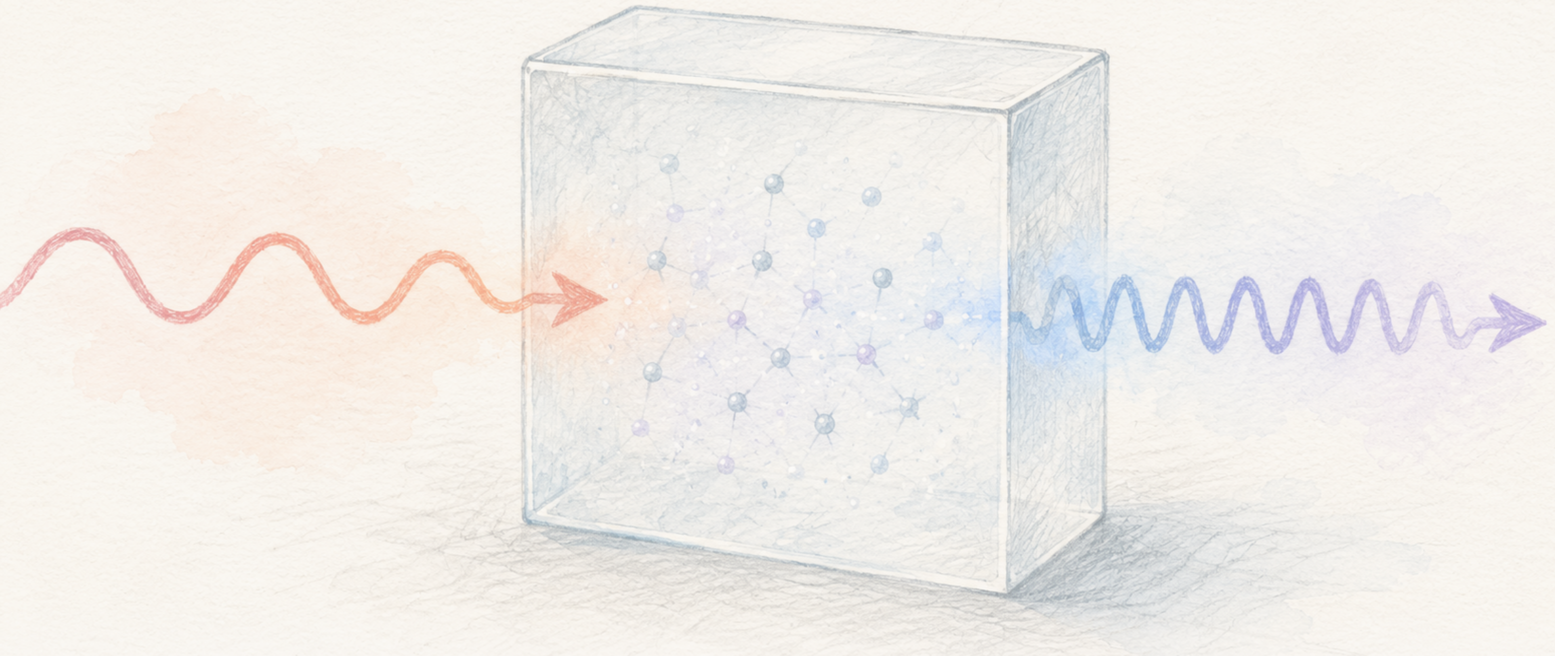


The Clean Paper

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

ጠጣር ቁሳቁስ visible blue lightን በsunlight-level ጥንካሬ ወደ UV ይቀይራል — የፀሐይ ኃይል ማሽን ግን አይደለም

DHI-based organic crystals ላይ alkyl side chainsን በመጠቀም ተመራማሪዎች π-electron systemን ከquenching ጠብቀው triplet energy እንዲንቀሳቀስ አደረጉ። ምርጡ iBu-DHI/Ir(ppy)$_3$ solid film visible-to-UV TTA upconversionን በ1.9% absolute quantum yield እና 1.2 mW cm^{-2} threshold አሳየ። ይህ እውነተኛ የmaterials እድገት ነው፣ ግን የፀሐይ ኃይል device፣ “ነፃ UV” ወይም በscale ላይ የተረጋገጠ ቴክኖሎጂ አይደለም።

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

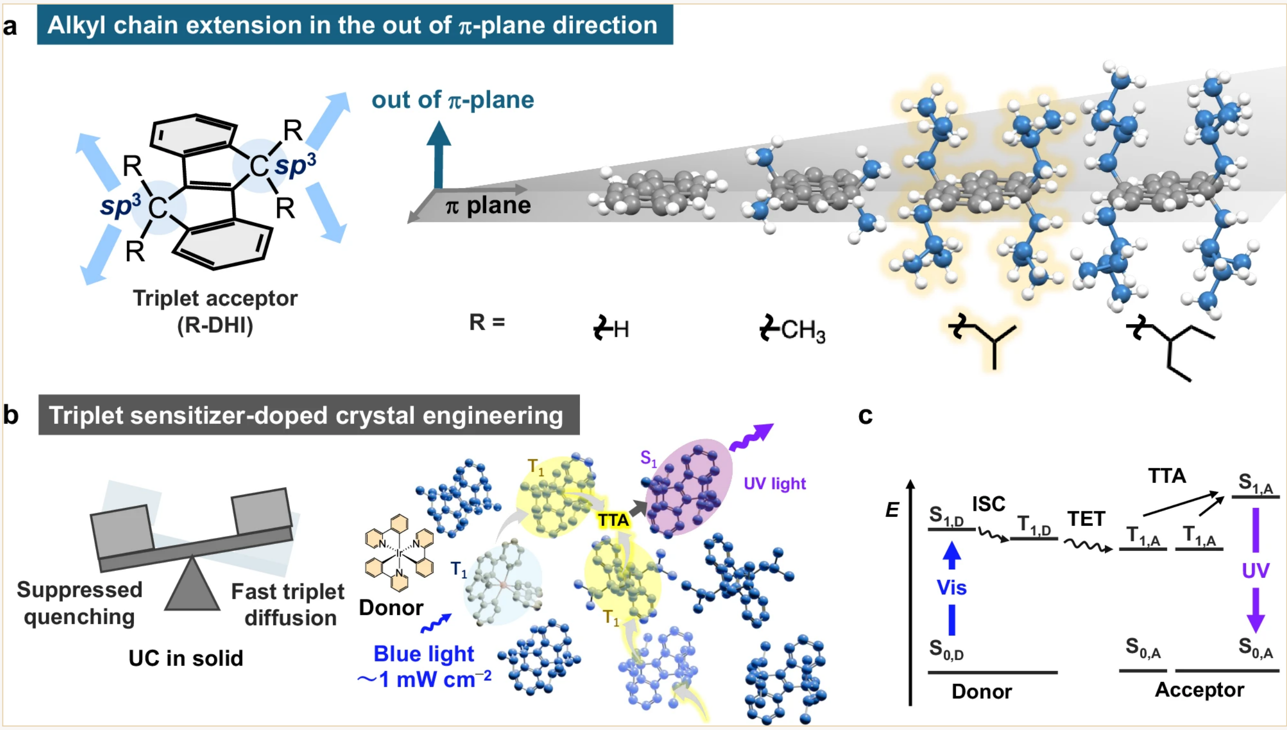
Paper: *Sterically protected π-electron systems for efficient solid-state photon upconversion*, Naoyuki Harada, Hayato Shoyama, Nutnicha Boonmong, Kiichi Mizukami, Yuya Watanabe, Pei Zhao, Masahiro Ehara, Yoichi Sasaki, and Nobuo Kimizuka, Nature Communications 17, 5134 (2026) · DOI: 10.1038/s41467-026-73898-0

በፀሐይ ብርሃን ደረጃ የሚሠራ ፎቶን ማሻሻያ — የፀሐይ ኃይል ማሽን ግን አይደለም

ወደ ምድር የሚደርሰው አብዛኛው የፀሐይ ብርሃን visible እና infrared ነው። አልትራቫዮሌት (UV) ትንሽ ክፍል ብቻ ነው፣ ግን UV photons በኬሚካል ምላሾች ላይ ኃይለኛ ናቸው፤ ዝቅተኛ ኃይል ያላቸው visible photons ማስነሳት የማይችሉትን ምላሽ ሊያስነሱ ይችላሉ። ይህ photon አፕኮንቨርዥን የሚባለውን ሀሳብ ማራኪ ያደርገዋል። አንድ ቁሳቁስ ሁለት ዝቅተኛ-ኃይል visible photonsን ተቀብሎ አንድ ከፍተኛ-ኃይል UV photon ማውጣት ቢችል፣ visible sunlight በተለምዶ UV የሚፈልጉ ኬሚካላዊ ሂደቶችን ለማንቀሳቀስ ሊውል ይችላል።

ይህ ጥናት የዚህን አስቸጋሪ እትም ይመለከታል፤ visible-to-UV አፕኮንቨርዥንን በጠጣር ቁሳቁስ ውስጥ፣ በፀሐይ ብርሃን ደረጃ ያለ ጥንካሬ፣ በsolution ውስጥ በነፃ የሚንቀሳቀሱ ሞለኪውሎችን ሳይጠቀም ማድረግ። በsolution ያሉ ስርዓቶች ውጤታማ ሊሆኑ ይችላሉ፣ ግን ለመሣሪያ አጠቃቀም አመቺ አይደሉም፤ solvents ይተናሉ፣ ሊፈስሱ ይችላሉ፣ ወይም የረጅም ጊዜ አጠቃቀምን ይገድባሉ። ጠጣር ቁሳቁሶች ተግባራዊ ናቸው፣ ግን አፕኮንቨርዥን የሚፈልገውን excited ሁኔታ ብዙውን ጊዜ ያጠፋሉ።

ስለዚህ እውነተኛው ውጤት “ከፀሐይ ነፃ UV” አይደለም። የmaterials chemistry ችግርን የሚፈታ ንድፍ ነው፤ በጠጣር ውስጥ ሞለኪውሎች triplet ኢነርጂ እንዲንቀሳቀስ በቂ ቅርብ መሆን አለባቸው፣ ግን እርስ በርሳቸውን በquenching እንዳያጠፉ በጣም ቅርብ መሆን የለባቸውም።



የጥናቱ የንድፍ ሀሳብ። Acceptor ሞለኪውሎች ከጠፍጣፋው π-ኤሌክትሮን plane ወደላይና ወደታች የሚወጡ alkyl side chains በመጨመር ተቀይረዋል። ይህ በcrystal ውስጥ የሚደራጁበትን መንገድ ይቀይራል። ዓላማው triplet ኢነርጂ በሞለኪውሎች መካከል ፈጥኖ እንዲንቀሳቀስ እና quenching እንዲቀንስ ማድረግ ነው። Sensitizer መጀመሪያ visible blue ብርሃኑን ይውጣል እና triplet ኢነርጂውን ወደ acceptors ያስተላልፋል፤ ሁለት acceptor triplets ሲገናኙ triplet–triplet annihilation ከፍተኛ-ኃይል UV photon ሊፈጥር ይችላል። ምስሉ የሞለኪውላዊ ንድፍን፣ የጠጣር-ሁኔታ ሚዛኑን እና የኢነርጂ-transfer መንገዱን ያጠቃልላል፤ የመሣሪያ አፈጻጸም ቀጥተኛ መለኪያ አይደለም።

Harada et al. / Nature Communications CC BY 4.0

ደራሲዎቹ ምን አደረጉ?

የተጠቀሙት ዘዴ triplet–triplet annihilation photon አፕኮንቨርዥን (TTA-UC) ነው። በቀላሉ፦

1. donor ሞለኪውል visible ብርሃኑን ይውጣል እና ረጅም ዕድሜ ያለው triplet excited ሁኔታ ይፈጥራል፤
2. ያ የtriplet ኃይል ወደ acceptor ሞለኪውል ይተላለፋል፤
3. ሁለት excited acceptors ይገናኛሉ፤
4. ኃይላቸው ወደ አንድ ከፍተኛ-ኃይል singlet ሁኔታ ይዋሃዳል፤
5. acceptor ከፍተኛ-ኃይል photon — እዚህ UV — ይለቃል።

በፈሳሽ ውስጥ ሶስተኛው ደረጃ በሞለኪውላዊ ዲፊውዥን ይረዳል፤ ሞለኪውሎች ይንቀሳቀሳሉ እና ይጋጫሉ። በጠጣር crystal ውስጥ ግን እንዲህ አይንቀሳቀሱም። ኃይሉ በተደራጀው ቁሳቁስ ውስጥ መጓዝ አለበት፤ ስለዚህ ሞለኪውላዊ packing በትክክል መሆን ይኖርበታል።

ደራሲዎቹ dihydroindeno[2,1-a]indene (DHI) ላይ የተመሠረቱ ሞለኪውሎችን ተጠቀሙ። የንድፋቸው ዋና እርምጃ በሀሳብ ደረጃ ቀላል ነበር፤ ከሞለኪውሉ π-ኤሌክትሮን plane በላይና በታች alkyl chains መጨመር። እነዚህ side chains እንደ spacers ወይም bumpers ይሠራሉ። Fluorescent π-ሥርዓት በጣም ጥብቅ እንዳይደራጅ ይከላከላሉ፣ ይህም quenchingን ይቀንሳል፤ በተመሳሳይ ጊዜ triplet ኢነርጂ ለመንቀሳቀስ የሚያስፈልገውን የምህዋር ግንኙነት ያቆያሉ።

ብዙ derivatives ፈትነው **iBu-DHI** — isobutyl-substituted እትም — ምርጡን ሚዛን እንዳለው አገኙ። ከtriplet donor $Ir(ppy)_3$ ጋር አጣመሩት፣ በspin-coating ወይም drop-casting crystalline ጠጣር films አዘጋጁ፣ እና fluorescence፣ triplet lifetime፣ triplet ዲፊውዥን፣ አፕኮንቨርዥን ኳንተም ምርት፣ oxygen tolerance እና ገደብ excitation intensityን ለኩ።

ምን አገኙ?

Side chains excited ሁኔታዎቹን ጠበቁ። መደበኛ DHI በdilute solution ውስጥ በጣም ጥሩ fluorescence አለው፣ በcrystal ውስጥ ግን እጅግ ይወርዳል፤ fluorescence ኳንተም ምርት ከsolution ውስጥ 96% ወደ crystal ውስጥ 10% ይወርዳል። iBu-DHI ግን በcrystal ውስጥም ጠንካራ fluorescence አሳየ — ከመፍጨት በፊት 69% ገደማ፣ ከመፍጨት በኋላ 83%፣ ከsolution ዋጋው ጋር ተቀራራቢ። ይህ የሀሳቡ የመጀመሪያ ክፍል ነው፤ ጠጣሩ singlet excited ሁኔታውን እንደቀድሞው በቀላሉ አያጠፋም።

ምርጡ ጠጣር film visible ብርሃኑን ወደ UV በዝቅተኛ ጥንካሬ አሻሻለ። በspin-coated iBu-DHI/$Ir(ppy)_3$ film ውስጥ፣ self-መምጠጥ ማስተካከያ ከተደረገ በኋላ absolute አፕኮንቨርዥን ኳንተም ምርት 1.9% ነበር፣ በ445 nm ላይ ገደብ excitation intensity 1.2 mW cm^{-2}። ደራሲዎቹ ይህን በዚያ የwavelength አካባቢ ካለው solar irradiance — በ445 ± 5 nm ገደማ 1.4 mW cm^{-2} — ጋር ያነጻጽራሉ። በቀላል ቃል፣ ቁሳቁሱ እጅግ ኃይለኛ laser ብቻ ሳይሆን ከመደበኛ የፀሐይ ብርሃን ጥንካሬ ጋር በሚመሳሰል ክልል ውስጥ ሠራ።

የጠጣር-ሁኔታ ውጤቱ የመጣው ከሚዛን እንጂ ብዙ bulk በመጨመር ብቻ አይደለም። ሞለኪውሎችን ማራራቅ quenchingን ሊቀንስ ይችላል፣ ግን በጣም ማራራቅ triplet ኢነርጂ migrationን ያዘገያል። ትልቅ side groups ያለው 2-EtBu-DHI ረጅም triplet lifetimes ነበረው፣ ግን አፕኮንቨርዥን ገደብ ደካማ ነበር። iBu-DHI crystal ወደ ጠቃሚው መካከለኛ ሚዛን የተቀረበ ይመስላል፤ quenchingን ለመከላከል በቂ steric ጥበቃ፣ እና triplet transfer እና triplet–triplet annihilation እንዲከናወን በቂ ሞለኪውላዊ ግንኙነት።

ቁሳቁሱ በቃ የsolution ስርዓት በመቀዝቀዝ የተጠናከረ አይደለም። ጥናቱ crystalline packing፣ በእኩል የተሰራጨ donor እና ጥቅጥቅ ያለ ሞለኪውላዊ assembly ሁሉ እንደሚጠቅሙ ይከራከራል። SEM-EDX maps በሚመለከቱት films ውስጥ በmicrometer ሚዛን donor segregation አላሳዩም፣ የdonor phosphorescence quenching ደግሞ triplet ኢነርጂ transfer ውጤታማ መሆኑን ጠቁሟል። Supplementary material በcrystals ውስጥ ለሞለኪውላዊ ጥንዶች የtriplet ኢነርጂ transfer እና annihilation times የቲዎሪ ግምቶችንም ይዟል።

በኦክሲጅን ፊት ለፊትም ልቀት አሳየ። ኦክሲጅን ብዙውን ጊዜ triplet ሁኔታዎቹን ያጠፋል፣ ይህም TTA-UC ላይ ትልቅ ችግር ነው። ጥቅጥቅ ያሉ ጠጣር films አየር ውስጥም አፕኮንቨርዥን አሳዩ፣ በመጀመሪያ ኦክሲጅንን የሚጠቀም turn-on period ካለፈ በኋላ። ይህ በተግባር ጠቃሚ ነው፣ ግን የረጅም ጊዜ outdoor device stabilityን ማረጋገጥ አይደለም።

ይህ ምናልባት ምን ማለት ነው?

በጥንቃቄ የሚደገፈው ትርጉም ይህ ንጹህ የmaterials ንድፍ ውጤት መሆኑ ነው። ደራሲዎቹ organic π-ኤሌክትሮን ሥርዓት በcrystal ውስጥ የሚደራጅበትን መንገድ በመቆጣጠር፣ በsolution ውስጥ ለማድረግ ቀላል የሆነውን visible-to-UV አፕኮንቨርዥን በጠጣር ውስጥ እንዲሠራ አደረጉ። አዲሱ ነገር photon አፕኮንቨርዥን መኖሩ አይደለም፤ ይህ የተወሰነ ጠጣር-ሁኔታ ስርዓት ብዙውን ጊዜ እርስ በርስ የሚጋጩ ባህሪያትን በአንድ ላይ ማሰባሰቡ ነው፤ ከፍተኛ fluorescence ምርት፣ ረጅም triplet lifetime፣ ፈጣን triplet ዲፊውዥን፣ አንዳንድ oxygen tolerance፣ እና ከsolar irradiance ጋር በሚቀራረብ ጥንካሬ መሥራት።

ሰፊው ትምህርት ከዚህ ሞለኪውል በላይ ይሄዳል። ጠጣር-ሁኔታ TTA-UC ላይ ጥያቄው "excited ሁኔታዎቹን እንዴት እንጠብቅ?" ወይም "triplet ኢነርጂውን እንዴት እናንቀሳቅስ?" በለየለየ መልኩ አይደለም። ሁለቱም በአንድ ጊዜ እንዲሠሩ ሞለኪውላዊ spacingን እንዴት እንነድፍ ነው። iBu-DHI የዚህ የንድፍ መርህ ተጨባጭ ምሳሌ ነው።

ለማጋነን የሚጋብዘው ትርጉም ግን ግልጽ ነው፤ visible sunlight ወደ UV ተቀየረ፣ ስለዚህ solar chemistry ተፈታ። ጥናቱ ይህን አያሳይም። በተቆጣጠሩ films እና በተወሰኑ optical conditions ውስጥ ተስፋ የሚሰጥ photophysical አሠራር እና የተወሰኑ የአፈጻጸም ቁጥሮች ያለውን ቁሳቁስ ያሳያል።

ይህ ጥናት የማያረጋግጠው

- የፀሐይ ኃይል መሣሪያ አይደለም። ሙሉ device፣ outdoor module፣ ሥርዓት-level ኢነርጂ balance ወይም በዚህ film በተነሳ ጠቃሚ chemical output የለም።
- "ከፀሐይ ነፃ UV" አይደለም። በጠጣር ውስጥ አፕኮንቨርዥን ኳንተም ምርት 1.9% ነው፣ ወደ ሙሉ ለውጥ አይቀርብም። ለዚህ ዓይነት ቁሳቁስ ጠቃሚ ውጤት ነው፣ ግን አብዛኛዎቹ input photons UV photons አይሆኑም።
- በእውነተኛ አጠቃቀም ረጅም ጊዜ የሚቆይ ጽናትን አያሳይም። Photostability እና oxygen tolerance በተቆጣጠሩ ሁኔታዎች ተፈትነዋል፣ ግን ይህ በሙቀት፣ እርጥበት፣ ኦክሲጅን፣ mechanical stress እና broadband sunlight ስር ለወራት ወይም ለዓመታት የሚሠራ device አይደለም።
- በተወሰነ donor-acceptor ሥርዓት ላይ ይመሰረታል። ምርጡ ውጤት iBu-DHI + $Ir(ppy)_3$ ነው። ተመሳሳይ ሌሎች derivatives በጣም ደካማ ሊሆኑ እንደሚችሉ ጥናቱ ያሳያል፣ ስለዚህ "alkyl chains ጨምር እና ሁሉም ይሠራል" የሚል አጠቃላይ መመሪያ አይደለም።
- ሁሉንም ተግባራዊ ችግሮች አያስወግድም። $Ir(ppy)_3$ iridium ይዟል። Supplementary ሙከራዎች ውስጥ metal-free TADF donors ታይተዋል፣ ግን ምርጡ ጠጣር-ሁኔታ ውጤት አሁንም iridium-donor ሥርዓት

ነው።

- Visible-to-UV አፐኮንቨርዥን በphotocatalysis፣ solar fuels፣ sensing ወይም sterilization ላይ በኢኮኖሚ ወይም በቴክኖሎጂ ተጠቃሚ እንደሚሆን አያረጋግጥም። እነዚህ የወደፊት የመተግበሪያ አካባቢዎች ናቸው፣ የዚህ ጥናት ውጤቶች አይደሉም።

ማስረጃው ምን ያህል ጠንካራ ነው?

ዋናው photophysical አባባል ጠንካራ ማስረጃ አለው። ጥናቱ መምጠጥ/emission መለኪያዎች፣ fluorescence ኳንተም yields፣ triplet lifetimes፣ excitation-intensity thresholds፣ አፐኮንቨርዥን ስፔክትራ፣ absolute ኳንተም-ምርት መለኪያዎች፣ crystal structures፣ donor-ስርጭት checks፣ supplementary ምንጭ መረጃ እና የተጠቆመውን packing አሠራር የሚደግፉ ንድፈ-ሐሳባዊ calculations ያቀርባል። Nature Communications ጽሑፉ ያልተፈታ access ነው፣ supplementary መረጃ እና ምንጭ-መረጃ fileም ይገኛሉ።

ዋናው ጥንቃቄ የscope ነው። ጠንካራው መደምደሚያ በላቦራቶሪ ተለክቶ ስለታየው ቁሳቁስ ነው። “በጠጣር film ውስጥ 1.9% visible-to-UV አፐኮንቨርዥን፣ ከsunlight-level blue intensity ጋር” ከሚለው ወደ “ጠቃሚ solar technology” ለመድረስ ትልቅ ርቀት አለ። Integration፣ stability፣ useful output፣ scalable manufacturing፣ እና upconverted UV photons ከሌሎች የዒላማ chemistry ማስነሻ ዘዴዎች የሚበልጡበት ምክንያት ያስፈልጋሉ።

በቃላት ደረጃም አንድ ጥንቃቄ አለ። “Sunlight-level” የሚለው በሙከራው የተጠቀመው የexcitation wavelength አካባቢ ያለውን ጥንካሬ ይመለከታል። በእውነተኛ device ውስጥ በሙሉ solar ስፔክትረም ላይ በብቃት ይሠራል ማለት አይደለም።

ለምን ይጠቅማል?

Photon አፐኮንቨርዥንን በቀላሉ በስህተት ማብራራት ይቻላል፤ ሁለት ደካማ photons ይገባሉ፣ አንድ ኃይለኛ photon ይወጣል። ግን አስቸጋሪው ክፍል ይህ ስሎጋን አይደለም። ኃይል በቂ ጊዜ እንዲቆይ፣ በቂ ርቀት እንዲጓዝ፣ እና እንደ ሙቀት ከመጥፋቱ በፊት እንዲዋሃድ እውነተኛ ሞለኪውሎችን በትክክል ማደራጀት ነው።

ይህ ጥናት ያንን ችግር በቁሳቁስ ንድፍ ያሳያል። Side chains ለጌጥ አይደሉም፤ ሞለኪውላዊ architecture ናቸው። π-ሥርዓትን ከላይና ከታች ይጠብቃሉ፣ quenchingን ይቀንሳሉ፣ እና triplet ኢነርጂ የሚጓዝበትን መንገድ አይዘጉም። ይህ የሚያስተምረው ክፍል ነው፤ “የተሻለ ቁሳቁስ” የሚለውን የደበዘዘ ሐረግ አንባቢው ሊያስብበት ወደሚችል አካላዊ ሚዛን ይቀይረዋል።

ወደፊት visible-to-UV አፐኮንቨርዥን devices በእውነት ጠቃሚ ቢሆኑ፣ ከዚህ ጥናት በላይ ብዙ እርምጃዎች ያስፈልጋሉ። ግን እንዲህ ያለ ሞለኪውላዊ ቁጥጥር በትክክል ያስፈልጋቸዋል። ውጤቱ የdevice breakthrough አይደለም፤ ጠጣር ቁሳቁሶች ብዙውን ጊዜ የሚያበላሹትን photophysical trick በጠጣር ውስጥ እንዴት ማስራት እንደሚቻል ጠንካራ ማሳያ ነው።

ንጹህ ማጠቃለያ

ተመራማሪዎች alkyl side chains ከላይና ከታች የπ-ኤሌክትሮን planeን የሚጠብቁ በDHI ላይ የተመሠረቱ organic ሞለኪውሎች ቤተሰብ ነደፉ። በምርጡ ሁኔታ iBu-DHI ከtriplet donor $Ir(ppy)_3$ ጋር ተቀላቅሎ crystalline ጠጣር film ፈጠረ፣ እና triplet–triplet annihilation በመጠቀም visible blue ብርሃኑን ወደ አልትራቫዮሌት emission ቀየረ። Filmው absolute አፕኮንቨርዥን ኳንተም ምርት 1.9% እና ገደብ excitation intensity 1.2 mW cm^{-2} ደረሰ፣ ይህም በ445 nm አካባቢ ካለው solar irradiance ጋር ተቀራራቢ ነው። እውነተኛው እድገት ሞለኪውላዊ packing ነው፤ excited-ሁኔታ quenchingን ለመቀነስ በቂ ርቀት፣ triplet ኢነርጂ transfer እና ዲፊውዥን ለማስቻል በቂ ግንኙነት። ይህ ጠጣር-ሁኔታ visible-to-UV photon አፕኮንቨርዥን ላይ ጠንካራ የmaterials demonstration ነው — የፀሐይ ኃይል device አይደለም፣ “ነፃ UV” አይደለም፣ የተተገበረ ቴክኖሎጂ ማስረጃም አይደለም።

ያለ ማጋነን ማረጋገጫ

ጥናቱ የሚያሳየው: iBu-DHI/$Ir(ppy)_3$ crystalline ጠጣር film visible-to-UV TTA photon አፕኮንቨርዥን በ1.9% absolute ኳንተም ምርት እና በ445 nm ላይ 1.2 mW cm^{-2} ገደብ እንደሚያደርግ፣ ከፍተኛ fluorescence ምርት፣ ረጅም triplet lifetime፣ ፈጣን triplet ዲፊውዥን እና አንዳንድ oxygen tolerance እንደሚያቀይ። ንድፉ π-ሥርዓትን sterically በመጠበቅ እና ጠቃሚ ሞለኪውላዊ contactsን በማቆየት ይሠራል።

ምክንያታዊ ግን ያልተረጋገጠ: ተመሳሳይ packing principle የተሻሉ ጠጣር-ሁኔታ አፕኮንቨርዥን materials ሊፈጥር እንደሚችል፤ metal-free sensitizer ሥርዓቶች ወደ ተመሳሳይ አፈጻጸም ሊሻሻሉ እንደሚችሉ፤ እና እንዲህ ያሉ films ወደፊት በphotocatalysis ወይም solar chemistry ላይ ሊረዱ እንደሚችሉ።

የማያሳየው: የሚሠራ ሙሉ device፤ ጠቃሚ solar-fuel ወይም photocatalytic output፤ outdoor durability፤ በሙሉ solar ስፔክትረም ላይ ከፍተኛ ብቃት፤ economic practicality፤ ለማንኛውም chromophore የሚሠራ አጠቃላይ መመሪያ።

ዋና ገደቦች: የላቦራቶሪ film፣ የተወሰነ material ሥርዓት፣ መጠነኛ absolute ኳንተም ምርት፣ በምርጡ ውጤት iridium donor፣ ቁጥጥር ያለው excitation wavelength፣ እና device-level demonstration አለመኖሩ። “Sunlight-level” የሚለው የexcitation ባንድ አካባቢ ጥንካሬን ይመለከታል፣ ሙሉ solar-technology አባባል አይደለም።

አጠቃላይ አንባቢ ምን ያህል እምነት ሊኖረው ይገባል? የmaterial ንድፍ በተፈተነው ስርዓት ጠጣር-ሁኔታ visible-to-UV TTA-UCን እንደሚያሻሽል እና ውጤቱ በሳይንስ አንጻር ጠቃሚ መሆኑ ላይ ከፍተኛ እምነት። ይህ በቅርቡ deployable solar technology እንደሚሆን ላይ ዝቅተኛ እምነት። ተገቢው አቋም፤ ብልህና እውነተኛ የmaterials እድገት — የመተግበሪያ ታሪኩ ግን በአብዛኛው ገና ከፊት ነው።

ምንጮች

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