

Brevi Appunti sulla Teoria dei Gruppi

(per il corso di Fisica Nucleare e Subnucleare 2011/12)

Fiorenzo Bastianelli

1 Definizione di gruppo

Consideriamo un gruppo $G = \{g\}$ visto come insieme di elementi g che soddisfano alle seguenti proprietà:

- 1) esiste una legge di composizione: presi $g_1, g_2 \in G$ allora $g_1 g_2 = g_3 \in G$,
- 2) esiste l'elemento identità: $\exists e \in G$ tale che $ge = eg = g$,
- 3) esiste l'elemento inverso: se $g \in G$ allora $\exists g^{-1} \in G$ tale che $gg^{-1} = g^{-1}g = e$,
- 4) associatività: $(g_1 g_2) g_3 = g_1 (g_2 g_3)$.

I *gruppi discreti* sono quei gruppi che contengono un numero finito di elementi, ad esempio $Z_2 \equiv \{1, -1\}$ con la legge di moltiplicazione usuale definisce un gruppo con due elementi. I *gruppi di Lie* sono quelli i cui elementi dipendono in modo continuo da alcuni parametri, ad esempio le rotazioni attorno all'asse z formano un gruppo di Lie i cui elementi sono parametrizzati da un angolo $\theta \in [0, 2\pi]$.

1.1 Esempi

Alcuni esempi di gruppi discreti sono:

- il gruppo ciclico Z_n , generato dalle potenze di un elemento a del gruppo, $Z_n = \{e, a, a^2, \dots, a^{n-1}\}$, dove $a^n = a^0 = e$ (gruppo isomorfo alle radici n -esime di 1, $e^{\frac{2\pi i}{n}k}$ con $k = 0, 1, \dots, n-1$);
 - il gruppo delle permutazioni di n elementi S_n , che contiene $n!$ elementi;
- etc..

Alcuni esempi di gruppi di Lie sono:

- $U(1) = \{z \in \mathbf{C} \mid |z| = 1\} = \{e^{i\alpha} \mid \alpha \in \mathbf{R}\}$, gruppo delle fasi (questo gruppo descrive le invarianze del prodotto z^*z con $z \in \mathbf{C}$);
 - $O(n)$ gruppo delle matrici reali ortogonali $n \times n$ (questo gruppo descrive le invarianze del prodotto scalare $x^T x$ con $x \in \mathbb{R}^n$);
 - $SO(n)$ gruppo delle matrici reali ortogonali $n \times n$ con determinante = 1;
 - $U(n)$ gruppo delle matrici unitarie $n \times n$ (questo gruppo descrive le invarianze del prodotto scalare $w^\dagger w$ con $w \in \mathbb{C}^n$);
 - $SU(n)$ gruppo delle matrici unitarie $n \times n$ con determinate = 1;
- etc., con relazioni facilmente dimostrabili tra questi gruppi: $O(n) = Z_2 \times SO(n)$; $U(n) = U(1) \times SU(n)$.

2 Rappresentazioni

Introduciamo ora il concetto di rappresentazioni del gruppo. Una rappresentazione di un gruppo astratto G è una “realizzazione” delle relazioni moltiplicative del gruppo G in un corrispondente gruppo di matrici quadrate, dove il prodotto è dato dalla solita moltiplicazione tra matrici.

Queste matrici possono essere pensate come operatori che agiscono su uno spazio vettoriale V la cui dimensione è detta dimensione della rappresentazione. Esplicitamente

$$\begin{aligned} r : G &\longmapsto \text{Matrici} \\ g &\longmapsto r(g) \end{aligned} \tag{1}$$

tali che

- 1) $r(g_1)r(g_2) = r(g_1g_2)$
- 2) $r(e) = I$ con I matrice identità.

Da questo segue anche che $r(g^{-1})r(g) = r(e) = I$, per cui $r(g^{-1}) = [r(g)]^{-1}$. L'associatività è automatica perchè il prodotto tra matrici è associativo. Quindi tutte le proprietà del gruppo sono realizzate esplicitamente dalle matrici della rappresentazione.

Negli esempi descritti sopra abbiamo quasi sempre usato delle matrici per definire il gruppo. Queste matrici definiscono direttamente una particolare rappresentazione: la rappresentazione definente (o rappresentazione fondamentale). Gli elementi del gruppo nella rappresentazione definente operano naturalmente trasformazioni sui vettori di spazio vettoriale V (lo spazio vettoriale su cui le matrici agiscono come operatori lineari). Indichiamo con v^a le componenti di un vettore generico dello spazio V . La matrice $r(g)$ che rappresenta l'elemento g del gruppo trasforma il vettore nel seguente modo

$$v^a \xrightarrow{g \in G} v'^a = [r(g)]^a_b v^b \tag{2}$$

dove come al solito $[r(g)]^a_b$ descrive gli elementi della matrice $r(g)$ al variare degli indici a e b .

A questo punto si pone il problema di studiare quante e quali siano le possibili rappresentazioni di un gruppo. Questo problema è di grande rilevanza per le applicazioni fisiche, perchè i vettori di una rappresentazione possono essere usati per descrivere variabili dinamiche associate a modelli fisici dove G agisce come gruppo di simmetria.

In generale si definiscono equivalenti rappresentazioni che sono collegate da trasformazioni di similitudine: $r(g)$ ed $\tilde{r}(g)$ sono rappresentazioni equivalenti se

$$\tilde{r}(g) = A r(g) A^{-1} \quad \forall g \in G. \tag{3}$$

Questa relazione di equivalenza permette di considerare rappresentazioni equivalenti come essenzialmente la stessa rappresentazione. Infatti la trasformazione di similitudine rappresenta semplicemente un cambio di base nello spazio vettoriale V : le matrici delle diverse rappresentazioni equivalenti identificano lo stesso operatore lineare espresso nelle rispettive basi.

Una rappresentazione riducibile è una rappresentazione equivalente ad una rappresentazione le cui matrici sono diagonali a blocchi, ad esempio $r(g)$ è riducibile se vale

$$\tilde{r}(g) = A r(g) A^{-1} = \left(\begin{array}{c|c|c} r_1(g) & 0 & 0 \\ \hline 0 & r_2(g) & 0 \\ \hline 0 & 0 & r_3(g) \end{array} \right) \quad \forall g \in G \tag{4}$$

ed in questo caso si dice che $r(g)$ è riducibile alle tre rappresentazioni $r_1(g)$, $r_2(g)$, $r_3(g)$. In questo esempio lo spazio vettoriale V su cui agisce la rappresentazione riducibile $r(g)$ è naturalmente decomposto come somma diretta dei tre spazi vettoriali su cui agiscono le rappresentazioni $r_1(g)$, $r_2(g)$, $r_3(g)$, i.e. $V = V_1 \oplus V_2 \oplus V_3$.

2.1 Indici in “alto” ed in “basso”, indici puntati

Dato un gruppo G ed una sua rappresentazione n dimensionale $R = \{r(g), \text{matrici } n \times n \forall g \in G\}$, allora possiamo pensare a queste matrici come operatori agenti su uno spazio vettoriale V di dimensione n . Negli esempi precedenti abbiamo definito i gruppi di Lie usando delle matrici, che identificano la cosiddetta rappresentazione defnente. Procediamo quindi considerando direttamente la rappresentazione defnente. I vettori dello spazio vettoriale V , vettori che indicheremo con le componenti v^a (dove $a = 1, 2, \dots, n$) sono trasformati dalle matrici $[r(g)]^a_b$. Per definizione un vettore generico v^a dello spazio V si trasforma nel seguente modo sotto l'azione del gruppo G

$$v^a \xrightarrow{g \in G} v'^a = [r(g)]^a_b v^b$$

(notare che si usa la convenzione per cui indici ripetuti sono sommati automaticamente sui loro possibili valori). Vettori che si trasformano in modo identico a quello descritto qui sopra hanno per definizione gli indici in “alto”. Sono vettori che appartengono a spazi vettoriali isomorfi a V e che hanno la proprietà di avere le stesse leggi di trasformazione di V sotto l'azione del gruppo G .

Ora data questa rappresentazione $r(g)$ (che come abbiamo detto corrisponde a trasformare vettori con indici in “alto” appartenenti a V) ne possiamo immediatamente costruire altre tre: rappresentazione “complesso coniugata” $r(g)^*$, rappresentazione “inverso trasposta” $r(g)^{-1T}$, rappresentazione “inverso hermitiana” $r(g)^{-1\dagger}$.

Per convenzione le faremo corrispondere rispettivamente a trasformazioni di:

vettori con “indici puntati in alto” (vettori dello spazio complesso coniugato V^*),

vettori con “indici in basso” (vettori dello spazio duale \tilde{V}),

vettori con “indici puntati in basso” (vettori dello spazio duale complesso coniugato \tilde{V}^*).

In formule:

$$\begin{aligned} v^{\dot{a}} &\xrightarrow{g \in G} v'^{\dot{a}} = [r(g)^*]^{\dot{a}}_b v^b \\ v_a &\xrightarrow{g \in G} v'_a = [r(g)^{-1T}]^b_a v_b \\ v_{\dot{a}} &\xrightarrow{g \in G} v'_{\dot{a}} = [r(g)^{-1\dagger}]^{\dot{b}}_{\dot{a}} v_{\dot{b}} \end{aligned}$$

È immediato verificare che queste sono rappresentazioni del gruppo se $r(g)$ lo è. La struttura indiciale diversa, associata a queste matrici, riflette il fatto che sono operatori che agiscono su spazi vettoriali diversi (anche se isomorfi allo spazio vettoriale V di partenza).

Si possono ottenere grandezze invarianti sotto l'azione del gruppo G prendendo il prodotto scalare tra vettori con indici in alto (a volte detti controvarianti) e quelli con indici in basso (a volte detti covarianti) entrambi puntati o non puntati. Infatti

$$\begin{aligned} v_a w^a &\xrightarrow{g \in G} v'_a w'^a = v'^T w' = (r(g)^{-1T} v)^T r(g) w = v^T r(g)^{-1} r(g) w = v^T w = v_a w^a \\ x_{\dot{a}} y^{\dot{a}} &\xrightarrow{g \in G} x'_{\dot{a}} y'^{\dot{a}} = x'^T y' = (r(g)^{-1\dagger} x)^T r(g)^* y = x^T r(g)^{-1*} r(g)^* y = x^T y = x_{\dot{a}} y^{\dot{a}} \end{aligned}$$

(in questi calcoli il tipo di notazione usata è ovvia dal contesto). In generale non ha senso da un punto di vista gruppale contrarre in altro modo gli indici dei vettori sopra descritti (“contrarre” indica l'operazione di uguagliare due indici e sommare su tutti i possibili valori che questi indici possono assumere).

Si noti che i tensori delta di Kronecker δ^a_b e $\delta^{\dot{a}}_{\dot{b}}$, numericamente identici alla matrice identità, rimangono invarianti per trasformazioni del gruppo se si trasformano i loro indici nel modo corrispondente alla natura degli indici descritto sopra, ed esempio

$$\begin{aligned} \delta^a_b \xrightarrow{g \in G} (\delta')^a_b &= [r(g)]^a_c [r(g)^{-1T}]^d_b \delta^c_d = [r(g)]^a_c [r(g)^{-1T}]^c_b = [r(g)]^a_c [r(g)^{-1}]^c_b = \\ &= [r(g)r(g)^{-1}]^a_b = \delta^a_b . \end{aligned}$$

Sono detti tensori invarianti, e difatti sono quelli usati per definire i prodotti scalari riportati sopra (si noti che, al contrario, se non ci sono relazioni speciali, il tensore δ_{ab} , numericamente identico alla delta di Kronecker, non è invariante: sotto una trasformazione del gruppo le componenti del tensore cambiano valore).

È comunque possibile che alcune di queste diverse rappresentazioni siano equivalenti tra loro, cioè collegate da una trasformazione di similitudine. Infatti per rappresentazioni reali vale $r(g)^* = r(g)$: dunque $v^{\dot{a}} \sim v^a$ e $v_{\dot{a}} \sim v_a$, dove il simbolo \sim significa “si trasforma come”. Non c’è dunque bisogno in questo caso di introdurre indici puntati. Per rappresentazioni unitarie vale $r(g)^{-1} = r(g)^\dagger$, e quindi $r(g)^{-1\dagger} = r(g)$, dunque $v_{\dot{a}} \sim v^a$ e $v^{\dot{a}} \sim v_a$. Di nuovo non c’è bisogno di usare indici puntati. Infine per rappresentazioni unitarie e reali (cioè ortogonali reali) tutte e quattro le rappresentazioni descritte sopra sono equivalenti.

Commento: le rappresentazioni spinoriali finito-dimensionali del gruppo di Lorentz $O(3,1)$ (le rappresentazioni spinoriali sono rappresentazioni a due valori ed il ricoprimento del gruppo di Lorentz è dato da $SL(2, C)$) non sono unitarie e neanche reali. In questo caso tutti e quattro i diversi tipi di indici sono utili (anche se solo due di queste quattro rappresentazioni sono inequivalenti).

2.2 Altre rappresentazioni: i tensori

Altre rappresentazioni possono essere ottenute dal prodotto tensoriale delle rappresentazioni descritte precedentemente. Per definizione queste rappresentazioni agiscono sui “tensori”, elementi di spazi vettoriali ottenuti dal prodotto tensoriale di V , V^* , \tilde{V} e \tilde{V}^* . Quindi questi tensori sono oggetti che per definizione hanno un certo numero di indici puntati e non puntati, in alto ed in basso, e con le proprietà di trasformazione definite dalla natura degli indici.

Ad esempio, il tensore $F^{ab}{}^d{}_e$ per definizione è un oggetto con n^5 componenti che si trasformano esattamente come il prodotto delle componenti dei vettori definiti precedentemente

$$F^{ab}{}^d{}_e \sim v^a v^b w_c x^d y_e .$$

Quindi il tensore $F^{ab}{}^d{}_e$ rappresenta un elemento di uno spazio vettoriale di dimensione n^5 (perché ciascun indice può assumere n valori; corrisponde ad un elemento dello spazio vettoriale $V \times V \times \tilde{V} \times V^* \times \tilde{V}^*$) e che sotto l’azione del gruppo G si trasforma nel seguente modo

$$F^{ab}{}^d{}_e \xrightarrow{g \in G} F'^{ab}{}^d{}_e = [r(g)]^a_f [r(g)]^b_g [r(g)^{-1T}]^h_c [r(g)^*]^{d'}_{m'} [r(g)^{-1\dagger}]^{\dot{n}}_{e'} F'^{fg}{}_{h\dot{n}}$$

Questa legge di trasformazione lineare identifica quindi una rappresentazione di dimensione n^5 (le n^5 componenti sono mescolate tra loro da una matrice $n^5 \times n^5$, ricavabile dalla formula qui sopra, che fornisce una rappresentazione del gruppo).

In generale, i tensori identificano rappresentazioni riducibili. Si pone quindi il problema di decomporli in rappresentazioni irriducibili. Un modo di decomporre una rappresentazione è quello di separare i tensori tenendo conto delle proprietà di simmetria sotto le permutazioni degli

indici della stessa natura (è quindi utile conoscere le proprietà del gruppo delle permutazioni di n oggetti, indicato con S_n , conosciuto anche come il gruppo simmetrico).

Ad esempio il tensore T^{ab} può essere separato nella sua parte simmetrica ($S^{ab} = S^{ba}$) e nella sua parte antisimmetrica ($A^{ab} = -A^{ba}$) nel seguente modo

$$T^{ab} = \underbrace{\frac{1}{2}(T^{ab} + T^{ba})}_{S^{ab}} + \underbrace{\frac{1}{2}(T^{ab} - T^{ba})}_{A^{ab}} . \quad (5)$$

È facile convincersi che queste parti con simmetria distinta non si mescolano tra di loro sotto le trasformazioni del gruppo. Infatti, si può calcolare il trasformato della parte simmetrica sotto una trasformazione arbitraria del gruppo, e verificare che risulta simmetrica

$$\begin{aligned} S^{ab} &\xrightarrow{g \in G} S'^{ab} = [r(g)]^a_c [r(g)]^b_d S^{cd} \\ &= [r(g)]^a_c [r(g)]^b_d S^{dc} \\ &= [r(g)]^b_d [r(g)]^a_c S^{dc} = S'^{ba} \end{aligned} \quad (6)$$

Similmente si può verificare che

$$\begin{aligned} A^{ab} &\xrightarrow{g \in G} A'^{ab} = [r(g)]^a_c [r(g)]^b_d A^{cd} \\ &= [r(g)]^a_c [r(g)]^b_d (-A^{dc}) \\ &= -[r(g)]^b_d [r(g)]^a_c A^{dc} = -A'^{ba} \end{aligned} \quad (7)$$

per cui il trasformato della parte antisimmetrica è antisimmetrica. Parti simmetriche e parti antisimmetriche non sono mai mescolate tra di loro da trasformazioni del gruppo, per cui la rappresentazione tensoriale identificata dal tensore T^{ab} è riducibile. In una notazione compatta possiamo scrivere che la rappresentazione $r_T(g)$ che trasforma il tensore $T^{ab} \sim T$

$$T' = r_T(g) T \quad (8)$$

è riducibile

$$\begin{pmatrix} S' \\ A' \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_S(g) & 0 \\ 0 & r_A(g) \end{pmatrix}}_{r_T(g)} \begin{pmatrix} S \\ A \end{pmatrix} \quad (9)$$

dove $T \sim \begin{pmatrix} S \\ A \end{pmatrix}$ indica la decomposizione in parte simmetrica e parte antisimmetrica.

Queste parti potrebbero essere ulteriormente riducibili nel caso esistano altre operazioni invarianti. Per i casi più semplici è facile studiare caso per caso una eventuale riducibilità ulteriore.

2.3 Rappresentazioni di $SO(N)$

Descriviamo le più semplici rappresentazioni di $SO(N)$, il gruppo speciale ortogonale di matrici $N \times N$. Questo è il gruppo che lascia invariato il prodotto scalare di vettori $\vec{v}, \vec{w} \in R^N$ definito da $\vec{v} \cdot \vec{w} = \delta_{ab} v^a w^b$, dove la metrica δ_{ab} è un tensore invariante (infatti indici in alto ed indici in basso sono equivalenti, quindi $\delta_{ab} = \delta^a_b$, ma sappiamo già che δ^a_b è un tensore invariante; in ogni caso è facile verificare direttamente questa proprietà). La rappresentazione definente (detta anche rappresentazione vettoriale) agisce sui vettori v^a , e come già descritto

le quattro rappresentazioni basilari sono tutte equivalenti: $v^a \sim v_a \sim v^{\dot{a}} \sim v_{\dot{a}}$. Indichiamo tale rappresentazione con N , cioè con le sue dimensioni. Il prodotto tensoriale $N \otimes N$ indica la rappresentazione tensoriale che agisce sui tensori con due indici T^{ab} , e quindi una rappresentazione di dimensione N^2 . Abbiamo visto che questi tensori si possono separare nella parte simmetrica S^{ab} (di dimensione $\frac{N(N+1)}{2}$) e nella parte antisimmetrica A^{ab} (di dimensione $\frac{N(N-1)}{2}$). La parte simmetrica è ancora riducibile, perchè si può formare uno scalare, cioè un invariante sotto le trasformazioni del gruppo, che corrisponde alla sua traccia

$$S \equiv S^{ab} \delta_{ba} = S^a_a \quad (10)$$

Si vede facilmente che questo è uno scalare (infatti sappiamo già che la contrazione di un indice in alto con un indice in basso produce uno scalare)

$$S \xrightarrow{g \in SO(N)} S' = S \quad (11)$$

e forma una rappresentazione banale uno-dimensionale. Possiamo separare la traccia dal tensore simmetrico S^{ab} dal resto nel seguente modo

$$S^{ab} = \underbrace{S^{ab} - \frac{1}{N} \delta^{ab} S}_{\hat{S}^{ab}} + \frac{1}{N} \delta^{ab} S \quad (12)$$

dove abbiamo definito il tensore simmetrico senza traccia \hat{S}^{ab} (che infatti soddisfa $\hat{S}^a_a = 0$). Dunque abbiamo separato il tensore T^{ab} nelle sue parti irriducibili

$$T^{ab} = \frac{1}{N} \delta^{ab} S + \hat{S}^{ab} + A^{ab} \quad (13)$$

che si trasformano tra di loro senza mai mescolarsi. Indicando le rappresentazioni irriducibili con le rispettive dimensioni, quanto descritto si traduce nella seguente scrittura

$$N \otimes N = 1 \oplus \left(\frac{N(N+1)}{2} - 1 \right) \oplus \frac{N(N-1)}{2} . \quad (14)$$

Nel caso specifico di $SO(3)$ questo produce

$$3 \otimes 3 = 1 \oplus 5 \oplus 3 \quad (15)$$

che ci dice che componendo lo spin 1 (la rappresentazione vettoriale “3”) con se stesso si ottiene lo spin 0 (la rappresentazione “1”, lo scalare), lo spin 1 (di nuovo la rappresentazione “3”) e lo spin 2 (la rappresentazione “5”).

La rappresentazione sui tensori antisimmetrici con due indici A^{ab} , la $\frac{N(N-1)}{2}$, è anche chiamata rappresentazione aggiunta: si noti che le sue dimensioni corrispondono al numero di parametri indipendenti del gruppo, che sono gli angoli che descrivono le rotazioni nei piani $a - b$ (con $a \neq b$).

2.4 Rappresentazioni di $SU(N)$

Consideriamo ora $SU(N)$, il gruppo speciale unitario di matrici $N \times N$. Questo è il gruppo che lascia invariato il prodotto scalare di vettori $\vec{v}, \vec{w} \in C^N$ definito da $\vec{v}^* \cdot \vec{w} = \delta^a_b v_a^* w^b$, dove il

simbolo $*$ indica il complesso coniugato e la metrica δ^a_b identifica un tensore invariante (vedere eq. (5)). Partendo dalla rappresentazione fondamentale, la N (corrispondente ai vettori v^a), ne otteniamo subito un'altra, la complesso coniugata (corrispondente ai vettori $v^{\dot{a}} \sim v_a$), indicata con \bar{N} . Studiamo ora altre rappresentazioni considerando il prodotto tensoriale

$$N \otimes N = \frac{N(N+1)}{2} \oplus \frac{N(N-1)}{2} \quad (16)$$

corrispondente alla separazione del tensore T^{ab} nelle sue parti simmetriche ed antisimmetriche, $T^{ab} = S^{ab} + A^{ab}$. Questo è tutto (si noti che non si possono prendere tracce per formare scalari su questi tensori perchè δ_{ab} non è un tensore invariante per $SU(N)$: per rendersene conto basta trasformare sotto $SU(N)$ il tensore δ_{ab} come dettato dalla struttura dei suoi indici e vedere che non rimane invariante; si paragoni questo con l'invarianza del tensore δ^a_b in eq. (5)). Consideriamo ora

$$N \otimes \bar{N} = 1 \oplus (N^2 - 1) \quad (17)$$

che corrisponde alla separazione del tensore T^a_b nella sua parte di traccia (lo scalare) e nella sua parte senza traccia. Questo è possibile perchè sappiamo che la contrazione di un indice alto con un indice basso produce uno scalare. In formule questa separazione si scrive

$$T^a_b = \frac{1}{N} \delta^a_b T + \hat{T}^a_b \quad (18)$$

dove $T \equiv T^a_a$ e $\hat{T}^a_b \equiv T^a_b - \frac{1}{N} \delta^a_b T$. Si noti che il tensore δ^a_b è un tensore invariante (lo si provi usando le trasformazioni di $SU(N)$; si noti che questo tensore corrisponde alla metrica dello spazio vettoriale complesso C^N). La rappresentazione $N^2 - 1$ è la cosiddetta rappresentazione aggiunta. Altri tensori invarianti di $SU(N)$ sono i tensori completamente antisimmetrici con N indici, $\epsilon_{a_1 a_2 \dots a_N}$ ed $\epsilon^{a_1 a_2 \dots a_N}$ (lo si può dimostrare utilizzando il fatto che le matrici del gruppo hanno determinate uguale ad uno).

Esplicitiamo il caso di $SU(3)$. Abbiamo

$$3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8 \quad (19)$$

relazione che trova applicazioni nel modello statico a quark dei mesoni quando si considerano i tre tipi quark up, down e strange. Inoltre

$$3 \otimes 3 = 6 + \bar{3} \quad (20)$$

La possibile ambiguità di capire se il tensore A^{ab} , che ha tre componenti, corrisponda alla 3 o alla $\bar{3}$ è risolto in favore di quest'ultima opzione considerando che $A^{ab} \sim A^{ab} \epsilon_{abc} \sim V_c$ (poiché ϵ_{abc} è un tensore invariante per $SU(3)$). Con un pò più di sforzo si può anche dedurre che

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10 \quad (21)$$

che trova applicazioni nel modello statico a quark dei barioni.

Esplicitiamo anche il caso di $SU(2)$. Abbiamo

$$2 \otimes 2 = 1 \oplus 3, \quad 2 \otimes \bar{2} = 1 \oplus 3 \quad (22)$$

che sono consistenti col fatto che la 2 è equivalente alla $\bar{2}$ (in notazioni $2 \sim \bar{2}$), evidente dalla relazione $v^a \sim v^a \epsilon_{ab} \sim v_b$ (infatti ϵ_{ab} è un tensore invariante per $SU(2)$).

2.5 Rappresentazioni di $U(1)$

Consideriamo anche il caso delle rappresentazioni del gruppo $U(1)$, che riveste una notevole importanza in fisica. Tutte le sue rappresentazioni unitarie sono uno-dimensionali (complesse) e sono identificate da un numero intero positivo o negativo detto “carica”. La rappresentazione definente rappresenta un elemento del gruppo $U(1)$ con la fase $e^{i\alpha}$ che “ruota” naturalmente un vettore complesso unidimensionale v ($v \in \mathbb{C}$, dove \mathbb{C} indica il campo dei numeri complessi, che ora interpretiamo come spazio vettoriale complesso ad una dimensione)

$$v \xrightarrow{g \in U(1)} v' = e^{i\alpha} v . \quad (23)$$

Quindi lo spazio vettoriale della rappresentazione definente è unidimensionale e complesso, e le matrici della rappresentazione sono matrici complesse 1×1 (cioè numeri complessi).

Oggetti che si trasformano come prodotti tensoriali

$$v_{(q)} \sim \underbrace{vv \cdots v}_{q \text{ volte}} = v^q \quad (24)$$

con q numero intero sono le rappresentazioni di carica q

$$v_{(q)} \xrightarrow{g \in U(1)} v'_{(q)} = e^{iq\alpha} v_{(q)} . \quad (25)$$

Evidentemente q può essere anche negativo. Il prodotto tensoriale di una rappresentazione di carica q_1 con una di carica q_2 genera la rappresentazione di carica $q_1 + q_2$. Il gruppo di simmetria $U(1)$ è usato in fisica quando ci sono numeri quantici additivi quantizzati. Siccome tutte le sue rappresentazioni sono uno-dimensionali, per distinguere la varie rappresentazioni inequivalenti occorre indicare la carica q della rappresentazione piuttosto che la sua dimensione.

3 Trasformazioni infinitesime ed algebra di Lie

Un gruppo di Lie è per definizione un gruppo di trasformazioni che dipendono in modo continuo da alcuni parametri. Studiando le trasformazioni infinitesime generate dal gruppo, cioè trasformazioni che differiscono di poco dall'identità, si ottiene la cosiddetta algebra di Lie del gruppo, un'algebra che riassume le informazioni essenziali del gruppo. In generale un elemento $g(\alpha)$ di un gruppo di Lie G (o più propriamente della parte del gruppo connessa all'identità) si può parametrizzare nel seguente modo

$$g(\alpha) = e^{i\alpha_a T^a} \in G \quad a = 1, \dots, \dim G \quad (26)$$

dove i parametri α_a sono numeri reali che parametrizzano i vari elementi del gruppo, e sono scelti in modo tale che per $\alpha_a = 0$ si ha l'identità $g = 1$, mentre gli operatori T^a sono i generatori del gruppo. Pensando il gruppo nella rappresentazione definente come un gruppo di matrici $n \times n$, anche i generatori risultano essere matrici $n \times n$. Essi generano trasformazioni infinitesime quando $\alpha_a \ll 1$ (basta sviluppare in serie di Taylor la funzione esponenziale e tenere i termini di ordine più basso)

$$g = 1 + i\alpha_a T^a + \dots \quad (27)$$

dove 1 indica l'elemento identità del gruppo. Studiando la relazione che cattura le proprietà di composizione del gruppo con trasformazioni infinitesime (che in generale sono non commutative) si ottiene l'algebra di Lie del gruppo G

$$[T^a, T^b] = if^{ab}_c T^c . \quad (28)$$

Le costanti f^{ab}_c sono chiamate costanti di struttura del gruppo e caratterizzano quasi completamente il gruppo (gruppi diversi ma con la stessa algebra di Lie differiscono per la loro diversa topologia, ma localmente sono simili). Per familiarizzare con queste definizioni è utile passare in rassegna i gruppi più semplici e familiari, quali $U(1)$, $SO(3)$ ed $SU(2)$.

3.1 Algebra di Lie del gruppo $U(1)$

Consideriamo il gruppo $U(1) = \{e^{i\alpha} \mid \alpha \in \mathbf{R}\}$, il gruppo delle fasi definito tramite la sua rappresentazione definente. Per trasformazioni infinitesime

$$e^{i\alpha} = 1 + i\alpha + \dots \quad (29)$$

ed il generatore infinitesimo è dato da $T = 1$ (che possiamo pensare come matrice 1×1) il quale produce l'algebra di Lie abeliana del gruppo $U(1)$ data dal commutatore

$$[T, T] = 0. \quad (30)$$

Nella rappresentazione di carica q , dove l'elemento $e^{i\alpha}$ è rappresentato da $e^{iq\alpha}$, si vede che il generatore infinitesimo è rappresentato da $T = q$ e soddisfa alla stessa algebra di Lie (30). Possiamo quindi pensare all'algebra di Lie $[T, T] = 0$ come all'algebra di Lie astratta corrispondente al gruppo $U(1)$, che viene poi rappresentata da matrici diverse nelle diverse rappresentazioni. Siccome le rappresentazioni irriducibili del gruppo $U(1)$ sono tutte uno-dimensionali tutte queste matrici sono matrici 1×1 e sono quindi dei numeri. Nella rappresentazione di carica q il generatore di $U(1)$ è rappresentato da $T = q$. Tipicamente si usa anche la notazione Q (con cui spesso si indica una carica) o anche J al posto di T per il generatore del gruppo $U(1)$.

3.2 Algebra di Lie del gruppo $SO(3)$

Consideriamo ora il familiare gruppo delle rotazioni nello spazio tridimensionale, il gruppo $SO(3)$ delle matrici R reali ortogonali 3×3 con determinante uguale ad 1. Queste matrici generano le trasformazioni di un vettore tridimensionale

$$\vec{x} \longrightarrow \vec{x}' = R \vec{x} \quad (31)$$

o in notazione tensoriale

$$x^i \longrightarrow x'^i = R^i_j x^j \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (32)$$

Questa è la rappresentazione definente (o vettoriale) e gli indici in alto ed in basso sono della stessa natura (poiché la metrica euclidea è la δ_{ij}), per cui si potrebbero anche porre tutti gli indici in alto. Consideriamo ora le rotazioni attorno ai tre assi cartesiani con coordinate $(x, y, z) = (x^1, x^2, x^3)$

$$R_z(\theta_z) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_z) & \sin(\theta_z) & 0 \\ -\sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\theta_z \ll 1} 1 + \underbrace{\theta_z \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{iT^3} + \dots \quad (33)$$

$$R_x(\theta_x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & \sin(\theta_x) \\ 0 & -\sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{pmatrix} \xrightarrow{\theta_x \ll 1} 1 + \theta_x \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}}_{iT^1} + \dots \quad (34)$$

$$R_y(\theta_y) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & -\sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{pmatrix} \xrightarrow{\theta_y \ll 1} 1 + \theta_y \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{iT^2} + \dots \quad (35)$$

cosicchè i generatori T^i delle trasformazioni infinitesime sono dati da

$$T^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \quad T^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad T^3 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (36)$$

La corrispondente algebra di Lie è facilmente calcolata calcolando i commutatori delle matrici sopra identificate

$$[T^i, T^j] = i\epsilon^{ijk}T^k \quad (37)$$

da cui si estraggono le costanti di struttura del gruppo $SO(3)$. Abbiamo ottenuto questa algebra usando la rappresentazione definente, però ora possiamo considerarla come l'algebra astratta del gruppo di Lie $SO(3)$ e studiarne le diverse rappresentazioni irriducibili. Come abbiamo visto le rappresentazioni irriducibili dell'algebra di Lie corrispondono alle rappresentazioni delle trasformazioni infinitesime del gruppo, esponenziando queste trasformazioni infinitesime si ottengono le trasformazioni finite¹. Riconosciamo in (37) l'algebra quantistica del momento angolare. Infatti rinominando $T^i \rightarrow J^i$ si ha la familiare algebra del momento angolare

$$[J^i, J^j] = i\epsilon^{ijk}J^k \quad (38)$$

e lo studio delle sue rappresentazioni unitarie irriducibili può essere risolto esplicitamente con i metodi usati in meccanica quantistica: queste rappresentazioni irriducibili sono date dalle armoniche sferiche Y_{lm} che formano una base della rappresentazione di spin l che è $2l + 1$ dimensionale (infatti i possibili valori di m sono $2l + 1$). Nel caso di rappresentazioni spinoriali (cioè con spin semintero) una rotazione di 2π (che per $SO(3)$ coincide con l'identità) è rappresentata dalla matrice -1 , e quindi si parla di rappresentazione a 2 valori (occorre ruotare di altri 2π per riottenere l'identità). Come vedremo queste rappresentazioni spinoriali sono vere e proprie rappresentazioni del gruppo $SU(2)$, che ha la stessa algebra di Lie di $SO(3)$, e quindi localmente ha la stessa struttura, ma diverse proprietà topologiche.

Per curiosità, e magari per apprezzare sviluppi futuri (algebre di Lie di $SO(n)$ e $SO(n, m)$), riscriviamo le matrici che identificano i generatori nella rappresentazione vettoriale (36) e la corrispondente algebra di Lie in (37) in un modo alternativo. Possiamo rinominare il generatore T^1 come T^{23} , poichè genera rotazione nel piano 2-3, e così via: $T^2 \equiv T^{31}$, $T^3 \equiv T^{12}$. Gli elementi di matrice in (36) possono essere scritti come

$$(T^1)^i_j \equiv (T^{23})^i_j = -i(\delta^{2i}\delta^3_j - \delta^{3i}\delta^2_j) \quad (39)$$

¹A meno di proprietà globali (o topologiche) come esemplificato dal caso delle rappresentazioni spinoriali a due valori che, come vedremo più avanti, sono vere rappresentazioni (cioè ad un solo valore) del gruppo $SU(2)$.

e similmente per T^{31} e T^{12} . Si ottiene quindi l'espressione

$$(T^{kl})^i_j = -i(\delta^{ki}\delta^l_j - \delta^{li}\delta^k_j) \quad (40)$$

L'algebra di Lie (41) può essere riscritta in questa base e diventa

$$[T^{kl}, T^{ij}] = -i\delta^{li}T^{kj} + i\delta^{ki}T^{lj} + i\delta^{lj}T^{ki} - i\delta^{kj}T^{li}. \quad (41)$$

Si noti in questa relazione la presenza della metrica euclidea (inversa) δ^{ij} . Scritta in questa forma l'algebra di Lie è valida per il generico gruppo $SO(n)$, se naturalmente gli indici assumono tutti i valori da 1 ad n .

3.3 Algebra di Lie del gruppo $SU(2)$

Analizziamo ora il gruppo $SU(2)$, il gruppo delle matrici unitarie 2×2 con determinante uguale ad 1

$$SU(2) = \{g, \text{matrici complesse } 2 \times 2 \mid g^\dagger = g^{-1}, \det g = 1\} \quad (42)$$

Possiamo scrivere matrici che differiscono infinitesimamente dalla matrice unità nel seguente modo

$$g = 1 + iT \quad T^i_j \ll 1. \quad (43)$$

Ora la richiesta che $g^\dagger = 1 - iT^\dagger$ coincida con $g^{-1} = 1 - iT$ implica che le matrici T debbano essere hermitiane

$$T^\dagger = T \quad (44)$$

mentre la richiesta di determinante unitario, $\det g = 1 + i \operatorname{tr} T = 1$, implica che queste matrici siano a traccia nulla

$$\operatorname{tr} T = 0. \quad (45)$$

Una base di matrici 2×2 hermitiane a traccia nulla sono date dalle matrici di Pauli

$$\sigma^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (46)$$

per cui possiamo esprimere una arbitraria matrice T come combinazione lineare delle σ^a

$$T = \theta_a \frac{\sigma^a}{2} \equiv \theta_a T^a \quad a = 1, 2, 3 \quad (47)$$

La normalizzazione è stata scelta per comodità. Infatti con questa normalizzazione i generatori infinitesimi $T^a = \frac{\sigma^a}{2}$ soddisfano alla seguente algebra di Lie di $SU(2)$

$$[T^a, T^b] = i\epsilon^{abc}T^c \quad (48)$$

che coincide con l'algebra di Lie di $SO(3)$. Questo dimostra che localmente sono lo stesso gruppo, anche se globalmente ci sono differenze: usando il linguaggio della geometria differenziale si può dire che il gruppo $SU(2)$ è un ricoprimento del gruppo $SO(3)$. Vediamo questa differenza esplicitamente nella rappresentazione definita (o fondamentale) di $SU(2)$ (la rappresentazione "2" o di spin $\frac{1}{2}$). Una rotazione finita è ottenuta esponenziando trasformazioni

infinitesime per renderle finite $g(\theta_a) = \exp(i\theta_a \frac{\sigma^3}{2})$. Una rotazione finita attorno all'asse z è ottenuta scegliendo $\theta_3 = \theta$ e $\theta_1 = \theta_2 = 0$, ed indicandola con $g_3(\theta)$ si ha

$$\begin{aligned}
g_3(\theta) &= e^{i\theta \frac{\sigma^3}{2}} \\
&= 1 + i\theta \frac{\sigma^3}{2} + \frac{1}{2!} \left(i\theta \frac{\sigma^3}{2}\right)^2 + \frac{1}{3!} \left(i\theta \frac{\sigma^3}{2}\right)^3 + \frac{1}{4!} \left(i\theta \frac{\sigma^3}{2}\right)^4 + \dots \\
&= 1 + i \left(\frac{\theta}{2}\right) \sigma^3 - \frac{1}{2!} \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 - i \frac{1}{3!} \left(\frac{\theta}{2}\right)^3 \sigma^3 + \frac{1}{4!} \left(\frac{\theta}{2}\right)^4 \\
&= \left(1 - \frac{1}{2!} \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 + \frac{1}{4!} \left(\frac{\theta}{2}\right)^4 + \dots\right) + i\sigma^3 \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{3!} \left(\frac{\theta}{2}\right)^3 + \dots\right) \\
&= \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + i\sigma^3 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)
\end{aligned} \tag{49}$$

e ponendo $\theta = 2\pi$ otteniamo la trasformazione

$$g_3(\theta = 2\pi) = -1 \tag{50}$$

che non coincide con l'identità di $SU(2)$. La trasformazione identità si ottiene solo per $\theta = 4\pi$. Questa è la ben nota proprietà di rotazione di uno spinore. Come è noto dalla meccanica quantistica, tutte le rappresentazioni unitarie irriducibili di $SU(2)$ sono caratterizzate da un numero quantico j che può essere intero o semintero, e sono di dimensione $2j + 1$.

3.4 Struttura di un generico gruppo di Lie

Usando l'intuizione sviluppata nelle discussioni precedenti, possiamo ora descrivere velocemente la struttura generale di un gruppo di Lie non abeliano. Un elemento del gruppo non abeliano G connesso all'identità può essere parametrizzato con le coordinate α_a collegate ai corrispondenti generatori T^a . Elenchiamo alcune definizioni e proprietà generali

- (i) $g = \exp(i\alpha_a T^a) \in G \quad a = 1, \dots, \dim G$
- (ii) $[T^a, T^b] = i f^ab{}_c T^c$
- (iii) $\text{tr}(T^a T^b) = \frac{1}{2} \gamma^{ab} \quad (\text{nella rappresentazione fondamentale})$
- (iv) $[[T^a, T^b], T^c] + [[T^b, T^c], T^a] + [[T^c, T^a], T^b] = 0$
 $\Rightarrow f^{ab}{}_d f^{dc}{}_e + f^{bc}{}_d f^{da}{}_e + f^{ca}{}_d f^{db}{}_e = 0$
- (v) $f^{abc} = f^{ab}{}_d \gamma^{dc} \quad \text{tensore completamente antisimmetrico.}$

La (i) descrive la parametrizzazione esponenziale di un elemento arbitrario del gruppo che sia connesso all'identità. L'indice a assume tanti valori quante le dimensioni del gruppo. Un elemento del gruppo è quindi parametrizzato dai parametri α_a con $a = 1, \dots, \dim G$.

La (ii) corrisponde all'algebra di Lie soddisfatta dai generatori infinitesimi T^a . Le costanti $f^{ab}{}_c$ sono dette costanti di struttura e caratterizzano il gruppo G .

La (iii) identifica una metrica γ^{ab} detta "metrica di Killing". Tale metrica è definita positiva solo per gruppi di Lie compatti, come ad esempio $SU(N)$ o $SO(N)$.

Le (iv) sono le cosiddette "identità di Jacobi" che possono essere sfruttate per costruire la rappresentazione aggiunta dell'algebra di Lie e del relativo gruppo. Infatti, denotando con $(T^a_{(A)})^b{}_c$ gli

elementi di matrice dei generatori della rappresentazione aggiunta $T_{(A)}^a$, si ha $(T_{(A)}^a)^b{}_c = -if^{abc}$. Le identità di Jacobi permettono di provare che questa è una rappresentazione (di dimensioni uguali alle dimensioni del gruppo, poiché $a, b, c = 1, 2, \dots, \dim G$).

In (v) si è usata la metrica di Killing per alzare un indice nelle costanti di struttura. Le f^{abc} sono completamente antisimmetriche in tutti gli indici: questa proprietà si può dedurre prendendo la traccia delle identità di Jacobi del punto (iv) ed usando la (ii) e la (iii). L'antisimmetria negli indici a e b è ovvia per la (ii).

A questo punto è utile citare la formula di Baker-Campbell-Hausdorff per il prodotto degli esponenziali di due operatori lineari A e B

$$e^A e^B = e^{A+B+\frac{1}{2}[A,B]+\frac{1}{12}[A,[A,B]]-\frac{1}{12}[B,[A,B]]+\dots} \quad (51)$$

dove i puntini indicano i termini successivi, che comunque sono sempre esprimibili tramite commutatori. Questa formula mostra che la conoscenza dell'algebra di Lie è sufficiente per ricostruire il prodotto (in generale non-commutativo) del corrispondente gruppo di Lie. Infine concludiamo con l'enunciato di un teorema che non dimostremo:

Teorema: Le rappresentazioni unitarie dei gruppi compatti sono finito dimensionali.

Questo teorema si applica a gruppi compatti quali $SO(N)$ ed $SU(N)$. Invece per gruppi non compatti, quali il gruppo di Lorentz $SO(3, 1)$ ed il gruppo di Poincaré $ISO(3, 1)$, questo teorema non si applica, ma vale l'opposto: le rappresentazioni unitarie sono infinito dimensionali.