

Chimica & Materiali

CARBONIO QUOTIDIANO.

FATTI, MISFATTI E DUBBI SULLE NUOVE APPLICAZIONI

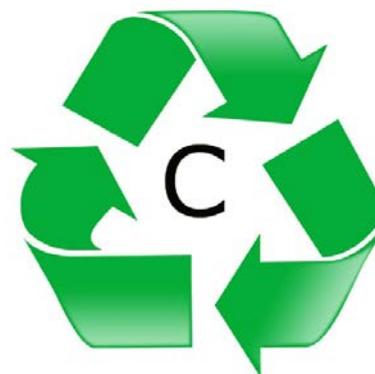
Francesco Neve

Dipartimento di Chimica e Tecnologie Chimiche

Università della Calabria

f.neve@unical.it

Il carbonio (e i suoi composti) è la risorsa globale più importante che si conosca, certamente la più discussa, forse la più indagata. Partendo da un breve riferimento al ruolo di questo elemento nelle problematiche ambientali, questa nota intende fornire una panoramica degli usi attuali meno convenzionali di alcune forme tecnologiche di carbonio e del possibile impatto nella nostra vita quotidiana.



La maggior parte del carbonio terrestre è dentro il nostro pianeta, una parte molto più ampia e profonda rispetto a quella nella quale localizziamo il ciclo biogeochimico più importante tra tutti, quello del carbonio. È questa semplice verità che viene a ricordarci il nuovissimo libro [1] di Robert Hazen, direttore del Deep Carbon Observatory (DCO) della prestigiosa Carnegie Institution di Washington [2]. Il testo di Hazen, probabilmente meno riuscito di altri sullo stesso argomento che lo hanno preceduto [3], è quasi uno spot per il tema dell'anno lanciato dalla Geological Society di Londra, la più antica al mondo. Per decisione della società geologica, il 2019 è infatti l'anno del carbonio [4], un'iniziativa che ancora una volta intende promuovere una riflessione sul ruolo critico e globale del sesto elemento nella vita e nella sopravvivenza del pianeta.

Il carbonio (in senso lato) continua ad essere sotto i riflettori dell'opinione pubblica mondiale soprattutto per il suo ruolo cruciale nei fenomeni climatici [5, 6]. Tuttavia, è quasi superfluo ricordare che questo elemento è al centro di cambiamenti epocali sia nel campo dell'energia che dell'elettronica. Materiali a base di carbonio sono tra i più versatili sia nel campo delle energie rinnovabili che in quelli più direttamente legati a problematiche ambientali (recupero, purificazione, bonifica). Forme ancora più sostenibili di materiali carbonacei (nanotubi, carboni attivati, aerogel di carbonio, ecc.) sono richiesti quando si considera l'intero ciclo di vita di un materiale [7]. Più in generale, per usare termini di recente coniazione, si sottolinea la necessità di promuovere un carbonio duraturo (*durable carbon*), riciclabile o quasi eterno, piuttosto che un carbonio disperso (*fugitive carbon*) in maniera incontrollata e sostanzialmente irreversibile, di modo che il bilancio globale del carbonio sia almeno in pareggio (*carbon neutrality*). Ma mentre i più sono impegnati a confrontarsi sul tema dei combustibili fossili e delle emissioni di CO₂, pochi si preoccupano di forme nanoscopiche e microscopiche di carbonio sempre più presenti nella nostra vita, e finanche nella nostra dieta.

Fullereni miracolosi

La scoperta dei fullereni nel 1985, e il successivo enorme interesse verso la loro caratterizzazione e funzionalizzazione per applicazioni in campo medico e biologico [8], ha avuto come sottoprodotto un rinnovato interesse per tutte le forme di carbonio, incluse quelle precedentemente note. Tra le forme di carbonio studiate ben presto grande rilevanza hanno assunto quelle extraterrestri, con la scoperta di fullereni nell'atmosfera di stelle e nebulae [9], e quelle geologiche [10]. Tra quest'ultime, la cui origine non è sempre completamente certa, comprendendo sia una provenienza meteoritica che un possibile processo-shock di formazione [11], è compresa una forma naturale di fullereni presente, in basse quantità, nel minerale ricco in carbonio (3-90%) detto *shungite* dalla località di Shunga nella regione russa della Carelia dove è estratto in rilevanti quantità.

Da almeno tre secoli la shungite è parte della cultura popolare russa come una pietra dai poteri miracolosi, particolarmente consigliata per purificare l'acqua e per protezione personale. Questo aspetto quasi taumaturgico ha attratto notevole interesse da parte dei ricercatori russi, e, nel periodo sovietico, l'uso e l'accesso a questo minerale è rimasto sotto stretto controllo militare. In particolare, la supposta azione di schermo delle radiazioni elettromagnetiche da parte del minerale è stata indagata e parzialmente confermata mediante studi *in vivo* sui ratti



[12]. Oggi la shungite si vende tranquillamente sul web in innumerevoli forme (piramidi, sfere, cubi, collane, ecc.) e prezzi. Le sue supposte proprietà (antiossidante, antimicrobico, radioschermante, conduttore, antistress, antidolorifico, concimante, ecc.) sono elencate e decantate ma tutt'altro che garantite. Ciò che sconcerta è che, accanto a meriti riconducibili in larga parte agli studi noti sui fullereni e su altre forme di carbonio, in alcuni siti ci sono affermazioni largamente false (*"la shungite contiene in sé tutti gli elementi chimici presenti sulla Terra (tutti gli elementi presenti sulla tavola di Mendeleev per*

intenderci)"), solo parzialmente corrette (*"la shungite è costituita da fullerene C₆₀"*), o semplicemente prive di significato (*"la shungite è l'unico elemento terrestre a possedere in sé i fullereni: forse, proprio per questo, è un minerale con innumerevoli benefici su tutto ciò che esiste e vive sulla Terra"*) [13].

Tra le proprietà attribuite alla shungite c'è quella di essere un efficace antiossidante, caratteristica onnipresente quando si parla di fullereni, ampiamente pubblicizzata nel caso di applicazioni in campo cosmetico. Il potere antiossidante del C₆₀ abbinato alla sua solubilità in acqua, fanno del suo derivato fullerenolo, un fullerene polioidrossilato, uno dei derivati fullerenici più studiati (anche per le sue proprietà citotossiche). Studi recenti sul nematode preferito dai biologi molecolari, il *Caenorhabditis elegans* (un organismo modello per gli studi sull'apoptosi), sembrano confermare che il fullerenolo ha un effetto protettivo nei confronti dello stress ossidativo e promuove un allungamento del ciclo vitale del *C. elegans* [14]. Che gli effetti sull'uomo siano gli stessi è ancora da dimostrare ma l'interesse del settore del wellness e dei rimedi anti-età è enorme e in rapida crescita.

È a questo campo che si può ricondurre un altro fenomeno recente che ha avuto origine dalla pubblicazione nel 2012 di un articolo da parte di un gruppo di ricercatori franco-tunisino [15]. Lo studio nasce per determinare la tossicità del C₆₀ utilizzando forme solubili del fullerene. L'impossibilità di utilizzare soluzioni di oli vegetali del fullerene (perché non abbastanza concentrate) per studiarne la tossicità acuta *in vivo* secondo le raccomandazioni dell'European Medicines Agency (EMA), ha indirizzato lo studio verso la misura della tossicità cronica ottenuta

Chimica & Materiali

in seguito a somministrazioni ripetute. Gli studi effettuati sui ratti somministrando fullerene non modificato in soluzione di olio vergine d'oliva certificano non solo l'assenza di tossicità cronica nelle condizioni degli esperimenti, ma addirittura confermano il quasi raddoppio della sopravvivenza degli animali rispetto a individui trattati solo con acqua. È interessante notare che la sopravvivenza di un terzo gruppo di ratti, quelli trattati con il solo olio vergine d'oliva, è generalmente intermedia (a parità di età) tra i valori minimi e massimi riscontrati per il gruppo di controllo e per quello a cui è stato somministrato il fullerene.



Fig. 1 - Oli commerciali al fullerene C60

Nonostante altri studi precedenti avessero parlato di danni al DNA di ratti trattati con soluzioni di fullerene in olio di girasole [16], l'azione antiossidante e anti-età dei fullereni continua ad essere al centro di notevole interesse scientifico [17, 18] e commerciale [19]. L'interesse per lo studio franco-tunisino è stato evidentemente elevato se è riuscito a creare le premesse per numerose iniziative di commercializzazione di olio d'oliva con fullerene. Al momento tutti i venditori sottolineano che si tratta di un prodotto per la ricerca e per il consumo animale (ne esistono anche versioni con olio di avocado, olio di semi di zucca, o olio di semi di canapa indiana, Fig. 1), ma stranamente si raccomanda di non somministrarlo a donne incinte o bambini.

E se da un lato il cittadino comune si potrebbe chiedere chi ne abbia autorizzato la vendita e con quali garanzie per la salute (chiunque lo assuma), gli specialisti sono fortemente preoccupati dell'incertezza che permane intorno alla tossicità del materiale e della evidente facilità con la quale il fullerene può essere venduto e acquistato online [20]. Il dubbio è che il fullerene finisca per essere considerato "di fatto" alla stregua di un nutraceutico o di un "farmaco" per combattere l'invecchiamento. In realtà questo è più che un sospetto dal momento che ci sono già siti web che parlano apertamente e chiaramente di consumo umano oltre che animale (quello di facciata) dell'olio al fullerene [21].

Dai grafeni "fake"... a quelli edibili

Centinaia di compagnie al mondo dichiarano di produrre grafene, il materiale delle meraviglie (il più leggero, il più sottile, il più conduttore, il più trasparente, ecc.). Nonostante esistano molti metodi per produrre il principe dei materiali 2D, il metodo della esfoliazione di grafite in fase liquida (LPE) rimane uno dei metodi più diffusi ed economici, essendo anche molto più pratico da realizzare su scala industriale di quello micromeccanico, detto del nastro adesivo, che ha portato all'isolamento del grafene nel 2004. In realtà, il metodo più importante per produrre grafene continuo è quello CVD che utilizza derivati di carbonio come reagenti.

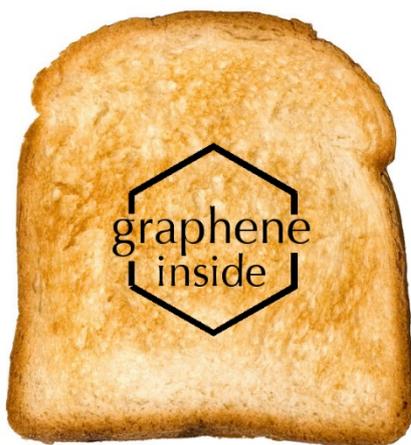
Ma se i metodi di preparazione sono abbastanza certi, rimane grande incertezza su cosa si possa

definire grafene e, soprattutto, su quale sia la qualità del prodotto grafene messo in commercio. Alla prima richiesta di chiarezza ha cercato di rispondere l'ISO (International Organization for Standardization), individuando quattro diverse forme di grafene [22] differenziate per numero di strati grafenici (N) e rapporto d'aspetto (*aspect ratio*):

- Grafene propriamente detto: un singolo strato di atomi di carbonio;
- Grafene a doppio strato (*bilayer graphene*): due strati grafenici regolarmente sovrapposti;
- Grafene multistrato (*few-layer graphene*): comprendente da 3 a 10 strati grafenici regolarmente sovrapposti;
- GNP, nanoplastine di grafene (*graphene nanoplatelets*): grafene di spessore tra 1 e 3 nm e dimensioni laterali comprese tra 100 nm e 100 μm .

In realtà, se per molti ricercatori il grafene GNP non sarebbe altro che polvere di grafite dal momento che ne ha tutte le caratteristiche fisiche, la nomenclatura utilizzata per le varie forme non è per niente unificata, e in generale i fiocchi di grafene mantengono molte delle caratteristiche del grafene monostrato solo se il numero di strati è inferiore a 5-10.

Il problema della qualità del grafene circolante sul mercato mondiale è stato affrontato in uno studio molto ampio (ma non onnicomprensivo) che ha analizzato il grafene commercializzato da 60 diverse aziende dislocate in quattro continenti (Americhe, Europa, Asia, Oceania) [23]. A partire dallo spessore degli strati (misurato mediante microscopia a forza atomica (AFM)), tutte le principali caratteristiche fisiche e di purezza misurate dimostrano che la maggior parte delle aziende analizzate vende un materiale (che la maggior parte produce) in cui il contenuto effettivo di grafene è <10% del totale nominale venduto (e nessuno fornisce materiale la cui percentuale di grafene >50%). La seconda sorpresa è che viene venduto come grafene un materiale che in alcuni casi contiene <50% di carbonio. Infine, il lavoro di Castro Neto e Novoselov certifica che nel materiale analizzato il grafene manca di elevata cristallinità e raramente si riscontrano scaglie (*flakes*) più larghe di 5 μm . Ora, sebbene applicazioni diverse richiedano (e tollerino) grafene di diversa qualità, è evidente che per quanto parziale possa essere lo studio, molto del grafene circolante (venduto a caro prezzo) potrebbe essere inutile o scarsamente utile per le applicazioni più inseguite (batterie, celle solari, ecc.) Per le applicazioni più ricercate è infatti estremamente importante poter contare su grafene relativamente puro, a basso valore di N e larghezza delle scaglie la più ampia possibile.



Al posto della forma nativa 2D di grafene, per alcune applicazioni speciali (fotodetector, biosensori elettrochimici, nanocondensatori, elettrocatalizzatori, ecc.) si preferisce ormai utilizzare schiume di grafene, forme 3D molto porose che garantiscono una maggiore area superficiale a parità di mobilità di carica e flessibilità. I metodi per produrre grafene poroso (che non rientra tra le forme standard ISO citate sopra) sono diversi e solo a partire dal 2014 si è imposto un metodo che utilizza comuni laser a CO_2 . Il metodo, denominato LIG (*laser induced graphene*) [24], permette di ottenere un sorta di grafene cinetico (cioè non stabilizzato dalla fase di annealing) con altissime prestazioni. L'ultimo upgrade al metodo, che

utilizza una tecnica di lasing multiplo, permette di ottenere grafene modellato nella forma desiderata "scrivendo" con il laser su un substrato di carbonio amorfo precedentemente ottenuto da un substrato precursore [25]. Il metodo di lasing multiplo, che arriva dall'americana Rice University (una delle culle delle ricerche sui fullereni e sui nanotubi di carbonio), è ormai in grado di generare grafene sia su substrati polimerici sintetici che direttamente su materiali

naturali ricchi in carbonio. Tra questi ultimi rientrano sia materiali cellulosici (carta, legno, gusci legnosi), che tessuti (cotone), che prodotti destinati al consumo alimentare (patate, pane). L'obiettivo dichiarato è quello di fornire un metodo accurato ed economico per stampare grafene per un'elettronica flessibile, indossabile e, se necessario, edibile.

Gli studi sul grafene proseguono ad un ritmo molto serrato. È di questi giorni la notizia di una collaborazione tra il consorzio Graphene Flagship, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e un'azienda svedese (SSC) che ha portato al lancio del razzo MASER 14 per effettuare esperimenti di crescita (printing) di grafene in condizioni di microgravità [26]. L'obiettivo è testare questa possibilità, e acquisire conoscenze da utilizzare per eventuali missioni spaziali di lunga durata nel corso delle quali potrebbe essere necessario fabbricare/stampare sul posto dispositivi elettronici piuttosto che trasportarli dalla terra.

Ma mentre si cerca per il grafene l'applicazione killer (quella che giustificherebbe gli attuali enormi investimenti nel campo della ricerca), il grafene è impiegato già in una miriade di applicazioni relativamente più "prosaiche" di quelle immaginate inizialmente o che si stanno perfezionando nei laboratori di tutto il mondo. Queste vanno, ad esempio, dalla produzione di una tintura per capelli ritenuta perfetta e che non fa male (purtroppo solo nera), all'impiego in nuove protesi dentarie, a basi per inchiostri e vernici (conduttivi o meno), e molte altre ancora. Purtroppo in questo campo il termine grafene non indica necessariamente il materiale descritto all'inizio ma anche ossido di grafene (GO, *graphene oxide*) più o meno puro, quantum dots di grafene (GQD), e altre forme in parte o largamente assimilabili al grafene cristallino multistrato.

Nanotubi per l'arte e per la strada

Se il grafene (monostrato) è il materiale *più trasparente* che si conosca - lascia passare infatti il 97,7% della luce - un altro nanomateriale di carbonio è servito per produrre il nero più profondo mai realizzato. A partire dal 2014, l'azienda inglese Surrey NanoSystems ha infatti realizzato un materiale, denominato *vantablack*[®], che assorbe il 99,965% della radiazione visibile (a 700 nm) [27]. Un ulteriore miglioramento tecnologico ha permesso alla stessa azienda di ottenere un nero ancora più nero che assorbe il 99,9923% del visibile. Il nuovissimo materiale (*vantablack 2.0*[®]) ha una profondità del nero così elevata che, se utilizzato come rivestimento di oggetti tridimensionali, induce la percezione visiva di un oggetto in due sole dimensioni, cioè ne fa percepire solo i contorni.

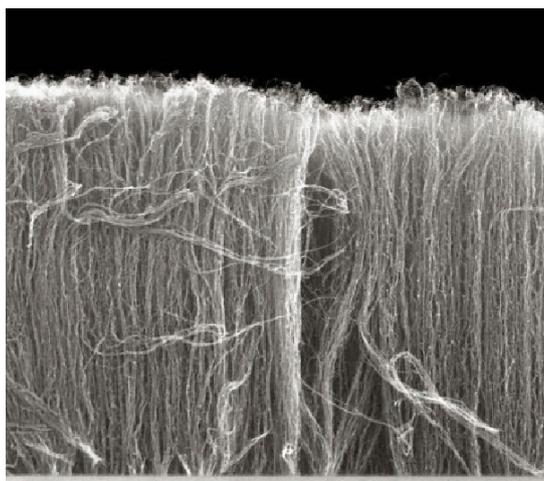


Fig. 2 - Immagine SEM di fasci di nanotubi di carbonio allineati su un substrato

Vantablack sta per *Vertical Aligned Nanotube Array Black*, un rivestimento costituito da foreste di nanotubi di carbonio allineati in verticale (Fig. 2) all'interno delle quali la luce assorbita

letteralmente si perde in riflessioni successive da parte dei singoli nanotubi, e infine si trasforma in calore che si dissipa nella struttura. Il materiale è leggerissimo perché si tratta sostanzialmente di spazio vuoto tra i nanotubi e dentro i singoli nanotubi (i nanotubi rappresentano solo lo 0,05% del rivestimento), e lo spessore che il rivestimento riesce a raggiungere è 20-30 μm . In questo modo un metro quadrato di rivestimento pesa circa 2,5 g. A causa dell'eccezionale modulo elastico dei nanotubi di carbonio, il rivestimento costituito da vantablack ha una durata eccezionale, e un'altrettanto eccezionale resistenza allo shock termico, meccanico e alle vibrazioni. Combinate con la straordinariamente bassa riflettanza in tutto lo spettro, dall'UV al lontano IR, queste proprietà rendono il vantablack (ora commercializzato anche in versioni spray) estremamente adatto per applicazioni in campo spaziale e, probabilmente, militare. Ma mentre il vantablack è disponibile sul mercato e riscuote un notevole successo in campo aerospaziale, della difesa, dei dispositivi per illuminazione, dei componenti ottici di precisione e altri ancora, esso non può essere utilizzato come pigmento nero in campo strettamente artistico. Questo perché l'artista britannico Anish Kapoor ne ha acquistato i diritti di sfruttamento universali, suscitando una marea di critiche negative. Curiosamente, Kapoor ha rivestito con vantablack la sua famosa opera in acciaio straordinariamente riflettente *Cloud Gate* (Millennium Park, Chicago) trasformandola per alcuni giorni in una sorta di buco nero a forma di fagiolo.

L'impiego dei nanotubi di carbonio è da sempre collegato ai metodi di preparazione di questa forma di nanocarbonio che spesso sono costosi, richiedono diverse fasi di purificazione e prevedono condizioni energeticamente dispendiose. In alcuni casi, e in particolare per nanotubi cresciuti su substrati, si possono ora realizzare sintesi a temperatura relativamente bassa (<400 °C) utilizzando comuni composti di sodio (NaCl, Na₂CO₃, NaHCO₃, NaOH). In questi processi il sodio funziona da catalizzatore metallico - un ruolo generalmente assolto da metalli più nobili (Fe, Co, Ni) - e può essere facilmente rimosso alla fine attraverso un processo di annealing del materiale carbonaceo [28].

Uno degli utilizzi più diffusi dei nanotubi di carbonio è quello di componenti multifunzionali (pregiati) di materiali compositi. Tuttavia, tra le limitazioni più frequenti vi è quella rappresentata dalla difficoltà di disperdere efficacemente i nanotubi nella matrice perché essi tendono ad aggregarsi in fasci e clusters. Questo problema sembra non essere però particolarmente rilevante quando parliamo dell'utilizzo di nanotubi in miscele (ancorché meno nobili) come il bitume. L'uso dei nanotubi di carbonio (generalmente a parete multipla, MWCNT) per migliorarne le qualità e influenzarne il comportamento reologico è ormai un dato largamente consolidato [29]. L'aggiunta di una relativamente alta percentuale ($\geq 1\%$) di nanotubi fa infatti aumentare la resistenza alla deformazione permanente dell'asfalto soprattutto alle alte temperature.

Diamanti del ricordo e futuri distopici

È dai primi anni 2000 che un particolare tipo di diamanti ha fatto la sua comparsa nel mercato dei diamanti sintetici. Utilizzando il ben noto processo ad alta pressione e alta temperatura (HPHT, *High Pressure High Temperature*) che replica le condizioni geologiche che hanno prodotto i diamanti naturali terrestri, diverse aziende (soprattutto americane e svizzere) propongono la trasformazione tecnologica delle ceneri di cremazione umane (o dei capelli) in diamanti da indossare, o semplicemente da ammirare, e che chiamano *diamanti della memoria* [30]. Nel primo passaggio, dalle ceneri è estratto tutto il carbonio presente che è quindi trasformato in grafite. Successivamente, la grafite è portata a 1300-1500 °C, riscaldata per un certo periodo di tempo, e infine sottoposta a fortissime pressioni (50-60 kbar) per convertire tutto il carbonio lamellare in diamante puro. Caratura, colore e taglio del diamante prescelto (in genere da 0,3 a 2 carati) determineranno sia il costo che il tempo necessario per completare l'intero processo che può durare fino a diversi mesi.



Ma se un diamante è per sempre, e viene a interrompere l'eterno ciclo della vita, niente ci ha ancora preparati allo scenario descritto da Richard Morgan in *Altered Carbon*, una storia fortemente distopica ambientata nel 2384 (adattata per lo schermo nel 2018 da Netflix) in cui si muovono esseri umani mortali le cui coscienze sono digitalizzate (quindi non “muoiono” mai), custodite a pagamento in lontani satelliti, e possono essere reimpiantate in nuovi corpi che funzionano come “gusci” delle menti [31].

BIBLIOGRAFIA

- ¹R.M. Hazen, *Symphony in C: Carbon and the Evolution of (Almost) Everything*, W.W. Norton, New York, 2019.
- ²<https://carnegiescience.edu/about>
- ³<https://www.geolsoc.org.uk/About/Themed-Years/Year-of-Carbon>
- ⁴E. Roston, *The Carbon Age: How Life's Core Element has Become Civilization's Greatest Threat*, Walker&Company, New York, 2008.
- ⁵<https://unfccc.int/climate-action/climate-neutral-now>
- ⁶J. Johnson, *Chem. Eng. News*, february 2019, 39.
- ⁷M. Titirici *et al.*, *Chem. Soc. Rev.*, 2015, **44**, 250.
- ⁸E. Castro *et al.*, *J. Mater. Chem. B*, 2017, **5**, 6523.
- ⁹J. Cami *et al.*, *Science*, 2010, **329**, 1180.
- ¹⁰P.R. Buseck *et al.*, *Science*, 1992, **257**, 215.
- ¹¹P.R. Buseck, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 203, 781, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00819-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00819-1)
- ¹²S.P. Kurotchenko *et al.*, *Bull. Exp. Biol. Med.*, 2003, **136**, 458, <https://doi.org/10.1023/B:BEBM.0000017092.52535.f8>
- ¹³<https://www.ilgiardinodeilibri.it/speciali/la-shungite-come-la-pietra-filosofale.php>
- ¹⁴W. Cong *et al.*, *Biomaterials*, 2015, **42**, 78, <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.11.048>
- ¹⁵T. Baati *et al.*, *Biomaterials*, 2012, **33**, 4936.
- ¹⁶J.K. Folkmann *et al.*, *Environ. Health Perspect.*, 2009, **117**, 703, <https://doi.org/10.1289/ehp.11922>
- ¹⁷Y.P. Galvan *et al.*, *Curr. Aging Sci.*, 2017, **10**, 56.
- ¹⁸S. Emelyantsev *et al.*, *Biosensors*, 2019, **9**(2), 81.
- ¹⁹<https://c60supply.com/product/c60-fullerene-olive-oil-solution-1-bottle/> (USA); <https://carbon60oliveoil.com/> (UK); <https://telomas.com/collections/health-food?ls=en> (Irlanda); <https://c60-france.com/fr/> (Francia).
- ²⁰J. Hare, *Chemistry World*, 2019, **16**(3), 29.
- ²¹<https://www.mybodysymphony.com/products-8-carbon-60/>
- ²²*Nanotechnologies - Vocabulary - Part 13: Graphene and Related Two-Dimensional (2D) Materials*, BSI Standards Publication, London, UK, 2017, <https://www.iso.org/standard/64741.html>
- ²³A.P. Kauling *et al.*, *Adv. Mater.*, 2018, **30**, 1803784.
- ²⁴R. Ye *et al.*, *Acc.Chem.Res.*, 2018, **51**, 1609.
- ²⁵Y. Chyan *et al.*, *ACS Nano*, 2018, **12**, 2176.
- ²⁶<https://graphene-flagship.eu/news/Pages/Graphene-goes-to-space.aspx>
- ²⁷<https://www.surreynanosystems.com/>
- ²⁸R. Li *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, **58**, 1.
- ²⁹V. Loise *et al.*, *Colloids Surf. A*, 2019, **566**, 113.
- ³⁰G. McDonald, *National Geographic Magazine*, May issue, 2019; <https://www.nationalgeographic.com/magazine/2019/05/ashes-to-diamonds-reefs-rockets-how-we-will-memorialize-dead/>
- ³¹R. Morgan, *Altered Carbon*, Random House, 2002; <https://www.netflix.com/it/title/80097140>