



אחרון הענקים - עם פטירתו של הנס בתה

2.7.1906-6.3.2005

מיכאל קירסון*, המחלקה לפיסיקה של חלקיקים, מכון ויצמן למדע, רחובות

ובהתוויית כיווני העבודה הניסויית בלוס-אלמוס. למרות התנגדותו הנמרצת לרצונו של אדוורד טלר (Teller) לפתח את פצצת המימן, משהתקבלה ההחלטה לאחר המלחמה להמשיך בפיתוח הפצצה הוא נרתם למאמץ ותרם תרומות משמעותיות להצלחת המשימה. בהתייחסו לכינוי "אבי

פצצת המימן" שיוחס לטלר, תיקן בתה: "אולם (Ulam) הוא האב, כי הוא סיפק את הזרע, וטלר הוא האם, כי הוא נשאר עם הילד. כשלעצמי, אני מניח שאני המיילד."

לאחר מלחמת העולם השנייה, פעל בתה נמרצות כפעיל ציבורי למען בקרת נשק להשמדה המונית, הקטנת היקפו ומיתון אימו על העולם המתורבת. כיועץ מדעי לנשיאי ארה"ב הוא דחף לניטרול האיום הגרעיני והשפעתו הייתה ניכרת בהשגת אמנה בינלאומית לאיסור חלקי של ניסויי פצצות גרעיניות. הוא המשיך לפעול כגורם ממתן וכמתנגד לתוכניות חימוש גרנדיוזיות כל ימיו. מאידך, היה בתה חסיד נלהב של תחנות כוח גרעיניות כתורמות לפתרון ארוך-טווח של בעיית האנרגיה העולמית.

מחקריו של הנס בתה במשך כשבעים וחמש שנה של פעילות מדעית התייחסו לתחומים רבים. היקף העבודה מונע סיקור ממצה במאמר, אפילו מאמר ארוך בהרבה מזה, ולכן יובאו כאן רק מספר דוגמאות בולטות של תרומותיו של בתה לפיסיקה העיונית.

בשנת 1931 פרסם בתה מאמר שהציע פתרון למודל פשוט בתורת המתכות. המודל בנוי משרשרת קווית של אטומים המפעילים כוחות פשוטים כל אחד על שכניו. בתה ניחש את הצורה של פונקציות הגל של המערכת, צורה התלויה בכמה פרמטרים הטעונים קביעה. התנאי שפונקציות אלה יהוו פונקציות עצמיות של המערכת הרב-גופית תורגם לסדרה של משוואות לא-ליניאריות הניתנות לפתרון נומרי. על-ידי כך הגיע בתה לפתרון מדויק של המודל, כולל גם ערכים עצמיים וגם פונקציות עצמיות. השיטה זכתה לכינוי "הנחת בתה"

הנס אלברכט בתה (Hans Albrecht Bethe) נולד בסטראסבורג, אז חלק מגרמניה, בשנים ביולי 1906 ונפטר בביתו באיתקה, ארה"ב, בששה במרס 2005. הוא התחיל את הקריירה המדעית שלו בפיסיקה עיונית זמן קצר אחרי ייסוד המכניקה הקוונטית והמשיך בפעילות מחקרית עד

סוף ימיו - המאמר האחרון עליו הוא רשום כמחבר פורסם בשנת 2002. היה מי שכונה אותו "אחרון ענקי הפיסיקה העיונית של המאה העשרים", כינוי שהתאים לו מאוד. פרס נובל בפיסיקה בשנת 1967 אישר את מעמדו הרם, ושורה ארוכה של נוסחאות, משוואות ושיטות הנושאות את שמו מבטיחות את מקומו בהיסטוריה של המדע.

בתה גדל בפרנקפורט, שם גם למד באוניברסיטה במשך שנתיים. את תואר הדוקטור הוא קיבל בשנת 1928 בהנחיית ארנולד סומרפלד (Sommerfeld) אחרי שנתיים וחצי של לימודים במינכן. לאחר מינויים זוטרים קצרים בפרנקפורט, שטוטגארט ומינכן, וביקורים מדעיים בקמברידג' שבאנגליה וברומא, הוא מונה כפרופסור עוזר בפועל באוניברסיטת טיבינגן. אך מינוי זה נשלל ממנו כעבור חצי שנה עם עלייתם לשלטון של הנאצים, בהיות

אימו יהודיה. בסוף 1933 היגר בתה לאנגליה, שם עבד במשרות זמניות במנצ'סטר ובבריסטול, עד שקיבל מינוי כפרופסור עוזר מאוניברסיטת קורנל בארה"ב בתחילת 1935. הוא הועלה לדרגת פרופסור מן המניין בקורנל בשנת 1937 ונשאר שם עד סוף חייו, מלבד שבתונים ותקופות עבודתו למען המאמץ המלחמתי של ארה"ב במהלך מלחמת העולם השנייה.

כאזרח אמריקאי מאז 1941, נטל בתה חלק בפעילות מעבדת הקרינה במכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (M.I.T.), ששקדה על פיתוח הרדאר בתחום גלי המיקרו. משם הוא גויס על-ידי רוברט אופנהיימר (Oppenheimer) לשמש מנהל המגזר העיוני בפרוייקט מנהטן בלוס-אלמוס, שם פותחה פצצת האטום. הוא מילא תפקיד מרכזי בניהול והדרכה של המאמץ העיוני

*מיכאל קירסון, (כיום פרופסור קירסון) עשה את הדוקטורט שלו בהנחייתו של פרופסור הנס בתה בשנים 1963-1966.

(Bethe ansatz) והיא מהווה עד עצם היום הזה גישה פורייה לפתרון מגוון רחב של בעיות. בעשרים השנים האחרונות של חייו של בתה, עוד צוטט מאמר זה ביותר מאלף חמש מאות מאמרים, למרות שחלק גדול מן המאמרים אשר בכותרתם או בתקצירם מופיעות המילים "הנחת בתה" אינו מזכיר כלל את המאמר המקורי!

באותה תקופה פרסם בתה, יחד עם מנחהו לשעבר סומרפלד, מאמר בו סקירה חשובה על תורת האלקטרונים של המתכות. מאמרים אחרים עסקו במעבר מסדר לאי-סדר בנתכים, בסריגי-על (superlattices) ובעבודות חלוציות נוספות בתורת החומר המעובה.

בתה תרם רבות לפיתוח התורה הקוונטית של הפיזור ויישם את פיתוחיו בסדרת עבודות. הוא טיפל באופן יסודי בחדירת חלקיקים מהירים לתוך חומר באמצעות חישוב קצב איבוד האנרגיה של חלקיקים טעונים כתוצאה מהתנגשויות עם האלקטרונים והיונים של החומר. מכאן הסיק בתה את טווח החדירה של חלקיק כזה דרך חומרים שונים, כפונקציה של האנרגיה ההתחלתית שלו. הקשר בין אנרגיה לטווח מהווה כלי ניסויי חשוב ויסודי במעבדות החלקיקים. נוסחאותיו של בתה עומדות ביסוד הבנת כוח העצירה (stopping power) של החומר. הוא עסק גם בפיזור קרינה אלקטרומגנטית מאלקטרונים ומאטומים, ויחד עם הייטלר (Heitler) חישב את נוסחת בתה-הייטלר עבור חתך-הפעולה לפיזור של קרינה, נוסחה הנמצאת בשימוש שגרתית גם היום.

באמצע שנות השלושים של המאה העשרים התחיל בתה להתעניין בגרעין האטום. הוא פרסם עם פאיירלס (Peierls) את התורה הראשונה של הדויטרון, הגרעין המורכב הפשוט ביותר (מורכב מפרוטון אחד ונויטרון אחד). הוא עסק בפיזור נויטרונים ופרוטונים, הרחיב והעמיק את תורת נילס בוהר (Niels Bohr) לפיזור גרעיני, ובשנות 1936/7 פרסם שלושה מאמרי סקירה אשר היו בבחינת המקור המוסמך לפיסיקה הגרעינית כולה במשך שנים רבות וזכו לכינוי "התנ"ך של בתה" (Bethe's bible).

עבודתו המעמיקה בתורת התגובות הגרעיניות הובילה את בתה להתחבטות עם בעיית מקור האנרגיה של הכוכבים¹. במאמץ רחב היקף ויסודי ביותר הוא חישב את קצב יצירת האנרגיה של כל התגובות הגרעיניות שבאו בחשבון. הוא הוציא מכלל חשבון את רוב התגובות המועמדות להסבר תהליך יצירת האנרגיה והצליח לבודד שני מעגלי תגובות שענו על כל הדרישות. אנרגיית השמש נובעת בעיקר מתגובות בין פרוטונים ובין תוצרי מיזוג פרוטונים, תהליך שנקרא מחזור פרוטון-פרוטון (p-p cycle), בעוד עיקר האנרגיה המיוצרת בכוכבים כבדים יותר נובעת ממחזור פחמן-חנקן-חמצן (CNO cycle). כעבור שלושים שנה קיבל בתה את פרס נובל בפיסיקה לשנת 1967

"על תרומותיו לתורת התגובות הגרעיניות, במיוחד תגליותיו אודות יצירת אנרגיה בכוכבים" (בלשון האקדמיה השוודית המעניקה את הפרס).

בתהליכי יצירת האנרגיה בכוכבים נפלטים נייטרונים המסוגלים, הודות לאינטראקציה החלשה מאוד שלהם עם החומר, לצאת מהר גם ממרכז הכוכב ולספק מידע על מצבו הפנימי. (פוטון של אור הנוצר בליבת הכוכב יוצא מפני הכוכב רק כעבור עשרות אלפי שנים ועובר בדרך התנגשויות רבות המסתירות את תנאי יצירת הפוטון). ניתן לגלות נייטרונים מן השמש על פני כדור הארץ במסגרת ניסויים גדולי היקף הקשים לביצוע. גילוי הנייטרונים מתאפשר באמצעות התגובה ההפוכה להתפרקות β (inverse beta decay) - שהיא בליעת נייטרון תוך כדי פליטת אלקטרון. הרעיון לנצל תגובה זו התבסס על מחקרם של בתה ופאיירלס, שניבאו את קיום התהליך וחישבו את חתך הפעולה שלו בשנת 1934.

כאשר בניסוי גילוי נייטרונים מן השמש נמצאו פחות נייטרונים מן הצפוי לפי המודלים הקיימים, הוצע בין היתר הסבר המבוסס על האפשרות של שינוי האופי של הנייטרונים בדרכו מיצירתו בשמש עד לגילוי על פני כדור הארץ². קיימים שלושה סוגים שונים של נייטרונים - זה הקשור עם האלקטרון, זה הקשור עם המיואון (muon) וזה הקשור עם הלפטון טאו (tau). רק הראשון נוצר בשמש, ורק הוא היה ניתן לגילוי בניסויים שנערכו. אם הנייטרונים של האלקטרון הופך לנייטרון מסוג אחר בדרך גלואי, יהיה מחסור בנייטרונים בגלאי. כדי להסביר את המדידות היה צורך בתהליך רזוננטי של החלפת האופי של הנייטרון במעברו בחומר של השמש. החישוב הראשון שאישר את הסבירות של הסבר זה וסיפק את ההערכה הראשונה של ערכי הפרמטרים הכרוכים בוצע על-ידי הנס בתה כחמישים שנה אחרי שחישב את תהליך התפרקות β ההפוכה. הניסויים האחרונים³ ביססו את ההסבר. בתה המשיך להתעניין בתפקיד הנייטרונים בתרחישים אסטרופיסיקליים, ולחקור אותם, עד סוף ימיו.

לאחר סיום מלחמת העולם השנייה, כאשר חזרו הפיסיקאים מעיסוקיהם המלחמתיים למחקר רגיל, היה עניין רב בתורות יחסותיות של אלקטרודינמיקה ואינטראקציות אחרות. היו קשיים יסודיים ביישום תורת היחסות במסגרת קוונטית, קשיים שהתבטאו בהתבררות האינטגרלים בחישובים. האפקטים הנמדדים היו זעירים אך ברורים, ואי היכולת לחשב את הגדלים כראוי העיקה על קהילת הפיסיקאים. בסדנא מיוחדת באי שלטר (Shelter Island) התאספו כל בעלי השמות הגדולים בפיסיקה העיונית והדיונים התרכזו בניסוי של למב (Lamb), בו נמדדה הסחה קטנה של רמת אנרגיה מסוימת של אטום המימן מן הערך המחושב המדויק ביותר. הועלו רעיונות שונים וכולם הסכימו להמשיך לחקור את הבעיה. ברכבת, בדרך הביתה

(Brueckner-Bethe-Goldstone) לחומר גרעיני. התפתחויות שונות במשך השנים הביאו את התורה להתאמה קרובה לערכים המוסקים מנתוני הגרעינים הסופיים, במידה רבה כתוצאה מהבנתו של בתה שהדרך הנכונה לסיווג התרומות השונות לאנרגיית הקשר של החומר הגרעיני, היא לפי מספר הנוקלאונים הנוטלים חלק באינטראקציה, דהיינו ראשית זוגות נוקלאונים, אחר כך שלשות, וכך הלאה.

בשנות השבעים והשמונים חזר הנס בתה לחקור את הכוכבים, בעיקר תהליכים המתפתחים לאחר צריכת כל הדלק הגרעיני של הכוכב. בהעדר לחץ נגדי הנובע מן החימום הנוצר על-ידי תגובות גרעיניות, מתגבר כוח הכובד והכוכב קורס. קריסה מהירה זו נעצרת על-ידי לחץ קוונטי שהוא תוצאה מעקרון פאולי (Pauli) האוסר הצטופפות של פרמיונים. נוצר גל הלם המפרק את השכבות החיצוניות של הכוכב בפיצוץ אדיר הנקרא סופרנובה (supernova)¹. הבנת הפיצוץ, מניעת עצירת גל ההלם על-ידי חיכוך עם החומר החיצוני של הכוכב, תפקידם של הנייטרונים הרבים מאוד הנוצרים - כל אלה העסיקו את בתה והולידו סדרה של עבודות חלוציות שהנחו חוקרים רבים אחרים, למרות שהפתרון הסופי טרם הושג.

הנס בתה היה חלוץ בתחומים רבים של הפיסיקה. הוא נהג לעבוד בשיטתיות והיה יושב למכתבתו עם ערימה של דפים נקיים בצידו האחד, ערימה של דפים כתובים בצידו השני וכותב בעט נובע על דף באמצע. מסופר שביום בו קיבל את פרס נובל הסכימה אשתו רוז (Rose) להזעיק אותו לטלפון רק כי "ממילא היום אבוד לעבודה". הוא היה איש חביב, עם צחוק רם ומהדהד, וחוש הומור מפותח. (פעם הכין הפיסיקאי הרוסי גאמוב (Gamow), יחד עם שותף אמריקאי בשם אלפר (Alpher), מאמר בנושא אסטרופיסיקה². בתה הסכים להצטרף כמחבר משותף כדי שהמאמר ייקרא "מאמר אלפר-בתה-גאמוב", (לכאורה alpha-beta-gamma)). בתה דגל בחשיבות החישוב הכמותי וניחן בחוש מדהים לקירוב הנכון והמתאים. שורות אלה מגלות רק טפח מתרומתו העצומה לפיסיקה. הוא היה באמת ענק.

מראי מקום ולקריאה נוספת

1. טוכמן, י., לידתם, חייהם ומותם של כוכבים. תהודה, (1) 21, עמ' 5, 2000.
2. ניר, י., תעלומת חלקיקי הנייטרונים מן השמש, תהודה (2) 22, עמ' 5, 2001.
3. נאמן, י. וקירש, י., צידי החלקיקים, מסדה 1993.

לקורנל, עשה בתה את החישוב הראשון של הסחת למב (Lamb shift) וקיבל התאמה טובה למדי לגודל הנמדד. חישוב זה, לא יחסותי, נתן דחף עצום לשטח כולו והוביל בסופו לפריצות הדרך של מייסדי האלקטרודינמיקה הקוונטית, פיינמן (Feynman), שווינגר (Schwinger), דייסון (Dyson) וטומונאגה (Tomonaga).

בתחילת שנות החמישים פיתחו בתה וסלפטר (Salpeter) משוואה לטיפול יחסותי במצבים קוונטיים קשורים. משוואת בתה-סלפטר מהווה אבן יסוד בתורות יחסותיות של שדות קוונטיים גם היום.

בשנות המלחמה הציע הפיסיקאי היפני הידקי יוקאווה (Hideki Yukawa) תיאוריה של מקור הכוח החזק הפועל בתוך גרעין האטום. לפי תיאוריה זו, נובע הכוח החזק מהחלפת חלקיק הנקרא מזון (meson) בין הנוקלאונים (הפרוטונים והנייטרונים בגרעין). לפי הטווח הידוע של הכוח החזק - פמטומטרים בודדים (פמטומטר = 10^{-15} מטר) - היה אפשר להעריך את מסת המזון מעקרון אי-הוודאות. הערכה זו, בסביבות 100 MeV, היתה קרובה לערך המסה של חלקיק חדש שנתגלה בקרינה הקוסמית, המיואון, בעל מסה של 105 MeV, אבל התפרקותו האיטית של המיואון העידה על אינטראקציה חלשה. בתה ומרשק (Marshak) פרסמו מאמר שאישר כמותית את הצעתו של מרשק שקיימים שני סוגי מזונים: הפיון (π pion), בעל מסה הגדולה מ-100 MeV ובעל אינטראקציה חזקה, המתאים למזון של יוקאווה והמיואון (μ muon), תוצר ההתפרקות של המזון של יוקאווה. אולם המיואון הוא בעל אינטראקציה חלשה. במונחים של היום המיואון הוא לפטון (lepton) ובכלל אינו מזון, הסברם של בתה ומרשק קיבל אישור ניסויי תוך זמן קצר.

באמצע שנות החמישים פנה בתה לחקר הגרעין כמערכת רב-גופית והתרכז בחישוב תכונותיו של חומר גרעיני אינסופי, מערכת דימינית בה פועל רק הכוח החזק, ללא אלקטרומגנטיות. את תכונות החומר הגרעיני האינסופי ניתן להסיק מחיצון (אקסטרפולציה) של התכונות הנמדדות של גרעינים רבים - אנרגיית הקשר לחלקיק וצפיפות החומר הגרעיני במצב של שיווי משקל. משוואת בתה-גולדסטון (Goldstone) מתארת את המצב של זוג נוקלאונים באינטראקציה הדדית בתוך תווך של נוקלאונים ומאפשרת את חישוב אנרגיית הקשר לחלקיק בצפיפויות שונות, למרות הקושי בטיפול בהשפעת הכוח החזק. קיום מינימום (ראייה למצב שווי משקל) בעקומת אנרגיית הקשר לחלקיק כפונקציה של הצפיפות אישר את מושגי היסוד של תורת ברוקנר-בתה-גולדסטון