



המפץ הגדול במעבדה?

זאב פרנקל, המחלקה לפיסיקה של חלקיקים, מכון ויצמן למדע, רחובות

מגנטי - הפוטון, שאינו טעון, הרי החלקיק המקביל לו, נושא כוח "הצבע", חלקיק הנקרא **גלואון** (gluon), נושא בעצמו מטען "צבע". התורה המסבירה את פעולת "כוח הצבע" או "הכוח החזק" נקראת דינמיקת הקוונטים של הצבע

(Quantum Chromo Dynamics) או בקיצור QCD והיא מקבילה QED (Quantum Electro Dynamics) דינמיקת הקוונטים האלקטרו-מגנטית שמסבירה את כל התופעות האלקטרו-מגנטיות בטבע. ל QCD יש הצלחה מרשימה בהסבר כל התופעות באנרגיות גבוהות בין חלקיקים הנשלטים על-ידי הכוח החזק. תורת ה-QCD מנבאת שבתנאים של טמפרטורה גבוהה פי 10000 מזו שבמרכז השמש או בצפיפות הגדולה פי 10 מהצפיפות הרגילה של הנוקליאונים בתוך הגרעין יעבור החומר מעבר פאזה מחומר המורכב מנוקליאונים ("חומר גרעיני") למצב צבירה חדש שבו הקווארקים והגלואונים "משתחררים מהכלא" שלהם בתוך הנוקליאונים והופכים חופשיים ולמעשה החומר הגרעיני הופך להיות **פלסמה של קווארקים וגלואונים** (Quark - Gluon Plasma או בקיצור QGP) **חופשיים**. חישובי QCD מנבאים שתנאים אלה של צפיפות וטמפרטורה ניתן אולי להשיג בהתנגשות בין שני יונים כבדים המואצים לאנרגיות גבוהות מאוד. לאור אפשרות זו התחיל לפני כעשר שנים מאמץ ניסיוני גדול מאוד באירופה (CERN) ובארה"ב ליצור במעבדה את מעבר הפאזה לפלסמה של קווארקים וגלואונים על ידי ריאקציות בין יונים כבדים רלטיביסטיים (RHI או Relativistic Heavy Ion Reactions), על ידי הפיכת כמה מאיצי חלקיקים למאיצי יונים כבדים.

החשיבות ביצירת QGP במעבדה אינה רק בעצם יצירת מצב צבירה חדש של החומר אלא בעיקר בגלל החשיבות שלו להבנתנו את יצירת היקום. על פי התורה המקובלת של יצירת היקום הרי מיקרו-שניה (10^{-6} s) אחרי המפץ הגדול תנאי הטמפרטורה והלחץ של חומר היקום התאימו לתנאים של יצירת QGP. כעבור זמן קצר היקום התפשט והתקרר עד **מְעֵבָר** מעבר פאזה מ-QGP למצב הצבירה הרגיל של חומר גרעיני רגיל של נוקליאונים ואלקטרונים, ומאותו רגע לא

מדענים באירופה ובארה"ב מנסים לשחזר בתנאי מעבדה את מצב היקום זמן קצר (כמיקרו-שניה - 10^{-6} s) אחרי "המפץ הגדול". באותו רגע החלקיקים שאנו מכירים היום, הפרוטונים, הנויטרונים וסוגים שונים של מזונים וחלקיקים כבדים יותר, עוד לא היו קיימים והיקום היה מורכב מ"פלסמה" של קווארקים וגלואונים חופשיים.

כדי לעמוד על הבעייתיות של שיחזור המפץ הגדול במעבדה, כלומר יצירת פלסמה של קווארקים וגלואונים חופשיים, אפתח בסקירה קצרה של תכונות חלקיקי ה"פלסמה" והכוח הפועל ביניהם.

ידוע שהחלקיקים "היסודיים", הפרוטונים והנויטרונים, שמהם מורכב גרעין האטום והמהווים את עיקר החומר ביקום, אינם למעשה יסודיים כי יש להם תת-מבנה בצורת חלקיקים הקרואים קווארקים (quarks). בכל נוקליאון (שם כולל לפרוטון ונויטרון) ישנם שלושה קווארקים משני סוגים: קווארק u ("up") ואו קווארק d ("down"). (נוסף ל"משפחה" זו של u-d יש עוד שתי "משפחות" נוספות של שני קווארקים ובסך הכל קיימים 6 קווארקים). לקווארקים יש מספר תכונות ייחודיות: הם החלקיקים היחידים בטבע שנושאים מטען חשמלי **שאינו כפולה של מטען האלקטרון**. לחלקיק ה-u יש מטען של $+2/3$ (ביחידות מטען האלקטרון) ואילו לחלקיק d יש מטען של $-1/3$. הפרוטון מורכב משני חלקיקי u וחלקיק d אחד ומכאן שמטענו הוא $+1$ ואילו הנויטרון מורכב משני חלקיקי d וחלקיק u אחד ועל כן מטענו הוא אפס. אך התכונה הבולטת ביותר של הקווארקים היא שהם **כלואים בתוך הנוקליאונים** ואינם קיימים באופן חופשי בטבע. הסיבה לכך היא שהכוח הקושר בין הקווארקים, הנקרא הכוח החזק או "כוח הצבע" (אם כי אין לו שום קשר לצבע האופטי) הולך **וגדל ליניארית עם המרחק ביניהם** (כאילו היו קשורים ביניהם בסרט אלסטי) וזאת בניגוד לכוח האלקטרו-מגנטי (וכוח הכבידה) שהולך **וקטן** ביחס ישר לריבוע המרחק בין המטענים. שוני זה קשור לשוני נוסף בין כוח "הצבע" והכוח האלקטרו-מגנטי והוא שבניגוד ל"נושא" הכוח האלקטרו-

בניסוי CERES שבו שותפה קבוצה ממכון ויצמן בראשות פרופסור יצחק צרויה התגלה עודף גדול של זוגות אלקטרון-פוזיטרון מעבר לזה שיש לצפות לו מהפיזיקה ה"רגילה". ניסויים אחרים גילו עודף של חלקיקים "מוזרים" (חלקיקים המכילים קווארק "מוזר") ומספר קטן מהמצופה של חלקיק בשם ψ (או J^{**}) המכיל קווארקים מסוג "charm". לאור מכלול תוצאות אלה הודיעה הנהלת המעבדה לפני זמן מה שקרוב לוודאי שאכן נוצר QGP בניסויי CERN.

בימים אלה מתחיל לעבוד במעבדת Brookhaven בארה"ב מאיץ חדש מסוג collider שנבנה במיוחד להאצת שתי קרניים של זהב (או יון כבד אחר) בכיוונים הפוכים. יוני הזהב מתנגשים זה בזה בארבעה מקומות לאורך המאיץ בעל ההיקף של כ-4 ק"מ וסביב נקודות התנגשות אלה נבנו ארבעה גלאים גדולים שימדדו התנגשויות אלה. מאחר ואנרגיית ההתנגשות במאיץ החדש, הנקרא Relativistic Heavy Ion Collider או בקיצור RHIC, גדולה פי עשרה בערך מאלה שבמאיץ SPS ב-CERN הרי הוודאות ליצירת QGP בהתנגשויות אלה תהייה הרבה יותר גדולה וגם ההוכחות הניסיוניות לכך תהיינה יותר ברורות ומשכנעות.

לעיון נוסף

1. אליצור, ש., המודל התיקני - מסגרת מאוחדת לכוחות הטבע, תהודה (2) 16, ע' 27-33, 1994.
2. נאמן, י. וקירש, י., צידי החלקיקים, מסדה 1983.
3. <http://www.rhic.bnl.gov/html2/rhicphysics.html>
#heavyion
4. <http://cern.web.cern.ch/CERN/Announcements/2000/New State Matter>
5. http://ceres6.physi.uni-heidelberg.de/physi/Output_nov.gif

קיימים קווארקים וגלואונים חופשיים בטבע. החשיבות של יצירת QGP במעבדה היא אפוא באפשרות שלנו לשחזר בזעיר אנפין את מצב היקום במיקרו-שניה הראשונה לקיומו.

מהנאמר לעיל גם עולה הקושי העיקרי של גילוי עצם יצירת QGP במעבדה: גם אם נצליח ליצור מצב צבירה חדש זה של החומר במעבדה הרי הוא יתקיים רק זמן קצר ביותר (בסדר גודל של 10^{-21} s!) מאחר שהוא יתפשט ויתקרר, יעבור מעבר פאזה "בכיוון הפוך" ויחזור למצב של חומר גרעיני רגיל המורכב מנוקליאונים וחלקיקים אחרים. ואכן בכל התנגשות בין יונים כבדים רלטיביסטיים נוצרים אלפי חלקיקים "גרעיניים", בעיקר מזונים, שנפלטים לכל הכיוונים מנקודת ההתנגשות. תפקיד הפיזיקאים הוא אפוא למדוד את החלקיקים האלה ולנסות ולשחזר מהם את תכונות ה-QGP שהתקיים רק בשבריר השניה הראשונה של ההתנגשות. אמנם תורת ה-QCD מנבאת מספר תכונות שיש לתוצרי הריאקציה אם אמנם נוצר בראשיתה QGP, אך רוב תכונות אלה ניתן להסביר גם, אם כי באילוץ מסוים, מבלי להיזקק להנחה שאכן נוצר ה-QGP; מכאן שיש לנסות ולגלות מספר רב ככל האפשר של "סימנים" אלה באותה ריאקציה וככל שמספרם גדול יותר, כך סביר יותר שאכן נוצרה הפלסמה (אם כי תמיד נשאר ספק מסוים שאכן הוכחנו את קיומה).

זוהי הדרך שבה בחרו המדענים במעבדת CERN בזינבה. לפני כעשר שנים הוכשר המאיץ הגדול Super Proton Synchrotron (או SPS בקיצור) להאצת יונים כבדים עד לאנרגיה של 200 GeV ליחידת מסה (A). בשבעה ניסויים שונים, שכל אחד מהם יוחד לגילוי ובדיקה של תכונה שונה של QGP, מדדו את החלקיקים הנפלטים בהתנגשויות בין יונים כבדים רלטיביסטיים. ואכן נתגלו בניסויים אלה מספר תופעות שלא נתגלו באנרגיות נמוכות יותר או בהתנגשויות בין פרוטונים, וניתן לייחס אותם ליצירת QGP. כך למשל

* זמן ההתפשטות וההתקררות של הפלסמה בתנאי מעבדה קצר בהרבה סדרי גודל מזה של התהליך ביצירת היקום, כי כאן אנו עוסקים בסדרי גודל הרבה יותר קטנים של המערכת.
** J ו-ψ הם שני שמות של אותו חלקיק, שהתגלה באופן בלתי תלוי על-ידי שני מדענים שונים.