

Συζυγία φορτίου – Charge conjugation - C

- ❑ Οι εξισώσεις Klein-Gordon και Dirac έχουν λύσεις τόσο θετικής όσο και αρνητικής ενέργειας. Οι λύσεις της αρνητικής ενέργειας εισάγουν την ύπαρξη αντι-σωματιδίων.
- ❑ Τα αντι-σωματίδια έχουν ίσο και αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο με αυτό των σωματιδίων καθώς επίσης και αντίθετους όλους τους άλλους κβαντικούς αριθμούς.
- ❑ Η μετατροπή μιας λύσης που αντιστοιχεί σε σωματίδια, σε λύση που αντιστοιχεί σε αντισωματίδια εμπεριέχει διεργασία μιγαδικής συζυγίας (καθώς και χρήση πινάκων στην περίπτωση του Dirac). Η διεργασία αυτή ονομάζεται συζυγία φορτίου.
- ❑ Επειδή η συζυγία φορτίου αναστρέφει τα quarks ή τα λεπτόνια σε διαφορετικές καταστάσεις (τα αντι-σωματίδια), αυτά δεν αποτελούν ιδιοκαταστάσεις του τελεστή της συζυγίας φορτίου C και επομένως δεν έχουν προσδιορισμένες τιμές για C (είναι όμως ιδιοκαταστάσεις της parity)
- ❑ Μια δέσμια κατάσταση quark ή λεπτονίου με το δικό του αντι-σωματίδιο το αλλάζει στον εαυτό του κάτω από συζυγία C και επομένως το σύστημα αποτελεί ιδιοκατάσταση του τελεστή C
- ❑ Σύμφωνα με την εξίσωση του Dirac, η εφαρμογή του τελεστή C σε φερμιόνιο δίνει έναν όρο i που πολλαπλασιάζει το αντι-φερμιόνιο, με αποτέλεσμα όταν ο τελεστής C ενεργεί σε ένα ζεύγος φερμιονίου-αντιφερμιονίου να δίνει ένα παράγοντα -1.
- ❑ Ο τελεστής C αναστρέφει ένα σύστημα σωματιδίου-αντισωματιδίου ως προς το κέντρο του που ουσιαστικά είναι το ίδιο αποτέλεσμα με αυτό του τελεστή της ομοτιμίας P
- ❑ Σαν αποτέλεσμα δρώντας με τον τελεστή C, συστήματα με άρτιες τιμές τροχιακής στροφορμής L παίρνουν ένα παράγοντα +1 ενώ οι περιπτές τροχιακές στροφορμές παίρνουν ένα παράγοντα -1.

Συζυγία φορτίου

- ❑ Για spin- $\frac{1}{2}$ σωματίδια, η $S=0$ μονήρης κατάσταση (singlet) αντιστοιχεί στην $\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow$
- ❑ Η $S=1$ τριπλή κατάσταση (triplet) αντιστοιχούν στις καταστάσεις $\uparrow\uparrow$, $\downarrow\downarrow$ και $\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$
- ❑ Εφαρμογή του τελεστή έχει σαν αποτέλεσμα την εναλλαγή των προσανατολισμών των spins
Σαν αποτέλεσμα η περίπτωση της singlet κατάστασης παίρνει ένα παράγοντα -1 ενώ η triplet περίπτωση παίρνει ένα παράγοντα $+1$
- ❑ Εν γένει, η διεργασία C για την περίπτωση κατάστασης φερμιονίου - αντιφερμιονίου δίνει ένα παράγοντα -1 για την Dirac, ένα παράγοντα $(-1)^L$ για την περίπτωση της τροχιακής στροφορμής, ένα παράγοντα $(-1)^{S+1}$ για την περίπτωση του spin που αντιστοιχεί σε ένα παράγοντα $(-1)^{L+S} = (-1)^J$
- ❑ Σωματίδιο το οποίο ταυτίζεται με το αντισωματίδιό του (όπως το φωτόνιο ή το π^0) τότε το σωματίδιο είναι ιδιοκατάσταση του τελεστή C και έχει συγκεκριμένη ιδιοτιμή
- ❑ Από την στιγμή που η εφαρμογή του τελεστή C δυο φορές σε κάθε σωματίδιο ουσιαστικά αφήνει το σωματίδιο αμετάβλητο, όπως και η διπλή εφαρμογή του τελεστή της ομοτιμίας P , θεωρούμε σαν ιδιοτιμές τις τιμές $+1$ και -1
- ❑ Ένα ζεύγος σωματίδιου-αντισωματίδιου σε δέσμια κατάσταση, μετασχηματίζεται στον εαυτό (επί ένα παράγοντα ± 1) κάτω από τον τελεστή C , και αποτελεί επομένως ιδιοκατάσταση
Διαφορετικά ένα σωματίδιο δεν έχει συγκεκριμένη τιμή συζυγίας φορτίου.

Συζυγία φορτίου

- Εφόσον ο τελεστής C αντιστρέφει το φορτίο, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο να αναστρέφει το πρόσημό του κάτω από την δράση του C .
Σαν αποτέλεσμα το φωτόνιο έχει ιδιοτιμή C ίση με -1

- Το π^0 διασπάται σε δυο φωτόνια. Αν δώσουμε τιμή $+1$ το αποτέλεσμα της εφαρμογής C , τότε η διάσπαση αυτή διατηρεί την συζυγία φορτίου

- Το ποζιτρόνιουμ είναι μία δέσμια κατάσταση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου

Αν τα δυο spins είναι προσανατολισμένα παράλληλα, και η τροχιακή στροφορμή του συστήματος είναι $L = 0$, η εφαρμογή του C -τελεστή δίνει και πάλι την αρχική ιδιοκατάσταση πολλαπλασιασμένη με ένα παράγοντα -1 επειδή είναι φερμιόνια

Επομένως η κατάσταση παράλληλων spin (ή διαφορετικά η triplet ή όρθο κατάσταση) έχει C ίση με $C = -1$.

- Τι συμβαίνει αν τα spins του ζεύγους ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου είναι αντιπαράλληλα? Οδηγούμαστε στην ίδια κατάσταση για το σύστημα αναστρέφοντας ηλεκτρόνιο με ποζιτρόνιο?

➤ Η απάντηση είναι όχι αν κάποιος μπορεί να πει με βεβαιότητα ότι το ποζιτρόνιο είχε spin προς τα κάτω και το ηλεκτρόνιο είχε spin προς τα πάνω.

➤ Αυτό όμως δεν μπορεί να το ισχυριστούμε, αλλά ακόμα και αν μπορούσαμε, τα spins θα αναστρέφονται μεταξύ τους.

➤ Η σωστή κατάσταση είναι η ιδιοκατάσταση της ολικής στροφορμής:
$$\frac{(e^+ \uparrow)(e^- \downarrow) - (e^+ \downarrow)(e^- \uparrow)}{\sqrt{2}}$$

➤ Κάτω από την συζυγία φορτίου C , η προηγούμενη σχέση δίνει ένα επιπλέον παράγοντα -1 πέρα από το -1 που προκύπτει από την εξίσωση Dirac.
Έτσι η κατάσταση με αντιπαράλληλα spins θα έχει $C +1$.

Συζυγία φορτίου

- ▣ Ποιο θα ήταν το αποτέλεσμα για ορθογώνιο σύστημα: $\frac{(e^+ \uparrow)(e^- \downarrow) + (e^+ \downarrow)(e^- \uparrow)}{\sqrt{2}}$
 - Το σύστημα αυτό είναι το $m_3=0$ αντίστοιχο του συστήματος και με τα δυο spins προς τα πάνω ή και τα δυο spins προς τα κάτω που αποτελούν μέρος της τριπλέτας με ολική στροφορμή ίση με 1.
- ▣ Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις διατηρούν την συζυγία φορτίου όπως έχει δείχθει πειραματικά.
 - Στην πραγματικότητα δεν ξέρουμε πως να γράψουμε την Hamiltonian των ισχυρών αλληλεπιδράσεων για χαμηλής ενέργειας διασπάσεις. Η διατήρηση όμως της συζυγίας φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα περιορισμούς ως προς το τι μπορεί να περιέχει η Hamiltonian
- ▣ Οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις διατηρούν την συζυγία φορτίου.
 - Το γινόμενο των τιμών της C στην αρχική κατάσταση ισούται με τον γινόμενο των τιμών της C στην τελική κατάσταση. Η Hamiltonian της αλληλεπίδρασης που δημιουργεί κάποιος σε αναλογία με τη κλασική φυσική περιέχει την ιδιότητα αυτή

Επισκόπηση – τελεστής P

- ❑ Ο τελεστής P μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστρέφει τις 3 συντεταγμένες ή ότι αφήνει τις συντεταγμένες αλλά αντιστρέφει τα διανύσματα θέσης και ορμής.
- ❑ Δράση του τελεστή P σε μια ιδιο-κατάσταση δίνει λ_P επί την ιδιοκατάσταση. Δράση του τελεστή P και πάλι θα δώσει $\lambda_P^2=1$ οπότε $\lambda_P=\pm 1$
- ❑ Η στροφορμή $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ δεν αντιστρέφεται με την δράση του τελεστή P. Το ίδιο και το spin
- ❑ Οι σφαιρικές αρμονικές Y_M^L είναι ιδιοκαταστάσεις της P, με P +1 για L άρτιο και -1 για L περιττό. Το spin δεν επηρεάζεται
- ❑ Ο τελεστής P για την εξίσωση του Dirac (quarks και λεπτόνια) δίνει +1 για φερμιόνια και -1 για αντιφερμιόνια
- ❑ Τα μεσόνια είναι δέσμιες καταστάσεις ζεύγους quark-antiquark. Τις περισσότερες φορές συζητούμε για καταστάσεις με L=0 γιατί καταστάσεις με L>0 διασπώνται γρήγορα. Τα μεσόνια έχουν P=-1
- ❑ Τα βαρυόνια είναι καταστάσεις 3-quarks. Αν L=0 τότε P=+1. Για αντιβαρυόνια έχουμε P=-1
- ❑ Το φωτόνιο έχει P=-1 (από εξισώσεις Maxwell)
- ❑ Οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις διατηρούν P: το γινόμενο P της αρχικής κατάστασης είναι ίδιο με αυτό της τελικής κατάστασης
- ❑ Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις διατηρούν (πειραματικά) την P.

Επισκόπηση – τελεστής C

- ❑ Ο τελεστής C μετατρέπει σωματίδια σε αντισωματίδια και το αντίστροφο
- ❑ Δράση του τελεστή C δύο φορές, δίνει την ίδια κατάσταση και επομένως $\lambda_C = \pm 1$
- ❑ Μόνο σωματίδια που ταυτίζονται με τα αντισωματίδιά τους είναι ιδιοκαταστάσεις
 - Το positronium είναι ένα τέτοιο παράδειγμα
 - Τα quarkonium (quark-antiquark κατάσταση) μεσόνια είναι ένα άλλο παράδειγμα
 - Τελικές καταστάσεις με ένα σωματίδιο και το αντισωματίδιό του μπορεί να είναι επίσης
- ❑ Ο τελεστής C για την εξίσωση του Dirac (quarks και λεπτόνια) δίνει έναν παράγοντα $+i$ για αναστροφή αντι-φερμιόνια ως προς φερμιόνια. Σαν αποτέλεσμα quarkonium και positronium παίρνουν έναν παράγοντα -1 .
- ❑ Ο τελεστής C αλλάζει τη σειρά σε spin-spin συστήματα. Αυτό δίνει έναν παράγοντα -1 για τις περιπτώσεις μονήρους κατάστασης $\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow$ και παράγοντα $+1$ για τριπλή κατάσταση $S=1$
- ❑ Για οποιοδήποτε σύστημα σωματιδίου - αντι-σωματιδίου, ο τελεστής C δρα όπως ο P στο τροχιακό τμήμα της κατάστασης και επομένως υπάρχει ένας παράγοντας $+1$ για L άρτιο και -1 για L περιττό. Εν γένει, $C = -1^L$ για σύστημα φερμιονίου - αντιφερμιονίου
- ❑ Το φωτόνιο έχει $C=-1$ (από εξισώσεις Maxwell)
- ❑ Οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις διατηρούν C: το γινόμενο C της αρχικής κατάστασης είναι ίδιο με αυτό της τελικής κατάστασης
- ❑ Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις διατηρούν (πειραματικά) την C.

Αναπαράσταση των σωματιδίων

- Η σύμβαση που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των σωματιδίων έχει την αναγραφή για κάθε σωματίδιο της ολικής στροφορμής του J , της τιμής του τελεστή parity και της τιμής του τελεστή C : J^{PC} όπου $P = \pm 1$ και $C = \pm 1$ (εφόσον ορίζεται)
- Για τα περισσότερα συνηθισμένα σωματίδια έχουμε :

γ	1^{--}
$\pi^0, \eta, \eta', \eta_c, \eta_b$	0^{-+}
$\rho^0, \omega, \phi, \psi, Y$	1^{--}
π^\pm, K, D, B	0^-
ρ^\pm, K^*, D^*, B^*	1^-

- Η parity δεν εξαρτάται από το spin, αλλά εξαρτάται από την τροχιακή στροφορμή L , η οποία είναι μηδέν για όλες τις παραπάνω καταστάσεις, και επομένως όλα έχουν περιττή parity.
- Η συζυγία φορτίου εξαρτάται από $J = L + S$ καθορισμένη σύμφωνα με την κβαντομηχανική πρόσθεση. Η C δεν ορίζεται για διάφορες καταστάσεις

Χρήση των νόμων διατήρησης

- ❑ Θεωρήστε την διάσπαση: $\rho \rightarrow \pi\pi$
- ❑ Το ρ αντιστοιχεί στην κατάσταση $J^P=1^-$ ενώ το π σε κατάσταση $J^P=0^-$
- ❑ Η διάσπαση αυτή φαίνεται αρχικά να είναι απαγορευμένη λόγω παραβίασης της parity
 - Συγκεκριμένα η αρχική κατάσταση έχει $P = -1$ ενώ η τελική έχει $P_{ολ}=P_{\pi}P_{\pi}=(-1) \times (-1)=1$
- ❑ Φαίνεται επίσης να μην διατηρείται η στροφορμή του συστήματος, εφόσον η αρχική κατάσταση έχει στροφορμή 1 και η τελική έχει στροφορμή $J = (0+0) = 0$
- ✧ Αλλά τα πιόνια έχουν τροχιακή στροφορμή. Αν έχουν $L=1$, τότε έχουμε διατήρηση στροφορμής
- ✧ Η τροχιακή στροφορμή συνεισφέρει στην parity. Η περίπτωση της τροχιακής στροφορμής $L = 1$ δίνει $P = -1$ και αυτό αναιρεί το πρόβλημα της παραβίασης της parity

Χρήση των νόμων διατήρησης

- ❑ Για την περίπτωση των φορτισμένων ρ : $\rho^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0$ η τιμή της συζυγίας φορτίου δεν προσδιορίζεται, κάτι που είναι αποδεκτό και επομένως η διάσπαση μπορεί να γίνει
- ❑ Για την περίπτωση των ουδέτερου ρ^0 : $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ η τιμή της συζυγίας φορτίου είναι $C=-1$ και η τελική κατάσταση είναι $(-1) \times (-1) = 1$. Επομένως μοιάζει σαν μη επιτρεπτή διάσπαση
- ✧ Αλλά τα $\pi^+ \pi^-$ αποτελούν ένα σύστημα σωματιδίου-αντισωματιδίου που έχει τη δική του τιμή συζυγίας φορτίου. Ο τελεστής της συζυγίας φορτίου ενεργεί σαν ένας τελεστής αναστροφής του χώρου που επιφέρει ένα παράγοντα $C = -1$ για τροχιακή στροφορμή $L = 1$.
- ✧ Δεν υπάρχει κάποιος παράγοντας για φερμιόνιο-αντιφερμιόνια και επομένως η διάσπαση μπορεί να πραγματοποιηθεί κανονικά.
- Ωστόσο η διάσπαση $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ δεν παρατηρείται. **Γιατί;**

Χρήση των νόμων διατήρησης

- ❑ Στη διάσπαση $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ τα δυο πιόνια είναι πανομοιότυπα σωματίδια. Από τη στιγμή που είναι μποζόνια η ολική κυματοσυνάρτηση θα πρέπει να είναι συμμετρική σε εναλλαγές
- ❑ Εναλλάσσοντας τα σωματίδια είναι ισοδύναμο με το να αναστρέψουμε τις συντεταγμένες.
- ❑ Από τη στιγμή που η χωρική κυματοσυνάρτηση πρέπει να αντιστοιχεί σε τροχιακή στροφορμή $L = 1$ ώστε να διατηρεί την τροχιακή στροφορμή, εισαγάγει τιμή -1 κάτω από αναστροφή και επομένως είναι αντισυμμετρική κάτω από εναλλαγή.
- ❑ Ο παράγοντας spin για δυο σωματίδια μηδενικού spin είναι πάντοτε συμμετρικός
- ❑ Επομένως δεν μπορούμε να κάνουμε συμμετρική κυματοσυνάρτηση και άρα $\rho^0 \not\rightarrow \pi^0 \pi^0$
- ❑ Για τις διασπάσεις $\rho^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ και $\rho^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^\pm$ τα πιόνια **δεν** είναι πανομοιότυπα και επομένως δεν απαιτείται συμμετρία εναλλαγής

G-Parity

- ❑ Η συζυγία φορτίου δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για να εξακριβώσουμε αν μια αντίδραση είναι επιτρεπτή ή όχι. Αυτό γιατί φορτισμένα σωματίδια σαν τα πιόνια δεν έχουν συγκεκριμένη τιμή για την συζυγία φορτίου C.
- ❑ Ένα χρήσιμο trick είναι να συνδυαστεί ο τελεστής της συζυγίας φορτίου, C, με ένα τελεστή στροφής isospin κατά 180° ως προς την διεύθυνση I_2 . Δηλαδή $G = CR = C \exp(i\pi I_2)$
 - Όπως μια 180° περιστροφή αναστρέφει το πρόσημο μιας κατάστασης με χωρική στροφορμή $L=1$, έτσι και η 180° περιστροφή του isospin δίνει ένα παράγοντα -1 για καταστάσεις με isospin 1, όπως συμβαίνει με τα πιόνια.
 - Αυτή η περιστροφή μετατρέπει επίσης $\pi^+ \leftrightarrow \pi^-$. Ενεργώντας με τον C-τελεστή, αναστρέφεται και πάλι $\pi^- \leftrightarrow \pi^+$. Ξαναπέρνουμε την αρχική κατάσταση με ένα παράγοντα -1.
- ❑ Ο συνδυασμός της συζυγίας φορτίου, C, με περιστροφή του isospin ονομάζεται **G-parity**
- ❑ Πολλά σωματίδια που δεν είναι ιδιοκαταστάσεις του C είναι ιδιοκαταστάσεις του G
 - ✧ Η G-parity των πιονίων είναι -1 και για τις 3 καταστάσεις των πιονίων (π^\pm και π^0)
 - ✧ Η G-parity των η-μεσονίων ($J=0$) είναι +1 ($C=+1$, $I=0$)
 - ✧ Η G-parity των ρ , ω , ϕ , ψ , Υ-μεσονίων ($J=1$) είναι -1 ($C=-1$, $I=0$)
- ❑ Η G-parity είναι πολλαπλασιαστική όπως η C και η P
- ❑ Εφόσον οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις διατηρούν C και P θα διατηρούν και την G-parity

Διατήρηση και παραβίαση

- ❑ Κάθε αλληλεπίδραση διατηρεί ενέργεια, ορμή, στροφορμή, φορτίο, και καθαρό αριθμό quark και λεπτονίων.
- ❑ Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις υπακούν στους περισσότερους νόμους διατήρησης: γεύση quark, parity, συζυγία φορτίου, isospin, και G-parity
- ❑ Οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις σέβονται τον αριθμό quark και λεπτονίων, parity, συζυγία φορτίου.
Παραβιάζουν το isospin και G-parity
- ❑ Οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις πιστεύονταν ότι μοιάζουν με τις ηλεκτρομαγνητικές αλλά τελικά παραβιάζουν όπως είδαμε τις διάφορες συμμετρίες.

Ο γρίφος των θ - τ σωματιδίων

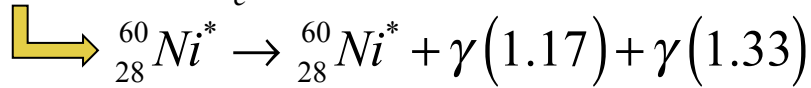
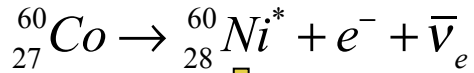
- ❑ Στις κοσμικές ακτινοβολίες και στην πρώιμη εποχή των επιταχυντών θεωρήθηκε ότι υπήρχε ένας γρίφος σχετικά με δυο σωματίδια που παρατηρούνταν σε διάφορες αλληλεπιδράσεις. Τα σωματίδια αυτά ήταν το θ και τ με διασπάσεις $\theta \rightarrow \pi^+ \pi^0$ και $\tau \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$
- ❑ Θεωρούνταν αποδεκτό ότι οι δυο περιπτώσεις περιέγραφαν δυο διαφορετικά σωματίδια αφού προφανώς είχαν διαφορετική εγγενή parity
- ❑ Καθώς τα πειράματα στους επιταχυντές έγιναν καλύτερα, ξεκαθαρίστηκε ότι το θ^+ και το τ^+ είχαν την ίδια μάζα και τον ίδιο χρόνο ζωής. Και τα δυο σωματίδια είναι το K^+
- ❑ Αρχικά πιστεύονταν επίσης ότι η κατάσταση που οδηγούσε στη διάσπαση των 3 πιονίων είχε επιπλέον τροχιακή στροφορμή. Μετά από προσεκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων σκέδασης απέδειξε ότι δεν υπήρχε επιπλέον τροχιακή στροφορμή.

Παραβίαση Parity σε ασθενείς αλληλεπιδράσεις

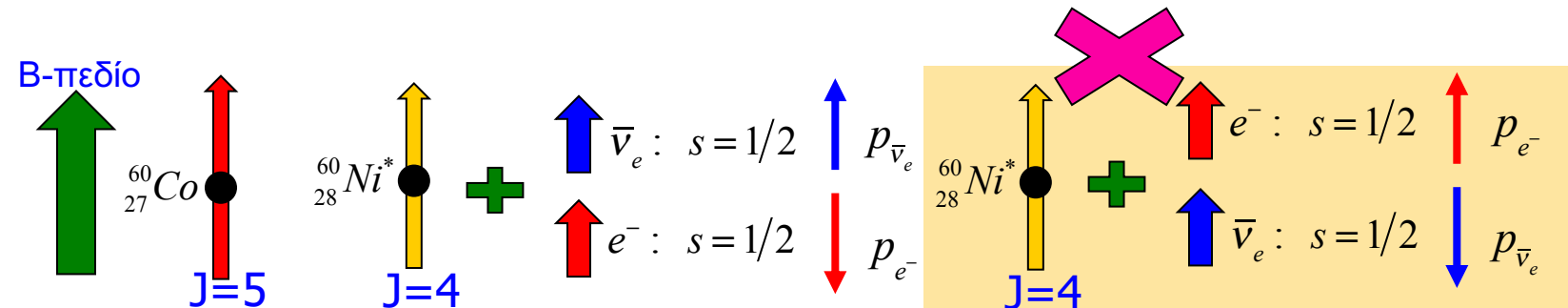
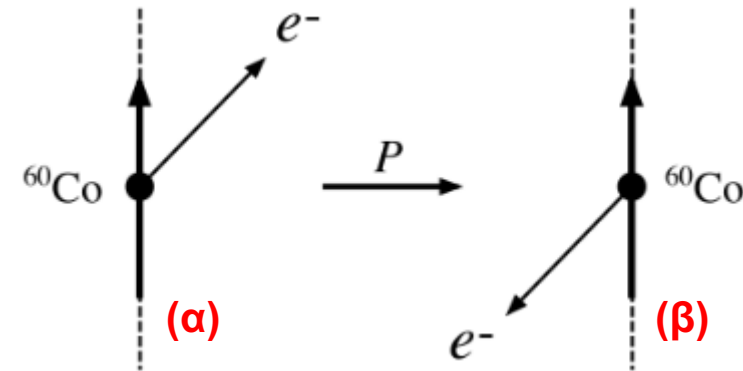
- ❑ Το 1956 οι T.D. Lee και C.N. Young διατύπωσαν αρχικά ότι δεν υπάρχει κάποια απόδειξη ότι οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις διατηρούν την ομοτιμία και ισχυρίστηκαν ότι οι διασπάσεις των « θ^+ » και « τ^+ » σωματιδίων αποδείκνυαν την παραβίαση της ομοτιμίας.
- ❑ Πρότειναν ένα πείραμα στο οποίο να χρησιμοποιηθούν spin πολωμένοι πυρήνες μέσα σε μαγνητικό πεδίο και να παρατηρηθεί ασυμμετρία στην διεύθυνση εκπομπής ηλεκτρονίων από την β -διάσπαση, παράλληλα και αντιπαράλληλα ως προς το μαγνητικό πεδίο
- ❑ Πρότειναν επίσης την μελέτη της συσχέτισης μεταξύ της γωνίας εκπομπής του μιονίου σε διασπάσεις πιονίων με την διεύθυνση εκπομπής των ηλεκτρονίων από την διάσπαση των μιονίων που παράχθηκαν.
- ❑ Έχουμε δει ότι η parity αναστρέφει την ορμή και την θέση αλλά δεν αναστρέφει την στροφορμή που είναι το εξωτερικό γινόμενο της θέσης και ορμής: $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$
Κατ' αναλογία δεν αντιστρέφει το spin των σωματιδίων
- ❑ Ένας όρος της Hamiltonian του συστήματος που εμπεριέχει εσωτερικό γινόμενο δυο διανυσμάτων ορμής δεν θα αλλάξει κάτω από parity αναστροφή.
Επομένως η κινητική ενέργεια, $p^2/2m$, δεν θα αλλάξει κάτω από parity
- ❑ Κατ'αναλογία, το εσωτερικό γινόμενο δυο διανυσμάτων στροφορμής δεν θα αλλάξει
- Ωστόσο κάποιος όρος που περιέχει εσωτερικό γινόμενο της μορφής: $\vec{p} \cdot \vec{L}$ ή $\vec{p} \cdot \vec{S}$ θα αλλάξει μετά από εφαρμογή του τελεστή της parity.
- Επομένως συσχετίσεις spin-ορμής απαγορεύονται κάτω από την υπόθεση της διατήρησης της parity

Παραβίαση της Parity – Πείραμα Wu

- Το 1956 η Wu πραγματοποίησε το προτεινόμενο πείραμα: (Phys.Rev.B, Jan 15, 1957) εξετάζοντας την β-διάσπαση:



- Ο μετασχηματισμός της Parity αναστρέφει όλες τις ορμές των σωματιδίων αφήνοντας αναλλοίωτα τα spins και όποιες γωνιακές στροφορμές
- Διατήρηση της parity προϋποθέτει ίδιο ρυθμό για τις καταστάσεις (α) και (β)
- Λιγότερα ηλεκτρόνια εκπέμπονται στο ημισφαίριο προς την διεύθυνση του spin του πυρήνα
 - Εμφάνιση ασυμμετρίας μεταξύ της ομόρροπης και αντίρροπης εκπομπής
- Με την δημοσίευση της ανακάλυψης της παραβίασης της parity από την Wu, 3 ακόμα επιβεβαιώσεις από άλλες ομάδες επιβεβαίωσαν την παρατήρηση



Ο ρυθμός εκπομπής ως προς την διεύθυνση του spin του πυρήνα εξαρτάται από τον όρο $\langle s \rangle \cdot \vec{p}_e$ που είναι αρνητικός κάτω από parity

Η διάσπαση του πιονίου

Τα φορτισμένα π^\pm διασπώνται >99% σε μίονια: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \bar{\nu}_\mu$ και $\pi^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$

Τα 2° πιο σύνηθες κανάλι διάσπασης είναι σε ηλεκτρόνιο: $\pi^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e$ και $\pi^- \rightarrow e^- \nu_e$

Το 2° κανάλι διάσπασης κινηματικά πιο δημοφιλές αφού $m_\pi \sim m_\mu$ ενώ $m_\pi \gg m_e$

Αντίθετα προς το αναμενόμενο: $\frac{Br(\pi \rightarrow e \nu_e)}{Br(\pi \rightarrow \mu \nu_\mu)} \approx 10^{-4}$

Ο όγκος φασικού χώρου συστημάτων 2 σωμάτων είναι ανάλογος της ορμής του κέντρου μάζας. Για την περίπτωση του μιονίου και ηλεκτρονίου επομένως ο λόγος των όγκων θα είναι: p_e^* / p_μ^*

Αν θεωρήσουμε 2 σωματίδια c και d τα οποία είναι στην τελική κατάσταση μιας διεργασίας και επίσης θεωρήσουμε το ΚΜ τότε τα σωματίδια θα έχουν ενέργεια E_c και E_d και ορμή $p_c = -p_d = p_f$
Η ολική $E = E_c + E_d$

Για να υπολογίσουμε τη πιθανότητα μετάβασης στην τελική κατάσταση θα πρέπει να βρούμε το ολοκλήρωμα:

$$\int |M_{fi}|^2 \frac{d^3 p_c}{(2\pi)^3 2E_c} \frac{d^3 p_d}{(2\pi)^3 2E_d} (2\pi)^4 \delta(E_c + E_d - E) \delta^3(\vec{p}_c + \vec{p}_d)$$

Το φασικό ολοκλήρωμα θα είναι: $\rho_2 = \int \frac{d^3 p_c}{(2\pi)^3 2E_c} \frac{d^3 p_d}{(2\pi)^3 2E_d} (2\pi)^4 \delta(E_c + E_d - E) \delta^3(\vec{p}_c + \vec{p}_d)$

$$\Rightarrow \rho_2 = \frac{1}{(4\pi)^2} \int \frac{d^3 p_c}{E_c E_d(p_c)} \delta(E_c + E_d(p_c) - E) \Rightarrow \rho_2 = \frac{1}{(4\pi)^2} \int \frac{p_f^2 dp_f d\Omega_f}{E_c E_d(p_f)} \delta(E_c + E_d(p_f) - E)$$

Χρησιμοποιώντας την δ-συνάρτηση έχουμε: $\frac{1}{(4\pi)^2} \frac{p_f^2}{E_c E_d(p_f)} \frac{dp_f}{d(E_c E_d(p_f))} d\Omega_f$

Η διάσπαση του πιονίου

Επομένως θα καταλήξουμε: $\frac{1}{(4\pi)^2} \frac{p_f^2}{E_c E_d(p_f)} \frac{dp_f}{d(E_c + E_d(p_f))} d\Omega_f = \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{p_f^2}{E_c E_d(p_f)} \frac{1}{\frac{d}{dp_f}(E_c + E_d(p_f))} d\Omega_f$

Αλλά: $\frac{dE_c}{dp_f} = \frac{p_f}{E_f}$ και $\frac{dE_d}{dp_f} = \frac{p_f}{E_d}$ οπότε έχουμε: $\frac{1}{(4\pi)^2} \frac{p_f^2}{E_c E_d(p_f)} \frac{1}{\frac{p_f}{E_c} + \frac{p_f}{E_d}} d\Omega_f = \frac{p_f}{E} \frac{d\Omega_f}{(4\pi)^2}$

Επιστρέφοντας στην περίπτωση του πιονίου θα έχουμε (θεωρώντας το λεπτόνιο σαν l) από διατήρηση της ενέργειας

$$\sqrt{p_l^{*2} + m_l^2} + p_l^* = m_\pi \Rightarrow p_l^* = \frac{m_\pi^2 - m_l^2}{2m_\pi}$$

Ο λόγος των ορμών επομένως για τις 2 περιπτώσεις διάσπασης θα είναι:

$$\frac{p_e^*}{p_\mu^*} = \frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} = \frac{140^2 - 0.5^2}{140^2 - 106^2} = 2.3$$

Επομένως καθαρά κινηματικά αναμένουμε ότι τα π διασπώνται σε ηλεκτρόνια κυρίως
Λαμβάνοντας υπόψη τις καταστάσεις ελικότητας καταλήγουμε ότι:

$$\frac{Br(\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e)}{Br(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)} = \frac{m_\mu^2}{m_e^2} \left[\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right]^2 = (1.230 \pm 0.004) \times 10^{-4}$$

παράγοντας ελικότητας: $\sim 2 \times 10^{-5}$

φασικός παράγοντας: ~ 4.9

Ελικότητα και νεutrίνο

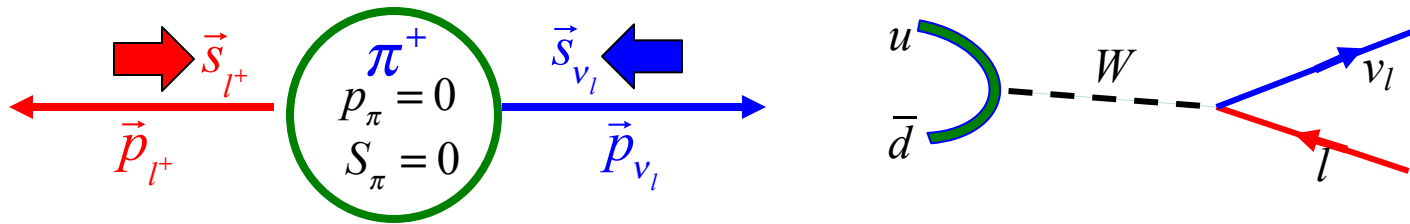
Υποθέτοντας ότι τα νεutrίνο είναι μηδενικής μάζας, βρίσκουμε πειραματικά ότι:

- ❑ Όλα τα νεutrίνο είναι αριστερόστροφα
- ❑ Όλα τα αντι-νεutrίνο είναι δεξιόστροφα
- **Αριστερόστροφο** δηλώνει ότι το spin και η z-συνιστώσα της ορμής είναι αντιπαράλληλα
- **Δεξιόστροφο** δηλώνει ότι το spin και η z-συνιστώσα της ορμής είναι παράλληλα

Η ελικότητα δεξιόστροφη/αριστερόστροφη εμφανίζεται στις διασπάσεις των πιονίων: $\pi^+ \rightarrow l^+ \nu_l$

$$\frac{Br(\pi \rightarrow e \nu_e)}{Br(\pi \rightarrow \mu \nu_\mu)} = 1.23 \times 10^{-4}$$

Αν τα νεutrίνο **δεν ήταν** αριστερόστροφα τότε ο λόγος πρέπει να είναι μεγαλύτερος της 1:



Διατήρηση της στροφορμής επιβάλλει το φορτισμένο λεπτόνιο (e ή μ) να βρίσκεται στο λάθος προσανατολισμό ελικότητας

- Ένα αριστερόστροφο ποζιτρόνιο ή αριστερόστροφο μιονίο

Βαρυονικός αριθμός

Ο Βαρυονικός αριθμός μιας κατάστασης ορίζεται σαν η διαφορά του αριθμού των βαρυονίων και του αριθμού των αντιβαρυονίων. Δηλαδή: $B = N(baryons) - N(antibaryons)$

Ο Βαρυονικός αριθμός διατηρείται από όλες τις αλληλεπιδράσεις όπως έχει μετρηθεί μέσα στα πειραματικά όρια.

Αυτό εξετάζεται συνήθως ψάχνοντας για διάσπαση πρωτονίου: $p \rightarrow e^+ + \pi^0$

Η αντίδραση παραβιάζει επίσης το λεπτονικό αριθμό L αλλά διατηρεί τη διαφορά B-L

Το παρόν όριο για την διάσπαση είναι $> 10^{34}$ έτη ενώ η ηλικία του σύμπαντος είναι 10^{10} έτη

Η μελέτη τέτοιου σήματος προϋποθέτει ακριβή έλεγχο 10^{34} πρωτονίων για παρατήρηση μερικών διασπάσεων μέσα σε αρκετά χρόνια.

Διεργασίες υποβάθρου προέρχονται από κοσμική ακτινοβολία (οπότε τα πειράματα προστατεύονται τοποθετώντας τους ανιχνευτές σε ορυχεία) και φυσική ραδιενεργότητα η οποία ωστόσο δίνει ενέργεια της τάξης των MeV ενώ τα προϊόντα της διάσπασης του πρωτονίου θα είναι της τάξης των GeV

Πλέον ευαίσθητο πείραμα σήμερα είναι το Kamiookande που περιέχει 50000 τόνους νερό. Το κεντρικό οφέλημα τμήμα του ανιχνευτή (εκμηδενισμός υποβάθρου) αντιστοιχεί σε 25000t

Στο νερό έχουμε 10/18 πρωτόνια ως προς τον αριθμό των νουκλεονίων και επομένως όλος ο ανιχνευτής περιέχει:

$$N_p = M \times 10^3 \times N_A (10/18) \Rightarrow N_p = 2.5 \times 10^7 \times 10^3 \times 6 \times 10^{23} (10/18) = 8.5 \times 10^{33}$$

Μετά από αρκετά χρόνια, η έκθεση έφθασε σε $M\Delta t = 91600ty$ ή διαφορετικά $N_p = 30 \times 10^{33} p / y$

Ανιχνεύοντας Cherenkov ακτινοβολία μετράται η ενέργεια. Δεν παρατηρήθηκε γεγονός

Βαρυονικός Αριθμός

Τα βαρυόνια αποτελούνται από 3 quarks, και άρα ο βαρυονικός αριθμός των quarks είναι 1/3

Σχετική ποσότητα είναι ο κβαντικός αριθμός της γεύσης (του τύπου) του quark

Ορίζουμε τον **down-αριθμό** σαν τον αριθμο των down quarks – τον αριθμό των αντιdown quark

Ανάλογα ορίζουμε και για τα υπόλοιπα quarks

$$\text{Έχουμε } N_d = N(d) - N(\bar{d}) \quad N_u = N(u) - N(\bar{u})$$

$$N_s = -[N(s) - N(\bar{s})] \quad N_c = N(c) - N(\bar{c})$$

$$N_b = -[N(b) - N(\bar{b})] \quad N_t = N(t) - N(\bar{t})$$

Οι ισχυρές και ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις διατηρούν τον βαρυονικό αριθμό αλλά όχι οι ασθενείς

Λεπτονικός αριθμός

Ο λεπτονικός αριθμός μιας κατάστασης ορίζεται σαν η διαφορά του αριθμού των λεπτονίων και του αριθμού των αντिलепτονίων. Δηλαδή: $L = N(leptons) - N(antileptons)$

Ανάλογα με τον τύπο του λεπτονίου έχουμε και διαφορετικούς λεπτονικούς αριθμούς:

$$N_e = N(e^- + \nu_e) - N(e^+ + \bar{\nu}_e)$$

$$N_\mu = N(\mu^- + \nu_\mu) - N(\mu^+ + \bar{\nu}_\mu)$$

$$N_\tau = N(\tau^- + \nu_\tau) - N(\tau^+ + \bar{\nu}_\tau)$$

Ο συνολικός λεπτονικός αριθμός είναι το άθροισμα των παραπάνω: $L = N_e + N_\mu + N_\tau$

Η ισχύς της διατήρησης εξετάζεται με την μελέτη διεργασιών όπως $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$

καθώς και $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + e^+ + e^-$

Μετράται ο λόγος διακλάδωσης αυτών των διασπάσεων ως προς το συνολικό. Δηλαδή

$$\frac{\Gamma(\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma)}{\Gamma_{tot}} < 1.2 \times 10^{-11} \quad \frac{\Gamma(\mu^\pm \rightarrow e^\pm + e^+ + e^-)}{\Gamma_{tot}} < 1 \times 10^{-12}$$

Αναστροφή χρόνου και CPT

Ο τελεστής αναστροφής χρόνου, T , αναστρέφει τον χρόνο αφήνοντας αμετάβλητες τις χωρικές συντεταγμένες

Σε αντίθεση με parity, P , και charge conjugation C , δεν υπάρχει κβαντικός αριθμός σχετιζόμενος με αναστροφή χρόνου

Θεώρημα Lauders: Αν μια θεωρία αλληλεπιδρώντων πεδίων είναι αναλλοίωτη κάτω από μετασχηματισμούς Lorentz και περιστροφές, θα είναι επίσης αναλλοίωτη κάτω από τον συνδυασμό διαδοχικών εφαρμογών (ανεξαρτήτου σειράς) της C , P και T αναστροφής ➡ **Θεώρημα CPT**

Σαν αποτέλεσμα, η μάζα των σωματιδίων πρέπει να είναι ίση με την μάζα των αντισωματιδίων

Έλεγχος για παραβίαση ή όχι της CPT έρχεται από έλεγχο διαφοράς μάζας σωματιδίων με αντισωματίδιά τους

Όριο έχει θεσπιστεί από αναζήτηση διαφοράς μάζας πρωτονίου – αντιπρωτονίου:

Αντιπρωτονικό άτομο $\bar{p}^4\text{He}^+$ (πυρήνας ^4He με ένα αντιπρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο) παράχθηκαν στο CERN (ASACUSA πείραμα). Εξέταση του φάσματος εκπομπής του ατόμου δείχνει ότι:

$$\frac{|m_p - m_{\bar{p}}|}{m_p} < 10^{-8}$$

Υπερφορτίο και βαρυονικός αριθμός

Ορίζουμε την σχέση μεταξύ I_3 και της ποσότητας: $I_3 \equiv Q - Y / 2$

όπου Q το ηλεκτρικό φορτίο και Y το υπερφορτίο

Το υπερφορτίο ορίζεται σαν $Y = B + S + C + Bot + T$

Θα μπορούσαμε να γράψουμε επίσης: $I_3 \equiv \frac{1}{2}(N_u - N_d)$

όπου $N_u = N(u) - N(\bar{u})$ και $N_d = N(d) - N(\bar{d})$

Με την ανακάλυψη όλων των quarks ο ορισμός του υπερφορτίου είναι:

$$Y = \frac{1}{3}(N_u + N_d - 2N_s + 4N_c - 2N_b + 4N_t)$$

Συζυγία φορτίου και parity - CP

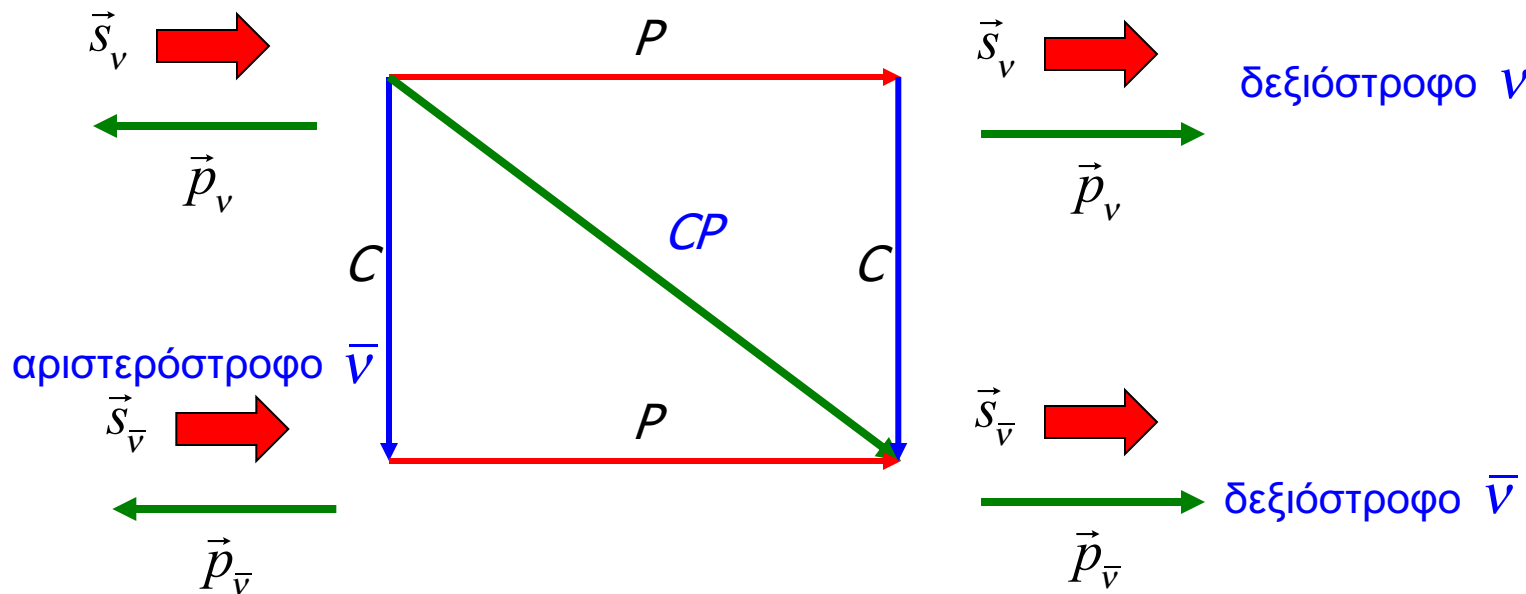
Οι ισχυρές δυνάμεις διατηρούν C και P ξεχωριστά

Στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις τόσο η C όσο και η P δεν διατηρούνται ξεχωριστά

➤ Ο συνδυασμός των δυο, CP, θα πρέπει να διατηρείται

Θεωρούμε πως τα νεutrino και αντινεutrino μετασχηματίζονται κάτω από C, P και CP

➤ Πειραματικά ξέρουμε ότι όλα τα νεutrino (αντι-νεutrino) είναι αριστερόστροφα (δεξιόστροφα)



✧ CP πρέπει να αποτελεί καλή συμμετρία!