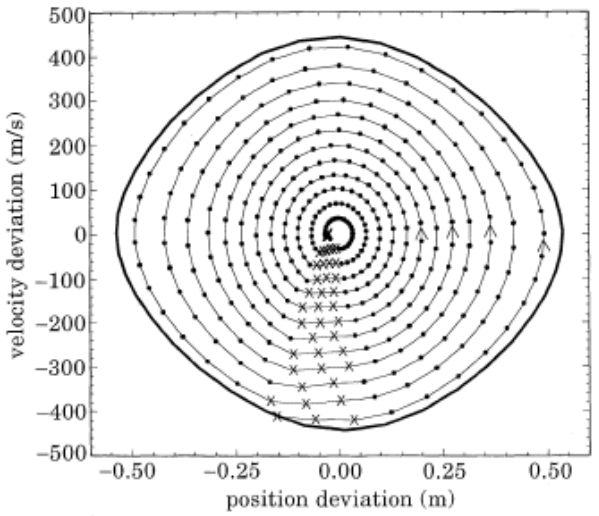
COOL 1993

I used to be one of you…

Laser cooling of a stored ion beam to 1 mK

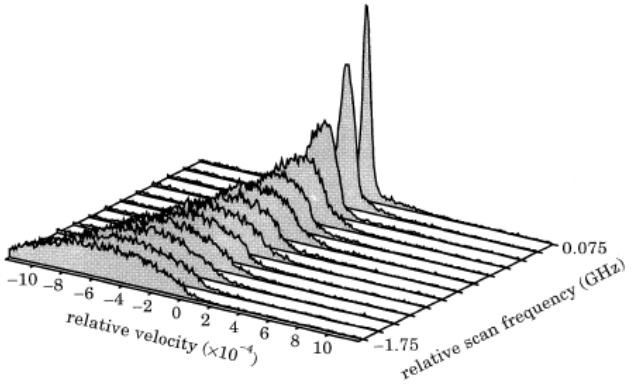
J. S. Hangst, M. Kristensen, J. S. Nielsen, O. Poulsen, J. P. Schiffer, and P. Shi
Phys. Rev. Lett. 67, 1238 – Published 2 September 1991



100 keV ^{7}Li or ^{24}Mg ions in ASTRID

Laser Cooling of a Bunched Beam in a Synchrotron Storage Ring

J. S. Hangst, J. S. Nielsen, O. Poulsen, P. Shi, and J. P. Schiffer
Phys. Rev. Lett. 74, 4432 – Published 29 May 1995



(won an EPS prize ⟶ tenure!)

In the beginning…

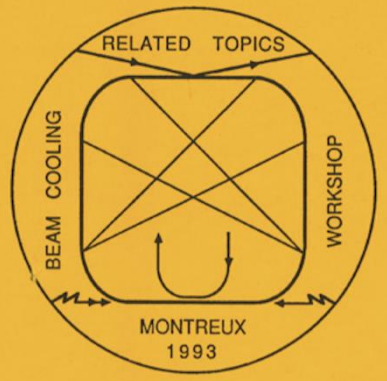
CERN 94–03
26 April 1994
Proton Synchrotron
Division

ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE
CERN EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

WORKSHOP ON

BEAM COOLING AND RELATED TOPICS

Montreux, Switzerland
4–8 October 1993



PROCEEDINGS
Editor: J. Bosser

GENEVA
1994

One more:

VOLUME 74, NUMBER 1 PHYSICAL REVIEW LETTERS 2 JANUARY 1995

Anomalous Schottky Signals from a Laser-Cooled Ion Beam

J. S. Hangst, A. Labrador, V. Lebedev, N. Madsen, J. S. Nielsen, O. Poulsen, and P. Shi
Institute of Physics and Astronomy, Aarhus University, Denmark

J. P. Schiffer
Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439
and The University of Chicago, Chicago, Illinois 60637
(Received 21 September 1994)

Fundamental Physics with Antihydrogen

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

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 `

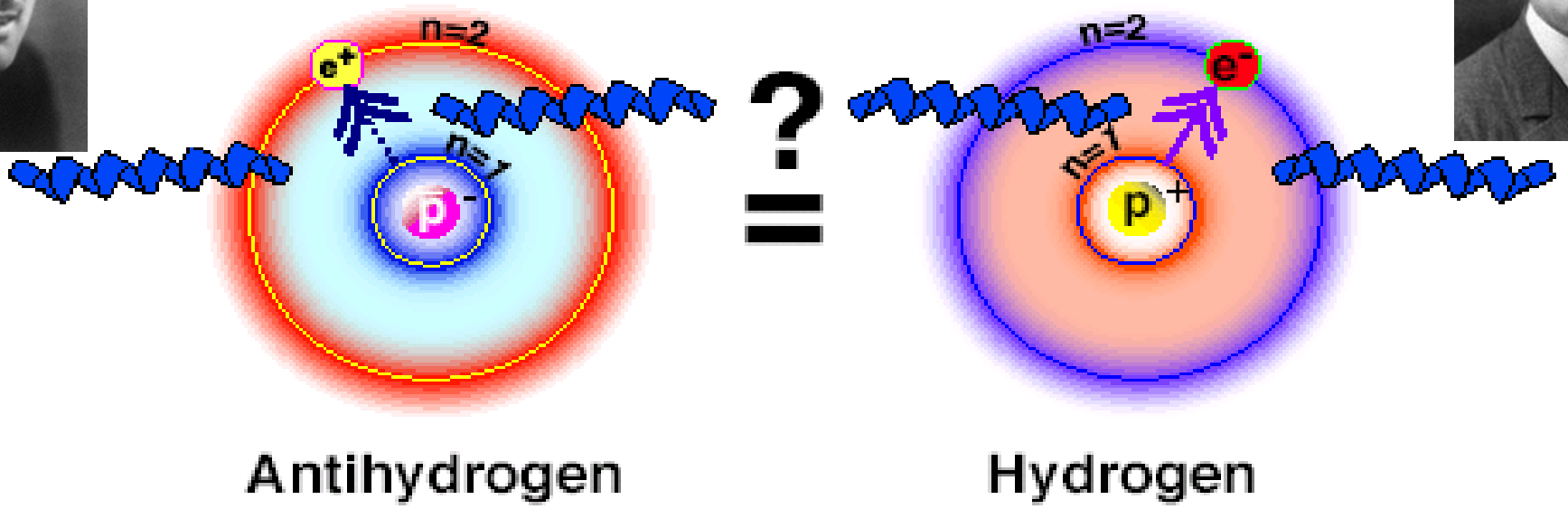
TRIUMF, Canada

University of Wales Swansea, UK

Cockcroft Institute, UK

York University, Canada

The Physics Question



Antihydrogen Hydrogen

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

Motivations in Brief

•Tests of fundamental symmetries by applying ***precise*** and ***accurate*** 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 – two previously approved experiments at CERN; AEGIS and Gbar – first actual measurement by ALPHA in 2022

•… of course this is all ***motivated*** by the apparent baryon asymmetry in the universe

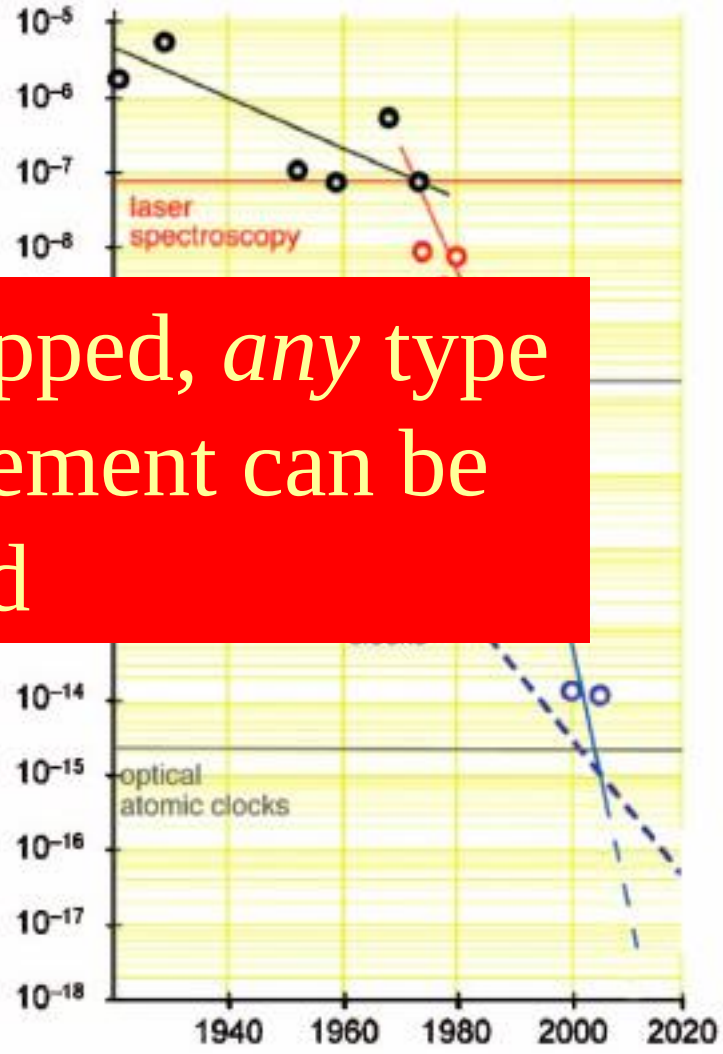
The *Holy Grail* - Antihydrogen Spectroscopy

1s-2s two-photon spectroscopy

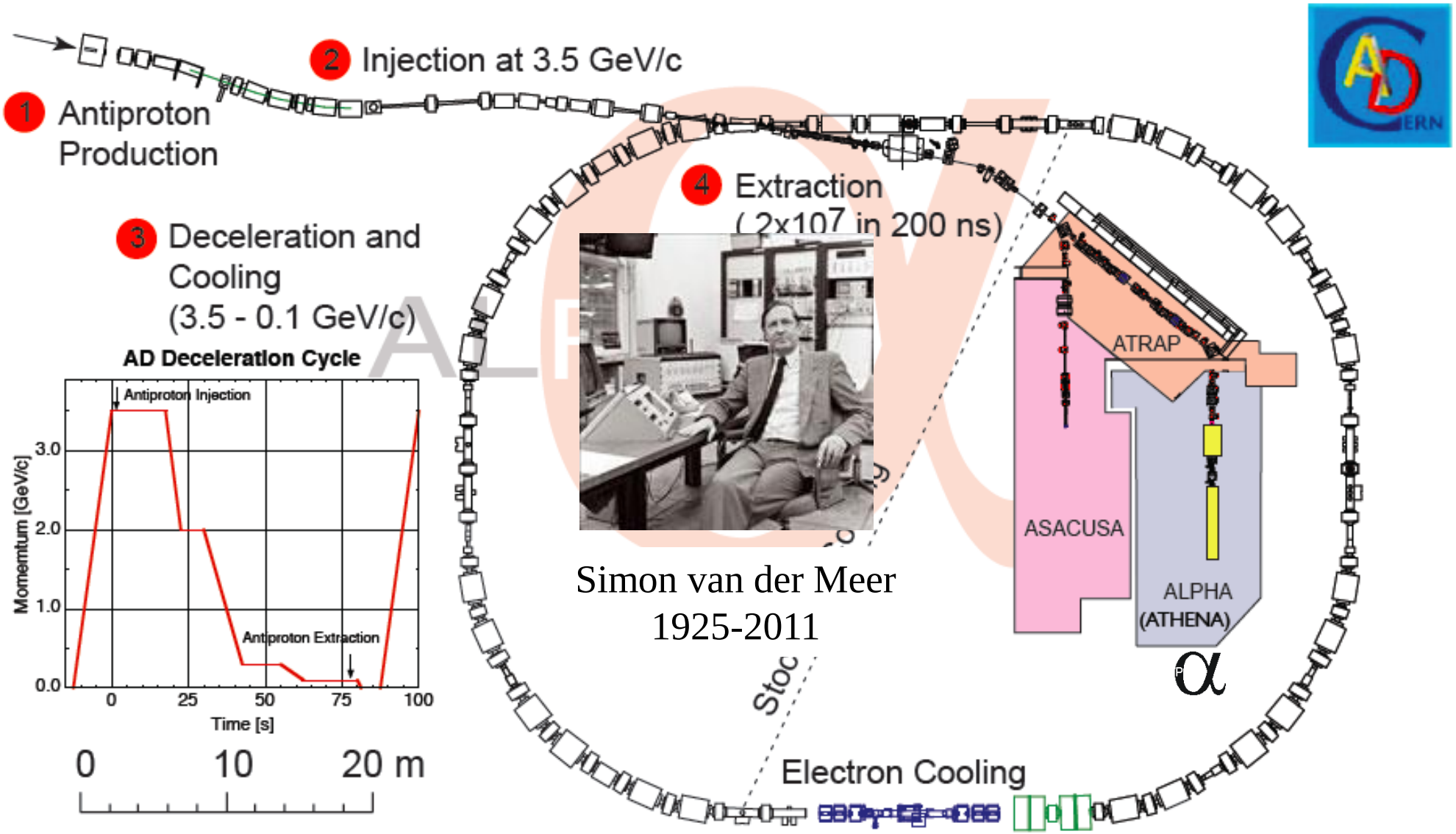
If antihydrogen can be trapped, *any* type of spectroscopic measurement can be contemplated

Antihydrogen Hydrogen

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

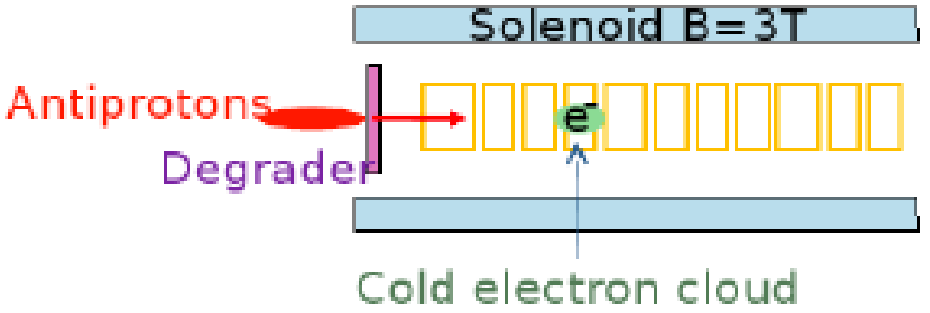


The CERN AD

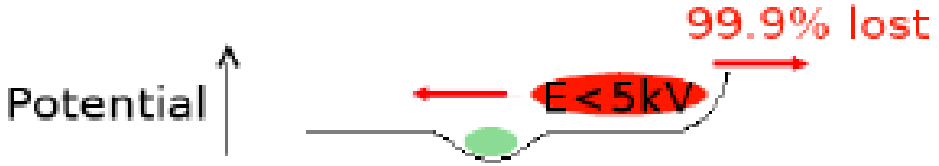

1 Antiproton Production
2 Injection at 3.5 GeV/c
3 Deceleration and Cooling (3.5 - 0.1 GeV/c)
4 Extraction (2x10^7 in 200 ns)
AD Deceleration Cycle
Antiproton Injection
Antiproton Extraction
Momentum [GeV/c]
Time [s]
0 10 20 m
Simon van der Meer
1925-2011
ATRAP
ASACUSA
ALPHA (ATHENA)
Electron Cooling

Capture and Cooling of Antiprotons

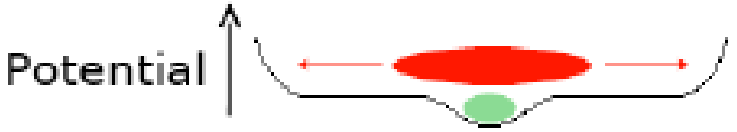
1) Degrading
(t = 0s)



2) Reflecting
(t = 200ns)



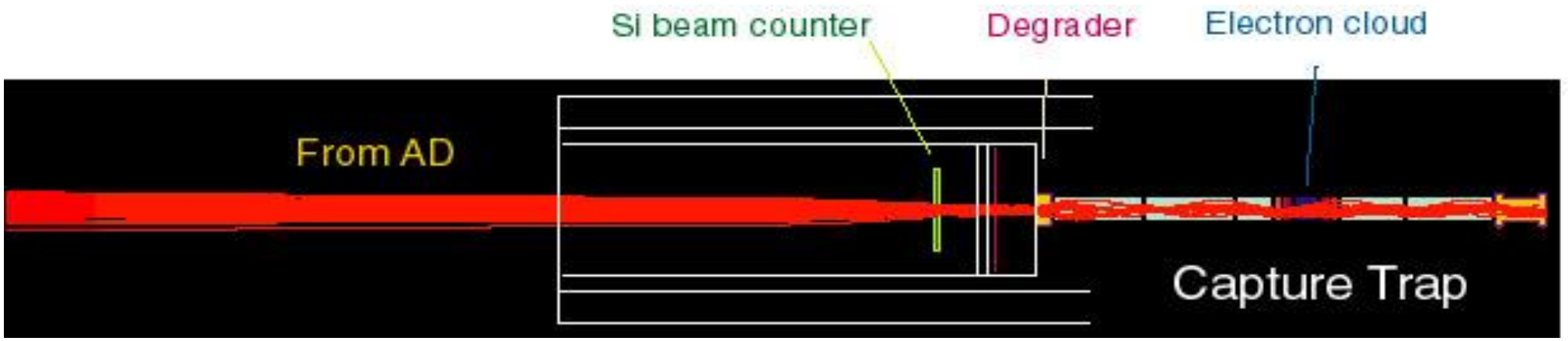
3) Trapping
(t = 500ns)

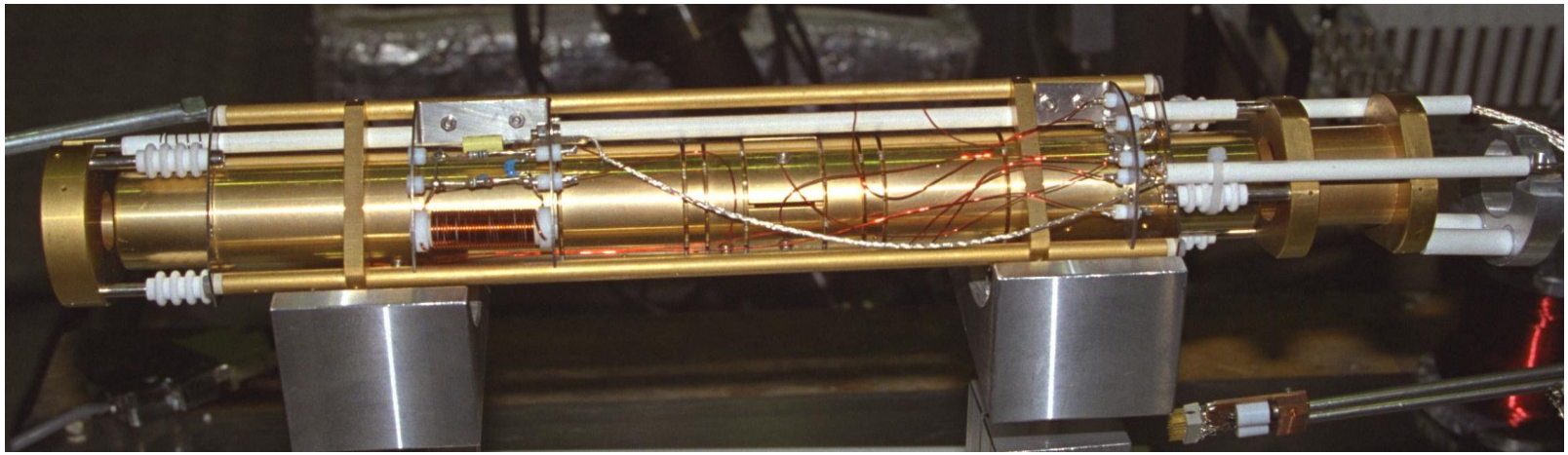


4) Cooling
(t = ~20s)

Technique developed by the *TRAP* collaboration at LEAR

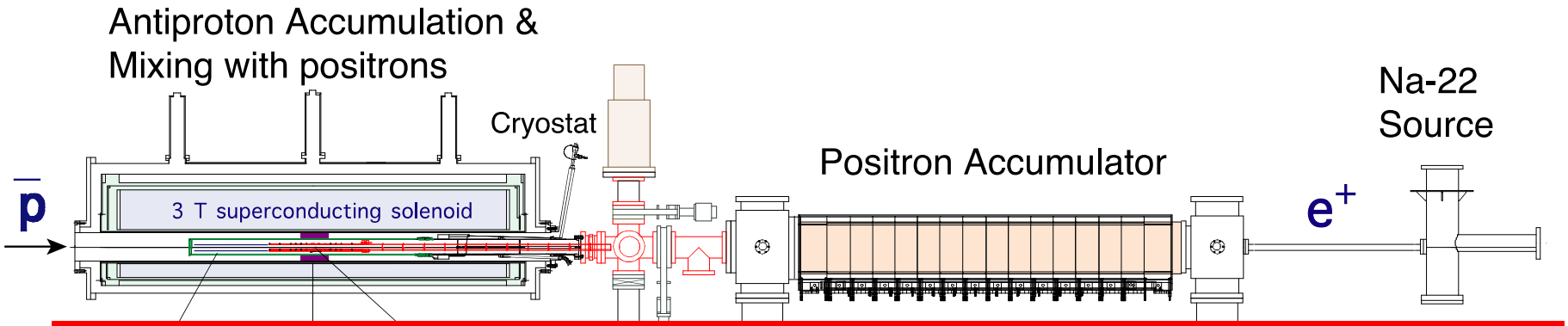
Antiproton Slowing and Catching (ATHENA)



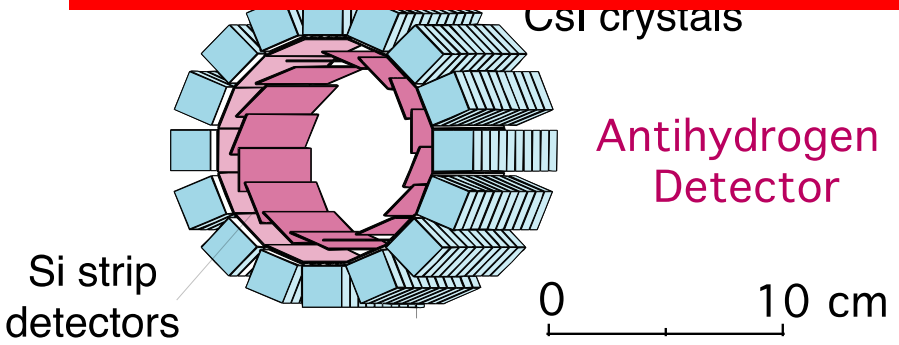


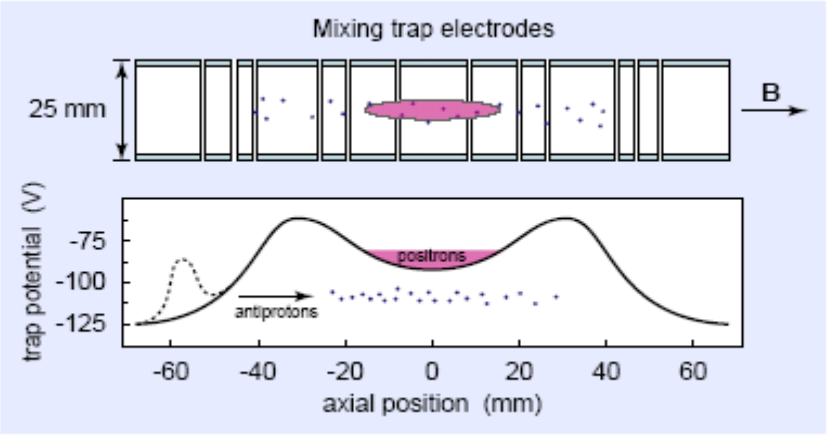
Ab **100000 (ALPHA)** rotons are captured from an AD shot.

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

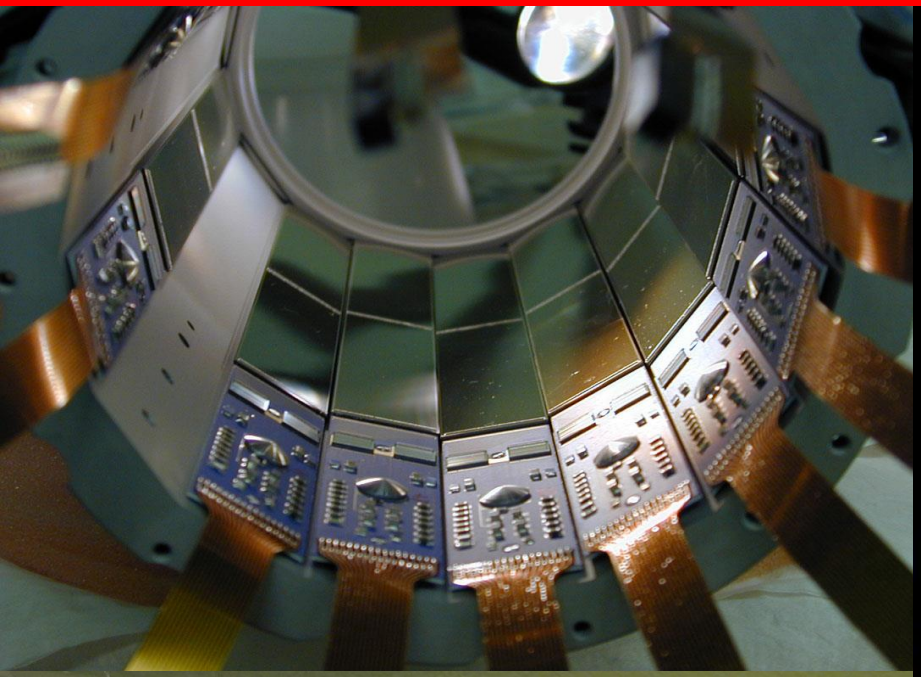


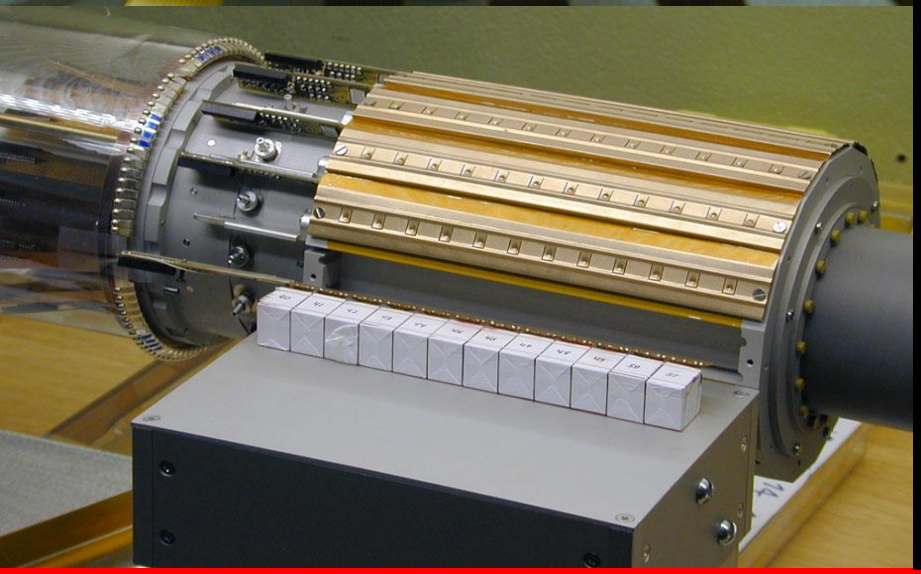
BTW: this is the experiment that inspired Dan Brown's: *Angels and Demons*

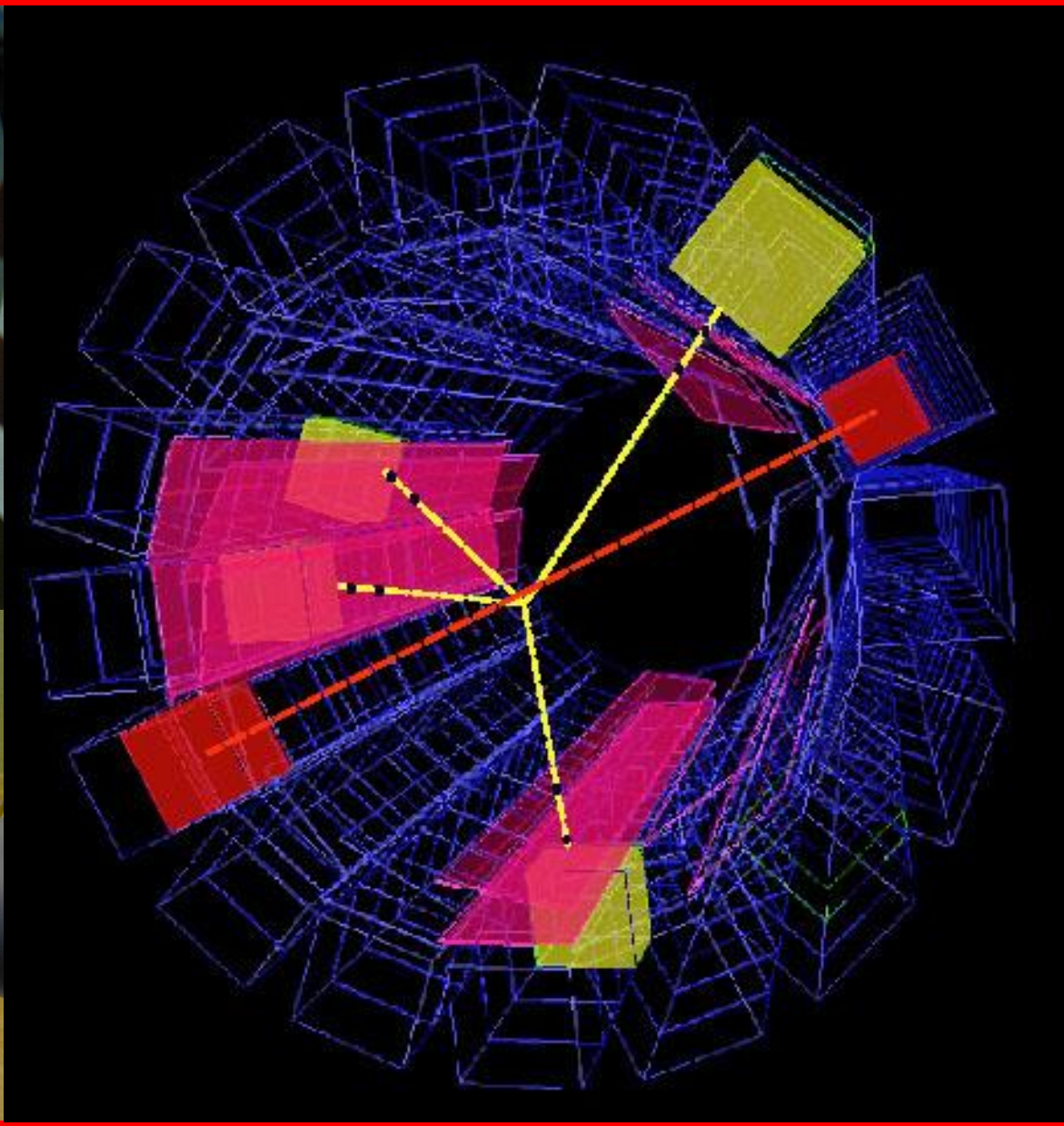


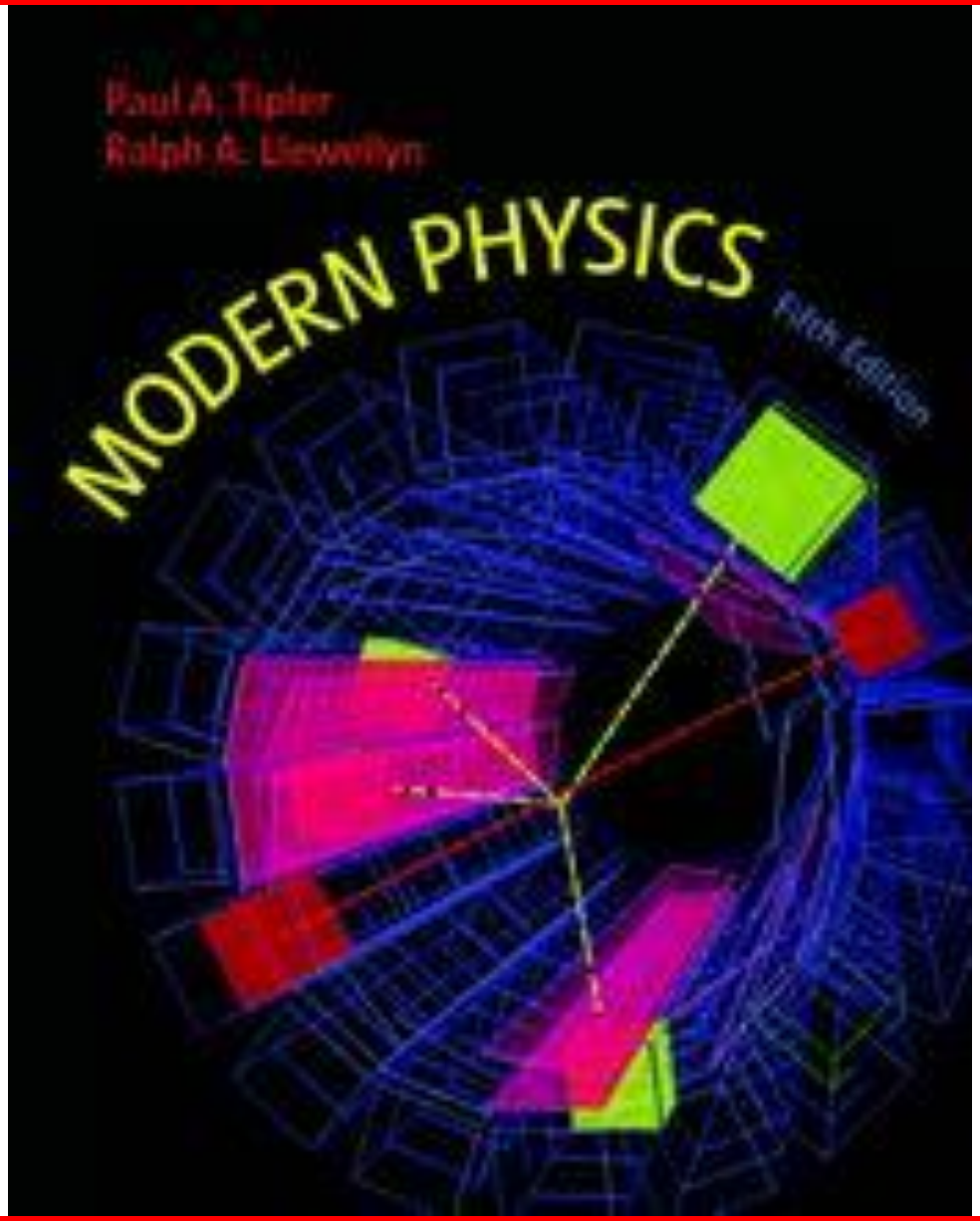


ATHENA Detector



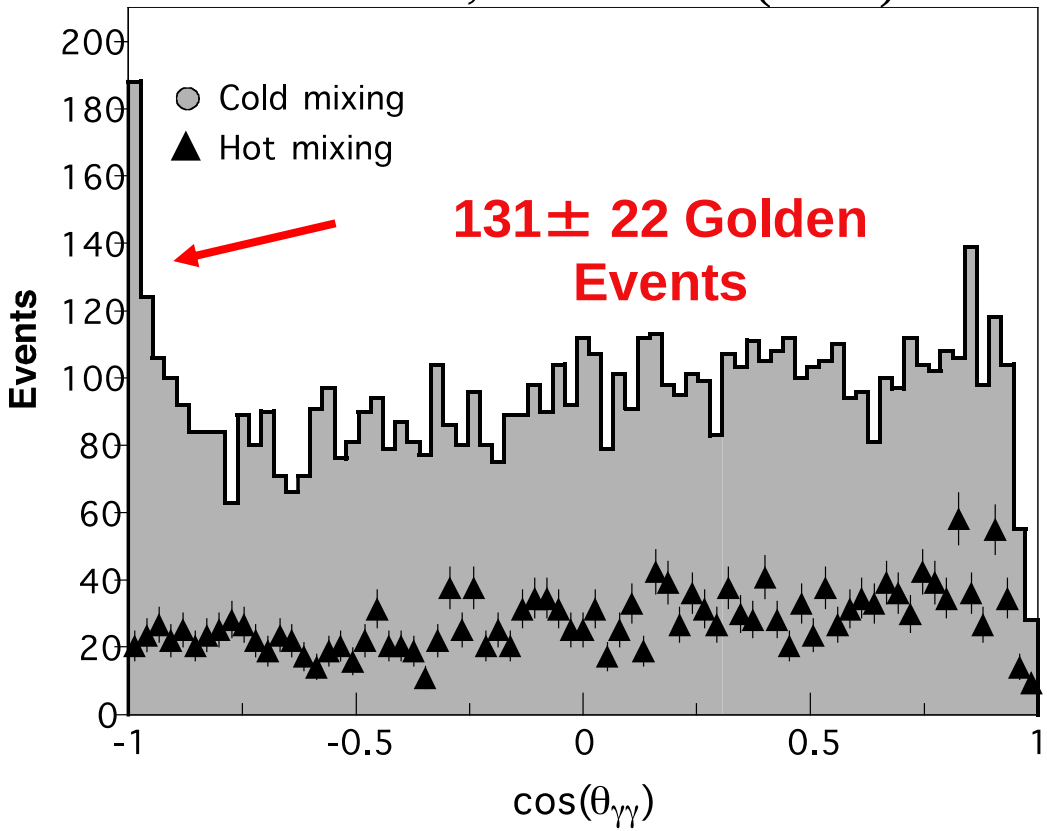





Paul A. Tipler
Ralph A. Llewellyn
MODERN PHYSICS
Fifth Edition

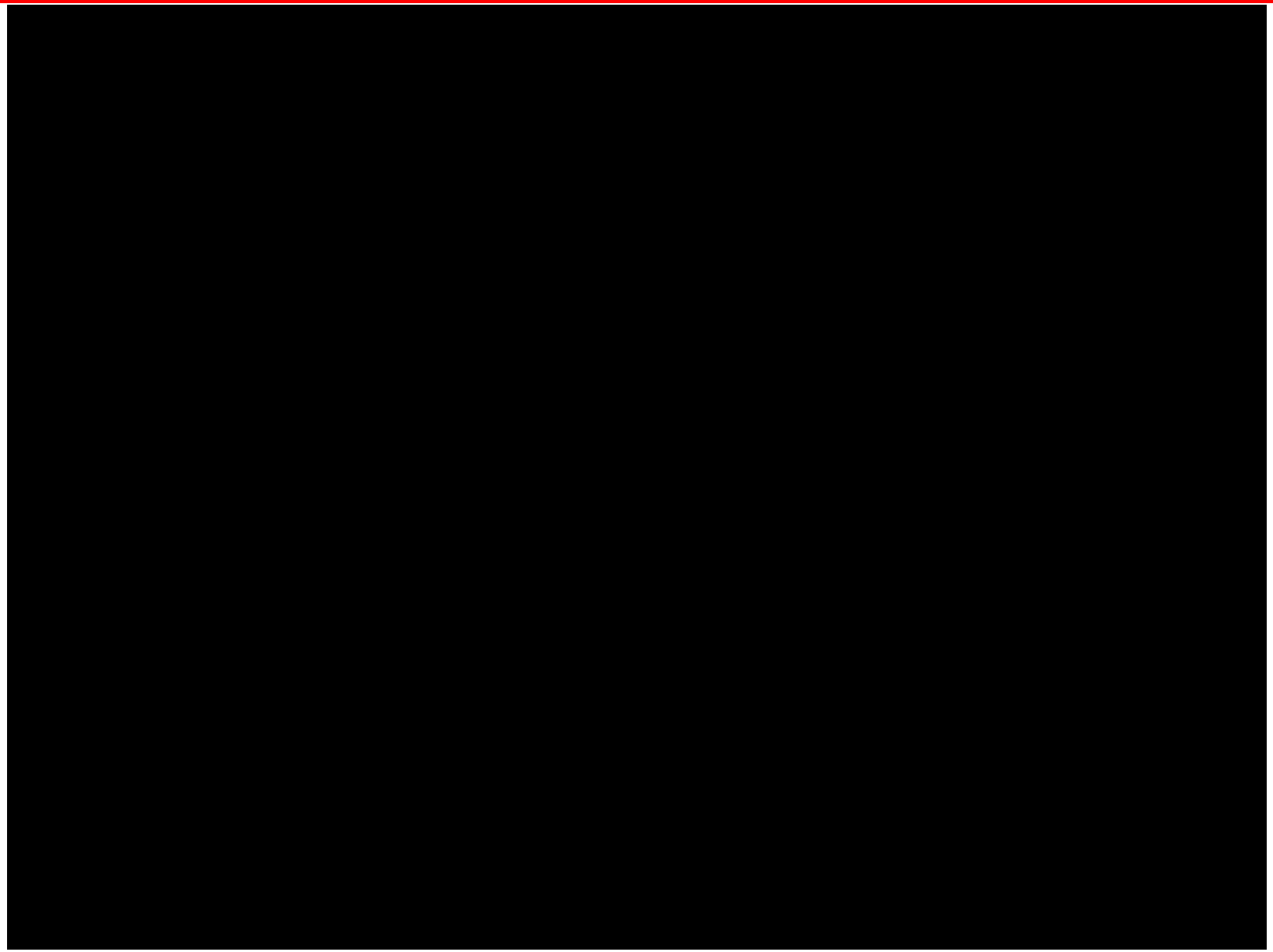
Antihydrogen Signal August 2002 *ATHENA*

Amoretti et al., ***Nature*** 419 (2002) 456



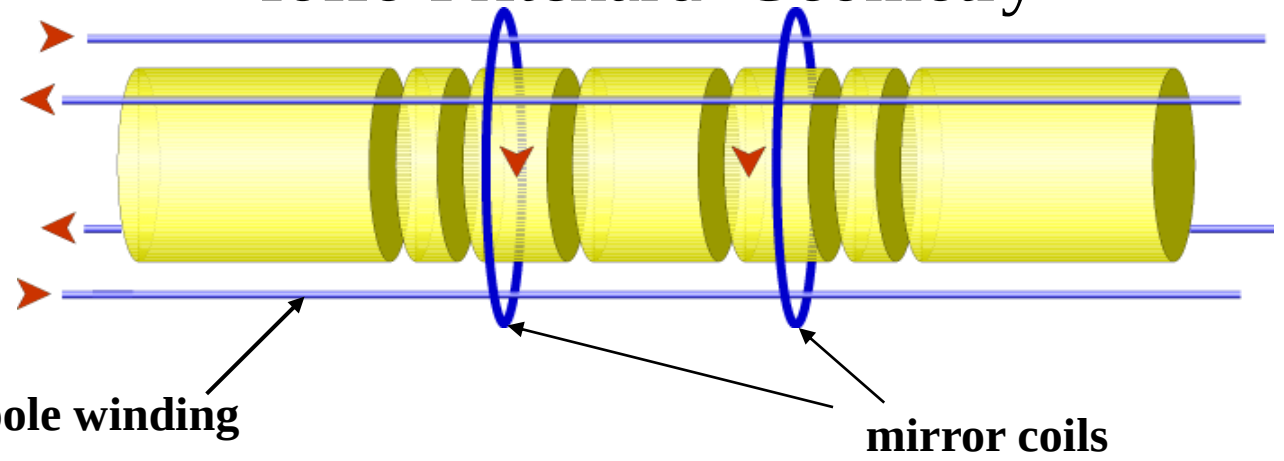
>50000 Cold Antihydrogen

Trapping Antihydrogen



Trapping Neutral Anti-atoms?

‘Ioffe-Pritchard’ Geometry



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

Well depth ~ 0.7 K/T

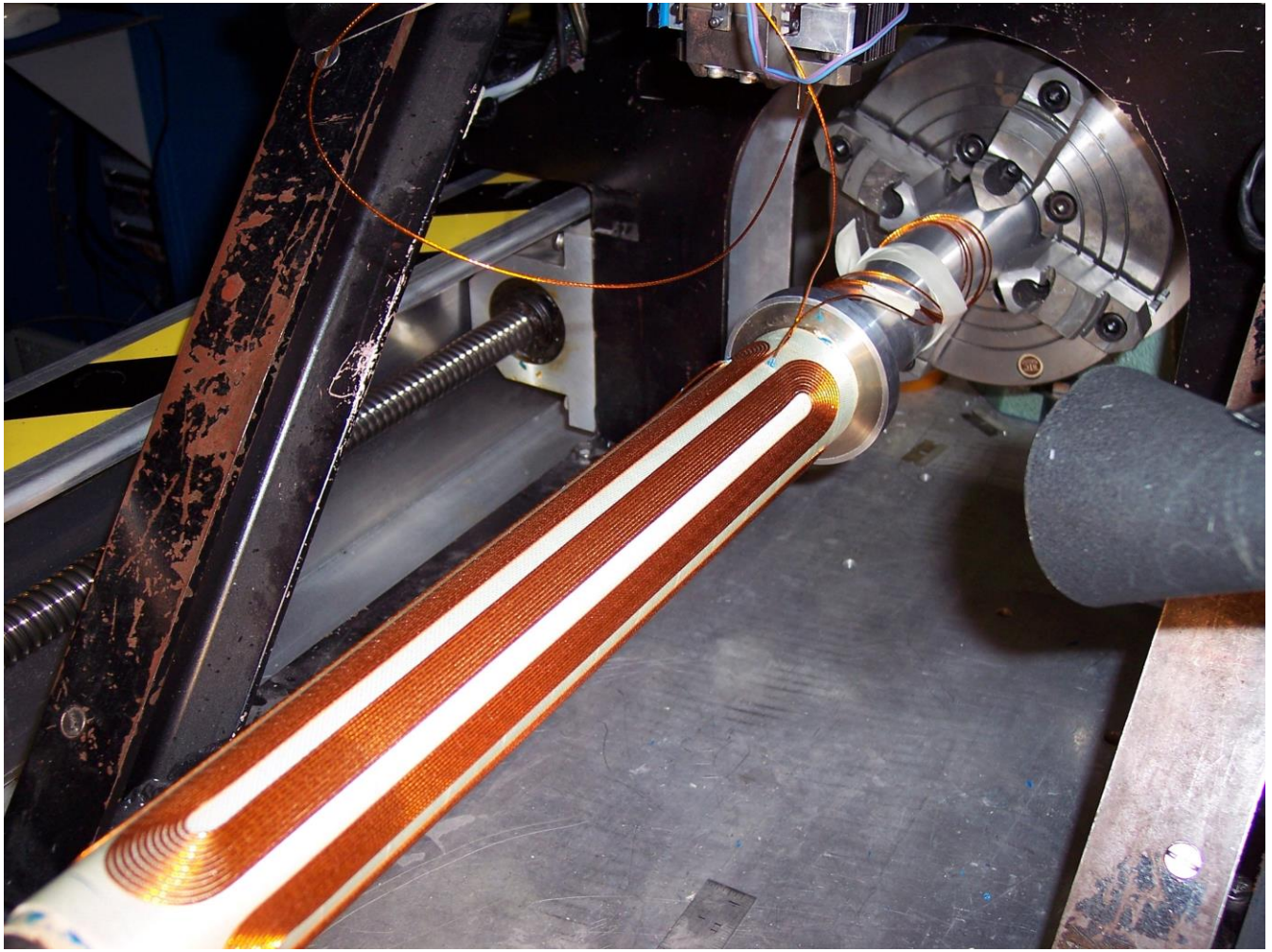
Need to produce the atoms so they are *born trapped*

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 (60 MK)**
- **Typical spacecharge energies of plasmas are a few eV**
- **The trap for neutral antihydrogen is *0.5 K deep***
- **Need large solenoidal B-field for catching pbars, cooling, etc. – but need a large delta-B for trapping**

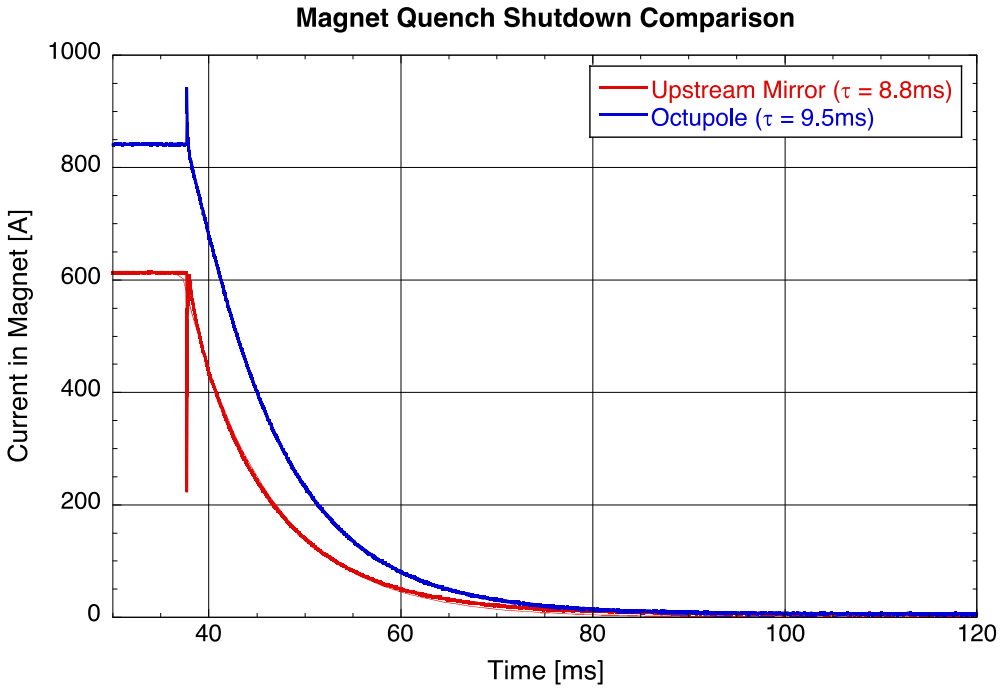
Octupole Fabrication at BNL



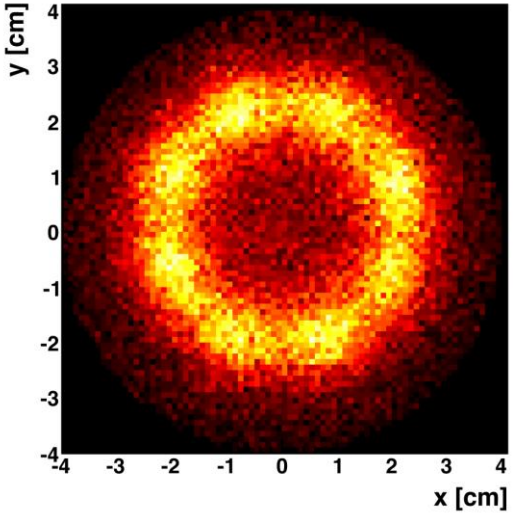
- Magnets wound directly on vacuum chamber (1.25 mm wall)
- No metals in support structure: epoxy/fiber
- High SC/copper ratio cable

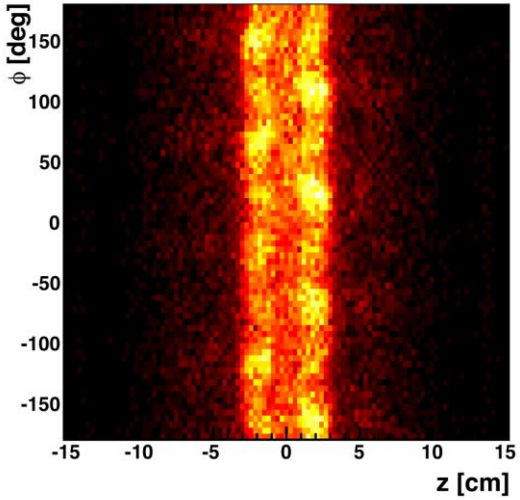
Detection of trapped antihydrogen: Rapid Shutdown

- 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 10^3 cycles of this



ALPHA Silicon Vertex Detector

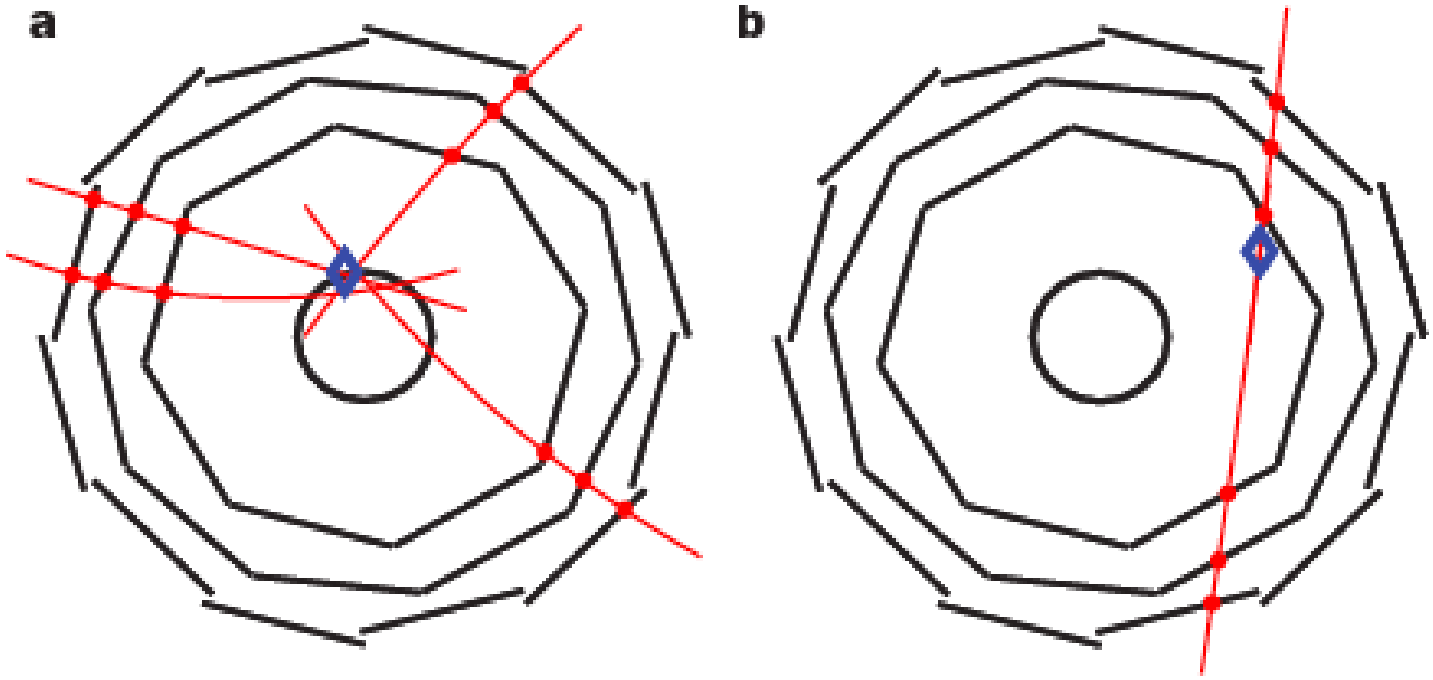




3-layer, double-sided modules
Detect antiproton anihilation (not e^+)
Fabricated by U. Liverpool

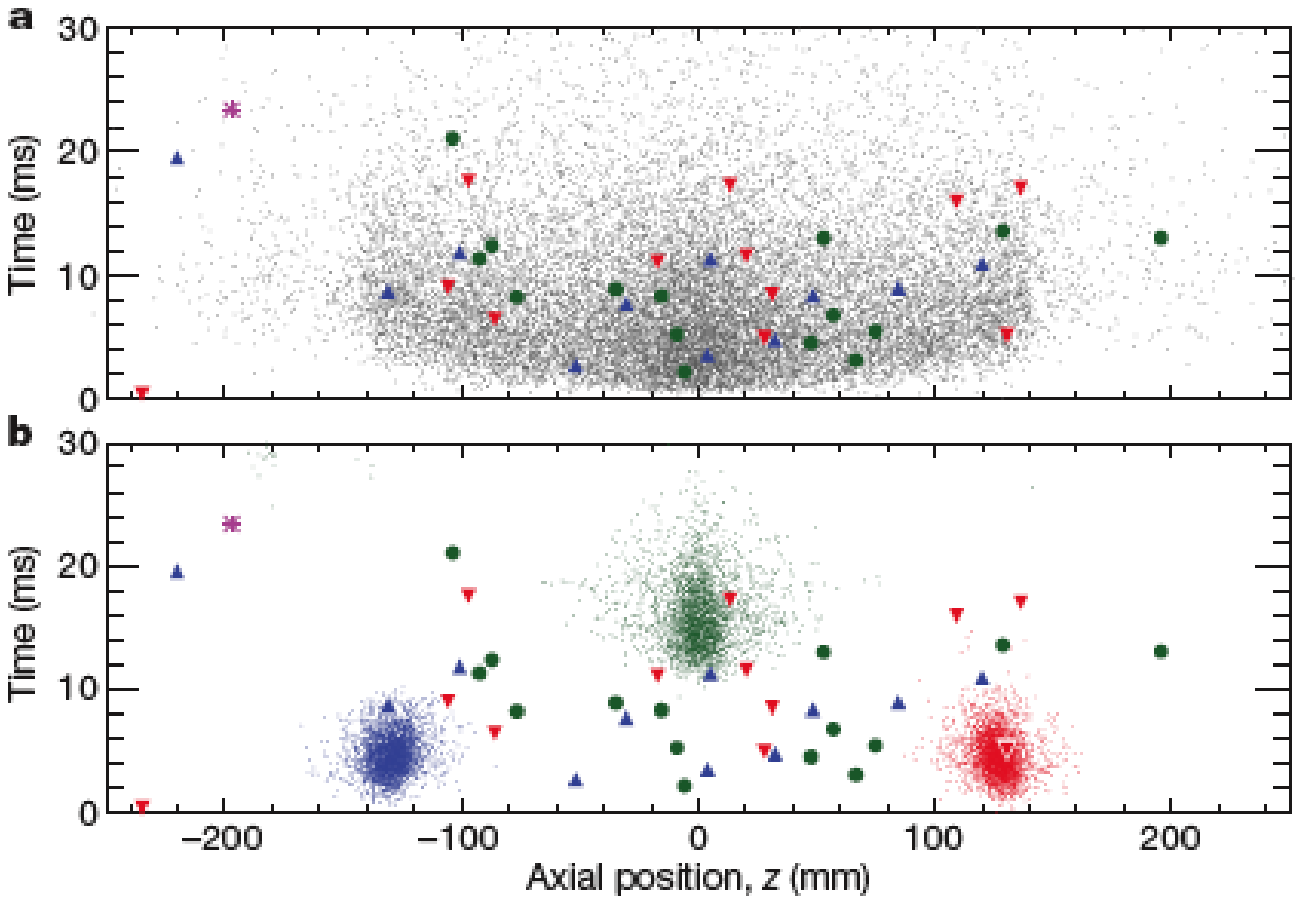
Event Topology

Typical antiproton annihilation **Typical cosmic ray**



… not much going on here

The First Trapping Result - 2010



HBAR simulation

left bias
right bias
no bias

PBAR simulations

1 event with heated positrons

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]

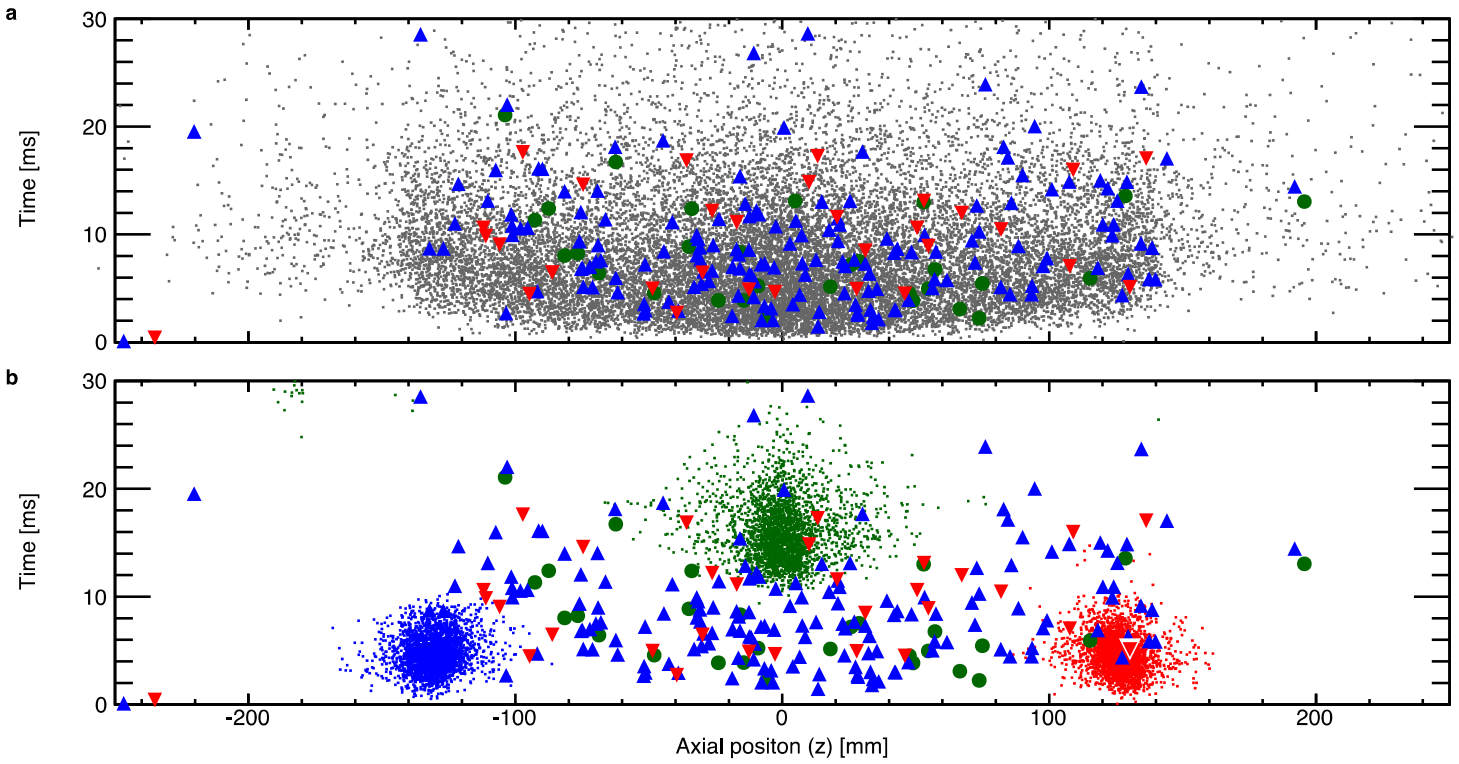
Published online in *Nature*, 17 November 2010

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

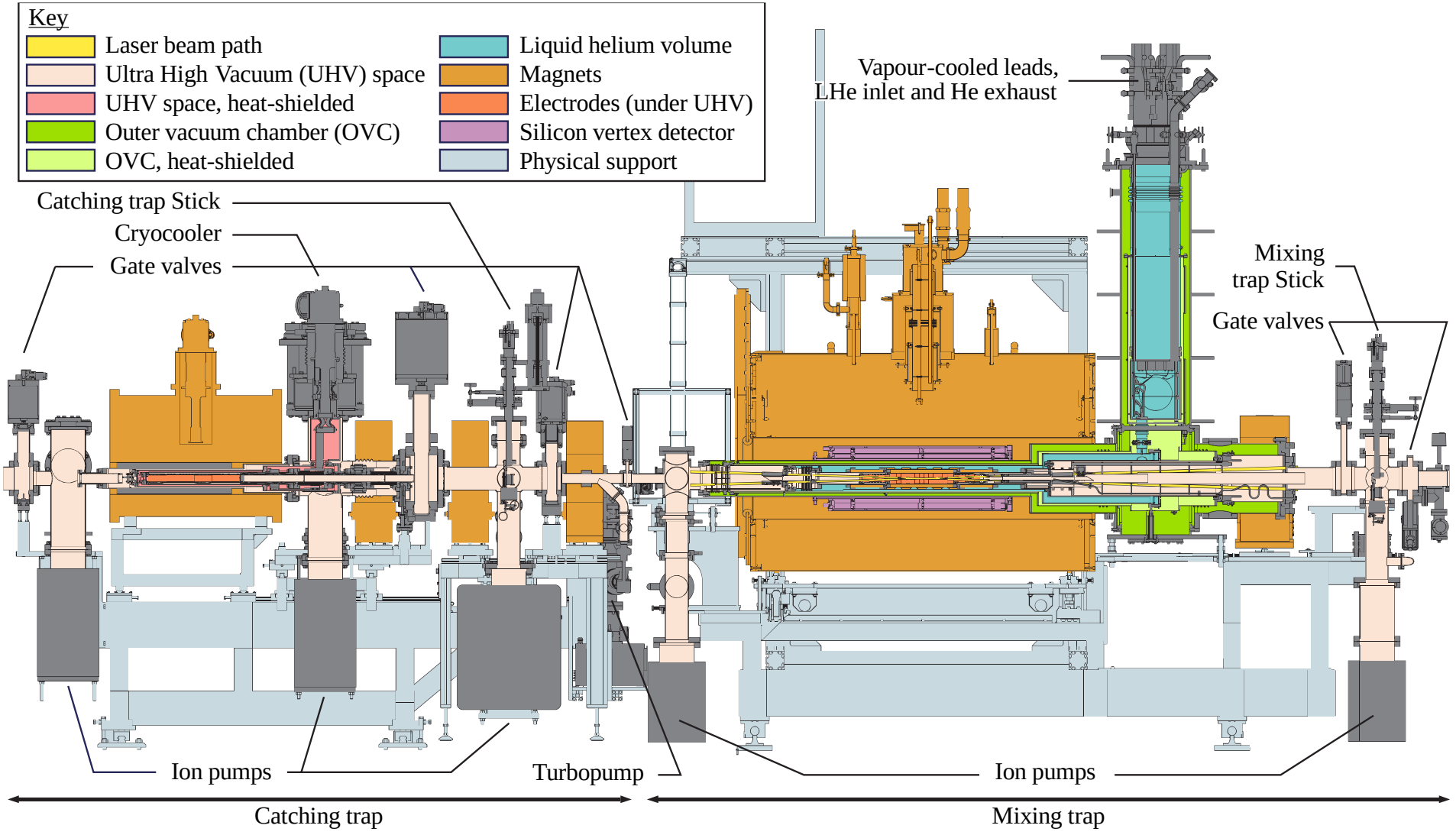
Most clicked-on story on *Nature* website for all of 2010

TOTAL SAMPLE – 2010 – you can tweak 38

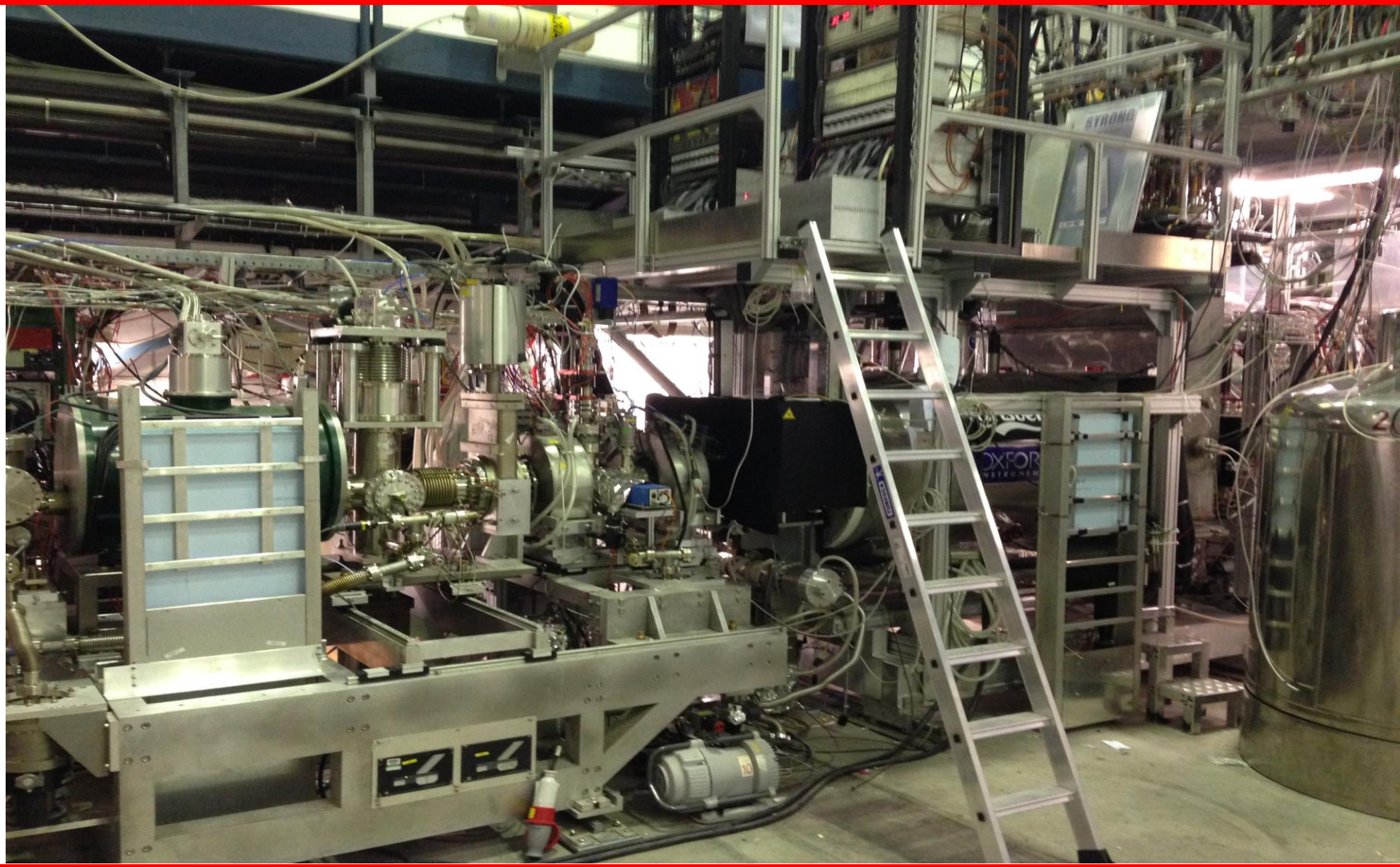


(300+ annihilation events)

ALPHA-2 (2012)

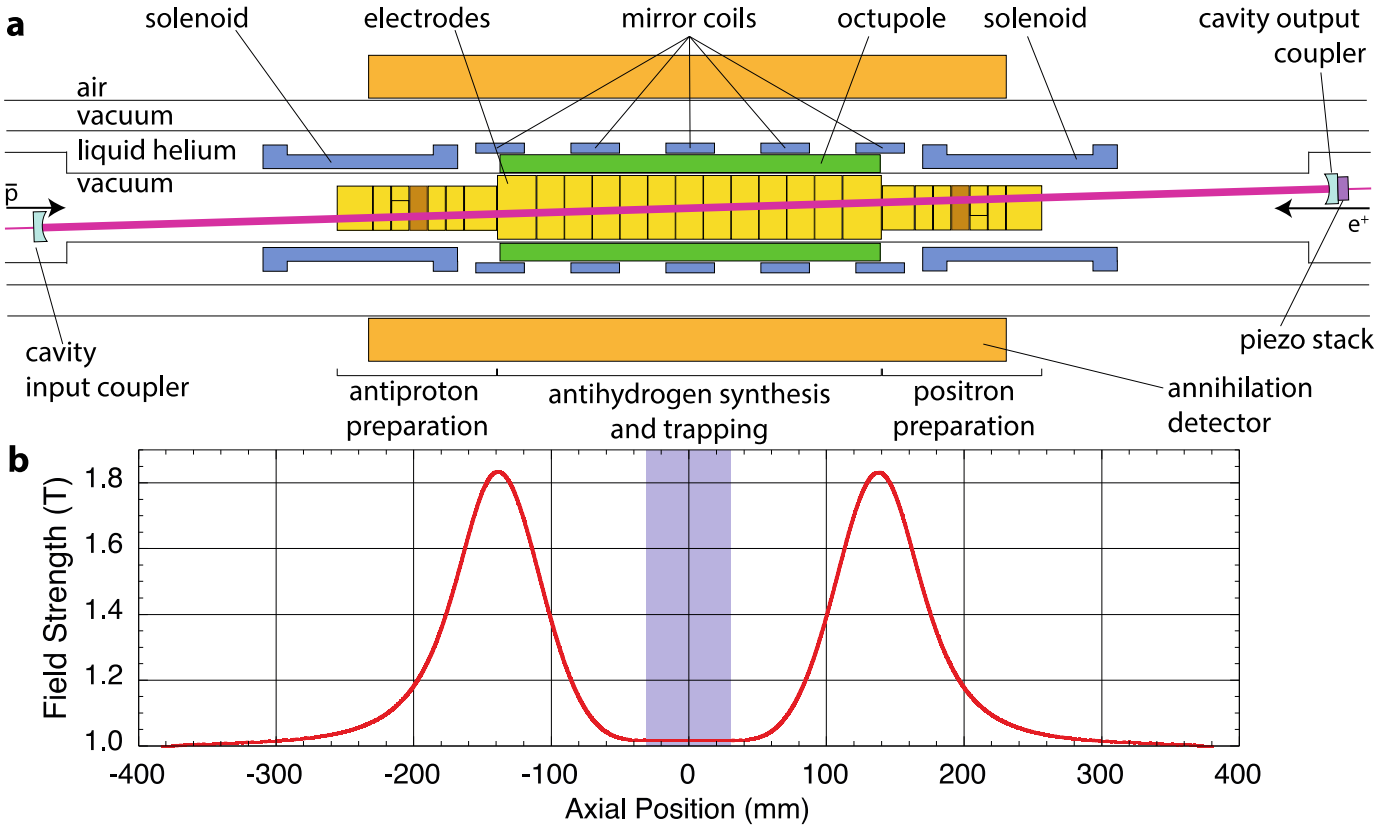

Key
Laser beam path
Ultra High Vacuum (UHV) space
UHV space, heat-shielded
Outer vacuum chamber (OVC)
OVC, heat-shielded
Liquid helium volume
Magnets
Electrodes (under UHV)
Silicon vertex detector
Physical support
Vapour-cooled leads,
LHe inlet and He exhaust
Catching trap Stick
Cryocooler
Gate valves
Mixing
trap Stick
Gate valves
Ion pumps
Turbopump
Ion pumps
Catching trap
Mixing trap

ALPHA-2




Carlsberg
OXFORD
INSTRUMENTS

Configuration for Laser Physics – 1S-2S transition



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 2×10^{-10}

~15 atoms trapped at a time

2010 – first trapping

"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."

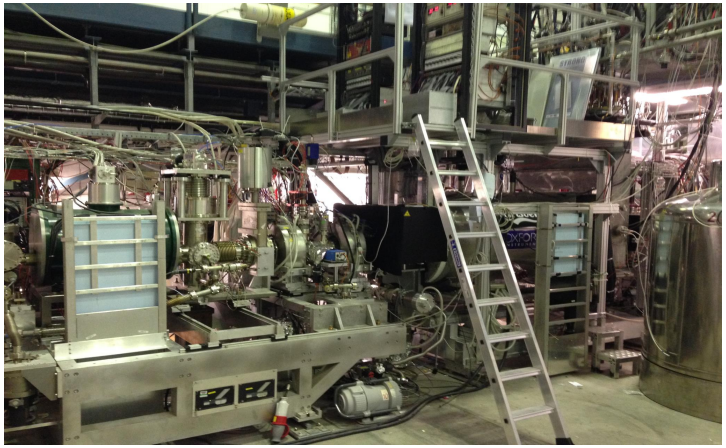
2016 - spectroscopy

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.

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

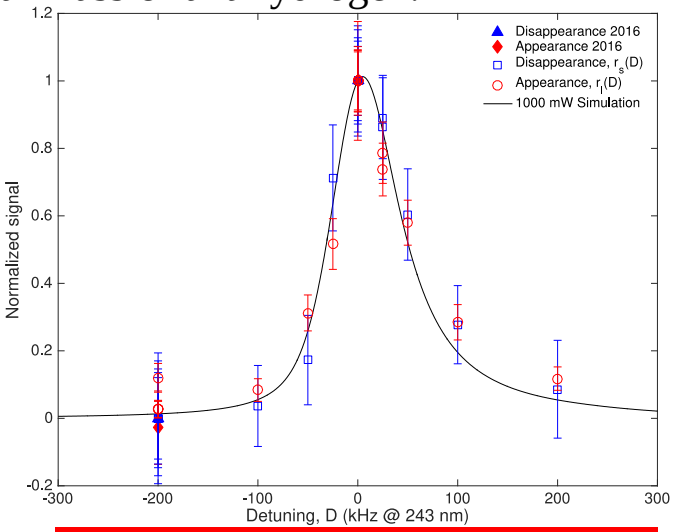
Resonant quantum transitions in trapped antihydrogen atoms.
Nature **483**, 439–443 (2012). https://doi.org/10.1038/nature10942

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 2×10^{-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

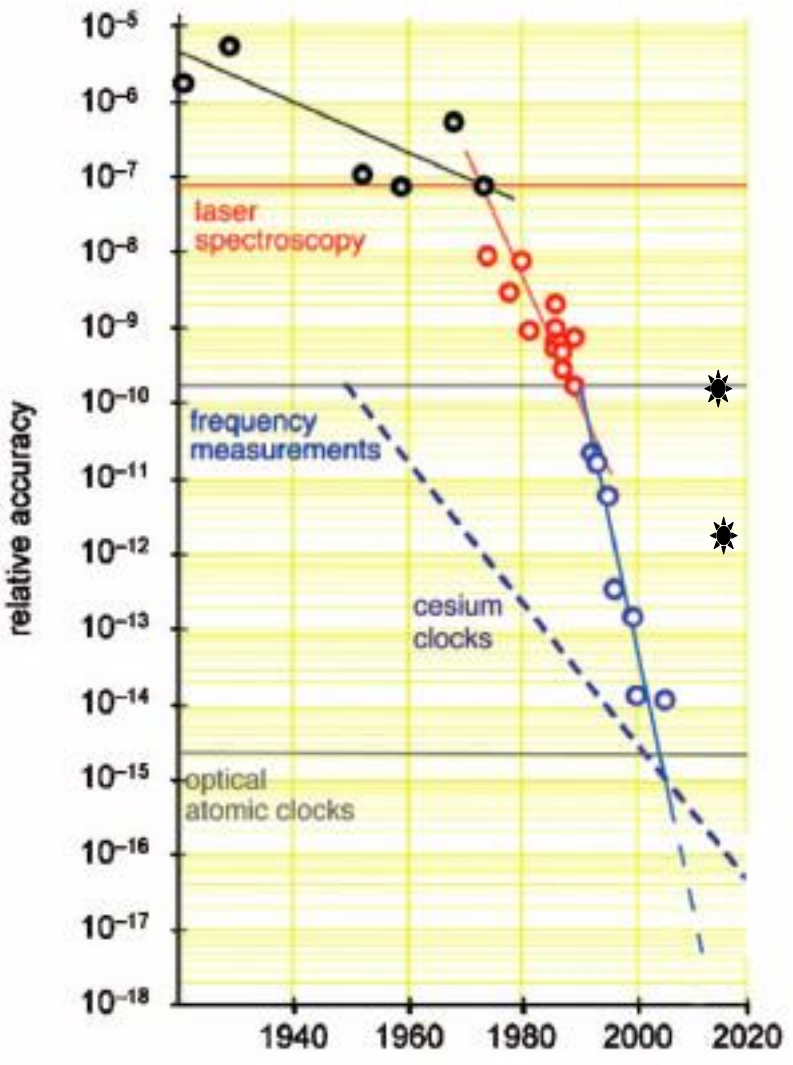
ALPHA-g installed (2018)

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

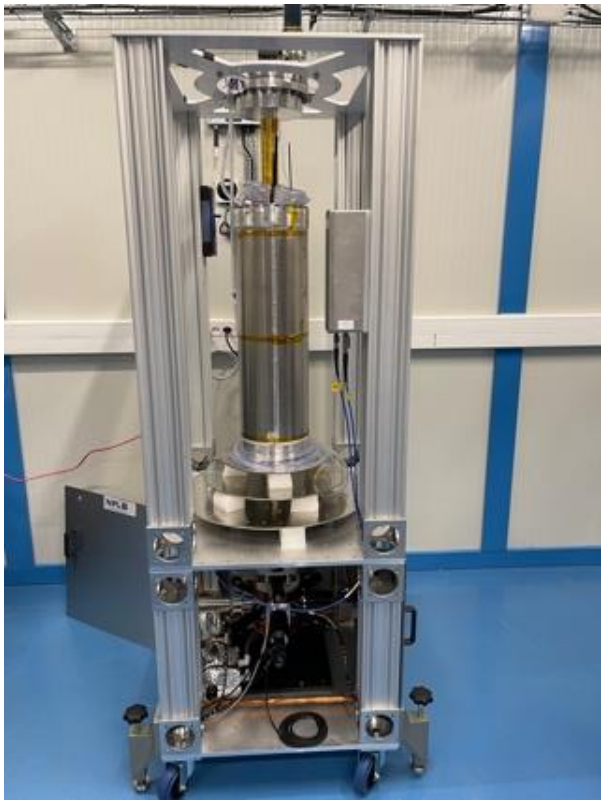
Sympathetic cooling of positrons to cryogenic temperatures for antihydrogen production.
Nat Commun **12**, 6139 (2021). https://doi.org/10.1038/s41467-021-26086-1

State of the Art



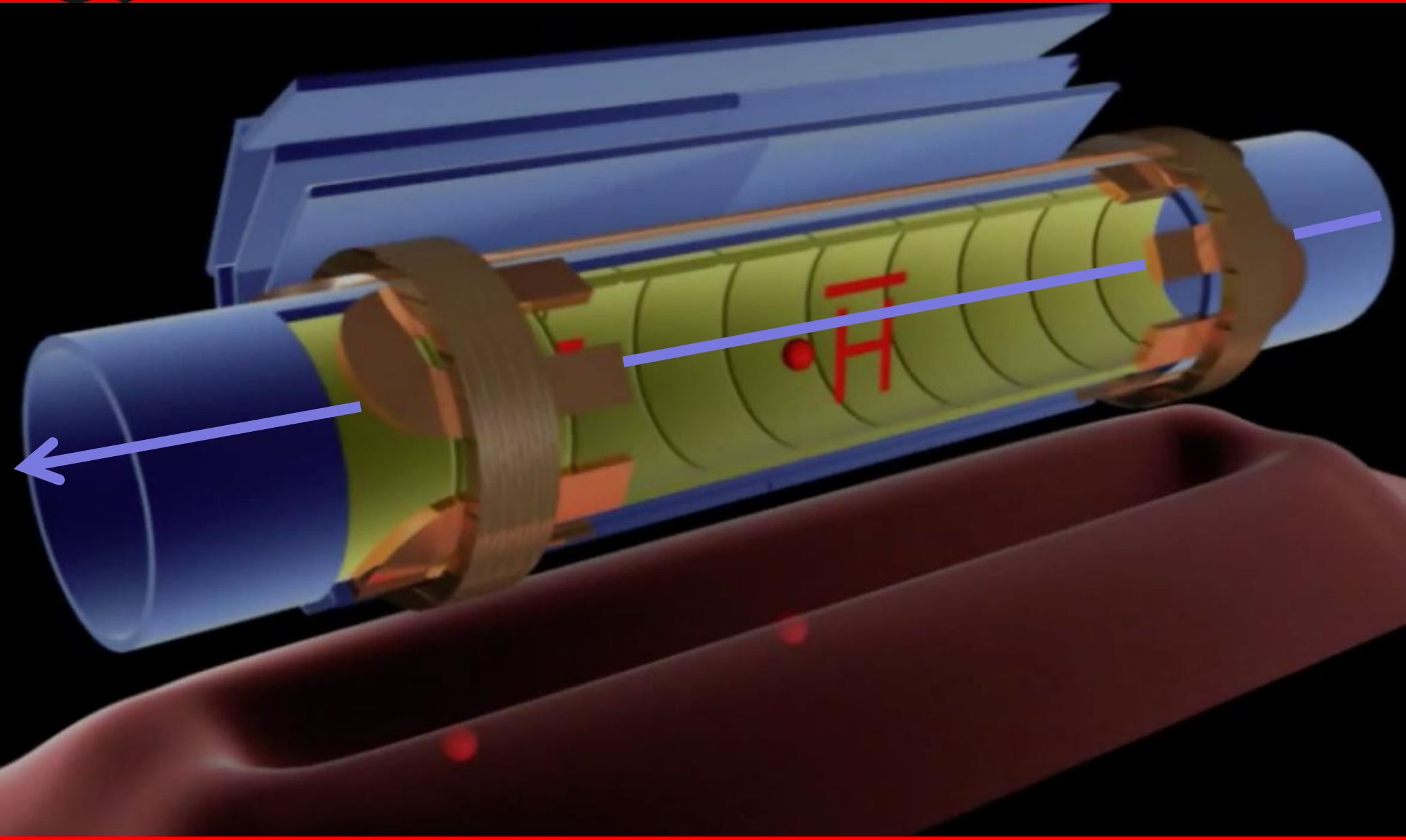
Theodor Hänsch

New Frequency Metrology Lab

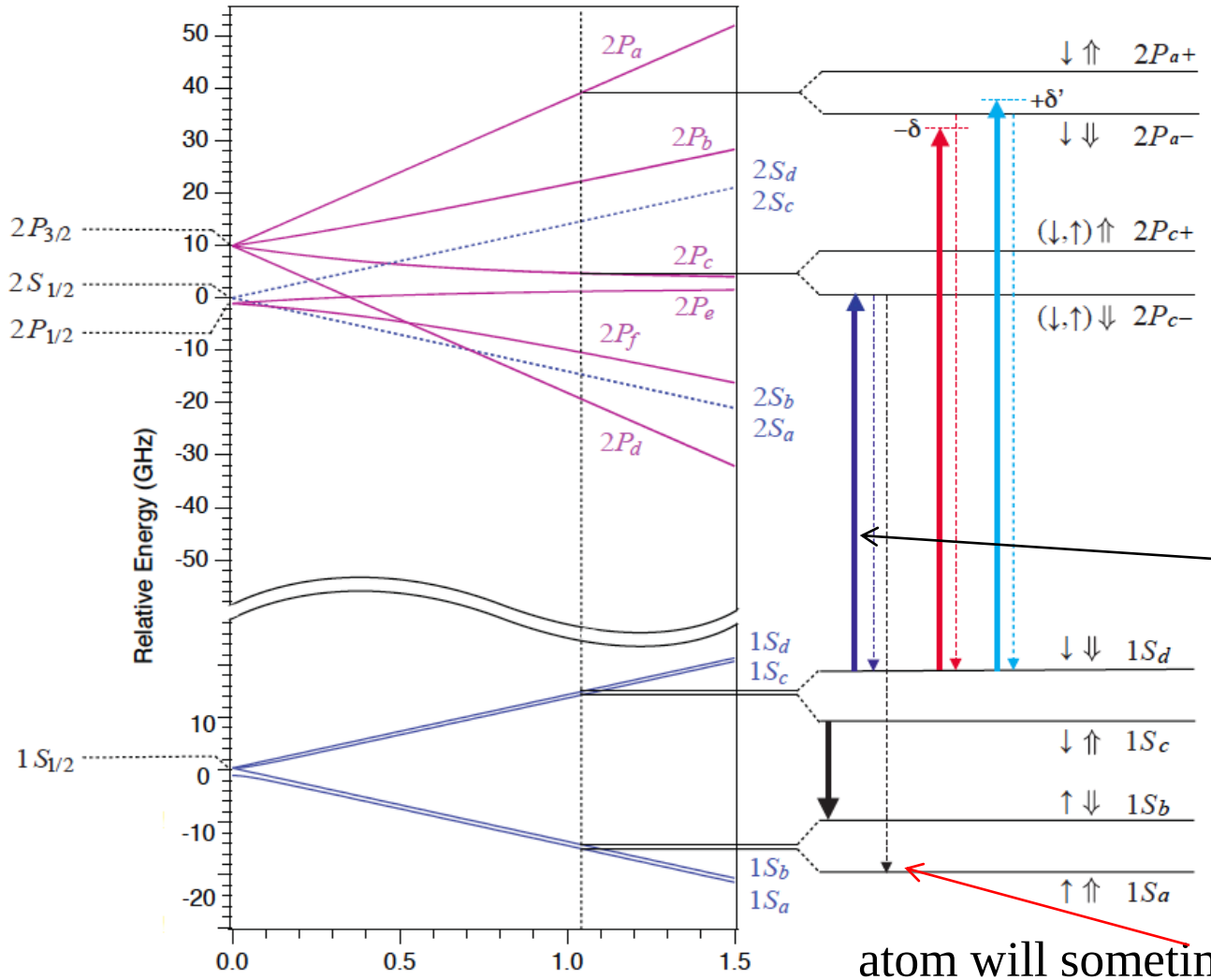


Cesium fountain clock from NPL (Krzysztof Szymaniec, Rich Hendricks , *et al.*) jarrived September 15th 2022!

Lyman-alpha Spectroscopy of Antihydrogen



1S – 2P transitions in (anti)hydrogen

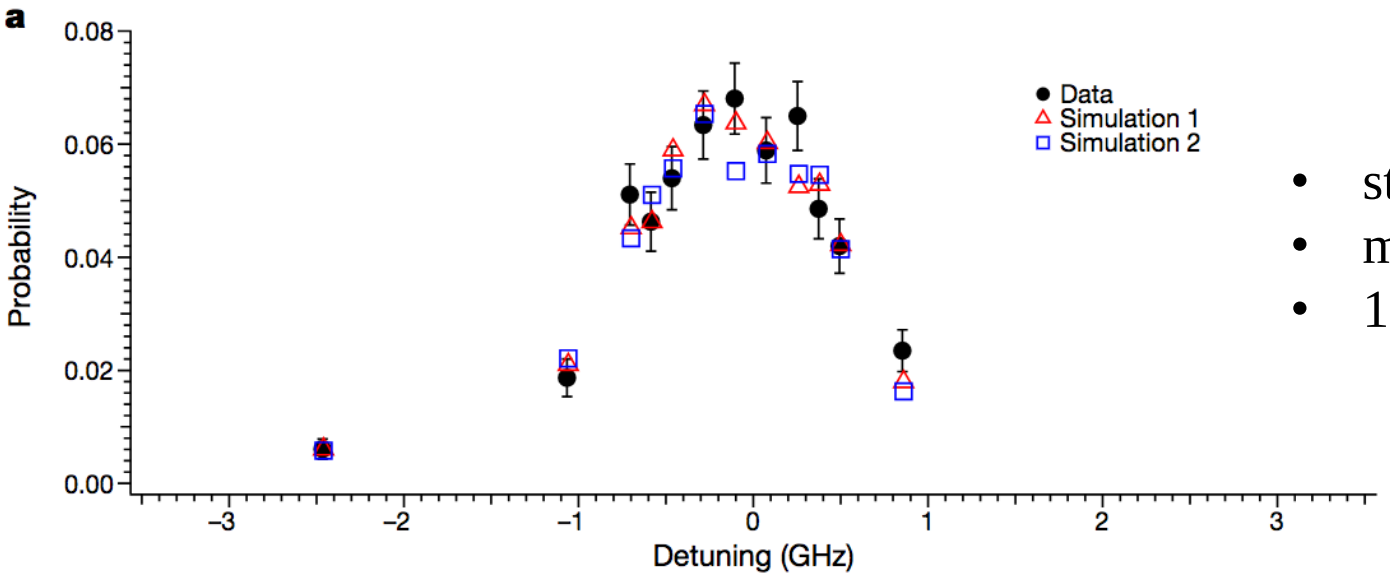


probing

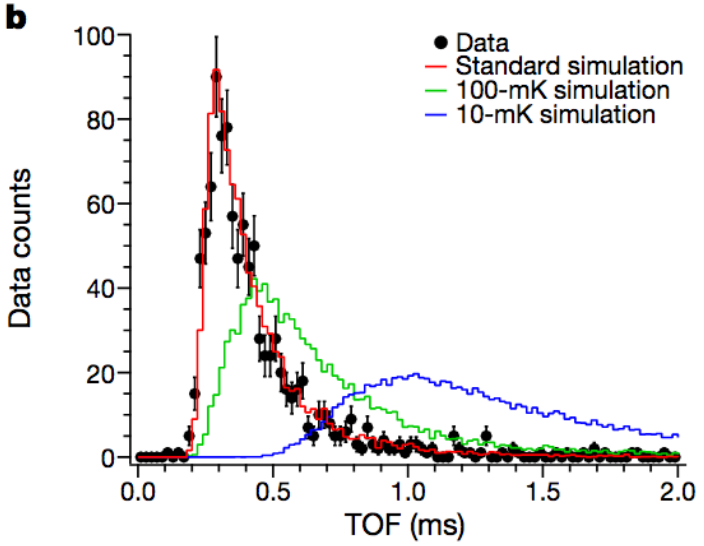
atom will sometimes spin-flip and then annihilate

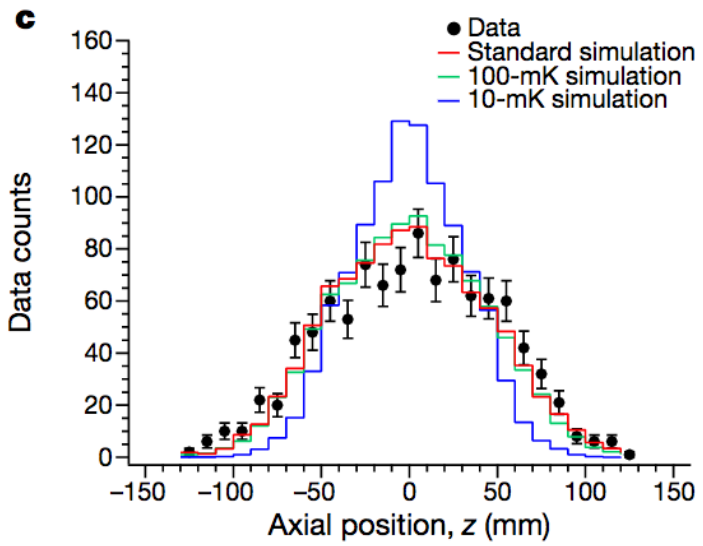
measure TOF between laser pulse and annihilation

Lyman-alpha Spectroscopy – 2017 Run

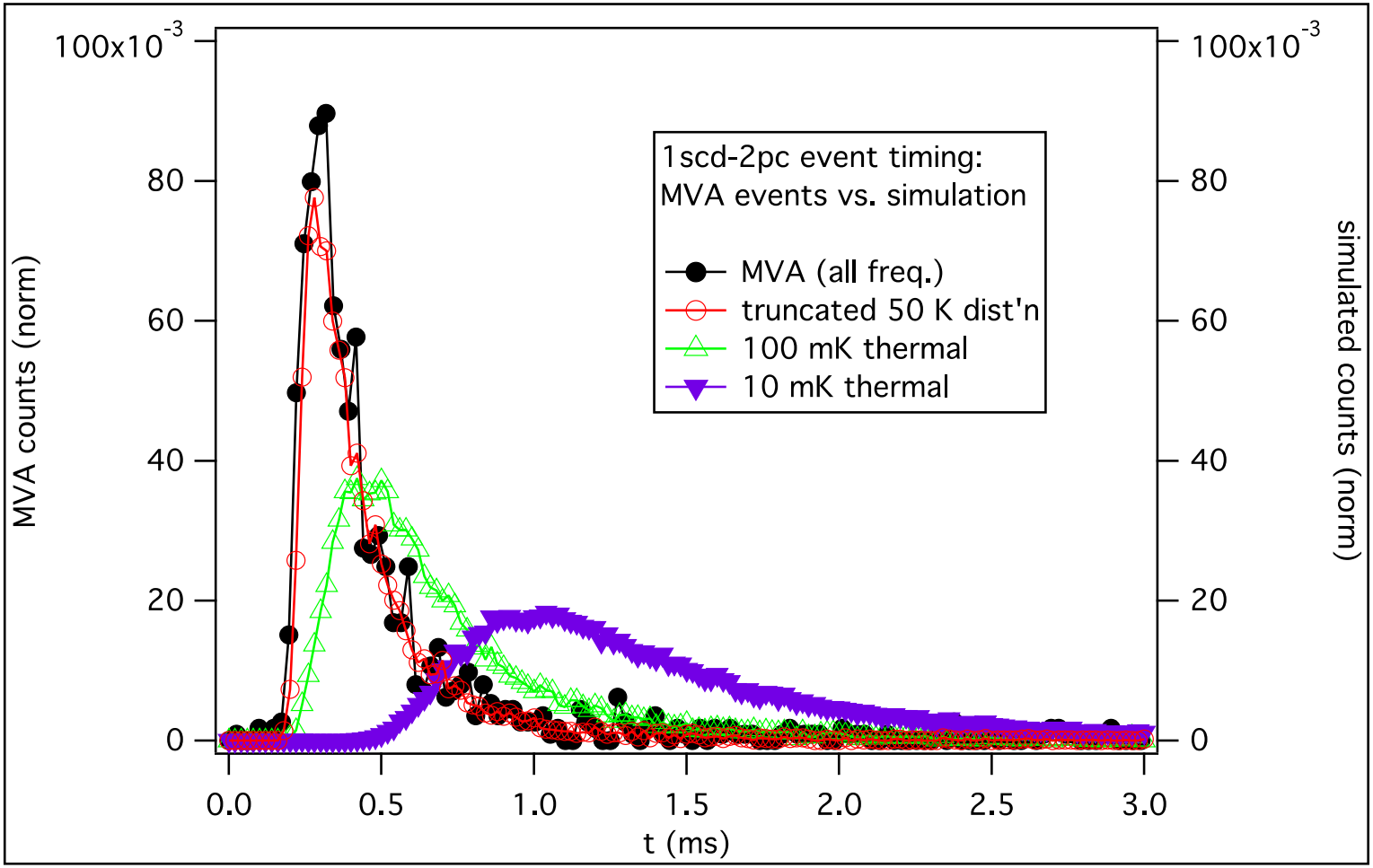


- stack for 2 hours
- measure for two hours
- 12 frequencies each time

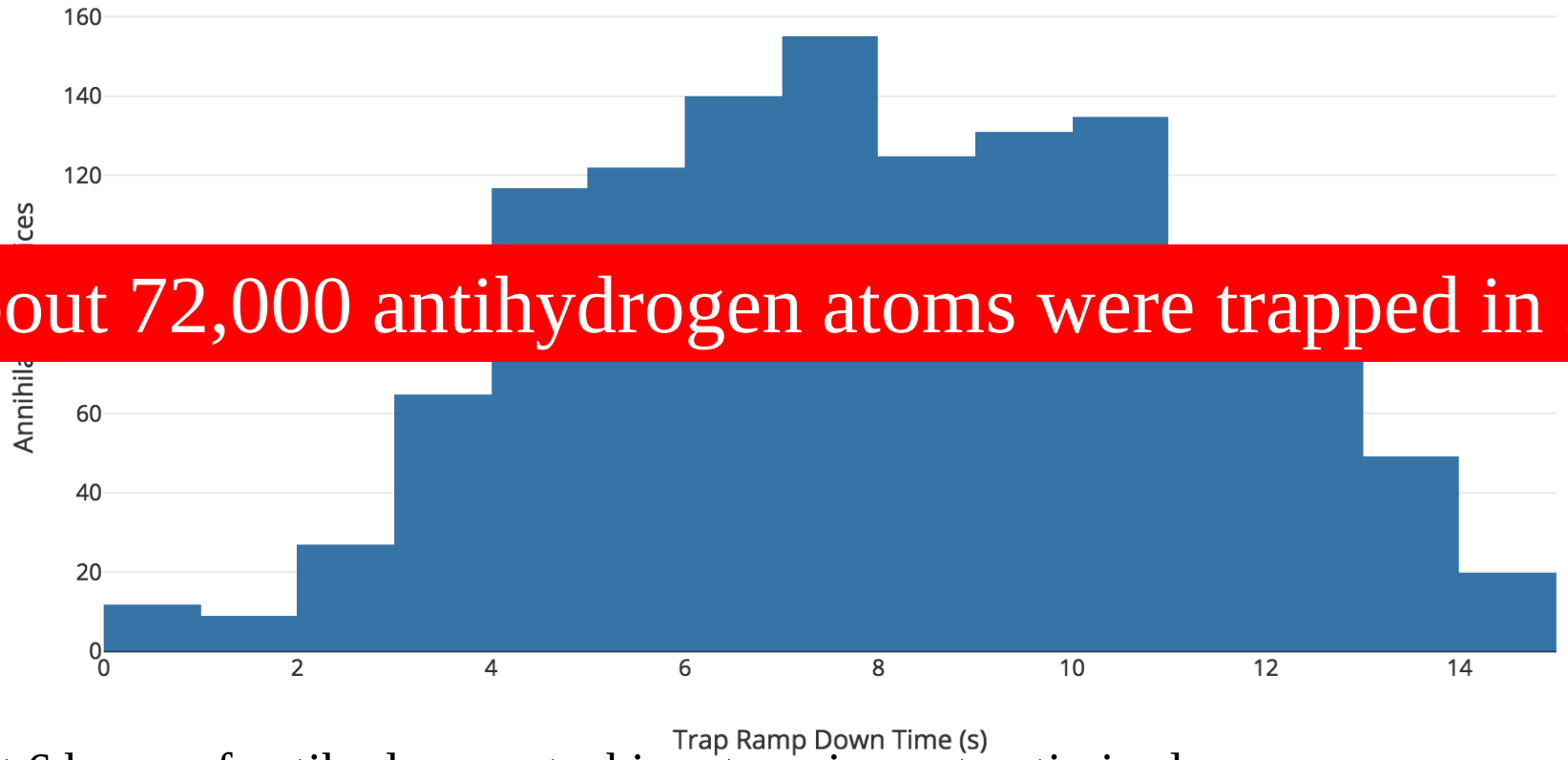




Signal arrival time distribution after laser pulses



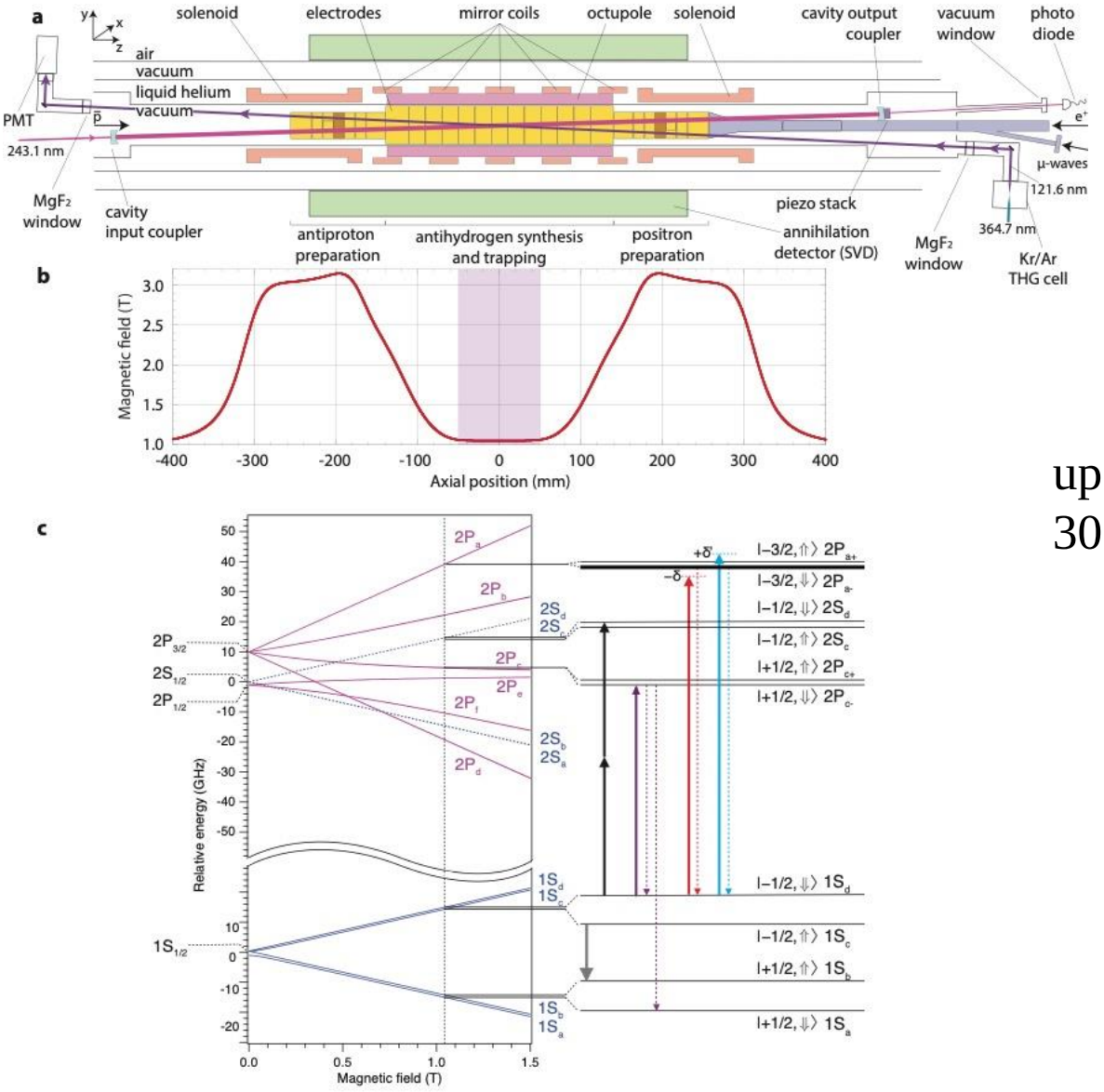
Accumulating Antihydrogen Atoms
18 December 2017



About 72,000 antihydrogen atoms were trapped in 2017

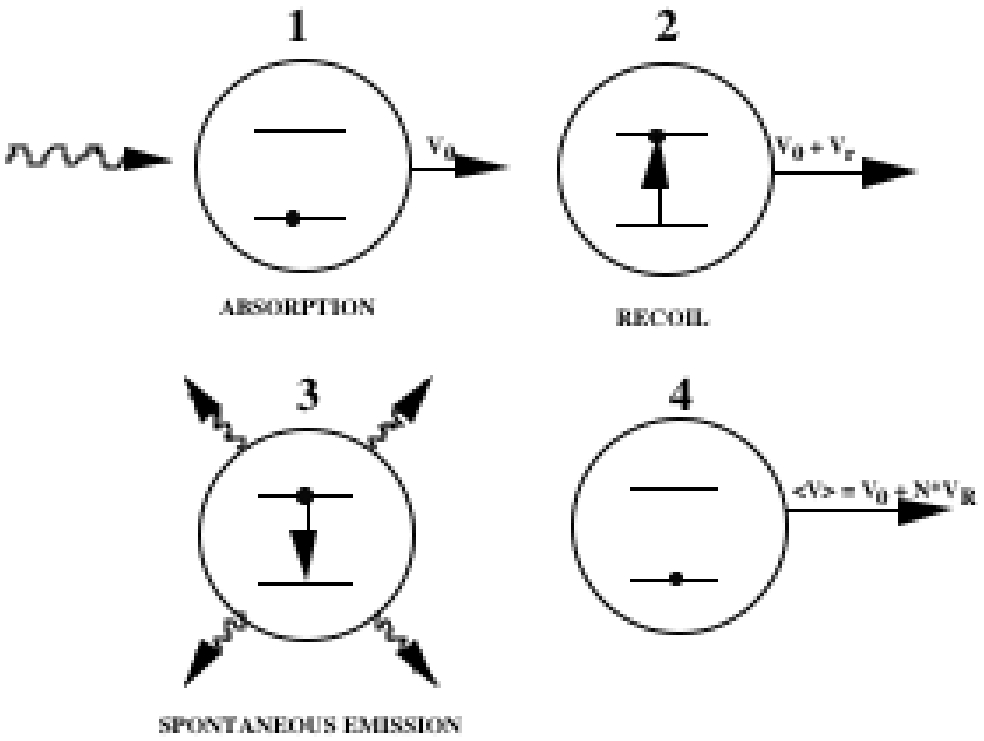
- about 6 hours of antihydrogen stacking; trapping not optimised
- 90/93 good shots from AD (we catch every second one)
- interesting future perspectives – better control of systematics for spectroscopy, gravitation, continuous laser cooling, release to zero field (hbar beam)
- this is larger than any per-YEAR sample we ever considered in the initial design of ALPHA-g

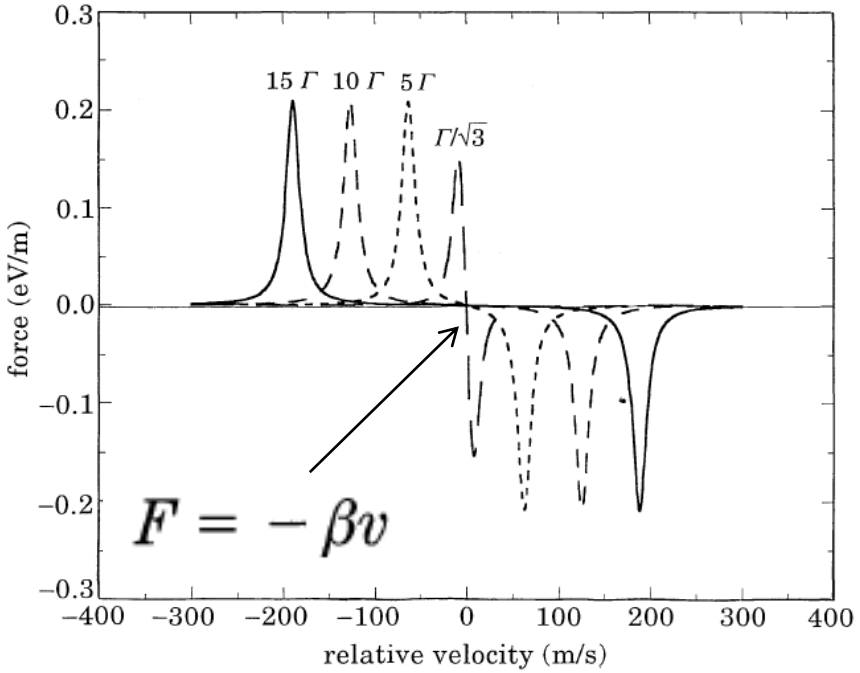
Laser Cooling of Antihydrogen (ALPHA-2)



up to 10^5 Hbar/cycle
30 trapped (<500 mK)

Laser cooling

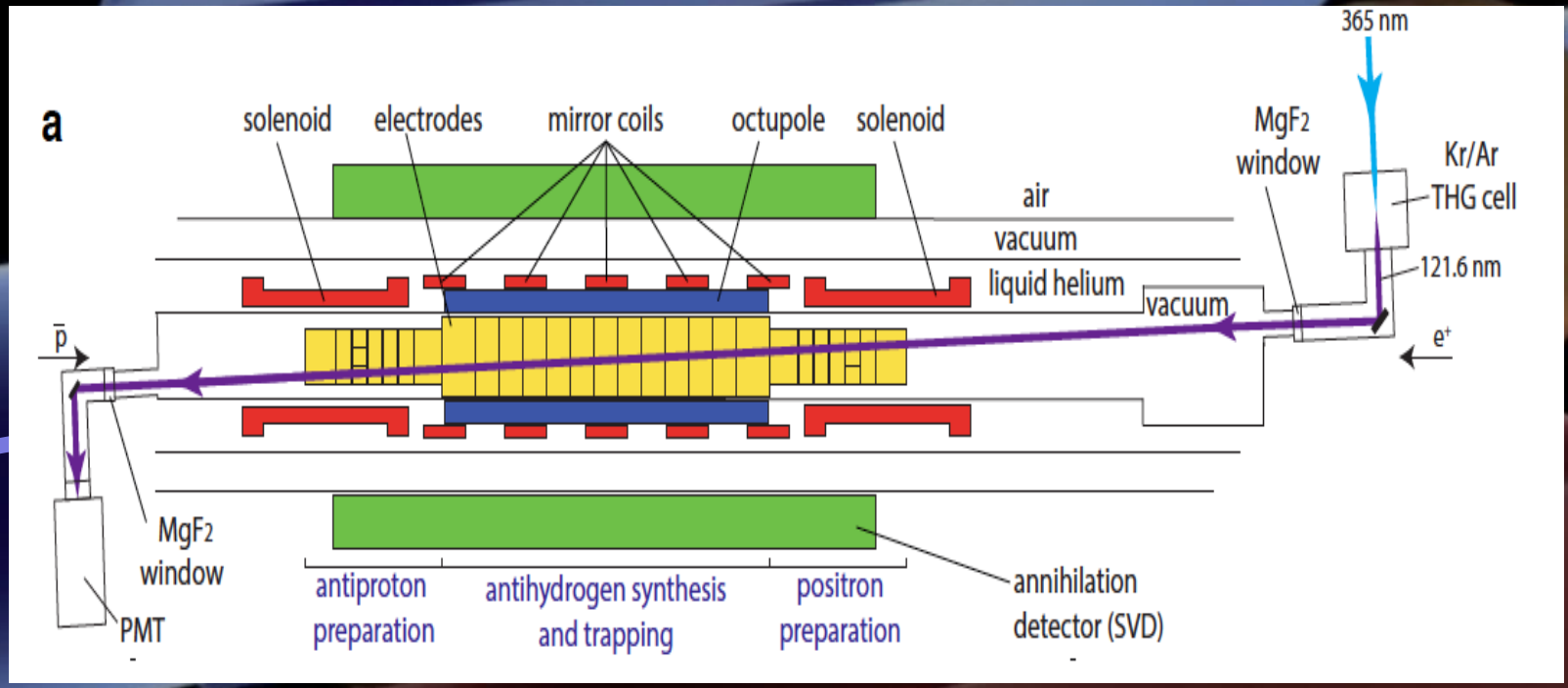




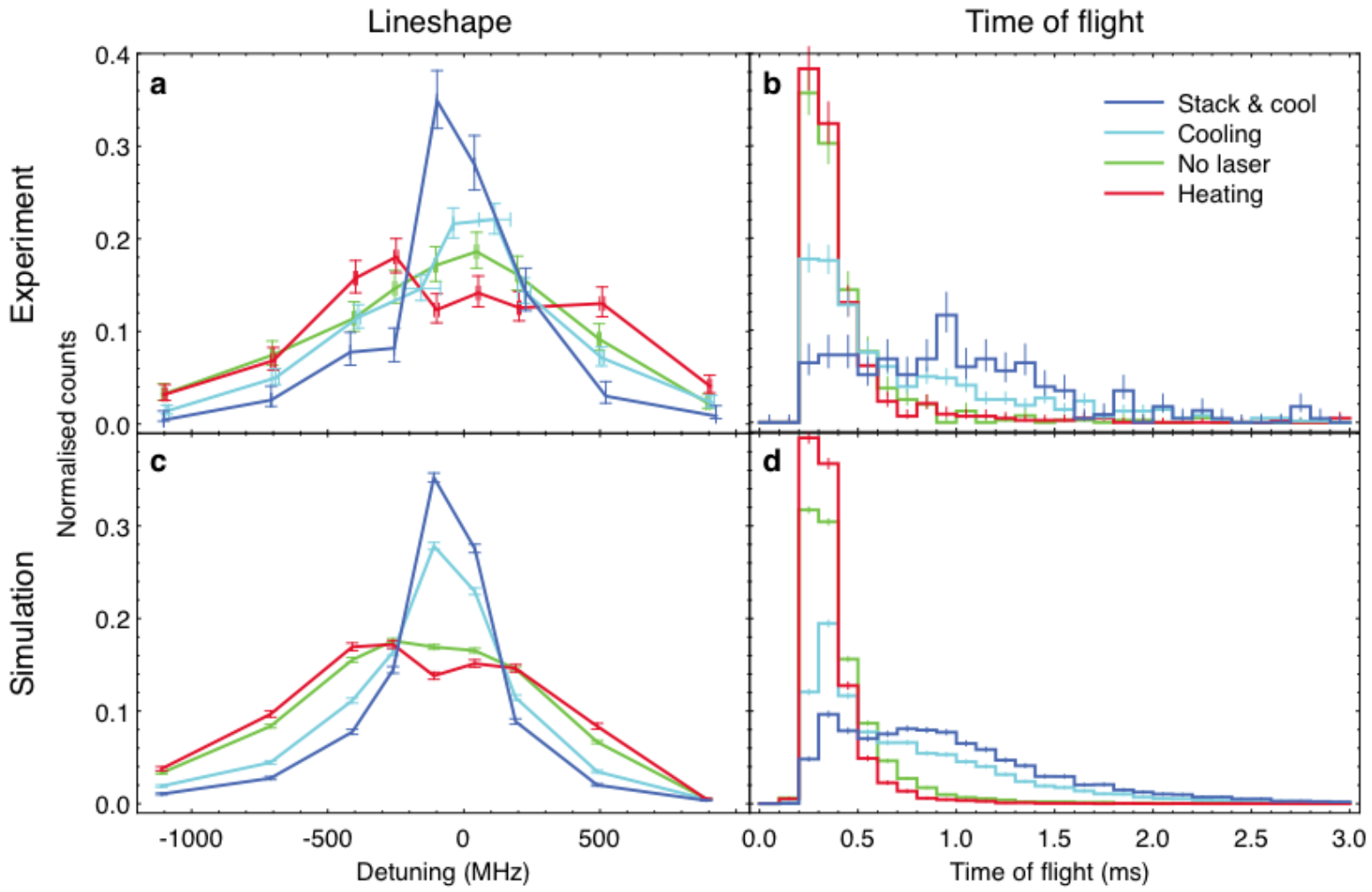
counter-propagating lasers

- Need a closed, two level system
- Typical photon energies of a few eV, recoil momentum of a few eV/c
- High scattering rates on resonance for CW lasers – transitions can be *ns*
- The Doppler shift introduces velocity dependence
- Level width determines ultimate temperature obtainable – Doppler cooling (~mK)

ALPHA Laser Coolinng Geometry – PULSED Lyman-alpha laser (121 nm)



Laser Cooling of Trapped Antihydrogen



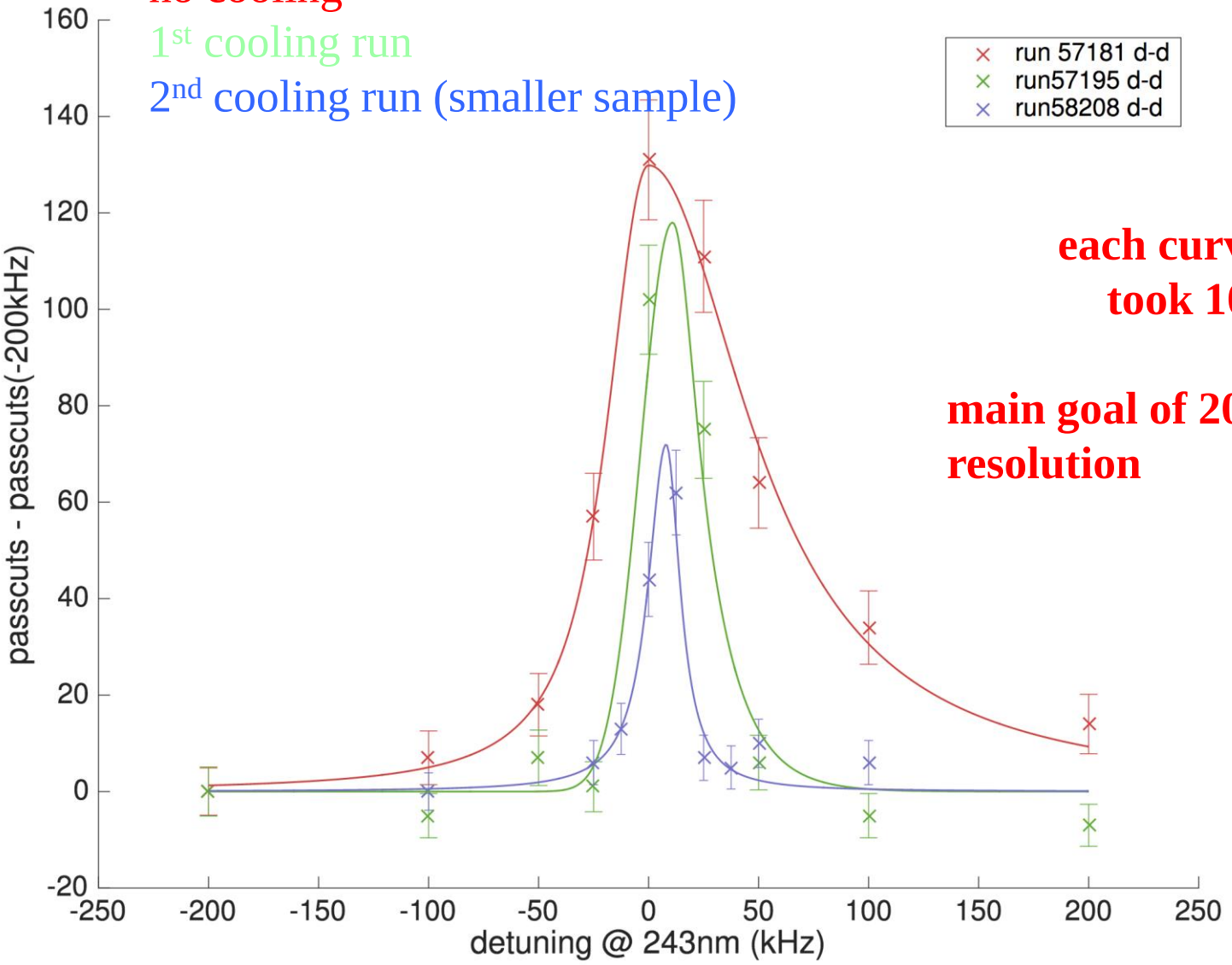
- lineshape contains a contribution from the Doppler width
- time of flight reflects transverse energy; cold particles come out later

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 is to improve this resolution

Finally on the cover!

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

nature COMMUNICATIONS

ARTICLE

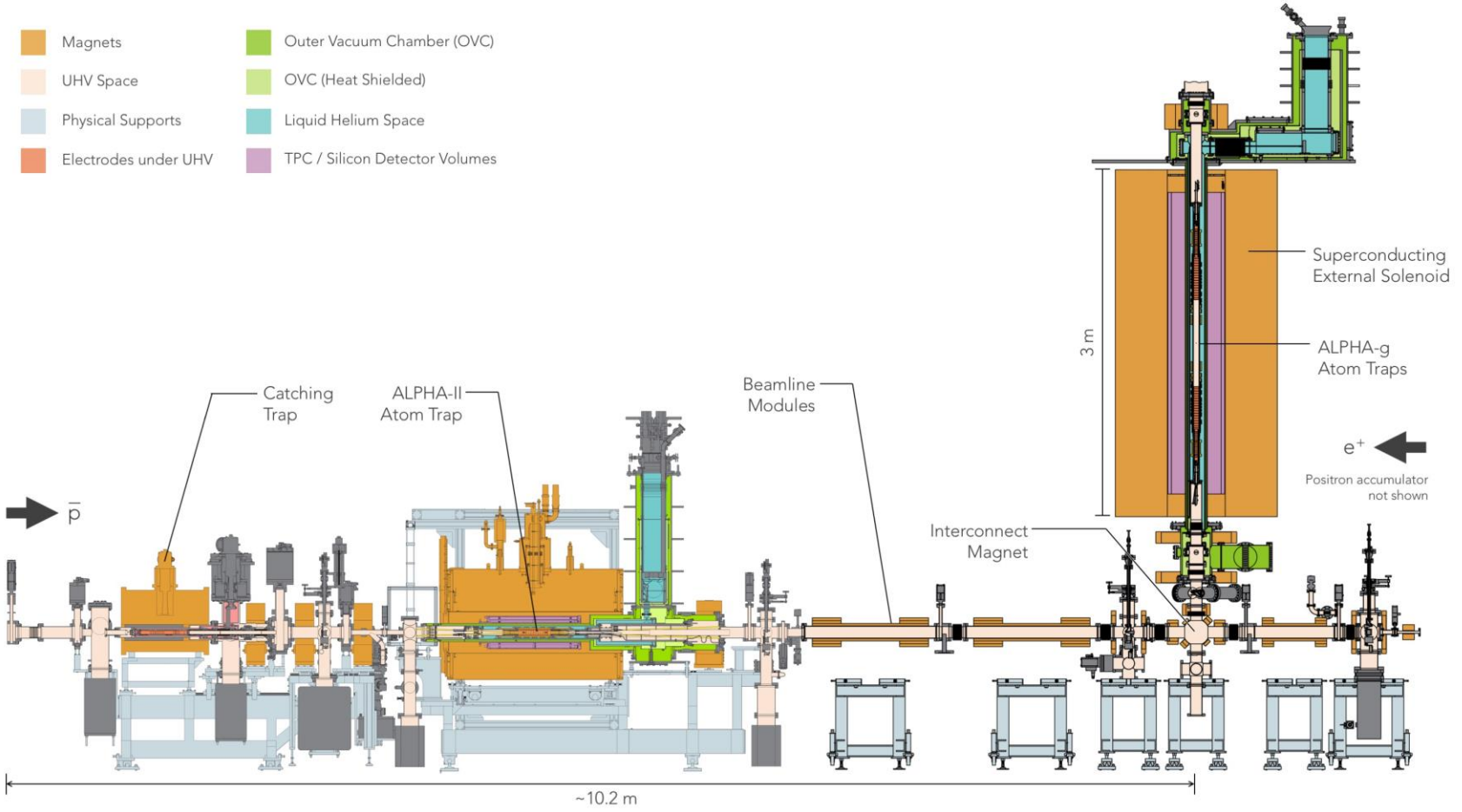
Received 14 Jan 2013 | Accepted 22 Mar 2013 | Published xx xxx 2013

DOI: 10.1038/ncomms2787 OPEN

Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen

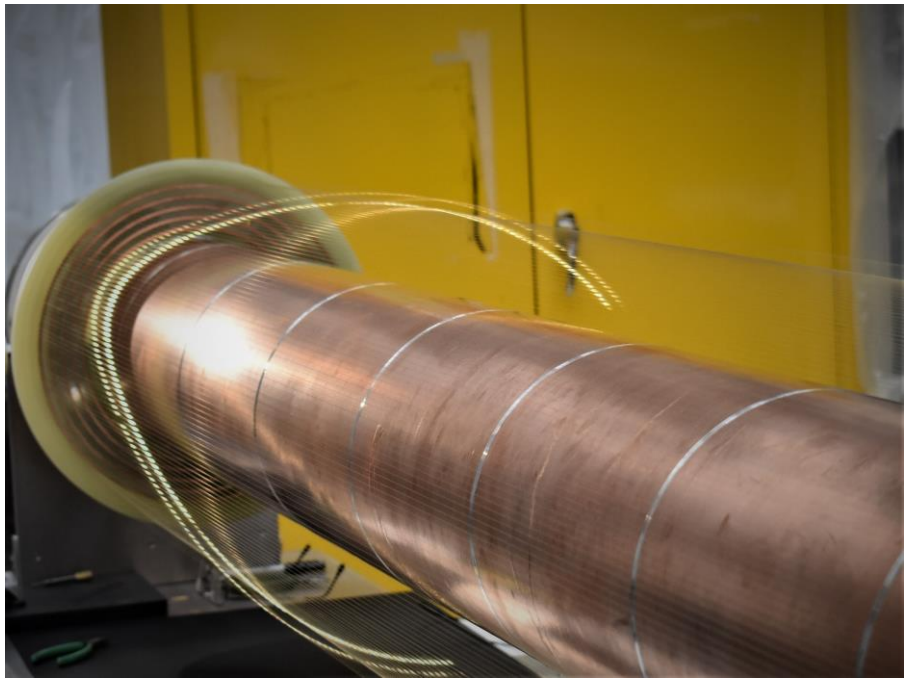
C. Amole[1], M.D. Ashkezari[2], M. Baquero-Ruiz[3], W. Bertsche[4,5,6], E. Butler[7,†], A. Capra[1], C.L. Cesar[8], M. Charlton[4], S. Eriksson[4], J. Fajans[3,9], T. Friesen[10], M.C. Fujiwara[11], D.R. Gill[11], A. Gutierrez[12], J.S. Hangst[13], W.N. Hardy[12,14], M.E. Hayden[2], C.A. Isaac[4], S.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

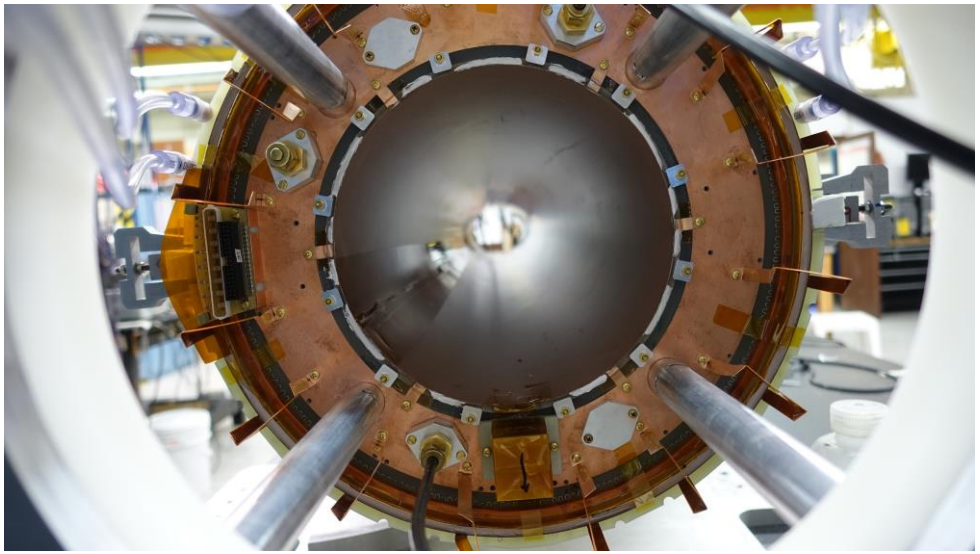
ALPHA-g – test of the WEP



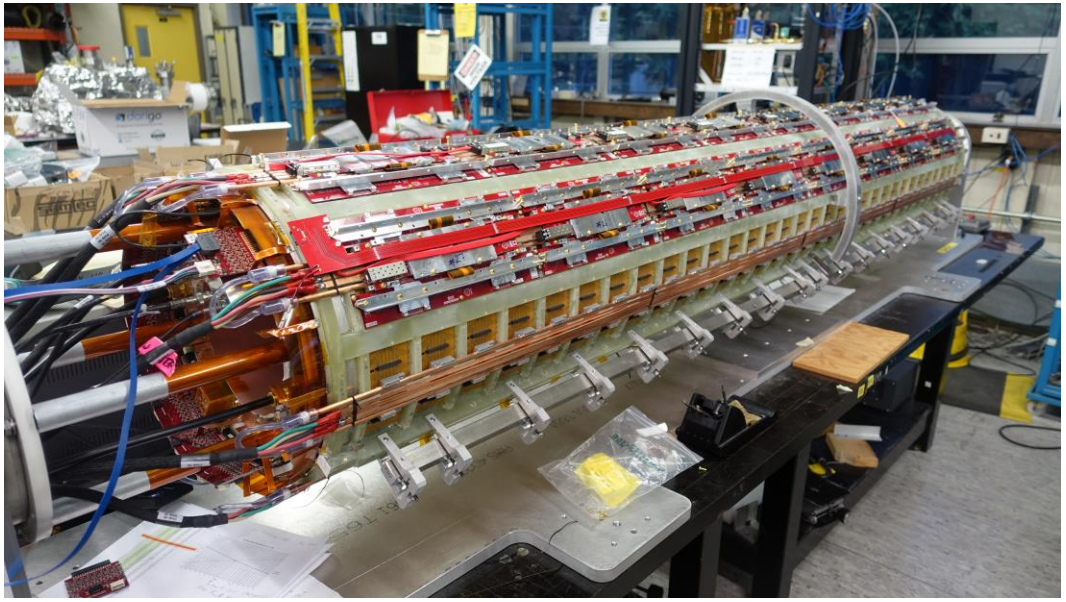
- trap some antihydrogen in a vertical trap
- release it
- see where it goes – radial time projection chamber annihilation detector

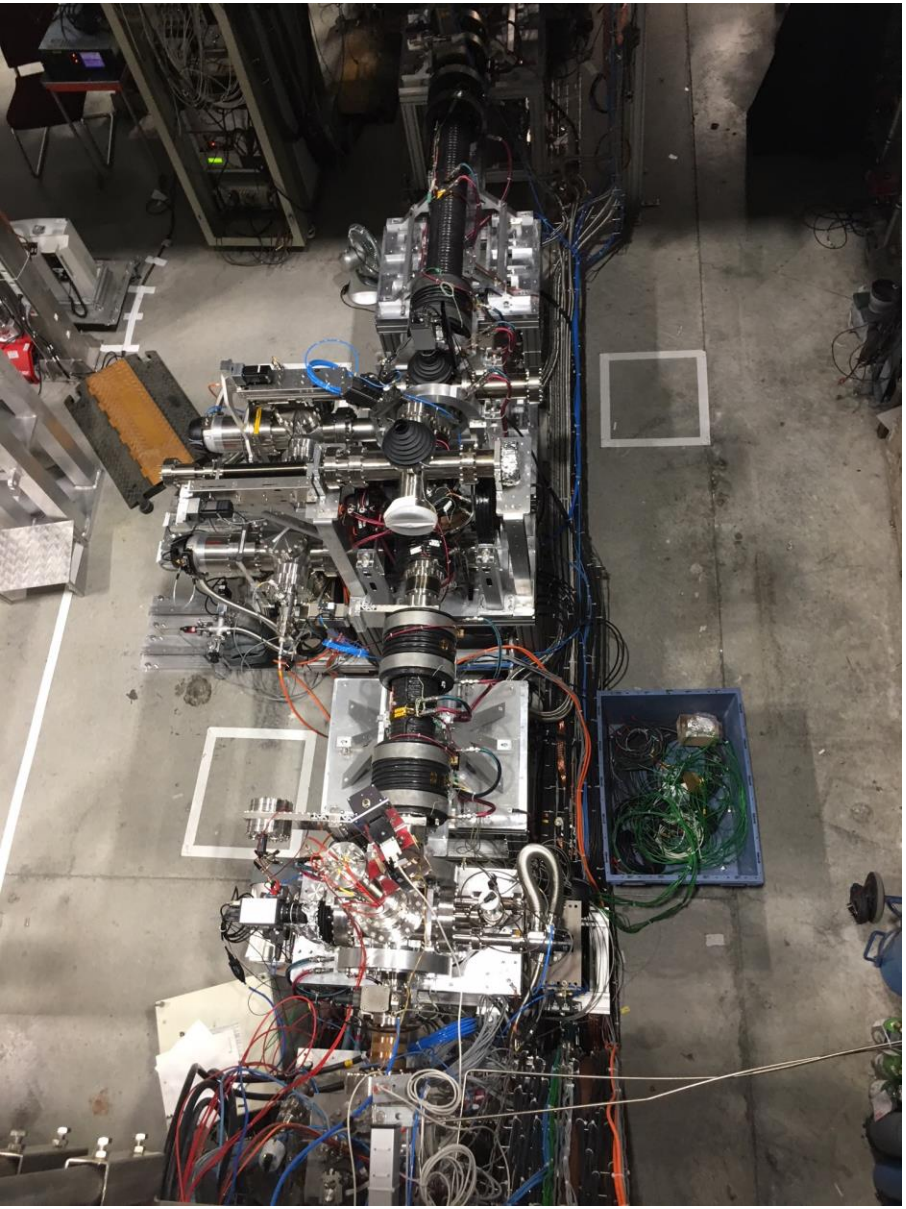
ALPHA-g Radial TPC (TRIUMF)





ready when needed






ALPHA

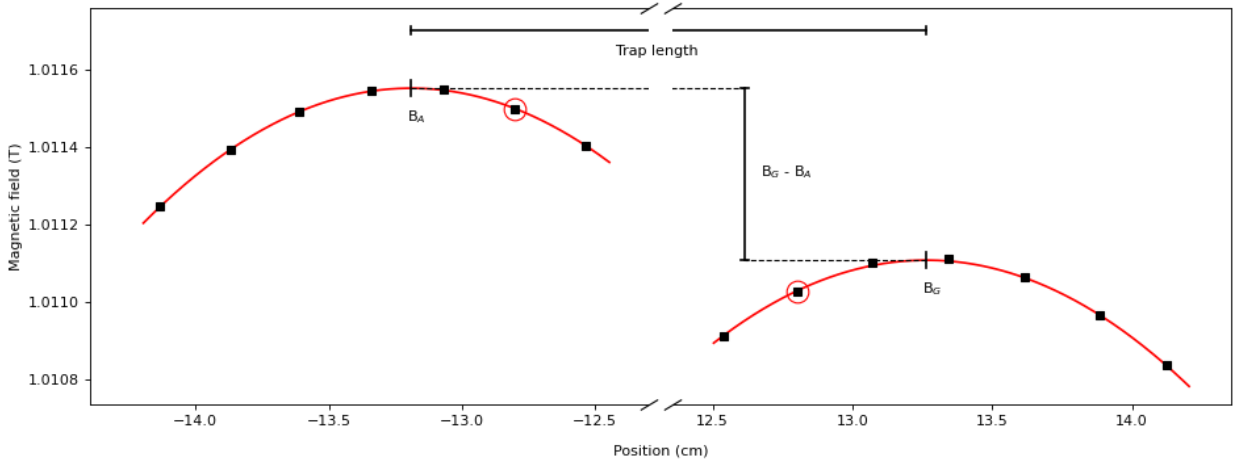
Insert ALPHA-g Here – May 2018

November 2018

Magnetic bias concept

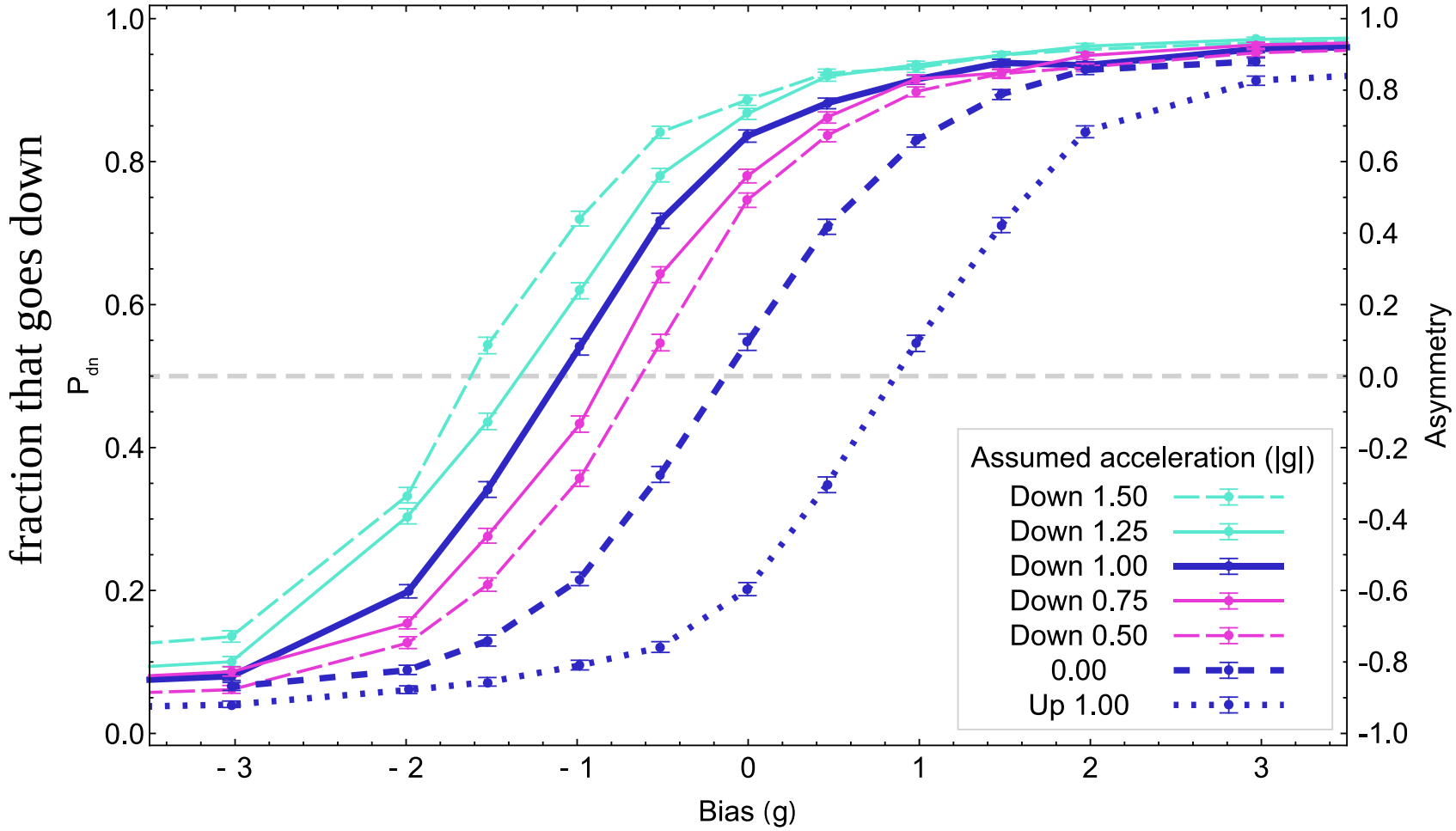
Add a differential current to one of the mirror coils

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

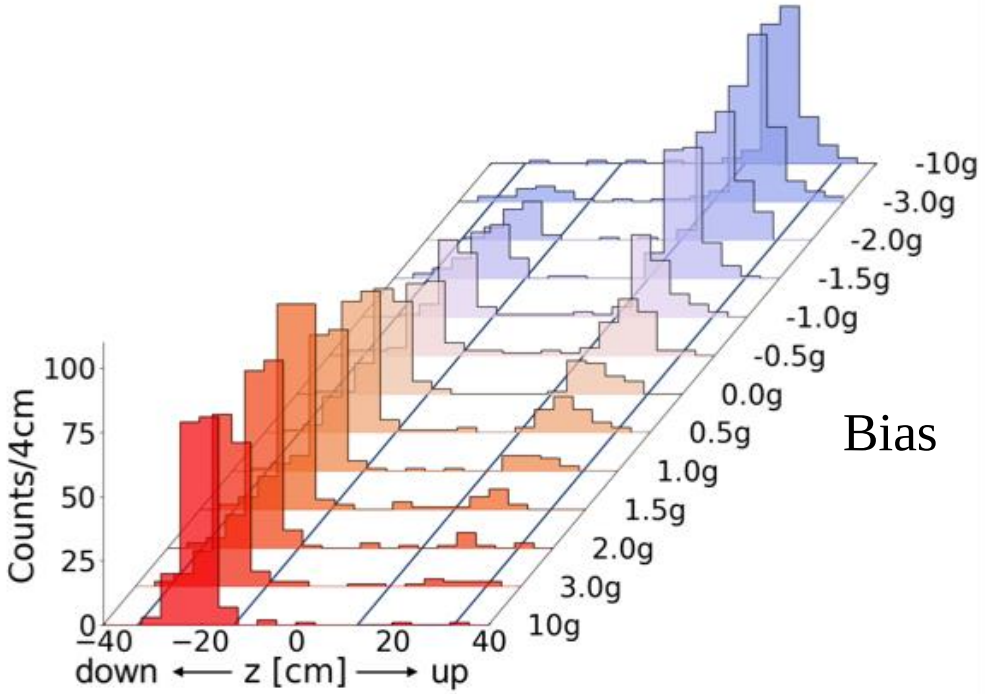


in a real experiment – ramp both mirror currents down while maintaining this difference

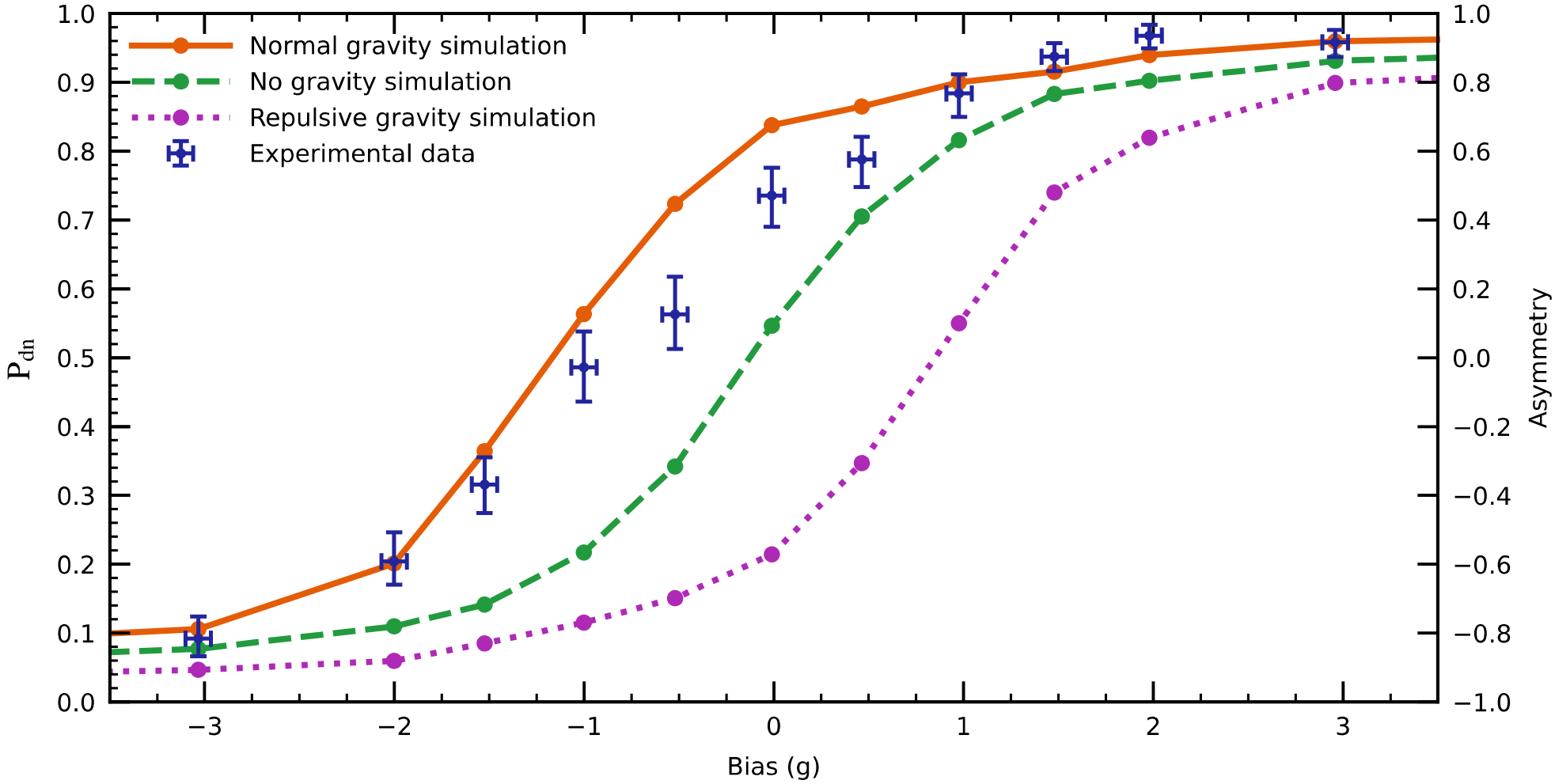
The S-curve - simulation



Data from 2022 run



The Result


Normal gravity simulation
No gravity simulation
Repulsive gravity simulation
Experimental data
P_{dn}
Asymmetry
Bias (g)
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
−1.0
−0.8
−0.6
−0.4
−0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
−3
−2
−1
0
1
2
3

nature

Explore content | About the journal | Publish with us

nature > articles > article

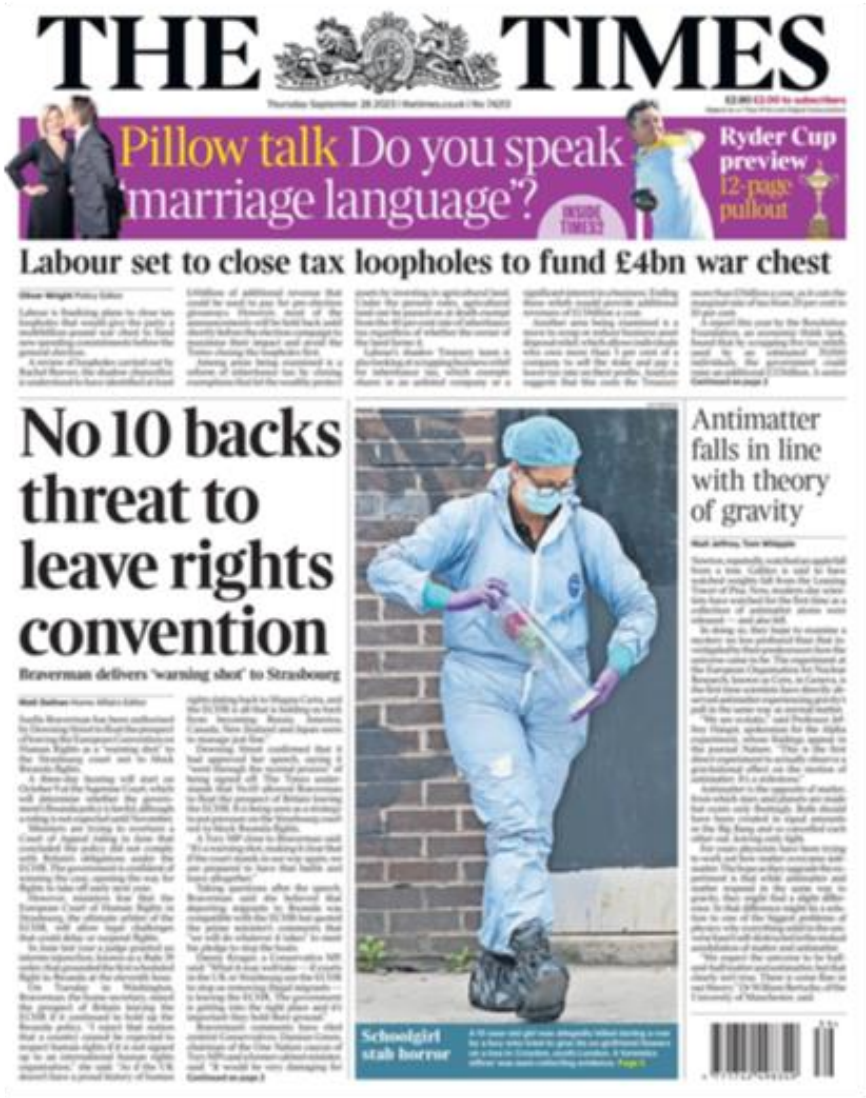
Article | Open access | Published: 27 September 2023

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

77k Accesses | **1632** Altmetric | Metrics



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

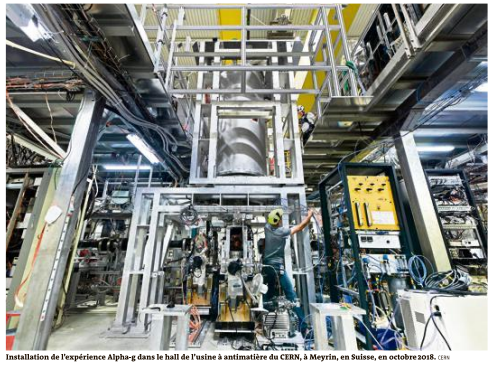
Schoolgirl stab horror

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.



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

« Usine à antimatière »

« Nous sommes les premiers à avoir fait cette expérience, qui représente trente ans d'efforts. Beaucoup pensaient que les antiatomes tombaient 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.

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.

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

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 3 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 baugent 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*.

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 des années à venir. ■

DAVID LABOUSSIERIE

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, arguant 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.

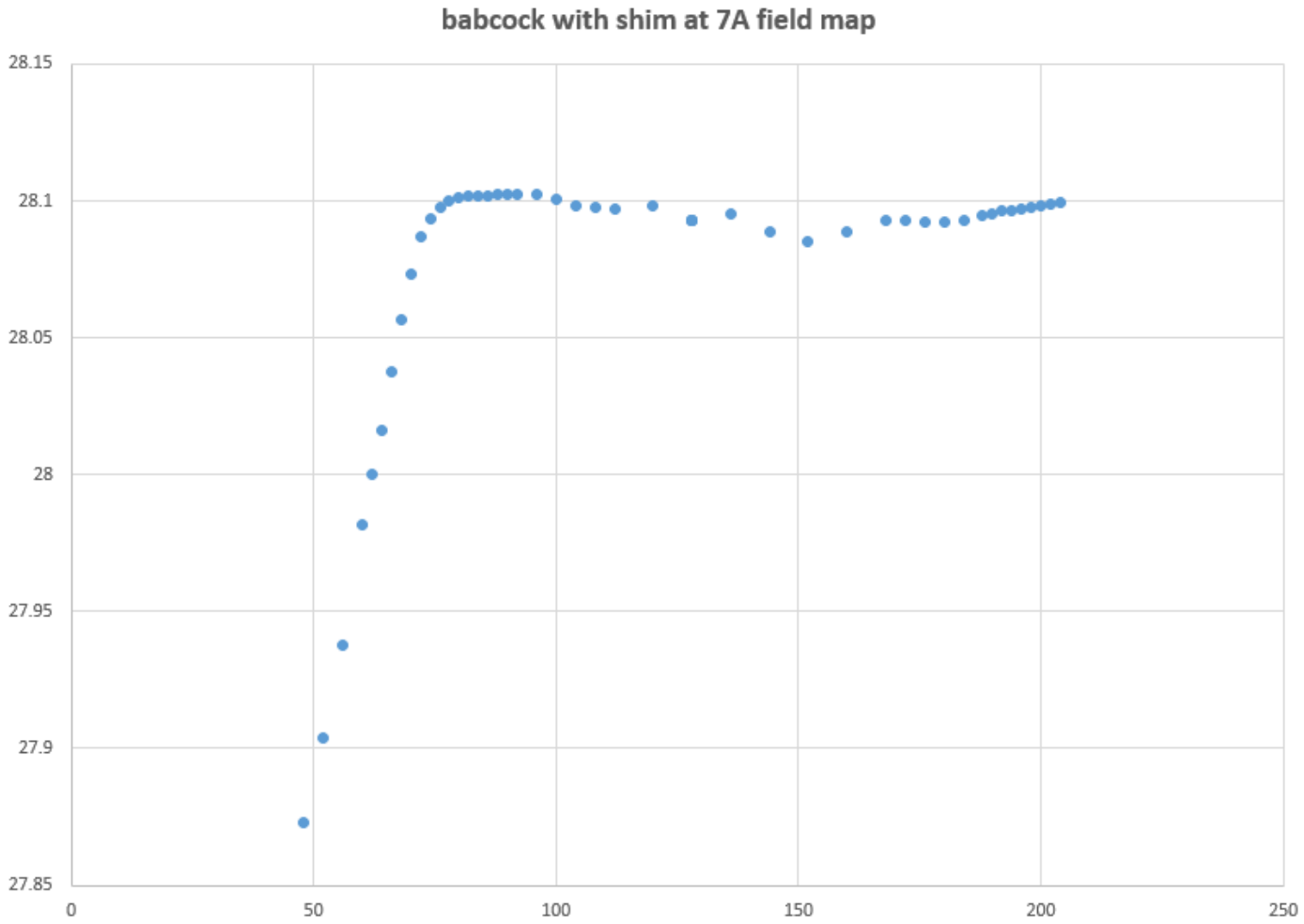
Les dirigeants écossais Humza Yousaf, premier ministre, chef du parti indépendantiste SNP, et Patrick Harvie, dirigeant des Verts écossais, son partenaire de coalition, ont également protesté mercredi, le premier estimant que l'accord donné *« est une mauvaise décision »*, le second dénonçant *« un gouvernement 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.

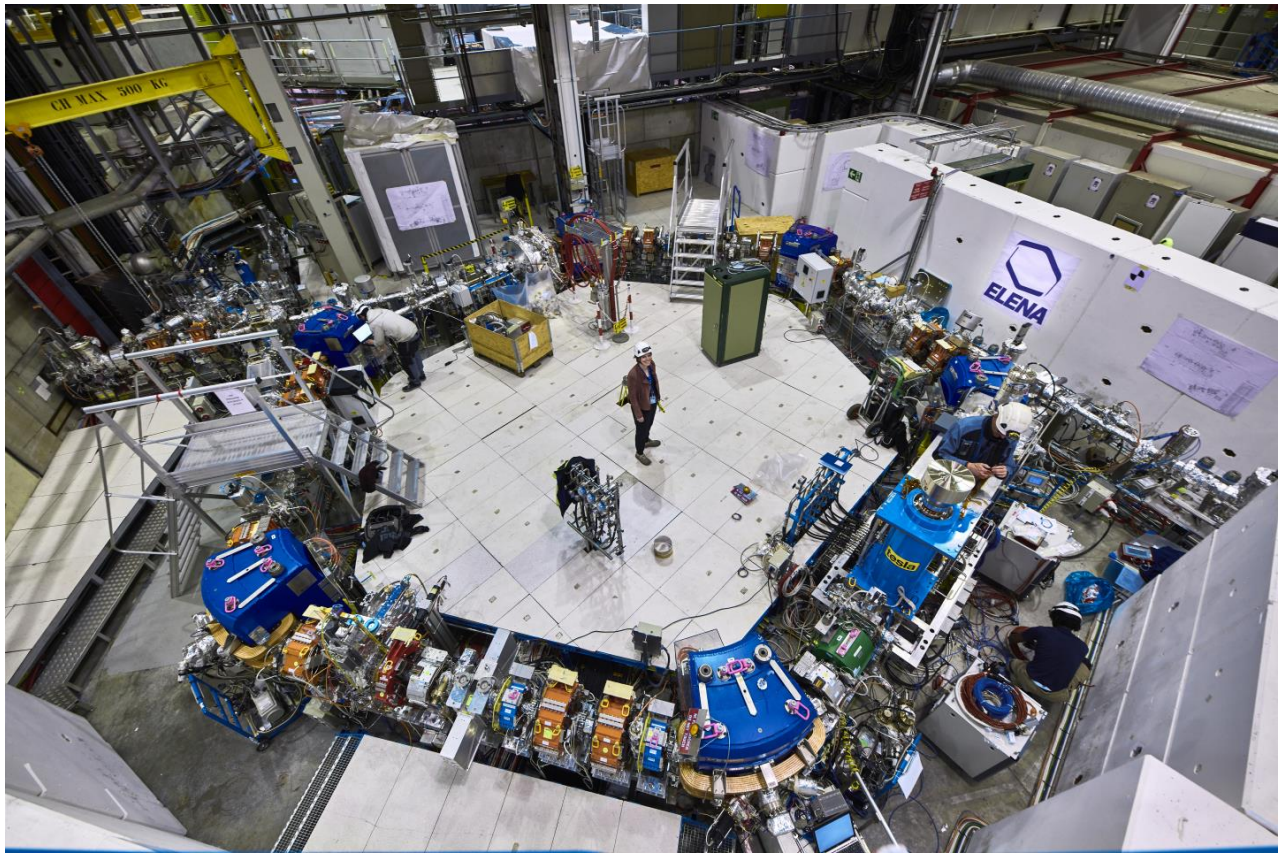
Les opposants à l'exploitation de Rosebank ne baissent pas les bras. Une manifestation spontanée a eu lieu mercredi devant le ministère de l'énergie à Londres. D'autres sont en préparation. En 2021, dans la foulée de la COP26 à Glasgow, ils avaient réussi à stopper l'attribution de la licence d'exploitation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

CÉCILE DUCOURTIEUX

Field mapping using electron cyclotron resonance (ECR)



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

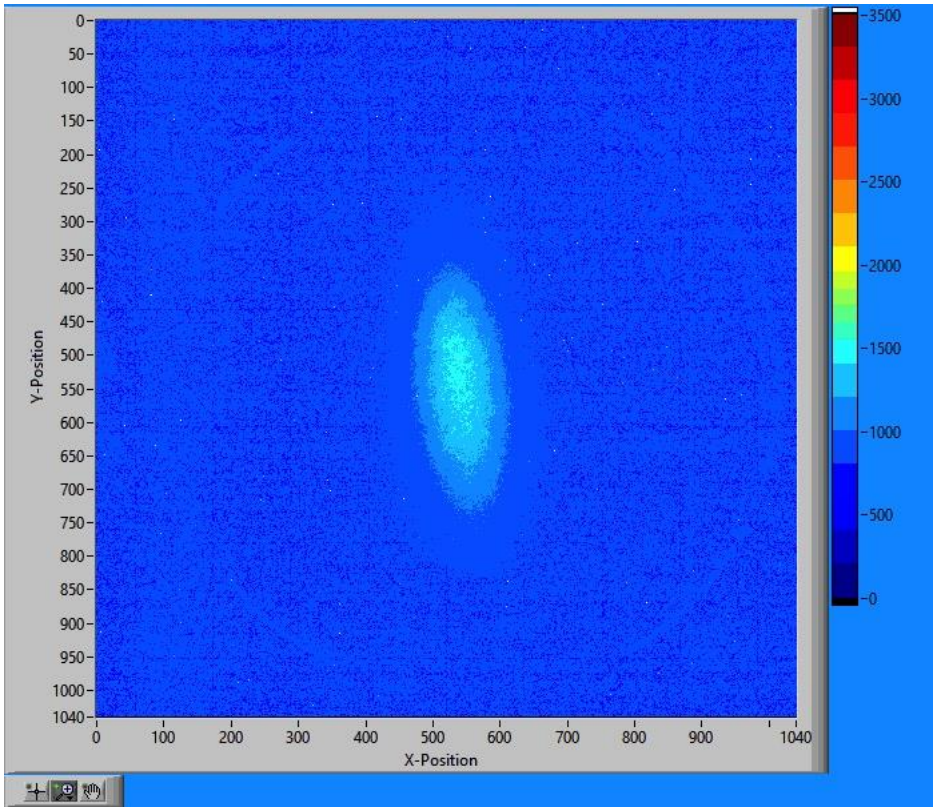
Operation for other experiments
in August 2021

Worked on the very first shot
to ALPHA in 2021!

Total paradigm shift: 24 hour pbars!

First shot of pbars to ALPHA from ELENA

- Very first shot went down the centre of the beamline on the first day of the run!
- Awe and respect for the AD/ELENA team…



phosphor screen upstream of ALPHA catching trap

Phase Space Cooling for Antihydrogen

In the AD: stochastic and electron cooling for pbars

In ELENA: electron cooling for pbars

In the antiproton catching trap: cyclotron cooling of electrons; electron cooling of pbars

In the positron accumulator: cryogenic moderation and buffer gas slowing of positrons

In the mixing trap: evaporative cooling of positrons, cyclotron cooling of positrons, positron cooling of pbars to form Hbar

In the antihdyrogen trap: pulsed laser cooling (121 nm) of antihydrogen, adiabatic ‘cooling’ of hbar

New for 2023: sympathetic cooling of positrons by laser cooled Be ions to increase hbar production rate

Result: the antihydrogen in ALPHA is now colder than the hydrogen used in the best spectroscopy measurements for matter…

ALPHA from 2024 onward

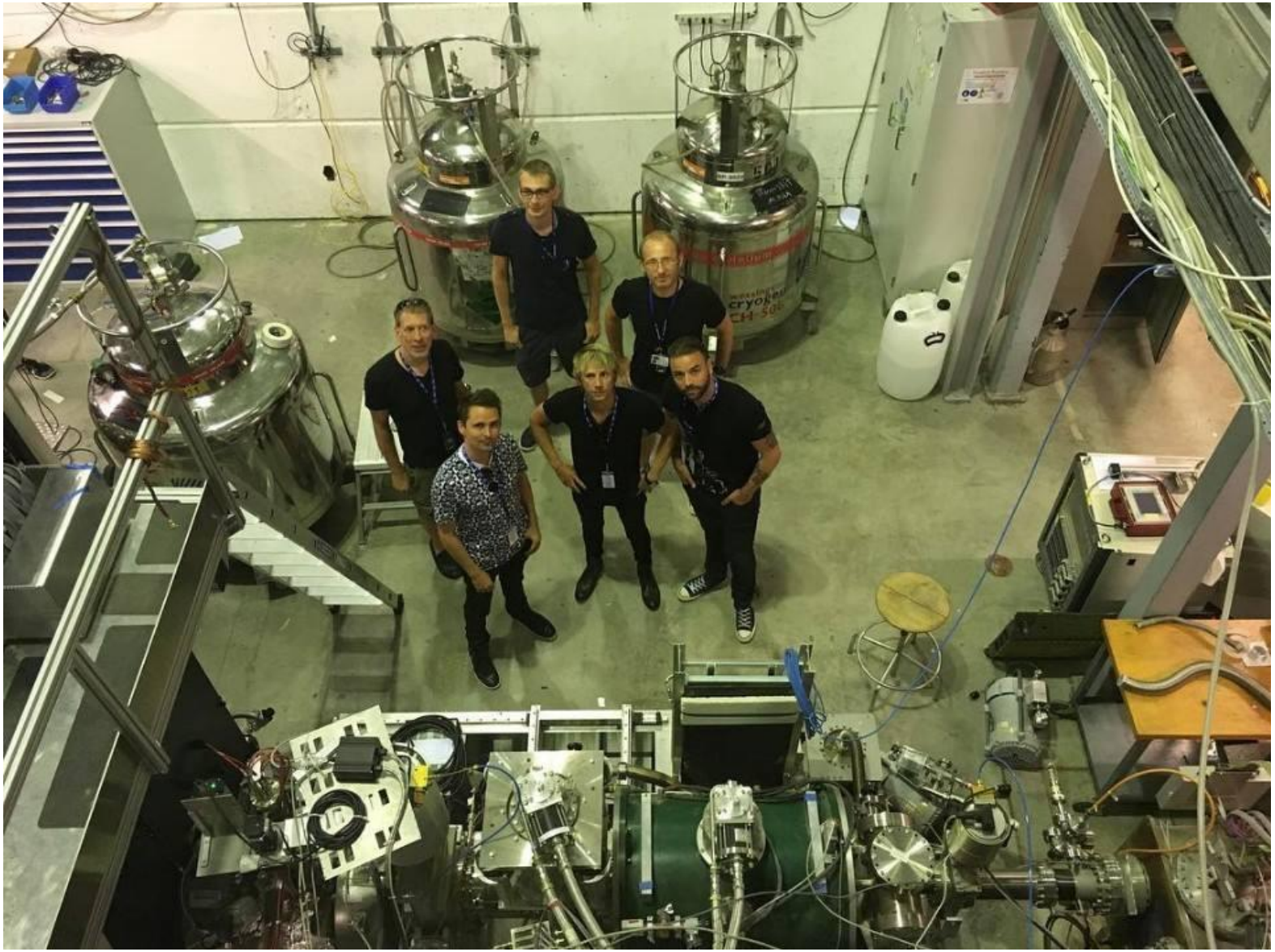
- gravity with antimatter – precision measurements
- antimatter spectroscopy to hydrogen-like precision:

antihydrogen can now be colder than the hydrogen used for the most precise measurements on matter…

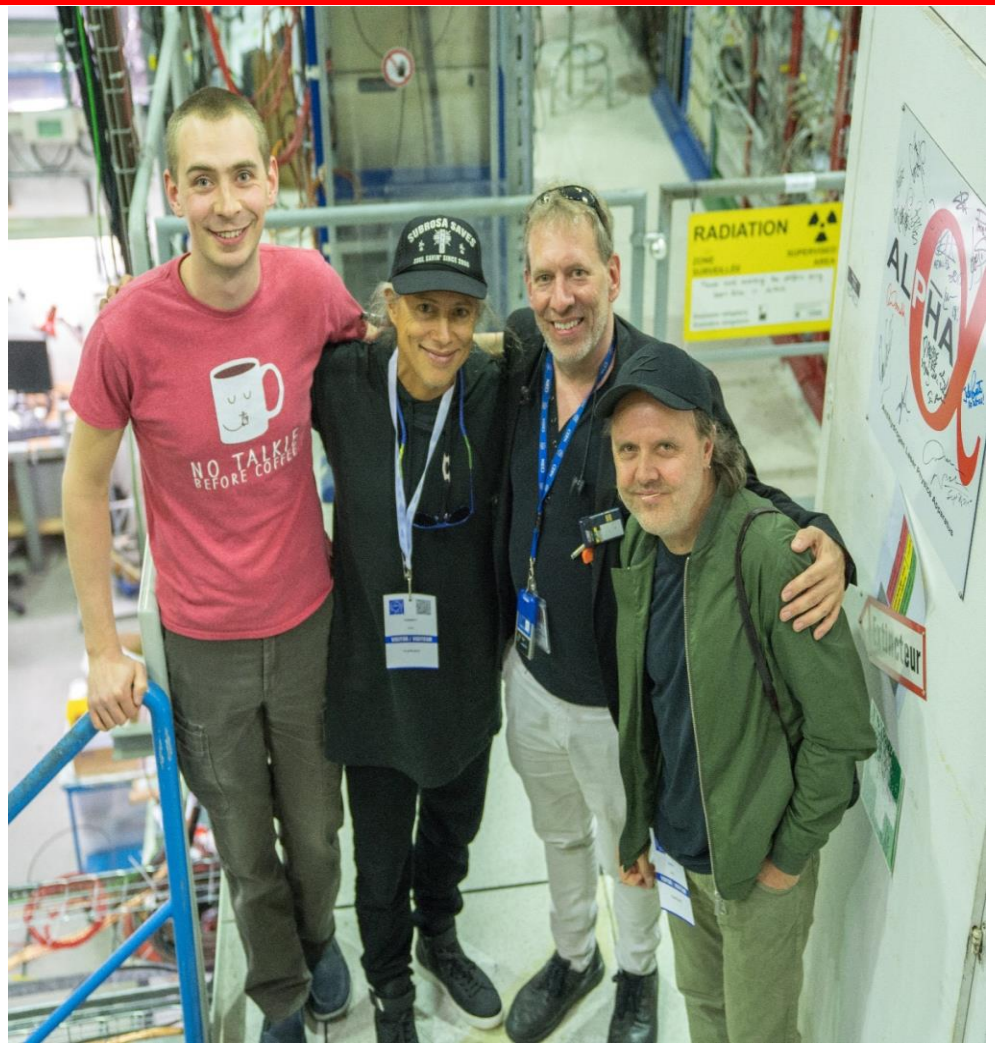
- other spectral lines – antiproton charge radius…
- measurements on hydrogen with ALPHA-developed techniques?
- long-term possibility: anti-deuterium?

All of our friends are rock stars…Crosby and Nash

All of our friends are rock stars 2…Muse



Metallica



755 official groups with 13869 international visitors in 2018

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 Monday night…

And finally, a word from my sponsor:

! "#$%$&()*+($+,)(% . *' / "#0+- (+12+"3 4 +-)(3 ()*+(5 #"8 6 (

Is Denmark a great country, or what?

Support *alternative* science: drink Carlsberg!