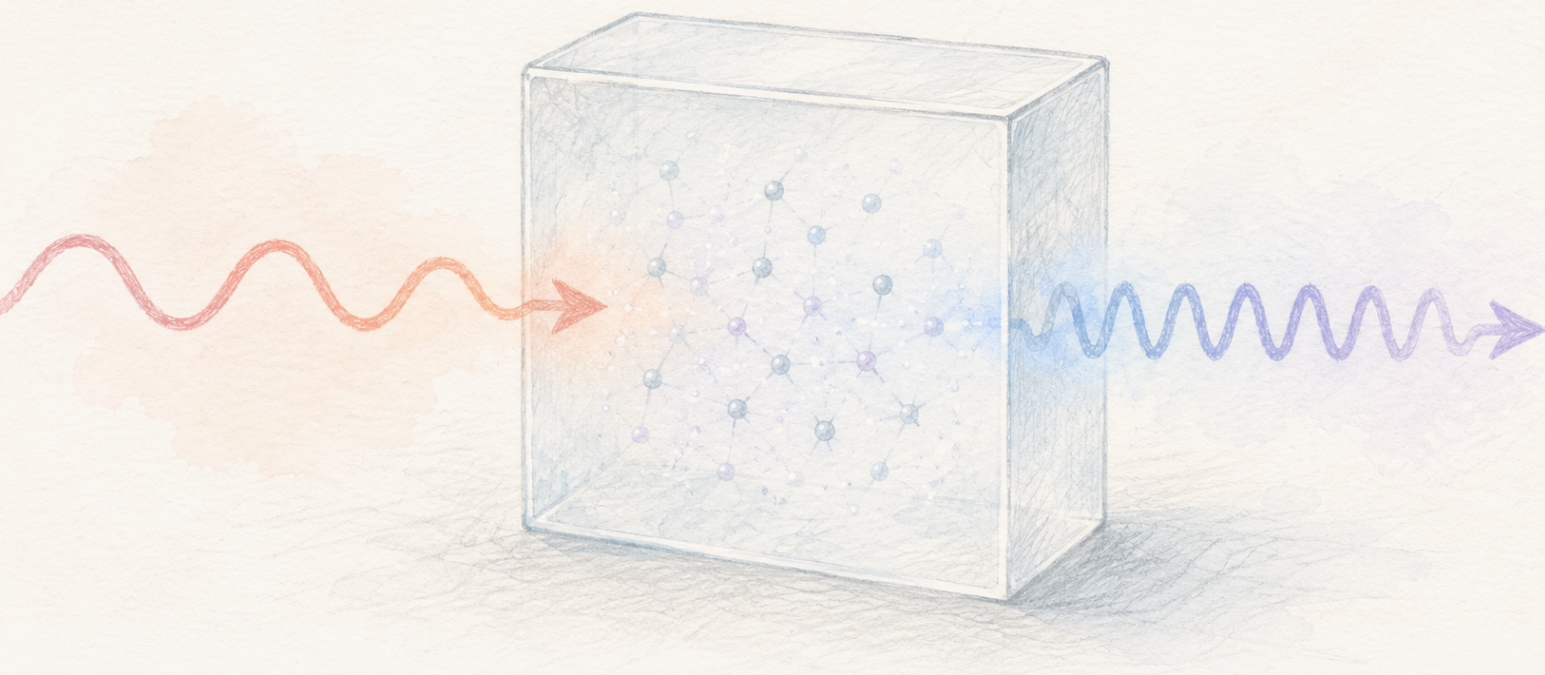




The CLEAN PAPER

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

Solid material kan yí visible blue light padà sí UV ní sunlight-level intensity — sùgbón kì í ɛ solar-energy machine

Àwọn olùwádíí engineer DHI-based organic crystals tí alkyl side chains wọn n dá π -electron system láàbò láidá triplet energy dúró láti rìn. Best *i*Bu-DHI/Ir(ppy)₃ solid film ɛ visible-to-UV triplet-annihilation upconversion pẹ̀lú 1.9% absolute quantum yield àti threshold 1.2 mW cm^{-2} nítòsì solar intensity ní ayíká 445 nm. Èyí jẹ real materials advance fún solid-state photon upconversion. Kì í ɛ working solar device, kì í ɛ 'free UV,' kì í sè ɛ proof pé visible sunlight ti lè drive useful UV chemistry ní scale.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

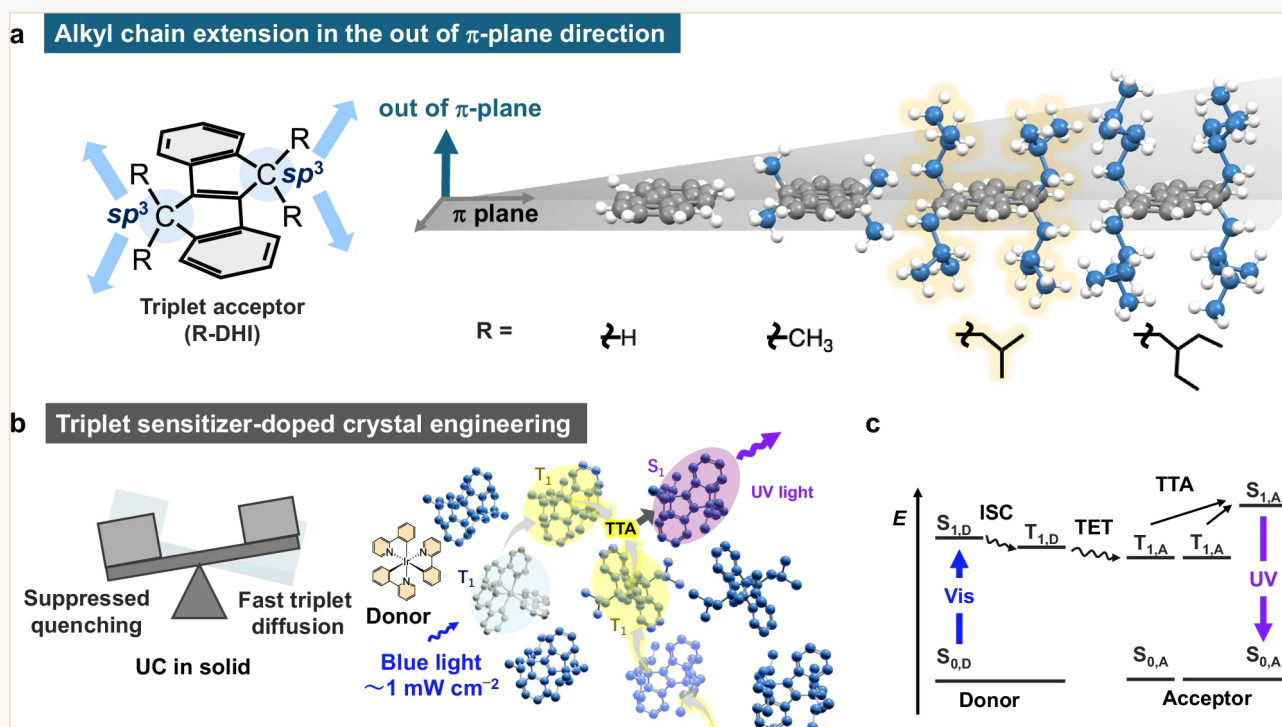
Paper: *Sterically protected π -electron systems for efficient solid-state photon upconversion*, Naoyuki Harada, Hayato Shoyama, Nutnicha Boonmong, Kiichi Mizukami, Yuya Watanabe, Pei Zhao, Masahiro Ehara, Yoichi Sasaki, and Nobuo Kimizuka, Nature Communications 17, 5134 (2026) · DOI: 10.1038/s41467-026-73898-0

Ètan tó sisé ní intensity ìmólè oorun, kì í se ẹrọ solar-energy

Ọ̀pọ̀ ìmọ̀lẹ̀ oorun tó dé Ilẹ̀ Ayé jẹ visible àti infrared light. Ultraviolet jẹ apa kékeré nìkan, sùgbón UV photons ní agbára chemistry tó pọ̀: wọn lè fa reaction tí visible photons tó ní agbára kéré kò lè fa. Èyí ló mú **photon upconversion** jẹ èrò tó wuni. Tí ohun èlò kan bá lè gba visible photon méjì tó ní agbára kéré, kí ó sì dá UV photon kan tó ní agbára ga padà, visible sunlight lè se chemistry tí UV nìkan sáà maa ní se.

iwé iwádíí yíí ní wo èdà tó nira jù lọ tí ìṣòrò náà: visible-to-UV upconversion nínú **solid**, ní **sunlight-level intensity**, láìgbẹ̀kẹ́ lé molíkúlù tó ní rìn kiri lófẹ́fẹ́ nínú solution. Èyí ṣe pàtàkì nítorí ètò solution lè efficient, ṣùgbọn wọn sòro fún device: solvent lè evaporate, leak, tàbí di long-term lò mọ́. Solid practical sí i, ṣùgbọn ó sáà maa ní pa excited ipò tí upconversion nílò.

Nítorí náà abajade gidi kì í ṣe “UV ọfẹ láti ìmọlẹ oorun.” Ó jẹ materials-chemistry fix fún contradiction kan pato: nínú solid, molíkúlù gbọdọ sún mọ ara wọn tó kí triplet agbára lè rìn, sùgbọ́n wọn kò gbọdọ sún mọra tó bẹẹ tí wọn fi quench ara won.



Logic àpèrè iwé iwádíí nàà nínú figure kan. Acceptor molíkùlù ní a ɛ modify pèlú alkyl side chains tó yọ síta kùrò ní flat π -plane, èyí tó yí bí wọn ɛ pack nínú crystal padà. Goal ní solid ohun èlò tí triplet agbára ɛ lè rìn kíákíá láàárín molíkùlù, ɔ̀gbọn tí quenching kéré sí í. Sensitizer kan kòkò gba visible blue light, ó sì gbe triplet agbára lọ sí acceptors; nígbà tí acceptor triplet méjì bá pàdé, triplet-triplet annihilation lè ɛ UV photon tó ní agbára ga. Figure nàà ɛàkótán molecular àpèrè, solid-state tradeoff àti energy-transfer pathway — kì í ɛ measurement taara tí device performance.

Ohun tí àwọn olùkòwé ẹ

Mechanism náà ni **triplet–triplet annihilation photon upconversion** (TTA-UC). Ní èdà tó rọ̀rùn:

1. donor molíkúlù kan gba visible light, ó sì wọ long-lived triplet excited ipò;
2. triplet agbára náà gbe lọ sí acceptor molíkúlù;
3. excited acceptor méjì pàdé;
4. agbára wọn darapọ̀ sí singlet ipò kan tó ní agbára ga;
5. acceptor náà tú photon tó ní agbára ga síta — níbí, ultraviolet light.

Nínú liquid, step 3 rọ̀rùn nítorí molecular diffusion. Molecule ní rìn kiri, wọn sì ní kọ̀lù ara wọn. Nínú solid crystal, wọn kò lè ẹ́ ẹ̀bẹ́. Energy náà gbọ̀dọ̀ migrate kojá packed ohun èlò náà, packing náà sì gbọ̀dọ̀ jẹ́ “just right”.

Àwọn olùkòwé lo family molíkúlù tó dá lórí **dihydroindeno[2,1-a]indene** (DHI). Design move wọn rọ̀rùn ní tí concept: fi alkyl chains mó molíkúlù náà lókè àti ní isalẹ́ π -electron plane rẹ́. Side chains wònyí dà bí spacer tàbí bumper. Wọn ní ẹ́ idiwo fún fluorescent π -ètò láti pack pọ̀ jù, èyí tó dín quenching kù, sùgbọ́n wọn sì jẹ́ kí orbital contact tó yẹ wà fún triplet agbára láti rìn.

Wọn idánwò derivative púpọ̀, wọn sì rí **iBu-DHI** — èdà pèlú isobutyl substitution — gégé bí balance tó dára jù. Wọn darapọ̀ rẹ́ pèlú triplet donor **Ir(ppy)₃**, wọn ẹ́ crystalline solid films nípa spin-coating tàbí drop-casting, wọn sì wọn fluorescence, triplet lifetime, triplet diffusion ìhùwàsí, upconversion quantum yield, oxygen tolerance àti threshold excitation intensity.

Ohun tí wọn rí

Side chains dá excited ipò láàbò. Plain DHI ní fluoresce dáadàa gan-an nínú dilute solution, sùgbọ́n burú nínú crystal: fluorescence quantum yield rẹ́ sùbú láti 96% nínú solution sí 10% nínú crystal. Pèlú iBu-DHI, crystal sì fluoresce lágbára — tó 69% sáájú grinding àti 83% lẹ́yìn grinding, tó sún mó value nínú solution. Èyí ni idámẹ́ta àkókò tí trick náà: solid kò pa singlet excited ipò run rọ̀rùn mó.

Solid film tó dára jù ẹ́ visible-to-UV upconversion ní intensity kéré. Nínú spin-coated iBu-DHI/Ir(ppy)₃ film, àwọn olùkòwé rọ̀yìn absolute upconversion quantum yield **1.9%** lẹ́yìn self-absorption correction, pèlú threshold excitation intensity **1.2 mW cm⁻²** ní 445 nm. Wọn fi èyí wé solar irradiance nítòsí wavelength yẹn, tó **1.4 mW cm⁻²** fún 445 ± 5 nm. Ní èdè rọ̀rùn: ohun èlò náà sì ẹ́ ní intensity ààlà tó jọ ordinary sunlight, kì í ẹ́ labẹ́ laser tó lágbára gan-an nìkan.

Solid-state performance náà wá láti compromise, kì í ẹ́ pé a kan fi bulk kún molíkúlù. Bí molíkúlù ẹ́ ní jìnnà sí ara wọn lè dín quenching kù, sùgbọ́n separation tó pọ̀ jù máa ní fa triplet agbára migration lóra. Bulky 2-EtBu-DHI ní triplet lifetime tó gùn, sùgbọ́n upconversion threshold ìhùwàsí rẹ́ burú. iBu-DHI crystal dà bí ẹ̀ni pé ó dé middle tó wúlò: steric protection tó tó láti suppress quenching, pèlú molecular contact tó tó fún triplet transfer àti triplet–triplet annihilation.

Material náà kì í ẹ́ solution ètò tí a kan di sílẹ́. Ìwé ìwádíí náà jìyan pé crystalline packing, homogeneous donor distribution àti dense molecular assembly ẹ́ pàtàkì. SEM-EDX maps kò fi micrometer-scale donor segregation

hàn nínú film tó yẹ, phosphorescence quenching ti donor sì fi efficient triplet agbára transfer hàn. Supplementary ohun èlò tún ní theoretical isirò afojúsùn fún triplet agbára transfer àti annihilation times fún molecular pairs nínú crystals.

Ó fi oxygen-tolerant emission hàn. Oxygen sáà maa ní quench triplet ipò, èyí sì jẹ nuisance pàtàkì fún TTA-UC. Dense solid films nàà sì fi upconversion hàn nínú air lẹyìn initial oxygen-consuming turn-on period. Èyí wúlò ní iṣe, ṣùgbọ́n kò dọgba pèlú proof ti long-term outdoor device stability.

Ohun tí èyí ṣeé túmò sí

Ìtúmò tó dáa jù ni pé èyí jẹ materials-design èsì tó mó. Àwọn olùkòwé rí ọ̀nà láti tune packing ti organic π -electron ètò kí solid lè ṣe visible-to-UV upconversion tó sáà rọ̀rùn jù nínú solution. Advance kì í ṣe pé photon upconversion wà; advance ni pé solid-state ètò yíi darapọ̀ property púpọ̀ tí wọn sáà ní tako ara wọn: high fluorescence yield, long triplet lifetime, fast triplet diffusion, oxygen tolerance àti operation nítòsì solar irradiance.

Lesson tó gbooro ju molíkúlù yí lọ ni pé fún solid-state TTA-UC, ibèèrè kì í ṣe “báwo la ṣe dá excited ipò láàbò?” tàbí “báwo la ṣe gbe triplet agbára?” lẹ́tò. Ibèèrè ni báwo la ṣe engineer molecular spacing kí ohun méjèjè lè jẹ òtítọ̀ ní àkókò kan nàà. iBu-DHI jẹ example gidi ti àpẹrẹ principle yẹn.

Overreading tó fà mọ̀ni jẹ kedere: visible sunlight yí padà sí UV, nítorí nàà solar chemistry ti solved. Kì í ṣe ohun tí iwé iwádíí fi hàn. Ó fi ohun èlò kan hàn pèlú photophysical ọ̀nà iṣe tó promising àti performance number pàtò, nínú controlled films, labẹ optical conditions pàtò.

Ohun tí èyí kò fi ẹrí múlẹ̀

- Kì í ṣe **solar-energy device**. Kò sí full device, outdoor module, system-level agbára balance, tàbí useful chemical output tí film yíi fi sunlight ṣe.
- Kì í ṣe “**UV ọ̀fẹ́ láti sunlight**.” Upconversion quantum yield nínú solid jẹ **1.9%**, kì í ṣe conversion tó sún mó 100%. Ó meaningful fún class ohun èlò yíi, ṣùgbọ́n ọ̀pọ̀ input photons kò di UV photons.
- Kò fi broad durability nínú gidi lò hàn. Wọn idánwò photostability àti oxygen tolerance ní controlled settings, ṣùgbọ́n èyí kò dọgba pèlú oṣù tàbí ọ̀dún ti device operation labẹ heat, humidity, oxygen, mechanical stress àti broadband sunlight.
- Ó dá lórí donor-acceptor ohun èlò ètò kan pato. Best èsì lo iBu-DHI pèlú Ir(ppy)₃. iwé iwádíí nàà tún fi hàn pé molecular variants tó sún mó ọ̀n lè ṣe burú gan-an, nítorí nàà kì í ṣe recipe gbogbogbo “fi alkyl chain kún un, yóò ṣiṣẹ́.”
- Kò yọ gbogbo practical concern kúrò. Ir(ppy)₃ ní iridium; àwọn olùkòwé tún fi sensitization pèlú metal-free TADF donors hàn nínú supplementary idánwò, ṣùgbọ́n best solid-state ọ̀ràn sì jẹ iridium-donor ètò.
- Kò fi ẹrí múlẹ̀ pé visible-to-UV upconversion yóò jẹ economically tàbí technologically useful fún photocatalysis, solar fuels, sensing tàbí sterilization. Wọn jẹ ṣeé ṣe applications, kì í ṣe abajade iwé iwádíí yíi.

Báwo ni èrí ẹ̀ lágbara tó?

Fún central photophysical claim, èrí nàà lágbara: ìwé ìwádíí nàà ní absorption/emission measurements tó consistent, fluorescence quantum yields, triplet lifetimes, excitation-intensity thresholds, upconversion spectra, absolute quantum-yield measurements, crystal ẹ̀sètò, donor-distribution checks, supplementary orísun dátà àti theoretical calculations tó ẹ̀ àtílẹ̀yìn fún packing ọ̀nà ẹ̀. Nature Communications article nàà jẹ̀ open access, supplementary information àti source-data file sì wà.

Caution pàtàkì ni scope. Conclusion tó lágbara jù jẹ̀ nípa ohun èlò labẹ̀ yàrá ìdánwò characterization. Igbesẹ̀ láti “solid-state film pẹ̀lú 1.9% visible-to-UV upconversion nítòsì sunlight-level blue intensity” sí “useful solar technology” gùn gan-an. Ó nílò integration, stability, useful output, scalable manufacturing, àti idi kan tí upconverted UV photons fi dara ju ọ̀nà mii tí driving target chemistry lọ.

Subtle wording issue kan tún wà. “Sunlight-level” túmọ̀ sí intensity nítòsì excitation wavelength tí ìdánwò lo, kì í ẹ̀ automatically efficient operation labẹ̀ gbogbo solar spectrum nínú gidi device. Ìyàtò yẹn ẹ̀ pàtàkì.

Kí nídí tí ó fi ẹ̀ pàtàkì?

Photon upconversion rọ̀rùn láti ẹ̀làyé lónà burú: photon aláìlágbara méjì wọ́lé, photon alágbara kan jáde. Ẹ̀gbọ̀n hard part kì í ẹ̀ slogan. Hard part ni bí a ẹ̀ máa ẹ̀tò molíkúlù gidi kí agbára lè wà fún àkókò tó tó, rìn jìn tó, kí ó sì darapọ̀ ẹ̀ájú kí ó tó sọ̀nù gégé bí heat.

ìwé ìwádíí yíi fún ẹ̀sòro yẹn ní ohun èlò shape. Side chains kì í ẹ̀ decoration. Wọ̀n jẹ̀ molecular architecture: wọ̀n shield π -ètò lókè àti ní isalẹ̀, dín quenching kù, wọ̀n sì sì fi path sílẹ̀ fún triplet agbára láti travel. Èyí ni apá tó yẹ̀ ká kọ̀, nítorí ó yí vague “better ohun èlò” padà sí physical compromise tí olùkà lè foju inú wo.

Tí visible-to-UV upconversion devices bá wúlò lójọ̀ iwájú, wọ̀n yóò nílò ọ̀pọ̀ step ju ìwé ìwádíí yíi lọ. Ẹ̀gbọ̀n wọ̀n yóò tún nílò irú molecular control yíi gan-an. Abajade kì í ẹ̀ device breakthrough; ó jẹ̀ lágbara demonstration ti bí a ẹ̀ lè mú solid ẹ̀ photophysical trick tí solid sáà máa ní ba jẹ̀.

Àkótán kedere

Àwọ̀n olùwádíí àpẹ̀rẹ̀ family organic molíkúlù tó dá lórí DHI, tí alkyl side chains wọ̀n ní shield π -electron plane lókè àti ní isalẹ̀. Nínú best ọ̀ràn, iBu-DHI tí a darapọ̀ pẹ̀lú triplet donor Ir(ppy)₃ dá crystalline solid film tí ó yí visible blue light padà sí ultraviolet emission nípasẹ̀ triplet–triplet annihilation. Film nàà dé absolute upconversion quantum yield **1.9%** àti threshold excitation intensity **1.2 mW cm⁻²**, nítòsì solar irradiance ní ayíká 445 nm excitation wavelength. Advance gidi ni molecular packing: separation tó tó láti suppress excited-state quenching, ẹ̀gbọ̀n contact tó tó fún triplet agbára transfer àti diffusion. Èyí jẹ̀ lágbara ohun èlò demonstration fún solid-state visible-to-UV photon upconversion — kì í ẹ̀ solar-energy device, kì í ẹ̀ “free UV,” kì í sì ẹ̀ proof ti deployed technology.

Àyèwò láìsí àṣejù

Ohun tí iwé iwádú fi hàn: iBu-DHI/Ir(ppy)₃ crystalline solid film kan ṣe visible-to-UV TTA photon upconversion pèlú 1.9% absolute quantum yield àti threshold 1.2 mW cm⁻² ní 445 nm, nígbà tí ó sì ní high fluorescence yield, long triplet lifetime, fast triplet diffusion àti diẹ oxygen tolerance. Design náà ní ṣiṣe nípa sterically protecting π-ètò nígbà tí useful molecular contacts sì wà.

Ohun tó ṣeé gbà ṣùgbón tí a kò fi ẹrì múlẹ: Pé packing principle kan náà lè mú solid-state upconversion ohun èlò tó dára sí i wá; pé related metal-free sensitizer ètò lè jẹ optimized sí performance tó sún mọ eyi; pé film bá yí lè ní application ọjọ iwájú nínú photocatalysis tàbí solar chemistry.

Ohun tí kò fi hàn: Working device; useful solar-fuel tàbí photocatalytic output; outdoor durability; high overall solar-spectrum efficiency; economic practicality; recipe gbogbogbo fún arbitrary chromophores.

Main limitations: Laboratory film, ohun èlò ètò pátó, modest absolute quantum yield, iridium donor nínú best ọràn, controlled excitation wavelength, àti kò sí device-level demonstration. “Sunlight-level” jẹ agbègbè sí excitation band, kì í ṣe full solar-technology claim.

Confidence wo ni gbogbogbò reader yẹ kí ó ní? Gíga pé ohun èlò àpẹrẹ náà ní mú sunwòn sí i solid-state visible-to-UV TTA-UC nínú ètò tí wọn ìdánwò, àti gíga pé èsì náà ní scientific meaning. Kéré pé èyí ti sún mọ deployable solar technology. Ìpò tó yẹ: ohun èlò advance tó clever, tó sì gidi — application ìtàn sì pọ síwájú.

Àwọn orísun

Nature Communications 17, 5134 (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41467-026-73898-0>

Supplementary Information

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467_2026_73898_MOESM1_ESM.pdf

Source Data

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467_2026_73898_MOESM3_ESM.xlsx