

Anti-hydrogène

l'atome que l'Univers n'a pas pu faire

Prof. Niels Madsen
Université de Swansea et CERN

Présentation à e2φ 2013 "Entre lumière et matière"
Limoges 26-29 août 2013



Pourquoi ?



LES DÉFENSEURS DE LA SCIENCE

POURQUOI EST-CE QUE LE FAIT D'AVOIR PIÉGÉ L'ANTIMATIÈRE EST IMPORTANT ?

OH ! IL EXISTE DES APPLICATIONS DANS LES DOMAINES DE LA PROPULSION, DE L'ÉNERGIE, DE LA TRANSMISSION DE DONNÉES, ETC.

Pourquoi ?

LES SCIENTIFIQUES

POURQUOI EST-CE QUE LE FAIT D'AVOIR PIÉGÉ L'ANTIMATIÈRE EST IMPORTANT ?

PARCE QUE C'EST GÉNIAL, PUTAIN !

Budget énergétique de l'Univers



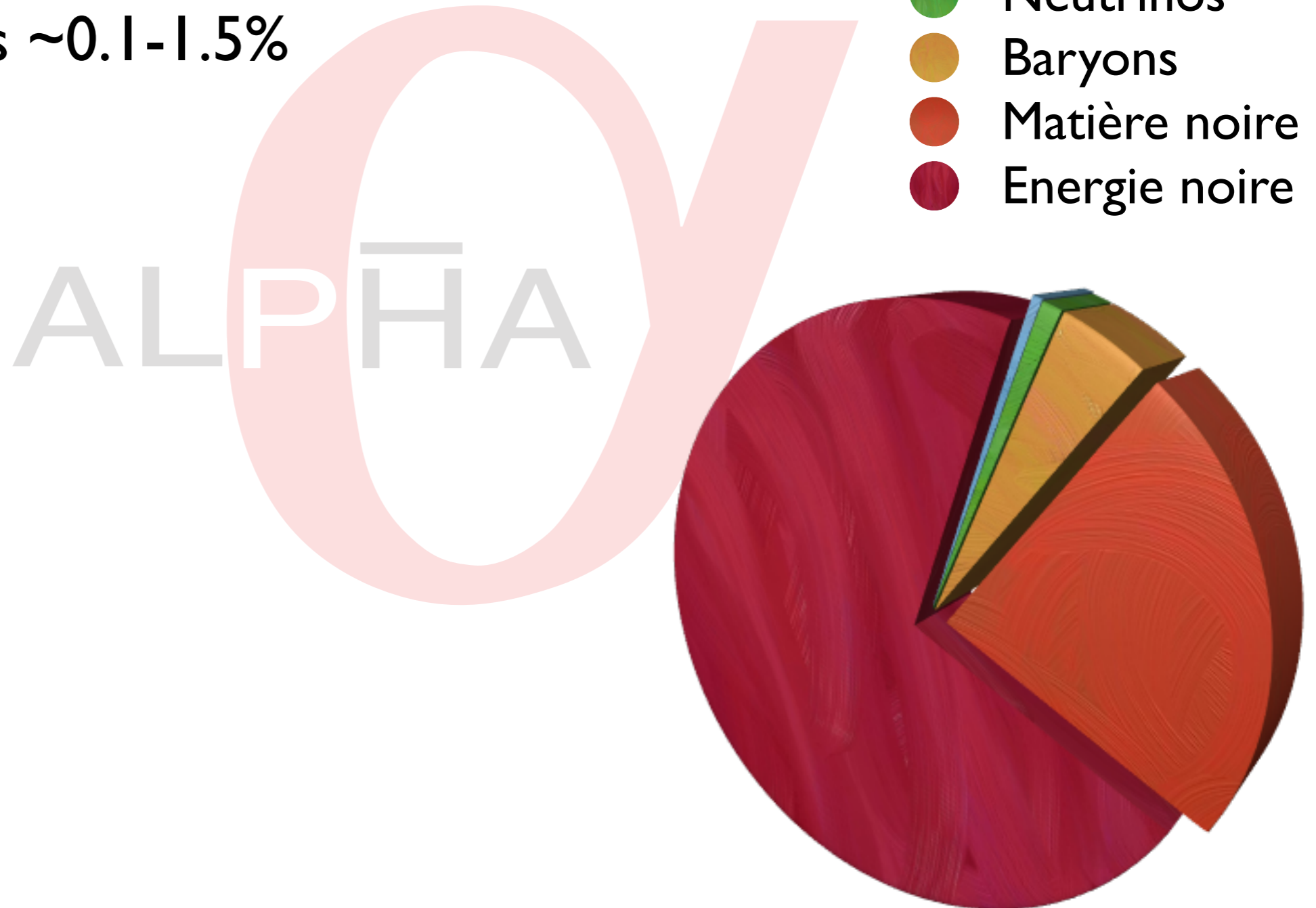
Budget énergétique de l'Univers

- Etoiles et galaxies ~ 0.5%



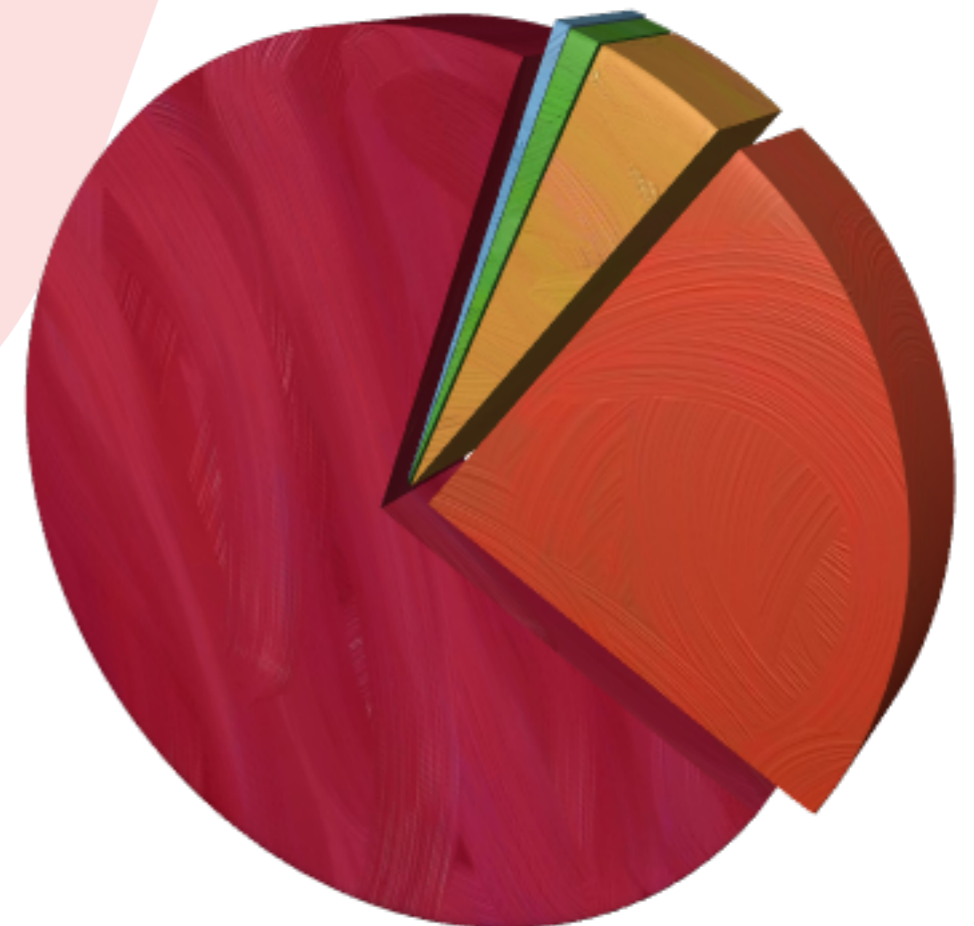
Budget énergétique de l'Univers

- Etoiles et galaxies ~ 0.5%
- Neutrinos ~0.1-1.5%



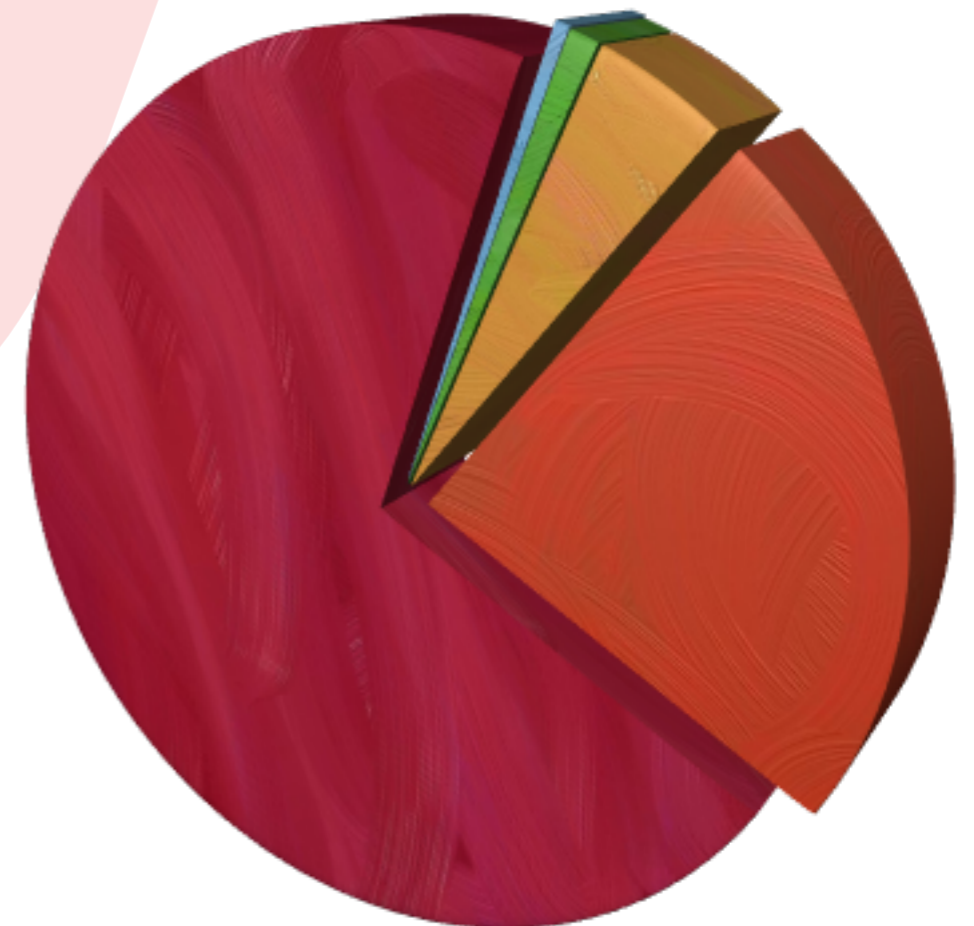
Budget énergétique de l'Univers

- Etoiles et galaxies ~ 0.5%
- Neutrinos ~0.1-1.5%
- Autre matière "normale"
(électrons, protons & neutrons) ~ 4.4%



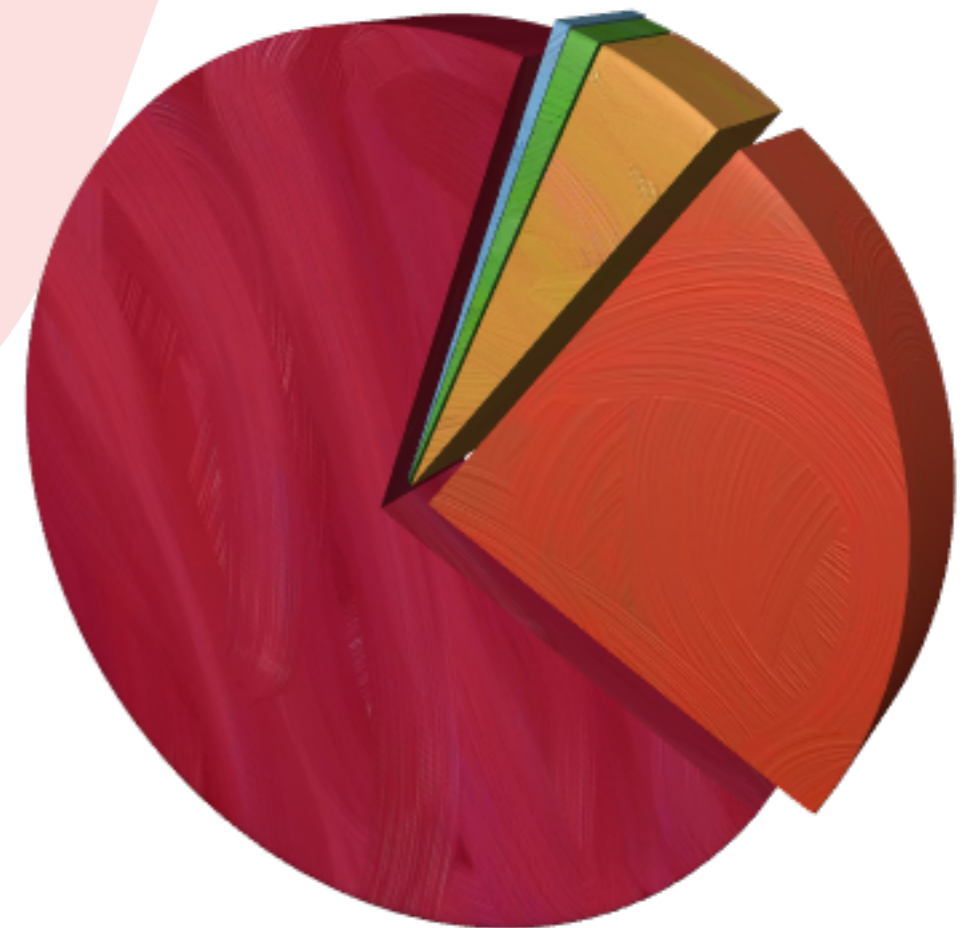
Budget énergétique de l'Univers

- Etoiles et galaxies ~ 0.5%
- Neutrinos ~0.1-1.5%
- Autre matière "normale" (électrons, protons & neutrons) ~ 4.4%
- Matière noire ~ 23%



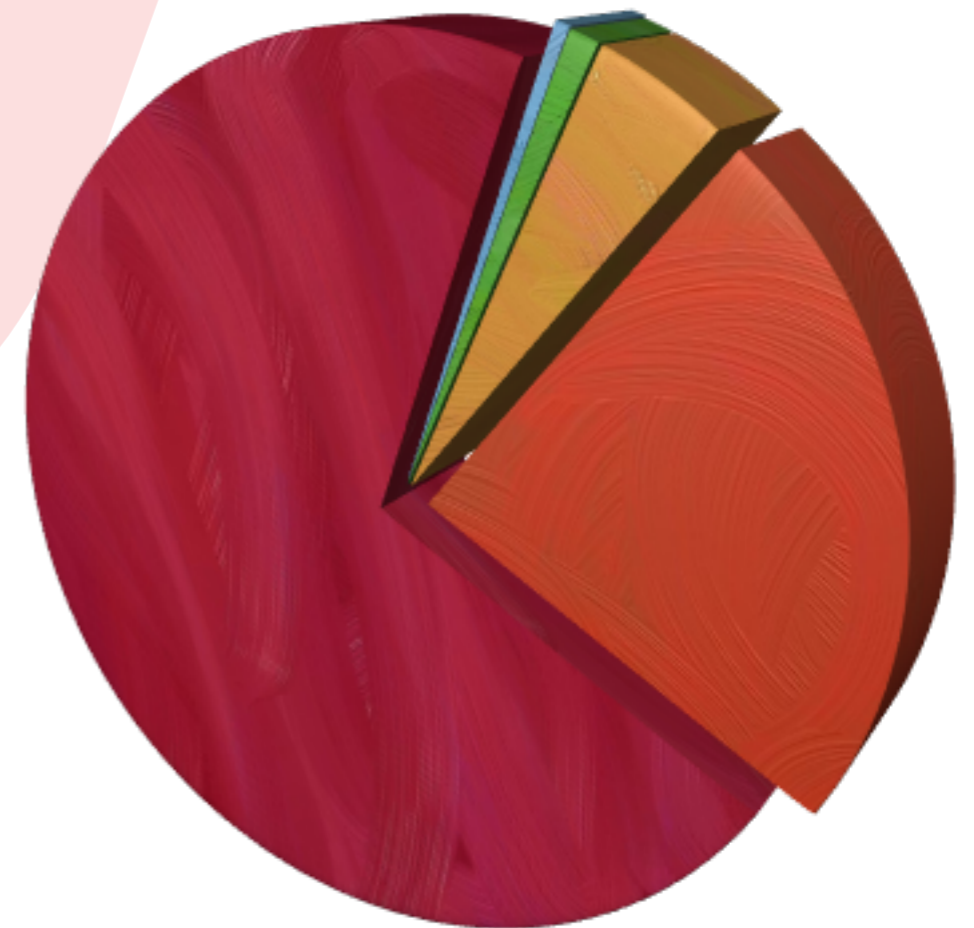
Budget énergétique de l'Univers

- Etoiles et galaxies ~ 0.5%
- Neutrinos ~0.1-1.5%
- Autre matière "normale" (électrons, protons & neutrons) ~ 4.4%
- Matière noire ~ 23%
- Energie noire ~ 73%



Budget énergétique de l'Univers

- Etoiles et galaxies ~ 0.5%
- Neutrinos ~0.1-1.5%
- Autre matière "normale" (électrons, protons & neutrons) ~ 4.4%
- Matière noire ~ 23%
- Energie noire ~ 73%
- Antimatière 0% ?



Où est l'antimatière ?



Que des questions...

ALPĪĀ

Que des questions...

- Baryogénèse (Big Bang) - (semble) symétrique, mais l'antimatière est disparu ?

ALPĪĀ

Que des questions...

- Baryogénèse (Big Bang) - (semble) symétrique, mais l'antimatière est disparu ?
- La gravitation est si faible... pourquoi ?
 - comment réagit l'antimatière avec la gravitation ?

Que des questions...

- Baryogénèse (Big Bang) - (semble) symétrique, mais l'antimatière est disparu ?
- La gravitation est si faible... pourquoi ?
 - comment réagit l'antimatière avec la gravitation ?
- Y-a-t-il plus que quatre dimensions ?
 - c'est pourquoi la gravitation est faible ?

Que des questions...

- Baryogénèse (Big Bang) - (semble) symétrique, mais l'antimatière est disparu ?
- La gravitation est si faible... pourquoi ?
 - comment réagit l'antimatière avec la gravitation ?
- Y-a-t-il plus que quatre dimensions ?
 - c'est pourquoi la gravitation est faible ?
- Y-a-t-il une version quantique de la gravitation ?
 - réponse pour antimatière ?

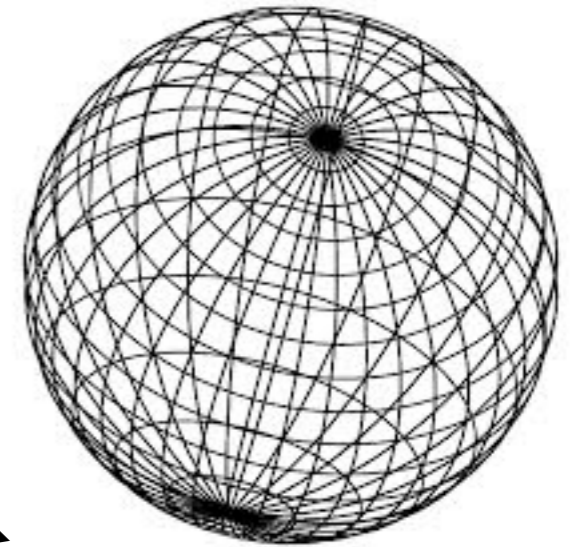
La faible gravitation...

$$F_G = G \times \frac{mM}{r^2}$$

ALPHA

La faible gravitation...

$$F_G = G \times \frac{mM}{r^2}$$

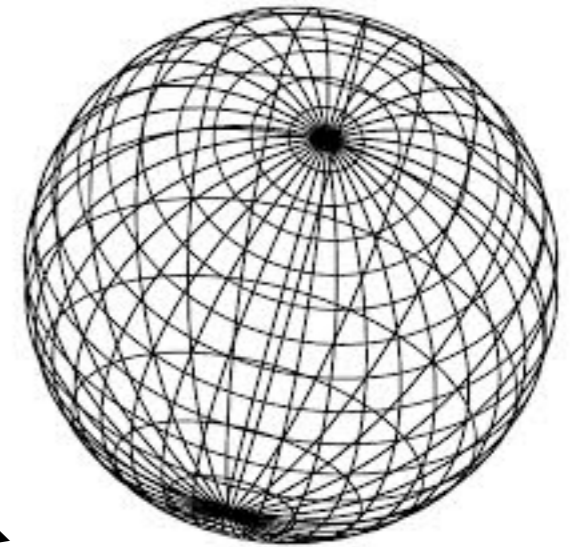


surface : $4 \pi r^2$

ALPHA

La faible gravitation...

$$F_G = G \times \frac{mM}{r^2}$$



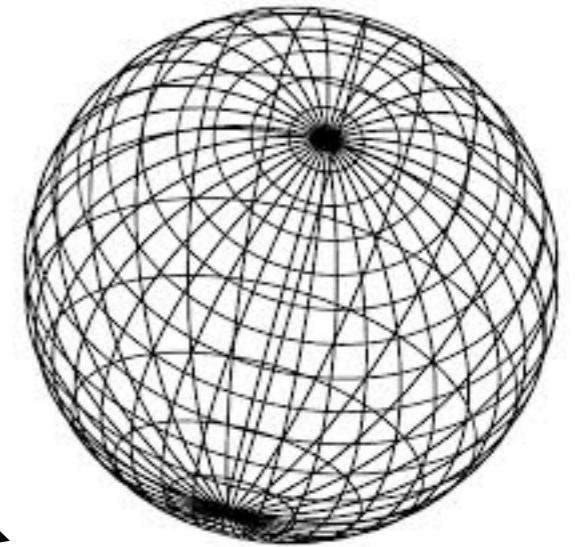
Une possibilité :

surface : $4 \pi r^2$

Plusieurs dimensions : surface $\sim r^n$

La faible gravitation...

$$F_G = G \times \frac{mM}{r^2}$$



Une possibilité :

surface : $4 \pi r^2$

Plusieurs dimensions : surface $\sim r^n$

$$\Rightarrow F_G \sim r^{-n} ?$$

Quoi ?
ALPHA
Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

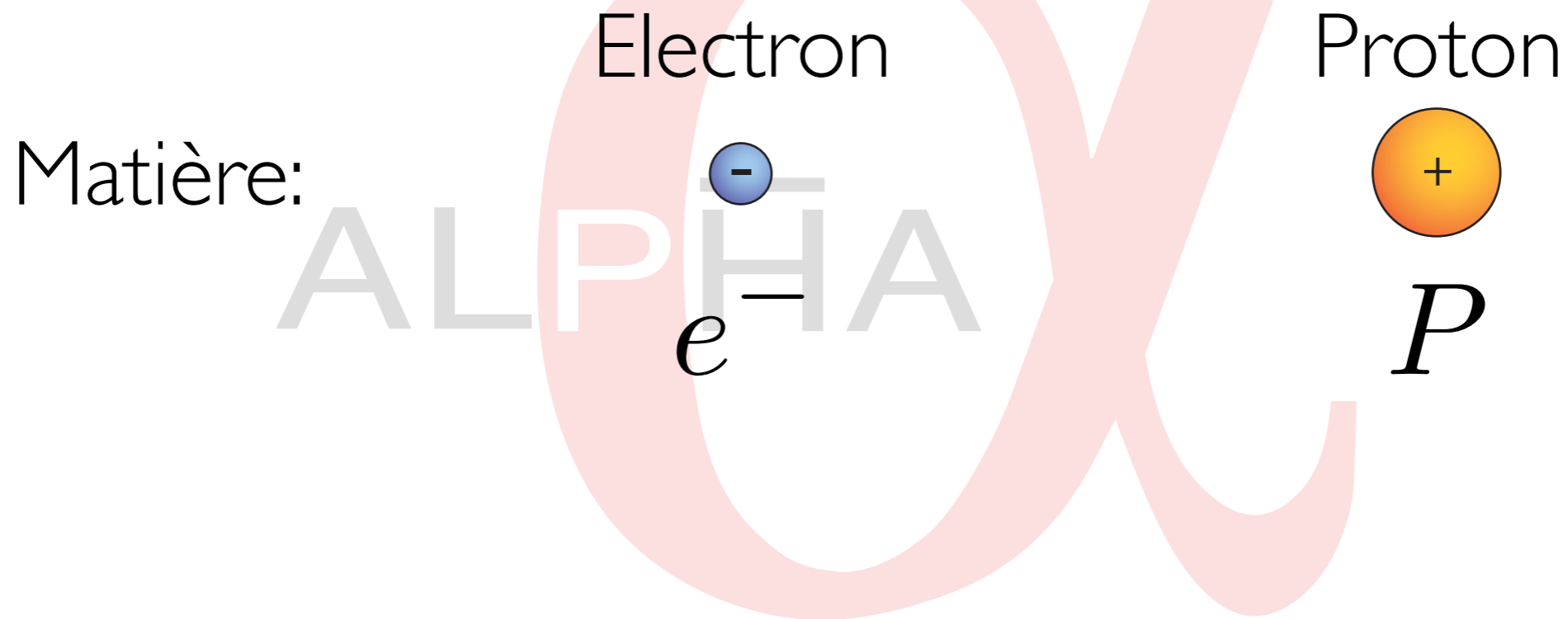
Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

- Les particules ont des “jumeaux” : même masse, charge opposée

ALP̄H̄A α

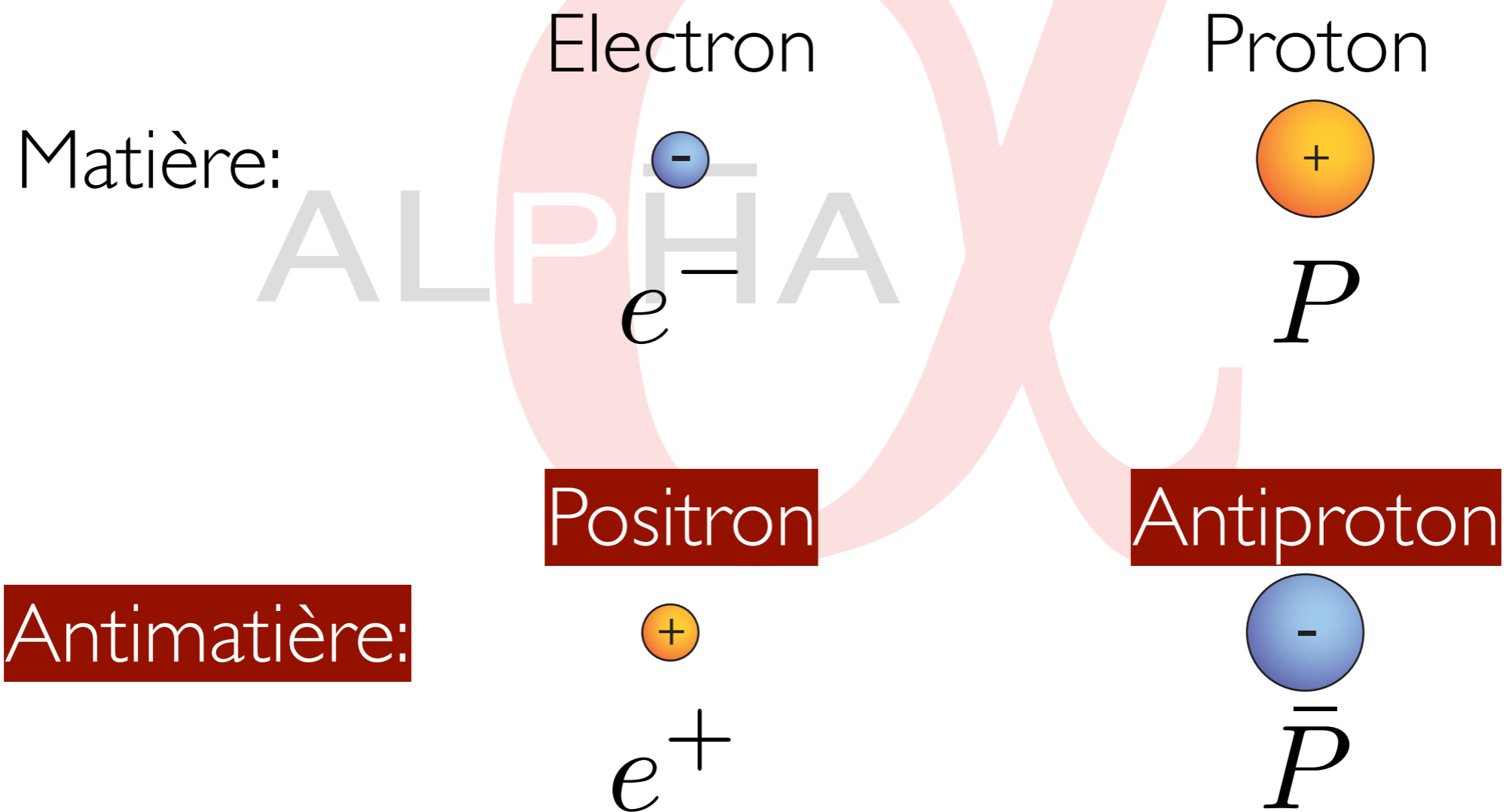
Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

- Les particules ont des “jumeaux” : même masse, charge opposée



Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

- Les particules ont des “jumeaux” : même masse, charge opposée



Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

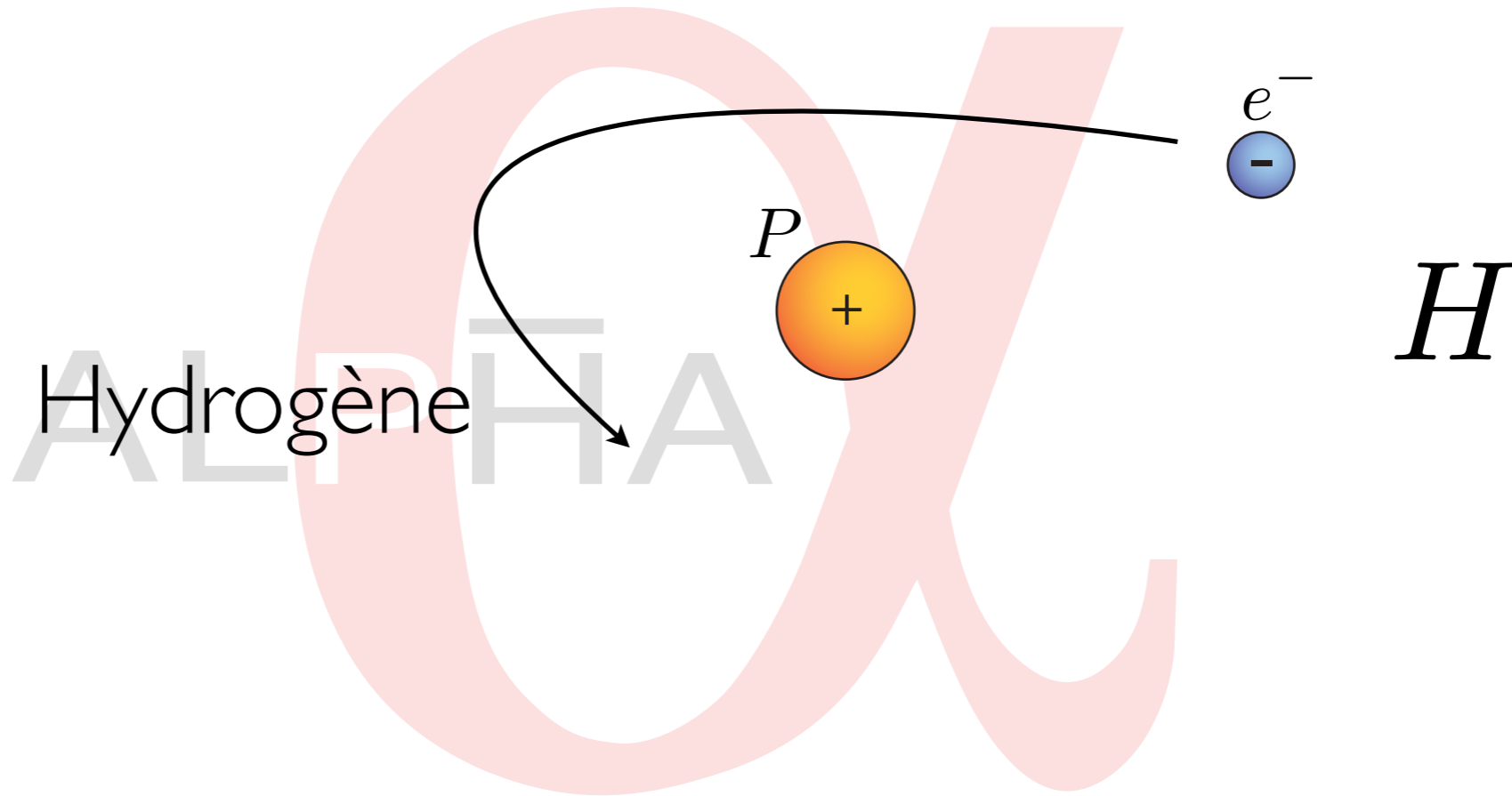
- Des atomes neutre d'antimatière :

ALP̄H̄A α

Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

- Des atomes neutre d'antimatière :

Matière:

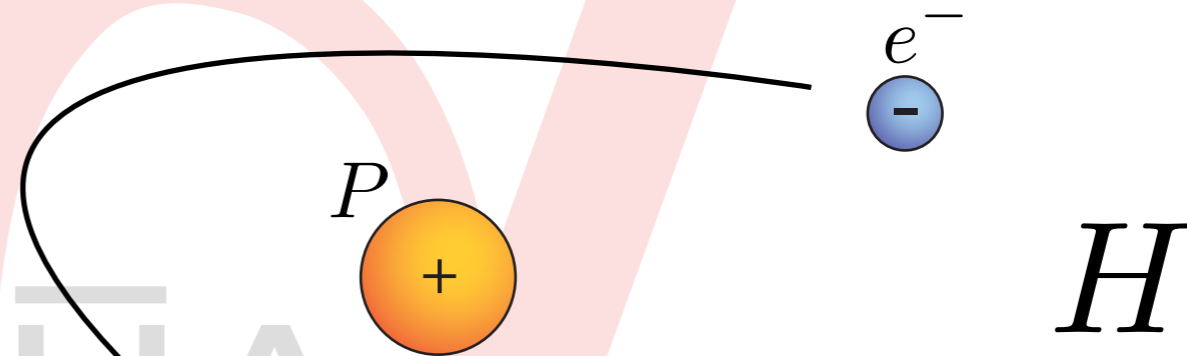


Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

- Des atomes neutre d'antimatière :

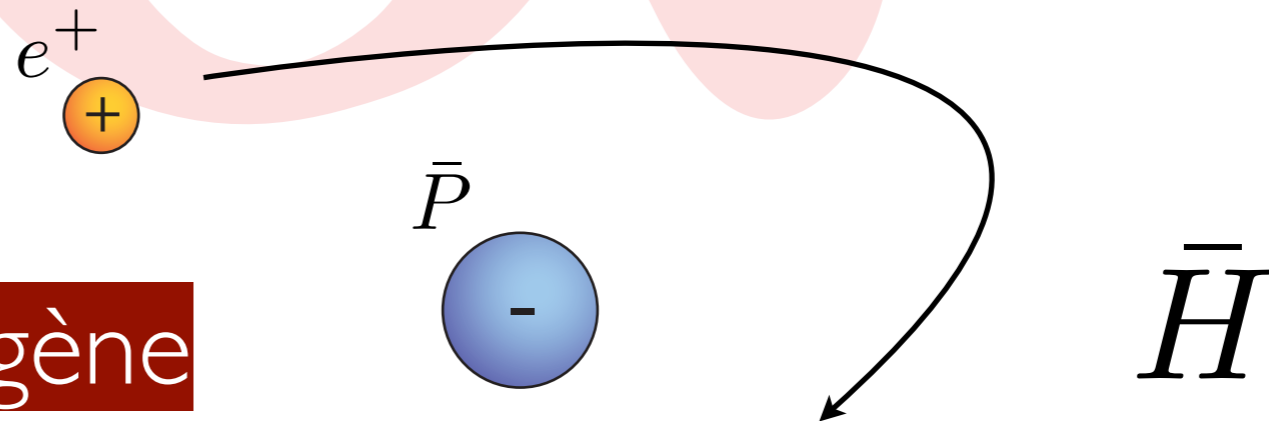
Matière:

Hydrogène

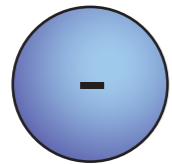


Antimatière:

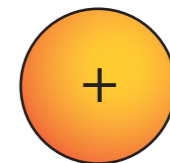
Anti-hydrogène



Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

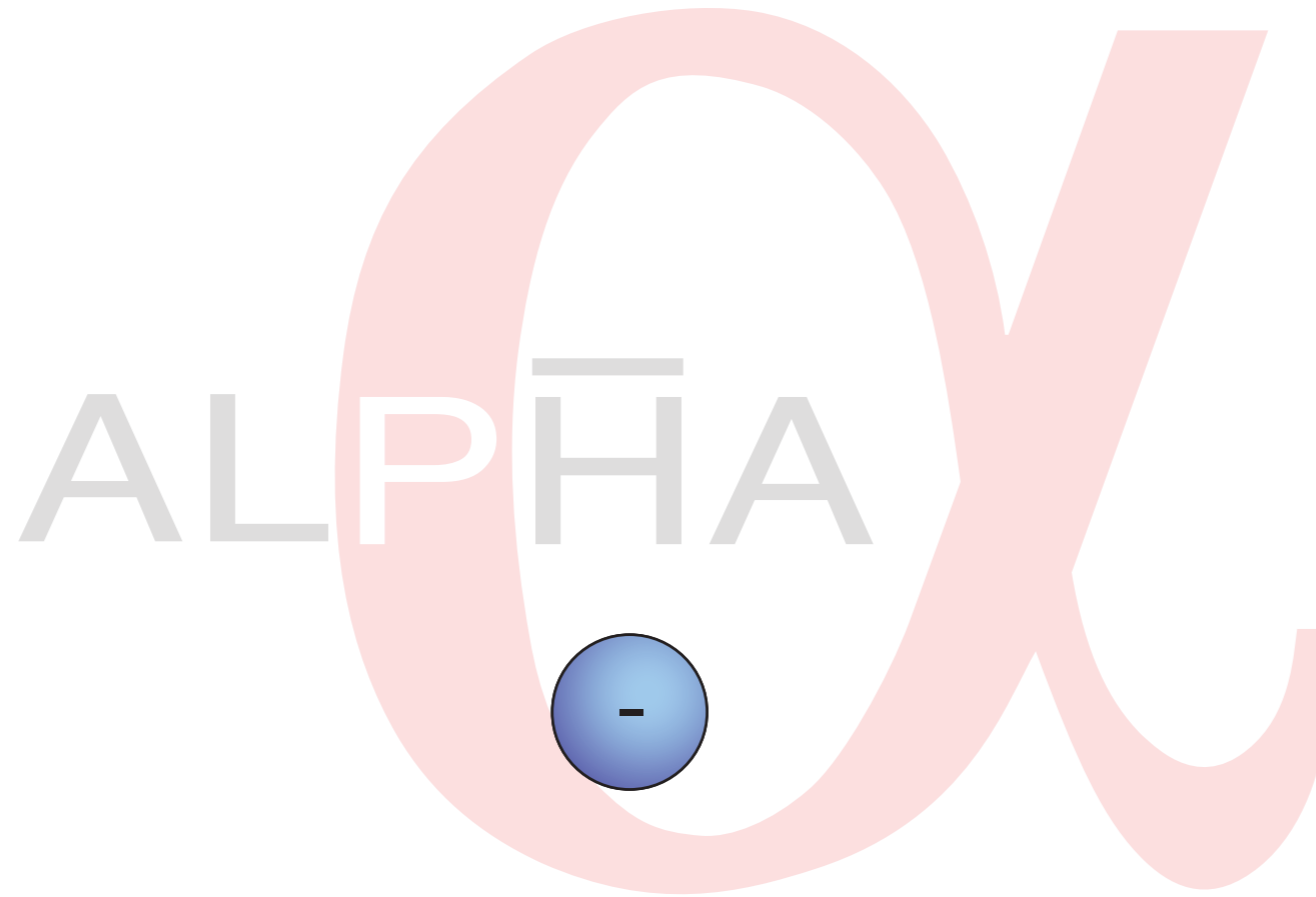


ALPĤĀ



Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

- Attention quand les jumeaux se retrouvent

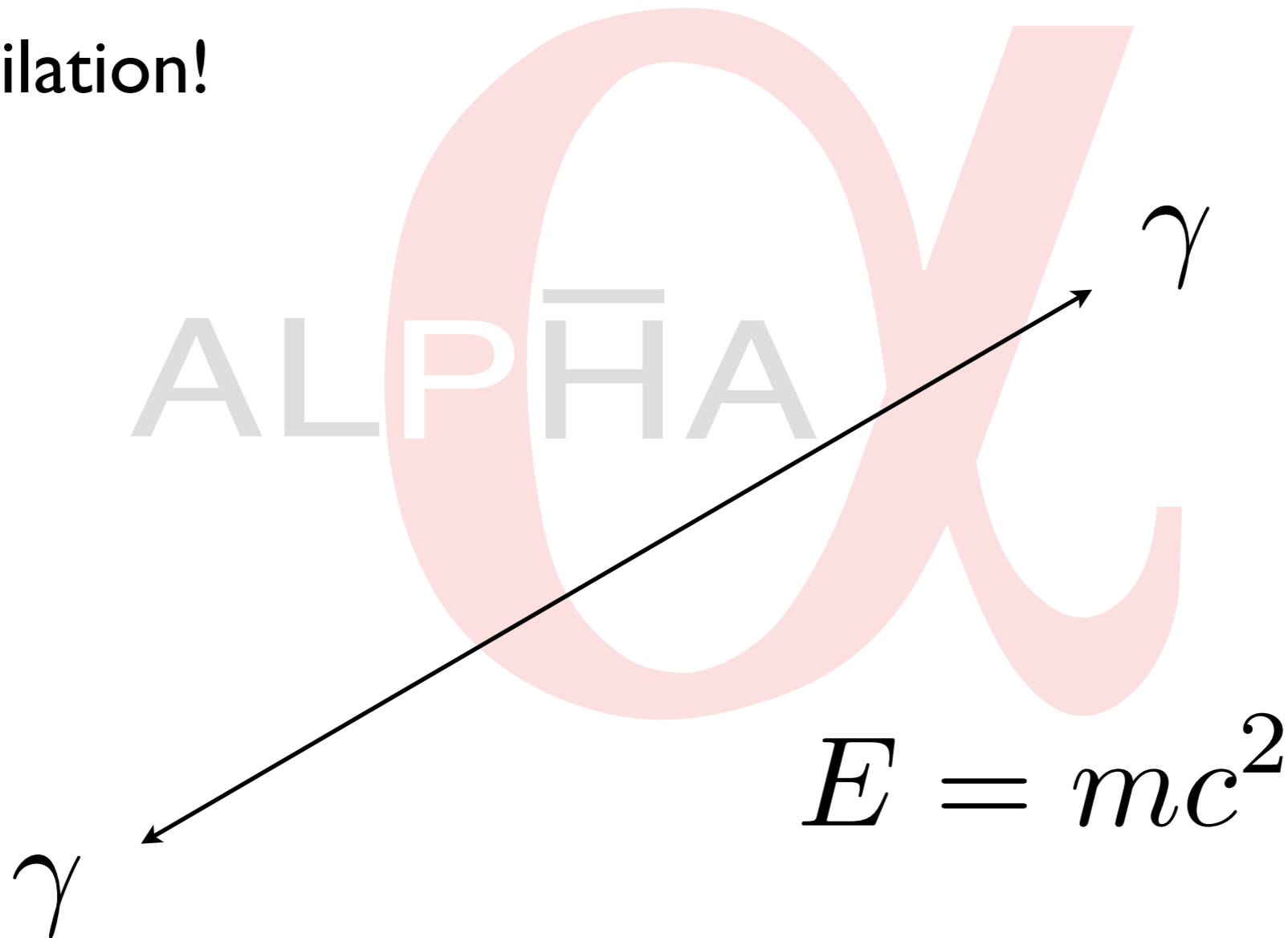


Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?



Qu'est-ce que c'est l'antimatière ?

- Annihilation!



Annihilations

- Positron / Electron: photons (511 keV)
- Antiproton / Proton: Plusieurs options - Pions, etc.



Point clé :

L'antimatière est créée d'une façon symétrique : formation en pair

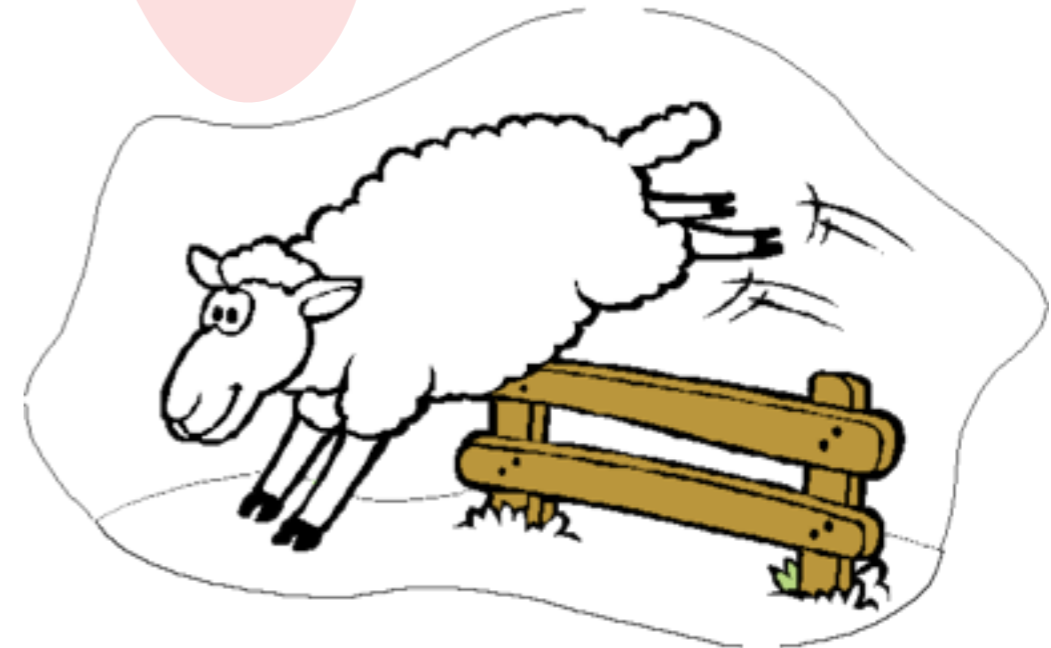
Intermezzo : Les paresseux

ALPĪA

Intermezzo : Les paresseux

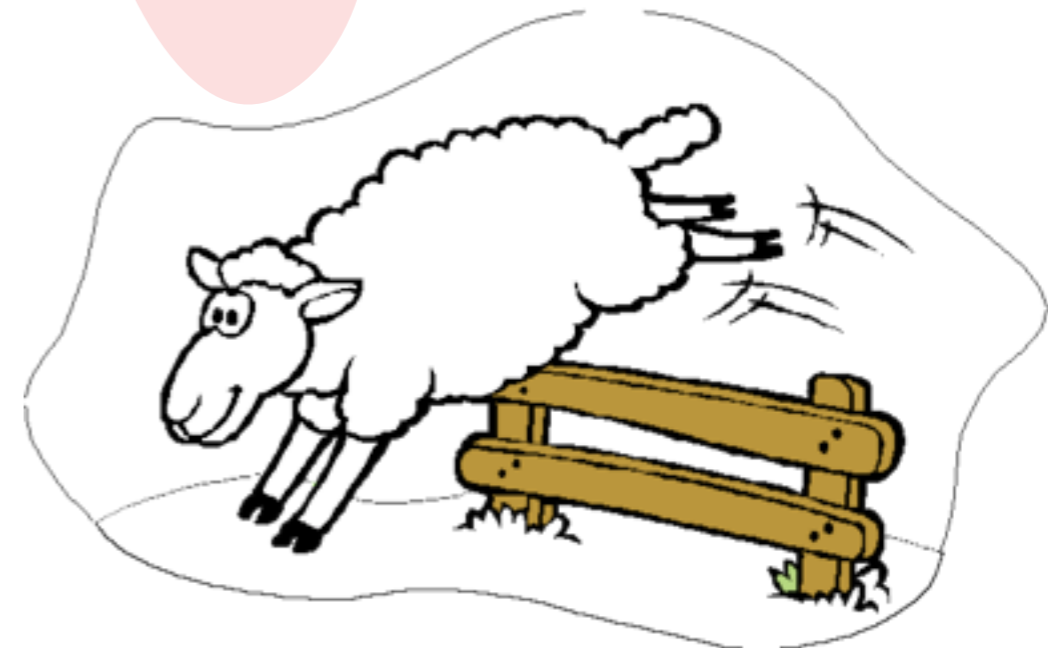
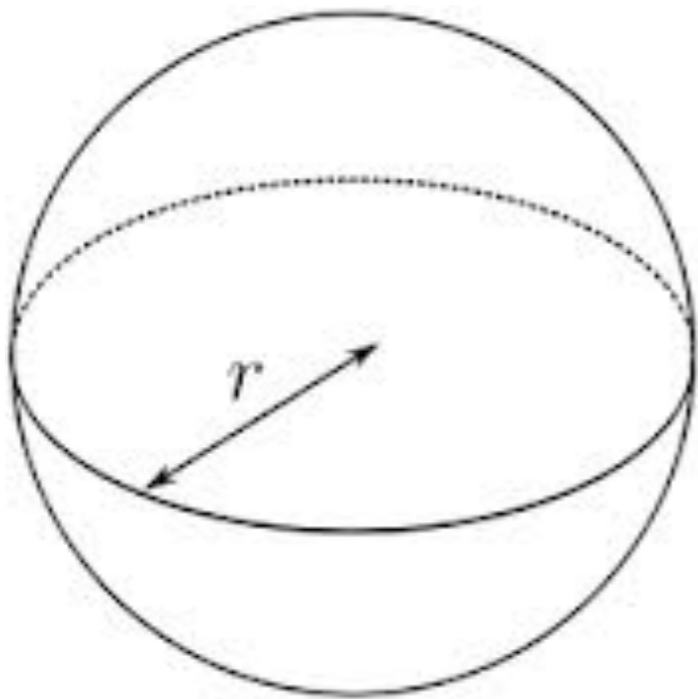
- Des symétries facilite la vie...

ALPĪĀ



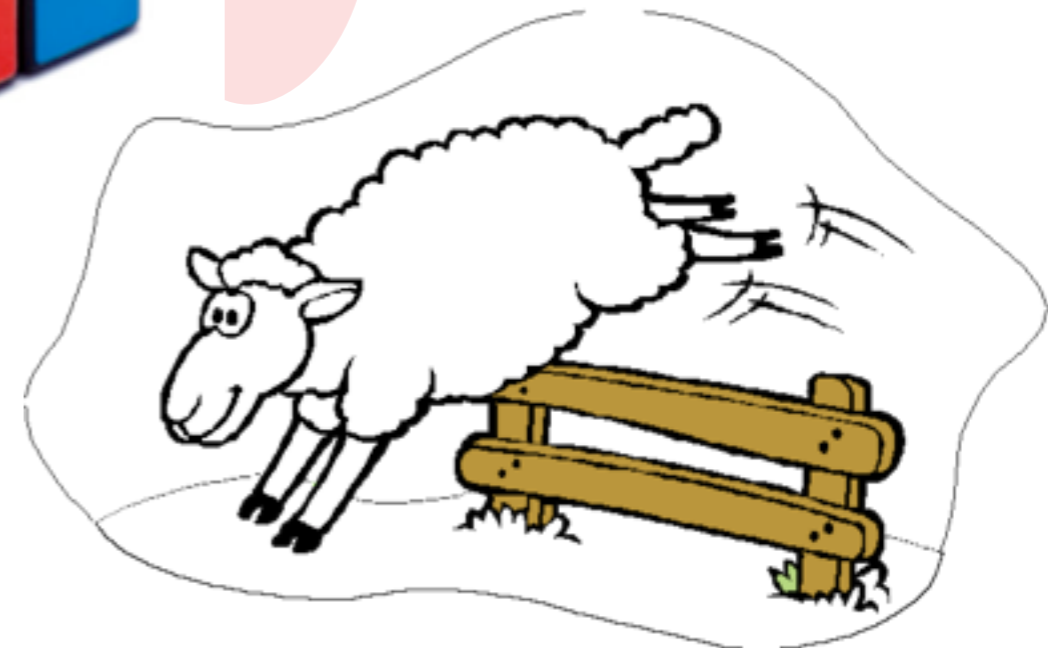
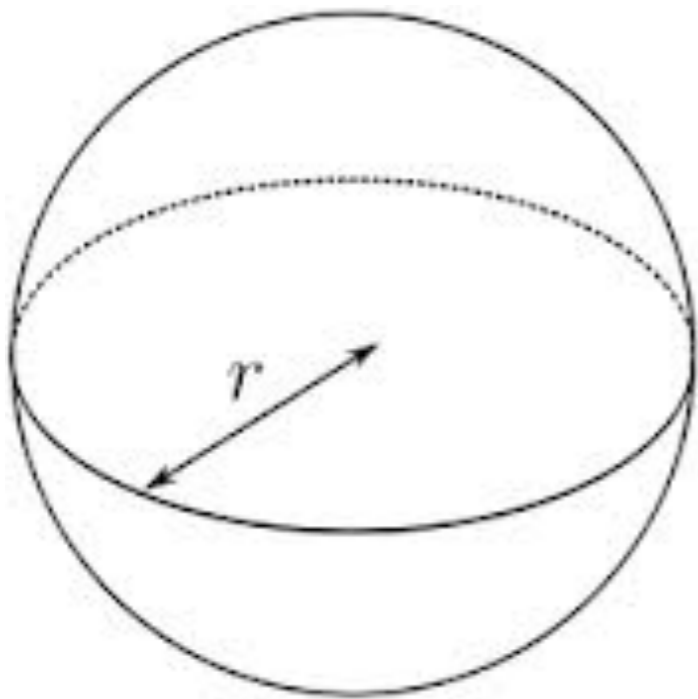
Intermezzo : Les paresseux

- Des symétries facilite la vie...



Intermezzo : Les paresseux

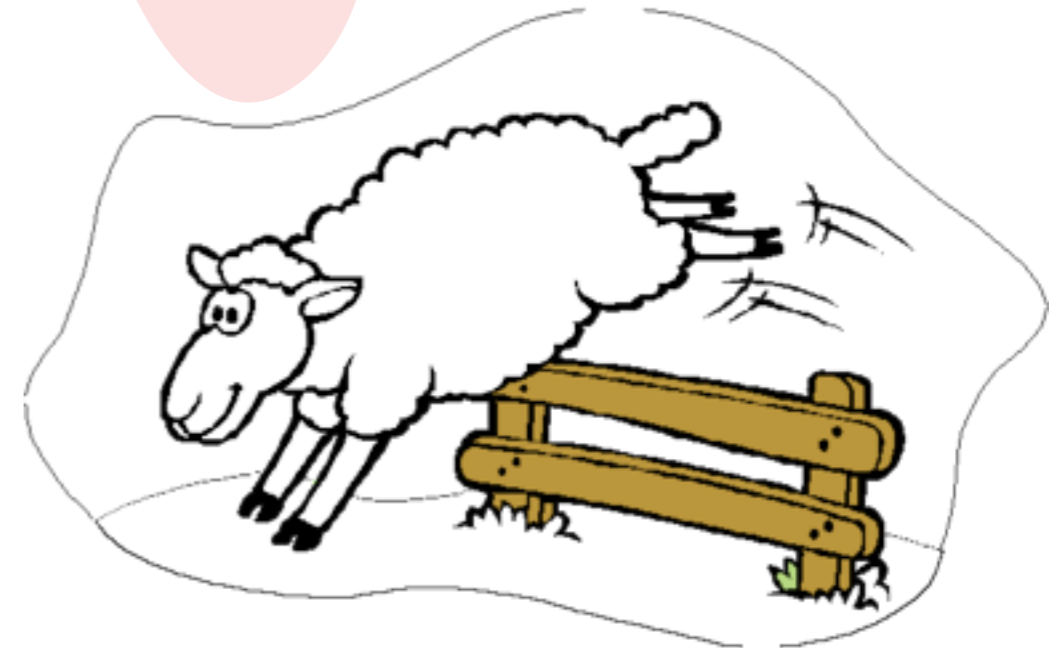
- Des symétries facilite la vie...



Intermezzo : Les paresseux

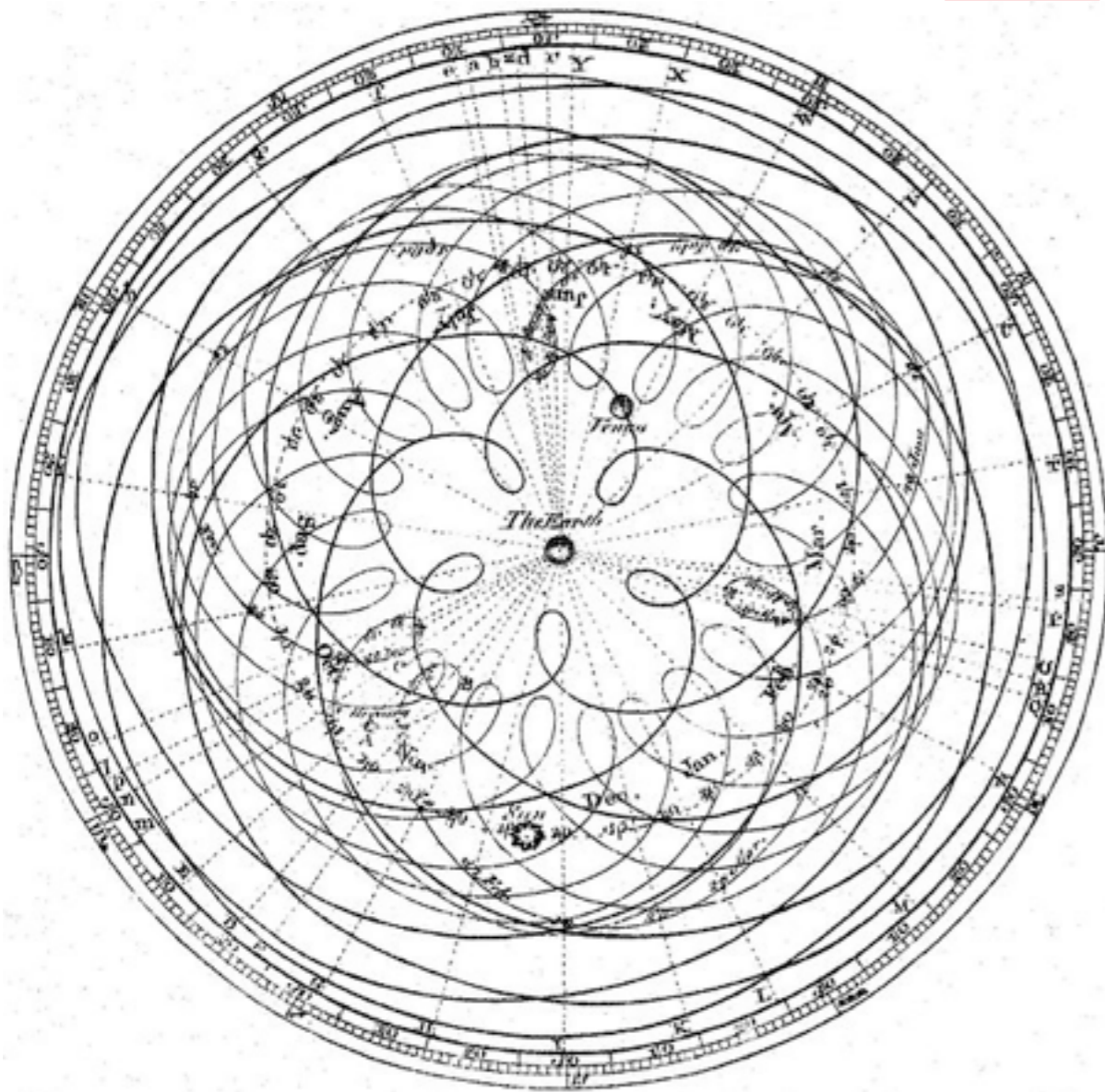
- Des symétries facilite la vie...
- L'explication le plus simple... (Kepler)

ALPĪA

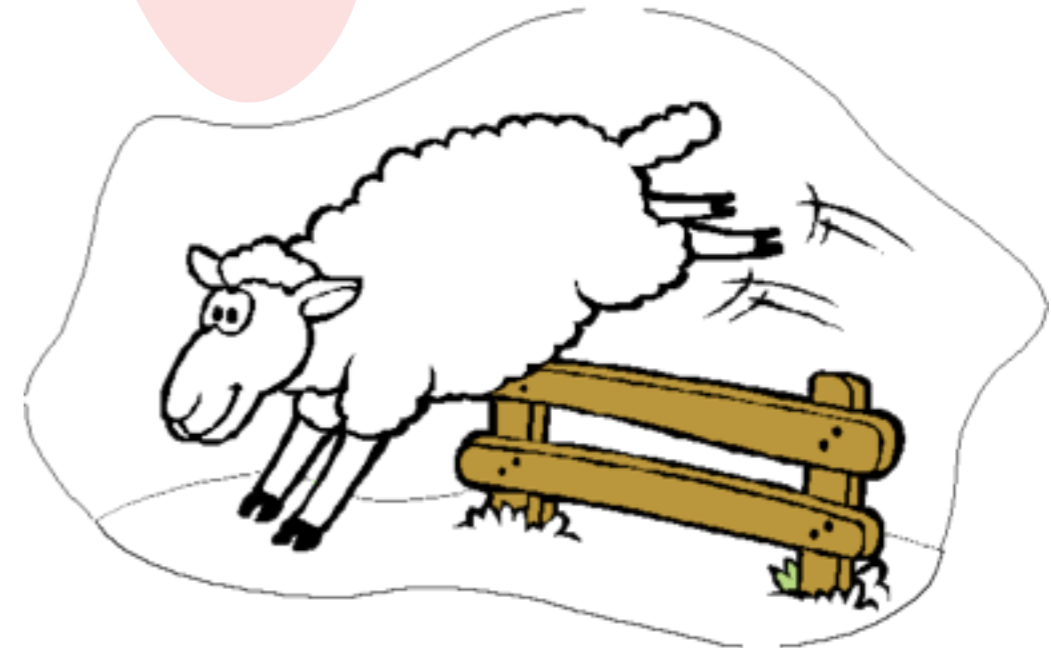


Intermezzo : Les paresseux

- Des symétries facilite la vie...
- L'explication le plus simple... (Kepler)

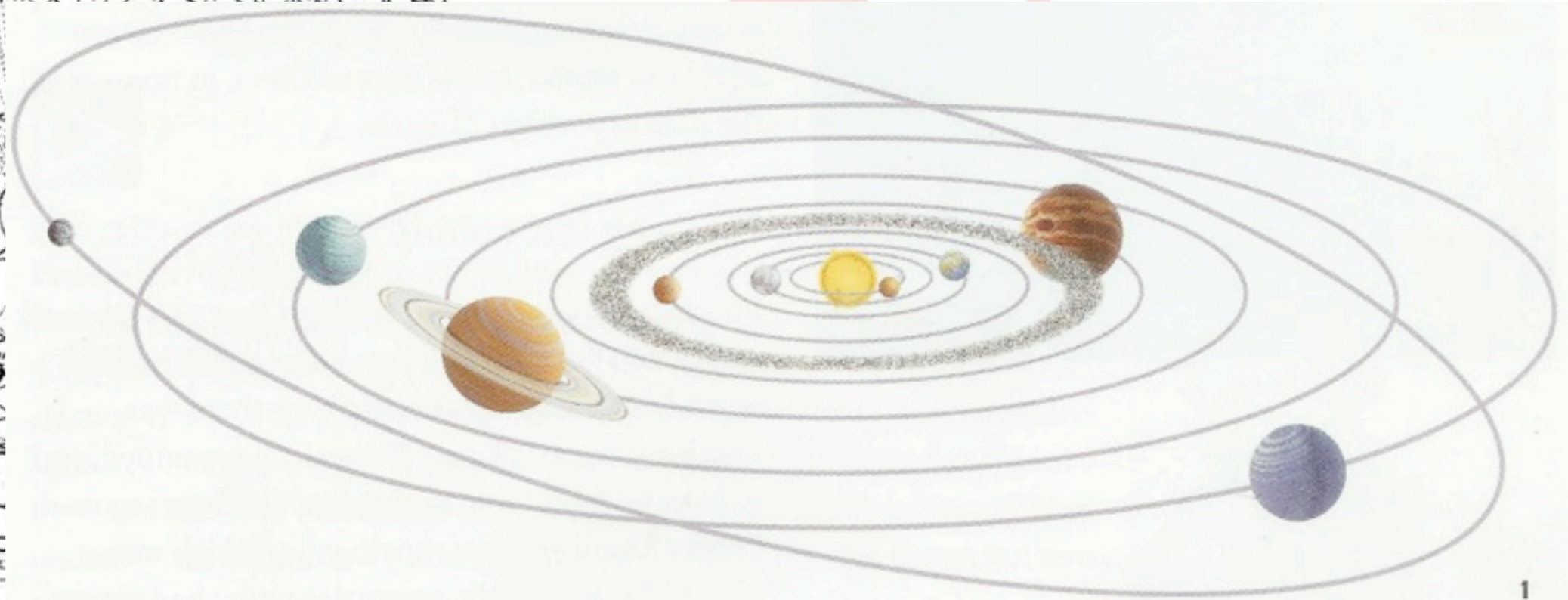
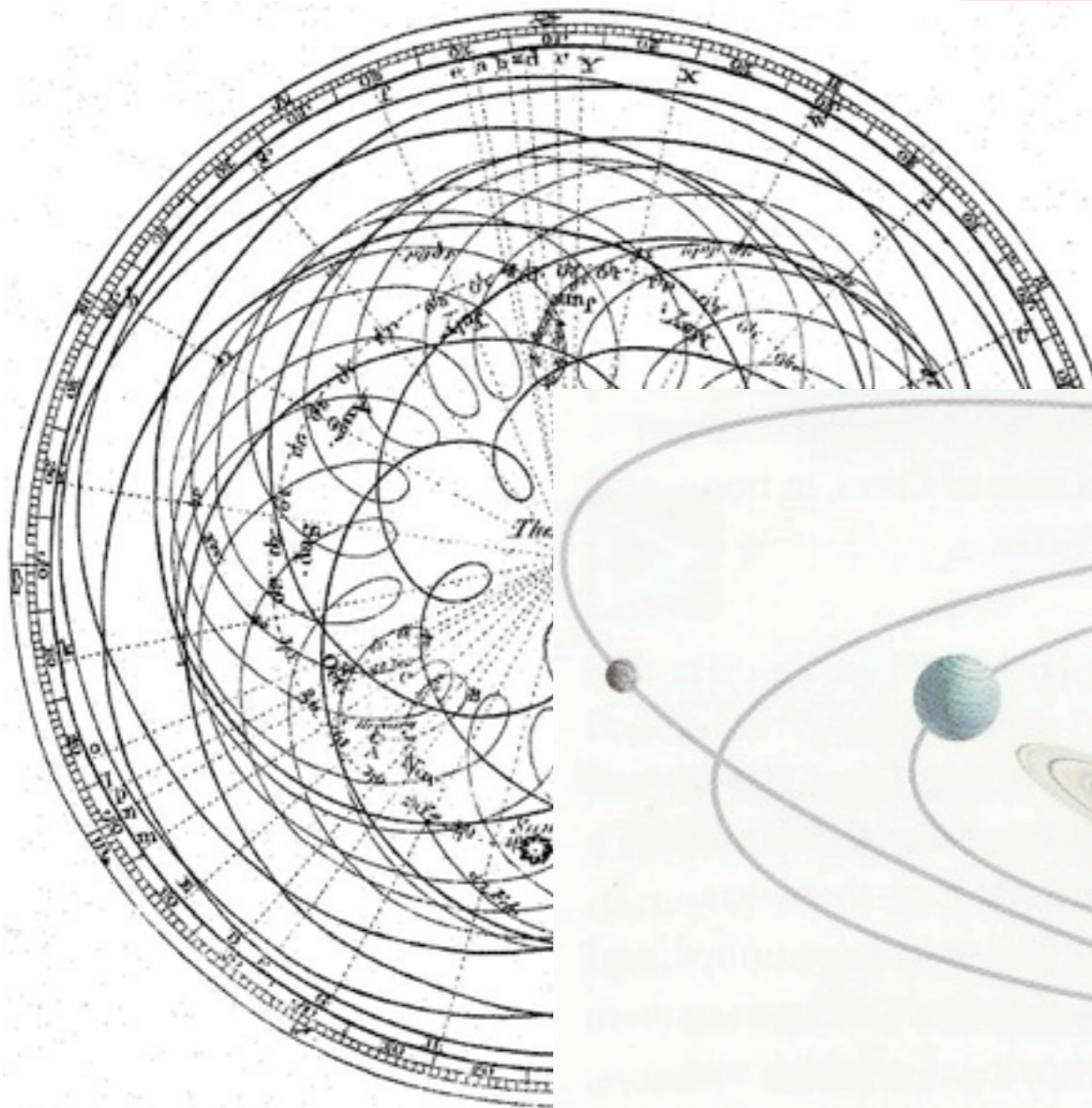


FA



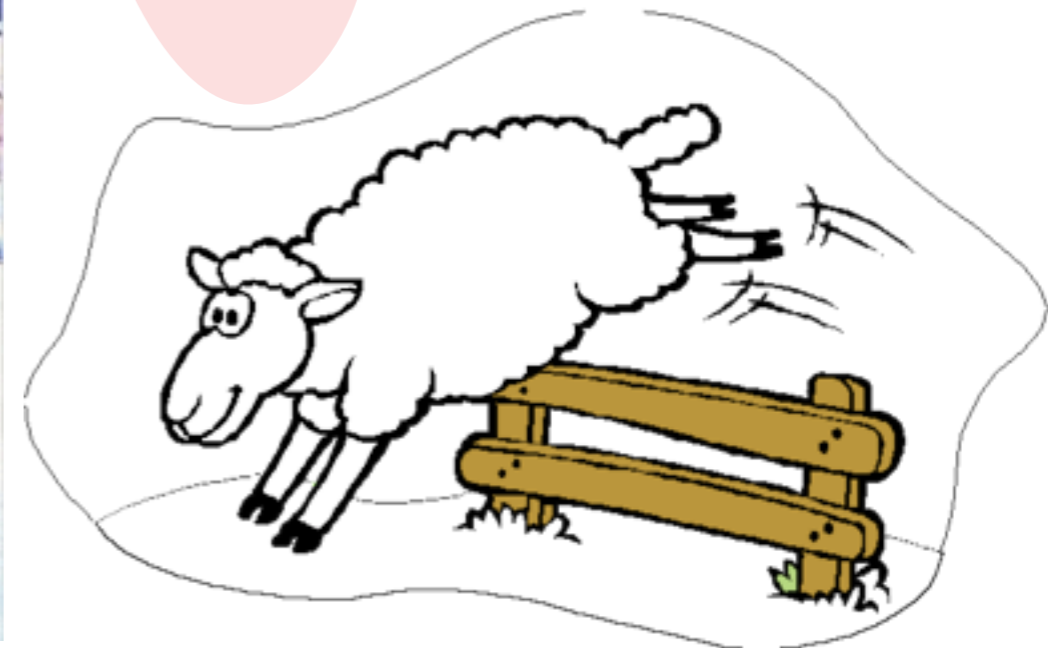
Intermezzo : Les paresseux

- Des symétries facilite la vie...
- L'explication le plus simple... (Kepler)



Intermezzo : Les paresseux

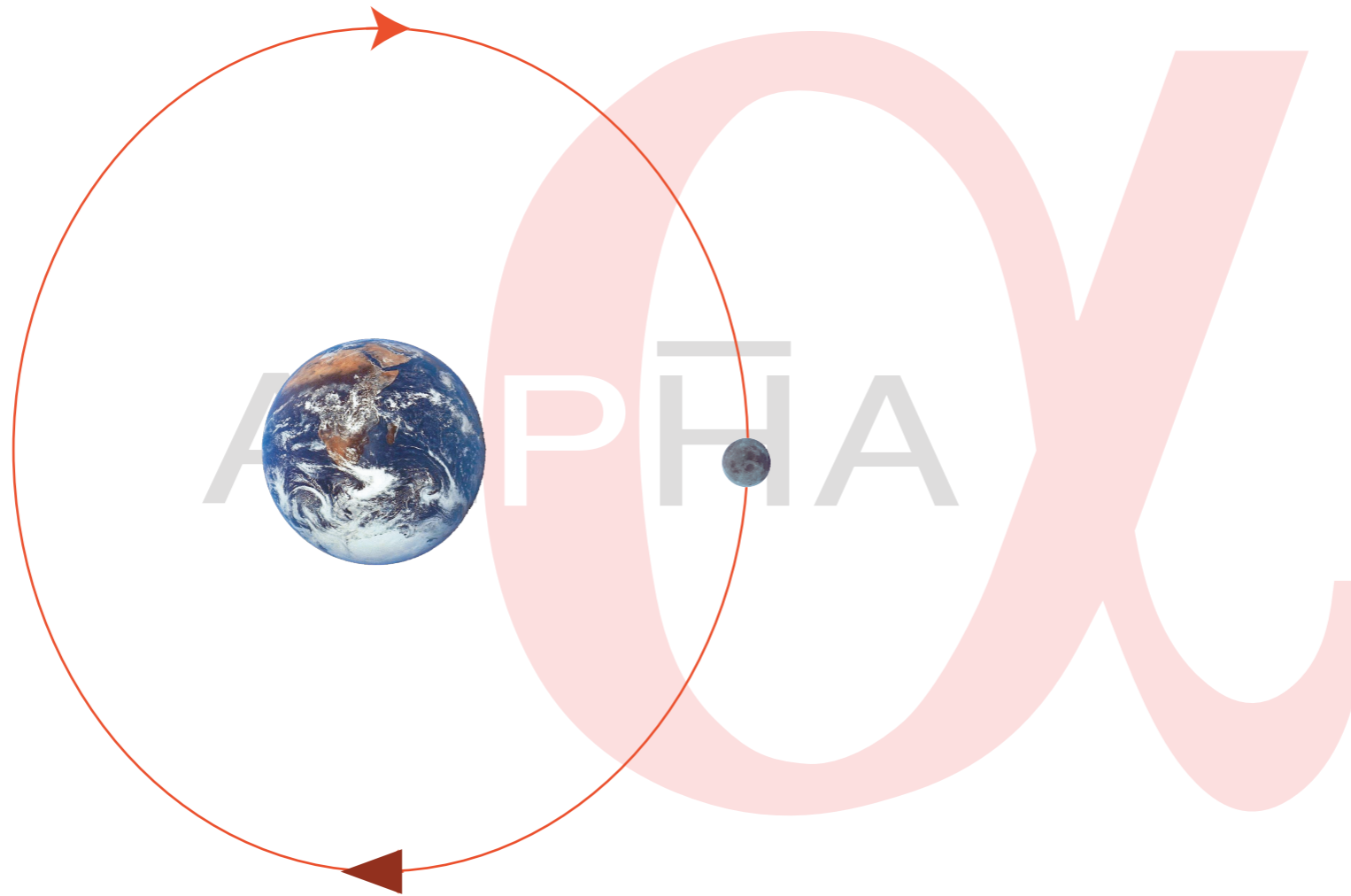
- Des symétries facilite la vie...
- L'explication le plus simple... (Kepler)
- Symétries -> des quantités conservés...



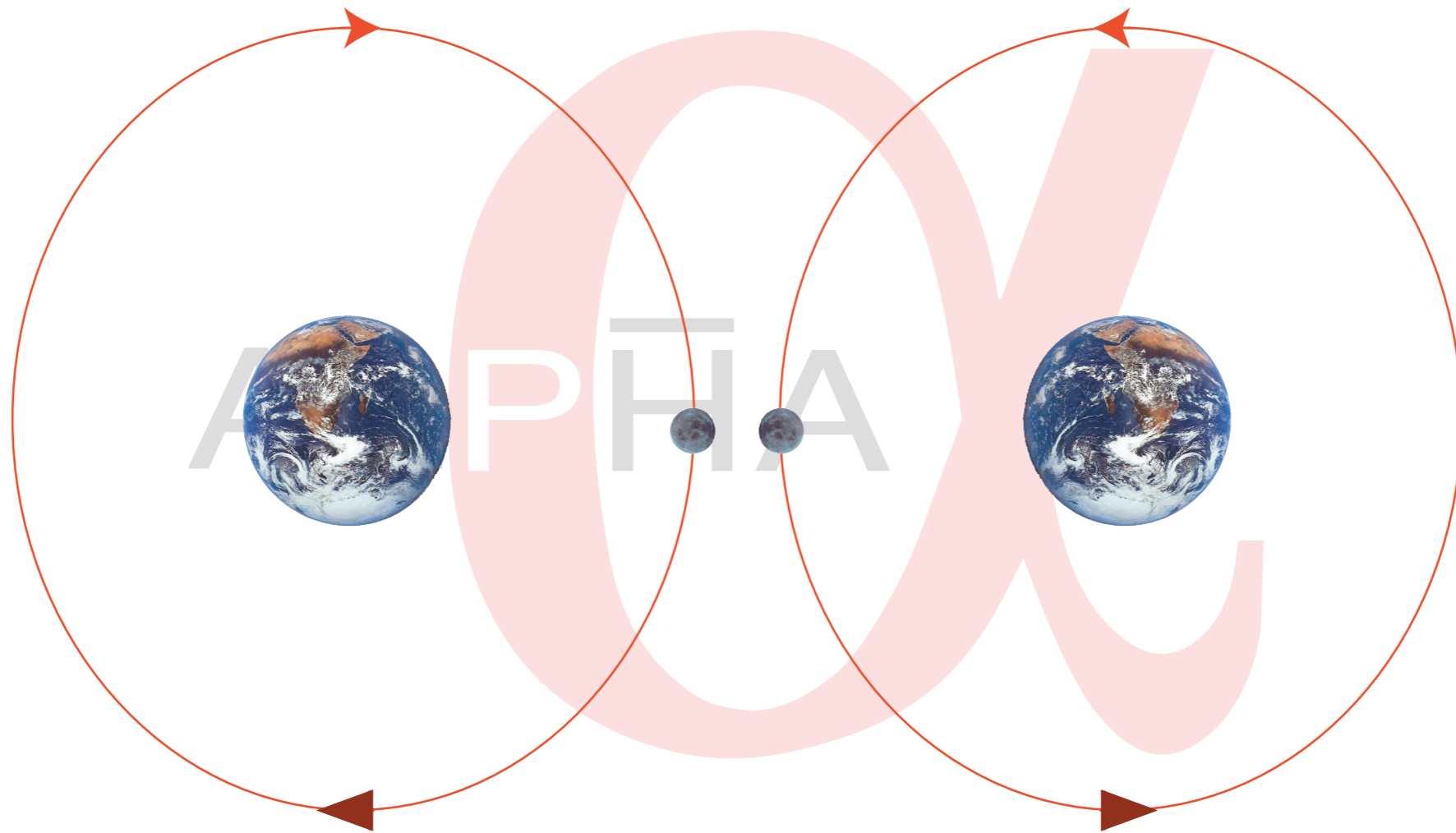
Les symétries - P



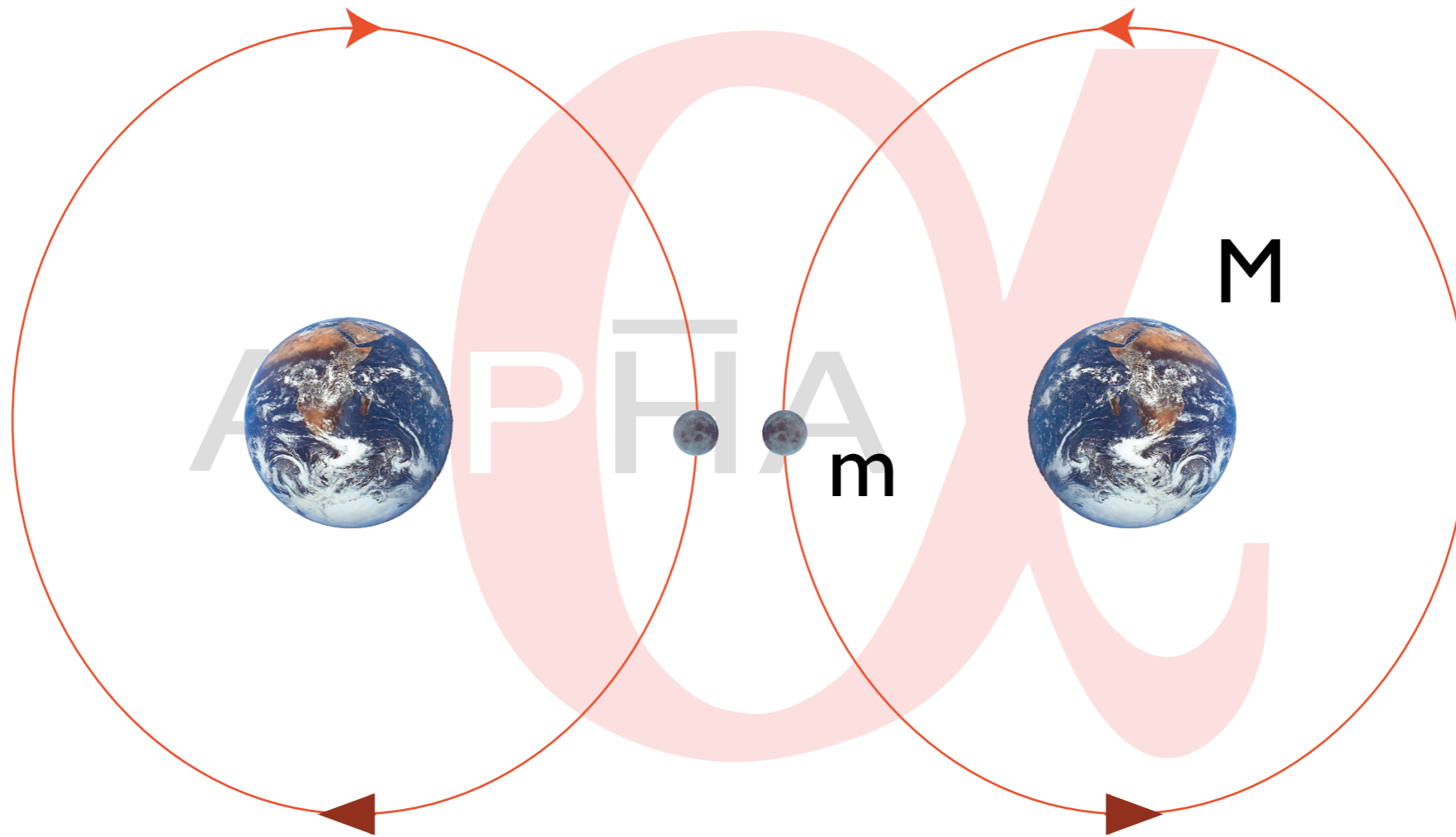
Les symétries - P



Les symétries - P



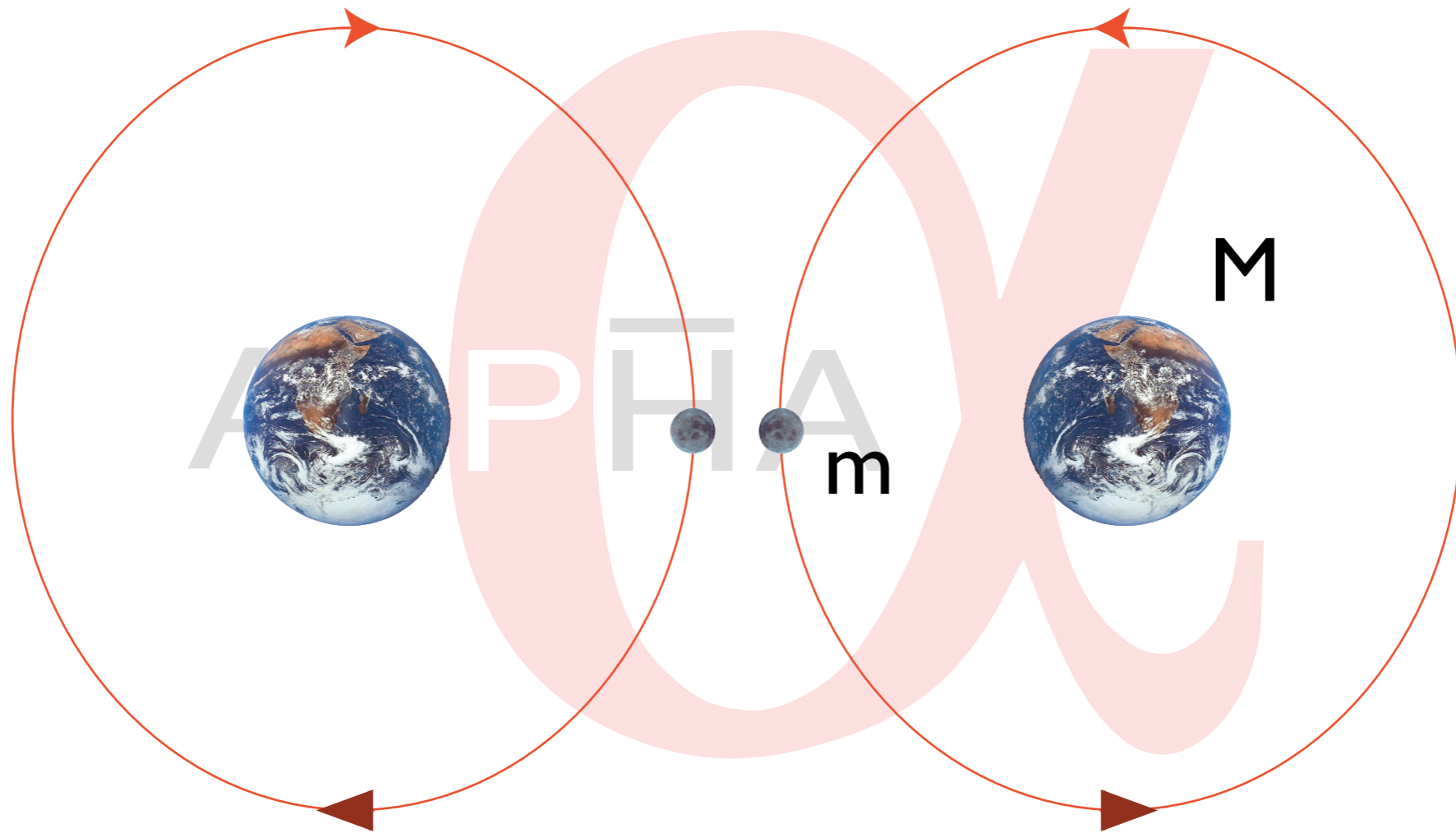
Les symétries - P



La gravitation :

$$\mathbf{F}_G = \mathbf{G} \times \frac{mM}{r^2}$$

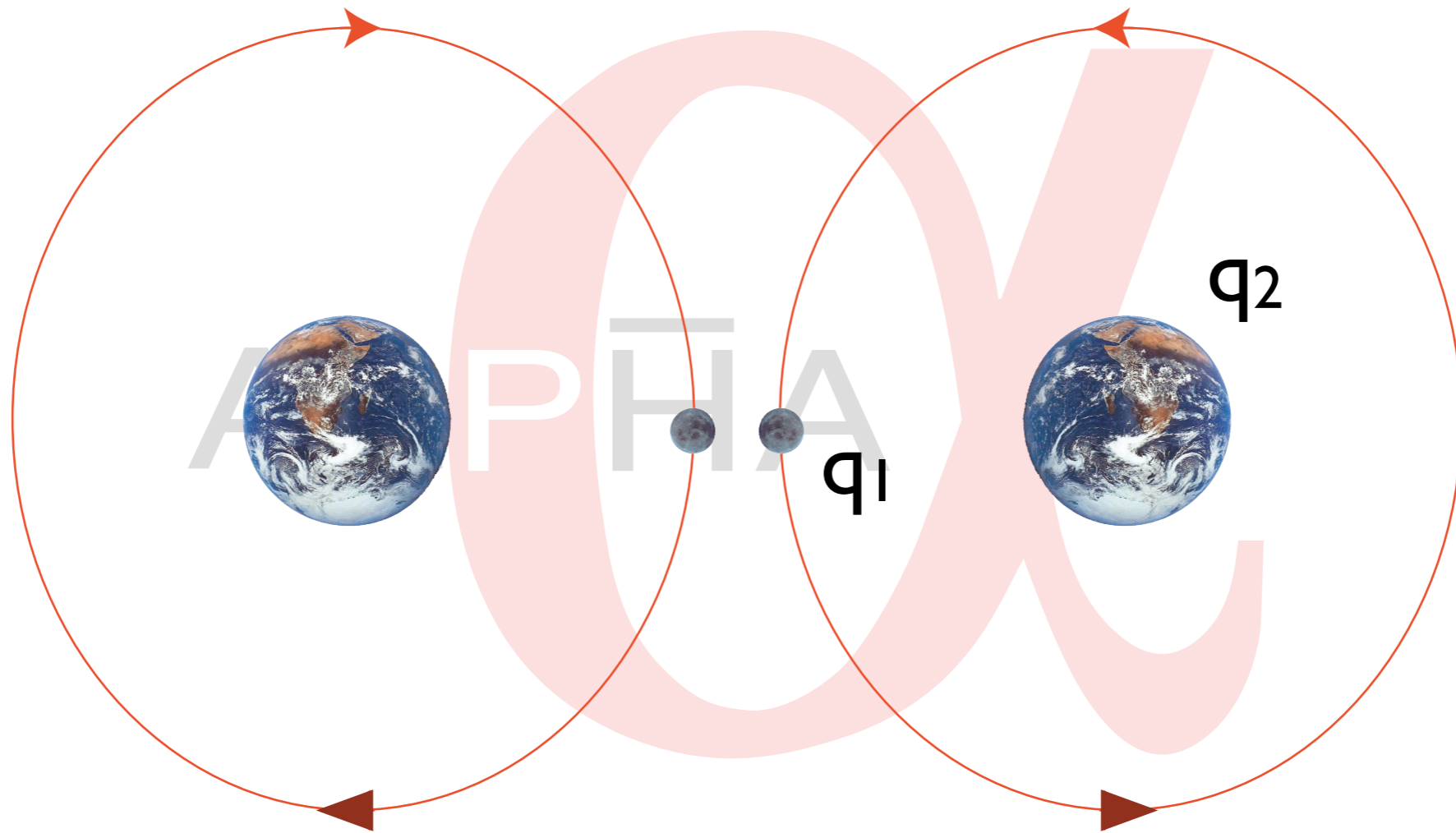
Les symétries - T



La gravitation :

$$\mathbf{F}_G = \mathbf{G} \times \frac{mM}{r^2}$$

Les symétries - C



La force de Coulomb :

$$F_C = C \times \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Symétrie CPT

ALP $\bar{\text{H}}$ A α

Symétrie CPT

- Symétrie : Les lois (physique) restent inchangées.

ALPĪA

Symétrie CPT

- Symétrie : Les lois (physique) restent inchangées.
- La symétrie P
 - voilé par la force nucléaire faible (1956 (neutrinos))

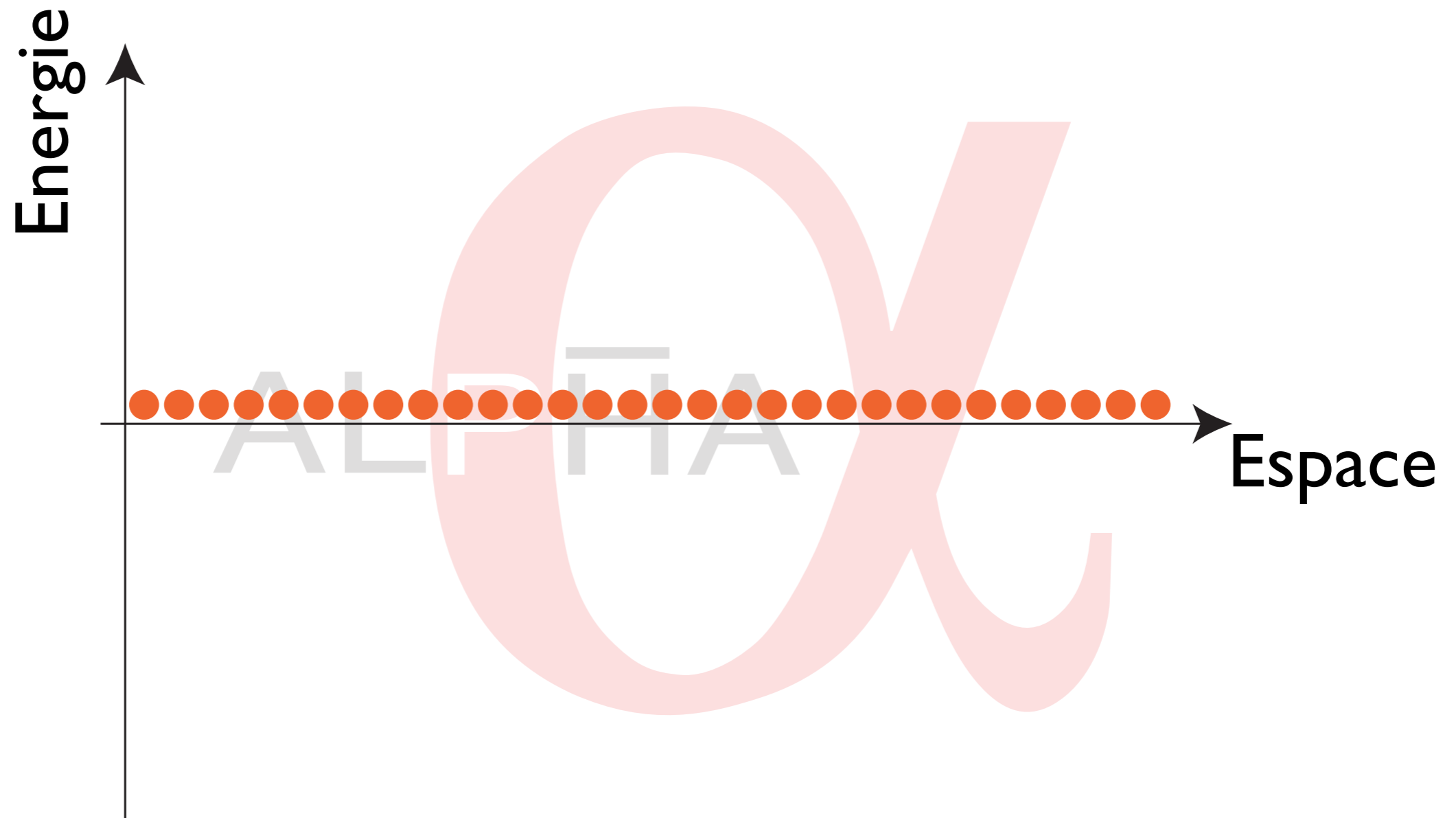
Symétrie CPT

- Symétrie : Les lois (physique) restent inchangées.
- La symétrie P
 - voilé par la force nucléaire faible (1956 (neutrinos))
- La (double) symétrie CP
 - voilé par la force nucléaire faible (1964 (Kaons))

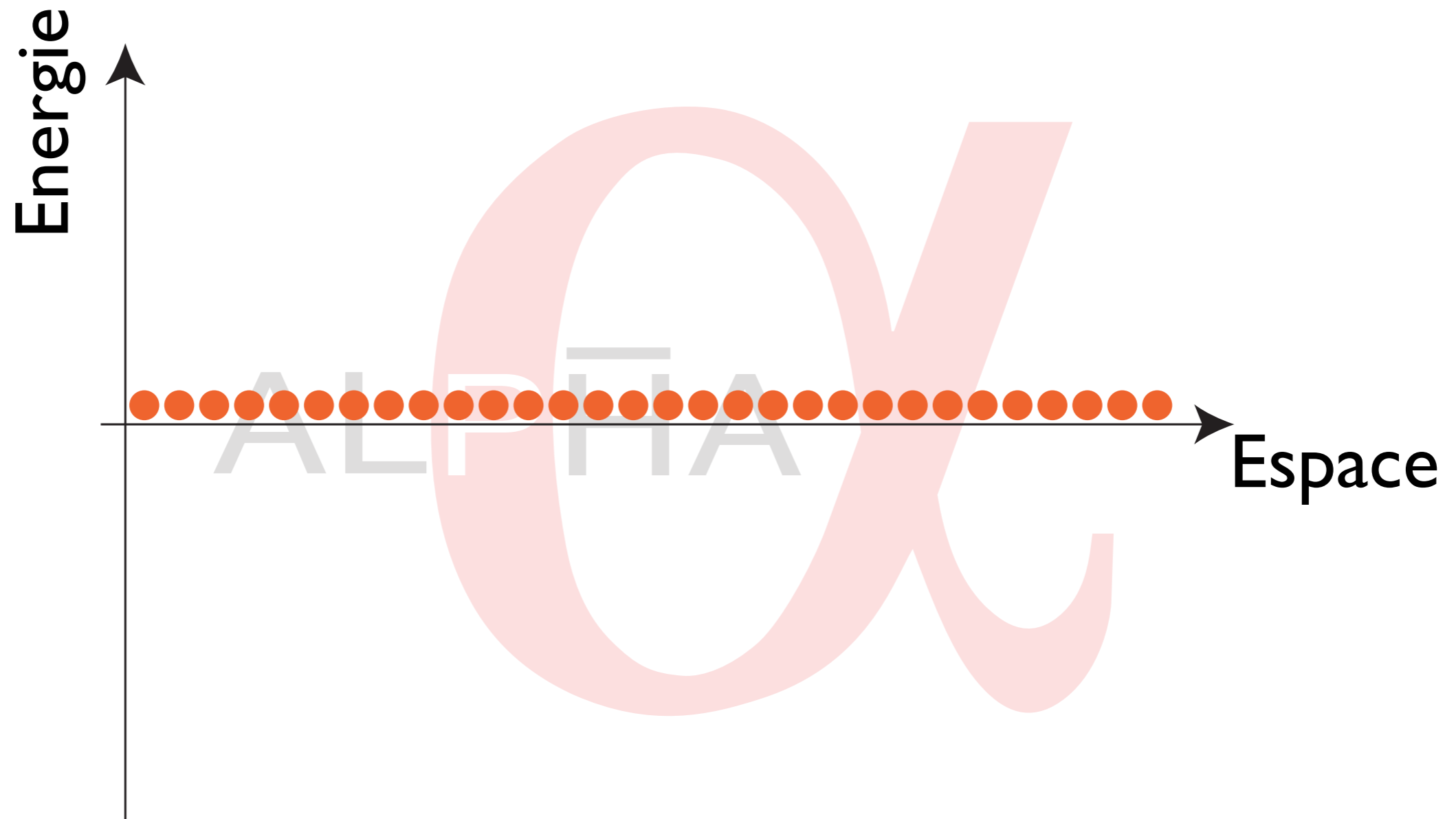
Symétrie CPT

- Symétrie : Les lois (physique) restent inchangées.
- La symétrie P
 - voilé par la force nucléaire faible (1956 (neutrinos))
- La (double) symétrie CP
 - voilé par la force nucléaire faible (1964 (Kaons))
- La (triple) symétrie CPT
 - encore bon
 - “transformation” de matière en antimatière.

D'une autre façon...



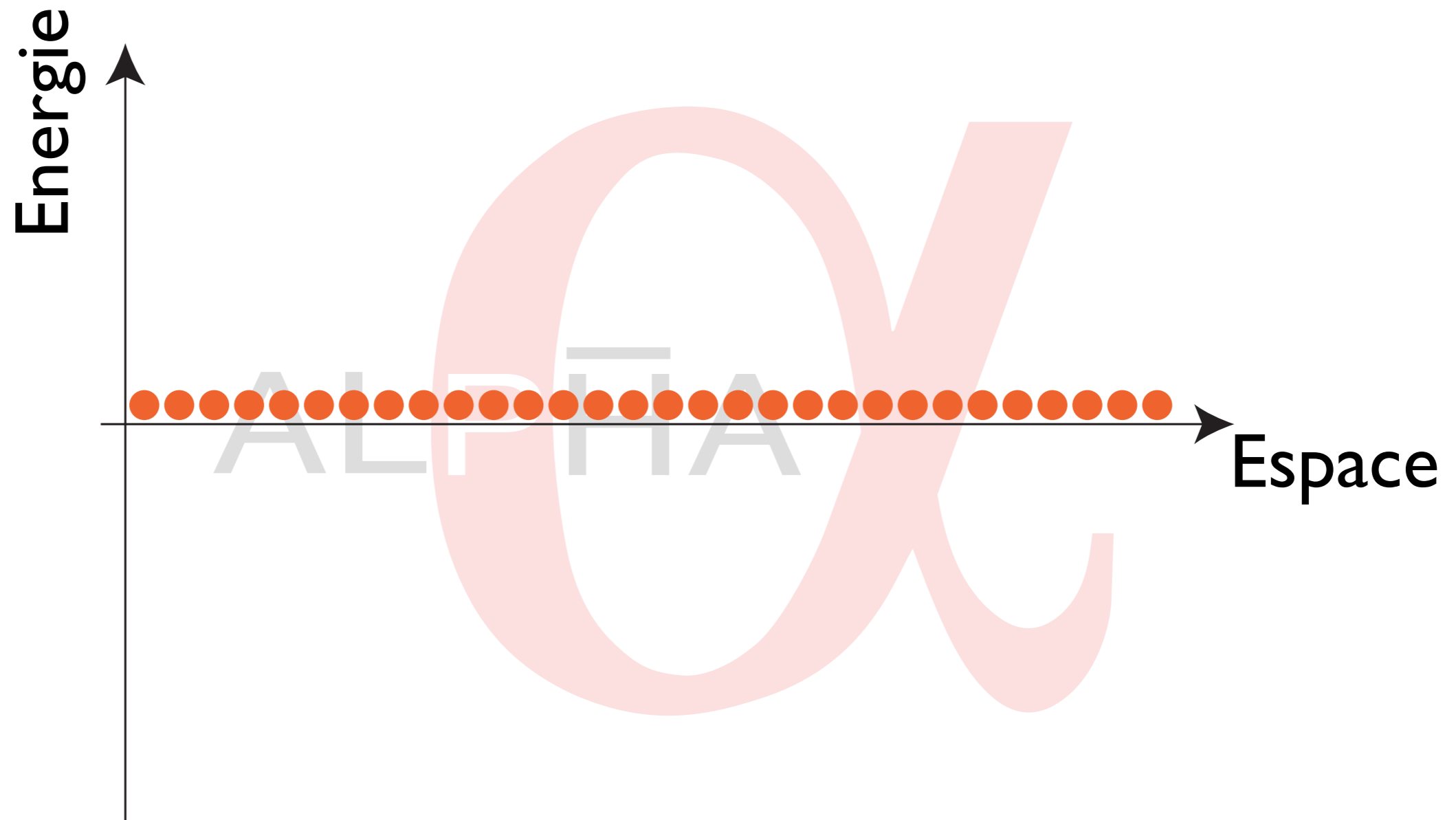
D'une autre façon...



Einstein :

$$E = mc^2$$

D'une autre façon...



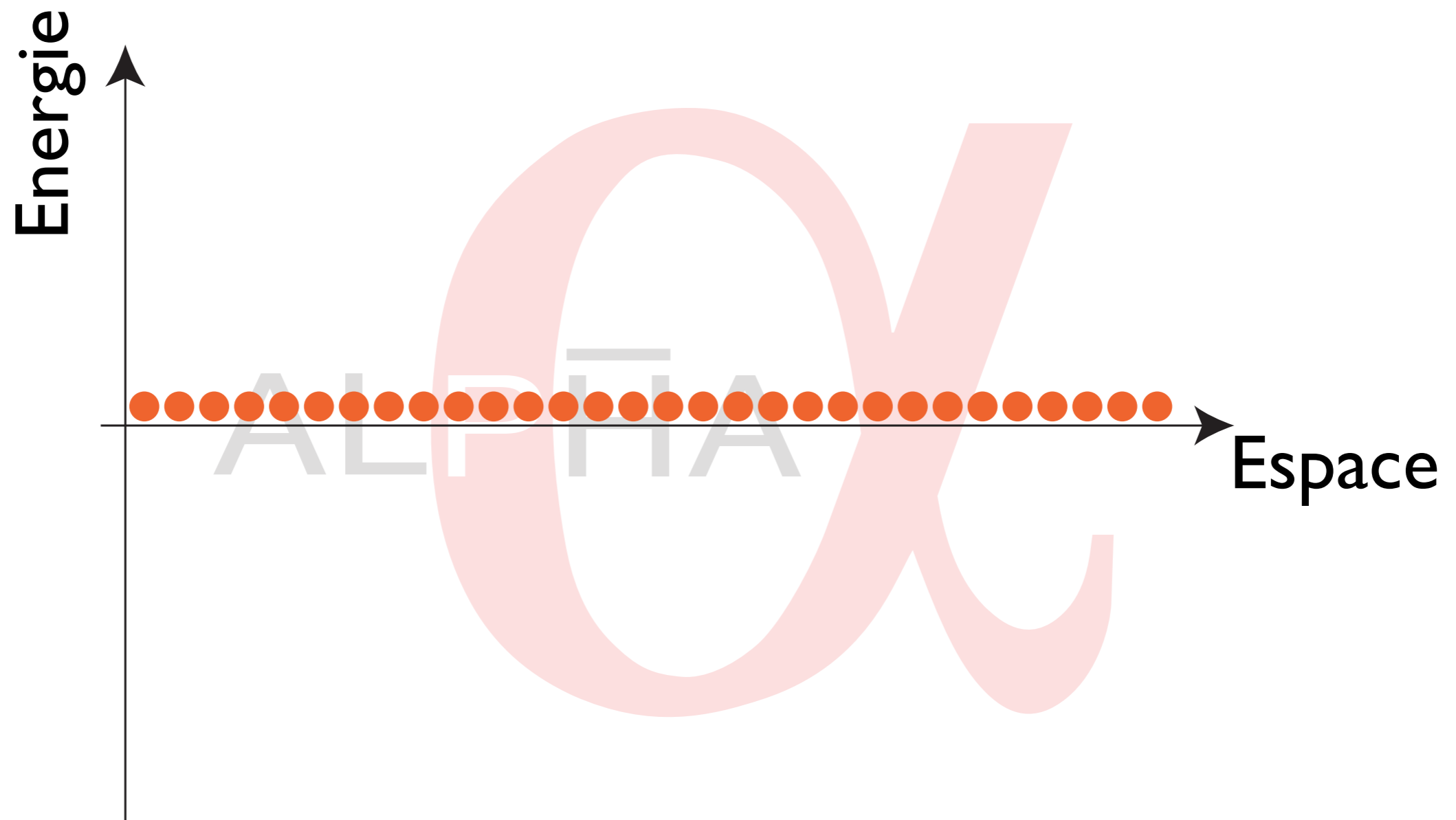
Einstein :

$$E = mc^2$$

En mouvement ça donne :

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

D'une autre façon...



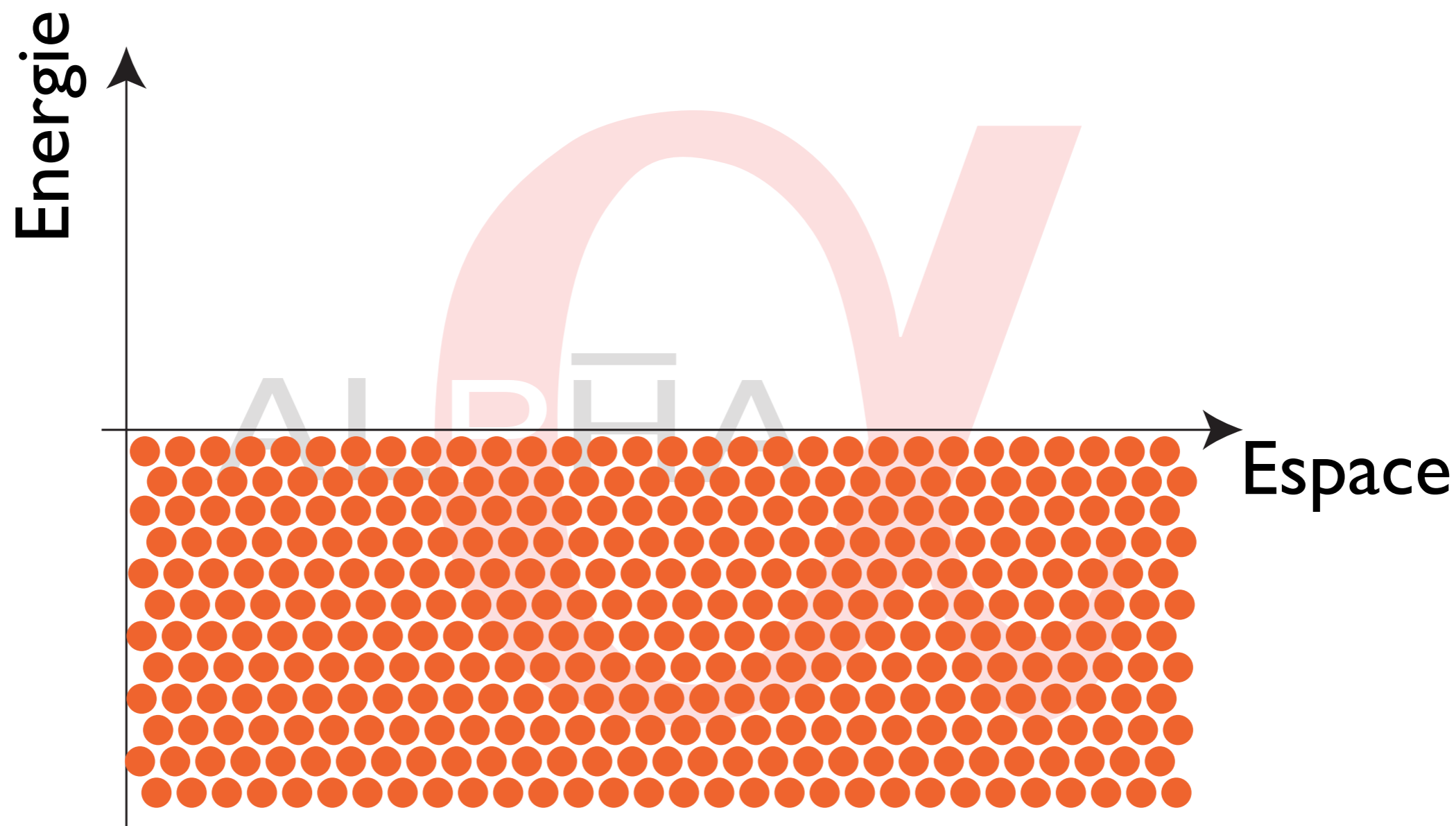
Einstein :

$$E = mc^2$$

En mouvement ça donne :

$$E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

D'une autre façon...



Einstein :

$$E = mc^2$$

En mouvement ça donne :

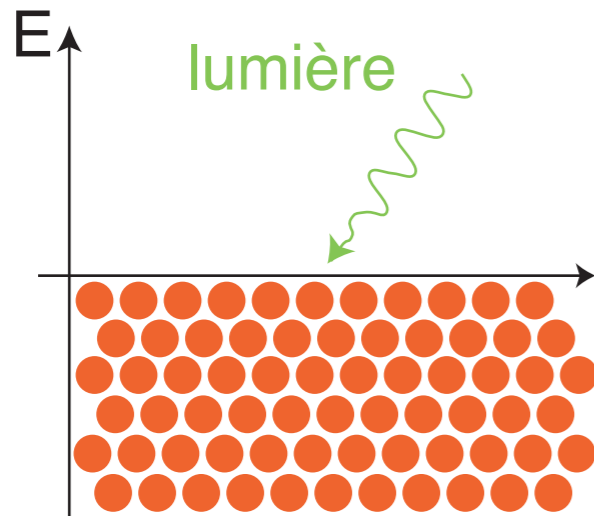
$$E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

Antiparticules

ALP̄H̄A

A large, light red, stylized Greek letter alpha symbol (α) is centered on the slide. The symbol is thick and has a slight shadow effect. Overlaid on the left side of the alpha symbol is the text "ALP̄H̄A" in a light gray, sans-serif font. The "P" and "H" in "ALP̄H̄A" have horizontal bars above them, indicating they are part of a specific scientific notation or acronym.

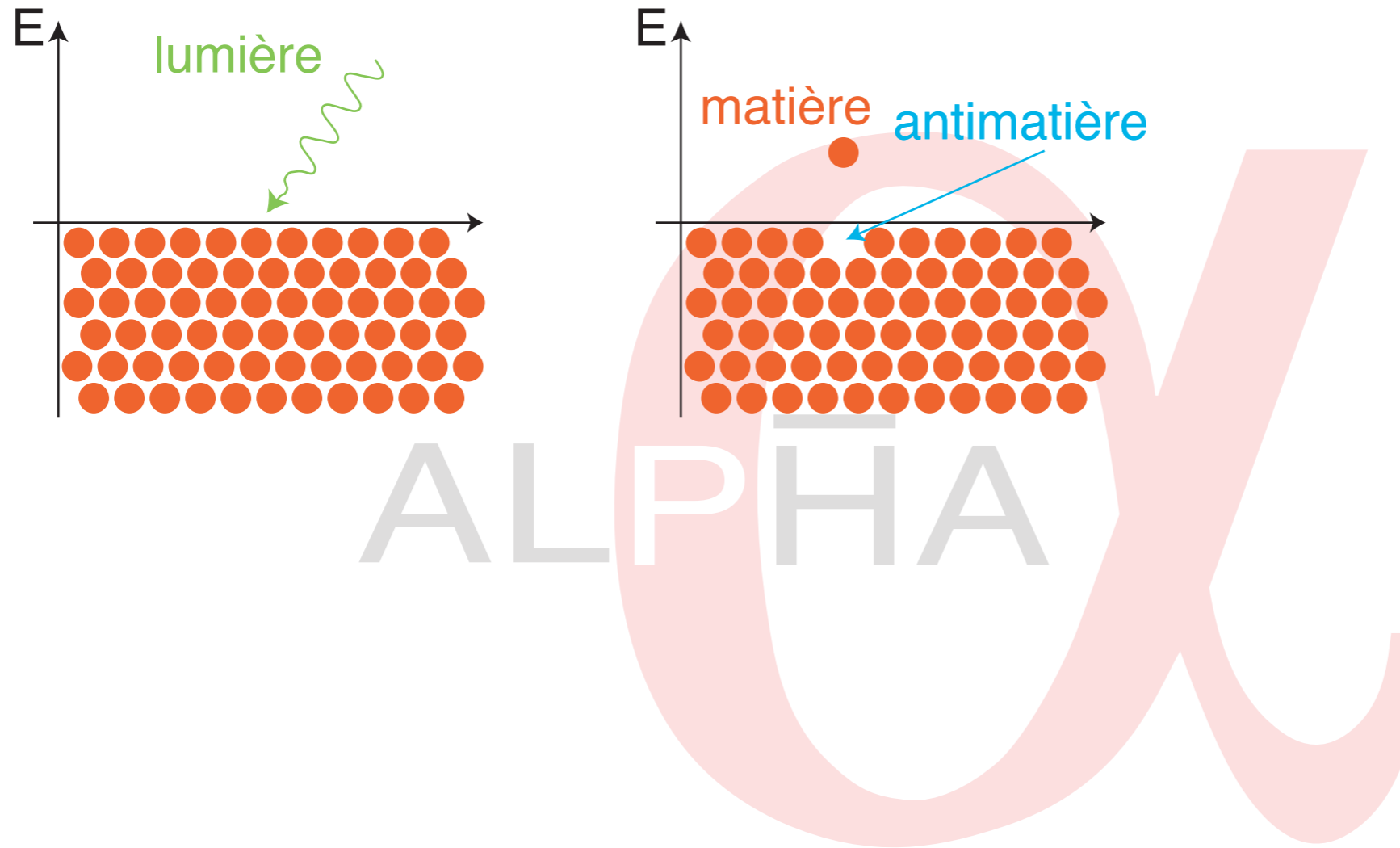
Antiparticules



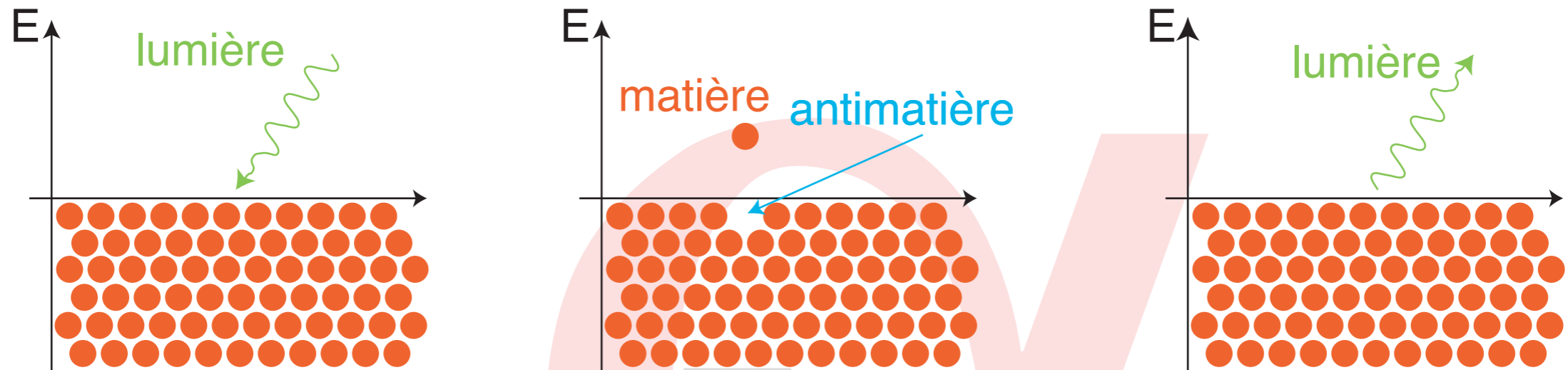
ALP̄H̄A

α

Antiparticules

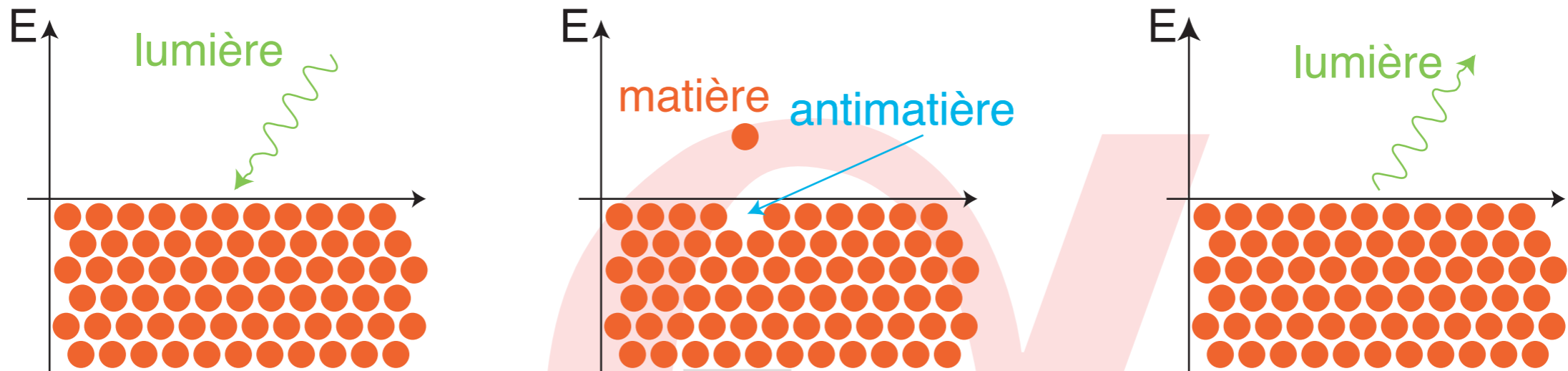


Antiparticules



ALPHA

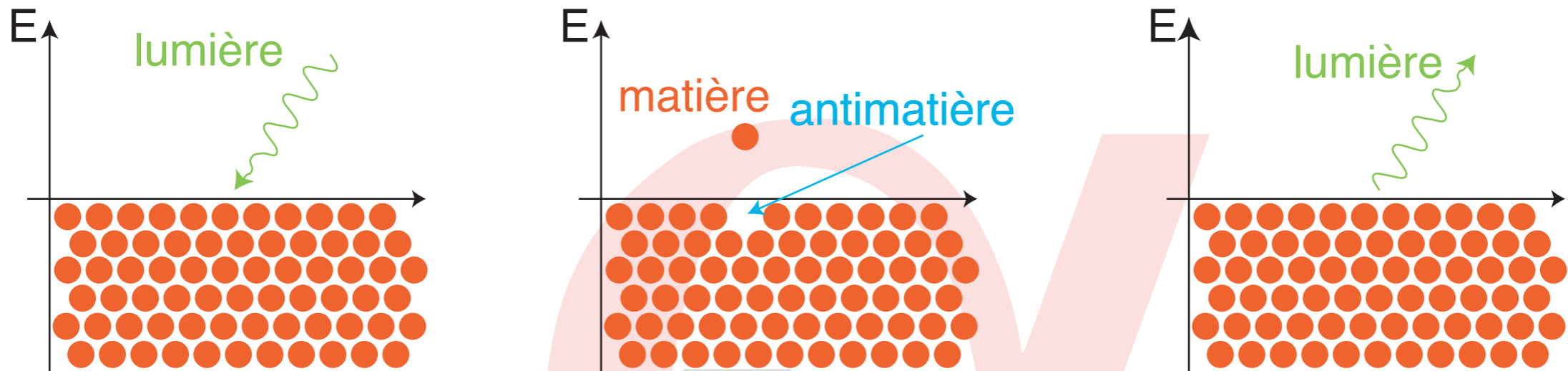
Antiparticules



- Antimatière est créée en paire avec de la matière...

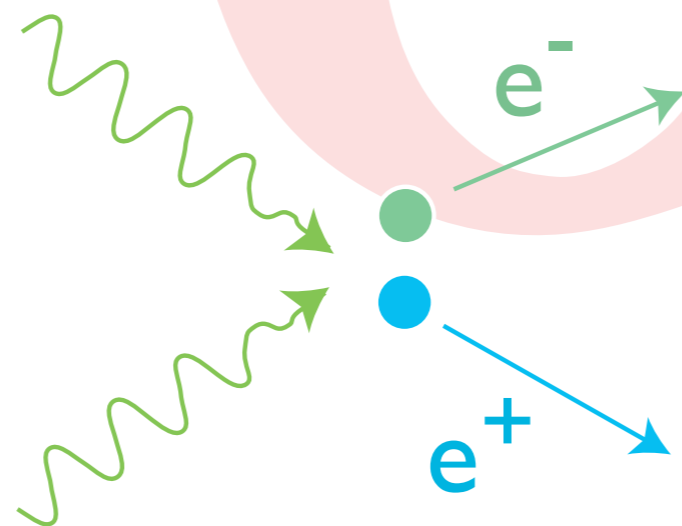
$$E = 2 \times 511 \text{ keV}$$

Antiparticules



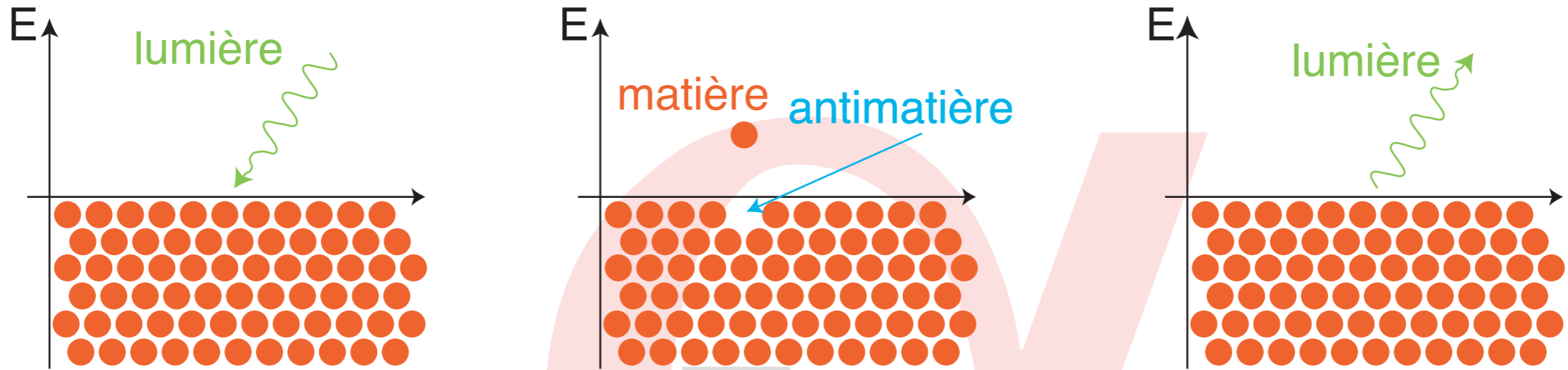
- Antimatière est créée en paire avec de la matière...

$E = 2 \times 511 \text{ keV}$



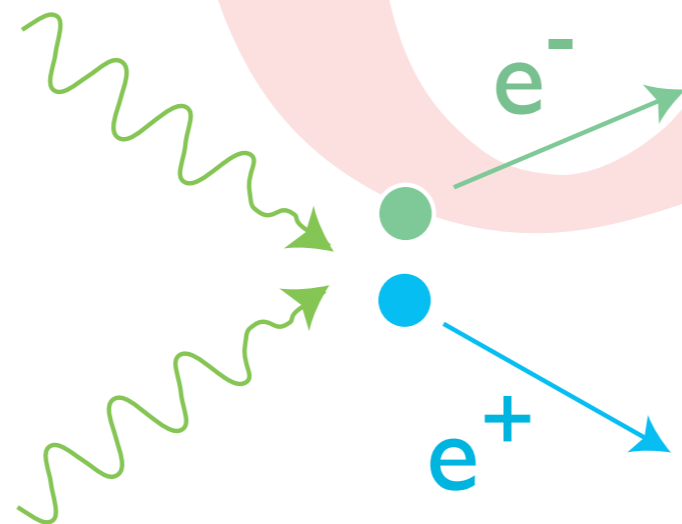
$E = 2 \times 511 \text{ keV}$

Antiparticules



- Antimatière est créée en paire avec de la matière...

$E = 2 \times 511 \text{ keV}$



$E = 2 \times 511 \text{ keV}$

Point clé :

L'antimatière est créée d'une façon symétrique : formation en pair

Quoi faire?

ALPHA

avec de l'antimatière...

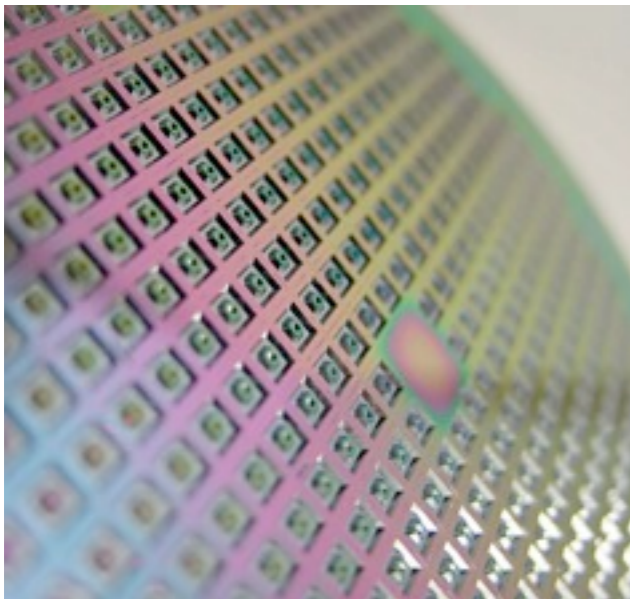
Quoi faire avec de l'antimatière

ALP̄H̄A α

Quoi faire avec de l'antimatière

- Caractérisation de matériaux

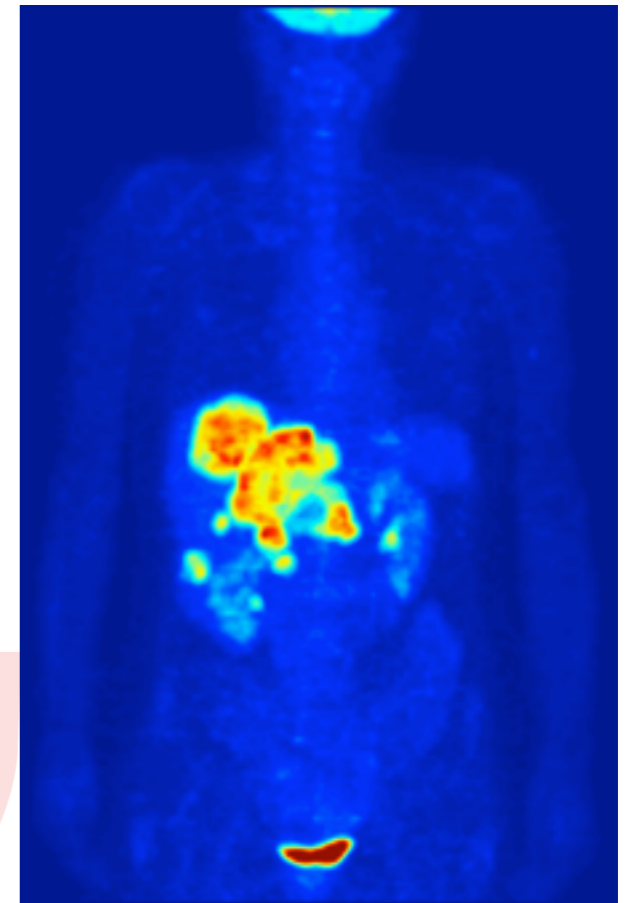
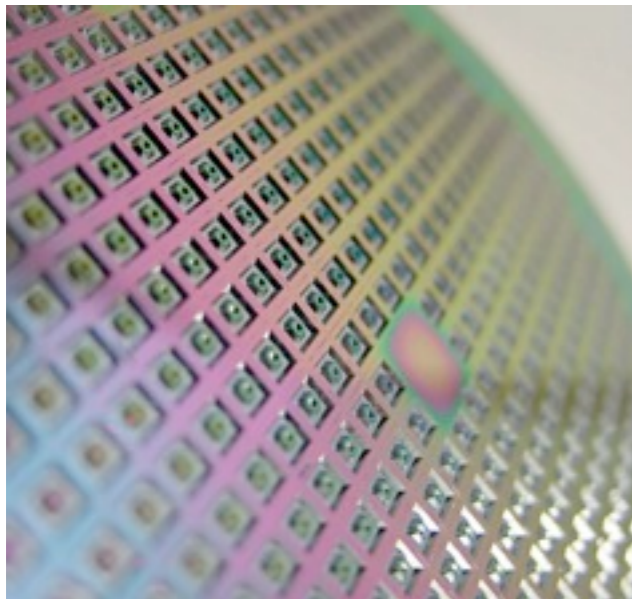
ALPHA α



Quoi faire avec de l'antimatière

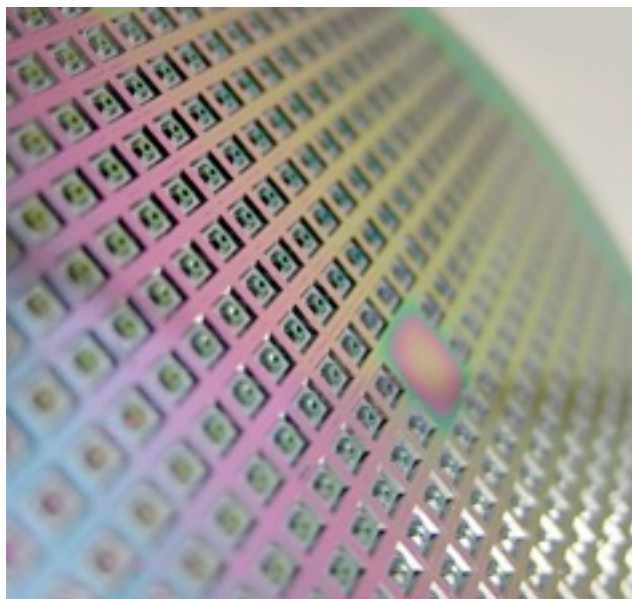
- Caractérisation de matériaux
- Imagerie médicale (PET)

ALPHA

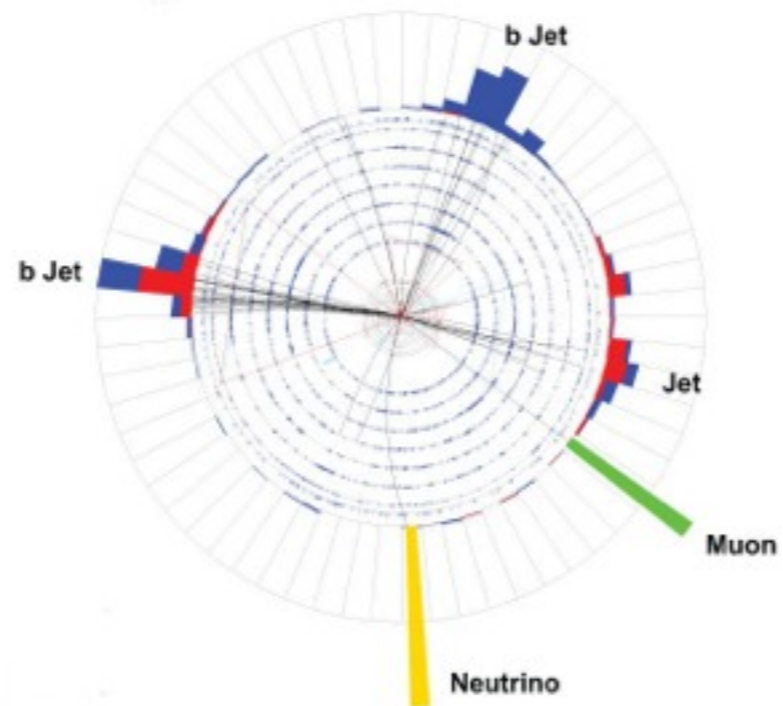


Quoi faire avec de l'antimatière

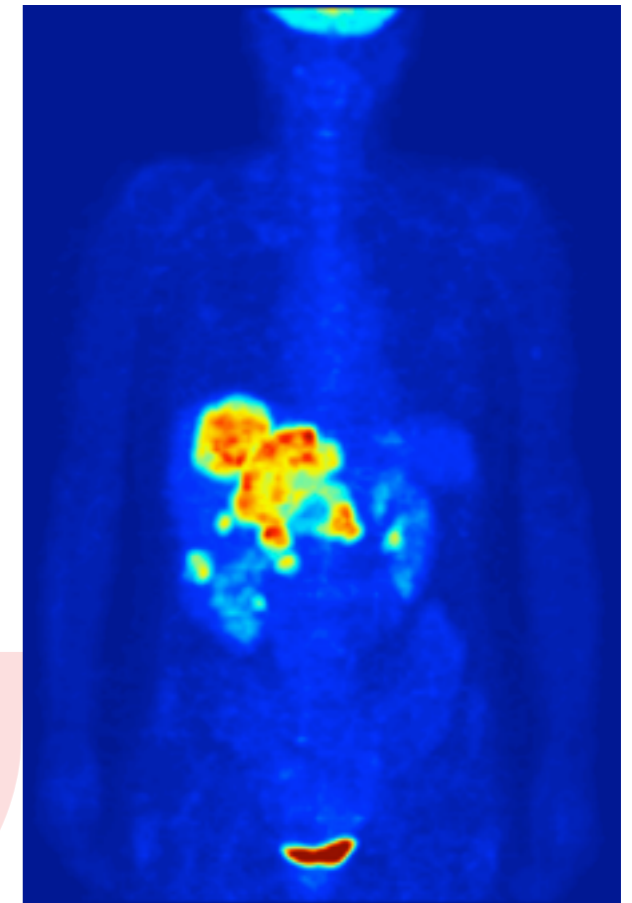
- Caractérisation de matériaux
- Imagerie médicale (PET)
- Physique de haute énergie



AI

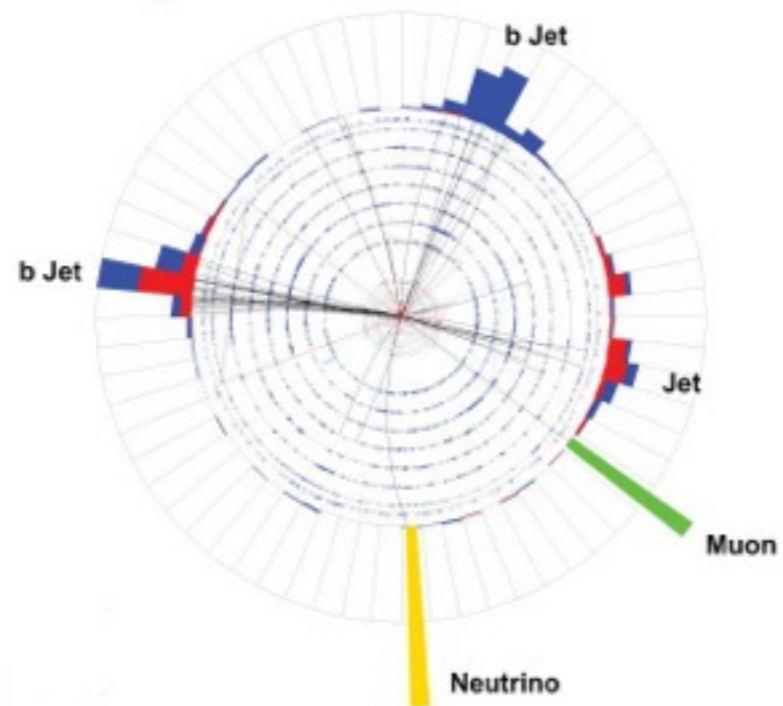
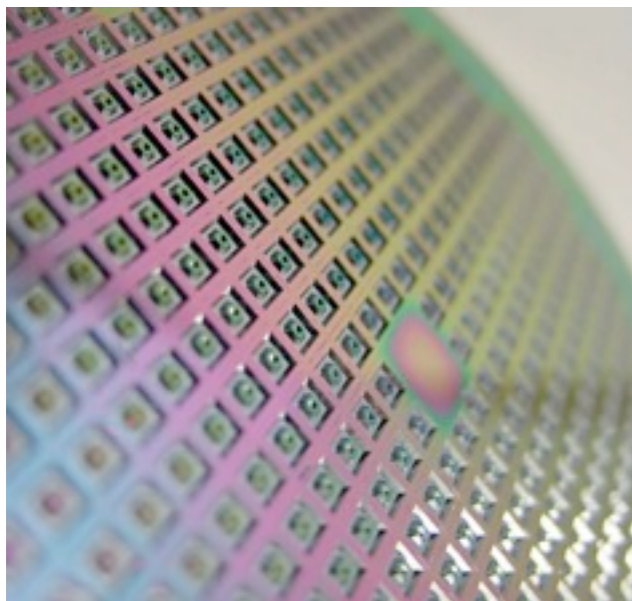


Single Top-Quark Candidate Event.
D-Zero collaboration

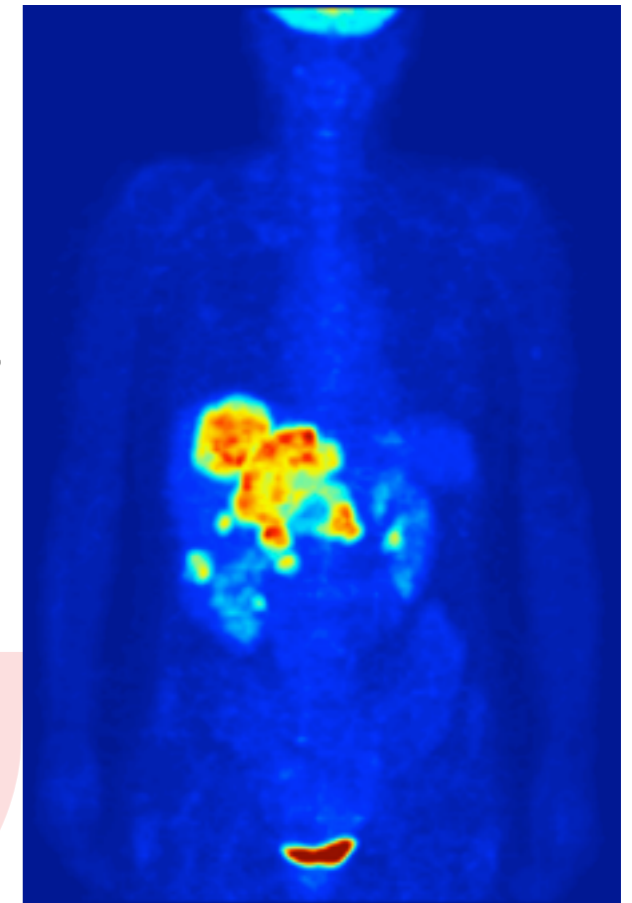


Quoi faire avec de l'antimatière

- Caractérisation de matériaux
- Imagerie médicale (PET)
- Physique de haute énergie
- Tests précises des symétries fondamentales



Single Top-Quark Candidate Event.
D-Zero collaboration



Oublié une utilisation ?

ALP̄H̄A α



Oublié une utilisation ?

- Vaisseau spatiale!? - “que” une tonne pour aller à Alpha Centauri.



ALPHA

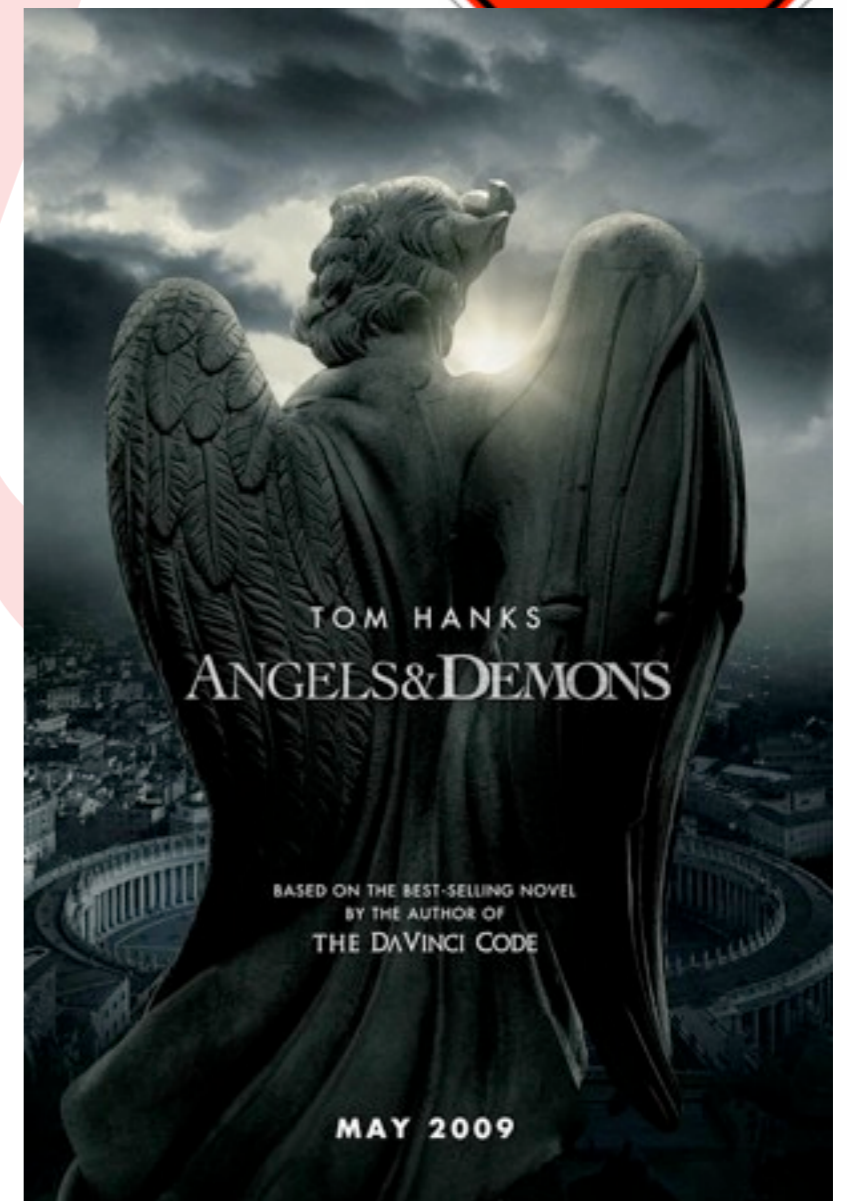


Oublié une utilisation ?

- Vaisseau spatiale!? - “que” une tonne pour aller à Alpha Centauri.
- Bombes!? - “que” 1/4g pour détruire le Vatican.



ALPHA



Oublié une utilisation ?

- Vaisseau spatiale!? - “que” une tonne pour aller à Alpha Centauri.
- Bombes!? - “que” 1/4g pour détruire le Vatican.
- OUBLIEZ-LE :

ALPĤĀ



Oublié une utilisation ?

- Vaisseau spatiale!? - “que” une tonne pour aller à Alpha Centauri.
- Bombes!? - “que” 1/4g pour détruire le Vatican.
- OUBLIEZ-LE :
- \bar{p} limite fondamentale : $p \rightarrow 10^{-6} \bar{p}$ @ 20 GeV/c



Oublié une utilisation ?

- Vaisseau spatiale!? - “que” une tonne pour aller à Alpha Centauri.
- Bombes!? - “que” 1/4g pour détruire le Vatican.
- OUBLIEZ-LE :
- \bar{p} limite fondamentale : $p \rightarrow 10^{-6} \bar{p} @ 20 \text{ GeV}/c$
- stockage mieux avec les neutres : $n < \frac{\epsilon_0 B^2}{2m} (lg \sim 10^7 \text{ m}^3)$



Oublié une utilisation ?

- Vaisseau spatiale!? - “que” une tonne pour aller à Alpha Centauri.
- Bombes!? - “que” 1/4g pour détruire le Vatican.
- OUBLIEZ-LE :
- \bar{p} limite fondamentale : $p \rightarrow 10^{-6} \bar{p} @ 20 \text{ GeV}/c$
- stockage mieux avec les neutres : $n < \frac{\epsilon_0 B^2}{2m}$ (1g $\sim 10^7 \text{ m}^3$)
- Transformation énergie \rightarrow masse (1g):
énergie mondiale pendant 50M années
comptant l'efficacité réel : 50000G années



Où ?
ALPHA
trouve-t-on de l'antimatière...



LHC (~29km)



LHC (~29km)



SPS (~4km)



LHC (~29km)



SPS (~4km)



PS (~0.6km)

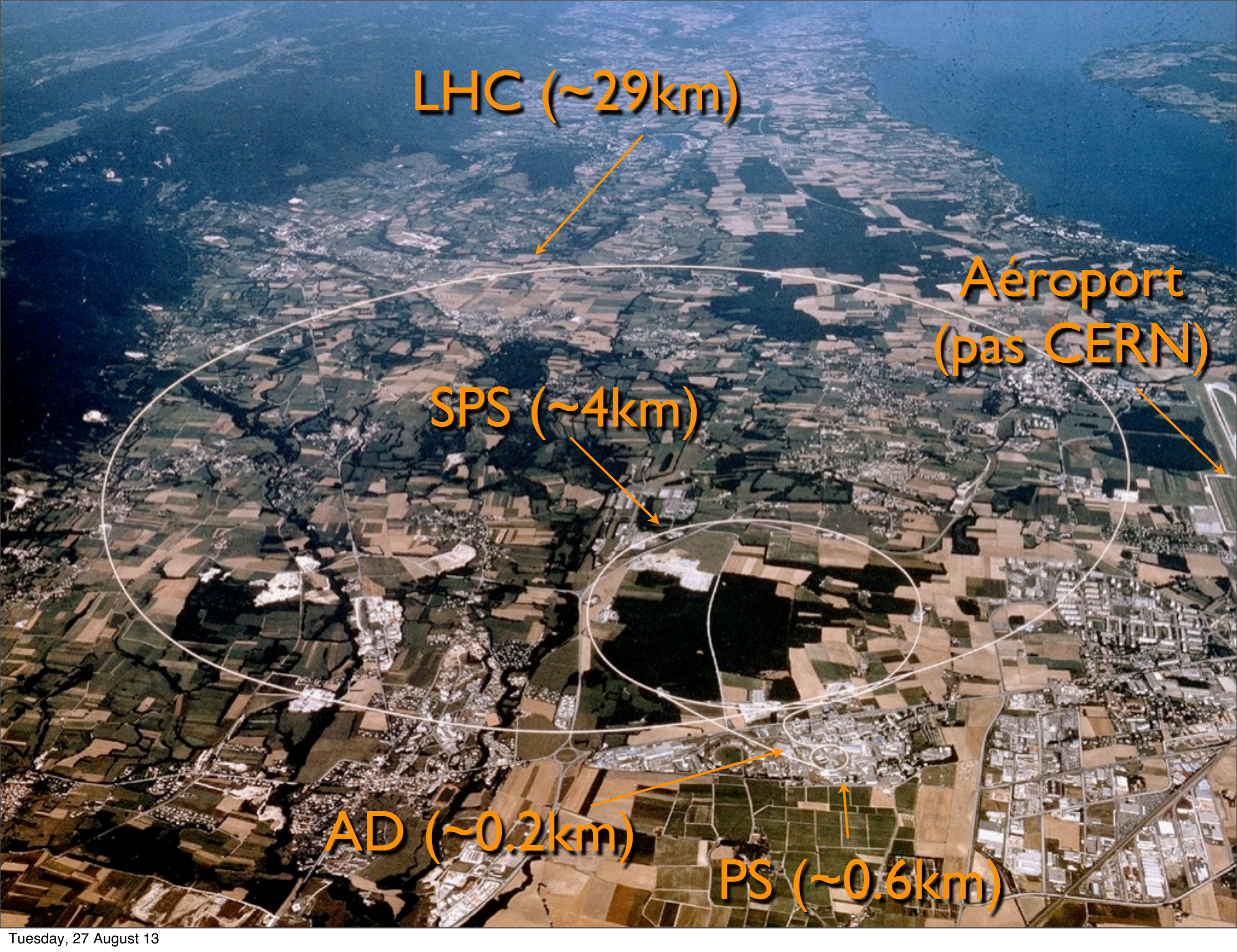


LHC (~29km)

SPS (~4km)

AD (~0.2km)

PS (~0.6km)



LHC (~29km)

Aéroport
(pas CERN)

SPS (~4km)

AD (~0.2km)

PS (~0.6km)



On a perdu
l'antimatière

C'était quand,
monsieur ?

il y environ un
milliard d'années

OBJETS TROUVÉS

CERN

Quand même...

ALPĪĀ

Quand même...

- Sources radioactif... désintégration β^+

ALPHA α

Quand même...

- Sources radioactif... désintégration β^+
- Dans l'espace - il y (quelques) anti-protons dans les rayons cosmiques... (créé comme chez nous)

ALP \bar{H} A



Quand même...

- Sources radioactif... désintégration β^+
- Dans l'espace - il y (quelques) anti-protons dans les rayons cosmiques... (créé comme chez nous)
- Les éclairs ! Des rayons gamma vu des télescopes d'espace (par hasard au début) l'ont vérifié!



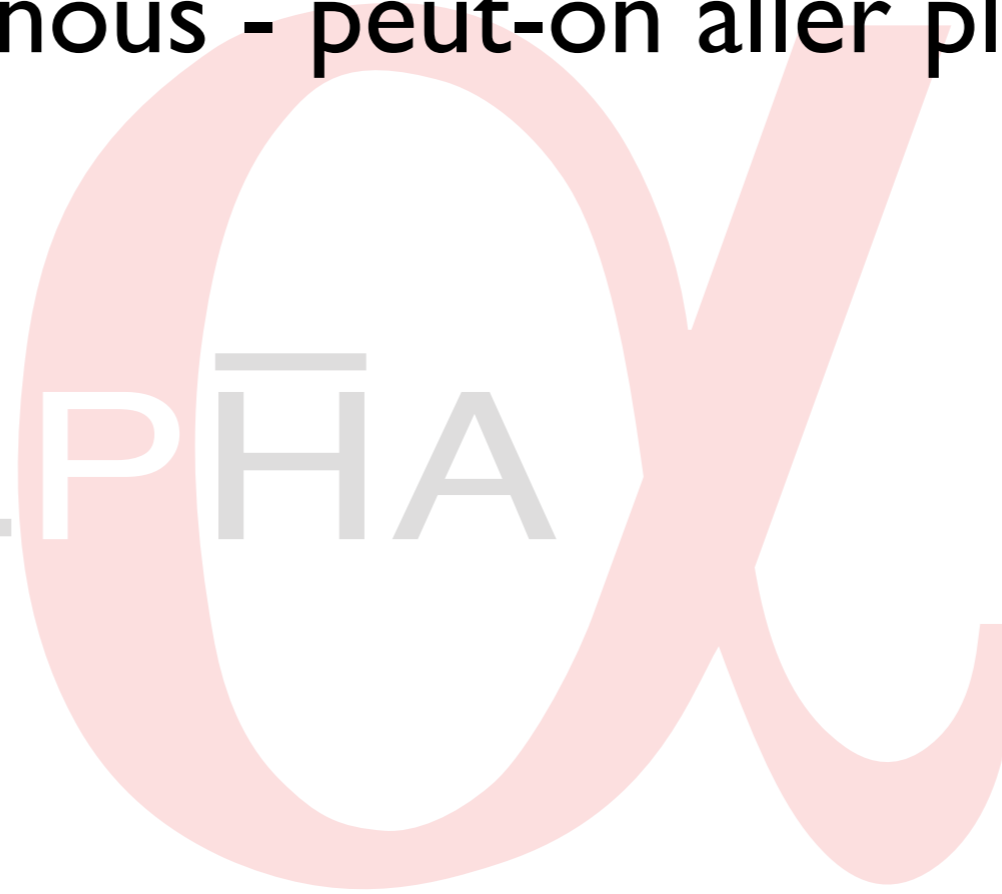
Plus que anti-hydrogène?

ALP̄H̄A

Plus que anti-hydrogène?

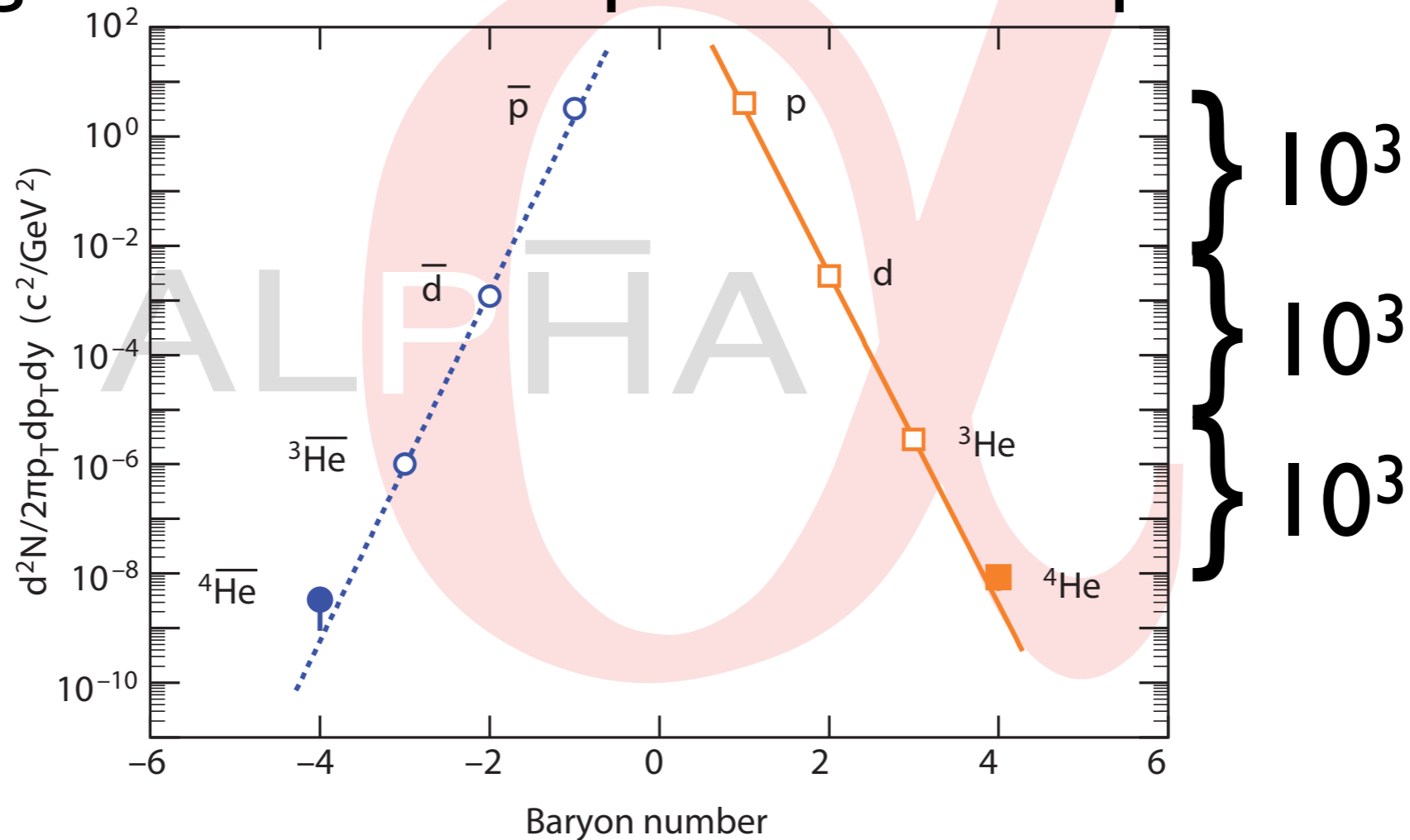
- La nature n'a même pas pu faire de l'anti-hydrogène - et nous - peut-on aller plus loin ?

ALPĪĀ



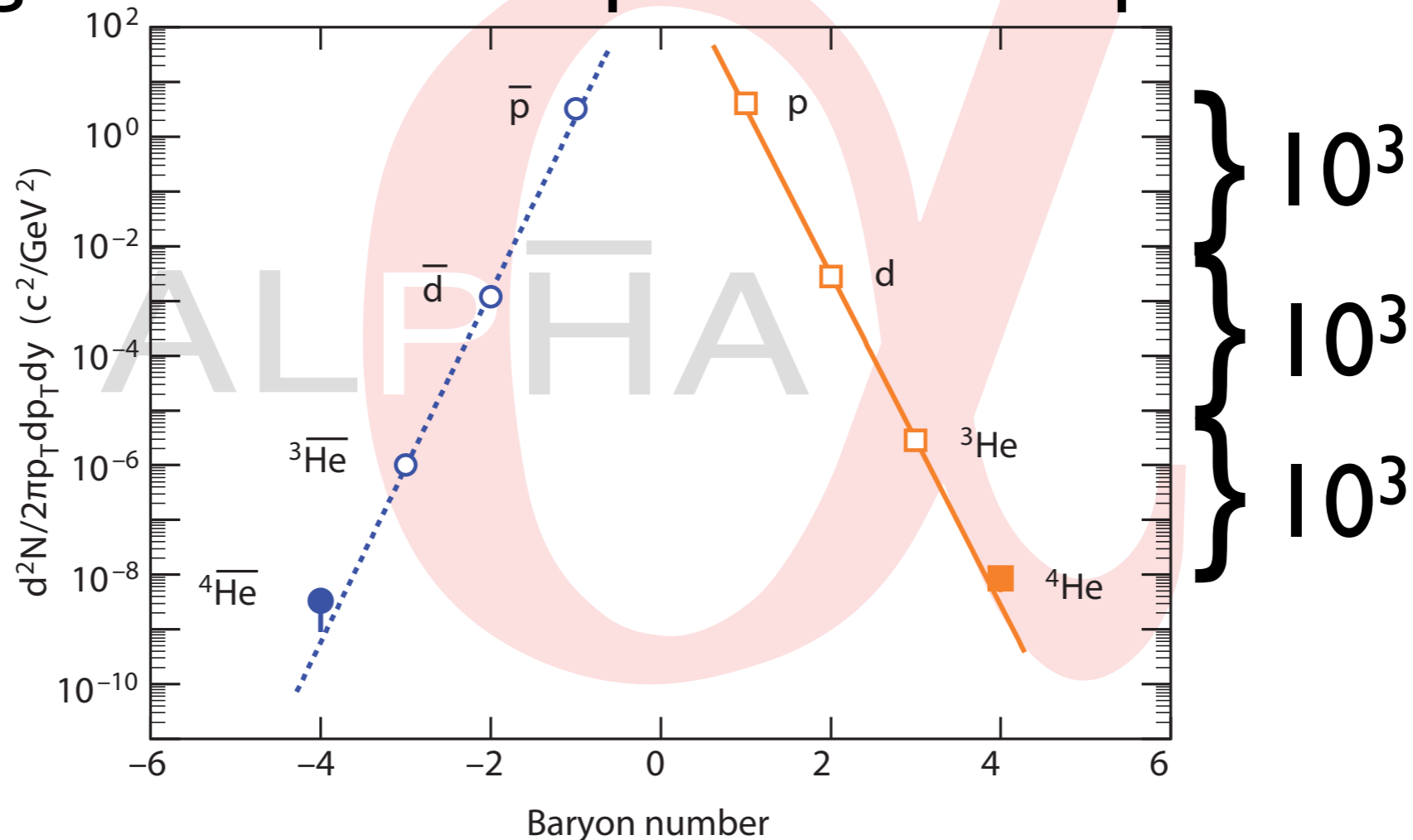
Plus que anti-hydrogène?

- La nature n'a même pas pu faire de l'anti-hydrogène - et nous - peut-on aller plus loin ?



Plus que anti-hydrogène?

- La nature n'a même pas pu faire de l'anti-hydrogène - et nous - peut-on aller plus loin ?



- 10^3 par nucléon \Rightarrow 1 milliard fois plus difficile de faire un nucléon d'anti-hélium... vaut mieux oublier

Alors pourquoi ?

si ça n'existe pas et c'est "juste" un miroir de la matière
pourquoi alors faire tout l'effort et faire de l'anti-hydrogène !?

Pourquoi anti-hydrogène

ALPĪĀ

A large, stylized Greek letter alpha (α) in a light red color is centered on the slide. The word "ALPĪĀ" is written in a light gray, sans-serif font, positioned behind the alpha symbol. The alpha symbol is a cursive-style character, starting with a large loop on the left and ending with a tail on the right.

Pourquoi anti-hydrogène

- Les lois de la physique sont identiques sous la symétrie CPT: l'Anti-hydrogène doit être identique à Hydrogène!

ALPĪA

Pourquoi anti-hydrogène

- Les lois de la physique sont identiques sous la symétrie CPT: l'Anti-hydrogène doit être identique à Hydrogène!
- Asymétrie baryonique: L'Univers paraît d'être constitué seulement pas la matière! A bon! Pourquoi?

Pourquoi anti-hydrogène

- Les lois de la physique sont identiques sous la symétrie CPT: l'Anti-hydrogène doit être identique à Hydrogène!
- Asymétrie baryonique: L'Univers paraît d'être constitué seulement pas la matière! A bon! Pourquoi?
- Gravitation: L'antimatière, comment réagi-t-elle dans un champ gravitationnel de la matière?
Ça nous aide pour un version quantique ?

Pourquoi anti-hydrogène

- Les lois de la physique sont identiques sous la symétrie CPT: l'Anti-hydrogène doit être identique à Hydrogène!
- Asymétrie baryonique: L'Univers paraît d'être constitué seulement pas la matière! A bon! Pourquoi?
- Gravitation: L'antimatière, comment réagi-t-elle dans un champ gravitationnel de la matière?
Ça nous aide pour un version quantique ?
- NB: **N'importe** la différence observée : implique de la nouvelle physique.

Anti-hydrogène aide comment?

ALP̄H̄A



Anti-hydrogène aide comment?

- Seule pure antimatière pour le moment!

ALPĪĀ

A large, semi-transparent red Greek letter alpha (α) is centered on the slide, partially overlapping the text 'ALPĪĀ'.

Anti-hydrogène aide comment?

- Seule pure antimatière pour le moment!
- L'Anti-hydrogène est neutre!

Anti-hydrogène aide comment?

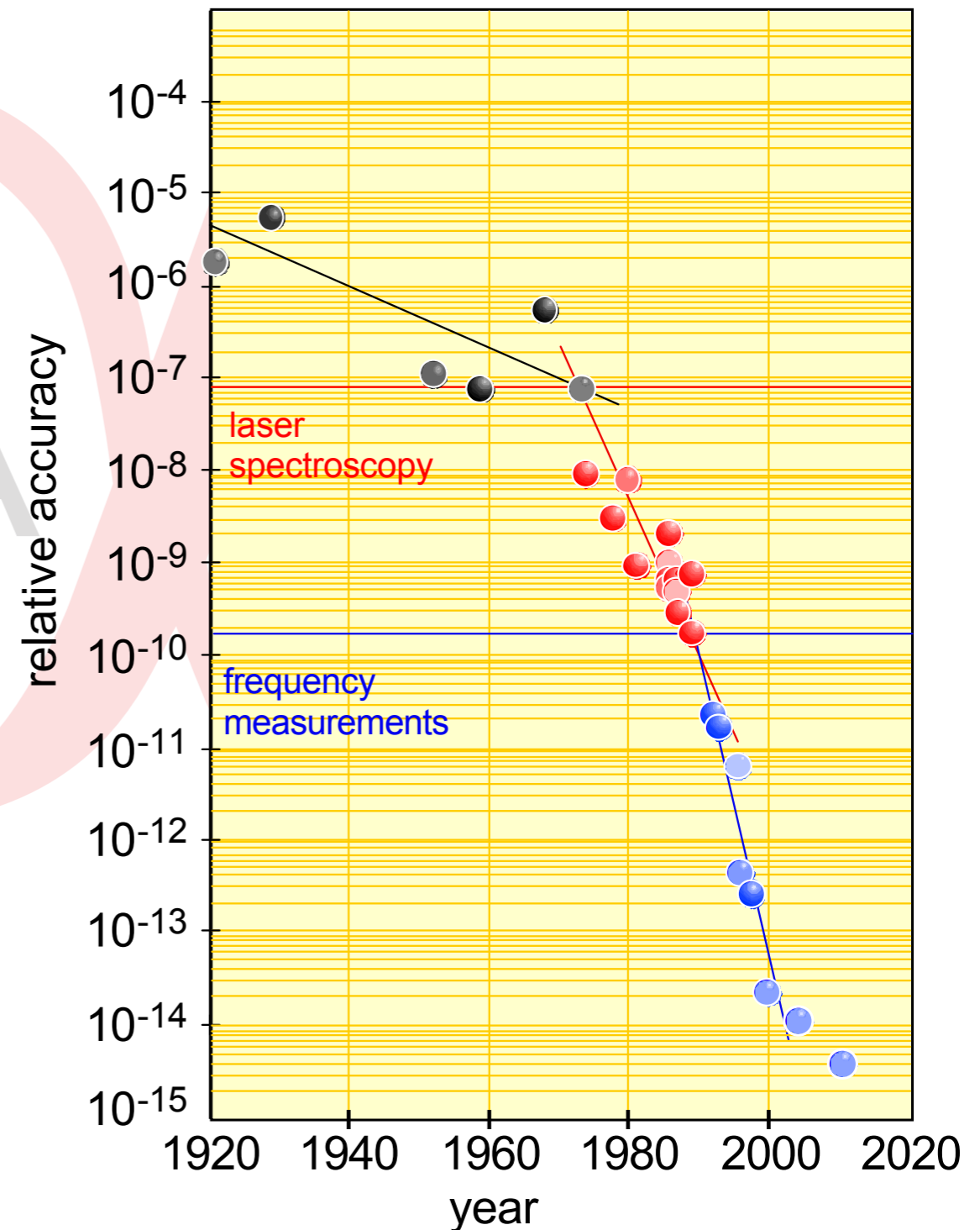
- Seule pure antimatière pour le moment!
- L'Anti-hydrogène est neutre!
- Techniques spectroscopique sont applicable.

Matière et anti-matière



Anti-hydrogène aide comment?

- Seule pure antimatière pour le moment!
- L'Anti-hydrogène est neutre!
- Techniques spectroscopique sont applicable.
- $H-\bar{H}$ comparaison par la transition $1s-2s$



Quand?

ALPHA

Un petit peu d'histoire de l'antimatière...

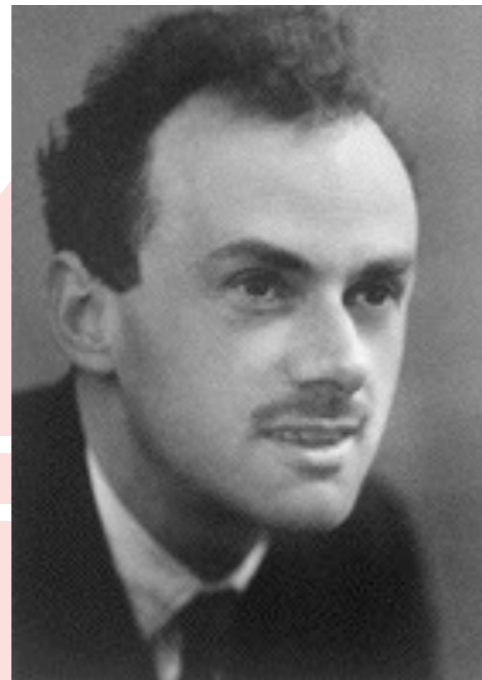
L'histoire d'antimatière en bref

ALPĪĀ

A large, light red, stylized Greek letter alpha symbol (α) is centered on the slide. The symbol is thick and has a slight shadow effect. The text 'ALPĪĀ' is overlaid on the symbol in a light gray, sans-serif font. The 'P' is white, and the 'Ī' has a horizontal bar over it.

L'histoire d'antimatière en bref

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste



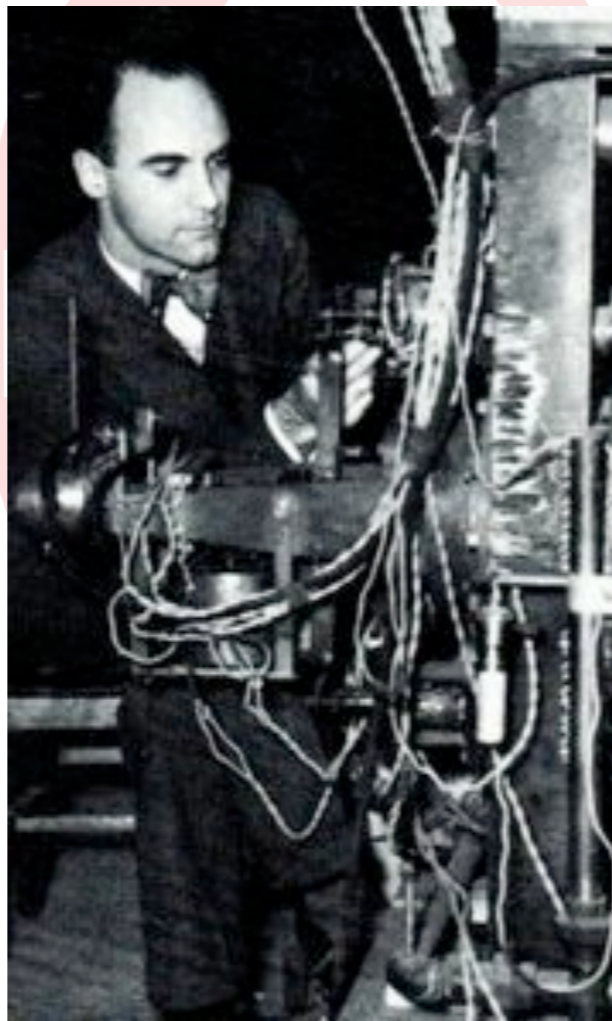
ALF

Dirac

L'histoire d'antimatière en bref

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron



Anderson

L'histoire d'antimatière en bref

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron

1955: Bevatron: Découverte de l'Antiproton



Emilio Gino Segrè



Owen Chamberlain



Le Bevatron à Berkeley

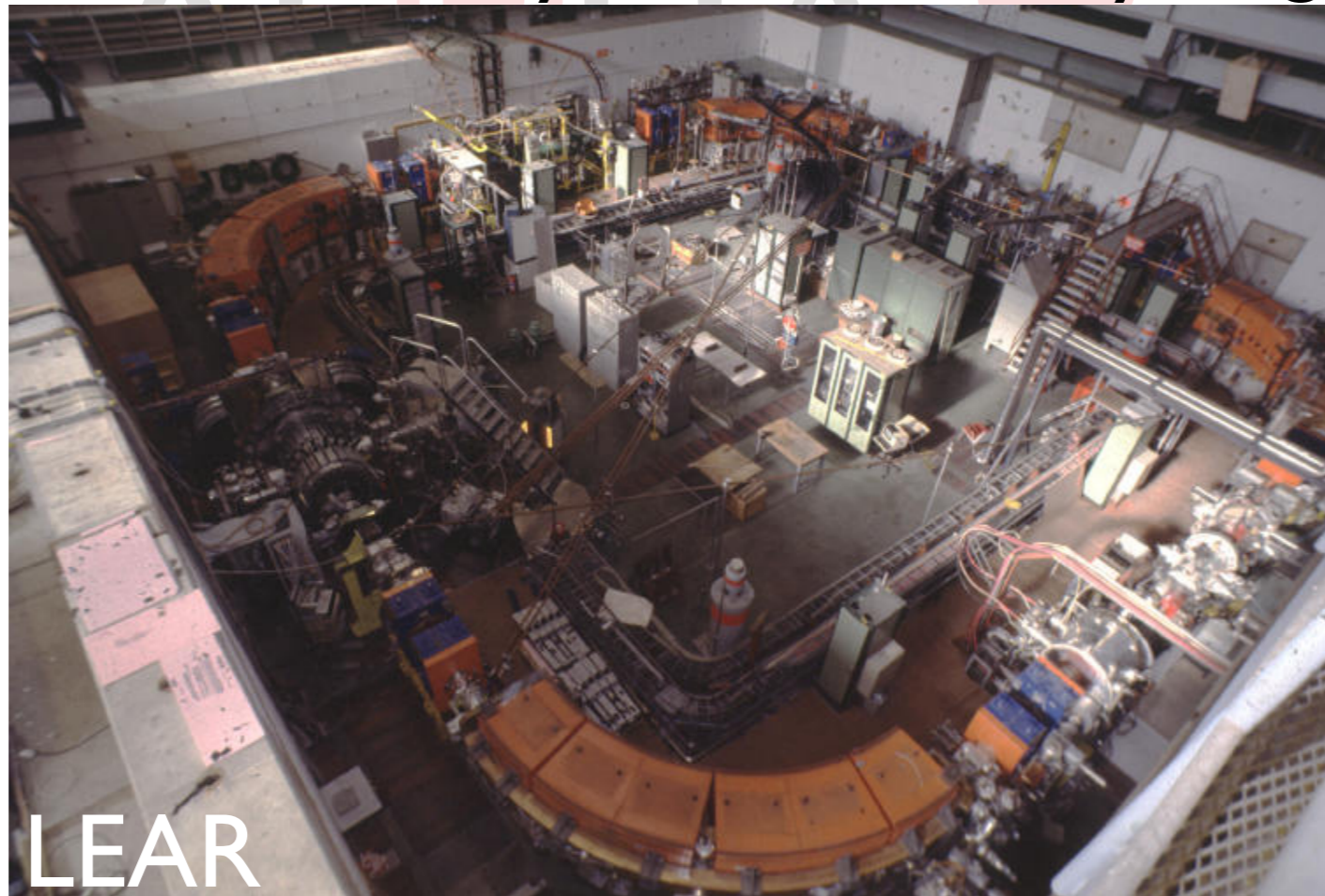
L'histoire d'antimatière en bref

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron

1955: Bevatron: Découverte de l'Antiproton

1996: CERN: Première synthèse d'anti-hydrogène (faisceau)



L'histoire d'antimatière en bref

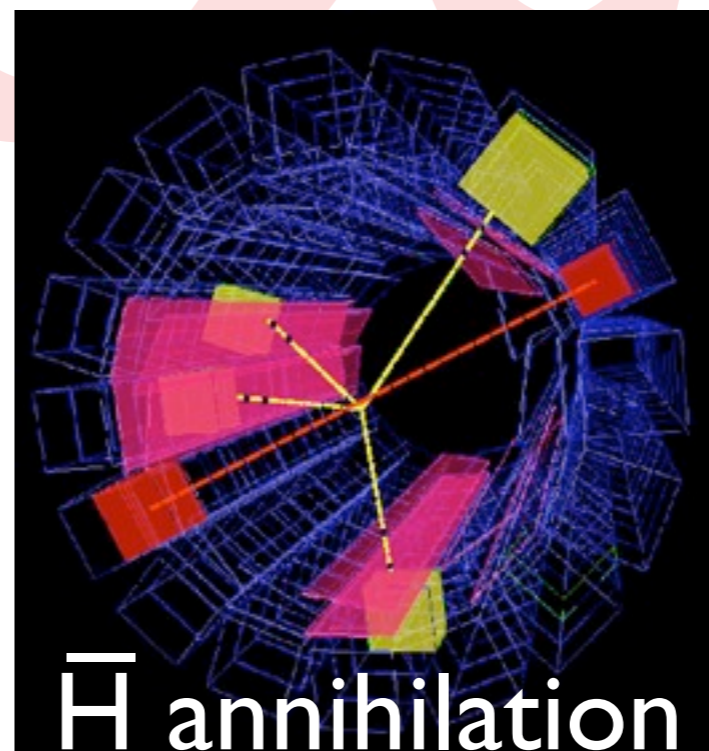
1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron

1955: Bevatron: Découverte de l'Antiproton

1996: CERN: Première synthèse d'anti-hydrogène (faisceau)

2002: ATHENA: Première anti-hydrogène à basse energie



L'histoire d'antimatière en bref

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron


1955: Bevatron: Découverte de l'Antiproton

1996: CERN: Première synthèse d'anti-hydrogène (faisceau)

2002: ATHENA: Première anti-hydrogène à basse energie

2010: ALPHA: Première capture de l'anti-hydrogène



 [comments on this story](#)

Stories by subject

Published online 17 November 2010 | *Nature* **468**, 355 (2010) | doi:10.1038/468355a

News

Antimatter held for questioning

Magnetically trapped atoms could test fundamental physics.

L'histoire d'antimati

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron

1955: Bevatron: Découverte de l'Antiproton

1996: CERN: Première synthèse d'anti-hydrogène (faisceau)

2002: ATHENA: Première anti-hydrogène à basse énergie

2010: ALPHA: Première capture de l'anti-hydrogène

2011: ALPHA: \bar{H} capturé 1000s => état fondamental!



L'histoire d'antimatière en bref

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron

1955: Bevatron: Découverte de l'Antiproton

1996: CERN: Première synthèse d'anti-hydrogène (faisceau)

2002: ATHENA: Première anti-hydrogène à basse énergie

2010: ALPHA: Première capture de l'anti-hydrogène

2011: ALPHA: \bar{H} capturé 1000s => état fondamental!

2012: ALPHA: Premières transitions quantiques dans \bar{H}



L'histoire d'antimatière en bref

1928: Dirac: Mécanique quantique relativiste

1932: Anderson: Découverte du positron

1955: Bevatron: Découverte de l'Antiproton

1996: CERN: Première synthèse d'anti-hydrogène (faisceau)

2002: ATHENA: Première anti-hydrogène à basse énergie

2010: ALPHA: Première capture de l'anti-hydrogène

2011: ALPHA: \bar{H} capturé 1000s => état fondamental!

2012: ALPHA: Premières transitions quantiques dans \bar{H}

2013: ALPHA: Méthode pour détecter la gravitation sur \bar{H}

Comment ?

ALPHA

faire de l'anti-hydrogène...

Préoccupations immédiate

ALPĪĀ



Préoccupations immédiate

- Très peu d' \bar{H} & temps de disponibilité court

ALP \bar{H} A

Préoccupations immédiate

- Très peu d' \bar{H} & temps de disponibilité court
- ➔ **clé:** capturer \bar{H} pour permettre de la spectroscopie (notre *ascenseur d'espace*).

ALP \bar{H} A

Préoccupations immédiate

- Très peu d' \bar{H} & temps de disponibilité court
 - ➔ **clé**: capturer \bar{H} pour permettre de la spectroscopie (notre *ascenseur d'espace*).
- Les pièges pour atomes sont peu profondes (quelques Kelvins au maximum).

Préoccupations immédiate

- Très peu d' \bar{H} & temps de disponibilité court
 - ➔ **clé**: capturer \bar{H} pour permettre de la spectroscopie (notre *ascenseur d'espace*).
- Les pièges pour atomes sont peu profondes (quelques Kelvins au maximum).
- Beaucoup d'énergie pour créer \bar{p} ($E=mc^2$).
 - Il nous faut : \bar{p} et e^+ très froid !

Préoccupations immédiate

- Très peu d' \bar{H} & temps de disponibilité court
 - ➔ **clé**: capturer \bar{H} pour permettre de la spectroscopie (notre *ascenseur d'espace*).
- Les pièges pour atomes sont peu profondes (quelques Kelvins au maximum).
- Beaucoup d'énergie pour créer \bar{p} ($E=mc^2$).
 - Il nous faut : \bar{p} et e^+ très froid !
- Pas possible (pour l'instant) de refroidir \bar{H} .
 - On est obligé de créer \bar{H} froid et piégée.

D'où viennent les positrons ?

ALP̄H̄A α

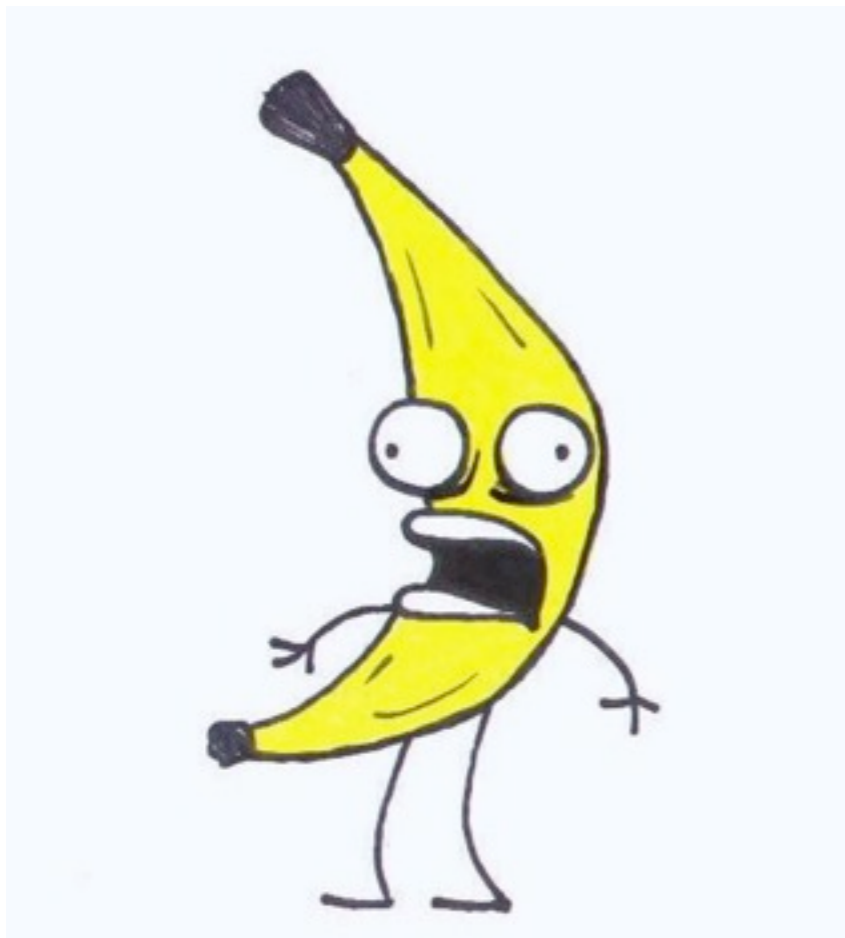
D'où viennent les positrons ?

- Facile: β^+ désintégration d'isotopes radioactives

ALPHA α

D'où viennent les positrons ?

- Facile: β^+ désintégration d'isotopes radioactives
 - Potassium-40 dans des bananes: ~ 15 Positrons / sec

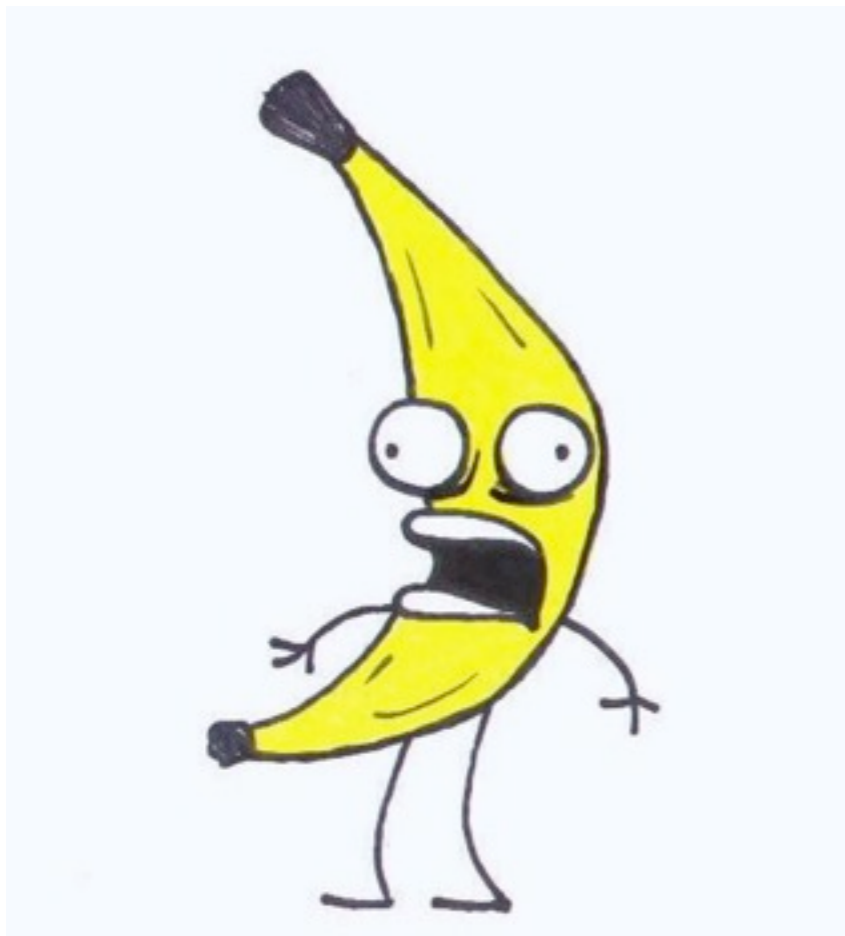
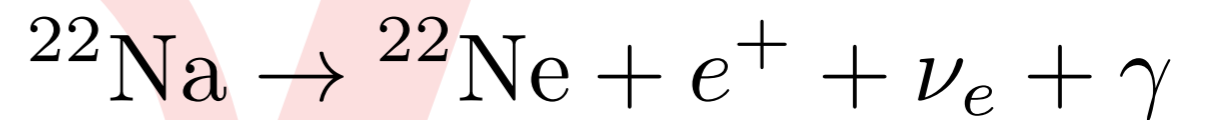


"I am a banana!" Don Hertzfeld

$P\bar{H}A$

D'où viennent les positrons ?

- Facile: β^+ désintégration d'isotopes radioactives
 - Potassium-40 dans des bananes: ~ 15 Positrons / sec
 - Nous utilisons une source de Sodium-22: ~ 10 M / sec



"I am a banana!" Don Hertzfeld

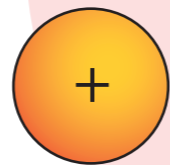


D'où viennent les antiprotons ?

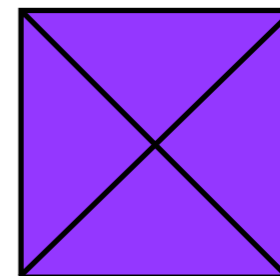
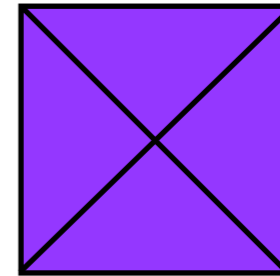
- Des protons à haute énergie créent de paires de proton/antiprotons.
- Sélection sur charge/masse après



CERN Proton Synchrotron



26 GeV/c

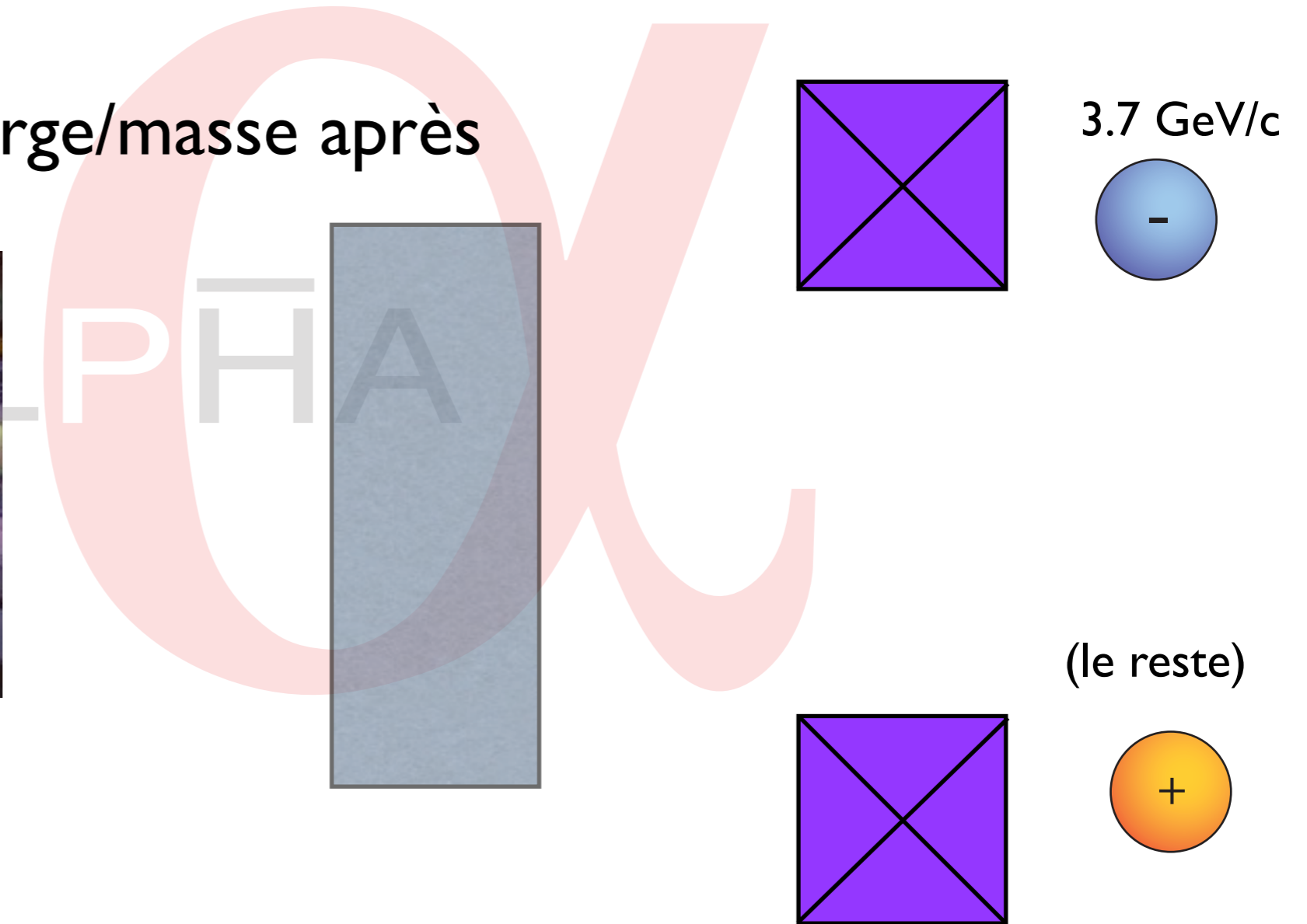


D'où viennent les antiprotons ?

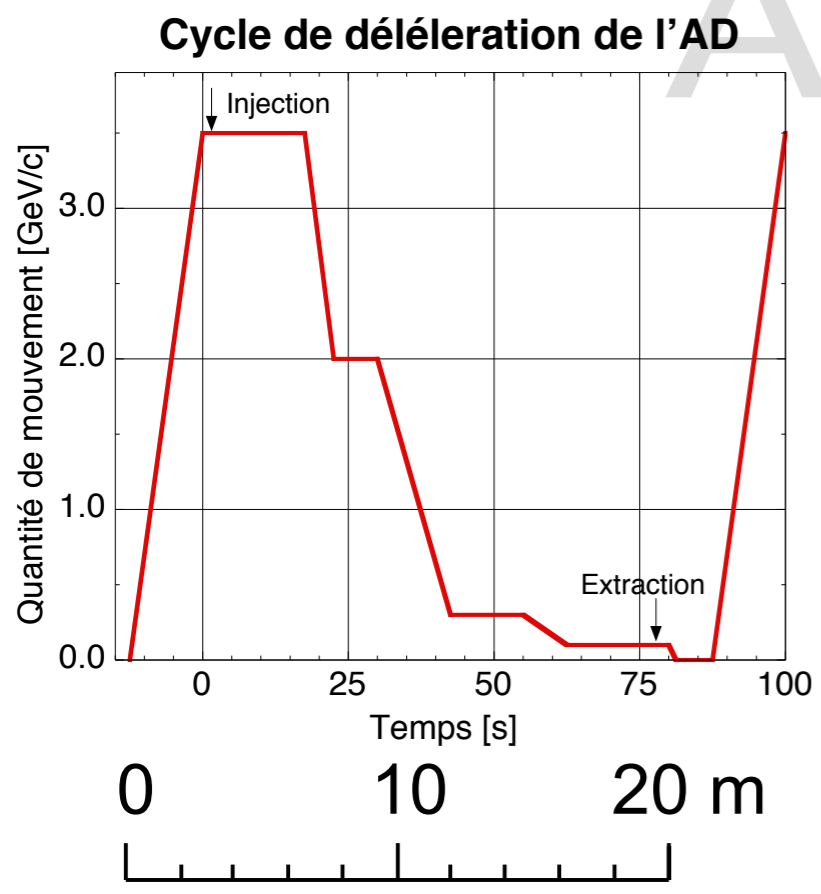
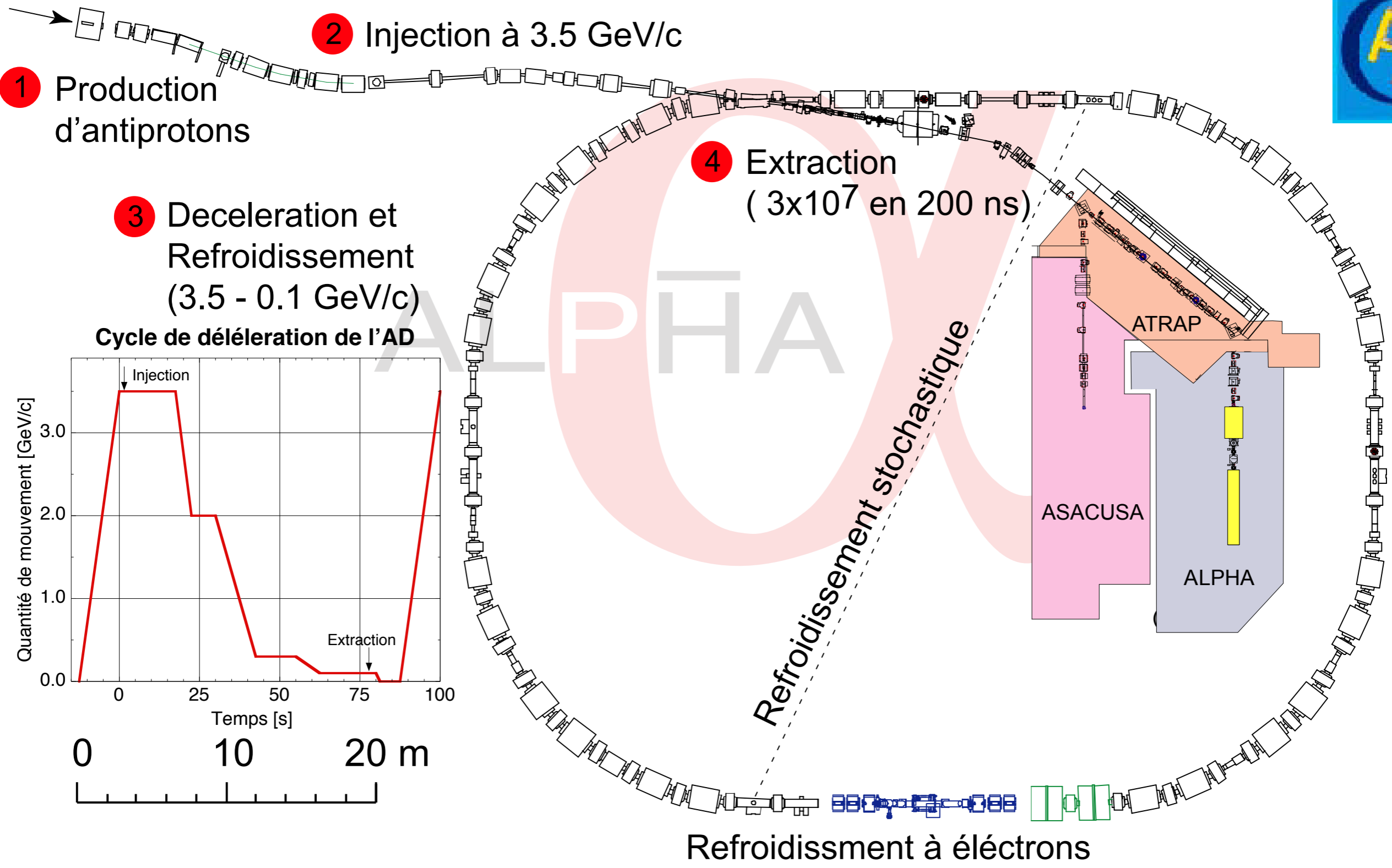
- Des protons à haute énergie créent de paires de proton/antiprotons.
- Sélection sur charge/masse après

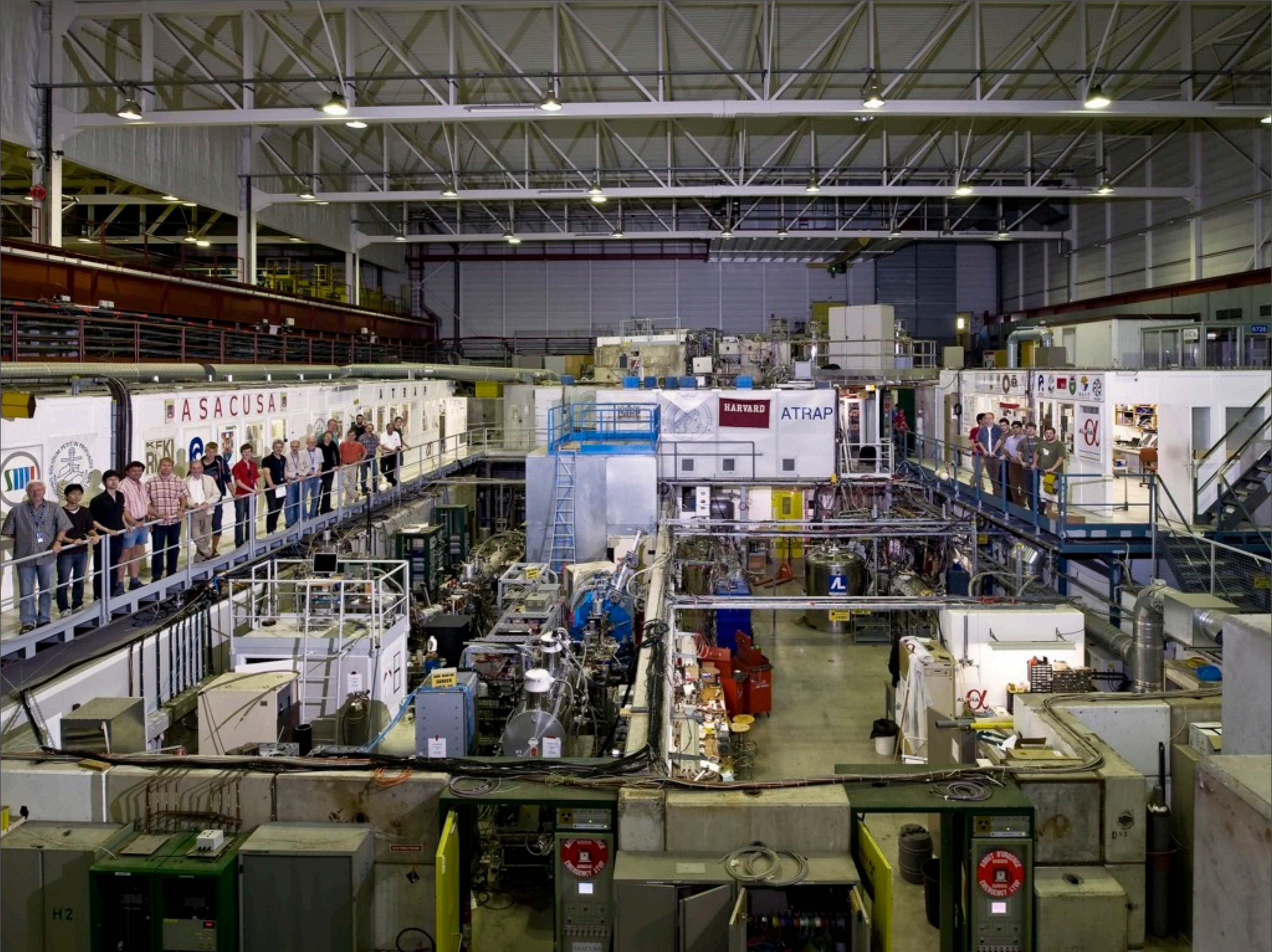


CERN Proton Synchrotron



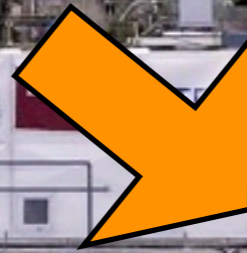
Décélérateur d'Antiprotons





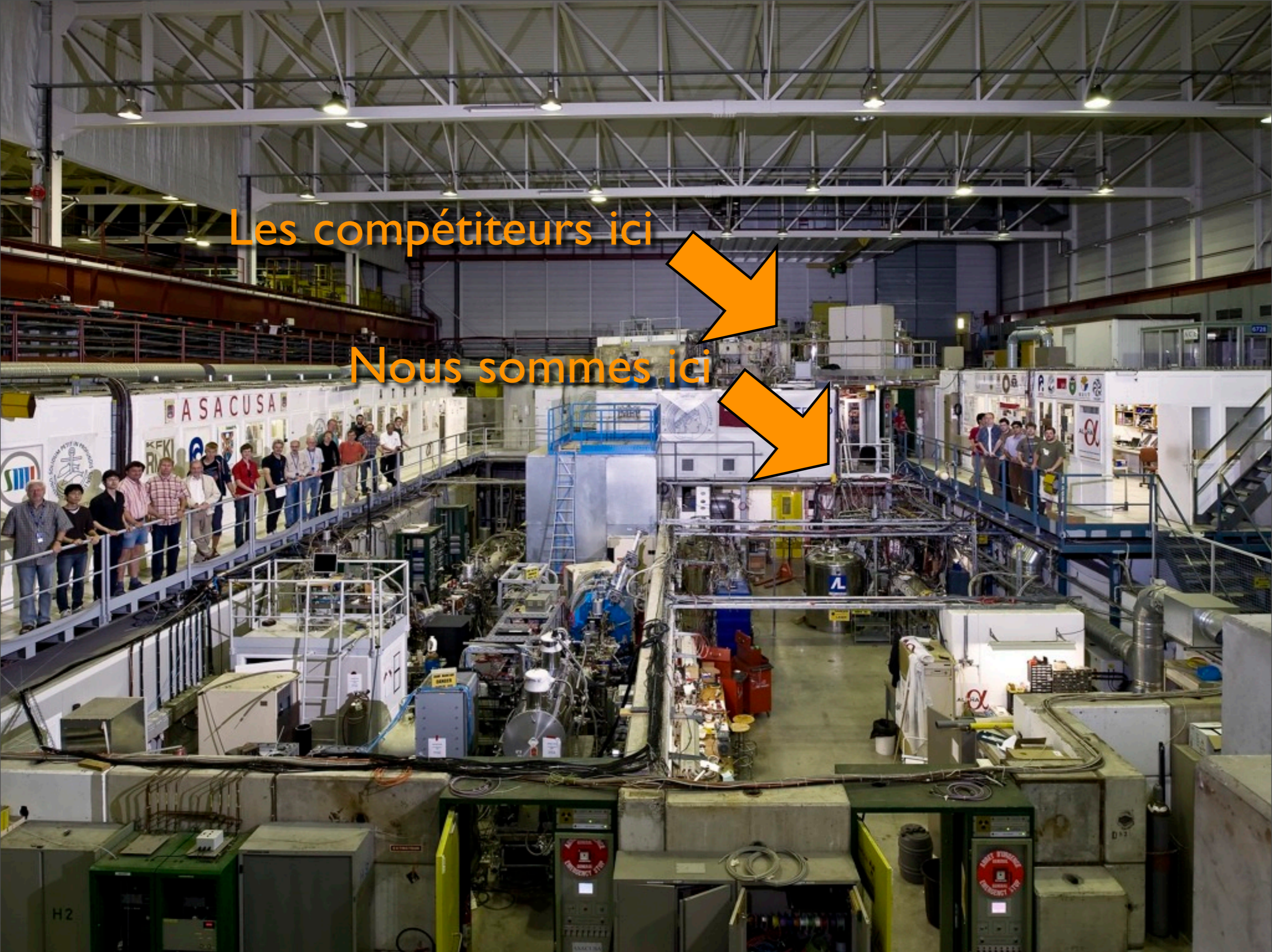
Tuesday, 27 August 13

Nous sommes ici

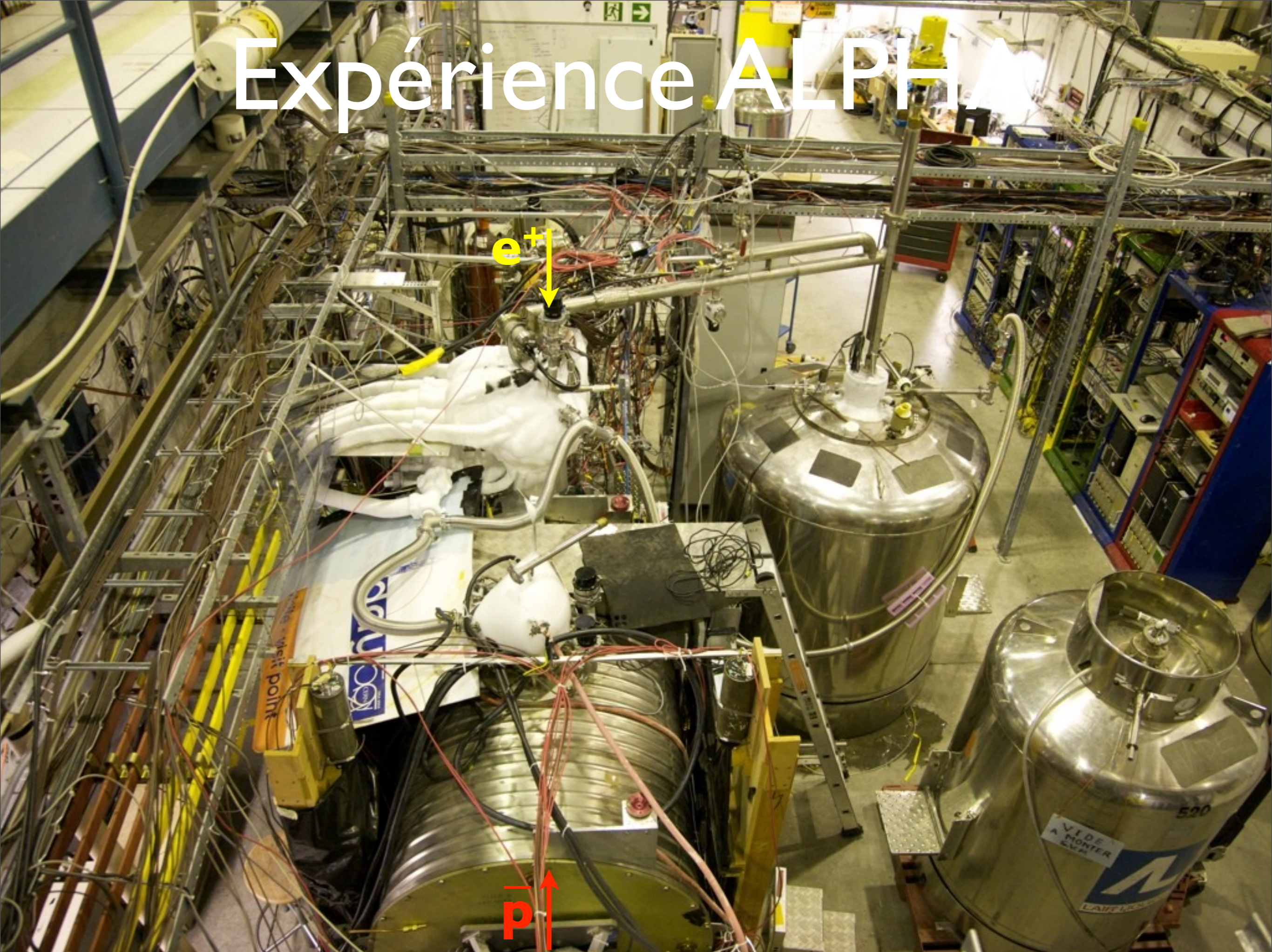


Les compétiteurs ici

Nous sommes ici

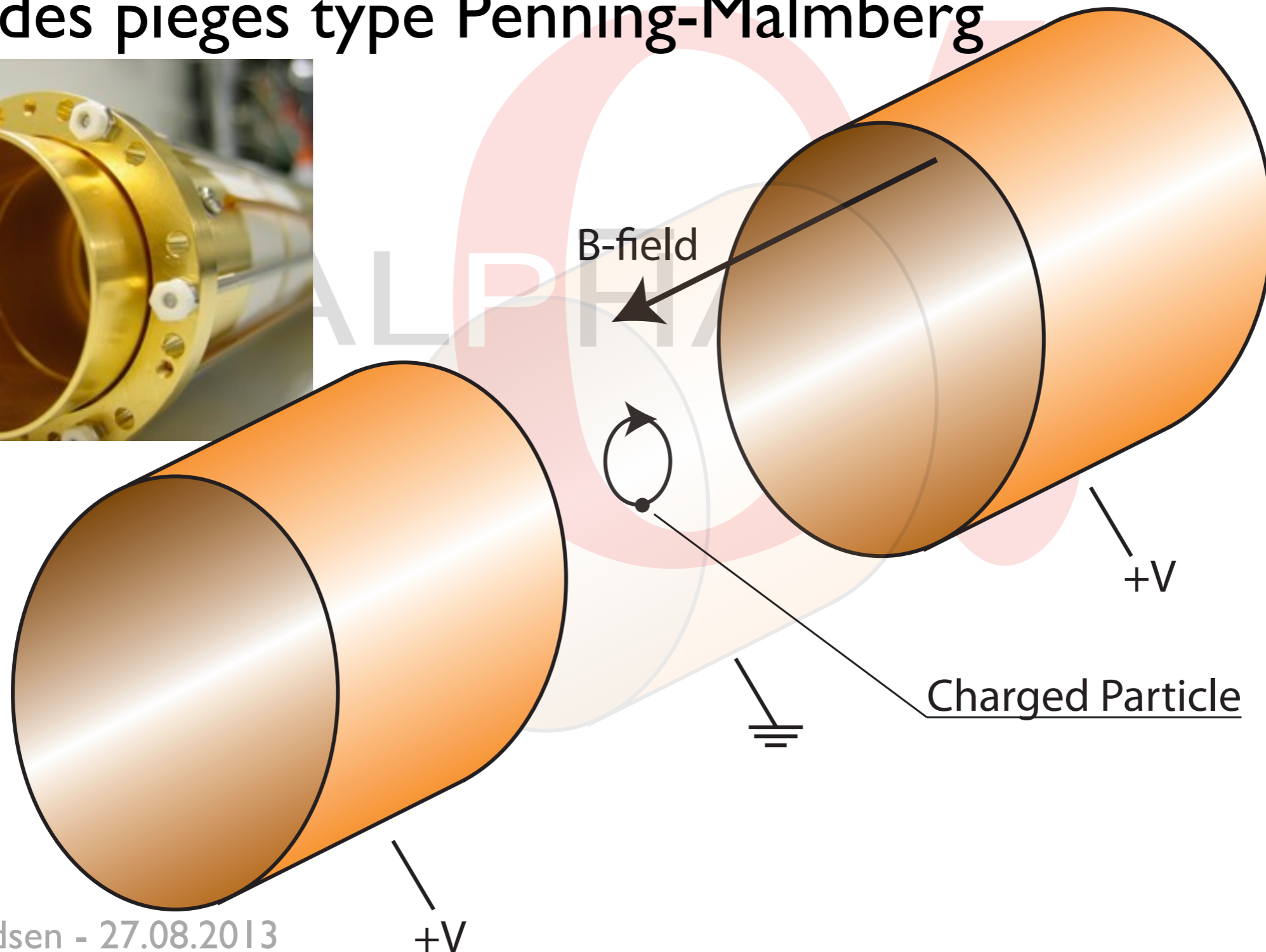
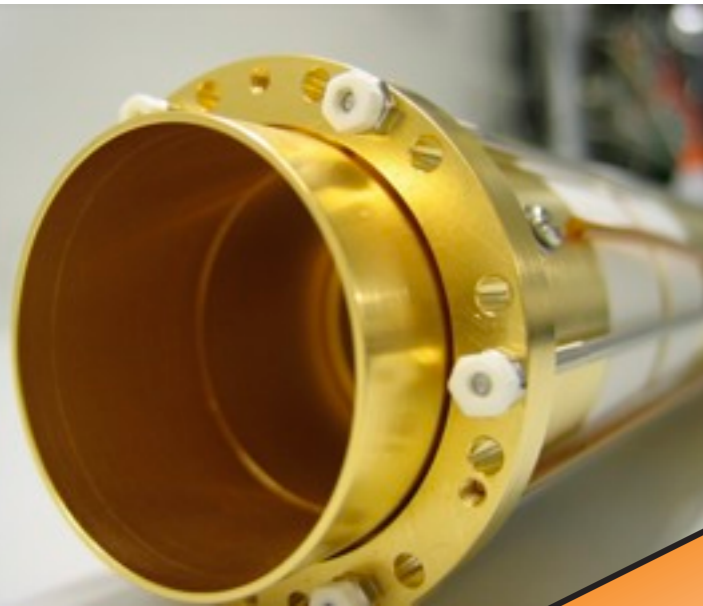


Expérience ALPHA



Pièges pour particules chargées

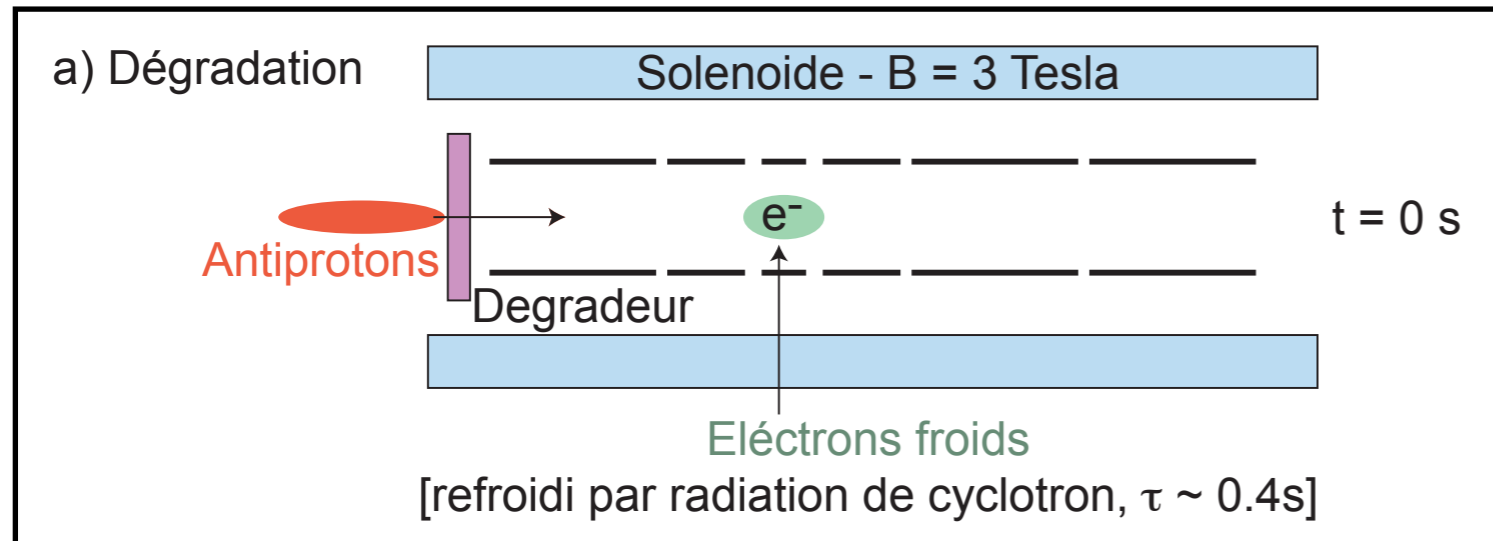
- Tout nos pièges (pour particules chargées) sont des pièges type Penning-Malmberg



Capture d'Antiprotons



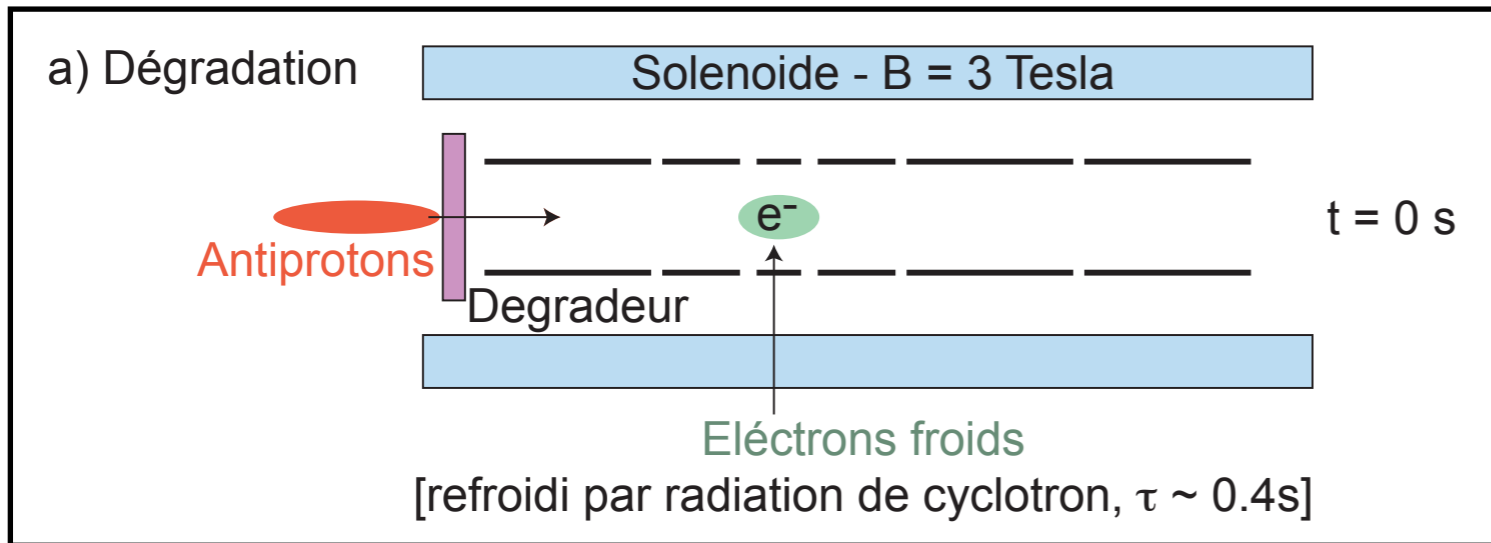
Capture d'Antiprotons



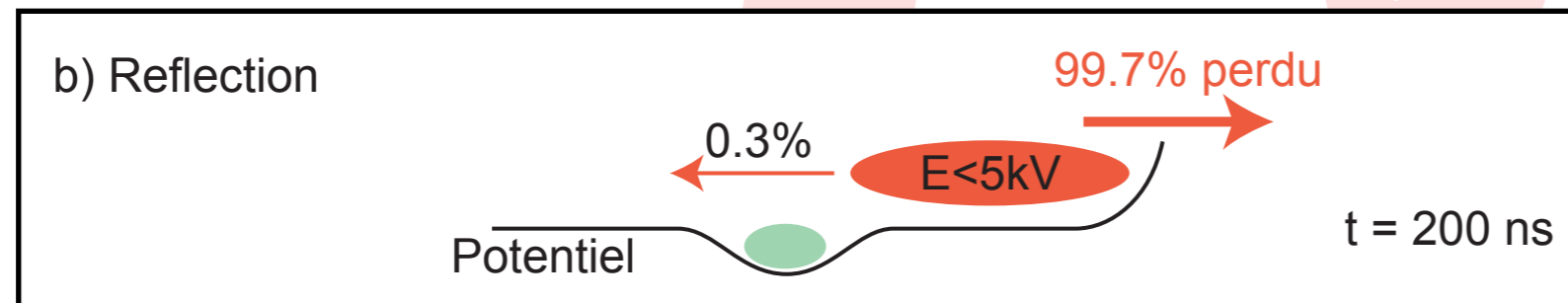
Environnement cryogénique ~ 7 K

ALPHA

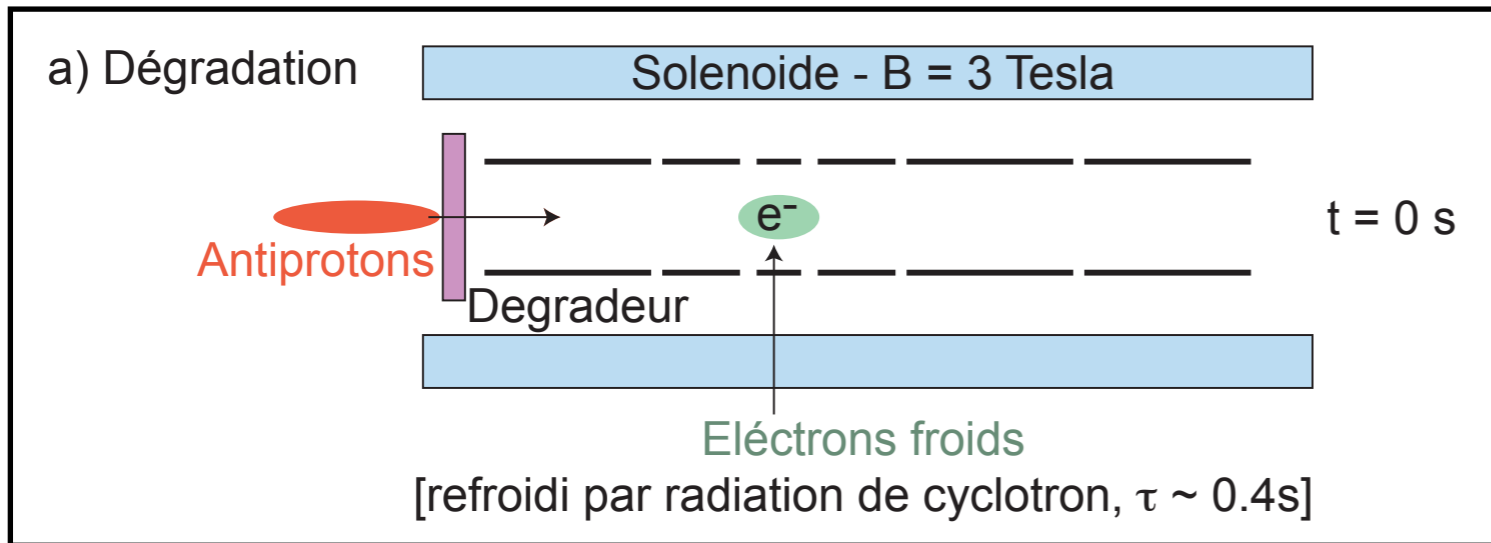
Capture d'Antiprotons



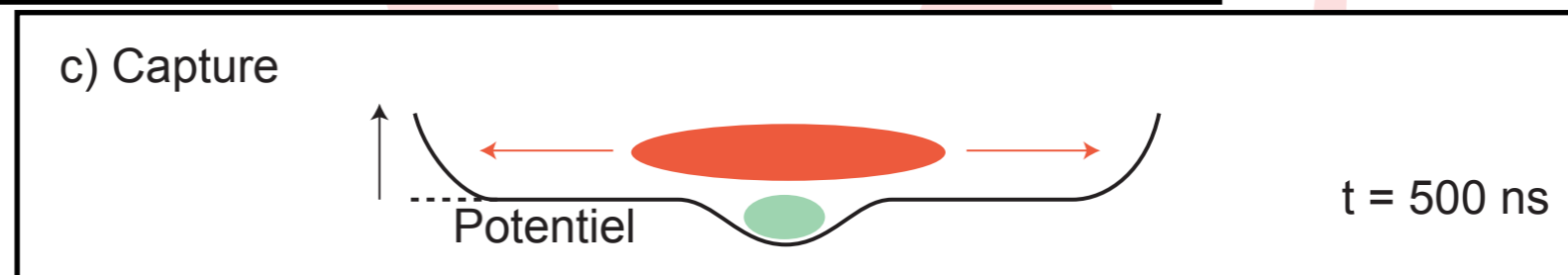
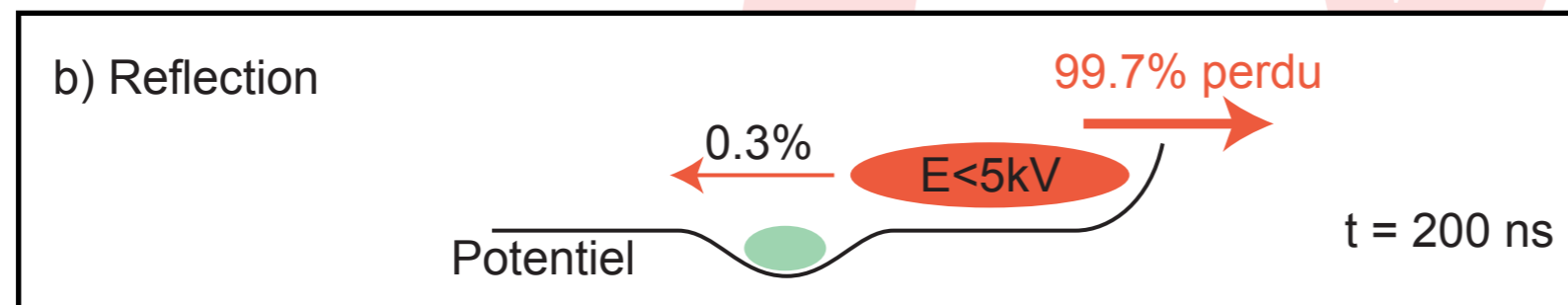
Environnement cryogénique ~ 7 K



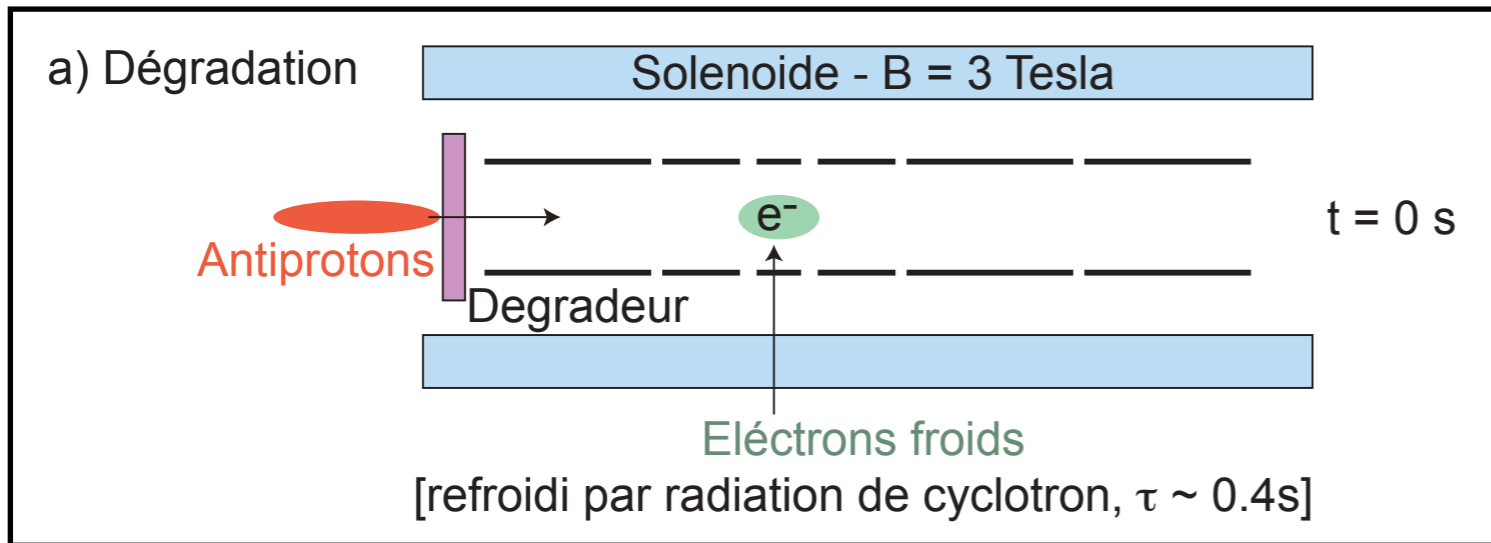
Capture d'Antiprotons



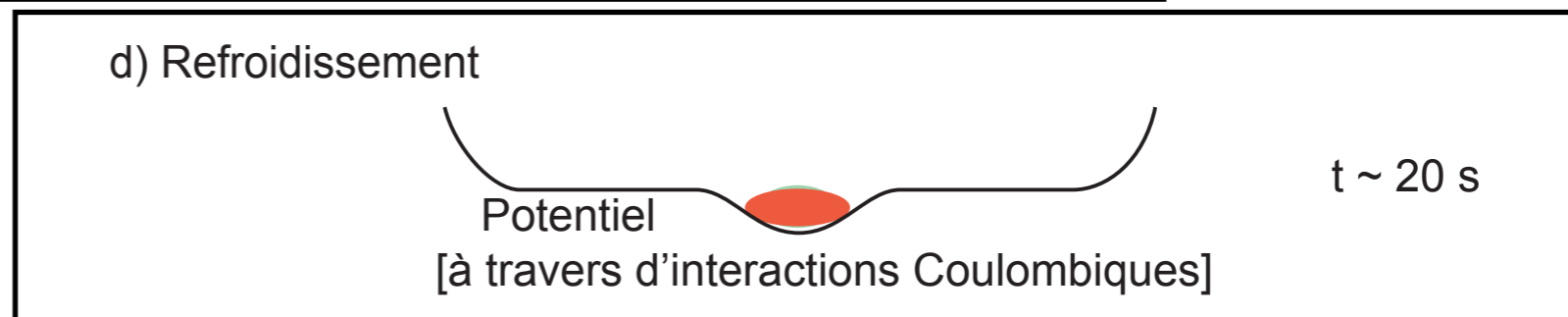
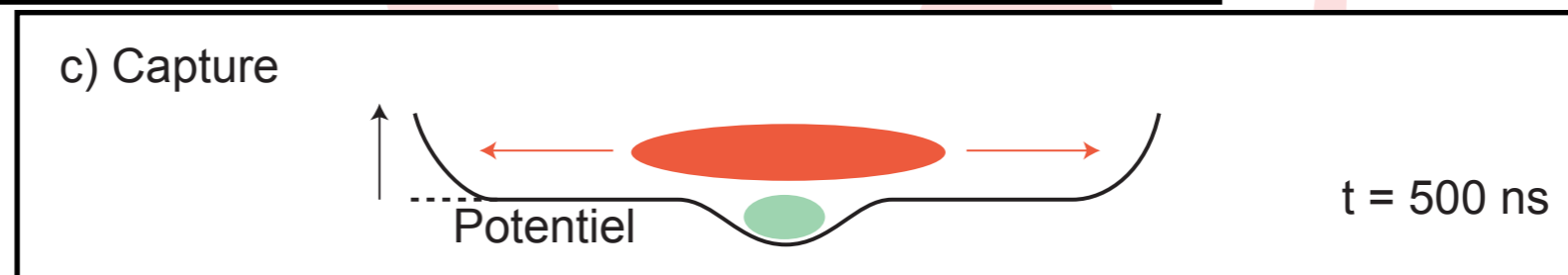
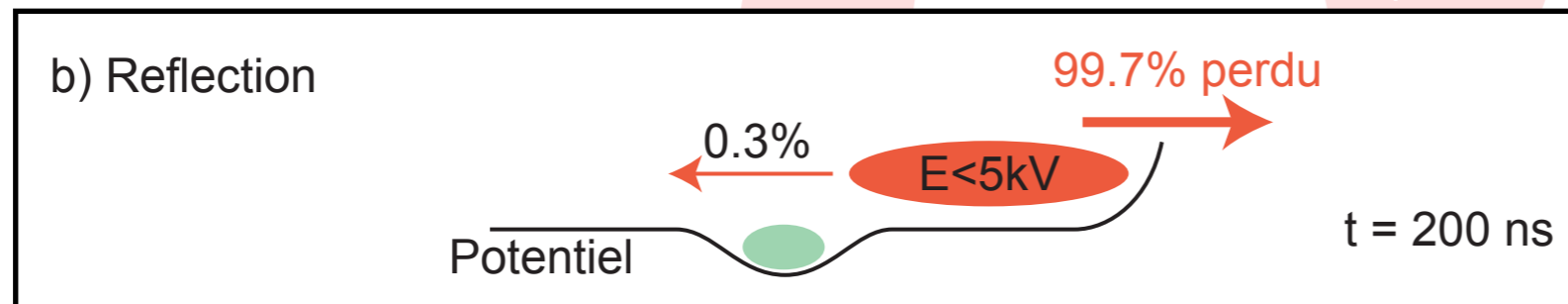
Environnement cryogénique ~ 7 K



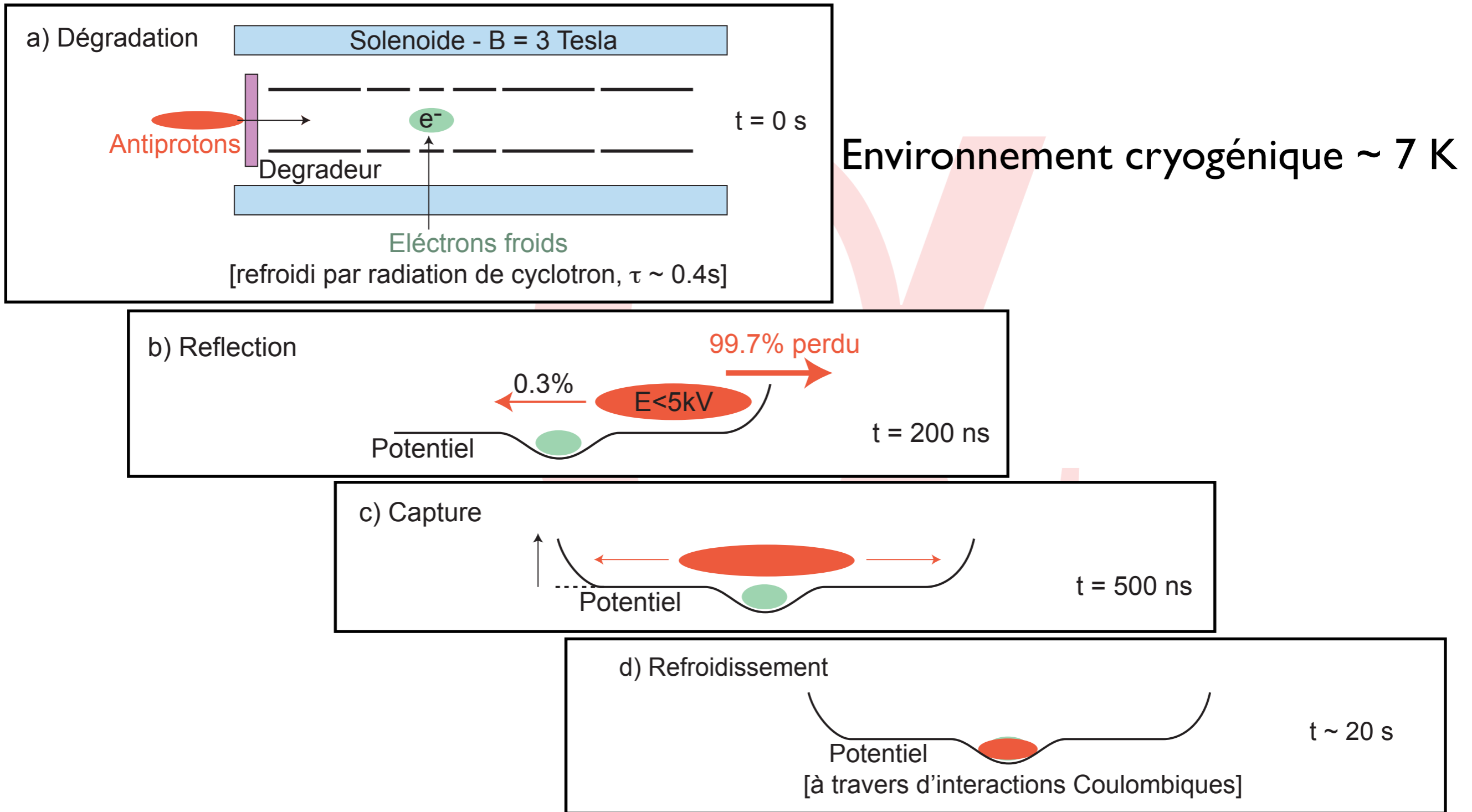
Capture d'Antiprotons



Environnement cryogénique ~ 7 K



Capture d'Antiprotons



Bilan : ~ 40000 \bar{p} refroidi / coup d'AD (tout les ~ 100s)

Détection de l'anti-hydrogène

ALP̄H̄A α

Détection de l'anti-hydrogène

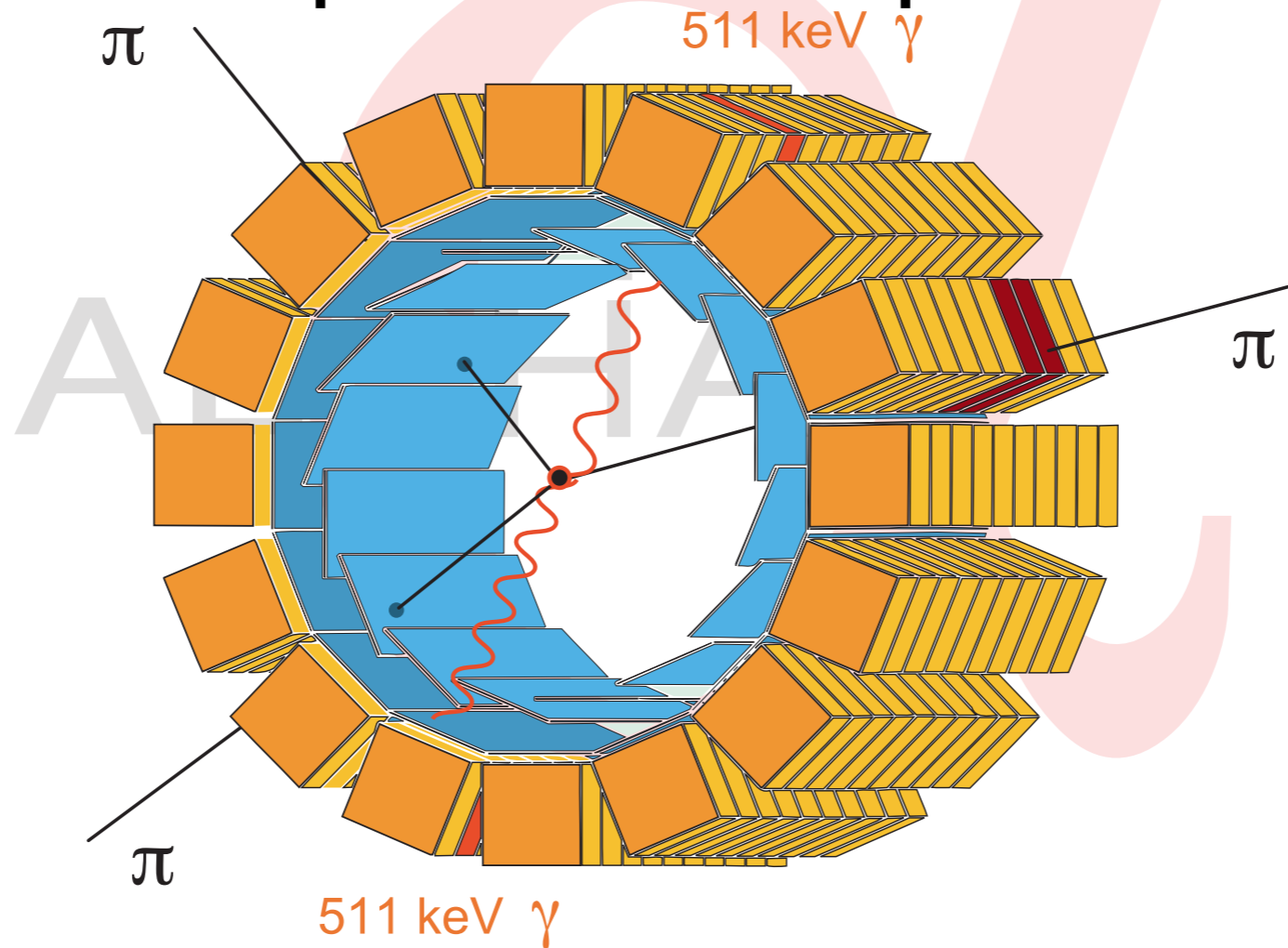
- D'une annihilation sort : des photons (lumière) du positron et des pions de l'antiproton...

ALPĪA



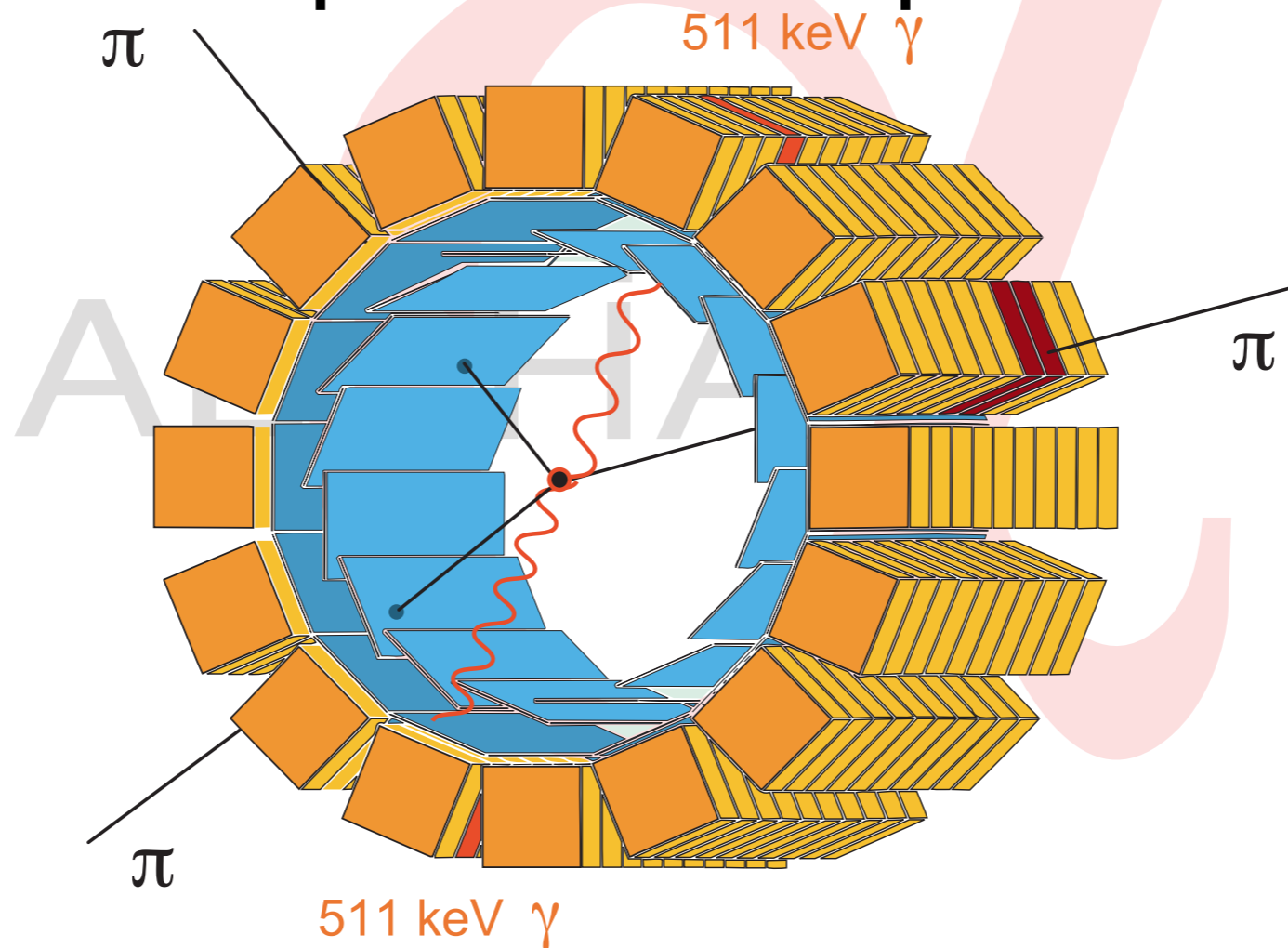
Détection de l'anti-hydrogène

- D'une annihilation sort : des photons (lumière) du positron et des pions de l'antiproton...

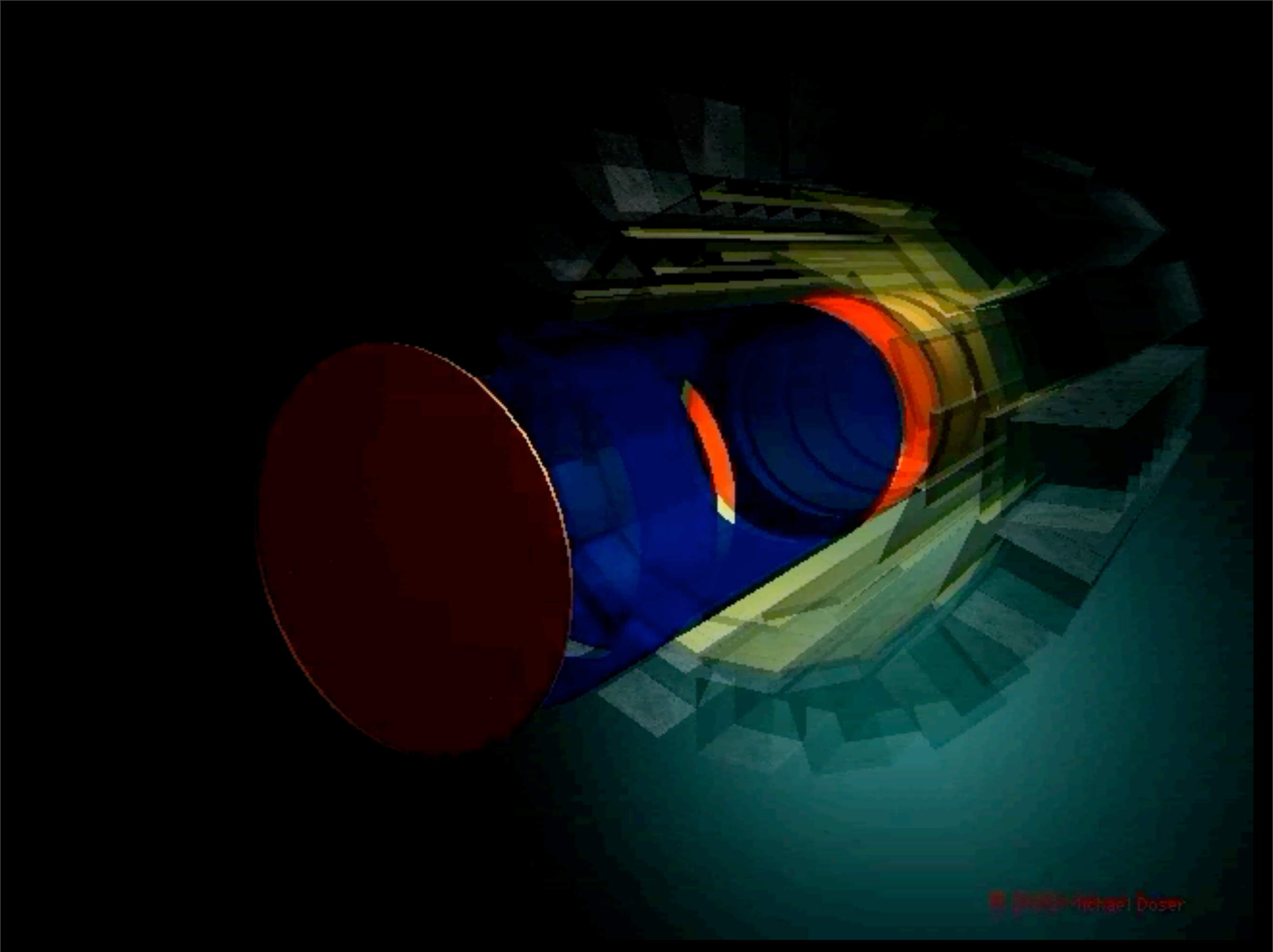


Détection de l'anti-hydrogène

- D'une annihilation sort : des photons (lumière) du positron et des pions de l'antiproton...



- Les “morceaux” - sont-ils venus du même endroit au même temp ?



© Michael Doser

Comment ?

ALPHA

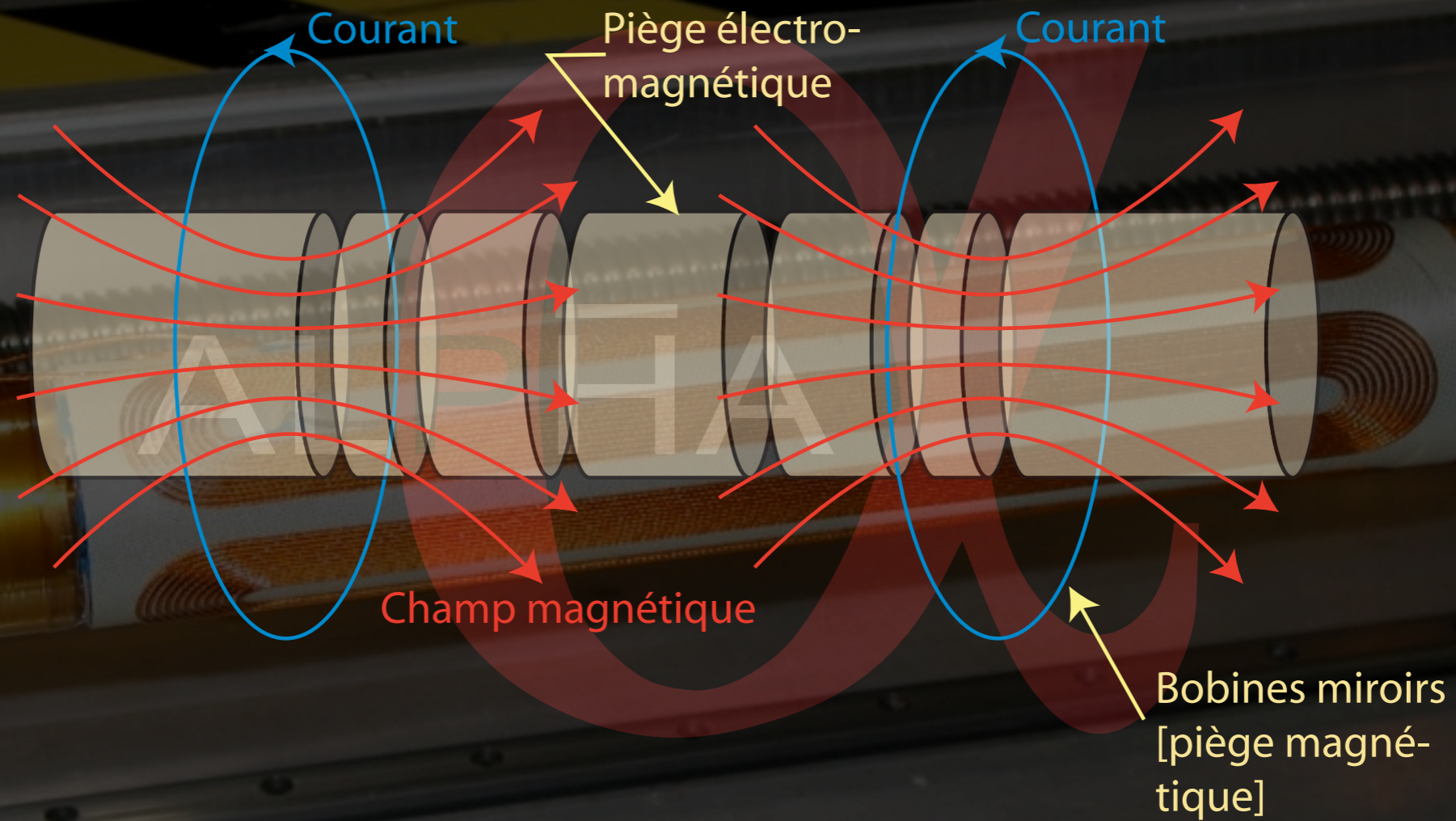
capturer de l'anti-hydrogène...

Capter des (anti)atomes

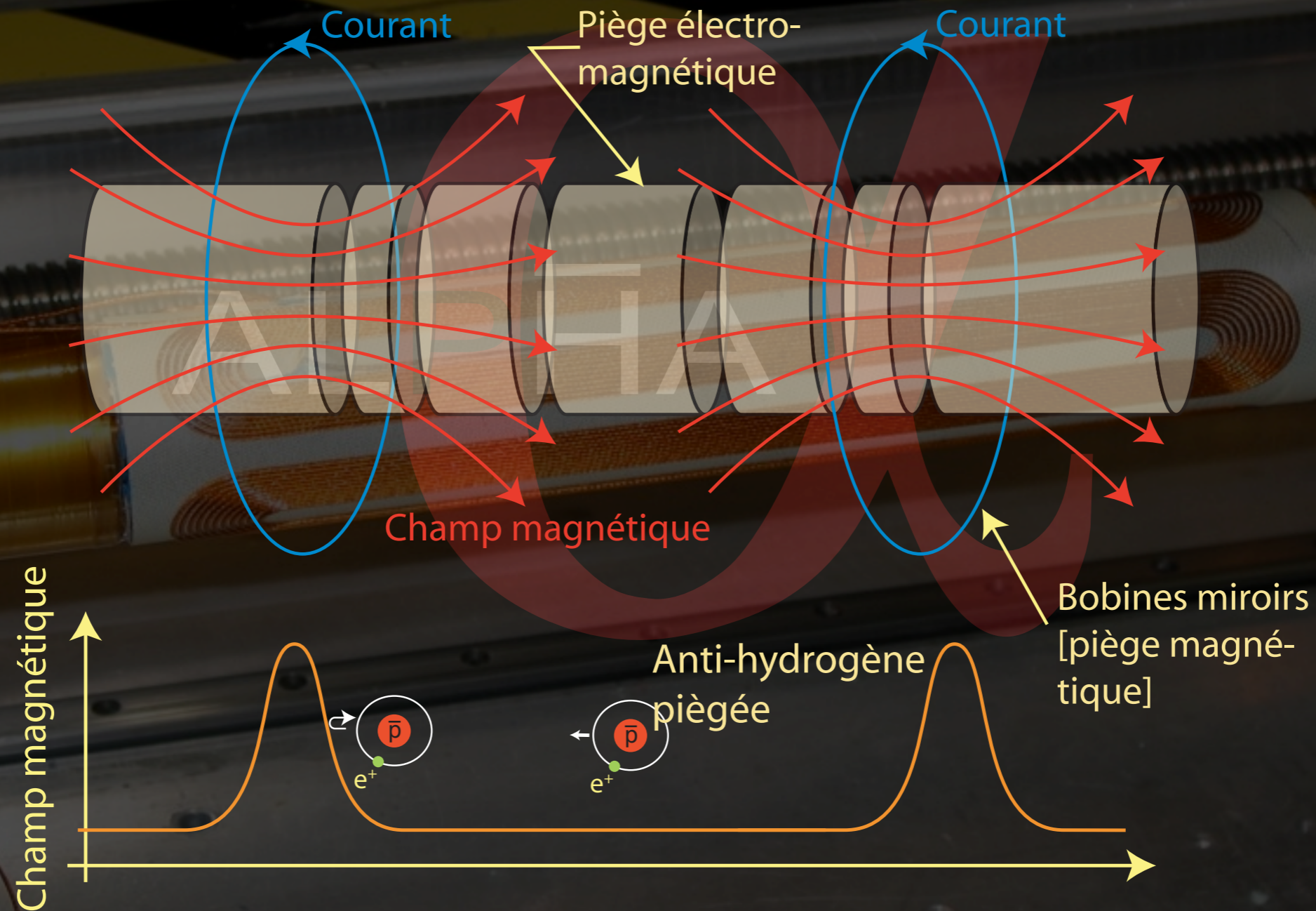
Piège électro-
magnétique



Capter des (anti)atomes

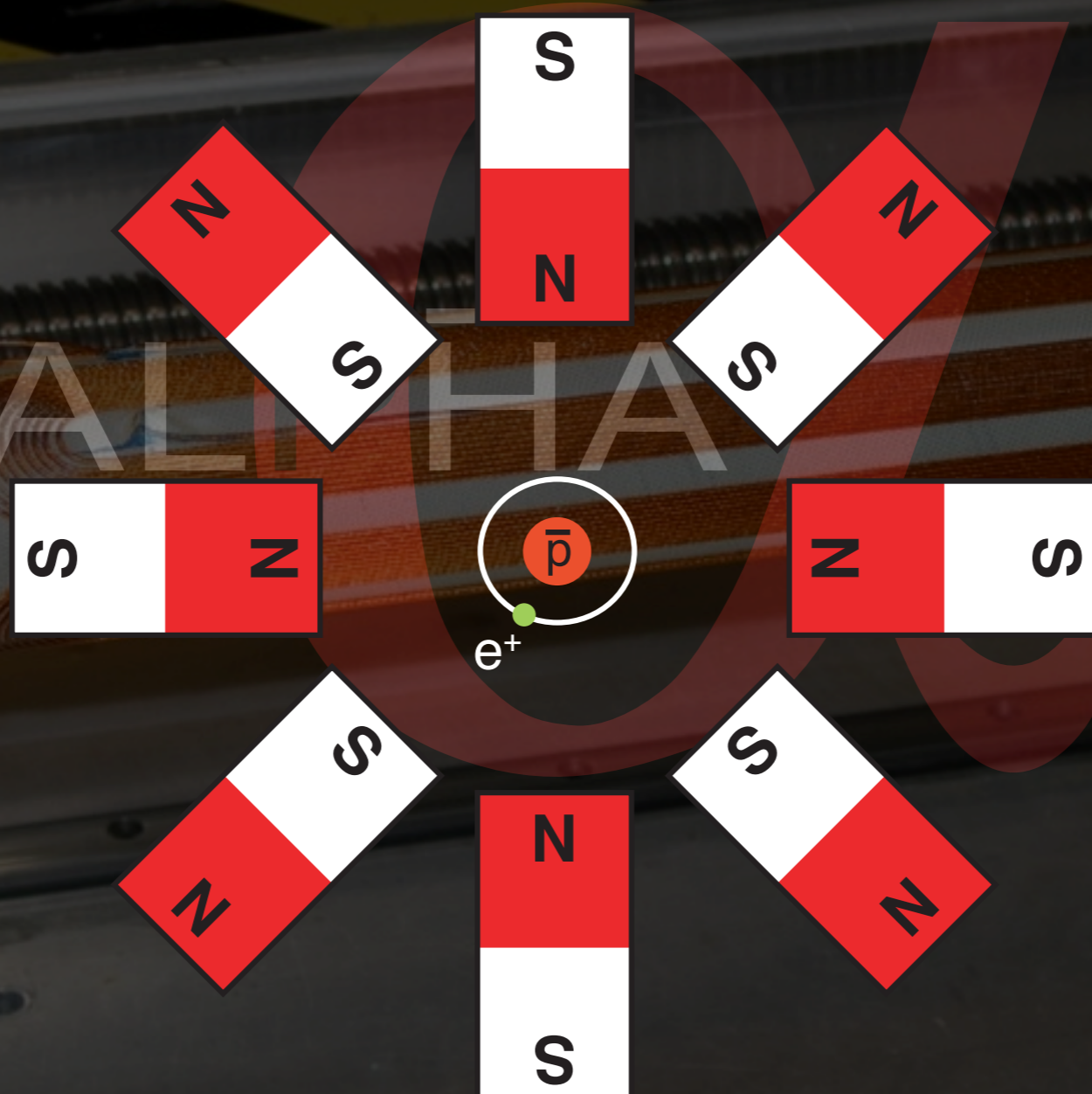


Capter des (anti)atomes

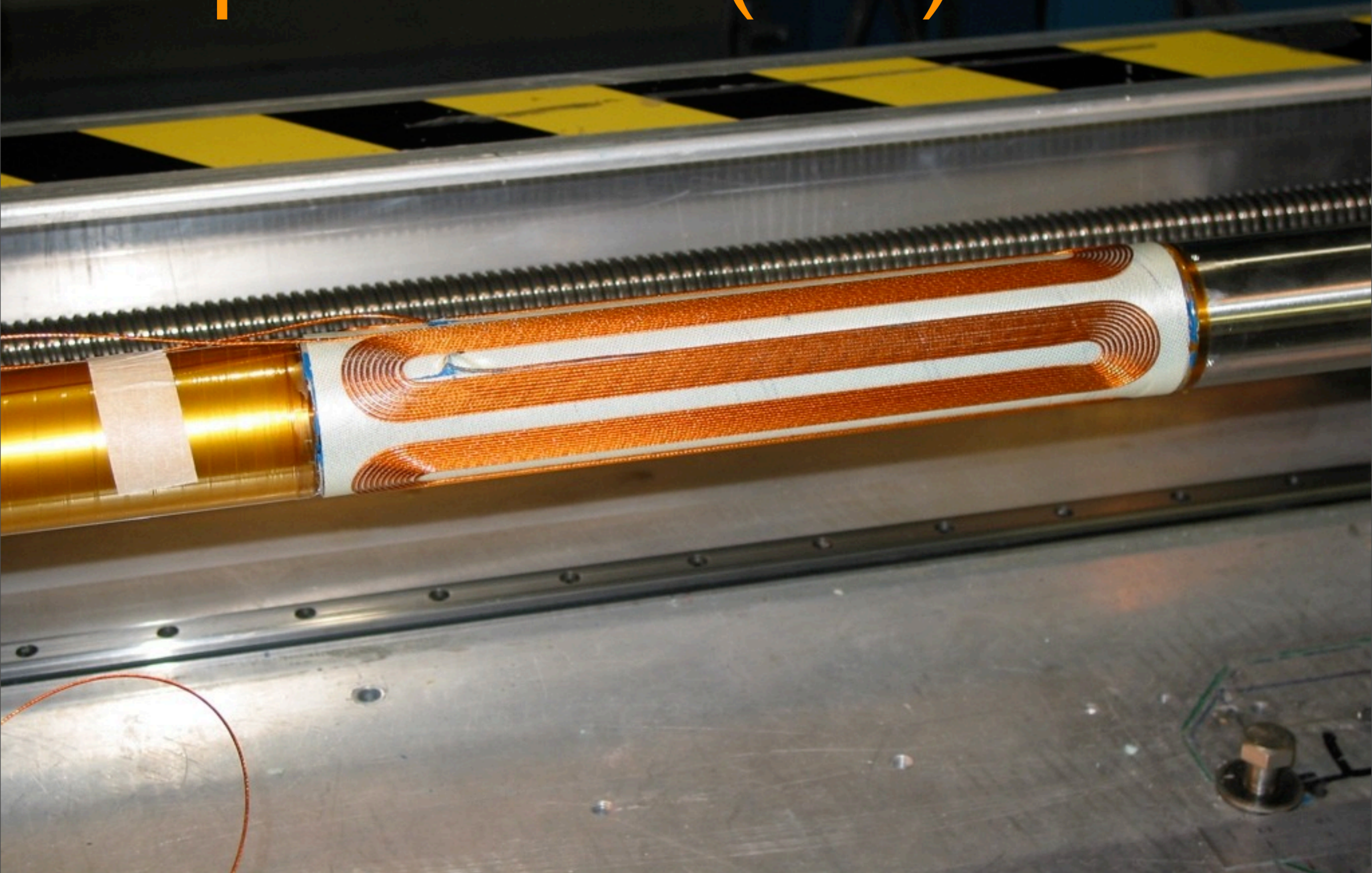


Minimum de champ magnétique

Capturer des (anti)atomes

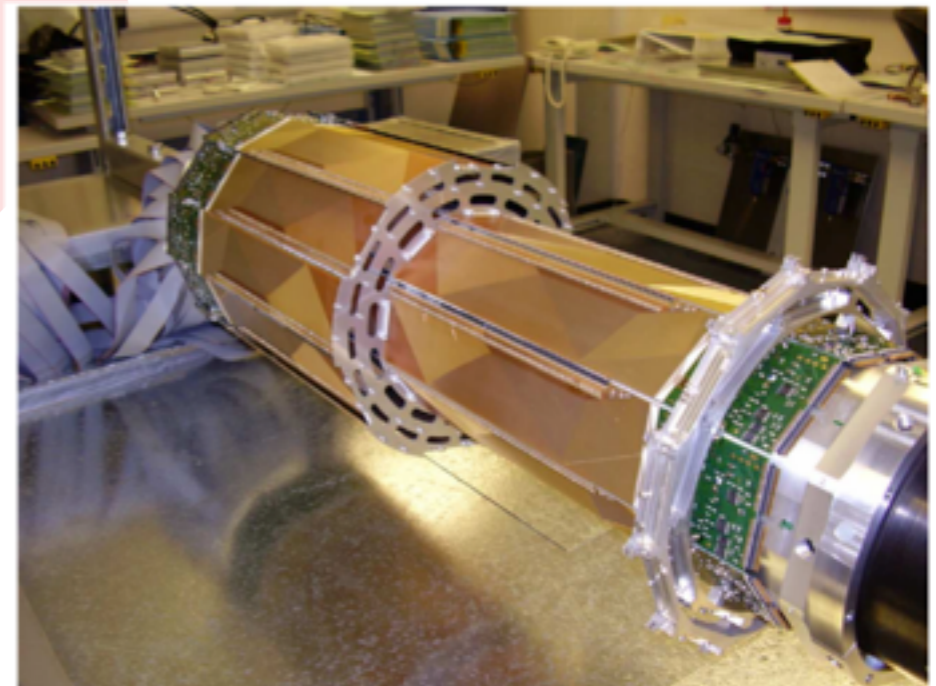
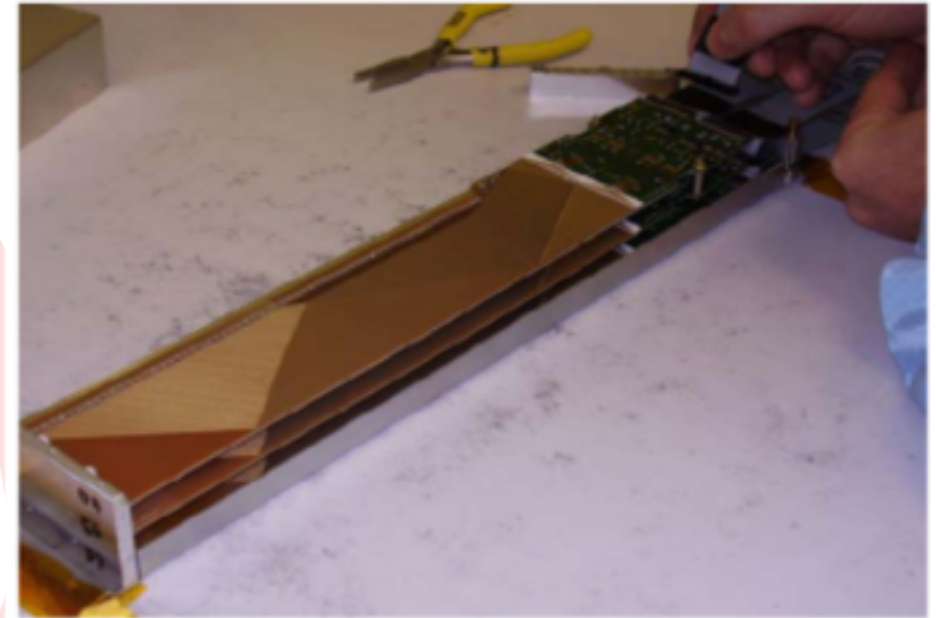
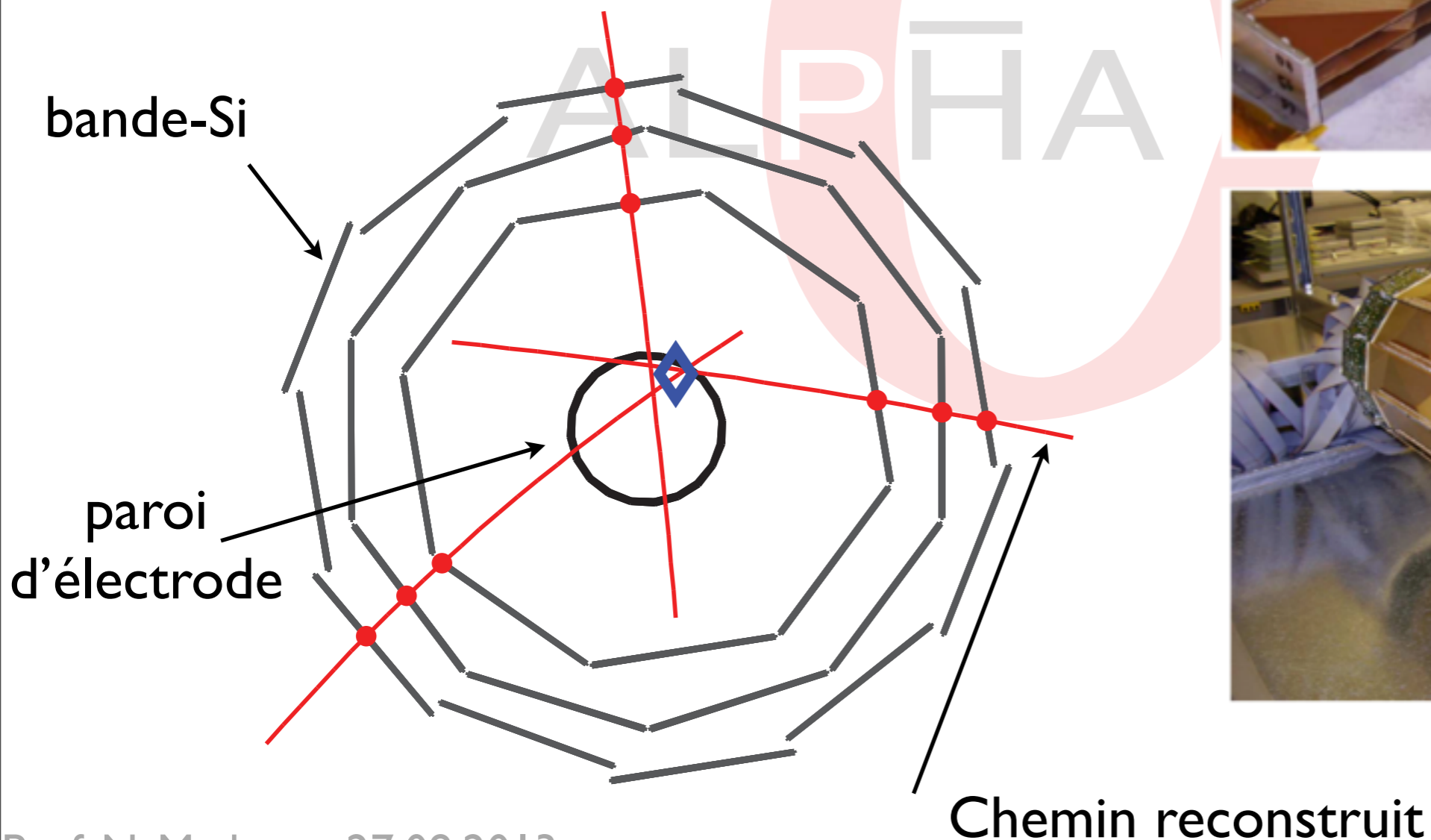


Capturer des (anti)atomes



Annihilation Detection

- Détection avec bande-Si
- Résolution de Vertex $\sim 1\text{mm}$
- Efficacité $\sim 50\%$



Comment alors ?

ALP^HHA

Comment alors ?

- On allume notre piège magnétique et démarre la synthèse d'anti-hydrogène...

ALPĪĀ



Comment alors ?

- On allume notre piège magnétique et démarre la synthèse d'anti-hydrogène...
- On reste plein d'espérance

ALPĪĀ



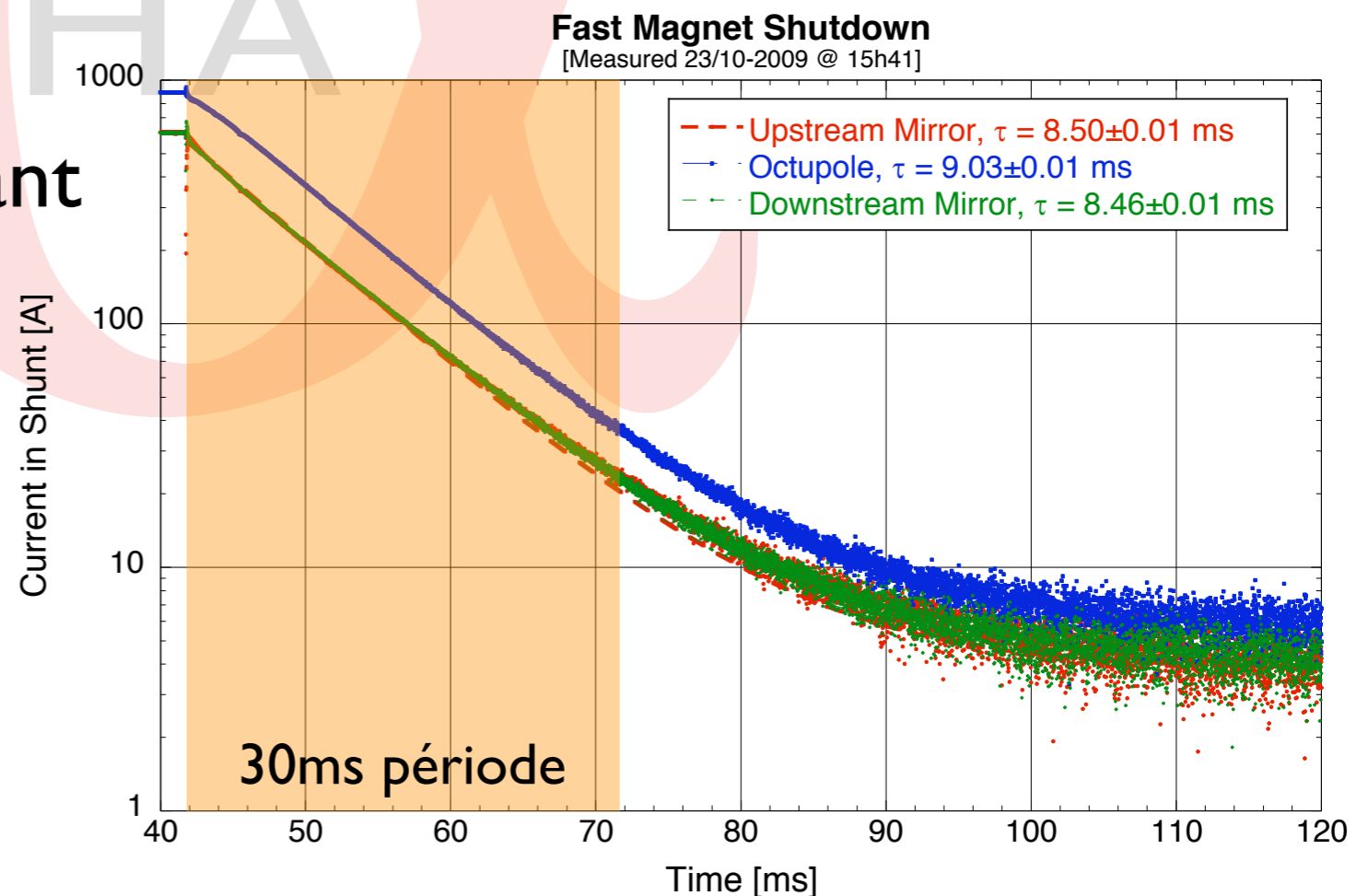
Comment alors ?

- On allume notre piège magnétique et démarre la synthèse d'anti-hydrogène...
- On reste plein d'espérance
- On élimine toutes les particules chargées restantes

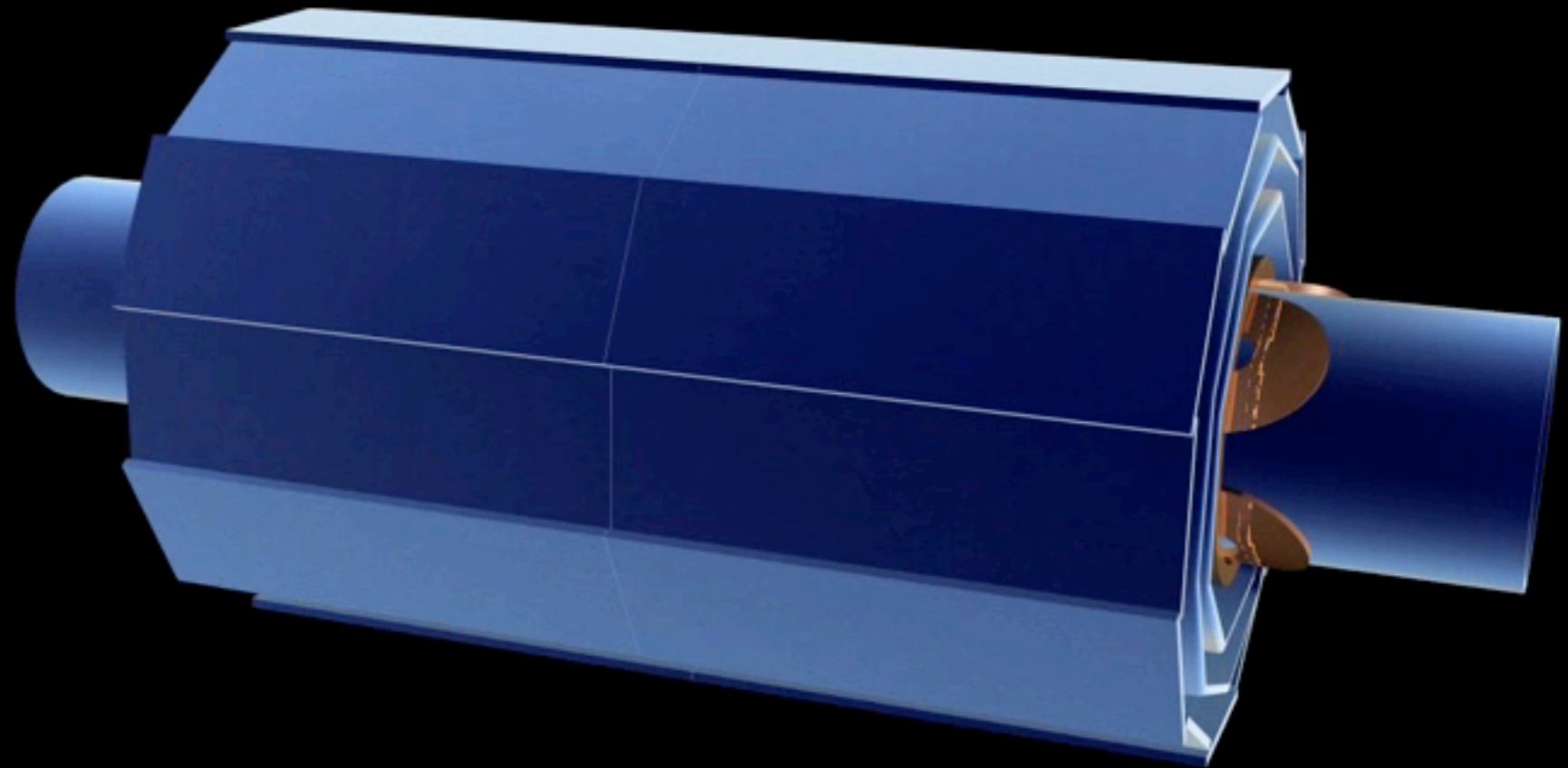
ALPHA

Comment alors ?

- On allume notre piège magnétique et démarre la synthèse d'anti-hydrogène...
- On reste plein d'espérance
- On élimine tout les particules chargées restantes
- On coupe la piège magnétique en cherchant d'échappement des anti-hydrogènes...

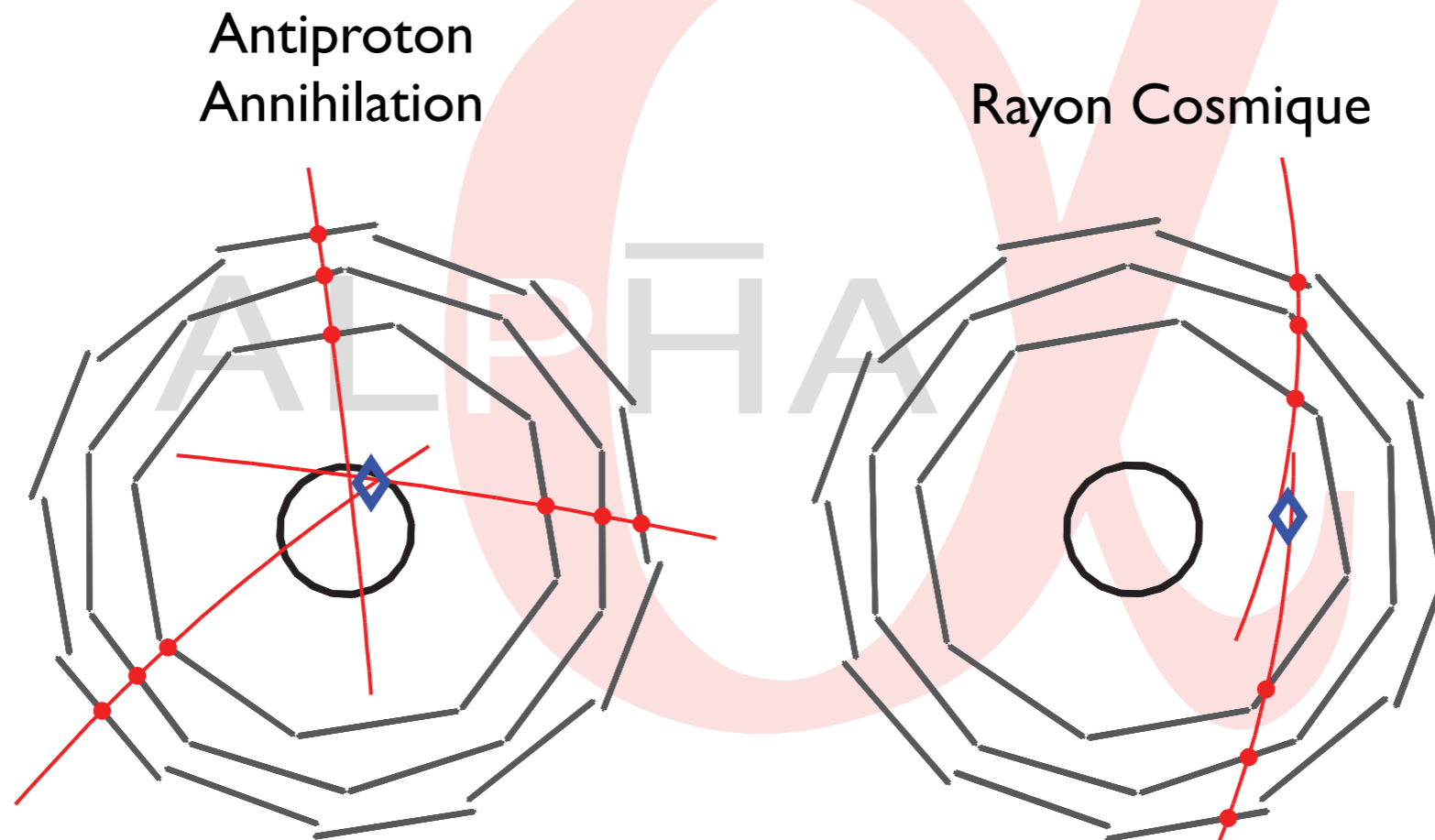


Capture de l'Anti-hydrogène



Fond Cosmique

- Un type de signal qui inquiète : rayons cosmiques



- Standard (2010/11) : 1.4/1000 “faut” / expérience

Piégeage en miroir



Piégeage en miroir

- Mais: Un \bar{p} n'est pas (nécessairement) un \bar{H} !



Piégeage en miroir

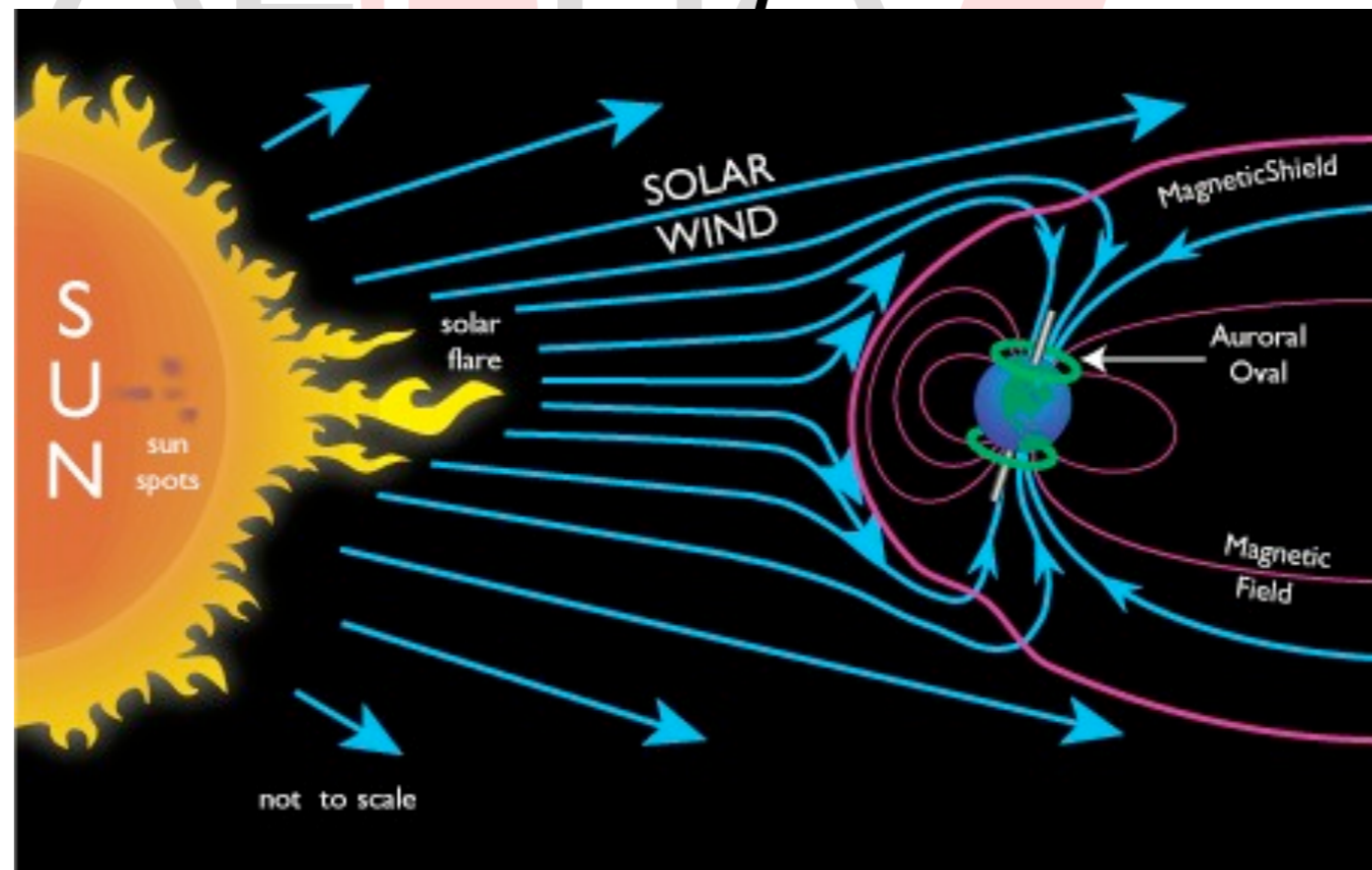
- Mais: Un \bar{p} n'est pas (nécessairement) un \bar{H} !
- Un \bar{p} peuvent être piégé par des champs magnétique dû à leur moment magnétique de mouvement

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

Piégeage en miroir

- Mais: Un \bar{p} n'est pas (nécessairement) un \bar{H} !
- Un \bar{p} peuvent être piégé par des champs magnétique dû à leur moment magnétique de mouvement

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



Piégeage en miroir

- Mais: Un \bar{p} n'est pas (nécessairement) un \bar{H} !
- Un \bar{p} peuvent être piégé par des champs magnétique dû à leur moment magnétique de mouvement

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

- Le piégeage dépend de leur énergie

Piégeage en miroir

- Mais: Un \bar{p} n'est pas (nécessairement) un \bar{H} !
- Un \bar{p} peuvent être piégé par des champs magnétique dû à leur moment magnétique de mouvement

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

- Le piégeage dépend de leur énergie

$$\alpha = \left(\frac{v_{||}}{v_{\perp}} \right) = \sqrt{\frac{B_{max}}{B_{min}} - 1}$$

- Pour éviter ceci on applique des champs (électrique) de nettoyage avant de couper le piège

Des \bar{p} ou des \bar{H}

ALP \bar{H} A



Des \bar{p} ou des \bar{H}

- Nettoyage complète pas garantie ($>20\text{eV}$)

ALP \bar{H} A α

Des \bar{p} ou des \bar{H}

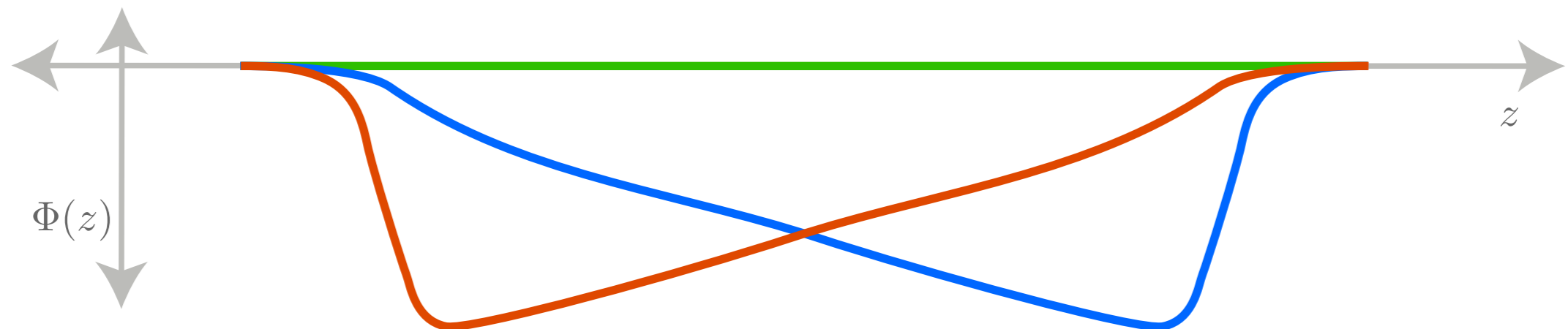
- Nettoyage complète pas garantie ($>20\text{eV}$)
- Chauffage des positrons arrête la création de l'anti-hydrogène

ALP \bar{H} A



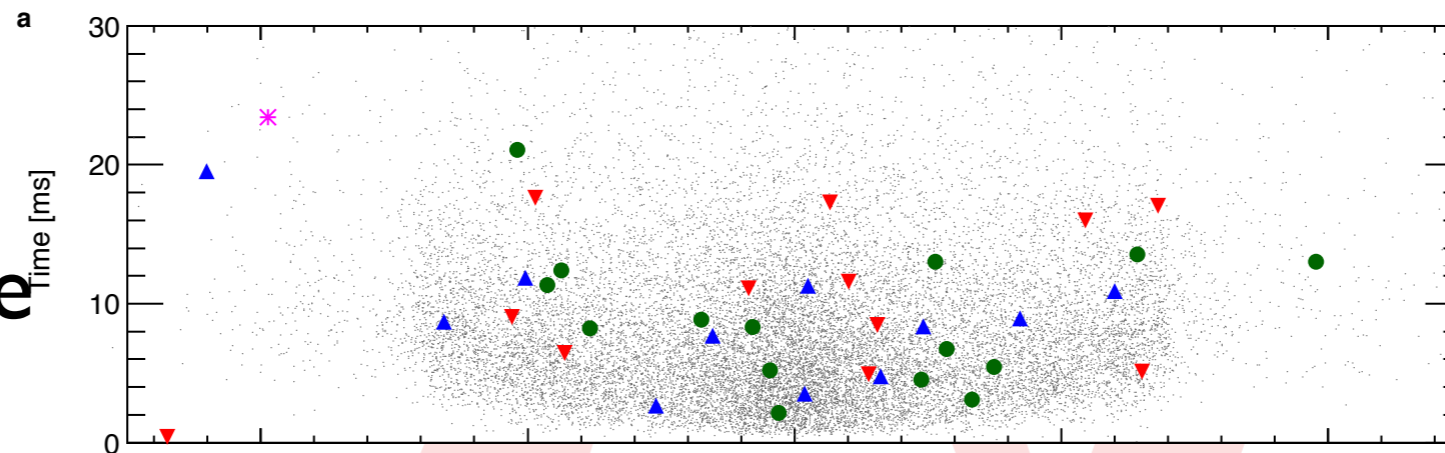
Des \bar{p} ou des \bar{H}

- Nettoyage complète pas garantie ($>20\text{eV}$)
- Chauffage des positrons arrête la création de l'anti-hydrogène
- On sépare les particules chargées (\bar{p}) des particules neutres (\bar{H}) en appliquant un champ électrique (pendant la coupure) qui n'agit pas sûr les particules neutres (\bar{H}).

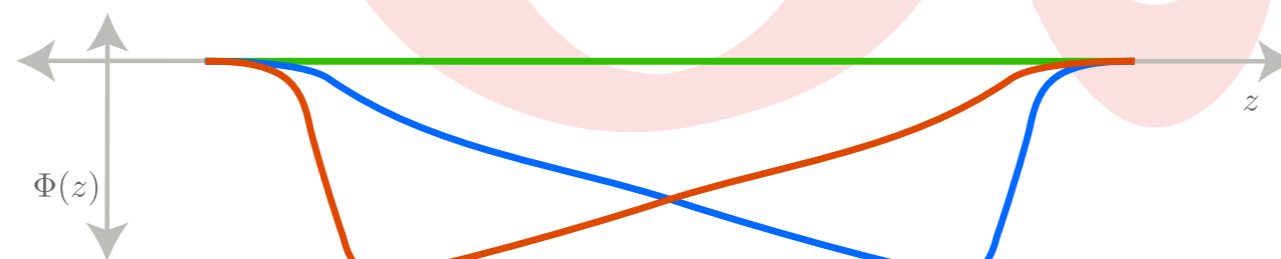
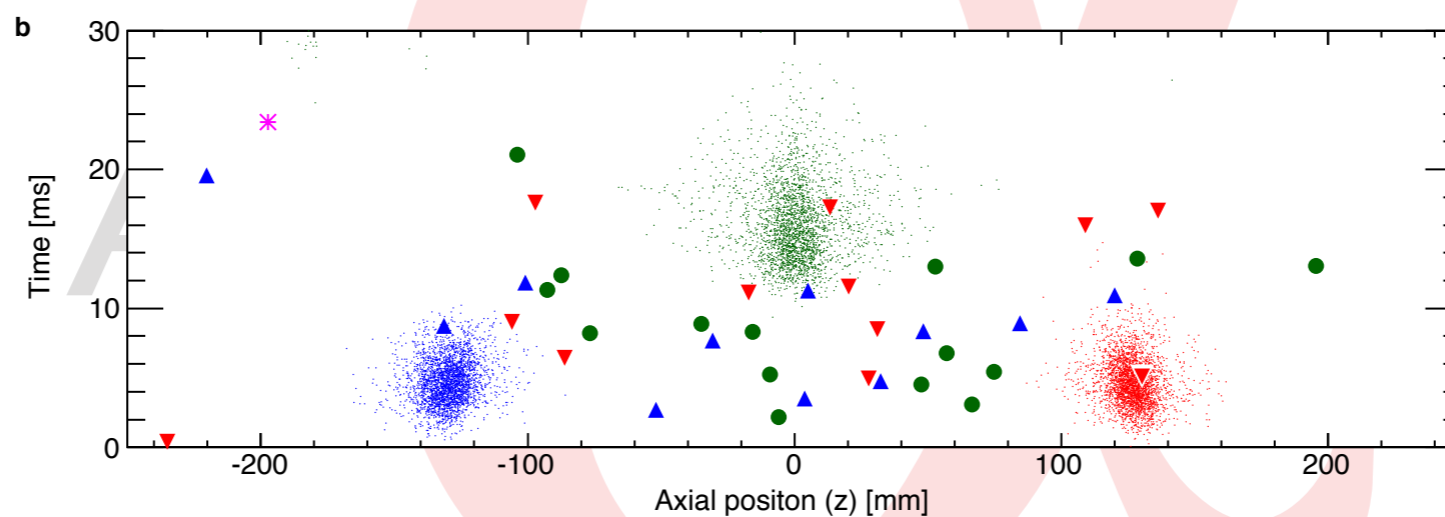


Résultats de l'expérience

Simulation:
Anti-hydrogène



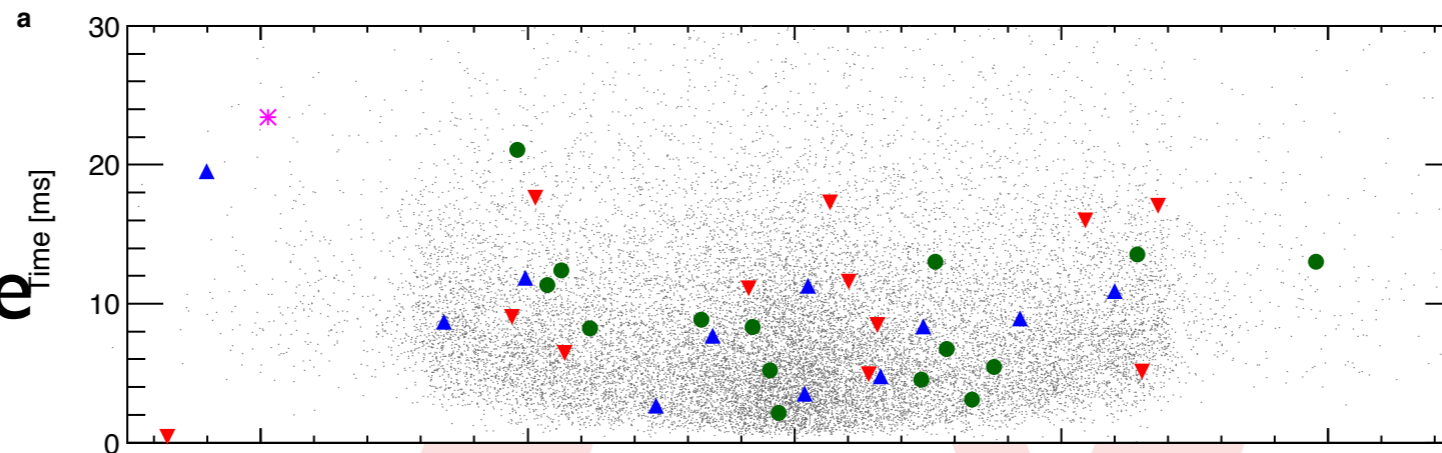
Simulation:
Antiprotons



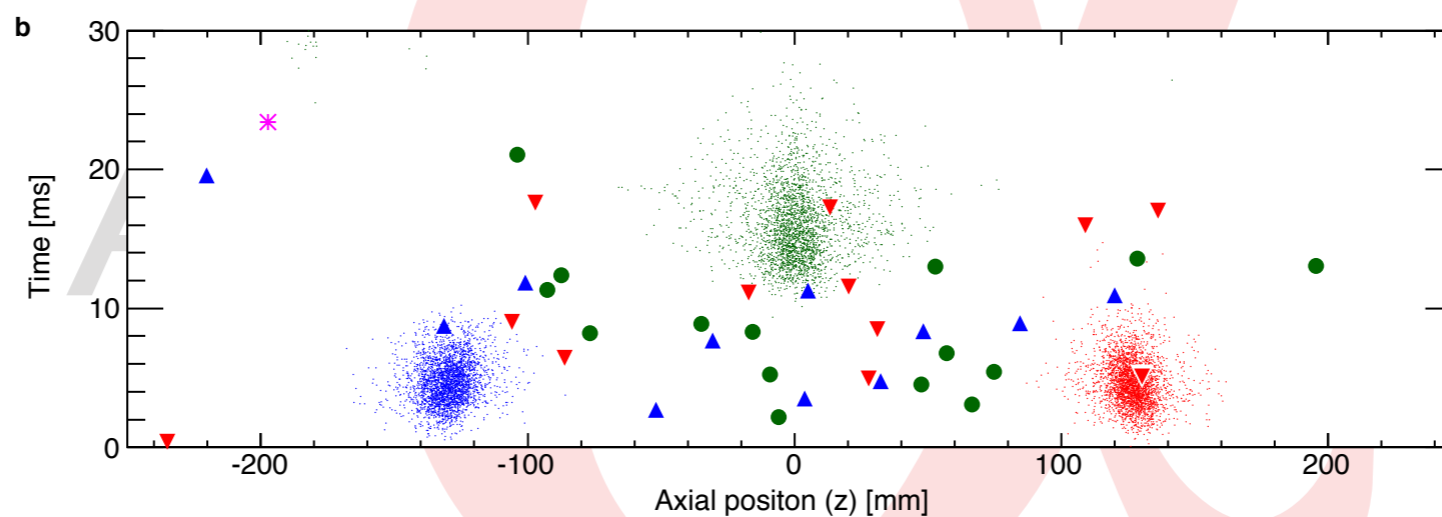
Sans bias
Bias à gauche
Bias à droite
(* Chauffage e^+)

Résultats de l'expérience

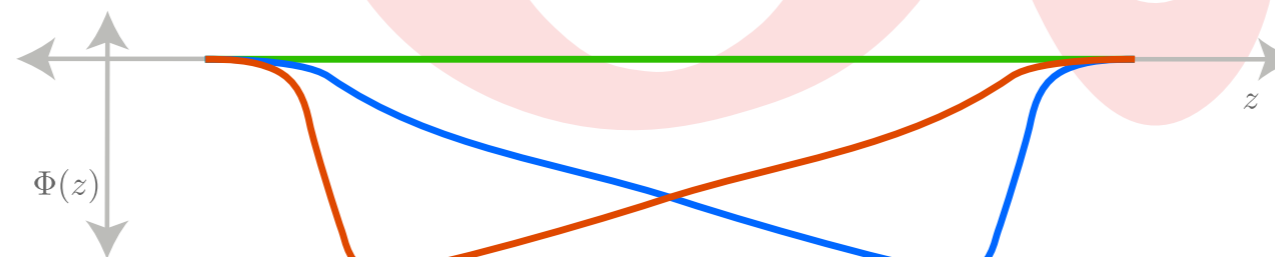
Simulation:
Anti-hydrogène



Simulation:
Antiprotons



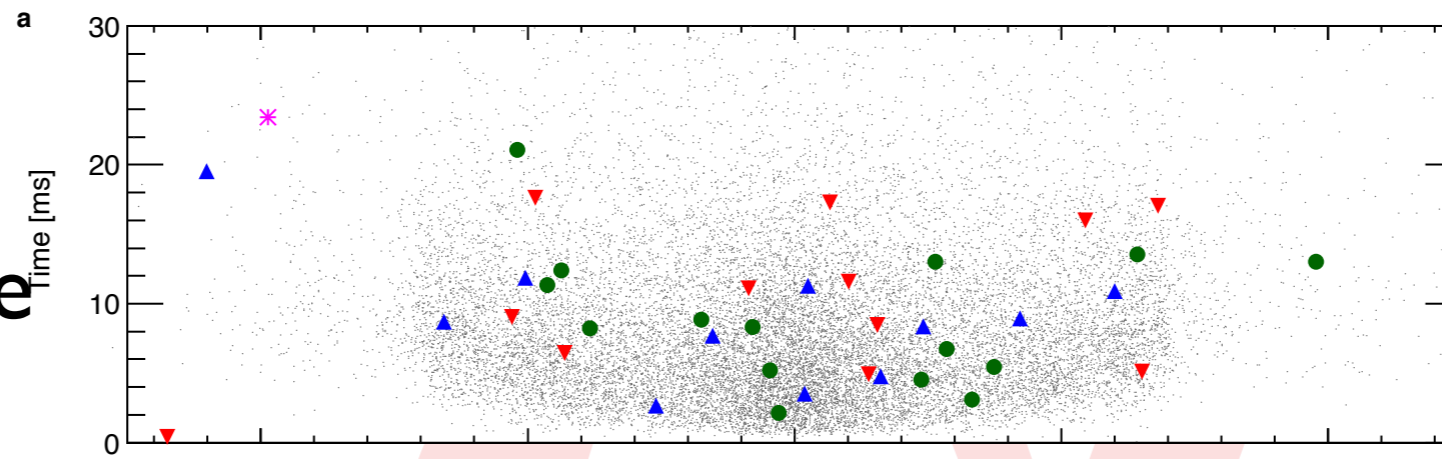
Sans bias
Bias à gauche
Bias à droite
(* Chauffage e^+)



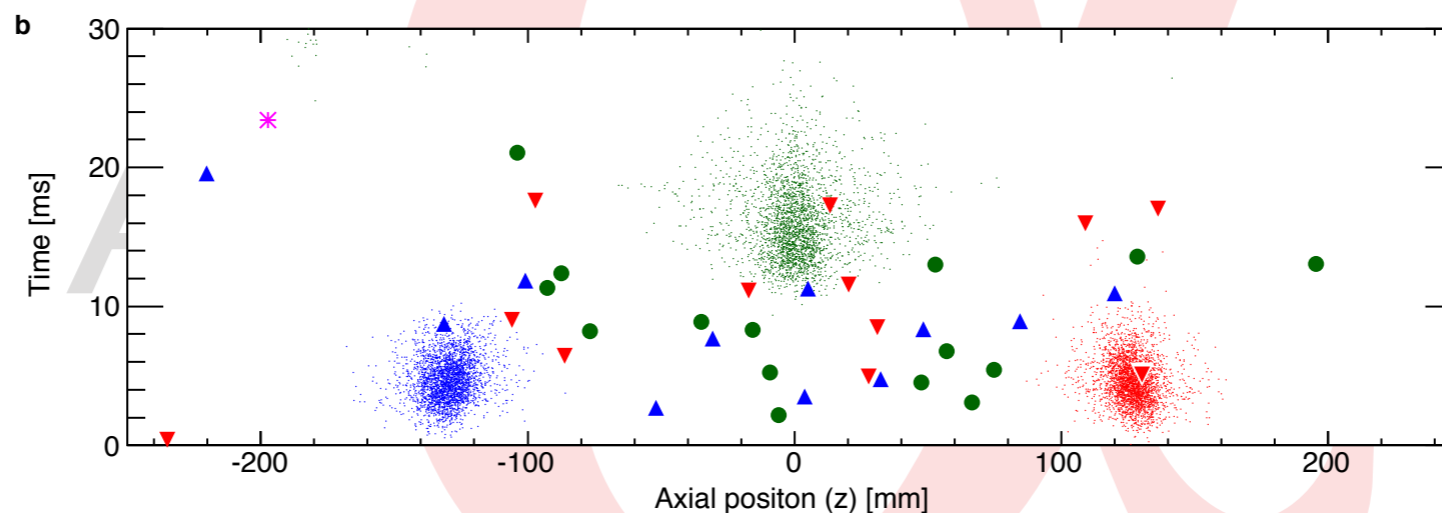
- Pas de bias spatiale; Chauffage des e^+ 'élimine' le signal

Résultats de l'expérience

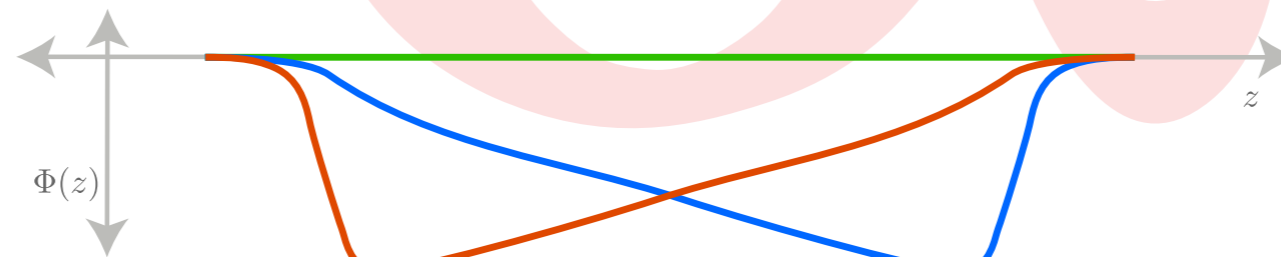
Simulation:
Anti-hydrogène



Simulation:
Antiprotons



Sans bias
Bias à gauche
Bias à droite
(* Chauffage e^+)



- Pas de bias spatiale; Chauffage des e^+ 'élimine' le signal

38 Anti-hydrogène capturé! Fond de signal 1.4 ± 1.4

Mais seulement $\sim |\bar{H}/\exp.$

ALP \bar{H} A α

Mais seulement $\sim 1 \bar{H}/\text{exp.}$

- Les antiprotons de l'AD arrive avec $E_{\text{cin}} = 5.3 \text{ MeV}$

ALP \bar{H} A



Mais seulement $\sim 1 \bar{H}/\text{exp.}$

- Les antiprotons de l'AD arrive avec $E_{\text{cin}} = 5.3 \text{ MeV}$
- Les potentiels électrique sont $\sim < 1 \text{ keV}$

ALP \bar{H} A

Mais seulement $\sim 1 \bar{H}/\text{exp.}$

- Les antiprotons de l'AD arrive avec $E_{\text{cin}} = 5.3 \text{ MeV}$
- Les potentiels électrique sont $\sim < 1 \text{ keV}$
- Les potentiels des plasma : 30mV (\bar{p}) 10V (e^+)

Mais seulement $\sim 1 \bar{H}/\text{exp.}$

- Les antiprotons de l'AD arrive avec $E_{\text{cin}} = 5.3 \text{ MeV}$
- Les potentiels électrique sont $\sim < 1 \text{ keV}$
- Les potentiels des plasma : 30 mV (\bar{p}) 10 V (e^+)
- La profondeur du piège : $\sim 50 \mu\text{V}$ (0.6 K)

Mais seulement $\sim 1 \bar{H}/\text{exp.}$

- Les antiprotons de l'AD arrive avec $E_{\text{cin}} = 5.3 \text{ MeV}$
- Les potentiels électrique sont $\sim < 1 \text{ keV}$
- Les potentiels des plasma : 30 mV (\bar{p}) 10 V (e^+)
- La profondeur du piège : $\sim 50 \mu\text{V}$ (0.6 K)
- \bar{H} doit être froid pour être capturé.

Mais seulement $\sim 1 \bar{H}/\text{exp.}$

- Les antiprotons de l'AD arrive avec $E_{\text{cin}} = 5.3 \text{ MeV}$
- Les potentiels électrique sont $\sim < 1 \text{ keV}$
- Les potentiels des plasma : 30mV (\bar{p}) 10V (e^+)
- La profondeur du piège : $\sim 50 \mu\text{V}$ (0.6 K)
- \bar{H} doit être froid pour être capturé.
- Plein de techniques nouvelles ont été développé.

Refroidissement par évaporation



Refroidissement par évaporation

- Si on laisse évaporer les particules qui ont plus d'énergie que la moyenne, les particules qui restent sont plus froid

ALPHA

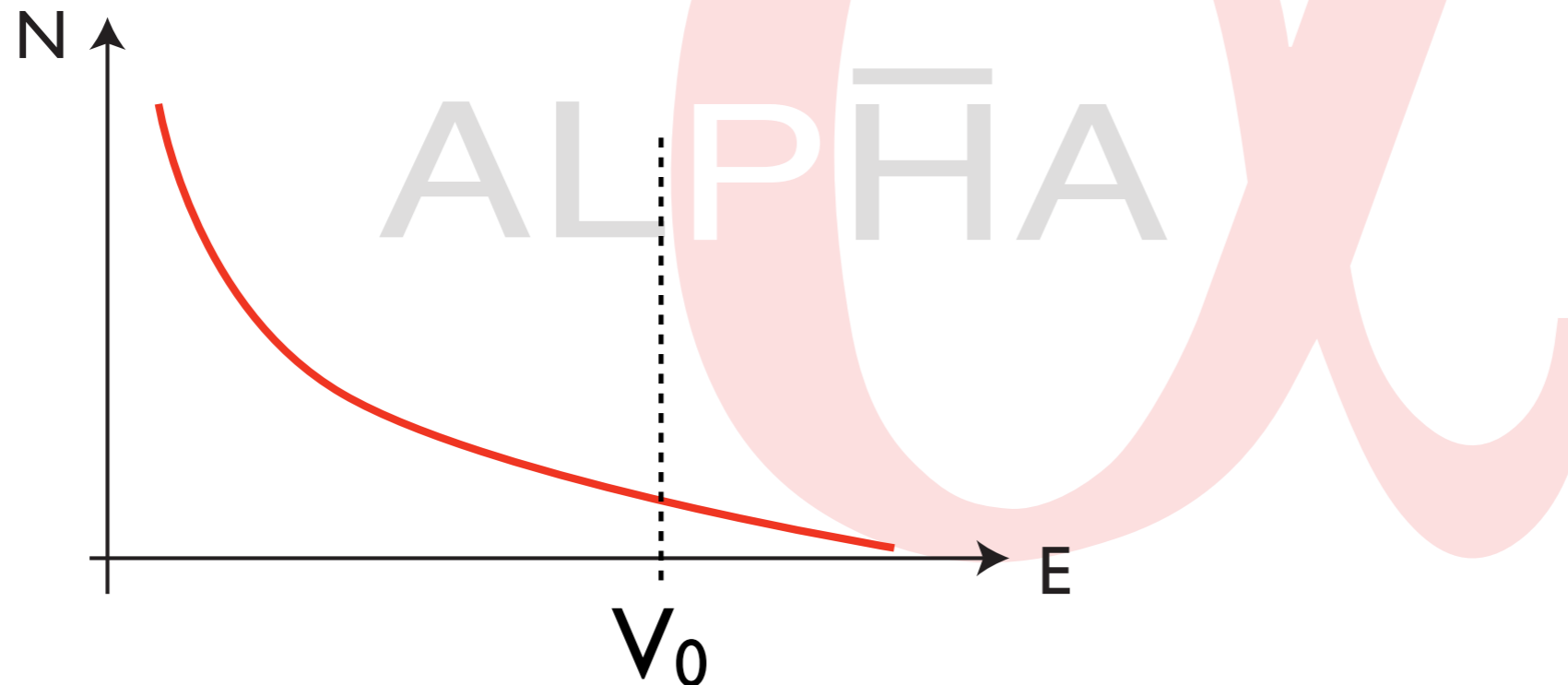
Refroidissement par évaporation

- Si on laisse évaporer les particules qui ont plus d'énergie que la moyenne, les particules qui restent sont plus froid



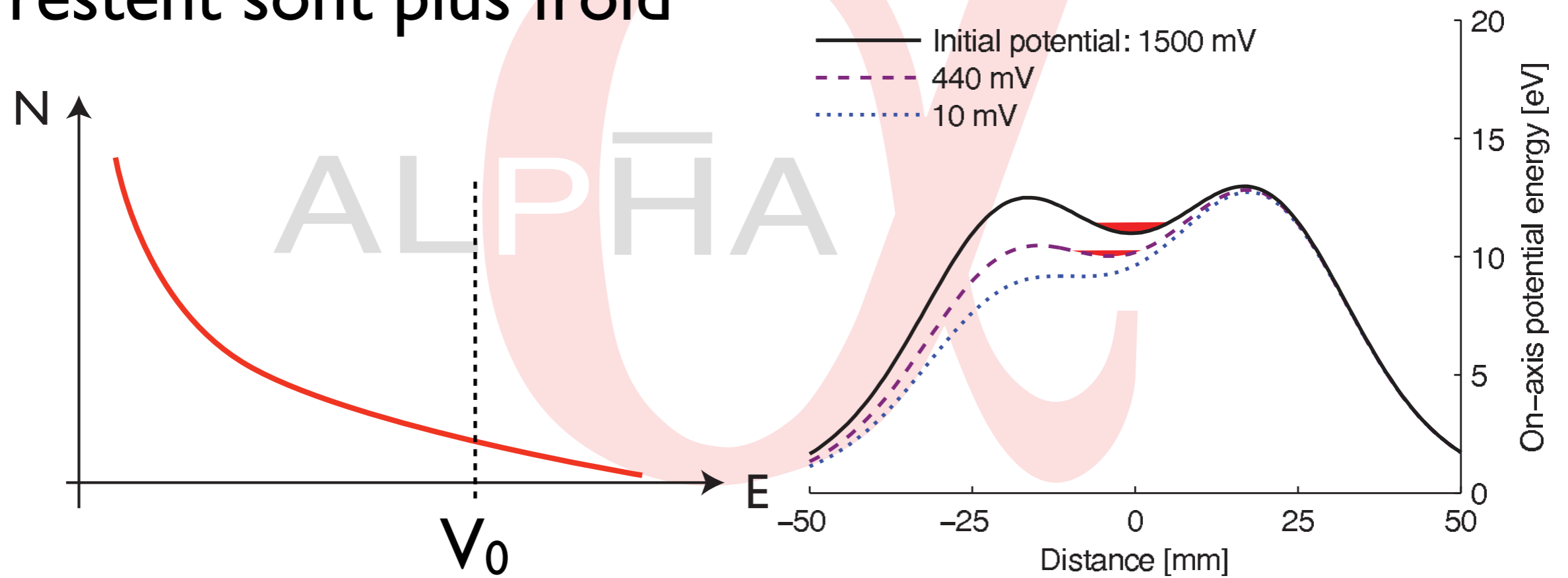
Refroidissement par évaporation

- Si on laisse évaporer les particules qui ont plus d'énergie que la moyenne, les particules qui restent sont plus froid



Refroidissement par évaporation

- Si on laisse évaporer les particules qui ont plus d'énergie que la moyenne, les particules qui restent sont plus froid

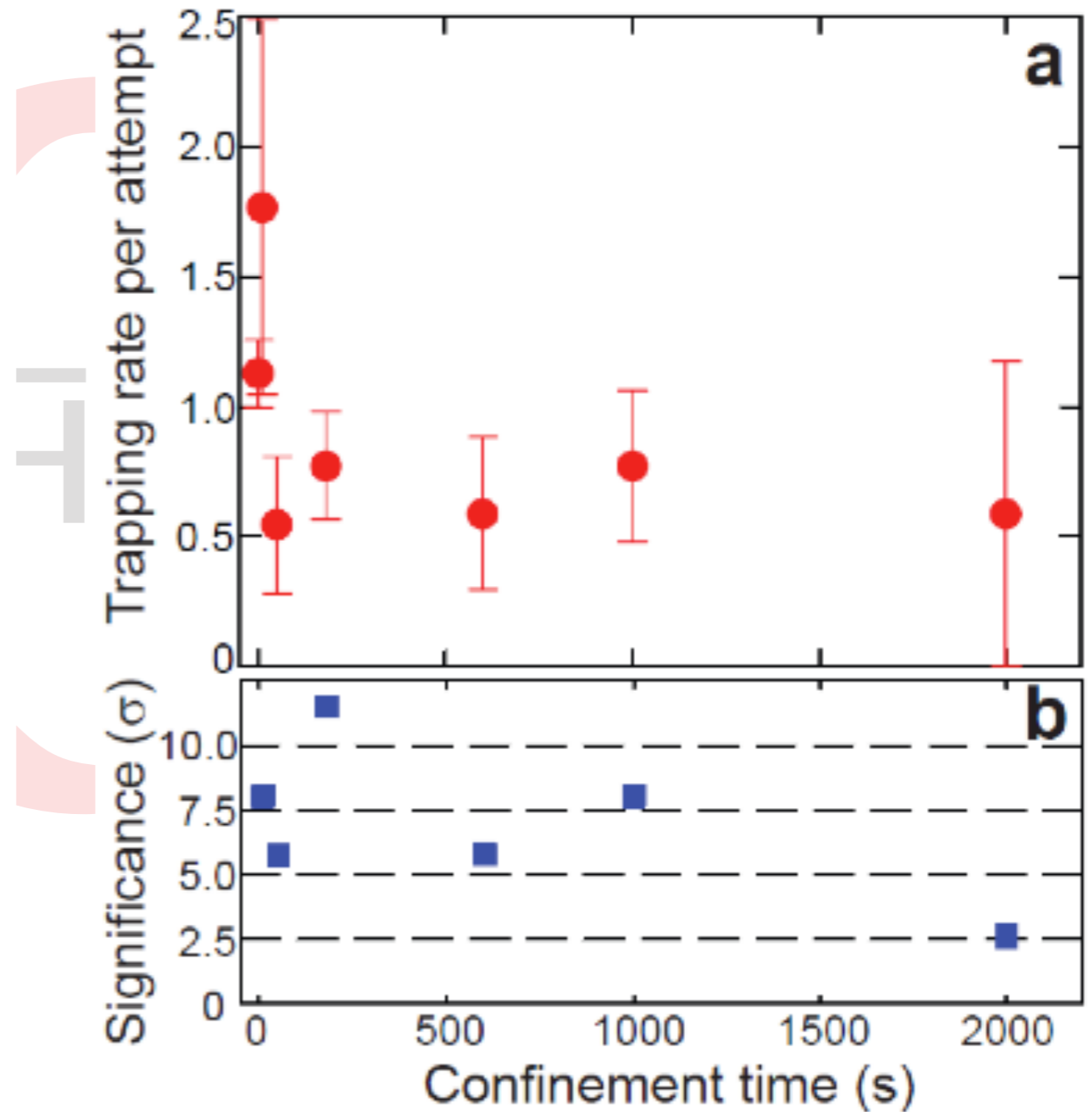
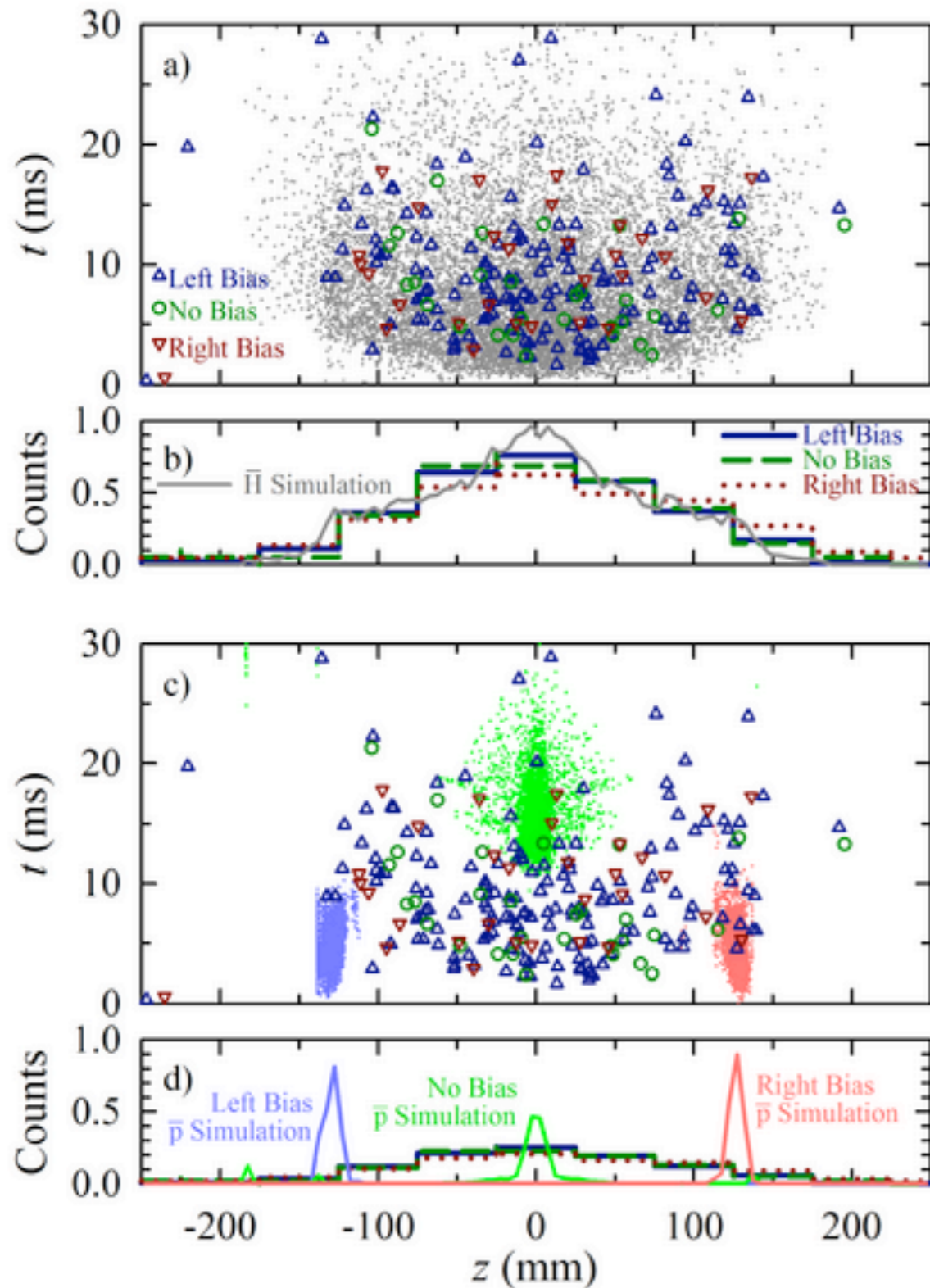


Que faire?

ALPHA

première mesures sur l'anti-hydrogène...

Une seule... mais pour longtemps



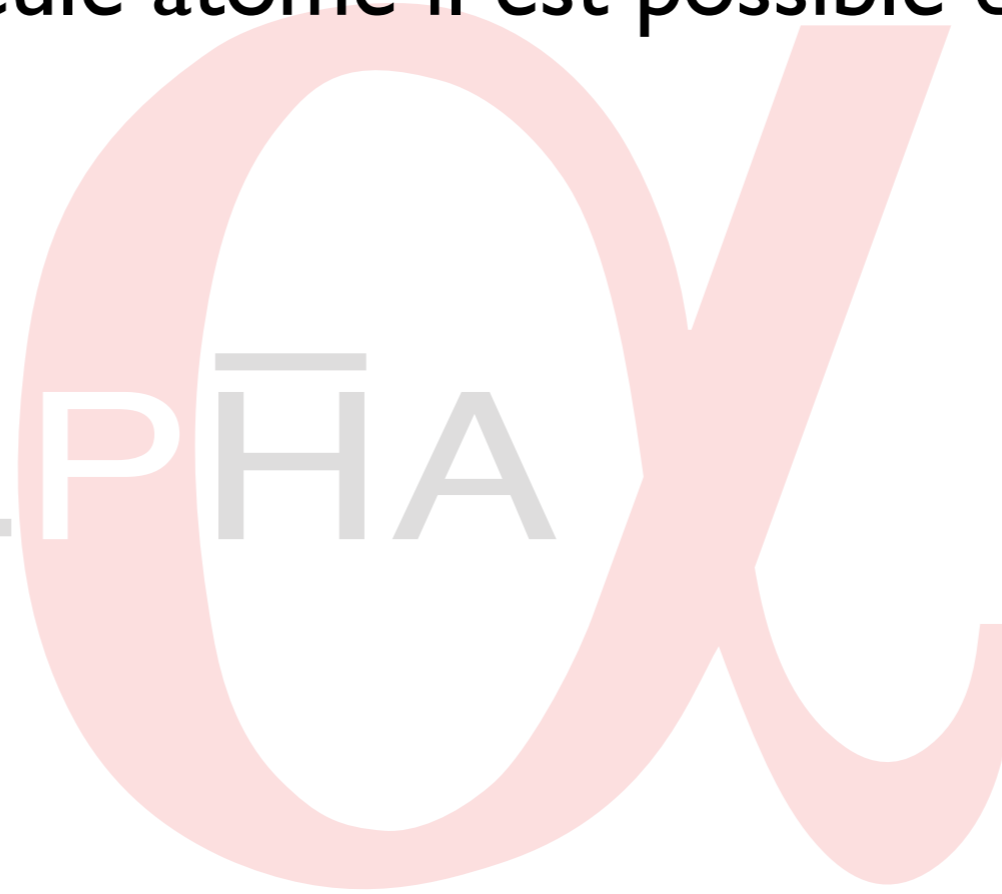
Sauts quantiques

ALP $\bar{\text{H}}$ A α

Sauts quantiques

- Les atomes piégés sont dans leur état fondamentale: - même avec une seule atome il est possible de faire des comparaisons...

ALPĪĀ



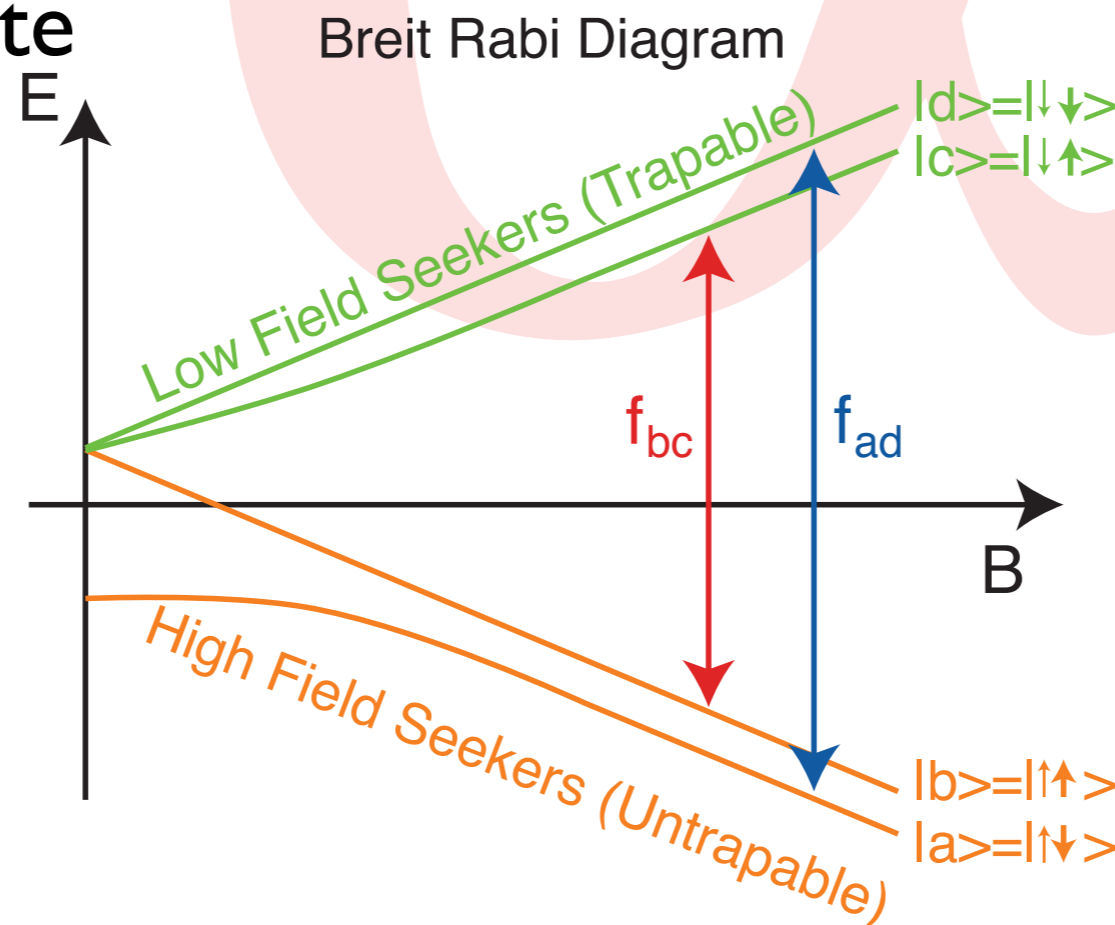
Sauts quantiques

- Les atomes piégés sont dans leur état fondamentale: - même avec une seule atome il est possible de faire des comparaisons...
- Observation d'une seule \bar{H} : Les annihilations

ALP \bar{H} A

Sauts quantiques

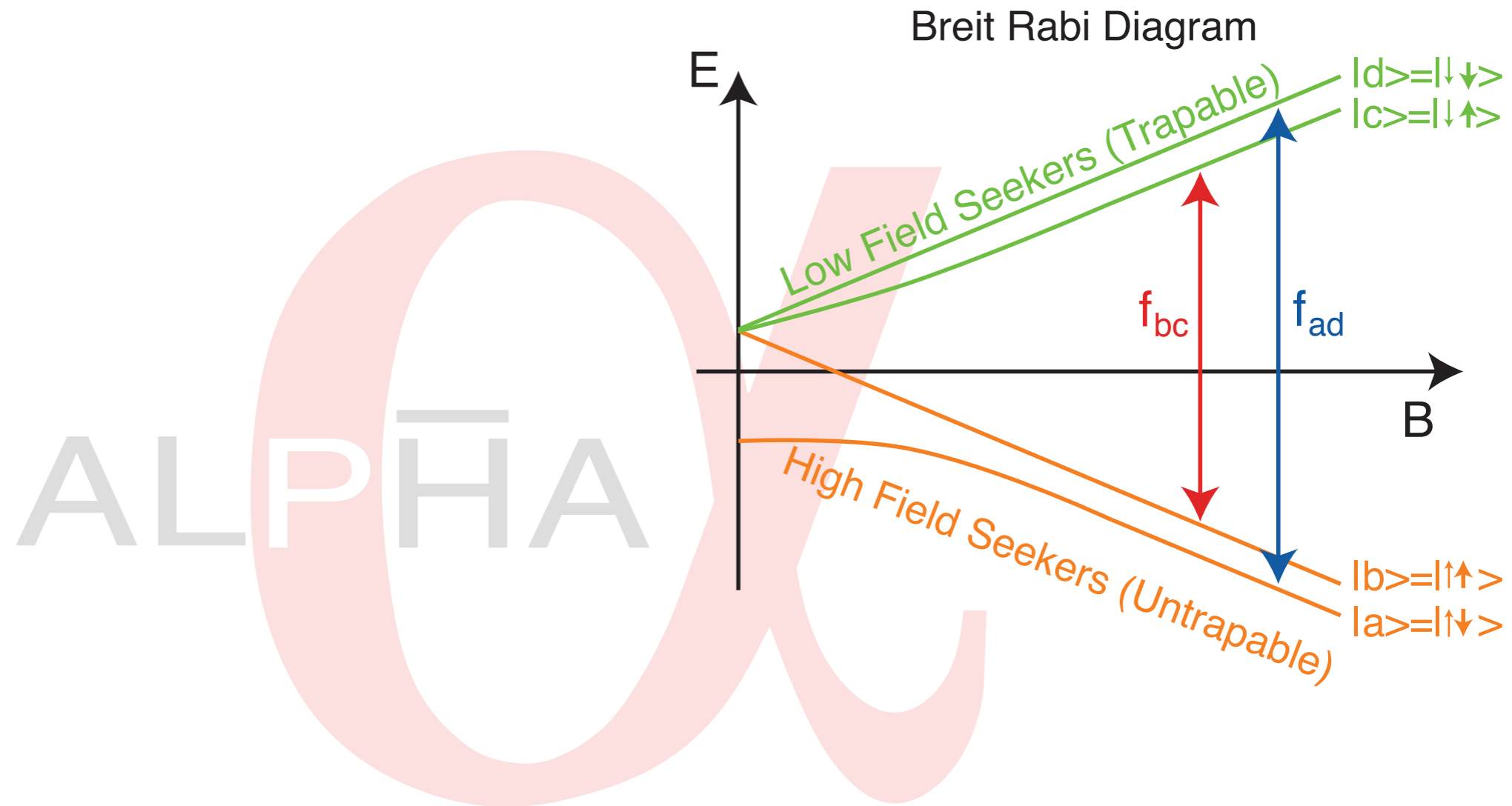
- Les atomes piégés sont dans leur état fondamentale: - même avec une seule atome il est possible de faire des comparaisons...
- Observation d'une seule \bar{H} : Les annihilations
- Méthode: Perte de \bar{H} occasionné par une retournement de spin résonante



Nature, March 7th (2012)

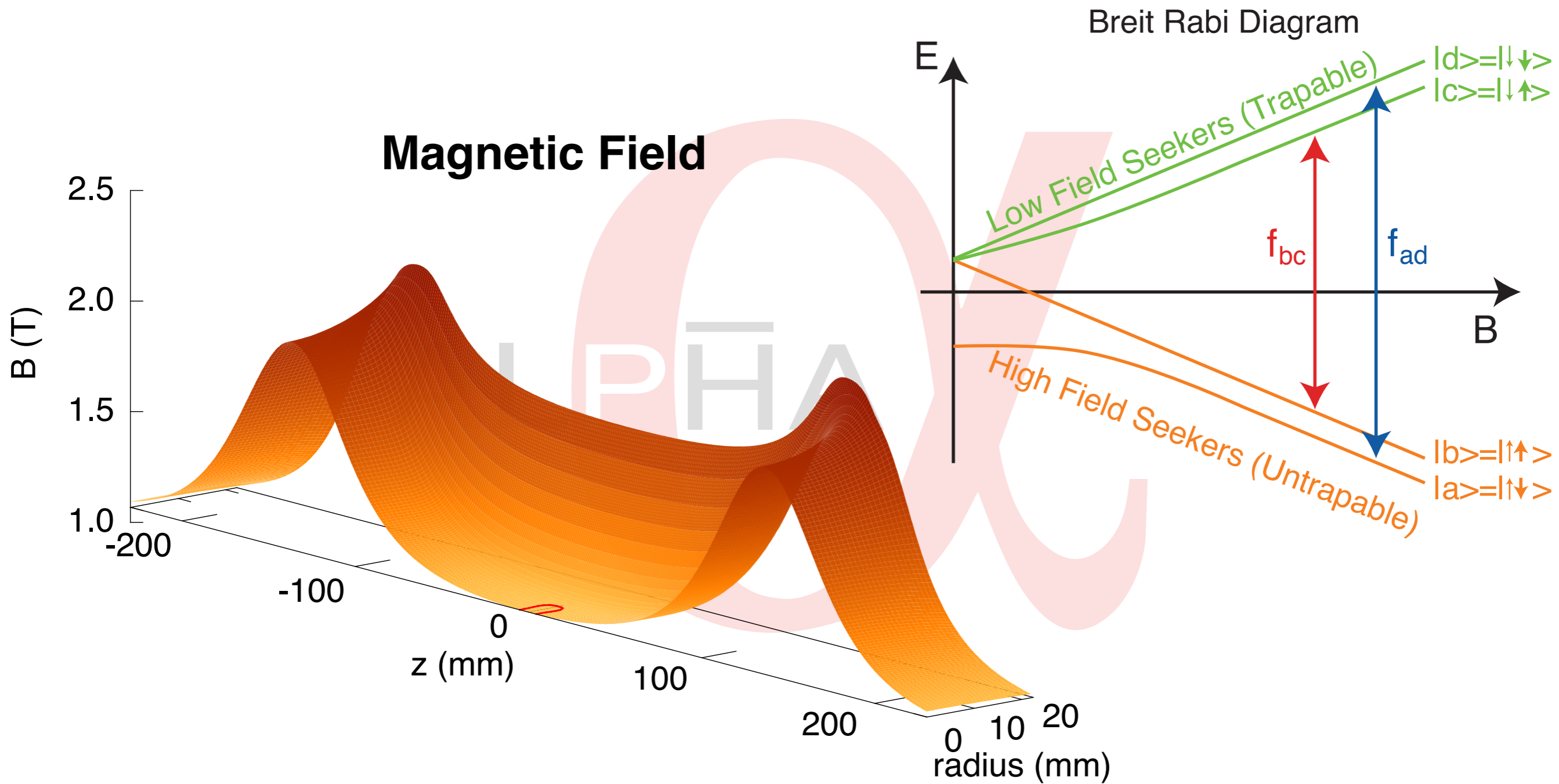
microwave spectroscopy

Retournement de spin



Nature, March 7th (2012)

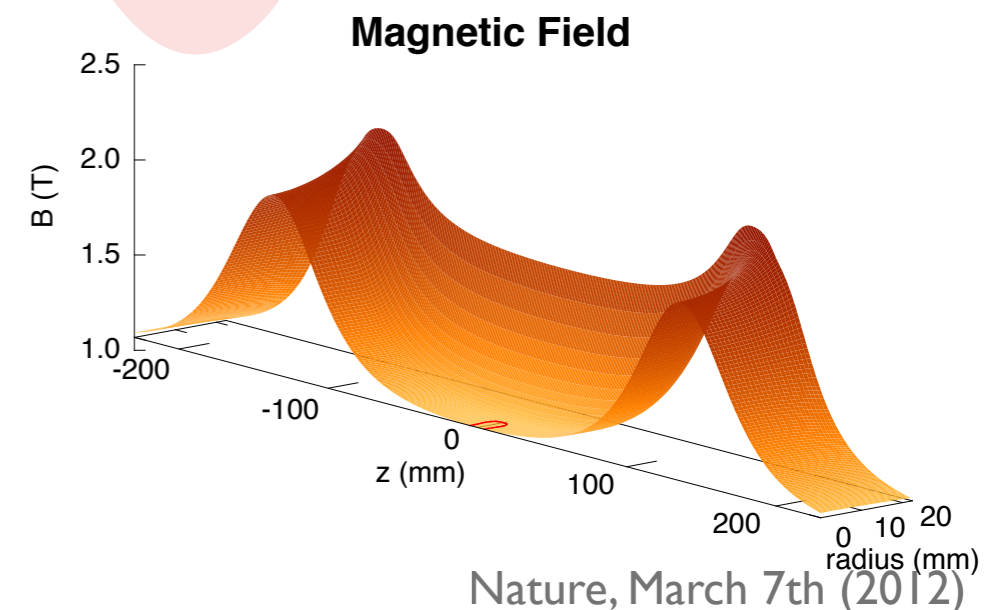
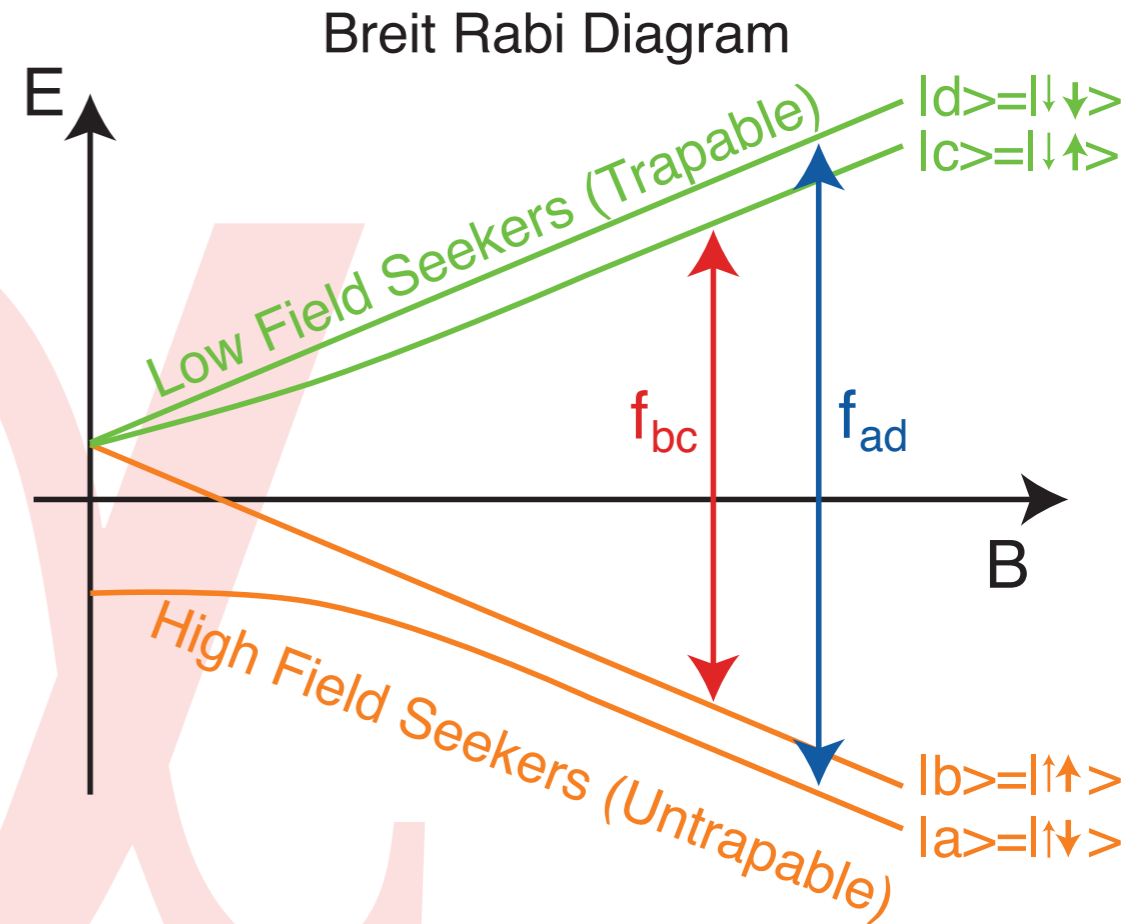
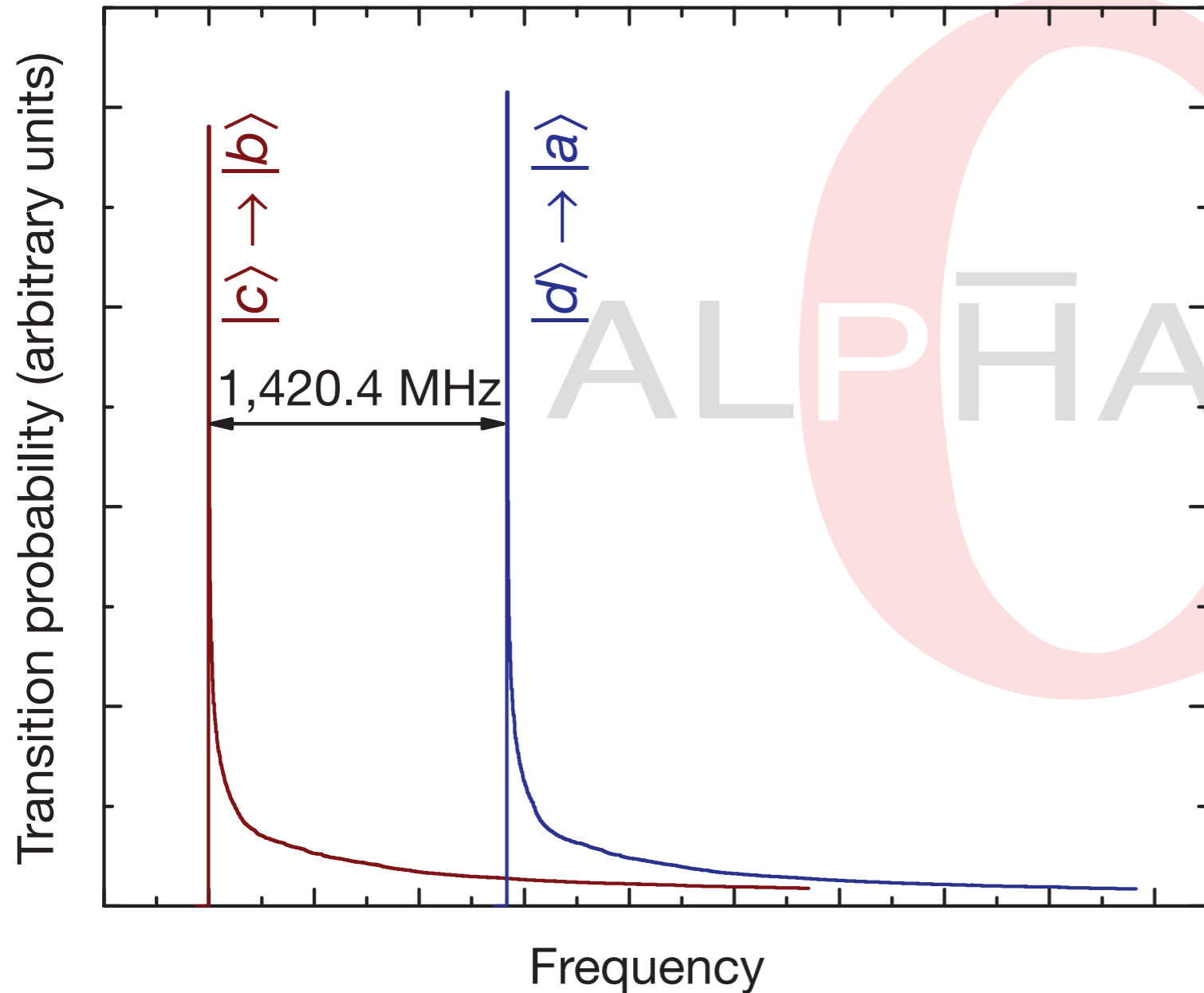
Retournement de spin



Nature, March 7th (2012)

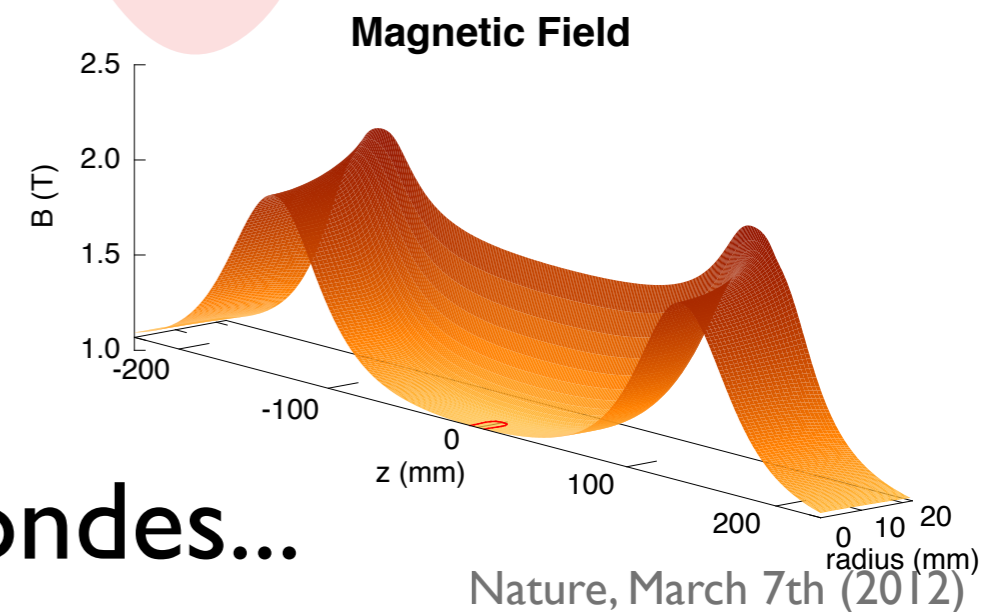
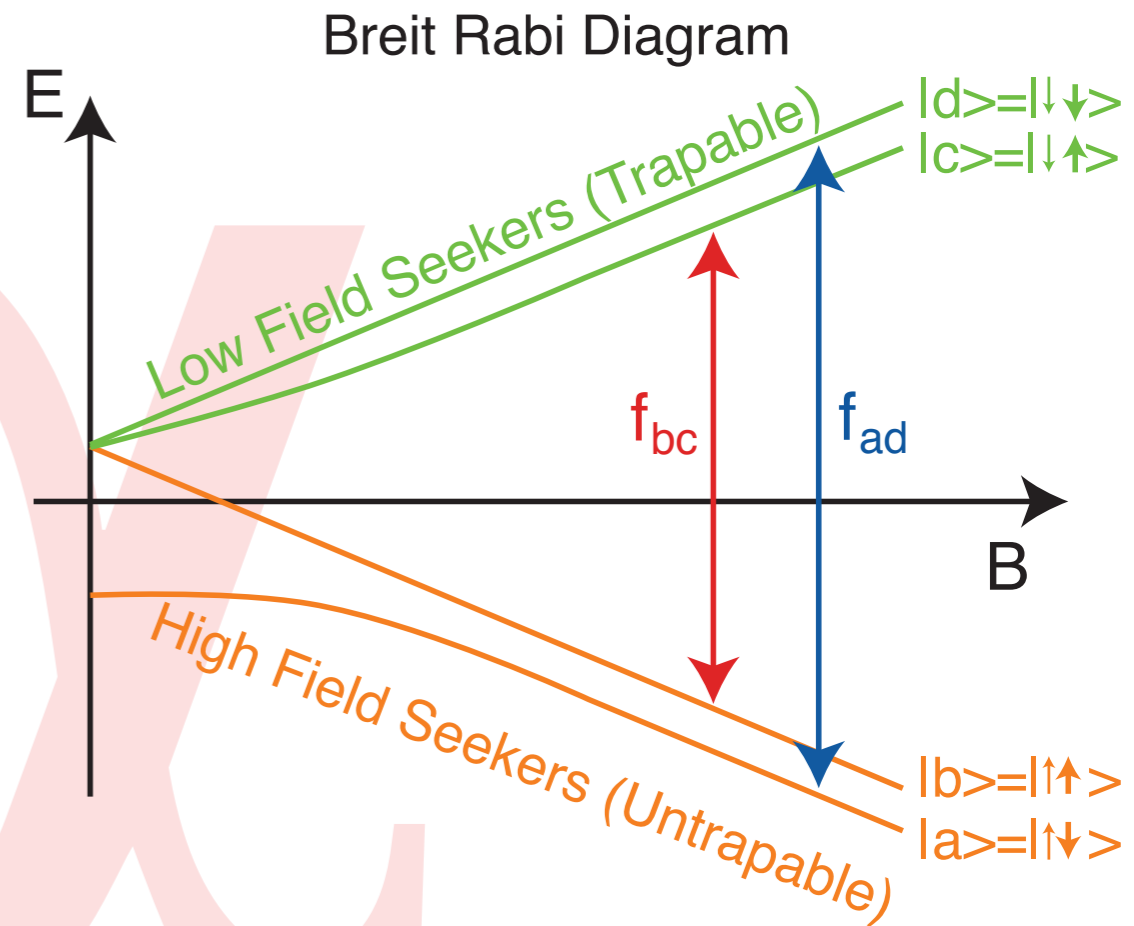
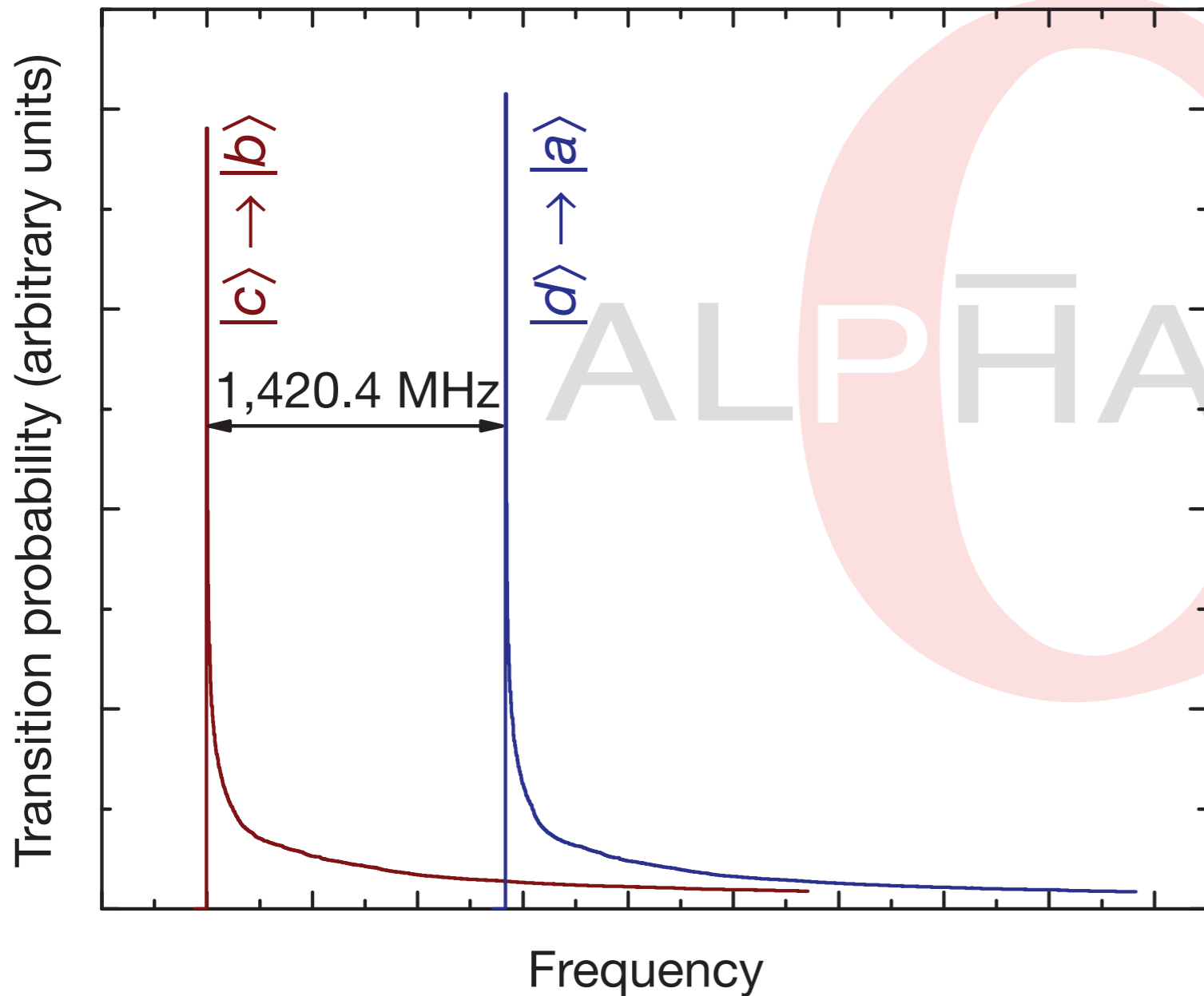
Retournement de spin

- Probabilités de transition



Retournement de spin

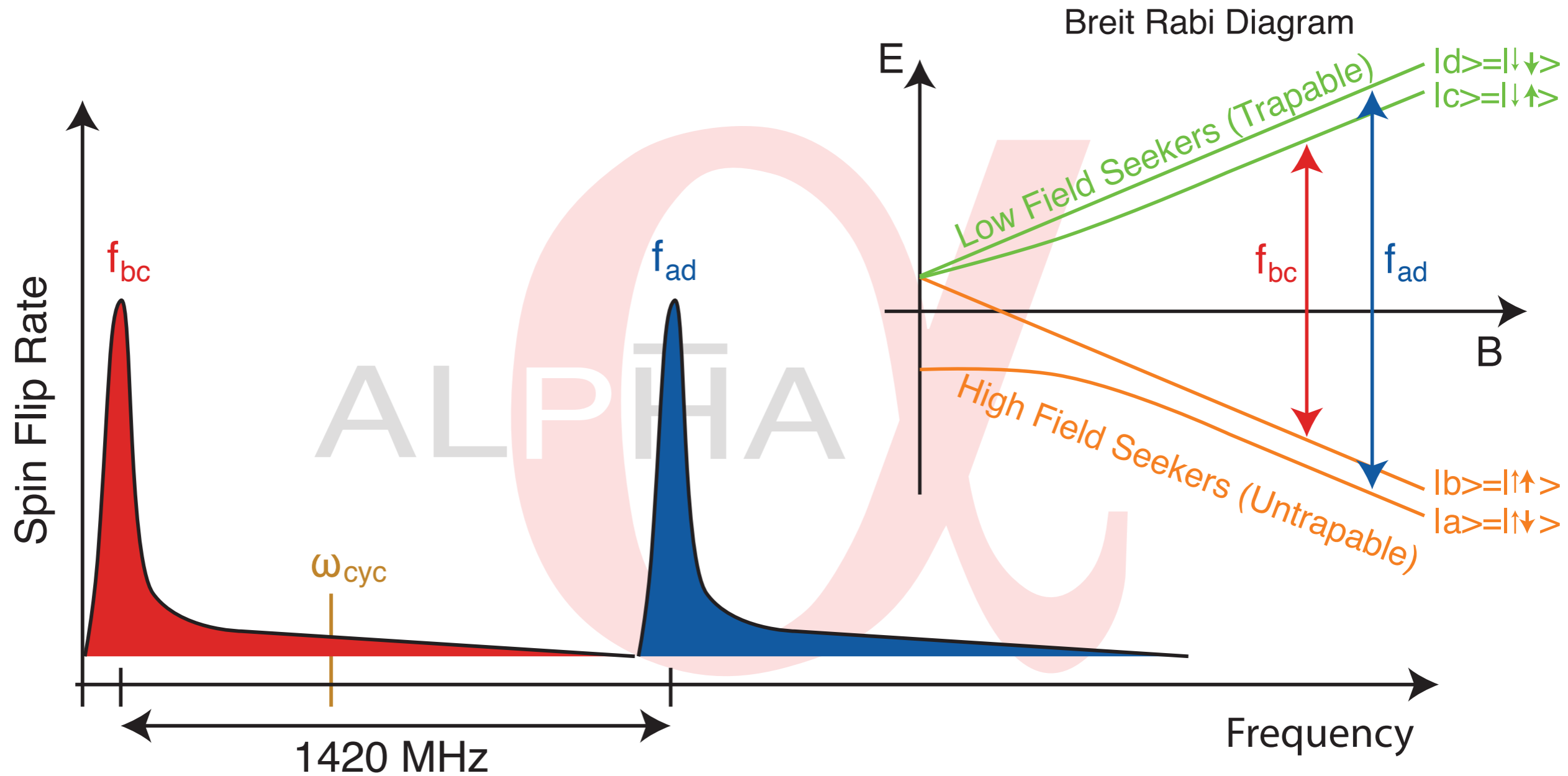
- Probabilités de transition



Trois expériences avec des μ -ondes...

Retournement de spin

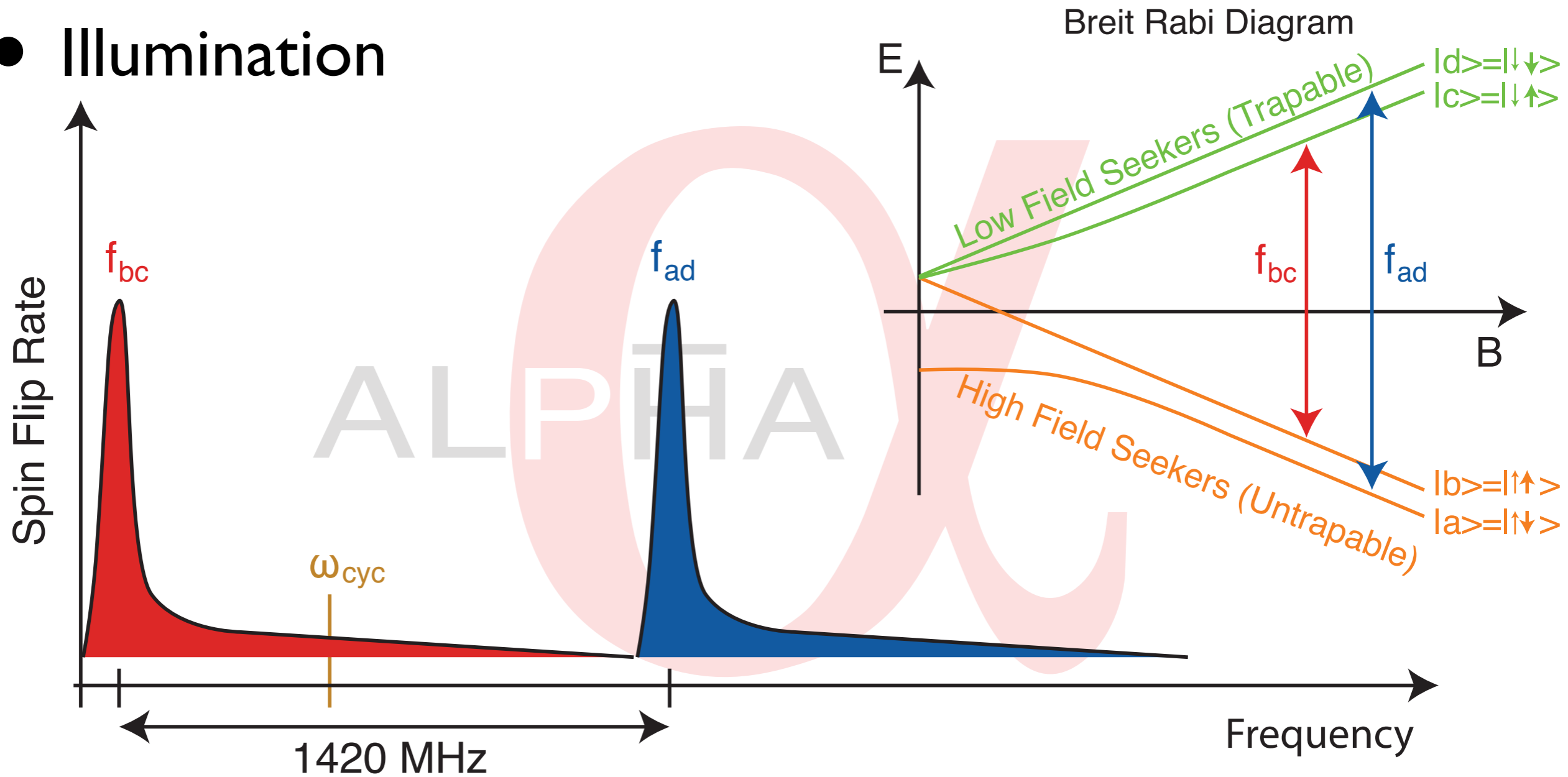
#1



Nature, March 7th (2012)

Retournement de spin

#1 ● Illumination

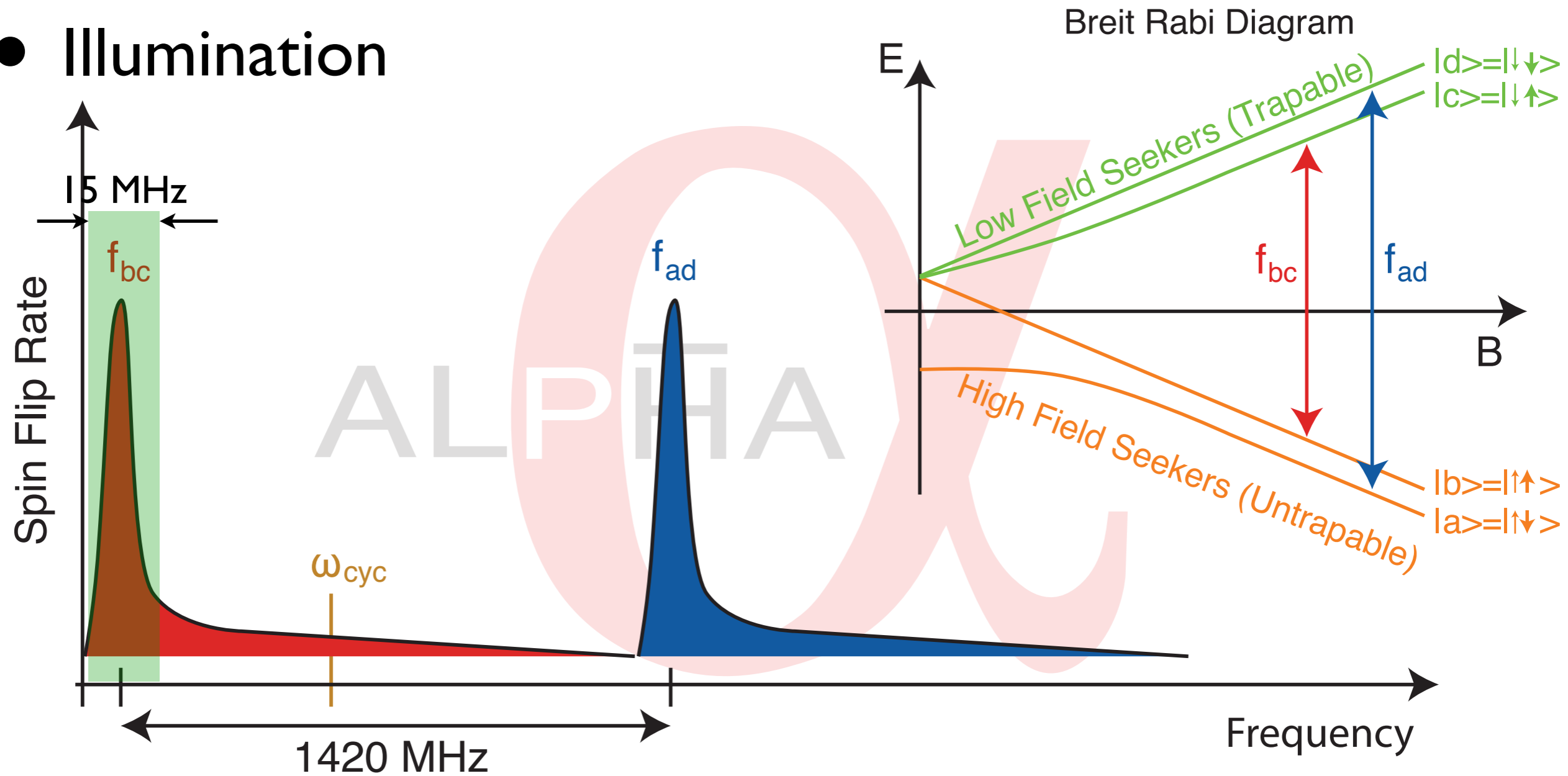


Nature, March 7th (2012)

Retournement de spin

#1

- Illumination



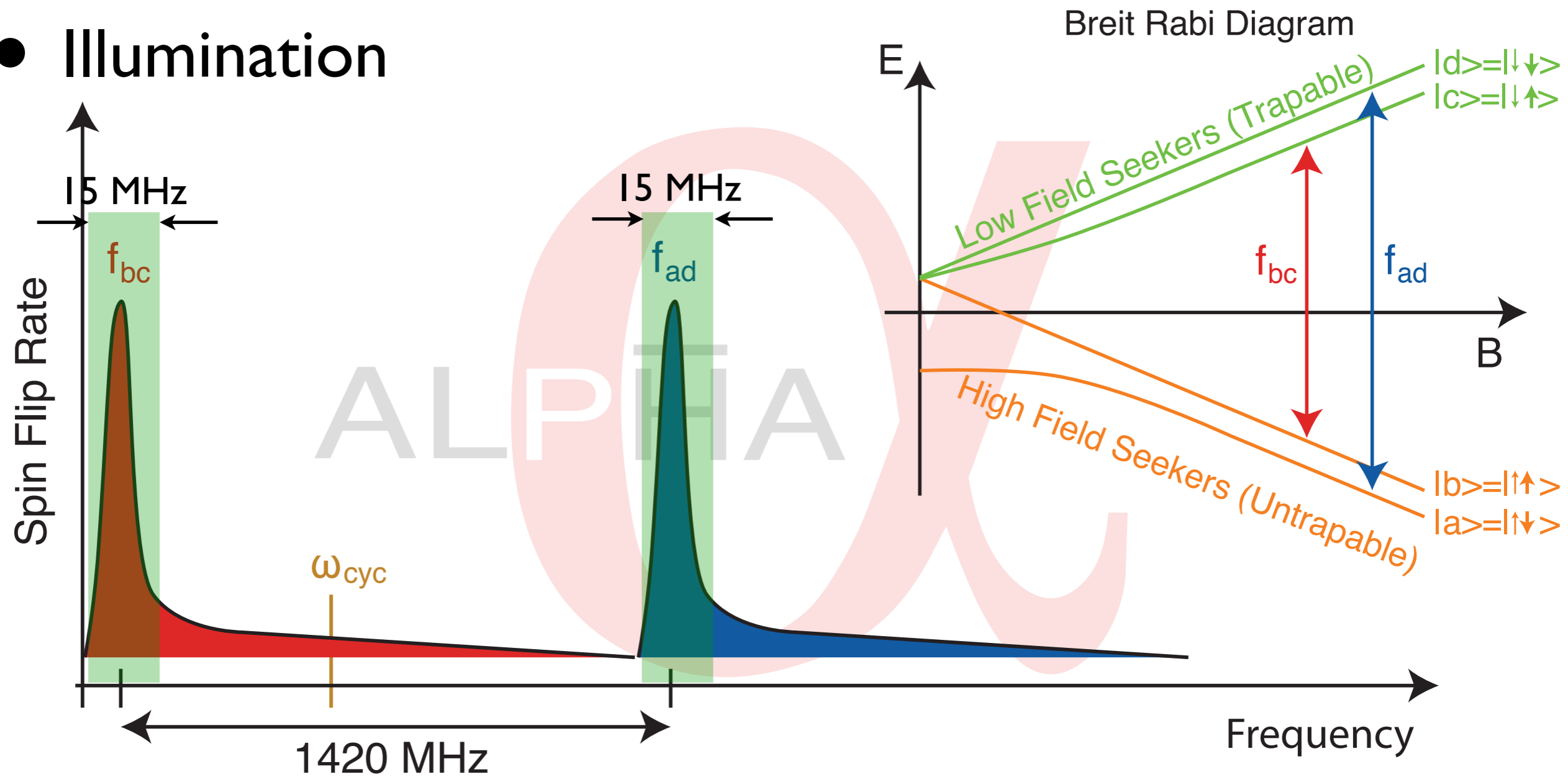
- Chaque transition $6 \times 15s$ (180s en totale) - commençant 60s après capture (ou changement de B..)

Nature, March 7th (2012)

Retournement de spin

#1

- Illumination

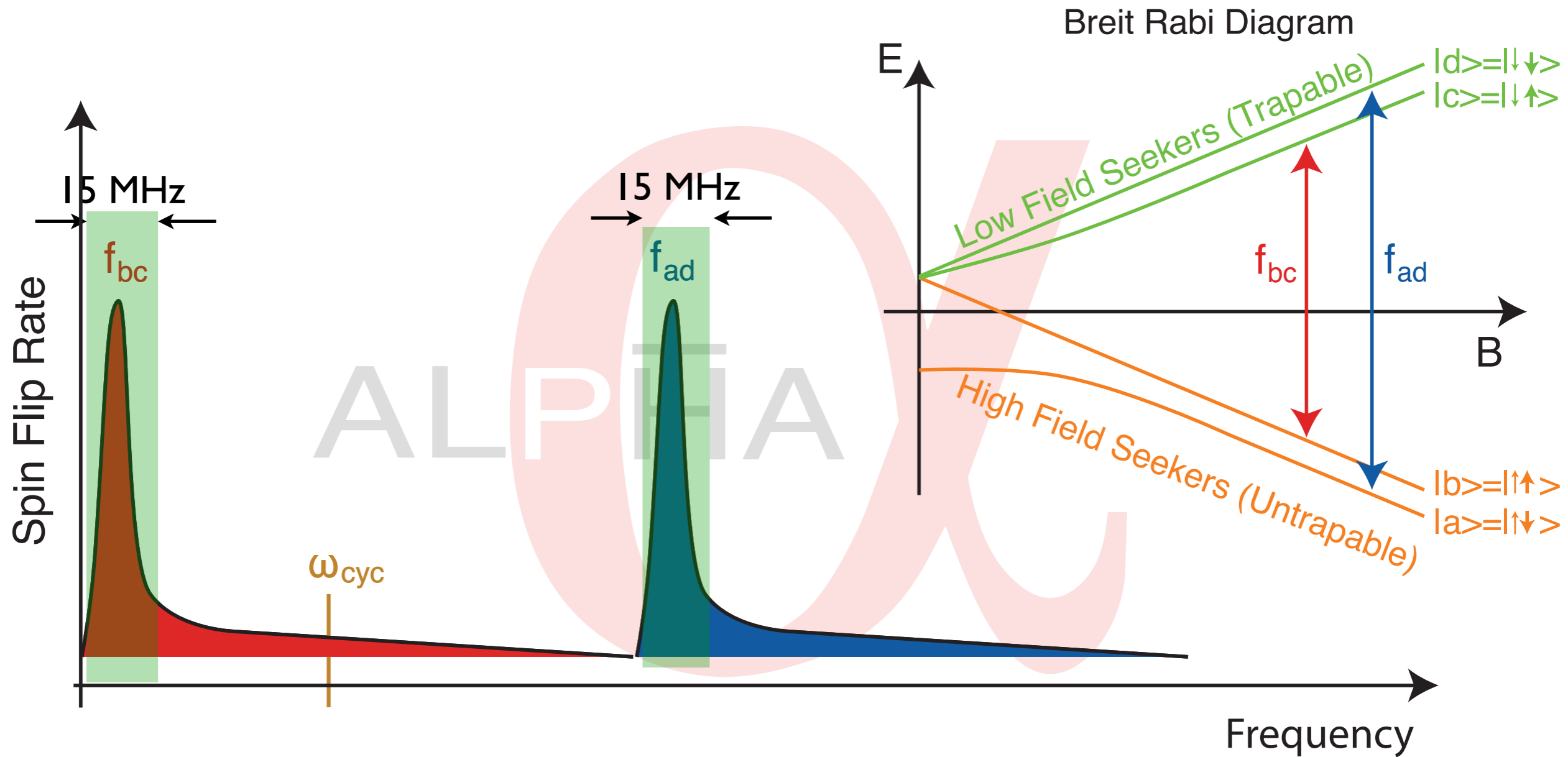


- Chaque transition $6 \times 15s$ (180s en totale) - commençant 60s après capture (ou changement de B..)

Nature, March 7th (2012)

Sur Résonance

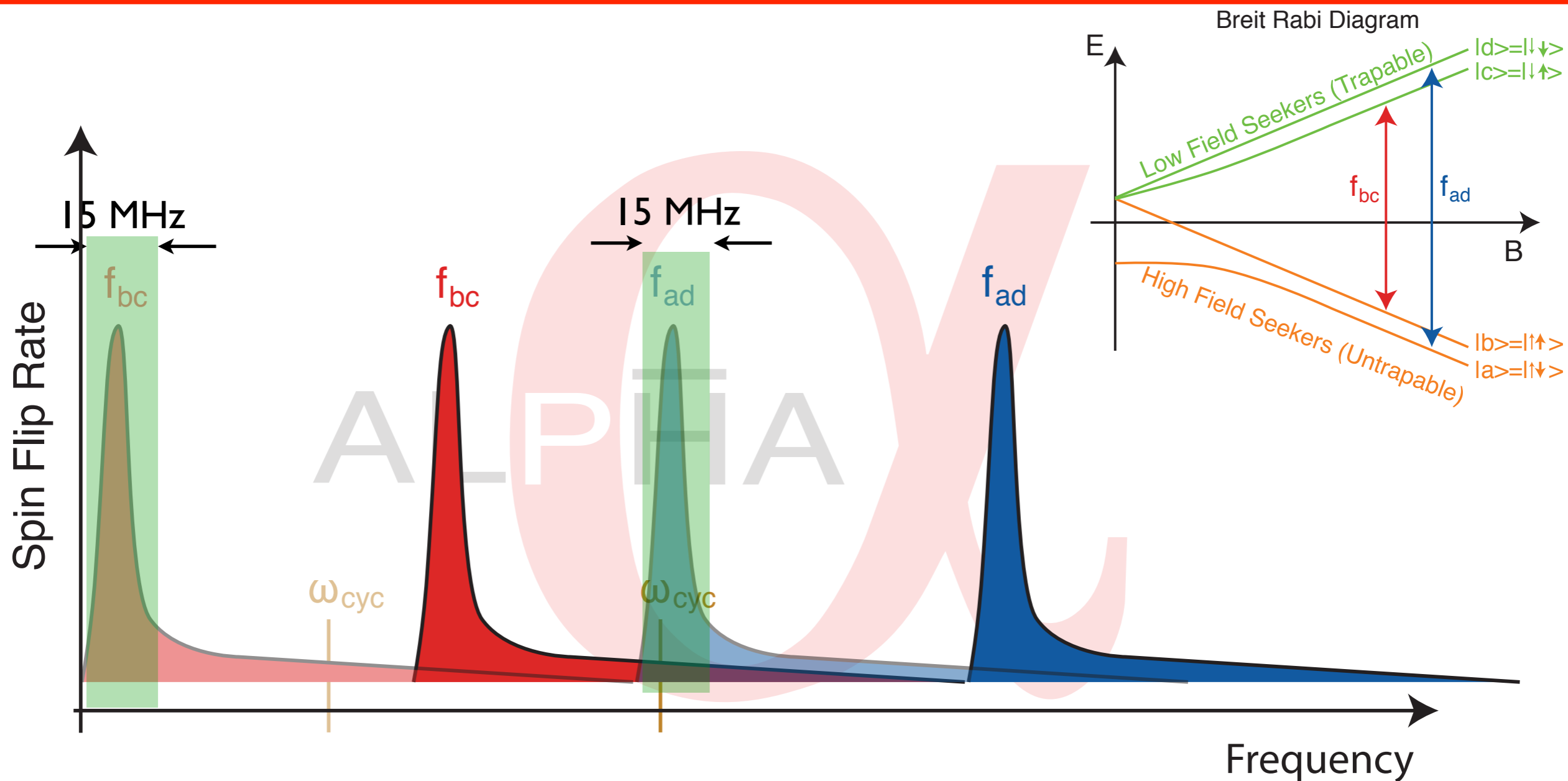
#1



Nature, March 7th (2012)

Hors Résonance

#2

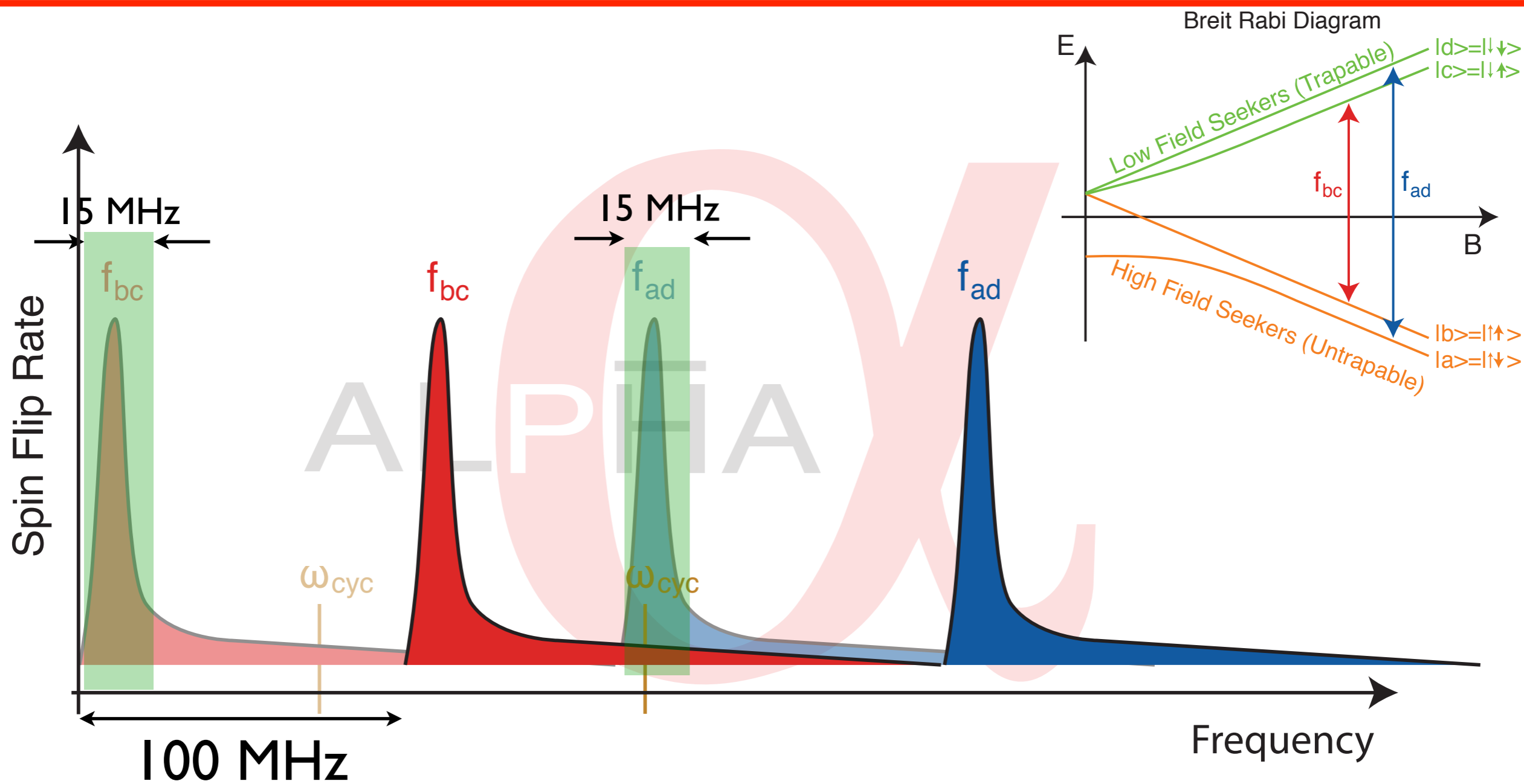


On va hors résonance des μ -ondes en montant le champ **magnétique** après capture, mais avant illumination.

Nature, March 7th (2012)

Hors Résonance

#2

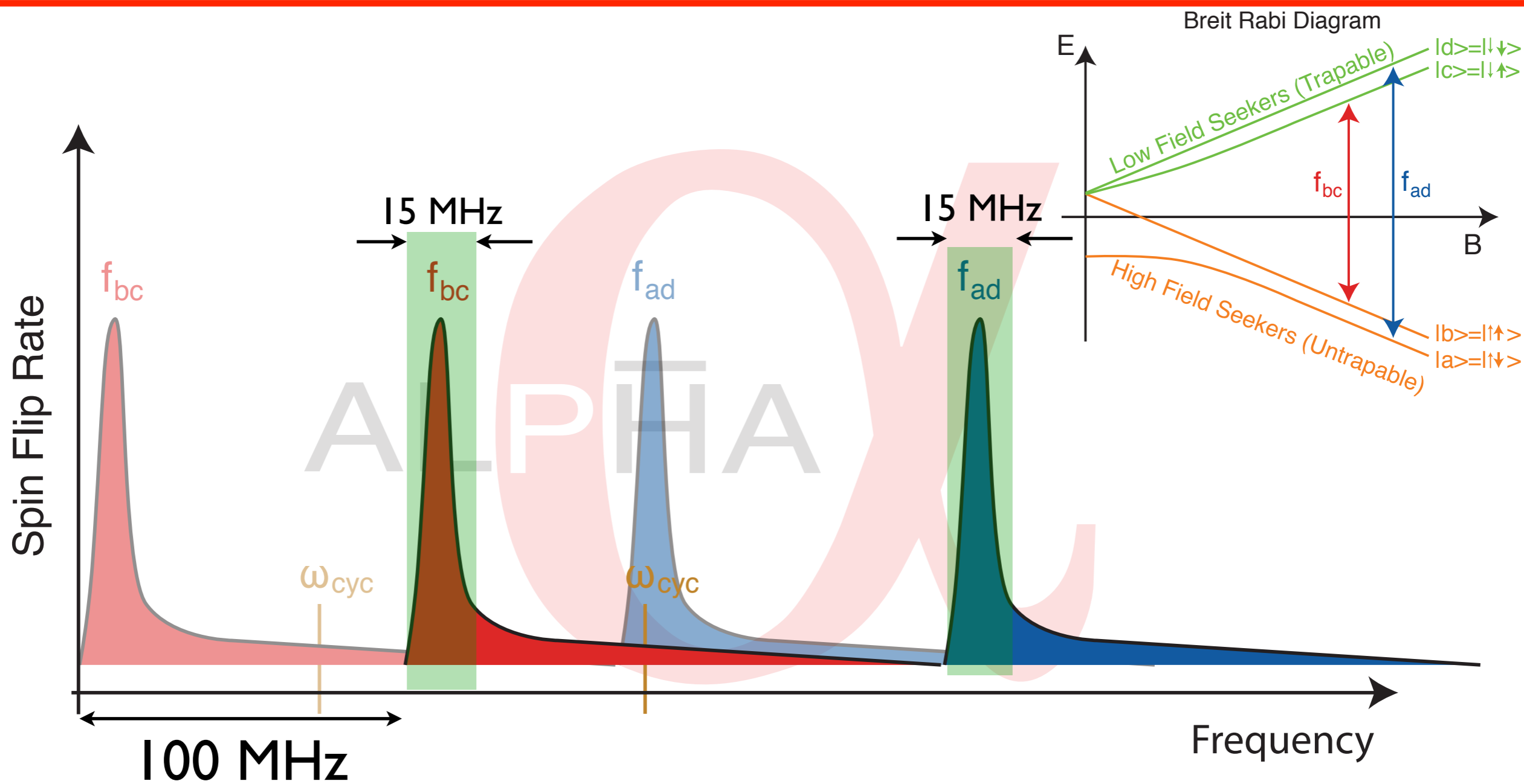


Changement de champs-B (3.5mT) **equivalent** à 100 MHz

Nature, March 7th (2012)

Sur Résonance

#3

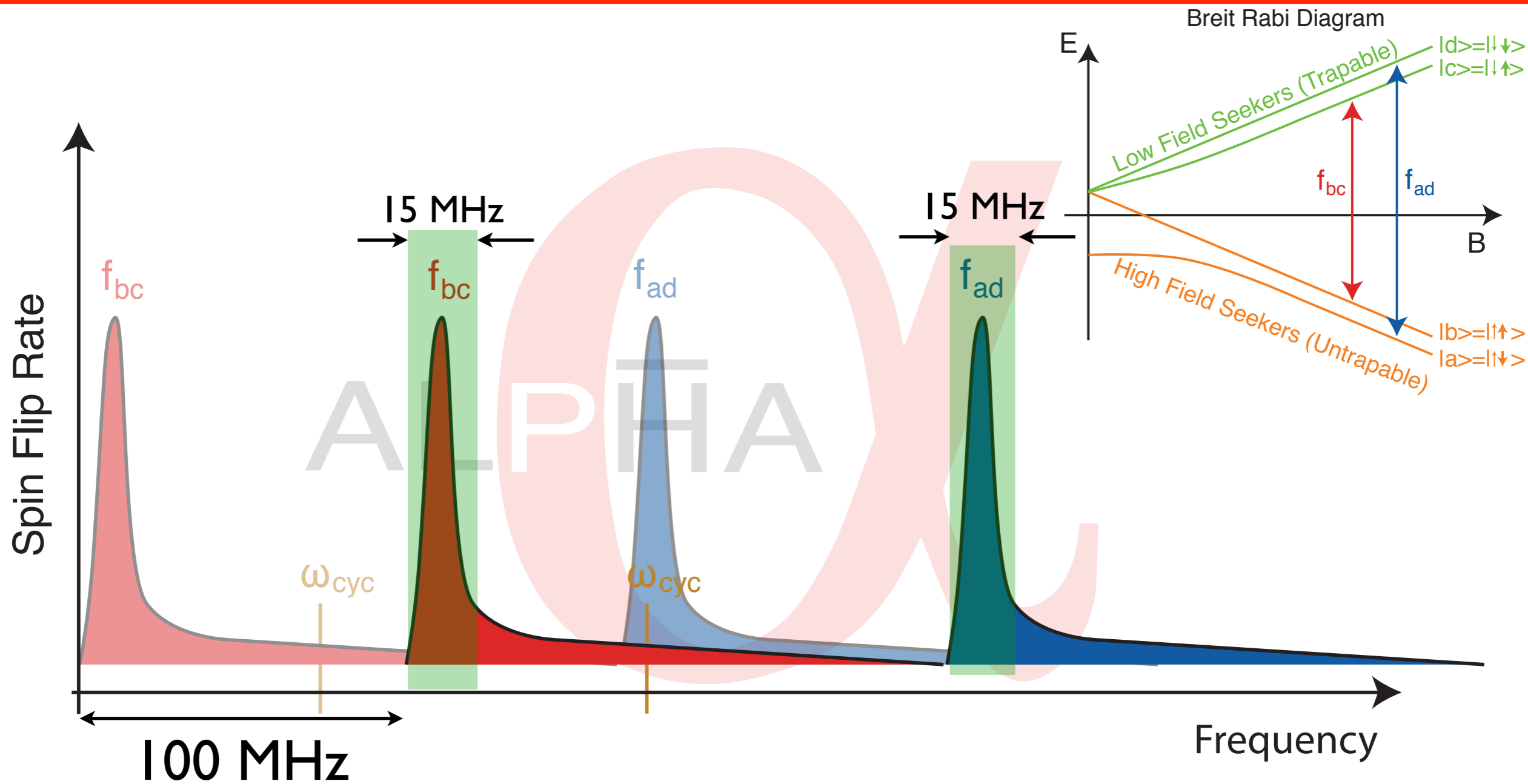


Pour revenir en résonance on change la fréquence des μ -ondes

Nature, March 7th (2012)

Sur Résonance

#3



- Changement de fréquence de +100 MHz

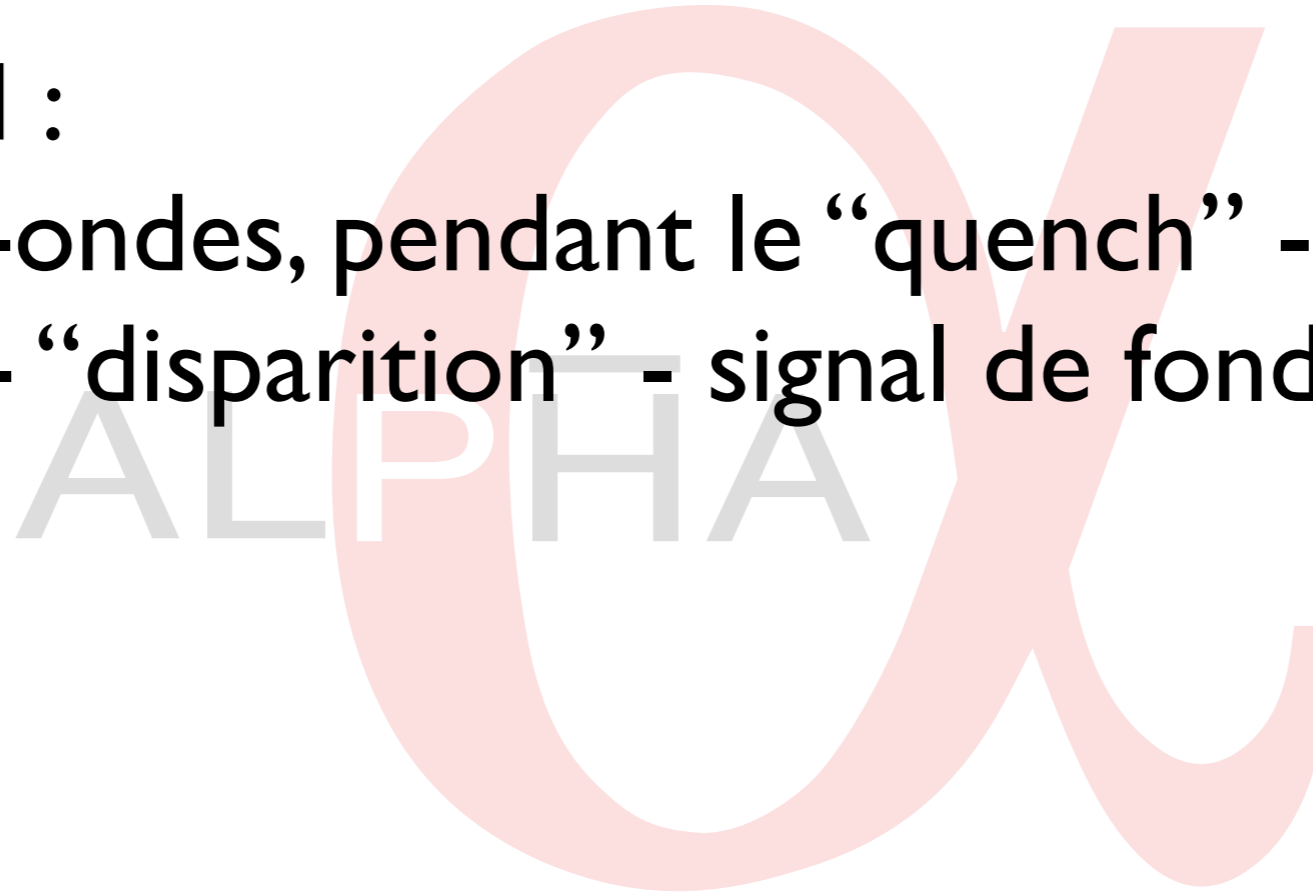
Nature, March 7th (2012)

Deux façon de regarder

ALP̄H̄A

Deux façon de regarder

- Standard :
Après μ -ondes, pendant le “quench” - 30ms
mesure - “disparition” - signal de fond : 47 mHz.



Deux façon de regarder

- Standard :
Après μ -ondes, pendant le “quench” - 30ms
mesure - “disparition” - signal de fond : 47 mHz.
- Nouveau :
“apparition” - regarde **pendant** illumination avec
 μ -ondes. Nouveau analyse de signaux : fond: 4.7
mHz, mais 25% de réduction de signal.
[Rappel: On cherche ~ 1 événement pendant 15s]

Sommaire : Disparition

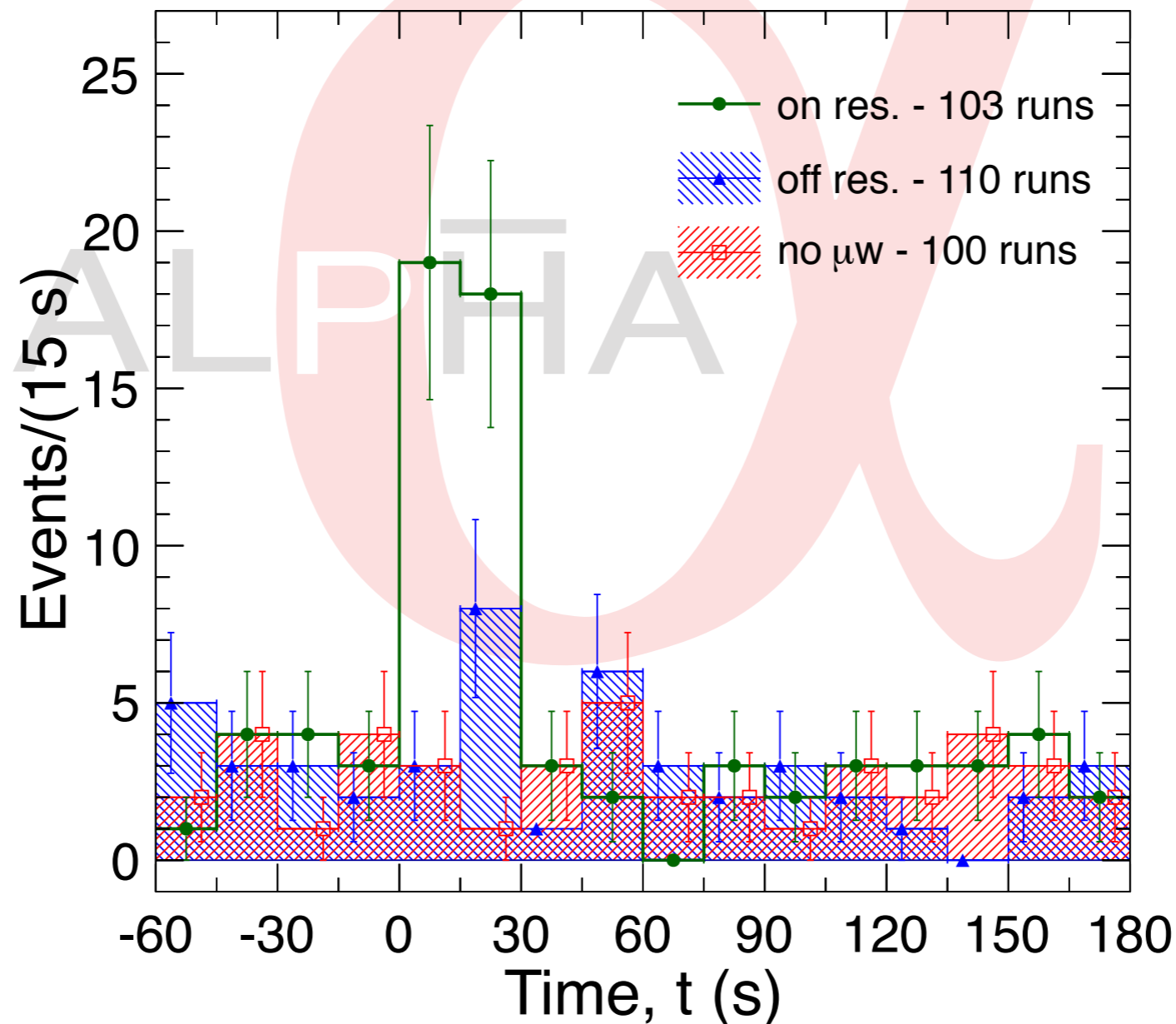
- Observation d'une baisse claire de "sur résonance" relatif à "hors résonance"

	# Essais	Anti-hydrogène restant	Taux
SUR résonance	103	2	0.02 ± 0.01
HORS résonance	110	23	0.21 ± 0.04
PAS DE μ -ondes	100	40	0.40 ± 0.06

$$p = 1.0 \times 10^{-5}$$

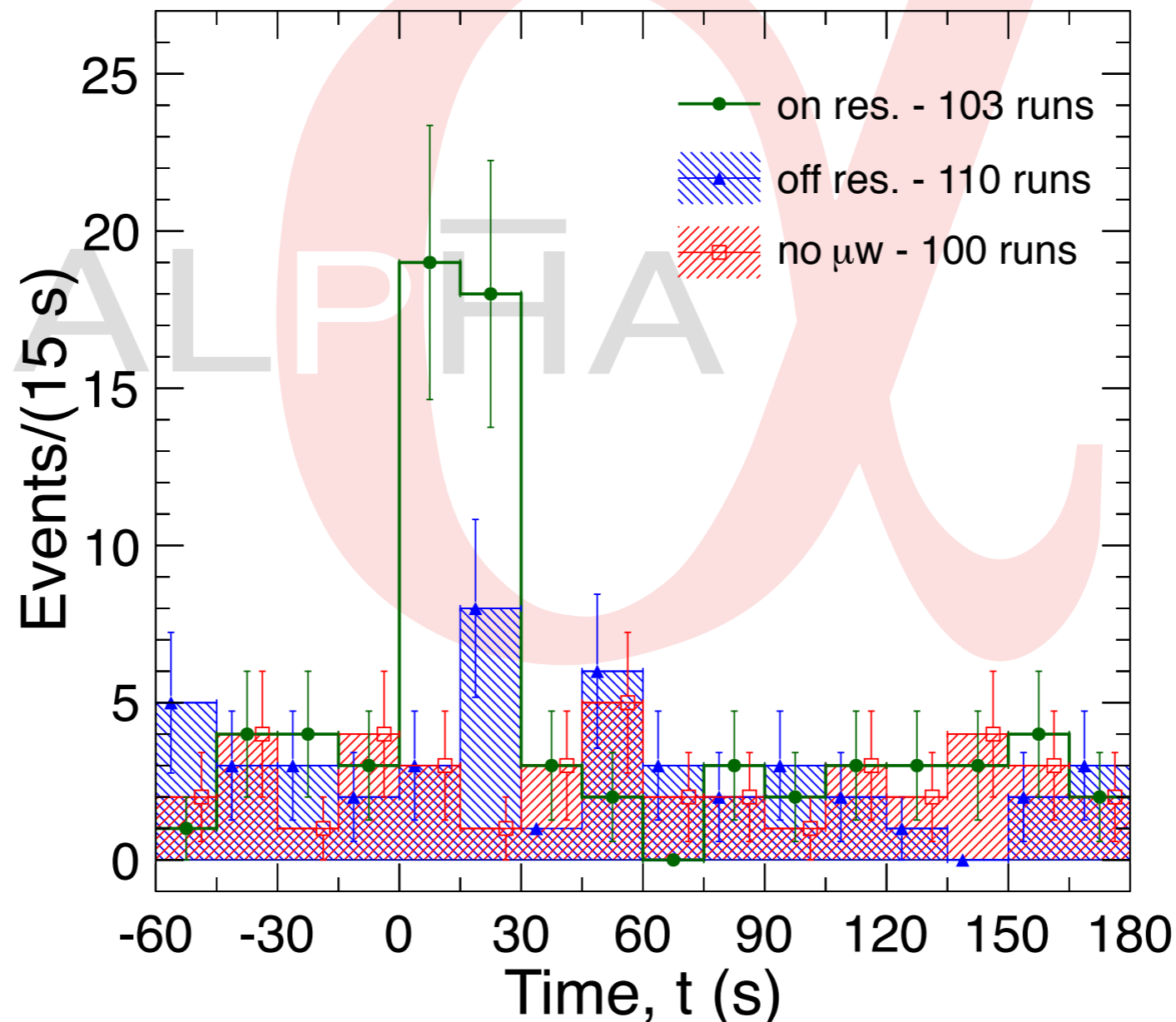
Apparition

- Excès significative pendant deux premier périodes d'illumination : 0-15s + 15-30s



Apparition

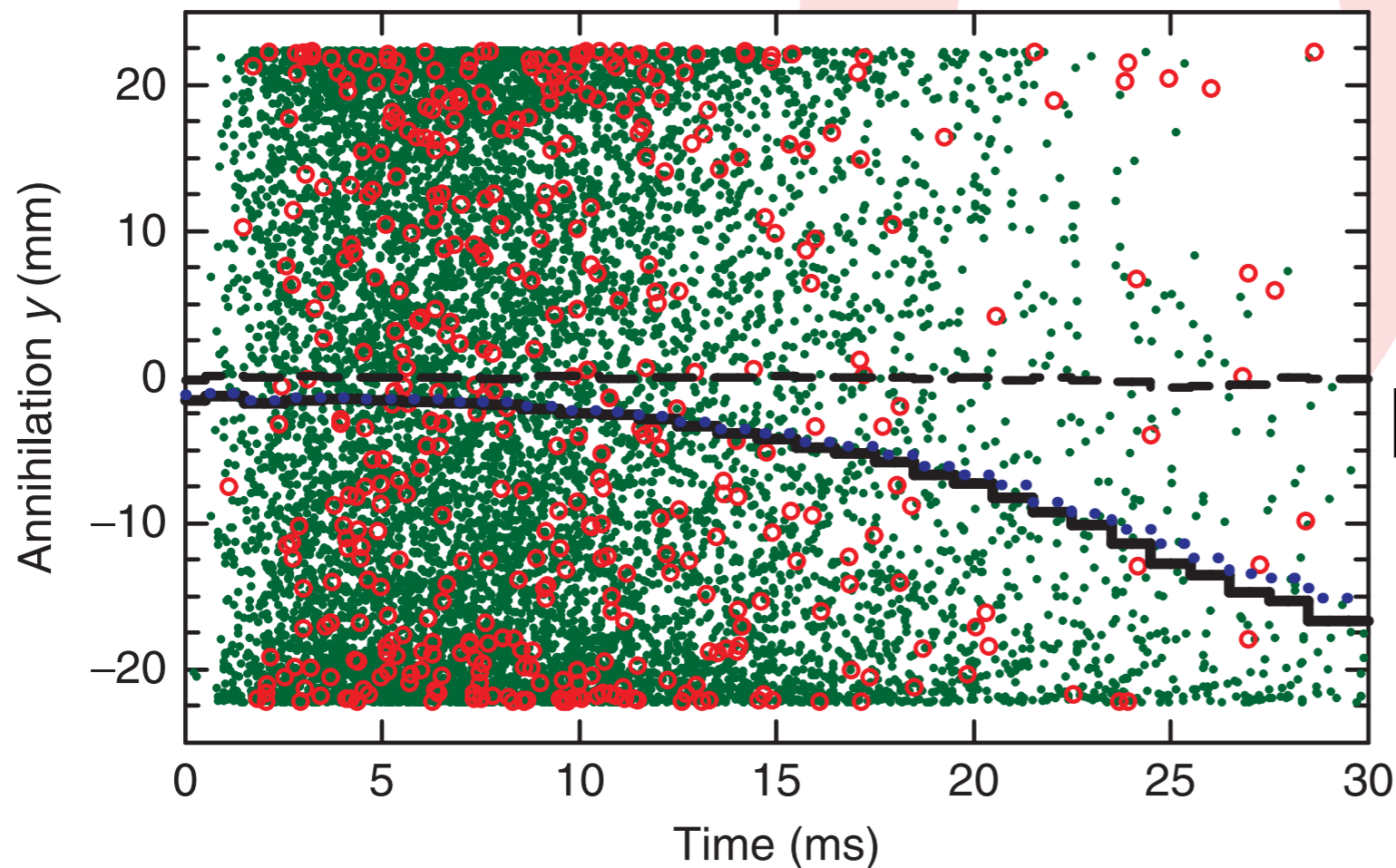
- Excès significative pendant deux premier périodes d'illumination : 0-15s + 15-30s



NB: 3 | 3 expériences 20min chaque un -> 104h - 2w (min)

Première regard sur la gravitation

- Notre détecteur d'annihilations efficace et sensible avec la coupure "lente" de notre piège permet un premier regard sur la gravitation ...



Simulation pour
 $M_{\text{gravitation}}/M_{\text{inertie}}=100$

Bilan

ALPĪĀ



Bilan

- On arrive à crée de l'anti-hydrogène - ce qui n'a jamais été possible pour Univers...

ALPHA

Bilan

- On arrive à crée de l'anti-hydrogène - ce qui n'a jamais été possible pour Univers...
- On arrive à piègé l'anti-hydrogène pour assez de temps que l'on envisage de la spectroscopie...

Bilan

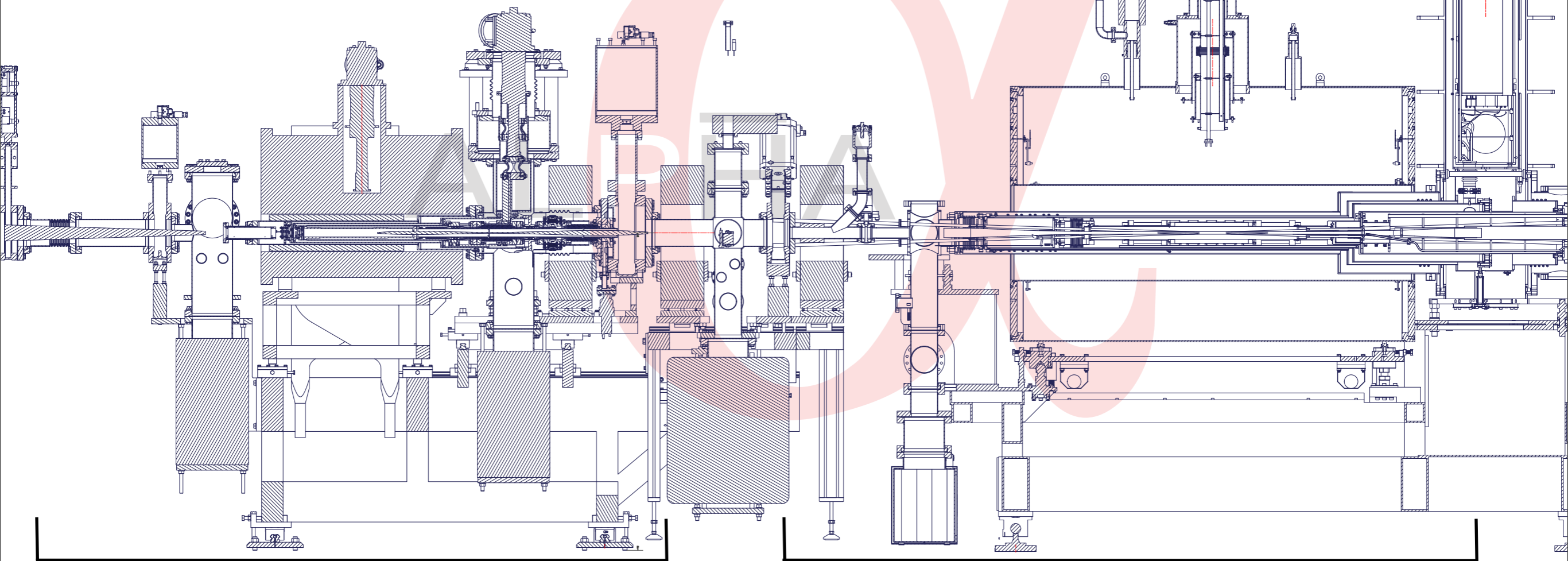
- On arrive à crée de l'anti-hydrogène - ce qui n'a jamais été possible pour Univers...
- On arrive à piègé l'anti-hydrogène pour assez de temps que l'on envisage de la spectroscopie...
- On a fait les premiers mesures (peu précises) sur la structure de l'anti-hydrogène

Où ?
ALPHA
où on va d'ici...

Perspectives d'ALPHA

- Révision vers la première interaction avec laser en 2014

Installed: ~150k p/shot, >10h lifetime



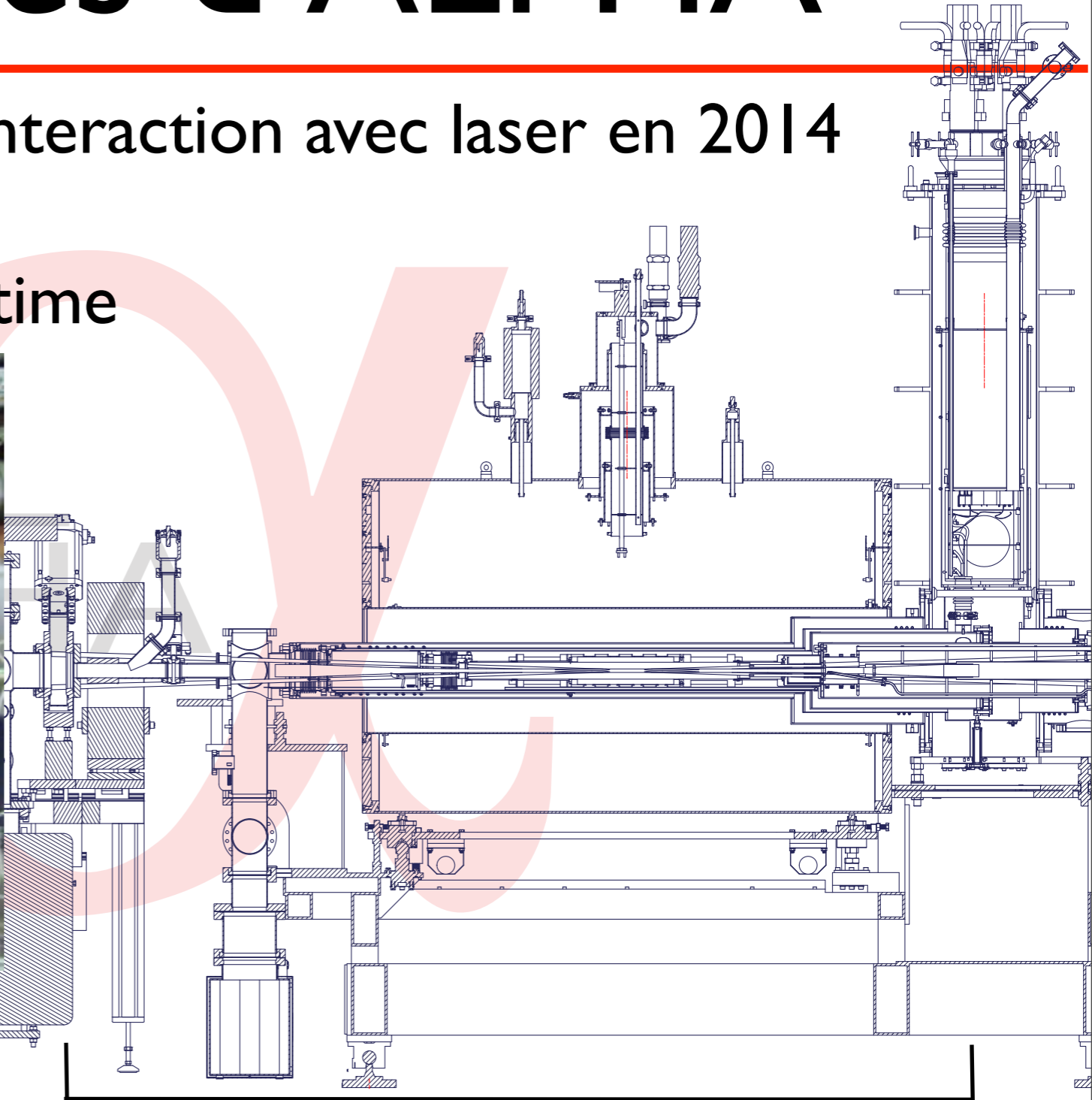
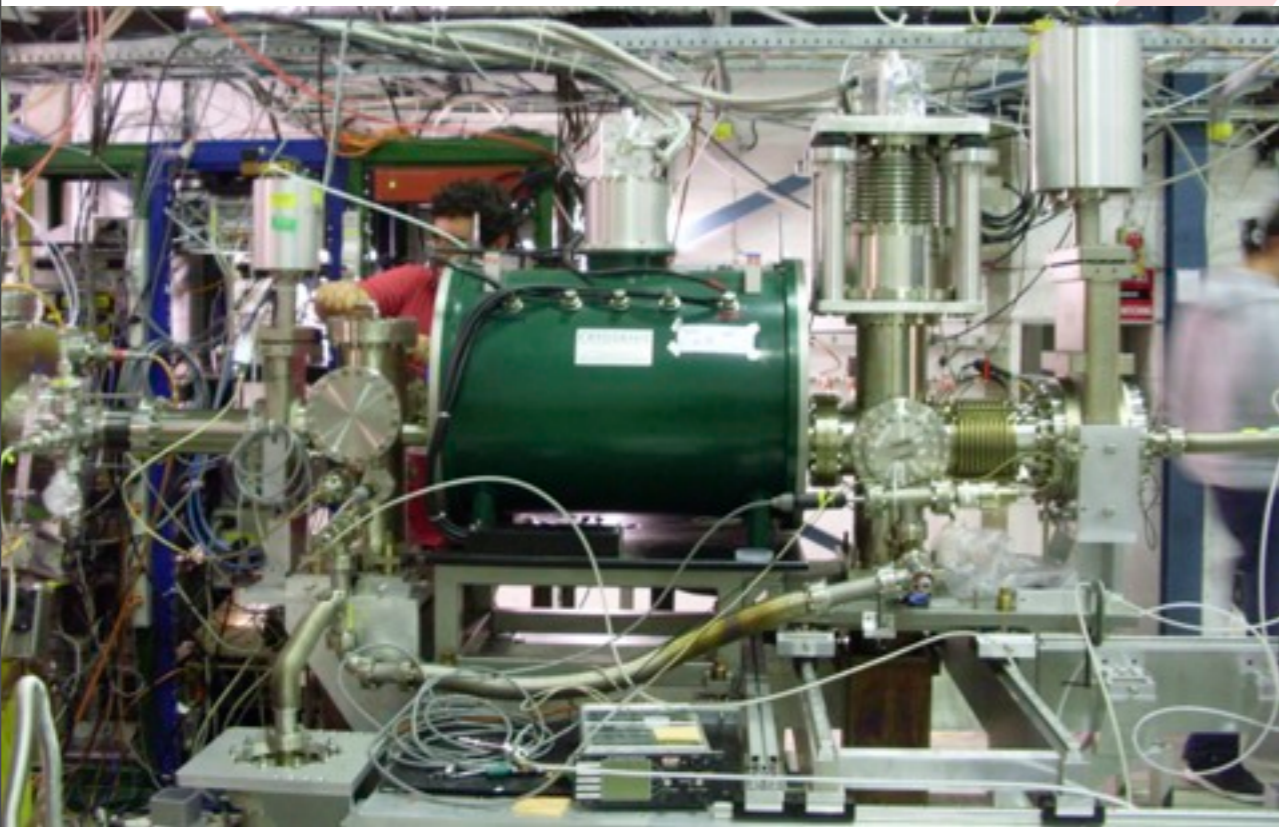
\bar{p} capture et stockage

\bar{H} formation, capture et spectroscopie

Perspectives d'ALPHA

- Révision vers la première interaction avec laser en 2014

Installed: ~150k p/shot, >10h lifetime



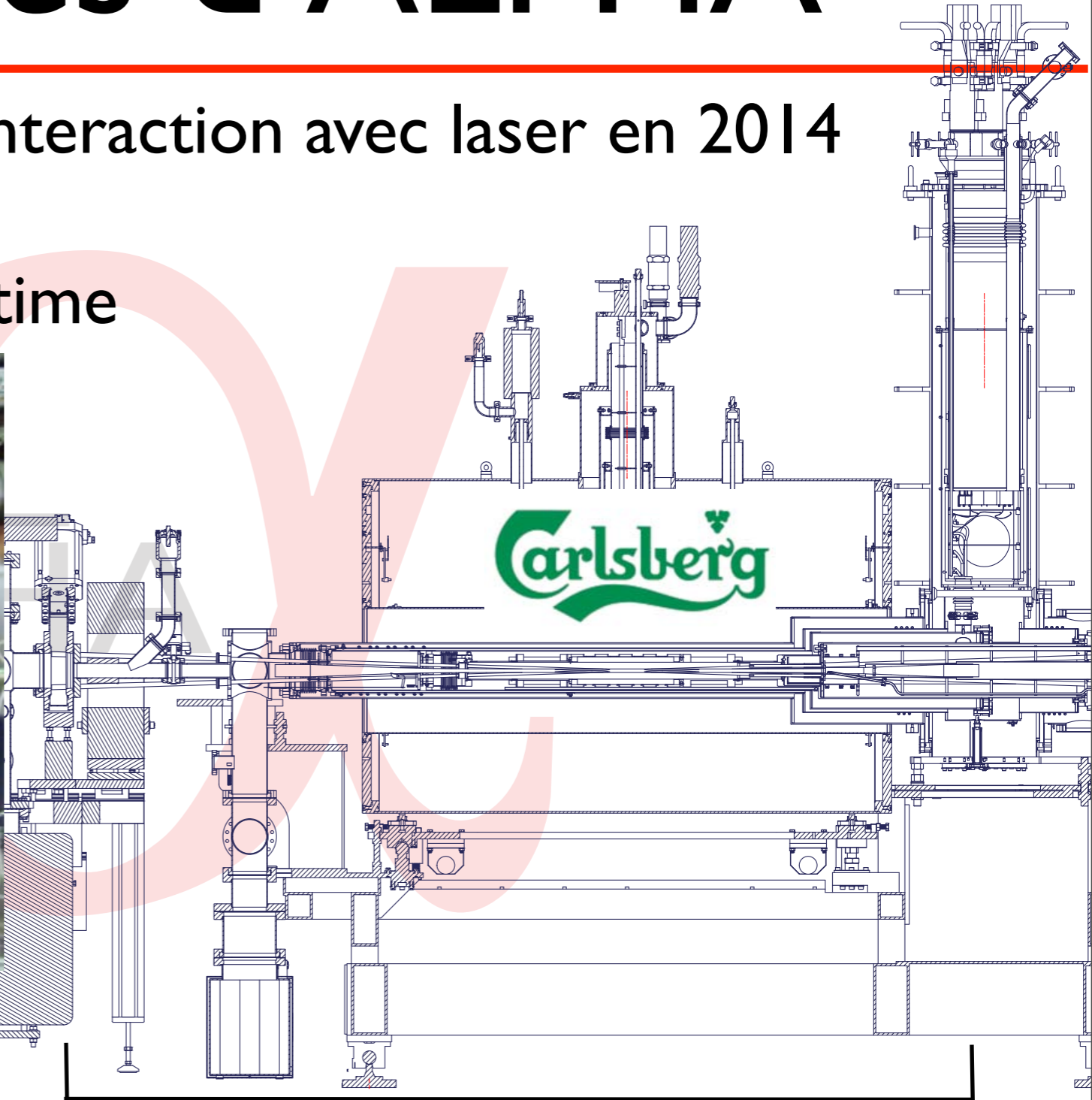
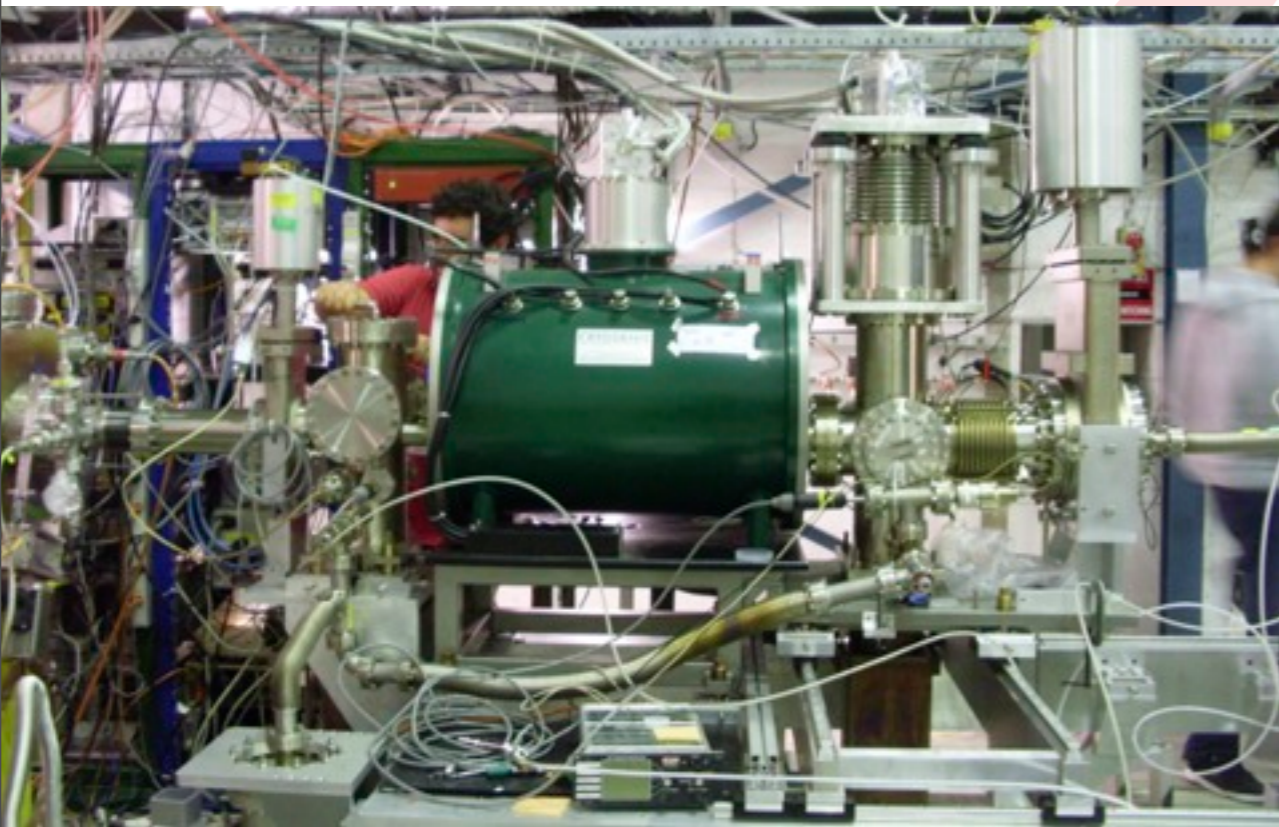
\bar{p} capture et stockage

\bar{H} formation, capture et spectroscopie

Perspectives d'ALPHA

- Révision vers la première interaction avec laser en 2014

Installed: ~150k p/shot, >10h lifetime



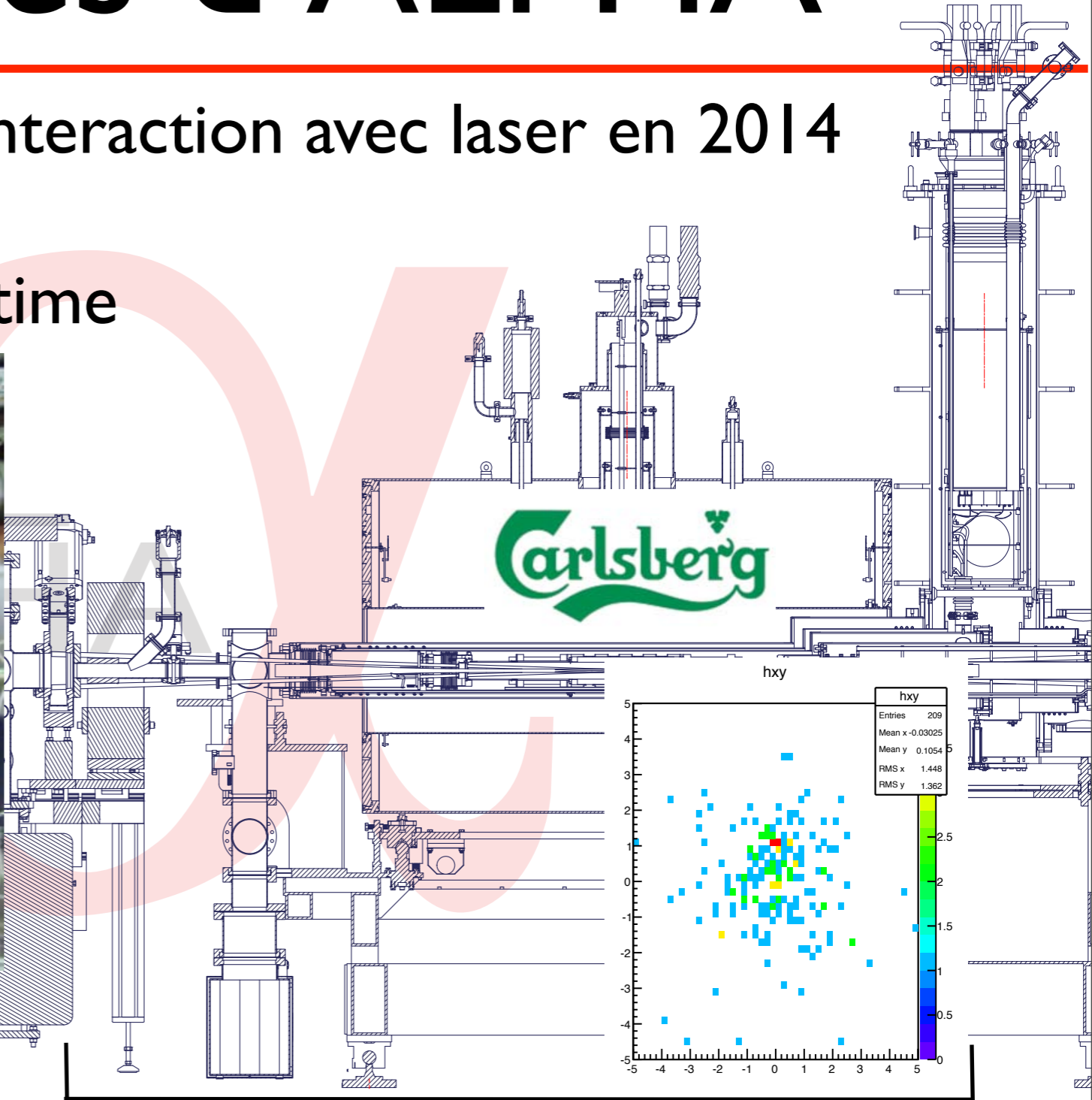
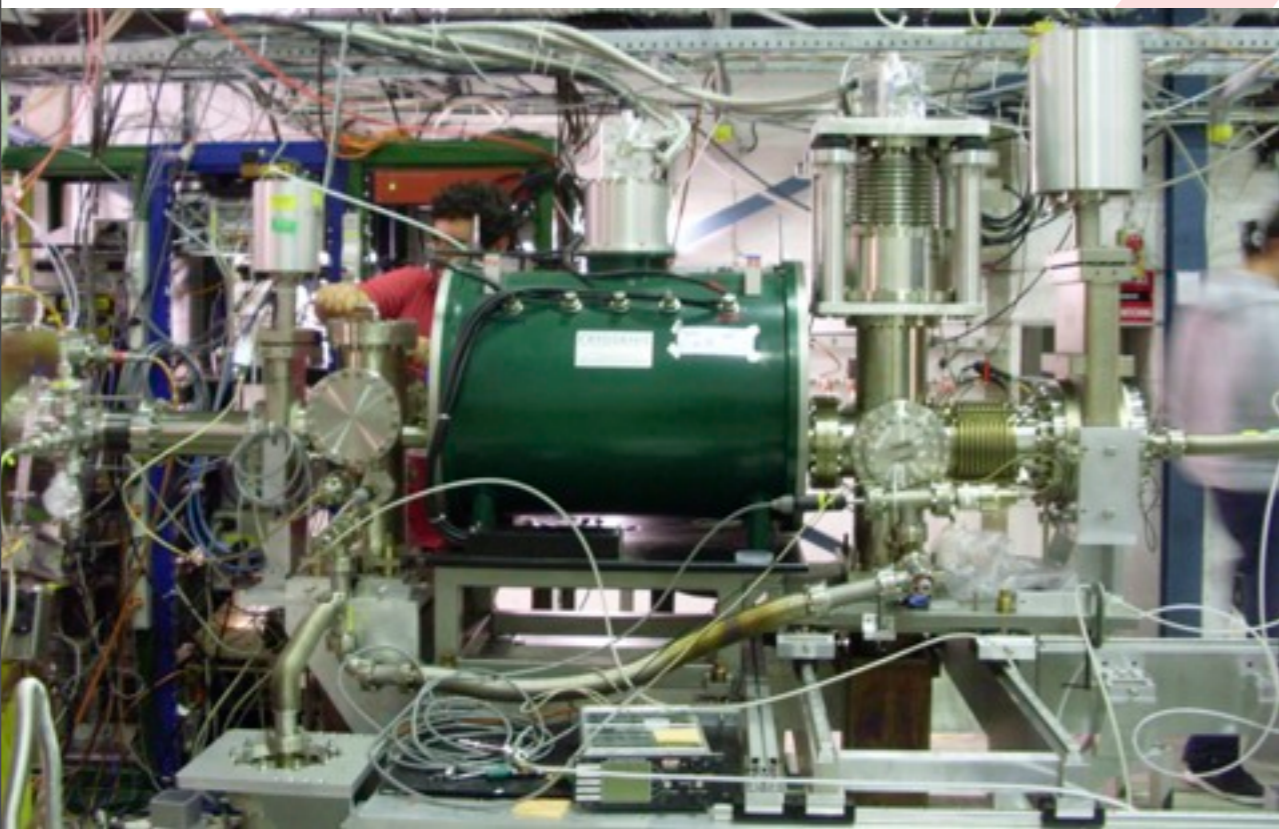
\bar{p} capture et stockage

\bar{H} formation, capture et spectroscopie

Perspectives d'ALPHA

- Révision vers la première interaction avec laser en 2014

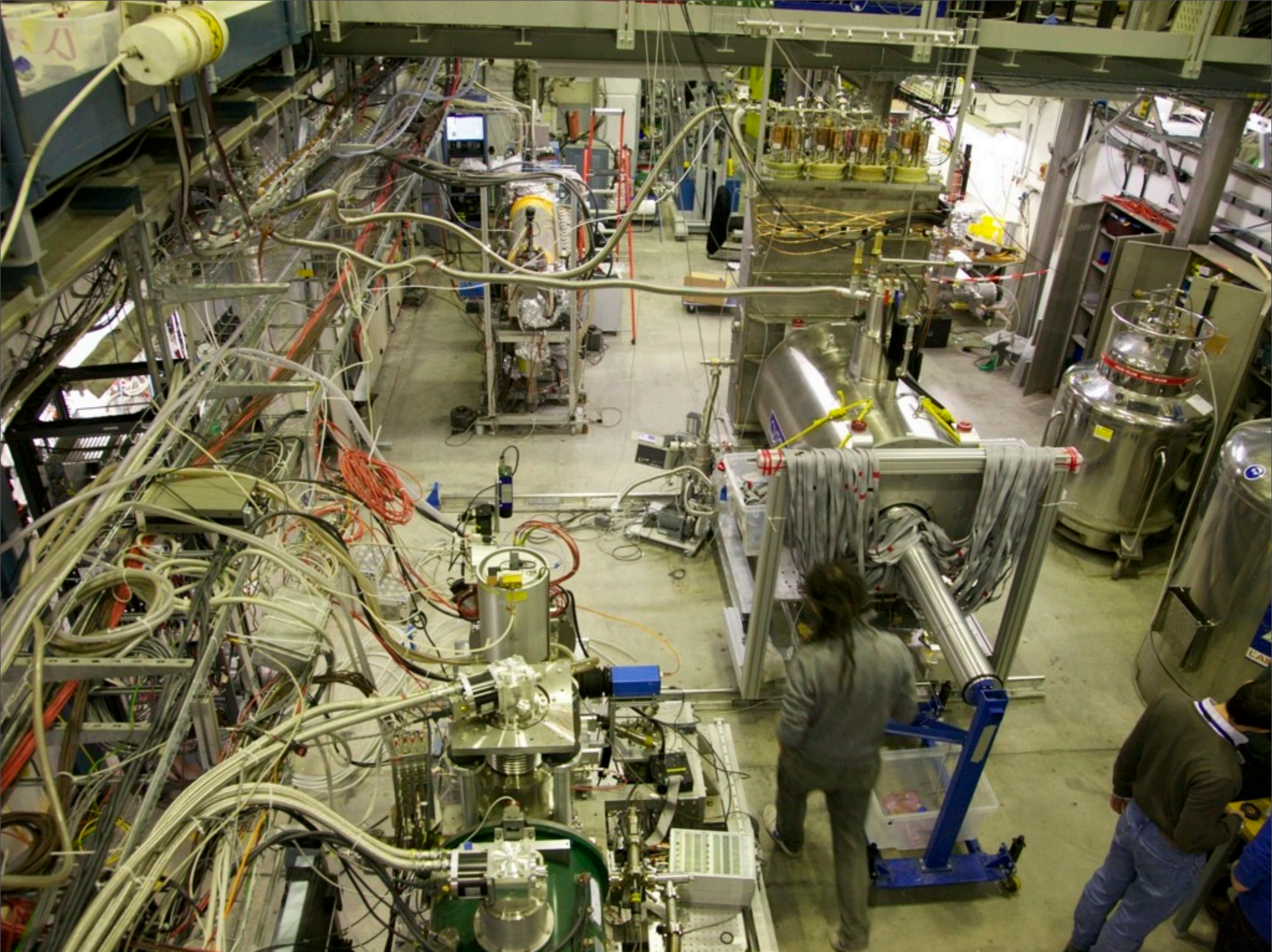
Installed: ~150k p/shot, >10h lifetime



\bar{p} capture et stockage

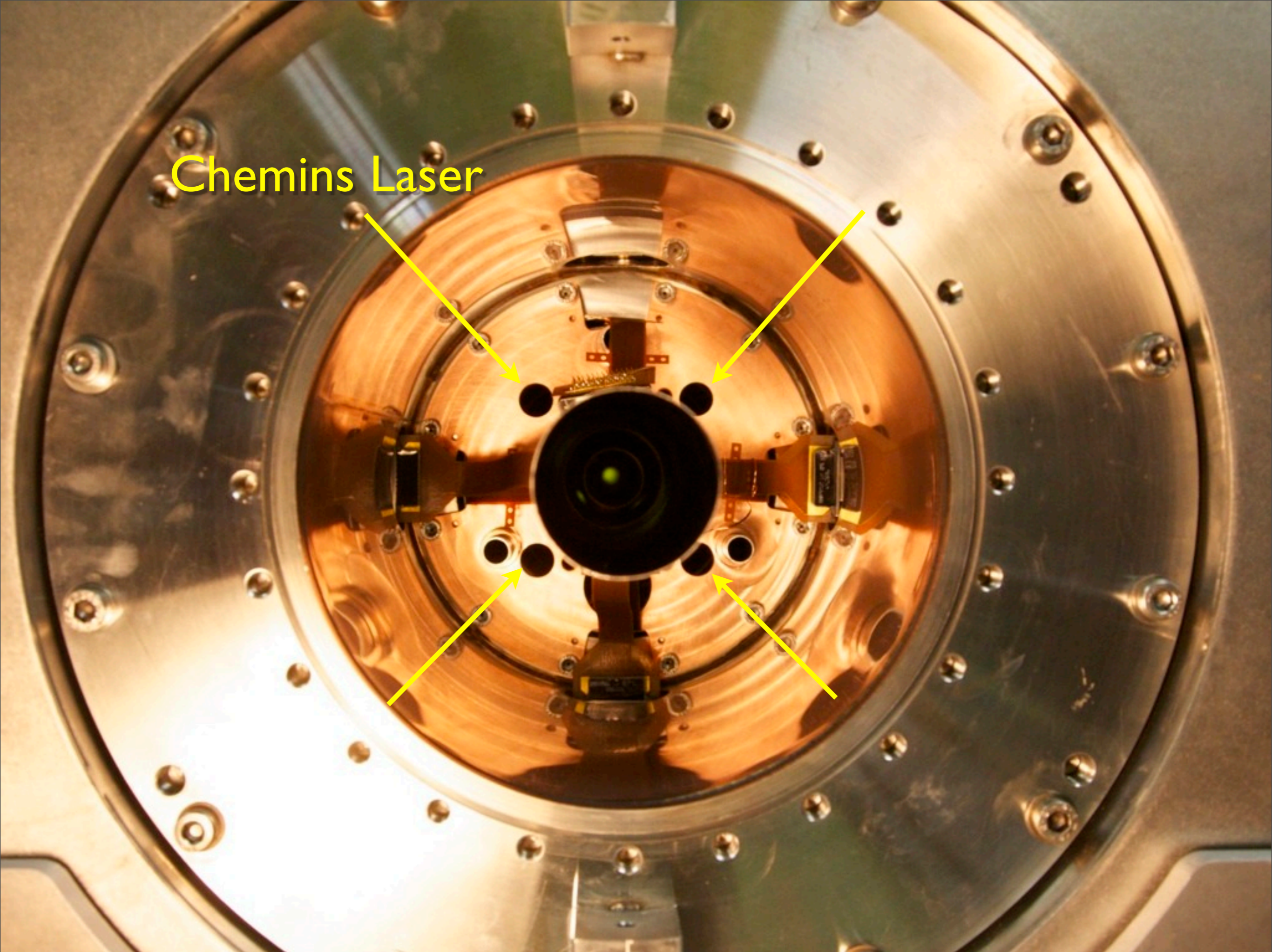
\bar{H} formation, capture et spectroscopie

Approche modulaire - prêt pour ELENA & “ \bar{g} ”



Tuesday, 27 August 13

Chemins Laser





Merci de votre attention

Références Populaires

- “Antihydrogen in a bottle”, M. Charlton, S. J. Eriksson, C.A. Isaac, N. Madsen and D. P. van der Werf, Phys. Edu. 48, 212 (2013) (en anglais)
- “Cold antihydrogen: a new frontier in fundamental physics”, Roy. Soc. Phil. Trans. A, **368**, 3671 (2010) (en anglais) [publique!]