

GOVERNANCE

EDITING DEL GENOMA, COME ORIENTARE UN'EVOLOZIONE ETICA: SFIDE E RISCHI

La modificazione genetica umana è aperta a sviluppi seriamente rischiosi e a sfide etiche con conseguenze impreviste per l'evoluzione futura dell'umanità. Stiamo per abbandonare la selezione naturale o solo per debellare alcune gravi malattie genetiche? I dubbi ancora senza risposta

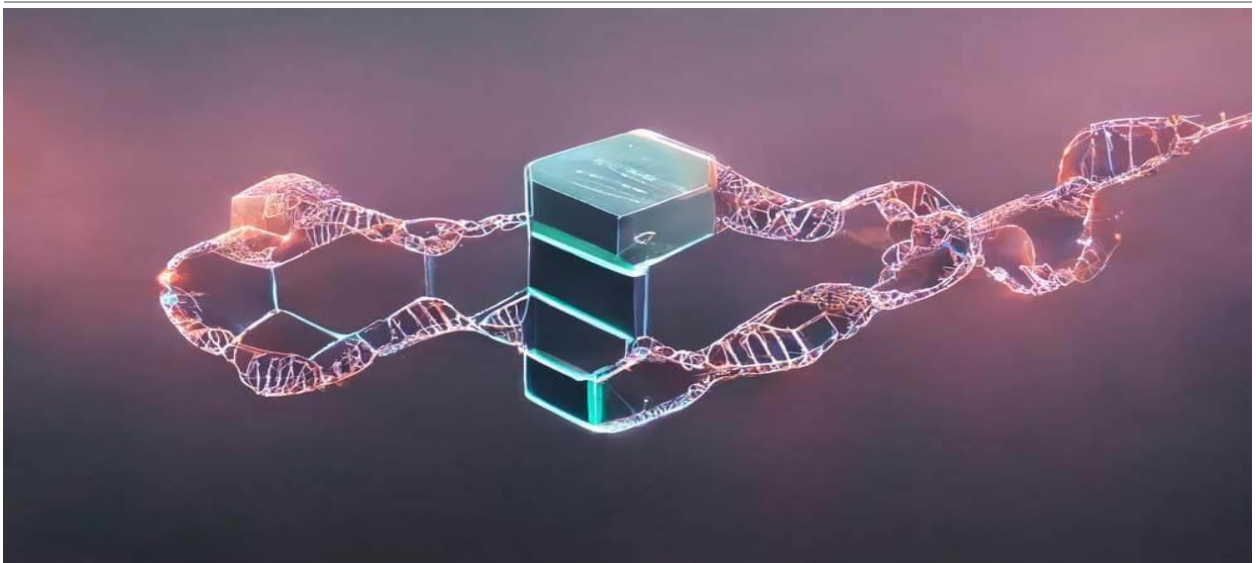
[Mirta Michilli](#)

Direttrice Generale della Fondazione Mondo Digitale

[Alfonso Molina](#)

Personal Chair in Technology Strategy all'Università di Edimburgo e

Direttore Scientifico della Fondazione Mondo Digitale



Presto la generazione e l'analisi di una **sequenza completa del genoma umano** saranno di routine in ogni laboratorio di ricerca. **La biotecnologia procede a velocità esponenziale, ma in quale direzione?**

Verso una medicina di precisione personalizzata per il beneficio di tutti o nella prospettiva di un'evoluzione volitiva, con la possibilità per gruppi privilegiati di scegliere cosa fare della propria ereditarietà?

La ricerca di una **governance appropriata** per l'evoluzione dell'editing del genoma umano è tra le sfide più impegnative e urgenti.

Indice degli argomenti

- Innovazione biotecnologica esponenziale
- Genoma, una sbalorditiva velocità di sviluppo
- Verso una medicina sempre più personalizzata
- Genomica: le previsioni al 2030

- L'editing genetico e il bambino ingegnerizzato
 - La modificazione genetica umana
- Il potenziamento umano
- Quale governance per l'editing del genoma
- Scenari di sviluppo
- Le questioni aperte
- Gli interrogativi del National Human Genome Institute
- Conclusioni
- Bibliografia

Innovazione biotecnologica esponenziale

Secondo il biologo Edward Wilson “Stiamo per abbandonare la selezione naturale, il processo che ci ha creato, per dirigere la nostra evoluzione attraverso la selezione volitiva, il processo di riprogettazione della nostra biologia e della natura umana come desideriamo” (Wilson, 2014). E la prospettiva di questa “evoluzione volitiva” – una specie che decide cosa fare della propria eredità – presenterà **le scelte intellettuali ed etiche più profonde** che l'umanità abbia mai affrontato (Wilson, 1998). Eppure, per il genetista dell'Università di Harvard George Church, continuiamo a sottovalutare gli esponenziali della biotecnologia che sono ancora più veloci degli elettroni e dei computer (citato in Molteni, 2021, p.17).

Genoma, una sbalorditiva velocità di sviluppo

In effetti, la velocità di sviluppo è sbalorditiva, se si considera che James Watson e Francis Crick hanno rivelato **la struttura a doppia elica del DNA nel 1953**. Poco dopo, gli anni '60 hanno visto una migliore comprensione dei geni e l'elucidazione del codice genetico, ossia le regole di base che governano il modo in cui le coppie di basi del DNA o i nucleotidi codificano le proteine. **Gli anni '70 e '80** hanno visto l'arrivo di nuovi metodi e strumenti per determinare la sequenza o l'ordine delle coppie di basi nel DNA. Questi progressi hanno posto le basi per il lancio del **Progetto Genoma Umano (HGP)** nel **1990**, con l'obiettivo di decifrare la sequenza di circa tre miliardi di coppie di basi contenute nel genoma rappresentativo o di riferimento. L'obiettivo è stato raggiunto nel **2003**, cinquant'anni dopo la scoperta della doppia elica del DNA. Da allora i tempi e i costi del sequenziamento hanno iniziato a diminuire in modo esponenziale, man mano che i progressi nei metodi e nelle tecnologie si facevano più rapidi. Un articolo del 2020 di Forbes ha riportato le parole di Eric Green, direttore del National Human Genome Research Institute (NHGRI): “Il primo genoma ci è costato circa un miliardo di dollari... Ora, quando sequenziamo il genoma di una persona, il costo è inferiore a 1.000 dollari, quindi si tratta di una riduzione di un milione di volte”. Il contenimento dei costi è andato di pari passo con la riduzione del tempo di sequenziamento, da quattro mesi circa (HGP) a cinque o sei giorni nel 2015, fino a un giorno nel 2020 (Ganguly, 2020 e NHGRI, 2015).

Verso una medicina sempre più personalizzata

Assistenza sanitaria, ricerca e pratica medica stanno beneficiando enormemente dei **progressi scientifici e tecnologici** della genomica. Gli strumenti digitali migliorano continuamente, consentendo esami più facili, economici e veloci del DNA di un individuo. Procediamo verso una medicina di precisione personalizzata, in grado di identificare la base genetica della malattia di una persona e di indurre un trattamento più accurato. **I laboratori molecolari per l'analisi e la diagnosi genetica** si stanno riducendo per dimensioni e costi, rendendo possibile un'ampia diffusione a livello di ospedali e cliniche. Un video del **Genomics Education Programme (GEP)**

di Health Education England mostra un impressionante laboratorio molecolare delle dimensioni di una scatola di scarpe, in grado di rilevare cambiamenti genetici in circa 15 minuti. Sono già disponibili applicazioni per smartphone, che svolgeranno ruoli sempre più importanti nella pratica dei laboratori molecolari.

Genomica: le previsioni al 2030

Guardando al 2030, il National Human Genome Research Institute prevede un'integrazione diffusa della genomica in quasi tutti i settori della ricerca biomedica (Green et al. 2020, p. 683). Tra le previsioni ci sono le seguenti (ibid. p. 690):

- la generazione e l'analisi di una sequenza completa del genoma umano sarà di routine per qualsiasi laboratorio di ricerca;
- la funzione biologica di ogni gene umano sarà nota;
- l'uso regolare delle informazioni genomiche sarà passato da boutique a mainstream in tutti i contesti clinici, rendendo i test genomici di routine come l'emocromo completo;
- la sequenza completa del genoma di un individuo, insieme alle annotazioni informative, sarà, se lo si desidera, accessibile in modo sicuro e immediato sul suo smartphone;
- le scoperte rivoluzionarie porteranno a terapie curative con modifiche genomiche per decine di malattie genetiche.

L'area della modificazione genetica forse è quella che nasconde lo sviluppo e le questioni etiche più impegnative e controverse per il futuro dell'umanità, come prevedeva Edward Wilson, perché l'evoluzione volitiva cambia radicalmente l'evoluzione umana come l'abbiamo conosciuta finora (Wilson, 1998, p. 305).

La capacità di intervenire e modificare il genoma umano a livello dei suoi blocchi di base o "lettere" (Adenina, Timina, Citosina, Guanina) ha ricevuto un forte impulso con la scoperta di [CRISPR-Cas9](#), una forbice genetica trovata in un batterio che consente una precisa modifica o editing genetico (cioè la rimozione e l'aggiunta di segmenti di una sequenza di DNA), con maggiore facilità e costi inferiori rispetto ai metodi precedenti. Gli scienziati Emmanuel Charpentier (Francia) e Jennifer Doudna (Usa) hanno pubblicato il documento fondamentale su CRISPR-Cas9 nel 2012 e hanno ricevuto il Premio Nobel 2020 per la Chimica per questa scoperta. In sostanza CRISPR-Cas9 è una tecnologia "copiata" dalla natura, dal sistema di difesa dei batteri contro i virus. CRISPR-Cas9 è ampiamente riconosciuto come un salto di qualità nel facilitare l'editing genetico di precisione, poiché le precedenti tecnologie erano difficili e costose. Il continuo miglioramento dei metodi di modificazione genetica è andato di pari passo, in una sorta di circolo virtuoso, con la crescita di un intero ecosistema di ricercatori, pubblicazioni, aziende, strumenti e un numero sempre crescente di applicazioni al trattamento di molte malattie (Molteni, 2022).

L'editing genetico e il bambino ingegnerizzato

La ricerca e la sperimentazione sull'uomo hanno seguito un percorso attento sotto la bandiera della medicina, affrontando un'ampia gamma di malattie genetiche, da quelle metaboliche a quelle neurodegenerative e virali (Li et al. 2020). Questo include specifiche malattie ereditarie umane come la leucemia, la falcemia, l'emofilia, la β -talassemia, la fibrosi cistica, l'Alzheimer, la Corea di Huntington, il Parkinson, la tirosinemia, la distrofia muscolare di Duchenne, Tay-Sachs e la sindrome dell'X fragile (Mani, 2021). Attualmente, sono in corso più di una dozzina di sperimentazioni sull'uomo di CRISPR-Cas 9 (Molteni, op. cit.). Chiaramente, **la**

potenziale eliminazione di queste terribili malattie non comporta alcuna opposizione o preoccupazione etica, soprattutto se i trattamenti saranno inclusivi, cioè alla portata di tutti.

La modificazione genetica umana

La modificazione genetica umana, tuttavia, è aperta a sviluppi seriamente rischiosi e a sfide etiche con conseguenze potenzialmente imprevedute per l'evoluzione futura dell'umanità. Un'area è la cosiddetta "ingegneria della linea germinale", che comporta la modifica genetica delle cellule germinali (gameti), cioè gli ovuli o gli spermatozoi che si combinano per creare lo zigote unicellulare e i primi embrioni. Le modifiche del DNA in queste cellule e nell'embrione diventano ereditarie, poiché si trasmettono almeno alle generazioni successive. Al contrario, **le modifiche genetiche nelle cellule somatiche non sono ereditarie**. La ricerca clinica e l'applicazione dell'editing genetico sulle cellule somatiche non è problematica, poiché riguarda solo il paziente, ed è simile all'uso della terapia genica per la prevenzione e il trattamento delle malattie. Invece, l'editing genetico delle cellule germinali umane influisce sul genoma del paziente, di suo figlio e potenzialmente dei discendenti più avanti nella linea.

Se l'obiettivo è l'eliminazione di terribili malattie genetiche, senza dubbio gli interventi germinali sono una benedizione per l'umanità e costituiscono un'espressione positiva dell'evoluzione volitiva a beneficio dell'umanità. L'ingegneria germinale, però, potrebbe anche aprire la strada a nuovi scenari, come il bambino "designer" o "ingegnerizzato" (Hercher, 2018; Regalado, 2015). Si entra nel campo del "potenziamento umano" che va ben oltre il trattamento delle malattie genetiche. I problemi etici e normativi che derivano da questi sviluppi della scienza e della tecnologia genomica sono semplicemente impressionanti, e sono questioni aperte che la società deve inevitabilmente affrontare.

In un prossimo futuro, ad esempio, nasceranno **bambini geneticamente modificati secondo le tendenze del mercato?** Manipolazioni genetiche potranno aumentare prestazioni e capacità umane per rendere alcune categorie più competitive? Stiamo per porre fine all'evoluzione della specie umana, così come l'abbiamo conosciuta finora? Queste domande sollevano importanti problemi etici e sociali e, per il momento, non hanno risposte immediate, data la complessa e contraddittoria rete di potere e interessi che governa le attività e le relazioni umane in tutto il pianeta.

Nel primo decennio del 2000 solo una piccola minoranza di persone, per lo più scienziati, esprimeva preoccupazione per le questioni etiche, dato che la maggior parte del lavoro si è concentrata sulla possibilità di eliminare le terribili malattie genetiche. Tuttavia, aprire la strada al potenziamento non medico rappresenterebbe **una rottura faticosa nell'evoluzione umana**, nel bene e nel male (Maron, 2015). Una serie di sviluppi emblematici di [CRISPR](#) provenienti dalla Cina ha suonato un campanello d'allarme e ha scosso la comunità scientifica internazionale della genomica, spingendola a occuparsi con maggiore urgenza dell'editing del DNA umano.

Nel 2015 gli scienziati della Sichuan University di Chengdu sono stati i primi a testare le cellule modificate con CRISPR in un essere umano, iniettando le cellule in un paziente con cancro al polmone avanzato (Cyranoski, 2016). Il processo era in corso anche negli Stati Uniti, ma i cinesi sono stati i primi. Poi nel 2018 il genetista cinese He Jiankui ha superato la barriera etico-scientifica della linea germinale e ha usato la tecnica CRISPR per modificare il genoma di embrioni umani precoci raccolti da diverse coppie con padri sieropositivi.

Gli embrioni sono stati trasferiti nelle donne nella speranza che le gravidanze avessero successo. Ma già nel 2015 la Dichiarazione del Vertice Internazionale sull'Editing del Genoma Umano era stata inequivocabile nell'affermare che la procedura era irresponsabile e non conforme alle norme internazionali. In seguito alla condanna di He Jiankui, le autorità cinesi hanno istituito nuove politiche che coprono l'intero processo di ricerca e applicazione e, in un libro separato del Codice civile, hanno inserito le tutele per i diritti della personalità, una pietra miliare nella storia cinese della protezione dei diritti umani" (Song e Joly, 2021, p.190).

Il potenziamento umano

Al momento la comunità scientifica rimane cauta: sostiene le applicazioni cliniche nei casi di malattie gravi senza altre opzioni di cura e un rafforzamento della sicurezza della ricerca tramite raccomandazioni e regolamenti politici governativi, soprattutto quando non è garantita la prevenzione di un uso improprio (Regalado, 2017). La politica legislativa e normativa internazionale è confusa e il consenso esistente de facto è verso il divieto dell'editing del genoma umano ereditabile (Feeney et al., 2021). Tuttavia, con il progredire della scienza e della tecnologia, è probabile che la proibizione totale finisca per lasciare il posto a un approccio più morbido. **La cura di atroci malattie genetiche fornisce sicuramente una forte motivazione, a meno che non si trovino altre soluzioni meno controverse.** Le questioni scientifiche e tecnologiche essenziali sono la profondità della comprensione scientifica delle intricate relazioni tra i tre miliardi di coppie di basi del genoma umano e l'esatta precisione della tecnologia di editing del DNA. Secondo Henry Greely, direttore del Center for Law and the Biosciences dell'Università di Stanford, "Se il processo di editing del DNA degli embrioni si dimostrerà alla fine sicuro ed efficace, potrebbe essere adottato, soprattutto perché continuiamo a migliorare la nostra comprensione della genetica. Man mano che impariamo di più sugli effetti delle variazioni genetiche, le tecnologie di editing genetico avranno sempre più da offrire. La maggior parte di noi non vede l'ora che questo accada quando si tratta di malattie, mentre **la prospettiva (lontana) di un "miglioramento" di tratti come l'altezza o l'intelligenza provoca sentimenti molto contrastanti**" (Greely, 2021). Vedremo che i "sentimenti contrastanti" del "potenziamento" umano sono ben giustificati, dato il potenziale di enormi disuguaglianze, come applicazioni militari o di potere, che avrebbero un impatto sconvolgente sullo sviluppo umano.

Questa esperienza ci mostra come **la nostra contraddittoria natura umana**, forse la volontà di potenza di cui parla il filosofo Nietzsche, rende reale il rischio del grande potere della scienza e della tecnologia nelle mani degli esseri umani. Vale quindi la pena ricordare una frase di Andrew Grove, ex ceo di Intel, che nel suo libro "Solo i paranoici sopravvivono" scrive: "Nella tecnologia, tutto ciò che può essere fatto sarà fatto".

Quale governance per l'editing del genoma

La ricerca di **una governance appropriata per l'evoluzione dell'editing del genoma umano** è una sfida impegnativa, soprattutto se l'obiettivo è raggiungere il consenso globale, tenendo conto dei diversi interessi in campo. Il Primo Summit Internazionale sull'Editing del Genoma Umano (2015) ha identificato i governi, l'industria privata, le istituzioni di ricerca e di formazione, le organizzazioni di difesa e le società professionali tra le parti interessate alla governance dell'editing genetico; e le questioni includono i diritti di proprietà intellettuale, le leggi commerciali, i quadri normativi, gli atteggiamenti culturali e gli investimenti pubblici nella ricerca. E c'è molto di più, se consideriamo l'evoluzione della scienza e della tecnologia, e accettiamo che la società nel suo complesso debba almeno essere consapevole di uno sviluppo così decisivo per il futuro.

Molte organizzazioni scientifiche e politiche nazionali e internazionali hanno prodotto dichiarazioni, relazioni e raccomandazioni. Le questioni variano dallo stato della scienza e della tecnologia dell'editing genetico all'importanza di un accordo globale e del coinvolgimento della società nel suo complesso. La scienza e la tecnologia richiedono la necessità di conoscenze comprovate e testate per garantire la sicurezza ed evitare conseguenze potenzialmente rischiose. Oltre alla sicurezza, ci sono gli spinosi aspetti etici, i processi normativi e politici in molti Paesi, le complessità della cooperazione globale e così via.

Scenari di sviluppo

La scienza e la tecnologia dell'editing genetico stanno progredendo rapidamente, ma sono ancora agli inizi. Ci sono tre punti chiave da considerare per comprendere lo sviluppo e le applicazioni dell'editing genetico:

- il tipo di attività svolta (ricerca di base, preclinica o clinica),
- il tipo di cellula/embrione coinvolto (cellula somatica o germinale, embrione vitale o non vitale)
- il tipo di malattia (monogenica o poligenica).

Le malattie monogeniche, causate da mutazioni in un singolo gene, sono rare ma numerose. Le malattie poligeniche, influenzate da molte varianti genetiche e fattori ambientali, sono più comuni ma più difficili da identificare e trattare. Attualmente è possibile prevenire la trasmissione di malattie monogeniche, ma le malattie poligeniche richiedono ulteriori progressi scientifici.

La ricerca e l'attività preclinica sono generalmente accettate, soprattutto se coinvolgono cellule somatiche che non vengono ereditate. L'editing genetico somatico viene già testato su pazienti. Tuttavia, la ricerca sulle cellule germinali o sugli embrioni è più controversa, anche se accettabile se si usano embrioni non vitali. Non dovrebbero essere usati embrioni umani vitali o cellule germinali per la gravidanza.

L'uso clinico dell'editing genetico germinale ereditabile è la sfida più grande a causa dei rischi legati all'editing impreciso e all'editing incompleto delle cellule embrionali. Attualmente, la maggior parte degli scienziati ritiene che non dovrebbe essere perseguito per scopi riproduttivi clinici, ma potrebbe diventare fattibile in futuro con ulteriori progressi scientifici e tecnologici, insieme a un ampio consenso sociale. Altre tecnologie esistenti, come la diagnosi genetica preimpianto (PGD) e la fecondazione in vitro (FIV), devono avere un'applicazione prioritaria.

È necessario definire **standard accettati e normative a livello nazionale e internazionale** per guidare la ricerca e la pratica clinica nell'editing del genoma umano. È importante garantire la sicurezza, la trasparenza e il coinvolgimento pubblico. Le proposte normative variano a seconda del tipo di attività di editing genetico, ma in generale si richiede una rigorosa supervisione e una partecipazione pubblica preliminare.

I meccanismi normativi proposti includono registri sull'editing genetico umano, meccanismi di segnalazione di attività illegali o non etiche, licenze etiche di brevetto e collaborazione internazionale. Tuttavia, la piena adozione di questi meccanismi è problematica a causa della loro natura volontaria e burocratica. È necessaria un'adeguata infrastruttura normativa nei Paesi coinvolti.

La **comunità scientifica internazionale svolge un ruolo importante nell'influenzare le pratiche**, le politiche e i meccanismi normativi nell'editing del genoma umano. L'accesso alle informazioni e la consapevolezza sono promossi attraverso forum, panel e gruppi internazionali.

Ma quali sono le aspettative temporali per un cambiamento che renda scientificamente e tecnologicamente sicuro e affidabile l'editing della linea germinale umana? La vincitrice del Premio Nobel, Jennifer Doudna, è ottimista: "Personalmente, ritengo che sia davvero **fondamentale discuterne in questo momento**, perché il cambiamento sta arrivando velocemente e dobbiamo essere pronti. Sento che possiamo vedere dove si sta dirigendo, e certamente entro cinque o dieci anni, credo, questo sarà assolutamente possibile, manipolare gli embrioni o le cellule germinali, e in modi precisi" (Mecklin, 2022).

La precisione della tecnologia di editing genetico è un fattore chiave, ma non l'unico; per questo motivo, la comunità scientifica sostiene la necessità di trasparenza e di standard accettati nel percorso delle procedure applicate nella ricerca sull'editing del genoma umano e nella sua traduzione in pratica terapeutica.

Le questioni aperte

In definitiva, **la sfida della modifica del genoma umano coinvolge la specie umana nel suo complesso**, perché in misura importante il genoma è l'umanità, indipendentemente dalle differenze nazionali e culturali, e consapevole dei molteplici aspetti da affrontare: scientifici, tecnologici, etici, legali, normativi, commerciali, educativi, democratici ecc. Ciò implica che **il processo decisionale sul futuro della modificazione genetica non dovrebbe essere esclusivamente nelle mani di segmenti ristretti di società** che possiedono il potere della conoscenza, della finanza, della politica o dell'esercito.

Possono tutti i gruppi, forum, panel ecc. attualmente esistenti dare il via a un processo che potrebbe produrre risultati che riflettono il più ampio accordo, compreso il modo di raggiungere la più ampia partecipazione sociale? È possibile su scala nazionale? E potrà mai accadere su scala globale?

L'importanza di un tale sforzo internazionale incentrato sulla modifica del genoma umano non può essere sottovalutata, nonostante le scoraggianti difficoltà e, forse, le illusioni. È necessario un ulteriore sguardo alle potenziali conseguenze per l'umanità del rapido progresso e della penetrazione sociale della genomica.

Gli interrogativi del National Human Genome Institute

Il **National Human Genome Institute** (NHGRI), ad esempio, pone alcune domande sconcertanti:

- **È lecito utilizzare la terapia genetica su un embrione** quando è impossibile ottenere il permesso dell'embrione per il trattamento? È sufficiente ottenere il permesso dei genitori?
- **Cosa succede se le terapie genetiche sono troppo costose** e solo le persone ricche possono accedervi e permetterselo? Ciò potrebbe peggiorare le disuguaglianze di salute esistenti tra ricchi e poveri.
- **Alcune persone useranno l'editing del genoma per tratti non importanti per la salute**, come la capacità atletica o l'altezza? È accettabile?

Conclusioni

Siamo in grado di rispondere? Possiamo partire da qui per allargare il dibattito alla società civile, comprese le comunità educanti e la scuola. Sono interrogativi complessi che richiedono una riflessione approfondita e una discussione pubblica inclusiva, il più possibile ampia e aperta, per il futuro dell'umanità.

Bibliografia

- Begley, S. (2019). Creating Pig3.0, the World's Most CRISPR'd Animal, Raises Hopes of Transplantable Organs. STAT+, Dicembre 20.
- Bell, C. (2010). Neurons for Peace: Take a Pledge Brain Scientists. New Scientist, Febbraio 3.
- Bell, C. (2014). Why Neuroscientists Should Take a Pledge. A Collective Approach to the Misuse of Neuroscience. in Neurotechnology in National Security and Defense. Practical Considerations, in Neuroethical Concerns (pp 227–38). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Callaway, E. (2015). Mammoth Genomes Hold Recipe for Arctic Elephants. Nature 521:18–19.
- Callaway, E. (2016). 'Gene Drive' Moratorium Shot down at UN Biodiversity Meeting. Nature, December 21.
- Cyranoski, D. (2016). CRISPR Gene Editing Tested in a Person. Nature 539 (7630):479.
- Cyranoski, D. e Reardon S. (2015). Chinese Scientists Genetically Modify Human Embryos. Nature, April 22.
- Feeney, O. et al. (2021). Ethics, Patents and Genome Editing: A Critical Assessment of Three Options of Technology Governance." Frontiers in Political Science 3(September):1–10.
- Ledford, H. (2016). Riding the CRISPR Wave. Nature 531:156–59.
- Ganguly, P. (2020). The-Human-Genome-Project-Turns-the-Big-3-0 @ Wwww.Genome.Gov. National Human Genome Research Institute (NHGRI), September 30.
- Greely, H. (2021). Opinion: How Biomedicine Could Transform Human Reproduction. The Scientist, August 1.
- Greely, H. T. (2019). "CRISPR'd Babies: Human Germline Genome Editing in the 'He Jiankui Affair'. Journal of Law and the Biosciences, 6(1), 111–183.
- Green, E. D. et al. (2020). Strategic Vision for Improving Human Health at The Forefront of Genomics. Nature 586(7831):683–92.
- Greene, M., Zubin M. (2018). Ethical Issues of Using CRISPR Technologies for Research on Military Enhancement. Bioethical Enquiry 15:327–35.
- Hercher, L. (2018). Designer Babies Aren't Futuristic. They Are Already Here. MIT Technology Review, October 28
- Hall, S. (2016). Editing the Mushroom. Scientific American 314(3):56–63.
- Li, H. et al. (2020). Applications of Genome Editing Technology in the Targeted Therapy of Human Diseases: Mechanisms, Advances and Prospects. Signal Transduction and Targeted Therapy 5(1).
- Liang, P. et al. (2015). CRISPR/Cas9-Mediated Gene Editing in Human Trippronuclear Zygotes. Protein and Cell 6(5):363–72.
- Mani, I. (2021). CRISPR-Cas9 for Treating Hereditary Diseases. In V. Singh (Ed.), Progress in Molecular Biology and Translational Science (Vol. 181, pp. 165–183).
- Maron, D. (2015). "'Improving' Humans with Customized Genes Sparks Debate among Scientistsan.Com." Scientific American, December 3.

- Mecklin, J. (2022). Interview: Nobel Chemistry Laureate Jennifer Doudna on the Promise and Peril of the Genetic Editing Revolution. Bulletin of Atomic Scientists, December 27.
- Molteni, M. (2021). "Growing a Chair" Is Easy and Other Words of Wisdom from the Audacious George Church. In STAT+ (Ed.), Charting a Course for Medicine's Future (pp. 17–20).
- Molteni, M. (2022). "Drugs Based on Next-Generation Gene Editing Are Moving toward the Clinic Faster than CRISPR 1.0." STAT+, February 10, 2–5.
- Mullin, E. (2017). CRISPR 2.0 Is Here, and It's Way More Precise. MIT Technology Review, October 25.
- NHGRI (2015). Advancing Human Health through Genomics Research.
- NHGRI. n.d. What Are the Ethical Concerns of Genome Editing? Retrieved from <https://www.genome.gov/about-genomics/policy-issues/Genome-Editing/ethical-concerns>.
- NHGRI. n.d. "What Is Genome Editing?" Retrieved (<https://www.genome.gov/about-genomics/policy-issues/what-is-Genome-Editing>).
- Regalado, A. (2015). Engineering the Perfect Baby. MIT Technology Review 118(3):26–33.
- Regalado, A. (2016). Can CRISPR Save Be Dupree? MIT Technology Review 119(6):80–87.
- Regalado, A. (2017). U.S. Panel Endorses Designer Babies to Avoid Serious Disease. MIT Technology Review, February 14.
- Regalado, A. (2019a). China's CRISPR Babies Could Face Earlier Death. MIT Technology Review, June 3.
- Regalado, A. (2019b). China's CRISPR Twins Might Have Had Their Brains Inadvertently Enhanced. MIT Technology Review, February 21.
- Regalado, A. (2020). Elon Musk's Neuralink Is Neuroscience Theater. Technology Review, August 30.
- Roach, J. (2018). Researchers Use AI to Improve Accuracy of Gene Editing with CRISPR. Microsoft / The AI Blog, January 10.
- Song, L., & Joly, Y. (2021). After He Jianku: China's Biotechnology Regulation Reforms. Medical Law International, 21(2), 174–191.
- Stein, R. (2015). Critics Las Out at Chinese Scientists Who Edited DNA in Human Embryos. NPR, April 23.
- Wilson, E. (1998). Consilience. The Unity of Knowledge. London: Little, Brown and Company.
- Wilson, E. (2014), The Meaning of Human Existence
- Wolfe, A. (2016). Jennifer Doudna: The Promise and Peril of Gene Editing. March 11.