

מהו חומר הנפץ של פצצות אטום? ולמה צריכים צנטריפוגות?

פרופ' שמעון לויט - 13.3.2018

שמי שמעון לויט, אני פרופסור אמריטוס במחלקה לפיזיקה של חומר מעובה. הסיבה שאני נותן את השיחה הזאת, היתה בעיקר הסקרנות שלי כמה אנשים מבינים ויודעים את כל הסיפורים של צנטריפוגות. אנחנו יודעים כמה הצנטריפוגות חשובות לאיראן, בעולם מסתכלים כמה יש להם, אבל השאלה כמה אנשים מבינים את הנושא – זו המוטיבציה שלי לדבר על זה. היא נתמכה על ידי זה ששאלתי כמה אנשים בסביבתי, קודם כל את הילדים שלי, והבנתי שהם לא כל כך יודעים מה זה. אין להם מושג למה צריכים צנטריפוגות, וגם מי שיש לו מושג - יודע רק חצי מהדברים. זו הסיבה שאני פה, באותה הזדמנות אספר גם פרטים מסביב, זה סיפור די מעניין.

אני אתחיל בלי הרבה הקדמה. אתחיל בזה שאשאל מה זה פיצוץ. יש פה דוגמא של חומר TNT נדמה לי, שהוא חומר נפץ רגיל, והשאלה למה הוא מתפוצץ. כפי שרואים בשקף, הסיבה העיקרית לכך היא שהמולקולה המסובכת שיש פה הנוסחה שלה – לא חשוב אם אתם מבינים אותה, אני לא כל כך... – זו מולקולה מסובכת שלא קשורה חזק אבל כל האטומים שלה קשורים. המולקולה הגדולה הזאת מתפרקת להרבה חתיכות קטנות שקשורות מאוד חזק. כלומר, יש מולקולה אחת גדולה שמתפרקת למולקולות פשוטות שקשורות בצורה חזקה, ואז מה שיש לנו זה הפרשי אנרגיה, כי התחלנו עם זה שהאטומים שנמצאים בתוך המולקולה, נעים בתוך המולקולה, התפרקו להרבה מולקולות רבות קטנות. יש הפרשי אנרגיה בין האופן שהאטומים אלה היו פחות קשורים במולקולה הגדולה לבין האופן שבו הם קשורים במולקולות קטנות. זה מתבטא בכך שרסיסים של המולקולה הגדולה עפים לכל הכיוונים, והפרש האנרגיות הולך לקינטיקה של כל הרסיסים הקטנים. אם זה קורה בבת אחת בכל המולקולות של חומר הנפץ, זה משתחרר לאנרגיה גדולה, הכל עף לצדדים, זה מה שקוראים פיצוץ. זה פיזיקה או כימיה של פיצוץ.

בפיצוץ גרעיני, כמו בפצצות אטום, קורה דבר דומה, אולי פשוט יותר ממה שראינו פה – יש גרעין גדול שמורכב מהרבה כדורים קטנים כאלה, נוקליאונים, שמי שיודע, הם מתחלקים לפרוטונים ונויטרונים שצבועים פה בצבע שונה. אדום זה פרוטונים, אפור זה נויטרונים. כרגע לא כל כך חשוב אם אתם יודעים את זה, מה שחשוב זה שיש אוסף גדול מאוד, 235 אלף כדורים קשורים ביחד בצורה די חלשה, ביחס למשהו, ואז הדבר הזה – עקב משהו שנגרם לו, פה גם כן היתה פעולת הצתה, אתם יכולים לראות שיש פה פתיל שמצית את חומר נפץ הרגיל – אז גם כאן יש פעולת הצתה שמשוה קורה וגורם לכך שכל האוסף של 235 אלף הכדורים, הנוקליאונים, מתפרק לשתי חתיכות, שהן חתיכות יותר קטנות ויותר קשורות. הן קשורות זו לזו חזק מאשר כל ה-235 אלף שהיו בגרעין המקורי. נוצר הפרש אנרגיה, והפרש האנרגיה הזה, אם הביקוע הזה קורה בבת אחת בחתיכה מיקרוסקופית של חומר, נוצר פיצוץ. רואים שיש פה מספר קטן של 200 וסימן מוזר, MeV. זו יחידת מדידה למדידת אנרגיה בפיזיקה גרעינית, זו היחסיות בין האנרגיה זאת לאנרגיות אחרות; קצת אתן לכם מושג מה זה הרבה או מעט, רק תזכרו שיש יחידה למדידת אנרגיה, MeV, מגה אלקטרון וולט, ומה שמשתחרר זה 200 MeV.

אני מקווה ששיכנעתי אתכם שבגדול התהליכים האלה דומים. חומר מסובך מתפרק לחתיכות פשוטות. הקשר של החתיכות של החומר המסובך הוא רופף, החלקים בחתיכות הקטנות קשורים הרבה יותר

חזק, והפרש האנרגיות משתחרר באנרגיה קינטית של רסיסים. אם זה קורה בבת אחת יש פיצוץ. אותו דבר קורה גם בגרעין גדול, הוא מתפרק לשני חלקים שהם הדוקים הרבה יתר מאשר הקשר הרופף של הנוקליאונים בגרעין הגדול, ומשתחררת אנרגיה.

כרגע אתם רואים את המספר 200MeV, אני רוצה לתת לכם טיפה הרגשה כמה זה 200MeV ביחס ליחידות אנרגיות שבדרך כלל אנחנו רואים, גם כדי לענות על השאלה למה יש אפקט שהוא כל כך יותר חזק מאשר אפקט של פיצוץ חומר נפץ רגיל. יש פה שני מספרים מרשימים. כאשר גרעין גדול מתפרק לשניים, משתחרר סדר גודל של 200 – 200MeV מגה אלקטרון וולט. אם מודדים את האנרגיה בהתפרקות של מולקולה גדולה, בכל מולקולה גדולה משתחררת אנרגיה של 0.1eV. ההפרש בין התפרקות מולקולה גדולה לבין התפרקות של גרעין גדול מצוין פה בשקף אני מחלק 200MeV ב- 0.1eV (0.1 אלקטרון וולט). לא צריך לדעת מה זה MeV או אלקטרון וולט, זה שמשנה זה היחסים ביניהם – היחס בין כמה אנרגיה משתחררת כאשר מתבקע גרעין, לבין כמה אנרגיה משתחררת כשמתפרקת מולקולה של חומר נפץ רגיל, זה 200 מיליון אלקטרון וולט, לחלק לעשירית אלקטרון וולט. יוצא מספר עצום, 2 כפול 10 בחזקת 9, זה מספר שהוא פי 2,000 מיליון יותר אנרגיה מאשר אנרגיה משתחררת ממולקולה רגילה.

אני רוצה לומר בכמה מילים למה יש הפרש כל כך גדול של אנרגיה, ולתת תחושה מה זה אלקטרון וולט, כדי להתחבר לתחושת האנרגיה שיש לנו. האנרגיה שיש לנו בדרך כלל זה חום, אני רוצה לתת לכם מספר אחד שלפחות לי עוזר הרבה פעמים להרגיש מה קורה, אלקטרון וולט אחד – אם אני אתן אלקטרון וולט אחד לכל המולקולות שנמצאות בחדר באוויר, אז האוויר פה יהיה בטמפרטורה של 11 אלף מעלות צלזיוס. 11 אלף מעלות! אלקטרון וולט זה אנרגיה עצומה בסקאלות שלנו ואנרגיה מאוד קטנה בסקאלות גרעיניות. כפי שאמרתי לכם, בשחרור או בביקוע גרעין, משתחררת אנרגיה של 200 מיליון אלקטרון וולט. ופה משתחררת אנרגיה של 0.1 אלקטרון וולט בפיצוץ רגיל. בהערכה גסה שאני עושה – ואני רוצה לסייג אותה שהיא גסה – בגדול אלקטרון וולט זה 11,000 מעלות, ואתם רואים שזה מתאים למה שאנחנו מרגישים בפיצוץ. אם משתחררת אנרגיה של עשירית אלקטרון וולט, זה מתאים ל-1,000 מעלות, אלה הטמפרטורות שנוצרות בזמן פיצוץ, 2,000 או 3,000 מעלות כאשר מתפוצץ חומר נפץ רגיל. כשמתפוצץ חומר גרעיני זה הרבה-הרבה יותר אנרגיה משתחררת. מה הסיבה שיש כל כך הרבה אנרגיה? בשל העוצמה של הכוחות הגרעיניים, שהם כוחות אדירים.

פה הראיתי לכם גרף סכמתי מאוד שעל הציר האנכי אתם רואים שני צירי Y, רואים את הציר שזה אנרגיה, הקשר של נניח 2 אטומי חמצן, והיא נמדדת ב-meV, אבל m קטן, מילי אלקטרון וולט; אנרגיה פה זה שתי חתיכות שמהם בנוי גרעין, שני נויטרונים, היא נמדדת ב-MeV, אבל M גדול. הסקאלות מתאימות, אבל ההבדל הוא 6 סדרי גודל. בציר Y השמאלי יש מילי ובציר Y הימני יש לי מגה אלף. בציר הימני יש 1000 אלקטרון וולט ובשמאלי אלפית אלקטרון וולט. זה ההפרש שאנחנו רואים, רואים שפחות או יותר התנהגות הכוחות שקושרים מולקולה וכוחות שקושרים נניח שני נוקליאונים – זה פחות או יותר אותו דבר, יש רק הפרשי סקאלות. כפי שאמרנו, סקאלה Y הימנית גדולה פי 2,000 מיליון מאשר סקאלה Y השמאלית. גם המרחקים מאוד שונים; פה, בציר X, המרחק הוא בנוי מטרים. זאת התשובה למה יש הפרש כל כך גדול באנרגיה המשתחררת בין מערכת מסובכת שמתפרקת למערכות קטנות יותר בפיזיקה גרעינית לבין בחומר נפץ רגיל.

באיזשהו מקום כבר סיימתי את ההרצאה, הסברתי לכם כבר מהו חומר הנפץ. זה גרעינים כבדים שמתפרקים לגרעינים קטנים. חומר נפץ רגיל זה מולקולות גדולות שמתפרקות למולקולות קטנות. לפיזיקאים זה מספיק, אבל יש פרטים מעניינים שאספר לכם.

בהמשך יש הסבר מהו חומר הנפץ, מנין מגיעה אנרגיה. ניכנס לפרטים ובנין בסופו של דבר איך זה קורה ולמה צריכים צנטריפוגה. בדרך בנין שיש עוד דרך לנצל אנרגיה גרעינית, זו הדרך שעליה אדבר קצת פחות – במקום לקחת גרעין מסובך ולחלק לשני חלקים שהם הרבה יותר הדוקים מהגרעין שקשור בצורה רופפת, אפשר לקחת גרעינים ולרתך אותם. זה נותן שני סוגים של פצצות אטום, פצצת אורניום ופצצת מימן.

נמשיך וניכנס קצת יותר לפרטים של הגרעין. מה זה גרעין? בואו נתחיל לראות גרעינים מול העיניים. נסתכל עכשיו בחומר פנימה; חומר בנוי מאטומים, זה אטום (בשקף), האטום הוא גוף די ריק, שבו מתעופפים אלקטרונים, במרכז האטום יושב הגרעין, הגרעין הרבה יותר קטן מהאטום. יש פה מידות של גרעין, שהוא פי 100 אלף קטן יותר מהאטום עצמו. גרעין זה היחידות שאנחנו יכולים למדוד אותן, בואו נסתכל על הגרעין ונגדיל אותו. גרעין בנוי מאוסף של כדורים קטנים, הכדורים האלה הם משני סוגים. יש כדורים שקוראים להם פרוטונים, יש כאלה שקוראים להם נויטרונים. יש קצת הבדל במסה ביניהם; נויטרונים הם קצת יותר כבדים, אבל לפרוטונים יש מטען חשמלי חיובי, לנויטרונים אין מטען חשמלי, הם ניטרליים. פרוטונים טעונים חיובית ונויטרונים לא טעונים.

זה הגרעין (בשקף). ננסה לבנות גרעינים, בדרך שהטבע בפועל בונה אותם. נתחיל עם החתיכות הכי קטנות; קודם כל אני בונה גרעינים וגם את האלמנטים הכימיים שסובבים אותם, שיש להם שמות. נראה שלכל אלמנט שאני בונה יהיו שני מספרים ושם. הנה נתחיל מהראשון, הוא פרוטון, יש לו שם: מימן, הידרוגן. מסתבר שהאטום הכי פשוט זה הגרעין שלו – כדור אחד טעון חיובית, זה נקרא מימן, ואנחנו בדרך כלל נסמן אותו בסימן מסוים, אני קורא לזה X, במקרה הזה H, הידרוגן. יש לו Z, שזה המטען שלו, שהוא 1 והסימן שלו יהיה H11. האלמנט הבא שיכול לבנות זה דאוטריום, לגרעין קוראים דיוטרון, והוא לוקח נויטרון ופרוטון ושם אותם יחד, יש כוח גרעיני שקושר אותם די חזק, ואנחנו בונים ממנו אלמנט כימי בשם דאוטריום. פה הסימן יהיה H, הוא עדיין יסומן כהידרוגן, ה-X וה-Z שלו זה 1 אבל ה-A שלו הוא 2. A זה מספר הכדורים שממנו הוא בנוי. אחר כך אני בונה הליום, לוקח שני פרוטונים, נויטרון אחד, נותן שם הליום-3, מסמן אותו בסימן של הליום, שני פרוטונים. בגרעין הליום הזה – במקום 4, יהיו 3 כדורים. אחר כך יש גרעין שנקרא טריטיום, הוא בנוי מפרוטון אחד ושני נויטרונים, לא כל כך יציב. הגרעין הבא זה הליום-4 – שני פרוטונים, שני נויטרונים. אחר כך עוברים – לליתיום, פה יש ליתיום-6, 3 זה 3 פרוטונים ו-3 נויטרונים, ככה הוא בנוי. יש לי ליתיום 6 וליתיום 7, זה סימן שמסמן את כל האלמנטים החיוניים.

עכשיו בואו נסתכל כמה אנרגיה יש לכל אחד מהם. הרי אמרנו שדאוטריום זה קשר בין פרוטון ונויטרון, אנחנו רוצים להסביר את ה-200 MeV שמשחרר כאשר אני מפרק גרעין גדול לשניים. אנחנו רוצים להבין איך זה בנוי. אני מגדיר דבר שנקרא אנרגיית קשר, הגדרה פשוטה – אני לוקח גרעין נתון, משווה את המסה שלו, את האנרגיה שלו, ואיינשטיין לימד אותנו שיש קשר חד חד ערכי בין אנרגיה למסה, הם קשורים דרך גודל שהוא קבוע בכל היקום, שהוא C בריבוע. אני יכול להגיד לשאול כמה שוקל גרעין כשכל הנוקליאונים שלו הם ביחד לעומת המשקל של אותו מספר נוקליאונים כאשר הם מפוזרים. ההבדל בין המסה של סכום המסות של כל הנוקליאונים לבין המסה של הגרעין, מחולק ל-

C בריבוע, או נמדד ביחידות C בריבוע – לזה קוראים אנרגיית הקשר. למה האנרגיה של הגרעין קטנה יותר מזו של כל הנוקליאונים שמהם הוא בנוי? כי הוא קשור, אחרת היה מתפרק, היה אוסף של נוקליאונים.

איך מודדים את זה? שוקלים. איך שוקלים? מעבירים דרך שדה מגנטי, יודעים פחות או יותר, יש נוסחאות שמאפשרות לקשור את הרדיוס של מסלול הגרעין, איך הוא קשור למסה שלו. אם יודעים כמה פרוטונים יש, מה המטען של כל אחד, מה השדה מגנטי, אפשר למדוד מסה. ואם יודעים את כל המסות של נוקליאונים בודדים ומשווים אחד עם השני, ויודעים בעצם מה ההפרש בין המסות האלה חלקי C בריבוע, זאת אנרגיית הקשר, זו המסה שלנו. או שבדרך כלל מודדים את זה, לא מחלקים ב-C בריבוע, ורואים שההפרש הזה הוא אנרגיית הקשר.

בואו נסתכל דוגמא מה קורה בדיוטרון – יש לנו שתי מדידות נפרדות לפרוטון ונויטרון. דיוטרון זו מערכת קשורה הכי פשוטה, יש מסה שנמדדת ביחידות C בריבוע. מדדנו את המסה של הפרוטון, ואנחנו יודעים שהיא שווה לבערך $1,000\text{MeV}$ או 938.3MeV . אני לא מסביר למה, ככה זה יוצא, יש תיאוריות שמסבירות אבל כרגע אני אומר מה שקלנו ומה התוצאה. שקלנו גם את הנויטרון, הוא קצת יותר כבד: 939.5MeV . כאשר אני מחבר שניהם אני מקבל 1877.8MeV , אני לוקח אותם קשורים, בתור דיוטרון – אני מעביר דרך שדה מגנטי כדי לשקול אותו, שוקל אותו, ומבטא את המסה שלו ביחידות אנרגטיות. כל הזמן מופיע פה MeV, אלה יחידות שאתם צריכים להתרגל שככה מודדים אנרגיות בעולם הגרעיני. אני שוקל את הדיוטרון ופה רואים פלא – המספר הזה קצת יותר קטן מאשר הסכום של הפרוטון והנויטרון – 1875.6MeV לעומת 1877.8MeV , ההבדל הוא 2.2MeV . זו אנרגיית הקשר של נויטרון ופרוטון, 2.2MeV , או MeV לנוקליאון אחד.

לא כל כך חשוב לי אם ממש עקבתם אחריי, רק שתדעו שאֵלה תוצאות המדידה של אנרגיית הקשר של דיוטרון – לוקחים את סכום האנרגיות של הפרוטון והנויטרון, מחסירים את המסה של הדיוטרון, ההפרש הוא אנרגיית הקשר, זה 2.2MeV . נהוג מאוד, ומאוד נוח להציג הרבה דברים, לחלק למספר נוקליאונים.

בואו נסתכל – בנינו הרבה גרעינים אחרים, נסתכל מה קורה עם הגרעינים האחרים. עכשיו אני מראה לכם גרף של תוצאות מדידה, ואני מסביר מה מצויר פה. ציר Y מייצג את אנרגיית הקשר, 0, 1, 2, 3, 4, 5 וכו', בסדר יורד. יש איבר שמופיע כאן – לפעמים מציגים אותו עם סימן מינוס, לפעמים כדבר חיובי – אבל תמיד מחסירים אותו מהמסה של כל הנוקליאונים המפוזרים ומודדים, ופה רואים את תוצאות המדידה.

אני מסביר לכם מה רואים בגרף. רואים פה שתי סקאלות, בציר Y רואים סקאלה של 0, 1, 2, 3 וכו' MeV, אנרגיית קשר לנוקליאון בודד. מודדים גם את האנרגיה של הגרעין הגדול ומחלקים למספר הנוקליאונים. בציר X רואים את המסה או את מספר הנוקליאונים בגרעינים הקיימים. לאורך העקומה רואים מימן, יש פה דיטריום, יש הליום, יש טריטיום, יש פה ליתיום ועוד סוג של ליתיום, במספר נויטרונים שונה. הנקודות האלה שרואים פה על העקומה – נקודה, נקודה, נקודה – אלה תוצאות המדידה של אנרגיית הגרעין הזה מחולק למספר הנוקליאונים שיש פה על ציר X. זה נוח מאוד לציין את זה ככה, אחרת הגרף הזה היה גדל מאוד ולא היה נוח לצייר אותו, אבל תראו שזה מאפשר לעשות חישובים על מה שאנחנו רואים. אנרגיית הקשר גדלה מהר מאוד, אחר כך יש פה חמצן, יש פה ברזל, בקצה של עקומה יש אורניום ויש פלוטוניום, אלה הגרעינים הכבדים מאוד.

העקומה הזאת היא מאוד חשובה, הצורה שלה חשובה לכל ההסבר הפרטני של מה זה פיצוץ גרעיני, איך הוא מתרחש ומה מתפוצץ. אתם רואים שהאנרגיה גדלה מהר מאוד ואז מתייצבת, יש לזה סיבה. אגיד שתי מילים על הסיבה, יש הסבר ארוך יותר שלא אכנס אליו.

הסיבה היא כזאת – הקשר הגרעיני הוא חזק מאוד, ככל שאני מוסיף יותר נוקליאונים, הקשר קושר אותם יותר ויותר חזק, אבל הוא קצר טווח. אני מוסיף נוקליאונים, נוקליאון בודד שנמצא באוסף גדול, אני מושך רק את אלה שנמצאים בסביבה שלי. בערך 3-4, 5 שכנים סביבי אותם אני מושך, הוספתי עוד נוקליאון, אני כמעט לא מרגיש אותו, כי אני לא מושך מרחוק, רק את הקרובים. לנוקליאון הרחוק אני לא שם לב. אני קושר את הנוקליאון הזה (בשקף), הוא קושר אותו, הוא קושר אותו, כך יוצרים את הכדור שנקרא גרעין. זו אינטראקציה חזקה אבל קצרת טווח, זו אינטראקציה MeV. לכן בהתחלה כשאני מתחיל להוסיף נוקליאונים, האנרגיה גדלה מאוד, אחר כך היא נרגעת כי לכל אחד יש את השכנים מסביב, האנרגיה לא גדלה פר נוקליאון. אבל יש אנרגיה נוספת, של דחייה. הרי יש פרוטונים שהם כולם חיוביים, ואתם ודאי זוכרים שמטענים בעלי אותו סימן של מטען לא אוהבים לשבת אחד ליד השני, הם רוצים להתרחק. מי מפריע? כוח הגרעין. הוא מושך אותם. מה ההבדל בין שני הכוחות? הכוח האלקטרוסטטי הוא כוח הרבה יותר חלש, הוא חלש פי 100 ויותר מהכוח הגרעיני. הכוח האלקטרוסטטי דוחה, הכוח הגרעיני מושך. לכן הכוח הגרעיני מתגבר עליו, רוצה לפזר את הפרוטונים לצדדים. כשאני מוסיף יותר ויותר, ההבדל בין כוח הגרעיני לכוח החשמלי הוא שהכוח החשמלי הוא ארוך טווח, הוא כמו כוח גרביטציה, גם במרחקים גדולים הוא דוחה. כשאני מוסיף יותר ויותר פרוטונים, הכוח גרעיני מושך אותם; זה מושך מפה, זה מושך מפה, והכוח האלקטרוסטטי דוחה את כולם – גם את הפרוטון לידו, גם את הפרוטון היותר רחוק ממנו. אני מוסיף יותר ויותר פרוטונים, כוח הדחייה גדל – להבדיל מכוח גרעיני שהוא קצר טווח ואינו גדל פר נוקליאון. הוא גדל כי מספר הנוקליאונים גדל, אבל כל נוקליאון מגיע לרוויה, יש לו שכנים שהוא מושך אותם וזהו, לא יותר. לכן כשאני מתחיל ללכת לכיוון גרעינים כבדים, פתאום אנרגיית הקשר הולכת ונעשית קטנה יותר, והגרעין מתרופף, יש התרופפות בגרעין. כאשר האנרגיה גדלה, היא מתייצבת, היא הכי גדולה באזור הברזל. זאת אחת הסיבות למה פרודיוריטים בנויים ברזל. זו אחת מהסיבות, אני נותן לכם רק רמז לסקרנות לחפש את זה. אבל אלה גרעינים שקשורים בצורה הכי חזקה, אחר כך הם מתחילים להתרופף. בדיוק פה אני רואה את התופעה שאני זקוק לה כדי לייצר פיצוץ. אני רואה שכדאי לקחת גרעין עם 200 נוקליאונים, ואני אומר: למה שהגרעין הזה לא יחיה בתור גרעין עם 200 נוקליאונים במקום שיהיו לי שני גרעינים שכל אחד מהם הוא 100? נסתכל בגרף ונשווה את האנרגיות שלהם, 200 זה בערך 7.5MeV, 100 זה בערך 8.5MeV. אז כמה אנרגיה ארוויח אם אקח גרעין של 200 נוקליאונים ואחלק אותו לשתי חתיכות של 100? הפרש באנרגיית הקשר הוא בערך MeV אחד. על הסקאלה הזאת אני יכול לראות בקלות את האנרגיה שתשתחרר אם גרעין של 200 נוקליאונים יתפרק לשניים. למה הוא מתפרק, תיכף נראה. כרגע אני מדבר מבחינה אנרגטית – אפשר לקחת את כל הגרעינים אלה, כולם יכולים להתפרק ונרוויח אנרגיה.

ראינו תופעה אחרת – פה כדאי דווקא למזג גרעינים, ניקח שני גרעיניים של ליתיום, H₂ יוצר מהם הליום. אני לוקח 2 גרעינים של H₂, ובונה גרעין בנוי מ-4. פה אני ארוויח אנרגיה ממיזוג של שניים כאלה, הפרש של 6MeV, 6 כפול 4. כלומר, אני ארוויח סביב 24-25MeV אם אקח שני גרעינים של H₂ ואייצר מהם הליום אחד.

כל החישובים אלה מביאים אותי לגרף הסכמתי מאוד, שבו מצוירת אנרגיית הקשר, כמו שצוירת קודם, והמסה או מספר הנוקליאונים בגרעין. כשאני מתחיל מהגרעינים הקלים והולך אל הכבדים, אני רואה את העקומה הזאת (בשקף), את אנרגיית הקשר לנוקליאון אחד של גרעינים ידועים. יש לי פה שני אזורים, שאני יכול לנצל כדי לעשות פיצוץ. לא שאני רוצה לנצל את זה, אבל ניצלו את האזורים הללו כדי לייצר פצצות אטום. יש פה אזור עם גרעינים שקשורים בצורה רופפת ויכולים להתפרק לשניים, וכך להרוויח אנרגיה, כשהחישוב הוא הפרש האנרגיה כפול מספר הנוקליאונים שיש לי כאן (פה מצוין אורניום שהוא כבד יותר מברזל). אז הגרעין הזה יכול להתפרק לשתי חתיכות, ומה שנקבל זה האנרגיה כפול מספר הנוקליאונים שישתחררו כשהוא יתפרק לשניים. יש אזור של מיזוג, היתוך של גרעינים יותר קלים ליותר כבדים, וכמה אנרגיה ארוויח אם אצליח למזג אותם ביחד.

אני רוצה לספר בשתי מילים על עוד דבר אחד, שהוא לא כל כך שייך לפה אבל פשוט מעניין. אפשר לשאול אותי: למה אתה כל הזמן מצייר פה את מספר הנוקליאונים הכולל בתוך הגרעין, רואים פה ברזל - 56, אורניום - 235, מה עם הפרוטונים והנויטרונים שהם בנוי הגרעין? למה אני לא מצייר גרף שיהיו בו שני צירים, Z ו-A, של מספר הפרוטונים ומספר הנויטרונים? אראה לכם מה קורה כאשר אני מסתכל על זה, יש פה תופעה מעניינת של עמק היציבות. מסיבות פיזיקליות, אם אני מצייר את האנרגיות האלה – יש לי שני צירים כמובן, ציר של מספר הנויטרונים וציר של מספר הפרוטונים, ואני צריך ציר שלישי של אנרגיה. הציר השלישי הוא אנכי, בצד ימין של הגרף, ובו יש קווי גובה כמו במפה, וגודל האנרגיה מיוצג על ידי צבעים – ככל שהצבע יותר צהוב, האנרגיות גדולות; ככל שהוא יותר כחול, האנרגיות קטנות. כחול זה 1, צהוב זה 8, וביניהם יש גוונים שונים. יש פה (בגרף) עמק יציבות, תחום שבו הגרעינים הם בדרך כלל מאוד יציבים, נפרסים לאורך העמק הזה. ככל שהם זזים מהעמק הזה לצדדים, היציבות שלהם נעשית פחות חזקה. האמת היא, שבגלל שקל מאוד לגרעינים לעבור מהמקומות האלה לכיוון העמק, רואים בפועל דבר שהוא מאוד ציורי, וזה מסביר את העמק – במרכז החלק הנמוך של העמק יש אבץ, בדיל, הפניום, זהב, רחוק יותר נמצאת העופרת, ואחריה האלמנטים הכבדים. כך נראה העמק, זו האנרגיה שלו. הגרעינים שאני מכיר, כולם שוכבים לאורך העמק. אם יש גרעינים שנמצאים בסביבה, בדרך כלל מהר מאוד – על ידי כל מיני התפרקות – הם מגיעים לעמק הזה.

הנה התמונה קצת אחרת – הציר האנכי מייצג את מספר הפרוטונים, הציר האופקי את מספר הנויטרונים. בסך הכל יש כ-300 גרעינים ידועים, יציבים, וקצת יותר לא יציבים. את כל הגרעינים האלה לא רואים בגלל ההתנהגות האנרגטית שיש לעמק הזה. רואים את הגרעינים ששוכבים לאורך העמק. הדבר היפה בעמק הזה, הוא שאיננו קו ישר, אלא מתעקל בכיוון ימינה למטה. הוא לא אוהב מספר גדול של פרוטונים, מספר הפרוטונים ביחס למספר הנויטרונים הולך וקטן. בעופרת יש 82 פרוטונים ו-126 נויטרונים, רחוק יותר "אי" קטן שעליו יש אלמנטים כמו אורניום שאתרכז בהם.

אני מראה לכם שוב את אותה תמונה, רק מצוירת אחרת, כדי לשאול שאלה. בטבלה הזאת (בשקף) רואים את כל האלמנטים, מי מכם שזוכר מבית הספר את כל האלמנטים האלה והטבלה הזאת – יודע שיש בה אורניום, צינק (אבץ), זירקוניום, כל מיני דברים כאלה. מה שאני רוצה לשאול בשלב זה – וכאן נלך לגרף שכבר התרגלנו אליו – מה האלמנטים האלה לא מתפרקים? אם כדאי לי, במיוחד לגבי הליום, שהוא יתפרק לשניים כי ארוויח אנרגיה, למה לא כולם מתבקעים עד היום? למה עדיין רואים

עופרת שזה 208 נוקליאונים, למה היא חיה בצורה כל כך שמחה ולא מתפרקת. הרי כדאי לה, היא תרוויח אנרגיה. זאת השאלה שאני אנסה לענות עליה.

התשובה היא שכדי להתפרק להרוויח אנרגיה צריך לעבוד, להתגבר על מחסום הביקוע. אם אני בונה מחסום ביקוע, מודל הכי פשוט, אני לוקח טיפה שקשורה, כל המולקולות של הטיפה קשורות זו לזו, בנוסף אני טוען אותה חשמלית. אני בודק איך האנרגיה של הטיפה הזאת תשתנה אם אני אתחיל עם טיפה כדורית ואני רוצה להגיע לשתי טיפות, להפריד ביניהן. בגלל שיש דחייה אלקטרונית, אני ארוויח את האנרגיה הזאת, אבל בדרך אצטרך לעבד אותה בצורה כזאת, שהיא תעבור להיות אליפטית, אחר כך יש צורה של טיפה מוארכת עם שקע באמצע, שבו אפשר לעשות את החיתוך לשתי טיפות. אפשר לתת גם הסבר פיזיקלי, שזה עולה לי קודם אנרגיה לעבור מצורה כדורית לצורה מעוותת, עד שאני מרוויח בסופו של דבר את האנרגיה החשמלית שנותנת לי שלשני החלקים הקטנים יש אנרגיית קשר יותר גדולה מאשר לחלק אחד גדול. בדרך אני צריך לעלות באנרגיה, ורק אז ארוויח אנרגיה. זה דומה למצב שיש גבעה, ובגבעה יש בור קטן. אם אני נמצא בבור הזה, למה שלא אתגלגל במורד הגבעה? כי זה דורש אנרגיה להוציא אותי מהבור ואז אתחיל להתגלגל למטה. אני מצייר את האנרגיה הזאת בצורה סקמטית, זה העיוות של הגרעין, זו דרך לאפיין את הצורות האלה. בהתחלה אני מצייר כדור, ופה יש כדורים שדבוקים אחד לשני, ואז יש פירוק לשני כדורים. כפי שרואים בגרף, בדרך יש עלייה באנרגיה, ורק בסוף התהליך אני מרוויח אנרגיה. העלייה באנרגיה היא מחסום הביקוע, שעליו צריך להתגבר כדי שהדבר הזה יקרה.

אז הבנתי למה לא פשוט להתבקע, ומה בפועל קורה? המספרים עונים לנו על השאלה. המספרים שמתארים את גובה מחסום הביקוע לגרעיניים קשורים. פה יש לנו גרף, בציר האנכי מסומנת אנרגיה ב-MeV, והציר האופקי מייצג את מחסום הביקוע. יש פה שלושה גרעינים כדוגמא, כל אחד עם מחסום הביקוע שלו – לראשון מחסום הביקוע הוא 100 נוקליאונים, לשני 236 נוקליאונים, ולשלישי 300 נוקליאונים. גובה המחסום לגרעין שמחסום הביקוע שלו 500, הוא גבוה – 50-60 MeV. זה מאוד גבוה בסקלה גרעינית. המחסום לגרעין שמחסום הביקוע שלו הוא 236, הוא בגובה נמוך מאוד, 5-6 MeV. כשאני הולך לגרעין יותר פנימי, בכלל אין מחסום. לכן אינם קיימים. אחת הסיבות למה בגרף הזה לא קיימים גרעינים יותר לכיוון ימינה, כי בסופו של דבר אנרגיית הדחייה שלהם מתגברת על אנרגיית המשיכה הגרעינית וגרעינים אלה לא קיימים, הם לא נוצרו או התפרקו.

עכשיו אנחנו מבינים למה גרעינים שמחסום הביקוע שלהם גבוה, עדיין רואים אותם למרות שהם יכולים להתפרק; כי מחסום הביקוע שלהם גבוה מאוד, ויש גרעינים שמחסום הביקוע שלהם לא קיים, לכן הם לא התבקעו, או אפילו לא נוצרו.

פה אני מראה גרעינים שמחסום הביקוע שלהם נמוך, פה אני מראה את אותו הגרף שראינו קודם עם עמק היציבות, רק שלגרעינים שנמצאים כאן יש מחסום ביקוע קטן, תיכף נבין קטן ביחס למה. הם נמצאים בסביבות גרעין האורניום.

נניח שיש לנו גרעין נתון, עם מחסום ביקוע לא גבוה, איך מתגברים עליו. למה מתגברים? כי אנחנו רוצים לבנות פצצה, רוצים להבין איך לפוצץ את הגרעין, איך להבקיע אותו. יש כמה דרכים להתגבר על מחסום הביקוע. בפצצות אטום משתמשים בנויטרון כי אין לו כוח דחייה חשמלי. ברגע שהוא מגיע לגרעין, הגרעין תופס אותו, יש לו כוח משיכה קצר אבל הוא תופס אותו והנויטרון ייכנס באיזושהי באנרגיה. אם האנרגיה שלו תהיה מעל גובה המחסום, אז במקום שהנויטרון יהיה בגומה הזאת – כי

כפי שאמרתי לכם, בגבעה יש גומה – אני מקפיץ אותו מעל המחסום של הגומה, ואז הוא יכול להתגלגל למטה ולהרוויח את כל האנרגיה הגדולה של הפרשי אנרגיה; כי הרבה יותר טוב להיות שני גרעינים מהודקים חזק מאשר להיות גרעין אחד רופף.

בשנות ה-30 עשו ניסויים של פיצוץ נייטרונים כדי לפוצץ גרעינים שונים. או שגרעינים גדולים מתפרקים לגרעינים שהם חצי ממשקלם, כך הבינו את כל התהליך של הביקוע. אני כמעט לא מספר את ההיסטוריה, שהיא מרתקת, כי אני רוצה להסביר את כל הספקטרום של הפיזיקה. ככה הגיע הרעיון שאם נותנים לנייטרון לעבור לגרעין באופן נכון, הוא יכול להבקיע אותו, הוא יספק בדיוק את האנרגיה הדרושה כדי להתגבר על מחסום הביקוע.

נסתכל על המספרים, ראינו שבגדול הבנו מה קורה. הבנו שאפשר להרוויח אנרגיה בביקוע, הבנו שמישהו עומד מולנו, זה מחסום הביקוע שעליו צריך להתגבר. בגרעינים קטנים המחסום כל כך גבוה שאין להם מספיק אנרגיה להתגבר עליה, בגרעינים כבדים המחסום אינו קיים, לכן נשארנו עם הגרעינים באמצע, ואז צץ רעיון להביא נייטרון. נסתכל מתי הנייטרון יעשה את העבודה שלו. פה רואים טבלה, יש בה מספרים ויש פה 5 גרעינים שונים - תוריום, אורניום, אורניום, אורניום, פלוטוניום. באורניום יש בכל אחד 92 פרוטונים, אבל מספר הנייטרונים שונה. בסך הכל לאורניום הראשון בטבלה יש 238 נוקליאונים, לשני 235 ולשלישי 233 נוקליאונים. יש פה גם פלוטוניום, שיש לו 94 פרוטונים ו-239 נוקליאונים.

בואו נתרכז בעיקר בשני האורניום האלה – 238 ו-235, הם רלוונטיים לבניית אטום. מה שאני מסמן זה מהו גובה מחסום הביקוע לכל אחד מהאלמנטים האלה. עבור התוריום – 7.5MeV , אורניום 238 – 7. אורניום 235 – 6.5 . אורניום 233 – 6. פלוטוניום – 5. כך שלאט-לאט יורד. אז בין אורניום 238 לאורניום 235 זה ירד חצי MeV , אבל הירידה הזאת חשובה מאוד. עכשיו נסתכל בעמודה השלישית בטבלה כמה אנרגיה יביא לנו נייטרון אחד. ראינו שבתוריום הנייטרון האחרון שנקשר מביא לנו 5.4MeV , ההפרש של האנרגיה לא יספיק כאן, כי כדי להתגבר על מחסום ביקוע צריך פה 7.5MeV , כך שההפרש הוא שלילי. אם אביא נייטרון אחד, הוא לא יתגבר על מחסום הביקוע. אם אביא נייטרון לאורניום 238, הוא יביא 5.5MeV , לעומת 7MeV שאני צריך כדי להתגבר על מחסום הביקוע. יש הרבה דברים שאני לא מספר פה, אבל בגדול הסיפור נכון. אני מסביר בצורה פשוטה, וזה נכון שבדרך כלל הדבר הזה לא ניתן לביקוע בצורה פשוטה. באורניום 235 הרווחנו, או הפסדנו – השאלה מה אתם חושבים על פצצת אטום. יש פה אנרגיה חיובית. כי אם אביא נייטרון אחד לתוך גרעין של אורניום 235, הוא יביא 6.8MeV , שזה גבוה ממחסום הביקוע ב- 0.3MeV . הגרעין כבר לא יושב בשקט בגומה הזאת, הוא כבר יתחיל לטייל בגומה, מדי פעם יישפך מעבר לגומה. אם אתם שואלים מה זה הגומה, זה צורות שונות של הגרעין. הגרעין בהתחלה יושב בתחתית הגומה, כשהוא מתעקם הוא מתעוות בצורה כזאת שיכול להישפך. הבנו שכדי לבנות פצצה שבנויה על נייטרונים שעוזרים לנו להתגבר על מחסום הביקוע, אנחנו חייבים לעבוד עם אחד מהחומרים האלה, או אורניום או פלוטוניום. אני אתרכז באורניום, אבל יש אפשרות שנייה, שאין לי זמן להסביר אותה היום, שזה פלוטוניום, כי אם נוסף לפלוטוניום נייטרון אחד, הוא יביא 6.6MeV , והאנרגיה כבר תהיה גבוהה ב- 1.5MeV ממחסום הביקוע. אורניום 233 כמעט לא קיים בטבע, תיכף אתן לכם מספרים. יש בסך הכל שני גרעינים שאפשר לנצל לפצצה על ידי הוספת נייטרונים, שזה אורניום 235 ופלוטוניום 239.

עכשיו מגיעים להבנה למה צריך צנטריפוגה. אם אני מסתכל ממה בנוי אורניום טבעי שמוצאים באדמה, הוא בנוי מ-99.3 אחוז של אורניום 238, ורק 0.7 אחוז אורניום 235. יש סיבה לכך. אורניום 238 מתפרק לאט מאוד, במשך מיליארדי שנים, אורניום 235 גם מתפרק לאט אבל הרבה יותר מהר. לכן מאז שהם נוצרו בזמנו, נשאר הרבה יותר אורניום 238 מאשר אורניום 235. בשקף מצוין גם אורניום 234, אבל הוא כמעט לא רלוונטי ולכן לא אדבר עליו. אדבר על אורניום 238 ו-235. כשרוצים לבנות פצצה, צריך לקחת אורניום טבעי ולהעשיר אותו, להגדיל את כמות האיזוטופ אורניום 235 בתוך האורניום הטבעי, ואתם רואים שההעשרה הזאת צריכה להיות אדירה – מ-0.7 אחוז להגיע למשהו שאפשר לעשות ממנו פצצה. תיכף נראה מספרים. פה בשקף אני מראה בדרך סכמתית שרוב האורניום שמוצאים באדמה זה אורניום 238, יש מעט אורניום 235, ואורניום 234 הוא זניח.

איך מגדילים את האחוז של אורניום 235 בתוך האורניום עצמו? בדרך כלל מפרידים חומרים על ידי ריאקציות כימיות. פה זה לא הולך, כי מספר האלקטרונים פה שווה, ולכן כימיה רגילה לא עובדת פה. יש דרכים מכניות להפריד חומרים, כשיש להם מסה שונה. אבל כשלוקחים אורניום 238 לעומת 235, כמעט אין הבדל במסה, ההבדל הוא קטן מאוד. אז מה עושים? מעבירים אותם בצנטריפוגה. לכן צריכים צנטריפוגה. לוקחים אורניום טבעי, יוצרים חומר שנקרא אורניום הקסה פלואוריד (UF₆), שזה נוזל שלוקחים אותו בצורת גז. מה זה צנטריפוגה? זה מיכל שמסתובב מהר מאוד. כאשר המיכל מסתובב מהר מאוד, הגז שכולל את האורניום נכנס לתוכו באמצע, האטומים של אורניום 238 טיפה יותר כבדים מאשר האטומים של אורניום 235. לכן 238 נדחף לקירות המיכל ו-235 נשאר באמצע. מפה שואבים את הגז הזה שנשאר באמצע, מכאן שואבים גז שנדחף לקירות, שזה גז שלא צריכים אותו, הוא מדולדל באורניום 235; והגז שצריכים אותו מועשר באורניום 235.

בשקף אפשר לראות דוגמא לצנטריפוגות שחברינו מאיראן מפרסמים – יש כמויות אדירות של צנטריפוגות כי העבודה בסך הכל סיזיפית, מ-0.7 אחוז צריכים להגיע ל-90 אחוז. פה אני מראה גרף שמצאתי באינטרנט שאומר כמה זמן לוקח לאיראן, לדוגמא, להגיע לנשק מבוסס אורניום שממנו אפשר לעשות פצצות. צריך להגיע ל-90% אורניום 235. מתחילים מ-0.7%, יש 9000 צנטריפוגות, תוך כך וכך זמן מגיעים ל-3.5% אורניום 235, מעבירים עוד שלבים של צנטריפוגות, מגיעים ל-20% אורניום, עוד שלבים - מגיעים ל-60% אורניום, מוסיפים עוד צנטריפוגות ובסוף מגיעים ל-90%. לא אכנס לפוליטיקה, אני נותן הרצאה על פיזיקה – צריך לעבור הרבה שלבים של צנטריפוגות כדי לעבור מאורניום 238, שהוא רוב האורניום שאנחנו חופרים, לאורניום 235 שהוא מפעיל את הפצצה.

עוד שני דברים שאני רוצה להוסיף כדי לסיים את הסיפור. אמרנו שכדי להבקיע גרעין, צריך להביא נויטרון. נויטרון מעלה את האנרגיה ומתגברים על מחסום הביקוע. בשל תוספת האנרגיה, הצורה של הגרעין מתעוותת ומדי פעם הוא מתבקע לשניים, ושני החלקים עפים לצדדים. לשני החלקים האלה יש מספר עודף של נויטרונים ביחס למה שהם צריכים. הם עפים לעמק היציבות – הנויטרונים רוצים להיפטר מעודף האנרגיה. הנויטרונים האלה ימשיכו את הביקוע. כי הבאנו נויטרון, הוא ביקע את הגרעין לשניים, לרסיסים הללו יש עודף נויטרונים ביחס למה שהם אוהבים, הם נפטרים מהנויטרונים האלה, הם עפים תוך זמן שקשה למדוד אותו, תוך ננו שניות הם נפטרים מהנויטרונים האלה, והרסיסים הם אלה שנושאים את האנרגיה שהשתחררה, 205MeV. הם עושים את הפיצוץ, כי אם בבת אחת אני גורם לאטומים רבים להתבקע, זו האנרגיה שאני מקבל וכך נוצר פיצוץ.

פה יש נקודות שאדלג עליהן, כמה אנרגיה משתחררת מכל אחד מהם. מה שאני רוצה לציין, זה הדבר שנקרא תגובת שרשרת. בגלל שמגיע נויטרון ושני רסיסים עפים לצדדים ובדרך הם קלטו עוד נויטרונים, אחד הדברים החשובים בשלבים מוקדמים של כל בניית פצצה, זה לקבוע כמה נויטרונים משתחררים. מסתבר שזה יותר מאחד, מספר הנויטרונים שמשחררים הוא בין 2 ל-3. מדוע זה חשוב? כי אם שלושת הנויטרונים האלה יגיעו עכשיו לגרעינים אחרים, הם יבקיעו גם אותם. כל אחד מהם יתפרק לשניים, לשני רסיסים קטנים, ויפרוק עוד 2-3 נויטרונים, אלה יבקיעו גרעינים נוספים ואז אתם רואים שיש לנו טור גיאומטרי שהולך ומתפתח: כל הגרעינים האלה יתבקעו, בזמנים מאוד קצרים כפי שצינתי, כל אחד ישחרר אנרגיה בסדר גודל של 200MeV וייווצר פיצוץ עצום.

המושג הבא זה מסה קריטית. אם אותה חתיכה קטנה, הנויטרונים שנוצרים בכל אקט של ביקוע הם פורחים, עושים דיפוזיה, מתנגשים לפני שהם נבלעים, אז אם כמות החומר קטנה, הוא בורח משם; אז אין את מספר הנויטרונים שאני צריך כדי לעשות פיצוץ. לכן דרושה מסה גדולה, או כמות חומר מספיק גדולה, שבה רוב הנויטרונים שאני צריך כדי לעשות פיצוץ. לכן דרושה מסה גדולה, או כמות חומר ככה בנויה פצצה. בסך הכל יש סְכָמָה של פצצה גרעינית – ומה שאתם רואים פה זו סכמה הכי פשוטה – לוקחים שני חלקים של כדור, של חומר אורניום 235, כשהמסה של כל אחד מהם היא קטנה יותר מהמסה הקריטית. לכן הפצצה יכולה להיות במטוס, המטוס מפיל את הפצצה; ברגע שרוצים לפוצץ אותה, מפוצצים כמות קטנה של חומר נפץ רגיל, הוא מאיץ את חצי הכדור לקראת חצי כדור השני, הם מתלכדים, עכשיו זו מסה קריטית. תמיד יש נויטרונים בסביבה, מגיע נויטרון אחד, מבקיע את הגרעין לשלושה, השלושה מתבקעים לתשעה וכן הלאה, תוך ננו שניות כל החומר הזה מתפוצץ, כל אחד נותן 200MeV, לכן יש טמפרטורות אדירות.

יש עוד שתי דוגמאות לדבר הזה. פה (בשקף) זה אותו רעיון, לוקחים חתיכה של אורניום, מכניסים אותה לחתיכה אחרת של אורניום, ונוצר פיצוץ. פה יש פלוטוניום, מכווצים את הכל ביחד ויש פיצוץ. אני רוצה לסכם את ההרצאה. למרות שידעתי שלא אספיק לדבר על הכל, יש הרבה דברים מעניינים גם בביקוע. יש שני סוגים של פצצה גרעינית, יש פצצות ביקוע ויש פצצות מיזוג היתוך. דיברנו רק על פצצת ביקוע, לא היה לי זמן לדבר על פצצת היתוך. פצצת ביקוע בנויה על הפרש אנרגיית הקשר בין גרעין גדול לרסיסים קטנים יותר. יש שלושה דברים שעומדים בדרך – אחד זה מחסום הביקוע, מי שעוזר להתגבר עליו זה הנויטרונים שמביאים האנרגיה החסרה. זה עובד רק עם אורניום 235 או פלוטוניום, זה לא עובד עם אורניום טבעי 238, לכן צריכים צנטריפוגות כדי להפריד בין רוב האורניום לבין האורניום המתבקע. תגובת שרשרת מאפשרת לעשות פיצוץ, ודרושה מסה קריטית כדי שתגובת השרשרת תעבוד. זה פחות או יותר איך עובדת פצצה גרעינית, מה חומר הנפץ שיש בה, ולמה צריך צנטריפוגות. תודה רבה.