



אילוף ליתיום: הפיכת סוללות העתיד לבטוחות יותר

David Rehlund^{1,2*}, Julia Maibach³

¹המחלקה לכימיה, מעבדת אנגסטרום, אוניברסיטת אופסאלה, אופסאלה, שוודיה
²המחלקה לביולוגיה שימושית, המכון למדעי הביולוגיה השימושיים, מכון קרלסרוהא לטכנולוגיה, קרלסרוהא, גרמניה
³המכון לחומרים שימושיים, מכון קרלסרוהא לטכנולוגיה, קרלסרוהא, גרמניה

סוקר צעיר

UMBERTO
גיל: 10



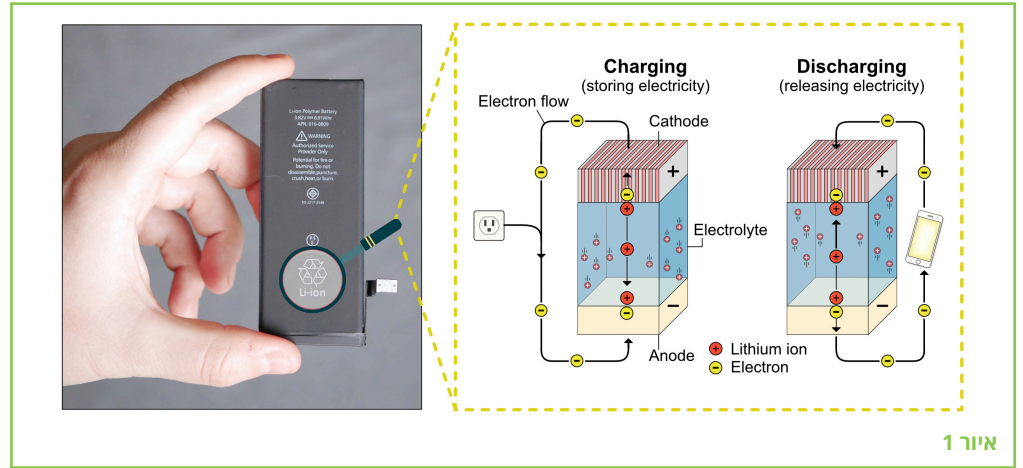
האם אתם יכולים לדמיין את הטלפון הנייד, שלט הטלוויזיה, או הרחפן שלכם מחוברים כל הזמן לכבל חשמל? זו הייתה המציאות לפני 1991, כאשר סוללות ליתיום נטענות הומצאו ושינו את עולמנו. המכשירים הקטנים האלה יכולים לספק חשמל לכל מכשירי האלקטרוניקה האלה, מה שמאפשר להם להיות ניידים ואלחוטיים. אולם המכשירים האלקטרוניים שלנו נעשים יותר ויותר מתקדמים, ודורשים יותר חשמל. מדעני סוללות עובדים קשה במטרה לפתח סוללות חדשות ומשופרות שיכולות לספק חשמל לטלפון הנייד שלכם למשך זמן רב עוד יותר לפני שתצטרכו לטעון אותו. החלום הוא להשתמש במתכת ליתיום, שיכולה לאגור הרבה חשמל. לרוע המזל, קשה מאוד לשלוט בליתיום, והוא יכול לגדל לחוטים שהופכים את הסוללה לבלתי בטוחה לשימוש. במחקרנו האחרון, חקרנו כיצד ליתיום גדל בתוך סוללות, וגילינו שאפשר לְאָלֵף את הליתיום ולגרום לו להיות בטוח לשימוש בסוללות העתיד.

כיצד סוללה פועלת?

סוללות הן מכשירים אלקטרוניים קטנים שמספקים חשמל לכל דבר, החל מטלפונים ניידים ועד למכוניות חשמליות. סוללות משחררות חשמל על ידי המרת אנרגיה כימית מאוחסנת

איור 1

סוללת ליתיום יון בטלפון נייד (משמאל) ותוך הסוללה (מימין). כאשר מתרחשת טעינה, אלקטרונים שליליים נעים על ידי מקור הכוח מהקתודה לאנודה. כאשר מתרחשת פריקה לצורך סיפוק חשמל לטלפון הנייד שלכם, אלקטרונים שליליים נעים באופן טבעי מהאנודה לקתודה. בשני המקרים, היונים החיוביים נעים באותו הכיוון כמו האלקטרונים השליליים, אולם שוחים דרך האלקטרוליט.



איור 1

אלקטרודות (Electrodes)

חומר קשיח שמאחסן יונים על ידי קשירתם לאלקטרונים. באלקטרודה, הזרם החשמלי מולך על ידי אלקטרונים נעים.

אנודה (Anode)

אחת האלקטרודות בסוללה, שנמצאת בקוטב הטעון שלילי. כאן, יונים ואלקטרונים משוחררים במהלך הפריקה.

קתודה (Cathode)

אחת האלקטרודות בסוללה, שנמצאת בקוטב הטעון חיובי. כאן, יונים ואלקטרונים נספגים ומאוחסנים במהלך הטעינה.

אלקטרוליט (Electrolyte)

נוזל שמכיל מלח שמומס בממס, כמו למשל מלח שולחן בתוך מים. האלקטרוליט יכול להוליך זרם חשמלי על ידי הנעת יונים.

יון (Ion)

אטום או קבוצת אטומים עם מטען חשמלי שהוא חיובי או שלילי. ליונים של ליתיום יש מטען חשמלי חיובי.

אלקטרון (Electron)

אלקטרונים אפילו קטנים יותר מאטומים, ויש להם מטען חשמלי שלילי.

לאנרגיה חשמלית. בתוך הסוללה ישנן שתי **אלקטרודות**, שנקראות **אנודה** ו**קתודה**, אשר מופרדות על ידי נוזל שנקרא **אלקטרוליט**. ישנם שני חלקיקים חשובים שמניעים את הסוללה, **יונים ואלקטרונים**. היונים, שיש להם מטען חיובי, יכולים לשחות דרך נוזל האלקטרוליט, אולם אלקטרונים, שטעונים שלילית, לא יכולים לשחות וצריכים לעבור דרך הכבלים כשהם נעים בין שתי האלקטרודות.

כפי שמוצג באיור 1, ישנן שתי דרכים "להפעיל" סוללה: טעינה (אגירת אנרגיה) ופריקה (שימוש באנרגיה האגורה). כשאתם טוענים את הסוללה בטלפון הנייד שלכם, אתם מספקים אנרגיה לסוללה שממפמת את האלקטרונים לתוך האנודה. שם, האלקטרונים יכולים להתחבר לבני הזוג היונים שלהם. כשאתם משתמשים בסוללה בטלפון הנייד שלכם, האלקטרונים רוצים למהר אל הקתודה. אנו קוראים לזרימת האלקטרונים הזו **זרם**. הזרם מנוהל על ידי מעגלים אלקטרוניים כדי לספק חשמל למכשירים כמו הטלפון הנייד שלכם. בסופו של דבר, הזרם נגמר והסוללה נפרקת. סוללות מסוימות יכולות להיטען מחדש על ידי אילוף האלקטרונים חזרה אל האנודה. סוללת הליתיום היא הסוללה הנטענת הטובה ביותר, שנמצאת בשימוש הרב ביותר.

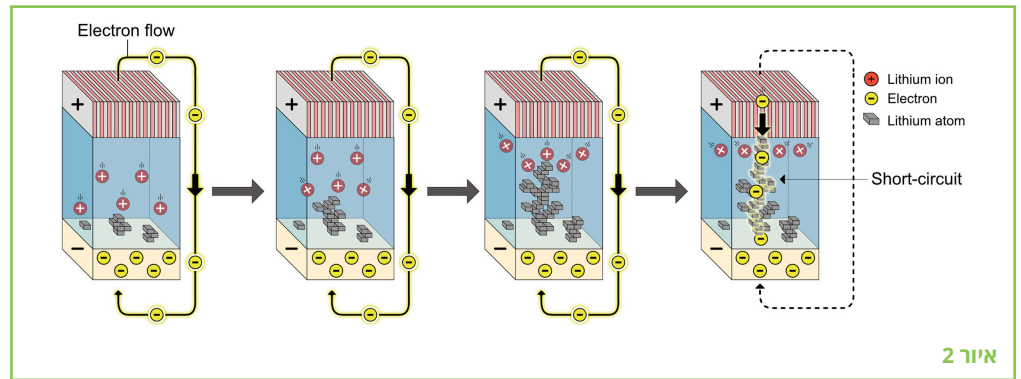
בניית סוללות לעתיד

כאשר המכשירים האלקטרוניים שלנו נעשים מתקדמים יותר, ה"תיאבון" שלהם לחשמל גדל. חוקרי סוללות ברחבי העולם עובדים קשה כדי ליצור סוללות חדשות ומשופרות. ישנם הרבה חלקים של הסוללה שאפשר לשפר, אולם המטרה החשובה ביותר היא להגדיל את כמות האנרגיה שאפשר לאחסן בה.

כדי להגדיל את יכולת אחסון האנרגיה של סוללות, אנו צריכים למצוא אלקטרודות טובות יותר. אלקטרודה אחת מבטיחה ביותר משתמשת ביסוד ליתיום. ליתיום הוא המתכת הקלה ביותר על פני כדור הארץ. היא גם ריאקטיבית מאוד, מה שאומר שהיא המתכת שמשחררת אלקטרונים הכי בקלות. זה גורם לליתיום להיות מושלם לסוללות ניידות. ליתיום היה בשימוש לראשונה בסוללה שהומצאה על ידי פרופסור וויטינגהאם בשנות 1970 [1]. לרוע המזל, קשה מאוד לשלוט בליתיום, והוא יכול לגרום לסוללה להתלקח. הפרופסורים ישינו [2] וגודאינק [3] שינו את האלקטרודות בסוללת הליתיום הראשונה כדי להפיק את הגרסה הבטוחה שאנו

איור 2

כאשר יונים ואלקטרונים של ליתיום נפגשים ומגיבים באופן בלתי נשלט, אטומי ליתיום נוצרים והם נעזרים זה על גבי זה, ויוצרים חוטי ליתיום. כאשר חוט ליתיום מחבר את שתי האלקטרודות בתוך סוללה, זה יוצר דרך קצרה יותר עבור האלקטרונים. האלקטרונים ממהרים מהקתודה לאנודה דרך החוט, במה שנקרא קצר. זה מסוכן מאחר שהחטים מתחממים ויכולים להעלות באש את האלקטרוליט.



איור 2

משתמשים בה כיום בחיי היומיום שלנו. ההישגים החשובים האלה זיכו את שלושת הפרופסורים בפרס נובל בכימיה בשנת 2019.

זרם
(Current)

כשאלקטרונים נעים בכיוון אחד, זרימת האלקטרונים הזו נקראת זרם. כאשר אתם מחלקים את הזרם בגודל האלקטרודה, זה נקרא צפיפות זרם. הזרם הוא הכוח המניע של כל המכשירים האלקטרוניים, כמו למשל הטלפון הנייד שלכם.

אטום
(Atom)

חלקיק קטן מאוד ללא מטען חשמלי. אטומים הם אבני הבניין הבסיסיות של כל החומר ביקום.

הבעיה של ליתיום

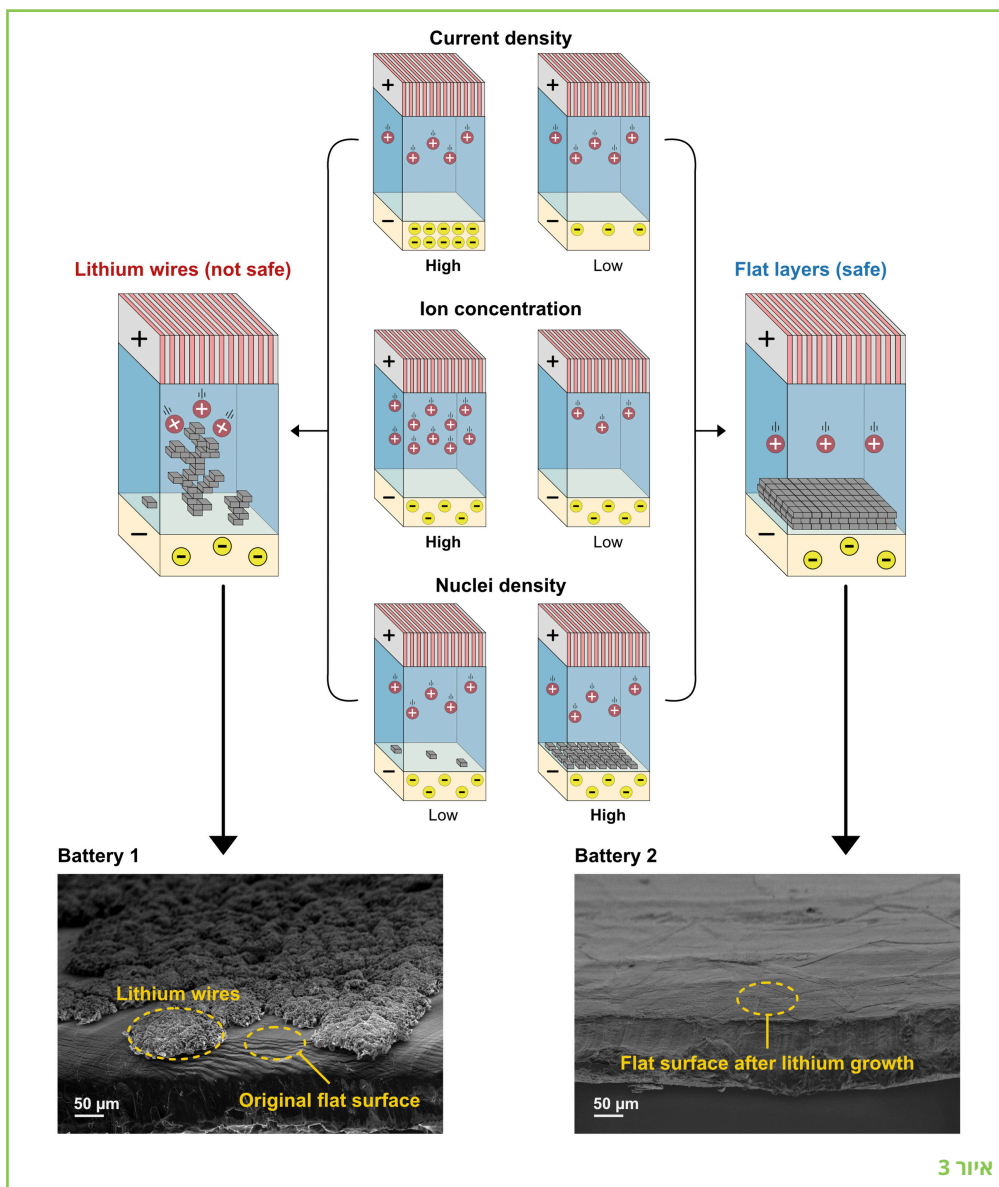
מדענים ברחבי העולם צריכים לעולם לא הרפו מהחלום להשתמש בליתיום לייצור סוללות טובות יותר. במשך כמעט 40 שנים, מדעני סוללות ניסו את כל הדרכים האפשריות להפוך ליתיום לבטוח יותר. הבעיה קשה מאוד, ועדיין לא מצאנו פתרון. אז, מדוע ליתיום לא בטוח? מאחר שהוא אוהב לגדול לחטים בתוך הסוללה!

לאחרונה חקרנו את בעיית הליתיום הזו כדי למצוא דרך לשלוט באופן שבו הליתיום גדל [4]. התחלנו מחקירת האופן שבו חוטי ליתיום נוצרים על האנודה. איור 2 מראה את הגדילה של חוטי ליתיום. כאשר יון ליתיום חיובי פוגש באלקטרון שלילי, הם מגיבים ויוצרים אטום ליתיום נייטרלי (ללא מטען חשמלי) על פני השטח של האלקטרודה. יותר ויותר יונים פוגשים את בני הזוג האלקטרוניים שלהם ויוצרים אטומים על פני השטח. באופן נורמלי, התהליך הזה מתרחש מהר מאוד, ולאטומי הליתיום החדשים שנוצרים יש זמן קצר מאוד לארגן את עצמם בשכבות שוות. במקום זאת, האטומים ייבנו זה על גבי זה ויגדלו כחטים אל תוך האלקטרוליט. ליוני הליתיום יש כעת דרך קצרה יותר לשחות אל חוט הליתיום הגדל. החטים ימשכו יונים קרובים ויגדלו מהר יותר משאר פני השטח של האלקטרודה. בסופו של דבר, חוטי הליתיום יגדלו ויהיו כל כך ארוכים שהם יתחברו לצד הנגדי של האלקטרודה. אלקטרונים יוכלו כעת לנוע לאורך החוט במקום לעשות מעקף ברחבי הסוללה (דרך המעגלים האלקטרוניים של המכשיר), כדי להגיע לאלקטרודה של הליתיום. הדרך הקצרה יותר הזו נקראת קצר, והיא גורמת לסוללה להיות בלתי בטוחה.

כיצד אפשר למנוע את הבעיה המסוכנת הזו? חקרנו זאת על ידי התבוננות באלקטרודות ליתיום בתוך הסוללה [4]. הסוללה נטענה תחילה כדי לגדל אטומי ליתיום חדשים על פני השטח של האנודה. לאחר מכן, פתחנו את הסוללה והסרנו את אלקטרודת הליתיום. הסתכלנו על פני השטח של האלקטרודה עם מיקרוסקופ אלקטרוני מיוחד שיכול לראות פריטים קטנים בגודל של כמה אטומים. לאחר מכן, שינינו את הרכיבים שבסוללה ואת האופן שבו החשמל הוזן לסוללה במהלך הטעינה. מצאנו שלושה גורמים עיקריים שמשפיעים על האופן שבו הליתיום גדל (איור 3).

איור 3

צפיפות זרם, ריכוז יונים וצפיפות גרעינים כולם שולטים באופן שבו ליתיום גדל בסוללה. כאשר צפיפות הזרם וריכוז היונים גבוהים, ומספר "חניית" הגרעינים נמוך, נוצרים חוטים. אולם כאשר ישנם הרבה מקומות חנייה, וצפיפות הזרם וריכוז היונים נמוכים, נוצרות שכבות שטוחות ובטוחות יותר. בתחתית האיור אתם יכולים לראות את התמונות ממיקרוסקופ האלקטרונים של פני השטח של הליתיום מהסוללה הראשונה והשנייה, אשר מראות הבדלים בהיווצרות חוט הליתיום בשני התנאים האלה.



הקטנת זרימת האלקטרונים

הגורם הראשון שמשפיע על גדילת חוטי הליתיום הוא צפיפות הזרם, שהוא זרימה של אלקטרונים דרך הסוללה. צפיפות זרם גדולה משמעותה שהרבה אלקטרונים נעים בין האלקטרודות באותו הזמן. כאשר מספר אלקטרונים נעים, הזרם נמוך. הזרם הוא כמו תחבורה בעיר. בלי מגבלות מהירות, האלקטרונים ימהרו לאלקטרודה ויתפסו כל יון בן זוג שמתקרב לפני השטח של האלקטרודה. עם הזרם הגבוה הזה, זוגות האלקטרון-יון ינחתו בכל מקום שהם יכולים. אם במקום זאת נוסף מגבלות מהירות לסוללה, צפיפות הזרם תהיה נמוכה. משמעות הדבר היא שיהיו פחות אלקטרונים על פני השטח של האלקטרודה. לאלקטרונים יש כעת זמן לנוע ברחבי הסוללה ולמצוא נקודה נוחה שבה הם יכולים לתפוס יון וליצור אטום ליתיום. צפיפות זרם נמוכה נותנת יותר זמן לאטומי הליתיום להתמקם ולהתארגן בתבנית מסודרת. זה אומר שאנו יכולים לסייע לליתיום לגדול לשכבות במקום לחוטים, באמצעות הוספת מגבלות

מהירות לאלקטרונים. שכבות ליתיום גורמות לסוללה להיות בטוחה לשימוש, מאחר שחוסים לא יכולים לגדול בין האנודה לבין הקתודה ולגרום לקצר מסוכן.

הפחתת יוני ליתיום באלקטרוליט

הגורם השני שמשפיע על גדילת חוטי ליתיום הוא ריכוז היונים באלקטרוליט. ריכוז גבוה משמעותו יותר יונים באלקטרוליט. כאשר האלקטרוליט מלא ביונים, הם ישחו סביב ויחפשו אלקטרונים להגיב איתם. כפי שראינו עם האלקטרונים, ההתנהגות הזו גורמת לאטומים לגדול מהר זה על גבי זה, וליצור חוסים. אם במקום זאת נקטין את ריכוז היונים, אז פחות יונים ישחו סביב, מה שיתן להם זמן למצוא נקודה טובה על פני השטח של האלקטרודה. חשוב להבין שכאשר מנמיכים את ריכוז היונים, איננו משנים את האנרגיה שאגורה בסוללה. האנרגיה בסוללה תלויה בכמות הליתיום שיש לנו באלקטרודות, ולא באלקטרוליט, מה שאומר שאנו יכולים לשנות את ריכוז היונים כדי לשלוט בכמות היונים שיעברו באותו הזמן, בלי להחליש את הסוללה.

הגדלת מספר "מקומות חנייה"

הגורם השלישי שמשפיע על גדילת חוטי ליתיום הוא צפיפות הגרעינים על פני השטח של האלקטרודה. גרעינים הם איים קטנים של אטומים שפועלים כנקודות שבהן גדילת ליתיום יכולה להתרחש. גרעינים הם כמו מקומות חנייה לאטומים. צפיפות גרעינים נמוכה משמעותה שישנו מספר קטן של מקומות חנייה, מה שמאלץ את אטומי הליתיום להיערם זה על גבי זה. אם נגדיל את צפיפות הגרעינים ונציע עוד מקומות חנייה, אז אטומי הליתיום יכולים למצוא כולם מקום ולארגן את עצמם בצורה מסודרת. צפיפות גרעינים גבוהה יכולה לסייע לאטומים לגדול בשכבות, במקום בחוסים.

סוללת הבוחן שלנו

במחקרנו, התמקדנו בשינוי ריכוז היונים וצפיפות הגרעינים כדי לראות אם נוכל להפחית את היווצרותם של חוטי ליתיום. בנינו שתי סוללות דומות. סוללה אחת הכילה ריכוז יונים גבוה וצפיפות גרעינים נמוכה. סוללה שנייה הכילה ריכוז יונים נמוך וצפיפות גרעינים גבוהה. שתי הסוללות נטענו ונפרקו. לאחר מכן, פרקנו את הסוללות והסתכלנו על הליתיום שעל פני השטח של האנודה. באיור 3, אנו מראים את התמונות שצולמו באמצעות מיקרוסקופ האלקטרונים, כך שתוכלו לראות כיצד נראו פני השטח של הסוללות האלה. האלקטרודה מהסוללה הראשונה כוסתה ברשת של חוטי ליתיום, שהם קטנים פי כמעט 1,000 מחוט השערה. לאלקטרודה מהסוללה השנייה היו פני שטח חלקים מאוד. משמעות הדבר היא שהליתיום גדל בשכבות.

המתכון שלנו לסוללת ליתיום בטוחה

במטרה לאגף ליתיום ליצור סוללות בטוחות, אנו צריכים להאט את גדילת חוטי הליתיום. אפשר לעשות זאת על ידי הפחתת כמות האלקטרונים והיונים שנעים בסוללה באותו הזמן. ליתיום גם

יגדל באופן נשלט יותר לצורת שכבות אם נוסף הרבה גרעינים לפני השטח של האלקטרודה. עם האסטרטגיה החדשה שלנו, פני השטח של האלקטרודה חלקים מאוד ומראים מעט מאוד חוטים. ללא האסטרטגיה שלנו, פני השטח של הליתיום כוסו לגמרי על ידי החוטים. זה מוכיח שאפשר לשלוט באלקטרודות של הליתיום, וזו תגלית חדשה מרגשת ביותר. אנו מקווים שהידע החדש יסייע לחוקרי סוללות לפתח סוללות חדשות ומשופרות. מטרתנו היא שהדור הבא של הסוללות יאגור יותר אנרגיה כך שהן יוכלו לספק חשמל לטלפון הנייד שלכם או למכונתכם לפרק זמן אפילו ארוך יותר, לפני שתצטרכו לטעון אותם שוב.

מאמר המקור

Rehnlund, D., Ihrfors, C., Maibach, J., and Nyholm, L. 2018. Dendrite-free lithium electrode cycling via controlled nucleation in low LiPF₆ concentration electrolytes. *Mater. Today* 21:1010–8. doi: 10.1016/j.mattod.2018.08.003

מקורות

1. Whittingham, M. S. 1976. Electrical energy storage and intercalation chemistry. *Science* 192:1126–7. doi: 10.1126/science.192.4244.1126
2. Yoshino, A. 2012. The birth of the lithium-ion battery. *Angew. Chem. Int. Ed.* 51:5798–800. doi: 10.1002/anie.201105006
3. Mizushima, K., Jones, P. C., Wiseman, P. J., and Goodenough, J. B. 1980. Li_xCoO₂ (0 < x < -1): a new cathode material for batteries of high energy density. *Mater. Res. Bull.* 15:783–9. doi: 10.1016/0025-5408(80)90012-4
4. Rehnlund, D., Ihrfors, C., Maibach, J., and Nyholm, L. 2018. Dendrite-free lithium electrode cycling via controlled nucleation in low LiPF₆ concentration electrolytes. *Mater. Today* 21:1010–8. doi: 10.1016/j.mattod.2018.08.003

פורסם אונליין: 23 ביוני 2022

נערך על ידי: Noemie Ott

מנחה מדעי: Elisa García-López

ציטוט: Rehnlund D and Maibach J (2022) אילוף ליתיום: הפיכת סוללות העתיד לבטוחות יותר. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00118-he

תורגם והותאם: Rehnlund D and Maibach J (2020) Taming Lithium: Making Future Batteries Safer. *Front. Young Minds* 8:118. doi: 10.3389/frym.2020.00118

הצהרת ניגוד אינטרסים: DR הוא הממציא של פטנט מוגש שכותרתו "An electrochemical device and method for charging the electro-chemical device".

המחברת הנתרת מצהירה כי המחקר נערך בהיעדר כל קשר מסחרי או כלכלי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

Rehnlund and Maibach 2022 © 2020 © **COPYRIGHT** תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקר צעיר

UMBERTO, גיל: 10

קוראים לי Umberto ואני אוהב ללמוד מדע ולשחק עם הנינטנדו סוויץ' שלי עם חברים. אני אוהב ללכת לים ולשחק בחול, הרפתקאות, וציור קריקטורות. בעתיד אני רוצה להיות פיזיקאי.



הכותבים

DAVID REHNLUND

אני חוקר פוסט-דוקטורט במכון קלסרוהא לטכנולוגיה באוניברסיטת אופסאלה. במעבדה שלי, אני חוקר גם חומרים חשמליים וגם חיידקים חשמליים. במחקר הסוללות שלי, אני חוקר כיצד אנו יכולים לשפר את סוללות הליתיום יון ההפיכות שלנו כדי לגרום להן לאחסן יותר אנרגיה למשך זמן רב יותר. אני גם חוקר כיצד חיידקים אלקטרו-אקטיביים יכולים לתקשר עם מתכות ועם מינרלים, וכיצד אפשר להשתמש בזה כדי ליצור חשמל ממי ביו. מחוץ למעבדה, אני אוהב לערוך ניסויים עם אפייה ונהנה לעשות פעילויות בחוץ, כמו למשל חתירה בסירה וטיפוס. *david.rehnlund@kemi.uu.se



JULIA MAIBACH

אני חוקרת במכון קלסרוהא לטכנולוגיה, שם אני חוקרת פני שטח בסוללות ליתיום יון ומלמדת על תהליכי פני שטח ועל איך לחקור אותם. קבוצת המחקר שלי עובדת בעיקר על הבנת התגובות שגורמות לסוללות להיות בטוחות לשימוש, אולם אנו גם חוקרים סוגים אחרים של משטחים, כמו למשל אלה שמשמשים בתאים סולריים ובמכשירים רפואיים. כשאני במעבדה, אני אוהבת לחקור את העולם עם המצלמה שלי ולנסות הרבה מזונות טעימים, שלאחר מכן אני מנסה לבשל בבית.



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK