

Apuntes de campos cuánticos

Asignatura

Apuntes de campos cuánticos

Profesor Antonio Dobado

21 de octubre de 2024

An Awesome Publisher

Disclaimer

En estos apuntes algunos los he sacado de libros que ha seguido Dobado pero quitando las partes que no usa y otros son de dobado haciendo freestyle en clase.

No copyright

© This book is released into the public domain using the CC0 code. To the extent possible under law, I waive all copyright and related or neighbouring rights to this work.

To view a copy of the CC0 code, visit:

<http://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>

Colophon

This document was typeset with the help of KOMA-Script and L^AT_EX using the kaobook class.

The source code of this book is available at:

<https://github.com/fmarotta/kaobook>

(You are welcome to contribute!)

Publisher

2024 by An Awesome Publisher

Índice general

Índice general	iii
PRELIMINARES	1
1 Álgebra	3
1.1 Álgebra de Lie. Grupo de Lie	3
1.2 Grupo de Lorentz	6
1.2.1 Álgebra de Lorentz	8
1.3 Representación tensorial	10
1.4 Representación espinorial	11
1.4.1 No relativista	11
1.4.2 Relativista	13
Representaciones de 1 dimensión	14
Representaciones de 2 dimensiones	14
Espinores de Weyl	14
Espinores de Dirac	15
1.5 Grupo de Poincare	15
1.5.1 Representación en estados de una partícula	16
Representación masiva	17
Representación no masiva	18
CAMPOS CLÁSICOS	21
2 Ecuaciones de Klein-Gordon y de Dirac	23
2.1 Ecuación de Klein Gordon	23
2.2 Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	23
2.3 Ecuación de Dirac	23
2.3.1 Partículas cargadas en un campo electromagnético	25
2.4 El límite no relativista de la ecuación de Dirac	25
2.5 Soluciones a la ecuación de Dirac	25
2.5.1 Ondas con energía positiva	25
2.5.2 Ondas con energía negativa	28
2.5.3 Interpretación física. Mar de Dirac	29
2.6 Fermiones quirales	30
2.6.1 Proyectores de Weyl	30
3 Teoría clásica de campos	31
3.1 Campos clásicos relativistas	31
3.2 Dinámica de los campos clásicos	31
3.2.1 Formalismo Lagrangiano	31
3.2.2 Formalismo Hamiltoniano	31
3.2.3 Ejemplos	32
3.3 Teorema de Noether	32
3.4 Transformaciones de simetría espacio-temporales	32
3.4.1 Traslaciones	32
3.4.2 Transformaciones de Lorentz	32

CAMPOS CUÁNTICOS	33
4 Cuantización canónica del campo escalar libre	35
4.1 Cuantización canónica del campo bosónico libre	35
4.1.1 Cuantización en teoría de campos	36
4.1.2 Solución general de la ecuación de Klein-Gordon	37
4.1.3 Soluciones en el formalismo de campo cuántico	38
Resumen de los operadores de campo $\hat{\phi}(\vec{x}, t)$	38
4.1.4 Espacio de Fock	39
Operadores en el espacio de Fock	41
Operadore Energía	41
Operador momento lineal	42
Operador campo	43
4.2 Propagador del campo escalar libre	43
5 Cuantización canónica del campo fermiónico libre	45
5.1 Ecuación de Klein Gordon	45
5.2 Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	45
5.3 Ecuación de Dirac	45
5.4 El límite no relativista de la ecuación de Dirac	45
5.5 Soluciones a la ecuación de Dirac	45
5.5.1 Ondas con energía positiva	45
5.5.2 Ondas con energía negativa	45
5.6 Fermiones quirales	45
6 Procesos de interacción: Matriz S, secciones eficaces y vidas medias	47
6.1 Ecuación de Klein Gordon	47
6.2 Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	47
6.3 Ecuación de Dirac	47
6.4 El límite no relativista de la ecuación de Dirac	47
6.5 Soluciones a la ecuación de Dirac	47
6.5.1 Ondas con energía positiva	47
6.5.2 Ondas con energía negativa	47
6.6 Fermiones quirales	47
7 Cuantización del campo escalar libre	49
7.1 Ecuación de Klein Gordon	49
7.2 Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	49
7.3 Ecuación de Dirac	49
7.4 El límite no relativista de la ecuación de Dirac	49
7.5 Soluciones a la ecuación de Dirac	49
7.5.1 Ondas con energía positiva	49
7.5.2 Ondas con energía negativa	49
7.6 Fermiones quirales	49
8 Electrodinámica cuántica	51
8.1 Ecuación de Klein Gordon	51
8.2 Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	51
8.3 Ecuación de Dirac	51
8.4 El límite no relativista de la ecuación de Dirac	51
8.5 Soluciones a la ecuación de Dirac	51
8.5.1 Ondas con energía positiva	51

8.5.2 Ondas con energía negativa	51
8.6 Fermiones quirales	51
Bibliography	53

Índice de figuras

2.1	Mar de Dirac	29
2.2	Antipartículas	29

Índice de cuadros

PRELIMINARES

Todo esto lo he sacado del [1]

1.1. Algebra de Lie. Grupo de Lie

Los grupos de Lie desempeñan un papel fundamental en física, y en esta sección recordamos algunas de sus principales propiedades. En las secciones siguientes aplicaremos estos conceptos al estudio de los grupos de Lorentz y Poincaré.

Un grupo de Lie es un grupo cuyos elementos g dependen de forma continua y diferenciable de un conjunto de parámetros reales θ^a , $a = 1, \dots, N$. Por tanto, un grupo de Lie es al mismo tiempo un grupo y una variedad diferenciable. Escribimos un elemento genérico como $g(\theta)$ y sin pérdida de generalidad elegimos las coordenadas θ^a tales que el elemento identidad e del grupo corresponde a $\theta^a = 0$, es decir $g(0) = e$.

Una representación (lineal) R de un grupo es una operación que asigna a un elemento genérico y abstracto g de un grupo un operador lineal $D_R(g)$ definido sobre un espacio lineal,

$$g \mapsto D_R(g) \quad (1.1)$$

con las propiedades de que

- $D_R(e) = 1$, donde 1 es el operador identidad,
- $D_R(g_1) D_R(g_2) = D_R(g_1 g_2)$, de modo que el mapeo preserve la estructura de grupo.

El espacio sobre el que actúan los operadores D_R se denomina base de la representación R . Un ejemplo típico de representación es una representación matricial. En este caso la base es un espacio vectorial de dimensión finita n , y un elemento de grupo abstracto g se representa por una matriz $n \times n$ $(D_R(g))^i_j$, con $i, j = 1, \dots, n$. La dimensión de la representación se define como la dimensión n del espacio base. Escribiendo un elemento genérico del espacio base como (ϕ^1, \dots, ϕ^n) , un elemento de grupo g induce una transformación del espacio vectorial

$$\phi^i \rightarrow (D_R(g))^i_j \phi^j \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) nos permite atribuir un significado físico a un elemento de grupo: antes de introducir el concepto de representación, un elemento de grupo g es sólo un objeto matemático abstracto, definido por sus reglas de composición con los demás miembros del grupo. En cambio, elegir una representación específica nos permite interpretar g como una transformación en un espacio determinado; por ejemplo, tomando como grupo $SO(3)$ y como espacio base los vectores espaciales \mathbf{v} , un elemento $g \in SO(3)$ puede interpretarse físicamente como una rotación en un

1.1	Algebra de Lie. Grupo de Lie	3
1.2	Grupo de Lorentz	6
1.2.1	Algebra de Lorentz	8
1.3	Representación tensorial	10
1.4	Representación espinorial	11
1.4.1	No relativista	11
1.4.2	Relativista	13
1.5	Grupo de Poincare	15
1.5.1	Representación en estados de una partícula	16

espacio tridimensional. Una representación R se llama reducible si tiene un subespacio invariante, es decir, si la acción de cualquier $D_R(g)$ sobre los vectores del subespacio da otro vector del subespacio. Por el contrario, una representación sin subespacio invariante se llama irreducible. Una representación es completamente reducible si, para todos los elementos g , las matrices $D_R(g)$ se pueden escribir, con una elección adecuada de base, en forma diagonal de bloque. En otras palabras, en una representación completamente reducible los vectores base ϕ^i pueden elegirse de modo que se dividan en subconjuntos que no se mezclen entre sí en virtud de la ec. (2.2). Esto significa que una representación completamente reducible puede escribirse, con una elección adecuada de la base, como la suma directa de representaciones irreducibles. Dos representaciones R, R^{prime} se llaman equivalentes si existe una matriz S , independiente de g , tal que para todo g tenemos $D_R(g) = S^{-1}D_{R'}(g)S$. Comparando con la ec. (2.2), vemos que las representaciones equivalentes corresponden a un cambio de base en el espacio vectorial abarcado por el ϕ^i . Cuando cambiamos la representación, en general la forma explícita e incluso las dimensiones de las matrices $D_R(g)$ cambiarán. Sin embargo, hay una propiedad importante de un grupo de Lie que es independiente de la representación. Se trata de su álgebra de Lie, que presentamos a continuación. Por el supuesto de suavidad, para θ^a infinitesimal, es decir, en la vecindad del elemento identidad, tenemos

$$D_R(\theta) \simeq 1 + i\theta_a T_R^a \quad (2.3)$$

con

$$T_R^a \equiv -i \left. \frac{\partial D_R}{\partial \theta_a} \right|_{\theta=0} \quad (2.4)$$

Los T_R^a se llaman los generadores del grupo en la representación R . Se puede demostrar que, con una elección adecuada de la parametrización alejada de la identidad, los elementos genéricos del grupo $g(\theta)$ siempre se pueden representar por

$$D_R(g(\theta)) = e^{i\theta_a T_R^a} \quad (2.5)$$

cuya forma infinitesimal reproduce la ec. (2.3). El factor i en la definición (2.4) se elige de modo que, si en la representación R los generadores son hermitianos, entonces las matrices $D_R(g)$ son unitarias. En este caso R es una representación unitaria.

Dadas dos matrices $D_R(g_1) = \exp(i\alpha_a T_R^a)$ y $D_R(g_2) = \exp(i\beta_a T_R^a)$, su producto es igual a $D_R(g_1 g_2)$ y por lo tanto debe ser de la forma $\exp(i\delta_a T_R^a)$, para algunos $\delta_a(\alpha, \beta)$,

$$e^{i\alpha_a T_R^a} e^{i\beta_a T_R^a} = e^{i\delta_a T_R^a} \quad (2.6)$$

Obsérvese que T_R^a es una matriz. Si A, B son matrices, en general $e^A e^B \neq e^{A+B}$, por lo que en general $\delta_a \neq \alpha_a + \beta_a$. Tomando el logaritmo y expandiendo hasta segundo orden en α y β obtenemos

$$\begin{aligned}
i\delta_a T_R^a &= \log \left\{ \left[1 + i\alpha_a T_R^a + \frac{1}{2} (i\alpha_a T_R^a)^2 \right] \left[1 + i\beta_a T_R^a + \frac{1}{2} (i\beta_a T_R^a)^2 \right] \right\} \\
&= \log \left[1 + i(\alpha_a + \beta_a) T_R^a - \frac{1}{2} (\alpha_a T_R^a)^2 - \frac{1}{2} (\beta_a T_R^a)^2 - \alpha_a \beta_b T_R^a T_R^b \right]
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Expandiendo el logaritmo, $\log(1+x) \simeq x - x^2/2$, y teniendo en cuenta que los T_R^a no conmutan obtenemos

$$\alpha_a \beta_b [T_R^a, T_R^b] = i\gamma_c(\alpha, \beta) T_R^c \tag{2.8}$$

con $\gamma_c(\alpha, \beta) = -2(\delta_c(\alpha, \beta) - \alpha_c - \beta_c)$. Dado que esto debe ser cierto para todos los α y β , γ_c debe ser lineal en α_a y en β_a , por lo que la relación entre γ y α, β debe ser de la forma general $\gamma_c = \alpha_a \beta_b f^{ab}_c$ para algunas constantes f^{ab}_c . Por lo tanto

$$[T^a, T^b] = i f^{ab}_c T^c \tag{2.9}$$

Se denomina álgebra de Lie del grupo considerado. Aquí hay que señalar dos puntos importantes. La primera es que, aunque la forma explícita de los generadores T^a depende de la representación utilizada, las constantes de estructura f^{ab}_c son independientes de la representación. De hecho, si f^{ab}_c dependiera de la representación, γ^a y por tanto δ^a también dependería de R , por lo que sería de la forma $\delta_R^a(\alpha, \beta)$. Entonces de la ec. (2.6) concluiríamos que el producto de los elementos del grupo g_1 y g_2 da un resultado que depende de la representación. Esto es imposible, ya que el resultado de la multiplicación de dos elementos de grupo abstracto $g_1 g_2$ es una propiedad del grupo, definida a nivel de grupo abstracto sin ninguna referencia a las representaciones. Por lo tanto, concluimos que f^{ab}_c son independientes de la representación.² El segundo punto importante es que esta ecuación se ha derivado requiriendo la consistencia de la ec. (2.6) hasta el segundo orden; sin embargo, una vez satisfecho esto, se puede demostrar que no surge ningún otro requisito de la expansión en órdenes superiores.

Así, las constantes de estructura definen el álgebra de Lie, y el problema de encontrar todas las representaciones matriciales de un álgebra de Lie equivale al problema algebraico de encontrar todas las posibles soluciones matriciales T_R^a de la ec. (2.9). En realidad, los generadores de un grupo de Lie pueden definirse incluso sin hacer referencia a una representación concreta. Se aprovecha el hecho de que un grupo de Lie es también un múltiple, parametrizado por las coordenadas θ^a y se definen los generadores como una base del espacio tangente al origen. A continuación, se demuestra que su conmutador (definido como un soporte de Lie) es de nuevo un vector tangente, y por lo tanto debe ser una combinación lineal del vector base. En este enfoque nunca se menciona una representación específica, por lo que resulta obvio que las constantes de estructura son independientes de la representación. Véase, por ejemplo, Nakahara (1990), apartado 5.6.

Un grupo se denomina abeliano si todos sus elementos conmutan entre sí; en caso contrario, el grupo no es abeliano. Para un grupo de Lie

abeliano las constantes de estructura desaparecen, ya que en este caso en la ec. (2.6) tenemos $\delta_a = \alpha_a + \beta_a$. La teoría de representación de las álgebras de Lie abelianas es muy sencilla: cualquier álgebra de Lie abeliana d -dimensional es isomorfa a la suma directa de d álgebras de Lie abelianas unidimensionales. En otras palabras, todas las representaciones irreducibles de grupos abelianos son unidimensionales. La parte no trivial de la teoría de representaciones de las álgebras de Lie está relacionada con la estructura no abeliana. En el estudio de las representaciones, un papel importante lo desempeñan los operadores de Casimir. Se trata de operadores contruidos a partir de los T^a que conmutan con todos los T^a . En cada representación irreducible, los operadores de Casimir son proporcionales a la matriz identidad, y la constante de proporcionalidad etiqueta la representación. Por ejemplo, el álgebra del momento angular es $[J^i, J^j] = i\epsilon^{ijk}J^k$ y el operador de Casimir es J^2 . En una representación irreducible, J^2 es igual a $j(j+1)$ veces la matriz identidad, con $j = 0, \frac{1}{2}, 1, \dots$

Un grupo de Lie que, considerado como colector, es un colector compacto se denomina grupo compacto. Las rotaciones espaciales son un ejemplo de grupo de Lie compacto, mientras que veremos que el grupo de Lorentz es no compacto. Un teorema afirma que los grupos no compactos no tienen representaciones unitarias de dimensión finita, excepto las representaciones en las que los generadores no compactos se representan trivialmente, es decir, como cero. La relevancia física de este teorema se debe a que en una representación unitaria los generadores son operadores hermitianos y, según las reglas de la mecánica cuántica, sólo los operadores hermitianos pueden identificarse con observables. Si un grupo no es compacto, para identificar sus generadores con observables físicos necesitamos una representación de dimensión infinita. Veremos en este capítulo que los grupos de Lorentz y Poincaré son no compactos, y que las representaciones de dimensión infinita se obtienen introduciendo el espacio de Hilbert de estados de una partícula.

1.2. Grupo de Lorentz

El grupo de Lorentz se define como el grupo de transformaciones lineales de coordenadas,

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = \Lambda^\mu_\nu x^\nu \quad (2.10)$$

que dejan invariante la cantidad

$$\eta_{\mu\nu} x^\mu x^\nu = t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (2.11)$$

El grupo de transformaciones de un espacio con coordenadas $(y_1, \dots, y_m, x_1, \dots, x_n)$, que deja invariante la forma cuadrática $(y_1^2 + \dots + y_m^2) - (x_1^2 + \dots + x_n^2)$ se llama grupo ortogonal $O(n, m)$, por lo que el grupo de Lorentz es $O(3, 1)$. La condición que debe satisfacer la matriz Λ para dejar invariante la forma cuadrática (2.11) es

$$\eta_{\mu\nu} x'^\mu x'^\nu = \eta_{\mu\nu} \left(\Lambda^\mu_\rho x^\rho \right) \left(\Lambda^\nu_\sigma x^\sigma \right) = \eta_{\rho\sigma} x^\rho x^\sigma. \quad (2.12)$$

Dado que esto debe mantenerse para x genérico, debemos tener

$$\eta_{\rho\sigma} = \eta_{\mu\nu} \Lambda_{\rho}^{\mu} \Lambda_{\sigma}^{\nu} \quad (2.13)$$

En notación matricial, esto se puede reescribir como $\eta = \Lambda^T \eta \Lambda$. Tomando el determinante de ambos lados, tenemos $(\det \Lambda)^2 = 1$ o $\det \Lambda = \pm 1$. Transformaciones con *operatornamedet* $\Lambda = -1$ pueden escribirse siempre como el producto de una transformación con $\det \Lambda = 1$ y de una transformación discreta que invierte el signo de un número impar de coordenadas, por ejemplo una transformación de paridad $(t, x, y, z) \rightarrow (t, -x, -y, -z)$, o una reflexión alrededor de un único eje espacial $(t, x, y, z) \rightarrow (t, -x, y, z)$, o una transformación de inversión temporal, $(t, x, y, z) \rightarrow (-t, x, y, z)$. Transformaciones con $\det \Lambda = +1$ se llaman transformaciones propias de Lorentz. El subgrupo de $O(3, 1)$ con $\det \Lambda = 1$ se denomina $SO(3, 1)$.

Escribiendo explícitamente la componente 00 de la ec. (2.13) encontramos

$$1 = (\Lambda_0^0)^2 - \sum_{i=1}^3 (\Lambda_0^i)^2 \quad (2.14)$$

lo que implica que $(\Lambda_0^0)^2 \geq 1$. Por tanto, el grupo Lorentz propio tiene dos componentes desconectadas, una con $\Lambda_0^0 \geq 1$ y otra con $\Lambda_0^0 \leq -1$, denominadas ortocrona y no ortocrona, respectivamente. Cualquier transformación no ortocrona puede escribirse como el producto de una transformación ortocrona y una inversión discreta del tipo $(t, x, y, z) \rightarrow (-t, -x, -y, -z)$, o $(t, x, y, z) \rightarrow (-t, -x, y, z)$, etc. Es conveniente factorizar todas estas transformaciones discretas y redefinir el grupo de Lorentz como el componente de $SO(3, 1)$ para el que $\Lambda_0^0 \geq 1$.

Si consideramos una transformación infinitesimal

$$\Lambda_{\nu}^{\mu} = \delta_{\nu}^{\mu} + \omega^{\mu}_{\nu} \quad (2.15)$$

la ecuación (2.13) nos da

$$\omega_{\mu\nu} = -\omega_{\nu\mu} \quad (2.16)$$

Una matriz antisimétrica de 4×4 tiene seis elementos independientes, por lo que el grupo de Lorentz tiene seis parámetros. Estos se identifican fácilmente: en primer lugar tenemos las transformaciones que dejan t invariante. Se trata simplemente del grupo de rotaciones $SO(3)$, generado por las tres rotaciones en los planos (x, y) , (x, z) e (y, z) . Además, tenemos tres transformaciones en los planos (t, x) , (t, y) y (t, z) que dejan invariante $t^2 - x^2$, etc. Una transformación que deja $t^2 - x^2$ invariante se llama un impulso a lo largo del eje x , y se puede escribir como

$$t \rightarrow \gamma(t + vx), \quad x \rightarrow \gamma(x + vt) \quad (2.17)$$

con $\gamma = (1 - v^2)^{-1/2}$ y $-1 < v < 1$. Su significado físico se entiende mirando el límite v pequeño, donde se reduce a la transformación de velocidad de la mecánica clásica. Es, por tanto, la generalización relativista

de una transformación de velocidad. Los seis parámetros independientes del grupo de Lorentz pueden tomarse, por tanto, como los tres ángulos de rotación y las tres componentes de la velocidad \mathbf{v} .

Como $-1 < v < 1$, podemos escribir $v = \tanh \eta$, con $-\infty < \eta < +\infty$. Entonces $\gamma = \cosh \eta$ y la ec. (2.17) puede escribirse como una rotación hiperbólica,

$$\begin{aligned} t &\rightarrow (\cosh \eta)t + (\sinh \eta)x \\ x &\rightarrow (\sinh \eta)t + (\cosh \eta)x \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \log\left(\frac{1+v}{1-v}\right)$$

La variable η se denomina rapidez. Vemos que el grupo de Lorentz está parametrizado de forma continua y diferenciable por seis parámetros, por lo que es un grupo de Lie. Sin embargo, en el grupo de Lorentz uno de los parámetros es el módulo de la velocidad de aceleración, $|\mathbf{v}|$, que abarca el intervalo no compacto $0 \leq |\mathbf{v}| < 1$. Por lo tanto, el grupo de Lorentz es no compacto.

1.2.1. Algebra de Lorentz

Hemos visto que el grupo de Lorentz tiene seis parámetros, los seis elementos independientes de la matriz antisimétrica $\omega_{\mu\nu}$, a los que corresponden seis generadores. Es conveniente etiquetar los generadores como $J^{\mu\nu}$, con un par de índices antisimétricos (μ, ν) , de modo que $J^{\mu\nu} = -J^{\nu\mu}$. Por tanto, un elemento genérico Λ del grupo de Lorentz se escribe como

$$\Lambda = e^{-\frac{i}{2}\omega_{\mu\nu}J^{\mu\nu}} \quad (2.19)$$

El factor $1/2$ en el exponente compensa el hecho de que estamos sumando sobre todos los μ, ν en lugar de sobre los pares independientes con $\mu < \nu$, y por lo tanto cada generador se cuenta dos veces. Por definición un conjunto de objetos ϕ^i , con $i = 1, \dots, n$, se transforma en una representación R de dimensión n del grupo de Lorentz si, bajo una transformación de Lorentz,

$$\phi^i \rightarrow \left[e^{-\frac{i}{2}\omega_{\mu\nu}J_R^{\mu\nu}} \right]_j^i \phi^j \quad (2.20)$$

donde $\exp \{-(i/2)\omega_{\mu\nu}J_R^{\mu\nu}\}$ es una representación matricial de dimensión n del elemento abstracto (2.19) del grupo de Lorentz; $J_R^{\mu\nu}$ son los generadores de Lorentz en la representación R , y son matrices $n \times n$. Bajo una transformación infinitesimal con parámetros infinitesimales $\omega_{\mu\nu}$, la variación de ϕ^i es

$$\delta\phi^i = -\frac{i}{2}\omega_{\mu\nu} (J_R^{\mu\nu})^i_j \phi^j \quad (2.21)$$

En $(J_R^{\mu\nu})^i_j$ el par de índices μ, ν identifican el generador mientras que los índices i, j son los índices matriciales de la representación que estamos considerando. Todas las magnitudes físicas pueden clasificarse según sus propiedades de transformación bajo el grupo de Lorentz. Un escalar es una magnitud invariante bajo la transformación. Un escalar Lorentz típico en física de partículas es la masa en reposo de una partícula. Un

cuatro-vector contravariante V^μ se define como un objeto que satisface la ley de transformación

$$V^\mu \rightarrow \Lambda^\mu_\nu V^\nu \quad (2.22)$$

con Λ^μ_ν definido por la condición (2.13). Un cuatro vector covariante V_μ se transforma como $V_\mu \rightarrow \Lambda_\mu^\nu V_\nu$, con $\Lambda_\mu^\nu = \eta_{\mu\rho} \eta^{\nu\sigma} \Lambda^\rho_\sigma$. Se comprueba inmediatamente que, si V^μ es un cuatro vector contravariante, entonces $V_\mu \equiv \eta_{\mu\nu} V^\nu$ es un cuatro vector covariante. Nos referimos genéricamente a los cuatro vectores covariantes y contravariantes simplemente como cuatro vectores. Las coordenadas espacio-temporales x^{μ} son el ejemplo más sencillo de cuatro vectores. Otro ejemplo particularmente importante viene dado por el cuatromomento $p^\mu = (E, \mathbf{p})$.

La forma explícita de los generadores $(J_R^{\mu\nu})^i_j$ como matrices $n \times n$ depende de la representación particular que estemos considerando. Para un escalar ϕ , el índice i toma un solo valor, por lo que es una representación unidimensional, y $(J^{\mu\nu})^i_j$ es una matriz 1×1 , es decir, un número, para cada par dado (μ, ν) . Pero de hecho, por definición, en un escalar una transformación de Lorentz es la transformación identidad, por lo que $\delta\phi = 0$ y $J^{\mu\nu} = 0$. Una representación en la que todos los generadores son iguales a cero es trivialmente una solución de la ec. (2.9), para cualquier grupo de Lie, por lo que se llama la representación trivial.

La representación de cuatro vectores es más interesante. En este caso i, j son a su vez índices de Lorentz, por lo que cada generador $J^{\mu\nu}$ está representado por una matriz de 4×4 $(J^{\mu\nu})^\rho_\sigma$. La forma explícita de esta matriz es

$$(J^{\mu\nu})^\rho_\sigma = i (\eta^{\mu\rho} \delta^\nu_\sigma - \eta^{\nu\rho} \delta^\mu_\sigma) \quad (2.23)$$

Esto puede demostrarse observando que, a partir de las ecs. (2.22) y (2.15), la variación de un cuatro vector V^μ bajo una transformación infinitesimal de Lorentz es $\delta V^\mu = \omega^\mu_\nu V^\nu$, que puede reescribirse como

$$\delta V^\rho = -\frac{i}{2} \omega_{\mu\nu} (J^{\mu\nu})^\rho_\sigma V^\sigma \quad (2.24)$$

con $(J^{\mu\nu})^\rho_\sigma$ dada por la ec. (2.23) (esta solución para $J^{\mu\nu}$ es única porque requerimos la antisimetría bajo $\mu \leftrightarrow \nu$). Esta representación es irreducible ya que una transformación de Lorentz genérica mezcla las cuatro componentes de un cuatro-vector y por tanto no hay cambio de base que nos permita escribir $(J^{\mu\nu})^\rho_\sigma$ en forma diagonal de bloque. Ahora podemos utilizar la expresión explícita (2.23) para calcular los conmutadores, y encontramos

$$[J^{\mu\nu}, J^{\rho\sigma}] = i (\eta^{\nu\rho} J^{\mu\sigma} - \eta^{\mu\rho} J^{\nu\sigma} - \eta^{\nu\sigma} J^{\mu\rho} + \eta^{\mu\sigma} J^{\nu\rho}) \quad (2.25)$$

Esta es el álgebra de Lie de $SO(3, 1)$. Es conveniente reordenar los seis componentes de $J^{\mu\nu}$ en dos vectores espaciales,

$$J^i = \frac{1}{2} \epsilon^{ijk} J^{jk}, \quad K^i = J^{i0} \quad (2.26)$$

En términos de J^i, K^i el álgebra de Lie del grupo de Lorentz (2.25) se

convierte en

$$[J^i, J^j] = i\epsilon^{ijk} J^k \quad (2.27)$$

$$[J^i, K^j] = i\epsilon^{ijk} K^k \quad (2.28)$$

$$[K^i, K^j] = -i\epsilon^{ijk} J^k \quad (2.29)$$

La ecuación (2.27) es el álgebra de Lie de $SU(2)$ y esto muestra que J^i , definido en la ec. (2.26), es el momento angular. En cambio la ec. (2.28) expresa el hecho de que \mathbf{K} es un vector espacial ³ Este es el punto de vista "activo". Alternativamente, podemos decir que mantenemos P fijo y rotamos el marco de referencia en el sentido de las agujas del reloj; este es el punto de vista "pasivo". También introducimos las definiciones $\theta^i = (1/2)\epsilon^{ijk}\omega^{jk}$ y $\eta^i = \omega^{i0}$. Entonces

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\omega_{\mu\nu}J^{\mu\nu} &= \omega_{12}J^{12} + \omega_{13}J^{13} + \omega_{23}J^{23} + \sum_{i=1}^3 \omega_{i0}J^{i0} \\ &= \boldsymbol{\theta} \cdot \mathbf{J} - \boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{K} \end{aligned} \quad (2.30)$$

donde utilizamos $\omega_{i0} = -\omega^{i0} = -\eta^i$ mientras que $\omega_{12} = \omega^{12} = \theta^3$, etc. Entonces una transformación de Lorentz puede escribirse como

$$\Lambda = \exp\{-i\boldsymbol{\theta} \cdot \mathbf{J} + i\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{K}\} \quad (2.31)$$

Con nuestras definiciones $\theta^i = +(1/2)\epsilon^{ijk}\omega^{jk}$ y $\eta^i = +\omega^{i0}$ una rotación por un ángulo $\theta > 0$ en el plano (x, y) gira en sentido contrario a las agujas del reloj la posición de un punto P respecto a un sistema de referencia fijo, ³ mientras que al realizar un impulso de velocidad \mathbf{v} sobre una partícula en reposo obtenemos una partícula con velocidad $+\mathbf{v}$. Para comprobar estos signos, podemos considerar transformaciones infinitesimales, y utilizar la forma explícita (2.23) de los generadores. Realizando una rotación por un ángulo θ alrededor del eje z , las ecs. (2.31) y (2.23) dan

$$\delta x^\mu = -i\theta (J^{12})^\mu{}_\nu x^\nu = \theta (\eta^{1\mu}\delta_\nu^2 - \eta^{2\mu}\delta_\nu^1) x^\nu \quad (2.32)$$

y por tanto $\delta x = -\theta y$ y $\delta y = +\theta x$, lo que corresponde a una rotación en sentido contrario a las agujas del reloj. Análogamente, realizando un impulso a lo largo del eje x ,

$$\delta x^\mu = +i\eta (J^{10})^\mu{}_\nu x^\nu = -\eta (\eta^{1\mu}\delta_\nu^0 - \eta^{0\mu}\delta_\nu^1) x^\nu \quad (2.33)$$

y por tanto $\delta t = +\eta x$ y $\delta x = +\eta t$, que es la forma infinitesimal de la ec. (2.18).

1.3. Representación tensorial

Por definición un tensor $T^{\mu\nu}$ con dos índices contravariantes (es decir, superiores) es un objeto que se transforma como

$$T^{\mu\nu} \rightarrow \Lambda_{\mu'}^{\mu} \Lambda_{\nu'}^{\nu} T^{\mu'\nu'} \quad (2.34)$$

En general, un tensor con un número arbitrario de índices superior e inferior se transforma con un factor $\Lambda_{\mu'}^{\mu}$ para cada índice superior y un factor $\Lambda_{\mu}^{\mu'}$ para cada índice inferior. Los tensores son ejemplos de representaciones del grupo de Lorentz. Por ejemplo, un tensor genérico $T^{\mu\nu}$ con dos índices tiene 16 componentes y la ec. (2.34) muestra que estas 16 componentes se transforman entre sí, es decir, son una base para una representación de dimensión 16. Sin embargo, esta representación es reducible. Sin embargo, esta representación es reducible. A partir de la ec. (2.34) vemos que, si $T^{\mu\nu}$ es antisimétrica, después de una transformación de Lorentz sigue siendo antisimétrica, mientras que si es simétrica sigue siendo simétrica. Así que las partes simétrica y antisimétrica de un tensor $T^{\mu\nu}$ no se mezclan, y la representación de 16 dimensiones es reducible a una representación antisimétrica de seis dimensiones $A^{\mu\nu} = (1/2)(T^{\mu\nu} - T^{\nu\mu})$ y una representación simétrica de 10 dimensiones $S^{\mu\nu} = (1/2)(T^{\mu\nu} + T^{\nu\mu})$. Además, también la traza de un tensor simétrico es invariante,

$$S \equiv \eta_{\mu\nu} S^{\mu\nu} \rightarrow \eta_{\mu\nu} \Lambda_{\rho}^{\mu} \Lambda_{\sigma}^{\nu} S^{\rho\sigma} = S \quad (2.35)$$

donde en el último paso utilizamos la propiedad definitoria del grupo de Lorentz, ecuación (2.13). Esto significa, en particular, que un tensor sin trazas sigue sin trazas después de una transformación de Lorentz, y así la representación simétrica de 10 dimensiones se descompone en una representación simétrica irreducible sin trazas de nueve dimensiones, $S^{\mu\nu} - (1/4)\eta^{\mu\nu} S$, y la representación escalar unidimensional S .

1.4. Representación espinorial

1.4.1. No relativista

Las representaciones tensoriales no agotan todas las representaciones finidimensionales físicamente interesantes del grupo de Lorentz. Podemos entender la cuestión considerando las rotaciones espaciales, es decir, el subgrupo $SO(3)$ del grupo de Lorentz. Las representaciones tensoriales de $SO(3)$ se construyen exactamente igual que antes, con escalares ϕ , vectores espaciales v^i , tensores T^{ij} , etc. con $i = 1, 2, 3$. Sin embargo, sabemos por la mecánica cuántica no relativista que, además de las representaciones tensoriales, existen otras representaciones de gran interés físico. Se trata de las representaciones espinoriales. Estrictamente hablando, éstas no son representaciones $SO(3)$, porque bajo una rotación de 2π un espinor cambia de signo, mientras que una rotación $SO(3)$ por 2π es lo mismo que la transformación de identidad. Sin embargo, dado que los observables son cuadráticos en la función de onda, esta ambigüedad de signos es perfectamente aceptable físicamente, y estas representaciones deben incluirse. En términos más formales, esto significa que, para las rotaciones espaciales, el grupo físicamente relevante no es $SO(3)$ sino $SU(2)$.

Recordemos algunos hechos sobre las representaciones $SU(2)$, bien conocidos de la mecánica cuántica no relativista. Las álgebras de Lie

de $SU(2)$ y de $SO(3)$ son las mismas, y vienen dadas por el álgebra de momento angular

$$[J^i, J^j] = i\epsilon^{ijk}J^k \quad (2.45)$$

A partir de la discusión del apartado 1.1, vemos que el álgebra de Lie sólo conoce las propiedades de un grupo cerca del elemento identidad, y el hecho de que $SU(2)$ y $SO(3)$ tengan el mismo álgebra de Lie significa que son indistinguibles a nivel de transformaciones infinitesimales. Sin embargo, $SU(2)$ y $SO(3)$ difieren a nivel global, es decir, lejos de la identidad. En $SO(3)$ una rotación por 2π es lo mismo que la identidad. En cambio, puede demostrarse que $SU(2)$ es periódico sólo bajo rotaciones por 4π . Esto significa que un objeto que recoge un signo menos bajo una rotación por 2π es una representación aceptable de $SU(2)$, mientras que no es una representación aceptable de $SO(3)$. Por tanto, cuando consideramos $SU(2)$ incluimos las soluciones de la ec. (2.45) que corresponden a espín medio entero, mientras que para $SO(3)$ sólo retenemos representaciones con espín entero. Así, las representaciones de $SU(2)$ se etiquetan con un índice j que toma valores $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$ y da el espín del estado, en unidades de \hbar . La representación de espín j tiene dimensión $2j + 1$, y los distintos estados dentro de ella se etiquetan por j_z , que toma los valores $-j, \dots, j$ en pasos enteros. La representación $j = 1/2$ se denomina representación espinorial, y tiene dimensión 2: en ella los J^i se representan como

$$J^i = \frac{\sigma^i}{2} \quad (2.46)$$

donde σ^i son las matrices de Pauli,

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

Satisfacen la identidad algebraica

$$\sigma^i \sigma^j = \delta^{ij} + i\epsilon^{ijk} \sigma^k \quad (2.48)$$

de lo que se deduce inmediatamente que $\sigma^i/2$ obedecen a las relaciones de conmutación (2.45).

El espinorial es la representación fundamental de $SU(2)$ ya que todas las representaciones pueden construirse con productos tensoriales de espinores. En ⁷ El hecho de que el álgebra de Lorentz pueda escribirse como el álgebra de $SU(2) \times SU(2)$ no significa que el grupo de Lorentz $SO(3, 1)$ sea el mismo que $SU(2) \times SU(2)$. En primer lugar, el álgebra de Lie sólo refleja las propiedades del grupo cercanas a la identidad. Además, J^\pm son combinaciones complejas de \mathbf{J} y \mathbf{K} . Obsérvese que, debido al factor i de la ec. (2.52), una representación de $SU(2) \times SU(2)$ con J^\pm hermitiana induce una representación de $SO(3, 1)$ con \mathbf{J} hermitiana pero \mathbf{K} antihermitiana. Para el lector más matemático: $SU(2) \times SU(2)$ es el grupo de cobertura universal de $SO(4)$ (de forma similar al hecho de que $SU(2)$ es el grupo de cobertura universal de $SO(3)$) y $SO(4)$ es la versión euclídea del grupo de Lorentz, es decir, se obtiene tomando la variable temporal t puramente imaginaria. El grupo de cobertura universal de $SO(3, 1)$ es $SL(2, \mathbb{C})$. En términos físicos, esto significa que con partículas de espín $1/2$ podemos construir sistemas compuestos con todos los espines enteros o semienteros posibles. Por ejemplo, la

composición de dos estados de espín 1/2 da espín cero y espín 1 ,

$$\frac{1}{2} \otimes \frac{1}{2} = 0 \oplus 1 \quad (2.49)$$

Si denotamos por \uparrow y \downarrow los estados $j = 1/2$ con $j_z = +1/2$ y $j_z = -1/2$, respectivamente, entonces los tres estados con $j = 1$ vienen dados por

$$(\uparrow\uparrow), \quad \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow), \quad (\downarrow\downarrow) \quad (2.50)$$

mientras que el singlete (es decir, el estado escalar) es

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow) \quad (2.51)$$

1.4.2. Relativista

Ciertamente queremos mantener los espinores en la teoría relativista. Esto significa que debemos ampliar el conjunto de representaciones del grupo de Lorentz, en comparación con las representaciones tensoriales discutidas anteriormente. Esto se hace más fácilmente partiendo del álgebra de Lorentz en la forma dada por las ecs. (2,27) – (2,29), y definiendo

$$\mathbf{J}^\pm = \frac{\mathbf{J} \pm i\mathbf{K}}{2} \quad (2.52)$$

El álgebra de Lie se vuelve

$$\begin{aligned} [J^{+,i}, J^{+,j}] &= i\epsilon^{ijk} J^{+,k} \\ [J^{-,i}, J^{-,j}] &= i\epsilon^{ijk} J^{-,k} \\ [J^{+,i}, J^{-,j}] &= 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto tenemos dos copias del álgebra del momento angular, que conmutan entre sí.

Habiendo escrito el grupo de Lorentz de esta forma, ahora es fácil incluir las representaciones espinoriales: simplemente tomamos todas las soluciones del álgebra (2,53) – (2,55), incluyendo las representaciones espinoriales.

Como conocemos las representaciones de $SU(2)$, y aquí tenemos dos factores conmutativos $SU(2)$, encontramos que: - Las representaciones del álgebra de Lorentz se pueden etiquetar con dos semienteros: (j_-, j_+) . - La dimensión de la representación (j_-, j_+) es $(2j_- + 1)(2j_+ + 1)$. - El generador de rotaciones \mathbf{J} está relacionado con \mathbf{J}^+ y \mathbf{J}^- por $\mathbf{J} = \mathbf{J}^+ + \mathbf{J}^-$; por tanto, por la suma de momentos angulares habitual en mecánica cuántica, en la representación (j_-, j_+) tenemos estados con todos los espines posibles j en pasos enteros entre los valores $|j_+ - j_-|$ y $j_+ + j_-$.

Las representaciones son en general complejas y la dimensión de la representación es el número de componentes complejas independientes. En algunos casos podemos imponer una condición de realidad y $(2j_- + 1)(2j_+ + 1)$ se convierte en el número de componentes reales independientes. Las representaciones (j_-, j_+) deben incluir todas las

representaciones tensoriales discutidas en la sección anterior, además de las representaciones espinoriales. Examinamos los casos más sencillos.

Representaciones de 1 dimensión

$(0, 0)$. Esta representación tiene dimensión uno. En ella, $\mathbf{J}^\pm = 0$ por lo que también \mathbf{J}, \mathbf{K} son cero. Por lo tanto es la representación escalar.

Representaciones de 2 dimensiones

Espinores de Weyl $(\frac{1}{2}, 0)$ y $(0, \frac{1}{2})$. Estas representaciones tienen dimensión dos y espín $1/2$, por lo que son representaciones espinoriales. Denotamos por $(\psi_L)_\alpha$, con $\alpha = 1, 2$, un espinor en $(1/2, 0)$ y por $(\psi_R)_\alpha$ un espinor en $(0, 1/2)$ (a veces en la literatura el índice de ψ_L se denota por $\dot{\alpha}$ para destacar que es un índice en una representación diferente en comparación con el índice de ψ_R). ψ_L se denomina espinor de Weyl zurdo y ψ_R espinor de Weyl diestro:

$$\text{Weyl spinors: } \psi_L \in \left(\frac{1}{2}, 0\right), \quad \psi_R \in \left(0, \frac{1}{2}\right) \quad (2.56)$$

Queremos determinar la forma explícita de los generadores \mathbf{J}, \mathbf{K} en espinores de Weyl. Consideremos primero la representación $(1/2, 0)$. Por definición, en esta representación \mathbf{J}^- está representado por una matriz 2×2 , mientras que $\mathbf{J}^+ = 0$. La solución de (2.54) en términos de matrices 2×2 es por supuesto $\mathbf{J}^- = \sigma/2$, y por tanto

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}^+ + \mathbf{J}^- = \frac{\sigma}{2} \quad (2.57)$$

$$\mathbf{K} = -i(\mathbf{J}^+ - \mathbf{J}^-) = i\frac{\sigma}{2} \quad (2.58)$$

Obsérvese que en esta representación los generadores K^i no son hermitianos. Esto es una consecuencia del hecho de que el grupo de Lorentz es no compacto y del teorema que afirma que los grupos no compactos no tienen representaciones unitarias de dimensión finita, excepto las representaciones en las que los generadores no compactos (en este caso los K^i) se representan trivialmente, es decir, $K^i = 0$. Ahora podemos escribir explícitamente cómo se transforma un espinor de Weyl bajo transformaciones de Lorentz, utilizando la ec. (2.31),

$$\psi_L \rightarrow \Lambda_L \psi_L = \exp \left\{ (-i\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\eta}) \cdot \frac{\boldsymbol{\sigma}}{2} \right\} \psi_L \quad (2.59)$$

Repitiendo el argumento para la representación $(0, 1/2)$, encontramos de nuevo $\mathbf{J} = \sigma/2$ pero $\mathbf{K} = -i\sigma/2$ y

$$\psi_R \rightarrow \Lambda_R \psi_R = \exp \left\{ (-i\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\eta}) \cdot \frac{\boldsymbol{\sigma}}{2} \right\} \psi_R \quad (2.60)$$

Nótese que $\Lambda_{L,R}$ son matrices complejas, y por tanto necesariamente las dos componentes de un espinor de Weyl son números complejos. Utilizando la propiedad de las matrices de Pauli $\sigma^2 \sigma^i \sigma^2 = -\sigma^{i*}$ y la forma explícita de $\Lambda_{L,R}$ es fácil demostrar que

$$\sigma^2 \Lambda_L^* \sigma^2 = \Lambda_R \quad (2.61)$$

De ello se deduce que

$$\sigma^2 \psi_L^* \rightarrow \sigma^2 (\Lambda_L \psi_L)^* = (\sigma^2 \Lambda_L^* \sigma^2) \sigma^2 \psi_L^* = \Lambda_R (\sigma^2 \psi_L^*) \quad (2.62)$$

donde usamos el hecho de que $\sigma^2 \sigma^2 = 1$. Por lo tanto, si $\psi_L(1/2, 0)$, entonces $\sigma^2 \psi_L^*$ es un espinor de Weyl diestro,

$$\sigma^2 \psi_L^* \in \left(0, \frac{1}{2}\right) \quad (2.63)$$

Espinores de Dirac $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$. Esta representación tiene dimensión (compleja) cuatro y $|1/2 - 1/2| \leq j \leq 1/2 + 1/2$, es decir $j = 0, 1$. Comparando con la ec. (2.40) vemos que se trata de una representación compleja de cuatro vectores. Un elemento genérico de la representación $(1/2, 1/2)$ puede escribirse como un par $\left((\psi_L)_\alpha, (\xi_R)_\beta\right)$, donde ψ_L y ξ_R son dos espinores de Weyl independientes, zurdo y diestro, respectivamente, y α, β toman los valores 1, 2. Queremos explicitar la relación entre estas cuatro magnitudes (complejas) y las cuatro componentes de un vector (complejo). En primer lugar, hemos visto anteriormente que, dado un espinor ξ_R diestro, podemos formar un espinor ξ_L zurdo $\equiv -i\sigma^2 \xi_R^*$, y análogamente a partir de ψ_L podemos construir $\psi_R \equiv i\sigma^2 \psi_L^*$. Definimos las matrices σ^μ y $\bar{\sigma}^\mu$ como

$$\sigma^\mu = (1, \sigma^i), \quad \bar{\sigma}^\mu = (1, -\sigma^i) \quad (2.67)$$

donde σ^i son las matrices de Pauli y 1 es la 2×2 matriz identidad. Entonces, es fácil demostrar que

$$\xi_R^\dagger \sigma^\mu \psi_R \quad (2.68)$$

y

$$\xi_L^\dagger \bar{\sigma}^\mu \psi_L \quad (2.69)$$

son cuadvectores contravariantes.

1.5. Grupo de Poincare

Además de la invariancia bajo transformaciones de Lorentz, requerimos también invariancia bajo traslaciones espacio-temporales. Un elemento genérico del grupo de traslación se escribe como

$$\exp \{-i P^\mu a_\mu\} \quad (2.96)$$

donde a_μ son los parámetros de la traslación, $x^\mu \rightarrow x^\mu + a^\mu$, y las componentes del operador de cuatro momentos P^μ son los generadores. Las traslaciones más las transformaciones de Lorentz forman un grupo, llamado el grupo de Poincaré, o el grupo inhomogéneo de Lorentz (a veces se denota como $ISO(3, 1)$, donde "I" significa inhomogéneo). Puesto que las traslaciones conmutan, tenemos

$$[P^\mu, P^\nu] = 0 \quad (2.97)$$

Para encontrar el conmutador entre P^μ y $J^{\rho\sigma}$ podemos partir de los conmutadores

$$[J^i, P^j] = i\epsilon^{ijk}P^k \quad (2.98)$$

$$[J^i, P^0] = 0 \quad (2.99)$$

que expresan los hechos de que P^i es un vector bajo rotaciones y que la energía es un escalar bajo rotaciones. La única generalización Lorentz-covariante de las ecs. (2.98) y (2.99) es

$$[P^\mu, J^{\rho\sigma}] = i(\eta^{\mu\rho}P^\sigma - \eta^{\mu\sigma}P^\rho) \quad (2.100)$$

Junto con el álgebra de Lorentz (2.25), las ecs. (2.97) y (2.100) definen el álgebra de Poincaré. En términos de $J^i, K^i, P^0 = H$ y P^i se lee

$$[J^i, J^j] = i\epsilon^{ijk}J^k, \quad [J^i, K^j] = i\epsilon^{ijk}K^k, \quad [J^i, P^j] = i\epsilon^{ijk}P^k \quad (2.101)$$

$$[K^i, K^j] = -i\epsilon^{ijk}J^k, \quad [P^i, P^j] = 0, \quad [K^i, P^j] = iH\delta^{ij} \quad (2.102)$$

$$[J^i, H] = 0, \quad [P^i, H] = 0, \quad [K^i, H] = iP^i \quad (2.103)$$

Las ecuaciones (2.101) expresan el hecho de que los J^i generan rotaciones espaciales y K^i, P^i son vectores bajo rotaciones. Las ecuaciones (2.103) establecen que J^i y P^i conmutan con el generador de traslaciones temporales y por lo tanto son cantidades conservadas; las K^i en cambio no se conservan, y esta es la razón por la que los valores propios de \mathbf{K} no se utilizan para etiquetar estados físicos.

1.5.1. Representación en estados de una partícula

La representación del grupo de Poincaré en campos nos permite construir Lagrangianos invariantes de Poincaré, como estudiaremos en el próximo capítulo. A nivel clásico, una descripción lagrangiana es todo lo que necesitamos para especificar la dinámica del sistema. A nivel cuántico, sin embargo, uno de nuestros objetivos será entender cómo el concepto de partícula emerge de la cuantización de campos. Por lo tanto, es útil ver cómo se puede representar el grupo de Poincaré utilizando como base el espacio de Hilbert de una partícula libre. Denotaremos los estados de una partícula libre con momento \mathbf{p} como $|\mathbf{p}, s\rangle$, donde s etiqueta colectivamente todos los demás números cuánticos. Puesto que \mathbf{p} es una variable continua e ilimitada, este espacio base es infinito-dimensional. Un teorema de Wigner (véase Weinberg (1995), capítulo 2) afirma que en este espacio de Hilbert cualquier transformación de simetría puede representarse mediante un operador unitario.¹ Por tanto, en este espacio base una transformación de Poincaré se representa por una matriz unitaria, y los generadores J^i, K^i, P^i y H por operadores hermitianos.

Las representaciones están etiquetadas por los operadores de Casimir. Uno de ellos es fácil de encontrar, y es $P_\mu P^\mu$. En un estado de una partícula tiene el valor m^2 , donde m es la masa de la partícula. Utilizando las relaciones de conmutación del grupo de Poincaré se puede verificar que existe un segundo operador de Casimir dado por $W_\mu W^\mu$, donde

$$W^\mu = -\frac{1}{2}\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}J_{\nu\rho}P_\sigma \quad (2.113)$$

se llama el cuatro-vector de Pauli-Lubanski. Demostrar que $W_\mu W^\mu$ es un operador de Casimir es sencillo. En primer lugar, W^μ es claramente un cuatro vector, por lo que $W_\mu W^\mu$ es Lorentz-invariante y por lo tanto conmuta con $J^{\mu\nu}$. De la forma explícita se deduce también que

$$[W^\mu, P^\nu] = 0 \quad (2.114)$$

(utilizando la ec. (2.100) y la antisimetría de $\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}$), y entonces $W_\mu W^\mu$ conmuta también con P^ν .

Como $W_\mu W^\mu$ es invariante de Lorentz, podemos calcularlo en el marco que prefiramos. Si $m \neq 0$, es conveniente elegir el marco de reposo de la partícula; en este marco $W^\mu = (-m/2)\epsilon^{\mu\nu\rho 0}J_{\nu\rho} = (m/2)\epsilon^{0\mu\nu\rho}J_{\nu\rho}$, por lo que $W^0 = 0$ mientras que

$$W^i = \frac{m}{2}\epsilon^{0ijk}J^{jk} = \frac{m}{2}\epsilon^{ijk}J^{jk} = mJ^i \quad (2.115)$$

Por lo tanto en un estado de una partícula con masa m y spin j tenemos

$$-W_\mu W^\mu = m^2 j(j+1), \quad (m \neq 0) \quad (2.116)$$

Si en cambio $m = 0$ el marco de reposo no existe, pero podemos elegir un marco donde $P^\mu = (\omega, 0, 0, \omega)$; en este marco un cálculo sencillo da $W^0 = W^3 = \omega J^3$, $W^1 = \omega$ izquierda ($J^1 - K^2$ derecha) y $W^2 = \omega$ izquierda ($J^2 + K^1$ derecha). Por lo tanto

$$-W_\mu W^\mu = \omega^2 \left[(K^2 - J^1)^2 + (K^1 + J^2)^2 \right], \quad (m = 0) \quad (2.117)$$

Comparando las ecs. (2.116) y (2.117) vemos que el límite $m \rightarrow 0$ es bastante sutil, y debemos estudiar por separado las representaciones masivas y sin masa.

Representación masiva

En este caso en los estados de una partícula tenemos $P^\mu P_\mu = m^2$ mientras que $W_\mu W^\mu = -m^2 j(j+1)$. Restringiremos a m reales y positivos. Por lo tanto las representaciones están etiquetadas por la masa m y por el espín j . Podemos entenderlo mejor observando que, si $m \neq 0$, con una transformación de Lorentz podemos llevar P^μ a la forma $P^\mu = (m, 0, 0, 0)$. Esta elección de P^μ nos deja aún la libertad de realizar rotaciones espaciales. En otras palabras, el espacio de estados de una partícula con momento $P^\mu = (m, 0, 0, 0)$ sigue siendo una base para la representación de rotaciones espaciales. El grupo de transformaciones que deja invariante una elección dada de P^μ se llama el pequeño grupo. En este caso, puesto que queremos incluir las representaciones de espinores, el pequeño grupo es $SU(2)$. Las representaciones masivas se etiquetan por tanto por la masa m y por el espín $j = 0, 1/2, 1, \dots$, y los estados dentro de cada ¹¹ En principio también existe la posibilidad de representaciones con $m^2 < 0$, conocidas como taquiones. En la teoría de campos, la aparición de un modo taquiónico es la señal de una inestabilidad, y refleja el hecho de que nos hemos expandido alrededor del vacío equivocado, por ejemplo, alrededor de un máximo en lugar de un mínimo de un potencial.

Esta parte es más técnica y puede omitirse en una primera lectura. Basta con suponer que el pequeño grupo es $SO(2)$ y omitir la parte escrita en caracteres más pequeños.¹² Serían hermitianas si las escribimos como $A^{\mu\nu}, B^{\mu\nu}$ y $C^{\mu\nu}$. Sin embargo, δx^ρ es proporcional a $\omega_{\mu\nu} (J^{\mu\nu})^\rho{}_\sigma x^\sigma$, por lo que la representación viene dada por las matrices con un índice superior y otro inferior, y es para estas matrices para las que se cumple el álgebra (2.124).124) es válida. representación se etiquetan con $j_z = -j, -j+1, \dots, j$. Esto significa que las partículas masivas de espín j tienen $2j+1$ grados de libertad.

Representación no masiva

Cuando $P^2 = 0$ el marco de reposo no existe, pero podemos reducir P^μ a la forma $P^\mu = (\omega, 0, 0, \omega)$. El pequeño grupo es el conjunto de transformaciones de Poincaré que deja este vector sin cambios. Se ve inmediatamente que las rotaciones en el plano (x, y) dejan invariante este P^μ ; se trata de un grupo $SO(2)$, generado por J^3 .

Además hay dos transformaciones de Lorentz menos evidentes que no cambian P^μ ; para encontrar la solución más general, basta con restringirse a transformaciones de Lorentz infinitesimales $\Lambda^\mu{}_\nu = \delta^\mu{}_\nu + \omega^\mu{}_\nu$, y buscar la matriz más general $\omega^{\mu\nu}$ que satisfaga $\omega^{\mu\nu} = -\omega^{\nu\mu}$ (para tener una transformación de Lorentz) y

$$\omega^{\mu\nu} P_\nu = 0 \quad (2.118)$$

para $P_\nu = (\omega, 0, 0, -\omega)$. Por lo tanto

$$\begin{pmatrix} 0 & \omega^{01} & \omega^{02} & \omega^{03} \\ -\omega^{01} & 0 & \omega^{12} & \omega^{13} \\ -\omega^{02} & -\omega^{12} & 0 & \omega^{23} \\ -\omega^{03} & -\omega^{13} & -\omega^{23} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = 0$$

lo que da $\omega^{03} = 0, \omega^{01} + \omega^{13} = 0$ y $\omega^{02} + \omega^{23} = 0$. Denotando $\omega^{01} = \alpha$, $\omega^{02} = \beta$ y $\omega^{12} = \theta$ vemos que la transformación de Lorentz más general que deja P^μ invariante puede escribirse como

$$\Lambda = e^{-i(\alpha A + \beta B + \theta C)} \quad (2.120)$$

donde (bajando el segundo índice de Lorentz)

$$A^\mu{}_\nu = i \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B^\mu{}_\nu = i \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

y

$$C^\mu{}_\nu = i \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Example 1.5.1 (Fotón: $m^2 = 0$, dos estados de polarización $h = \pm 1$)
 Puesto que la interacción electromagnética conserva la paridad, es más natural definir el fotón como una representación del grupo de Poincaré y de la paridad, es decir, reunir los dos estados de helicidad $h = \pm 1$. Los dos estados $h = \pm 1$ se denominan entonces fotones ($h = -1$) zurdos y ($h = +1$) diestros.

Example 1.5.2 (Gravitón: $m^2 = 0$, dos estados de polarización $h = \pm 2$)
 Del mismo modo, los dos estados con helicidad $h = \pm 2$ que median la interacción gravitatoria se consideran mejor como dos estados de polarización de la misma partícula, el gravitón:

Example 1.5.3 (Neutrinos) Por el contrario, los neutrinos sólo tienen interacciones débiles (aparte de la interacción gravitatoria, mucho menor), que no conservan la paridad, y los dos estados con helicidad $h = \pm 1/2$ reciben nombres diferentes: neutrino se reserva para $h = -1/2$, y antineutrino para $h = +1/2$.

CAMPOS CLÁSICOS

Ecuaciones de Klein-Gordon y de Dirac

2

Todo esto lo he sacado de [2]

2.1. Ecuación de Klein Gordon

2.2. Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos

2.3. Ecuación de Dirac

A continuación vamos intentar solucionar algunos de los problemas que tenía la ecuación de Klein-Gordon y para ello vamos a definir la siguiente base de estados:

$$|\vec{x}, s\rangle \Rightarrow \psi_s = \vec{x}, s \psi(t) = \psi_s(\vec{x}, t)$$

en donde $s = s_1, s_2, \dots, s_m$ y $\Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_m \end{bmatrix}$

La s tiene que ver con el espín, pero no es exactamente el espín

A continuación definimos un nuevo hamiltoniano llamado *Hmailtoniano de Dirac* el cual tiene la forma

$$H_D = \vec{\alpha} \vec{\mathcal{P}} + \beta$$

en donde α, β son matrices de $m \times n$ dimensiones.

Aplicando este Hamiltoniano a la ecuacion de Shrödinger obtenemos

$$i\partial_t \Psi = H_D \Psi \Rightarrow H_D \Psi = E \Psi \quad (2.1)$$

$$\Rightarrow E \Psi = H_D \Psi \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow (E - H_D) \Psi = 0 \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow (E - \vec{\alpha} \vec{\mathcal{P}} - \beta) \Psi = 0 \quad (2.4)$$

La ecuación de Klein-Gordon es correcta por lo que se tiene que satisfacer que $E^2 = p^2 + m^2$ de forma que

$$(E + \vec{\alpha} \vec{\mathcal{P}} + \beta)(E - \vec{\alpha} \vec{\mathcal{P}} - \beta) \Psi = 0 \Rightarrow (E^2 - (\vec{\alpha} \vec{\mathcal{P}} + \beta)^2) \Psi = 0 \quad (2.5)$$

$$\Rightarrow (E^2 - \alpha_i \alpha_j P^i P^j - m \alpha_i \beta P^i - m \beta \alpha_i P^i - (\alpha_i^2 + \beta^2)) \Psi = 0 \quad (2.6) \quad \left. \begin{array}{l} \Rightarrow \\ \Rightarrow \end{array} \right\} i = j$$

$$\Rightarrow (E^2 - \sum_i P_i^2) \Psi = 0 \quad (2.7)$$

$$\Rightarrow \quad (2.8)$$

2.1	Ecuación de Klein Gordon	23
2.2	Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	23
2.3	Ecuación de Dirac	23
2.3.1	Partículas cargadas en un campo electromagnético	25
2.4	El límite no relativista de la ecuación de Dirac	25
2.5	Soluciones a la ecuación de Dirac	25
2.5.1	Ondas con energía positiva	25
2.5.2	Ondas con energía negativa	28
2.5.3	Interpretación física. Mar de Dirac	29
2.6	Fermiones quirales	30
2.6.1	Proyectores de Weyl	30

Para acortar vamos a usar el convenio de Einstein de índices repetidos, en este caso esto es $\alpha_i \alpha_j P^i P^j = \sum_{ij} \alpha_i \alpha_j P_i P_j$

Recuerda

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_m \end{bmatrix}$$

De esta última ecuación podemos obtener los coeficientes de las matrices α y β que cumplen la ecuación de K-G, los cuales deben cumplir las siguientes propiedades:

- $\alpha_i^2 = \beta_i^2 = \mathcal{I}$
- $\{\alpha_i, \alpha_j\} = 0 \quad \forall i \neq j$
- $\{\alpha_i, \beta\} = 0$
- $\alpha^i = (\alpha^i)^\dagger$ y $\beta^i = (\beta^i)^\dagger$

De esta forma la ecuación de Dirac por componentes queda con la forma

$$i(\partial_t + i\vec{\alpha} \cdot \vec{\nabla} - \beta m)\psi_s = 0 \quad (2.9)$$

A continuación vamos a definir lo que se denominan *Matrices de Dirac*, las cuales se definen como

$$\gamma^0 = \beta \quad \gamma^i = \beta \alpha^i$$

con $\alpha^i = \alpha_i$. Podemos expresarlas en forma indicial, **pero sin ser un cuadvivector**, con la forma $\gamma^\mu = (\gamma^0, \gamma^i)$.

Podemos expresar las condiciones de los coeficientes β y α con estas matrices de forma mucho más abreviada como

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$$

Se puede demostrar que estas condiciones solo se satisfacen para matrices con dimensiones pares, pero además se puede demostrar que la dimensión mínima que han de tener para que se cumplan es 4, por lo que solo se cumplen para aquellas con $n \geq 4$ siendo n el número de componentes del espinor de Dirac Ψ .

Podemos escribir la ecuación 2.4 con las matrices γ de la forma

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu + m)\Psi = 0$$

Esta ecuación no es covariante ya que γ^μ no es un cuadvivector ni Ψ es un escalar (es decir, función $\Psi(x)$); pero si es un invariante relativista.

A continuación veamos la forma de estas matrices γ en diferentes representaciones:

- Representación de Dirac

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} \mathbb{I} & 0 \\ 0 & \mathbb{I} \end{pmatrix} \quad \vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ \vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix}$$

- Representación de Weyl

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & \mathbb{I} \\ \mathbb{I} & 0 \end{pmatrix} \quad \vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ \vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix}$$

Como podemos ver entre una representación y otra solo cambia γ^0 , pero el cambio es importante ya que si **cambiamos las matrices, cambiamos el significado físico de las componentes del espinor de Dirac**.

Además, podemos reconocer $\vec{\sigma}$ como las matrices sigma de Pauli, las cuales siguen la siguiente regla de conmutación y anticonmutación:

$$\sigma^i \sigma^j = \delta^{ij} + i \varepsilon_{ijk} \sigma^k \quad \left\{ \begin{array}{l} [\sigma^i, \sigma^j] = 2i \varepsilon_{ijk} \sigma^k \\ \{\sigma^i, \sigma^j\} = 2\delta_{ij} \end{array} \right.$$

2.3.1. Partículas cargadas en un campo electromagnético

2.4. El límite no relativista de la ecuación de Dirac

2.5. Soluciones a la ecuación de Dirac

Esta sección es de [3]

Para familiarizarnos con la física de la ecuación de Dirac, analicemos ahora sus soluciones de onda plana. Puesto que un campo de Dirac ψ obedece a la ecuación de Klein-Gordon, sabemos inmediatamente que puede escribirse como una combinación lineal de ondas planas:

$$\psi(x) = u(p)e^{-ip \cdot x}, \quad \text{en donde } p^2 = m^2 \quad (3.45)$$

2.5.1. Ondas con energía positiva

Por el momento nos concentraremos en soluciones con frecuencia positiva, es decir, $p^0 > 0$. El vector columna $u(p)$ debe obedecer a una restricción adicional, que se encuentra introduciendo (3.45) en la ecuación de Dirac:

$$(\gamma^\mu p_\mu - m) u(p) = 0 \quad (3.46)$$

Es más fácil analizar esta ecuación en el marco de reposo, donde $p = p_0 = (m, \mathbf{0})$; la solución para p general puede entonces encontrarse potenciando con $\Lambda_{\frac{1}{2}}$. En el marco de reposo, la Ec. (3.46) se convierte en

$$(m\gamma^0 - m) u(p_0) = m \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} u(p_0) = 0$$

y las soluciones son

$$u(p_0) = \sqrt{m} \begin{pmatrix} \xi \\ \xi \end{pmatrix} \quad (3.47)$$

para cualquier espinor numérico de dos componentes ξ . Convencionalmente normalizamos ξ de modo que $\xi^\dagger \xi = 1$; el factor \sqrt{m} se ha insertado por conveniencia futura. Podemos interpretar el espinor ξ observando

el generador de rotación (3.27): ξ se transforma bajo rotaciones como un espinor ordinario de dos componentes del grupo de rotación, y por tanto determina la orientación del espín de la solución de Dirac de la forma habitual. Por ejemplo, cuando $\xi = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, la partícula tiene espín hacia arriba a lo largo de la 3-dirección.

Nótese que después de aplicar la ecuación de Dirac, somos libres de elegir sólo dos de los cuatro componentes de $u(p)$. Esto es justo lo que queremos, ya que una partícula con espín 1/2 sólo tiene dos estados físicos: espín arriba y espín abajo. (Por supuesto, estamos siendo un poco prematuros al hablar de partículas y espín. Demostraremos que el momento angular de espín de una partícula de Dirac es $\hbar/2$ cuando cuantifiquemos la teoría de Dirac en la Sección 3.5; por ahora, basta con observar que hay dos soluciones posibles $u(p)$ para cualquier momento p). Ahora que tenemos la forma general de $u(p)$ en el marco de reposo, podemos obtener $u(p)$ en cualquier otro marco potenciando. Consideremos un aumento a lo largo de la dirección 3. Primero debemos recordar lo que el impulso hace al vector 4-momento. En forma infinitesimal,

$$\begin{pmatrix} E \\ p^3 \end{pmatrix} = \left[1 + \eta \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} m \\ 0 \end{pmatrix}$$

donde η es algún parámetro infinitesimal. Para η finito debemos escribir

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E \\ p^3 \end{pmatrix} &= \exp \left[\eta \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} m \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \left[\cosh \eta \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \sinh \eta \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} m \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.48) \\ &= \begin{pmatrix} m \cosh \eta \\ m \sinh \eta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

El parámetro η se denomina rapidez. Es la cantidad que es aditiva bajo aumentos sucesivos. Ahora aplicar el mismo impulso a $u(p)$. Según las Ecs. (3.26) y (3.30),

$$\begin{aligned} u(p) &= \exp \left[-\frac{1}{2} \eta \begin{pmatrix} \sigma^3 & 0 \\ 0 & -\sigma^3 \end{pmatrix} \right] \sqrt{m} \begin{pmatrix} \xi \\ \xi \end{pmatrix} \\ &= \left[\cosh \left(\frac{1}{2} \eta \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \sinh \left(\frac{1}{2} \eta \right) \begin{pmatrix} \sigma^3 & 0 \\ 0 & -\sigma^3 \end{pmatrix} \right] \sqrt{m} \begin{pmatrix} \xi \\ \xi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} e^{\eta/2} \left(\frac{1-\sigma^3}{2} \right) + e^{-\eta/2} \left(\frac{1+\sigma^3}{2} \right) & 0 \\ 0 & e^{\eta/2} \left(\frac{1+\sigma^3}{2} \right) + e^{-\eta/2} \left(\frac{1-\sigma^3}{2} \right) \end{pmatrix} \sqrt{m} \begin{pmatrix} \xi \\ \xi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \left[\sqrt{E+p^3} \left(\frac{1-\sigma^3}{2} \right) + \sqrt{E-p^3} \left(\frac{1+\sigma^3}{2} \right) \right] \xi \\ \left[\sqrt{E+p^3} \left(\frac{1+\sigma^3}{2} \right) + \sqrt{E-p^3} \left(\frac{1-\sigma^3}{2} \right) \right] \xi \end{pmatrix} \quad (3.49) \end{aligned}$$

La última línea puede simplificarse para obtener

$$u(p) = \begin{pmatrix} \sqrt{p \cdot \sigma} \xi \\ \sqrt{p \cdot \bar{\sigma}} \xi \end{pmatrix} \quad (3.50)$$

donde se entiende que al tomar la raíz cuadrada de una matriz, tomamos la raíz positiva de cada valor propio. Esta expresión para $u(p)$ no sólo es más compacta, sino que también es válida para una dirección arbitraria de \mathbf{p} . Cuando se trabaja con expresiones de esta forma, a menudo es útil conocer la identidad

$$(p \cdot \sigma)(p \cdot \bar{\sigma}) = p^2 = m^2 \quad (3.51)$$

Entonces se puede verificar directamente que (3.50) es una solución de la ecuación de Dirac en la forma de (3.43). En la práctica, a menudo es conveniente trabajar con espinores específicos ξ . Una elección útil en este caso serían los estados propios de σ^3 . Por ejemplo, si $\xi = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ (espín hacia arriba a lo largo del eje 3), obtenemos

$$u(p) = \begin{pmatrix} \sqrt{E - p^3} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \sqrt{E + p^3} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{large boost}} \sqrt{2E} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

mientras que para $\xi = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ (espín hacia abajo a lo largo del eje 3) tenemos

$$u(p) = \begin{pmatrix} \sqrt{E + p^3} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \sqrt{E - p^3} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{large boost}} \sqrt{2E} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

En el límite $\eta \rightarrow \infty$ los estados degeneran en los espinores de dos componentes de una partícula sin masa. (Ahora vemos la razón del factor \sqrt{m} en (3.47): Mantiene finitas las expresiones de los espinores en el límite sin masa). Las soluciones (3.52) y (3.53) son estados propios del operador de helicidad,

$$h \equiv \hat{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{2} \hat{p}_i \begin{pmatrix} \sigma^i & 0 \\ 0 & \sigma^i \end{pmatrix}$$

Una partícula con $h = +1/2$ se llama diestra, mientras que una con $h = -1/2$ se llama zurda. La helicidad de una partícula masiva depende del sistema de referencia, ya que siempre se puede pasar a un sistema en el que su momento esté en la dirección opuesta (pero su espín no cambie). En el caso de una partícula sin masa, que se desplaza a la velocidad de la luz, no se puede realizar tal desplazamiento. La forma extremadamente simple de $u(p)$ para una partícula sin masa en un estado propio de helicidad hace que el comportamiento de dicha partícula sea fácil de entender. En el Capítulo 1, nos permitió adivinar la forma de $e^+ e^-$ en el límite sin masa. En capítulos posteriores a menudo haremos primero un cálculo sin masa, y luego miraremos los estados propios de la helicidad en el límite de alta energía para entender lo que hemos hecho. Por cierto, ya estamos preparados para comprender el origen de la notación ψ_L y ψ_R para los espinores de Weyl. Las soluciones de las ecuaciones de Weyl son estados de helicidad definida, correspondientes a partículas zurdas y diestras, respectivamente. La invariancia Lorentz de la helicidad (para una partícula sin masa) se manifiesta en la notación de los espinores de Weyl, ya que ψ_L y ψ_R viven en diferentes representaciones del grupo de Lorentz. Es conveniente escribir la condición de normalización para

$u(p)$ de forma Lorentzinvariante. Vimos anteriormente que $\psi^\dagger\psi$ no es invariante de Lorentz. Análogamente,

$$\begin{aligned} u^\dagger u &= \left(\xi^\dagger \sqrt{p \cdot \bar{\sigma}}, \xi^\dagger \sqrt{p \cdot \bar{\sigma}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{p \cdot \bar{\sigma}} \xi \\ \sqrt{p \cdot \bar{\sigma}} \xi \end{pmatrix} \\ &= 2E_p \xi^\dagger \xi \end{aligned} \quad (3.55)$$

Para hacer un escalar de Lorentz definimos

$$\bar{u}(p) = u^\dagger(p) \gamma^0 \quad (3.56)$$

Entonces, por un cálculo casi idéntico,

$$\bar{u}u = 2m \xi^\dagger \xi \quad (3.57)$$

Esta será nuestra condición de normalización, una vez que también requerimos que el espinor de dos componentes ξ se normalice como de costumbre: $\xi^\dagger \xi = 1$. También es convencional elegir espinores de base ξ^1 y ξ^2 (como $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ y $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$) que sean ortogonales. Para una partícula sin masa la Ec. (3.57) es trivial, por lo que debemos escribir la condición de normalización en la forma de (3.55). Resumamos nuestra discusión hasta ahora. La solución general de la ecuación de Dirac puede escribirse como una combinación lineal de ondas planas. Las ondas de frecuencia positiva son de la forma

$$\psi(x) = u(p) e^{-ip \cdot x}, \quad p^2 = m^2, \quad p^0 > 0 \quad (3.58)$$

Hay dos soluciones linealmente independientes para $u(p)$,

$$u^s(p) = \begin{pmatrix} \sqrt{p \cdot \bar{\sigma}} \xi^s \\ \sqrt{p \cdot \bar{\sigma}} \xi^s \end{pmatrix}, \quad s = 1, 2 \quad (3.59)$$

que normalizamos según

$$\bar{u}^r(p) u^s(p) = 2m \delta^{rs} \quad \text{or} \quad u^{r\dagger}(p) u^s(p) = 2E_p \delta^{rs} \quad (3.60)$$

2.5.2. Ondas con energía negativa

Exactamente de la misma manera, podemos encontrar las soluciones de frecuencia negativa:

$$\psi(x) = v(p) e^{+ip \cdot x}, \quad p^2 = m^2, \quad p^0 > 0 \quad (3.61)$$

(Nótese que hemos optado por poner el signo + en la exponencial, en lugar de tener $p^0 < 0$). Hay dos soluciones linealmente independientes para $v(p)$,

$$v^s(p) = \begin{pmatrix} \sqrt{p \cdot \sigma} \eta^s \\ -\sqrt{p \cdot \bar{\sigma}} \eta^s \end{pmatrix}, \quad s = 1, 2 \quad (3.62)$$

donde η^s es otra base de espinores de dos componentes. Estas soluciones se normalizan según

$$\bar{v}^r(p)v^s(p) = -2m\delta^{rs} \quad \text{or} \quad v^{r\dagger}(p)v^s(p) = +2E_p\delta^{rs} \quad (3.63)$$

Las u 's y v 's también son ortogonales entre sí:

$$\bar{u}^r(p)v^s(p) = \bar{v}^r(p)u^s(p) = 0 \quad (3.64)$$

Ten cuidado, ya que $u^{r\dagger}(p)v^s(p) \neq 0$ y $v^{r\dagger}(p)u^s(p) \neq 0$. Sin embargo, obsérvese que

$$u^{r\dagger}(\mathbf{p})v^s(-\mathbf{p}) = v^{r\dagger}(-\mathbf{p})u^s(\mathbf{p}) = 0 \quad (3.65)$$

donde hemos cambiado el signo del trivector momento en un factor de cada producto espinor.

2.5.3. Interpretación física. Mar de Dirac

Las soluciones encontradas por Dirac no tienen sentido debido a que no hay un estado fundamental de energía cero (Ver figura 2.1).

Dirac propuso lo que se conoce como el mar de Dirac

Definition 2.5.1 (Mar de Dirac) *El mar de Dirac propone que todos los niveles con energía negativa están llenos (u ocupados) por estados, dado que Dirac trabajaba con fermiones hay que tener en cuenta el principio de exclusión de Pauli y por lo tanto hay un número finito de electrones que pueden ocupar dichos estados.*

Esto quiere decir que el vacío no está realmente vacío, sino que está lleno, tan lleno que no cabe nada más y por lo tanto no son estados accesibles. Lo que se puede interpretar como que ese es el estado fundamental.

En este caso Dirac tuvo suerte, ya que al tratar con fermiones se sacó el principio de exclusión de Pauli como un as bajo la manga, pero con los bosones ese truco no funciona.

Ahora veamos cómo llegamos de eso a la existencia de antipartículas con toda la magia que conlleva. Las antipartículas nacen de esta interpretación por las excitaciones del vacío mediante campos electromagnéticos (Ver figura 2.2) las cuales hacen saltar a los estados con masa negativa a masas positivas (más o menos como los huecos que contaban en estado sólido).

Por razones que no apunté o Dobado no contó, al parecer estos huecos como pasan a tener ahora masa positiva pero su energía (o algo, estoy inventando un poco) se conserva, estas deben tener carga contraria (en carga inserte propiedad cualquiera).

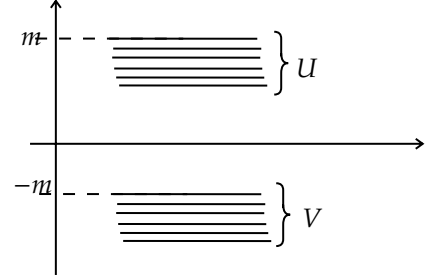


Figura 2.1: Soluciones de la ecuación de Dirac

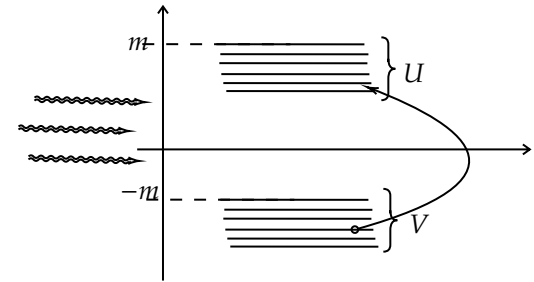


Figura 2.2: Excitación del mar de Dirac por un campo electromagnético

2.6. Fermiones quirales

A continuación definimos la matriz γ^5 en la representación de Weyl, que será la que usemos de ahora en adelante para este curso.

$$\gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Algunas propiedades de γ^5 son:

- $\gamma^5 = (\gamma^5)^\dagger$
- $\gamma^\mu\gamma^5 = -\gamma^5\gamma^\mu$
- $\gamma^\mu\gamma^5 =$
- $(\gamma^5)^2 = \mathcal{I}$

2.6.1. Proyectores de Weyl

A continuación definiremos los proyectores Weyl y posteriormente los formularemos.

Definition 2.6.1 *Los proyectores Weyl son unos operadores que nos devuelven el espinor de Weyl correspondiente, esto es, ψ_L o ϕ_R una vez aplicados a la función de onda*

Todo esto lo he sacado del [2]

3.1. Campos clásicos relativistas

3.2. Dinámica de los campos clásicos

Por la mecánica lagrangiana sabemos que para estudiar la dinámica usamos las llamadas coordenadas generalizadas $q_i(t)$. En el formalismo de campos utilizamos el propio campo para definir la dinámica, es decir, supongamos que tenemos un campo Φ el cual esta compuesto por el valor del campo en un punto que denotamos $\phi_i(\vec{x}, t)$ estas ϕ_i son las coordenadas generalizadas en el formalismo de campos. Esto se puede ver como:

$$q_i \rightarrow \phi_i(\vec{x}, t)$$

Esto quiere decir, que vamos a tener tantas coordenadas como puntos del espacio esten definidos en nuestro campo y cada punto del espacio ϕ_i esta definido por unas coordeandas.

De esta forma, la teoría de campos que buscamos para entender la dinámica de un sistema es una *Teoría de campos local*, es decir, que lo que le ocurre a un punto del campo solo afecte a otros puntos cercanos y no a todo el campo y que además sea relativista.

3.2.1. Formalismo Lagrangiano

Para ello definimos la densidad lagrangiana \mathcal{L} la cual depende de las coordenadas generalizadas ϕ_i y de sus velocidades generalizadas $\partial_\mu \phi_i$

3.2.2. Formalismo Hamiltoniano

Una vez descrito el formalismo Lagrangiano, podemos ir al formalismo Hamiltoniano de forma análoga a como lo hacíamos en mecánica clásica, para ello definimos el *Momento canónico generalizado* como

$$\Pi(x) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_0 \phi_i} \text{ con } \partial_0 \phi_i = \dot{\phi}$$

De forma que el Hamiltoniano queda definido como

$$\mathcal{H} = \Pi \phi_i - \mathcal{L}$$

3.1	Campos clásicos relativistas	31
3.2	Dinámica de los campos clásicos	31
3.2.1	Formalismo Lagrangiano	31
3.2.2	Formalismo Hamiltoniano	31
3.2.3	Ejemplos	32
3.3	Teorema de Noether	32
3.4	Transformaciones de simetría espacio-temporales	32
3.4.1	Traslaciones	32
3.4.2	Transformaciones de Lorentz	32

3.2.3. Ejemplos

Example 3.2.1 (Campo escalar real)

Example 3.2.2 (Campo escalar real)

Example 3.2.3 (Campo escalar real)

Example 3.2.4 (Campo escalar real)

Example 3.2.5 (Campo escalar real)

3.3. Teorema de Noether

3.4. Transformaciones de simetría espacio-temporales

3.4.1. Traslaciones

3.4.2. Transformaciones de Lorentz

CAMPOS CUÁNTICOS

Cuantización canónica del campo escalar libre

4

Todo esto lo he sacado del [2]

4.1. Cuantización canónica del campo bosónico libre

Una vez visto lo que es un campo clásico vamos a cuantizarlo, para ello vamos primero a ver como se cuantizaban las cosas.

En mecánica clásica teníamos el Hamiltoniano el cual estaba definido como función de (q_i, p_i) , sin embargo, en mecánica cuántica usamos operadores

$$\left. \begin{array}{l} q_i \xrightarrow{\text{Cuantizamos}} \hat{q}_i \\ p_i \xrightarrow{\text{Cuantizamos}} \hat{p}_i \end{array} \right\} [\hat{q}_i, \hat{p}_i] = i\delta_{ij}$$

Como podemos sospechar que en vez de tener variables como (q_i, p_i) tengamos los operadores (\hat{q}_i, \hat{p}_i) complica un poco las cosas, ya que habrá que asegurarse siempre que se cumplan ciertas reglas de conmutación.

Si (q_i, p_i) han pasado a convertirse en operadores H , también lo será, es decir, $\hat{H}(\hat{q}_i, \hat{p}_i)$.

En mecánica cuántica la ecuación que describía la dinámica de un sistema era la ecuación de Schrödinger, y su variable dinámica era la función de onda

$$i \frac{d}{dt} |\psi(t_0)\rangle = \hat{H} |\psi(t_0)\rangle$$

En este caso nos encontramos con un problema, ya que la variable dinámica es la función de onda, y es la que tiene la dependencia temporal, y queremos irnos a un campo en donde no hay funciones de onda. La solución a este problema es la **Imagen de Heisenberg**, la cual nos permite poner la dependencia temporal en los operadores en vez de en las funciones de onda, es decir,

$$q_i \longrightarrow \hat{q}_i(t) = e^{i\hat{H}t} \hat{q}_i e^{-i\hat{H}t} = \mathcal{U}^{-1} \hat{q}_i \mathcal{U}$$

como el operador evolución temporal \mathcal{U} cumple la relación $\mathcal{U}^{-1}\mathcal{U} = \mathbb{I}$, entonces conservamos la relación de conmutación de la imagen de Schrödinger

$$[\hat{q}_i(t), \hat{p}_i(t)] = i\delta_{ij}$$

Basicamente hemos movido la dinámica a los operadores, y esto es importante porque cuando pasamos (en el tema anterior) al formalismo

4.1	Cuantización canónica del campo bosónico libre . .	35
4.1.1	Cuantización en teoría de campos	36
4.1.2	Solución general de la ecuación de Klein-Gordon	37
4.1.3	Soluciones en el formalismo de campo cuántico . .	38
4.1.4	Espacio de Fock	39
4.2	Propagador del campo escalar libre	43

de campos, pasamos las coordenadas generalizadas, en ningún momento hablamos de funciones de onda.

4.1.1. Cuantización en teoría de campos

Ahora una vez visto como cuantizamos cosas y sabiendo como se pasa de la coordenadas generalizadas a un campo, vamos a juntar las dos cosas y ver que pasa, para ello expresemos los operadores $\hat{q}_i(t)$ como campos

$$\hat{q}_i(t) \longrightarrow \hat{\phi}(\vec{x}, t)$$

El subíndice i hace referencia a las coordenadas \vec{x} , es decir, $q \rightarrow \phi$ y $i \rightarrow \vec{x}$

En teoría clásica de campos podíamos obtener un campo real $\phi \in \mathbb{R}$ con el que describir una partícula con el lagrangiano

$$\mathcal{L}_0 = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} m^2 \phi^2$$

Del cual podíamos obtener el momento canónico conjugado como

$$\Pi(x) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_0 \phi} = \dot{\phi}$$

Con estas 2 cantidades podíamos escribir el Hamiltoniano del sistema como

$$H_0 = \int d\vec{x} \mathcal{H} = \int d\vec{x} (\Pi \dot{\phi} - \mathcal{L}) = \frac{1}{2} \int d\vec{x} (\Pi^2 + (\vec{\nabla} \phi)^2 + m^2 \phi^2)$$

Si ahora cuantizamos el campo pasamos a obtener que

$$\left. \begin{array}{l} \phi_i \xrightarrow{\text{Cuantizamos}} \hat{\phi}(\vec{x}, t) \\ \Pi_i \xrightarrow{\text{Cuantizamos}} \hat{\Pi}(\vec{x}, t) \end{array} \right\} [\hat{\phi}(\vec{x}, t), \hat{\Pi}(\vec{x}', t)] = i\delta(\vec{x} - \vec{x}')$$

En este caso a diferencia de los operadores, los campos son un continuo (por definición, ya que ocupan todo el espacio) no obtenemos la delta de Kronecker, si no la de Dirac.

Otras reglas de conmutación que cumplen estos campos cuantizados son

$$[\hat{\phi}(\vec{x}, t), \hat{\phi}(\vec{x}', t)] = [\hat{\Pi}(\vec{x}, t), \hat{\Pi}(\vec{x}', t)]$$

De esta forma obtenemos que el operador Hamiltoniano en este formalismo es

$$\hat{H}_0 = \int d\vec{x} \frac{1}{2} [\hat{\Pi}^2 + (\vec{\nabla} \hat{\phi}(\vec{x}, t))^2 + m^2 \hat{\phi}(\vec{x}, t)^2]$$

Como los operadores de campo son continuos, estos cumplen la ecuación de heisenberg de forma que

$$i\partial_0\hat{\phi}(\vec{x},t) = [\hat{\phi}(\vec{x},t), \hat{H}_0]$$

Se puede demostrar que $\hat{\phi}(\vec{x},t)$ cumple la ecuación de Klein-Gordon.

Demostración.

$$(m^2)\hat{\phi}(\vec{x},t) = 0$$

□

4.1.2. Solución general de la ecuación de Klein-Gordon

Volviendo al formalismo de campos clásicos y a la ecuación de Klein-Gordon, obtuvimos soluciones con la forma

$$e^{-ikx}$$

para soluciones con energía positiva y con la forma

$$e^{ikx}$$

para soluciones con energía negativa, en donde $k^\mu = (k^0, \vec{k})$ y $x^\mu = (t, \vec{x})$. Estas soluciones complian las siguientes condiciones:

$$k^2 - m^2 = 0 \quad k^0 = E_k = \sqrt{\vec{k}^2 + m^2} \text{ con } E_k > 0$$

Si nos centramos en las soluciones con energía positiva, podemos buscar otras soluciones, que mientras cumplan las condiciones anteriores también serán soluciones válidas.

Esta función

$$\int d^4k \frac{k}{(2\pi)^3} \alpha_{\vec{k}} \theta(k^0) \delta(k^2 - m^2) e^{-ikx}$$

es solución porque $\delta(k^2 - m^2)$ garantiza que $k^2 - m^2 = 0$ y $\theta(k^0)$ (es la función escalón¹) garantiza que $E_k > 0$ y es proporcional a las soluciones que obtuvimos en el tema 1.

1: $\theta(k^0) = \{ \}$

Podemos definir la delta de una función como

Definition 4.1.1 (Delta de Dirac de una función) *Podemos definir la delta de Dirac de una función como*

$$\delta(f(x_0)) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\delta(x - x_i)}{|f'(x_i)|}$$

En el caso de nuestra solución esto se aplica como

$$\delta(k^2 - m^2) = \delta((k^0)^2 - \vec{k}^2 - m^2) = \frac{1}{2k^0} \delta(k^0 - E_k) + \text{Un termino de } k^0 < 0$$

Y como la última delta nos fuerza a que $k^0 = E_k$.

La última condición que debemos cumplir es que $\phi \in \mathbb{R}$, por lo que juntando este desarrollo con el mismo para las soluciones con energía negativa, tenemos que la solución más general a la ecuación de Klein-Gordon es:

$$\phi(\vec{x}, t) = \int d\tilde{k} (\alpha_{\vec{k}} e^{-ikx} + \alpha_{\vec{k}}^* e^{ikx})$$

en donde los coeficientes $\alpha_{\vec{k}}$ y $\alpha_{\vec{k}}^*$ aseguran que se cumpla la última condición

Corollary 4.1.1 *El termino*

$$d^4 \frac{k}{(2\pi)^3} \delta(k^2 - m^2)$$

se convierte en

pasando a una integral sobre el trivector \vec{k} por el efecto de la delta, este término de ahora en adelante llamaremos $d\tilde{k}$.

Además que, tanto d^4k como k^2 son invariantes Lorentz (esto es porque el jacobiano de la transformación es 0), entonces

$$d\tilde{k} = d\tilde{k}'$$

4.1.3. Soluciones en el formalismo de campo cuántico

Para conseguir las soluciones en el formalismo de campo cuántico podemos reutilizar la misma estructura que para un campo clásico.

Para ello seguimos teniendo que tener soluciones $\hat{\phi}(\vec{x}, t) \in \mathbb{R}$, el análogo clásico era que $\phi(\vec{x}, t) = \phi^*(\vec{x}, t)$. EN este formalismo cuántico esta condición se puede obtener imponiendo que las soluciones sean autoadjuntas, es decir, $\hat{\phi}(\vec{x}, t) = \hat{\phi}^\dagger(\vec{x}, t)$.

De esta forma vemos que ya no podemos seguir usando los números $\alpha_{\vec{k}}$, si no que tenemos que cambiarlos por unos operadores llamados aniquilación $\hat{a}_{\vec{k}}$ y destrucción $\hat{a}_{\vec{k}}^\dagger$.

Así obtenemos que las soluciones de la ecuación de Klein-Gordon de un campo cuántico son

$$\hat{\phi}(\vec{x}, t) = \int d\tilde{k} (\hat{a}_{\vec{k}} e^{-ikx} + \hat{a}_{\vec{k}}^\dagger e^{ikx})$$

Resumen de los operadores de campo $\hat{\phi}(\vec{x}, t)$

- Estos operadores satisfacen la ecuación de Heisenberg

$$i\partial_0 \hat{\phi}(\vec{x}, t) = [\hat{\phi}(\vec{x}, t), \hat{H}_0]$$

- Tambien Satisfacen la ecuación de Klein-Gordon

$$(m^2)\hat{\phi}(\vec{x}, t) = 0$$

- Son autoadjuntos

$$\hat{\phi}(\vec{x}, t) = \hat{\phi}^\dagger(\vec{x}, t)$$

- Cumplen la regla de conmutación

$$\left[\hat{\phi}(\vec{x}, t), \hat{\phi}(\vec{x}', t) \right] = i\delta(\vec{x} - \vec{x}')$$

Esto no lo hemos obtenido realmente, pero si forzamos a que cumplan estas reglas podemos obtener las reglas de conmutación de los operadores creación y destrucción. Estas reglas son

$$\left[\hat{a}_{\vec{k}}, \hat{a}_{\vec{k}'} \right] = \left[\hat{a}_{\vec{k}}^\dagger, \hat{a}_{\vec{k}'}^\dagger \right] = 0$$

y

$$\left[\hat{a}_{\vec{k}}, \hat{a}_{\vec{k}'}^\dagger \right] = 2E_k(2\pi)^3 \delta(\vec{k} - \vec{k}')$$

Una vez encontrados los operadores, nos falta encontrar a que estados los aplicamos, ya dijimos que no íbamos a tener funciones de onda, ¿como vamos a describir a las cosas si no usamos funciones de onda?

4.1.4. Espacio de Fock

El espacio de Fock es el equivalente al espacio de Hilbert en campos cuánticos.

Definition 4.1.2 (Espacio de Fock) *El espacio de Fock $\mathcal{F}(H)$, en mecánica cuántica es un espacio de Hilbert especial, que se construye como suma directa de productos tensoriales de otro espacio de Hilbert dado H . Dicho espacio se usa para describir el estado cuántico de un sistema formado por un número variable o indeterminado de partículas.*

Dentro de este espacio vamos a encontrar los estados de Fock, que son los que usaremos en este formalismo de campo cuantizado.

Definition 4.1.3 (Estados de Fock) *Si nos limitamos, por simplicidad, a un sistema con un solo tipo de partícula y un solo modo (con lo que formalmente estamos describiendo un oscilador armónico), un estado de Fock se representa por $|n\rangle$, donde n es un valor entero. Esto significa que hay n cuantos de excitación en ese modo. Así, $|0\rangle$ corresponde al estado fundamental (sin excitación), o estado que representa el vacío cuántico (esto es diferente de 0 ($\langle 0|0\rangle = 1$), que es el vector nulo que no es un estado posible del sistema al no ser un vector unitario)*

Los estados de Fock han de cumplir las siguientes condiciones:

-

$$\hat{a}_{\vec{k}} |0\rangle = 0 \quad \forall \vec{k}$$

Si recordamos al operador $\hat{a}_{\vec{k}}$ lo denominamos operador destrucción, por lo que al vacío no podemos quitarle partículas

-

$$\hat{a}_{\vec{k}}^\dagger |0\rangle = |\vec{k}\rangle$$

Si recordamos al operador $\hat{a}_{\vec{k}}^{\dagger}$ lo denominamos operador creación, si al vacío le aplicamos este operador aparecerá una partícula. De esta forma podemos ver que cualquier estado puede ser construido aplicando el operador creación al estado de vacío $|0\rangle$.

Ahora vamos a contruir la normalización de este conjunto de estados, esto es:

$$\langle \vec{k} | \vec{k}' \rangle = \langle 0 | \hat{a}_{\vec{k}} \hat{a}_{\vec{k}'}^{\dagger} | 0 \rangle = \langle 0 | [\hat{a}_{\vec{k}}, \hat{a}_{\vec{k}'}^{\dagger}] | 0 \rangle + \langle 0 | \hat{a}_{\vec{k}'}^{\dagger} \hat{a}_{\vec{k}} | 0 \rangle = 2E_k (2\pi)^3 \delta(\vec{k} - \vec{k}')$$

Remark 4.1.1 (Normalización de estados con momento bien definido) Como podemos observar la norma de los estados con $\vec{k} = \vec{k}'$ nos da 0, sin embargo podemos redefinir la delta como:

$$\delta(\vec{k}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{\mathbb{R}^3} d\vec{x} e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} \chi(x)$$

si $\chi(x) = 0 \quad \forall x \in \Omega$, es decir, que la función es 0 para cualquier valor de x que no pertenezca a una región del espacio, entonces

$$\delta(0) = \frac{1}{(2\pi)^3} V(\Omega)$$

si el espacio $\Omega \equiv \mathbb{R}^3$ entonces $V(\Omega) = V$

Cuando los momentos están bien definidos $\delta(\vec{k} - \vec{k}') = \delta(0)$ y podemos hacer la normalización así:

$$\langle \vec{k} | \vec{k} \rangle = 2E_k V$$

Una vez obtenida la normalización vamos a construir estados de multiples partículas, empezando por 2:

$$\hat{a}_{\vec{k}_1}^{\dagger} \hat{a}_{\vec{k}_2}^{\dagger} | 0 \rangle = |\vec{k}_1, \vec{k}_2\rangle$$

Esto quiere decir que para crear un estado vamos a multiplicar tantos operadores creación al estado de vacío como partículas haya en el. De esta forma un estado con N partículas es

$$|\vec{k}_1, \vec{k}_2, \dots, \vec{k}_N\rangle = \frac{1}{\sqrt{n!}} \hat{a}_{\vec{k}_1}^{\dagger} \hat{a}_{\vec{k}_2}^{\dagger} \dots \hat{a}_{\vec{k}_N}^{\dagger} | 0 \rangle$$

Tambien podemos tener un estado cualquiera $|\psi\rangle \in \mathcal{F}$ formado por muchos estados diferentes con cada uno diferentes partículas como

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n!}} f(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \dots, \vec{k}_n) \prod_{n=0}^{\infty} \hat{a}_{\vec{k}_n}^{\dagger} | 0 \rangle$$

Obteniendo un estado con la forma

$$|\phi\rangle = |0\rangle + \alpha |\vec{k}_1\rangle + \beta |\vec{k}_1 \vec{k}_2\rangle + \dots$$

además, como

$$[\hat{a}_{\vec{k}}, \hat{a}_{\vec{k}'}^\dagger] = 0 \longrightarrow |\vec{k}_1, \vec{k}_2\rangle = |\vec{k}_2, \vec{k}_1\rangle$$

Es decir, son funciones simétricas y por lo tanto serán lo que llamaremos bosones.

Operadores en el espacio de Fock

Una vez definidos los estados, lo lógico es calcular algunos valores esperados necesarios y ver como se hace. Para ellos calculamos el valor esperado de la energía de vacío como

Operadore Energía

$$\langle 0 | \hat{H}_0 | 0 \rangle = \frac{1}{2} \int d\vec{k} \langle \vec{k} | \vec{k} \rangle = \frac{V}{2} \int d\vec{k} = \infty \quad (4.1)$$

Como vemos la energía de vacío diverge, lo cual no tiene sentido por lo que podemos definir un nuevo Hamiltoniano como

$$\hat{H}'_0 = \hat{H}_0 - \langle 0 | \hat{H}_0 | 0 \rangle \quad (4.2)$$

$$\langle 0 | \hat{H}'_0 | 0 \rangle = 0 \quad (4.3)$$

De esta forma la energía de vacío se anula, lo cual tiene más sentido.

Como ya mencionamos al pasar de las coordenadas clásicas q, p a los operadores \hat{q}, \hat{p} teníamos el problema de que estos operadores no conmutan, por lo que hay muchas formas de obtener \hat{H}_0 , para no tener esa ambigüedad a la hora de obtener el Hamiltoniano definimos el producto normal

Definition 4.1.4 (Producto normal) *El producto normal se define como*

$$:\hat{a}_{\vec{k}} \hat{a}_{\vec{k}}^\dagger := \hat{a}_{\vec{k}}^\dagger \hat{a}_{\vec{k}} \quad (4.4)$$

Basicamente, lo que hace es ordenar los operadores de forma que todos los conjugados se encuentren a la izquierda.

De esta forma podemos definir el Hamiltoniano \hat{H}' como

$$\hat{H}' \equiv: \hat{H}_0 := \int d\vec{k} E_k \hat{a}_{\vec{k}}^\dagger \hat{a}_{\vec{k}} \quad (4.5)$$

En donde encontramos un nuevo operador como multiplicación de 2 operadores, este es el operador número y se define como

Definition 4.1.5 (Operador número)

$$\hat{n}_k = \hat{a}_k^\dagger \hat{a}_k$$

Este operador nos devuelve el número de partículas en un estado.

De esta forma el Hamiltoniano H' es

$$\int d\vec{k} E_k \hat{n}_k \quad (4.7)$$

Una vez definido el operador número, es conveniente definir el operador número total de partículas

Definition 4.1.6 (Operador número total de partículas)

Este operador nos devuelve el número total de partículas en un estado.

$$\hat{N} |0\rangle = 0 \hat{N} |\vec{k}\rangle = 1 |\vec{k}\rangle \hat{N} |\vec{k}_1 \vec{k}_2\rangle = 2 |\vec{k}_1 \vec{k}_2\rangle \quad (4.9)$$

Hay que tener en cuenta que en el caso de $|\psi\rangle = \alpha |\vec{k}\rangle + \beta |\vec{k}' \vec{k}''\rangle$ no tenemos un autoestado, por lo que el número total de partículas no estará bien definido y podrá dar números que no son enteros.

Dado que la construcción del producto normal nos pone el operador aniquilación en primer lugar obtenemos que el valor esperado de la energía de vacío es

$$\langle 0 | \hat{H}' | 0 \rangle = 0 \quad (4.10)$$

Otros resultados de este Hamiltoniano son:

- $\hat{H}' |0\rangle$
- $\hat{H}' |\vec{k}\rangle = E_k |\vec{k}\rangle$
- $\hat{H}' |\vec{k}_1 \vec{k}_2\rangle = (E_{k_1} + E_{k_2}) |\vec{k}_1 \vec{k}_2\rangle$

Operador momento lineal También se puede definir el operador momento lineal mediante el producto normal como

$$: \hat{P} := \int d\vec{k} \hat{n}_k \vec{k} \quad (4.11)$$

Operador campo El operador campo conjugado crea una partícula y nos devuelve la posición de esa partícula en el campo, es decir,

$$\hat{\Phi}^\dagger(\vec{x}, 0)|0\rangle = |\psi\rangle = |\vec{x}\rangle \quad (4.12)$$

Demostración. Esto se puede ver como

$$\langle \vec{k} | \psi \rangle = e^{-ikx} \quad (4.13)$$

$$\langle \vec{k} | \vec{x} \rangle = e^{-ikx} \quad (4.14)$$

$$(4.15)$$

Y como ambas cosas son iguales, podemos sustituir. \square

4.2. Propagador del campo escalar libre

El propagador de un campo se define como:

$$\textbf{Definition 4.2.1} \quad G(x, y) = \langle 0 | T(\hat{\phi}(x), \hat{\phi}(y)) | 0 \rangle \quad (4.16)$$

Donde $\hat{\phi}(x)$ es el campo escalar libre en el punto x y $T(\hat{\phi}(x), \hat{\phi}(y))$ es el operador de ordenación temporal, el cual ordena los tiempos de mayor a menor, es decir,

$$\begin{aligned} & \hat{\phi}(x), \hat{\phi}(y) \quad \text{si } x^0 > y^0 \\ & \hat{\phi}(y), \hat{\phi}(x) \quad \text{si } x^0 < y^0 \end{aligned}$$

Ahora podemos ver que tenemos 2 casos:

1. $x^0 > y^0$

En este caso tenemos que el propagador es

$$G(x, y) = \langle 0 | \hat{\phi}(x), \hat{\phi}(y) | 0 \rangle = \int d\tilde{k} e^{-ikx} \int d\tilde{k}' e^{ik'y} \langle \vec{k} | \vec{k}' \rangle \quad (4.17)$$

$$= \int d\tilde{k} e^{-ik(x-y)} \quad (4.18)$$

2. $x^0 < y^0$

De forma análoga tenemos que el propagador es

$$\begin{aligned} G(x, y) &= \langle 0 | \hat{\phi}(y), \hat{\phi}(x) | 0 \rangle = \int d\tilde{k} e^{-iky} \int d\tilde{k}' e^{ik'x} \langle \vec{k} | \vec{k}' \rangle \\ &= \int d\tilde{k} e^{-ik(y-x)} \end{aligned}$$

El propagador del campo escalar libre es una función que realmente se comporta como una distribución de probabilidad ya que permite el uso de deltas de Dirac.

Podemos definir el propagador de forma general como

$$\textbf{Definition 4.2.2 (Propagador General I)} \quad G(x, y) = \theta(x^0 - y^0) \int d\tilde{k} e^{-ik(x-y)} + \theta(y^0 - x^0) \int d\tilde{k} e^{-ik(y-x)} \quad (4.19)$$

Aunque esta definición no es muy cómoda, podemos definirla de forma más sencilla haciendo uso del siguiente teorema:

Theorem 4.2.1
$$G(x, y) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} i \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{e^{-ik(x-y)}}{k^2 - m^2 + i\epsilon} \quad (4.20)$$

Primero se hace la integral y luego se hace el límite

Demostración. A continuación demostraremos este teorema para el caso $x^0 > y^0$ y para el caso $x^0 < y^0$ se procederá de manera análoga.

□

Cuantización canónica del campo fermiónico libre

5

Todo esto lo he sacado del [2]

5.1. Ecuación de Klein Gordon

5.2. Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos

5.3. Ecuación de Dirac

5.4. El límite no relativista de la ecuación de Dirac

5.5. Soluciones a la ecuación de Dirac

5.5.1. Ondas con energía positiva

5.5.2. Ondas con energía negativa

5.6. Fermiones quirales

5.1	Ecuación de Klein Gordon	45
5.2	Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	45
5.3	Ecuación de Dirac	45
5.4	El límite no relativista de la ecuación de Dirac . . .	45
5.5	Soluciones a la ecuación de Dirac	45
5.5.1	Ondas con energía positiva	45
5.5.2	Ondas con energía negativa	45
5.6	Fermiones quirales	45

Procesos de interacción: Matriz S, secciones eficaces y vidas medias

6

Todo esto lo he sacado del [2]

6.1. Ecuación de Klein Gordon

6.2. Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos

6.3. Ecuación de Dirac

6.4. El límite no relativista de la ecuación de Dirac

6.5. Soluciones a la ecuación de Dirac

6.5.1. Ondas con energía positiva

6.5.2. Ondas con energía negativa

6.6. Fermiones quirales

6.1	Ecuación de Klein Gordon	47
6.2	Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	47
6.3	Ecuación de Dirac	47
6.4	El límite no relativista de la ecuación de Dirac . . .	47
6.5	Soluciones a la ecuación de Dirac	47
6.5.1	Ondas con energía positiva	47
6.5.2	Ondas con energía negativa	47
6.6	Fermiones quirales	47

Cuantización del campo escalar libre

7

Todo esto lo he sacado del [2]

7.1. Ecuación de Klein Gordon

7.2. Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos

7.3. Ecuación de Dirac

7.4. El límite no relativista de la ecuación de Dirac

7.5. Soluciones a la ecuación de Dirac

7.5.1. Ondas con energía positiva

7.5.2. Ondas con energía negativa

7.6. Fermiones quirales

7.1	Ecuación de Klein Gordon	49
7.2	Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	49
7.3	Ecuación de Dirac	49
7.4	El límite no relativista de la ecuación de Dirac . . .	49
7.5	Soluciones a la ecuación de Dirac	49
7.5.1	Ondas con energía positiva	49
7.5.2	Ondas con energía negativa	49
7.6	Fermiones quirales	49

Todo esto lo he sacado del [2]

8.1. Ecuación de Klein Gordon

8.2. Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos

8.3. Ecuación de Dirac

8.4. El límite no relativista de la ecuación de Dirac

8.5. Soluciones a la ecuación de Dirac

8.5.1. Ondas con energía positiva

8.5.2. Ondas con energía negativa

8.6. Fermiones quirales

8.1	Ecuación de Klein Gordon	51
8.2	Ecuación de Klein-Gordon en presencia de campos electromagnéticos	51
8.3	Ecuación de Dirac	51
8.4	El límite no relativista de la ecuación de Dirac . . .	51
8.5	Soluciones a la ecuación de Dirac	51
8.5.1	Ondas con energía positiva	51
8.5.2	Ondas con energía negativa	51
8.6	Fermiones quirales	51

Bibliography

Aquí las referencias que ha usado Dobado en clase.

- [1] Michele Maggiore. «A Modern Introduction to Quantum Field Theory». En: Oxford University Press, 2005. Cap. Tema 2 (vid. pág. 3).
- [2] Antonio Dobado. *Notas tomadas de la pizarra durante la clase*. Clase de campos cuánticos, Universidad Complutense de Madrid. 2024 (vid. págs. 23, 31, 35, 45, 47, 49, 51).
- [3] Michael E. Peskin y Daniel V. Schroeder. *An Introduction to Quantum Field Theory*. Boulder, CO: Westview Press, 1995 (vid. pág. 25).