



המודל התיקני, מסגרת מאוחדת לכוחות הטבע

Skane Aizor, מכון רקח לפיסיקה, האוניברסיטה העברית, ירושלים

תקציר

איחוד הכוחות היסודיים שבטבע: הכוח החשמלי, הכוח החלש והכוח החזק הוא הצלחתו של המודל הסטנדרטי (תיקני). במאמר זה מתוארים הכוחות האלה ומאפייניהם כפאזות שונות של תורה כללית הנקראת תורת כיול (Gauge Theory).

מילות מפתח

מודל תיקני, תורת כיול, כוח אלקטרומגנטי, כוח חלש, כוח חזק, פרוטון, ניוטרון, ניוטרינו, הדרון, פוטון, לְפֶטוֹן, קווארק, גלואון, כליאת צבע.

חשמליים בין גופים טעונים, כוחות מגנטיים בין מוליכים נושאי זרם, שדות מגנטיים בחלל וסערות ברקים באטמוספירה. האופטיקה כולה היא תופעה חשמלית, שכן האור אינו אלא סוג מסויים של שדות אלקטרומגנטיים. בתחום המיקרוסקופי הבסיסי יותר, מבנה האטום נקבע על ידי האינטראקציה החשמלית שבין האלקטרונים לבין הגרעין ועל ידי זו שבינם לבין עצמם. מבנה המולקולות וכל חוקי הכימיה נשלטים אף הם על ידי כוחות אלו; התנהגותם של מערכי אטומים ומולקולות היוצרים מוצקים ונוזלים גם היא מוכתבת על ידי הכוחות החשמליים בין יונים ואלקטרונים (המגיבים לכוחות אלו לפי כללי המכניקה הקוואנטית). גם כדי להבין מולקולות אורגניות מסובכות ואף תהליכים ביולוגיים אין צורך להניח חוקים בסיסיים נוספים מעבר לאינטראקציה החשמלית. המערכות שזכרו שונות מאד זו מזו במידת מורכבותן, אולם הכוח הבסיסי השולט בכלן (באמצעות חוקי מכניקה הקוואנטים), הוא אחד, הכוח החשמלי. הטווח של הכוח החשמלי הוא אינסופי, שהרי בחלל היקום שוררים שדות חשמליים ומגנטיים.

2. **הכוח החלש**, האחראי להתנגשויות בין חלקיקי הנויטרינו לפרוטונים ונויטרונים. בתהליך כזה עשויים הנויטרינו והנויטרון להתנגש אלסטית תוך רתיעה ושינוי כיוון, או להפוך, לאחר ההתנגשות, לאלקטרון ופרוטון. דבר זה מוסבר על-ידי ההנחה של קיום כוח בסיסי נוסף בטבע, הכוח החלש, כאחראי לתופעות אלו. הכוח הוא אמנם חלש כשמו, וההסתברות להתנגשות כזאת היא נמוכה מאד. חולשת הכוח ביחס לאינטראקציה החשמלית

ההישג העיקרי של פיסיקת החלקיקים בעשרות השנים האחרונות הוא ניסוחו של המודל התיקני (הסטנדרטי), מערכת תיאורטית המתארת את כל הכוחות בטבע, חוץ מכוח הגרביטציה, מנקודת מבט מאוחדת. פירושו של דבר הוא כי כל התהליכים שבטבע, כגון: ממטרי החלקיקים שבקרינה הקוסמית, בעירתם הגרעינית של כוכבים, ריאקציות כימיות, מבנה מולקולות אורגניות, גשמים, רוחות, ברקים ורעמים, החי והצומח וכו' מובנים, באופן עקרוני, כהרכבים מסובכים ביותר של מספר תהליכי יסוד בסיסיים המתוארים כולם בשפה ובמסגרת אחידה. תיאור כמותי מדויק של תהליכים טבעיים בעזרת אבני הבנין הבסיסיות הוא, בדרך כלל, מעבר לכוח אנוש, עקב המורכבות והסיבוך הרב שלהם. המודל התיקני, הנבחן על ידי התאמה כמותית לתהליכי מעבדה מבוקרים, מאפשר הבנה איכותית של תופעות הטבע, על העושר והרבגוניות הבלתי מוגבלים שבהן, במסגרת פשוטה וחסכונית של עקרונות.

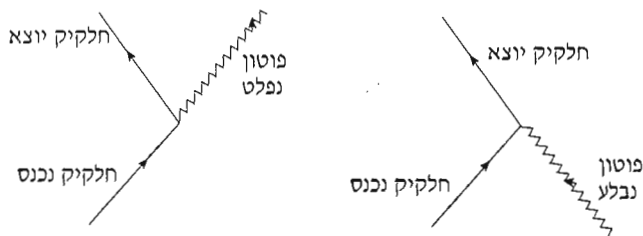
ארבעת הכוחות היסודיים

במחצית הראשונה של המאה ה-20 נתגבשה חלוקה של כוחות הטבע לארבע אינטראקציות בסיסיות:

0. **כוח הגרביטציה**, השולט במבנה הקוסמוס בתנועתו ובצורתן של גלקסיות, כוכבים ופלניטות. טווח הגרביטציה הוא אינסופי, שהרי היא פועלת בסקלות קוסמיות, עוצמתה ניכרת לגבי עצמים אסטרונומיים אבל זניחה לחלוטין בין גופים מיקרוסקופיים.

1. **הכוח האלקטרומגנטי**, הגורם העיקרי ברוב התופעות שסביבנו. בתחום המיקרוסקופי אנו פוגשים כוחות

המושגים העיקריים המשמשים בהבנת האינטראקציה האלקטרומגנטית הם המטען החשמלי והשדה האלקטרומגנטי. לכל חלקיק יסודי תכונה הנקראת **מטען חשמלי**. חלקיק יכול להיות טעון חיובית במטען q^+ או שלילית ב"אנטי מטען" q^- . אם המטען שונה מאפס, הרי שתנועת החלקיק גורמת לזעזועים בשדה החשמלי והמגנטי סביבו. משוואות מקסוול מתארות אז כיצד מתפשטים זעזועים אלה במרחב כגלים אלקטרומגנטיים. כאשר גל כזה פוגע בחלקיק טעון נוסף יתנועע החלקיק בהשפעת הגל וכך מועבר הכוח החשמלי מחלקיק טעון אחד למשנהו על ידי הגל. זהו התיאור הקלאסי. תורת הקוואנטים מלמדת, כי לשדה אלקטרומגנטי מתנדוד, כמו למערכות מיקרוסקופיות רבות אחרות, רמות אנרגיה בדידות, והאנרגיה שלו אינה משתנה באופן רציף. הזעזוע שיוצר החלקיק הטעון בשדה האלקטרומגנטי ניתן אז לתיאור כמעבר של מנת אנרגייה מן החלקיק אל השדה. אומרים כי החלקיק **פולט פוטון**. כיוצא בזה, כאשר הגל פוגע בחלקיק טעון ומניע אותו נתאר את התהליך בלשון קוואנטית **כבליעת פוטון** על ידי חלקיק טעון. נמצא כי **התהליך הבסיסי של האינטראקציה החשמלית הוא פליטת פוטון או בליעתו על ידי חלקיק טעון**. (תרשים 1).



תרשים 1: פליטת פוטון ובליעתו על-ידי חלקיק טעון

ככל שמטען החלקיק גדול יותר כן תגדל עוצמת הזעזוע שתגרום תנועתו לשדה האלקטרומגנטי, בשפה הקלאסית, או יגדל הסיכוי שלו לפלוט פוטון בשפה הקוואנטית. חלקיק נייטרלי, בעל מטען אפס, אינו משפיע או מושפע על ידי השדה. נשים לב כי לאחר הפליטה או הבליעה לא השתנה מטענו החשמלי של החלקיק. לפיכך אם נניח כי מטען חשמלי נשמר בתהליך, נייחס לפוטון מטען חשמלי אפס.

משהבהרנו את אופן פעולת הגומלין של השדה

נובעת מן הטווח הקצר מאד שלו; על הנויטרנו להתקרב לנויטרון או לפרוטון עד למרחק של 10^{-15} cm כדי לחוש בכוח החלש. תהליך חלש אחר הדומה להתנגשויות שתוארו למעלה, הוא **התפרקות β** בה מתפרק נויטרון לפרוטון, אלקטרון ואנטי-נויטרנו. בדרך זו שולט הכוח החלש על מאזן הפרוטונים והנויטרונים בגרעין ומשפיע בעקיפין על מבנה החומר בעולם. לא כל תהליך חלש כולל בהכרח חלקיקי נויטרנו. הֶבְרִיּוֹן המכונה Λ , חלקיק נייטרלי לא יציב שהוא קרוב משפחה של הפרוטון והנויטרון, מתפרק לאחר זמן חיים של כ- 10^{-10} שניות לפרוטון ולמזון π , בתהליך חלש.

3. **הכוח החזק**, הכוח השולט בפיסיקה ההדרונית ובפיסיקה הגרעינית. הכוחות הגרעיניים, בעלי טווח של 10^{-12} cm מצמידים את הנוקליאונים זה לזה בתוך הגרעין (על אף הדחיה החשמלית בין הפרוטונים). הכוחות הגרעיניים הם תוצאה של האינטראקציה החזקה בין אבני הבנין של הנוקליאונים. הנוקליאונים, ככל יתרה ההדרונים, הם מערכות מורכבות הבנויות מאבני בנין יסודיות יותר, **הקווארקים**. הכוח החזק הוא הכולא את הקווארקים בתוך ההדרונים והוא האחראי לכוחות הבין הדרוניים. בין שלש האינטראקציות, החשמלית, החלשה והחזקה, הכוח החשמלי הוא המוכר ביותר והחשוב ביותר לתופעות הקרובות לנו. ואמנם, כבר בשנות הששים של המאה הקודמת הושגה הבנה תיאורטית כמותית של האינטראקציה האלקטרומגנטית שהגיעה לשיאה בניסוח הידוע בשם **משוואות Maxwell**. משוואות אלו מסכמות את חוקי הכוח החשמלי במסגרת הפיסיקה הקלאסית ומספקות הסבר לכל התופעות האופטיות של גלי אור כשדות אלקטרומגנטיים. בשנות הארבעים של המאה הזאת הושלמה ההכללה של ניסוח חוקי האינטראקציה החשמלית לתחום הפיסיקה הקוואנטית למסגרת הידועה בשם **אלקטרודינמיקה קוואנטית** שנתנה הבנה כמותית בדיוק חסר תקדים לתהליכים אלקטרומגנטיים. הישגו של המודל התיקני הוא בבניית הכללה של המבנה התיאורטי של האלקטרודינמיקה המאכסנת באותה מסגרת גם את הכוח החלש ואת הכוח החזק. להלן ננסה לסקור מסגרת זו, הקרוייה **תורת כיוול**, בקווים כלליים. יתברר כי הסידור שנקטנו בין הכוחות השונים, לפיו סומן הכוח החשמלי ב-1, הכוח החלש ב-2, והכוח החזק ב-3, הוא בעל משמעות במסגרת המודל התיקני.

חלקיקים אלה שלושה "דורות", כאשר מרכיבי כל דור זהים מבחינת מטעניהם השונים למרכיבי הדור הקודם, אלא שהם כבדים יותר. (יוצא מכלל זה הוא החלקיק Higgs הרשום בתחתית הטבלה, שהוא בעל ספין 0. זהו שותף חריג במקצת במודל התיקני שתפקידו קשור לתופעת הסיכוך של הכוח החלש ולערבוב שלו עם הכוח החשמלי (תופעות שיוזכרו בקצרה להלן).

האלקטרומגנטי על חלקיקים טעונים, כל שנותר הוא לקבוע את מטענו החשמלי של כל אחד מן החלקיקים האלמנטריים הבונים את החומר. החלקיקים האלמנטריים הבונים את המודל הסטנדרטי מנויים בטבלה. אלה הם חלקיקים בעלי ספין 1/2 הקרויים **לפטונים וקווארקים**. המטען החשמלי של כל אחד מהם רשום בעמודה הראשונה של הטבלה. מסיבה שאינה ברורה לנו היום מהווים

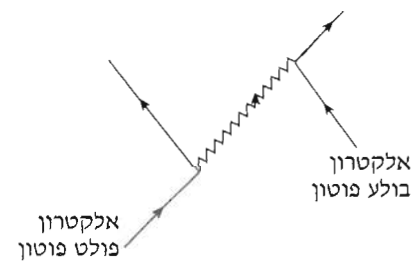
לפטונים				קווארקים			
החלקיק	מטען חשמלי	מטען חלש (מרכיבים שמאליים)	צבע	החלקיק	מטען חשמלי	מטען חלש (מרכיבים שמאליים)	צבע
דור I	ν_e	0	—	u_1 u_2 u_3	$\frac{2}{3}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{2}{3}$	u u u	ירוק כחול אדום
	e	-1	—	d_1 d_2 d_3	$-\frac{1}{3}$ $-\frac{1}{3}$ $-\frac{1}{3}$	d d d	ירוק כחול אדום
דור II	ν_μ	0	—	c_1 c_2 c_3	$\frac{2}{3}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{2}{3}$	u u u	ירוק כחול אדום
	μ	-1	—	s_1 s_2 s_3	$-\frac{1}{3}$ $-\frac{1}{3}$ $-\frac{1}{3}$	d d d	ירוק כחול אדום
דור III	ν_τ	0	—	t_1 t_2 t_3	$\frac{2}{3}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{2}{3}$	u u u	ירוק כחול אדום
	τ	-1	—	b_1 b_2 b_3	$-\frac{1}{3}$ $-\frac{1}{3}$ $-\frac{1}{3}$	d d d	ירוק כחול אדום
Higgs	ϕ^+	1	—				
	ϕ^0	0	—				

טבלת חלקיקי היסוד

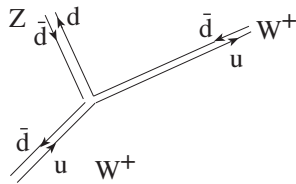
2. הכוח החלש, מטענים משני סוגים.

במודל התיקני מתואר הכוח החלש במושגים דומים לאלה ששימשו בתורה האלקטרומגנטית. גם כאן יאופיין כל חלקיק בתכונת המטען החלש שלו כשתנועתו גורמת לשינויים בשדה החלש במרחב. ההבדל הוא בכך שהמטען החלש הוא משני סוגים שיכוננו u ו d (up ו down). תוך כדי תנועתו יוצר המטען החלש שינויים וזעזועים בשדה החלש, או, בלשון קוואנטית, פולט פוטון חלש. בנוסף לתהליך בו פולט החלקיק פוטון חלש מבלי לשנות את מטענו, מכיל המודל הפעם גם תהליך בו, תוך כדי הפליטה, הופך החלקיק את מטענו מ u ל d או מ d ל u. אם המטען החלש נשמר בתהליך הפליטה הבסיסי, עלינו ליחס לכל אחד מן הפוטונים החלשים הנפלטים בשלשה תהליכים אלו מטענים

תהליכים אלקטרומגנטיים בטבע מורכבים משרשרות של התהליכים הבסיסיים של פליטת פוטון ובליעתו. לדוגמה, התנגשות בין שני אלקטרונים מורכבת מתהליך של פליטת פוטון על ידי אחד האלקטרונים ותהליך בליעתו על ידי האלקטרון השני. (תרשים 2).

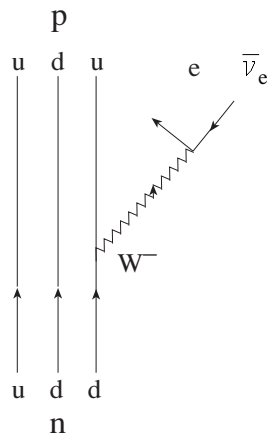


תרשים 2: התנגשות בין שני אלקטרונים



תרשים 4: פליטת פוטון חלש על-ידי פוטון חלש

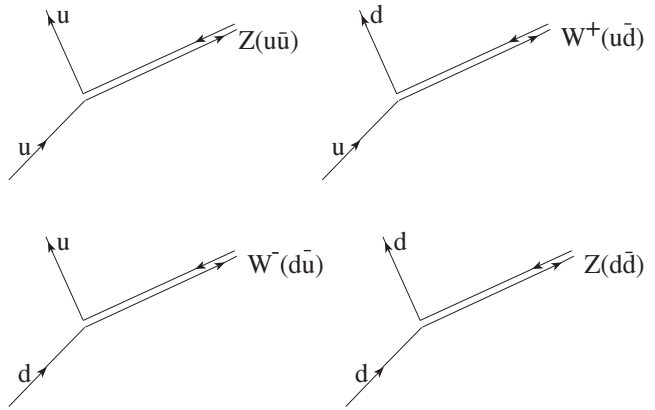
חלש מתאים. מטענים אלה מנויים בטבלה בעמודה השניה. גם כאן, תהליכים טבעיים הינם שרשרות של התהליכים הבסיסיים. **התהליך החלש של התפרקות β** למשל, מורכב משני תהליכים בסיסיים. ראשית, הופך אחד הקווארקים d שבנויטרון לקווארק u תוך פליטת W^- , ואז הופך אותו W^- לאלקטרון (מטען חלש \bar{u}). (תרשים 5).



תרשים 5: התהליך החלש של התפרקות β

יש לשים לב לתכונה נוספת המיוחדת לכוח החלש. רק לחלקיקים "שמאליים", היינו חלקיקים שהספין שלהם מנוגד לכיוון תנועתם, יש מטען חלש. החלקיקים ה"ימניים", אלה שהספין שלהם בכיוון תנועתם, אינם טעונים מטען חלש ואינם מגיבים לשדה החלש. (וכן רק האנטי חלקיקים הימניים טעונים במטען אנטי חלש, ואילו האנטי חלקיקים השמאליים אינם מגיבים לשדה החלש). נעיר עוד כי הואיל והנייטרנו הטעון מטען חלש u אינו טעון חשמלית, ואילו האלקטרון הטעון מטען חלש d נושא מטען חשמלי שלילי, הרי שימור המטען החשמלי דורש כי הפוטון החלש W^+ הנפלט כאשר הופך הנויטרנו לאלקטרון יהיה גם בעל מטען חשמלי חיובי, בנוסף למטען החלש. עירוב זה בין הכוח החשמלי לכוח החלש הוא תוצאה של סיבוב דינמי נוסף של המודל התיקני שלא נוכל לדון בפרטיו כאן.

שוניים: בתהליך $u \rightarrow u$ יהיה הפוטון החלש הנפלט בעל מטען $u\bar{u}$ (u ואנטי u). פוטון חלש זה מכונה **חלקיק Z**. במעבר $u \rightarrow d$ יפלט פוטון חלש בעל מטען חלש $u\bar{d}$ הנקרא W^+ , ובתהליך $d \rightarrow u$ נפלט החלקיק הקרוי W^- שמטענו החלש $d\bar{u}$. (לפי טיעון זה נחוץ לכאורה פוטון חלש רביעי בעל מטען $d\bar{d}$ למעבר $d \rightarrow d$, אולם מסיבות טכניות יותר שלא יפורטו כאן המטען $u\bar{u}$ מזוהה עם המטען $d\bar{d}$ וגם בתהליך $d \rightarrow d$ נפלט החלקיק Z המוכר מן התהליך $u \rightarrow u$) (תרשים 3).

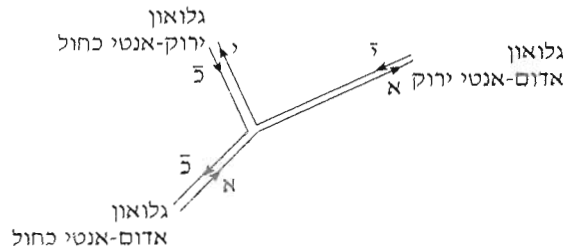


תרשים 3: ארבעת תהליכי היסוד בשדה הכוח החלש

לפנינו אפוא הכללה של אלקטרודינמיקה עם מטען משני סוגים, u ו- d , ושדה משלשה סוגים, W^+ , W^- ו-Z. לכל אחד משלושת סוגי השדות יש שדה חשמלי ושדה מגנטי. יתר על כן, וכאן השינוי העיקרי ביחס לאלקטרודינמיקה, **הפוטונים החלשים עצמם נושאים מטען חלש**. הואיל ותנועת מטען גורמת לזעזועים בשדה, הרי שלא רק תנועתם של החלקיקים פולטת פוטונים חלשים, אלא תנועת הפוטונים עצמם פולטת שוב פוטונים. לארבעת תהליכי הפליטה היסודיים שנמנו למעלה יש לצרף עוד תהליכים של **פליטת פוטון חלש על ידי פוטון חלש**. למשל, הפוטון החלש W^+ טעון u ו- \bar{d} . המרכיב u שבו עשוי לפלוט W^+ נוסף ולהפוך תוך כדי כך ל d . לאחר הפליטה הפך הפוטון החלש המקורי ל $d\bar{d}$, היינו לחלקיק Z תוך פליטת W^+ . (תרשים 4).

המבנה התיאורטי המכליל את תורת Maxwell ליותר מסוג מטען אחד, נוסח בשנות ה-50 על ידי Yang ו Mills, והוא ידוע בשם "**תורת כיוול**" (*Gauge Theory*). המודל התיקני עושה שימוש במבנה זה להסברת כל כוחות הטבע.

כדי לקבוע את פעולתה הבסיסית של האינטראקציה החלשה על החומר, יש לייחס לכל חלקיק אלמנטרי מטען



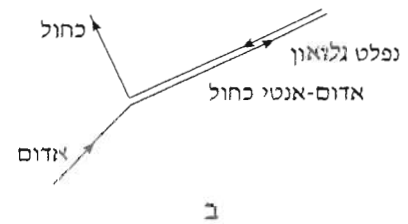
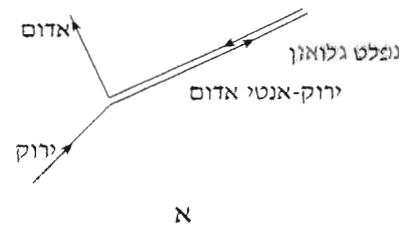
תרשים 7: גלואון פולט גלואון

כל שנותר להשלמת התמונה הוא לקבוע את צבעו של כל מרכיב מאבני הבנין היסודיות של החומר. פירוט זה נמצא בעמודה השלישית שבטבלה.

שלוש האינטראקציות, פאזות שונות של תורת כיוול

מודל הבנוי על הדמיון המאחד את שלשת הכוחות היסודיים חייב להסביר גם את ההבדלים הרבים ביניהם, את העובדה שהשפעותיהם על העולם כפי שהוא נראה לנו שונות בתכלית זו מזו. הזכרנו כי בעוד שטווח הכוח החשמלי הוא אינסופי, מוגבל הכוח החלש למרחקים הקטנים מ 10^{-15} cm. אשר לכוח החזק, הוא מאופיין על ידי התופעה הידועה בשם "כליאת הצבע". הקווארקים והגלואונים הנושאים מטען חזק, היינו צבע, נותרים קשורים זה בזה על ידי הכוח החזק ואינם יכולים להשתחרר ולנוע כחלקיקים חופשיים. כל שאנו רואים בטבע הם מצבים קשורים של קווארקים וגלואונים שהם נייטרליים מבחינת הצבע. אלה הם ההדרונים, דוגמת הפרוטון, הבנוי קומבינציה חסרת צבע של שני קווארקים מטפוס u ואחד מטפוס d. הרי לנו שוב הבדל גדול בין הכוח החשמלי שאינו כולא את המטען ומאפשר לנו לראות חלקיקים טעונים בלתי קשורים, לבין כליאת הצבע של הכוח החזק. נשים לב שההבדלים הגדולים בין הכוחות השונים בולטים ככל שסקלת המרחקים הנדונה גדולה יותר. במרחקים קטנים בהרבה מ 10^{-15} cm הטווח הסופי של הכוח החלש אינו רלוונטי. במרחקים כאלה תהליכי הפליטה והבליעה של הפוטונים החלשים אכן אינם שונים מאלה של פליטה ובליעה של פוטונים אלקטרומגנטיים רגילים. אף לגבי הכוח החזק, תופעת הכליאה נעשית חשובה כאשר הקווארק מנסה להתרחק מן הנוקליאון. אבל במעמקי הפרוטון או הנויטרון, במרחקים הקטנים בהרבה ממימדיהם, שם הקווארקים פולטים ובלועים גלואונים באופן שאינו שונה בהרבה מן התהליכים האלקטרומגנטיים הבסיסיים. מצב זה מזכיר במידה רבה את התופעה של מעברי פאזות במערכות מאקרסקופיות.

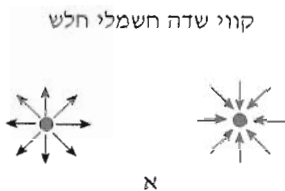
המודל הסטנדרטי מתאר גם את הכוח החזק במסגרת זהה. ההבדל העיקרי בינו לבין הכוחות שתוארו למעלה הוא בכך שכאן המטען הוא משלושה סוגים שונים המכונים צבעים. (מובן שאין להם דבר עם תופעת הצבע הפיסיקלי שהוא תכונה של השדה האלקטרומגנטי). חלקיק הטעון מטען חזק יכול להיות טעון מטען אדום, כחול או ירוק. שוב, בנוסף למטען החזק קיים גם שדה חזק המעורר ומזועזע על ידי תנועת חלקיק בעל צבע. חלקיק אדום עשוי, כשהוא מתנוודד במרחב, לעורר את שדה הצבע ולהחליף את צבעו תוך כדי כך מאדום לכחול, לדוגמה. הפרטון החזק הנפלט בתהליך חייב להיות בעל צבע אדום-אנטי כחול כדי לשמור על מאזן הצבע. כמו כן בתהליך בו חלקיק ירוק הופך לאדום ייפלט פוטון ירוק-אנטי אדום. נמצא שמטען משלושה סוגים מצריך שדה בעל שמונה סוגים, (יש תשע קומבינציות של צבע-אנטי צבע, ושוב מזהים את הירוק-אנטי ירוק עם סכום של כחול-אנטי כחול ואדום-אנטי אדום, מה שמעמיד את מספר הפוטונים החזקים על שמונה). פוטונים חזקים אלו קרויים גלואונים. (תרשים 6).



תרשים 6: תהליכי יסוד בשדה הכוח החזק

גם כאן, כמו בדיון על הכוח החלש, נושאים הגלואונים עצמם צבע, ולפיכך הם עשויים לפלוט או לבלוע גלואונים אחרים תוך כדי תנועתם. לתהליך הבסיסי של קווארק הפולט גלואון יש להוסיף תהליך בסיסי של גלואון הפולט גלואון. (תרשים 7).

בתווך על-מוליך נמשכים ונצמדים זה לזה כדי להקטין ככל האפשר את הנפח במרחב בו שורר השדה המגנטי. הם אינם יכולים להיבלע במרחב אלא ליצור שפופרות דקות של שטף מגנטי מרוכז הבוקע מקצה סליל אחד ונבלע בקצה סליל אחר. אנו מאמינים כי **לגבי הכוח החלש נוהג הווקואום עצמו כמו תווך מוליך-על, ומכאן טווחו הקצר של הכוח החלש**. (המקור להתנהגות זו נעוץ בשדה הנוסף הנזכר בתחתית הטבלה הידוע בשם "שדה Higgs". החלקיק המתאים לא נתגלה עדיין ומהווה את אחד הקצוות הלא סגורים של המודל הסטנדרטי.)



א

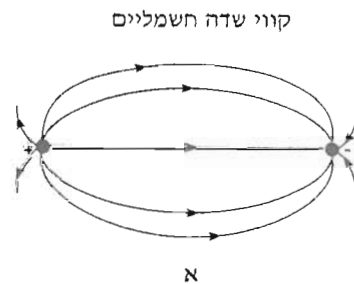


תרשים 9: א. קווי שדה חשמלי חלש
ב. קווי שדה מגנטי חלש

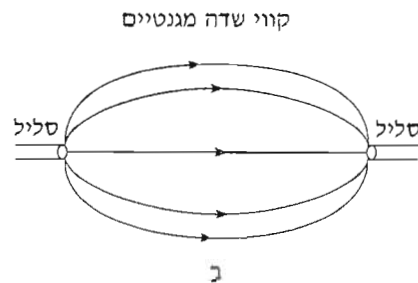
הכוח החזק מייצג לעומת זאת את פאזת הכליאה של תורת הכיול. מאמינים כי בפאזה זו מוחלפת צורת ההתנהגות של השדות החשמלי והמגנטי לעומת זו שבפאזה מוליכת-על שתוארה לעיל. כאן השדה הכרומו מגנטי, השדה המגנטי של הצבע, הוא המסוכך. קווי השדה הכרומו מגנטי היוצאים מקצה "סליל של זרם צבע" אינם מתפשטים במרחב אלא נבלעים בתוך הווקום, בקרבת מקום יצירתם (טווח של 10^{-15} cm). לעומתם, קווי השדה הכרומו אלקטרי הבוקעים ממטען צבע, מושכים זה את זה ויוצרים שפופרות דקות של שטף כרומו-אלקטרי המתכנסות אל מטען אנטי צבע. עוצמת השדה הכרומו-אלקטרי של קווארק הפועלת על אנטי קווארק אינה קטנה עם המרחק ביניהם, הואיל והשדה אינו מתפזר במרחב אלא נותר מוגבל בשפופרת בעלת עובי קבוע. לפיכך נחוצה אנרגיה אינסופית כדי לנתק את הקווארק מהאנטי קווארק, וזוהי תופעת הכליאה. יצויין כי הבנתנו את התופעה היא איכותית, אבל לא הגענו עדיין לשליטה כמותית מדוייקת בתופעות הכליאה.

התנהגותם של מים בטמפרטורה של 101°C שונה מאוד מזו של מים ב- 99°C . ברמה המיקרוסקופית לא חל כל שינוי דרסטי בכוחות הבין מולקולריים תוך כדי חימום המים מעל לנקודת הרתיחה. אולם השינוי הזעיר בהתנהגות המיקרוסקופית מוגבר, בנקודת המעבר, והופך להבדל איכותי גדול בין שני אופני ההתנהגות במרחקים גדולים. מודרכים על ידי אנלוגיה זו אנו רגילים לחשוב על ההופעות השונות של הכוח החשמלי, החזק והחלש, כעל שלש פאזות שונות של תורת הכיול של Yang ו-Mills.

הפאזה האלקטרומגנטית מאופיינת על ידי ההתנהגות המוכרת לנו של שדות חשמליים ומגנטיים בריק. קווי השדה החשמלי הבוקעים ממטען חיובי, "דוחים זה את זה" ומתפשטים במרחב לפי חוק קולון. קווי השדה המגנטי הבוקעים למשל מקצהו של סליל ארוך נושא זרם מתנהגים בצורה דומה. (תרשים 8).



א



תרשים 8: קווי שדה חשמליים ב. מגנטיים

אנו מאמינים כי השדות החשמליים והמגנטיים החלשים מתנהגים בריק בדומה לשדות אלקטרומגנטיים בתוך חומר מוליך-על. בתווך כזה השדות החשמליים מסוככים על ידי המטענים החופשיים שבמוליך. הם נבלעים בתווך בקירבת המטען היוצר אותם ואינם מתפשטים למרחוק; הכוח החשמלי בתווך כזה הוא קצר טווח. קווי השדה המגנטי

