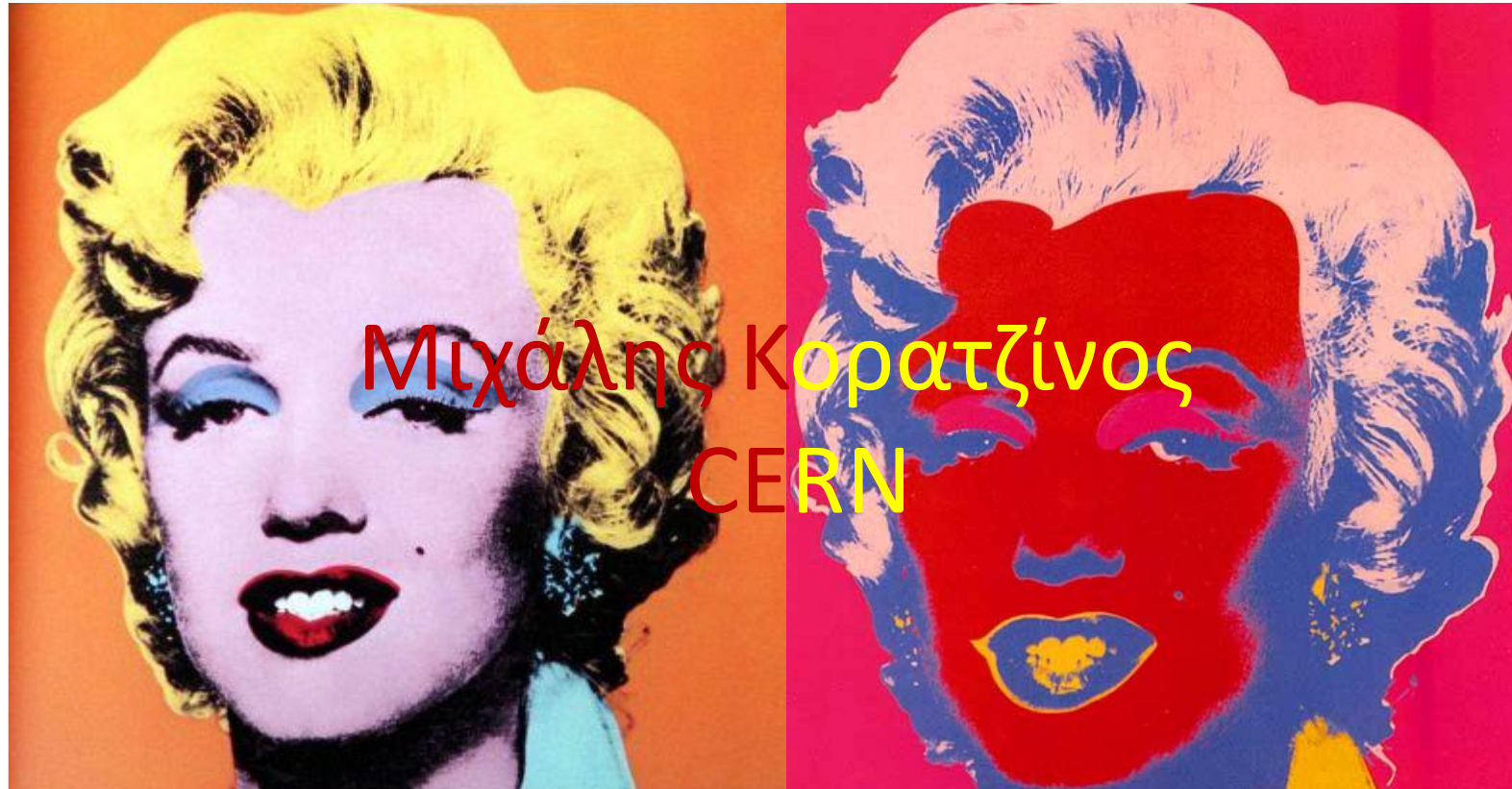
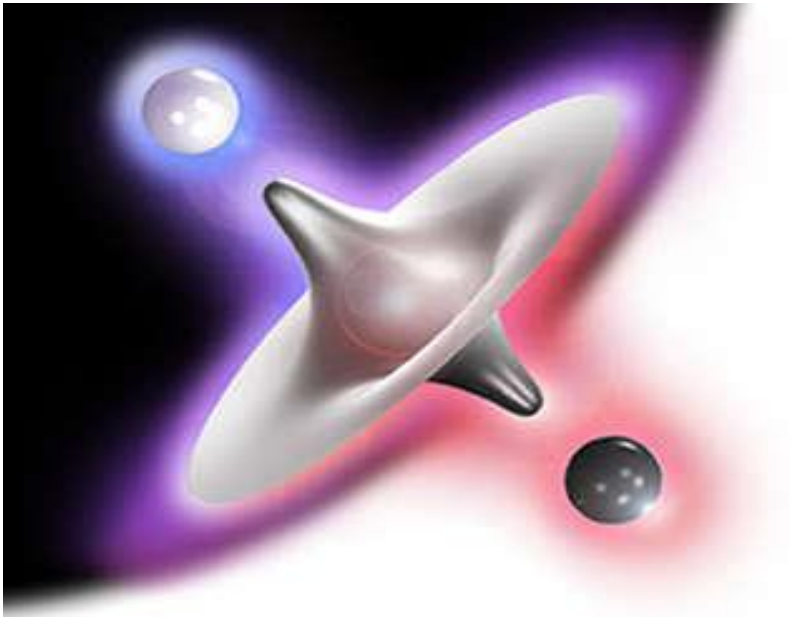


Αντιύλη



Πρόγραμμα καθηγητών Φυσικής μέσης εκπαίδευσης του CERN,
Αύγουστος 2010.

Ερωτήσεις



Επτά ερωτήσεις

Τι είναι αντιύλη

Πώς την φτιάχνουμε

Που την φτιάχνουμε

Το μυστήριο της αντιύλης

Πώς μπορούμε να την μελετήσουμε

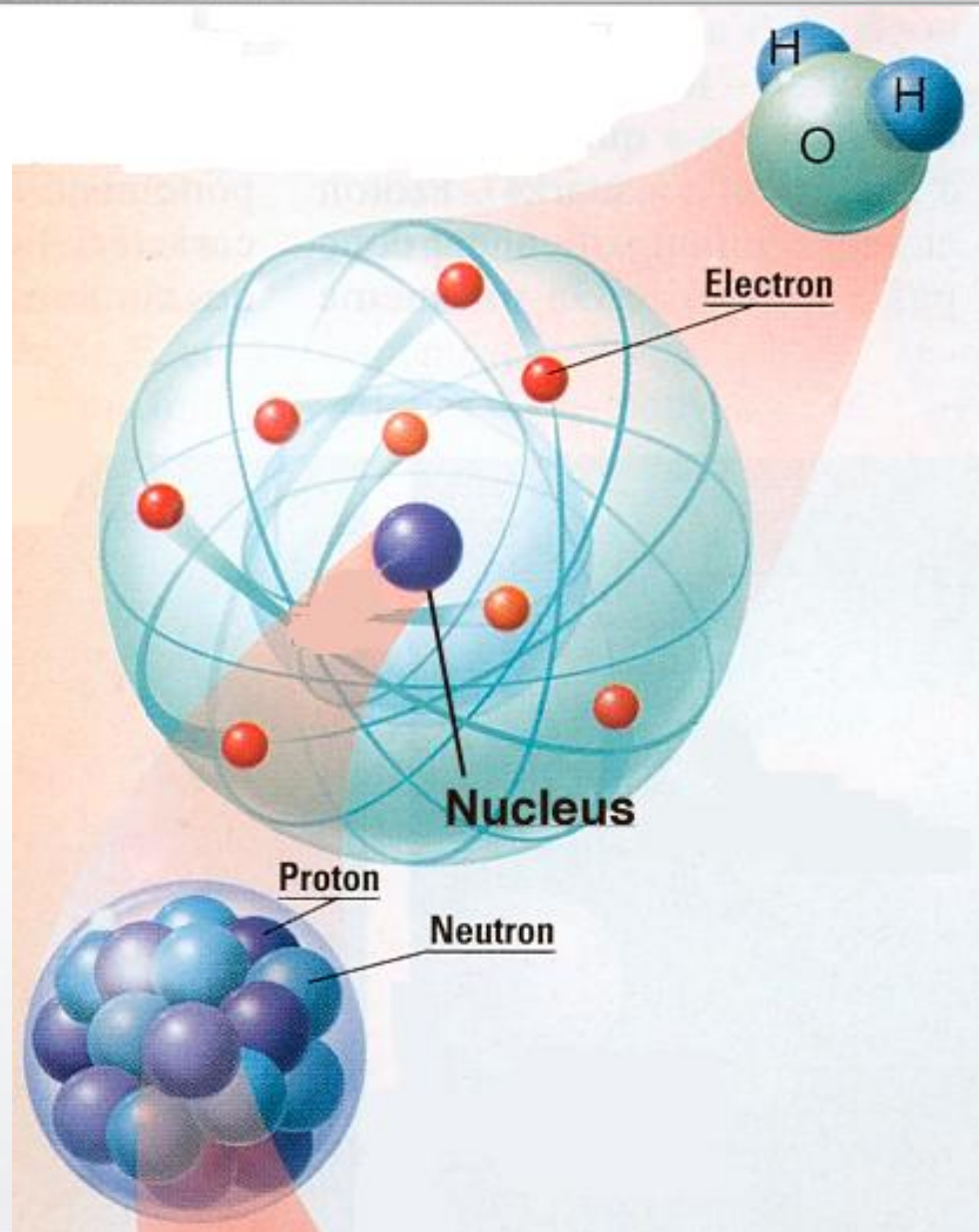
Είναι πηγή ενέργειας, όπλο, προωθητικό;

Εφαρμογές στην ιατρική

CREDITS: Rolf Landua, CERN

1 Τι είναι η αντιύλη;

1 Τι είναι η αντιύλη;



Η ύλη που βλέπουμε γύρω μας
είναι φτιαγμένη από
σωματίδια

Ηλεκτρόνια
Πρωτόνια } Κουάρκ
Νετρόνια }

1 Τι είναι η αντιύλη;

Τα σωματίδια έχουν συγκεκριμένες μάζες και φορτία

Name	Electric Charge [e]	Mass [GeV*]
Electron	- 1	0.0005
Proton	+ 1	0.938
Neutron	0	0.941

*GeV = Giga-Electron Volt = 1,000,000,000 Electron-Volt = $1.8 \cdot 10^{-27}$ kg

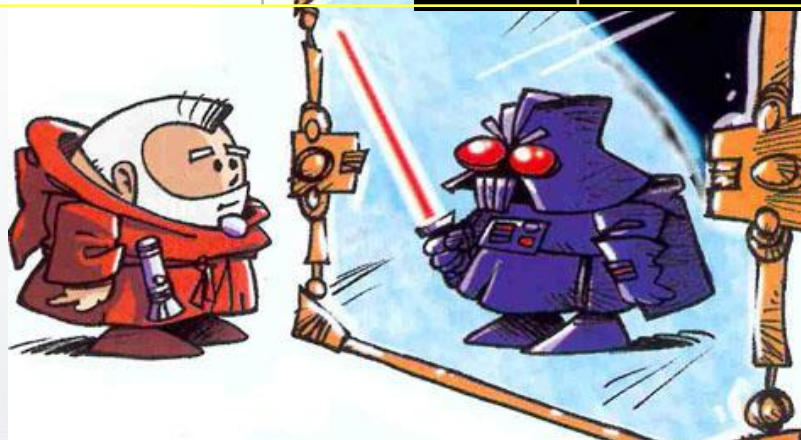
1 Τι είναι η αντιύλη;

Τα αντισωματίδια έχουν την ίδια μάζα, αλλά αντίθετο φορτίο

Name	Electric Charge [e]	Mass		Electric Charge [e]	Name
Electron	- 1	0.0005		+ 1	Positron
Proton	+ 1	0.938		- 1	Antiproton
Neutron	0	0.941		0	Antineutron



Σωματίδια

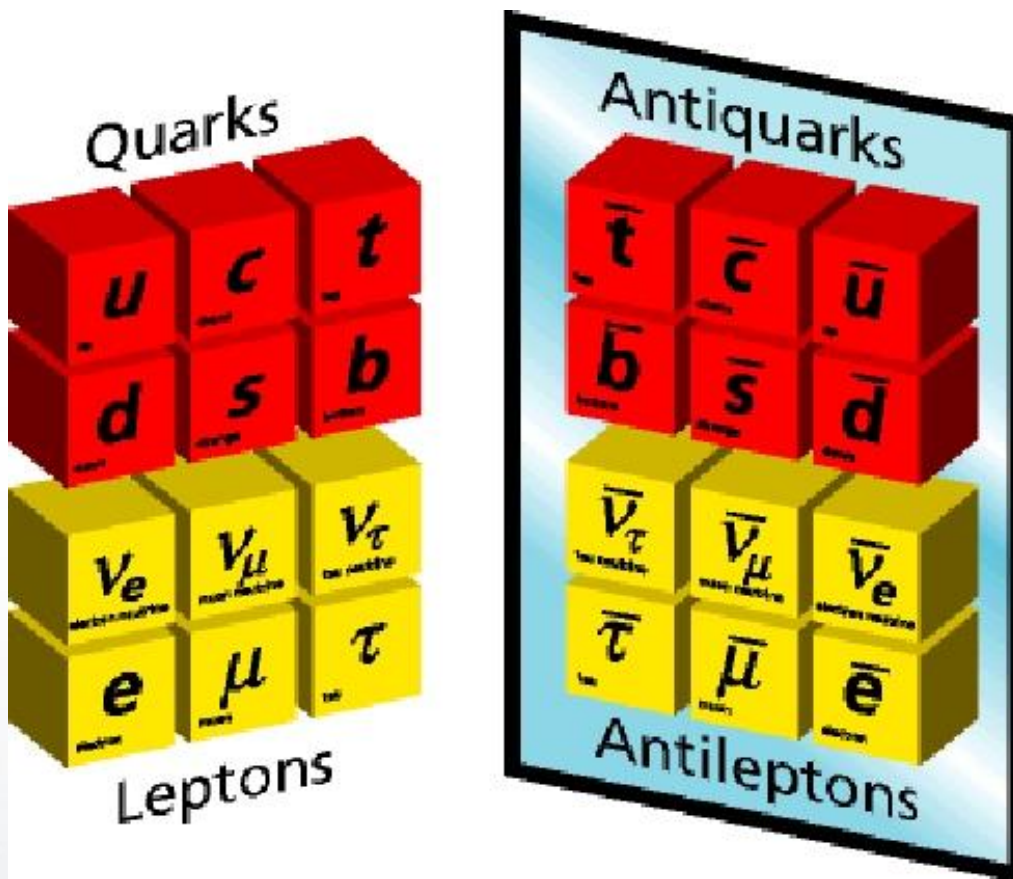


Αντισωματίδια

Αντιύλη

1 Τι είναι η αντιύλη;

Και για να είμαστε πιο σωστοί...

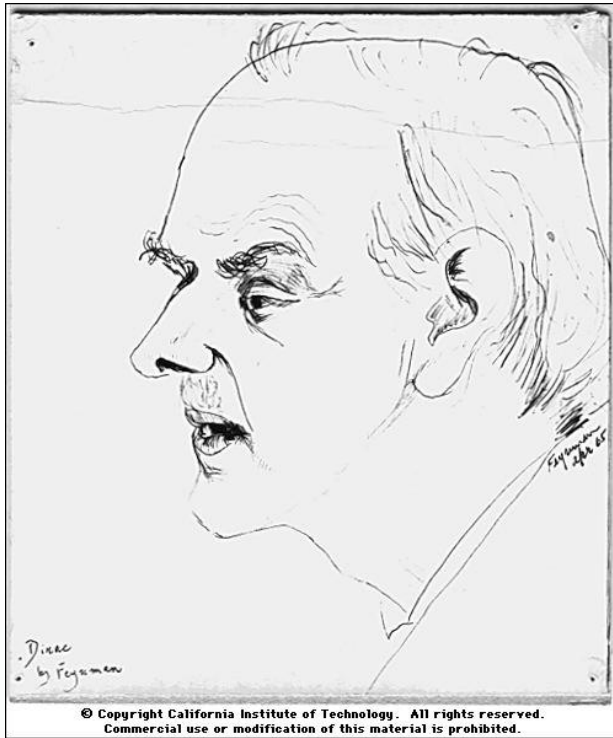


Κάθε θεμελιώδες σωματίδιο έχει το αντισωματίδιο του

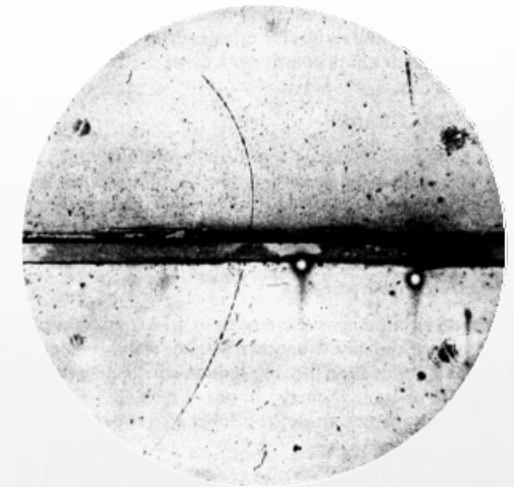
Το αντισωματίδιο του u κουαρκ (φορτίο $+2/3$) είναι το αντι- u (φορτίο $-2/3$) και του d κουαρκ (φορτίο $-1/3$) είναι το αντι- d κουαρκ (φορτίο $+1/3$)

Το πρωτόνιο αποτελείται από uud κουαρκς ενώ το αντιπρωτόνιο από $\bar{u} \bar{u} \bar{d}$ κουαρκς

Λίγη ιστορία



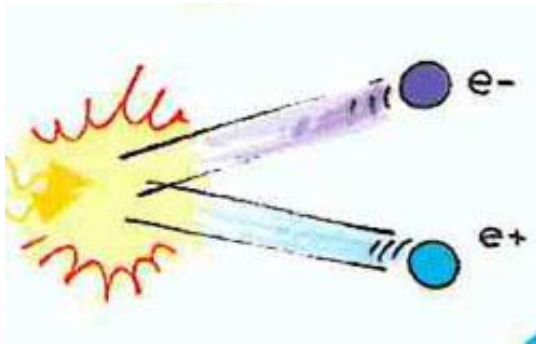
- Ο P.A.M. Dirac γράφοντας τις εξισώσεις για την κίνηση του ηλεκτρονίου ανακάλυψε πως οι εξισώσεις του είχαν λύση και με κάποιο άλλο (υποθετικό) σωματίδιο με αντίθετο φορτίο (1928).



- Το ποζιτρόνιο ανακαλύφθηκε το 1931 από τον Carl Anderson (βραβείο Νόμπελ Φυσικής 1936) σε θάλαμο φυσαλίδων από κοσμική ακτινοβολία

1 Τι είναι η αντιύλη;

Τι περίεργο έχουν τα
Αντισωματίδια;



Τα αντισωματίδια είναι
τόσο πραγματικά όσο
και τα σωματίδια



*Ένας κόσμος φτιαγμένος από αντισωματίδια θα μπορούσε να
υπάρξει -- και θα φαινόταν ο ίδιος με τον κόσμο μας.*

1 Τι είναι η αντιύλη;

Προσοχή με τον εξωγήινο φτιαγμένο από αντιύλη!



Αντιύλη

1 Τι είναι η αντιύλη;

Marylin



Anti-Marylin?



$\neq$

Λάθος αναλογία: ύλη και αντιύλη δείχνουν το ίδιο

Αντιύλη

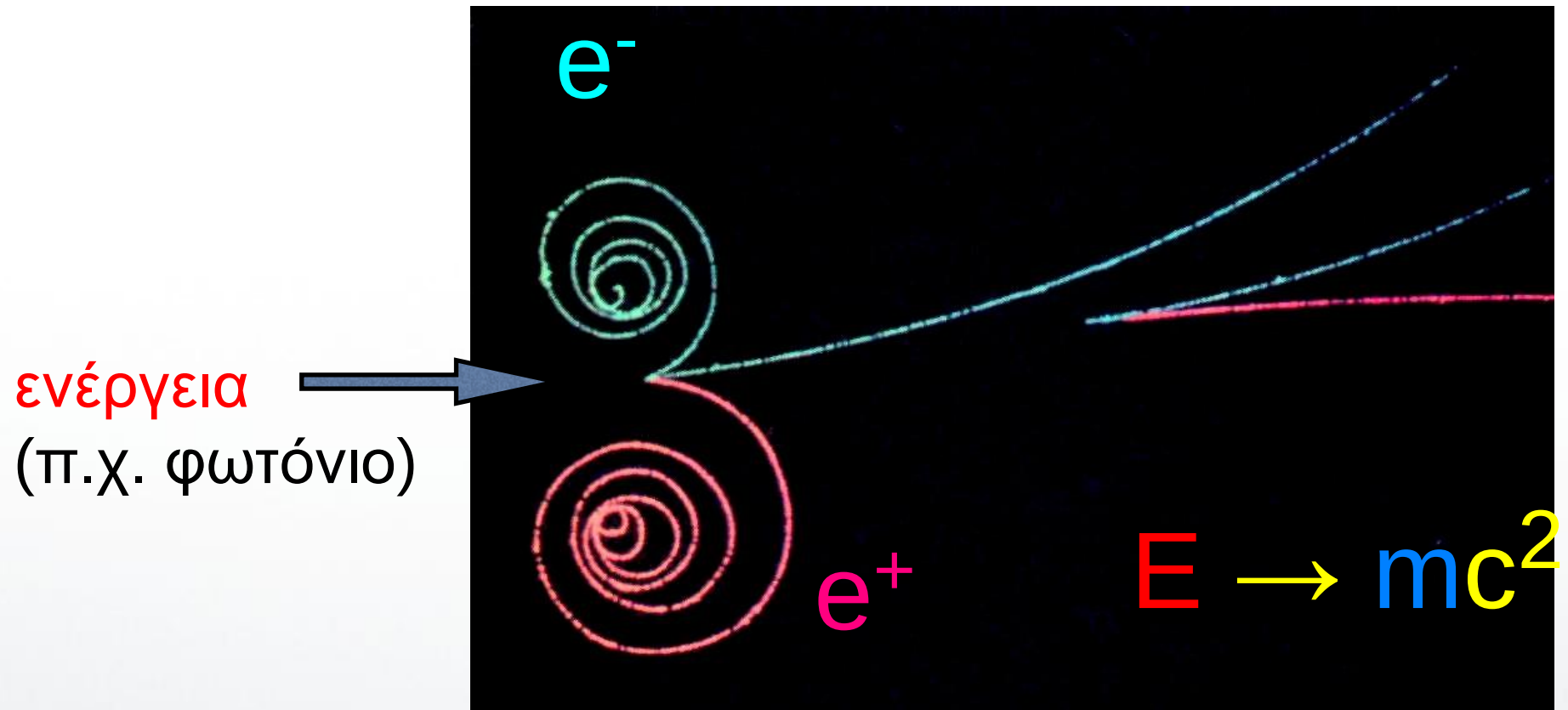
Συμπερασματικά:

- Ο όρος «αντιύλη» είναι κατά την άποψη μου ατυχής.
- Όπως είπαμε, η αντιύλη είναι τόσο πραγματική όσο και η ύλη.
- Απλά, όταν μιλάμε για σταθερά σωματίδια (ηλεκτρόνια, up και down quarks π.χ.) ο κόσμος γύρω μας απαρτίζεται από ένα είδος σωματιδίων που έχουμε συμβατικά ονομάσει 'ύλη'.
- Αλλά μεταξύ ενός μ^+ και ενός μ^- , πιο είναι το σωματίδιο και πιο το αντισωματίδιο; Δεν έχει νόημα η διαφοροποίηση
- [Ένα π^0 ($\frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}$) είναι το αντισωματίδιο του εαυτού του]

2 Πώς παράγεται η αντιύλη;

2 Πώς παράγεται η αντιύλη;

Η ενέργεια μετατρέπεται σε μάζα



Μάζα ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου

Αντιύλη

2 Πώς παράγεται η αντιύλη;

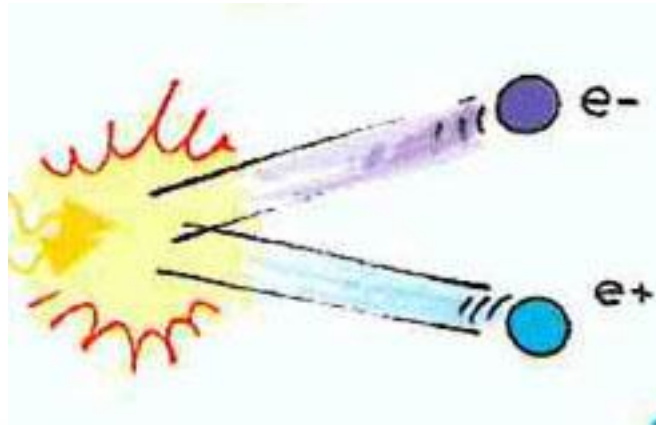
(Στον Ήλιο, μάζα μετατρέπεται σε **ενέργεια**)



2 Πώς παράγεται η αντιύλη;

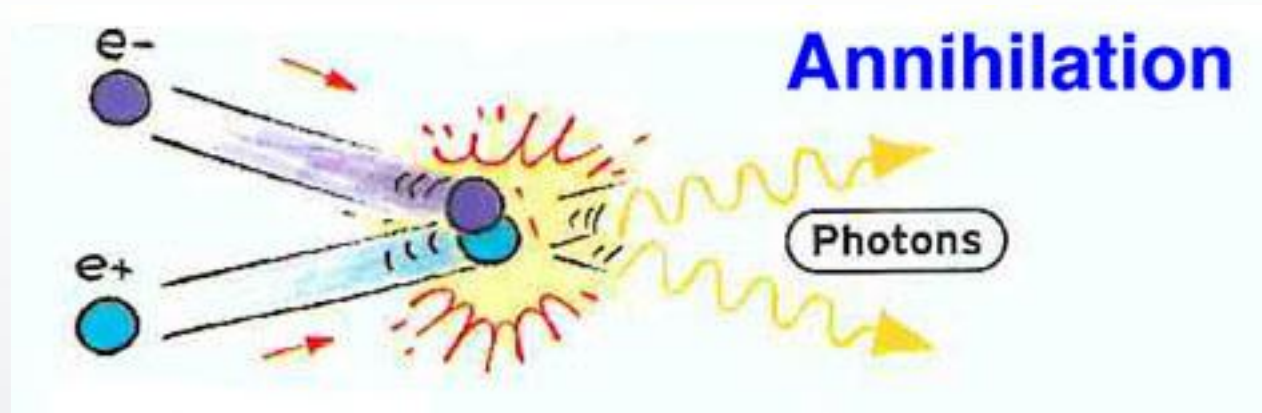
Τα σωματίδια και τα αντισωματίδια δημιουργούνται πάντα **ανά ζευγάρια...**

Ενέργεια σε μάζα:

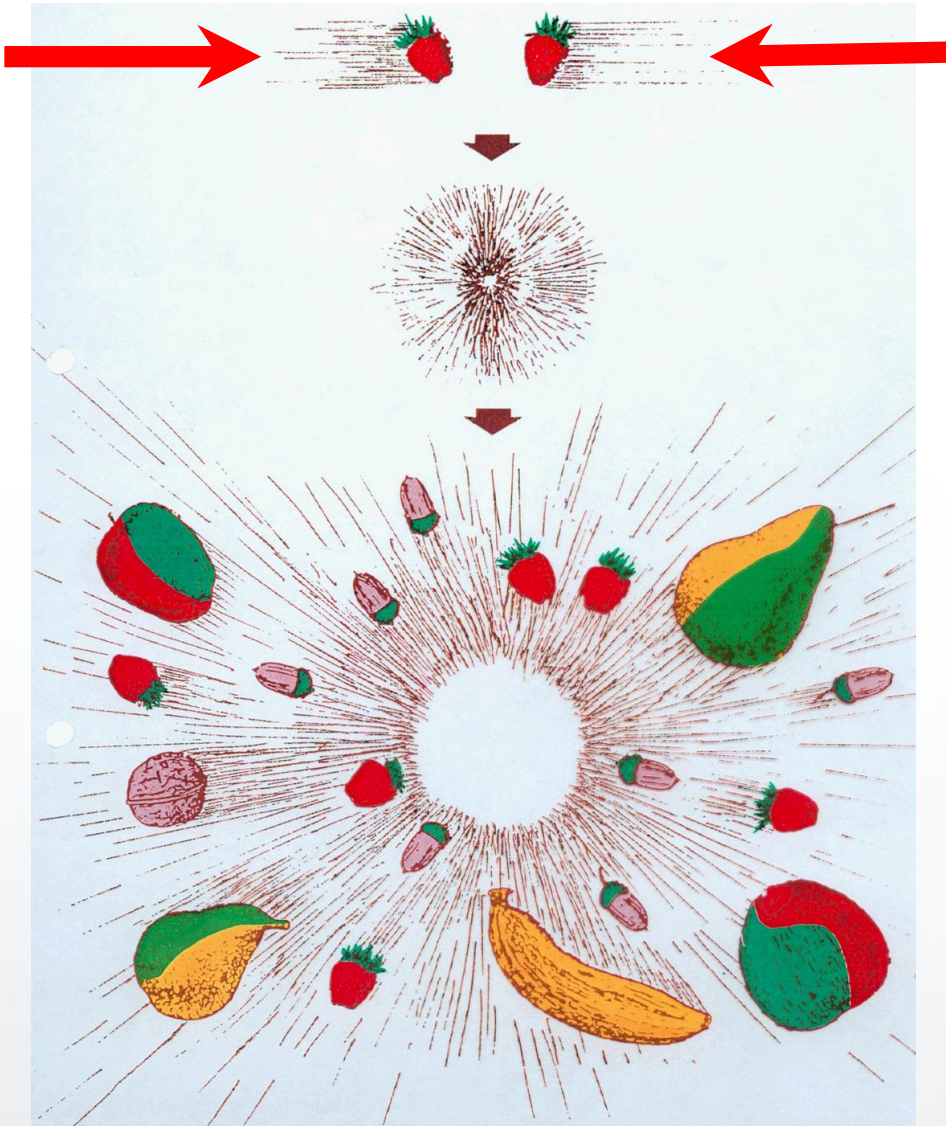


.. και μπορούν επίσης να **αλληλοεξουδετερωθούν**

Μάζα σε ενέργεια:

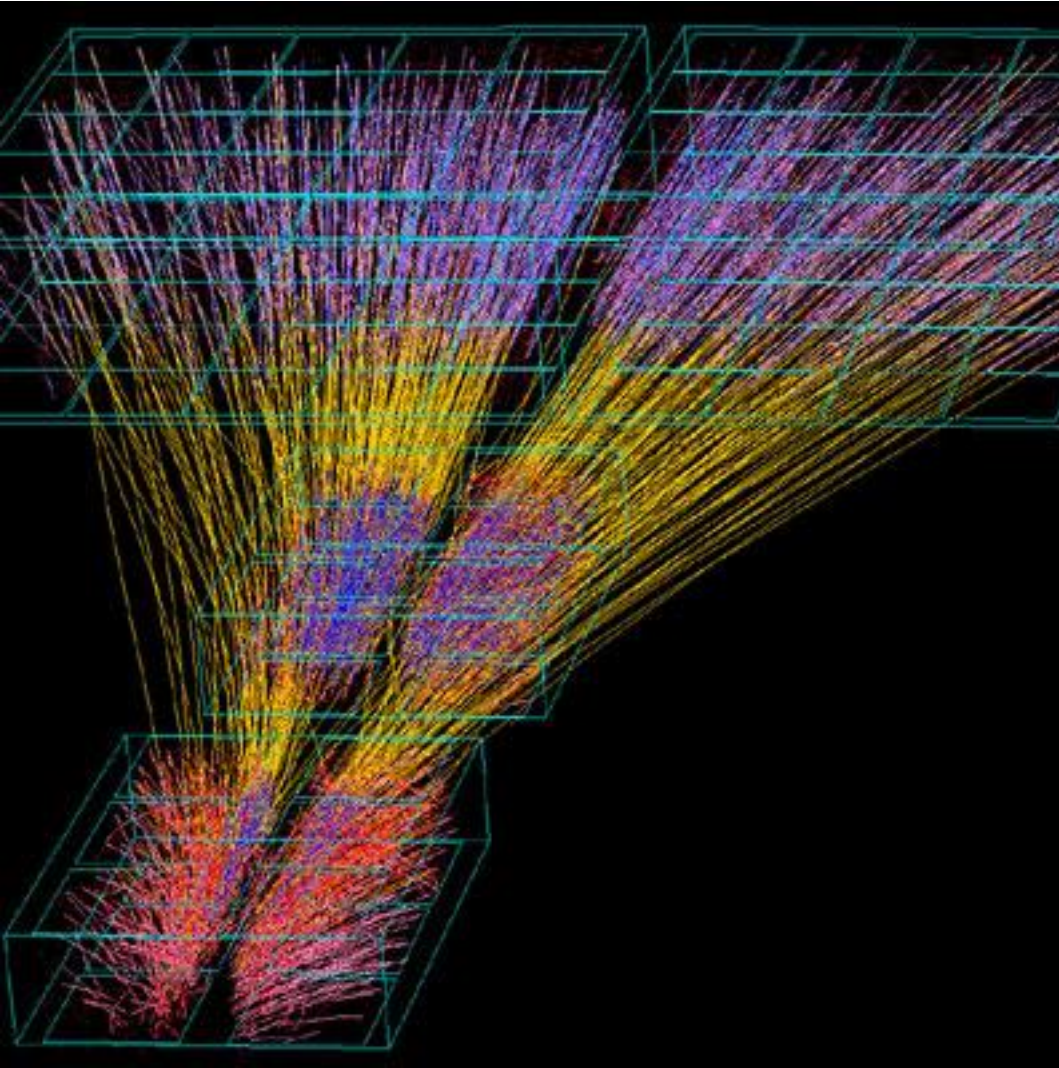


2 Πώς παράγεται η αντιύλη;



Νέα σωματίδια και
αντισωματίδια
δημιουργούνται σε
συγκρούσεις

2 Πώς παράγεται η αντιύλη;



Όταν η ενέργεια μετατρέπεται σε μάζα, δημιουργούνται **ίσες ποσότητες** από σωματίδια και αντισωματίδια

Αντιύλη

3 Που παράγεται αντιύλη;

3 Που παράγεται αντιύλη;

- Τα αντισωματίδια κατασκευάζονται στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας επιταχυντές.
- [Το μεγαλύτερο εργαστήριο που λειτουργεί επιταχυντές στον κόσμο είναι το CERN στη Γενεύη]



10000 φυσικοί
από 100 χώρες

4 Το μυστήριο της αντιύλης

4 Το μυστήριο της αντιύλης



4 Το μυστήριο της αντιύλης

Σε μακρινούς γαλαξίες; ...

Όχι

Δείχνει να μην υπάρχει καθόλου αντιύλη πουθενά
στο σύμπαν σήμερα

Αντιύλη

4 Το μυστήριο της αντιύλης

Δεν υπάρχει αντιύλη στο σύμπαν;

Γιατί;

4 Το μυστήριο της αντιύλης

Το σύμπαν ξεκίνησε πριν από 13.700
εκατομμύρια χρόνια



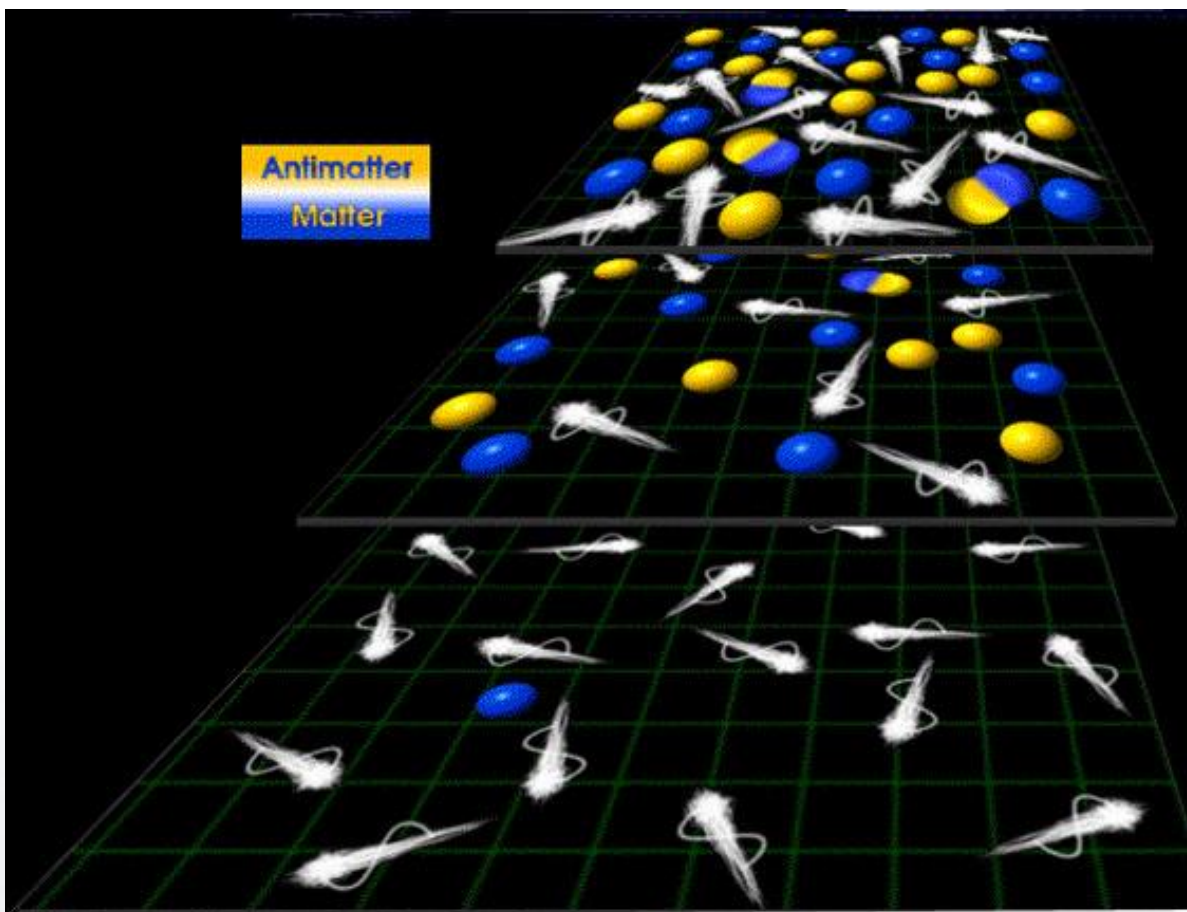
$\sim 10^{72}$

Joule

Μέγεθος ($\times 100$) του ορατού
σύμπαντος
[στην στιγμή 'Planck' $t = 10^{-43}$ s]

4 Το μυστήριο της αντιύλης

13,7 δισεκατομμύρια χρόνια πριν: το Big Bang



Μετασχηματισμός της ενέργειας σε μάζα σε μια γιγαντιαία κλίμακα

$t \sim 0$:

ποσότητα ύλης = ποσότητα αντιύλης

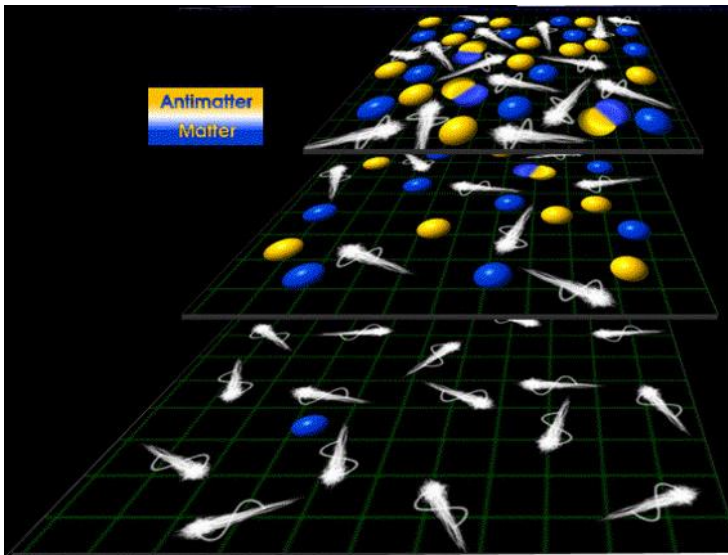
$t \sim 0.001 \text{ s}$:

όλη η αντιύλη έχει εξαφανιστεί, αλλά λίγη υλη (εμείς!) έχει μείνει; η περισσότερη ενέργεια είναι φωτόνια

Σήμερα :

>2,000,000,000 φωτόνια για κάθε πρωτόνιο ή νετρόνιο

4 Το μυστήριο της αντιύλης



Το ‘μυστήριο της αντιύλης’ είναι βασικά αυτό: προσπαθούμε να καταλάβουμε γιατί το σύμπαν περιέχει μόνο υλη

Είναι μήπως γιατί η υλη και η αντιύλη έχουν (λίγο) διαφορετικές ιδιότητες*?

*Μάζα, φορτίο, μαγνητική ροπή, ...?

Η είναι μήπως επειδή έχουν (λίγο) διαφορετικές ιδιότητες διάσπασης*?

*CP violation

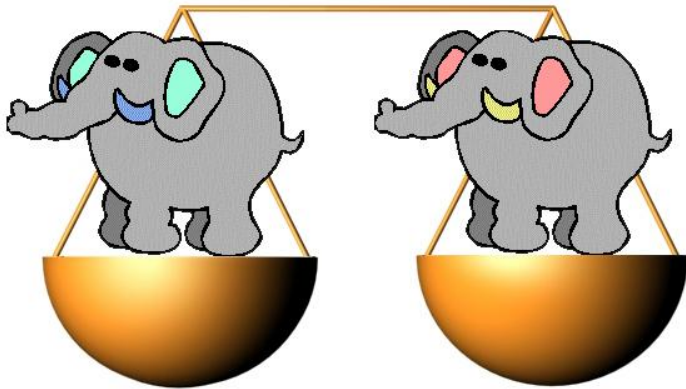


LHCb

5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

Συγκρίνουμε τις ιδιότητες ύλης και αντιύλης με μεγάλη ακρίβεια



Μάζα του πρωτονίου και του αντιπρωτονίου;

Παρόν αποτέλεσμα : $\Delta M/M < 0.000\,000\,000\,1$

διαφορά μικρότερη από ένα κόκκο σκόνης



Μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου;

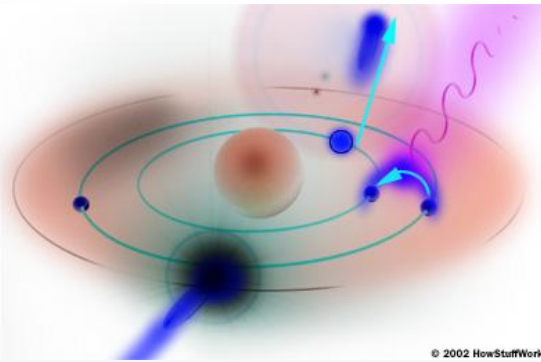
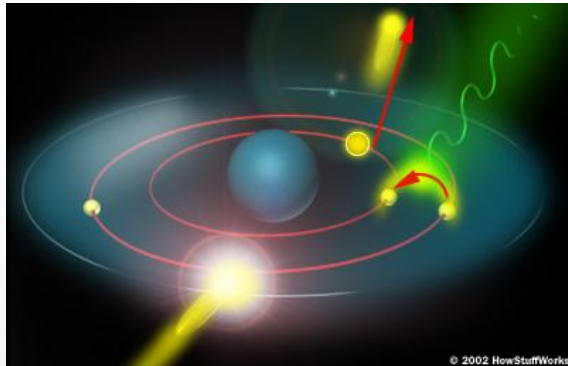
Παρόν αποτέλεσμα : $\Delta \mu/\mu < 0.000\,000\,000\,001$

Η κατάσταση σήμερα: άριστη συμφωνία!

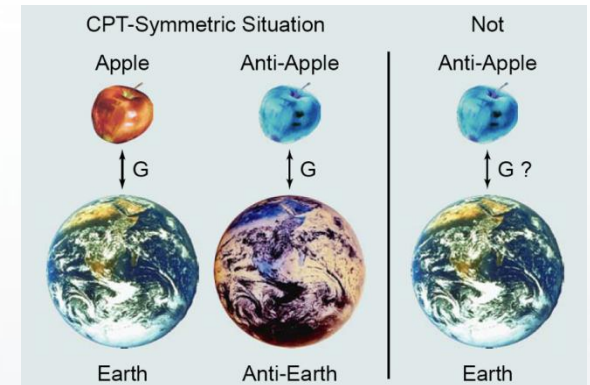
5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

Συγκρίνουμε τις ιδιότητες ύλης και αντιύλης με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια

- 1) Παράγουμε **άτομα αντιυδρογόνου** από **αντιπρωτόνια** και **ποζιτρόνια**
- 2) Παγιδεύουμε τα άτομα αντιυδρογόνου
- 3) Μετράμε τις ιδιότητες τους



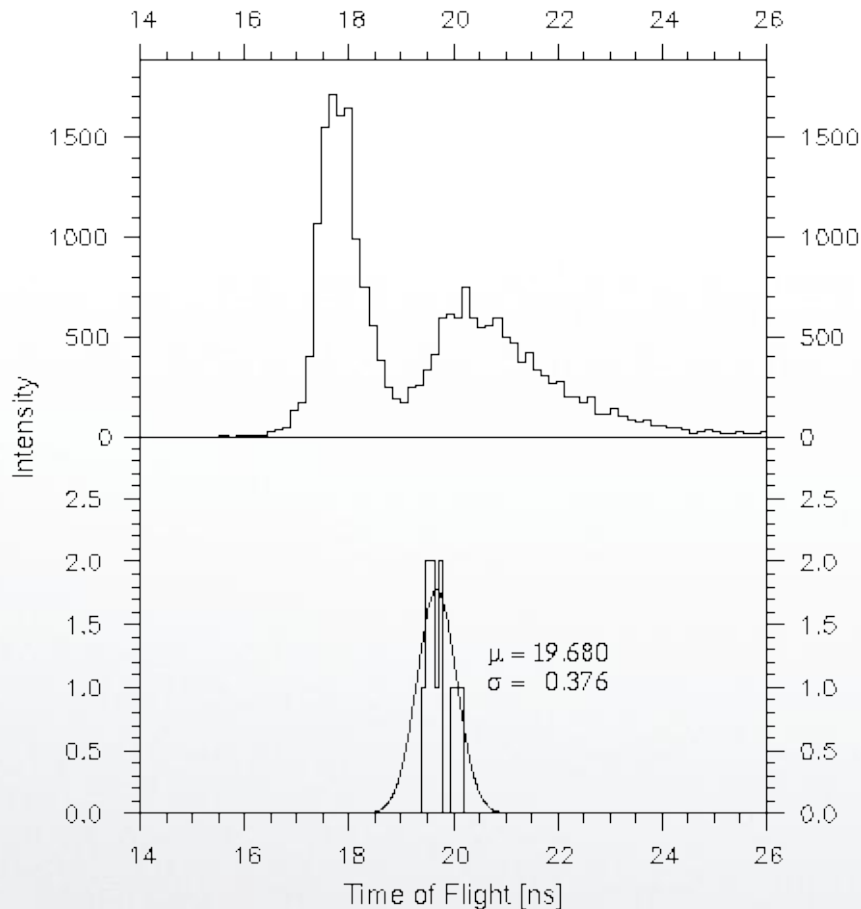
Ενεργειακά επίπεδα



Βαρύτητα

Οι πρωτοπόροι - PS210

1995: η πρώτη δημοσίευση δημιουργίας ατόμων αντιυδρογόνου



«Στο τέλος της ανάλυσης δεδομένων, 11 γεγονότα παρέμειναν με τον κατάλληλο χρόνος πτήσης (19.7nsec) και το σήμα εξαϋλωσης ποζιτρονίων. Από αυτά τα 2 ± 1 μπορεί να οφείλονται στις αντιδράσεις υποβάθρου. Έτσι, το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι μετρήσαμε σαφή υπογραφή για **9 άτομα αντιυδρογόνου**»

5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

Παραγωγή ποζιτρονίων: εύκολη!

- Δίδυμη γένεση
- Από ραδιενεργή πηγή β^+

Όμως: Παραγωγή αντιπρωτονίων:
δύσκολη!

- Ακριβή
- Αργή

Επίσης: παραγωγή ατόμων
αντιυδρογονου: ακόμα πιο δύσκολη

- ψύξη

5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;



Εργοστάσιο αντιύλης στο
CERN

Antiproton Decelerator

Παράγει αντιπρωτόνια και τα
επιβραδύνει

188 m μήκος

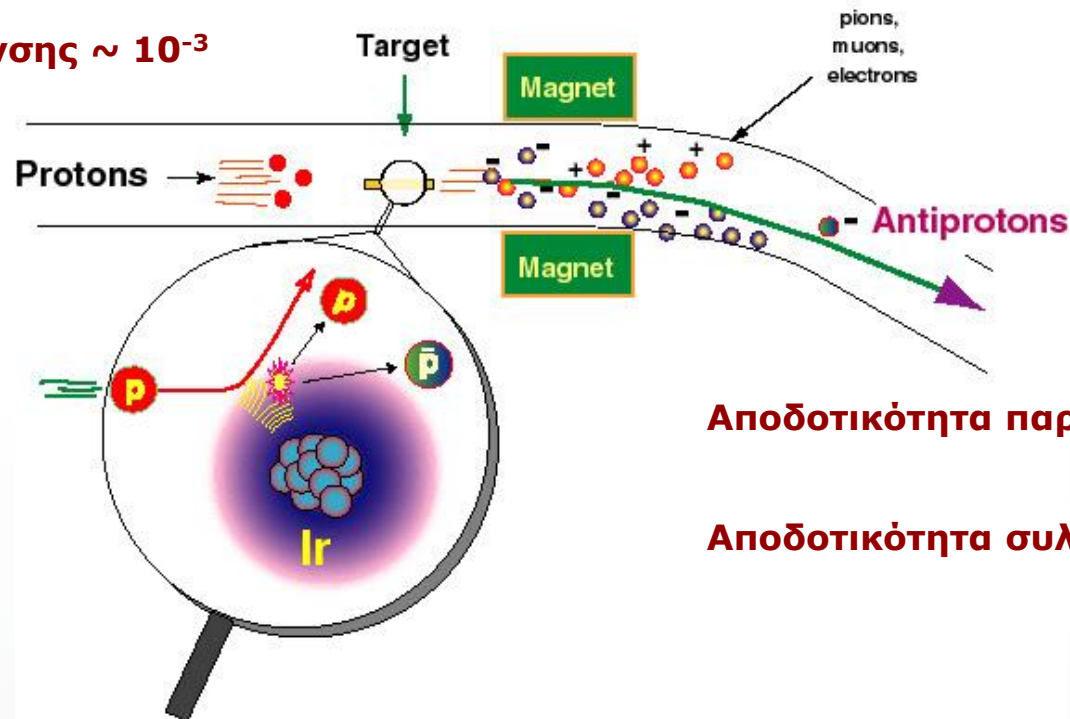
Παραγωγή αντιπρωτονίων:
100,000,000 αντιπρωτόνια το λεπτό

Επιβράδυνση
96 % $\rightarrow$ 10 % της ταχύτητας
του φωτός

5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

Αρχή παραγωγής αντιπρωτονίων

Αποδοτικότητα επιτάχυνσης $\sim 10^{-3}$



Αποδοτικότητα παραγωγής $\sim 10^{-4}$

Αποδοτικότητα συλλογής (AD) $\sim 10^{-2}$

Μέγιστη παραγωγή στο CERN $\sim 200,000,000,000,000$ αντιπρωτόνια το χρόνο

(μόνο 0.3 νανο-γραμμάρια, συνολική αποδοτικότητα $\sim 10^{-9}$)

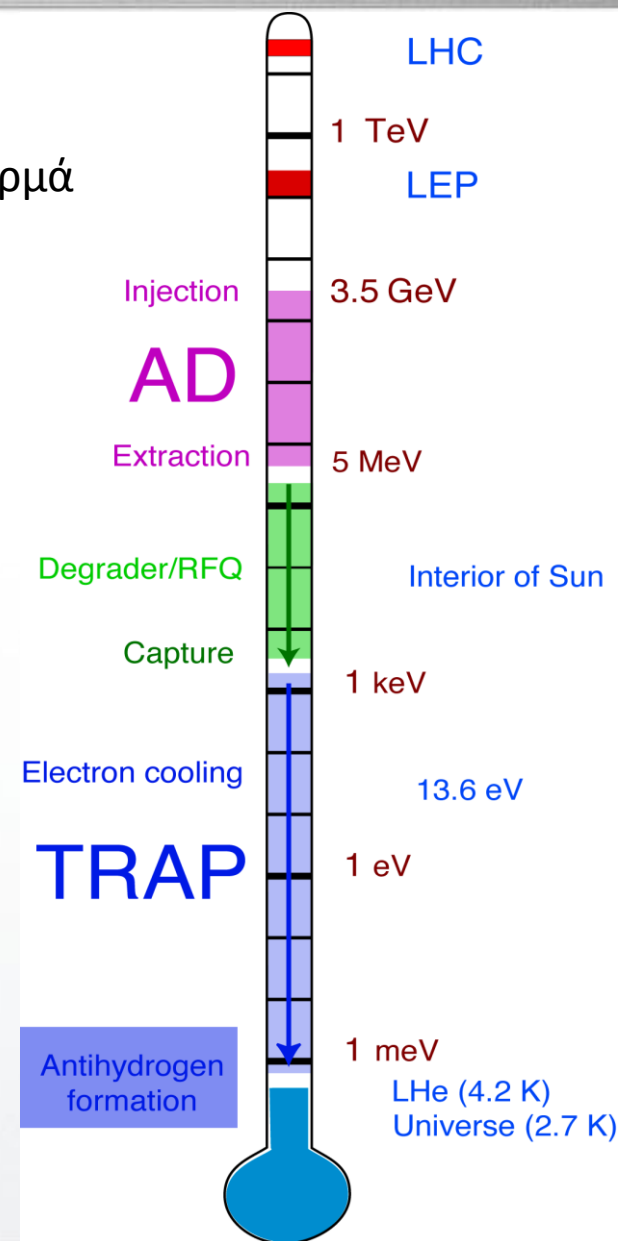
5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

Τα αντιπρωτόνια και τα ποζιτρόνια (όταν δημιουργούνται) είναι θερμά
(ενέργεια αντιπρωτονίων όταν δημιουργούνται: 3.6 GeV)

Το άτομο υδρογόνου είναι ένα αδύναμα συνδεδεμένο σύστημα:

$$E(1s) = -0.000\,000\,013\,6 \text{ GeV}$$

Τα συστατικά πρέπει να καταψυχθούν πριν να
μπορέσουν να βρουν το ταίρι τους



5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

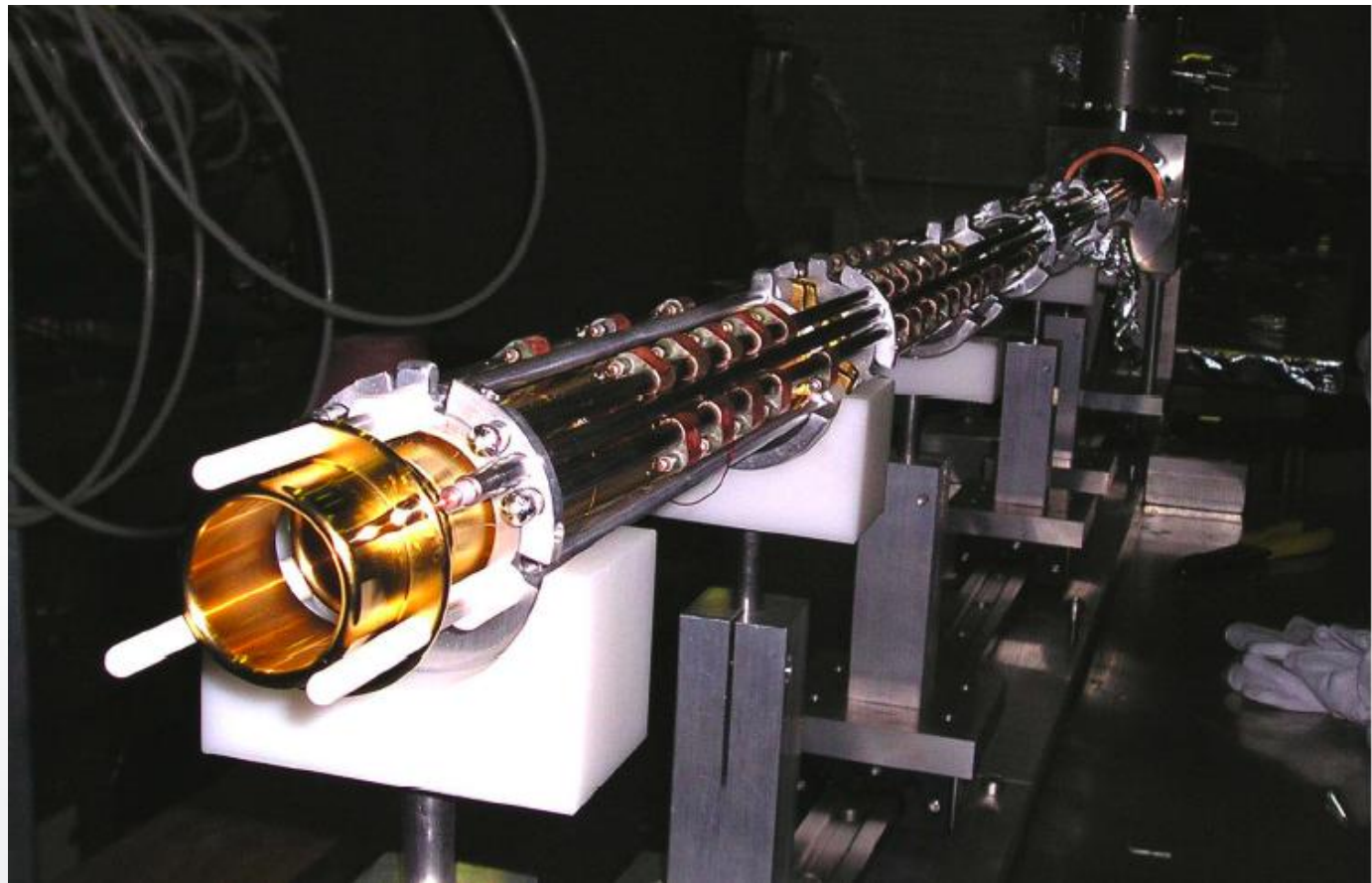
- Το PS μας δίνει δέσμη πρωτονίων **26GeV**.
- Αυτά παράγουν αντιπρωτόνια στα **3.6GeV**
- Αυτά τα ψύχουμε Πιθανολογικά (Stochastic cooling) μέχρις ότου το εύρος της κατανομής της ορμής να πέσει στο 0.1%.
- Μετά τα επιβραδύνουμε από τα 3.6 στα **2Gev**
- Το επόμενο ενδιάμεσο επίπεδο ψύξης είναι στα **300MeV** όπου το εύρος της κατανομής της ορμής ανεβαίνει στο 0.2%.
- Τώρα μπορεί να εφαρμοστεί η «ψύξη ηλεκτρονίων» που μειώνει την ενέργεια τους στα **5 MeV**.

Περίπου 5×10^7 αντιπρωτόνια εγχέονται στα 3.6 GeV/c (και αν υποθέσουμε μια αποδοτικότητα 25%) 1.2×10^7 είναι διαθέσιμα σε χαμηλή ενέργεια για τα πειράματα

5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

Κατόπιν, τα αντιπρωτόνια (και τα ποζιτρόνια) παγιδεύονται.

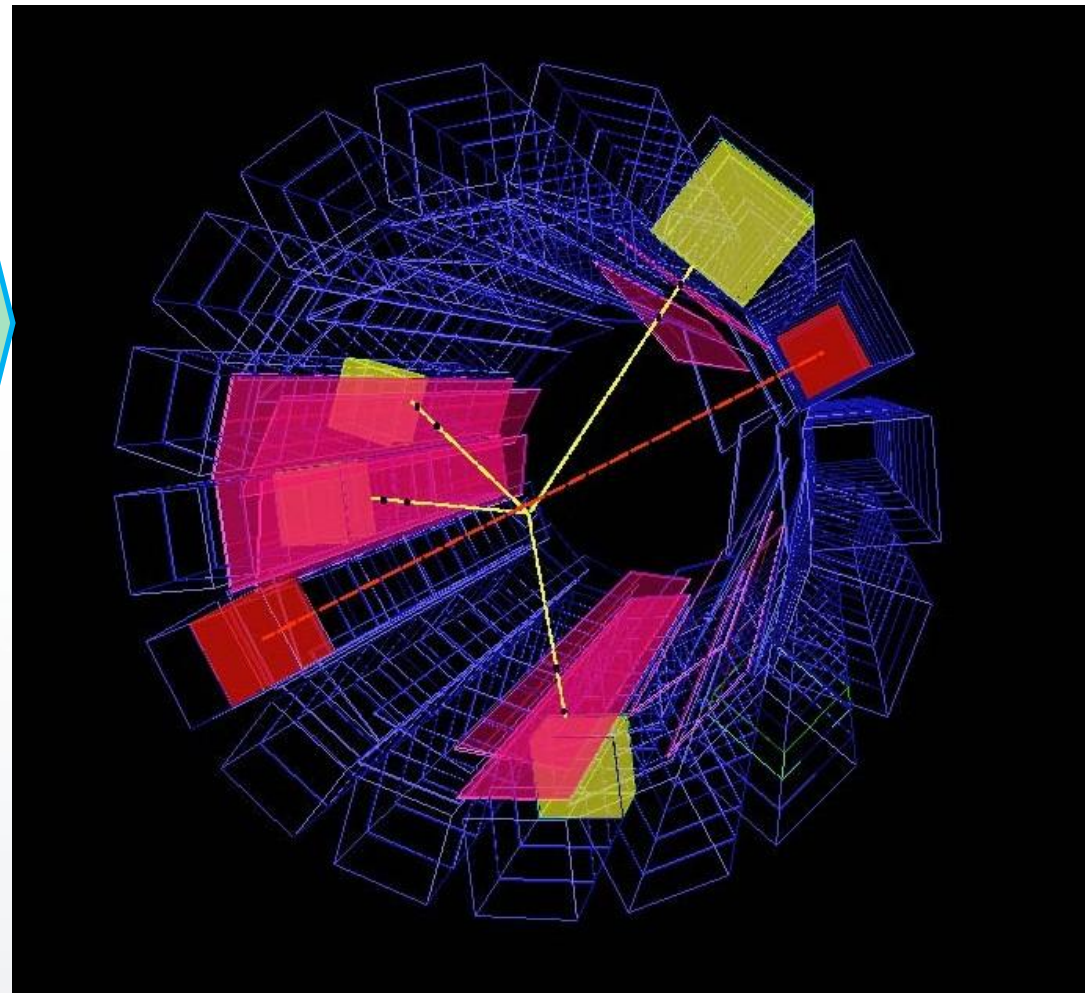
Από τα 5 MeV και μετά τα αντιπρωτονια στέλνονται στα πειράματα όπου παγιδεύονται σε ηλεκτρικές 'παγίδες' (Penning Traps) για περεταίρω ψύξη. Εκεί τα αντιπρωτόνια ψύχονται αρχικά στο 1KeV και μετά με τη μέθοδο του electron cooling σε θερμοκρασίες κάτω από τα 13.6eV



Πώς ανιχνεύεται το αντιυδρογόνο;

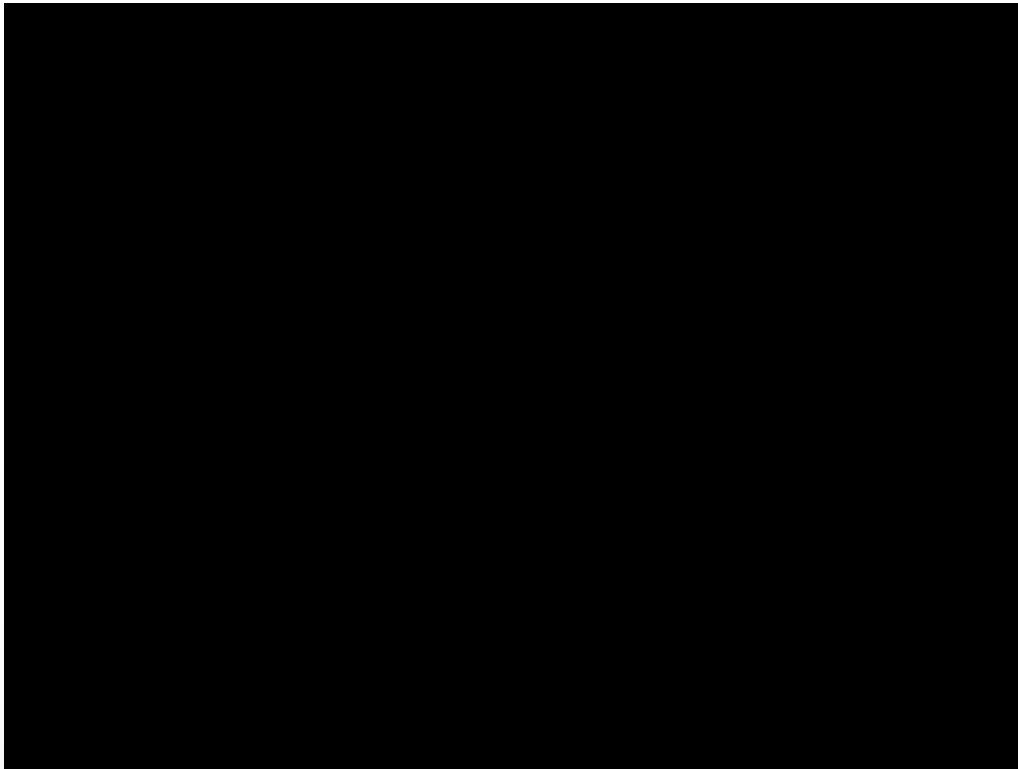
- Ανιχνεύουμε το αντιυδρογόνο καταστρέφοντας το.
- Από τη στιγμή της δημιουργίας του το άτομο του αντιυδρογόνου δεν είναι φορτισμένο, οπότε δεν υπακούει πλέον στα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία της παγίδας

Ένα πραγματικό γεγονός εξαΰλωσης ενός ατόμου αντιυδρογόνου, όπως κατεγράφη από τον ανιχνευτή ΑΘΗΝΑ. Το αντιυδρογόνο εξαϋλώνεται μόλις χτυπήσει τον τοίχο της παγίδας της ΑΘΗΝΑΣ (δεν παρουσιάζεται στο σχήμα). Το αντιπρωτόνιο εξαϋλώνεται σε τέσσερα φορτισμένα πιόνια (κίτρινες τροχιές) που ανιχνεύονται από ανιχνευτή τροχιάς πυριτίου (ροζ). Το ποζιτρόνιο εξαϋλώνεται σε δύο, πλάτη-με-πλάτη 511 keV ακτίνες γάμμα (κόκκινες τροχιές) που ανιχνεύονται από το θερμιδόμετρο κρύσταλλων CsI (κόκκινοι κύβοι). Τα φορτισμένα πιόνια αφήνουν επίσης ενέργεια στο θερμιδόμετρο (κίτρινοι κύβοι).



5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

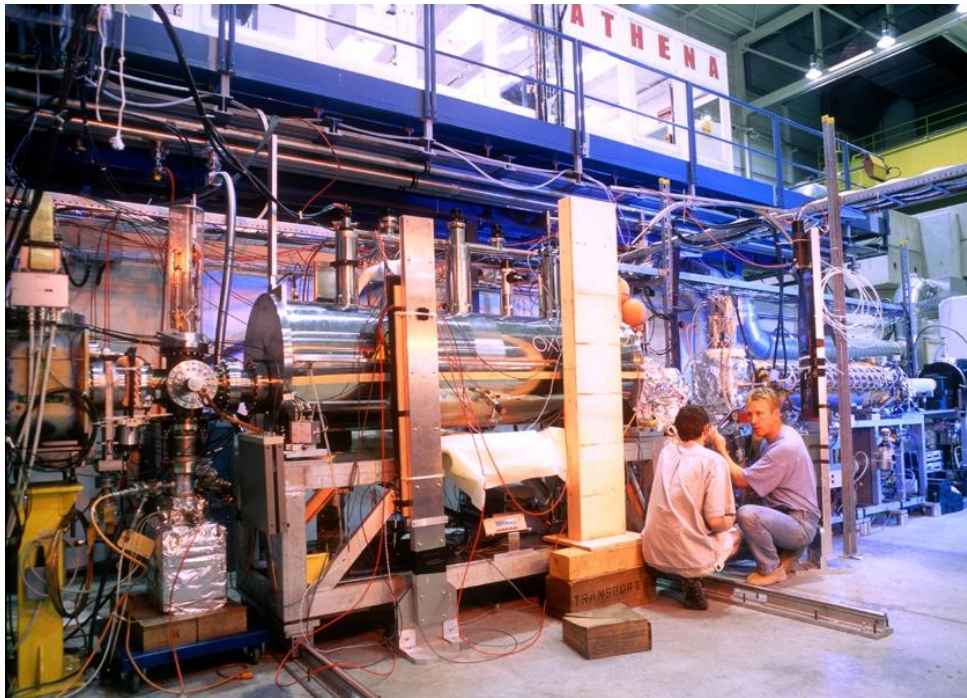
Φιλμάκι: Πώς το αντιυδρογόνο παράγεται στο AD



Αυτό και ένα δεύτερο [φιλμάκι](#) για το πώς αποθηκεύουμε ποζιτρόνια και αντιπρωτόνια, στο συμπληρωματικό υλικό αυτής της διάλεξης

5 Πώς μελετάμε την αντιύλη;

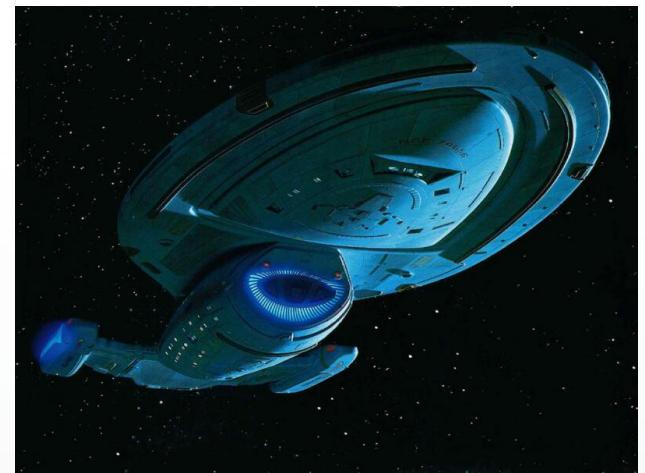
Πείραμα ATHENA (2002), στο AD



Status:

- Έχουν παραχθει περισσότερα από 1 εκατομμύριο άτομα αντιυδρογόνου
- Μικρή κινητική ενέργεια (< 0.01 eV)
- Επόμενο βήμα (υπό εξέλιξη): παγίδευση ατόμων αντιυδρογόνου

6 Πηγή ενέργειας; Όπλο; Προώθηση Star Trek;



6 Πηγή ενέργειας; Όπλο; Ώση διαστημοπλοίου;

Η κύρια πλοκή...



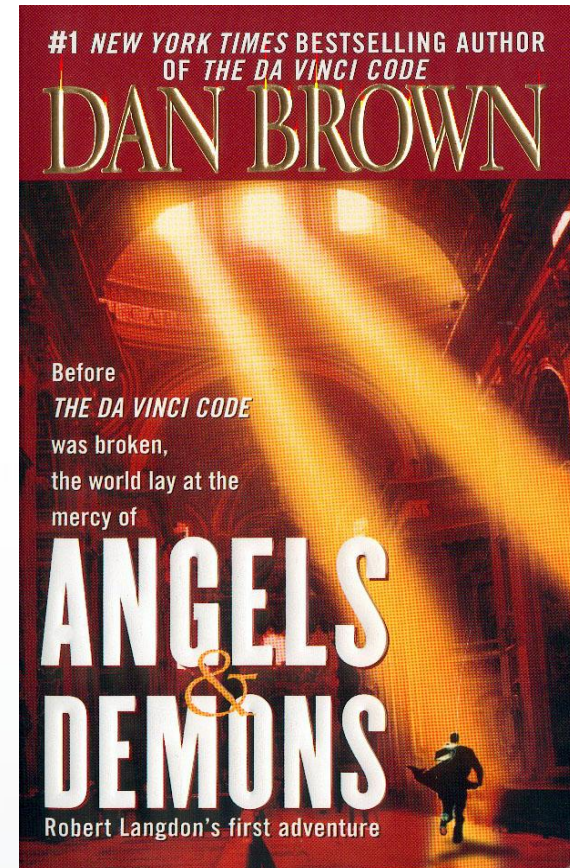
Αστυνομική ιστορία για μια
μυστική κοινωνία που...



... κλέβει 1 γρ. αντιύλης από έναν φυσικό
που δουλεύει στο 'LHC' σε ένα μέρος που
ονομάζεται "CERN" ...



... Για να ανατινάξει το
Βατικανό, έναν παλιό "εχθρό
της επιστήμης και του
CERN".



6 Πηγή ενέργειας;

Dan Brown: Η Αντιύλη είναι η πηγή ενέργειας του μέλλοντος



Όχι

Η παραγωγή αντιύλης **χρειάζεται ενέργεια**

1.000.000.000 φορές περισσότερη ενέργεια **επενδύεται**
παρά **ελευθερώνεται** από την αλληλοεξουδετέρωση

Αντιύλη

6 Βόμβες αντιύλης?



Ο Dan Brown έχει δίκιο: μόλις 0.5 g αντιύλης έχουν την ίδια ισχύ με μια ατομική βόμβα

Όμως:

$$0.5 \text{ g αντιύλης} = 4.5 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Συνολική ενέργεια που απαιτείται
(αποδοτικότητα $=10^{-9}$) : $4.5 \cdot 10^{22} \text{ J}$

Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (ειδική τιμή
CERN)

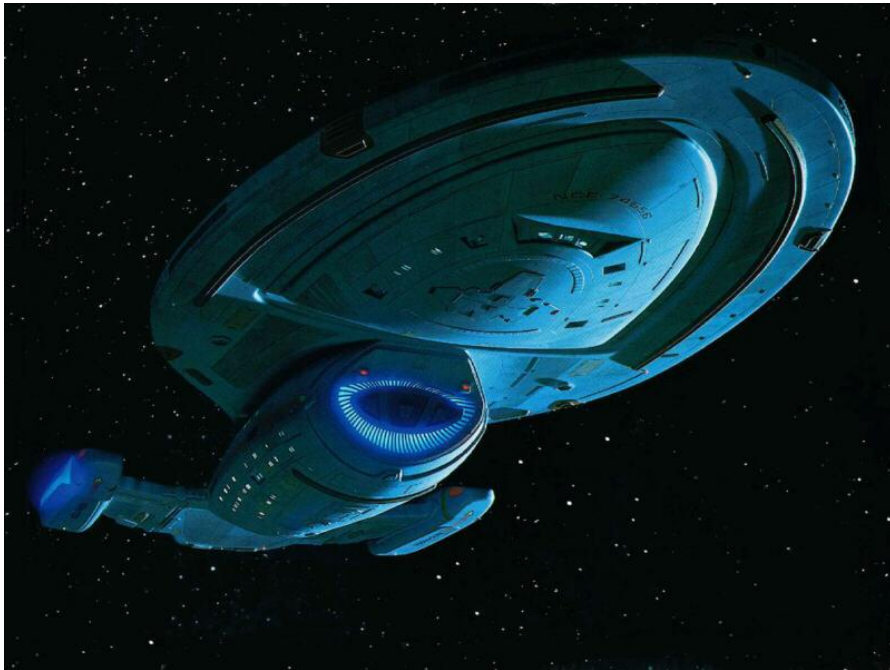
$$[1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} = 0.1 \text{ €}]$$

κόστος ~1,000,000,000,000,000 €

Απαιτούμενος χρόνος ~ 1 000 000 000 years

**20 kt TNT = $8.4 \cdot 10^{13} \text{ J}$
0.5 g antimatter + 0.5 g
matter**

6 Star Trek?



Αντιύλη ως καύσιμο για τα
διαστημικά σκάφη;
Όχι!

Η ενέργεια που απαιτείται για να επιταχύνει ένα διαστημικό σκάφος 10 τόνων
στο 95% της ταχύτητας του φωτός:

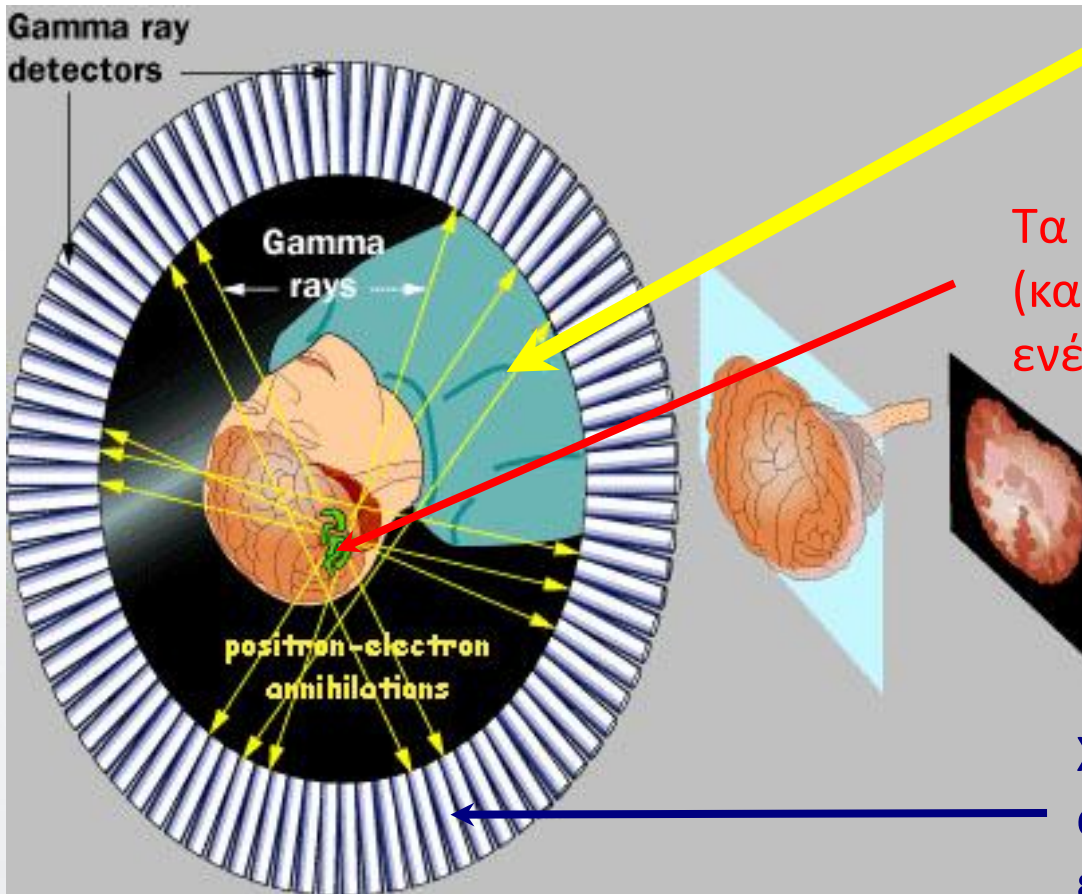
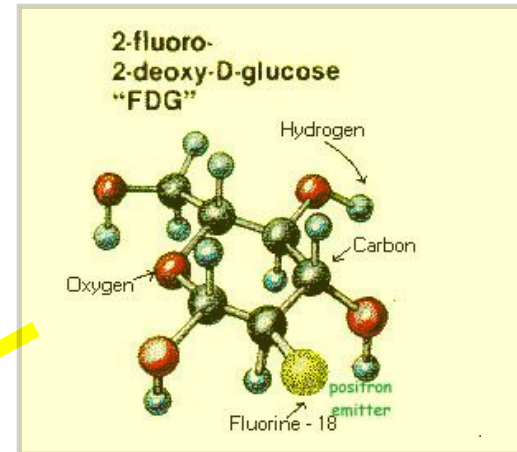
$$E = \gamma mc^2 \sim 10 \cdot 10^4 \text{ kg} =$$

Χρειάζονται 50 τόνοι αντιύλης

7 Ιατρικές εφαρμογές

7 Positron Emission Tomography

Πρόσθεση ισοτόπων που εκπέμπουν **ποζιτρόνια** (π.χ. Φθόριο-18) στο μόριο γλυκόζης και έγχυση στο αίμα



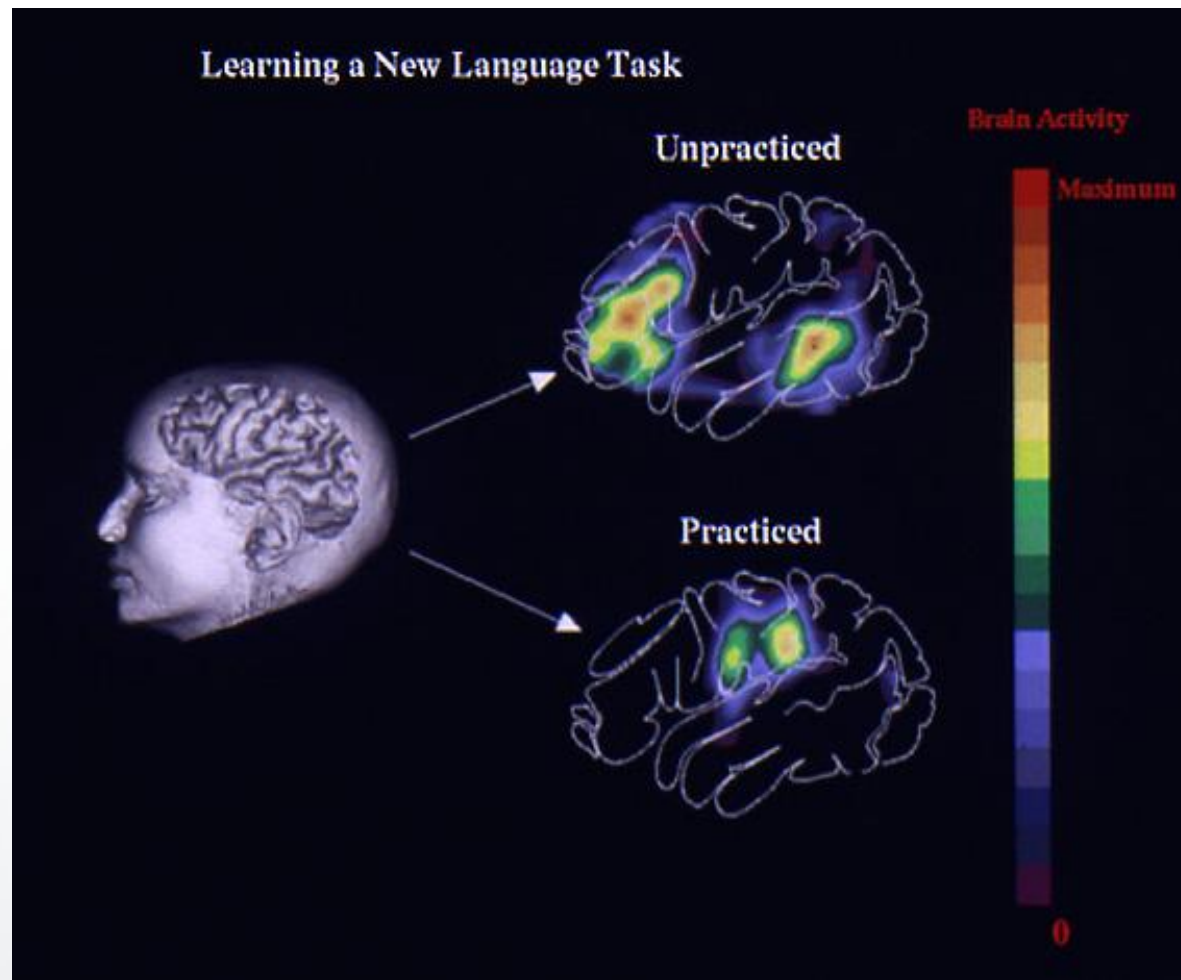
Τα μόρια γλυκόζης συσσωρεύονται (και διασπώνται) όπου απαιτείται ενέργεια

Χρησιμοποιούμε ανιχνευτή που αναδημιουργεί τη θέση της εξουδετέρωσης ποζιτρονίων

Αντιύλη

7 Positron Emission Tomography

Οι εξουδετερώσεις αντιύλης βοηθούν στο να καταλάβουμε πώς λειτουργεί ο εγκέφαλος



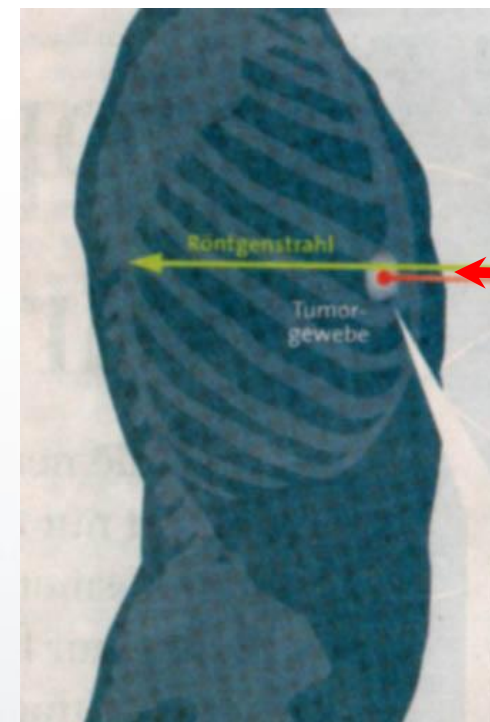
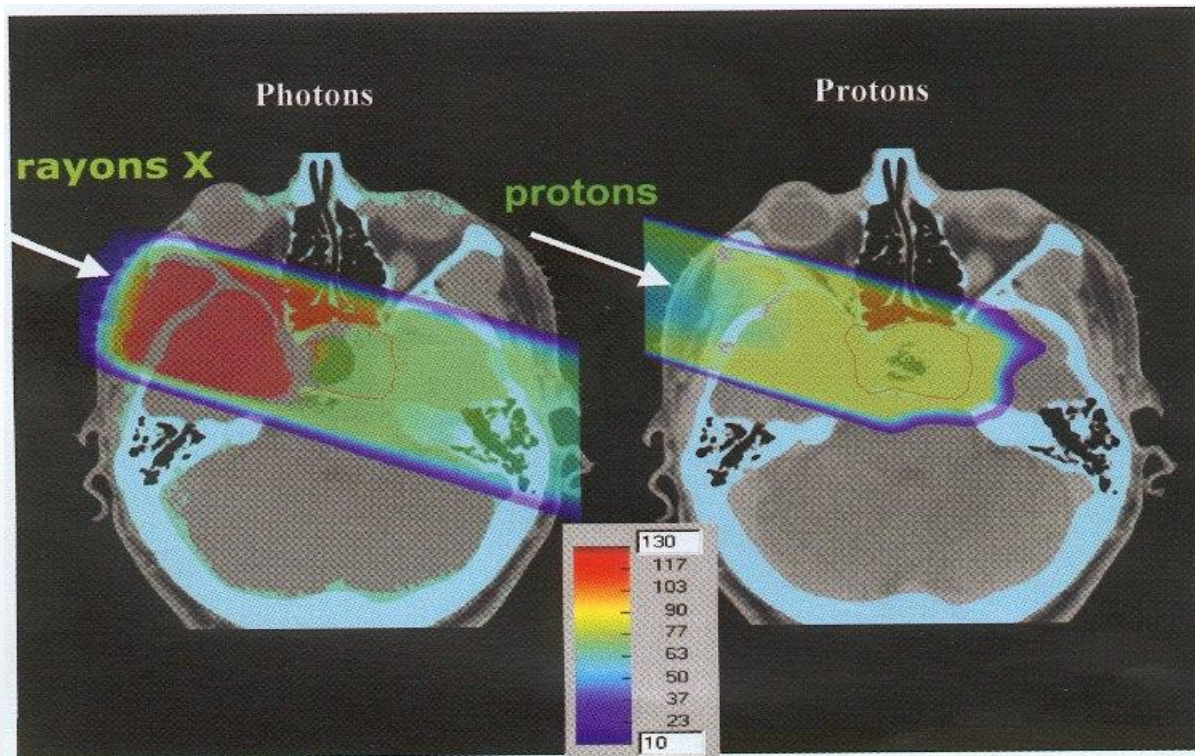
7 Θεραπεία όγκων με αντιπρωτόνια;

Η ακτινοβολία καταστρέφει τα κύτταρα όγκων, αλλά και τα υγιή κύτταρα

Ακτινοβολία γάμμα: πιο πολλά υγιή κύτταρα καταστρέφονται παρά κύτταρα όγκων

Τα πρωτόνια παραδίδουν περισσότερη ενέργεια στα κύτταρα όγκων

Τα αντιπρωτόνια είναι 3x καλύτερα από τα πρωτόνια (αλλά πιο ακριβά)



Τέλος