

GIUSEPPE MAMBRIANI (*)

È possibile dare diritto di cittadinanza in meccanica al concetto di massa negativa? ()**

A Bianca Manfredi con amicizia e stima

1 - Introduzione

La domanda sulla possibilità di dare un senso al concetto di massa negativa si è presentata diverse volte nella storia della meccanica e della fisica. Almeno a partire dal secolo scorso vi sono tentativi documentati [24], [25], [26], [13], [28], [29] di dare una risposta affermativa a questa domanda. Una spinta a formularla viene ovviamente dalle analogie tra l'interazione gravitazionale e quella coulombiana in cui la carica elettrica si presenta con i due segni. Infatti, l'ipotesi di una possibile esistenza di masse negative si è presentata per lo più sotto il versante delle masse gravitazionali negative, ovvero dell'esistenza di interazioni gravitazionali repulsive. In altri termini, è stata talora ipotizzata l'esistenza dell'anti-gravità, della cui esistenza però non è mai stato individuato alcun indizio empirico. Anche il concetto di massa inerziale negativa, almeno quando venga considerato di per sé, implica l'esistenza di fenomeni mai osservati, o logicamente insoddisfacenti. Ad esempio: una forza applicata ad una massa negativa dovrebbe provocare un'accelerazione di verso opposto alla forza; il verso della quantità di moto di una massa negativa dovrebbe essere opposto a quello della velocità; ed infine una massa negativa dovrebbe avere energia cinetica negativa.

L'avvento delle teorie relativistiche ha aperto nuovi spazi e, ad esempio, il concetto di massa negativa appare, seppur molto timidamente, in forma nuova nell'ambito della relatività generale [6], [7]. La sintesi proposta da Dirac (cfr.,

(*) Dip. di Fisica, Univ. Parma, Viale delle Scienze, 43100 Parma, Italia.

(**) Ricevuto il 7.6.1993. Classificazione AMS 70 A 05.

ad esempio, [9]) tra relatività ristretta e meccanica quantistica, con l'equazione che ne porta il nome, e l'associata previsione dell'esistenza dell'antiparticella dell'elettrone (seguita dalla sua scoperta — il positrone — e poi man mano dalla scoperta delle altre antiparticelle), avevano in un certo senso suggerito di legare il concetto di massa negativa e (o) di proprietà antigravitazionali, alle antiparticelle. Questa possibilità è indicata in qualche modo dalla hamiltoniana relativistica. Consideriamo infatti il quadrato dell'energia relativistica totale E di un corpo di massa M in assenza di interazioni, si ha

$$(1.1) \quad E^2 = p^2 c^2 + M^2 c^4$$

dove $p = Mc\beta\gamma$ è il modulo della quantità di moto, essendo c la velocità della luce nel vuoto, $\beta = vc^{-1}$ la velocità adimensionale, e $\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ il fattore di Lorentz. Se dalla (1.1) si ricava E , o p , ovvero Mc^2 , si ottengono ovviamente i due valori con i segni opposti, di cui quello negativo veniva trascurato in quanto privo di senso fisico. Dirac, com'è ben noto, ha proposto, nel contesto quantomeccanico da lui elaborato, che queste radici negative opportunamente interpretate siano da associarsi alle antiparticelle. Nel caso di particelle elettricamente cariche, ad ogni particella va associata un'antiparticella di carica elettrica opposta, con massa eguale a quella della particella. Per le particelle neutre particella ed antiparticella possono distinguersi per i valori opposti di qualche numero quantico, ovvero essere anche indistinguibili (quest'ultime sono dette particelle veramente neutre). È stato mostrato (vedi ad esempio [20]) che la soluzione della equazione di Dirac per una particella libera, associata alla radice negativa è interpretabile anche in termini di massa inerziale negativa, ma questa interpretazione di per sé non è compatibile con l'attuale assetto standard della fisica (ASF), per i motivi sopra accennati.

Nel complesso l'attenzione riservata alla possibilità di dare diritto di cittadinanza in fisica al concetto di massa negativa è stata sino agli anni quaranta decisamente marginale, anche se ha avuto degli autorevoli avversari. Ad esempio, Einstein (in suo lavoro con Rosen [11]), in cui tenta di costruire un modello di particella senza singolarità, sottolineava tra i suoi pregi che questo modello proibiva l'esistenza di masse negative. Nel dopoguerra, la sempre più ampia evidenza empirica dell'esistenza delle antiparticelle è stata inquadrata negli sviluppi dell'elettrodinamica quantistica, e si è trovata al centro della rinnovata attenzione alle proprietà di simmetria e di invarianza per trasformazioni dei gruppi di Lorentz e di Poincaré. Il risultato forse più saliente è il teorema *CPT* (cfr., ad esempio, le opere [27], [17]), dove C è l'operazione che trasforma le particelle in antiparticelle e viceversa (coniugazione di carica), P è l'operazione di inversione

spaziale (parità), ed infine T è l'operazione di inversione temporale. L'invarianza CPT di tutte le leggi fisiche (quelle invarianti per trasformazioni del gruppo proprio di Lorentz) è a tutt'oggi un caposaldo della fisica delle interazioni *fondamentali* e delle particelle *elementari*. In questo contesto il concetto di massa negativa e (o) l'associata proposta dell'antigravità sono ricomparse alcune volte con varie modalità e caratteristiche, ma forse più che altro hanno sollevato obiezioni.

L'intento di questa nota è da un lato mostrare che esiste un insieme di ipotesi nel cui ambito i concetti di massa negativa e di antigravità sembrano accettabili in quanto largamente compatibili con la fenomenologia inquadrata in ASF, e d'altro lato sviluppare alcune delle conseguenze di carattere meccanico. Queste ipotesi possono essere riassunte nei seguenti cinque asserti.

1. La carica elettrica *fondamentale* ha un solo segno, che viene assunto positivo.

2. Tutte le particelle *elementari* aventi carica elettrica negativa (positiva) in ASF hanno massa negativa (positiva).

3. La massa inerziale di tutti i corpi ha lo stesso segno e modulo della massa gravitazionale.

4. Tutte le interazioni *fondamentali* dipendono dai segni delle masse dei corpi interagenti.

5. La dinamica relativistica ha due rami: uno per le masse positive l'altro per le masse negative.

Queste ipotesi, come si vedrà meglio nel seguito, sono fortemente legate, nel senso che se ne si considera solo un sottoinsieme, aggiungendolo per così dire ad ASF, si hanno conseguenze più o meno fortemente controfattuali. Due esempi possono chiarire meglio la questione. Consideriamo solo la seconda ipotesi, assumendo, più limitativamente, che tutte le particelle con carica elettrica negativa (positiva) hanno massa gravitazionale negativa (positiva) e vengono respinte (attratte) dalla Terra. Questa assunzione, ignorando la terza ipotesi, lascia implicitamente invariata l'ipotesi standard che tutte le masse inerziali siano positive. Consideriamo ora un atomo di idrogeno. Il peso del protone è $m_{pg}\mathbf{g}_E$, e quello dell'elettrone $-m_{eg}\mathbf{g}_E$, dove \mathbf{g}_E è l'accelerazione gravitazionale standard della Terra, e le due masse sono quelle gravitazionali. Trascurando il difetto di massa, dalla seconda legge di Newton, si ha

$$(m_{pg} - m_{eg})\mathbf{g}_E = (m_{pi} + m_{ei})\mathbf{a}_F,$$

dove m_{pi} e m_{ei} sono le masse inerziali standard, ed \mathbf{a}_F è l'effettiva accelerazione dell'atomo. Questo risultato viola la proporzionalità tra massa inerziale e gravi-

tazionale, poiché ad esempio un atomo di deuterio (il cui nucleo ha massa circa doppia) cadrebbe con un'accelerazione più grande di a_F , di circa lo 0.1%, ed è quindi assolutamente incompatibile con i dati sperimentali che evidenziano con grande accuratezza che le masse dei due tipi sono proporzionali.

Come secondo esempio, consideriamo che siano valide la seconda e la quinta ipotesi, prescindendo dalle altre. Per particelle a riposo la (1.1) diviene $E = \pm Mc^2$, dove la massa inerziale M può essere negativa o positiva. Associando l'equazione con il segno *più* (che compare esplicitamente a secondo membro) alle masse positive, e l'equazione con il segno *meno* alle masse negative, la dinamica relativistica risulta sdoppiata in due rami. Ne consegue che l'energia intrinseca (o di massa) è positiva sia per le masse positive che per quelle negative (per quest'ultime il segno *meno* esterno si elide con quello interno ad M), e l'energia di massa in entrambi i casi è pari ad mc^2 ($m = |M|$). Si vede così come lo sdoppiamento della dinamica elimini una delle conseguenze inaccettabili che si verificano qualora si inserisca *isolatamente* in dinamica il concetto di massa inerziale negativa. Se però consideriamo una massa negativa dotata di carica elettrica in moto in un campo magnetico, sorge immediatamente un problema. Il segno del rapporto tra carica elettrica e massa per una tale particella (che avrebbe sia massa negativa che carica elettrica negativa) sarebbe opposto a quello standard, e la deflessione provocata dalla forza di Lorentz sarebbe opposta a quella osservata. A questo punto, se si recupera la prima ipotesi (che implica che tutte le particelle abbiano carica elettrica positiva) la suddetta contraddizione scompare. Infatti consideriamo, ad esempio, un elettrone: il suo rapporto standard carica/massa = $-em_{ei}^{-1}$ rimane immutato se assumiamo che la sua massa sia $M_e = -m_{ei}$, e che la sua carica elettrica sia positiva e pari ad e .

Nel numero 2 si sviluppano le assunzioni sopra delineate. In 3 si prendono in esame i sistemi misti costituiti da masse di entrambi i segni. Essi richiedono ulteriori definizioni e sviluppi e sono di particolare rilevanza poiché, sotto le ipotesi qui considerate, gli atomi sono sistemi misti, in quanto composti dalla massa positiva del nucleo e da quella negativa degli elettroni. In 4, infine, si fanno alcune considerazioni conclusive, delineando quelli che potrebbero essere gli aspetti forse più significativi da investigare e sviluppare.

2 - Lo sdoppiamento della dinamica relativistica e le altre ipotesi più rilevanti

Come si è delineato nell'introduzione, i concetti di massa inerziale negativa e di antigravità sembrano incompatibili con l'attuale ASF, ma incorporando questi concetti in un opportuno insieme di assunzioni sembra possibile aggirare le varie

obiezioni e difficoltà, e creare uno schema compatibile con gran parte dell'evidenza empirica e in grado di prevedere nuovi fenomeni suscettibili di verifica sperimentale. Lo schema qui proposto si colloca nell'ambito della dinamica relativistica e consiste in un insieme di Nuove Assunzioni su Massa e Carica Elettrica (in breve NAMEC), che può essere articolato nei seguenti cinque punti.

I. - La carica elettrica *fondamentale*, ovvero il quanto di carica (il modulo comune e della carica dell'elettrone e del protone) ha un solo segno che verrà assunto come positivo. Tutte le particelle *elementari* elettricamente cariche hanno così carica positiva. Gli usuali valori negativi della carica elettrica verranno, in certo senso, recuperati tramite le assunzioni dei punti II e IV.

II. - Tutte le particelle e le antiparticelle *elementari* che hanno una carica elettrica positiva in ASF, hanno in NAMEC una massa positiva e sono classificate come *particelle*. Tutte le particelle e le antiparticelle che hanno una carica elettrica negativa in ASF, sono classificate come *antiparticelle* in NAMEC e si assume abbiano una massa negativa. Questa scelta dei segni, anziché quella opposta, è ovviamente una pura convenzione, come lo è in ASF la scelta dei segni delle cariche elettriche. Questa convenzione va debitamente completata con assunzioni coerenti per le particelle neutre (cfr. 4). In NAMEC si richiederà (cfr. 3) l'invarianza per inversione di questa Convenzione dei Segni delle Masse (in breve CSM).

III. - La massa di riposo inerziale di ogni particella *elementare*, o sistema composto, o corpo, ha lo stesso valore e segno della massa di riposo gravitazionale: entrambe coincidono con la massa d'interazione M_t (vedi la definizione in 3).

IV. - Tutte le interazioni *fondamentali* dipendono dal segno della massa dei corpi interagenti. Sia M la massa di riposo di una particella o di un corpo, di modulo m e segno σ : si ha allora ovviamente $M = \sigma m$ (per le masse si utilizzerà una lettera maiuscola come simbolo comprensivo del segno, e l'associata minuscola per il modulo). Per il limite newtoniano F_{G1} della forza gravitazionale esercitata da un corpo puntiforme 2 su un corpo 1, si assume

$$(2.1) \quad F_{G1} = -GM_1M_2r^{-3}\mathbf{r} = -G\sigma_1\sigma_2m_1m_2r^{-3}\mathbf{r}$$

dove \mathbf{r} è il vettore spostamento (di modulo r) da 2 a 1, $M_1 = \sigma_1m_1$ ed $M_2 = \sigma_2m_2$ sono le due masse e G è la costante di gravitazione universale. Dalla (2.1) consegue che l'interazione gravitazionale è attrattiva quando i segni delle due masse

sono concordi ($\sigma_1 = \sigma_2$) e repulsiva quando $\sigma_1 = -\sigma_2$. Se le due particelle 1 e 2 sono entrambe elettricamente cariche con carica e , la forza coulombiana F_{C1} esercitata da 2 su 1 viene assunta essere

$$(2.2) \quad F_{C1} = (4\pi\epsilon_0)^{-1} \sigma_1 \sigma_2 e^2 r^{-3} \mathbf{r}$$

dove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto. Così in NAMEC l'interazione coulombiana tra particelle *elementari* è identica a quella di ASF, a condizione di sostituire la carica elettrica standard con il suo modulo moltiplicato per il segno della massa del corpo che possiede la carica stessa. Per corpi costituiti da più particelle la carica totale standard $Q = e\sum_n \sigma_n$ (con la somma dei segni estesa a tutte le particelle cariche del corpo) funziona in NAMEC come carica efficace nella (2.2) (vedi più avanti). La dipendenza dal segno delle altre due interazioni *fondamentali* (quella debole e quella forte) non sembra richiedere alcuna ulteriore specificazione delle proprietà delle particelle interagenti, oltre alla loro nota dipendenza dal carattere di particella o antiparticella.

V. - La dinamica relativistica si sdoppia in due rami: uno per le *particelle* e i corpi di massa positiva ($\sigma = +1$), e l'altro per i corpi e le particelle di massa negativa (*antiparticelle*) ($\sigma = -1$). In NAMEC si assume che entrambi i segni che si ottengono dalla (1.1), abbiano significato anche a livello classico (nell'impostazione di Dirac i segni negativi acquistano significato fisico solo in ambito quantistico). Invece delle equazioni standard della dinamica relativistica, con il recupero delle equazioni precedute dal segno *meno*, si assumono i due seguenti insiemi di equazioni.

Dinamica p , per $\sigma = +1$, per le <i>particelle</i>	Dinamica a , per $\sigma = -1$, per le <i>antiparticelle</i>
(2.3) $E = +M\gamma c^2 = +M(\gamma^2 c^2 v^2 + c^4)^{\frac{1}{2}}$	$E = -M\gamma c^2 = -M(\gamma^2 c^2 v^2 + c^4)^{\frac{1}{2}}$
(2.4) $E_0 = +Mc^2$	$E_0 = -Mc^2$
(2.5) $\mathbf{p} = +M\gamma\mathbf{v}$	$\mathbf{p} = -M\gamma\mathbf{v}$
(2.6) $K = +Mc^2(\gamma - 1)$	$K = -Mc^2(\gamma - 1)$
(2.7) $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = +M \frac{d(\gamma\mathbf{v})}{dt}$	$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = -M \frac{d(\gamma\mathbf{v})}{dt}$

In entrambe le dinamiche, E_0 è l'energia di massa, K è l'energia cinetica, e \mathbf{F} è una forza. Il segno meno davanti ai secondi membri delle equazioni della dinamica a si elide con il segno della massa, cioè, con $\sigma = -1$ contenuto in M . Così, ba-

nalmente, in entrambe le dinamiche tutte le energie sono positive, le quantità di moto sono equiverse con le velocità, e le accelerazioni hanno lo stesso verso delle forze. Tutto questo naturalmente si mantiene anche per le equazioni della dinamica non relativistica, che ne sono il limite per $\beta \rightarrow 0$, ovvero per $\gamma \rightarrow 1$.

In ASF, sia in dinamica newtoniana che in quella relativistica, vi è un'ampia libertà di scelta per le forze che si vogliono considerare applicate ad un corpo. In NAMEC, per effetto del gioco di segni legato alle assunzioni fatte, le proprietà dei corpi e delle loro interazioni condizionano la dinamica in modo assai più stretto di quanto non accada in ASF, e solo le forze *fondamentali* e le loro combinazioni hanno diritto di cittadinanza. Infatti il segno della massa dei corpi interagenti seleziona la dinamica da utilizzare e il carattere dell'interazione. Quando si considera una particella libera (esente da interazioni), entrambe le dinamiche si riducono banalmente alla dinamica relativistica standard. Quando invece si consideri una particella in un campo di forza dovuto ad una interazione fondamentale, le assunzioni del punto IV fanno sì che le equazioni (2.7) si riducano all'unica equazione standard, permettendo però di analizzare anche il moto sotto l'effetto di una repulsione gravitazionale.

Per le interazioni elettromagnetiche e la conseguente elettrodinamica delle particelle *elementari* le predizioni di NAMEC sono identiche a quelle di ASF. Infatti quando si prende in considerazione una carica elettrica come generatore del campo, è ovviamente equivalente considerare la carica standard ovvero la carica positiva di NAMEC moltiplicata per il segno della massa. D'altra parte il moto di una particella carica in un campo elettromagnetico è ottenibile in NAMEC dalle equazioni di ASF, poiché il rapporto carica/massa è identico in modulo e segno in ASF e NAMEC. Per corpi costituiti da più particelle *elementari* la carica standard può essere usata come carica elettrica efficace in (2.2). Infatti, consideriamo ad esempio le cariche *elementari* che costituiscono un corpo, ed una carica di prova posta ad una distanza dal corpo molto maggiore delle sue dimensioni. Dalla (2.2) si ottiene immediatamente che la forza totale sulla carica di prova è quella calcolabile dalla (2.2) stessa, attribuendo al corpo una carica efficace $Q = e \sum_n \sigma_n$, che coincide con la carica standard del corpo. Ad esempio, un corpo macroscopico di massa positiva (costituito da molti atomi di *materia*, cioè, costituito di *particelle* nei nuclei atomici e di elettroni cioè di *antiparticelle*), può avere un eccesso (un difetto) di elettroni ed avere una carica efficace negativa (positiva).

Il pacchetto di ipotesi di NAMEC, dopo tutto, sembra implicare in meccanica ed elettromagnetismo solo piccoli ritocchi linguistici, mentre ci si possono aspettare delle novità maggiori nella fisica delle particelle *elementari* e delle intera-

zioni *fondamentali* e se ne accennerà in 4. Nuovi aspetti di rilievo si presentano anche quando si affronta la dinamica di sistemi costituiti sia di *materia* che di *antimateria*, ovvero sistemi in cui siano presenti masse di entrambi i segni. Sarà questo l'oggetto del prossimo paragrafo.

3 - Sistemi di masse con entrambi i segni

Come si è accennato nella introduzione, i sistemi di particelle o di corpi in cui sono presenti masse di entrambi i segni potrebbero avere un rilevante interesse fenomenologico. Infatti, le ipotesi di NAMEC implicano che gli atomi siano sistemi di questo tipo, in quanto composti dai nuclei con massa positiva e dagli elettroni con massa negativa. Come si vedrà inoltre questi sistemi pongono alcuni problemi peculiari che richiedono nuove assunzioni. Per analizzarli conviene considerare separatamente il caso in cui sia le energie cinetiche sia quelle potenziali delle interazioni tra i corpi del sistema, possono essere considerate trascurabili rispetto all'energia di massa, dal caso invece in cui per il calcolo della massa totale del sistema stesso occorre tener conto delle suddette energie.

Per il primo tipo di sistemi, in un riferimento opportuno, non è necessario applicare la dinamica relativistica, ma si possono invece utilizzare le equazioni della dinamica newtoniana, pensate come limite non relativistico delle equazioni delle due dinamiche di NAMEC. Come esempio saliente consideriamo un sistema formato da un protone e da un elettrone legati l'un l'altro dall'attrazione coulombiana (in NAMEC l'interazione gravitazionale repulsiva tra protone ed elettrone, è ovviamente del tutto trascurabile come quella attrattiva in ASF), cioè, prendiamo in esame un atomo di idrogeno che viene qui considerato da un punto di vista non quantistico. Le equazioni (2.7) applicate rispettivamente al protone e all'elettrone, nel loro limite non relativistico, congiuntamente alla (2.2), danno

$$(3.1) \quad \begin{aligned} -(4\pi\varepsilon_0)^{-1} \sigma_e \sigma_p e^2 R^{-3} \mathbf{R} &= M_p \frac{d^2 \mathbf{R}_p}{dt^2} \\ (4\pi\varepsilon_0)^{-1} \sigma_e \sigma_p e^2 R^{-3} \mathbf{R} &= M_e \frac{d^2 \mathbf{R}_e}{dt^2} \end{aligned}$$

dove: $\mathbf{R} = \mathbf{R}_e - \mathbf{R}_p$, con $R = |\mathbf{R}|$. Inoltre, \mathbf{R}_e e \mathbf{R}_p ; M_e e M_p ; e infine $\sigma_e = -1$ e $\sigma_p = +1$ sono rispettivamente i vettori posizione (in un riferimento inerziale opportuno), le masse, e i segni delle masse di elettrone e protone. Le (3.1), come è facile verificare sostituendo a σ_e e σ_p il loro valore (anche i segni interni a M_e e M_p), si trasformano esattamente nelle equazioni standard. Ne consegue anche

che tutti i concetti standard (come quelli di centro di massa e di massa ridotta) possono essere applicati per risolvere il ben noto problema dei due corpi presentato dalle (3.1), e che le soluzioni saranno quelle standard.

Per un aspetto le previsioni di NAMEC differiscono nettamente da quelle di ASF, e cioè per i valori delle masse atomiche. Consideriamo ad esempio l'atomo di idrogeno, in NAMEC la sua massa deve essere espressa come la differenza $m_p - m_e$ tra i moduli della massa del protone e di quella dell'elettrone, mentre in ASF (sempre trascurando il difetto di massa) è espressa dalla somma $m_p + m_e$, che è maggiore della differenza di circa lo 0.1%, cioè, uno scarto molto maggiore degli errori con cui si misurano sia m_p che m_e . Per rendersi conto della natura di questa discrepanza occorre da un lato rilevare che la differenza e la somma suddette sono due valori calcolati e non misurati, e d'altro lato prender atto che ogni misura di massa richiede sempre l'utilizzo più o meno diretto di una massa di riferimento. Anche la massa di riferimento è costituita da atomi e ovviamente se per una massa sotto esame si ipotizza (come in NAMEC) che gli elettroni diano un contributo negativo alla massa atomica, questa ipotesi va applicata anche alla massa di riferimento. Questa osservazione rimanda ad un'analisi dei metodi di misura delle masse atomiche. I due metodi che hanno portato alla più recente compilazione [31] dei valori delle masse atomiche (differenze di massa tra coppie di atomi ottenute da misure di bilancio energetico di reazioni nucleari; spettrometria di massa su doppietti stretti con correzioni ottenute con la costante di dispersione) sono del tutto insensibili alle differenze tra ASF e NAMEC. Infatti, come si analizza in dettaglio altrove [19], i valori delle masse atomiche espressi in unità di massa atomica ($1 \text{ AMU} = \frac{1}{12}$ della massa dell'isotopo del carbonio con il nucleo costituito da sei protoni e sei neutroni), sono i medesimi in ASF e NAMEC. Qualora però questi valori vengano convertiti in unità di misura diverse dall'AMU, si possono avere due valori diversi come $m_p - m_e$ (in NAMEC) e $m_p + m_e$ (in ASF), in quanto si hanno due valori diversi del coefficiente di conversione. La spettroscopia di massa (da utilizzarsi senza le correzioni ottenibili con la costante di dispersione) può permettere di falsificare (o confermare) alcune previsioni che si possono trarre da NAMEC [19] per vari sistemi misti, quali: alcuni tipi di atomi, ioni variamente carichi e gli atomi mesici leggeri.

Consideriamo ora un sistema (sempre con difetto di massa trascurabile), formato di N corpi aventi masse M_k ($k = 1, 2, \dots, N$). Mentre in ASF la massa totale m_T è la somma delle $m_k = |M_k|$, in NAMEC si assumerà, estendendo le ipotesi fatte, che la massa totale M_t sia la somma algebrica delle M_k , che potrà essere negativa, nulla, o positiva. Essa sarà denominata la massa totale d'interazione del sistema, poiché è la massa che deve essere utilizzata sia in (2.1), sia

Riscriviamo la (3.5) nella forma più relativistica

$$(3.6) \quad m_s = m_+ \gamma_+ + m_- \gamma_- - V_0 c^{-2}$$

dove l'uso dei fattori di Lorentz (definiti in r.c.m.) permette di associare a ciascuna delle due masse il suo contributo di energia cinetica a m_s . In ASF il contributo a m_s delle energie di interazione come V_0 non è divisibile tra le masse componenti, a differenza di quanto si verifica per quello delle energie cinetiche. Questo implica che il difetto di massa $E_L c^{-2}$ per un sistema legato, non può essere pensato come ripartito tra i suoi componenti. Brillouin ha fatto notare [4], [5] come questo stato di cose non sia soddisfacente da un punto di vista relativistico, in quanto viene meno la possibilità di applicare compiutamente le trasformazioni di Lorentz non essendo possibile localizzare il contributo alla massa dovuto a V_0 . Consideriamo, ad esempio, che i due corpi girino intorno al loro centro di massa in orbite eccentriche, con un importante interscambio periodico tra le due energie cinetiche e V_0 . Quest'ultima non appartenendo né all'uno né all'altro corpo, non è in alcun modo localizzabile ed è possibile associare ad essa solo la velocità del centro di massa (cfr. anche più avanti), il che ovviamente consente di localizzarla solo se si possono considerare trascurabili le dimensioni del sistema stesso. De Broglie [8] ha individuato una modalità di ripartizione dell'energia potenziale, proponendo di suddividerla in modo inversamente proporzionale alle masse. Nel caso dei due corpi della (3.6), sempre in ASF, la proposta di de Broglie per la suddivisione dell'energia potenziale $-V_0$, è esprimibile come

$$(3.7) \quad \begin{aligned} -V_+ &= -V_0 m_- (m_+ + m_-)^{-1} \\ -V_- &= -V_0 m_+ (m_+ + m_-)^{-1}. \end{aligned}$$

Le (3.7) però non danno una risposta esauriente, in quanto non viene esplicitata la dipendenza relativistica dell'energia potenziale dalla velocità del corpo. Scrivendo la (3.6) il problema non sorgeva esplicitamente in quanto V_0 era riferita a tutto il sistema, ovviamente in quiete in r.c.m. Ripartendo però V_0 tra i due corpi non si può non tener conto del fatto che le loro velocità in r.c.m., sono non nulle e in generale diverse tra loro.

Esplicitare la dipendenza dell'energia potenziale associata ad un corpo dalla sua velocità, richiede di precisare la natura dell'interazione. La classificazione pertinente prende in esame tre tipi principali di interazione: scalare, vettoriale e tensoriale (di rango due). Secondo le attuali teorie quantistiche di campo, ogni interazione implica lo scambio di particelle di mediazione. Questi mediatori devono avere momento angolare intrinseco s (spin) intero in unità $\hbar = \frac{1}{2\pi} h$ (h è la

costante di Planck). Per le interazioni scalari $s = 0$, per quelle vettoriali $s = 1$, e per quelle tensoriali $s = 2$. Come ad esempio esplicitamente dimostrato in [30], la dipendenza dell'energia potenziale V delle interazioni interne di un sistema dalla velocità del centro di massa (ovvero dal fattore di Lorentz γ) rispetto ad un riferimento qualsivoglia, è data da

$$(3.8) \quad V(\gamma, s) = V_0 \gamma^{s-1}.$$

Questa dipendenza di V da s spiega anche, in un certo senso, come mai la (3.8) sia poco considerata in letteratura. Infatti, le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti sono tutte di carattere vettoriale, per cui essendo $s = 1$, V non dipende da γ ed è quindi indipendente dalla velocità del sistema. D'altra parte queste interazioni sono le uniche per cui vi è un'evidenza sperimentale relativamente ai mediatori (detti anche bosoni vettori intermedi), il più noto dei quali è il fotone. L'unico altro mediatore considerato (ma sperimentalmente per ora del tutto inaccessibile) è il gravitone che nell'ambito della teoria della relatività generale (la teoria della gravitazione più accreditata) ci si aspetta abbia $s = 2$, poiché il *campo gravitazionale* è descritto da un tensore di rango due.

La (3.8) e l'indicazione di De Broglie espressa nelle (3.7) permettono di formulare una proposta per *tradurre* in NAMEC le (3.4), (3.5) e (3.6) in modo invariante rispetto all'inversione di CSM. Per il sistema delle due masse M_+ e M_- sopra considerato, si può assumere per la massa totale d'interazione

$$(3.9) \quad M_t = M_+ \gamma_+ - \sigma_+ \gamma_+^{s-1} \frac{m_-}{m_+ + m_-} \frac{V_0}{c^2} + M_- \gamma_- - \sigma_- \gamma_-^{s-1} \frac{m_+}{m_+ + m_-} \frac{V_0}{c^2}.$$

Come è facile verificare, per una coppia legata, cioè quando $m_+ = m_-$ per cui $\gamma_+ = \gamma_-$, la (3.9) dà $M_t = 0$. La (3.9) dà un modulo di M_t invariante per inversione di CSM per due masse qualsivoglia, perché $|M_t|$ non varia scambiando tutti gli indici *più* con quelli *meno*, come è facile verificare. Per sistemi costituiti da N masse la (3.9) può essere generalizzata come

$$(3.10) \quad M_t = \sum_k^N M_k^*$$

essendo la massa efficace M_k^* del k -esimo corpo data da

$$(3.11) \quad M_k^* = \sigma_k m_k^* = M_k \gamma_k + \frac{\sigma_k}{c^2} \sum_{\substack{i \\ i \neq k}}^N \gamma_k^{s_{ik}-1} \frac{m_i}{m_i + m_k} W_{0ik}$$

dove γ_k è il fattore di Lorentz in r.c.m. del k -esimo corpo ed s_{ik} e W_{0ik} (nel siste-

ma di riposo del corpo k -esimo) sono lo spin e l'energia potenziale dell'interazione tra l' i -esimo e il k -esimo corpo; per semplicità si è considerato per ogni coppia di corpi un solo tipo d'interazione.

L'inclusione delle energie potenziali nelle masse dei singoli componenti di un sistema sembra fornire una buona coerenza complessiva, ma certamente rende difficile la soluzione anche dei più semplici problemi dinamici, perché le equazioni sono non lineari. Ad esempio, il problema dei due corpi sembra, nel caso generale (cioè quando l'energia di legame non è trascurabile), difficilmente risolvibile con una trattazione analitica non approssimata.

4 - Osservazioni conclusive

Le ipotesi considerate in questa nota e gli sviluppi di carattere dinamico che si sono presi in esame, sembrano presentare una loro coerenza interna, e per quanto riguarda la meccanica e l'elettromagnetismo sembrano implicare, come si è detto, dei ritocchi di natura prevalentemente linguistica. Aspetti e fenomeni nuovi capaci di falsificare (o confermare) le ipotesi fatte, sono da cercarsi sia nei sistemi composti di masse di entrambi i segni, sia nella fisica delle particelle *elementari* e delle interazioni *fondamentali*, ed in particolare nella fisica della gravitazione, data la rilevanza dell'ipotesi riguardante la natura repulsiva dell'interazione gravitazionale tra *particelle* ed *antiparticelle*. Ovviamente oltre a questioni di consistenza tra NAMEC e fenomeni noti o non ancora investigati, vi è anche il problema della compatibilità o meno tra NAMEC e gli schemi teorici più importanti di ASF. In base a quanto si è delineato NAMEC sembra del tutto compatibile con la relatività ristretta in quanto in un certo senso ne rappresenta un'estensione. Vi è inoltre una sostanziale compatibilità con l'elettromagnetismo e l'elettrodinamica relativistica, sia nella loro versione classica sia in quella quantistica.

Vi sono, invece, forti ragioni di incompatibilità con la più accreditata teoria post-newtoniana della gravitazione, cioè con la relatività generale, in quanto NAMEC sembra del tutto inconciliabile con uno dei principi della relatività generale, e precisamente con il principio di equivalenza. Nella formulazione di Einstein [10], il principio di equivalenza vieta che con esperimenti *locali* si possa distinguere tra una situazione di moto rispetto ad un riferimento accelerato e quella di caduta con eguale accelerazione in un campo gravitazionale omogeneo. In NAMEC, la disponibilità di *particelle* e di *antiparticelle*, che poste in un dato campo gravitazionale sono soggette a forze opposte, permette di distinguere questa situazione da quella di un moto accelerato in cui sia le *particelle* che le

antiparticelle si muoverebbero con la stessa accelerazione rispetto ad un riferimento accelerato. Questa violazione del principio di equivalenza, non pone NAMEC in contraddizione con le basi empiriche del principio stesso, cioè con gli esperimenti che attestano con grande accuratezza la proporzionalità tra massa gravitazionale e massa inerziale; e in NAMEC si può così assumere l'eguaglianza dei due tipi di masse (cfr. il punto III di 2). Rimane ovviamente aperto il problema di una teoria post-newtoniana della gravitazione (necessaria per spiegare i fenomeni che la gravità newtoniana non riesce a inquadrare), che sia compatibile con NAMEC: possibili candidature non mancano (cfr., ad esempio, [21], [22], [18]).

Tra le teorie delle interazioni *fondamentali* ve ne è una con cui NAMEC sembra incompatibile, ed è la cosiddetta cromodinamica quantistica (QCD), che descrive l'interazione forte ipotizzando che tutte le particelle che sono soggette a questa interazione (cioè gli adroni, come ad esempio, i componenti dei nuclei atomici) siano da pensarsi composte da particelle più *elementari* (i quark) che interagiscono tra loro tramite lo scambio di mediatori detti gluoni. I quark (che individualmente non sono mai stati rivelati e probabilmente sono confinati all'interno degli adroni) avrebbero cariche elettriche frazionarie (di entrambi i segni) e precisamente potrebbero avere carica $\pm \frac{1}{3} e$, e $\pm \frac{2}{3} e$. Il protone ad esempio in QCD è da pensarsi composto da due quark di sapore *up*, aventi ciascuno carica elettrica $+\frac{2}{3} e$ e da un quark di sapore *down* con carica $-\frac{1}{3} e$, con una carica complessiva che risulta così pari a $+e$. Ed è proprio in situazioni di questo tipo che si manifesta l'incompatibilità con NAMEC. Infatti un protone con la suddetta presenza di cariche sarebbe composto di masse positive e negative e la sua massa d'interazione avrebbe un modulo inferiore alla massa energetica. D'altra parte una conclusione di questo tipo sembra da escludersi perché la massa d'interazione del protone (che si misura con campi elettrici e magnetici) e quella energetica (che si ottiene dai bilanci energetici di svariate reazioni nucleari) sono eguali tra loro con elevata precisione. Esiste però una cromodinamica con quark a cariche elettriche intere [15], [23], [16], [14], [1], [2], [3] (plausibilmente in grado, se adeguatamente sviluppata, di rendere conto dei molti fenomeni spiegati dalla QCD standard), che potrebbe essere pienamente compatibile con NAMEC.

Dalle osservazioni fatte risulta già abbastanza chiaramente la notevole estensione degli sviluppi che sarebbe necessario affrontare per dare a NAMEC una sua consistenza, se le previsioni empiriche già sin d'ora enunciabili non saranno falsificate. Nell'ambito della fisica delle particelle *elementari* per poter arrivare

a delle previsioni definite occorre, oltre che affrontare gli sviluppi a cui sopra si è accennato, estendere le assunzioni sul segno della massa anche alle particelle elettricamente neutre. A tale scopo sembra naturale avvalersi dei numeri quantici che hanno valore opposto per particelle ed antiparticelle. Ad esempio, dato che in ASF l'antineutrino elettronico ha carica leptonica opposta a quella dell'elettrone, lo si classificherebbe come *particella* con massa positiva (se il modulo della massa stessa non è nullo) poiché in NAMEC l'elettrone ha massa negativa. In modo analogo, servendosi del numero barionico, si dovrà classificare positiva la massa del neutrone, come quella del protone. Nell'ambito di un'opportuna QCD con quark a cariche elettriche intere, non sembra impossibile far posto a tutte le *particelle* e alle relative *antiparticelle*, anche per i casi in cui in ASF *particella* e *antiparticella* sono pensate come coincidenti (le cosiddette *particelle veramente neutre*). Potrebbe qui aprirsi un fruttuoso campo di indagine, perché probabilmente vari adroni con quark a sapori *pesanti*, nei suddetti modelli QCD a cariche intere, potrebbero essere composti di quarks di entrambi i segni di massa: conseguentemente le masse d'interazione di questi adroni potrebbero essere decisamente inferiori alle relative masse energetiche. Nel caso di adroni elettricamente carichi, in cui entrambi i tipi di massa sono concettualmente misurabili, si avrebbero delle occasioni significative sia per verificare NAMEC e gli associati modelli QCD, sia per determinare per altra via le masse dei quark in gioco.

Esistono varie previsioni peculiari che si possono trarre da NAMEC e che potrebbero permettere di falsificarlo (o confermarlo). Tra tutte la più significativa sembra quella di osservare il moto di un antiprotone o di un atomo di antiidrogeno (costituito da un antiprotone e da un positrone) nel campo gravitazionale terrestre: si dovrebbe avere un moto di *caduta* verso l'alto, con un'accelerazione eguale in modulo a quella standard. Studiare l'interazione gravitazionale di una *particella* con la Terra ha il grande vantaggio di far interagire la *particella* con i circa 3.4×10^{51} nucleoni della Terra stessa. Ciononostante, le forze elettromagnetiche sono ancora importanti, infatti il peso sulla Terra di un nucleone (o l'antipeso di un antiprotone in NAMEC) è pari alla forza a cui è soggetta una carica elementare e in un campo di circa 10^{-9} V m^{-1} . Un campo elettrico di questo tipo è purtroppo assai più piccolo di molti campi spuri presenti in condizioni di laboratorio, e questo è uno dei motivi che rendono difficile questo tipo di esperimenti. Un altro motivo di difficoltà è che la produzione di antiprotoni avviene ad energie relativamente molto elevate (dell'ordine dei 10^9 eV), mentre per poter osservare il moto di un antiprotone nel campo gravitazionale terrestre occorre che la sua velocità sia sufficientemente bassa e, cioè, corrispondente ad energie cinetiche non molto superiori a 10^{-9} eV . L'uso di atomi di antiidrogeno risolverebbe varie difficoltà in quanto essi sono insensibili ai campi elettromagnetici

esterni, ma occorrerebbe risolvere il non facile problema di preparare questi atomi con energie adeguatamente piccole. Comunque, al CERN è in fase di avanzata preparazione un esperimento (PS200) [12], che dovrebbe permettere la pesata degli antiprotoni e dare una risposta alla domanda espressa nel titolo di questo nota.

Bibliografia

- [1] S. L. ADLER, *A new embedding of quantum electrodynamics in a non-Abelian gauge structure*, Phys. Lett. B **221** (1989), 39-43.
- [2] S. L. ADLER, *A new electroweak and strong interaction unification scheme*, Phys. Lett. B **225** (1989), 143-147.
- [3] M. BENAYOUN, M. FEINDT, M. GIRONE, A. KIRK, PH. LERUSTE, J-L. NARJOUX and K. SAFARIK, *Experimental evidence for the box anomaly in η/η' decays and the electric charge of quarks*, Z. Phys. C **58** (1993), 31-53.
- [4] L. BRILLOUIN, *L'énergie potentielle et sa masse*, C. R. Acad. Sc. Paris **259** (1964), 2361-2362.
- [5] L. BRILLOUIN, *Relativity reexamined*, Academic Press, New York 1970.
- [6] H. E. J. CURZON, *Bipolar solutions of Einstein's gravitation equations*, Proc. London Math. Soc. **23** (1924), XXIX-XXXII.
- [7] H. E. J. CURZON, *Cylindrical solutions of Einstein's gravitation equations*, Proc. London Math. Soc. **23** (1924), 477-480.
- [8] L. DE BROGLIE, *Sur la répartition des potentiels d'interaction entre les particules d'un système*, C. R. Acad. Sc. Paris **275** (1972), 899-901.
- [9] P. A. M. DIRAC, *The principles of quantum mechanics*, Ch. 9, Oxford Univ. Press, Oxford 1958.
- [10] A. EINSTEIN, *The meaning of relativity*, Princeton Univ. Press, Princeton USA 1950.
- [11] A. EINSTEIN and N. ROSEN, *The particle problem in the general theory of relativity*, Phys. Rev. **48** (1935), 73-77.
- [12] EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH, *Experiments at CERN in 1992*, ISSN 0259-093X, Genève 1992, 172-173.
- [13] A. FÖPPL, *Über eine mögliche Erweiterung des Newton'schen Gravitation-Gesetzes*, Sitz. Bayer. Akad. Wiss. München **27** (1897), 93-99.
- [14] R. M. GODBOLE, J. C. PATI, S. D. RINDANI, T. JAYARAMAN and G. RAJASEKARAN, *The recent single-tag two-photon experiments at Petra and the issue of quark charges*, Phys. Lett. B **142** (1984), 91-98.
- [15] M.-Y. HAN and Y. NAMBU, *Three-triplet model with double SU(3) symmetry*, Phys. Rev. B **139** (1965), 1006-1010.
- [16] M.-Y. HAN and Y. NAMBU, *Three triplets, paraquarks and «colored» quarks*, Phys. Rev. D **10** (1974), 674-683.

- [17] L. LANDAU et E. LIFCHITZ, *Physique théorique*, Vol. 4; V. BERESTETSKI, E. LIFCHITZ et L. PITAYEVSKI, *Théorie quantique relativiste*, Ch. 2, MIR, Moscou 1972.
- [18] A. A. LOGUNOV, YU. M. LOSKUTOV and M. A. MESTVIRISHVILI, *Relativistic theory of gravity*, Intern. J. Mod. Phys. 3 (1988), 2067-2099.
- [19] G. MAMBRIANI, *Atomic masses and fundamental constants in NAMEC (a New Approach to Mass and Electric Charge)*, in preparation (1993).
- [20] A. MESSIAH, *Mécanique quantique*, Tome 2, Chap. 20, Dunod, Paris 1964.
- [21] O. NACHTMANN, H. SCHIMMLE and R. U. SEXL, *On the structure of field theories of gravitation*, Acta Phys. Austriaca 29 (1969), 289-299.
- [22] O. NACHTMANN, H. SCHIMMLE and R. U. SEXL, *On the most general linear theory of gravitation*, Commun. Math. Phys. 13 (1969), 254-256.
- [23] J. C. PATI and A. SALAM, *Unified lepton-hadron symmetry and a gauge theory of the basic interactions*, Phys. Rev. D 8 (1973), 1240-1251.
- [24] K. PEARSON, *On the motion of spherical and ellipsoidal bodies in fluid media*, Quart. J. Pure Appl. Math. 20 (1885), 60-80.
- [25] K. PEARSON, *On the motion of spherical and ellipsoidal bodies in fluid media*, Quart. J. Pure Appl. Math. 20 (1885), 184-211.
- [26] K. PEARSON, *Ether squirts*, Am. J. Math. 13 (1891), 309-362.
- [27] P. ROMAN, *Theory of elementary particles*, Ch. 4, North-Holland, Amsterdam 1961.
- [28] A. SCHUSTER, *Potential matter - a holiday dream*, Nature 58 (1898), 367.
- [29] A. SCHUSTER, *Potential matter*, Nature 58 (1898), 618-619.
- [30] W. THIRRING, *Why is gravitation fascinating?*, *Elementary processes at high energy*, Ed. A. Zichichi, Academic Press, New York 1971.
- [31] A. H. WAPSTRA and G. AUDI, *The 1983 atomic mass evaluation; (I) Atomic mass table*, Nucl. Phys. A 432 (1985), 1-54.

Summary

The question of a possible legitimacy of the concepts of negative mass and antigravity is advanced, and a tentatively positive answer is given. Such a possibility, requires a compact set of new hypotheses, which are more or less interdependent and so that if some of them are suspended, the remaining ones cannot be saved because they enter into conflict with the experimental evidence. Among such hypotheses the newest ones are: the existence of the electric charge with only the positive sign, the negativity of the mass sign for all the «elementary» particles having standard negative electric charge, the gravitational repulsion between particles and antiparticles, and the splitting of relativistic dynamics into two branches (one for particles, the other for antiparticles). This set of hypotheses, called NAMEC (New Approach to Mass and Electric Charge), leaves classical mechanics and electrodynamics, special relativity, and non-relativistic quantum mechanics largely untouched. Instead, new provisions concern mainly gravitation (NAMEC cannot be conciliated with general relativity), particle physics (NAMEC

seems to require quarks having integer electric charge, with the consequent necessity of modifying the standard quantum chromodynamics), and the properties of systems containing masses of both signs, which require particular care. An example of the latter is the repartition of the potential energies among the system bodies, which is assumed following a proposal by de Broglie. These latter systems have a relevant importance, because in NAMEC all atoms must be thought of a systems of this type, being composed of a nucleus with positive mass and of electrons with negative masses. This opens some interesting possibilities which could put NAMEC to the test. The most crucial NAMEC prevision is that antiproton must be gravitationally repelled from the Earth, thus, when free, «falling upward» with an acceleration equal in modulus to the standard fall acceleration.

* * *

