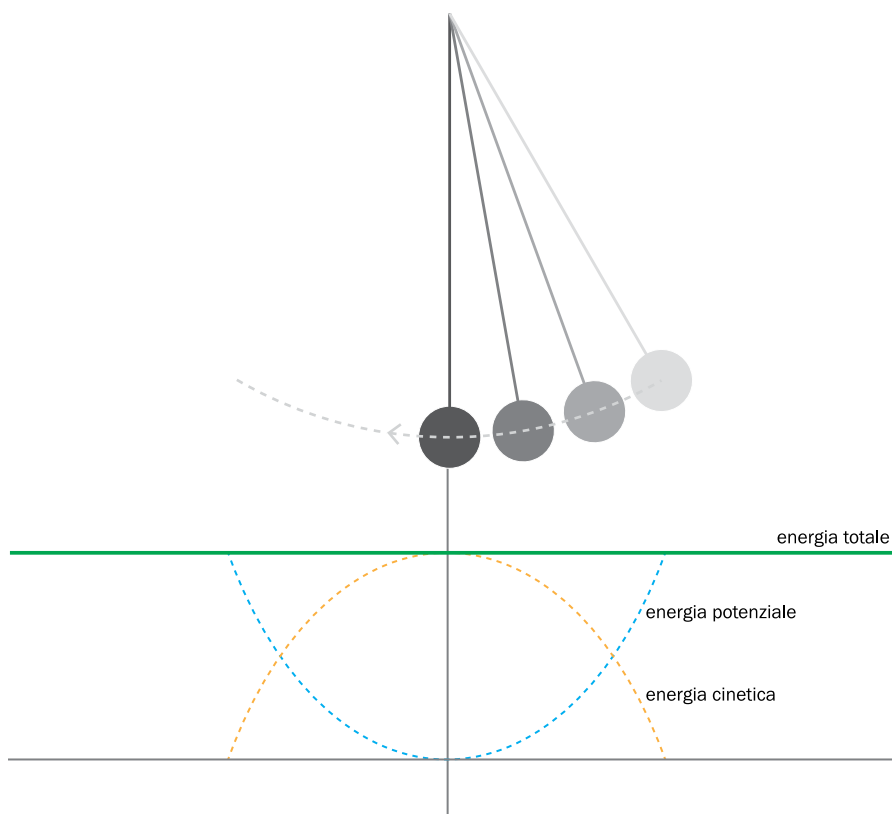


A photograph of a beach at sunset. In the foreground, several tall, thin grasses with feathery seed heads are silhouetted against the bright, golden light of the setting sun. The sun is positioned on the right side of the frame, creating a strong lens flare and casting long, soft shadows of the grasses onto the sand. The background shows a calm ocean meeting a clear, light blue sky at the horizon. The overall mood is serene and contemplative.

# L'energia è tutto

Le mille facce di una grandezza fisica

di Paolo Gambino



a.  
L'energia totale di un pendolo in oscillazione (assumendo nulle le forze di attrito) è costante (linea verde). Questa è la somma tra l'energia cinetica (linea tratteggiata gialla) e l'energia potenziale (linea tratteggiata blu), che invece variano a seconda della posizione del pendolo.

L'esplosione cosmica all'inizio del tempo ha avuto origine da un grumo di energia. L'incessante e rocambolesca trasformazione di questa energia primordiale, il suo continuo disperdersi e riaggregarsi costituiscono a tutti gli effetti la storia dell'universo. In principio era quindi l'energia, e l'energia è luce ed è massa, è movimento ed è calore, è elettricità ed è vita. I fisici definiscono l'energia come capacità di compiere "lavoro meccanico" (ad esempio l'energia contenuta nella benzina alimenta un'automobile), ma l'energia è molto di più, e non tutta l'energia può essere completamente convertita in lavoro meccanico. Un pallido riflesso dell'energia primordiale muove pure le nostre vite, illumina e riscalda le nostre notti, alimenta l'economia del pianeta e con essa le speranze di miliardi d'individui. Da sempre, la riflessione sulla realtà fisica è stata accompagnata, e spesso direttamente motivata, dal desiderio di dare risposte a problemi pratici, di fornire cioè tecnologie in grado di aiutare l'umanità a soddisfare i propri bisogni. Oggi, gran parte di questi bisogni (calore, trasporto, luce, ecc.) sono soddisfatti attraverso lo sfruttamento di combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale). Si tratta di risorse finite, destinate prima o poi a esaurirsi, il cui impiego massiccio ha causato un rapido aumento dell'anidride carbonica atmosferica che sta alterando l'equilibrio dell'ecosistema terrestre. Le prime avvisaglie di drammatici cambiamenti climatici sono ormai evidenti e gli sviluppi futuri potrebbero essere ben peggiori: la transizione verso fonti energetiche sostenibili è quindi diventata una questione urgente. Questa transizione è già iniziata a livello planetario, ed è molto probabile che le sorti del riscaldamento globale dipendano dalla velocità con cui si compirà. Che cosa è dunque l'energia? Abbiamo detto della sua natura mutevole e multiforme: nella storia della fisica, forme di energia differenti sono state successivamente individuate e gradualmente inglobate in un processo unificante, culminato nella formulazione di un principio universale di conservazione

secondo cui "la somma di tutte le forme di energia di un sistema isolato è costante nel tempo". Il primo passo nella comprensione dell'energia è stato l'affermarsi nel XVIII secolo del "teorema dell'energia cinetica" o "delle forze vive", che stabilisce proprio l'equivalenza tra energia cinetica, cioè energia posseduta da un corpo in virtù del suo moto, e lavoro meccanico, dato dal prodotto di forza per spostamento. La forza che accelera un razzo, ad esempio, compie un lavoro pari all'energia cinetica acquisita dal razzo. Si consideri ora un pendolo (vd. fig. a): durante le oscillazioni la sua velocità (e quindi la sua energia cinetica) diminuisce quando esso sale verso l'alto e cresce quando esso scende. È quindi naturale legare l'altezza raggiunta dal pendolo a un nuovo tipo di energia, l'"energia potenziale", che rappresenta la capacità di un sistema di immagazzinare energia attraverso l'interazione con qualcosa, in questo caso il campo gravitazionale. L'energia cinetica del pendolo si trasforma gradualmente in energia potenziale e viceversa, ma la loro somma rimane sempre costante. In effetti, avrebbe poco senso parlare di energia se questa non fosse conservata. A seconda del tipo di sistema distingueremo tra energia potenziale "gravitazionale", come nel caso del pendolo, energia potenziale "elastica", come nel caso di una molla, ecc. Un pendolo lasciato a sé stesso, però, prima o poi si ferma: la sua energia viene lentamente dissipata attraverso l'attrito con l'aria e al perno. Dove finisce? Si trasforma in calore, e contribuisce all'"energia interna", l'energia posseduta dai componenti microscopici del pendolo e dell'aria che lo circonda, il cui moto disordinato è legato alla temperatura del sistema. La branca della fisica che studia la relazione tra calore, energia e lavoro è la "termodinamica". Il suo primo principio riafferma la conservazione dell'energia totale, mentre il secondo principio sancisce l'impossibilità di trasformare tutto il calore assorbito da un sistema in energia meccanica.

La termodinamica si sviluppa durante la rivoluzione industriale e le sue leggi spiegano il comportamento delle macchine termiche, che venivano messe a punto proprio in quegli anni. In particolare, una macchina termica, scambiando calore con una sorgente calda e una fredda a temperature assolute  $T_1$  e  $T_2$ , non può mai trasformare in energia meccanica più di una frazione  $1-T_2/T_1$  del calore assorbito (teorema di Carnot).

Questa frazione è l'“efficienza”, il rapporto cioè tra energia utile ed energia assorbita. I motori a combustione interna delle nostre automobili, che consumano benzina o gasolio per produrre l'energia meccanica necessaria al loro movimento, hanno un'efficienza del 25-30%: il 70-75% dell'energia viene quindi disperso nell'ambiente come calore. Qualsiasi trasformazione energetica a livello macroscopico è caratterizzata da un'efficienza minore di 1 e da una dispersione di calore nell'ambiente (vd. fig. b).

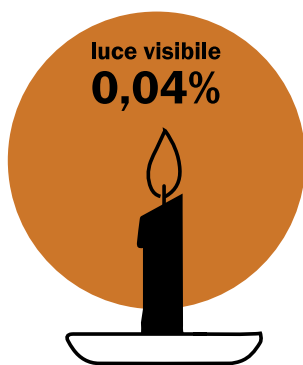
Naturalmente abbiamo anche l'energia potenziale elettrica e magnetica: le onde elettromagnetiche trasferiscono proprio questo tipo di energia, che noi percepiamo come luce, calore o radiazione a seconda della loro lunghezza d'onda. Tutti i corpi emettono onde elettromagnetiche in misura proporzionale alla quarta potenza della loro temperatura: la maggior parte del consumo metabolico del nostro corpo, circa 100 watt (un watt, l'unità di misura della “potenza”, è pari a un joule per secondo), viene emesso come radiazione infrarossa.

Con l'avvento della relatività,

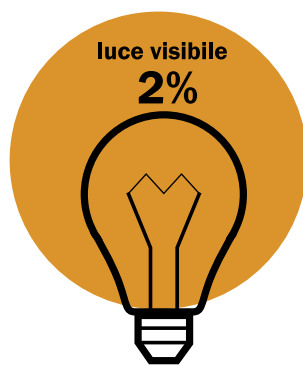
intervengono alcune novità dirimpenti. La principale è che la massa stessa è una forma di energia (la famosa equivalenza einsteiniana tra massa ed energia), come dimostrano i decadimenti dei nuclei radioattivi e delle particelle elementari o l'annichilazione tra materia e antimateria. Su questo fenomeno è basata la PET (la tomografia a emissione di positroni, una tecnica diagnostica molto usata in medicina, soprattutto per la localizzazione e il monitoraggio di tumori, vd. in Asimmetrie n. 7 p. 38, ndr): nell'annichilazione tra un elettrone e un positrone (l'antiparticella dell'elettrone) a riposo, l'energia della loro massa si trasforma completamente nell'energia elettromagnetica dei due fotoni prodotti (due raggi  $\gamma$ ). L'energia di massa è immensa: un solo grammo di materia contiene più energia di quella rilasciata dalla bomba atomica di Hiroshima. Nei reattori nucleari si cattura una piccola parte dell'energia di massa per produrre energia elettrica. L'equivalenza massa-energia vale anche nel senso opposto. Negli acceleratori di particelle parte dell'energia delle particelle che collidono si tramuta nell'energia di massa di nuove particelle, che poi rapidamente decadono. La recente scoperta del bosone di Higgs in Lhc è proprio stata resa possibile dalla grande energia dei protoni che vi vengono fatti collidere. E poiché ogni particella è anche un'onda (ce lo insegna la meccanica quantistica), la cui lunghezza d'onda decresce al crescere dell'energia, particelle di alta energia sondano la struttura della materia a distanze piccolissime, come microscopi superpotenti.

Nonostante le innumerevoli conferme sperimentali della sua conservazione, l'energia rimane un concetto sfuggente - come disse Feynman: “Ad oggi, non sappiamo davvero che cosa sia” - la cui essenza è da cercare a livello formale. La conservazione dell'energia (vd. p. 9, ndr) è il riflesso dell'immutabilità delle leggi fondamentali della natura, e quindi dell'intellegibilità del mondo, quella misteriosissima proprietà che ci permette di trovare ordine nel caos dell'universo. E parlando di misteri, non possiamo non ricordare che a livello cosmologico il bilancio energetico non sembra funzionare: per spiegare le osservazioni sperimentali, in particolare l'accelerazione dell'espansione dell'universo, è stata perciò ipotizzata l'esistenza di un'energia del vuoto (vd. p. 13, ndr), detta “energia oscura”, che rappresenta uno dei problemi più affascinanti della fisica attuale.

b.  
In figura è mostrata l'efficienza di emissione di alcune sorgenti luminose. Nel caso di una lampadina, l'energia utile è quella emessa sotto forma di luce visibile, che è solo una frazione dell'energia impiegata, perché la restante parte viene dissipata in calore o radiazione non visibile. L'illuminazione a Led (*light emitting diode*) è un tipico esempio di tecnologia che migliorando l'efficienza riduce i consumi di energia: a Torino, ad esempio, la parziale conversione a Led dell'illuminazione pubblica ha ridotto i relativi consumi elettrici del 33% (25 milioni di kWh/anno equivalenti a 4 milioni di euro/anno).



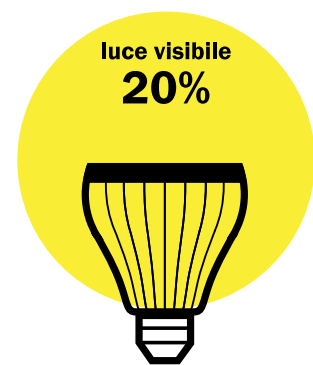
candela



lampada a incandescenza



lampada a fluorescenza



lampada a Led

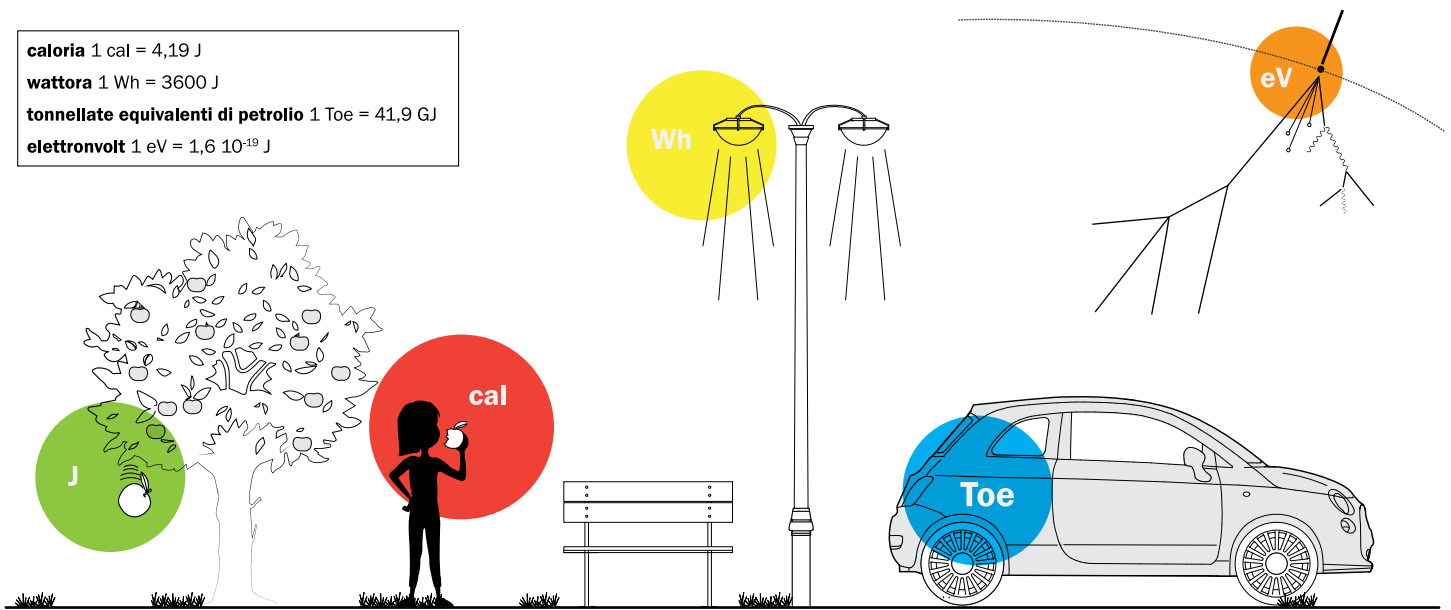


c.  
I pannelli fotovoltaici trasformano la radiazione solare in energia elettrica. La tecnologia dominante è basata sull'uso del silicio, materiale molto abbondante in natura, e ha un'efficienza modesta, tra il 15 e il 22%. Il suo costo è crollato negli ultimi 10 anni. La ricerca di alternative ancora più economiche ed efficienti è attivissima.

Ogni secondo, la Terra riceve dal Sole ben  $1,7 \cdot 10^{17}$  joule di energia, da cui derivano quasi tutte le forme di energia che conosciamo, sia rinnovabili (solare, eolica, idrica) sia fossili (carbone, petrolio e gas naturale non sono altro che energia solare fossile). Solo le correnti di marea e il calore geotermico hanno origine diversa. Un  $m^2$  di territorio italiano, per esempio, riceve in media 170 watt di radiazione solare: tutta l'energia (finale) consumata nel nostro paese in un anno è pari all'energia solare che raggiunge un quadrato di soli 30 km di lato nello stesso periodo. Si tratta quindi di una risorsa abundantissima e apparentemente a portata di mano, e lo stesso si può dire del vento, almeno nelle zone più ventose. Il problema è trasformare questi flussi naturali di energia nelle forme di energia di cui abbiamo bisogno (elettrica, termica, ecc.) per poterla utilizzare quando necessario. Le principali limitazioni sono legate all'efficienza del processo di trasformazione, alle fluttuazioni (giornaliere, stagionali e aleatorie) di questi flussi e al costo dei relativi impianti. Un comune pannello fotovoltaico al silicio, ad esempio, trasforma l'energia solare in energia elettrica con un'efficienza di circa il 15-17% (i migliori modelli in commercio raggiungono il 22%) e quindi solo una frazione ridotta della radiazione solare può essere trasformata in energia elettrica. Nuove tecnologie potrebbero aumentare l'efficienza, ma esistono limiti fisici invalicabili (il 29% circa per le celle al silicio a giunzione singola). Possiamo invece scaldare l'acqua con il Sole in maniera assai più efficiente: un collettore solare ha un'efficienza che dipende dalla differenza tra la temperatura dell'acqua e quella dell'ambiente, ed è tipicamente del 50-60% per temperature dell'acqua attorno ai 60°C. Naturalmente, il valore che attribuiamo all'efficienza dipende dal costo: la buona notizia è che il prezzo del fotovoltaico tradizionale è sceso drammaticamente negli ultimi anni, al punto che i moduli non sono più la voce principale di costo nella costruzione di un piccolo impianto. E anche il prezzo dell'energia eolica è sceso,

seppur più lentamente. Il risultato, a livello mondiale, è un boom di queste due fonti rinnovabili, che in molte zone non necessitano più di incentivazione e sono spesso ormai competitive con le fonti energetiche fossili. A fine 2016 risultavano installati circa 300 GW di fotovoltaico e 500 GW di eolico in tutto il mondo. La transizione energetica interessa ormai davvero tutto il globo e procede a grande velocità: l'Agenzia Internazionale dell'Energia (Iea) stima che nel 2016 il 24% dell'energia elettrica mondiale sia stata prodotta da fonti rinnovabili, una quota destinata a superare il 30% entro il 2021. In Italia siamo ormai stabilmente attorno al 33%, il doppio rispetto al 2008. Queste fonti tuttavia non sono programmabili, e la loro aleatorietà e stagionalità rappresentano un serio problema per le future reti elettriche, solo parzialmente mitigato dal potenziale di fonti rinnovabili programmabili come le biomasse. L'accumulo di energia (di breve o lunga durata, termico, meccanico o chimico) è quindi al centro della ricerca attuale, ma anche la rete elettrica e il modo in cui usiamo l'energia sono destinati a cambiare in profondità, spostando parte dei consumi nei periodi di massima disponibilità di energia rinnovabile. Parallelamente, il miglioramento dell'efficienza energetica ha grandi potenzialità. Si pensi ai consumi termici che in Italia rappresentano il 45% del totale: il miglioramento dell'isolamento termico degli edifici e l'estensione del teleriscaldamento possono concorrere a una loro forte riduzione. Il settore dei trasporti, che assorbe globalmente quasi un terzo dell'energia, è prevalentemente basato su motori diesel e a benzina, che come abbiamo visto sono poco efficienti. Un motore elettrico ha invece un rendimento prossimo al 90% e permette anche il recupero dell'energia in frenata. La diffusione delle auto elettriche e in generale l'elettrificazione dei trasporti sono quindi componenti essenziali di ogni scenario energetico futuro basato sulle fonti rinnovabili. La tecnologia è ormai matura e si stima che entro il 2030 ci saranno nel mondo 150 milioni di auto elettriche circolanti.

**caloria** 1 cal = 4,19 J  
**wattora** 1 Wh = 3600 J  
**tonnellate equivalenti di petrolio** 1 Toe = 41,9 GJ  
**elettronvolt** 1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J



Il miglioramento dell'efficienza energetica è quindi complementare all'impiego delle fonti rinnovabili in una strategia di riduzione delle emissioni e richiede un investimento il cui tempo di ritorno è spesso breve. Poiché il risparmio che ne deriva è molto competitivo rispetto alla costruzione di nuove centrali elettriche, assistiamo a livello globale a una forte espansione di questi investimenti (200 miliardi di euro nel solo 2015). Oggi ogni italiano consuma in media circa 80 kWh al giorno di energia primaria, ovvero assorbe mediamente 3,3 kW. Servono per scaldarci, a casa e in ufficio (oltre il 20% del totale), per spostarci, mangiare, lavorare e divertirci e per produrre oggetti di consumo, dalle automobili ai cellulari. Percorrere un chilometro con un'auto a benzina o gasolio, p. es., richiede quasi un kWh di energia primaria, 5-10 volte più dell'energia elettrica assorbita da un'auto elettrica. Un aereo di linea Torino-Roma consuma circa 50.000 kWh e attorno a 200 kWh per passeggero. Viaggiare in treno, anche ad alta velocità, è almeno dieci volte meglio! Oltre al miglioramento dell'efficienza e all'eliminazione degli sprechi ci sono poi moltissime possibilità per risparmiare energia che però implicano dei cambiamenti nel nostro stile di vita (p. es. usare la bicicletta invece dell'auto).

Purtroppo il ritmo della transizione energetica è ancora insufficiente per incidere sui cambiamenti climatici in atto, e per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> in misura tale da contenere l'aumento medio di temperatura entro i 2°C. La domanda globale di energia, trainata dall'aumento della popolazione mondiale, continua infatti a crescere (vd. p. 28, ndr). Solo nei paesi avanzati si osserva un lieve ma costante calo dai primi anni 2000, dovuto in parte al miglioramento dell'efficienza. Se nell'immediato futuro la priorità dovrebbe essere di ridurre le emissioni e i consumi, aumentando la quota di rinnovabili, nel medio-lungo termine potrebbe giocare un ruolo importante lo sviluppo di nuove tecnologie rinnovabili e nucleari, tra cui la fusione (vd p. 24, ndr) e la fissione intrinsecamente sicura. In definitiva, per quanto la transizione energetica sia già cominciata, non sappiamo ancora esattamente dove ci porterà, anche se avrà certamente un impatto notevole sulla società e sull'economia. In effetti, sarebbe sbagliato considerare il problema energetico soltanto come un problema tecnologico: è anche, e forse soprattutto, un problema politico-culturale. Senza una capillare educazione all'uso responsabile dell'energia e senza una riscoperta del valore della sobrietà, le migliori tecnologie, probabilmente, non basteranno.

d. Nel Sistema Internazionale l'unità di misura dell'energia è il joule (J), ma a seconda dei contesti si usano spesso unità pratiche diverse: per misurare la quantità di calore si usa la caloria (cal, pari a 4,19 J), i consumi di energia elettrica si esprimono in wattora (Wh, pari a 3600 J), mentre per esprimere l'energia prodotta dai combustibili fossili si usa la tonnellata di petrolio equivalente (Toe, posta convenzionalmente uguale a 10 Gcal = 41,9 GJ); infine, l'energia delle particelle elementari si esprime in elettronvolt (eV, pari a  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J). Così l'energia potenziale di una mela di 100 g appesa a un metro di altezza (energia che si ritrova sotto forma di energia cinetica nel momento in cui la mela, cadendo, tocca il suolo) è di circa 1 J; la stessa mela, consumata come alimento, fornisce un contenuto energetico nutrizionale di circa 50 kcal = 209 kJ; un lampione da 1000 W consuma in un'ora 1000 Wh, pari a 3600 kJ; un pieno di 60 litri di benzina corrisponde a circa 0,05 Toe, pari a 2 GJ; i raggi cosmici più energetici che sono stati osservati hanno energie maggiori di  $10^{20}$  eV (10 milioni di volte l'energia dei protoni in Lhc), che corrispondono ad appena qualche decina di joule.

#### Biografia

**Paolo Gambino** è professore di fisica teorica all'Università di Torino. Si occupa principalmente di fisica delle particelle elementari (e in particolare del loro "flavour") ed è referente del gruppo Energia di UniToGo, il nuovo hub per la sostenibilità ambientale dell'Università di Torino.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.1