

כך סייעו קרני גמא לבחון את תורת היחסות

אז מה היה לנו: שני פוטונים מקרני גמא – אחד בעל אנרגיה נמוכה (האדום, בעל אורך הגל הארוך) ואחד בעל אנרגיה גבוהה (הכחול, בעל אורך הגל הקצר) עושים את דרכם מהפיצוץ הרחוק אל הגלאי שעל הלוויין. שניהם מגיעים באותו זמן – מה שאומר שמהירותם שווה

פרופ' יהונתן גרנות, חבר הסגל הבכיר באוניברסיטה הפתוחה חוקר תופעות כמו חורים שחורים והתפוצצויות של כוכבים מסיביים. במחקר שעורר עניין רב בעולם הוא בחן את תורת היחסות של איינשטיין בקו התפר שלה עם תורת הקוואנטים ומצא שהנחת היסוד של איינשטיין לפיה מהירות האור בריק היא קבוע אוניברסלי, עומדת במבחן

אבל תצפיות תלויות במתבונן ויש טעויות אופטיות. והמרחקים העצומים מעמידים כמעט כל דבר בסימן שאלה.

"לא ממש. יש דברים שנתונים לפרשנות, אבל יש תצפיות שכל עוד אין ויכוח שהתצפית מדעית ומדויקת אפשר להתייחס אל נתוניה כאל עובדה. חוץ מזה, במשך אלפי השנים שבהן חוקר האדם את השמים, נצבר כבר לא מעט ידע מבוסס שאפשר לסמוך עליו. אתה יכול להביט אל הירח ולטעון שעל פי מה שאתה רואה הירח עשוי גבינה, אבל היום אנחנו כבר יודעים בוודאות שאין זו גבינה, כי כבר נחתנו על הירח ואנחנו יודעים ממה הוא עשוי. יתרה מכך, כיום גם אפשר ללמוד הרבה על ההרכב הכימי של גוף מרוחק גם בלי להגיע אליו, זאת באמצעות טלסקופ מתאים ומדידת ספקטרום הקרינה

"באסטרופיזיקה, שלא כמו בענפי פיזיקה אחרים", אומר פרופ' יהונתן גרנות, איש המחלקה למדעי הטבע והחיים באו"פ שהוא אסטרופיזיקאי המתמקד באסטרופיזיקה של אנרגיות גבוהות, "אינך הולך למעבדה לבחון את התופעות שאתה חוקר. מדובר בתחום שבו קשה לערוך ניסויים. אינך יכול לקחת כוכב אחד, לזרוק אותו על כוכב אחר ולראות מה קורה. פה ושם מנסים ליצור במעבדות משוכללות מאוד תנאים דומים לאלה השוררים בחלל, אבל זה יכול לעבוד רק עד גבול מסוים. ברוב המקרים אי אפשר ליצור תנאים הדומים לאלה הקיימים בחלל הרחוק".

אז משחקים בנדמה לי?

פרופ' גרנות: "לא – כי התצפיות מחליפות את הניסויים".



הקשת בענן: ספקטרום הצבעים המוכר לכול

מכל סוג שהוא, כולל גלי אור וגלים אלקטרומגנטיים אחרים. בגלי האור, הצבע האדום הוא הצבע בעל התדירות הנמוכה ביותר בספקטרום (קשת הצבעים המרכיבים את האור הנראה יוצרת ביחד צבע 'לבן') ולכן התופעה נקראת 'הסחה לאדום' עבור עצם שמתרחק מאיתנו.

"האסטרונום האמריקאי אדווין האבל היה הראשון שגילה שיש יחס ישר (ליניארי) בין המרחק של גלקסיה מכדור הארץ למידת ההסחה לאדום של האור הנפלט ממנה. יחס זה קיבל את השם חוק האבל והוא מעיד על התפשטות היקום.

"מכיוון שככל שעצם מרוחק מאיתנו יותר, המהירות שבה הוא מתרחק מאיתנו גדולה יותר, גם ההסחה לאדום של האור המגיע ממנו גדולה יותר. לכן ממדידת ההסחה לאדום של האור המגיע אלינו מגלקסיה שמרחקה מאיתנו אינו ידוע – אפשר להסיק מה גודלו של המרחק הזה. כל מה שעלינו לעשות הוא להשוות בין ההסחה שלו לאדום לזו שמופיעה בגלקסיה שמרחקה מאיתנו כבר ידוע. וכיוון שלפי חוק האבל ההסחה תלויה ליניארית במרחק – השוואה פשוטה תגלה את התשובה המבוקשת. במרחקים מסדר גודל של כל היקום הנראה (מיליארדי שנות אור) התלות נהיית מסובכת יותר, אך היא עדיין ידועה בדיוק טוב למדי והשיטה דומה".

אין אובדן אנרגיה בדרך

איזו קרינה מגיעה אלינו מן העצמים הרחוקים שאתה חוקר?

"בגלל התפשטות היקום העצמים הרחוקים מאיתנו ממשיכים כאמור להתרחק מאיתנו אבל אנחנו ממשיכים לקלוט מהם קרינה. זו הרי הדרך העיקרית שממנה אנו לומדים שהם בכלל קיימים. בעצם, מה שמגיע אלינו הוא מגוון של סוגי קרינה אלקטרומגנטית, החל בגלי רדיו בעלי אורך הגל הארוך ביותר, דרך גלי מיקרו, תת-אדום, אור נראה, על-סגול, קרני-א (או רנטגן), וכלה בקרני גמא – בעלות אורך הגל הקצר ביותר (ואנרגיית הפוטונים הגדולה ביותר).

Alamy קריאייטיב/Alamy

ספקטרום של הנתרן

הנפלטת ממנו ומגיעה אלינו.

"ספקטרום הפליטה של חומר הוא קבוצת תדרי הקרינה האלקטרומגנטית הנפלטים מן החומר כתוצאה מחימום או עירור אנרגטי אחר. כאשר חומר כלשהו עובר עירור, אלקטרונים בתוכו עוברים לרמה אנרגטית גבוהה יותר. לאחר מכן, כשהאלקטרונים חוזרים לרמת אנרגיה נמוכה יותר, נפלט חלקיק אור – פוטון – עם אנרגיה השווה להפרש בין שתי רמות האנרגיה. מאחר שרמות האנרגיה של כל חומר ייחודיות לו, גם אנרגיות הפוטונים שהחומר פולט או בולע (המתבטאות באורכי הגל המתקבלים בתהליכי הפליטה או הבליעה – התהליך ההפוך מפליטה) אופייניות לו ויכולות לשמש לזיהוי. לכן גם בלי להיות על כוכב ובלי לגעת בו, נוכל לזהות אם יש בכוכב הזה יסודות כמו פחמן, נתרן או ברזל מן הקרינה המגיעה ממנו – כי במעבדות שעל כדור הארץ נוכל לזהות את ה'חתימה האנרגטית' של החומרים האלה על פי הניתוח הספקטרולי המוכר של אותם יסודות".

המרחק וההסחה לאדום

אבל בדבר בסיסי כמו מרחק – כיצד תוכל למדוד את המרחק בינינו לגלקסיה רחוקה כאשר אתה עצמך מרותק לכדור הארץ?

"השיטה שבה מודדים היום את המרחק אל עצמים רחוקים היא זו המתבססת על 'ההסחה לאדום'. זו התוצאה של תופעה פיזיקלית המכונה אפקט דופלר: כאשר גוף פולט גלים מתקרב אל צופה מסוים, אורך הגל שיימדד על ידי הצופה יהיה קצר יותר (ובהתאם, התדירות של הגל גבוהה יותר), ואילו כאשר הגוף מתרחק מן הצופה, אורך הגל יהיה ארוך יותר (התדירות נמוכה יותר).

"בחיי היום-יום אנו נתקלים בכך כאשר אנחנו שומעים סירנה של אמבולנס: הצליל שלה נשמע לנו גבוה יותר כשהאמבולנס נוסע לקראתנו ונמוך יותר כשהוא מתרחק מאיתנו. אפקט דופלר התגלה בגלי הקול אך מתקיים בגלים

גלאי ואם עושים הצלבה בין כמה גלאים שעל אותו לוויין, אפשר לקבוע בדיוק סביר (של מעלות אחדות) את הכיוון שממנו הגיעה הקרינה בעוצמה הגדולה ביותר.

”ככל שהאות שמגיע חזק יותר אפשר לקבוע את הכיוון בצורה מדויקת יותר, ועבור התפרצויות חזקות יחסית הדיוק הוא בערך של פלוס-מינוס 2-3 מעלות. קשה יותר לקבוע באופן מדויק את הכיוון במקרה של אות חלש, כי אז קשה יותר להבחין בין האות לרעש הרקע, והאות עצמו מכיל פחות פוטונים (כך שגם ללא כל קרינת רקע הדיוק יורד).

פריצת דרך בשנת 1997

”בעבר חשבו שהתפרצויות קרני הגמא מקורן מהגלקסיה שלנו. אפילו כתבו זאת בביטחון בספר לימוד שהן מגיעות מכוכבי נויטרונים מהגלקסיה שלנו. ככל שנצבר מידע רב יותר, כל התיאוריות האלה התבדו. כיום אנחנו יכולים למדוד בצורה אמינה את המרחק שממנו מגיעות התפרצויות קרני

”זאת ועוד, כידוע, האור יכול להופיע בצורת גל או כחלקיקים. ככל שאורך הגל קצר יותר – האנרגיה של כל קוואנטום של אור (פוטון) גדולה יותר והאופי שלו חלקיקי יותר. כך, בעוד גלי הרדיו הם הגליים ביותר – קרני גמא הן בעלות אופי חלקיקי מובהק. זהו אחד הדברים שעוזרים לנו לזהות בדיוק איזו קרינה אנחנו מקבלים. הגלאי שקולט את הגל או החלקיק יכול למדוד בדיוק מה האנרגיה שלו. אם אנחנו מתעלמים מהשפעת התפשטות היקום, האנרגיה של החלקיק שאנו קולטים היא האנרגיה שאיתה הוא יוצא בדרכו אלינו.”

אין אובדן של אנרגיה בדרך?

”לא. אין גם כל סיבה שהאנרגיה תפחת, כי החלקיק אינו נתקל בכל התנגדות בדרך.”

אז במה מתבטאת השפעת המרחק, אם לא באובדן חלק מהאנרגיה של הקרן?

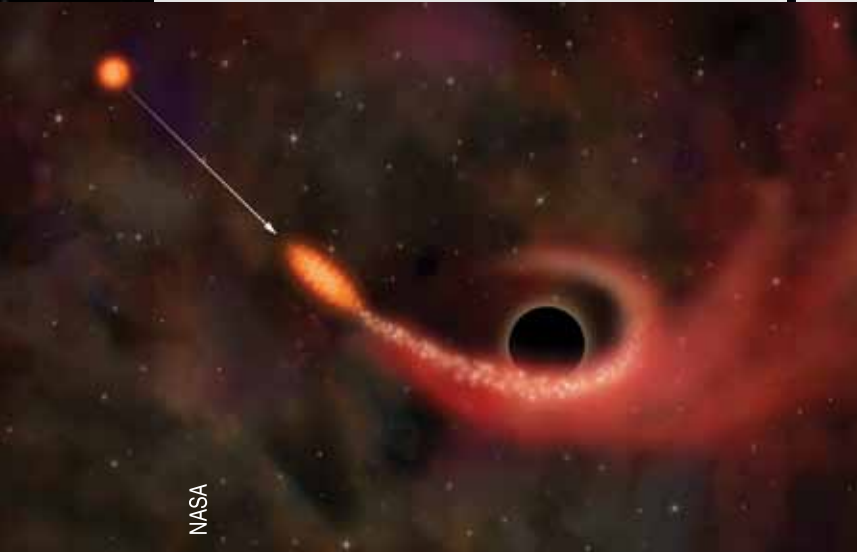
”ההשפעה מתבטאת בכך שפחות חלקיקים מגיעים לגלאי בעל גודל נתון – אבל חלקיק שמגיע אליו מגיע עם אותה אנרגיה שעמה יצא לדרך. תחשוב על נר שמאיר דף בחשכה. כשאתה מציב אותו קרוב לדף – הוא מאיר אותו בעוצמה. כשאתה מרחיק אותו – העוצמה של האור פוחתת משום שחלק קטן יותר מחלקיקי האור שהנר מפיץ פוגעים בדף, אך האנרגיה של כל חלקיק אור המתקרב אל הדף היא אותה אנרגיה, כפי שאפשר ללמוד מכך שצבע האור (או אורך הגל שלו) אינו משתנה.”

פיצוצים בגלקסיות רחוקות

אתה עצמך כמעט לא עוסק בקרינה אופטית. היא ”קטנה עליך”. אתה מתמחה בחקר קרינת גמא – שהיא הקרינה בעלת אורך הגל הקטן ביותר והפוטונים שלה בעלי האנרגיה הגדולה ביותר.

”אני תיאורטיקן, אך נעזר בכל התצפיות הרלוונטיות, ובתופעות שאני חוקר קרני הגמא שימושיות במיוחד. התפרצויות של קרינת גמא מגיעות אלינו מן הפיצוצים העזים והאנרגטיים ביותר ביקום, שמתרחשים בגלקסיות רחוקות. מעצם טבעם, אי אפשר לדעת מראש מאיזה כיוון או מתי בדיוק יגיעו פריצי הקרינה האלה ולכן גם קשה מאוד להתכונן לקראתם. כל מה שאפשר לעשות הוא לגלות התפרצות כזו ברגע שהיא מגיעה ואז לנסות לקבוע מה מקורה.

”המכשירים שיש לנו היום משוכללים דיים כדי לגלות התפרצויות כאלה של קרינת גמא. גלאי אחד אינו יכול לזהות את המקור ולכן שולחים לחלל לוויינים שעליהם מותקנים גלאים רבים. לדוגמה, אחד בכל פינה של הלוויין. גלאי שפניו מופנים בדיוק אל מקור הקרינה יקבל את האות החזק ביותר, בעוד גלאי שפניו פונים אל אותו כיוון רק בפזילה, בזווית מסוימת, יקבל איתות חלש יותר. מדובר בגלאים משוכללים מאוד שכל אות שמגיע אליהם נרשם, כולל זמן ההגעה המדויק והאנרגיה של חלקיקי הקרינה שהגיעו. מה שלא נרשם אוטומטית הוא הכיוון שממנו הגיעה הקרינה. אבל בכל רגע נתון אנחנו יודעים היכן היה הלוויין ובאיזו זווית עמד כל



NASA

ציור המדמה חור שחור המתחיל "לבלוע" כוכב

הגמא וברור שמדובר במרחקים עצומים ביחס לגודלה של הגלקסיה שלנו. הדבר התברר כמובן בהדרגה ובאטיות.

”תחילה גילו שאחרי קרינת הגמא הגיעו מאותו מקור גם קרני X וגם גלים אופטיים (קרינה בתחום הנראה) וגם גלי רדיו. קרינה מאוחרת זו (ביחס לקרינת הגמא) נקראת 'הזוהר שאחרי' (afterglow) התפרצויות קרינת גמא, והיא נמדדת במשך ימים, שבועות וחודשים (גלי רדיו נמדדו לעתים אף במשך שנים). כאשר בדקו את הספקטרום בתחום האופטי ראו קווים ספקטראליים ידועים של חומרים ידועים – ועל סמך ההסחה שלהם לאדום הצליחו למדוד בצורה אמינה את המרחק שממנו הגיעה הקרינה.

”כדי לקלוט אותות של אור נראה, שהוא בעל אנרגיה נמוכה יחסית, צריך לכוון בדיוק למקור טלסקופ אופטי שיש לו בדרך כלל שדה ראייה צר מאוד, ולכן יש לדעת בדיוק רב מאוד את הכיוון שממנו מגיע האור. לשם כך נשלח לוויין שעליו הותקן גלאי רחב זווית לקליטת קרני גמא – שיגלה את הכיוון המקורב שממנו מגיעות ההתפרצויות – ויכוון לשם טלסקופ בקרני X בעל שדה ראייה צר. זה נמשך כמה שנים, אבל הדבר נעשה לבסוף.

"מניתוח הנתונים מדובר במסה גדולה עד מאוד המרוכזת במקום קטן ביותר. רק שני הנתונים האלה יכולים להסביר את מסלולי הכוכבים שנעים סביב מרכז הגלקסיה ומכך אנו למדים שיש שם חור שחור מסיבי".

ניסוי בעזרת לוויין פרמי

במחקר שבהחלט "עשה גלים" בעולם המדע, בחנת את טענתם של אלה המערערים על קביעתו של איינשטיין שמהירות האור היא קבוע אוניברסלי. איך בדיוק נעשה הדבר?

"בתורת היחסות של איינשטיין מהירות האור בריק, c, היא קבוע אוניברסלי והיא המהירות המרבית שאפשר להגיע אליה ביקום. מאז איינשטיין הוצעו תיאוריות פיזיקליות שונות המנסות לאחד בין שני הקצוות של עולמנו – בין המרחבים העצומים של היקום (שבהם שולטת הכבידה) לעולם זעיר המידות של האטומים (שבו שולטת תורת הקוואנטים). תיאוריות אלה מכונות תיאוריות של כבידה קוואנטית, וחלקן מערערות על הקביעה של איינשטיין ומתירות תלות של מהירות האור בריק באנרגיה של הפוטונים. אם האנרגיה שלהם גדולה דיה – מהירותם יכולה להיות שונה בהרבה מ-c, שבמקרה זה יהיה מהירות הפוטונים באנרגיות נמוכות מאוד. "לפי תיאוריות אלה, מהירות האור הופכת להיות שונה בהרבה מ-c כאשר האנרגיה של הפוטונים מתקרבת לאנרגיה אופיינית כלשהי, שמצפים שתהיה קרובה למה שמכונה בשם 'אנרגיית פלאנק', אנרגיה שערכה הוא כ-10 בחזקת 19 ג'יגה אלקטרון-וולט. בעוד שבתיאוריות מסוימות האנרגיה 'אופיינית' הזאת יכולה להיות נמוכה מאנרגיית פלאנק, לא סביר על פי תיאוריות אלה שהיא תהיה הרבה יותר גדולה ממנה.

"אני זיהיתי את ההזדמנות לבדוק את אמיתות התיאוריות האלה בעזרת לוויין חדש ששמו פרמי שנשלח לחלל בשנת 2008 והתמחה בגילוי קרינת גמא על פני טווח אנרגיות גדול, החל מ-8 קילו-אלקטרון-וולט ועד יותר מ-300 ג'יגה-אלקטרון-וולט.

מועד הגעתו של הפוטון – ידוע

"אנחנו יודעים למדוד את האנרגיה של חלקיקי האור בדיוק טוב למדי בעזרת לוויין פרמי, ובהתפרצות קרני הגמא הקצרה שבה השתמשנו, האנרגיות של הפוטונים שמדדנו היו מ-8 קילו-אלקטרון-וולט ועד 31 ג'יגה-אלקטרון-וולט. האנרגיה ומספר הפוטונים הרבים שנמדדו מעידים כמובן על עוצמת הפיצוץ שגרם להתפרצות קרינת הגמא הקצרה הזאת, שמשערים שמקורה במיזוג של שני כוכבי נייטרונים.

"אנרגיית פלאנק היא כמובן גבוהה בהרבה מהאנרגיה של הפוטון הכי אנרגטי שנקלט בפרמי, אך אם מהירות האור אכן תלויה באנרגיית הפוטונים אפשר לצפות שתלות קטנה כלשהי של המהירות באנרגיה תישאר גם באנרגיות הנמוכות בהרבה מאנרגיית פלאנק.

"תיאוריות כבידה קוואנטית שמאפשרות תלות כזו מצפות שבאנרגיות נמוכות בהרבה מאנרגיית פלאנק השינוי במהירות הפוטון (כלומר הערך המוחלט של ההפרש בין מהירות

(המשך בעמוד 8)

"פריצת הדרך אירעה בשנת 1997, השנה שבה התחלתי לעבוד על עבודת המסטר שלי שעסקה בנושא זה בדיוק – התפרצויות קרינת גמא – והגילויים החדשים שהגיעו אז מהשמים היו מרגשים מאוד עבורי.

"נכון להיום אנחנו יודעים פחות או יותר את המרחק שממנו מגיעות ההתפרצויות של קרינת הגמא, אבל אנחנו עדיין לא יודעים מה המקור להתפרצויות שאנחנו קולטים. בדיקה העלתה שההתפרצויות נחלקות באופן גס לשתי קבוצות מבחינת אורכן: כאלה שנמשכות פחות משתי שניות (התפרצויות קצרות) וכאלה שנמשכות זמן רב יותר (בדרך כלל עשרות שניות – התפרצויות ארוכות). ה'אורך' הוא כמובן יחסי. אנחנו עוסקים באסטרופיזיקה ו-30 שניות הן פרק זמן אפסי לעומת אורך חייה של השמש, שהוא מיליארדי שנה.

משהו על חורים שחורים

"יש לנו היום מושג סביר לגבי מקורן של ההתפרצויות הארוכות, בזכות עדות תצפיתית חזקה למדי. כשעקבו אחר הספקטרום של 'הזוהר שאחרי' בהתפרצויות קרני גמא ארוכות, כאלו שהיו קרובות אלינו יותר מהמוצא, הבחינו שכעבור שבועות אחדים הספקטרום משתנה, ובמקביל יש האטה בקצב ההיחלשות של עוצמת האור ולעתים אף התחזקות זמנית של העוצמה הזאת. הספקטרום שמתגלה אז דומה להפליא לזה שמתקבל בשעת פיצוץ שכבר מוכר לנו זה שנים רבות: פיצוץ סופרנובה מסוים מאוד. סופרנובה הוא שמה של תופעה שבה כוכב מסיבי מתפוצץ. אפשר אף לקבוע שזמן הפיצוץ של הסופרנובה דומה לזמן התפרצות קרינת הגמא (בדיוק של פלוס-מינוס יום).

"הפיצוץ בסופרנובה מתרחש בסוף חייו של כוכב. כאשר הולך ואזול בו הדלק הגרעיני (כלומר, כאשר הולכים ונגמרים בתוך הכוכב היסודות שיכולים להתמזג ביניהם בהיתוך גרעיני ליסודות כבדים יותר, תוך שחרור אנרגיה). אז שוב אין בתוך הכוכב כוח שיתנגד למשיכת הכבידה העצמית שלו. התוצאה – הכוכב קורס אל תוך עצמו. ליבת הכוכב נדחסת אז פנימה במהירות, מתחממת מאוד והמעטפת החיצונית של הכוכב עפה החוצה בפיצוץ אדיר כתוצאה מהלחץ העצום שנוצר בזמן הקריסה במרכז הכוכב (לחץ שגורם לגל הלם שעובר דרך מעטפת הכוכב מן הפנים החוצה תוך שעות ספורות). החומר מתפשט במהירות עצומה כגז, בעוד מרכז הכוכב הופך לכוכב נייטרונים, או – אם מסתו גדולה דיה – לחור שחור".

חור שחור הוא דימוי, השערה או כבר עובדה מוכחת? הרי איש עוד לא ראה חור שחור ומעצם טבעו – גם אי אפשר לראות אותו, כי הוא בולע כל דבר שמגיע אליו, כולל האור.

"העדות הטובה ביותר לקיומם של חורים שחורים היא החור השחור המצוי במרכז הגלקסיה שלנו. הקביעה שהוא ישנו היא פרי מעקב ארוך שנים אחר תנועת הכוכבים שנעים סביבו במסלולים קרובים יחסית. מהתנועה הזאת של הכוכבים וממסלוליהם – המוכתבים על ידי קרבתם לחור השחור – אפשר לקבוע את מיקומו ואת המסה המשוערת שלו, כמו שמבדיקות מסלוליהם של כדור הארץ ושל יתר כוכבי הלכת אפשר לקבוע את מיקומה של השמש ואת המסה שלה.



הפוטון ל-c ביחידות של c) שווה ליחס שבין אנרגיית הפוטון לאותה אנרגיה אופיינית שהזכרתי, בחזקה כלשהי. בדרך כלל סבורים שהחזקה הזאת היא 1 (ואז התלות היא ליניארית) או 2 (ואז התלות היא ריבועית).

"תחילה בדקנו את הנתונים שבידינו. אין שום בעיה לקבוע בדיוק מצוין את מועד הגעתו של כל פוטון ולקבוע בדיוק טוב את האנרגיה שלו. איננו מודדים ישירות את המהירות של כל פוטון – אבל כיוון שכל הפוטונים מגיעים מאותו מקור, אנחנו יכולים לחשב את הפרשי המהירות בין הפוטונים בעזרת מדידת הפרש זמני הגעתם אלינו אחרי שעברו אותו מרחק (לפי הנוסחה הידועה שמהירות היא מרחק חלקי זמן).

"אי הוודאות לגבי ההפרש בזמני המעוף מן המקור אלינו של הפוטונים האטניים והמהירים נשלטת על ידי ההפרש בזמני הפליטה שלהם, שאותו אפשר לחשב בדיוק רב יותר ככל שזמן הפליטה של כל קבוצת פוטונים קצר יותר. מסיבה זו התפרצות קרני גמא קצרה שימושית יותר מהתפרצות ארוכה.

"לכן בחרנו בכוונה בהתפרצות קצרה ביותר של כשנייה, כדי שנוכל לקבוע בדיוק טוב יותר את זמני הפליטה של הפוטונים. ההפרש בזמני המעוף יצביע על הפרש המהירות שבין הפוטונים האנרגטיים יותר לאנרגטיים פחות, שכן כולם עוברים אותו מרחק בדרכם אלינו. הרעיון שמאחורי הניסוי פשוט ביותר אך היישום – הרבה יותר מסובך.

חסם עליון להפרש המהירויות

"בהתפרצות קרני גמא כזו יש כרגיל פוטונים המתפרשים על סקאלת אנרגיה רחבה מאוד. מקובל על כולם שפוטונים באנרגיות נמוכות במידה מספקת נעים בריק במהירות השואפת לערך קבוע, c, שלפי תורת היחסות הוא קבוע אוניברסלי. השאלה היא באיזו מהירות נעים הפוטונים בעלי האנרגיה הגדולה והעצומה.

"האם בגלל הפרשי האנרגיה הפוטונים האלה יעברו את המרחק לאט יותר – ויגיעו אחרי הפוטונים הפחות אנרגטיים, או שמא יגיעו מהר יותר ויגיעו קודם? לרוב התיאוריות של כבידה קוואנטית שמאפשרות תלות של מהירות האור באנרגיית הפוטונים אין ניבוי ברור בקשר לשאלה זו, ולכן ניסינו לבדוק את שתי האפשרויות.

"קיבלנו חסמים תצפיתיים בשתי שיטות עיקריות. ראשית, בחנו את זמן ההגעה של הפוטון האנרגטי ביותר, מתוך הנחה שמהירותו קטנה מזו של הפוטונים הפחות אנרגטיים, ושזמן הפליטה שלו מגיע כמובן אחרי תחילת ההתפרצות של קרני הגמא, כפי שמדדנו אותה באנרגיות נמוכות.

"ההנחה האחרונה הזאת סבירה מכיוון שהקרנה הייתה תוצאה של פיצוץ חד-פעמי שהתחיל בזמן מסוים. מאחר שכל ההבזק נמשך שנייה אחת בלבד – הפרש הזמנים בין תנועתם של הפוטונים האטניים ביותר לפוטונים המהירים ביותר הוא לכל היותר שנייה. דהיינו, לפוטון האטי ביותר לקח לכל היותר שנייה אחת יותר להגיע אלינו מאשר לפוטונים האחרים.

"כך קבענו את הפרש זמני המעוף המקסימלי שבין הפוטון האנרגטי ביותר לבין הפוטונים בעלי האנרגיות הנמוכות. את הנתון הזה אפשר לתרגם מיד לערך מקסימלי (או חסם עליון) עבור הפרשי המהירויות, ולערך מינימלי (או חסם תחתון) עבור 'האנרגיה האופיינית'.

"כשהבנו את הנתונים שאספנו בנוסחה הרלוונטית התברר שהחסם התחתון של האנרגיה האופיינית – עבור תלות ליניארית של מהירות הפוטונים באנרגיה שלהם – הוא 1.2 פעמים אנרגיית פלאנק. הגענו לכך כשהחסם חושב בגישה שמרנית מאוד ובזהירות מופלגת. בהנחה שמרנית מעט פחות לגבי זמן הפליטה של הפוטון האנרגטי ביותר נקבל חסם תחתון על האנרגיה האופיינית, הגדול עד פי 10 מאנרגיית פלאנק. וכאמור, תיאוריות הכבידה הקוואנטית מצפות שהאנרגיה האופיינית תהיה **לכל היותר** מסדר הגודל של אנרגיית פלאנק אחת.

"אם זו המסקנה שאליה מובילה ההנחה שמהירות הפוטונים תלויה ליניארית באנרגיה שלהם – מובן שההנחה בעייתית.

הפוטונים הגיעו במקבצים מרוכזים

"השיטה השנייה שבה השתמשנו מבוססת על כך שהפוטונים האנרגטיים יותר הגיעו אלינו בכמה שיאים חדים (שרוחבם של אחרים מהם רק כמאית, או כשתי מאיות השנייה, ואולי אף פחות מזה) ולא מפוזרים באופן אחיד על פני כל משך ההתפרצות.

"אילו מהירות הפוטונים הייתה תלויה באנרגיה שלהם במידה ניכרת – כיוון שהסקאלה של האנרגיות של הפוטונים האנרגטיים הייתה רחבה – השיאים או המקבצים הצרים האלה היו 'נמרחים' לרוחב ציר הזמן, כי כל פוטון היה עובר את המרחק הזה בזמן משלו, לפי האנרגיה שלו. אך מכיוון שזה לא קרה – והתקבלו מקבצים מרוכזים – יכולנו להציב חסם עליון משמעותי על גודלה של התלות האפשרית הזאת של מהירות הפוטונים באנרגיה.

"כשהבנו את הנתונים שאספנו בנוסחאות תורות הכבידה הקוואנטית קיבלנו עבור תלות ליניארית של מהירות הפוטונים באנרגיה שלהם, חסם תחתון של האנרגיה האופיינית שהוא 1.2 פעמים אנרגיית פלאנק. החסם הזה תקף גם אם הפוטונים האנרגטיים יותר נעים מהר יותר, וגם אם הם נעים לאט יותר מפוטונים אנרגטיים פחות, שכן בשני המקרים זה היה גורם 'למריחה' של השיאים החדים. וכיוון שלצורך החישוב הזה השתמשנו בחלק הבהיר ביותר של ההתפרצות, שמנתה כמה מאות פוטונים אנרגטיים שנקלטו בגלאי העיקרי של הלווין פרמי – הטלסקופ בעל השטח הגדול (Large Area Telescope) – זהו חסם שמרני מאוד שמבוסס על מספר גדול מאוד של פוטונים.

"לסיכום, שני חישובים שנעשו בשתי דרכים שונות ובלתי תלויות זו בזו (כי הן לא התבססו על אותם פוטונים), נתנו לנו תוצאה, שלפיה במקרה של תלות ליניארית של מהירות האור בריק באנרגיה של הפוטונים (כלומר כאשר יש פרופורציה ישירה), האנרגיה האופיינית חייבת להיות גדולה מאנרגיית פלאנק לפחות פי 1.2. חסמים שמרניים פחות נותנים אנרגיה הגדולה פי 10. לכן, אפשר להסיק שתלות ליניארית כזו של מהירות האור באנרגיית הפוטונים, כפי שחזות כמה תיאוריות של כבידה קוואנטית, היא מאוד לא סבירה.

"תוצאה זו עוררה עניין רב בקרב הקהילה המדעית שעוסקת בתורות כבידה קוואנטית, וממש עכשיו חזרתי מכנס נוסף שעסק בכך ואשר הוזמנתי אליו כדי להציג את התוצאות האלה, המחזקות את הנחתו של איינשטיין על היותה של מהירות האור בריק קבוע אוניברסלי." ■