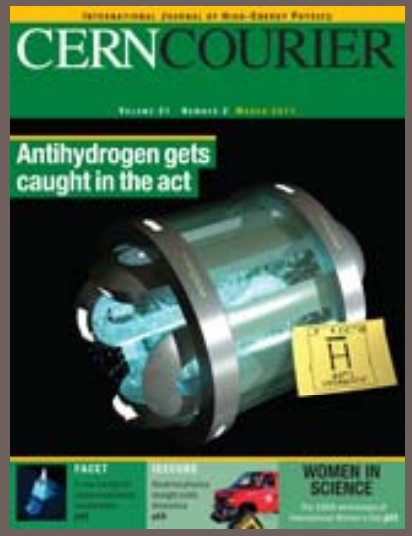
TRIUMF

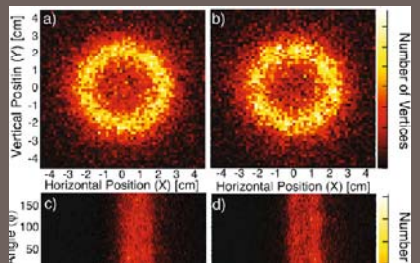
Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
Laboratoire national canadien pour la recherche en physique nucléaire
et en physique des particules

Confinement of Antihydrogen for 1000 Seconds: ALPHA Collaboration

PANIC 2011, July 25 – 29, MIT

Makoto C. Fujiwara
TRIUMF / Univ. of Calgary



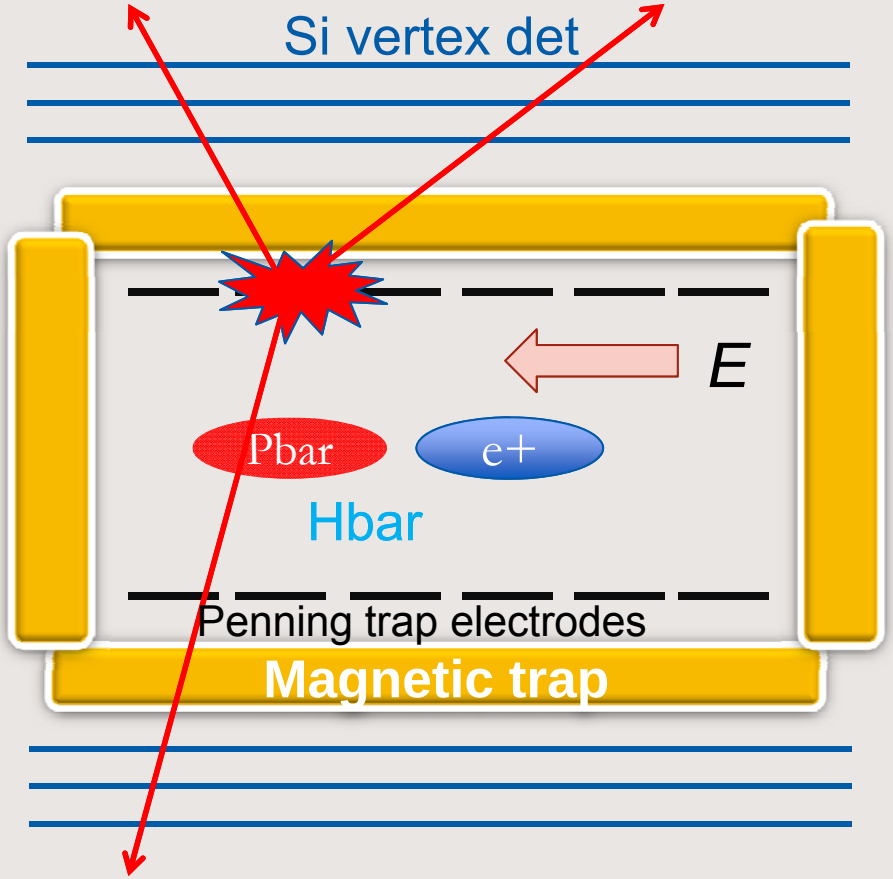


Owned and operated as a joint venture by a consortium of Canadian universities via a contribution through the National Research Council Canada
Propriété d'un consortium d'universités canadiennes, géré en co-entreprise à partir d'une contribution administrée par le Conseil national de recherches Canada

Motivations

- Atomic hydrogen: one of best studied systems
  - 1s-2s level: 2 466 061 102 474 851 (25) Hz $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-14}$
  - Hyperfine splitting: 1 420 405 751.768 (1) Hz 10^{-12}
- Antihydrogen (anti-H): bound state of pbar & e+: produced in large quantities by ATHENA, ATRAP (2002)
- Comparison of H and anti-H: "Textbook" experiment!
- Tests of Fundamental Symmetries and Concepts: CPT, Quantum Field Theory, Gravity
- Trapping of antihydrogen: technical bottleneck
  → Initial Goal of ALPHA (est. 2005)

Antihydrogen Trapping with ALPHA



1. Prepare 3x10^4 pbars (300K; after cooling, compression, transfer), and 4x10^7 e+ (170K) [4 PRLs]
2. Energize magnetic trap
3. Gently mix pbars and e+ for 1 s [Phys. Rev. Lett. 2011]
4. Hbar < 0.5 K (50 μeV) will be trapped
5. Clear charged particles by E field
6. Anything remaining trapped should be neutral anti-H
7. Shutdown magnetic trap in ~10 msec by quenching magnets
8. Released anti-H hit the walls
9. Search for annihilation signatures in Si detector [PLB 2011]

ALPHA Challenges

Characteristic energy scales:

- Plasma energy: space charge ($\propto en_e r^2$) $\approx$ 10 eV
- Neutral trap depth: ($\mu \Delta B$) $\approx$ 50 μeV
- Need 10^{-5} control of plasmas to make cold enough anti-H

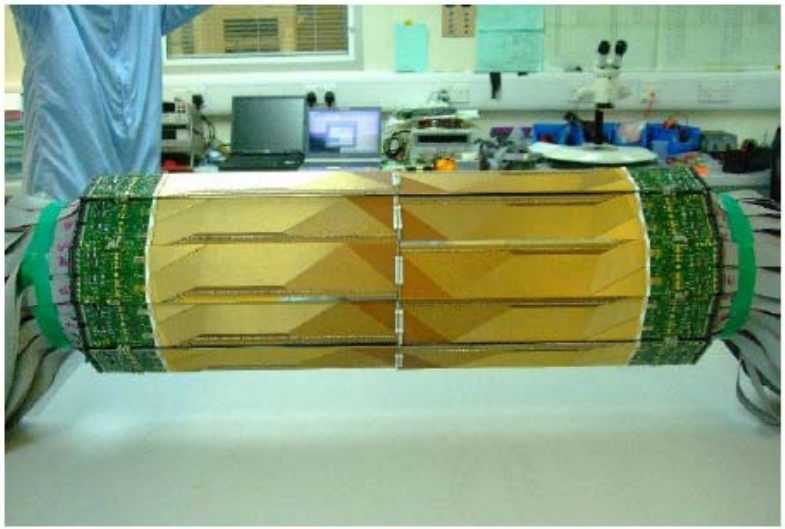
- ATHENA's anti-H production was much easier!

  Atomic energy scale: ($m_e \alpha^2$) 10 eV

  $\approx$ Plasma space charge 10 eV

Detection of anti-H trapping

- Expected event rates very low
- Statistics & backgd limited



30,000 channel 3-layer Si strips
~0.8 m^2 active area
Liverpool + ALPHA Canada
Position Sensitivity Essential

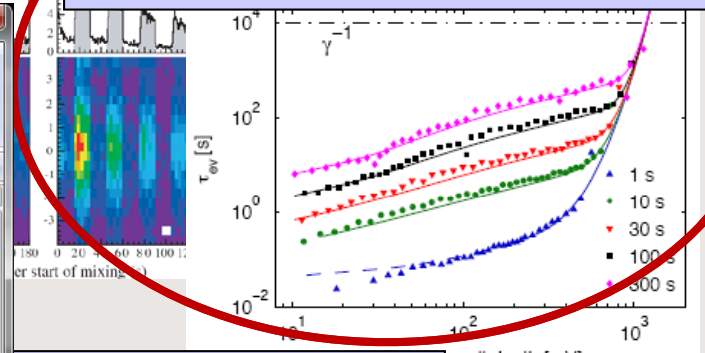
ALPHA Progress since First Beam in 2006

Phys. Rev. Lett. **98**, 023402 (2007)
Compatibility of Penning and Neutral traps

Phys. Rev. Lett. **101**, 053401 (2008)
Pulsed source of antihydrogen (ATHENA)

Phys. Rev. Lett. **100**, 203401 (2008)
Antiproton plasma manipulation

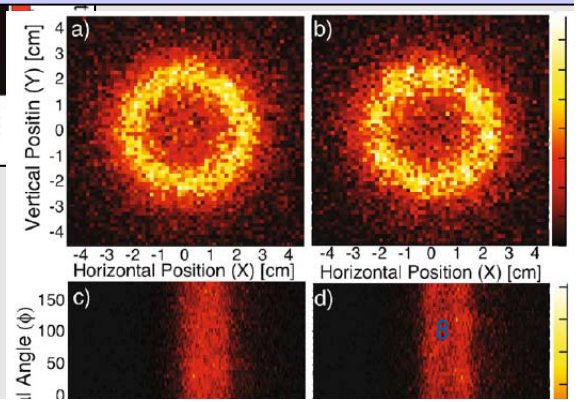
Phys. Rev. Lett. (2010), July 2
Evaporative cooling of antiprotons



Phys
Annih

Letters **16**, 100702
asma resonances

Phys. Lett. B **685**, 141 (2010)
Anti-H production in atom trap



The Coolest Antiprotons | Physical Review Focus - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

http://focus.aps.org/story/v26/st1

Most Visited Getting Started Latest Headlines

The Coolest Antiprotons | Physical Re...

Physical Review Focus | Focus Archive | Image Index | Focus Search

Previous Story / Volume 26 archive

Phys. Rev. Lett. **105**, 013003
(issue of 2 July 2010)
Title and Authors

2 July 2010

The Coolest Antiprotons

A new record low temperature for a cloud of antiprotons was measured at CERN in Geneva, announces a report in the 2 July *Physical Review Letters*. Researchers cooled a cloud of about 4,000 antiprotons down to 9 kelvin using a standard approach for cooling atoms that has never been used with charged particles or ions. The technique could provide a new way to create and trap antihydrogen, which could help researchers probe a basic symmetry of nature.

iStockphoto/Thomas_EyeDesign

Antihydrogen, the antimatter counterpart of hydrogen, is composed of one antiproton and one positron (anti-electron). According to the CPT (charge-parity-time) theorem, a fundamental pillar of the standard model of particle physics, hydrogen and antihydrogen should share many basic traits, like mass.

Antiproton steam. A standard method for

Done

More papers (2011)

Physics Letters B 695 (2011) 95–104

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

Search for trapped antihydrogen

ALPHA Collaboration [1]

G.B. Andresen [a], M.D. Ashkezari [b], M. Baquero-Ruiz [c], W. Bertsche [d], P.D. Bowe [a], C.C. Bray [c], E. Butler [d], C.L. Cesar [e], S. Chapman [c], M. Charlton [d], J. Fajans [c], T. Friesen [f], M.C. Fujiwara [g,f], D.R. Gill [g], J.S. Hangst [a], W.N. Har… L. Kurcha… P. Pusa [1], R.I. Thon…

Allowed "gentle mixing" of pbar & e+

PRL 106, 025002 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 14 JANUARY 2011

Autoresonant Excitation of Antiproton Plasmas

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

PRL 106, 145001 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 8 APRIL 2011

Centrifugal Separation and Equilibration Dynamics in an Electron-Antiproton Plasma

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] T. Friesen,[6] M. C. Fujiwara,[7] D. R. Gill,[7] A. Gutierrez,[8] J. S. Hangst,[1] W. N. Hardy,[8] M. E. Hayden,[2] A. J. Humphries,[4] R. Hydomako,[6] S. Jonsell,[9] N. Madsen,[4] S. Menary,[10] P. Nolan,[11] A. Olin,[7] A. Povilus,[3] P. Pusa,[11] F. Robicheaux,[12] E. Sarid,[13] D. M. Silveira,[14] C. So,[3] J. W. Storey,[7] R. I. Thompson,[6] D. P. van der Werf,[4] J. S. Wurtele,[3,15] and Y. Yamazaki[14,16]

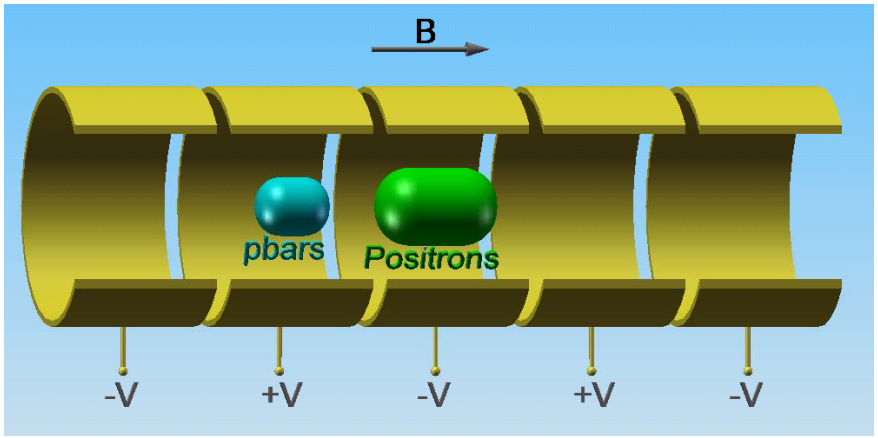
(ALPHA Collaboration)

Antihydrogen production via auto-resonant (AR) injection of antiprotons

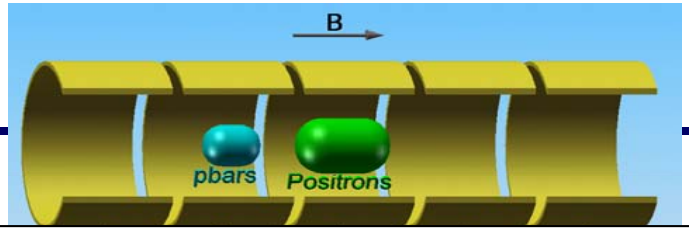
ALPHA: Phys. Rev. Lett. 106, 025002 (2011)

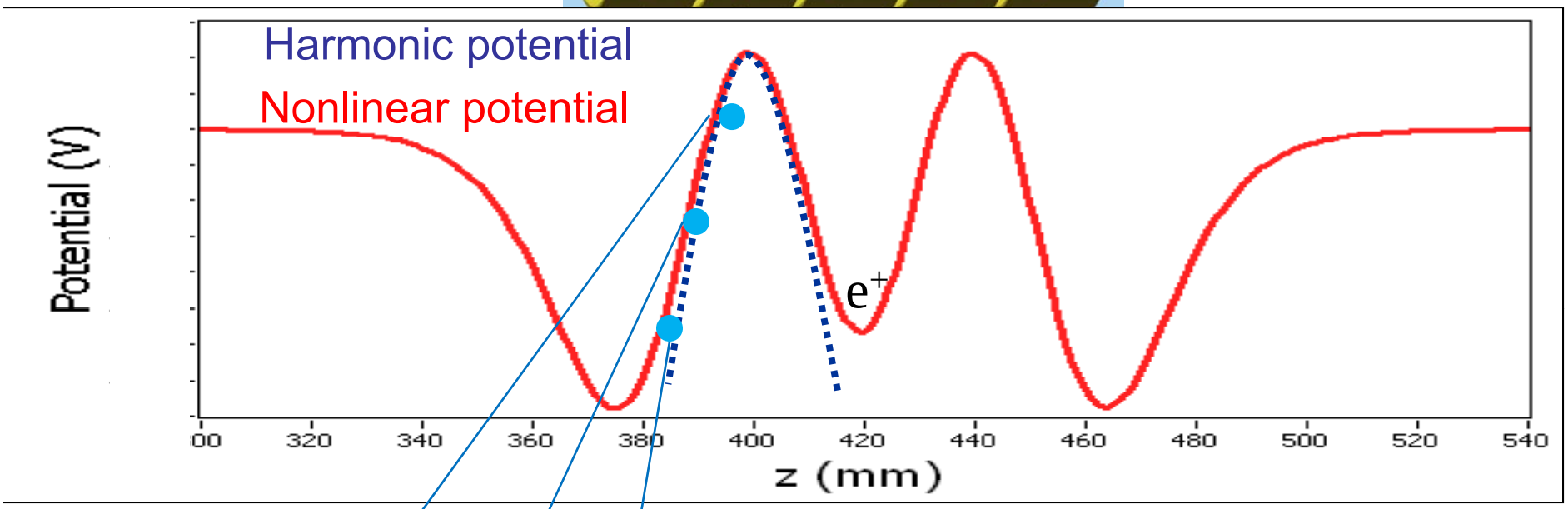
AR: self-regulating feature
of a driven non-linear oscillator,
where oscillation amplitude can be
locked by drive frequency

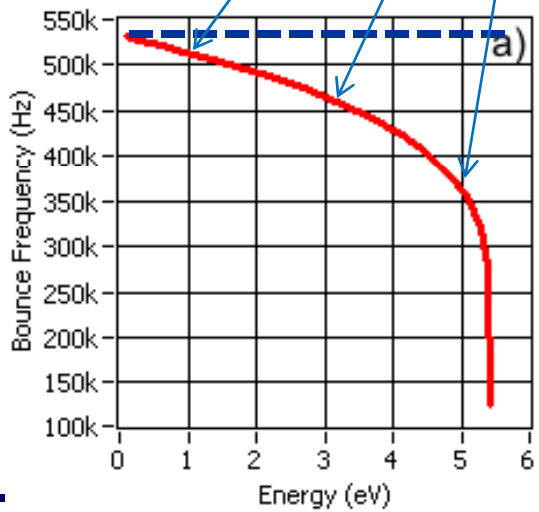
Allows efficient pbar injection into
e+ with very low relative energy
(gentle mixing vs. 10 eV injection)



Auto-resonance





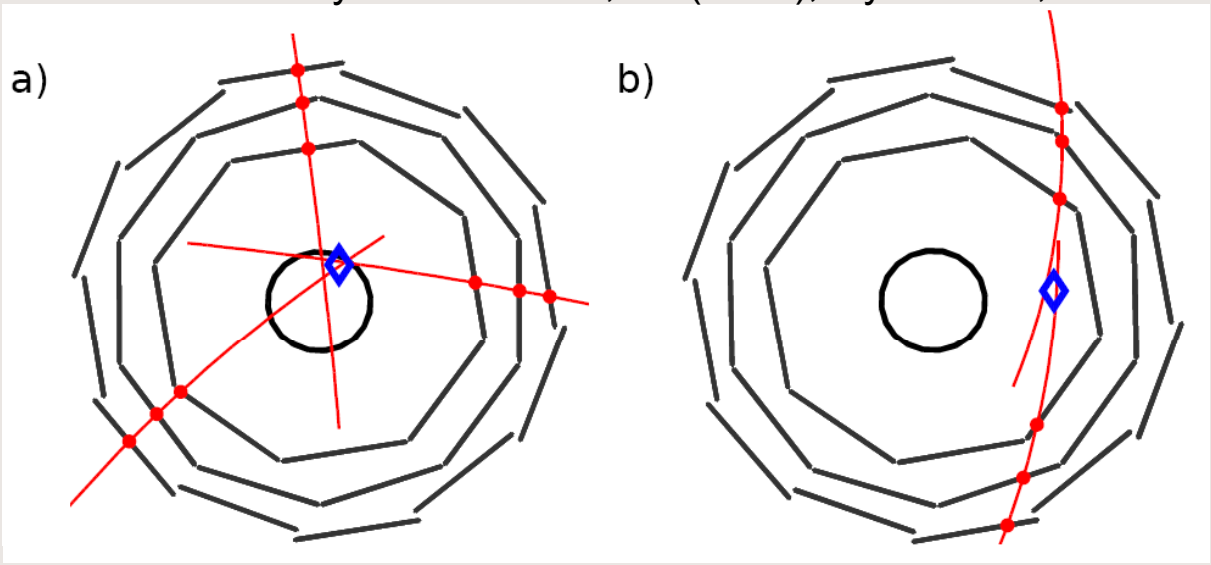


RF drive:
Start at high freq (600 kHz)
Chirp down to lower freq

AR: Essential for trapped Hbars

Antihydrogen Detection (Richard Hydomako, U Calgary + ALPHA-Canada)

Phys. Lett. B 695, 95 (2011); Hydomako, Ph.D. thesis, U Calgary

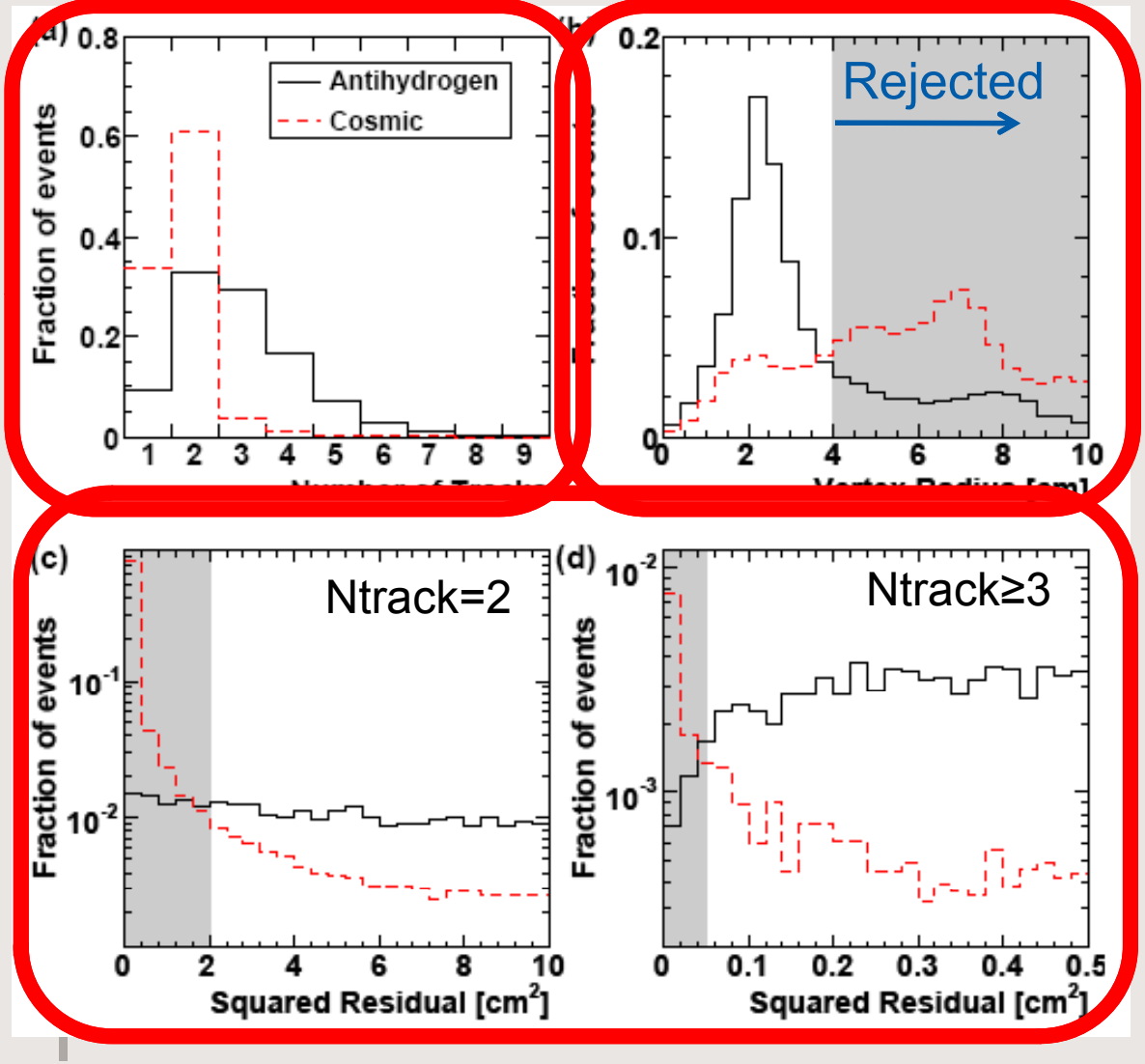


Antihydrogen Cosmic

- Use event topology to select signal from cosmic background
- Study selection criteria ("cuts"), without looking at trapping data (except on-line monitoring)
- Instead use independent calibration data samples
  - Antihydrogen Sample (2.4×10^4 events); Cosmic Sample (1.3×10^5 events)
- Achieved *unbiased* and *optimized* choice of cuts ("blind analysis")
  [submitted to NIM]

Event Selection Criteria

Distributions of calibration samples



Main cut variables

1. Number of tracks
2. Vertex radius
3. Linear fit residuals

Cuts optimized for *expected* significance (p-value)

Cosmic rejection: 99.5%

Signal acceptance: 65%

All this studied without Looking at the data

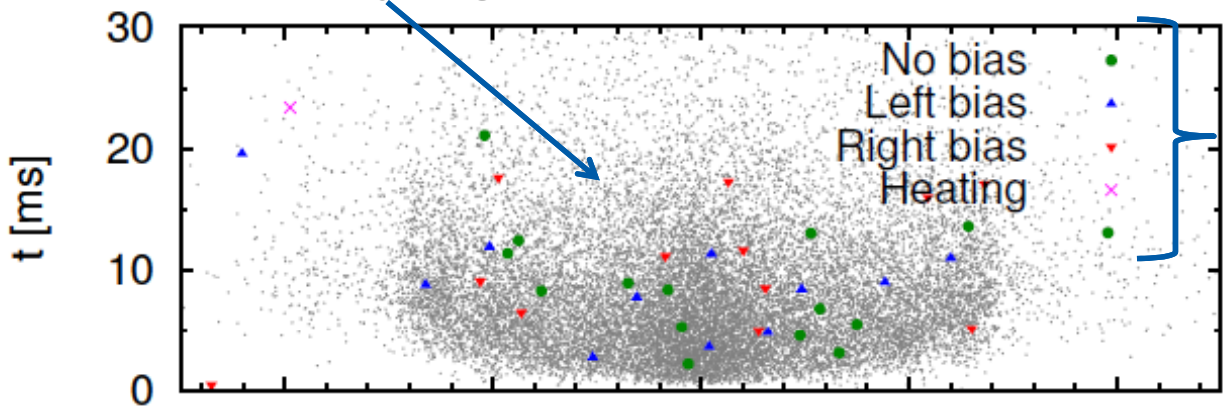
Antihydrogen Trapping

- 2009: found 6 events after "opening the box"
  - 212 trials
  - Cosmic background rejected >5 sigma
  - (very unlikely) "mirror trapping" of bare pbars in homogenous B field could not be ruled out

    (recall: no e+ detected)
  - Did NOT claim anti-H trapping!
- 2010: found 38 events
  - 335 trials
  - Improved plasma conditions
- New control expt's
  - Mixing with heated e+ (suppresses anti-H production)
  - Release anti-H while applying E field: bare pbars would be deflected
  - Mirror trapped bkgd ruled out!

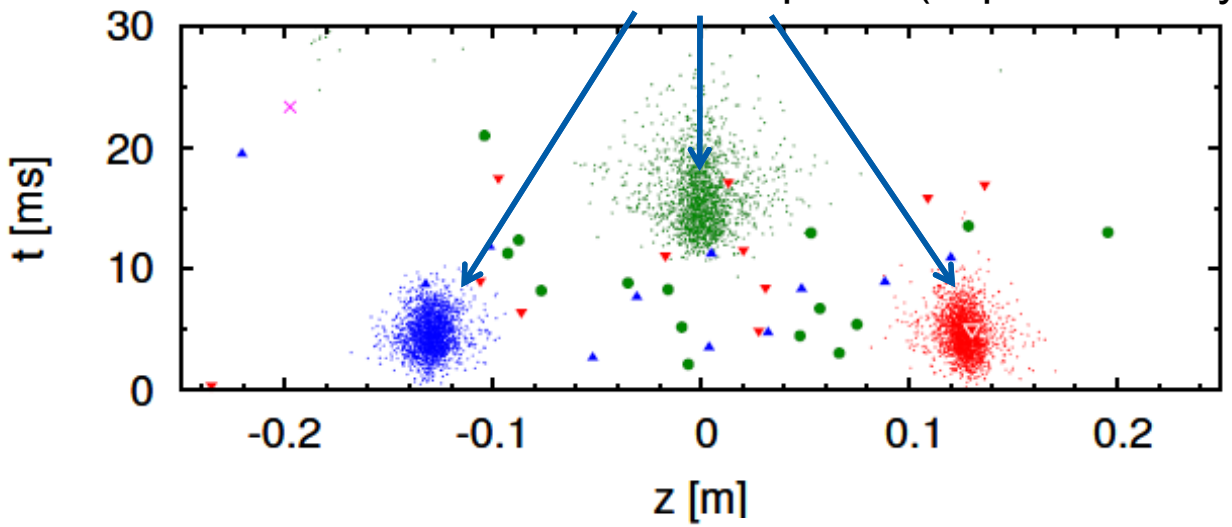
Annihilation time and position

Simulation for antihydrogen



data

Simulations for bare pbars (experimentally validated)



Makoto Fujiwara,

Position sensitivity essential!

TRIUMF

Antihydrogen Trapped (for 172 ms)
Nature, Nov. 2010

SALON SEUDUN SANOMAT — Torstaina 18. marraskuuta 2010 15

Ulkomaat

Vinkkaa juttu!

toimitus@ssn.fi

(02) 7702 314

Kate Middletonin uskotaan pärjäävän prinsessa Dianaa paremmin

LONTOO. Prinssi **William**in kihlattu **Kate Middleton** on paremmin valmistautunut "palottavaan" tehtäväänsä kuningashuoneen tulevana jäsenenä kuin edesmennyt prinsessa **Diana** aikanaan oli, arvioivat hovitalantuntijat.

Diana oli ujo 20-vuotias tyttönen, kun hän meni naimisiin itsellään 12 vuotta vanhemman prinssi Charlesin kanssa vain lyhyen seurustelun päätteeksi. Kate sen sijaan on jo 28-vuotias, hänellä on turvanaan yliopistotutkinto, työpaikka ja pitkä yhdessäolo Williamin kanssa.

– Uskon, että hän pärjää hyvin. Tämä hidas suhteen rakentaminen on valmistanut häntä, sanoi etiketin ja aristokratian asiantuntija **Charles Kidd**.

Myös William itse on myöntänyt, että hän odotti kosinnan kanssa nähdäkseen pitkään aviokseen Katelle "mahdollisuuden tutustua (tulevaan elämäntapaansa) ja tarvittaessa vetäytyä pois". (STT–AFP)

Antimaterian vangitseminen onnistui Sveitsin Cernissä

Suomalaistutkijan mukaan antimateriaa voidaan nyt ensimmäistä kertaa tutkia, ei vain havaita

Antivedyn tutkimus voi muuttaa käsityksiämme luonnon perussymmetrioista

Eurooppa hiukkasfysiikan tutkimuskeskuksessa Cernissä on onnistuttu ensimmäistä kertaa paitsi valmistamaan niin myös säilömään neutraalia antiainetta, antivetyä, riittävän pitkäksi, että sitä ehditään tutkia.

– Olemme vangitseet antivetyatomin erikoislaisen loukkuun sekunnin murto-osiksi, mikä on fysiikan maailmassa riittävä aika tutkia sitä ominaisuuksia mitä vain. Tiedämme, että voimme pitää sitä vangittuna pidempäänkin, Cernin ALPHA-kokeessa työskentelevä tohtori Petteri Pusa kertoo Sveitsistä.

Tuhansista Cernin AD-laitoksen valmistamista antivetyatomeista 38 on tutkimuksen tähtäämällä riittävän pitkäksikin tutkittavaksi.

– Tästä avautuva tutkimus tarjoaa mahdollisuuden ymmärtää paremmin maailmankaikkeutta, tohtori Pusa sanoo.

Vaikea tutkimuskohde

Antimateria on vaikea tutkimuskohde: antiprotoneja pitää tuottaa hiutaleisuutta voimakkaissa hiukkaskiihdyttimissä. Näin tuotetuit antihiukkaset ovat hyvin kuumia, oli ne otsoneet lähes valon nopeudella. Lisäksi törmätessään materiaan ne annihiloituvat: toisessa kohdatessaan materia ja antimateria tuhoutuvat, räjähtävät taikaisin energiaksi.

Antimaterian olemassaolon ennusti Nobel-palkittuna teoriassaan brittiläinen fysiikko Paul Dirac 1928. Antivetyä onnistuttiin tuottamaan Cernissä ensimmäisen kerran 1995. Silloin se oli olemassa sekunnin kahdeksanmiljoonasosan, riittävästi sen havaitsemiseen.

Cernissä valmistetaan antivetyä siksi, että se on kaikkein yksinkertaisin (anti)atomaarinen systeemi. Antivedyn "peilikuva", tavallinen vety, on tunnettu ja tutkittu alkuaina. Sen ominaisuudet tunnetaan hyvin ja fysiikan teoriasta rukata uuteen uskoon. Jos ne ovat samanlaiset, tiedämme, että on otettävä ratkaisua muualta kysymyksiin, miksi antimateria on vähemmän tai miksi olemme ylipäätään olemassa, Pusa sanoo.

Missä antimateria luuraa?

– Yksi fysiikan suuria mysteereitä on se, ettei mistään maailmasta ole löydetty antimateriaa, Pusa sanoo.

Mysteerikin astan takaa se, että maailmankaikkeuden synnyn ensi hetkillä yli 13 miljardia vuotta sitten materiaa ja antimateriaa on täytynyt olla yhtä paljon. On yhä epäselvää, miksi kaikki antimateria katosi tai miksi aiheutti sen, että materiaa jäi jäljelle riittävästi nykyisen tunnetun universumin rakennusaineksi.

– Materian ja antimaterian välillä vallitsee CTP-symmetria, eli vedyllä ja antivedyllä pitäisi olla täsmälleen samat ominaisuudet, lukuun ottamatta niiden rakennusosadan vastakkaista varauksia.

Antivetytutkimuksen tarkoituksa on hyötyä on joko löytää eroja tai olla löytämättä niitä.

Mielenkiintoisia tuloksia.

– Nyt pääsemme vertailemaan, ovatko antivedyn ominaisuudet samoja kuin normaalivedyn. Jos ne eroavat, tiedämme, että symmetriassa on jotain poikeaa ja silloin pitää fysiikan teoriasta rukata uuteen uskoon. Jos ne ovat samanlaiset, tiedämme, että on otettävä ratkaisua muualta kysymyksiin, miksi antimateria on vähemmän tai miksi olemme ylipäätään olemassa, Pusa sanoo.

Pelottava annihilaatio

Antivety-tutkimusta tehdään Cernin AD-laitoksessa. Laitos lähettää "antivetykokeille" noin 30 miljoonaa antiprotonia joka sadas sekunti. Positronit saadaan voimakkaasta radioaktiivisesta lähteestä. Hiukkasten yhdistäminen antivetyatomeiksi on huolavaa. Alkuaineutu antivetyatomi on tuhoutumisen eli annihilaation estämiseksi pidettävä tutkimuksen kannalta riittävän kauan omassa kalkosta materiasta magneettikenttien avulla.

Materian ja antimaterian kohdatessa pyllätävät suuret voimat. Grammaan annos antimateriaa ja materiaa saisi annihilaatiossaan aikaan yhtä kahdeksankertaisesti Hiroshiman atomipommista räjähtäneen voiman.

Cernin Alpha-kokeen laboratoriossa kuvataan muualla universumista mysteerisesti kadonnutta antimateriaa.

CERNISSÄ TUTKITAAN AINETTA JA UNIVERSUMIA

- **CERN** on maailman suurin hiukkasfysiikan tutkimuslaitos, joka sijaitsee Genevessä kaupungin vieressä Sveitsin ja Ranskan rajalla.
- **Cernissä työskentelee** noin 2 500 vakituista työntekijää, vuosittain vierailevia tutkijoita on lähes 7 000.
- **Syyskuussa 2008** Cernissä käynnistettiin maailman suurin kone, Large Hadron Collider, jonka piiruun on 27 kilometriä. LHC:llä on tarkoitus selvittää alkuvain rakenteen perusksymmetriaa, kuten miksi on kaiken alkuvain alkuperä ja kuinka maailmankaikkeus syntyi.
- **Alpha-kokeessa tutkitaan** ja valmistetaan antivetyä.

Saksa kiristää turvatoimia terroriuhan tak

BERLIIN | STT-DPA-AFP

Saksa kiristää turvatoimia keskustella ja juna-asemilla terrori-iskujen uhan vuoksi. Sisäministeri Thomas de Maizieren mukaan hallitus on saanut viitteitä siitä, että iskuja on suunniteilla viele marraskuun lopulla.

– Tästä päivästä lähtien poliisoja on huomattavan paljon lisää. Haluan selventää tätä kansalaisille, de Maizieren sanoi kiireisesti kokoon kutsutussa lehdistötilaisuudessa Berliinissä keskiviikkona.

Tiedotteet mahdollisista iskuista on saatu Saksan viranomaisille Pakistanista. Turvallisuusviranomaisten mukaan terroristeilla on jo valmiiksi tehtävät jouluaattona ja uudenvuodenpäivänä.

Stalinin Moskova datshaa esiteltiin toimittajille

MOSKOVA | STT-DPA

Venäjän turvallisuuspalvelu FSO on ensimmäistä kertaa esitellyt neuvostodiktaattori Josif Stalinin Moskovan-datshaa venäläisille toimittajille. Asumusta ei kuitenkaan ole aiemmin toistaiseksi tarkoitus avata yleisölle.

1 000-neliöisessä, kaksikerroksisessa datshassa on myös muassa bunkkeri. Vastoin turbaanissa legendoissa lievin-

nytti tietoa Kr... vällä ei kuiv...

Stalin kuoli ... kaupungissa ... shallaissa vuo... kommunistipu... hänen henkilö... muutettiin hot... jille ei kuitenka... ritti Stalinin ...

Vuonna 1991 ... tiin FSO:lle, jo... päätettyä sitä... ja kutsuvierai...

Irakin presidentti ei allekirjoita Azizin teloitusta

MARSI | STT-AFP–Reuters

Irakin presidentti Jalal Talabani ei aio allekirjoittaa Tariq Azizin teloitusmääräystä. Entisen varapääministeri Azizin tuomittiin viime kuussa kuolemaan ihmisoikeuksien vaivaamasta 1960-luvulla.

– Ei, en aio allekirjoittaa tätä määräystä, koska olen sosialisti, hän sanoi France 24 -tv:n haastattelussa.

Tarunan myöttäisenä Azizia kuitenkaan, koska hän on Irakin kristitty. Hän on myös vanhempi herra, oli yli 70-vuotias. Näiden syiden vuoksi on aio kuskaan allekirjoittaa teloitusmääräystä, Talabani sanoi.

Ex-diktaattori Saddam Husseinin lähetnen liittolainen on jo aiemmin tuomittu vankeuteen rikoksista ihmisyyttä vastaan ja kurdien karkotlamisesta.

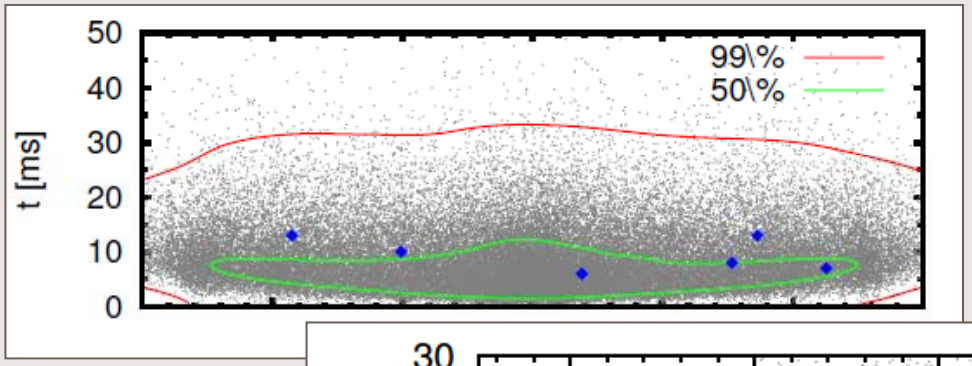
Muun muassa YK on vedonnut Irakin, jotta se ei toimeenpanisi Azizin kuolemantuomiota.

Andrea Gutierrez
(1st yr UBC Ph.D. student)
in Finnish newspaper!

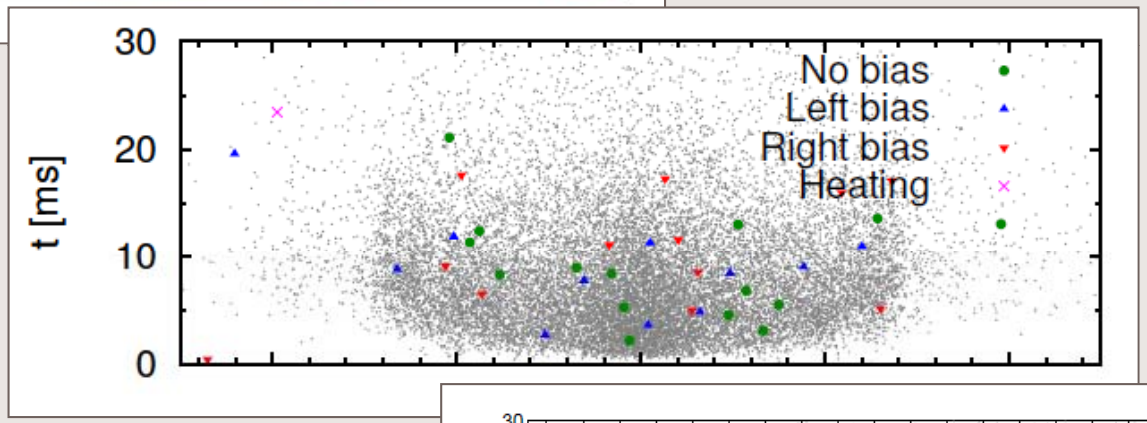
Latest Results from ALPHA

Nature Phys. 7, 558 (2011)
[arXiv:1104.4982]

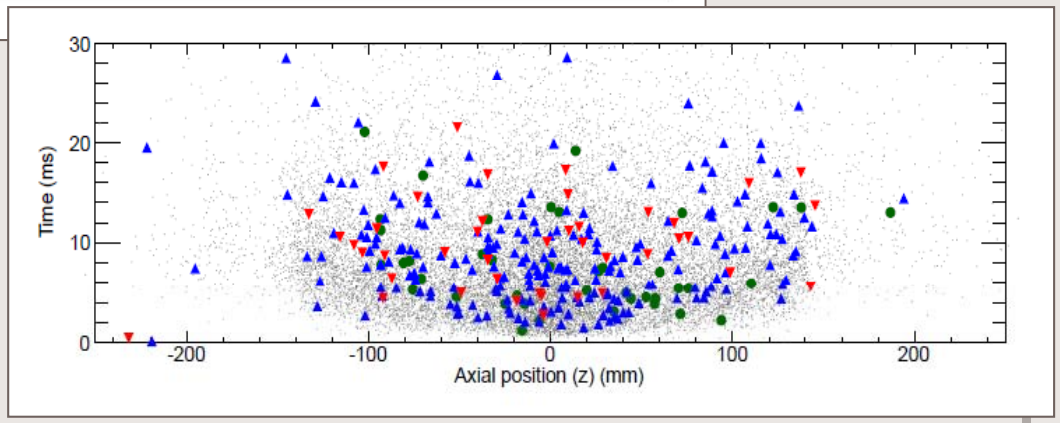
New Result 1: Increased trapping rates



2009: 6 events

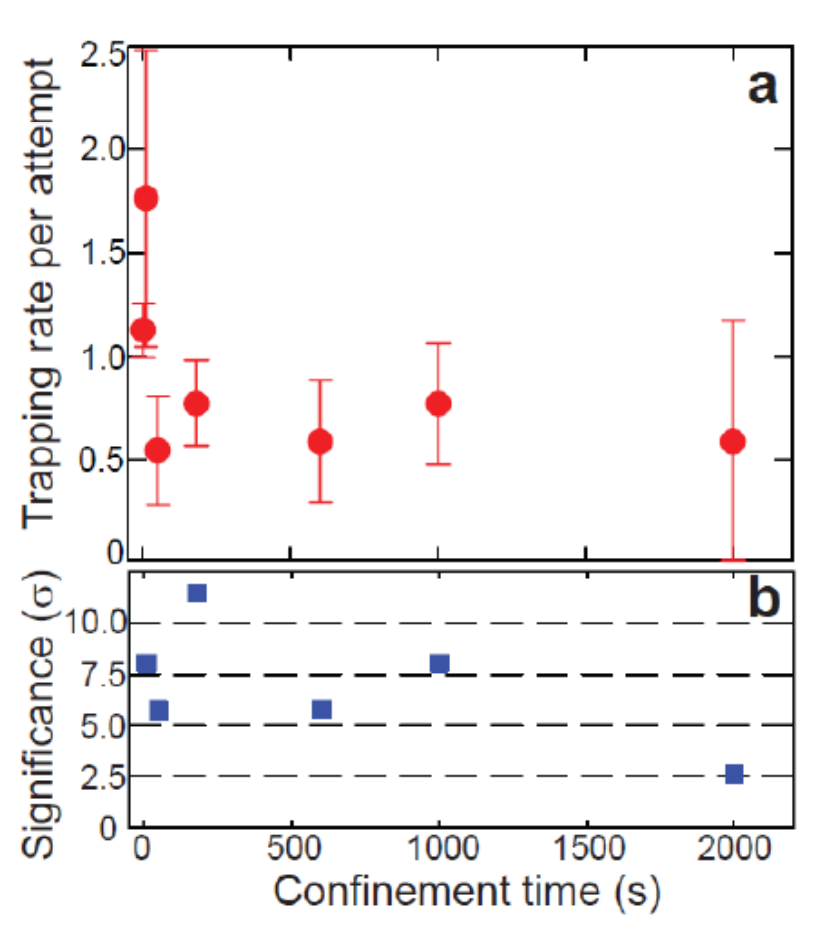


2010 Sep:
38 events



2010 Nov:
309 events
(hard to tweak zero!)

New Result 2: Long-time confinement

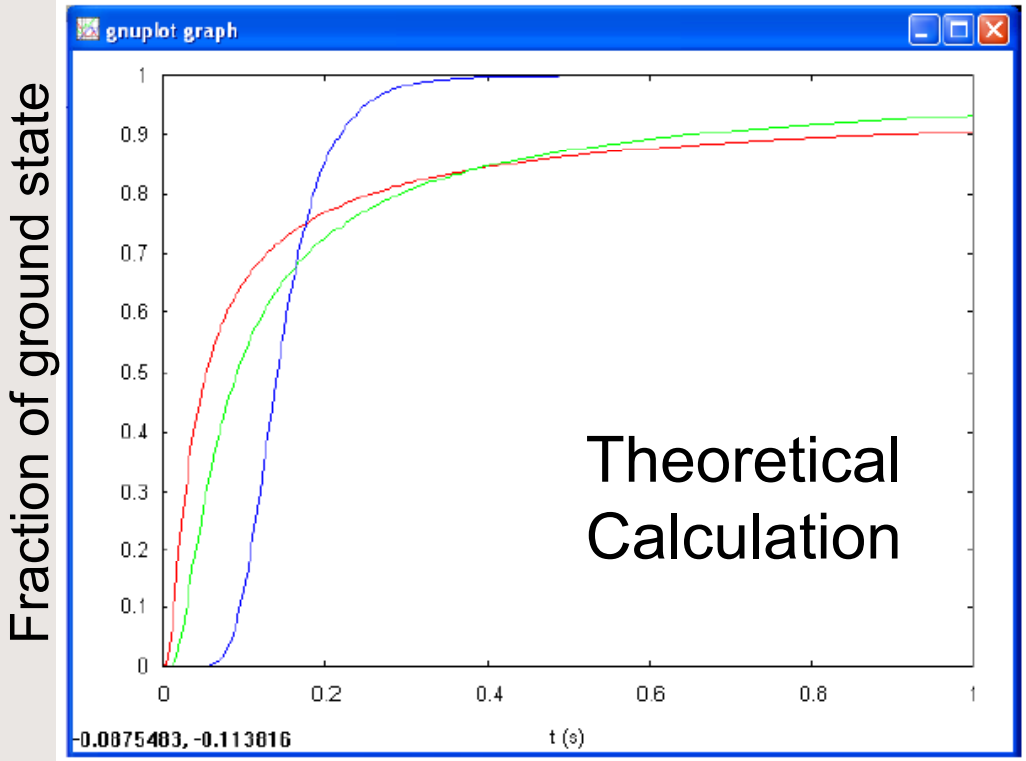


- Trapping time increased from 172 ms to 1000 s:
- Nearly 4 orders of magnitude increase

TRIUMF

Results 3: Evidence for ground state Hbars

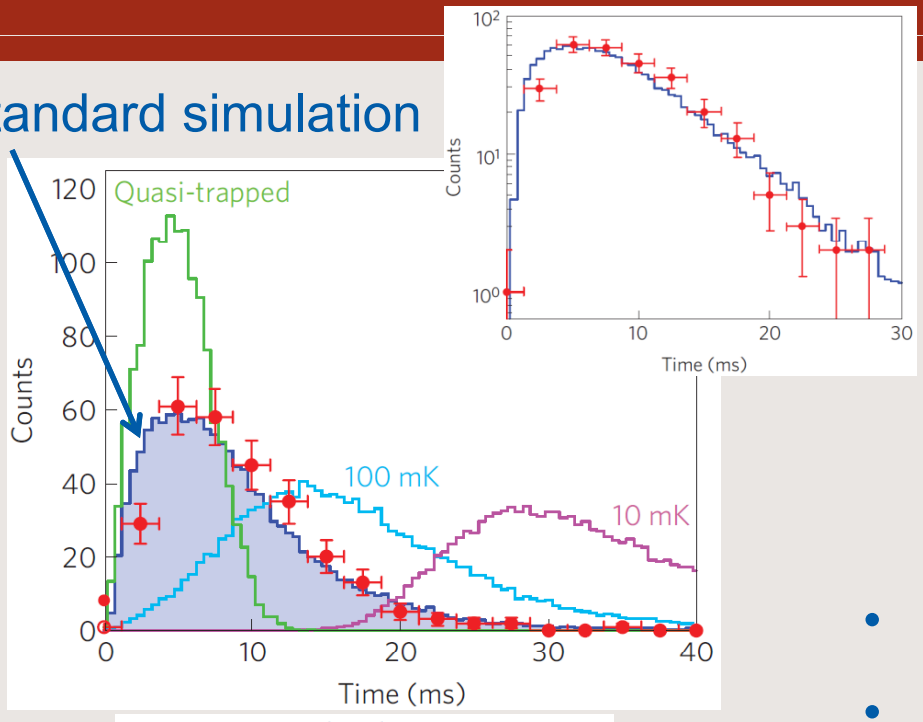
- Precision spectroscopy requires ground state Hbars (1s state)
- All the previous observed states are excited states
  - 3 body recombination
- Our theoretical calculations
  - De-excitation to grounds state < 1 sec

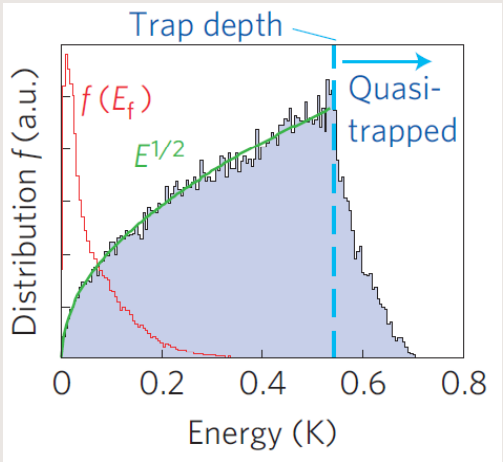


- 1st evidence for G.S. Hbars!
- Will test experimentally via μ-wave spectroscopy soon

Results 4: kinetic energy of trapped Hbars

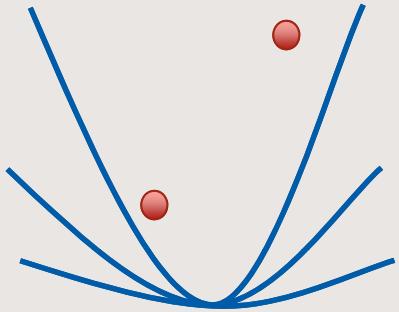
Standard simulation





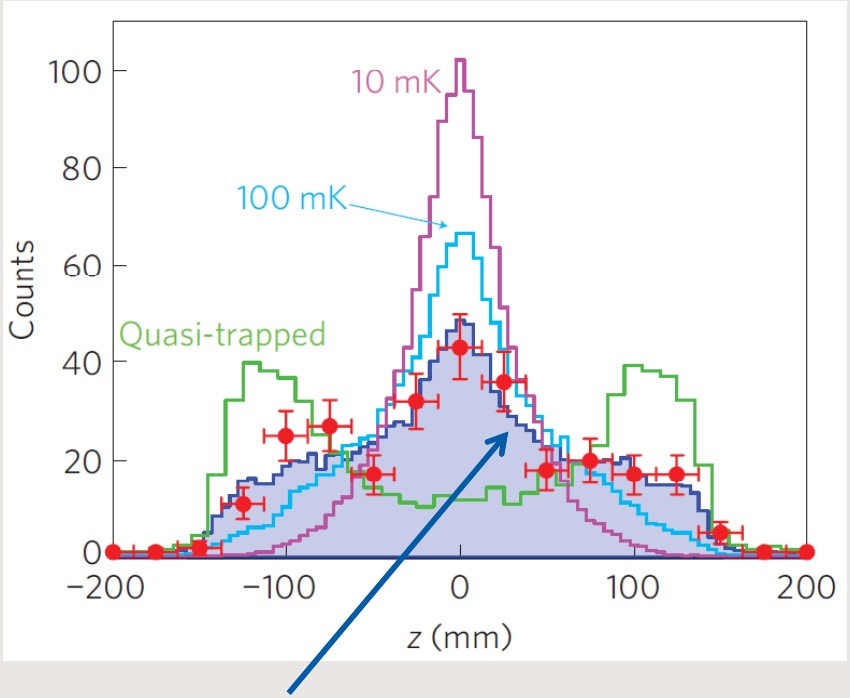
Simulated kinetic energy distribution

Release of trapped Hbar at *t*=0



- Colder Hbars come out later
- Data agree with simulated energy distribution
- Consistent with theory assuming Hbar produced at thermalized with e+ (~50 K)
- First physics information of trapped antihydrogen!

Annihilation position distribution



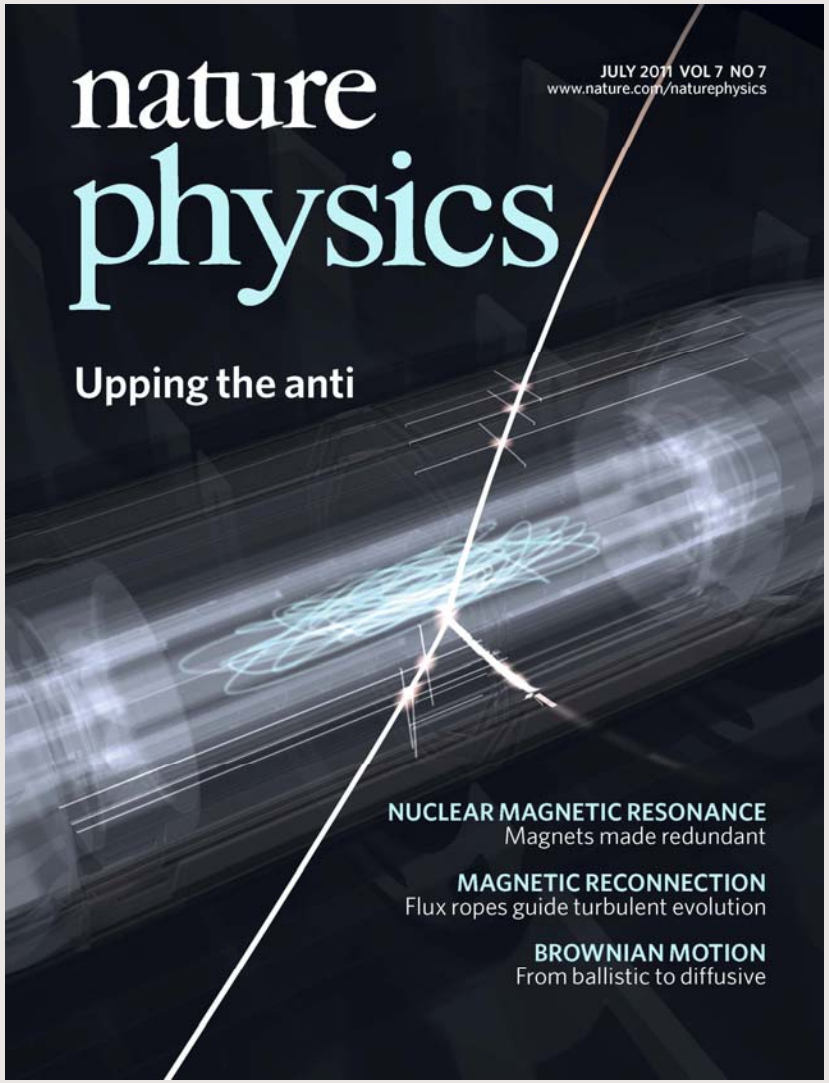
Standard simulation

- Simulation: Position distribution has sensitivity to energy; but why?
- Has to do with coupling of axial and radial degrees of freedom in Hbar motion

  →Sensitivity to anisotropic temperature distributions

Trapping dynamics important for spectroscopy

Latest ALPHA results
Nature Phys. 7, 558 (2011)



Nature Physics

July 2011 Issue

http://WWW.CERN.CH

CERN - the European Organization for N...

http://public.web.cern.ch/public/

Getting Started | Latest Headlines | ALPHA ELOG | ALPHA Data Log | MIDAS History | The Personal World Cl...

English Français

European Organization for Nuclear Research

Search

5 June 2011

ALPHA experiment traps antimatter atoms for 1000 seconds

Andrea Gutierrez, a PhD student from UBC, transfers liquid helium from a storage dewar into the cryostat containing the superconducting magnetic trap used by the ALPHA experiment.

In a paper published by *Nature Physics*, the ALPHA experiment at CERN reports that it has succeeded in trapping antimatter atoms for over 16 minutes: long enough to begin to study their properties in detail. ALPHA

INFORMATION FOR:

CERN staff and users
Journalists
Kids
Our neighbours

INFORMATION ABOUT:

CERN in a nutshell
Science at CERN
Research at CERN
The Large Hadron Collider (LHC)
People at CERN
Education at CERN
CERN and the environment
CERN Global Network

PUBLICATIONS:

CERN Courier
CERN Bulletin

TRIUMF

Implications of long time confinement

- Still digesting the implications
- "Game changer"
  - 170 ms to 1000 s
- For spectroscopy
  - Figure of merit:

    (trapped number) x (observation time) x (laser, μ-wave power)^n
  - Reduces dramatically power requirements
- Laser cooling
  - Lyman alpha laser: very hard to produce
  - Atomic hydrogen laser cooled over ~15 min
- Antimatter gravity
  - At ~mK level, gravity becomes non-negligible
  - Gravity experiments becoming plausible due to long confinement
- Many other possibilities

Towards Antihydrogen Microwave Spectroscopy

Canadian-Led Initiative:

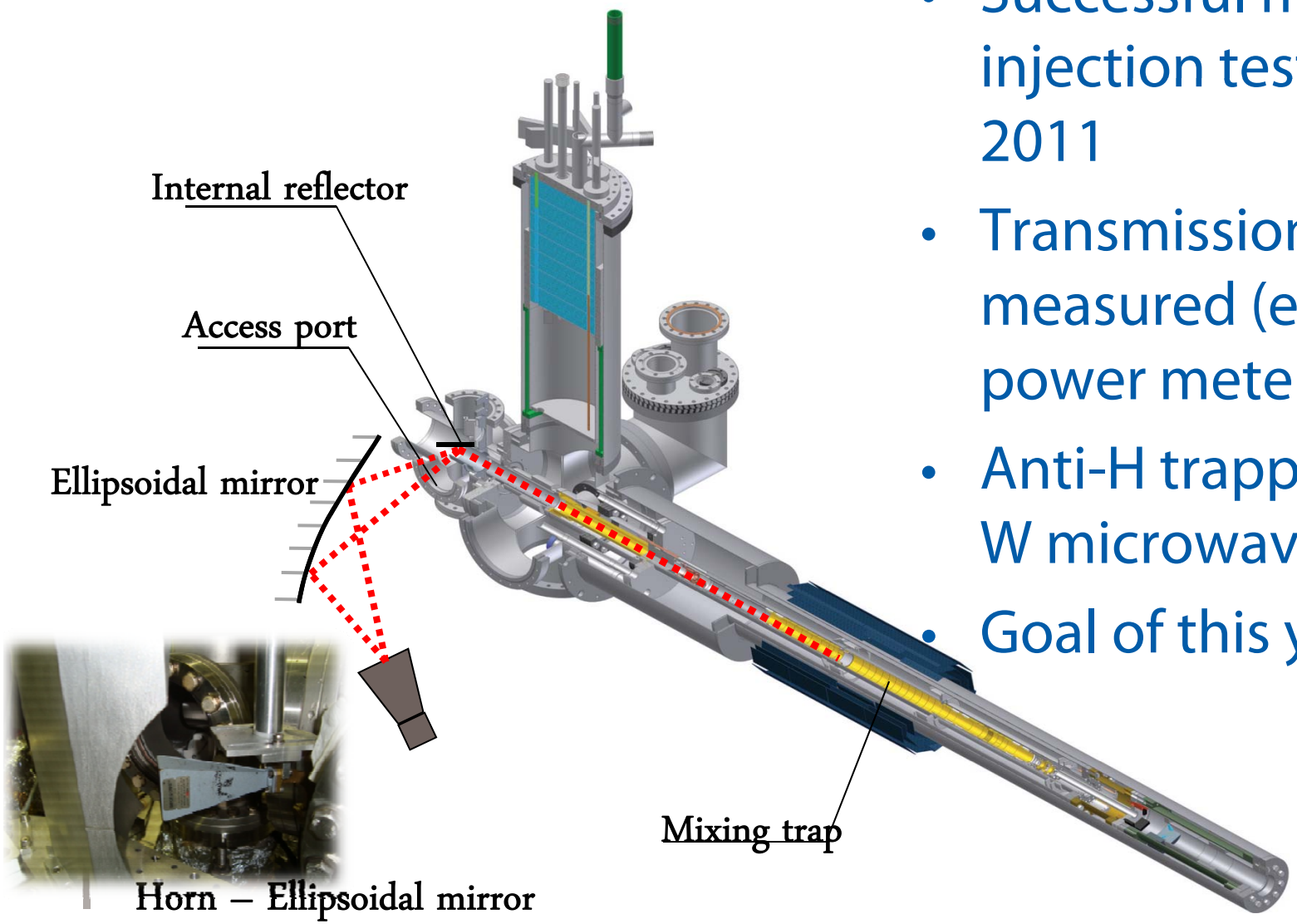
Walter Hardy (UBC), Mike Hayden (SFU)

M. Ashkezari (SFU), T. Friesen (Calgary), MCF

[Also, for Laser Spectroscopy:

Rob Thompson, T. Friesen (Calgary), MCF]

Microwave Spectroscopy (at 1 T)



- Successful microwave injection tests: Nov. 2011
- Transmission efficiency measured (e- plasma as power meter)
- Anti-H trapping with 4 W microwave injected
- Goal of this year's run

ALPHA Status

- 2011 Run at CERN
  - May 9-Nov 21: 6.5 months
- Goals
  - First spectroscopy (via microwaves)

    Canadian initiative
- ALPHA upgrade for 2012
  - Laser access
  - Microwave resonators
- ELENA: AD upgrade just approved by CERN
  - x100 more antiprotons by 2015-2016!
- Antihydrogen: moving from “demonstration” phase to “physics” phase
- Exciting time for antihydrogen physics!

TRIUMF

Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
Laboratoire national canadien pour la recherche en physique nucléaire
et en physique des particules

Thank you!
Merci!

4004 Wesbrook Mall | Vancouver BC | Canada V6T 2A3 | Tel 604.222.1047 | Fax 604.222.1074 | www.triumf.ca