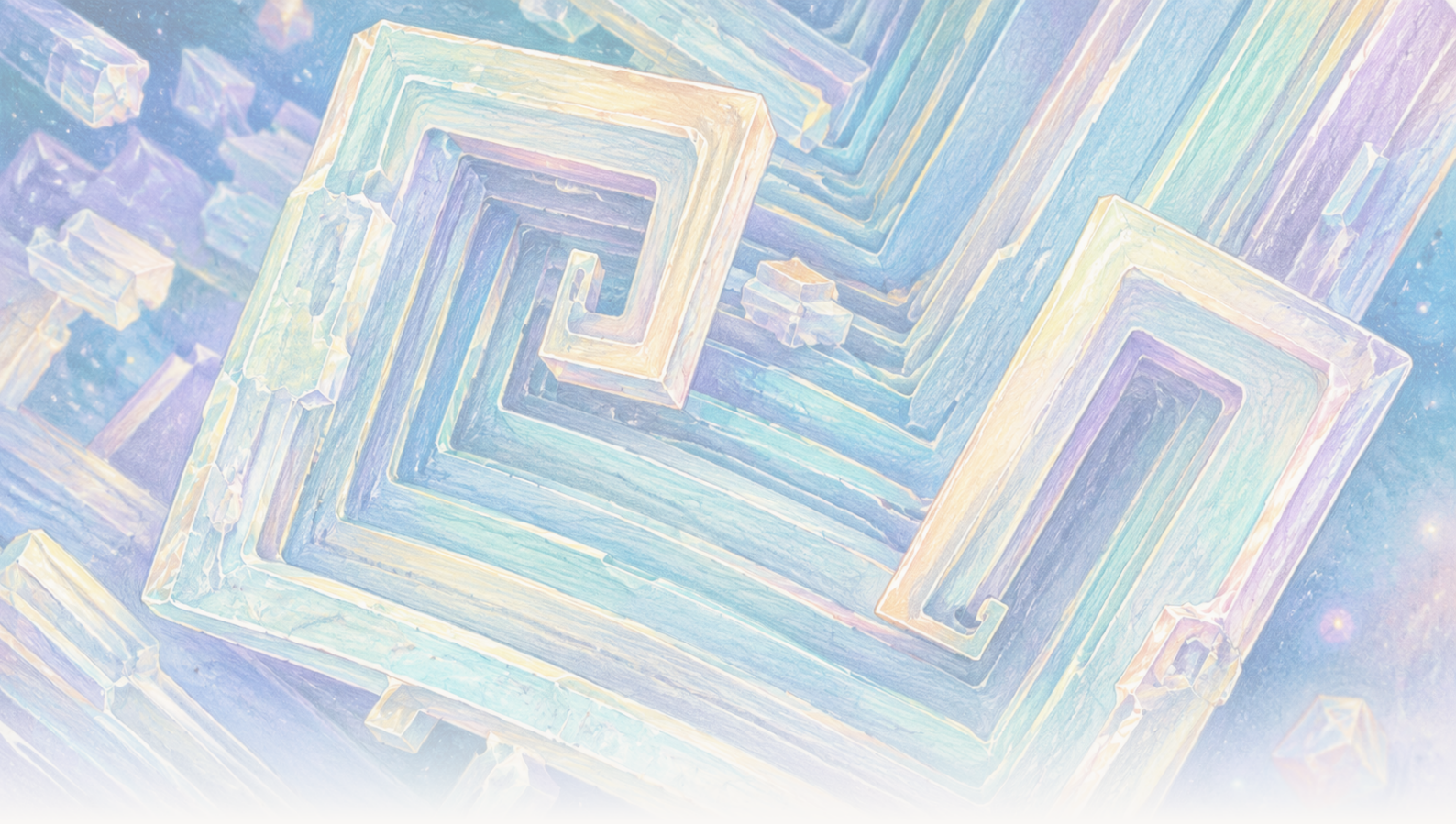




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

במסלול, מלח שולחן יצר קוביות חלולות. הכבידה שינתה את התמלחת, לא את המלח

גבישי נתון כלורי שגודלו בתחנת החלל הבין-לאומית כללו קוביות חלולות ומדורגות שרוחבן 2 עד 8 מילימטרים. המאמרים תומכים בהסבר של תהליכי הובלה. שקיעה רגילה וזרימה המונעת מציפה דוכאו מאוד, בעוד שבשלבי הגידול המוקדמים הדיפוזיה שלטה. הסריג לא הפך לצורה חדשה של מלח, והניסויים אינם מבססים תהליך תעשייתי.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity, 5 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

במסלול, מלח שולחן רגיל גדל לקוביות חלולות ומדורגות

הגבישים נראו כמעט אדריכליים: מסגרות מרובעות בתוך מסגרות מרובעות, ופאותיהם שקועות למדרגות.

הם היו עשויים נתון כלורי רגיל, אותו חומר שמרכיב מלח שולחן. הדבר החריג לא היה החומר עצמו. זו הייתה התמלחת שסביבו.

על פני כדור הארץ, גביש הגדל בתוך נפח נוזל בקנה מידה של סנטימטרים יכול לשקוע, לגעת בדופן או בפני שטח, ולעזור ליצור הבדלי צפיפות שמניעים סירקולציה של התמיסה. בתחנת החלל הבין-לאומית דוכאו מאוד השקיעה הרגילה והזרימה המונעת מציפה. חלק מגבישי המלח נשארו מרחפים מספיק זמן כדי לגדול לאט ובצורה סימטרית יותר לקוביות hopper בעלות צלעות של 2 עד 8 מילימטרים.

שלושה מאמרים, שפורסמו ב-2011, 2015 וב-2019, מתארים את הניסויים האלה. יחד הם מספקים שיעור נקי בפיזיקת הובלה: שינוי האופן שבו חומר מומס מגיע אל הגביש יכול לשנות את צורתו הנראית לעין בלי לשנות את המבנה האטומי שלו.

הם אינם מראים שהחלל יוצר גבישים מושלמים, אינם מבססים תהליך תעשייתי ואינם חושפים סוג חדש של מלח.

מה הופך קובייה ל-hopper

לגביש רגיל של נתון כלורי יש סידור אטומי קובי. גביש hopper עדיין קובי, אבל הפינות והקצוות שלו גדלים מהר יותר ממרכזי הפאות. התוצאה היא שקע חלול ומדורג בכל פאה, כאילו הקובייה ניסתה לבנות קודם את המסגרת שלה ורק אחר כך למלא את הקירות.

דוגמה מאוחרת יותר מה-ISS ממחישה את דפוס הגידול הזה, אך היא מספקת הקשר ולא ראייה מתוך שלושת המאמרים על נתון כלורי. התמונה וסרטון ה-time-lapse של Pettit Donald שלהלן מראים אשלגן כלורי, מלח אחר, היוצר במיקרו-כבידה מורפולוגיות hopper מדורגות ומגולגלות.

[figure_pair pending]

שתי מיקרוגרפיות אלקטרוניות סורקות של גבישי hopper מגולגלים מאשלגן כלורי שגודלו על סיפון ה-ISS. התמונות המאוחרות האלה הן דוגמאות הקשר למורפולוגיה, ולא דגימות נתון כלורי או מדידות ממחקרי 2011, 2015 או 2019 הנידונים במאמר הזה.

[video pending]

סרטון time-lapse מאוחר יותר של גידול גביש hopper מאשלגן כלורי בתוך סרט מים דק במיקרו-כבידה. הוא ממחיש גידול בקצוות ובפינות, ולא את ניסויי הנתון הכלורי או הנתונים שנותחו במאמר הזה.

גבישים גדלים מתוך תמלחת רוויה-ביתר: מי מלח המכילים יותר נתון כלורי מומס מכפי שהיו מחזיקים בשיווי משקל בתנאים האלה. יוני נתון וכלוריד צריכים לנוע דרך הנוזל ולהצטרף לפני השטח של הגביש.

יש שתי דרכים רחבות להעביר אותם. דיפוזיה היא תנועה מולקולרית אקראית שמעבירה חומר מומס לאורך הפרש ריכוזים, בלי סירקולציה כוללת של הנוזל. קונוקציה היא תנועה של הנוזל עצמו. תחת כבידה רגילה, הבדלים קטנים בטמפרטורה או בריכוז יכולים לשנות את הצפיפות ולהניע סירקולציה מכוח הציפה. גבישים יכולים גם לשקוע דרך הנוזל.

Gravity changes the growth environment, not the salt lattice

Conceptual transport comparison for ordinary centimetre-scale bulk brine

ORDINARY BULK BRINE ON EARTH

crystals can settle
density differences can circulate liquid

walls and surfaces can break symmetry

NaCl

same cubic lattice

MICROGRAVITY

settling strongly suppressed
weaker buoyancy-driven flow

longer suspension;
diffusion matters more early

NOT A MATCHED EARTH-VERSUS-ISS EXPERIMENT

- terrestrial hopper growth in confined capillaries can also be diffusion dominated

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

השוואה רעיונית מראה את אותו סריג של נתון כלורי בשתי הסביבות. בתמלחת רגילה בתפזורת על פני כדור הארץ יכולים להתרחש שקיעה, סירקולציה מכוח ציפה ומגע עם פני שטח; מיקרו-כבידה מדכאת מאוד את שני הראשונים, מאפשרת ריחוף ממושך יותר והופכת את הדיפוזיה לחשובה יותר בשלב הגידול המוקדם. זה לא היה ניסוי תואם של כדור הארץ מול ISS.

The Clean Paper CC BY 4.0

הניסוי נערך בתחנת החלל הבין-לאומית, מעבדת מיקרו-כבידה המקיפה את כדור הארץ. הביטוי **מיקרו-כבידה** אינו אומר שאין כבידה. המאמר מ-2019 דיווח על תאוצה שירית של כ-1.2 מיליוניות מכבידת פני השטח של כדור הארץ, כלומר 1.2 micro-g, לצד תנועה מחזורית איטית של הנוזל. הסביבה שינתה את מאזן ההובלה; היא לא הפכה את התמלחת לנייחת לחלוטין.

דרך איטית לקוביות בגודל מילימטרים

המחקר מ-2019 התמקד בקוביות hopper שגדלו כאשר מים התאדו מתמלחת על ה-ISS. אורכי הצלעות שדווחו נעו בין 2 ל-8 מילימטרים. קצבי הגידול נעו בין 0.34 ל-1.0 מיקרומטר לדקה (כ-0.49 עד 1.44 מילימטרים ליום), עם ממוצע של 0.68 מיקרומטר לדקה וסטיית תקן של 0.23.

בקצב הממוצע הזה, לצלע באורך 8 מילימטרים היה נדרש בערך שבוע להתפתח. החישוב הוא הערכה, לא מדידת time-lapse של כל שלבי הגדילה של גביש יחיד.

המחברים העריכו רוויה-ביתר של פחות מ-1.002. ספרות ההשוואה הארצית שלהם תיארה גידול hopper תחת רוויה-ביתר גבוהה בהרבה, מעל 1.45, בקצבים של 10 עד 110 מיקרומטר לשנייה במשך שניות או דקות, שבדרך כלל יצרו קוביות קטנות מ-250 מיקרומטר.

ההשוואה הזו אינפורמטיבית אך אינה תואמת. גבישי ה-ISS וספרות ההשוואה הארצית לא הגיעו מזרועות ניסוי זהות וסימולטניות על פני כדור הארץ ובמסלול שבוצעו בידי אותו צוות. גם מכלים, ממשקים ושיטות שונים יכולים להשפיע

לצד הכבידה.

לכן הניגוד החזק ביותר הוא תיאורי: בתצפיות האלה מה-ISS, קוביות hopper גדלו לאט, ברוויה-ביתר נמוכה, במשך ימים עד שבועות, והגיעו לקנה מידה של מילימטרים.

הדיפוזיה שלטה בתחילה; בהמשך עדיין הייתה אפשרית זרימה

המאמר מ-2019 השתמש במספר פקלה כדי להשוות הובלה באמצעות תנועת נוזל להובלה באמצעות דיפוזיה. ערך מתחת לאחד פירושו שהדיפוזיה חשובה יותר; ערך מעל אחד פירושו שתנועה כוללת של הנוזל עשויה לשלוט.

יחס, לא מתג

לאחד מתחת לחלוטין נייח לנוזל העולם את מחלק לא הוא הובלה. קצבי שני בין השוואה הוא פקלה מספר לתמלחת ששימשה המהירות הערכת ועם הגביש גודל עם השתנה הערך כאן אחד. מעל טהורה ולקונוקציה הגדול במכל ביותר הגדול הגביש דיפוזיה; ידי על הנשלט במשטר בבירור היו ביותר הקטנים הגבישים שסביבו. חשובה. הייתה כבר הנוזל של איטית תנועה שבו למשטר להיכנס היה יכול יותר

בטיפות הקטנות יותר, בקוטר של בערך 0.8 סנטימטר, ערכי פקלה המוערכים עלו מכ-0.0004 סמוך לגרעון לכ-0.03 בגודל הסופי שנמדד. הדיפוזיה נותרה דומיננטית.

במכלי גידול של 2 עד 3 סנטימטרים, ההערכה עלתה מכ-0.05 עבור גרעין של 50 מיקרומטר לכ-4 עבור צלע של 4 מילימטרים. הגידול המוקדם עדיין נשלט על ידי דיפוזיה, אך תנועה מחזורית איטית יכלה לתרום בהמשך.

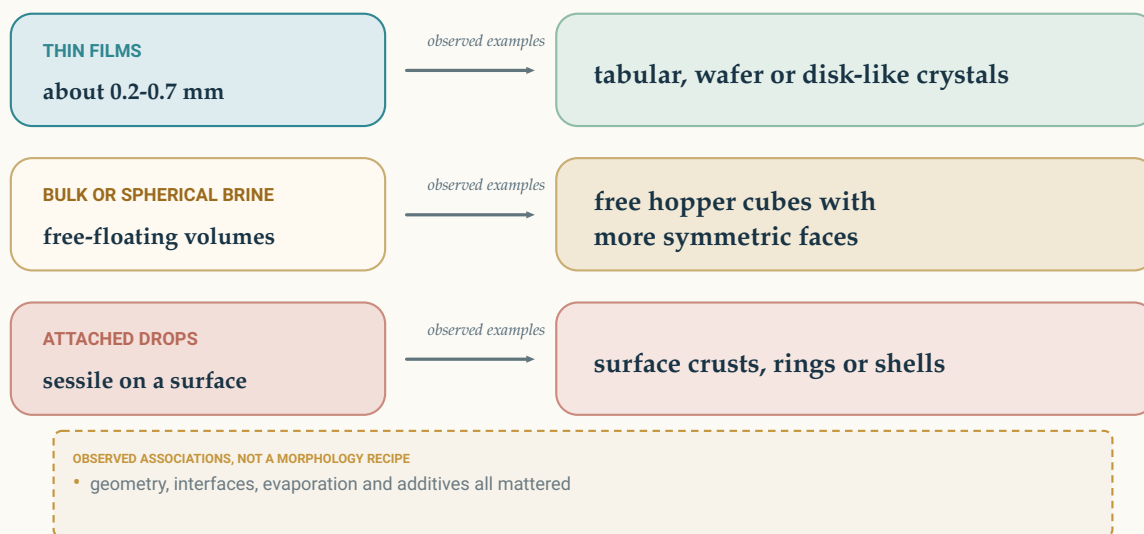
זו הסיבה שהמשפט "מיקרו-כבידה ביטלה את הקונוקציה" יהיה שגוי. הסירקולציה הרגילה המונעת מציפה והשקיעה צומצמו מאוד. תאוצה שירית ותנועה ניתנת למדידה נותרו.

גם צורת הנוזל הייתה חשובה

המאמר מ-2011 והמאמר מ-2015 הרחיבו את התמונה. הם דיווחו על התגבשות מלח בסרטים דקים, בשכבות נוזל עבות יותר, בנפחי תמלחת כדוריים בקירוב ובטיפות המחבורות לפני שטח.

Different brine geometries, different observed forms

Descriptive examples from the 2011 and 2015 ISS series



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

שלוש שורות מסכמות דוגמאות שנצפו ברחבי תיק המחקר: סרטים דקים עם צורות לוחיות או דמויות דיסקה, תמלחת בתפזורת או כדורית עם קוביות hopper חופשיות, וטיפות מחוברות עם קרומים, טבעות או קליפות. אלה קשרים תיאוריים, לא מתכון או הבטחה.

The Clean Paper CC BY 4.0

במחקר מ-2011, סרטים דקים בעובי של כ-0.2 עד 0.7 מילימטר יצרו לוחות דקים וגבישים לוחיים. נפחי תמלחת מרחפים אפשרו פאות צדדיות סימטריות יותר וקוביות hopper.

התצפיות מ-2015 כללו שכבות דקות בעובי 0.2 עד 0.7 מילימטר, שכבות עבות יותר של כ-4 עד 6 מילימטר וטיפות חצי-כדוריות מחוברות בקוטר של כ-20 עד 32 מילימטר. הצורות שדווחו כללו hopper לוחיים, קוביות, גבישים דמויי דיסקה, דנדריטים, טבעות וקליפות. הוספת פוליאתילן גליקול דיכאה גידול hopper בקבוצת תצפיות אחת.

המחברים תיארו את עבודת 2015 כתצפיות שנעשו עם אספקה שלא נכללה במלאי, בזמן הפנוי של הצוות, ולא כמחקר שיטתי קשיח. הדוגמאות מראות שגם גאומטריית הנוזל, הממשקים, האידי והתוספים היו חשובים. הן אינן מגדירות מתכון דטרמיניסטי שבו צורה מסוימת של מכל מבטיחה צורה מסוימת של גביש.

הסריג לא הפך לצורה חדשה של מלח

ההבחנה בין מבנה גבישי לבין מורפולוגיה חיונית.

מבנה הוא הסידור האטומי החוזר. מורפולוגיה היא הצורה החיצונית הנראית לעין. דיפרקציית נייטרונים במאמר מ-2011 לא זיהתה שינוי במבנה הנתרן הכלורי או בפרמטרי תא הסריג בהשוואה לדגימות ארציות. הדגימות מן המסלול הכילו גם תכלילי תמלחת, כיסים קטנים של תמיסה שנלכדו בתוך גביש.

לכן המראה הגדול והסימטרי אינו ראיה לחומר טהור יותר או נטול פגמים. אף מאמר בתיק אינו מדווח על טוהר כימי

גבוה יותר, ביצועים מכניים טובים יותר או התאמה להתקן מסוים.

הכבידה פעלה בעקפיין. היא שינתה שקיעה, סירקולציה של הנוזל, אוריינטציה ומגע עם פני שטח. היא לא שינתה את חוזק הקשרים בנתרן כלורי ולא יצרה פאזה אטומית חדשה.

מה הניסויים האלה יכולים ולא יכולים ללמד

המאמרים תומכים בהסבר המבוסס על הובלה: דיכוי חזק של שקיעה רגילה ושל זרימה המונעת מציפה אפשר לחלק מהגבישים להישאר מרחפים ולגדול לאט בתנאים סימטריים יותר. הגדלים, הקצבים והצורות שנמדדו הם תצפיות ישירות; הרוויה-ביתר, היסטוריית הגידול וערכי פקלה כוללים הערכות; וההשוואה לכדור הארץ נשענת בחלקה על ניסויים אחרים שפורסמו.

אין מכנה יחיד ונקי לכל התיק. הוא משלב גבישים בודדים, מכלי גידול ודוגמאות נבחרות משלושה מאמרים. חיבור כולם לסך אחד היה יוצר רושם של ניסוי אחיד שמעולם לא התקיים.

המחקרים גם אינם מדווחים על אף אחת מן הראיות הנדרשות לטענה יצרנית. הם אינם מודדים תפוקה, עלות ייצור, שימוש באנרגיה, ניצולת, אמינות או ביצועי חומר שימושיים. סדרת 2015 הייתה חקרנית. ההשוואות הארציות לא היו קבוצות ביקורת תואמות. וגדול או מרשים לעין אינו זהה לטוב יותר עבור יישום.

מרבצי מלח טבעיים יכולים להכיל קוביות hopper בגודל סנטימטרים, ולעיתים הן מרחפות בבוץ ספוג תמלחת. המאמר מ-2019 מציג אנלוגיה אפשרית לגידול איטי הנשלט על ידי דיפוזיה. זו השוואה מעניינת, לא הוכחה לכך שלגבישי hopper טבעיים ומסלוליים יש מנגנון אחד משותף.

בקצרה

גבישי מלח שגודלו מתמלחת מתאדה בתחנת החלל הבין-לאומית כללו קוביות hopper חלולות ומדורגות שרוחבן 2 עד 8 מילימטרים. המאמרים תומכים בהסבר המבוסס על הובלה: מיקרו-כבידה דיכאה מאוד שקיעה רגילה וזרימה המונעת מציפה, אפשרה גידול איטי וריחוף ממושך יותר, בעוד שהדיפוזיה שלטה בשלבים המוקדמים. גם גאומטריית הנוזל, ממשקים, אידוי ותוספים השפיעו על המורפולוגיה. דיפרקציית נייטרונים לא הראתה מבנה חדש של נתרן כלורי, ותכלילי תמלחת נותרו בגבישים. זו דוגמת מחקר תחומה במדע החומרים, לא הוכחה שהחלל יוצר גבישים מושלמים או מאפשר תהליך תעשייתי.

בדיקה מפוכחת

מה המאמרים מראים: קוביות hopper של נתרן כלורי בקנה מידה מילימטרי ומורפולוגיות אחרות גדלו בכמה גאומטריות של תמלחת על ה-ISS. קוביות ה-hopper ממחקר 2019 גדלו לאט ברוויה-ביתר מוערכת נמוכה, כאשר הדיפוזיה שלטה בשלב המוקדם.

מה פרשני: דיכוי חזק של שקיעה וזרימה המונעת מציפה אפשר ריחוף ממושך יותר וגידול סימטרי יותר. תנועה איטית של הנוזל יכלה להיות חשובה בשלב המאוחר במכל הגדול יותר.

מה הם אינם מראים: צורה אטומית חדשה של מלח, גבישים טהורים יותר או נטולי פגמים, ניסוי תואם כדור־הארץ מול ISS, יתרון אוניברסלי של מיקרו־כבידה או מסלול ייצור מסחרי.

המגבלות העיקריות: שלושה מחקרים נפרדים עם גאומטריות שונות ודוגמאות נבחרות; השוואות ארציות בין מחקרים; גדלי הובלה מוערכים; חלקים חקרניים ולא שיטתיים בתיק; וללא כלכלת תהליך או מבחני ביצועים.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? ביטחון גבוה שהמורפולוגיות המסלוליות והגידול האיטי שדווחו הם אמיתיים. ביטחון בינוני בהסבר ההובלה כתיאור הטוב ביותר של מכלול התצפיות. ביטחון נמוך מאוד בכל טענה שהופכת את ניסויי המלח האלה להבטחה כללית לגבי ייצור בחלל.

מקורות

conditions, terrestrial and microgravity under grown cubes hopper chloride sodium of Comparison Fontana, and Pettit
(2019) 25, 5 Microgravity npj

<https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0>

Crystal of Journal microgravity, in grown crystals chloride sodium of Characterization Pettit, and Schefer Fontana,
(2011) 207-211, 324 Growth

<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001>

drops sessile and layers, thick sheets, liquid thin from crystallization chloride Sodium Cristoforetti, and Pettit Fontana,
(2015) 80-85, 428 Growth Crystal of Journal microgravity, in

<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026>