

F. Massa

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma

ALCUNE CONSEGUENZE DELL'ESISTENZA DI UNA QUINTA FORZA
NELLA FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

(*)

Recentemente (rif.1) e' stata avanzata l'ipotesi che, oltre le note forze gravitazionale, debole, elettromagnetica e forte, esista una ulteriore interazione : l'iperforza.

Questa nuova forza sarebbe mediata da particelle (iperfotoni) di massa $m_{\tilde{\gamma}} \sim 10^{-9}$ ev ed accoppiate all'iperforza.

In questa nota sono riassunte le motivazioni che hanno condotto all'ipotesi dell'iperforza (par.1), i suoi effetti sulla legge di gravitazione universale di Newton (par.2) ed alcune critiche rivolte contro l'analisi fatta nel rif.1 (par.3). Nel par.4 sono brevemente riassunti gli effetti sul sistema $K^0 - \bar{K}^0$ ed alcuni decadimenti indotti dall'iperfotone.

(*) Lezione tenuta per il Dottorato di Ricerca in Fisica all'Universita' degli Studi di Pavia nell'A.A. 1985/86.

Sebbene la mancata osservazione di questi decadimenti escluda l'accoppiamento dell'iperfotone con la stranezza, tuttavia l'ipotesi di un accoppiamento col numero barionico attualmente resta valida. Una delle possibili conseguenze di quest'ultima ipotesi e' discussa nel paragrafo 5, dove viene considerato l'effetto di questa nuova forza sulle transizioni spontanee di neutroni in antineutroni.

1. -IPOTESI DELL' IPERFORZA -

Nel rif.1 sono riportate ad una unica causa le seguenti anomalie riscontrate in due situazioni sperimentali e su due grandezze fisiche completamente diverse:

1. alcune misure geofisiche della costante G di gravitazione universale (rif.2) presentano anomalie interpretate come una possibile evidenza di un accoppiamento non Newtoniano. L'energia di interazione tra due masse puntiformi m ed m sarebbe:

$$(1) \quad V(r) = -G_{\infty} (m_1 m_2 / r) (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

dove

$$\lambda = (200 \pm 50)m$$

$$\alpha = -(7.2 \pm 3.6) \times 10^{-3}$$

e G_∞ e' il valore della costante di Newton per $r \rightarrow \infty$.
 Notiamo che, se G_0 e' il valore di G per $r \rightarrow 0$, dalla
 (1) si ricava:

$$(2) \quad G_\infty = G_0 / (1 + \alpha)$$

Quindi oltre all'energia Newtoniana

$$V_N = -G m_1 m_2 / r$$

esisterebbe un'energia dovuta ad una forza repulsiva
 ($\alpha < 0$) con un range di azione limitato:

$$(3) \quad [\Delta V](Geof) = -\alpha G_\infty m_1 m_2 (e^{-r/\lambda}) / r$$

2. alcune grandezze intrinseche al sistema $K^0 - \bar{K}^0$, come la differenza di massa Δm tra K_L e K_S , la vita media τ_S di K_S ed i parametri caratteristici della violazione di CP nel decadimento di K_L : $|\eta_{+-}|$ e $\text{tg } \phi_{+-}$, sembrano mostrare una dipendenza dall'energia (vedi par.3). Questa anomalia viene interpretata nel rif.1 come dovuta al fatto che il sistema $K^0 - \bar{K}^0$ e' ritenuto isolato, mentre in effetti e' in presenza di una forza esterna che ne modifica le caratteristiche.

Se l'anomalia descritta nel punto 1 fosse dovuta ad una forza accoppiata al numero barionico, allora gli effetti di questa forza sarebbero presenti anche nei dati del famoso

esperimento di Eotvos (rif.3), finora interpretato come la prima dimostrazione sperimentale dell'uguaglianza tra massa inerziale e massa gravitazionale.

I dati dell'esperimento di Eotvos sono stati quindi rielaborati nel rif.1, nel quale sono anche riportate le due importanti affermazioni:

1. esiste una forza accoppiata al numero barionico la cui costante di accoppiamento e' compatibile con quella osservata negli esperimenti geofisici
2. l'azione di questa forza tra corpi macroscopici risulta repulsiva.

2. -IL CAMPO DI IPERFORZA DELLA TERRA-

2.1 In analogia col caso elettromagnetico, nel quale un fotone scambiato tra cariche elettriche dello stesso segno genera una forza repulsiva, il nuovo campo di forze dovrebbe anche esso essere associato ad una particella vettoriale (spin 1). Inoltre se questa nuova particella fosse la causa delle anomalie osservate sia nella legge di Newton che nel sistema $K^0-\bar{K}^0$, dovrebbe essere accoppiata sia al numero barionico B che alla stranezza S e quindi all'ipercarica Y ($Y=B+S$). Dall'accoppiamento con l'ipercarica deriva il nome di iperfotone ($\tilde{\gamma}$).

Se l'iperfotone $\tilde{\gamma}$ avesse una massa non nulla $m_{\tilde{\gamma}}$, scambiato tra due corpi di numero barionico B_1 e B_2 , introdurrebbe un'energia di interazione alla Yukawa:

$$(4) \quad V_{\tilde{\gamma}}(r) = f^2 B_1 B_2 (e^{-r m_{\tilde{\gamma}}}) / r$$

Tra due protoni ($B_1 = B_2 = 1$) si ottiene dalla (4):

$$V_{\tilde{\gamma}}(r) = f^2 (e^{-r m_{\tilde{\gamma}}}) / r$$

e dalla (3):

$$[\Delta V](\text{Geof}) = -\alpha G_{\infty} m_{\mu}^2 (e^{-r/\lambda}) / r$$

dove m_{μ} e' la massa dell'atomo di idrogeno.

L'ipotesi fatta:

$$V_{\tilde{\gamma}} = [\Delta V](\text{Geof})$$

ha quindi come conseguenza:

$$(5) \quad m_{\tilde{\gamma}} = 1/\lambda = 10^{-9} \text{ ev}, (\lambda = 0.1)$$

ed inoltre

$$f^2 = -\alpha G_{\infty} m_{\mu}^2$$

Per cui, sostituendo la (2) nella precedente, si ottiene:

$$(6) \quad f^2 / G_0 m_\mu^2 = -\alpha / (1 + \alpha) \approx -\alpha = 7.2 \times 10^{-3}$$

2.2 In un esperimento condotto sulla superficie della Terra i corpi sono soggetti all'azione dell'iperforza generata da tutta la Terra.

Per valutare l'energia di interazione tra un corpo di numero barionico B e la Terra, considerata come una sfera omogenea di raggio R_\oplus , possiamo procedere in modo intuitivo partendo dall'energia di interazione tra due cariche barioniche puntiformi B_1 e B_2 (che si ottiene dalla (4) sostituendovi $m_{\tilde{\nu}} = 1/\lambda$):

$$(7) \quad V_{\tilde{\nu}}(r) = (f^2 B_1 B_2 / r) (e^{-r/\lambda})$$

Nel secondo membro della (7) il primo fattore ha la forma di una energia Newtoniana, mentre il secondo limita il range di interazione ad un valore circa uguale a λ . Poiche':

$$\lambda / R_\oplus = 3 \times 10^{-5}$$

un corpo posto sulla superficie della Terra sentirà l'azione dei barioni distanti meno di λ e non quella dei barioni di tutta la Terra.

Se ρ e ρ_B sono rispettivamente la densità di massa e la densità barionica della Terra, poiche':

$$V_N(R_\oplus) = -GmM_\oplus / R_\oplus = -(4/3) \pi Gm \rho R^2$$

ci si aspetta (come ordine di grandezza):

$$v_{\tilde{\gamma}}(R_{\oplus}) \sim (4/3)\pi f^2 B \varrho_B \lambda^2$$

e quindi:

$$(8) \quad v_{\tilde{\gamma}}/v_N \sim (f^2/G)(B/m)(\varrho_B/\varrho)(\lambda/R_{\oplus})^2 = \\ = (f^2/Gm_H^2)(B/\mu)(B_{\oplus}/\mu_{\oplus})(\lambda/R_{\oplus})^2$$

dove μ e μ_{\oplus} sono rispettivamente la misura delle masse del corpo in esame e della Terra in unita' di massa dell'atomo di idrogeno e B_{\oplus} e' il numero barionico della Terra.

Analogamente, se g_N e' l'accelerazione Newtoniana verso la Terra:

$$g_N = GM_{\oplus}/R_{\oplus}^2 = (4/3)\pi G \varrho R_{\oplus}$$

per cui ci si aspetta che il contributo $g_{\tilde{\gamma}}$ dovuto all'iperforza generata dalla Terra sia dato da:

$$(9) \quad g_{\tilde{\gamma}}/g_N \sim (f^2/Gm_H^2)(B/\mu)(B_{\oplus}/\mu_{\oplus})(\lambda/R_{\oplus})$$

E' interessante notare che dalle (8) e (9) si deduce:

$$(10) \quad v_{\tilde{\gamma}} \sim (\lambda/R_{\oplus})(v_N/g_N)g_{\tilde{\gamma}} = (\lambda/R_{\oplus})mR_{\oplus}g_{\tilde{\gamma}} = m\lambda g_{\tilde{\gamma}}$$

Una valutazione precisa del contributo della Terra, considerata come una sfera omogenea di raggio R_{\oplus} , produce i seguenti risultati:

$$(11) \quad v_{\tilde{\gamma}} / v_N = (f^2 / Gm_N^2) (B/\mu) (R_{\oplus} / \mu_{\oplus}) \gamma(x)$$

dove:

$$(12) \quad \gamma(x) = 3e^{-x} (x \cosh x - \sinh x) / x^2 \sim 3 / (2x^2)$$

$$(13) \quad g_{\tilde{\gamma}} / g_N = (f^2 / Gm_N^2) (B/\mu) (R_{\oplus} / \mu_{\oplus}) \epsilon(x)$$

dove:

$$(14) \quad \epsilon(x) = 3(1+x)e^{-x} (x \cosh x - \sinh x) / x \sim 3 / (2x)$$

essendo:

$$x = R_{\oplus} / \lambda \sim 3 \times 10^4$$

Da queste due ultime relazioni si ricava:

$$v_{\tilde{\gamma}} = m \lambda g_{\tilde{\gamma}} x / (1+x) \sim m \lambda g_{\tilde{\gamma}}$$

Dalla (13) ci si aspetta una violazione del principio di equivalenza in forma debole della relatività generale, in quanto l'accelerazione di un corpo verso la Terra

dipenderebbe dal rapporto tra il numero barionico e la massa del corpo stesso. Questo rapporto varia tra sostanze diverse a causa della dipendenza dell'energia di legame dal numero di massa, della differenza di massa tra neutrone e protone e della variazione del rapporto tra numero di neutroni e di protoni.

Quindi, nei dati dell'esperimento di Eotvos (rif.3), che per primo ha dimostrato la validità del principio di equivalenza in forma debole, dovrebbe invece essere presente una evidenza dell'azione dell'iperforza.

L'analisi dei dati di questo esperimento è riportata in fig.1 (presa dal rif.1), nella quale si è posto:

$$\Delta a/g = (a_1 - a_2)/g - k_1 - k_2 - \Delta k$$

dove a_1 e a_2 sono le accelerazioni di due corpi 1 e 2 messi a confronto. Dalla fig.1 risulta evidente una correlazione tra Δk e :

$$\Delta (B/\mu) = B_1/\mu_1 - B_2/\mu_2$$

Nel rif.1 si arriva quindi alle seguenti conclusioni:

1. esiste una forza repulsiva tra barioni

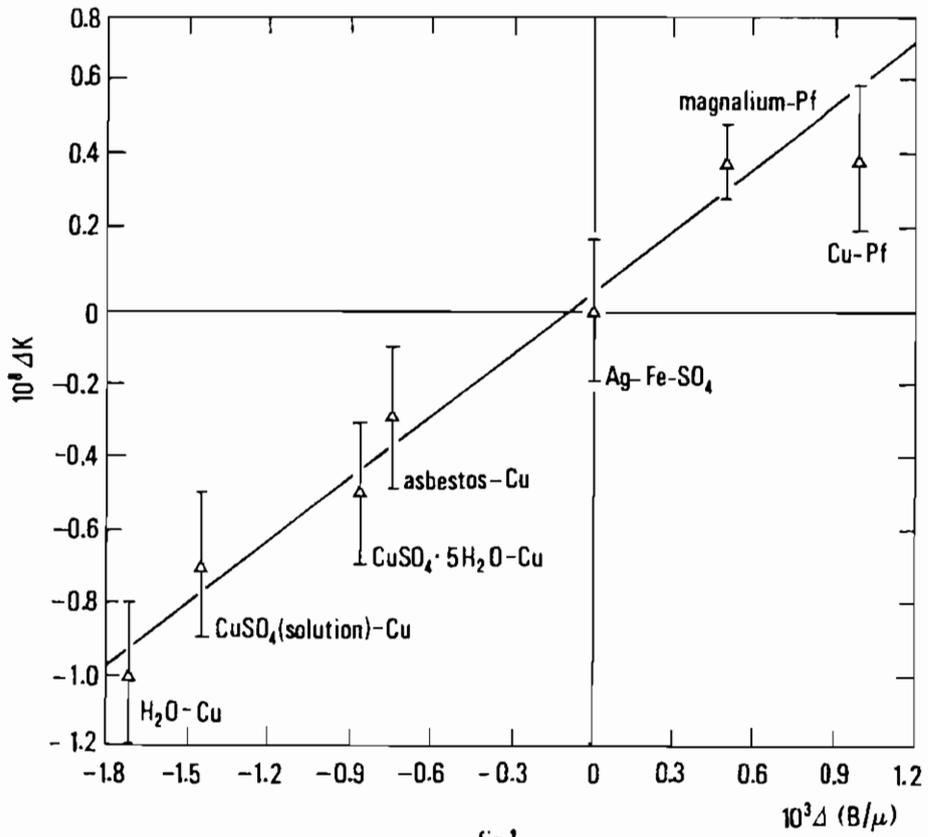


fig.1

2. il valore della costante di accoppiamento tra iperfotone e barioni e' maggiore di quello ottenuto dalle misure geofisiche:

$$[f^2/Gm_H^2](\text{Eotvos}) \sim 18.8 [f^2/Gm_H^2](\text{Geof})$$

Tuttavia l'accordo con le misure geofisiche viene considerato soddisfacente considerando che, se $\lambda = 200$ m, la distribuzione locale di materia puo' influenzare la forma della funzione $\epsilon(x)$ nella (13) e quindi il valore che si ricava per f^2/Gm_H^2 nel confronto con i dati di Eotvos.

2.3 Per valutare gli ordini di grandezza di $v_{\tilde{\gamma}}$ e $g_{\tilde{\gamma}}$ si puo' assumere nelle (11) e (13):

$$B/\mu = 1, B_{\oplus}/\mu_{\oplus} = 1$$

Assumendo inoltre per la costante di accoppiamento il valore $[f^2/Gm_H^2](\text{Geof})$ si ottiene:

$$v_{\tilde{\gamma}}/v_N = 10^{-11}$$

$$g_{\tilde{\gamma}}/g_N = 3 \times 10^{-7}$$

Quindi:

$$g_{\tilde{\gamma}} = 3 \times 10^{-7} g_N \sim 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

L'energia potenziale di un protone nel campo dell'iperforza della Terra risulta dalla (10):

$$V_{\tilde{f}} \sim m_p \lambda g_{\tilde{f}} \sim 6 \times 10^{-12} \text{ ev}$$

Assumendo invece il valore [f^2/Gm_{μ}^2] (Eotvos) si avrebbe:

$$V_{\tilde{f}} \sim 10^{-10} \text{ ev}$$

Nel seguito assumeremo:

$$(15) \quad V_{\tilde{f}} \sim (6 \times 10^{-12} \div 10^{-10}) \text{ ev}$$

3. -COMMENTI ALLA RIANALISI DELL'ESPERIMENTO DI EOTVOS-

L'ipotesi dell'iperforza ha sollevato diversi commenti critici rivolti sia all'ipotesi di esistenza di una particella con massa non nulla dotata di ipercarica (vedi par.4), sia alla rianalisi dei dati dell'esperimento Eotvos. E' stato notato (rif.4) che, prendendo in considerazione i dati dell'esperimento di Eotvos omissi nel rif.1 ed altri successivi esperimenti, la correlazione tra accelerazione e numero barionico di fig.1 non risulta piu' cosi' evidente. E' stato inoltre notato (rif.5) che, al contrario di quanto affermato nel rif.1, i dati riportati in fig.1 mostrano una evidenza di una forza attrattiva. Quindi nel rif.1 sarebbe

stato commesso un errore di segno nella valutazione di f^2/Gm_μ^2 . Infatti confrontiamo ad esempio le accelerazioni dell'acqua e del rame come riportate dai dati di Eotvos. Risulta (vedi fig.1):

$$k_{H_2O} - k_{Cu} = (-1. \pm .2) \times 10^{-8}$$

Quindi, secondo le misure di Eotvos, l'acqua dovrebbe avere una accelerazione minore del rame. Risulta anche:

$$(B/\mu)_{H_2O} - (B/\mu)_{Cu} = -1.171 \times 10^{-3}$$

che comporta un accoppiamento dell'acqua all'iperforza minore del rame e quindi una minore repulsione da parte della Terra verso l'acqua che verso il rame. Poiche' questa repulsione e' opposta all'attrazione gravitazionale, per effetto dell'iperforza l'accelerazione dell'acqua sarebbe maggiore di quella del rame.

Riassumendo: Eotvos ha misurato che l'acqua cade piu' lentamente del rame, mentre la teoria dell'iperforza prevede l'opposto. Se i dati di fig.1 fossero corretti, dovremmo concludere che esiste una forza attrattiva accoppiata al numero barionico. Questa nuova interazione non puo' essere mediata da particelle vettoriali, ma da particelle scalari o di spin 2.

Il carattere attrattivo di questa possibile forza esclude la possibilita' di identificarla con quella presente nelle

misure geofisiche.

E' stato anche osservato (rif.6) che dai dati del rif.3 non e' possibile ricavare informazioni circa il carattere attrattivo o repulsivo della nuova forza: se l'esperimento di Eotvos fosse eseguito su un terreno perfettamente piatto, orizzontale e simmetrico l'effetto di una forza a corto range sarebbe nullo. Infatti la bilancia di torsione di Eotvos non e' sensibile alle forze verticali, cioe' alle forze dirette secondo la composizione della forza Newtoniana, diretta verso il centro della Terra, e della forza centrifuga, dovuta alla rotazione della Terra. Solo le componenti orizzontali delle forze possono indurre una torsione alla bilancia di Eotvos. La direzione di ogni nuova forza a corto range ($\lambda \ll R$) risulta definita dalla configurazione della massa locale, per cui nell'ipotesi fatta l'iperforza sarebbe perfettamente verticale e darebbe un contributo nullo alla torsione della bilancia. In generale l'angolo tra la direzione dell'iperforza e la verticale e' definito dalla situazione ambientale. Si perde percio' ogni possibilita' di dedurre direttamente dall'analisi della fig.1 il carattere attrattivo o repulsivo della nuova forza.

Quindi, sebbene nel rif.1 ci sia un errore nel segno della forza che e' supposta agire tra cariche barioniche (rif.5), poiche' i dati dell'esperimento di Eotvos non sono significativi al fine di affermare od escludere l'esistenza di una forza a range intermedio accoppiata al numero

barionico (rif.8), non puo' essere esclusa l'ipotesi che una tale forza esista e che sia la causa dell'anomalia osservata nella legge di gravitazione universale di Newton.

Come si e' visto, la situazione non e' chiara e sarebbe necessario un nuovo esperimento per esaminare la possibile esistenza di questa nuova forza .

E' interessante notare che se, effettivamente una tale forza esistesse e se in un esperimento fosse provato l'effetto di questa forza generato dalla Terra, ripetendo l'esperimento in una situazione di distribuzione locale di massa simmetrica attorno all'apparato sperimentale (fino ad una distanza alcune volte maggiore del range della forza, come sotto la galleria del Gran Sasso o in una miniera), si otterrebbe un risultato nullo. Questo in quanto per ragioni di simmetria la iperforza totale agente sui corpi in esame sarebbe nulla nella situazione descritta (a meno di disomogeneita' locali di materia) e certamente molto minore di quella presente in un esperimento condotto sulla superficie della Terra.

Nel seguito l'ipotesi di una forza accoppiata al numero barionico sara' mantenuta. Sara' pure mantenuta la valutazione dell'energia potenziale di un protone espressa dalla (15), dove pero' il valore ottenuto dai dati di Eotvos ($\Delta V \sim 10^{-10}$ ev) deve essere considerato come una stima di un limite estremo dell'energia di interazione.

4. -CRITICHE ALL'IPOTESI DELL' IPERFOTONE -

4.1 In un esperimento al Fermilab (rif.7) sono stati misurati alcuni dei parametri caratteristici dei processi di rigenerazione dei K^0 in un intervallo di energia 30÷100 Gev.

Sono stati così determinati:

la differenza di massa tra K_L e K_S : $\Delta m = m_L - m_S$

la vita media del K_S : τ_S

i parametri caratteristici della violazione di CP: $|\eta_{+-}|$,

$\text{tg } \phi_{+-}$ definiti come:

$$\eta_{+-} = |\eta_{+-}| e^{i\phi_{+-}} = A(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) / A(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)$$

dove $A(K_{L(S)} \rightarrow \pi^+ \pi^-)$ rappresenta l'ampiezza del decadimento del K_L (K_S) in $\pi^+ \pi^-$.

I risultati di queste misure rivelano una anomala dipendenza dall'energia: i valori dei parametri precedenti, misurati alle energie del Fermilab, differiscono da quelli misurati a bassa energia (~ 5 Gev).

Una possibile dipendenza dall'energia dei parametri misurati e' la seguente:

$$x = x_0 (1 + b \gamma^2)$$

dove x rappresenta indifferentemente uno dei parametri Δm ,

τ_S , $|\eta_{+-}|$, $\text{tg } \phi_{+-}$ e $\gamma = E_K / m_K$.

Includendo i valori di bassa energia dai dati sperimentali si ricava un valore non nullo del parametro b. Questa dipendenza dall'energia puo' essere generata dall'interazione del sistema $K^0-\bar{K}^0$ con un campo esterno. Il sistema $K^0-\bar{K}^0$ non sarebbe isolato e l'interazione con un campo esterno darebbe un contributo ai parametri misurati dipendente dall'energia del fascio dei K^0 . L'accoppiamento del campo esterno con le particelle deve perciò essere proporzionale alla stranezza S.

Supponendo che questo campo sia lo stesso che ha generato le anomalie osservate nelle misure geofisiche della costante di gravitazione universale (rif.2) e nella rianalisi dell'esperimento di Eotvos (rif.1), e' possibile ricavare la costante di accoppiamento tra iperfotone ed ipercarica e quindi calcolare l'effetto dell'interazione del sistema $K^0-\bar{K}^0$ col campo dell'iperforza generato dalla Terra.

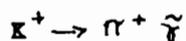
Il confronto tra previsione teorica (rif.8) del parametro b e risultati sperimentali e' riportato nella tabella seguente:

	PREVISIONE	ESPERIMENTO
Δm	2.3×10^{-9}	$-(8 \div 6) \times 10^{-6}$
$\Delta \Gamma_S$	-2.3×10^{-9}	$+(2 \div 1) \times 10^{-6}$
$ \eta_{+-} $	-3.6×10^{-7}	$\sim 10^{-6}$

$$\operatorname{tg} \phi_{+-} \quad -7.10^{-7} \quad \sim -10^{-5}$$

Dal confronto precedente l'accordo non risulta chiaro, anche per l'incertezza dei dati sperimentali.

4.2 L'esistenza di un iperfotone massivo accoppiato alla stranezza puo'indurre il decadimento:



reso possibile attraverso la componente longitudinale della polarizzazione dell'iperfotone (rif.9).

Questo decadimento sarebbe distinguibile dal:



perche', nel primo caso, nel sistema di quiete del K^+ l'impulso del π^+ risulta:

$$P_{\pi^+} = 227 \text{ Mev}/c$$

mentre nel secondo caso l'impulso del π^+ risulta:

$$P_{\pi^+} = 205 \text{ Mev}/c$$

La previsione teorica del rapporto:

$$R = \Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ \tilde{\gamma}) / \Gamma(K \rightarrow \text{all})$$

Risulta (rif.11):

$$R = \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \tilde{\gamma}) / \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-) \sim (F^2/8 \pi^2 \hbar c) (\omega_0^2 / m_{\tilde{\gamma}}^2)$$

dove:

$$\omega_0 \sim 100 \text{ Mev}$$

$$m_{\tilde{\gamma}} = 10^{-9} \text{ ev}$$

$$F^2/4 \pi \hbar c = f^2/\hbar c = 10^{-39} \text{ -- } 10^{-40}$$

Si ottiene così:

$$\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \tilde{\gamma}) / \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) = R \cdot \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-) / \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)$$

$$\sim (3 \div 30)\%$$

Questo rapporto e' almeno dello stesso ordine di grandezza di quello osservato (rif.11) per il decadimento:

$$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$$

Quindi se l'iperfotone fosse accoppiato alla stranezza risulterebbe incomprensibile la mancata identificazione del decadimento (16).

5.-IPERFORZA ED OSCILLAZIONE $N-\bar{N}$ -

5.1 Nel paragrafo precedente si e' visto come sia esclusa una forza accoppiata alla stranezza, con un range e una costante di accoppiamento dati nel rif.1. Nel par.3 si e' visto invece che non puo' essere esclusa l'esistenza di una forza a range intermedio, come causa della anomalia osservata nella legge di gravitazione universale di Newton. In questo paragrafo viene considerato l'effetto di questa forza sulle transizioni di neutroni in antineutroni, che possono avvenire con fasci di neutroni "liberi".

La possibilita' di transizioni spontanee di neutroni in antineutroni e' attualmente studiata nell'esperimento NADIR condotto col reattore nucleare TRIGA MARK II del laboratorio LENA dell'Universita' di Pavia.

In questo esperimento i neutroni del reattore vengono incanalati in un tubo a vuoto di 1.2 m di diametro per un percorso di circa 16.5 m, corrispondente ad un tempo di volo di circa 7.5 msec. Lungo questo percorso il campo magnetico terrestre viene schermato fino ad un valore inferiore a circa 10 mGauss. In questo modo le interazioni dei neutroni con l'ambiente risultano trascurabili e gli eventuali antineutroni prodotti nelle transizioni spontanee dei neutroni liberi annichilirebbero contro un bersaglio di grafite di 125 μ m di spessore. Attorno a questo bersaglio e' costruito un rivelatore per determinare il vertice di interazione degli antineutroni e l'energia di circa 2 Gev

liberata nell'annichilazione.

Con un flusso di 5×10^{10} n/sec integrato su un periodo di quattro mesi l'apparato e' capace di rivelare un evento di oscillazione, se il tempo di oscillazione $\tau_{n\bar{n}}$ risulta :

$$\tau_{n\bar{n}} \sim 10^6 \text{ sec}$$

L'indeterminazione sul limite di $\tau_{n\bar{n}}$ e' dovuta al livello dei fondi, attualmente in studio.

5.2 Le transizioni neutrone-antineutrone ($n-\bar{n}$) sono previste nelle teorie che postulano la unificazione delle interazioni debole, elettromagnetica e forte. In queste Teorie Unificate sono previste reazioni nelle quali viene violato il numero barionico al livello $\Delta B=1$, come nel decadimento del protone, ed anche violazioni del tipo $\Delta B=2$, come nelle oscillazioni $n-\bar{n}$.

Se il numero barionico non e' conservato, lo stato fisico $|n_f\rangle$ corrispondente ad un neutrone non deve necessariamente avere un numero barionico definito. Per cui, se indichiamo con $|n\rangle$ ed $|\bar{n}\rangle$ gli stati corrispondenti rispettivamente al numero barionico $B=1$ e $B=-1$, in assenza di interazione con campi esterni gli stati fisici possibili saranno costituiti da una sovrapposizione di $|n\rangle$ ed $|\bar{n}\rangle$:

$$(17) \quad |n_f\rangle = (1/\sqrt{2})(|n\rangle \pm |\bar{n}\rangle), (j=1,2)$$

con massa:

$$m_j = m \pm \delta m, (j=1,2)$$

L'evoluzione temporale di questi stati risulta:

$$(18) \quad |n_f(t)\rangle = |n_f(0)\rangle e^{-i m_j t / \hbar}, (j=1,2)$$

Invertendo le (17) e sostituendovi le (18) si puo' ricavare l'evoluzione temporale dello stato $|\bar{n}(t)\rangle$ in funzione dei valori iniziali $|n(0)\rangle$ ed $|\bar{n}(0)\rangle$.

Partendo da un fascio di puri neutroni ($|\bar{n}(0)\rangle = 0$), si ottiene:

$$|\bar{n}(t)\rangle = (1/2) |n(0)\rangle e^{-i m t / \hbar} \begin{pmatrix} e^{-i \delta m t / \hbar} & e^{i \delta m t / \hbar} \\ e^{i \delta m t / \hbar} & -e^{-i \delta m t / \hbar} \end{pmatrix}$$

Si avrebbe quindi una probabilita' diversa da zero di trovare un antineutrone al tempo t, partendo a t=0 con soli neutroni:

$$(19) \quad P_{\bar{n}}^{\text{Free}}(t) = \text{sen}^2 \delta m \cdot t / \hbar = \text{sen}^2 t / \tau_{n\bar{n}}$$

dove si e' posto:

$$\tau_{n\bar{n}} = \hbar / \delta m$$

Tipicamente i tempi di volo t realizzati con neutroni liberi

sono:

$$t \geq 10 \text{ msec}$$

ed i tempi di oscillazione di interesse fisico:

$$\tau_{n\bar{n}} \sim (10^5 \div 10^6) \text{ sec}$$

Per cui risulta:

$$t \ll \tau_{n\bar{n}}$$

e la (19) può essere approssimata dalla:

$$(20) \quad P_{\bar{n}}^{\text{Free}}(t) \sim (t/\tau_{n\bar{n}})^2$$

Se nella zona sperimentale esiste un campo col quale neutrone ed antineutrone entrano in interazione, allora la probabilità di transizione diventa (rif.13):

$$(21) \quad P_{\bar{n}}^{\text{Int}}(t) = (1/(\Delta V \cdot \tau_{n\bar{n}}/\hbar)^2) \text{sen}^2 \Delta V \cdot t/\hbar$$

dove

$$\Delta V = |E_n - E_{\bar{n}}|/2$$

essendo $E_{n(\bar{n})}$ l'energia del neutrone (antineutrone) nel

campo esterno.

Come risulta dal confronto della (20) con la (21), si puo' porre:

$$P_{\bar{n}}^{Int}(t) = \alpha P_{\bar{n}}^{Free}(t)$$

con

$$(22) \quad \alpha = (1/(\Delta V \cdot t/\hbar)^2) \text{sen}^2 \Delta V \cdot t/\hbar$$

Quindi se fosse realizzata una interazione tra i neutroni ed il campo sufficientemente ridotta, in modo che possa valere la relazione seguente:

$$(23) \quad \Delta V \cdot t/\hbar \ll 1$$

si potrebbe porre nella (22):

$$\text{sen}^2 \Delta V \cdot t/\hbar \sim (\Delta V \cdot t/\hbar)^2$$

ottenendo $\alpha \sim 1$ e quindi:

$$P_{\bar{n}}^{Int}(t) \sim P_{\bar{n}}^{Free}(t) \sim (t/\tau_{m\bar{n}})^2$$

In questo caso, pur non essendo i neutroni "liberi", puo' essere utilizzata la (20) per valutare il tempo di oscillazione .

In ogni esperimento di oscillazione $n-\bar{n}$ va considerata l'interazione tra il campo magnetico terrestre \vec{B} e il momento magnetico $\vec{\mu}_n$ dei neutroni. Si ha:

$$(24) \quad \Delta V(\vec{B}) = (1/2) 2 \mu_n |\vec{B}| \sim 3 \times 10^{-12} \text{ ev}$$

dove:

$$|\vec{B}| \sim .5 \text{ Gauss}$$

$$\mu_n \sim 6 \times 10^{-12} \text{ ev/Gauss}$$

Si ottiene perciò:

$$\Delta V(\vec{B})/\hbar \sim 4.5 \times 10^3 \text{ sec}^{-1}$$

e quindi per tempi di volo $t \sim 10 \text{ msec}$:

$$\Delta V(\vec{B})t/\hbar \sim 45$$

Per soddisfare la condizione (23) ed avere quindi $\alpha \sim 1$ bisogna abbattere il campo magnetico terrestre di un fattore ~ 500 . Con un valore residuo:

$$|\vec{B}| \sim 10 \text{ mGauss}$$

si può porre $\alpha \sim 1$ e:

$$P_{\bar{n}}^{Int}(t) \sim (t/\tau_{n\bar{n}})^2$$

Se esistesse una iperforza accoppiata al numero barionico B , neutrone ed antineutrone verrebbero rispettivamente respinto ed attratto dall'iperforza generata dalla Terra. Tenendo conto che :

$$B_n - B_{\bar{n}} = 2$$

la semidifferenza tra le energie di n e \bar{n} sarebbe pari a quella già calcolata nella (15):

$$(25) \quad \Delta V_{\bar{n}} \sim (6 \div 10) \times 10^{-12} \text{ ev}$$

Confrontando la (25) con la (24) si nota che l'energia di interazione del sistema $n-\bar{n}$ con l'iperforza risulterebbe maggiore di quella col campo magnetico terrestre :

$$\Delta V_{\bar{n}} > \Delta V(\vec{B})$$

Va perciò valutata la correzione da portare a quei risultati sperimentali nei quali l'interazione (25) non sia stata considerata nella valutazione di $\tau_{n\bar{n}}$.

Per tempi di volo $t \gg 10$ msec dalla (25) si ha:

$$\Delta V_{\bar{n}} \cdot t / \hbar \gg 1$$

In questo caso il secondo fattore nella (21) introduce una oscillazione della probabilita' di transizione $n-\bar{n}$ lungo il percorso dei neutroni. La lunghezza d'onda λ_0 di questa oscillazione risulta:

$$(26) \quad \lambda_0 = \hbar v / (\Delta V / \hbar)$$

dove v e' la velocita' dei neutroni.

Prendendo ad esempio :

$$\Delta V_{\bar{n}} = 6 \times 10^{-12} \text{ ev}$$

dalla (26) si ottiene per neutroni termici ($v \sim 2200$ m/sec):

$$\lambda_0 \sim 70 \text{ cm}$$

e per neutroni "freddi" ($v \sim 160$ m/sec):

$$\lambda_0 \sim 5 \text{ cm}$$

Se in un esperimento la dimensione della sorgente dei neutroni fosse piccola rispetto a λ_0 , solo la conoscenza dettagliata della situazione sperimentale potrebbe definire l'effettivo valore da adoperare per $P_{\bar{n}}^{\text{Int}}(t)$ nel valutare il tempo di oscillazione $\tau_{n\bar{n}}$.

Se invece la dimensione della sorgente di neutroni e' molto maggiore di λ_0 , allora nella (21) si puo' sostituire il

termine

$$\text{sen}^2 \Delta V \cdot t / \hbar$$

col suo valor medio 1/2 ottenendo :

$$(27) \quad \langle P_{\bar{n}}^{I_{nt}} \rangle = 1 / (2(\Delta V \cdot \tau_{n\bar{n}} / \hbar)^2)$$

In un esperimento nel quale fosse stato misurato un tempo di oscillazione $\tau_{n\bar{n}}^0$ senza tener conto dell'azione dell'iperforza si sarebbe posto, invece della (27):

$$(28) \quad P_{\bar{n}}^{I_{nt}} \sim (t / \tau_{n\bar{n}}^0)^2$$

Confrontando le (27) e (28) si ottiene il rapporto $\sqrt{\langle \alpha \rangle}$, tra il valore corretto $\tau_{n\bar{n}}$ e quello valutato $\tau_{n\bar{n}}^0$ senza l'effetto dell'iperforza:

$$(29) \quad \sqrt{\langle \alpha \rangle} = \tau_{n\bar{n}} / \tau_{n\bar{n}}^0 = 1 / (2 \Delta V \cdot t / \hbar)$$

E' stato recentemente pubblicato (rif.14) un limite sperimentale sul tempo di oscillazione $n-\bar{n}$:

$$\tau_{n\bar{n}}^0 > 10 \text{ sec. (90\% c.l.)}$$

ottenuto in un esperimento con neutroni "freddi" ($v \sim 160 \text{ m/sec}$) e su un percorso schermato dal campo

magnetico terrestre corrispondente ad un tempo di volo $t \sim 25$ msec. In questo caso dalla (29) si ottiene un fattore di correzione:

$$\sqrt{\epsilon} \sim (2+30) \times 10^{-4}$$

e quindi un limite effettivo per il tempo di oscillazione:

$$\tau_{n\bar{n}} \sim (200 \div 3000) \text{ sec}$$

Nel caso dell'esperimento NADIR, essendo $t \sim 7.5$ msec ed il limite previsto:

$$\tau_{n\bar{n}}^0 \sim 10^6 \text{ sec}$$

si avrebbe:

$$\tau_{n\bar{n}} \sim (5.5 \times 10^2 \div 10^4) \text{ sec}$$

Supponendo che un evento di oscillazione $n\bar{n}$ sia rivelato in un esperimento attualmente in corso, si potrebbe pensare di poter mettere dei limiti restrittivi all'esistenza della nuova forza. In effetti in questo caso sembra ragionevole attendersi $\epsilon \sim 1$ e quindi, dalla (23):

$$\Delta V \cdot t / \hbar \ll 1$$

Inoltre dalle (11) e (12) risulta:

$$\Delta V = (f^2/Gm_\mu^2) \gamma(x) V_\mu = (f^2/Gm_\mu^2) (3/2) (\lambda/R_\oplus)^2 m(4/3) \pi G \varrho R_\oplus^3 -$$

$$- 2 \pi G \varrho m (f^2/Gm_\mu^2)$$

Ponendo la relazione precedente nella (23) si ottiene:

$$(30) \quad (f^2/Gm_\mu^2) \cdot \lambda^2 \ll 10 / (2 \pi G \varrho m c t)$$

Se, ad esempio, l'esperimento NADIR trovasse un evento di oscillazione $n-\bar{n}$, ponendo nella (30):

$$t \sim 8 \text{ msec}$$

$$\varrho \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$$

$$G = 6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ sec}^{-2}$$

$$m = 1.7 \times 10^{-24} \text{ g}$$

si otterrebbe:

$$(31) \quad (f^2/Gm_\mu^2) \cdot \lambda^2 \ll 8 \text{ m}^2$$

D'altra parte dagli esperimenti geofisici si ottiene (vedi par.1):

$$(32) \quad (f^2/Gm_{\mu}^2) \lambda^2 \approx (80 \div 680) \text{ m}^2$$

Dalla incompatibilita' tra la (31) e la (32) si potrebbe quindi scartare l'interpretazione della anomalia osservata nella legge di gravitazione universale in termini di una forza accoppiata al numero barionico.

Sfortunatamente dai supposti eventi di oscillazione sarebbe possibile ricavare solamente una relazione tra $\tau_{n\bar{n}}$ e ΔV , attraverso la (21), mentre alcun limite su ΔV potrebbe essere derivato: un qualsiasi valore del tempo di oscillazione potrebbe essere correlato con un opportuno valore di ΔV , in modo da soddisfare la relazione (21).

E' interessante notare che, al contrario di quanto aspettato per un esperimento "alla Eotvos", l'eventuale esecuzione di un esperimento di oscillazione $n-\bar{n}$ con una opportuna distribuzione simmetrica di massa attorno all'apparato non ridurrebbe l'effetto del campo di iperforza. Questo in quanto l'energia ΔV nella (21) rappresenta la differenza di lavoro che bisogna compiere contro l'iperforza per portare un neutrone o un antineutrone dall'infinito al laboratorio. Questo lavoro tende a raddoppiare spostandosi verso il centro della Terra. Infatti, procedendo intuitivamente, dalla (8) si ha:

$$V_{\bar{0}} / V_N \sim \alpha (\lambda / R_{\oplus})^2$$

e percio' :

$$V_{\text{eff}} \sim \alpha \left(\frac{\lambda}{R_{\oplus}} \right)^2 \left(\frac{GmM_{\oplus}}{R_{\oplus}} \right) - \frac{4}{3} \pi \rho \alpha Gm \lambda^2 - \alpha GmM_{\lambda} / \lambda$$

dove M_{λ} e' la massa contenuta in una sfera di raggio λ .
 Spostandosi dalla superficie della Terra verso il centro
 questa massa tende a raddoppiare e cosi' pure il fattore ΔV
 nella (21).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. E.Fischbach, D.Sudarsky, A.Szafer, C.Talmadge,
S.H.Aronson, Phys.Rev.Lett. 56,3(1986)
2. F.D.Stacey and G.J.Tuck, Nature 292,230(1981);
S.C.Holding and G.J.Tuck, Nature 307,714(1984);
G.W.Gibbons and B.F.Whiting, Nature 291,636(1981)
3. R.v.Eotvos, D.Pekar and E.Fekete, Ann. Phys.(Leipzig)
68,11(1922)
4. P.T.Keyser, T.Niebauer, J.E.Faller, articolo inviato a
Phys.Rev.Lett.
5. H.H.Thodberg, Niels Bohr Inst., NBI-HE-86-05
6. P.G.Bizzeti, Universita' degli Studi di Firenze,
Dipartimento di Fisica, Preprint DFF 86 N.31/Feb.1986
7. S.H.Aronson, G.J.Bock, H.Y.Cheng and E.Fischbach,
Phys.Rev.D28,476(1983)
8. G.Preparata, Incontro informale sulla possibile scoperta
di una quinta forza, L.N.F.17/1/1986
9. M.Lusignoli, A.Pugliese, Universita' di Roma "La
Sapienza", Preprint N.486,31/1/1986

10. Y.Asano et al., Phys.Lett.107B,188(1981)
11. S.Weinberg, Phys.Rev.Lett. 13,495,(1964)
12. Review of Particle Properties, Phys.Lett. 111B,
April 1982
13. G.Bressi et al., Proceedings of ICOMAN '83 (reported by
S.Ratti)
14. G.Fidecaro et al, Phys.Lett.156,122(1985)

DESCRIZIONE DELLE FIGURE

1. dal rif.1:analisi dei dati dell'esperimento di Eotvos

$$\Delta k = (a_1 - a_2)/g, \Delta(B/\mu) = (B/\mu)_1 - (B/\mu)_2$$

