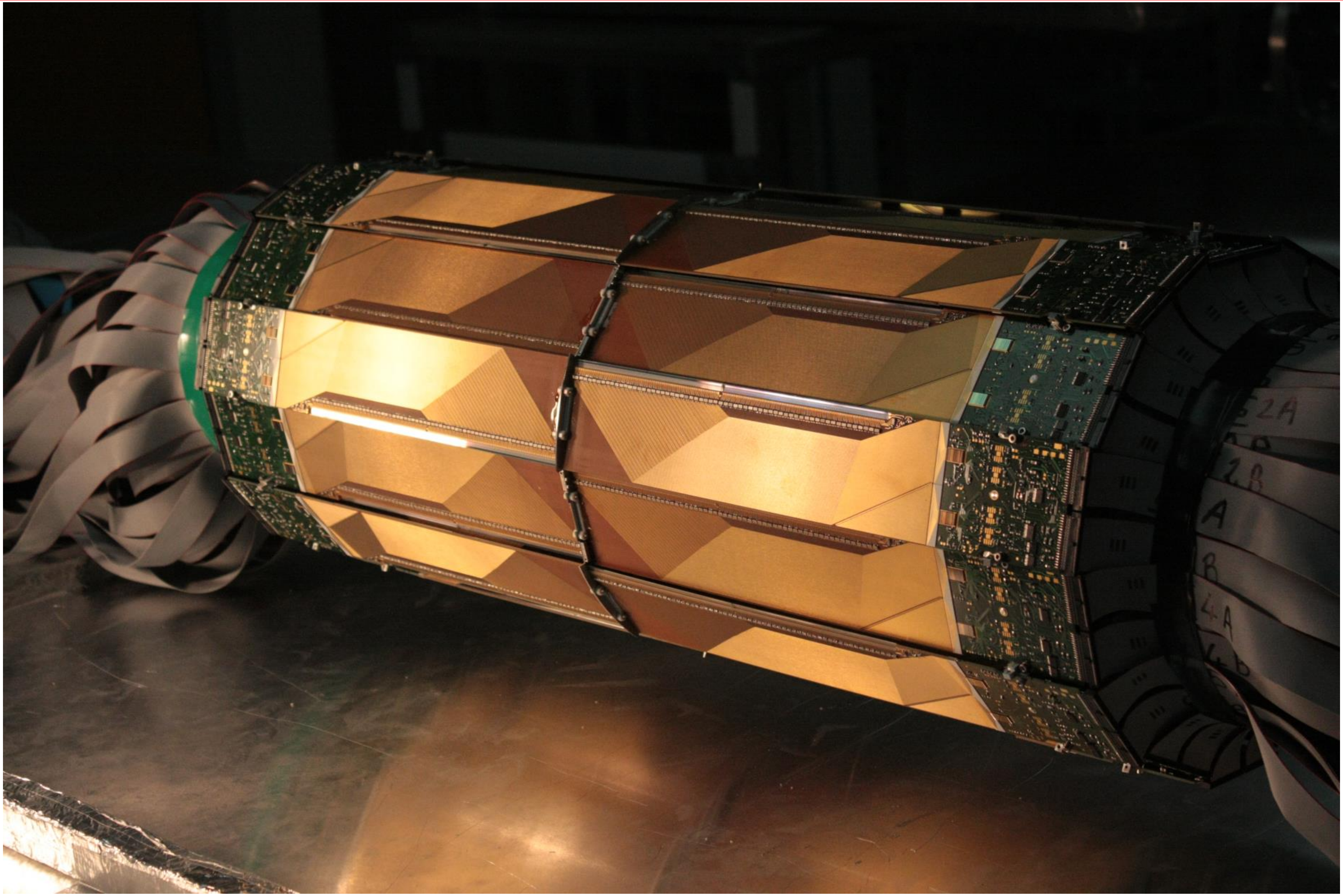
There is no doubt that this result is of high originality and of highest relevance to a broad scientific community, and thus, merits publication in any journal the authors have selected. I congratulate the editors that the ALPHA collaboration has selected Nature to publish this ground-breaking work.

ALPHA-2

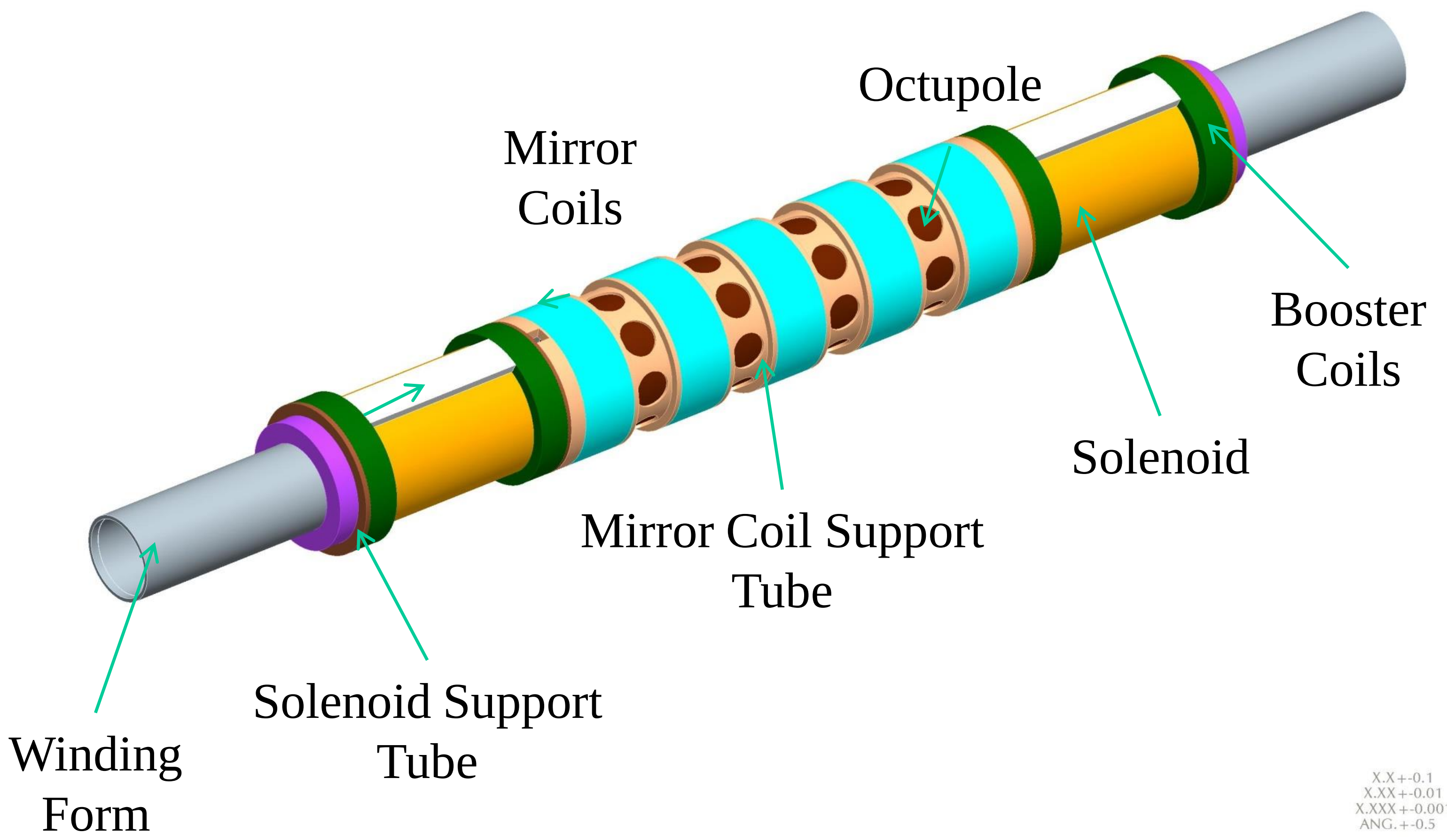


HTS leads for atom trap magnets
3100,00
1909,65
4370,37
2350,00
1706,46
779,73
access for laser beams
5 T solenoid
cryogen free
Pumping for upstream end of atomtrap.
Bellows
229,65
147,30
94,30
35,03
308,06
330,75
253,50
217,74
97,65
annihilation detector
Antiproton catching trap
1.5 T solenoid
Oxford Instruments
antihydrogen production
and trapping

ALPHA-2 Silicon Detector

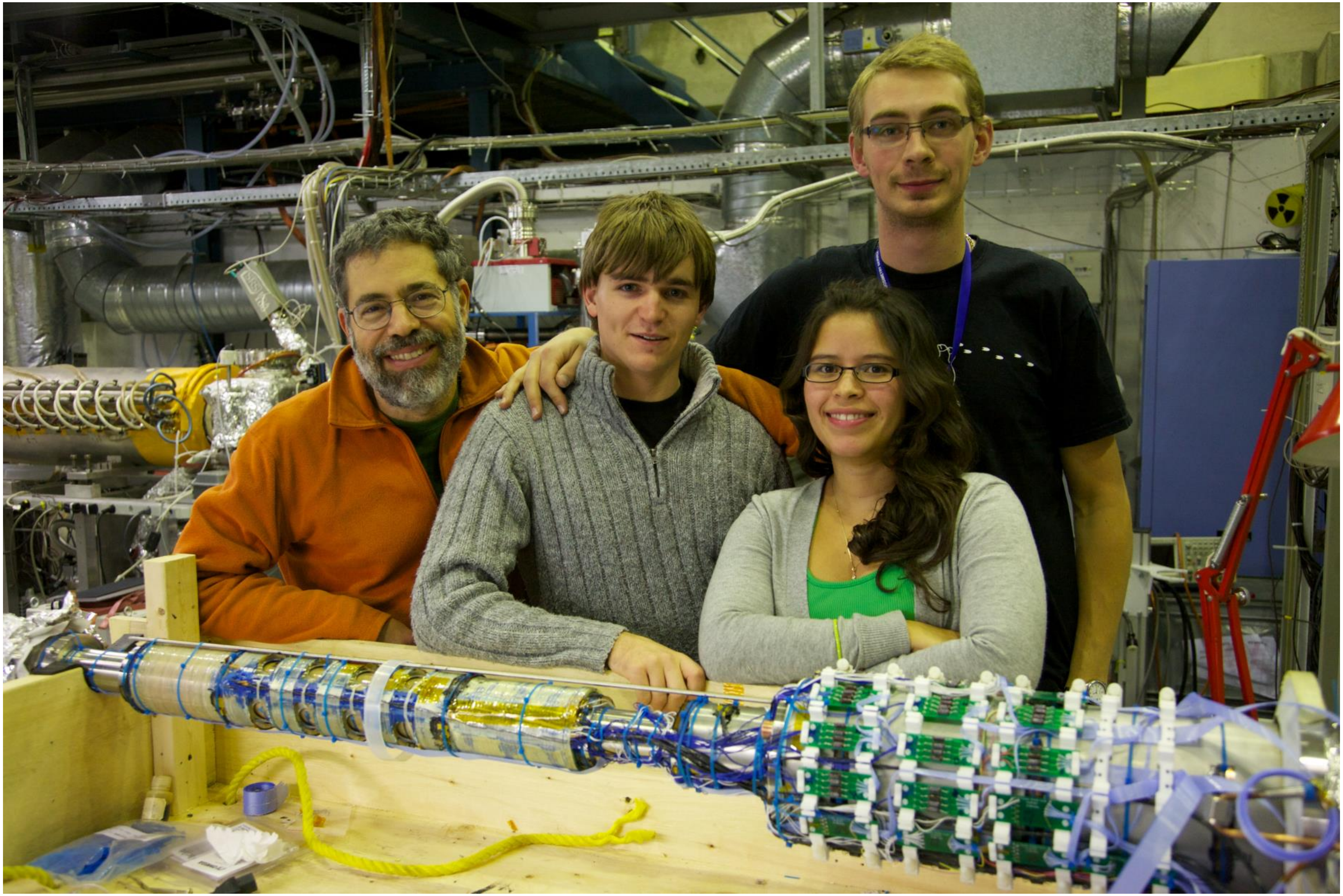


The ALPHA-2 Atom Trap (2013)



Penning Trap – ALPHA-2

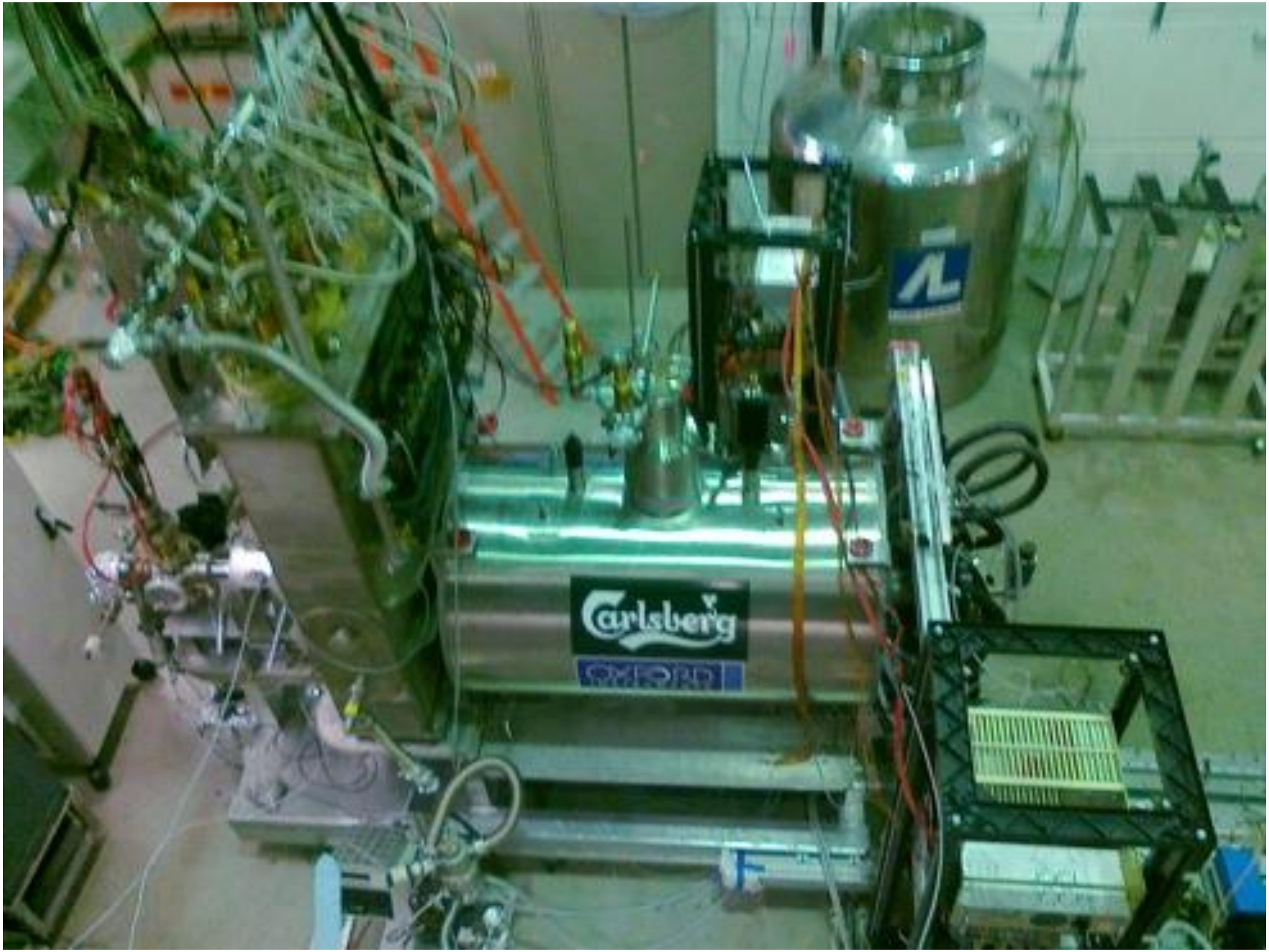
ALPHA-2 Magnet Package



‘Carlsberg’ Magnet

- 350 mm warm bore, 1.5 m long
- 1.5 T
- 10 ppm uniformity over 30 cm (z) x 1 cm (r)

- 10 s ramp from 1 T to 0.65 T
- 480,000 €
- Fabricated by Oxford Instruments


Carlsberg
OXFORD

ALPHA-2 Cryostat and Current Leads

Thanks to Amalia!
4 x 4 LHC HTS
leads (600A)

They work fine at 1000 A!

Antihydrogen in ALPHA - highlights

- **Prior to LS1**

Trapped antihydrogen.
Nature **468**, 673–676 (2010). https://doi.org/10.1038/nature09610

Confinement of antihydrogen for 1,000 seconds.
Nature Phys **7**, 558–564 (2011). https://doi.org/10.1038/nphys2025

Resonant quantum transitions in trapped antihydrogen atoms.
Nature **483**, 439–443 (2012). https://doi.org/10.1038/nature10942

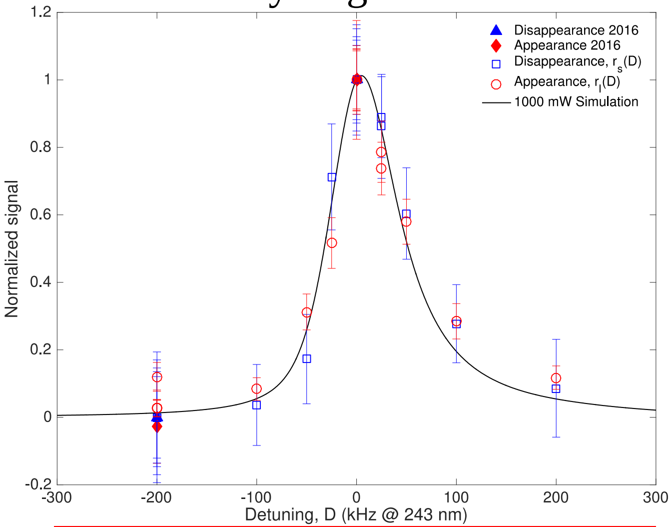
Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen.
Nat Commun **4**, 1785 (2013). https://doi.org/10.1038/ncomms2787

An experimental limit on the charge of antihydrogen.
Nat Commun **5**, 3955 (2014). https://doi.org/10.1038/ncomms4955

ALPHA-2 constructed (2012)

An improved limit on the charge of antihydrogen from stochastic acceleration.
Nature **529**, 373–376 (2016). https://doi.org/10.1038/nature16491

Observation of the 1S–2S transition in trapped antihydrogen.
Nature **541**, 506–510 (2017). https://doi.org/10.1038/nature21040



consistent with expectations for hydrogen to about 2 x 10^{-12}

Antihydrogen in ALPHA - highlights II

- **since LS1 (continued)**

Observation of the hyperfine spectrum of antihydrogen.
Nature **548**, 66–69 (2017). https://doi.org/10.1038/nature23446

Antihydrogen accumulation for fundamental symmetry tests.
Nat Commun **8**, 681 (2017). https://doi.org/10.1038

Characterization of the 1S–2S transition in antihydrogen.
Nature **557**, 71–75 (2018). https://doi.org/10.1038/s41586-018-0017-2

Observation of the 1S–2P Lyman-α transition in antihydrogen.
Nature **561**, 211–215 (2018). https://doi.org/10.1038/s41586-018-0435-1

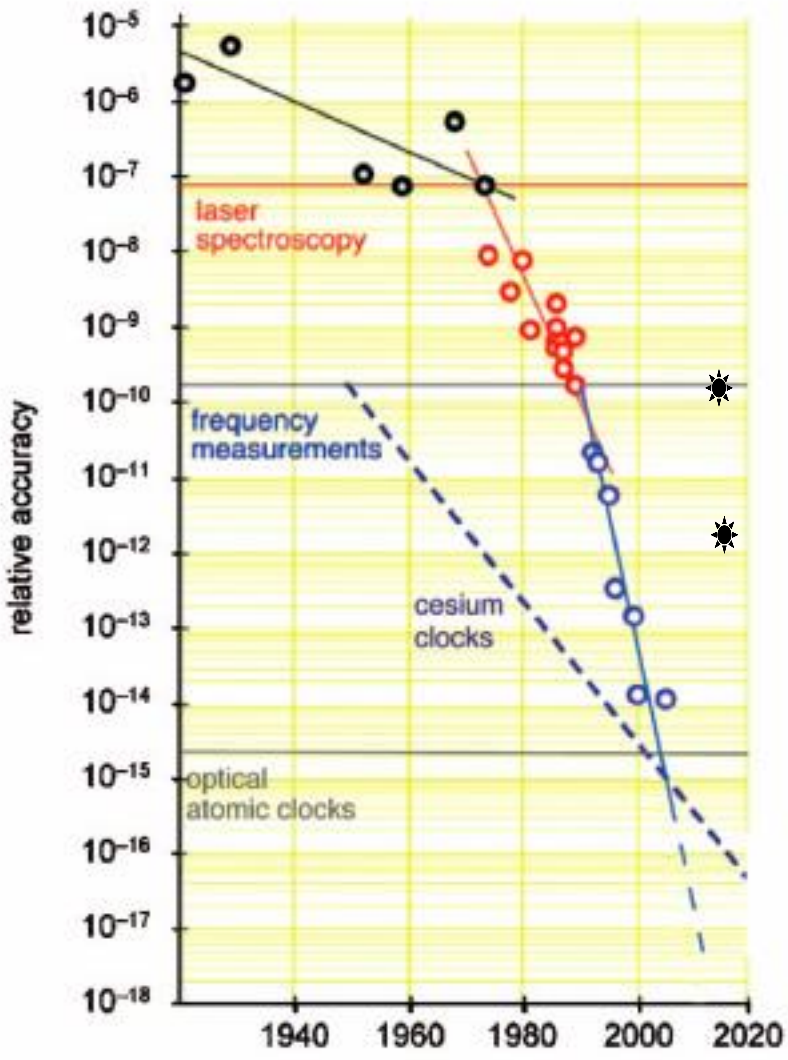
ALPHA-g installed (2018)

Investigation of the fine structure of antihydrogen.
Nature **578**, 375–380 (2020). https://doi.org/10.1038/s41586-020-2006-5

Laser cooling of antihydrogen atoms.
Nature **592**, 35–42 (2021). https://doi.org/10.1038/s41586-021-03289-6

Sympathetic cooling of positrons to cryogenic temperatures for antihydrogen production.
Nat Commun **12**, 6139 (2021). https://doi.org/10.1038/s41467-021-26086-1

State of the Art (published)



Theodor Hänsch

Finally on the cover - 2021!

nature

Explore content ⌄ About the journal ⌄ Publish with us ⌄

nature > articles > article

Article | Open Access | Published: 31 March 2021

Laser cooling of antihydrogen atoms

C. J. Baker, W. Bertsche, ... J. S. Wurtele + Show authors

Nature **592**, 35–42 (2021) | Cite this article

35k Accesses | **8** Citations | **655** Altmetric | Metrics

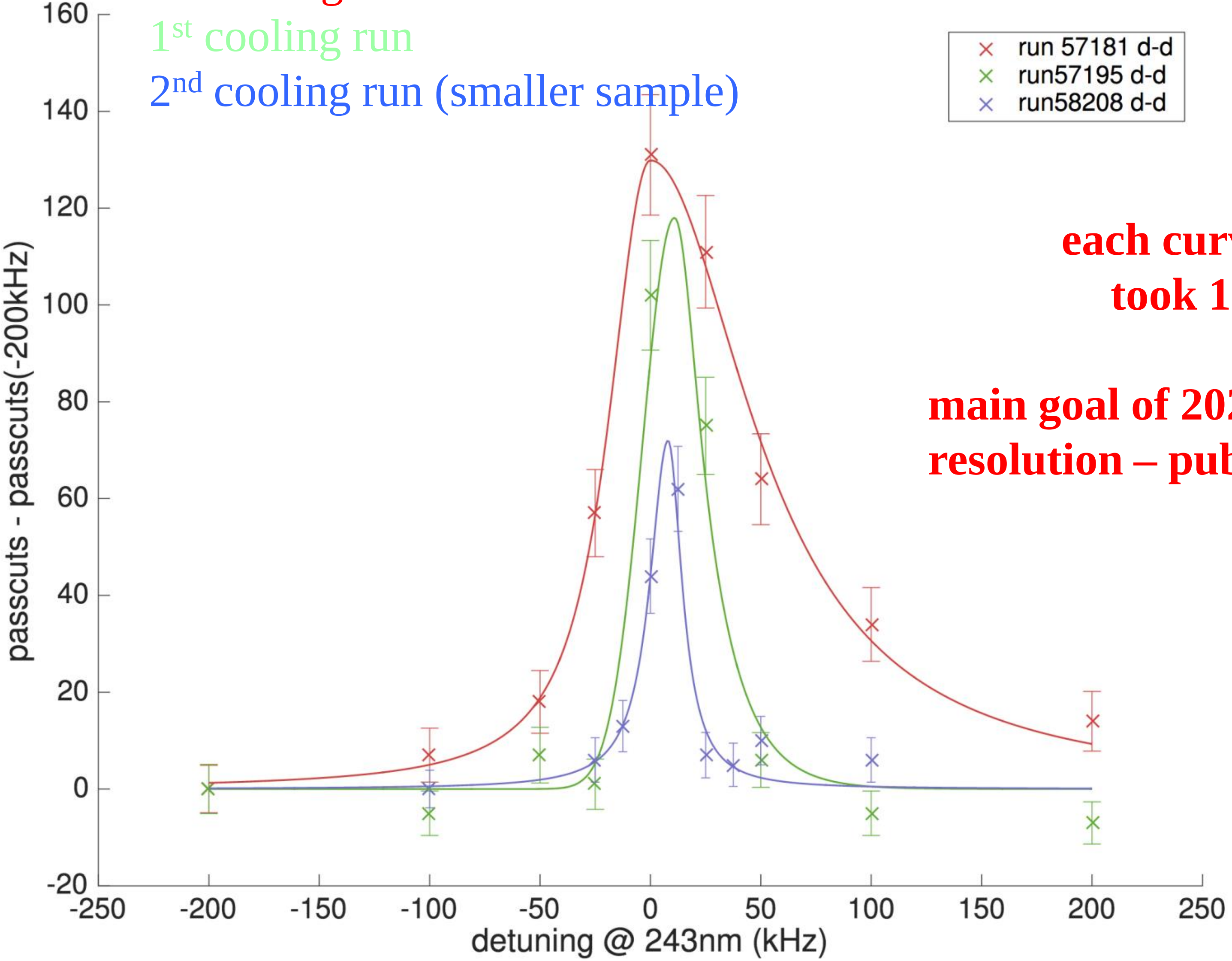
in 2024: cooled to <10 mK (8×10^{-7}) eV

1S-2S Lineshape with Laser Cooling

no cooling

1st cooling run

2nd cooling run (smaller sample)

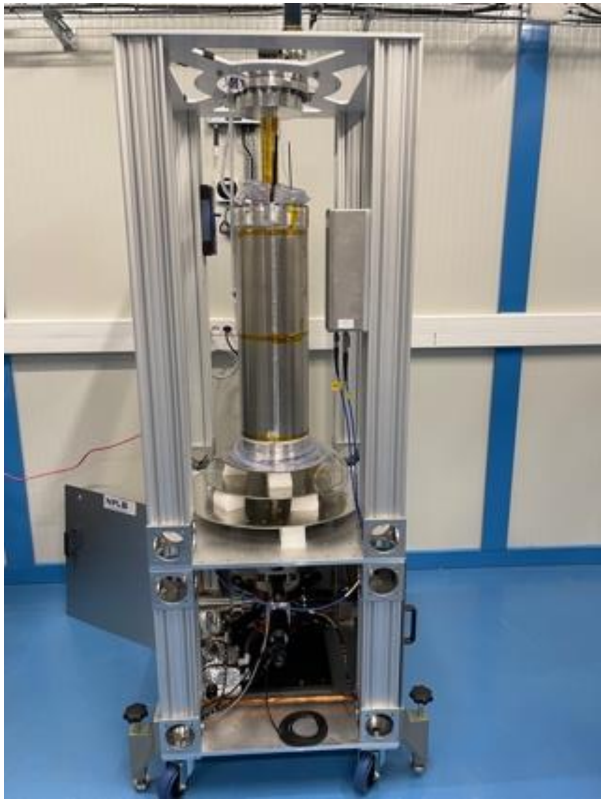


each curve obtained in 1 day took 10 weeks in 2017...

main goal of 2023 run was to improve this resolution – publication in progress

1S-2S transition with laser cooling

Frequency Metrology Lab

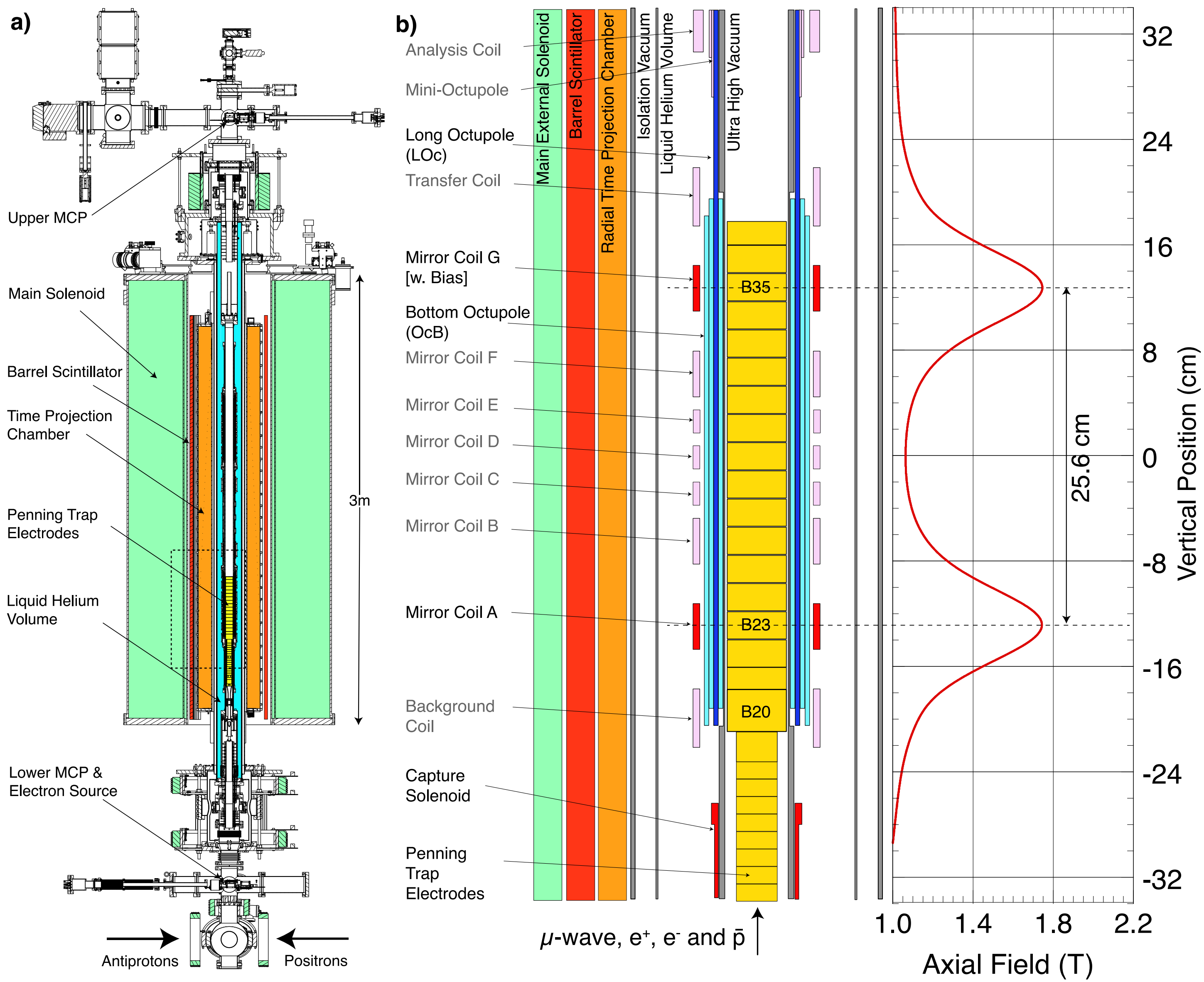


Cesium fountain clock from NPL
"primary time standard"

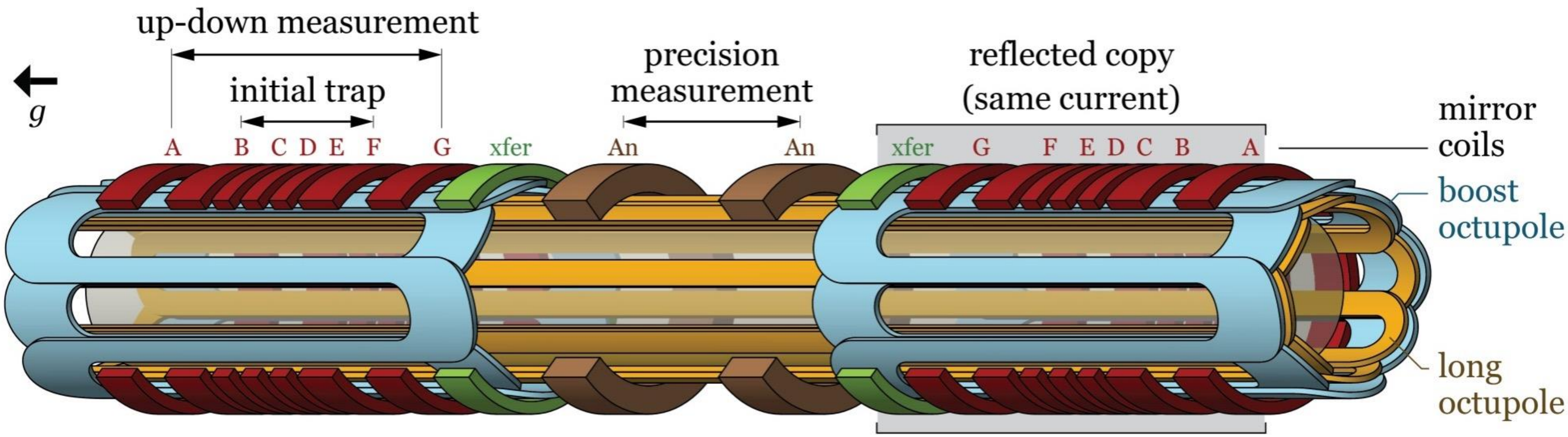
Hydrogen maser

ALPHA-g

ALPHA-g Schematic

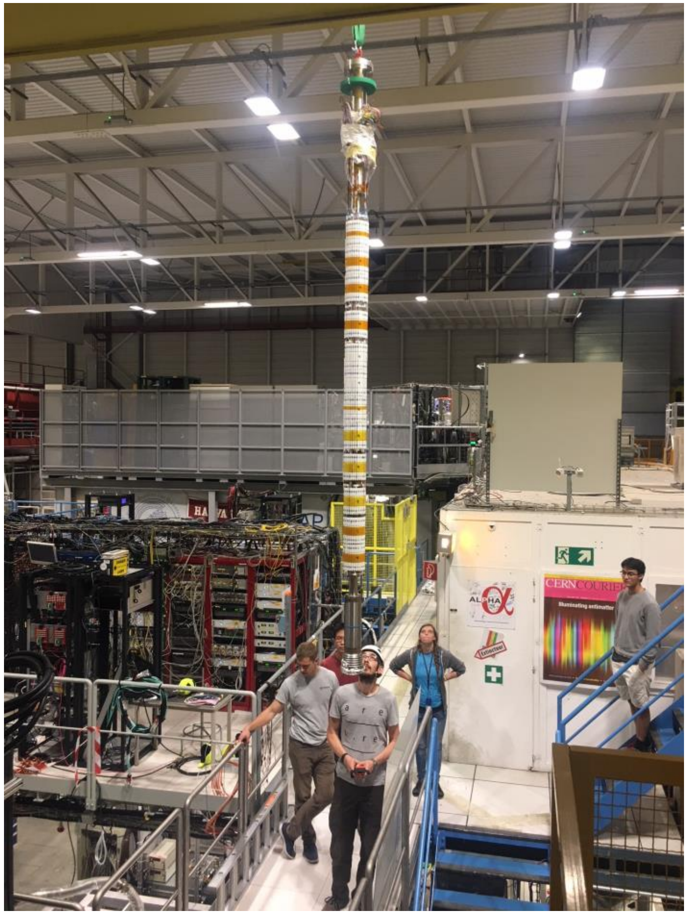


ALPHA-g Coil Package



the gravitational potential change over the length of the bottom trap is equivalent to 4.5 Gauss

ALPHA-g

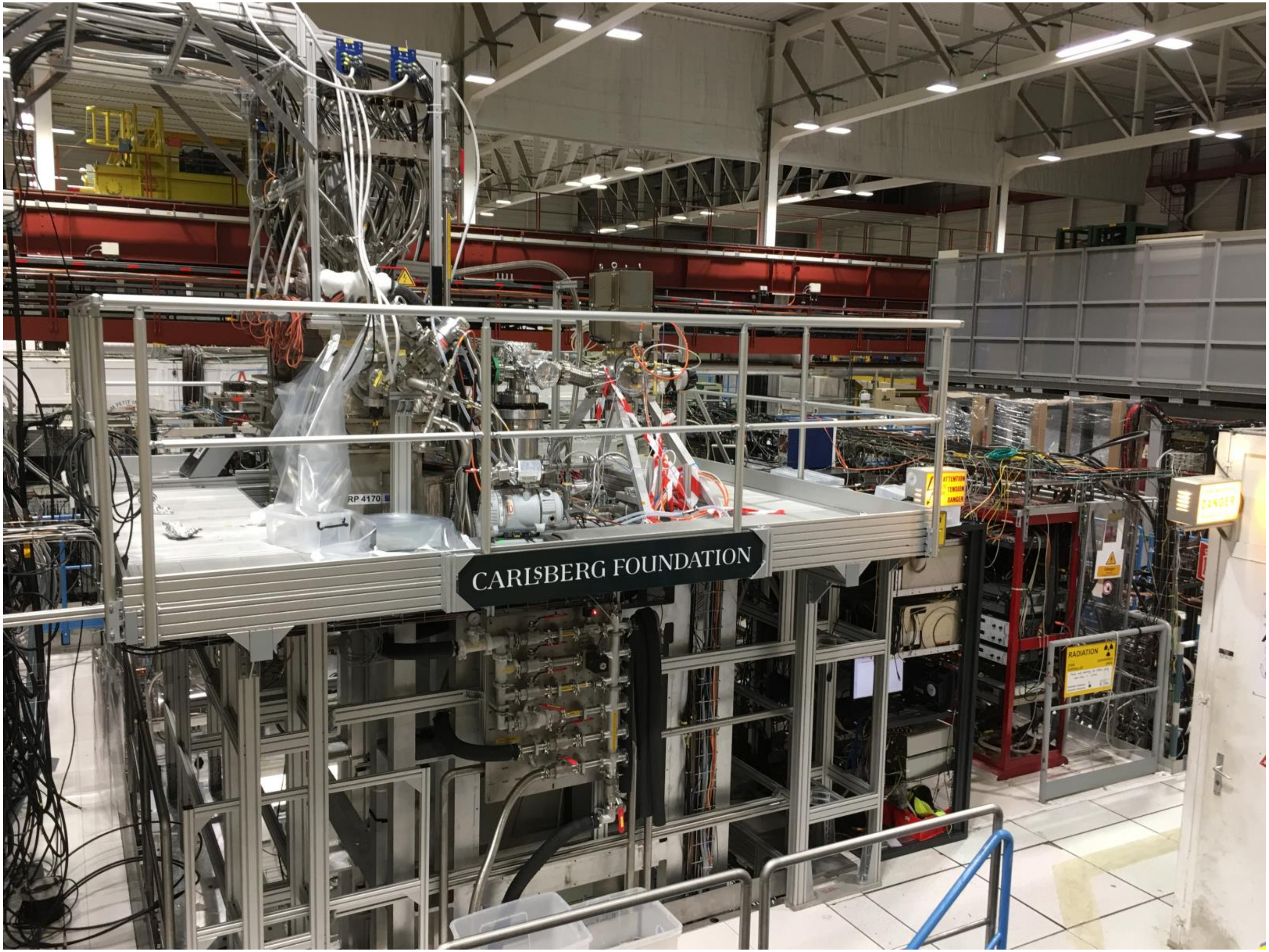


1 T 50 cm bore, 3m solenoid
from Bilfinger
Sumitomo cryocoolers

vertical cryostat

BNL magnets
3 separate trapping regions
27 SC coils
34 HTS leads

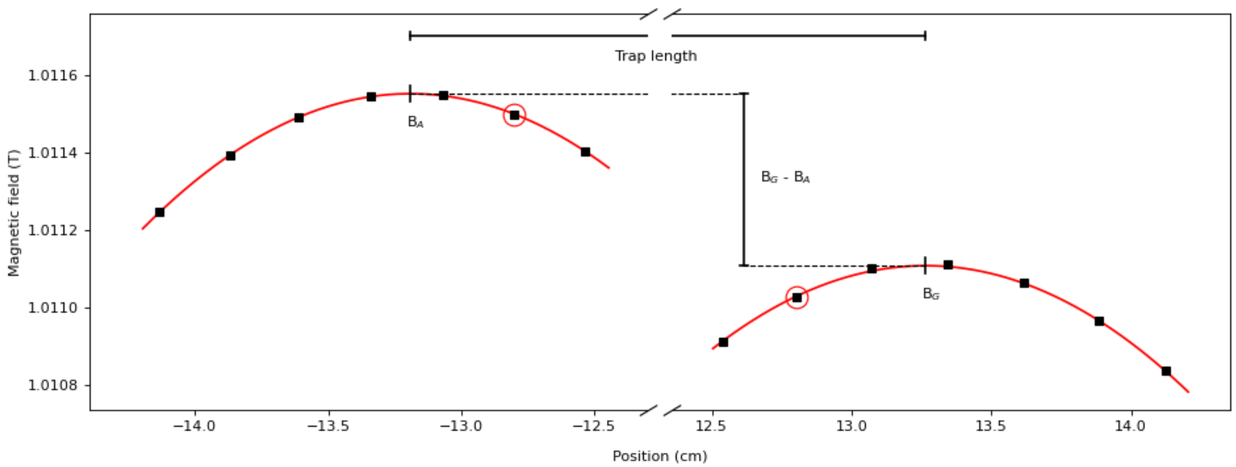
ALPHA-g


CARLSBERG FOUNDATION
RP 4170
RADIATION
DANGER

Magnetic bias concept (J. Fajans)

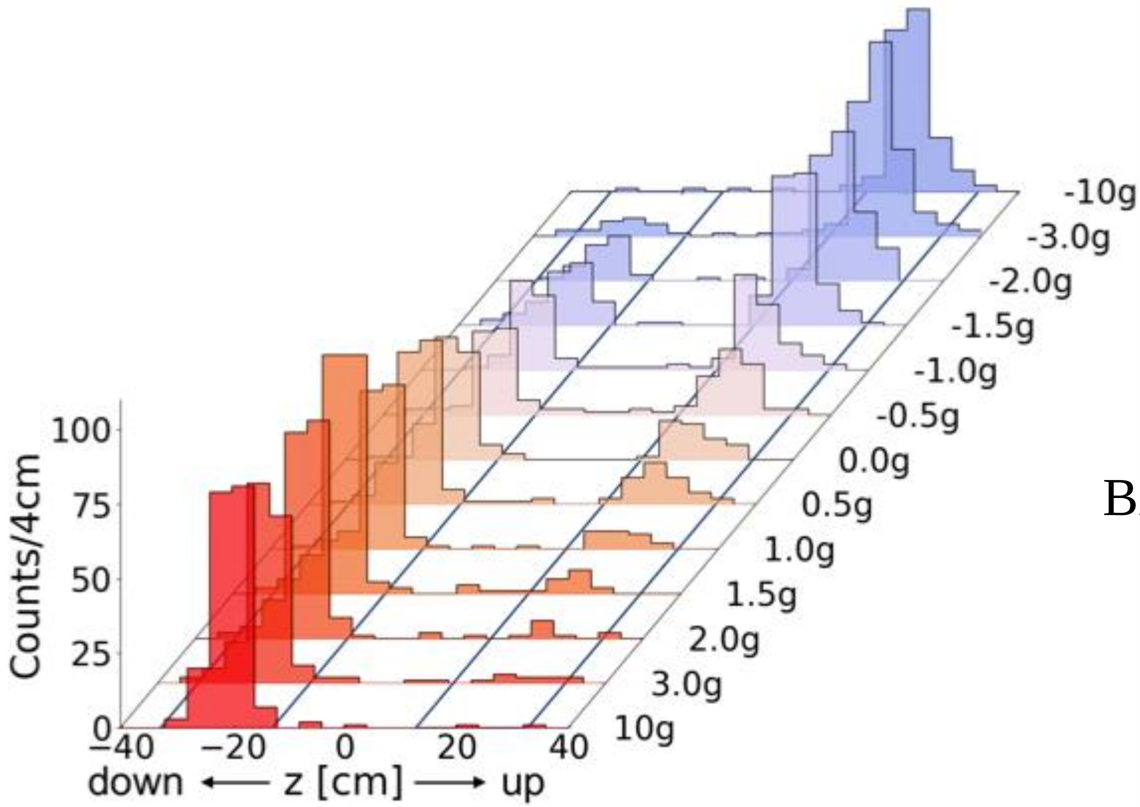
Add a differential current to one of the mirror coils

$$\frac{\mu_B(B_G - B_A)}{m_H(z_G - z_A)}$$ we call this the bias – units of acceleration



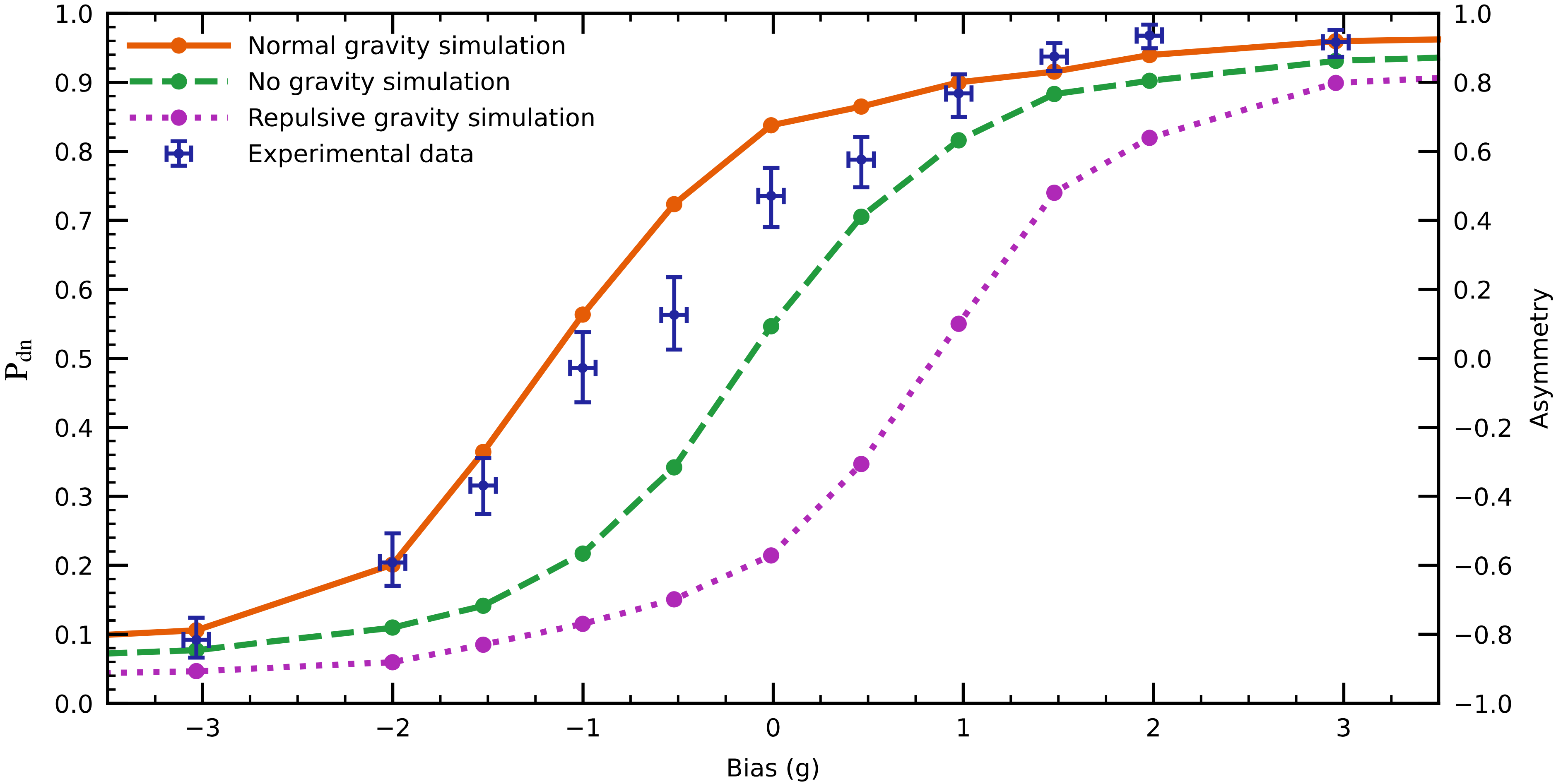
in a real experiment – ramp both mirror currents down while maintaining this difference

Raw data from 2022 run



Bias

The Result



$a_{\bar{g}}$ = (0,75 ± 0,13 (stat. + syst.) ± 0,16 (simulation)) • g where g = 9,81 m/s^2

nature

Explore content About the journal Publish with us

nature articles article

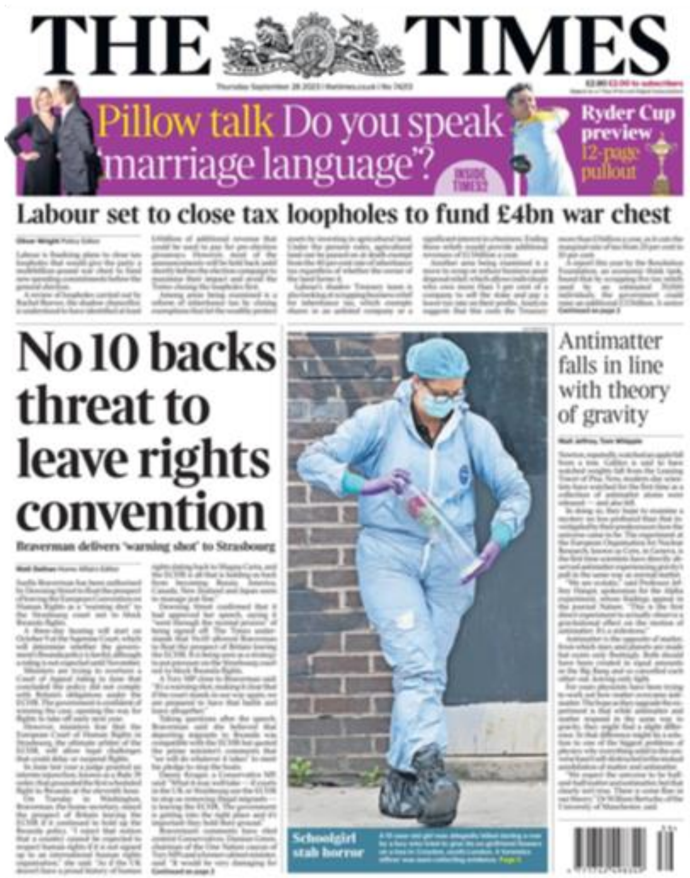
Article | Open access | Published: 27 September 2023

Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter

E. K. Anderson, C. J. Baker, W. Bertsche, N. M. Bhatt, G. Bonomi, A. Capra, I. Carli, C. L. Cesar, M. Charlton, A. Christensen, R. Collister, A. Cridland Mathad, D. Duque Quiceno, S. Eriksson, A. Evans, N. Evetts, S. Fabbri, J. Fajans, A. Ferwerda, T. Friesen, M. C. Fujiwara, D. R. Gill, L. M. Golino, M. B. Gomes Gonçalves, … J. S. Wurtele + Show authors

Nature **621**, 716–722 (2023) | Cite this article

ALPHA α


THE TIMES

Pillow talk Do you speak marriage language?

Ryder Cup preview 12-page pullout

Labour set to close tax loopholes to fund £4bn war chest

No 10 backs threat to leave rights convention

Braverman delivers 'warning shot' to Strasbourg

Antimatter falls in line with theory of gravity

Schoolgirl stab horror

L'antimatière ne « tombe » pas vers le haut

Une équipe internationale a observé, pour la première fois, le comportement d'antiatomes en chute libre

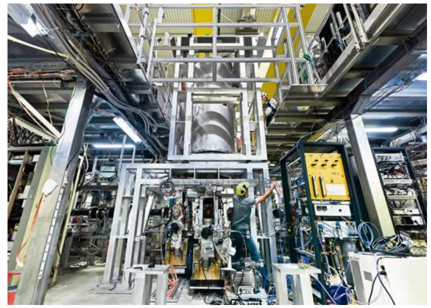
L'expérience commune nous enseigne un principe de bon sens : on tombe vers le bas. Mais les physiciens aiment bien jouer avec le bon sens et oser l'impensable. Et s'il existait des objets qui ne chutent pas vers le bas mais vers... le haut, voire qui ne tombent pas du tout ? Plus savamment, est-ce que la force de gravité, dont on connaît l'effet sur la matière ordinaire, agit de la même façon sur sa cousine l'antimatière, image miroir de la première ? Dans l'antimatière, les charges électriques des particules sont inversées, tandis que les masses restent identiques. Un proton du noyau devient un antiproton, chargé négativement, et un électron qui gravite autour devient un antiélectron, chargé positivement.

Alors, une plume d'antimatière chuterait-elle aussi vite qu'une plume de matière ? La réponse est enfin tombée, sous forme d'un article dans la revue *Nature* du 27 septembre : l'antimatière ne chute pas vers le haut. La gravité, connue pour attirer les masses de matière ordinaire entre elles, n'est pas répulsive pour l'antimatière.

« Usine à antimatière »

« Nous sommes les premiers à avoir fait cette expérience, qui représente trente ans d'efforts. Beaucoup pensaient que les antiatomes tomberaient vers le bas, mais nous étions prêts à observer le contraire. Même si ce n'est finalement pas le cas, en voyant le résultat, nous étions radieux », résume Jeffrey Hangst, chercheur de l'université d'Aarhus (Danemark), auteur de cette étude originale et responsable de la collaboration Alpha-g, installée au CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, et forte de soixante-dix membres. Ce centre est le leader mondial en la matière, avec un bâtiment baptisé « Usine à antimatière » qui abrite six expériences consacrées à l'étude de cette substance.

« C'est l'une des plus importantes expériences de physique fondamentale jamais réalisées », explique Stefan Ulmer, responsable du programme antimatière du CERN et chef d'une autre expérience, BASE. *« Je leur tire mon chapeau. Un résultat magnifique »*, apprécie Patrice Perez, coresponsable d'une autre expérience de l'usine à antimatière, GBAR. *« Ça n'avait jamais été fait. L'antimatière a été testée dans le domaine des hautes énergies. On la connaît en électromagnétisme, mais pas sur la gravitation »*, complète Bruno Mansoulié, autre membre de GBAR. *« Trouver la moindre différence de comportement entre la matière et l'antimatière serait révolutionnaire, car la théorie de la relativité générale serait alors mise en défaut »*, rappelle Jeffrey Hangst.


Installation de l'expérience Alpha-g dans le hall de l'usine à antimatière du CERN, à Meyrin, en Suisse, en octobre 2018. CERN

L'expérience n'est donc pas anecdotique. Elle touche même à l'un des mystères de l'Univers. Aux origines, particules et antiparticules ont été créées en quantité égale. Et lorsque l'une rencontre l'autre, c'est une explosion qui fait jaillir un rayonnement. Or, on constate que l'antimatière a disparu. Sans doute à cause d'un déséquilibre ténu dans les propriétés des deux sœurs jumelles. L'un a déjà été identifié, dès les années 1960. Certaines particules et antiparticules ne se désintègrent pas de la même façon. Mais l'écart ne suffit pas à expliquer le désert d'antimatière actuel. Il faut donc trouver autre chose. Et ce quelque chose forcera à écrire différemment les lois du monde : la cosmologie, la relativité générale d'Einstein et les théories régissant l'infiniment petit comme la gravitation quantique.

D'où l'importance de cette expérience de chute libre, qui a relevé plusieurs défis. D'abord, puisque les antiparticules ont disparu, il faut les fabriquer. Et surtout les assembler pour faire des atomes complexes. En 1995, au CERN, de premiers antiatomes d'hydrogène sortaient des fourneaux de l'usine : un antiélectron orbitant autour d'un antiproton. Mais, trop agités, ils rendaient des « photos » de leurs propriétés très floues. Au cours des années suivantes, les chercheurs parvenaient à refroidir peu à peu ces antiatomes, jusqu'à pouvoir sonder leurs niveaux d'énergie interne et les comparer à ceux de l'hydrogène. En 2020, un record de précision est établi par l'équipe de Jeffrey Hangst, sans trouver d'écart cependant entre antihydrogène et hydrogène.

Des semaines de mesures

En parallèle, ces chercheurs construisaient l'expérience de chute libre qui consiste à faire monter les antihydrogènes dans un cylindre de 5 mètres de hauteur. A son pied arrivent des antiprotons d'un des accélérateurs du CERN, qui montent dans le cylindre grâce à des champs électromagnétiques. Par un canal opposé sont amenés des antiélectrons, que des tensions et champs magnétiques font aussi monter. En bas du cylindre, ces deux gaz se frôlent, se touchent, se rapprochent. Des antiélectrons parviennent à se lier à des antiprotons. Moins d'une centaine d'antiatomes sont obtenus, alors que des millions de particules ont été injectées. Ce petit monde s'agite à quelque 100 mètres par seconde. *« Ils sont comme dans une baignoire de 25 centimètres de long au fond de laquelle ils bougent un peu. Puis on baisse les bords du piège pour les libérer et les faire chuter »*, décrit Pierre Grandemange, cosignataire de l'article de *Nature*.

> « C'est l'une des plus importantes expériences de physique fondamentale jamais réalisées »
>
> STEFAN ULMER
> responsable du programme antimatière du CERN

Et 80 % de ces atomes tombent vers le bas, 20 % vers... le haut ! Il y aurait donc de l'antigravité ? Non. La vitesse au fond de la baignoire étant aléatoire, certains vont assez vite vers le haut pour donner cette impression. Cette proportion 80/20 est en fait celle qui est prévue par la théorie, en tenant compte de ces vitesses résiduelles.

Mais piéger et relâcher les antihydrogènes n'était pas le plus difficile. Ces derniers ont certes une masse, mais ils sont surtout comme des petits aimants. Tout champ magnétique résiduel pourrait les entraîner vers le bas, en faisant croire aux chercheurs que c'est la gravité, ou vers le haut, mimant l'antigravité...

Refroidissement par laser

Lever l'ambiguïté a pris des semaines de mesures et contre-mesures. Un des résultats montre le très haut degré de contrôle obtenu et rassure sur la solidité des conclusions. En augmentant ou diminuant volontairement le champ magnétique, les chercheurs ont pu forcer la montée ou la descente des antiatomes, et donc savoir exactement quand les atomes sont en chute libre, sans biais magnétique.

L'histoire n'est pas terminée. Car si l'expérience exclut que les antiatomes tombent vers le haut, et que très probablement la force de gravité n'est pas nulle, elle laisse encore ouverte la possibilité que cette force ne soit pas exactement la même que pour la matière. Les résultats actuels indiquent qu'elle vaut entre 50 % et 100 % de la valeur pour la matière.

Pour améliorer la précision, les chercheurs vont devoir refroidir encore plus leurs antiatomes, pour quasiment les figer et éviter des mesures « floues ». Ils sont confiants, car la technique qu'ils vont utiliser, un refroidissement par laser, marche déjà à l'horizontale depuis 2021. Jeffrey Hangst, tel un Galilée légendaire du haut de la tour de Pise, se refuse à toute prédiction, mais promet des expériences dès 2024. ■

DAVID LAROUSSERIE

Feu vert pour l'exploitation d'un champ pétrolier en mer du Nord

Le gouvernement britannique, qui soutient la décision, défend la « sécurité énergétique » du Royaume-Uni et inquiète les défenseurs du climat

LONDRES - *correspondante*

La décision est très controversée et exacerbe les critiques contre le gouvernement Sunak, jugé rétrograde dans sa lutte contre le changement climatique. Mercredi 27 septembre, la North Sea Transition Authority (NSTA), l'autorité semi-indépendante britannique chargée de délivrer des permis d'exploitation d'hydrocarbures en mer du Nord, a donné son accord à l'exploitation de l'énorme champ Rosebank, considéré comme le plus important restant encore à exploiter dans la zone. Situé à 130 kilomètres à l'ouest des îles Shetland, Rosebank pourrait contenir jusqu'à 500 millions de barils de pétrole. L'extraction pourrait commencer dès 2026.

Cette autorisation était redoutée depuis des semaines, après que le conservateur Rishi Sunak avait réitéré sa volonté que soient accordées *« des centaines »* de permis d'exploitation d'hydrocarbures en mer du Nord.

M. Sunak a défendu l'aval à Rosebank, assurant que le Royaume-Uni *« a encore besoin »* d'hydrocarbures dans sa transition vers la neutralité carbone en 2050. *« C'est la bonne décision à prendre, pour la sécurité énergétique du pays »*, a insisté le dirigeant, qui s'est distingué par son peu d'intérêt pour les sujets climatiques et a créé la polémique le 20 septembre en repoussant de 2030 à 2035 un engagement-clé du pays : la bascule vers les voitures neuves électriques.

Claire Coutinho, la toute nouvelle ministre de l'énergie, a développé le même type d'argument : Rosebank renforcera l'indépendance énergétique du pays, dans l'intérêt des Britanniques. *« Arrêtons-nous l'exploitation de nos propres champs d'hydrocarbures au risque d'être dépendants de régimes étrangers, de perdre 200 000 emplois dans le pays et de devoir importer du pétrole avec une empreinte carbone bien plus élevée tout en perdant des milliards de revenus pour le Trésor britannique ?*, a interrogé sur le réseau X (ex-Twitter), cette proche de M. Sunak. *Nous devons être pragmatiques, c'est la raison pour laquelle nous soutenons l'autorisation délivrée par la NSTA. »*

> Dans les faits, le pétrole extrait sera vendu sur les marchés internationaux, et pas en priorité au Royaume-Uni

L'exploitation de Rosebank a été accordée à deux entreprises privées, le géant norvégien Equinor (l'opérateur principal, qui détient 80 % du champ) et la société britannique Ithaca Energy. Equinor, sur son site Web, assure que ce projet *« contribue à la sécurité énergétique* [du Royaume-Uni], *à créer des emplois dans le pays et à réduire les émissions globales de CO_2 »*. Le norvégien projette d'électrifier ses plates-formes d'exploitation pour réduire les émissions de CO_2 liées à leur fonctionnement, mais ces travaux ne seront pas achevés avant 2030. Quant aux créations d'emplois, elles sont relativement limitées : 450 postes pour le Royaume-Uni.

« Vandalisme écologique »

Rosebank *« ne fera aucune différence pour les factures d'énergie des Britanniques »*, a critiqué la députée Caroline Lucas, seule élue Verte à la Chambre des communes. De fait, le pétrole extrait du champ sera chargé dans des tankers, vendu sur les marchés internationaux, et pas en priorité au Royaume-Uni.

L'exploitation de Rosebank est *« le pire acte de vandalisme écologique que j'ai connu dans ma vie »*, ajoute l'élue sur le réseau X. La décision britannique est par ailleurs en contradiction avec l'Agence internationale de l'énergie (AIE) qui, dès 2021, recommandait l'abandon de tous les nouveaux projets d'exploitation d'hydrocarbures, pour que le monde ait une chance de limiter la hausse des températures de 1,5 °C. A en croire un groupe de cinquante députés et Lords britanniques, de gauche comme de droite, qui alertaient à ce sujet cet été, l'extraction de ce pétrole pourrait générer la production de 200 millions de tonnes de dioxyde de carbone.

Les dirigeants écossais Humza Yousaf, premier ministre, chef du parti indépendantiste SNP, et Patrick Harvie, dirigeant des Verts écossais, son partenaire de coalition, ont également protesté mercredi, le premier estimant que l'accord donné *« est une mauvaise décision »*, le second dénonçant *« un gouvernement britannique qui après avoir abandonné sa politique climat la semaine dernière, une fois de plus, détruit notre futur »*. Les autorités écossaises n'ont cependant pas leur mot à dire dans l'attribution des licences d'exploitation en mer du Nord.

Le Labour, premier parti d'opposition au Royaume-Uni, s'est montré beaucoup plus prudent. Déterminé à entrer à Downing Street lors des élections générales de 2024, Keir Starmer, son chef de file, a confirmé qu'il ne révoquerait pas la licence Rosebank s'il gagnait les élections.

Les opposants à l'exploitation de Rosebank ne baissent pas les bras. Une manifestation spontanée a eu lieu mercredi devant le ministère de l'énergie à Londres. D'autres sont en préparation. En 2021, dans la foulée de la COP26 à Glasgow, ils avaient réussi à stopper l'attribution de la licence d'exploitation pour le champ pétrolifère Cambo, au nord-ouest des Shetlands. ■

CÉCILE DUCOURTIEUX

Scientists get closer to solving mystery of antimatter

27 September

Artwork: shortly after the Big Bang which created the Universe, matter and antimatter existed in equal amounts

By Pallab Ghosh
Science correspondent

Scientists have made a key discovery about antimatter - a mysterious

physicsworld
TOP 10
BREAKTHROUGH
2023

third time ALPHA has been nominated

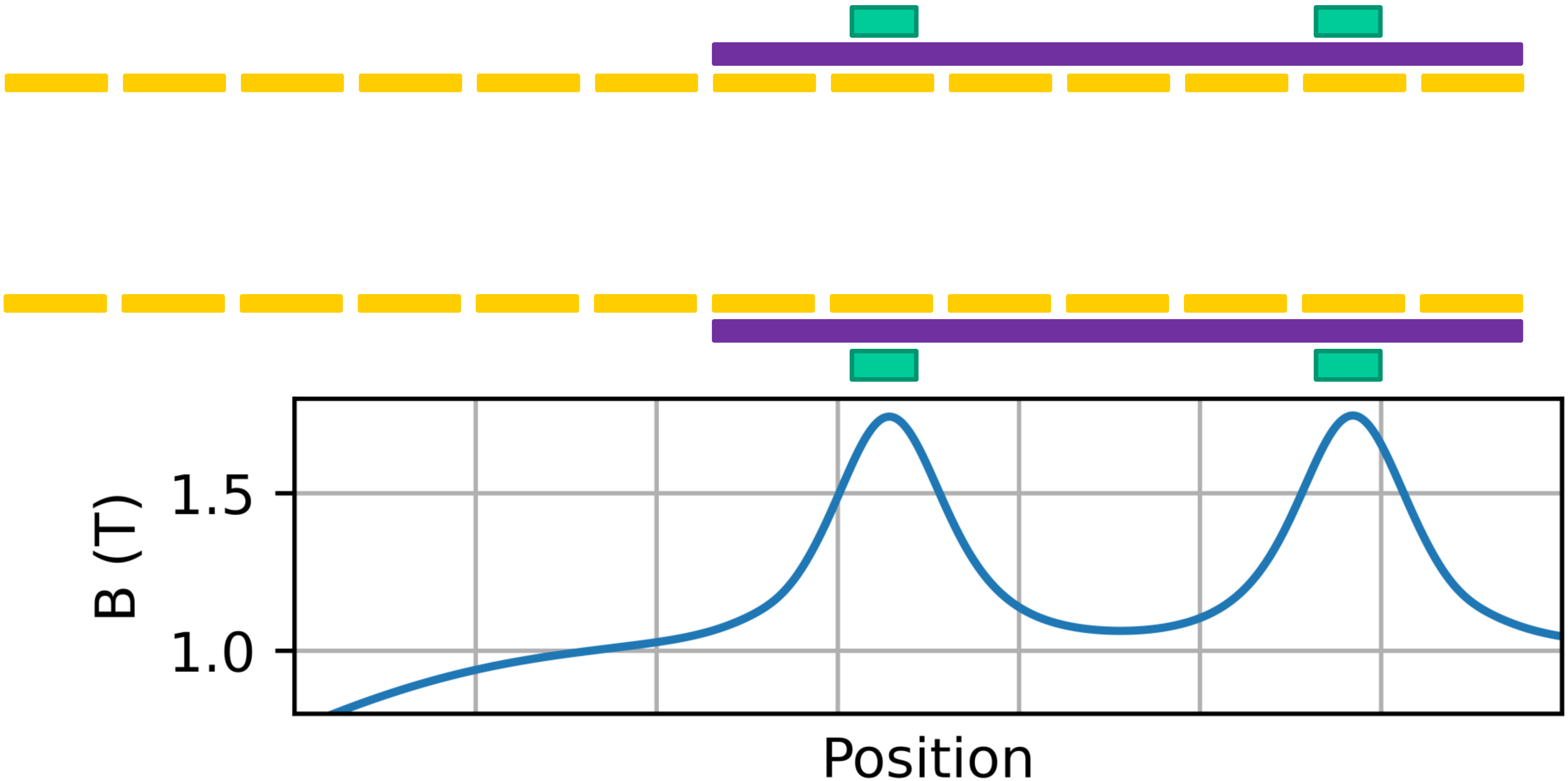
2010: trapping of antihydrogen (won)

2021: laser cooling of antihydrogen (didn’t win)

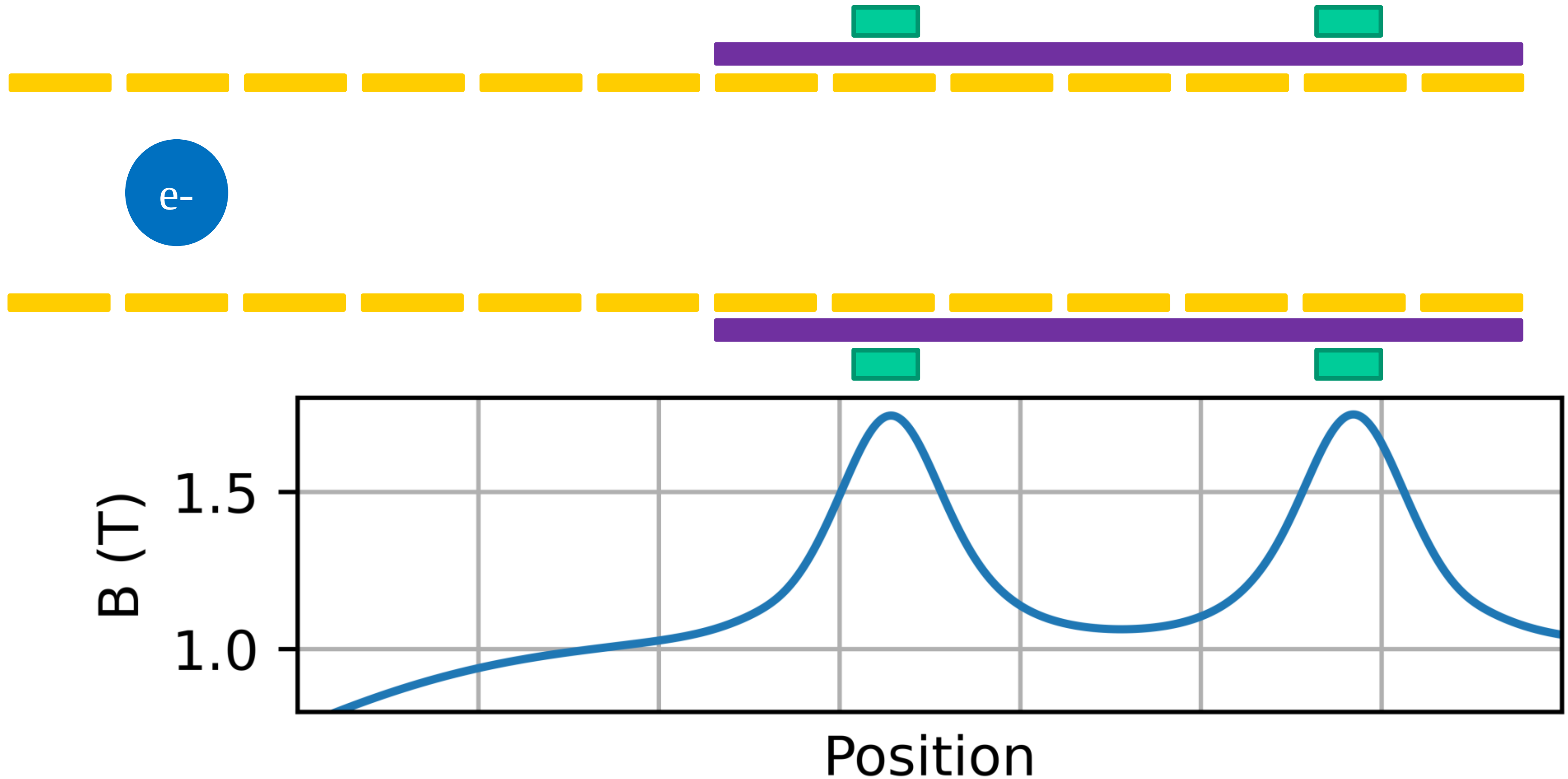
2023: gravity experiment (didn’t win again)

What is Electron cyclotron resonance (ECR) magnetometry?

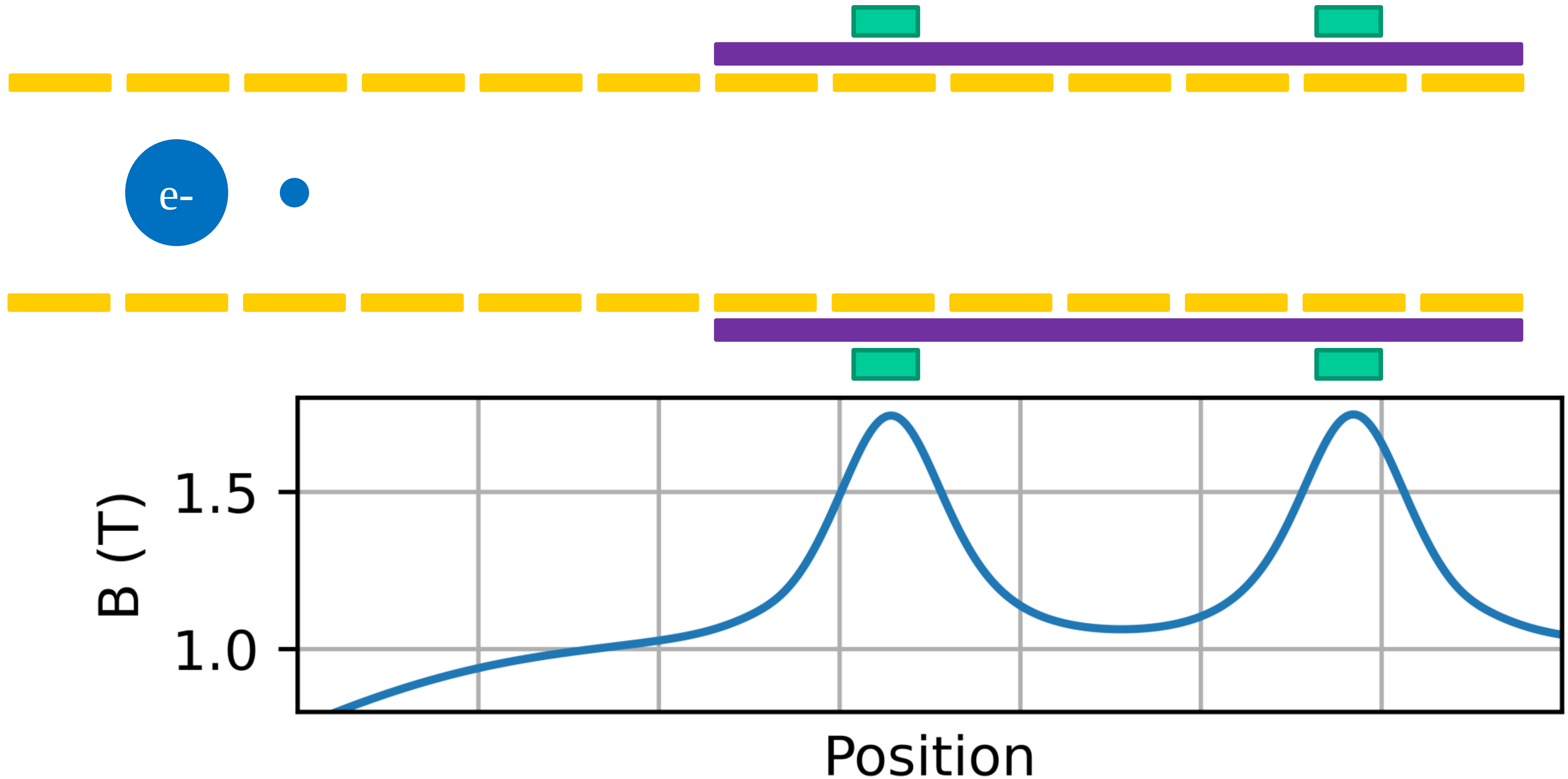
Adam Powell PhD thesis 2024 U. of Calgary



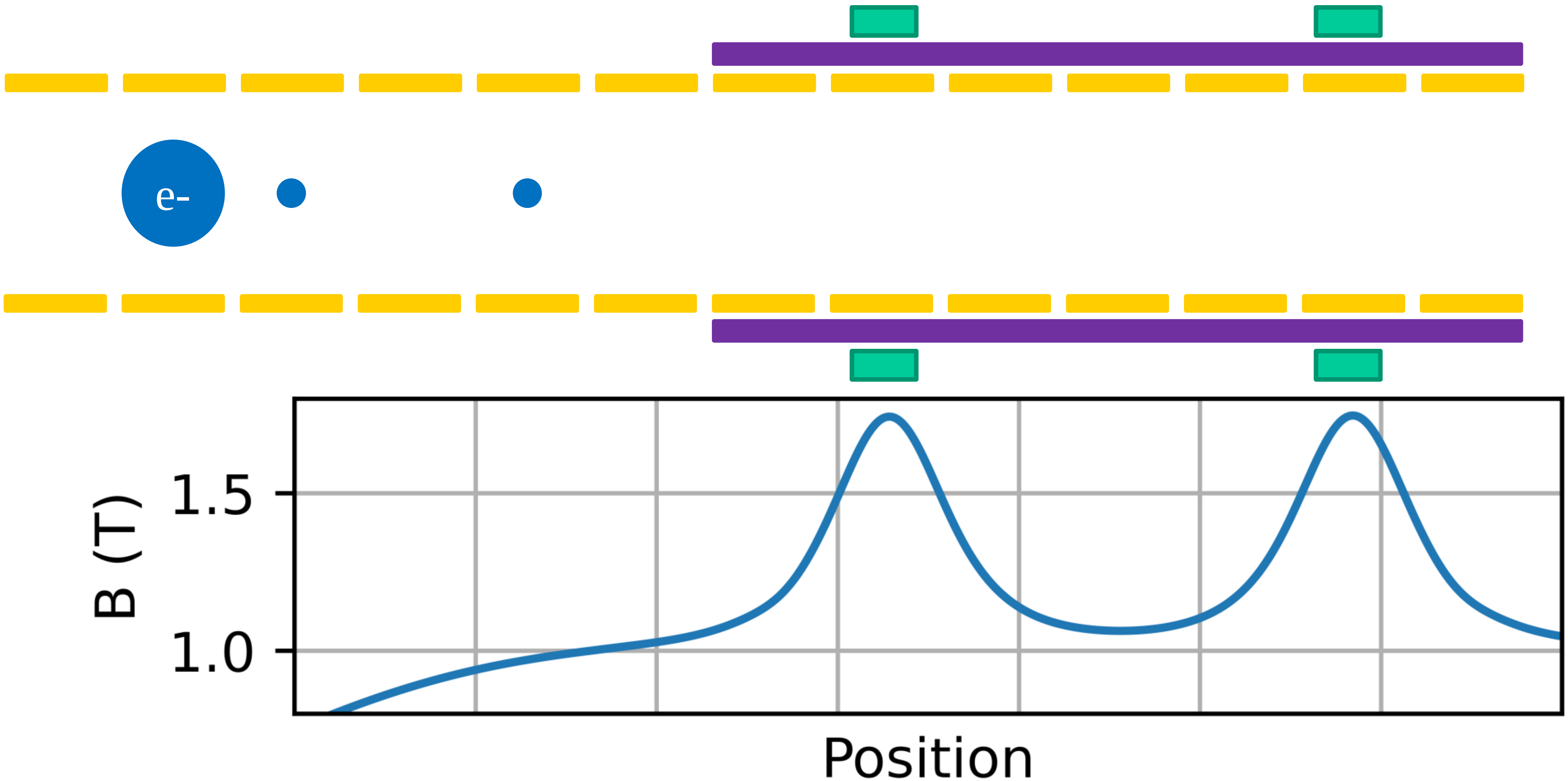
Get an electron plasma



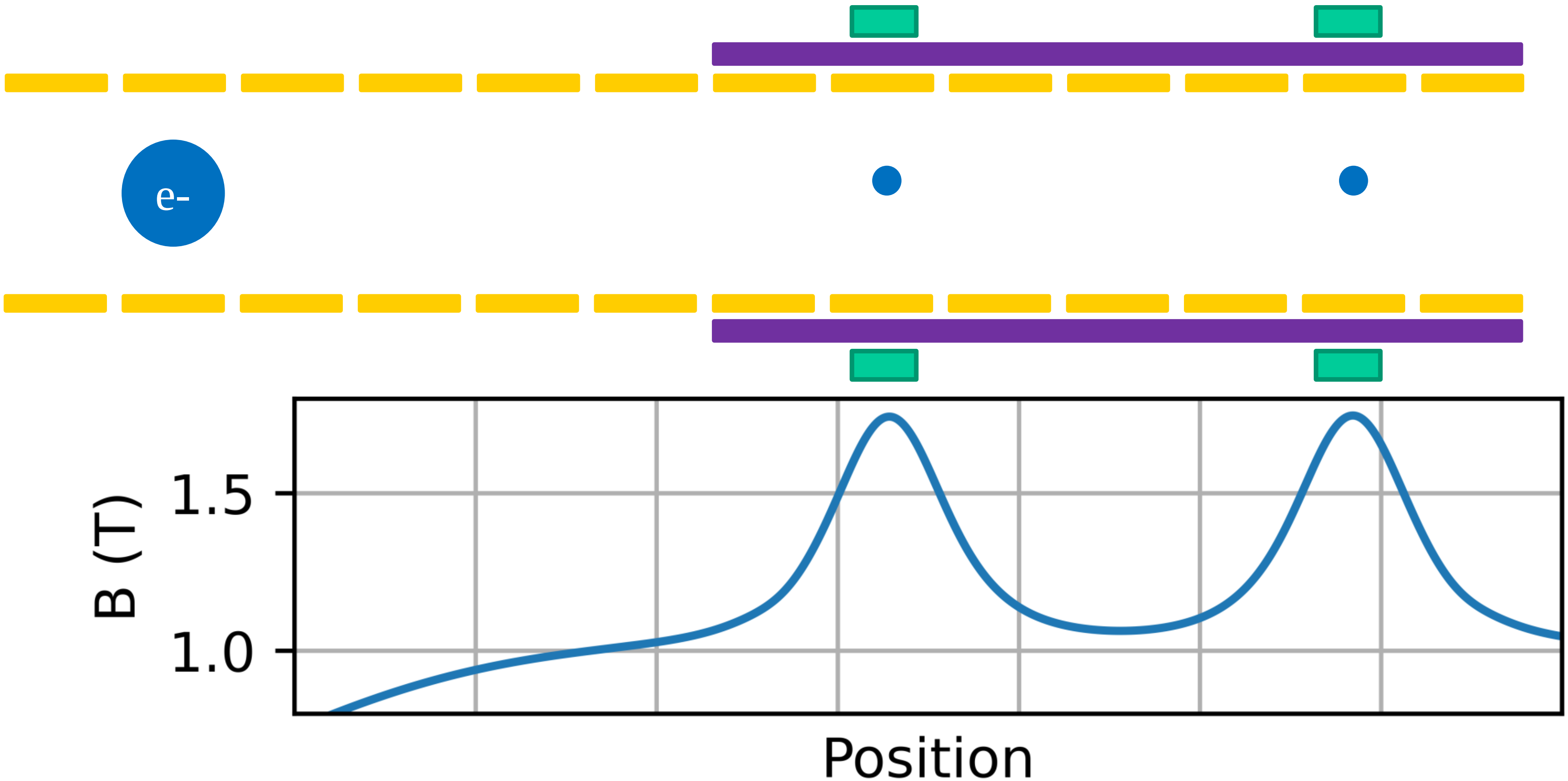
Remove a small "scoop" of electrons



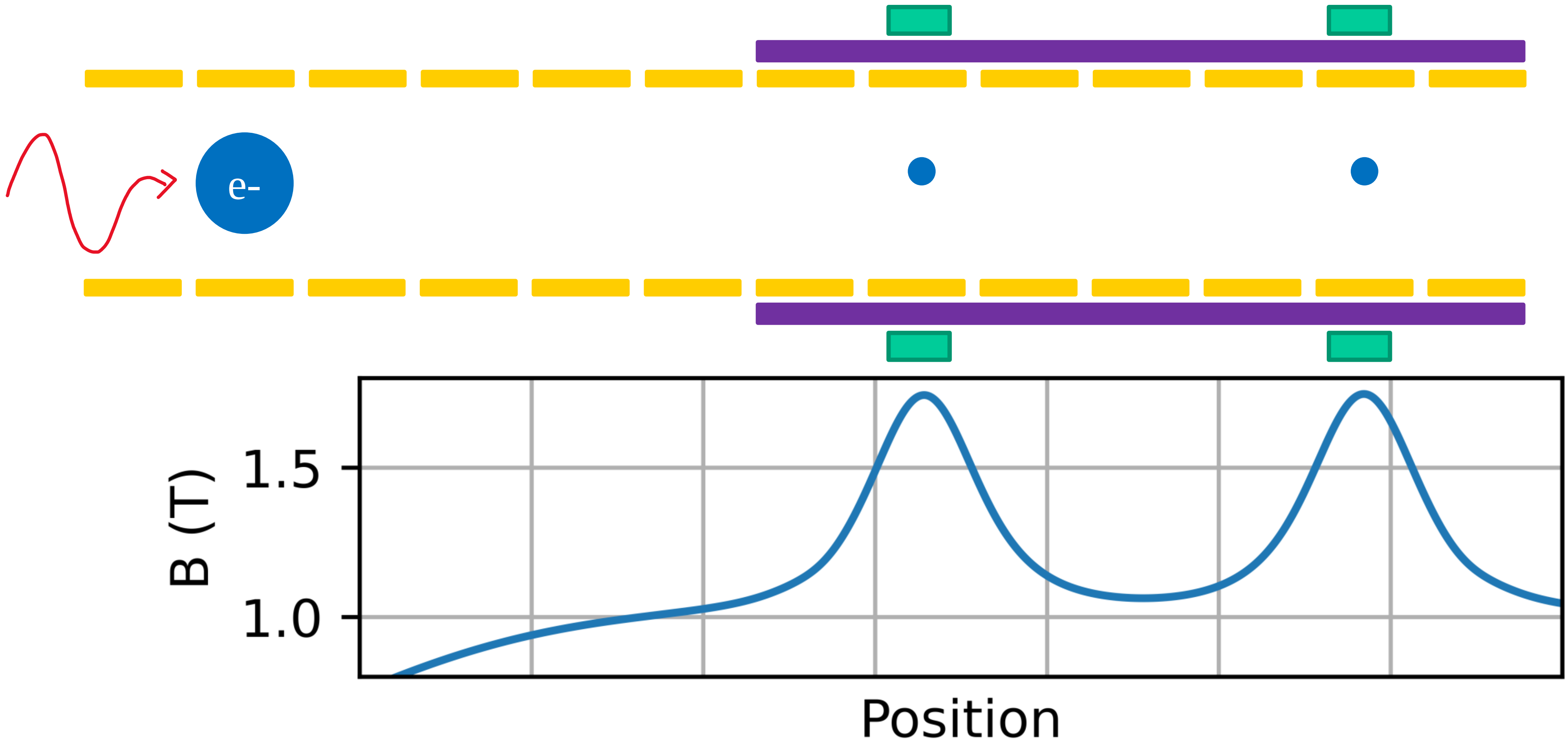
And another



Move to target location

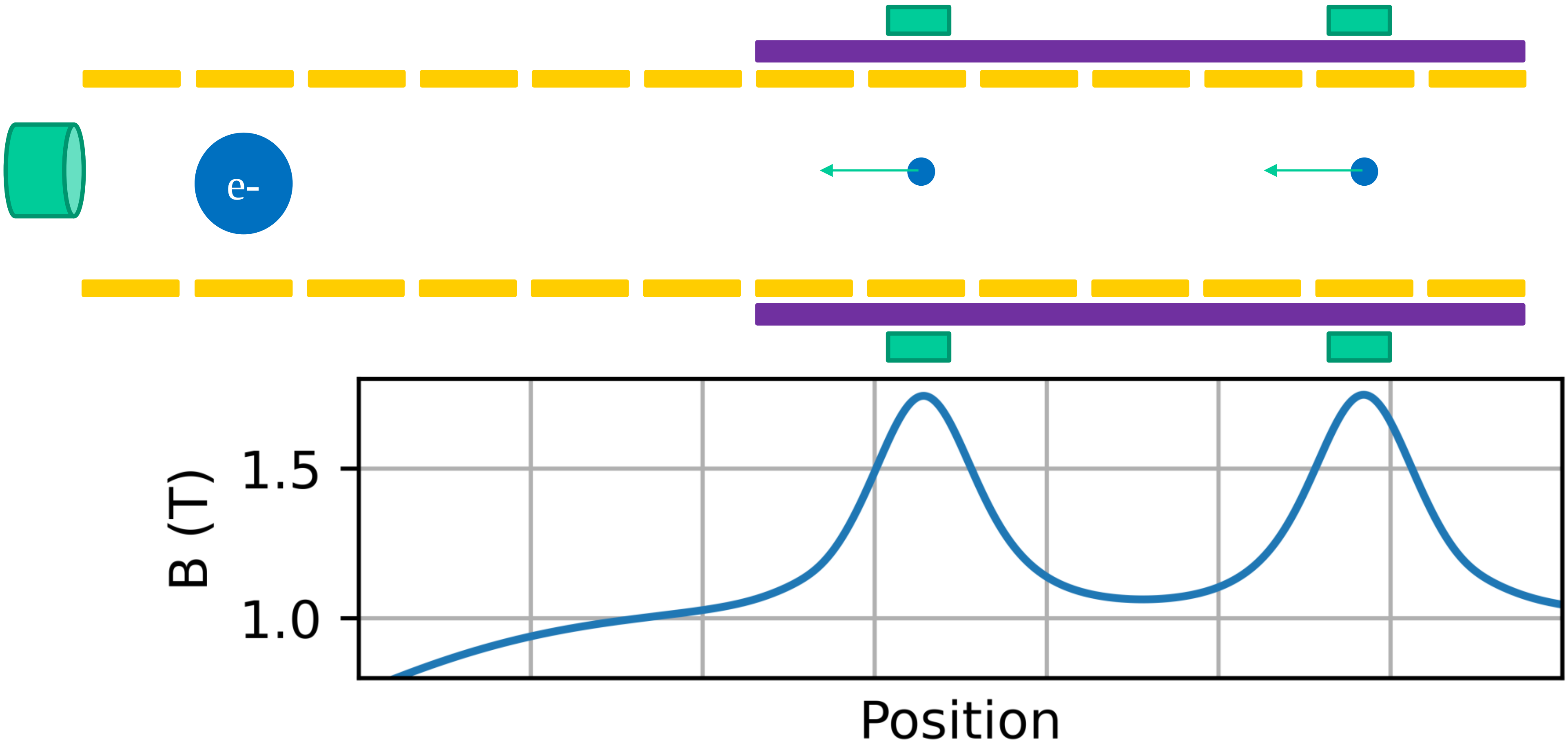


Irradiate with a microwave pulse



Measure temperature of electron "scoops"

MCP detector

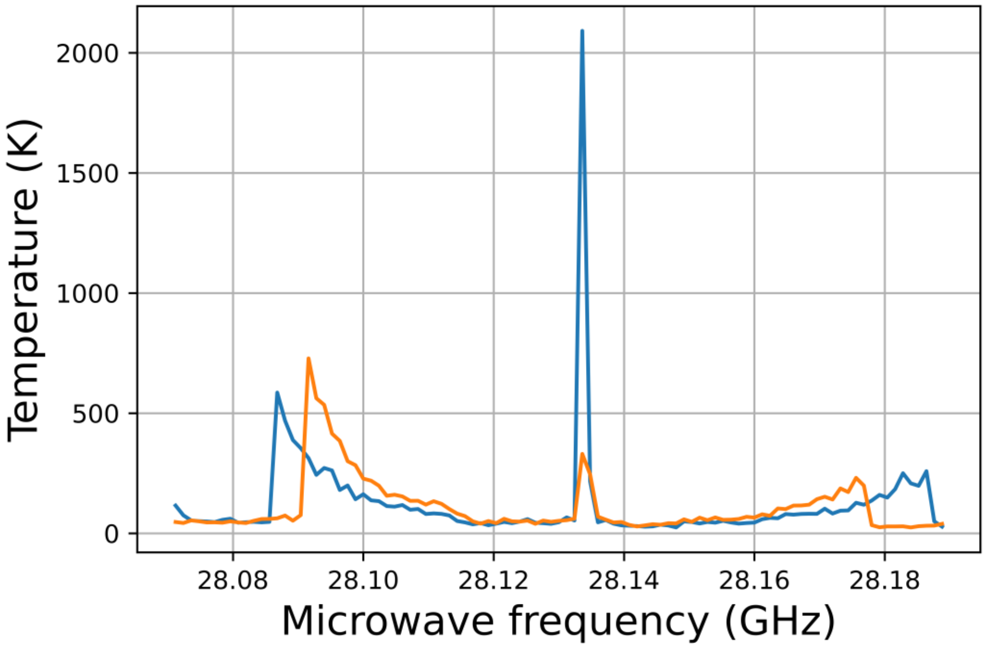


Electron Cyclotron Resonance (ECR) Magnetometry with a Plasma Reservoir
E. D. Hunter, A. Christensen, J. Fajans , T. Friesen, E. Kur, and J. S. Wurtele (2019)

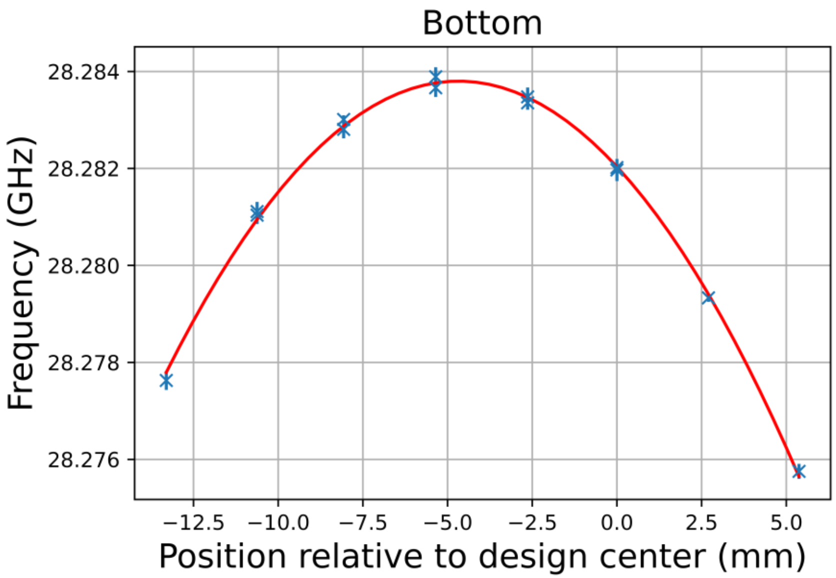
Example ECR Spectrum

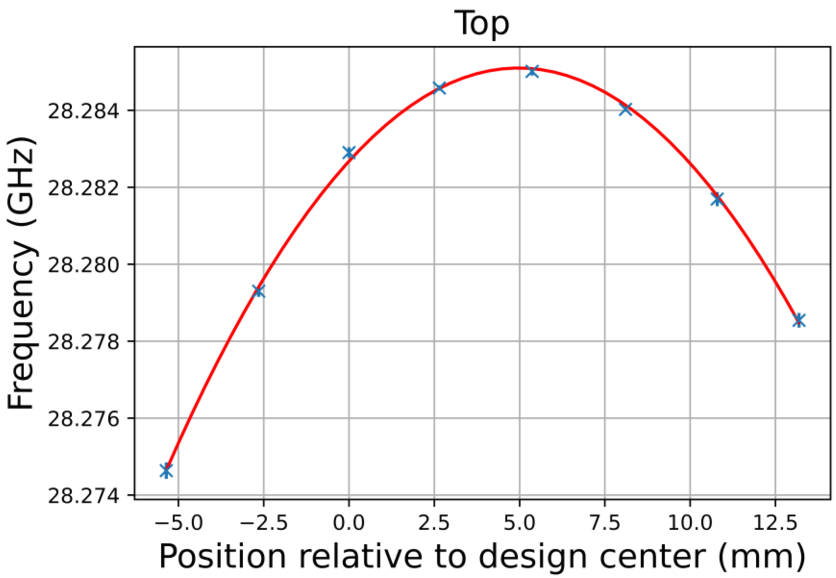
CALGARY

- Narrow central peak = f_c
- Precision related to peak width
- Broad, asymmetric sidebands from electrons axial frequency

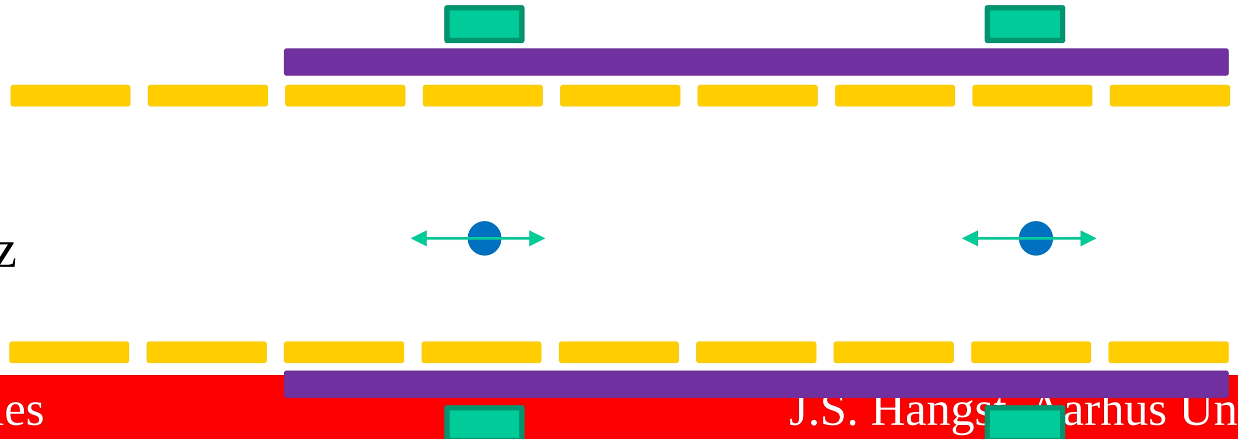


Mapping out the on-axis maxima solenoids

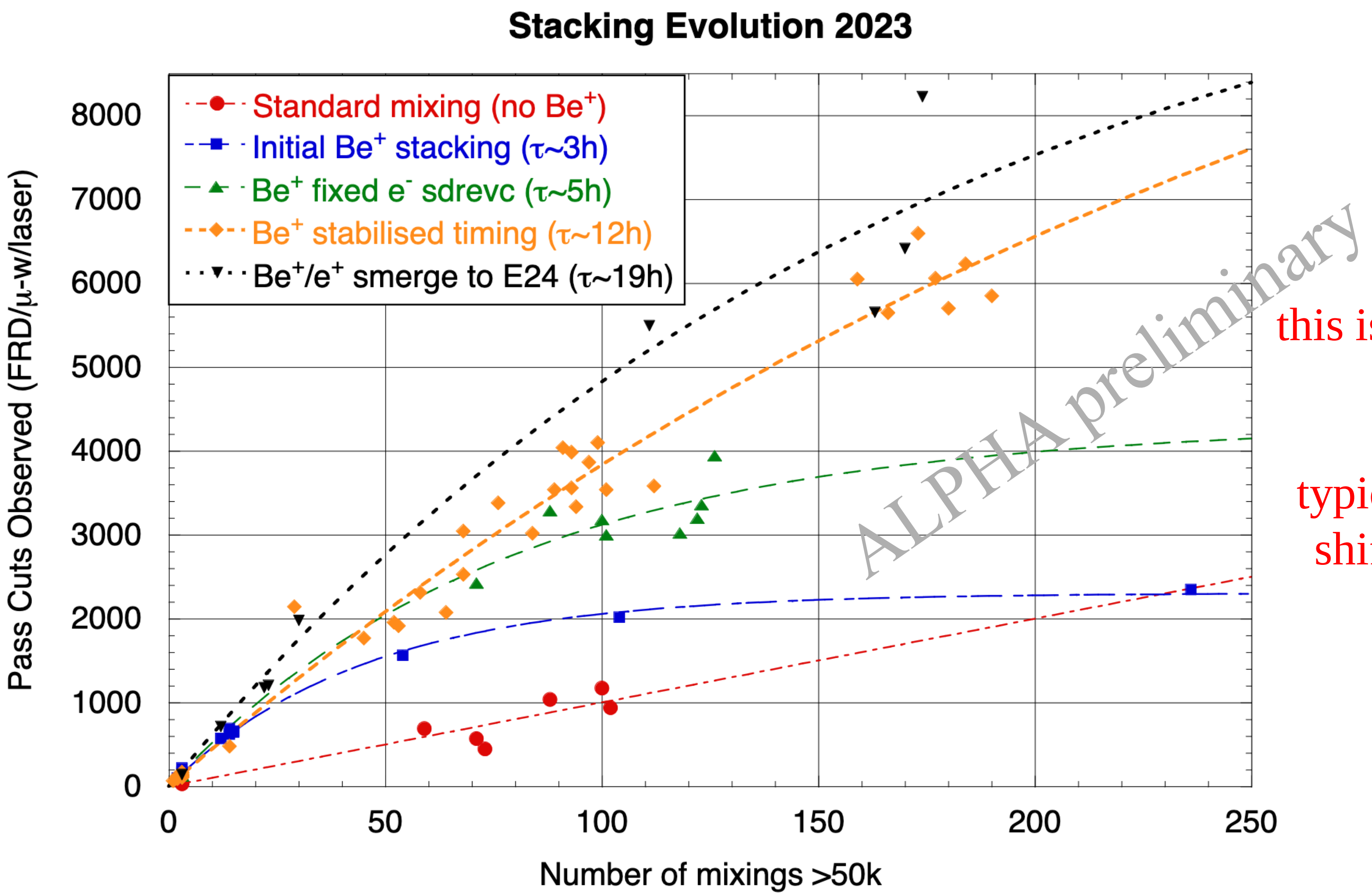




10^{-4} T = 1 Gauss = 2.8 MHz



Accumulation of 10^4 hbars using laser-cooled Be ions



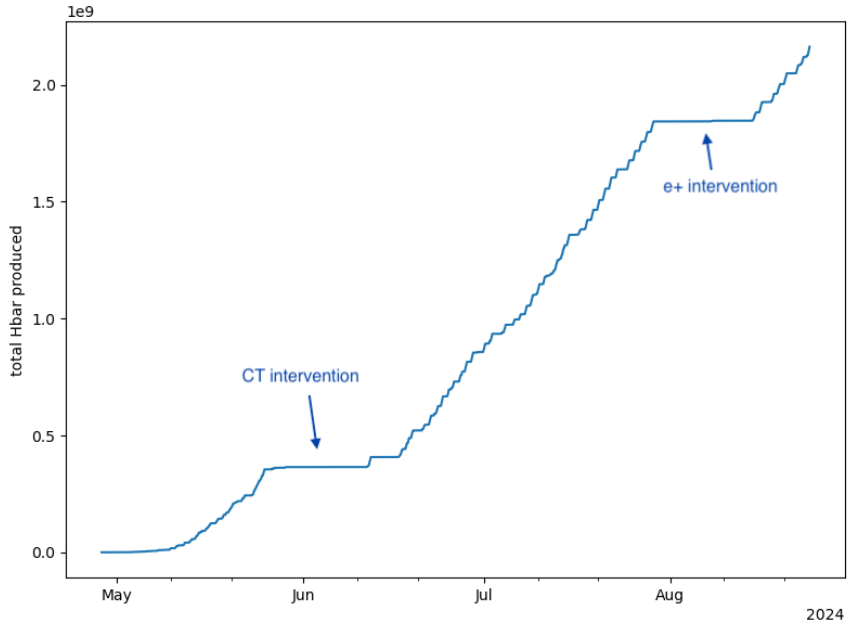
N. Madsen,
M. Goncalves,
K. Thompson *et al.*

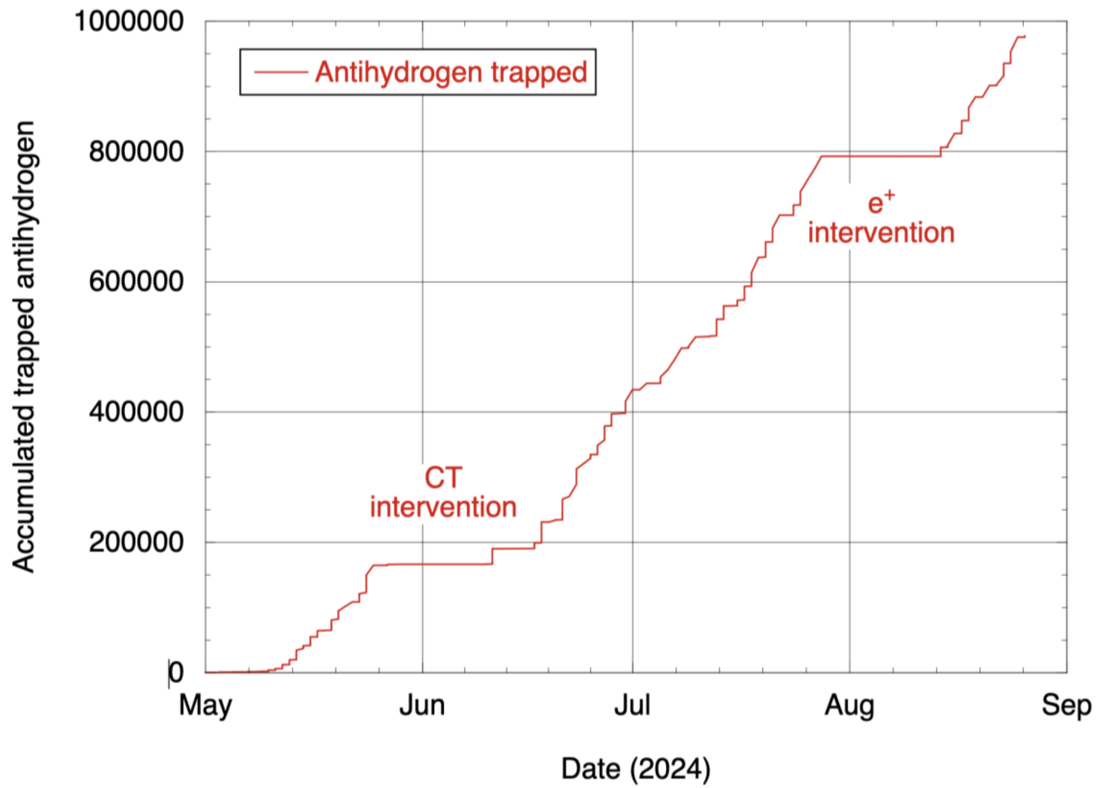
this is about 650 times the rate from 2010

typically stack on night shift – then (cool and) measure

average 15 mixings per hour

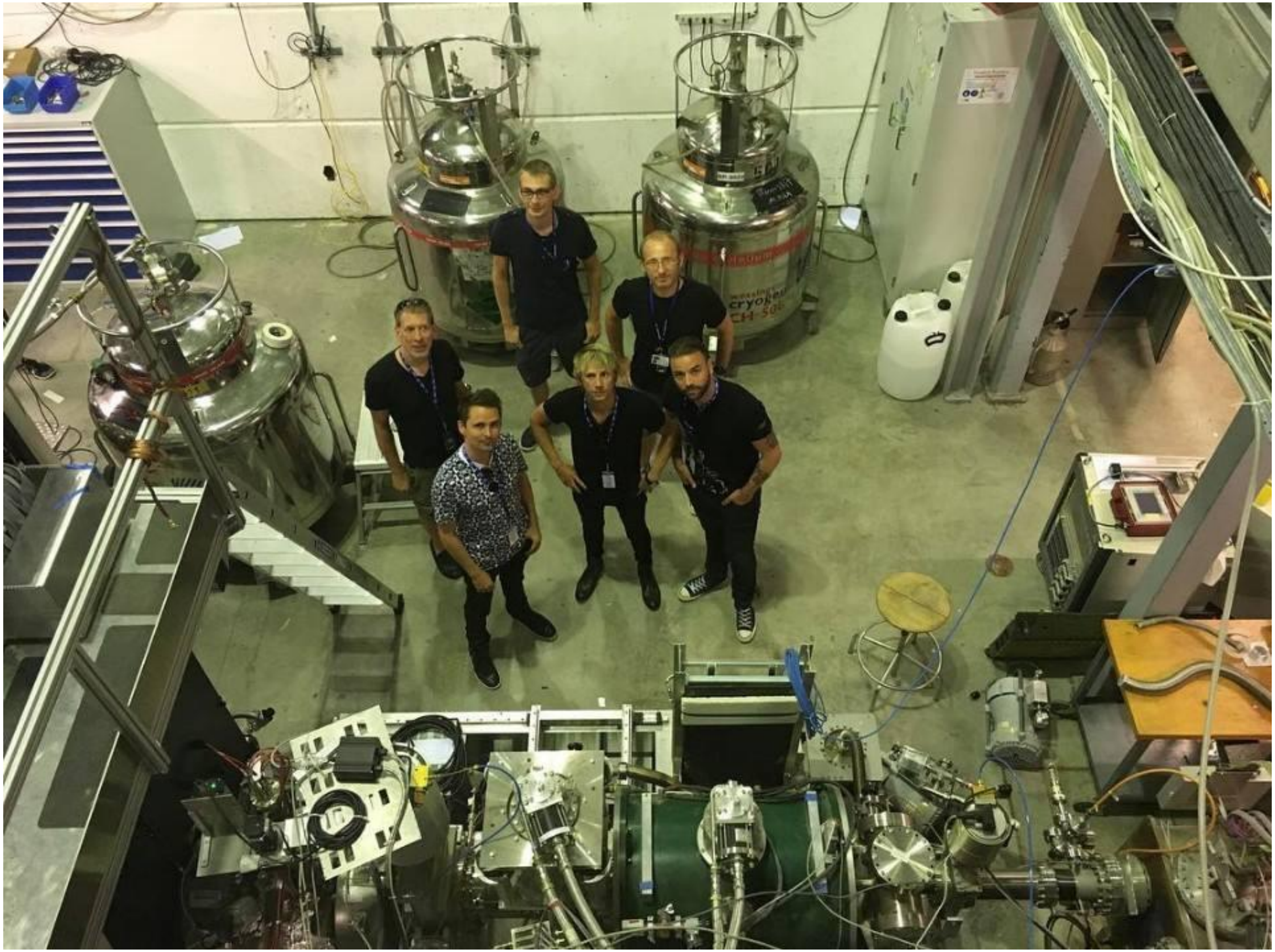
2024 accumulation in ALPHA-2



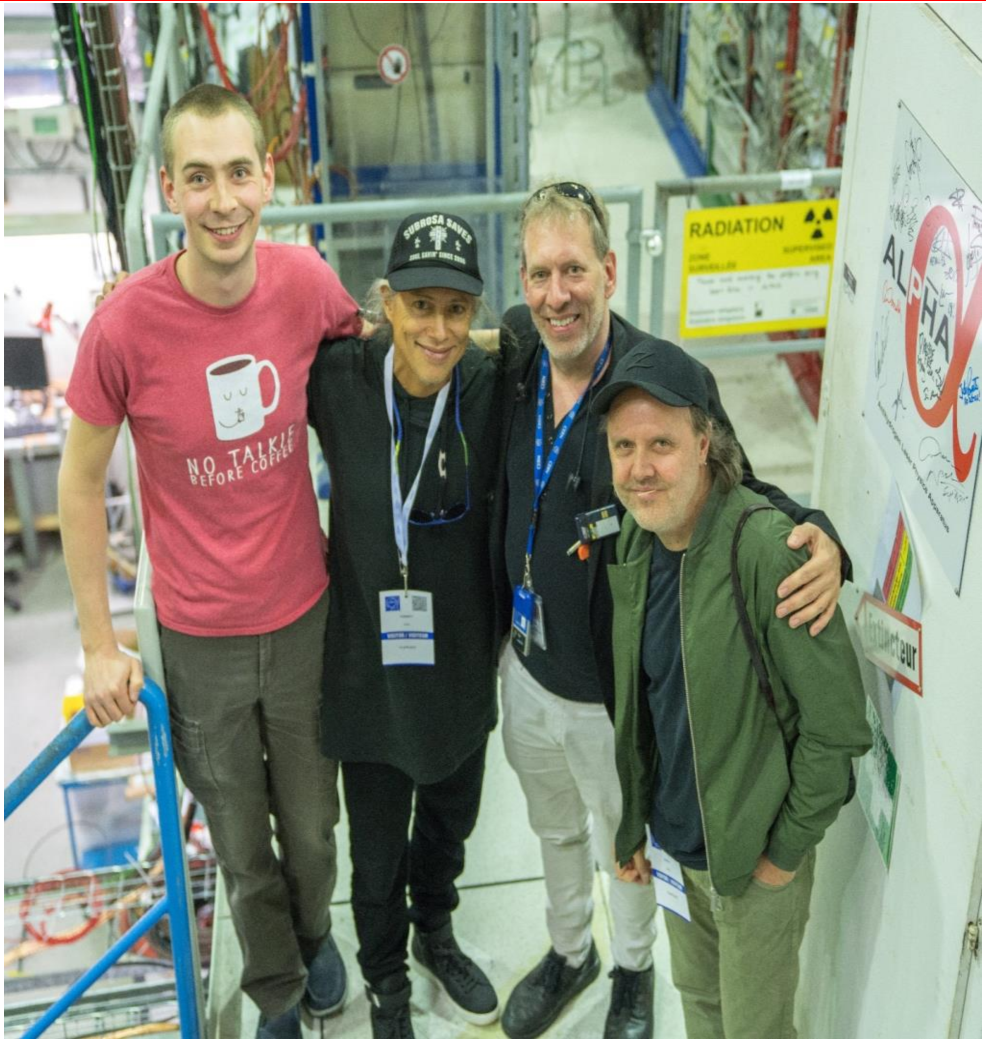


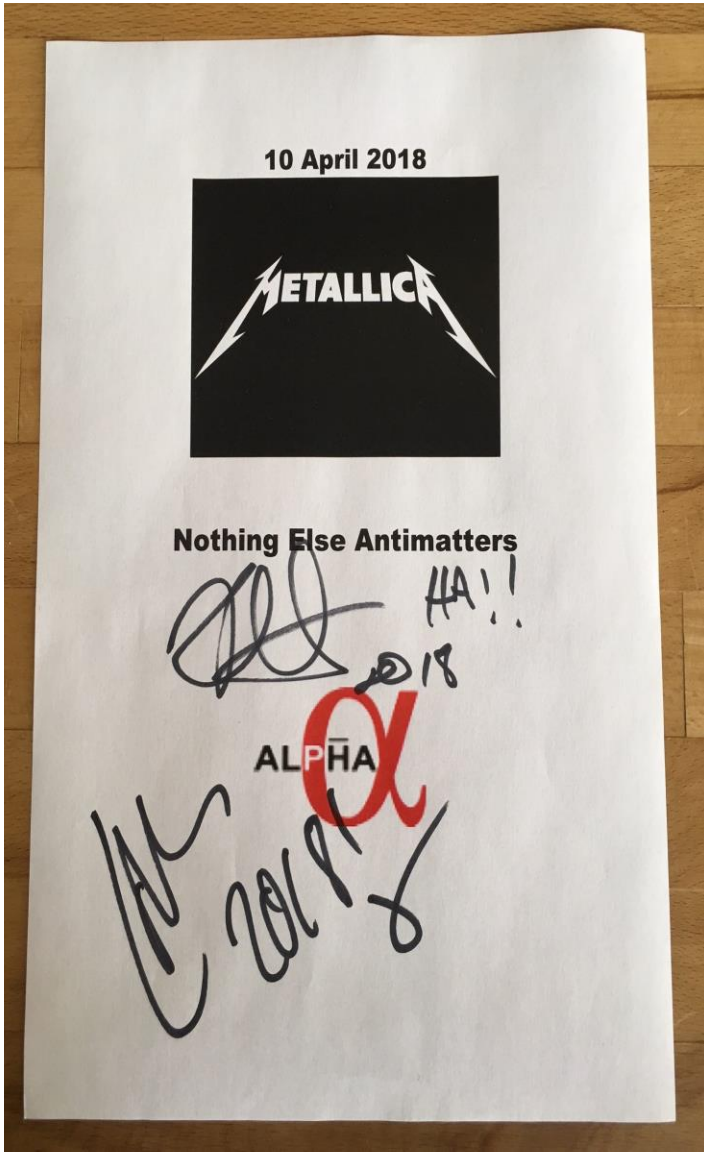
All of our friends are rock stars…Crosby and Nash

All of our friends are rock stars 2…Muse



Metallica


RADIATION
NO TALKIE
BEFORE COFFEE


10 April 2018
METALLICA
Nothing Else Antimatters
HA!!
2018
ALPHA

Jack White

Roger Waters

CERN 13 March 2019

Slayer

garyholt_official • Follow
garyholt_official See this guy? One thing is certain. In any room, anywhere, when he walks into a room, he is the most intelligent guy there. His specialty? PARTICLE MATTER. Jeffrey S. Hangst from CERN. Straight up genius. Some of the guys went for a tour of the Hadron Super Collider yesterday, I sat it out to rest my back. But the show was invaded by scientists today! Slayer and science, match made in hell!! That's SCIENCE BIYATCH!
1d
lisaholt777 I'm hella smarter
7,246 likes
1 DAY AGO
Add a comment...
Post

slayerbandofficial • Follow
CERN
slayerbandofficial Kerry King and Professor Jeffrey Hangst from @cern One man changed music and the other changed science. #Slayer #Cern #AntiMatter #JeffreyHangst #KerryKing #innovators @jeffreyhangst Thanks to @conniepotter1 for setting everything up. @clairewakesa for the tour and @xavier_espinal for taking care of our crew
5d
gtrplayer1 CERN opens the portal to Hell...Slayer same thing kinda. Lol
5d 30 likes Reply
23,513 likes
5 DAYS AGO
Add a comment...
Post

Roger Waters 2

Washington, DC
16 August 2022

Roger Waters 3

Zurich, April 25 2023

Roger Waters 4 (+Nick Mason)

London DSOTM Redux concert

Jane’s Addiction

Carl Verheyen Band (CERN70)