

Công trình được hoàn thành tại:

Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế.

Người hướng dẫn khoa học:

1. GS. Phạm Quang Hưng, Đại học Virginia, Hoa Kỳ
2. TS. Võ Tinh, Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế

Phản biện 1: PGS. TS. Phan Hồng Liên, Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Phản biện 2: PGS. TS. Đặng Văn Soa, Trường Đại học Thủ đô Hà Nội.

Phản biện 3: PGS. TS. Lê Viết Hòa, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

Luận án đã được đăng ký và cấp số đăng ký luận án tại

Đại học Huế tại: Đại học Huế

Có thể tìm hiểu luận án tại Thư viện Quốc gia, Học viện Công nghệ Việt Nam, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế

Batch PDF Me

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả, đồ thị... được nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Demo Version - Select.Pdf SDK Tác giả luận án

Nguyễn Như Lê

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành và sâu sắc nhất đến Giáo sư Phạm Quang Hưng, Tiến sĩ Võ Tình, những người thầy mà với tấm lòng nhiệt thành và chu đáo, với sự quan tâm thường xuyên và tận tụy, đã giúp đỡ tôi trong quá trình nghiên cứu và hướng dẫn tôi hoàn thành luận án này.

Tôi xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ và đóng góp ý kiến quý báu của các đồng nghiệp trong Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm Huế. Để hoàn thành luận án này, tôi đã nhận được sự động viên, khuyến khích và tạo điều kiện của lãnh đạo Đại học Huế, Trường Đại học Sư phạm - Đại học Huế, của bạn bè đồng nghiệp. Tự đáy lòng mình tôi xin gửi lòng tri ân đến tất cả.

Demo Version - Select.Pdf SDK

Huế, tháng 2-2016

Nguyễn Như Lê

MỤC LỤC

| | |
|---|-----|
| Mục lục | iii |
| Danh mục các từ viết tắt | vii |
| Bảng đối chiếu thuật ngữ Anh-Việt | ix |
| Danh mục các hình vẽ, đồ thị | x |
| MỞ ĐẦU | 1 |
| Chương 1. MỘT SỐ KIẾN THỨC CƠ SỞ | 11 |
| 1.1 Lý thuyết gauge | 11 |
| 1.1.1 Nguyên lý gauge | 11 |
| 1.1.2 Phá vỡ đối xứng tự phát | 17 |
| 1.1.3 Cơ chế Higgs | 24 |
| 1.2 SM của tương tác điện yếu | 26 |
| 1.2.1 Nguyên lý chuẩn thiết lập lý thuyết gauge | 27 |
| 1.2.2 Các fermion nghịch và thuận | 28 |
| 1.2.3 Chọn nhóm gauge | 30 |
| 1.2.4 Cơ chế Higgs | 35 |
| 1.2.5 Khối lượng fermion | 38 |
| 1.2.6 Tham số ρ | 39 |
| 1.2.7 Lagrangian của SM cho tương tác điện yếu | 39 |
| 1.3 Kết luận chương 1 | 42 |
| Chương 2. MÔ HÌNH EWν_R | 43 |
| 2.1 Hạt neutrino | 43 |
| 2.1.1 Sơ lược về hạt neutrino | 43 |
| 2.1.2 Sự dao động neutrino | 45 |
| 2.2 Khối lượng neutrino | 49 |

| | | |
|--|--|----|
| 2.2.1 | Khối lượng Dirac | 49 |
| 2.2.2 | Khối lượng Majorana | 49 |
| 2.3 | Cơ chế see-saw | 50 |
| 2.3.1 | Cơ chế see-saw loại I | 51 |
| 2.3.2 | Cơ chế see-saw loại II | 52 |
| 2.3.3 | Cơ chế see-saw loại III | 53 |
| 2.4 | Mô hình đối xứng thuận-nghịch | 53 |
| 2.5 | Mô hình $EW\nu_R$ | 55 |
| 2.5.1 | Thành phần fermion | 56 |
| 2.5.2 | Thành phần Higgs | 57 |
| 2.5.3 | Tương tác giữa trường fermion và trường Higgs | 60 |
| 2.5.4 | Điều kiện ràng buộc chính xác điện yếu trong mô hình $EW\nu_R$ | 60 |
| 2.6 | Kết luận chương 2 | 64 |
| Demo Version - Select Pdf SDK | | |
| Chương 3. TRẠNG THÁI NGỪNG TỤ TRONG MÔ HÌNH | | |
| | $EW\nu_R$ | 66 |
| 3.1 | Lý thuyết phi tương đối tính cho trạng thái ngưng tụ trong tương tác Yukawa | 66 |
| 3.1.1 | Thế Yukawa | 66 |
| 3.1.2 | Trạng thái ngưng tụ | 67 |
| 3.2 | Phương pháp sử dụng phương trình SD cho các trạng thái ngưng tụ của fermion trong mô hình $EW\nu_R$ [77] | 70 |
| 3.2.1 | Nghiệm của phương trình SD cho năng lượng riêng của neutrino thuận và quark gương [77] | 72 |
| 3.2.2 | Thang năng lượng của trạng thái ngưng tụ | 75 |
| 3.2.3 | Thang năng lượng cắt | 76 |

| | | |
|--|--|-----|
| 3.3 | Hàm β một vòng của các hằng số liên kết Yukawa của fermion trong mô hình $EW\nu_R$ [83] | 77 |
| 3.3.1 | Khái niệm hàm β của hằng số liên kết | 77 |
| 3.3.2 | Hàm β_{g_M} một vòng của hằng số liên kết Yukawa g_M giữa neutrino thuận và tam tuyến Higgs $\tilde{\chi}$ | 79 |
| 3.3.3 | Hàm $\beta_{g_{qM}}$ một vòng của hằng số liên kết Yukawa g_{qM} giữa quark gương và lưỡng tuyến Higgs Φ_{2M} | 81 |
| 3.3.4 | Hàm $\beta_{g_{eM}}$ một vòng của hằng số liên kết Yukawa g_{eM} giữa lepton điện gương và lưỡng tuyến Higgs Φ_{2M} | 84 |
| 3.3.5 | Kết quả tính số | 86 |
| 3.4 | Kết luận chương 3 | 88 |
| Chương 4. PHÁ VỠ ĐỐI XỨNG ĐIỆN YẾU ĐỘNG LỰC | | |
| | HỌC TRONG MÔ HÌNH $EW\nu_R$ | 91 |
| 4.1 | Demo Version - Select.Pdf SDK Phá vỡ đối xứng điện yếu động lực học | 91 |
| 4.1.1 | Lý do nghiên cứu DEWSB | 91 |
| 4.1.2 | Thang năng lượng của EWSB | 93 |
| 4.2 | Phá vỡ đối xứng điện yếu động lực học trong mô hình $EW\nu_R$ [84] | 95 |
| 4.3 | Khối lượng của hạt Higgs | 100 |
| 4.3.1 | Phổ khối lượng của các vô hướng | 100 |
| 4.3.2 | Boson Higgs 125-GeV và hạt Higgs trong mô hình $EW\nu_R$ | 102 |
| 4.4 | Khối lượng của neutrino | 104 |
| 4.4.1 | Cơ chế see-saw trong mô hình $EW\nu_R$ | 104 |
| 4.4.2 | VEV của đơn tuyến Higgs ϕ_S [84] | 107 |
| 4.5 | Kết luận chương 4 | 109 |

| | |
|---|-----|
| KẾT LUẬN CHUNG | 112 |
| CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CÔNG BỐ LIÊN QUAN | |
| ĐẾN LUẬN VĂN | 114 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO | 114 |
| PHẦN PHỤ LỤC | P.1 |

Demo Version - Select.Pdf SDK

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

| Viết tắt | Tiếng Việt |
|----------|--|
| SM | Mô hình chuẩn |
| PMNS | Pontecorno-Maki-Nakagawa-Sakata |
| RENO | Thí nghiệm phản ứng của dao động neutrino |
| EW | Điện yếu |
| GUT | Lý thuyết thống nhất lớn |
| LHC | Máy gia tốc hadron lớn |
| VEV | Giá trị kỳ vọng chân không |
| ILC | Máy gia tốc tuyến tính quốc tế |
| DEWSB | Phá vỡ đối xứng điện yếu động lực |
| EWSB | Phá vỡ đối xứng điện yếu |
| SUSY | Siêu đối xứng |
| LH | Higgs nhỏ |
| TH | Higgs song sinh |
| LED | Chiều thêm vào lớn |
| TC | Phim màu |
| ETC | Mở rộng phim màu |
| NJL | Nambu-Jona-Lassinio |
| SD | Schwinger-Dyson |
| SSB | Phá vỡ đối xứng tự phát |
| QED | Điện động lực học lượng tử |
| QCD | Sắc động lực học lượng tử |
| DONUT | Thí nghiệm quan sát trực tiếp neutrino tau |
| NH | Phân bậc thông thường |
| IH | Phân bậc nghịch |

| Viết tắt | Tiếng Việt |
|------------|---|
| LSND | Máy dò neutrino sử dụng chất lỏng đặc biệt |
| KARMEN | Thí nghiệm neutrino với năng lượng trung bình Rutherford ở Karlsruhe |
| CHOOZ | Một thành phố của Pháp |
| NOMAD | Máy dò dao động neutrino bằng từ |
| LR | Nghịch thuận |
| CMS | Một trạm thí nghiệm trong hệ thống máy LHC |
| MF | Fermion gương |
| tot | Tổng cộng |
| cm | Khối tâm |
| RGE | Phương trình nhóm tái chuẩn hóa |
| BCS | Bardeen-Cooper-Schrieffer |
| $S\chi SB$ | Phá vỡ đối xứng Spontaneous phát |
| ATLAS | Một trạm thí nghiệm trong hệ thống máy LHC |
| cond | Ngưng tụ |
| vh | Vô hướng |
| sym | Đối xứng |
| sb | Phá vỡ đối xứng |
| BR | Tỉ lệ của kênh phân rã |

BẢNG ĐỐI CHIẾU THUẬT NGỮ ANH-VIỆT

| Tiếng Anh | Tiếng Việt |
|---|---------------------------------------|
| Standard model | Mô hình chuẩn |
| Electroweak | Điện yếu |
| Vacuum expectation value | Giá trị kỳ vọng chân không |
| General unified theory | Lý thuyết thống nhất lớn |
| Dynamical electroweak symmetry breaking | Phá vỡ đối xứng điện yếu động lực học |
| Electroweak symmetry breaking | Phá vỡ đối xứng điện yếu |
| Spontaneous symmetry breaking | Phá vỡ đối xứng tự phát |
| Left-right | Nghịch-thuận |
| Renormalization group equation | Phương trình nhóm tái chuẩn hóa |
| Right-handed | Thuận |
| Left-handed | Nghịch |
| Sterile | Trơ |
| Condensate | Ngưng tụ |
| Scale invariance | Bất biến thang |
| Charge current | Dòng mang điện |
| Neutral current | Dòng trung hòa |
| Gauge invariance | Bất biến gauge |
| Quantum electrodynamics | Điện động lực học lượng tử |
| Quantum chromodynamics | Sắc động lực học lượng tử |

| Tiếng Anh | Tiếng Việt |
|--------------------|------------------------|
| Branching ratio | Tỉ lệ của kênh phân rã |
| Momentum cutoff | Xung lượng cắt |
| Energy cutoff | Năng lượng cắt |
| Normal hierarchy | Phân bậc thông thường |
| Inverted hierarchy | Phân bậc nghịch |
| Hierarchy | Phân bậc |

Demo Version - Select.Pdf SDK

Danh sách hình vẽ

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Sự định hướng của spin trong (a) pha thuận từ và (b) pha sắt từ. | 18 |
| 1.2 | Thế vô hướng được cho bởi phương trình (1.35) với hai trường hợp: (a) $\mu^2 > 0$ và (b) $\mu^2 < 0$ | 20 |
| 2.3 | Quá trình phân rã beta theo lý thuyết của E. Fermi. . . | 44 |
| 2.4 | \tilde{S}_S và \tilde{S}_{MF} trong hai điều kiện ràng buộc 1σ và 2σ [18]. . | 63 |
| 3.5 | Giản đồ Feynman đóng góp vào vế phải của phương trình SD cho năng lượng riêng của neutrino thuận Σ_{ν_R} [77]. . . | 73 |
| 3.6 | Giản đồ Feynman đóng góp vào vế phải của phương trình SD cho năng lượng riêng của quark gương Σ_{ν_R} [77]. . . | 74 |
| 3.7 | Ví dụ điển hình cho hàm β trong phương trình Callan-Symanzik có điểm cố định bên tử ngoại là λ_1 và điểm cố định bên hồng ngoại là gốc tọa độ và λ_2 . Chiều của mũi tên biểu diễn xu hướng biến đổi của hằng số liên kết khi xung lượng tăng. | 78 |
| 3.8 | Đóng góp của hiệu chỉnh đỉnh vào hàm β_{g_M} một vòng của hằng số liên kết g_M | 80 |
| 3.9 | Đóng góp năng lượng riêng của fermion vào hàm β_{g_M} một vòng của hằng số liên kết g_M | 81 |
| 3.10 | Đóng góp của năng lượng riêng vô hướng vào hàm β_{g_M} một vòng của g_M | 82 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3.11 | Đóng góp của hiệu chỉnh đỉnh vào hàm $\beta_{g_{q^M}}$ một vòng của hằng số liên kết g_{q^M} | 82 |
| 3.12 | Đóng góp năng lượng riêng của fermion vào hàm $\beta_{g_{q^M}}$ một vòng của hằng số liên kết g_{q^M} | 83 |
| 3.13 | Đóng góp của năng lượng riêng vô hướng vào hàm $\beta_{g_{q^M}}$ một vòng của g_{q^M} | 84 |
| 3.14 | Đóng góp của hiệu chỉnh đỉnh vào hàm $\beta_{g_{e^M}}$ một vòng của hằng số liên kết g_{e^M} | 84 |
| 3.15 | Đóng góp năng lượng riêng của fermion vào hàm $\beta_{g_{e^M}}$ một vòng của hằng số liên kết g_{e^M} | 85 |
| 3.16 | Đóng góp của năng lượng riêng vô hướng vào hàm $\beta_{g_{e^M}}$ một vòng của g_{e^M} | 86 |
| 3.17 | Sự biến thiên của các hằng số liên kết Yukawa với các giá trị khối lượng <i>naive</i> ban đầu của ν_R, e^M và q^M lần lượt bằng 200 GeV, 102 GeV và 202 GeV. Mũi tên màu xanh da trời và màu xanh lục chỉ các giá trị năng lượng tại đó tam tuyến Higgs χ và lưỡng tuyến Higgs Φ_{2M} tương ứng nhận VEV [84]. | 87 |
| 4.18 | Giản đồ tán xạ $W_L W_L$ | 95 |
| 4.19 | Giản đồ tạo khối lượng cho (a) χ^0 , (b) ϕ_{2M}^0 [84]. | 97 |
| 4.20 | Giản đồ tạo khối lượng cho (a) ξ^0 , (b) ϕ_2^0 [84]. | 98 |
| 4.21 | So sánh cường độ tín hiệu $\mu_{EW\nu_R} \left(\tilde{H} \rightarrow \gamma\gamma, W^+W^-, ZZ, b\bar{b}, \tau\bar{\tau} \right)$ của mô hình $EW\nu_R$ trong trường hợp $\tilde{H} \sim H_1^0$ với cường độ tín hiệu được đo bởi CMS [19]. | 103 |
| 4.22 | Giản đồ tạo VEV cho ϕ_S : (a) từ năng lượng riêng của neutrino thuận, (b) từ năng lượng riêng của quark gương [84]. | 108 |

| | | |
|----|--|------|
| 23 | Hàm truyền và đỉnh tương tác trong lý thuyết $\lambda\phi^4$ | P.4 |
| 24 | Hàm truyền là tổng của các hàm năng lượng riêng 1PI. | P.5 |
| 25 | Giản đồ năng lượng riêng. | P.6 |
| 26 | Một số giản đồ 1PI phân kỳ một vòng trong thuyết $\lambda\phi^4$ | P.6 |
| 27 | Một số giản đồ 1PI phân kỳ một vòng trong thuyết $\lambda\phi^4$ | P.12 |
| 28 | Đóng góp của hiệu chỉnh đỉnh vào hàm β một vòng của hằng số liên kết h_i | P.23 |
| 29 | Đóng góp năng lượng riêng của fermion vào hàm β_{g_M} một vòng của hằng số liên kết g_M | P.24 |
| 30 | Đóng góp năng lượng riêng vô hướng vào hàm β_{g_M} một vòng của hằng số liên kết g_M | P.25 |

Demo Version - Select.Pdf SDK

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Vật lý hạt cơ bản nghiên cứu các hạt sơ cấp chứa trong vật chất và bức xạ cùng với những tương tác giữa chúng. Vật lý hạt cơ bản còn được gọi là vật lý năng lượng cao vì rất nhiều hạt trong số đó không xuất hiện ở điều kiện môi trường tự nhiên mà chỉ được tạo ra trong các tia vũ trụ, các phản ứng hạt nhân và trong các máy gia tốc. Vật lý hạt cơ bản hiện nay là mũi nhọn của vật lý học hiện đại. Những ứng dụng của nó không chỉ thể hiện trong công nghệ cao ngày nay hay trong đời sống hằng ngày mà còn có vai trò rất lớn trong vật lý thiên văn, là lời giải cho nhiều bài toán về bản chất của vũ trụ, không gian và thời gian.

Ý tưởng vật chất được tạo bởi các hạt cơ bản đã xuất hiện từ thế kỷ thứ 6 trước công nguyên. Thuyết nguyên tử đã được truyền bá bởi những triết gia người Hy Lạp. Mặc dù từ thế kỷ thứ 17, I. Newton đã chỉ ra rằng vật chất được tạo bởi các hạt, song mãi đến năm 1802, J. Dalton mới chứng minh được mọi vật chất đều được cấu tạo bởi các hạt cực nhỏ, được gọi là các nguyên tử. Năm 1869, bảng tuần hoàn các nguyên tố hóa học của D. I. Mendeleev đã được xây dựng và củng cố lý thuyết trên. Vài thập niên sau, khi J. J. Thomson (1897) phát hiện ra hạt electron, E. Rutherford đặt tên hạt nhân của nguyên tử nhỏ nhất là proton và hạt neutron được phát hiện bởi J. Chadwick (1932) thì lý thuyết về cấu tạo của nguyên tử lần đầu tiên được hình thành. Các hạt cấu trúc của lý thuyết này bao gồm electron, proton và neutron. Thế kỷ 20 chứng kiến sự bùng nổ của vật lý hạt, đỉnh điểm là trong những năm 1950 và 1960, một số lượng lớn các hạt được tìm ra bởi các thí nghiệm phân rã hạt. Năm 1984, nhà vật lý người Ý, C. Rubia với việc tìm ra

quark đã chứng minh lý thuyết đối xứng Unitar trong hạt cơ bản là đúng đắn. Nghĩa là, vũ trụ được cấu tạo từ sáu hạt quark (u, d, c, s, t, b) và sáu hạt lepton ($e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$), được chia đều thành ba thế hệ [1]. Các fermion này liên kết với nhau nhờ bốn tương tác cơ bản bao gồm tương tác hấp dẫn, tương tác điện từ, tương tác yếu và tương tác mạnh. Bốn tương tác này được thực hiện thông qua hạt truyền tương tác là các boson, graviton cho hấp dẫn, photon ảo cho điện từ, ba boson trung gian cho tương tác yếu và tám gluon cho tương tác mạnh. Các hạt cấu trúc và hạt truyền tương tác này đã được tìm thấy trong máy gia tốc, trừ graviton. Việc tìm hiểu bản chất của vũ trụ qui về tìm hiểu các đặc trưng vật lý của các hạt cấu trúc và các hạt truyền tương tác thông qua mô hình chuẩn (SM)[2]. SM cho tương tác điện yếu là lý thuyết trường tái chuẩn hóa gần như phù hợp với các số liệu thực nghiệm, tiên đoán đúng sự tồn tại và dạng của dòng trung hòa yếu [3, 4], sự tồn tại và khối lượng của các boson truyền tương tác yếu W và Z [5, 6] và các hạt quark, trong đó thành công mới nhất là sự phát hiện ra hạt quark đỉnh [7]. Mặc dù SM được công nhận là đúng thông qua những thí nghiệm kiểm chứng hiện đại nhất ngày nay, tuy nhiên nó vẫn chưa hoàn chỉnh để có thể mô tả tự nhiên một cách trọn vẹn. SM còn bộc lộ nhiều thiếu sót cả về mặt lý thuyết và thực nghiệm. Đặc biệt, hiện tượng dao động neutrino được phát hiện bởi phòng thí nghiệm Super-Kamiokande [8] là một trong những bằng chứng thực nghiệm tiêu biểu chứng tỏ sự cần thiết phải mở rộng SM. Nguyên nhân tại sao neutrino có khối lượng và rất bé là vấn đề các mô hình mở rộng SM cần nghiên cứu.

Trên thực tế, vật lý neutrino đã có những thành công nhất định từ phép đo chính xác các góc trộn trong ma trận U_{PMNS} của neutrino. Cụ thể, giá trị của góc θ_{13} được xác định tương đối lớn tại thí nghiệm

Daya Bay [9] và thí nghiệm RENO [10] đã xác nhận kết quả này. Tuy nhiên, những thành tựu trong vật lý neutrino này chưa thể xác định được neutrino là hạt Majorana hay hạt Dirac cùng với nguồn gốc khối lượng bé của nó. Neutrino có khối lượng rất bé so với các fermion khác, có bậc vào cỡ $\mathcal{O}(\text{eV})$. Cách đơn giản để tạo khối lượng cho neutrino là thêm vào SM một neutrino thuận đơn tuyến, tạo cho nó khối lượng Dirac [11]. Tuy nhiên, để giải thích khối lượng của neutrino, giá trị của hằng số liên kết Yukawa trong mô hình này rất bé, vào bậc 10^{-11} . Tiếp theo, cơ chế see-saw được đề xuất [12], trong đó neutrino thuận (hay còn được gọi là neutrino phân cực phải) là đơn tuyến của $SU(2)_L \times U(1)_Y$. Lagrangian của neutrino chứa số hạng khối lượng Majorana $M_R \nu_R^T \sigma_2 \nu_R$ và số hạng khối lượng Dirac $m_D \bar{\nu}_L \nu_R + \text{h.c.}$. Khi $M_R \gg m_D$, ma trận khối lượng của neutrino có hai trị riêng tương ứng là $\frac{m_D^2}{M_R}$ và M_R . Trong phiên bản đơn giản nhất của chế see-saw, ν_R là các đơn tuyến của SM nên chúng trở và $m_D \propto (\Lambda_{EW})$, $M_R \propto \mathcal{O}(\Lambda_{GUT})$. Như vậy, mặc dù cơ chế see-saw giải thích được tại sao neutrino có khối lượng bé nhưng dễ thấy rằng, ν_R trong mô hình này trở và không thể dò tìm được trong thực nghiệm. Để khắc phục những nhược điểm này, Phạm Quang Hưng đã đề xuất mô hình khối lượng neutrino thuận thang điện yếu (EW ν_R) với nhóm gauge tương ứng là $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ [13], trong đó ν_R nằm trong lưỡng tuyến $SU(2)_W$ và hạt song hành với nó là lepton mang điện gương. Với đặc trưng này, mô hình EW ν_R có hai ưu điểm nổi bật. Thứ nhất, ν_R không trở và có thể tương tác với các boson W và Z . Thứ hai, vì ν_R là thành viên của lưỡng tuyến nên có thể thu được số hạng khối lượng Majorana của neutrino khi tam tuyến Higgs nhận giá trị kỳ vọng chân không (VEV), phá vỡ đối xứng $SU(2)_W \times U(1)_Y$. Theo đó, khối lượng M_R có bậc vào cỡ thang điện yếu, $M_R \propto \mathcal{O}(\Lambda_{EW})$. Với đặc tính

này ν_R và bản chất Majorana của neutrino có thể được dò tìm và kiểm chứng trong máy gia tốc hadron lớn (LHC) hoặc máy gia tốc tuyến tính quốc tế (ILC) trong tương lai.

Phiên bản đầu tiên của mô hình $EW\nu_R$ [13] đã được đề xuất vào năm 2007, trong đó chú trọng đến việc giải thích khối lượng nhỏ của neutrino với neutrino thuận có khối lượng vào bậc của thang điện yếu. Những năm tiếp theo, một số vấn đề quan trọng của mô hình như các quá trình vi phạm hương, hệ quả của sự thống nhất của Pati-Salam của neutrino hoạt động, thành phần Higgs của mô hình đã được nghiên cứu chi tiết [14–16]. Thông qua dữ liệu điện yếu chính xác và việc khám phá ra hạt boson Higgs khối lượng 125 GeV [17], mô hình này được cộng đồng các nhà vật lý hạt đánh giá rất cao và khẳng định sự tồn tại của nó trong hệ thống lý thuyết của vật lý hạt hiện đại. Cụ thể, kết quả nghiên cứu được trình bày chi tiết trong [18] đã chứng tỏ mô hình $EW\nu_R$ thỏa mãn số liệu thực nghiệm điện yếu chính xác dựa trên sự tồn tại của các tam tuyến Higgs. Phần đóng góp dương vào thông số S và T từ các fermion gương và neutrino thuận triệt tiêu với phần đóng góp đến từ các tam tuyến Higgs. Thêm vào đó, phiên bản mở rộng mô hình $EW\nu_R$ chứa lưỡng tuyến Higgs thứ hai [19] thể hiện sự phù hợp của lý thuyết với dữ liệu thực nghiệm của hạt boson Higgs 125-GeV. Những nghiên cứu liên quan đến phiên bản mở rộng của mô hình $EW\nu_R$ tiếp tục được xuất bản như khối lượng neutrino và ma trận U_{PMNS} , các quá trình phân rã vi phạm hương lepton và sự dò tìm quark gương tại LHC [20–22].

Như vậy, việc xây dựng một lý thuyết đầy đủ cho mô hình $EW\nu_R$ đóng vai trò cấp thiết và quan trọng, góp phần giải thích các hiện tượng trong lĩnh vực vật lý năng lượng cao. Trong phiên bản đầu tiên của mô hình $EW\nu_R$, cơ chế see-saw được đưa ra để giải thích khối lượng bé của

neutrino. Tuy nhiên, lý thuyết về sự phá vỡ đối xứng điện yếu động lực (DEWSB) để các trường Higgs nhận VEV chưa được đề cập đến. Các tính chất của neutrino thuận và vai trò của nó trong cơ chế tạo khối lượng này chưa được làm rõ. Với các vấn đề còn bỏ ngỏ ở trên, tôi chọn tài nghiên cứu *“Một số tính chất của neutrino thuận thang điện yếu”* làm đề tài luận án tiến sĩ của mình.

2. Lịch sử nghiên cứu vấn đề

Trên thực tế, việc không giải thích được bản chất của phá vỡ đối xứng điện yếu (EWSB) mà hạt Higgs với khối lượng chưa biết đóng vai trò trung tâm là một trong những hạn chế của SM. Đối xứng của SM bị phá vỡ một cách tự phát bởi thế Higgs có dạng $V(\Phi^+\Phi) = \mu^2\Phi^+\Phi + \lambda(\Phi^+\Phi)^2$, trong đó Φ là một trường vô hướng cơ sở. Điều này đã dẫn đến nhiều vấn đề chưa được giải đáp như tại sao μ^2 phải có giá trị âm hay vấn đề về phân bậc, tại sao thang điện yếu $v \propto \mathcal{O}(\text{GeV})$ lại bé hơn rất nhiều lần so với thang Planck, $M_P \propto \mathcal{O}(10^{19} \text{ GeV})$. Cách phổ biến giải quyết vấn đề này là sử dụng sự triệt tiêu giữa các đóng góp phân kỳ bậc bốn của fermion và của boson đã được đề xuất trong một số mô hình như mô hình Siêu đối xứng (SUSY), Higgs nhỏ (LH), Higgs song sinh (TH), ... [23]. Một ý tưởng khác có thể được tìm thấy trong các mô hình Chiều thêm vào lớn (LED), mô hình phi Higgs [23], trong đó các chiều thêm vào đóng vai trò quan trọng trong việc giải quyết vấn đề phân bậc. Ngoài ra, cơ chế DEWSB, trong đó các trạng thái ngưng tụ của fermion sẽ thay thế cho trường Higgs cơ bản được rất nhiều nhà vật lý hạt quan tâm và sử dụng để giải quyết vấn đề này. Nhiều mô hình chẳng hạn như mô hình Higgs đa hợp, phim màu (TC), mở rộng phim màu (ETC), top-color [23], ..., trong đó có mô hình $EW\nu_R$ đã chọn

hướng giải quyết này.

Tiên phong trong hướng nghiên cứu này là các mô hình xem trạng thái ngưng tụ của quark đỉnh là tác nhân của DEWSB [24] và mô hình Nambu-Jona-Lassinio (NJL) [25] khi được tổng quát hóa. Tuy nhiên, để hình thành trạng thái ngưng tụ cần fermion có khối lượng lớn hơn m_t . Bên cạnh đó, các mô hình ngưng tụ quark (hay các mô hình NJL, trong đó các fermion ngưng tụ có khối lượng vào bậc của $\mathcal{O}(m_t)$) và thang cắt của các tương tác mạnh mới có bậc lớn hơn nhiều so với m_t , nghĩa là vào cỡ $\mathcal{O}(10^{17} \text{ GeV})$, theo đó, dẫn đến sự hiệu chỉnh bé trong cơ chế DEWSB. Những khó khăn này của các mô hình ngưng tụ quark đỉnh là động lực cho việc tìm hiểu mô hình mới phù hợp hơn [26–34].

Công trình nghiên cứu [32] đề xuất mô hình, trong đó các trạng thái ngưng tụ của fermion nặng thế hệ thứ tư là tác nhân của DEWSB. Thế hệ fermion thứ tư sẽ ngưng tụ khi tương tác với một lưỡng tuyến Higgs cơ sở được giả thiết không khối lượng và không có VEV ở mức cây, nghĩa là, không chứa số hạng $\mu^2 \phi^+ \phi$. Năng lượng riêng của fermion được xác định thông qua phương trình Schwinger-Dyson (SD). Công trình [32] đã chỉ ra rằng khi $\alpha_Y = \frac{g_Y^2}{4\pi} \geq \frac{\pi}{2}$, nghiệm của phương trình SD thỏa mãn điều kiện ngưng tụ. Trạng thái ngưng tụ $\langle \bar{t}'_L t'_R \rangle$ có thể được viết dưới dạng của năng lượng riêng của fermion thế hệ thứ tư t' . Trong mô hình này, thang xung lượng cắt TeV của hệ vật lý được đưa ra một cách “tự nhiên” nhất.

DEWSB trong mô hình $EW\nu_R$ sẽ dựa trên cơ chế đã được trình bày trong [32], trong đó neutrino thuận và fermion gương trong mô hình sẽ ngưng tụ khi tương tác lần lượt với tam tuyến Higgs và lưỡng tuyến Higgs cơ sở khi năng lượng đủ lớn. Đối xứng của mô hình $EW\nu_R$ sẽ bị phá vỡ do sự xuất hiện của các trạng thái ngưng tụ. Theo đó, các trường

Higgs nhận VEV và vai trò, đặc trưng của neutrino sẽ thể hiện rõ trong cơ chế see-saw tạo khối lượng cho neutrino của mô hình $EW\nu_R$.

3. Mục tiêu nghiên cứu

Đề tài luận án bao gồm các mục tiêu sau

- Tìm điều kiện để neutrino thuận và quark gương trong mô hình $EW\nu_R$ ngưng tụ.
- Tìm thang năng lượng để hình thành trạng thái ngưng tụ của neutrino thuận và quark gương.
- Xây dựng cơ chế DEWSB cho mô hình $EW\nu_R$.
- Thông qua cơ chế DEWSB, giải thích khối lượng bé của neutrino.
- Trong mỗi phần làm rõ các đặc trưng, vai trò của neutrino thuận.

4. Nội dung nghiên cứu

Demo Version - Select.Pdf SDK

Các nội dung cụ thể cần nghiên cứu bao gồm

- Sử dụng phương trình SD cho năng lượng riêng của neutrino thuận và quark gương tìm điều kiện của các hằng số liên kết Yukawa để các trạng thái ngưng tụ tương ứng hình thành.
- Sử dụng lý thuyết nhóm tái chuẩn hóa tìm hàm β một vòng của các hằng số liên kết Yukawa của neutrino thuận và fermion gương.
- Thực hiện giải số các phương trình nhóm tái chuẩn hóa để tìm thang năng lượng tại đó hình thành các trạng thái ngưng tụ của neutrino thuận và fermion gương.
- Xây dựng lý thuyết về DEWSB, tạo VEV cho các trường Higgs cơ sở trong mô hình $EW\nu_R$.
- Mô tả sự hình thành khối lượng của neutrino theo cơ chế see-saw trong mô hình $EW\nu_R$.

5. Phạm vi nghiên cứu

Luận án chỉ giới hạn trong phạm vi nghiên cứu tương tác điện yếu trong mô hình $EW\nu_R$.

6. Phương pháp nghiên cứu

Khi xây dựng mô hình DEWSB luận án dựa trên lý thuyết gauge cho tương tác yếu. Các đặc trưng của trạng thái ngưng tụ fermion trong mô hình $EW\nu_R$ được làm rõ thông qua phương pháp hàm Green trong lý thuyết trường lượng tử, cụ thể là phương trình SD cho năng lượng riêng của các fermion tương ứng. Bên cạnh đó, phương trình nhóm tái chuẩn hóa và phương pháp số dựa trên phần mềm Mathematica đã được sử dụng để tính hàm β của các hằng số Yukawa của fermion gương và neutrino thuận. Ngoài ra, phương pháp giản đồ Feynman đã được áp dụng khi tính các hiệu chỉnh bậc cao cho hàm β hay các tham số trong thế hiệu dụng Higgs.

7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Những kết quả thu được của đề tài đóng góp một phần quan trọng vào nỗ lực tìm hiểu bản chất của cơ chế Higgs, nguồn gốc tạo khối lượng cho vật chất. Đề xuất được mô hình DEWSB phù hợp và giải thích khối lượng bé của neutrino. Bản chất của vũ trụ, vật chất tối, năng lượng tối theo đó sẽ dần được làm rõ một khi lý thuyết về hạt cơ bản được hoàn chỉnh. Ngoài ra, kết quả của đề tài còn có vai trò định hướng, cung cấp thông tin cho vật lý thực nghiệm trong việc dò tìm các hạt fermion trong mô hình $EW\nu_R$.

8. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận, danh mục các tài liệu tham khảo và phần phụ lục, nội dung luận án gồm 4 chương, 18 mục với 19 hình vẽ, 3 đồ thị, 3 biểu bảng, được bố trí như sau

- Chương 1 gồm hai phần chính. Phần thứ nhất trình bày nguyên lý gauge và các khái niệm về phá vỡ đối xứng tự phát (SSB) cùng cơ chế Higgs. Phần thứ hai trình bày quy trình xây dựng mô hình SM dựa trên các nguyên lý cơ bản thiết lập lý thuyết gauge. Để có cái nhìn tổng quan về SM, Lagrangian của mô hình này được tổng hợp trong mục cuối của phần 2.

- Chương 2 gồm năm phần chính. Phần thứ nhất sơ lược về hạt neutrino và bằng chứng thực nghiệm chứng minh neutrino có khối lượng. Các phần tiếp theo trình bày lý thuyết về khối lượng neutrino trong SM, cơ chế see-saw và mô hình đối xứng thuận-nghịch (LR) tạo khối lượng cho neutrino. Phần cuối cùng của chương sẽ trình bày tổng quan về mô hình EW ν_R .

Demo Version - Select.Pdf SDK

- Chương 3 gồm ba phần chính. Phần đầu sơ lược về sự hình thành trạng thái ngưng tụ trong giới hạn phi tương đối tính. Theo đó, điều kiện tối thiểu để một fermion ngưng tụ được đề cập đến. Phương pháp sử dụng phương trình SD để tìm điều kiện hình thành và khảo sát các đặc trưng của trạng thái ngưng tụ của neutrino thuận và quark gương sẽ được trình bày ở phần tiếp theo. Hàm β một vòng của các hằng số liên kết Yukawa của neutrino thuận và fermion gương sẽ được tính giải tích và thang năng lượng để các các trạng thái ngưng tụ hình thành sẽ được xác định thông qua nghiệm số của các phương trình nhóm tái chuẩn hóa tương ứng.

- Chương 4 gồm bốn phần chính. Phần đầu đưa ra những lý do nghiên cứu DEWSB và trình bày phương pháp xác định thang năng

lượng của EWSB. Phần thứ hai xây dựng cơ chế DEWSB trong mô hình $EW\nu_R$, trong đó trình bày quá trình động lực học tạo khối lượng cho các Higgs cơ sở và mô tả sự phá vỡ đối xứng của mô hình $EW\nu_R$ khi các Higgs cơ sở nhận VEV. Phần tiếp theo đề cập đến phổ khối lượng của các vô hướng và đối chiếu kết quả này với số liệu thực nghiệm của boson Higgs-125 GeV. Các đặc trưng của neutrino thuận sẽ được làm rõ thông qua cơ chế see-saw trong mô hình $EW\nu_R$ và được trình bày trong phần cuối của chương.

Bên cạnh nội dung chính, mỗi chương đều có phần kết luận chung. Ngoài ra, trong chương 2, 3 và 4 có thêm phần kết luận về đặc trưng và vai trò của neutrino thuận tương ứng. Phần phụ lục trình bày khái quát về lý thuyết tái chuẩn hóa và nhóm tái chuẩn hóa.

Các kết quả chính của luận án được công bố trong 3 công trình dưới dạng 1 bài báo đăng ở tạp chí trong nước và 2 bài báo đăng ở tạp chí nước ngoài.

Demo Version - Select.Pdf SDK

Chương 1

MỘT SỐ KIẾN THỨC CƠ SỞ

Nội dung của chương 1 gồm hai phần chính. Phần thứ nhất trình bày nguyên lý gauge và các khái niệm về SSB cùng cơ chế Higgs. Phần thứ hai trình bày quy trình xây dựng mô hình SM dựa trên các nguyên lý cơ bản thiết lập lý thuyết gauge. Cụ thể, cơ chế Higgs tạo khối lượng cho boson gauge và fermion được xây dựng dựa trên nhóm gauge của SM. Tiếp theo, tham số ρ liên quan đến EWSB được trình bày ở mục 1.2.6. Để có cái nhìn tổng quan về SM, Lagrangian của mô hình này được tổng hợp trong mục cuối của phần 2.

1.1 Lý thuyết gauge

1.1.1 Nguyên lý gauge **Demo Version - Select.Pdf SDK**

Đối xứng đóng vai trò quan trọng trong sự phát triển của vật lý học. Từ đối xứng không thời gian của lý thuyết tương đối đặc biệt đến bất biến gauge, chúng đã và đang vạch ra lộ trình phát triển của các lý thuyết vật lý. Đối với lý thuyết trường và vật lý hạt, tính đối xứng được thể hiện thông qua định lý Noether [1]: điều kiện Lagrangian bất biến với phép biến đổi liên tục bất kỳ nào đó cho phép suy ra tính chất bảo toàn của một đại lượng động lực đối với thời gian. Nghĩa là, định lý Noether thiết lập toàn bộ các định luật bảo toàn. Theo đó, khi Lagrangian bất biến đối với phép biến đổi đối xứng bất kỳ sẽ xác định dạng của tương tác giữa các hạt. Hay nói cách khác, đối xứng bao hàm động lực học. Trên thực tế, đặc tính này đã xuất hiện trong điện động lực học lượng tử (QED). Trong QED, sự tồn tại và một vài tính chất của trường gauge