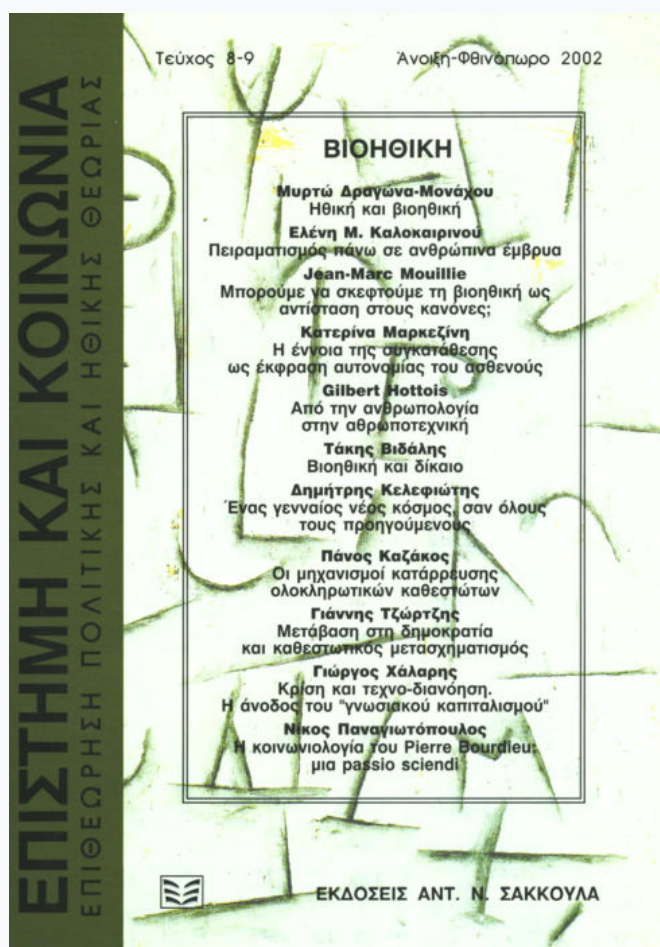


## Επιστήμη και Κοινωνία: Επιθεώρηση Πολιτικής και Ηθικής Θεωρίας

Τόμ. 8 (2002)

Τόμ. 8-9 (2002): Βιοηθική



Ένας γενναίος νέος κόσμος, σαν όλους τους προηγούμενους

Δημήτρης Κελεφιώτης

doi: [10.12681/sas.721](https://doi.org/10.12681/sas.721)

Copyright © 2015, Δημήτρης Κελεφιώτης



Άδεια χρήσης [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

### Βιβλιογραφική αναφορά:

Κελεφιώτης Δ. (2015). Ένας γενναίος νέος κόσμος, σαν όλους τους προηγούμενους. *Επιστήμη και Κοινωνία: Επιθεώρηση Πολιτικής και Ηθικής Θεωρίας*, 8, 119–146. <https://doi.org/10.12681/sas.721>

## Ένας γενναίος νέος κόσμος, σαν όλους τους προηγούμενους

---

Δημήτρης Κελεφιώτης\*

Στη μελέτη αυτή παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των προσφάτων εξελίξεων της βιολογίας: ανάγνωση του ανθρώπινου γονιδιώματος, ευρεία καλλιέργεια γενετικά τροποποιημένων οργανισμών και δυνατότητα κλωνοποίησης ανθρώπων. Το Πρόγραμμα της Ανάγνωσης του Ανθρώπινου Γονιδιώματος, είναι μια καλά οργανωμένη διεθνής προσπάθεια βασικής έρευνας που ανοίγει νέες προσεγγίσεις στην κατανόηση του φαινομένου της ζωής και ορίζει ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών. Ο δημόσιος χαρακτήρας του προγράμματος αυτού επέβαλε μια προσχεδιασμένη προσέγγιση των θεμάτων που αφορούν τα ηθικά, νομικά και κοινωνικά θέματα που σχετίζονται με τη γνώση που παράγεται. Το Πρόγραμμα της Ανάγνωσης του Ανθρώπινου Γονιδιώματος, η δημιουργία γενετικά τροποποιημένων οργανισμών και η κλωνοποίηση με όλα τους τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τους προβληματισμούς που τα συνοδεύουν, αποτελούν σύγχρονα παραδείγματα εφαρμογών των προόδων στην κατανόηση του φαινομένου της ζωής. Η κατανόηση των φυσικών φαινομένων και η επέμβαση του ανθρώπου με στόχο την προσαρμογή του περιβάλλοντος στις ιδιαίτερες ανάγκες του, διατρέχει την ιστορία της ανθρώπινης εξέλιξης και της δημιουργίας των πολιτισμών. Η πορεία του ανθρώπινου είδους με τη δημιουργία νέων τεχνολογιών που ανατρέπουν τον παλιούς κόσμους χαρακτηρίζεται και από μια γενναιότητα που προκαλεί την άγνοια και διακινδυνεύει διεκδικώντας το μέλλον.

---

\* Διδάκτωρ Βιολογίας, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

## Εισαγωγή

Ο επικός χαρακτήρας της επιστημονικής προόδου των τελευταίων δεκαετιών φαίνεται να ξεπερνά ακόμη και τις πιο τολμηρές υποθέσεις των συγγραφέων επιστημονικής φαντασίας των αρχών του εικοστού αιώνα. Από το σύνολο των μικρών και μεγάλων ανακαλύψεων στον χώρο της βιολογίας τρεις ξεχωρίζουν για διαφορετικό λόγο η κάθε μια. Η ανάγνωση του γενετικού υλικού που είναι ο συλλαβισμός των γραμμάτων του πλήρους σχεδίου ενός οργανισμού και στην περίπτωση μας του ανθρώπου, η δημιουργία γενετικά τροποποιημένων οργανισμών με τις τεράστιες εφαρμογές στην παραγωγή τροφίμων και η κλωνοποίηση σαν απειλή για την ατομικότητα και στη συνέχεια την ίδια την ύπαρξη του ανθρώπου.

## Ανάγνωση του γενετικού υλικού

Τα κύτταρα αποτελούν τις θεμελιώδεις λειτουργικές μονάδες κάθε ζωτανού οργανισμού. Όλες οι οδηγίες που απαιτούνται για τη ρύθμιση των κυτταρικών δραστηριοτήτων εμπεριέχονται σε μια χημική ουσία το DNA (Δεσοξυριβοζονουκλεϊκό οξύ). Το DNA είναι μια μακριά αλυσίδα που σχηματίζεται με την εν σειρά σύνδεση τεσσάρων βάσεων ή νουκλεοτιδίων που συμβολίζονται με τα γράμματα A, T, C και G (π.χ. GCTATATTGCACA). Το DNA είναι ένα δίκλωνο μόριο και οι βάσεις στη μία αλυσίδα του DNA ζευγαρώνουν με ακρίβεια με εκείνες στην άλλη αλυσίδα, έτσι ώστε απέναντι από κάθε A να υπάρχει ένα T και απέναντι από κάθε G ένα C. Η διάταξη ή καλύτερα η αλληλουχία των βάσεων καθορίζει με ακρίβεια τη δημιουργία και τα μοναδικά χαρακτηριστικά κάθε συγκεκριμένου οργανισμού. Το γονιδίωμα, δηλαδή το σύνολο των μορίων DNA ενός οργανισμού μπορεί να αποτελείται από περίπου 600.000 ζεύγη βάσεων, όπως στη περίπτωση των βακτηρίων που είναι οι μικρότεροι γνωστοί ανεξάρτητοι οργανισμοί. Αντίστοιχα το γονιδίωμα του ανθρώπου και του ποντικού έχουν περίπου τρία δισεκατομμύρια ζεύγη βάσεων. Όλα μάλιστα τα κύτταρα με εξαίρεση τα ώριμα ερυθροκύτταρα περιέχουν ένα πλήρες αντίγραφο του γονιδιώματος.

Το μεγαλύτερο μέρος του DNA του ανθρώπινου γονιδιώματος εμπεριέχεται σε 24 διακριτά χρωμοσώματα που κάθε ένα αποτελεί ένα διαφορετικό μόριο DNA το μήκος του οποίου κυμαίνεται ανάμεσα στα πενήντα και τα διακόσια πενήντα εκατομμύρια ζεύγη βάσεων. Αν και η εξέταση στο μικροσκόπιο μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για κάποιες χρωμοσωμικές ιδιαι-

τερότητες, οι διαφοροποιήσεις του DNA απαιτούν λεπτομερέστερη ανάλυση, πολλές φορές μέχρι το επίπεδο της αλληλουχίας των βάσεων. Κάθε χρωμόσωμα περιέχει πολλά γονίδια που αποτελούν τις φυσικές και λειτουργικές μονάδες της κληρονομικότητας. Τα γονίδια είναι συγκεκριμένες αλληλουχίες βάσεων που κωδικοποιούν την πληροφορία για τη δημιουργία πρωτεϊνών. Οι πρωτεΐνες αποτελούν τα πραγματικά δομικά και λειτουργικά εργαλεία του κυττάρου, συμμετέχοντας σε διάφορες δομές και ελέγχοντας τις περισσότερες κυτταρικές λειτουργίες. Σε αντίθεση μάλιστα με το σχετικά απaráλλαχτο γονιδίωμα η δυναμική των αλλαγών της ποιότητας και της ποσότητας των πρωτεϊνών επιτρέπει την προσαρμογή του κυττάρου σε συνεχώς μεταβαλλόμενες εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες. Η δομή και η λειτουργία μιας πρωτεΐνης καθορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αλληλουχία του γονιδίου που την κωδικοποιεί. Η διερεύνηση της δομής και της λειτουργίας των πρωτεϊνών αναμένεται να αποτελέσει το κέντρο των ερευνών των επόμενων δεκαετιών που θα οδηγήσουν στην αποσαφήνιση της μοριακής βάσης που καθορίζει τη διαφορά ανάμεσα στην υγεία και την ασθένεια.

Η πορεία για τη χαρτογράφηση του ανθρώπινου γονιδιώματος μπορεί να περιγραφεί σε τέσσερα στάδια που ανταποκρίνονται χονδρικά στα τέσσερα τέταρτα του εικοστού αιώνα. Ξεκινάει με την εκ νέου ανακάλυψη, στις αρχές του εικοστού αιώνα, των νόμων του Mendel για τη κληρονομικότητα των χαρακτηριστικών των μπιζελιών. Στο πρώτο τέταρτο του εικοστού αιώνα οριστικοποιείται η αποδοχή της κυτταρικής βάσης της κληρονομικότητας και του ρόλου των χρωμοσωμάτων. Κατά το δεύτερο τέταρτο προσδιορίζεται η μοριακή βάση της κληρονομικότητας: Η διπλή έλικα του DNA (Watson and Crick 1953), βραβείο Nobel 1962. Κατά το τρίτο τέταρτο αποκρυστογραφείται ο ενιαίος γενετικός κώδικας με τον οποίο οι ζωντανοί οργανισμοί αξιοποιούν τη γενετική πληροφορία που περιέχουν τα γονίδια. Το τελευταίο τέταρτο του εικοστού αιώνα διατρέχεται από την προσπάθεια της ανάγνωσης πρώτα γονιδίων και μετά ολόκληρων γονιδιωμάτων. Με το τέλος του εικοστού αιώνα είναι γνωστές οι αλληλουχίες των γονιδιωμάτων 599 ιών, 205 πλασμιδίων, 185 οργανιδίων, 31 βακτηρίων, 7 πρωτοζώων, ενός μύκητα δύο ζώων και ενός φυτού.

Ίσως ο επιεικέστερος χαρακτηρισμός που μπορεί να αποδοθεί στο Πρόγραμμα για την Ανάγνωση του Ανθρώπινου Γονιδιώματος είναι ότι είναι φιλόδοξο. Ο τελικός στόχος του Προγράμματος για την Ανάγνωση του Ανθρώπινου Γονιδιώματος είναι η δημιουργία μιας υψηλής ποιότητας αλληλουχίας αναφοράς για όλο το ανθρώπινο γονιδίωμα και ο προσδιορισμός όλων



των ανθρώπινων γονιδίων (The United States Human Genome Project 1991). Στους στόχους του προγράμματος περιλαμβάνονται η βελτίωση των εργαλείων για την ανάλυση των δεδομένων, η μεταφορά της σχετικής τεχνολογίας στον ιδιωτικό τομέα και η διαχείριση των ηθικών, νομικών και κοινωνικών θεμάτων που ενδέχεται να προκύψουν από το πρόγραμμα.

Ήδη τον Φεβρουάριο του 2001 τόσο η διεθνής κοινοπραξία του Προγράμματος για την Ανάγνωση του Ανθρώπινου Γονιδιώματος όσο και η Celera Genomics, μια επιχείρηση που αυτοπροσδιορίζεται πως 'διαβάζει αλληλουχίες γονιδιωμάτων για να δημιουργήσει και να εμπορευματοποιήσει (commercialize) γενομική πληροφορία με στόχο την επιτάχυνση της κατανόησης των βιολογικών διαδικασιών' (Celera Genomics 2002) δημοσίευσαν τόσο τα αρχικά δεδομένα όσο και την πρώτη απόπειρα επεξεργασία τους (International Human Genome Sequencing Consortium 2001, Craig et.al. 2001). Τα δεδομένα αυτά όπως και οι κυριότερες σχετικές επιστημονικές δημοσιεύσεις στα περιοδικά Nature και Science διατίθενται ελεύθερα χωρίς χρέωση στο διαδίκτυο (βλέπε: [www.ornl.gov/hgmis/project/journals/journals.html](http://www.ornl.gov/hgmis/project/journals/journals.html)).

Μολονότι δεν αποτελεί τη λύση σε όλα τα προβλήματα της Βιολογίας η αλληλουχία του ανθρώπινου γονιδιώματος αποτελεί μια θαυμαστή και πρωτοφανή πηγή για την έρευνα για τις επόμενες δεκαετίες. Από τις πρώτες παρατηρήσεις προκύπτει πως είμαστε κάτι πολύ περισσότερο από το απλό άθροισμα των περίπου 35.000 γονιδίων μας. Ο αριθμός αυτός που αποτελεί το ένα τρίτο των αρχικών προβλέψεων, είναι μόλις διπλάσιος εκείνου των σκουληκιών και σχεδόν ταυτόσημος με του ποντικού. Η απομυθοποίηση αυτή της ανθρώπινης ιδιαιτερότητας αύξησε το σχετικό ενδιαφέρον και έφερε στο προσκήνιο μια σειρά μηχανισμούς που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την ανθρώπινη πολυπλοκότητα. Μεταξύ των μηχανισμών αυτών περιλαμβάνονται: διαφορετικοί χειρισμοί κατά τη διαδικασία της μεταγραφής των γονιδίων σε πρωτείνες, ποικιλόμορφες τροποποιήσεις των πρωτεϊνών μετά την ολοκλήρωση της σύνθεσης τους και βέβαια το θαυμαστό σύμπλεγμα ρυθμιστικών μηχανισμών που ελέγχουν αυτές τις διαδικασίες. Η αλληλουχία εργασίας που έχουμε στη διάθεσή μας περιλαμβάνει πάνω από το 90% του ανθρώπινου γονιδιώματος που υπάρχει στα χρωμοσώματα και περιέχει τα περισσότερα από τα γονίδια. Το 30% της αλληλουχίας εργασίας είναι ήδη στην τελική υψηλής ποιότητας μορφή της, αφού η ανάγνωση έχει επαναληφθεί επτά έως δέκα φορές, η ακρίβεια φθάνει το 99,99% και τα κενά είναι ελάχιστα. Η πλήρης έκδοση υψηλής ποιότητας αναμένεται το 2003, ακριβώς

50 χρόνια μετά τη δημοσίευση της δομής του DNA (Watson and Crick 1953) που άνοιξε τον δρόμο της μοριακής γενετικής.

## **Οι πρώτες αποκαλύψεις από την αλληλουχία εργασίας**

Το υπουργείο ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής που είναι ένας από τους κύριους χρηματοδότες του εγχειρήματος της ανάγνωσης του ανθρώπινου γονιδιώματος, σε πρόσφατη σχετική αναφορά του, συμπεκνώνει τα πρώτα ευρήματα από την ανάγνωση του ανθρώπινου γονιδιώματος σε επτά τομείς (U.S. Department of Energy Human Genome Program 2002).

- Το ανθρώπινο γονιδίωμα αποτελείται από 3.164 εκατομμύρια βάσεις (Α, Τ, C και G). Το μέσο μέγεθος των γονιδίων είναι 3.000 βάσεις, αλλά υπάρχει μεγάλη ποικιλία μεγεθών και το μεγαλύτερο γονίδιο, εκείνο της δυστροφίνης φθάνει τα 2,4 εκατομμύρια βάσεις. Οι εκτιμήσεις για το συνολικό αριθμό των γονιδίων κυμαίνονται μεταξύ 30.000 και 40.000. Η αλληλουχία σχεδόν όλων (99,9%) των νουκλεοτιδίων είναι ακριβώς η ίδια σε όλους τους ανθρώπους. Δεν έχουμε προσδιορίσει τη λειτουργία των μισών περίπου από τα γονίδια που ανακαλύφθηκαν.
- Μόλις το 2% του γονιδιώματος περιέχει οδηγίες για τη σύνθεση πρωτεϊνών. Από το υπόλοιπο περίπου το 50% περιέχει επαναλαμβανόμενες αλληλουχίες που δεν κωδικοποιούν πρωτεΐνες 'junk DNA'. Μολονότι δεν έχει αποδοθεί κάποια χρησιμότητα σε αυτές τις περιοχές θεωρούνται πιθανός χώρος εξελικτικού πειραματισμού και ανάδειξης νέων γονιδίων. Φαίνεται μάλιστα πως τα τελευταία 50 εκατομμύρια χρόνια έχει μειωθεί δραματικά ο ρυθμός συσσώρευσης τέτοιων επαναλήψεων.
- Η διάταξη του γονιδιώματος περιλαμβάνει 'αστικά κέντρα' πλούσια σε γονίδια και εξαιρετικά φτωχές 'έρημους'. Τα γονίδια εμφανίζονται να συμπυκνώνονται σε διάφορες περιοχές και να ορίζονται από περιοχές έως και 30.000 βάσεων επαναλαμβανόμενων GC που τα ξεχωρίζουν είτε από άλλες συσσωματώσεις είτε από τις μη κωδικοποιούσες περιοχές. Τα περισσότερα γονίδια (2968) περιέχονται στο μεγαλύτερο χρωμόσωμα 1, και τα λιγότερα στο ανδρικό φυλετικό χρωμόσωμα Y (231).
- Οι συγκρίσεις με άλλους οργανισμούς οδήγησαν στις εξής παρατηρήσεις: Τα γονιδιώματα πολλών άλλων οργανισμών είναι πιο ομοιόμορφα και τα γονίδια κατανέμονται με κάποια κανονικότητα σε όλη τη διαθέσιμη έκταση. Οι άνθρωποι σχηματίζουν κατά μέσον όρο τριτλάσιο αριθμό πρωτεϊνών σε σύγκριση με τις μύγες ή τα σκουλήκια χάρη σε διαδικασίες (κό-

ψιμο - ράψιμο, χημική τροποποίηση) που μπορούν να οδηγήσουν στην παραγωγή διαφορετικών πρωτεϊνών από το ίδιο γονίδιο. Οι άνθρωποι έχουν κοινές αλλά πολυπληθέστερες σε σύγκριση με τα άλλα είδη (σκουληκιών, μυγών, φυτών) οικογένειες πρωτεϊνών. Τα ανθρώπινο γονιδίωμα περιέχει εξαιρετικό υψηλό ποσοστό (50% αντί 3-11%) επαναλαμβανόμενων 'άχρηστων' αλληλουχιών.

- Προσδιορίστηκαν 1,4 εκατομμύρια θέσεις όπου υπήρχε διαφορά σε μία βάση, δηλαδή περιοχές όπου η αλληλουχία ενός ή περισσότερων δειγμάτων διέφερε από τα υπόλοιπα σε μια βάση. Δηλαδή η αλληλουχία της πλειοψηφίας ήταν για παράδειγμα ..TCGCGTTGC. και η διαφοροποιημένη ..TCGAGTTGC.. έχοντας στην τέταρτη θέση ένα Α αντί για C. Η αξιοποίηση τέτοιων πληροφοριών θα προωθήσει τη διερεύνηση χρωμοσωμικών περιοχών που εμπλέκονται σε ασθένειες και την αντικειμενοποίηση της ιστορίας των ανθρώπινων πληθυσμών. Μεγάλος μέρος της ποικιλομορφίας αποδίδεται στις πολλές διαιρέσεις που απαιτούνται για την ωρίμανση των αρσενικών γαμετικών κυττάρων, με αποτέλεσμα να μεταφέρονται στην επόμενη γενιά σχεδόν διπλάσιες μεταλλάξεις από τα σπερματοζώαρια σε σχέση με τα ωάρια.
- Η μετατροπή της αλληλουχίας του DNA σε χρήσιμη γνώση αναμένεται να απασχολήσει δεκάδες χιλιάδες επιστήμονες και να καθορίσει τη βιολογική έρευνα τις επόμενες δεκαετίες. Ήδη από το στάδιο της 'αλληλουχίας εργασίας' άρχισαν να διακρίνονται μια σειρά γονίδια που εμπλέκονται σε διάφορες αρρώστιες και διαταραχές από τον καρκίνο του στήθους ως τις μυοπάθειες, την κώφωση και την τύφλωση. Ακόμη διαφαίνεται ο προσδιορισμός αλληλουχιών που εμπλέκονται σε κοινές ασθένειες όπως οι καρδιοπάθειες, ο διαβήτης και τα αρθρικά και η δυνατότητα να εστιάσουμε σε αυτές τις προσπάθειές μας για την ανάπτυξη νέων θεραπειών. Ίσως όμως η σημαντικότερη επίπτωση θα είναι η ανάπτυξη μιας ολιστικής θεώρησης. Δεν θα ασχολούμαστε πια με ένα γονίδιο ή μια πρωτεΐνη τη φορά, αλλά με το σύνολο τους και με το σύνολο των αλληλεπιδράσεών τους.
- Θα χρειαστεί να αναπτυχθούν καινούργιες ερευνητικές τεχνικές και να βελτιωθούν οι ήδη υπάρχουσες ώστε να αξιοποιηθεί η ήδη διαθέσιμη πληροφορία. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε: Μελέτες της ρύθμισης της έκφρασης των γονιδίων, της λειτουργίας και της τρισδιάστατης δομής των πρωτεϊνών, μελέτες απενεργοποίησης συγκεκριμένων γονιδίων και καταγραφής των επιπτώσεων καθώς και συγκρίσεις με άλλους οργανισμούς-πρότυπα για τον προσδιορισμό γονιδίων και την ερμηνεία της δράσης τους.

## **Οι άμεσες επιδράσεις στην Ιατρική: Γονιδιακός Έλεγχος, Φαρμακο-γενομική και Γονιδιακή Θεραπεία**

Είναι εύκολα κατανοητό πως η γνώση του μοριακού υποβάθρου της ζωής θα επιτρέψει την εκλογίκευση όλων των διαγνωστικών και θεραπευτικών παρεμβάσεων αυξάνοντας την αποτελεσματικότητά τους. Θα αναφερθούμε σε τρεις πολύ σημαντικές εξελίξεις: στον Γονιδιακό Έλεγχο, τη Φαρμακογενομική και τη Γονιδιακή Θεραπεία.

### **Γονιδιακός Έλεγχος**

Ο γονιδιακός έλεγχος πιο γνωστός σαν 'τεστ DNA' αποτελεί μια από τις πρώτες ιατρικές εφαρμογές των νέων ανακαλύψεων στον χώρο της γενετικής. Μπορούμε να ξεχωρίσουμε δύο μεγάλες κατηγορίες γονιδιακών ελέγχων. Η πρώτη αφορά εκατοντάδες 'τεστ DNA' που ήδη χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ιατρική πρακτική και πολλά περισσότερα που τώρα εξελίσσονται. Τα τεστ αυτά βασίζονται στον προσδιορισμό μεταλλάξεων που συνδέονται με σπάνιες γενετικές διαταραχές που ακολουθούν το πρότυπο τη Μεντελικής κληρονομικότητας. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η κυστική ίνωση, ή δρεπανοκυτταρική αναιμία και οι μυϊκές δυστροφίες. Η δεύτερη και πιο πρόσφατη κατηγορία γονιδιακών ελέγχων προσδιορίζει μεταλλάξεις σε μερικές πιο πολύπλοκες καταστάσεις όπως ο καρκίνος του στήθους ή του παχέως εντέρου. Παρά τους πολύ σημαντικούς περιορισμούς τους, τα τεστ αυτά προσδιορίζουν σε άτομα με βεβαρημένο οικογενειακό ιστορικό, τα οποία όμως δεν έχουν συμπτώματα, την πιθανότητα να προσβληθούν από την αντίστοιχη ασθένεια. Αυτή η γνώση θα επιτρέψει για παράδειγμα την προσεκτικότερη παρακολούθησή τους για την έγκαιρη διάγνωση της έναρξης της ασθένειας και επομένως την επιτυχέστερη θεραπεία της, ή τις αναγκαίες αλλαγές στη συμπεριφορά τους για την πλήρη αποφυγή της. Αυτή η δεύτερη κατηγορία γενετικών δοκιμασιών που επιχειρεί την πρόβλεψη της πιθανότητας να εκδηλωθεί μια συγκεκριμένη ασθένεια, δεν έχει ενσωματωθεί στην καθημερινή πρακτική όπως οι παλιότερες και προκαλεί μια σειρά προβληματισμούς. Μερικοί από αυτούς είναι η έλλειψη αποτελεσματικών θεραπειών σε κάποιες από αυτές τις ασθένειες, τα πιθανά ψυχολογικά ή συναισθηματικά προβλήματα, η διαταραχή της δυναμικής των οικογενειών και η προστασία από διακρίσεις από εργοδότες και μέχρι του σημείου του στιγματισμού ομάδων του πληθυσμού.



## **Φαρμακογονομική: Η απομάκρυνση από τη μία λύση για όλους**

Μέσα στην παρούσα δεκαετία αναμένεται η συσχέτιση των παραλλαγών του γενετικού υλικού με την ανταπόκριση στις διάφορες θεραπείες, που θα οδηγήσει στον προσδιορισμό συγκεκριμένων υποομάδων ασθενών και την ανάπτυξη φαρμάκων βελτιστοποιημένων για τους συγκεκριμένους πληθυσμούς. Πρώτα από όλα θα αποφευχθούν οι παρενέργειες σε θεραπείες που ενώ ωφελούν εκατοντάδες εκατομμύρια ασθενών οδηγούν στο θάνατο 100.000 ανθρώπους κάθε χρόνο. Η ανάπτυξη γρήγορων δοκιμασιών για τον καθορισμό της ποικιλομορφίας των γονιδίων που σχετίζονται με τον μεταβολισμό των φαρμάκων θα αποτρέψει μεγάλο μέρος των παρενεργειών. Η τεχνολογία και τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάγνωση του ανθρωπίνου γονιδιώματος θα επιτρέψει την ταχύτερη οικονομικότερη και αποτελεσματικότερη δημιουργία φαρμάκων. Από τους περίπου 500 στόχους στους οποίους παρεμβαίνουν τα φάρμακα που διαθέτουμε σήμερα θα επιλεγούν με τη μελέτη των γονιδίων που εμπλέκονται στις διάφορες ασθένειες πολλοί περισσότεροι και πολύ πιο εξειδικευμένοι. Ακόμη και οι κλινικές δοκιμές θα είναι πιο αποτελεσματικές γιατί θα αφορούν μόνο όσους έχουν πραγματικά ανάγκη, δηλαδή εκείνους που ενδέχεται να παρουσιάσουν τη συγκεκριμένη ασθένεια και όχι το σύνολο του πληθυσμού.

## **Γονιδιακή Θεραπεία**

Η πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν τα ίδια τα γονίδια οδήγησε στην ανάπτυξη ενός, σε μεγάλο μέρος πειραματικού, πεδίου, που βασίζεται στη χρησιμοποίηση υγιών γονιδίων για την αντικατάσταση ελαττωματικών ή την υποστήριξη φυσιολογικών διαδικασιών όπως η ανοσία. Το Ιούνιο του 2001 βρίσκονταν σε εξέλιξη πάνω από 500 δοκιμασίες γονιδιακής θεραπείας που αφορούσαν 3.500 ασθενείς. Το κύριο τεχνικό εμπόδιο σε αυτήν την προοπτική είναι η ελλιπής βασική γνώση των μηχανισμών που αφορούν τη μεταφορά και την έκφραση των γονιδίων.

## **Άλλες τρέχουσες και αναμενόμενες εφαρμογές της γονιδιακής έρευνας**

Πέρα των εφαρμογών της γονιδιακής έρευνας στον τομέα της μοριακής ιατρικής που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους υπάρχει μια

σειρά από πολύ ενδιαφέροντες εφαρμογές που αξίζει να αναφερθούν. Η μικροβιακή γενομική αναμένεται να βελτιώσει τη μεθοδολογία ανίχνευσης και θεραπείας των παθογόνων μικροοργανισμών (Stratidaki et al. 2001). Η πρόγνωση της επικινδυνότητας θα διαφυλάξει τα ευαίσθητα άτομα από την έκθεση σε διάφορα χημικά και τοξίνες σε συνθήκες πρακτικά αβλαβείς για το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού. Μια νέα σειρά δεδομένων θα υποστηρίξουν τις μελέτες ανθρωπολογίας, εξέλιξης των οργανισμών και της ιστορίας των ανθρώπινων μεταναστεύσεων. Η ταυτοποίηση του DNA θα οδηγήσει στην αναγνώριση υπόπτων ή την απαλλαγή αθώων με βάση το γενετικό υλικό που βρίσκεται στη σκηνή του εγκλήματος. Η ίδια τεχνική μπορεί να βοηθήσει στην αναγνώριση θυμάτων καταστροφών και την επιβεβαίωση της πατρότητας και των οικογενειακών δεσμών. Τέλος και η γεωργία και η κτηνοτροφία θα επωφεληθούν από τη ανάπτυξη φυτών ανθεκτικών στις ασθένειες, τα έντομα και την ξηρασία, την ανατροφή ανθεκτικών, παραγωγικών και υγιών ζώων, την παραγωγή θρεπτικότερων προϊόντων, την ανάπτυξη βιολογικών εντομοκτόνων και τέλος την ενσωμάτωση φαγώσιμων εμβολίων σε διάφορες τροφές.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας που επέτρεψε την παραγωγικότερη ανάγνωση των αλληλουχιών του DNA, οδήγησε στην εμφάνιση ιδιωτικών επιχειρήσεων που ενεπλάκησαν και επέτυχαν τη δική τους, σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη, ανάγνωση της αλληλουχίας του γονιδιώματος. Η δυνατότητες των ιδιωτικού ενδιαφέροντος προσεγγίσεων οδήγησαν σε απόπειρες συνεργασίας με το Πρόγραμμα Ανάγνωσης του Ανθρώπινου Γονιδιώματος, που τελικά απέτυχαν. Οι στόχοι των επιχειρήσεων αυτού του τύπου όπως π.χ. η Celera (Celera Genomics 2002), όπως η αναγνώριση νέων στόχων για φαρμακευτική παρέμβαση και η αξιοποίηση καινούργιων διαγνωστικών δεικτών δεν διαφέρουν από εκείνους της συνεργασίας των οργανισμών δημοσίου συμφέροντος. Η μόνη διαφορά είναι η ιδιοκτησία της γνώσης που η ιδιωτική επιχείρηση παράγει και η εμπορική εκμετάλλευσή της.

Οι αναφορές για την πρόοδο της ανάγνωσης της αλληλουχίας του ανθρώπινου γονιδιώματος συχνά περιλαμβάνουν μη τεχνοκρατικές φράσεις που αναφέρονται είτε στη μεταφυσική διάσταση του εγχειρήματος της ανάγνωσης του 'βιβλίου της ζωής' είτε στις θετικές ή αρνητικές επιπτώσεις του στην καθημερινή ζωή. Κατά το ξεκίνημά της τουλάχιστον η ανάγνωση του γονιδιώματος των θηλαστικών εθεωρείτο ένα γιγαντιαίο εγχείρημα που απαιτούσε κρατική ενίσχυση και διεθνή συνεργασία. Η συμμετοχή οργανισμών δημοσίου συμφέροντος οδήγησε στην αφιέρωση τεραστίων κονδυλίων, όχι βέ-

βαια στις μεταφυσικές αναζητήσεις, αλλά στη διερεύνηση των συγκεκριμένων πρακτικών επιπτώσεων (Collins et al. 1998). Το Υπουργείο Ενέργειας και το Εθνικό Ινστιτούτο Υγείας των Ηνωμένων Πολιτειών αφιέρωσαν 3-5% του σχετικού ετήσιου προϋπολογισμού τους για την ανάγνωση του ανθρωπίνου γονιδιώματος, στη μελέτη των ηθικών, νομικών και κοινωνικών ζητημάτων που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα της γενετικής πληροφορίας. Πρόκειται πιθανόν για το μεγαλύτερο πρόγραμμα Βιοηθικής σε εξέλιξη. Η παρουσία της ηθικής στα όρια του χώρου της βιολογίας, δηλαδή η βιοηθική, δεν είναι καινούργια. Από τη φύση της η μελέτη και η επέμβαση σε θέματα που αφορούν την ανθρωπίνη, κυρίως, ζωή απαιτεί μια προσεκτική προσέγγιση. Μπορούμε να ανακαλέσουμε τα προβλήματα που δημιούργησε η θεωρία της εξέλιξης του Δαρβίνου, ο ευγονισμός που στη πιο ακραία μορφή του γίνεται ρατσισμός, οι εκτρώσεις, τα πειράματα σε ανθρώπινα υποκείμενα, η κλωνοποίηση και τόσα άλλα. Όμως στην περίπτωση της ανάγνωσης του ανθρωπίνου γονιδιώματος η ανάλυση των ηθικών, νομικών και κοινωνικών θεμάτων συμπεριλαμβάνεται ήδη από τον σχεδιασμό του εγχειρήματος. Ανάμεσα στα θέματα που απασχολούν τη μελέτη των ηθικών, νομικών και κοινωνικών ζητημάτων είναι και τα παρακάτω: Γενετικό απόρρητο, αξιοποίηση της γενετικής πληροφορίας από τρίτους (εργοδοσία, ασφάλειες), ψυχολογικές επιπτώσεις στιγματισμός και διακρίσεις με βάση τις γενετικές ιδιαιτερότητες, θέματα αναπαραγωγής (υπεύθυνη συμμετοχή στην αξιοποίηση της γενετικής πληροφορίας για θέματα αναπαραγωγής), κλινικά θέματα (επιμόρφωση των παραγόντων των υπηρεσιών παροχής υγείας για τις δυνατότητες, τους κινδύνους και τους περιορισμούς της νέας γνώσης), ισότιμη πρόσβαση στις εξελιγμένες γονιδιακές τεχνολογίες, αβεβαιότητες των γονιδιακών τεστ για την πρόβλεψη πιθανών ή πολύπλοκων καταστάσεων (καρδιοπάθειες, διαβήτης, κ.ο.κ.), γνωσιολογικές και φιλοσοφικές εμπλοκές σε σχέση με την υπευθυνότητα και την ελευθερία επιλογής σαν αντίβαρο στο γενετικό προκαθορισμό και τις έννοιες της ασθένειας και της υγείας, θέματα υγιεινής και περιβάλλοντος σε σχέση με τους γενετικά τροποποιημένους οργανισμούς, εμπορευματοποίηση της παραγόμενης γνώσης (πατέντες, πνευματικά δικαιώματα, βιομηχανικά μυστικά και προσβασιμότητα στα δεδομένα και το υλικό).

Η κριτική των επιστημόνων-τεχνοκρατών στη λειτουργία της επιτροπής μελέτης των ηθικών, νομικών και κοινωνικών ζητημάτων μοιάζει αιμυτική. Αποδέχονται την ανάγκη για τη θέσπιση κανόνων και διαμαρτύρονται που τα θέματα αυτά συζητούνται σε ένα κλειστό κύκλο όπου επιστήμονες της ηθικής απευθύνονται σε επιστήμονες της ηθικής. Αυτό που προτείνεται είναι

μια διεπιστημονική προσέγγιση που να συμπεριλαμβάνει όλους τους ενδιαφερόμενους για τη χάραξη μια κατευθυντήριας γραμμής υψηλού επιπέδου, με βάση τα οράματα και τις αναμενόμενες δυνατότητες που προκύπτουν (Nat. Genet. Editorial 2001).

## **Γενετική τροποποίηση**

Η γενετική τροποποίηση αφορά αλλαγές στο γενετικό υλικό, στο DNA, ενός οργανισμού. Οι αλλαγές μπορεί να αφορούν ένα προϋπάρχον κομμάτι DNA, ή την προσθήκη ενός εντελώς νέου γονιδίου. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη χρήση του όρου 'μεταλλαγμένα' που χρησιμοποιείται με μια εκφοβιστική διάθεση για να περιγράψει τα γενετικώς τροποποιημένα προϊόντα ή οργανισμούς. Οι μεταλλάξεις είχαν οριστεί ως συνήθεις, ανεξέλεγκτες και πολύ σπάνια επωφελείς αλλαγές στο γενετικό υλικό που εντείνονται με την έκθεση των οργανισμών σε μεταλλαξογόνους παράγοντες. Αντίθετα η γενετική τροποποίηση είναι προσχεδιασμένη και αποσκοπεί στην ανάπτυξη επιθυμητών ιδιοτήτων στους οργανισμούς που εφαρμόζεται.

Ένα νέο γονίδιο μπορεί να μεταφερθεί από έναν οργανισμό σε έναν άλλο του ίδιου είδους, π.χ. από ένα φυτό ντομάτας σε ένα άλλο, ή ακόμη και ανάμεσα σε οργανισμούς διαφορετικών ειδών, π.χ. από ένα φυτό ντομάτας σε ένα ψάρι. Το γενετικό υλικό όλων των οργανισμών είναι το ίδιο, το DNA, όπως άλλωστε και οι κανόνες για την αξιοποίηση της γενετικής πληροφορίας. Αυτό επιτρέπει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς για τη μεταφορά γονιδίων: από φυτό σε φυτό από φυτό σε ζώο από ζώο σε ζώο και από ζώο σε φυτό.

Με αυτό τον τρόπο έγινε δυνατή η κατασκευή φυτών ντομάτας που αντέχουν τον παγετό με την προσθήκη ενός αντιπηκτικού γονιδίου από ένα ψάρι, τον πλευρονόκτε των κρύων νερών, που μπορεί να επιβιώσει σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η διαδικασία περιλαμβάνει: Απομόνωση του γονιδίου, δηλαδή του κομματιού του DNA, που κωδικοποιεί τη διαδικασία για τη σύνθεση μιας αντιπηκτικής χημικής ουσίας από τα κύτταρα του ψαριού. Μεταφορά του επιθυμητού γονιδίου, μέσω ενός πλασμιδίου, στο γενετικό υλικό ενός βακτηρίου. Ανάπτυξη και πολλαπλασιασμό του βακτηρίου. Μόλυνση κυττάρων ντομάτας με το βακτήριο και μεταφορά και ενσωμάτωση του γονιδίου στο γενετικό υλικό της τομάτας. Ανάπτυξη των κυττάρων της ντομάτας ώστε να δώσουν πλήρη φυτό. Έλεγχο και επιβεβαίωση της μεταφοράς του γονιδίου και της ανάπτυξης της αντοχής στον παγετό από τα νέα φυτά



ντομάτας. Η διαδικασία είναι μάλλον απλή, το μεγάλο πρόβλημα σε τεχνικό επίπεδο είναι η συμβατότητα του 'μεταμοσχευμένου' γονιδίου με το πλέγμα των βιοχημικών αντιδράσεων του δέκτη. Είναι δυνατόν το γονίδιο τελικά να μη μπορέσει να εκφραστεί ή στην άλλη άκρη να μπλοκάρει κρίσιμες διεργασίες του δέκτη. Έχει καταγραφεί και η περίπτωση καταστροφής εσοδείας γενετικά τροποποιημένων φυτών σε κάποιες ακραίες, αλλά αναμενόμενες συνθήκες, όπου η τροποποίηση αποτελούσε μειονέκτημα για την επιβίωση των φυτών.

Γνωρίζουμε πως ως άνθρωποι τροποποιούμε τις γενετικές ιδιότητες των τροφών μας εδώ και χιλιάδες χρόνια. Η τεχνική των διασταυρώσεων, που ήταν η μόνη διαθέσιμη μέχρι τον εικοστό αιώνα, απαιτούσε μεγάλη προσπάθεια και δεν ήταν αρκετά αποτελεσματική. Όμως από τη δεκαετία του 1960 και μετά οι επιστημονικές εξελίξεις και η κατανόηση της φύσης και της δράσης των γονιδίων άνοιξαν καινούργιες δυνατότητες. Γρήγορα έγινε κατανοητό ότι η καινούργια γνώση παρείχε τη δυνατότητα μιας επαναστατικής αλλαγής στην παραγωγή τροφίμων, με τεράστια οφέλη για όλο τον κόσμο. Το 1964 το Διεθνές Ινστιτούτο Έρευνας για το Ρύζι στις Φιλιππίνες επέτυχε τη δημιουργία μιας νέας ποικιλίας ρυζιού που διπλασίαζε τη σοδειά σε σύγκριση με τις προηγούμενες. Αυτή η ανακάλυψη απετέλεσε το ξεκίνημα της Πράσινης Επανάστασης, μιας διεθνούς κίνησης που οραματιζόταν το τερματισμό της πείνας σε όλο τον κόσμο. Ο στόχος της κίνησης αυτής ήταν να δώσει στους αγρότες του αναπτυσσόμενου κόσμου παραγωγικές ποικιλίες ικανές να αντέχουν σε ακραίες συνθήκες.

Η Πράσινη Επανάσταση οδήγησε σε ραγδαία αύξηση του μεγέθους της σοδειάς και εισήγαγε τις σύγχρονες μεθόδους καλλιέργειας σε όλο τον κόσμο. Αλλά δυστυχώς όχι μόνο δεν εξάλειψε τη πείνα, αλλά με τη σειρά της προκάλεσε μια νέα σειρά προβλημάτων. Οι νέες μέθοδοι καλλιέργειας απαιτούσαν τη χρήση φυτοφαρμάκων και εντομοκτόνων που με τη σειρά τους μόλυναν τα νερά, μείωναν τη γονιμότητα και την ποσότητα του εδάφους. Ακόμα μείωναν τη βιοποικιλότητα και οδηγούσαν στην εξάρτηση των αγροτών από τις χημικές βιομηχανίες.

Ήδη όμως από το 1972 μια άλλη επανάσταση περίμενε τη σειρά της. Αρχικά έγινε δυνατή η σύνδεση δύο κομματιών DNA από δύο διαφορετικούς οργανισμούς και η δημιουργία του πρώτου ανασυνδυασμένου μορίου DNA (Jackson et al. 1972). Ακολούθησε την επόμενη χρονιά η θεαματική μεταφορά DNA από βάκτρο στο βακτήριο *E. Coli* (Morrow et al. 1974). Σχεδόν αμέσως την ευφορία που προκάλεσαν αυτές οι ανακαλύψεις επεσκίασε ο σκε-

πικισμός για την ασφάλεια και την ηθικότητα τέτοιων ερευνών. Την επόμενη χρονιά (1975) στη σύσκεψη του ASILOMAR το μορατόριουμ ή πάγωμα των γενετικών ερευνών, μέχρι να επιβεβαιωθεί η ασφάλεια της νέας τεχνολογίας, που παθιασμένα διεκδίκησαν ορισμένοι βιολόγοι δεν έγινε αποδεκτό. Το μόνο που έγινε ήταν η σύσταση να φυλάσσονται προσεκτικά μέσα στα εργαστήρια τόσο το ανασυνδυασμένο DNA (συνήθως ενσωματωμένο στο γενετικό υλικό βακτηρίων) όσο και οι γενετικά τροποποιημένοι οργανισμοί, μέχρι την ανάπτυξη σχετικών ρυθμιστικών κανόνων για την έρευνα από τους αρμόδιους θεσμοθετημένους φορείς.

Η τεχνολογία της γενετικής τροποποίησης είναι πλέον ώριμη, σύμφωνα με ορισμένες εκτιμήσεις, και έχει ξεκινήσει η επιχειρηματική αξιοποίησή της. Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 άρχισε μια εισροή επενδύσεων στη βιομηχανία της βιοτεχνολογίας που οδηγήθηκε τόσο από την προσδοκία μεγάλων κερδών όσο και από μια γνήσια αίσθηση ενδιαφέροντος και περιπέτειας για αυτήν την παρθένα τεχνολογία. Τεράστιες επιχειρήσεις χημικών, όπως η Monsanto (Monsanto 2002), που είναι γνωστή για τα εντομοκτόνα με τη φίρμα 'Round Up', άρχισαν τις δικές τους βιοτεχνολογικές μονάδες ήδη από το 1981 με στόχο τη διερεύνηση των εφαρμογών της γενετικής μηχανικής στη γεωργία. Λίγα χρόνια αργότερα, δύο ανεξάρτητα εργαστήρια παρουσίασαν σχεδόν ταυτόχρονα τα πρώτα γενετικά τροποποιημένα φυτά. Αυτά τα φυτά της πετούνιας και του καπνού που δημιουργήθηκαν ήταν και τα δύο ανθεκτικά στο αντιβιοτικό καναμυκίνη. Σύντομα η βιομηχανία άνθισε και εμφανίστηκε μια σειρά νέων επιχειρήσεων που ήλπιζε να συμμετάσχει στην εκμετάλλευση αυτού του χρυσωρυχείου. Μετά από μια δεκαετία σταθερής προόδου της έρευνας στη γεωργία των γενετικά τροποποιημένων φυτών, εμφανίστηκαν τα πρώτα γενετικά τροποποιημένα τρόφιμα στην αγορά το 1994. Το μέλλον φαινόταν λαμπρό και εξαιρετικά επικερδές για τις εταιρείες που παρήγαγαν γενετικά τροποποιημένους σπόρους.

Αλλά οι βιοτεχνολογικές εταιρείες δεν πέτυχαν ακόμη τα κέρδη που οραματίζονταν, γιατί τους διαφεύγει μια πολύ σημαντική αγορά - η Ευρωπαϊκή. Ενώ λοιπόν οι Αμερικάνοι έχουν σχεδόν αποδεχθεί τις γενετικά τροποποιημένες σοδειές, η Ευρώπη παραμένει το ίδιο εχθρική στην ιδέα της τροποποιημένης τροφής. Το αποτέλεσμα είναι να βρίσκεται σε εξέλιξη ένας ήπιος εμπορικός πόλεμος μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής με θέμα τη σήμανση των γενετικά τροποποιημένων προϊόντων. Σε κατάσταση αναμονής βρίσκονται και οι προσδοκίες για την επίλυση του προβλήματος της πείνας σε όλο τον πλανήτη. Επειδή οι κανονισμοί για τη χορήγηση άδειας για τη δημιου-

γία γενετικά τροποποιημένων φυτειών ανεβάζουν πολύ το κόστος, οι εταιρείες συγκεντρώνουν τις προσπάθειές τους σε άλλους τομείς όπου είναι πιθανότερη η υψηλή οικονομική ανταπόδοση. Οι τέσσερις μεγαλύτεροι παρಾಗωγοί γενετικά τροποποιημένων σπόρων - Aventis, Monsanto, Syngenta και DuPont επένδυσαν τεράστια ποσά στην έρευνα και την ανάπτυξη νέων προϊόντων και θα πρέπει να ανακτήσουν (ρεφάρουν) τα ανοίγματά τους. Η κατοχύρωση των δικαιωμάτων τους γίνεται με την απόκτηση πατέντων.

Οι πατέντες είναι άδειες που χορηγούνται στους εφευρέτες από τις κυβερνήσεις. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση οι πατέντες εκδίδονται από τον σχετικό οργανισμό και έχουν διάρκεια 20 χρόνια. Ο εφευρέτης, είτε είναι άτομο είτε επιχείρηση, αποκτά την ιδιοκτησία της ανακάλυψής του με την απόκτηση της πατέντας και μπορεί στη συνέχεια να την εκμεταλλευτεί ή ακόμη να την πουλήσει ή να την ενοικιάσει. Υπάρχει ένα ανοικτό θέμα σε σχέση με το πατεντάρισμα γονιδίων και για ηθικούς λόγους αλλά και σαν άδικο για τους επιστήμονες που τα μελετούν. Συγκεκριμένα οι επιστήμονες μπορούν να μελετήσουν ένα πατενταρισμένο γονίδιο αλλά δεν μπορούν να το εκμεταλλευθούν επιχειρηματικά. Αυτό βέβαια σημαίνει, πως ενώ μια εταιρεία ή ένας δημόσιος φορέας επενδύει στη μελέτη ενός γονιδίου μια άλλη εταιρεία που έχει τη πατέντα θα αποκομίσει όλα τα κέρδη, εάν επιτευχθεί η εμπορευματική αξιοποίησή του. Μια τέτοιου τύπου παρενέργεια αναδείχθηκε όταν το 1997 η Rise-Tec, μια βιοτεχνολογική εταιρεία από το Τέξας, απέκτησε μια πατέντα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής για το ρύζι μπασμάτι. Η ποικιλία του ρυζιού μπασμάτι καλλιεργείται στην Ινδία και το Πακιστάν εδώ και εκατοντάδες χρόνια. Η πατέντα έδινε στην Rise-Tec τον πλήρη έλεγχο όλης της παραγωγής του μπασμάτι των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Το γεγονός αυτό εξόργισε την κυβέρνηση της Ινδίας και την οδήγησε σε δικαστικό αγώνα για την αμφισβήτηση της πατέντας. Το επιχείρημα της Rise-Tec είναι πως έχει δημιουργήσει μια μοναδική ποικιλία με ξεχωριστό άρωμα και γεύση. Από την άλλη η Ινδική κυβέρνηση επιμένει πως οι αλλαγές δεν είναι επαρκείς για τη χορήγηση πατέντας.

Εάν η τεχνολογία της γενετικής τροποποίησης ανταποκριθεί στις προσδοκίες των πιο ενθουσιωδών υποστηρικτών της, θα μπορούσε να μειώσει τη χρήση λιπασμάτων και εντομοκτόνων, να επιτρέψει την καλλιέργεια σε άγονα περιβάλλοντα και να αυξήσει τις σοδειές. Θα μπορούσε ακόμη να κάνει την τροφή μας πιο υγιεινή και πιο θρεπτική. Ήδη όμως οι επιστήμονες εργάζονται για το επόμενο γιγαντιαίο βήμα της επανάστασης των γενετικών τροποποιήσεων που θα φέρει τα πάνω κάτω. Τα φυτά και τα φρούτα θα

μπορούσαν να μετατραπούν σε βιολογικά εργοστάσια που θα παράγουν πρωτεΐνες και υλικά κατά παραγγελία μεταξύ των οποίων: φάρμακα και εμβόλια, υγιεινά φυσικά έλαια που θα αντικαταστήσουν τα ζωικά λίπη και θα προφυλάξουν τους καταναλωτές που δεν χρησιμοποιούν ελαιόλαδο από τις καρδιακές ασθένειες, φιλικά προς το περιβάλλον βιοκαύσιμα καθώς και βιολιπαντικά και βιοδιασπώμενα πλαστικά. Διάφορα φυτά, όπως οι ντομάτες, διαθέτουν το κλειστό στείρο περιβάλλον που απαιτείται για την ανάπτυξη εμβολίων και φαρμάκων. Τα βιοκαύσιμα μπορεί να προέλθουν από γενετικά τροποποιημένες σοδειές συνηθισμένων καλλιεργειών, όπως η σόγια και το ζαχαροκάλαμο. Ήδη έχει δοκιμαστεί η χρήση αλκοόλης που προέρχεται από τη ζύμωση φυτικής προέλευσης σακχάρων για την κίνηση αυτοκινήτων. Η αξιοποίηση αυτών των δυνατοτήτων και η μαζική καλλιέργεια γενετικά τροποποιημένων φυτών συναντά, όπως ήδη περιγράψαμε, σημαντικές αντιδράσεις στην Ευρώπη που δεν επιτρέπουν την πλήρη αποκάλυψη των δυνατοτήτων της.

Τα επιχειρήματα ενάντια στα γενετικά τροποποιημένα προϊόντα, τα οποία αναφέρονται από τους αντιπάλους τους ως μεταλλαγμένα, εστιάζονται σε δύο κυρίως τομείς, το περιβάλλον και την ασφάλεια - υγιεινή και καταλήγουν με την αποστροφή 'ποιος κερδίζει από όλα αυτά'.

Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία πως οι οργανισμοί είναι κάτι πολύ πιο πολύπλοκο από το άθροισμα των γονιδίων τους και πως, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο της ανάπτυξης του ανθρώπινου γονιδιώματος, η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα γονίδια και ανάμεσα στα γονίδια και το περιβάλλον θα αποτελέσει το θέμα της έρευνας για τις επόμενες δεκαετίες. Είναι επομένως πολύ πρόωμη η απελευθέρωση 'μεταλλαγμένων' οργανισμών, αφού δεν γνωρίζουμε τι επιπτώσεις μπορεί να έχει η τροποποίηση που έχουμε εισάγει. Χαρακτηριστική είναι η καταστροφή χιλιάδων στρεμμάτων καλλιέργειας βαμβακιού γενετικά τροποποιημένου, ώστε να είναι ανθεκτικό σε κάποια έντομα αλλά φεν ακόμη ευαίσθητου σε κάποια άλλα. Η ζημιά που έγινε αρκετά χρόνια μετά την εισαγωγή της ποικιλίας στην παραγωγή ανερχόταν σε ένα δισεκατομμύριο δολάρια. (Science debates 1996). Σε μια άλλη περίπτωση, σε μελέτη της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, το γενετικά τροποποιημένο βακτήριο που είχε σχεδιαστεί για την απομάκρυνση ενός εντομοκτόνου τελικά το μετέτρεπε σε μια τοξική ουσία για τους μύκητες επηρεάζοντας την ισορροπία και τη γονιμότητα του εδάφους (Doyle et al. 1991).

Μια ακόμη περιβαλλοντική ανησυχία αφορά τη γενετική ρύπανση που



αφορά τη δυνατότητα μεταφοράς γονιδίων ανάμεσα σε συγγενικά είδη. Έτσι γονίδια που επάγουν την ανοχή σε ζιζανιοκτόνα θα μπορούσαν μεταφερόμενα σε άγριες ποικιλίες να τις μετατρέψουν σε 'υπερ-ζιζάνια'. Αντίστοιχος είναι ο κίνδυνος για τη μεταφορά γονιδίων σε έντομα καθιστώντας τα ανθεκτικά σε εντομοκτόνα και σε βακτήρια καθιστώντας τα ανθεκτικά στα αντιβιοτικά. Στις περιπτώσεις των ανθεκτικών ζιζανίων και εντόμων, για να σωθεί η σοδεία θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν εξαιρετικά τοξικές ουσίες, ενώ στην περίπτωση των ανθεκτικών μικροβίων θα απαξιωθεί η χρησιμότητα εξαιρετικά διαδεδομένων φαρμάκων. Τέλος προσοχή θα πρέπει να δοθεί και στην ανάπτυξη ακόμη και θανατηφόρων αλλεργιών εξ αιτίας της εμφάνισης διαφορετικών, ξένων προς τις αρχικές, ουσιών στους γενετικά τροποποιημένους οργανισμούς.

Η απελευθέρωση των γενετικά τροποποιημένων οργανισμών στο περιβάλλον είναι μια πράξη μη αναστρέψιμη. Οι γενετικά τροποποιημένοι οργανισμοί είναι ζωντανοί οργανισμοί, που αναπαράγονται, διασταυρώνονται, μεταλλάσσονται και θα δώσουν νέες γενιές. Τυχόν μόλυνση με λάθος γενετικά τροποποιημένους οργανισμούς είναι πολύ πιο επικίνδυνη από μια χημική μόλυνση. Το λάθος μπορεί να είναι πολύ εύκολο, αφού η απλή εισαγωγή μιας διαφορετικής ποικιλίας ενός είδους μπορεί να προκαλέσει πολύ μεγάλες αλλαγές στις οικολογικές ισορροπίες. Η νεοεισαχθείσα ποικιλία μπορεί να ανταγωνισθεί τα αυτόχθονα είδη ή είτε να ευνοήσει είτε να αποθαρρύνει την ανάπτυξη άλλων ειδών που εξαρτώνται από αυτή όπως έντομα ή μικρά ζώα. Οι απαιτήσεις για τη γρήγορη επιχειρηματική αξιοποίηση των νέων προϊόντων επηρεάζουν τις μελέτες που σχετίζονται με την ασφάλειά τους τόσο σε θέματα οικολογίας όσο και σε θέματα υγείας. Είναι σαφές ότι ούτε οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ούτε οι αλληλεπιδράσεις των τροποποιημένων ποικιλιών με το περιβάλλον μπορούν να αξιολογηθούν σε πειραματικές καλλιέργειες μερικών καλλιεργητικών περιόδων. Την ευθύνη μάλιστα για την τεκμηρίωση της ασφάλειας των γενετικά τροποποιημένων οργανισμών έχουν οι ίδιες οι εταιρείες που τους διακινούν. Και σε αυτή τη βάση οι πολέμιοι των γενετικά τροποποιημένων προϊόντων καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι όλοι είμαστε μέρος ενός ανεξέλεγκτου πειράματος σε παγκόσμια κλίμακα. Η ευαισθησία των Ευρωπαίων καταναλωτών και η αρνητική διάθεσή τους ενισχύεται από τα διατροφικά σκάνδαλα του τύπου 'διοξίνες στα κοτόπουλα' ή ακόμη χειρότερα με τη 'νόσο των τρελών αγελάδων'. Στη δεύτερη περίπτωση μια αλλαγή στη διαδικασία προετοιμασίας των ήδη υπόπων τροφών για τα βοοειδή σε συνδυασμό με την αποδυνάμωση του συστή-

ματος ελέγχου της ποιότητας των σφαγείων επέτρεψε την εξάπλωση μιας θανατηφόρου ασθένειας.

Τέλος το ερώτημα 'ποιος κερδίζει από όλα αυτά' μας οδηγεί στις μεγάλες εταιρείες που έχουν επενδύσει στην τεχνολογία της γενετικής τροποποίησης και προσδοκούν την κερδοφορία που είχαν προβλέψει. Σε αυτήν την περίπτωση είναι φανερή η σύγκρουση ανάμεσα στο δημόσιο και το ιδιωτικό συμφέρον. Χωρίς να χρειάζεται να αρνηθεί κανείς την αξιοποίηση της νέας τεχνολογίας, θα πρέπει να ορίσει τους κανόνες για την ασφαλή αξιοποίησή της. Όσο πιο αυστηροί και συντηρητικοί είναι οι κανόνες τόσο μικραίνει το περιθώριο κέρδους για τις επενδύσεις στις νέες τεχνολογίες. Η τεχνοκρατική ανάλυση των παραμέτρων δημόσιας ασφάλειας, εκφρασμένης σε οικονομικό κόστος και επιχειρηματικό κέρδος, οδηγεί σε μια συγκεκριμένη πρόταση. Οι επενδύσεις για τη διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας θα πρέπει να είναι ισοδύναμες με το ενδεχόμενο κόστος των αρνητικών επιδράσεων των νέων τεχνολογιών. Παρά το βραχυπρόθεσμο ορίζοντα και τον ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα της αυτή πρόταση ενσωματώνει το εξωτερικό κόστος στις απώλειες επιχειρηματικής αξιοποίησης νέων τεχνολογιών. Τέτοιου είδους προσεγγίσεις δημιουργούν την ελπίδα πως η τεχνολογική ανάπτυξη μπορεί να εκλογικευθεί και τελικά να κερδίσουμε όλοι ή τουλάχιστον να μη ζημιωθούν οι περισσότεροι. Βέβαια μόνο η κυριαρχία αντιλήψεων όπως η αειφόρος ανάπτυξη και η ολιστική θεώρηση του οικοσυστήματος μπορεί να οδηγήσει στα πραγματικά όρια μέσα στα οποία πρέπει να κινηθούν οι νέες τεχνολογικές παρεμβάσεις.

## **Κλωνοποίηση**

Τα μοναδικά δύο επώνυμα πειραματόζωα που μπορούμε να ανακαλέσουμε στη μνήμη μας είναι η Λάϊκα, η σκυλίτσα που θυσιάστηκε στις πρώτες διαστημικές αποστολές, και τώρα η Ντόλυ, η προβατίνα που δημιουργήθηκε ως γενετικό αντίγραφο ζώντος ενήλικου οργανισμού με τη διαδικασία της κλωνοποίησης (Campbell et al. 1996).

Ο όρος κλωνοποίηση χρησιμοποιείται για την περιγραφή της παραγωγής ακριβών αντιγράφων διαφόρων βιολογικών υλικών όπως κύτταρων, γονιδίων, χρωμοσωμάτων ακόμη και ολόκληρων οργανισμών. Όμως παρά την τεράστια συζήτηση που άνοιξε η επίσημη παρουσίασή της ως πειστήριο της πραγματοποίησης της κλωνοποίησης θηλαστικών, η Ντόλυ δεν είναι ούτε ο πρώτος ούτε ο μοναδικός κλώνος. Η παραγωγή κλώνων δεν περιορίζεται σε

εξελιγμένα εργαστήρια βιοτεχνολογίας ή στα φυτώρια για την παραγωγή πολλαπλασιαστικού υλικού. Τα μονοζυγωτικά δίδυμα, δηλαδή τα αδέρφια που προκύπτουν από το ίδιο ωάριο και είναι γενετικά πανομοιότυπα, οφείλουν την ύπαρξή τους σε ένα τυχαίο φαινόμενο φυσικού κλωνισμού εμβρύων που συμβαίνει περίπου 4.000 φορές την ημέρα σε ολόκληρο τον κόσμο.

Η φυλετική ή αλλιώς ασεξουαλική αναπαραγωγή είναι, είτε ο μοναδικός είτε ένας από τους κύριους τρόπους αναπαραγωγής πολύ μεγάλου αριθμού οργανισμών. Πρέπει μάλιστα να τονιστεί πως η φυλετική ή αλλιώς σεξουαλική αναπαραγωγή είναι προνόμιο των πλέον εξελιγμένων οργανισμών. Σε αυτή τη περίπτωση αντί οι απόγονοι να αποτελούν ακριβή αντίγραφα ενός γονέα (όσο επιτυχημένος και αν είναι αυτός στη μάχη της επιβίωσης) αποτελούν μια νέα πρόταση από τον συνδυασμό των γενετικά κληρονομούμενων ιδιοτήτων δύο επιτυχημένων οργανισμών. Οι φυλετικά αναπαραγόμενοι οργανισμοί φέρουν δύο σειρές χρωμοσωμάτων μία από τον πατέρα τους και μία από τη μητέρα τους. Έτσι για κάθε πρωτεΐνη που συνθέτουν έχουν δύο ανεξάρτητες σειρές οδηγιών που μπορεί να είναι και διαφορετικές μεταξύ τους. Σε αυτή μάλιστα την περίπτωση οι φυλετικά αναπαραγόμενοι οργανισμοί έχουν να επιδείξουν μεγαλύτερο εύρος αντιδράσεων ή αντοχής ή δραστηριότητας που πηγάζουν από τις διαφορετικές ιδιότητες των δύο πρωτεϊνών. Είναι μάλιστα δυνατόν η μία μορφή και η αντίστοιχη λειτουργικότητα να κυριαρχεί και να εκφράζεται, και η άλλη να λανθάνει έως ότου βρεθεί σε ομόζυγη κατάσταση σε μία από τις επόμενες γενιές. Όταν το υπολειπόμενο χαρακτηριστικό τύχει να κληρονομηθεί και από τους δύο γονείς, τότε θα εκφραστεί και θα δοκιμαστεί η συμβατότητα της διαφορετικότητάς του, που θα οδηγήσει σε μεγαλύτερα ή μικρότερα ποσοστά επιβίωσης και αναπαραγωγής των φορέων του.

Η απλούστερη μεθοδολογία δημιουργίας κλώνων είναι η εργαστηριακή αναπαραγωγή της δημιουργίας των μονοζυγωτικών διδύμων. Σε αυτήν την περίπτωση το γονιμοποιημένο ωάριο, που φέρει και τις δύο σειρές γενετικής πληροφορίας αφήνεται να προχωρήσει στην πρώτη διαίρεση. Στη συνέχεια τα δύο πανομοιότυπα γενετικά κύτταρα που προκύπτουν διαχωρίζονται και οδηγούνται προς την ανάπτυξη δύο γενετικά πανομοιότυπων οργανισμών - κλώνων. Η δημιουργία κλώνων από γονιμοποιημένα ωάρια και από πρόωιμα εμβρυικά κύτταρα είναι μια σχετικά εύκολη διαδικασία, αφού τα κύτταρα αυτά δεν έχουν ακόμη αρχίσει να διαφοροποιούνται, να παίρνουν, δηλαδή, τον μονοσήμαντο δρόμο που θα τα οδηγήσει στην τελική ενήλικη μορφή και λειτουργία τους. Όλα αυτά είναι γνωστά από τη δεκαετία του 1970 οπότε

είχαν δημιουργηθεί κλώνοι βατράχων (Laskey and Gurdon 1970). Αυτό ήταν δυνατόν, γιατί τόσο η γονιμοποίηση του ωαρίου από το σπερματοζωάριο όσο και η ανάπτυξη του εμβρύου γίνεται στο νερό έξω από το σώμα του θηλυκού βατράχου. Στην περίπτωση των θηλαστικών έπρεπε πρώτα να αναπτυχθεί η μέθοδος της εξωσωματικής γονιμοποίησης και στη συνέχεια της εμφύτευσης του γονιμοποιημένου ωαρίου στη μήτρα. Αναφερόμαστε στα πλήρως αποδεκτά 'παιδιά του σολιήνα', τα οποία αποτελούν περίπου το 20% των παιδιών που γεννιούνται στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια.

Με δεδομένη τη δυνατότητα εξωσωματικής γονιμοποίησης δοκιμάστηκε η δημιουργία ενός οργανισμού που από το πρώτο κίτλας κύτταρό του θα έχει γενετικό υλικό από ένα μόνο ενήλικο άτομο, του οποίου θα αποτελεί κλώνο. Πρόκειται για ένα διαφορετικό τύπο κλωνοποίησης που ονομάζεται πυρηνική μεταφορά. Σε αυτήν την περίπτωση, το γενετικό υλικό ενός ώριμου οργανισμού που βρίσκεται στον πυρήνα ενός σωματικού κυττάρου μεταφέρεται σε ένα ωάριο του οποίου ο πυρήνας και επομένως το γενετικό υλικό είχε αφαιρεθεί. Με το τέλος της διαδικασίας της πυρηνικής μεταφοράς το ωάριο έχει δύο πλήρεις σειρές γενετικού υλικού στον πυρήνα του και μπορεί να συμπεριφερθεί σα να ήταν γονιμοποιημένο, αφήνεται λοιπόν να αναπτυχθεί και τη κατάλληλη στιγμή εμφυτεύεται στη μήτρα του οργανισμού που θα το κυοφορήσει. Η μεγάλη έκπληξη που συνόδευσε την εμφάνιση της Ντόλυ έγκειται στην ανασκευή της άποψης πως τα σωματικά κύτταρα του ώριμου οργανισμού έχουν απολέσει ανεπιστρεπτί την ικανότητά τους να επιστρέψουν στην πρώιμη εμβρυϊκή τους κατάσταση και να δώσουν όλο το φάσμα των δεκάδων ειδών κυττάρων από τα οποία αποτελείται ένας ώριμος άνθρωπος. Η δυνατότητα 'αναζωογόνησης' των διαφοροποιημένων σωματικών κυττάρων των θηλαστικών επιβεβαιώθηκε με τη δημιουργία μια σειράς κλώνων άλλων οργανισμών, όπως ποντικών (Wakayama and Yanagimachi 2001), βοειδών (Lanza et al. 2001), χοίρων (Bethausen et al. 2000), των οποίων ο κατάλογος συνεχώς αυξάνει και μεταξύ των οποίων αναμένεται να συμπεριληφθεί και ο άνθρωπος.

Παρά τις κοινωνικές αντιδράσεις ή μάλλον εν μέσω αυτών, η επιτυχής κλωνοποίηση θηλαστικών οδηγεί στη διερεύνηση των επόμενων δύο πολύ σημαντικών δυνατοτήτων, την αναπαραγωγική κλωνοποίηση και τη φαρμακευτική κλωνοποίηση. Ως αναπαραγωγική ορίζεται η κλωνοποίηση που αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός υγιούς αυτόνομου οργανισμού που θα περιέχει το επιθυμητό γενετικό υλικό. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να θυμίσουμε την τεράστια διάδοση που έχει η τεχνική της εξωσωματικής γονιμοποίησης και



την, εντελώς κατανοητή από βιολογική άποψη, απαίτηση της αναπαραγωγής των γονιδίων τους από όλους τους ανθρώπους. Η αναπαραγωγική κλωνοποίηση ζώων που θα έμπαιναν στην αλυσίδα της διατροφής είτε πολύ περισσότερο ανθρώπων θα πρέπει κατ' αρχήν να αντιμετωπίσει μια σειρά από φρικτά σενάρια σχετικά με την υγεία των κλώνων. Όπως οι απολογητές της αναπαραγωγικής κλωνοποίησης σημειώνουν 'στην ουσία όλες οι ανωμαλίες που παρουσιάζονται στους κλώνους παρατηρούνται και κατά τη φυσική αναπαραγωγή αλλά σε πολύ μικρότερες αναλογίες' (Cibelli et al. 2002). Βέβαια ακόμα και στην παραπάνω αναφορά, δεν περνάει απαρατήρητη η εξαιρετικά υψηλή αναλογία των αποβολών σε εγκυμοσύνες κλωνοποιημένων εμβρύων, που ξεπερνάει το 50% στις περισσότερες μελέτες. Οι ανωμαλίες αυτές αποδίδονται τόσο στους χειρισμούς προετοιμασίας των κυττάρων για τη μεταφορά του γενετικού υλικού όσο και σε ανωμαλίες στη διαδικασία μεθυλίωσης και απομεθυλίωσης του DNA στα κλωνοποιημένα έμβρυα αλλά και στους απογόνους τους. Σημειώνουμε πως η διαδικασία μεθυλίωσης – απομεθυλίωσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην έκφραση των γονιδίων κατά τη διάρκεια της εμβρυϊκής ανάπτυξης.

Οι προοπτικές της αναπαραγωγικής κλωνοποίησης θηλαστικών για κτηνοτροφικούς σκοπούς είναι τεράστιες, κάτι που πιστοποιείται από το καθεστώς της εμπορίας των σπόρων για τις καλλιέργειες των φυτών. Στη σύγχρονη γεωργία όλοι οι σπόροι που χρησιμοποιούνται είναι υβρίδια με εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής, εμφάνισης, ποιότητας και προέρχονται από συγκεκριμένα εργαστήρια. Είναι επομένως αναμενόμενη η παραγωγή στείρων ζώων με εξαιρετικές ιδιότητες γαλακτοπαραγωγής ή κρεατοπαραγωγής ή /και αντοχής σε ασθένειες που όμως θα διατίθενται από ένα ή περισσότερους συγκεκριμένους φορείς προς τους κτηνοτρόφους.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και η Μεγάλη Βρετανία πρωτοστατούν στην προσπάθεια νομοθετικής απαγόρευσης της κλωνοποίησης ανθρώπων. Η Ελλάδα είναι μία από τις πρώτες πέντε χώρες που επικύρωσαν το Πρωτόκολλο για την Απαγόρευση του Κλωνισμού Ανθρώπινων Όντων του Συμβουλίου της Ευρώπης, το οποίο εντάσσεται στη 'Συνθήκη για τα Ανθρώπινα Δικαιώματα και τη Βιοϊατρική'. Ταυτόχρονα η έλλειψη τέτοιου τύπου νομοθεσίας σε δεκάδες άλλα κράτη αφήνει ανοικτή τη δυνατότητα κλωνοποίησης ανθρώπων.

Ως φαρμακευτική κλωνοποίηση ορίζεται εκείνη που έχει σα στόχο όχι την παραγωγή ενός αυτόνομου οργανισμού αντιγράφου, αλλά ενός οργάνου όπως το δέρμα, η καρδιά, το συκώτι, που θα μπορούσε να αντικαταστήσει το

άρρωστο ή κατεστραμμένο όργανο του δότη του γενετικού υλικού. Από τεχνικής πλευράς οι μεταμοσχεύσεις που εκτελούνται σήμερα, μολοντί εξαιρετικά πολύπλοκες και επικίνδυνες, αντιμετωπίζουν πέρα από τα προβλήματα συμβατότητας, το πρόβλημα έλλειψης αρκετών οργάνων για μεταμόσχευση. Η φαρμακευτική κλωνοποίηση λύνει ταυτόχρονα και το πρόβλημα της προέλευσης και εκείνο της συμβατότητας αφού ο δότης και ο δέκτης ταυτίζονται. Οι προσπάθειες στη φαρμακευτική κλωνοποίηση εστιάζονται σε δύο στόχους: πρώτον το τεχνικό πρόβλημα της αξιοποίησης των πλέον κατάλληλων κυττάρων από τον ασθενή δότη και δεύτερον τη χρησιμοποίηση των πρωϊμότερων δυνατών κυττάρων από το κλωνοποιημένο έμβρυο.

Η διαδικασία της φαρμακευτικής κλωνοποίησης προσπαθεί να αποφύγει την παρακάτω αλληλουχία που είναι δυνατή με τα σημερινά δεδομένα. Πυρήνας από ώριμο κύτταρο του δότη - μεταφορά σε ωάριο χωρίς πυρήνα - ανάπτυξη βλαστομεριδίου - σχηματισμός εμβρυϊκών οργάνων - αφαίρεση και ανάπτυξη του ή των αναγκαίων οργάνων *in vitro* - μεταμόσχευση στον δότη. Κατά την πρώτη προσέγγιση επιχειρείται ο εξαναγκασμός σε διαφοροποίηση στο απαιτούμενο όργανο μέρους ή του συνόλου των κυττάρων του βλαστομεριδίου που προέρχεται από τις πρώτες διαιρέσεις του κλωνοποιημένου κυττάρου. Σε αυτήν την περίπτωση παρακάμπτεται το στάδιο του σχηματισμού των αρχέγονων εμβρυϊκών οργάνων και η αλληλουχία γίνεται: Πυρήνας από ώριμο κύτταρο του δότη - μεταφορά σε ωάριο χωρίς πυρήνα - ανάπτυξη βλαστομεριδίου - ανάπτυξη του ή των αναγκαίων οργάνων *in vitro* - μεταμόσχευση στον δότη. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στην αποδιαφοροποίηση των κυττάρων του δότη, ώστε να επιστρέψουν στο στάδιο του σχηματισμού του οργάνου από το οποίο προέρχονται. Σε αυτήν την περίπτωση δεν περνάμε από κάποιο στάδιο πολυδυναμίας και η αλληλουχία γίνεται: Ώριμο κύτταρο του δότη - αποδιαφοροποίηση - σχηματισμός εμβρυϊκών οργάνων *in vitro* - ανάπτυξη ωρίμανση των οργάνων - μεταμόσχευση στον δότη. Και οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις εξυπηρετούν την απομάκρυνση από το ηθικό δίλημμα της αυτονομίας του εμβρύου και των δικαιωμάτων του ως εν δυνάμει ανθρώπου. Οι προοπτικές της φαρμακευτικής κλωνοποίησης είναι προφανείς. Η δυνατότητα δημιουργίας ανταλλακτικών οργάνων για την αντικατάσταση των φθαρμένων θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια εξαιρετική βελτίωση τόσο της ποιότητας της ζωής των ανθρώπων όσο και σε μια πιθανή αύξηση της διάρκειάς της. Φαίνεται μάλιστα πως η έρευνα των δυνατοτήτων των βλαστικών κυττάρων, που είναι τα πλέον κατάλληλα για την αναδημιουργία

για συγκεκριμένων ιστών, ευνοείται επειδή απομακρύνεται από τη δημιουργία εν δυνάμει αυτόνομου οργανισμού.

### Πόσο γενναίος και πόσο νέος είναι ο τρέχων γενναίος νέος κόσμος

Θα χρειαστεί τουλάχιστον άλλη μια γενιά για να αφομοιωθούν, από τον αναπτυσσόμενο κόσμο βέβαια, οι αλλαγές που συνόδευσαν το τελευταίο τέταρτο του εικοστού αιώνα. Η καθημερινή χρήση εξαιρετικά ισχυρών ηλεκτρονικών υπολογιστών, η επεξεργαστική ισχύς των οποίων εξακολουθεί να διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες σύμφωνα με τον νόμο του Moore (Leyden 1997), οι δορυφορικές τηλεπικοινωνίες που οδήγησαν στο όποιο 'παγκόσμιο χωριό' και τέλος η δυνατότητα χειρισμού των γονιδίων και η δημιουργία οργανισμών κατά παραγγελία, περιγράφουν αποσπασματικά και ελλιπώς την πραγματική όψη των αλλαγών αυτών. Αλλά προφανώς τα πράγματα δεν έχουν σταματήσει ως εδώ. Πέρα από τις προοπτικές στον χώρο της μοριακής βιολογίας και της γενετικής, στις οποίες αναφερθήκαμε με κάποια διεξοδικότητα, οι έρευνες συνεχίζονται σε όλους τους τομείς. Από τη μελέτη του εγκεφάλου, όπου η γνώση συσσωρεύεται με εκρηκτικό ρυθμό, ως τη θεωρία των πάντων που θα ενιαιοποιήσει την άποψή μας για τη φύση του κόσμου, που προσπαθούν να αναπτύξουν οι ερευνητές της φυσικής, τίποτε δεν μοιάζει να πλησιάζει προς το τέλος, ούτε καν προς την αρχή του τέλους. Ίσως μάλιστα να μην είμαστε κοντά ούτε στο τέλος της αρχής. Οι αλληλεπιδράσεις των νέων τεχνολογιών και η επόμενη γενιά εκπλήξεων που θα ξεπηδήσει από τα ερευνητικά κέντρα θα προκαλέσουν τη δυνατότητα τουλάχιστον των ανθρώπων να προσαρμόζονται σε τόσο ταχέως μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Ίσως δεν υπάρχει ισχυρότερο επιχείρημα σε αυτήν την κατεύθυνση, από την εμφάνιση του όρου 'δια βίου εκπαίδευση' που σηματοδοτεί την απαξίωση της γνώσης σε μία ή δύο δεκαετίες και την ανάγκη επανεκπαίδευσης του ήδη έμπειρου εργατικού δυναμικού.

Χωρίς να έχουμε τη διάθεση να υποτιμήσουμε τις ανακαλύψεις που αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους, θα πρέπει να αναλογιστούμε ότι η επιστημονική και τεχνική πρόοδος είναι αναπόσπαστο κομμάτι της εξέλιξης του ανθρώπινου πολιτισμού. Σίγουρα η πράσινη επανάσταση απετέλεσε ένα εγχείρημα που με λιγότερα μέσα επεχείρησε να λύσει το πρόβλημα της πείνας σε παγκόσμιο επίπεδο. Για να είμαστε ακόμη πιο σαφείς τα ορόσημα στην εξέλιξη της βιοτεχνολογίας έχουν σημαδέψει την εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού σε τέτοιο βαθμό ώστε οι εφαρμογές που μας απασχόλησαν

στις προηγούμενες παραγράφους να μην αποτελούν παρά τη φυσική επέκταση παλαιότερων καινοτομιών. Η εξημέρωση των ζώων που οδήγησε στις νομαδικές κοινωνίες, η εισαγωγή της γεωργίας που έφερε τη μονιμότητα στην εγκατάσταση των ανθρωπίνων πληθυσμών, η αξιοποίηση των ζυμώσεων για την παραγωγή ή τη συντήρηση των τροφίμων (ψωμί, κρασί), αποτελούν προϊστορικές καινοτομίες πολλές από τις οποίες αποδόθηκαν στους θεούς. Η σύνδεση των νέων ανακαλύψεων με την ιστορική τους ρίζα βοηθά να εκτιμήσουμε καλύτερα τόσο τις δυνατότητές τους όσο και τη σημασία των προηγούμενων τεχνολογικών επαναστάσεων. Έσως μάλιστα να αποκτήσουμε καλύτερη εποπτεία των 'θαυμαστών νέων κόσμων' του παρελθόντος αν απαγκιστρωθούμε από την επιστήμη της βιολογίας και αναλογιστούμε την επίδραση τεχνολογικών εξελίξεων όπως η τιθάσευση της φωτιάς, η αγγειοπλαστική, η μεταλλουργία και στη συνέχεια η γραφή. Οι αλλαγές που επέφεραν οι προϊστορικές αυτές ανακαλύψεις στη ζωή των ανθρώπων ξεπερνάνε κατά πολύ τα όρια και τους στόχους του παρόντος κειμένου. Η δημιουργία ειδών οικόσιτων ζώων όπως ο σκύλος και η γάτα, ή ειδών για κτηνοτροφία, η επιλογή και η εξάπλωση των πλέον χρήσιμων στον άνθρωπο ποικιλιών ρυζιού ή άλλων δημητριακών δεν διαφέρει στο αποτέλεσμα της από τη δημιουργία γενετικά τροποποιημένων οργανισμών. Με αυτήν την έννοια η προϊστορική δυνατότητα του ανθρώπου να επάγει τη δημιουργία νέων ειδών, παρεμβαίνοντας στο επίπεδο του πληθυσμού, βελτιώνεται με τη δυνατότητα του χειρισμού του γενετικού υλικού των διαφόρων οργανισμών. Στο παράδειγμα μάλιστα της ανάπτυξης ανθρώπινων οργάνων για μεταμόσχευση σε κατοικίδια ζώα, μπορούμε να επιλέξουμε ποια τεχνική είναι πιο σημαντική και αποτελεί προϋπόθεση για τις επόμενες: η εκτροφή κατοικίδιων ζώων, η μεταμόσχευση οργάνων, ή τέλος η ανάπτυξη ανθρώπινων οργάνων κατά παραγγελία. Ακόμη και η επίδραση του ανθρώπου στο περιβάλλον του φαίνεται πολύ πιο ισχυρή κατά την προϊστορική περίοδο. Είναι προφανές πως η δημιουργία νέων ειδών κατά παραγγελία, όπως ακριβώς έκανε ο προϊστορικός άνθρωπος, αποτελεί υψηλού επιπέδου παρέμβαση στις οικολογικές ισορροπίες. Και όπως οι ιστορικές μελέτες βεβαιώνουν όλα αυτά δεν έγιναν χωρίς κόστος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ξεπεράσματος των ορίων αντοχής και οριστικής κατάρρευσης ενός οικοσυστήματος αποτελούν οι κρεμαστοί κήποι της Βαβυλώνας στην εύφορη κοιλάδα της Μεσοποταμίας όπου η εντατική καλλιέργεια (πολύ πριν τις σύγχρονες τεχνικές) οδήγησε στην εξάντληση της γονιμότητας του εδάφους και στη δημιουργία μιας αφιλόξενης ερήμου.



## Αλλάζοντας τον κόσμο

Ο κόσμος όπως τουλάχιστον μας προτείνουν οι τρέχουσες επιστημονικές αντιλήψεις είναι ένα διαρκές πείραμα. Από τη φύση του λοιπόν δεν είναι ούτε σταθερός, ούτε αιώνιος, είναι εξελικτέος. Στα διάφορα σημεία του σύμπαντος δοκιμάζονται διάφοροι συνδυασμοί παραγόντων και οι συνέπειες αυτών των δοκιμών διαγράφουν τη δική τους πορεία. Ένα από τα πειράματα σε εξέλιξη είναι η ζωή όπως την ξέρουμε. Τα ζωντανά συστήματα σε αντίθεση με τα υπόλοιπα αντιπαλεύουν το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα πως η φυσική κατάρλιξη κάθε διατεταγμένου συστήματος είναι η αποδιάταξή του. Τα ζωντανά συστήματα έχουν αναπτύξει μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να διατηρούν την οργάνωσή τους καταναλώνοντας ενέργεια ή αλλιώς αποδιατάσσοντας το περιβάλλον τους. Ένας από τους μηχανισμούς διατήρησης της ζωής είναι η αναπαραγωγή των ζωντανών οργανισμών που αποτελεί τη μόνη εγγυημένη μορφή αθανασίας της γενετικής πληροφορίας που ορίζει τη δομή και τη λειτουργικότητα των ζωντανών συστημάτων. Μια προκλητική απάντηση στο ερώτημα 'ή κότα έκανε το αυγό ή το αυγό την κότα' ορίζει πως η κότα είναι ένα μέσο που χρησιμοποιούν τα αυγά για να ξαναφτιάξουν τον εαυτό τους. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση οι ζωντανοί οργανισμοί όχι μόνο είναι αποτέλεσμα των οδηγιών που υπάρχουν στα γονίδια αλλά ταυτόχρονα συνιστούν μηχανισμούς που εξασφαλίζουν την αθανασία των γονιδίων εντών (Dawkins 1998). Η διατήρηση των όσων μαθαίνουμε και η διαφυγή της γνώσης από τη φθορά που επιβάλει το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα παρενέργεια του αγώνα για τη διατήρηση της γενετικής πληροφορίας. Σε μια σχηματική περιγραφή η ιστορία της εξέλιξης του ανθρώπινου πολιτισμού μπορεί να υποστηριχθεί πως η απόκτηση, συντήρηση και αξιοποίηση της γνώσης είναι μια εξαιρετικά αποδοτική στρατηγική στον αγώνα για τη διατήρηση και την αναπαραγωγή της γενετικής πληροφορίας. Το να καταλαβαίνουμε αυτό τον κόσμο, όσο περιέργο και αν φαίνεται, αποτελεί συνέπεια των φυσικών του ιδιοτήτων.

Το ανθρώπινο είδος έχει επιβιώσει και στη συνέχεια έχει κυριαρχήσει πάνω στη γη και πέρα από αυτή, με βάση τα εξελικτικά εγκαθιδρυμένα εξερευνητικά και κατακτητικά χαρακτηριστικά του. Το ανθρώπινο είδος από πολύ νωρίς δεν αρκείται στην ικανότητά του να προσαρμόζεται στο περιβάλλον του. Ο άνθρωπος, όπως και μεταξύ άλλων ορισμένα είδη πουλιών, προσαρμόζει το περιβάλλον στις ανάγκες του κατασκευάζοντας ασφαλή καταφύγια που θα τον προστατεύσουν από τους εχθρούς του και τις δυσκολίες

καιρικές συνθήκες. Εκείνο που μοιάζει να διαφοροποιεί το ανθρώπινο είδος είναι η εξερευνητική του διάθεση, η προθυμία του να δοκιμάσει, που σε κάποιες περιπτώσεις του ανταμείβει με μια καινούργια απάντηση στα παλιά προβλήματα. Ως ερευνητής ο άνθρωπος είναι αντιφατικός, αιτείται την κατάκτηση νέων γνώσεων και δυνατοτήτων και ταυτόχρονα επιμένει στην παραγωγή των δομών που τον έφεραν σε αυτό το σημείο. Οι άνθρωποι πολιτισμοί στους οποίους κυριάρχησε η διατήρηση των υφιστάμενων δομών απέτυχαν να εξελιχθούν και τελικά αποδυναμώθηκαν εκ των έσω, πριν καταρρεύσουν είτε για εσωτερικούς είτε για εξωτερικούς λόγους. Στον Δυτικό κόσμο η εξάπλωση του ορθολογισμού υπερίσχυσε της παραδοσιακής ακαμψίας των παραδόσεων – όχι χωρίς κόστος. Η ιστορία της επιστήμης είναι γεμάτη παραδείγματα που η καινούργια γνώση δεν γίνεται αποδεκτή, επειδή έρχεται σε σύγκρουση με τις προηγούμενες αντιλήψεις. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τη σύγκρουση της καθολικής εκκλησίας με τον Γαλιλαίο και τη σύγκρουση του Δαρβίνου ως ερευνητή με τον εαυτό του ως θρησκευόμενο άτομο.

Από την άλλη μεριά ο άνθρωπος ως χρήστης των νέων ανακαλύψεων θα πρέπει να χαρακτηριστεί απλοϊκός. Η ανθρώπινη προσέγγιση είναι επιθετική, κοντόφθαλμα χρηστική και ανθρωποκεντρική. Ίσως οι μεγάλης κλίμακας καταστροφές, όπως η ατομική βόμβα και το ατύχημα του Τσερνομπίλ, η καταστροφή των δασών της βροχής και η ασθένεια των ‘τρελών αγελάδων’ να βοηθήσουν στον εξορθολογισμό της ανθρώπινης πρακτικής. Φαίνεται πως σε σχέση με την αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών χρησιμοποιείται ακόμη η μέθοδος ‘δοκιμή και πλάνη’. Αυτό όμως δεν μπορεί να συνεχιστεί. Άλλωστε η ταχύτητα των εξελίξεων θα επιβάλει την αξιολόγηση των εφαρμογών που είναι δυνατές και την επιλογή όσων είναι επιθυμητές. Με αυτή την έννοια οι αντιπαραθέσεις και οι συζητήσεις σε όλο και ευρύτερο κύκλο και με όλο και πιο ουσιαστικά επιχειρήματα γύρω από τα ηθικά, νομικά και κοινωνικά ζητήματα των νέων εφαρμογών δείχνουν στη σωστή κατεύθυνση.

Το ανθρώπινο είδος, ως φορέας νοημοσύνης, αποτελεί εξαιρετικό προϊόν του υποπειράματος της ζωής στα πλαίσια του πειράματος του κόσμου. Όμως ο άνθρωπος είναι ένα εξαιρετικά κακό πειραματόζωο τουλάχιστον για τους ερευνητές της βιολογίας. Αργεί να ενηλικιωθεί, επομένως δεν είναι δυνατή η παρακολούθηση των αποτελεσμάτων των επεμβάσεων μετά από μερικές γενιές. Χρειάζεται πολύ χώρο και έχει εξαιρετικές απαιτήσεις διαβίωσης, επομένως η απομόνωσή του σε ελεγχόμενες συνθήκες είναι εξαιρετικά δαπανηρή. Το χειρότερο όμως είναι πως τη σχετικά μικρή φυσιολογική ποικι-

λομορφία του υπερκαλύπτει η προσωπικότητα που διαθέτει και καθιστά τον κάθε άνθρωπο εντελώς μοναδικό και απρόβλεπτο. Οι δυσκολίες μάλιστα του πειραματισμού με ανθρώπους φαίνεται να έχουν κοστίσει ιδιαίτερα στις λεγόμενες ανθρωπιστικές επιστήμες σε σύγκριση με τις θετικές που βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε αυτόν. Από την πλευρά της βιολογίας πάντως, είναι αρκετή η μεγάλη ομοιότητα του γενετικού, βιολογικού και φυσιολογικού υποβάθρου του ανθρώπινου είδους με εκείνη των υπόλοιπων οργανισμών. Επομένως από τη σκοπιά των βιολόγων είναι δυνατή η μελέτη των πλέον βασικών και θεμελιωδών ερωτημάτων, με την αξιοποίηση άλλων οργανισμών μοντέλων όπως ο ποντικός και ο πίθηκος χωρίς να απαιτείται η εκτεταμένη χρήση ανθρώπων-πειραματόζωων.

Η κατάληξη της προηγούμενης παραγράφου αποσκοπεί και στην ανακίνηση του θέματος της αυτοεκτίμησης του ανθρώπου και πόσο αυτή διαφοροποιείται ανάμεσα στους διάφορους πολιτισμούς. Πέρα δηλαδή από τον πειραματισμό σε ανθρώπους μπορούμε να αξιολογήσουμε την αξία που ένας πολιτισμός αποδίδει στον άνθρωπο εξετάζοντας μεταξύ άλλων την ύπαρξη ή όχι της θανατικής ποινής, ή τη θέση των γυναικών και των παιδιών. Οι διαφορετικές επιλογές των πολιτών της Ευρώπης και της Αμερικής σε σχέση με την κατανάλωση γενετικά τροποποιημένων τροφών και οι επιλογές των κοινωνιών σε σχέση με την αποδοχή των τεχνολογιών άλλα και των προτύπων και των αξιών που αυτές προβάλλουν, αποτελούν πηγή ποικιλομορφίας. Από αυτήν την ποικιλομορφία που πραγματώνεται με τη μορφή των διαφορετικών απαντήσεων στο ερώτημα πόση και ποια τεχνολογική ανάπτυξη επιθυμούμε, θα προκύψουν οι σωστές απαντήσεις που μπορεί να είναι και περισσότερες από μία. Η θέση των ερευνητών είναι πως η γνώση είναι δύναμη και η άποψή τους για το μέλλον αισιόδοξη. Ο άνθρωπος μπορεί να λύσει τα προβλήματα στα οποία είναι μπλεγμένος και ο ίδιος. Η ίδια η εξέλιξη του ανθρώπου αποτελεί μια πρόταση λύσης στο πρόβλημα της διατήρησης της ζωής στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Η εξέλιξη των πολιτισμών δεν είναι παρά συνεχείς προτάσεις με θέμα την καλύτερη οργάνωση της ανθρώπινης κοινωνίας. Θα πρέπει να σημειώσουμε πως ποτέ άλλοτε ο άνθρωπος δεν είχε στα χέρια του τόση δύναμη. Αλλά πάλι, η φωτιά που ο Προμηθέας έκλεψε από τους θεούς, έχει κάψει δάση και χωριά και έχει ζεστάνει ανθρώπους.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Bethausen, J. et al. (2000). *Nat. Biotechnol.* 18: 1055-9.
- Campbell, K.H., McWhir, J., Ritchie, W.A., Wilmut, I. (1996). 'Sheep Cloned by Nuclear Transfer from a Cultured Cell Line'. *Nature* 380(6569): 64-6.
- Celera Genomics. (2002) <http://www.celera.com>
- Cibelli, J.B., Campbell, K.H., Seidel, G.E., West, M.D. ad Lanza, R.P. (2002). 'The Health Profile of Cloned Animals'. *Nature Biotechnology* 20: 13-4.
- Collins, F.S., Patrinos, A., Elke, J., Chakravarti A., Gesteland, R., Walters, L., and the members of the DOE and NIH planning groups(1998). 'New Goals for the U.S. Human Genome Project: 1998-2003'. *Science* 282: 682-689.
- Craig Venter, J. et.al. (2001). *Science* 291: 1318.
- Dawkins, R. (1998). *Το Εγωϊστικό Γονίδιο*. Αθήνα: Σύνταγμα.
- Doyle, J.D., Short, K.A., Stotzky, G., King, R.J., Seidler, R.J., Olsen, R.H.(1991). 'Ecologically Significant Effects of *Pseudomonas Putida* PPO301(pRO103), Genetically Engineered to Degrade 2,4-Dichlorophenoxy- Acetate, on Microbial Populations and Processes in Soil'. *Can J Microbiol* 37(9): 682-91.
- International Human Genome Sequencing Consortium (2001). 'Initial Sequencing and Analysis of the Human Genome'. *Nature* 409: 860.
- Jackson, D.A., Symons, R.H., Berg, P. (1972). 'Biochemical Method for Inserting New Genetic Information into DNA of Simian Virus 40: Circular SV40 DNA Molecules Containing Lambda Phage Genes and the Galactose Operon of *Escherichia Coli*'. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 69(10): 2904-9.
- Lanza, R.P. et al. (2001). *Science* 294: 1893-4.
- Laskey, R.A., Gurdon, J.B. (1970). 'Genetic Content of Adult Somatic Cells Tested by Nuclear Transplantation from Cultured Cells'. *Nature* 228(278): 1332-4.
- Leyden, P. (1997). 'Moore's Law Repealed, Sort OF'. *Wired Magazine* 5.05.
- Monsanto (2002). 'Company Timeline / History. 1976' 1988: The Move Toward Biology... <http://www.monsanto.com/monsanto/layout/careers/timeline/timeline5.asp>
- Morrow, J.F., Cohen, S.N., Chang, A.C., Boyer, H.W., Goodman, H.M., Helling, R.B.. (1974). 'Replication and Transcription of Eukaryotic DNA in *Escherichia Coli*'. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 71(5): 1743-7.



- Nat Genet Editorial (2001). 'Defining a New Bioethic'. *Nat Genet.* 28(4): 297-8.
- Science debates (1996). *Science* 273: 1638-1643.
- Stratidaki, I., Skoulika, E., Kelefiotis, D., Matrella, E., Alexandrakis, G., Economou, A., Kouroumalis, E. (2001). 'NS5A Mutations Predict Biochemical but not Virological Response to Interferon-alpha Treatment of Sporadic Hepatitis C Virus Infection in European Patients'. *J Viral Hepat.* 8(4): 243-8.
- The United States Human Genome Project (1991). 'Understanding Our Genetic Inheritance . The First Five Years: Fiscal Years 1991-1995'. <http://www.genome.gov/page.cfm?pageID=10001477>
- U.S. Department of Energy Human Genome Program (2002). 'Genomics and Its Impact on Medicine and Society.A 2001 Primer'. <http://www.ornl.gov/hgmis>
- Wakayama, T. and Yanagimachi, R. (2001). *Mol.Rep.Dev.* 58: 376-383.
- Watson, J.D., and Crick, F.H.C. (1953). 'Molecular Structure of Nucleic Acids. A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid'. *Nature* 171: 737-738.