

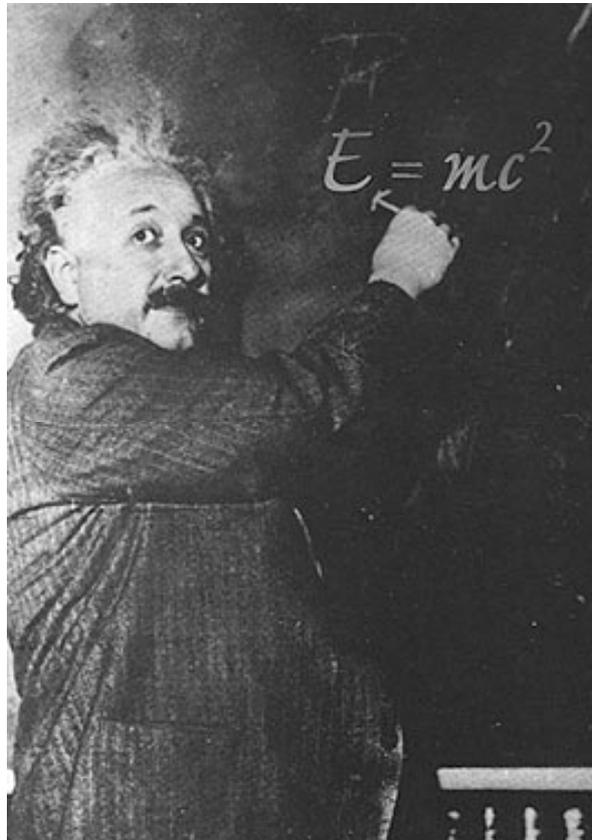
**Lorenzo Aparo**

***Applicazioni della  
Relatività Speciale***

**Esame di stato 2007**

**Liceo Scientifico Statale "Farnesina" - ROMA  
V sez. C - PNI**

## Le applicazioni della relatività speciale



### La relatività speciale

Tutto inizia nel 1632 quando Galileo Galilei, fisico, filosofo, astronomo e matematico, nel suo *“Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano”* espone il principio di relatività. Si avvale dell’esempio della nave che viaggia a velocità costante senza beccheggio o rollio, su un mare piatto dove un qualsiasi osservatore sotto coperta, senza riferimenti fissi esterni non è in grado di capire se la nave sia in moto o ferma.

Circa tre secoli dopo, nel 1905, Albert Einstein, nel suo articolo *“Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento”* presenta la teoria della relatività speciale. Einstein riprende l’esempio di Galileo e lo combina con il postulato per cui la velocità della luce è la stessa in tutti i riferimenti inerziali (ovvero quei riferimenti in cui un corpo non soggetto a forze si muove di moto rettilineo uniforme).

La teoria della relatività speciale supera il concetto newtoniano della dimensione assoluta dello spazio e del tempo, affermando che la distanza ed il tempo sono funzione dell’osservatore e che il tempo e lo spazio sono osservati in modo diverso da osservatori in stati di moto differenti. Il che porta a postulare l’equivalenza fra massa ed energia, come espresso dalla famosa uguaglianza  $E=mc^2$ , dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto. La relatività speciale, si chiama “speciale” proprio perché vale solo nel caso di sistemi inerziali.

## Applicazioni della Relatività Speciale

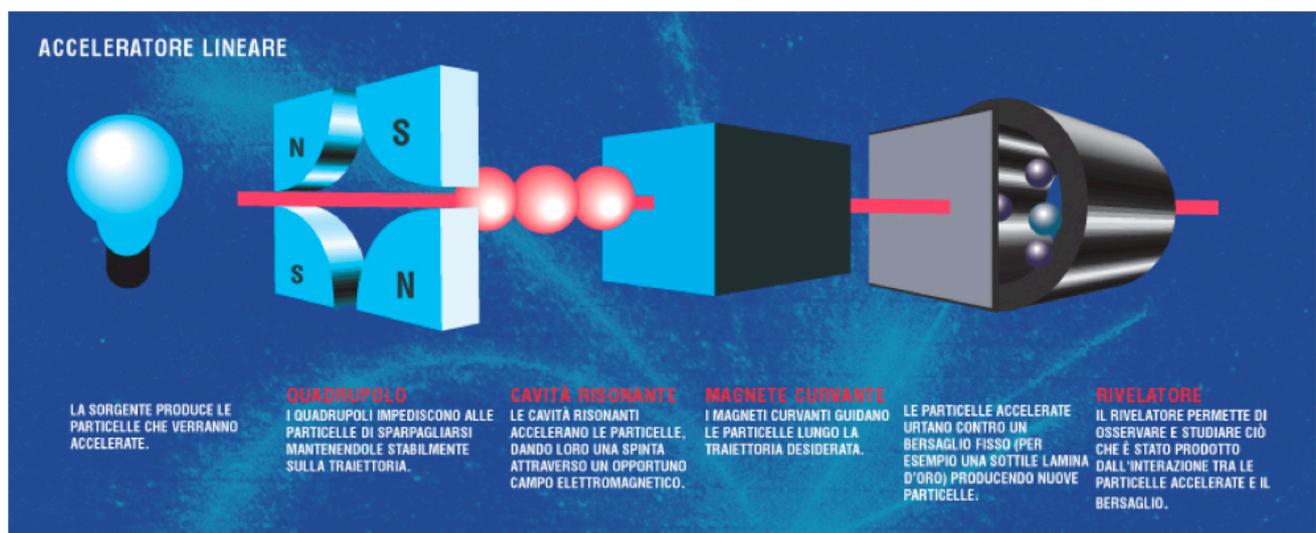
Il dominio d'applicazione naturale della relatività speciale è quello delle alte velocità, una condizione comune delle particelle subatomiche (elettroni, protoni, ...) che circolano negli acceleratori ad alta energia.

## Acceleratori

Un acceleratore di particelle è una macchina il cui scopo è quello di produrre fasci di ioni o particelle subatomiche (elettroni, positroni, protoni, antiprotoni ecc.) con "elevata" energia cinetica.

I metodi per accelerare le particelle sono basati sull'uso di campi elettrici e magnetici, dove i primi forniscono energia alle particelle accelerandole (acceleratori lineari) ed i secondi servono a curvarne la traiettoria (ad esempio negli acceleratori circolari: ciclotrone e sincrotrone) o a correggere dispersioni spaziali e d'impulso dei fasci accelerati.

In un acceleratore, dunque, si utilizzano dispositivi basati sull'uso di campi elettrici e magnetici per aumentare la velocità di particelle elettricamente cariche, ad esempio di elettroni, fino a fare loro raggiungere velocità prossime a quella della luce. Continuando ad accelerare, come stabilito dall'espressione  $E=mc^2$  non si ha più un aumento significativo della velocità, bensì un aumento incrementale dell'energia. Mentre secondo la meccanica classica il lavoro compiuto da una forza  $F$  necessario per accelerare un corpo è indipendente dalla velocità iniziale, per la meccanica relativistica non è così perché la massa è funzione della velocità. Per la fisica einsteiniana un incremento della velocità di un corpo richiede un apporto di energia tanto maggiore quanto maggiore è la velocità.



### Fisica classica

$$M = 1\text{kg}$$

$$v_i = 1\text{ms}^{-1}$$

$$v_f = 2\text{ms}^{-1} \Rightarrow F = M \frac{dv}{dt} \Rightarrow F = 1\text{kg} \frac{2\text{ms}^{-1} - 1\text{ms}^{-1}}{1\text{s}} = 1\text{N}$$

$$\Delta t = 1\text{s}$$

$$M = 1\text{kg}$$

$$v_i = c$$

$$v_f = c + 1\text{ms}^{-1} \Rightarrow F = M \frac{dv}{dt} \Rightarrow F = 1\text{kg} \frac{c + 1\text{ms}^{-1} - c}{1\text{s}} = 1\text{N}$$

$$\Delta t = 1\text{s}$$

Per passare da 1m/s a 2m/s ci vuole la stessa forza, quindi energia, che per passare da  $c$  a  $c+1\text{m/s}$ . Con questa legge tra l'altro è consentito sfrecciare ad una velocità maggiore a quella della luce.

## Applicazioni della Relatività Speciale

**Fisica relativistica**

$$M = M_0 \gamma = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

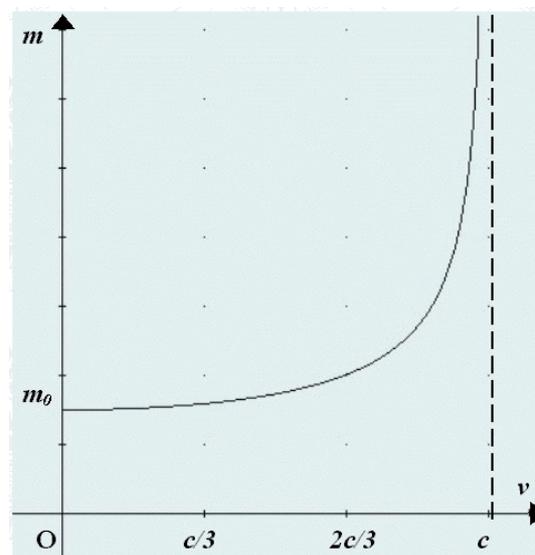
$$F = M \frac{dv}{dt} \Rightarrow F = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{dv}{dt} \Rightarrow F = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{vf - vi}{\Delta t}$$

se  $vf \rightarrow c$

$$\Downarrow$$

$$F = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \frac{vf - vi}{\Delta t} \rightarrow \infty$$

Per la fisica relativistica la forza necessaria ad aumentare la velocità di una stessa  $\Delta v$  dipende dalla velocità del corpo. Questa è anche una delle dimostrazioni per cui non è possibile superare la velocità della luce.

Andamento di  $m$  in funzione di  $v$ 

All'energia desiderata, il fascio di particelle viene fatto collidere con un bersaglio. Dall'urto vengono generate nuove particelle. Dallo studio delle particelle generate, si ricavano informazioni sulle strutture del materiale di cui è costituito il bersaglio ed anche sulle interazioni che governano il processo di generazione e annichilazione delle particelle prodotte.

Una delle idee alla base della formulazione della Meccanica Quantistica è il dualismo onda-particella: in certe condizioni, ogni particella presenta anche i comportamenti tipici delle onde, e viceversa. Il legame tra questi due aspetti è stato esplicitato dal fisico francese de Broglie il quale postula la seguente relazione tra la variabile che descrive lo stato di moto della particella (la quantità di moto  $p$ ) e la lunghezza d'onda  $\lambda$  che ad essa corrisponde:

## Applicazioni della Relatività Speciale

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad h = \text{costante di Planck}; p = \text{quantità di moto}$$

$$p = \frac{U}{c}; U = \text{energia}$$

Quindi, la relazione di de Broglie dice che quanto è maggiore l'energia delle particelle che si scontrano, tanto più è piccola la scala della distanza esplorate. Un acceleratore è una sorta di potentissimo microscopio che permette di esplorare la struttura più intima della materia: quanto più si vuole andare in profondità, tanto maggiore deve essere il potere risolutivo di questo "microscopio"

**Onda: potere risolutivo  $> \lambda$ , i.e. oggetto di dimensione  $L$  deve essere studiato con onde di  $\lambda < L$**

La lunghezza d'onda di tali onde-particelle dipende dal loro stato energetico. Questo è il motivo per cui si cerca di costruire acceleratori sempre più potenti.



Il LEP di Ginevra con un diametro di 27 Km che è stato sostituito dal LHC con un'energia massima di 1TeV

Le macchine più potenti sono quelle che consentono di fare collidere un fascio di particelle ad altissima velocità ed energia contro altre, altrettanto veloci ed energetiche, che si muovono in verso opposto. Si ha che fare con macchine ad anello, che usano potenti campi magnetici per tenere i fasci, altamente collimati, su traiettorie circolari. Questo tipo di macchina assume il nome di "collisore".

DAΦNE, acronimo che sta per Double Anular φ Factory for Nice Experiments, è l'anello di collisione per elettroni e positroni (girano in verso opposto a parità di direzione e verso del campo elettrico e magnetico a causa della carica elettrica opposta) attualmente in funzione presso i Laboratori Nazionali dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare a Frascati.

## Applicazioni della Relatività Speciale



Il rivelatore dell'esperimento Finuda di DAΦNE



DAΦNE

Un approccio complementare all'aumento di energia dei fasci è l'aumento del numero di collisioni che essi sono in grado di produrre. In questo modo la comprensione delle proprietà fondamentali della natura sta nello studio, con grandissima precisione, di fenomeni estremamente rari prodotti nelle collisioni.

La grandezza legata al numero di collisioni prende il nome di "luminosità". Per DAΦNE la luminosità  $L$  è espressa dalle relazioni che seguono.

$$L = \frac{N^{e^+} N^{e^-}}{4\pi\sigma_x\sigma_y} f = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$N^{e^+} = 2 \cdot 10^{10} \text{ numero.di.positroni}$$

$$N^{e^-} = 2 \cdot 10^{10} \text{ numero.di.elettroni}$$

$$\sigma_x = 1 \text{ mm.sezione.x.del.pacchetto}$$

$$\sigma_y = 10 \mu\text{m.sezione.y.del.pacchetto}$$

$$f = 3 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ frequenza.di.collusione}$$

La  $\phi$  di DAΦNE sta per la particella  $\phi$ , altamente instabile, di massa pari a 1,02 miliardi di elettronvolt, che decade in particelle di massa inferiore, tra cui le particelle  $K$  che contengono i quark <sup>1</sup>.

Negli anelli di DAΦNE, lunghi circa 100 metri, circolano più di cento pacchetti composti da più di 100 miliardi di particelle, che compiono più di tre milioni di giri in un secondo e le cui collisioni producono circa 2000 particelle  $\phi$  al secondo.

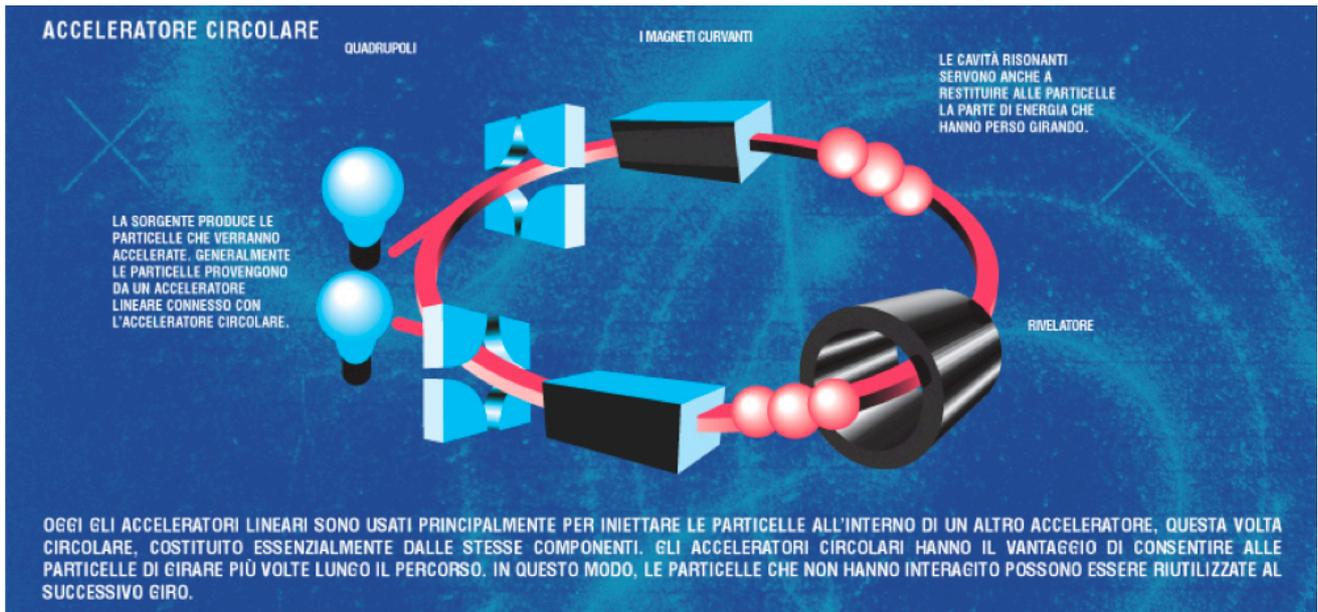
Le dimensioni di ciascun pacchetto nel punto d'interazione sono di un  $1 \text{ mm} \times 10 \mu\text{m} \times 2 \text{ cm}$  <sup>2</sup>. Per raggiungere queste dimensioni vengono utilizzati sofisticati magneti:

- i quadrupoli agiscono sulle particelle all'interno della camera a vuoto focalizzandole (come le lenti nel caso della luce);
- i dipoli generano un campo magnetico verticale rispetto alla direzione di propagazione del fascio, facendole curvare;
- i magneti superconduttori, accelerano in modo impulsivo le particelle.

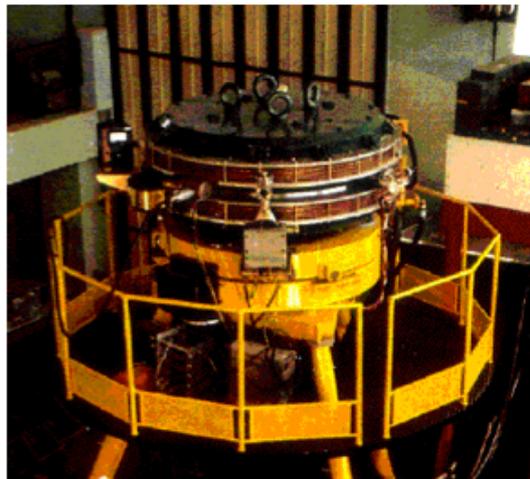
<sup>1</sup> La particella  $K$  fa parte della famiglia dei mesoni e sono anche conosciuti come Kaoni. La loro peculiarità consiste nell'essere portatori di quark "strani". La loro vita media è dell'ordine di grandezza di  $10^{-8}$  secondi

<sup>2</sup> I 2 cm sono nella direzione longitudinale, ovvero quella di moto del pacchetto; le altre sono nel piano perpendicolare a tale direzione

## Applicazioni della Relatività Speciale



DAΦNE è l'ultima evoluzione di AdA (Anello di Accumulazione), geniale invenzione di uno dei grandi fisici della seconda metà del Novecento, Bruno Touschek. Insieme a Carlo Bernardini, Gianfranco Corazza e Giorgio Ghigo, all'inizio degli anni 1960, egli concepisce e realizza, presso i Laboratori INFN di Frascati ADA, la prima macchina nel mondo nella quale pacchetti di elettroni e positroni circolano alla stessa energia ma in versi opposti.



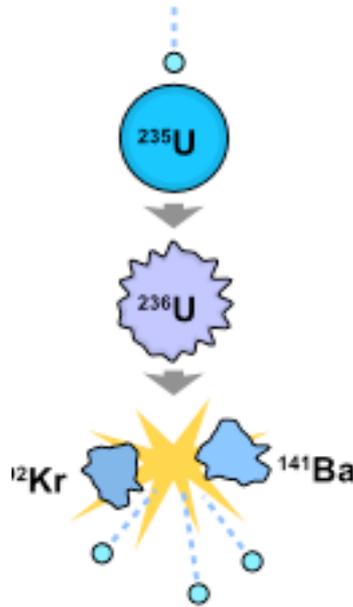
AdA

Le macchine acceleratrici, nelle loro diverse architetture, vengono usate anche per scopi industriali (60%) (impiantazione di ioni, sterilizzazione) e medici (35%) (produzione di isotopi radioattivi, terapia adronica, ecc.).



Applicazioni della Relatività Speciale

## Nuclear Fission



In this picture an atom of  $U^{235}$  is shot with a neutron, become instable and decay in Kr (Krypto) and Ba (Bario)

Let's start from the Einstein famous special relativity formula  $E=mc^2$ .

It states that mass is equivalent to energy divided by the square of the speed of light in a vacuum.

Hence, mass (energy) can be converted in energy (mass). If the nucleus of an atom is split –known as Nuclear Fission or Atomic Fission- smaller nuclei and some by-product particles –neutrons, protons, photons in form of gamma rays, beta particles (electrons) and nuclear fragments such as beta and alfa particles (Helium nuclei) - are generated. This process is a sort of elemental trasmutation. Because the total mass of these particles is lower than the original mass, energy is released.

Fission of big, heavy elements – like Uranium and Plutonium - is an exothermic reaction which releases huge amounts of energy, both as gamma rays and kinetic energy of the fragments.

If the fission process is controlled, therefore the energy release is controlled, we do have nuclear reactors, used to eventually generate electricity. If the process is uncontrolled, almost instantaneous, then we have a nuclear explosion, a nuclear bomb.

During a nuclear fission a nucleus absorbs a neutron and is broken in two smaller nuclei. Isotopes produced by this reaction are radioactive because they have an excess of neutrons. The energy  $E$  that is produced by the fragmentation of just one atom of Uranium 235 is equal to 211,5 MeV. We can find this value using the famous Einstein's formula  $E=mc^2$ .

$$\Delta E = c^2 * \Delta M$$

$$\Delta E = c^2 * (M_2 - M_1)$$

$$\Delta E = c^2 * (M_{U^{235}} - M_{produced.nuclei.and.neutrons})$$

By this formula we can understand that part of the mass is converted in energy. It's really interesting to notice that the fission of only one atom of Uranium create approximately 50 time more energy than the combustion of one atom of Carbon.

## Applicazioni della Relatività Speciale

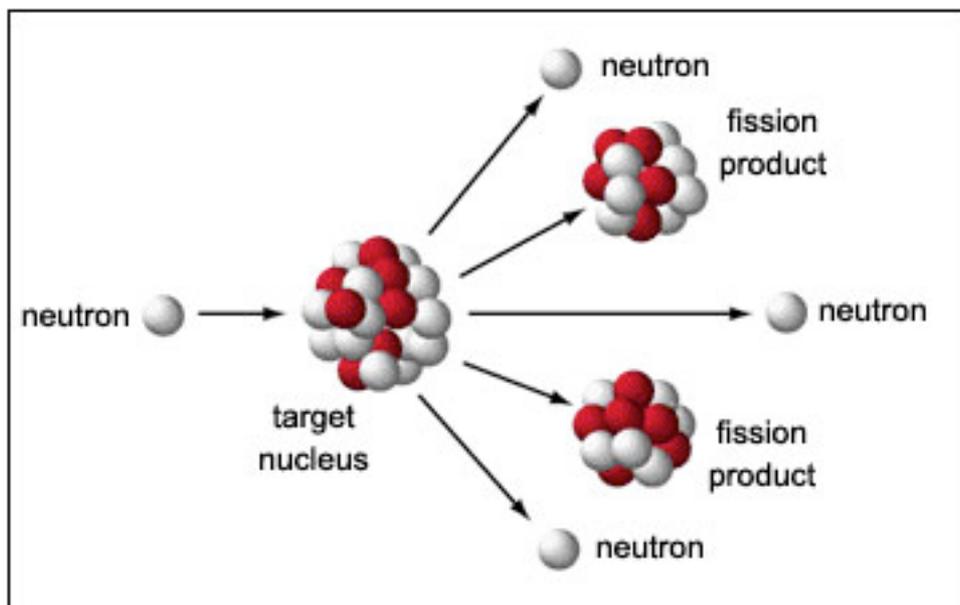
If there is a parameter that is important to control during a nuclear reaction that is the factor  $R$ .

$$R = \frac{\text{Absorbed neutrons}}{\text{Number of reactions}}$$

If  $R=1$  the reaction is stable. We can find this sort of reaction in a nuclear reactor.

If  $R>1$  the reaction is not stable and the number of neutrons involved in the reaction will increase exponentially. We can find this sort of reaction in a nuclear bomb.

A picture to summarize what has been said: when a nucleus fissions, it splits into several smaller fragments. These fragments, or fission products, are about equal to half the original mass. Two or three neutrons are also emitted.



Nuclear Fission

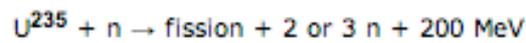
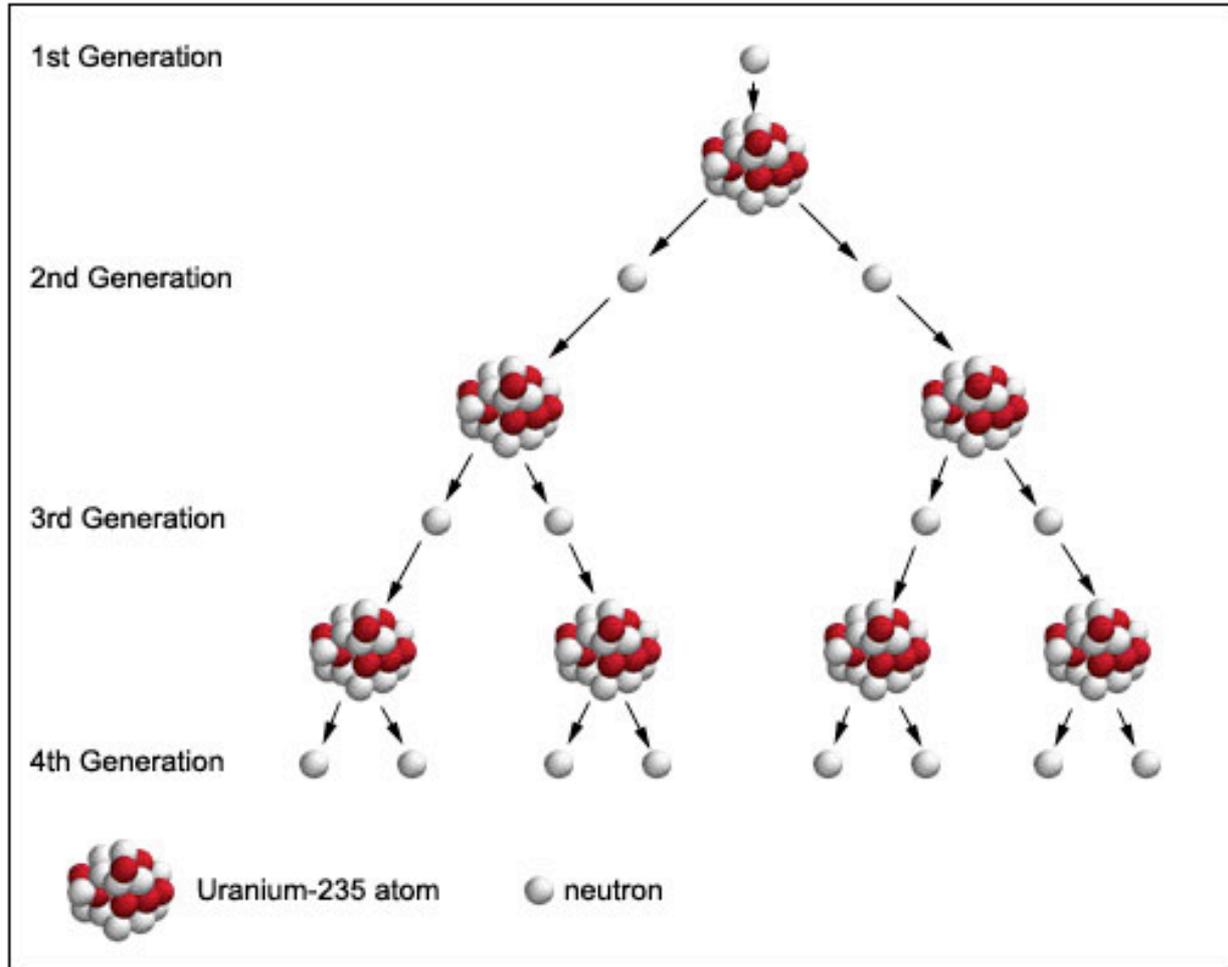
The sum of the masses of these fragments is less than the original mass. The “missing” mass (about 0.1 percent of the original mass) has been converted into energy according to Einstein's equation.

Fission can occur when a nucleus of a heavy atom captures a neutron, or it can happen spontaneously.

### Nuclear Chain Reactions

A chain reaction refers to a process in which neutrons released in fission produce an additional fission in at least one further nucleus. This nucleus in turn produces neutrons, and the process repeats. The process may be controlled (nuclear power) or uncontrolled (nuclear weapons).

## Applicazioni della Relatività Speciale



If each neutron releases two more neutrons, then the number of fissions doubles at each generation. It is easy to compute that 10 generations induce 1,024 fissions and in 80 generations there are about  $6 \times 10^{23}$  fissions.

### Energy Released From Each Fission

165 MeV	kinetic energy of fission products
7 MeV	gamma rays
6 MeV	kinetic energy of the neutrons
7 MeV	energy from fission products
6 MeV	gamma rays from fission products
9 MeV	anti-neutrinos from fission products

-----  
200 MeV

1 MeV (million electron volts) =  $1.609 \times 10^{-13}$  J

Applicazioni della Relatività Speciale

**Solzenicyn – Il secondo dopoguerra in U.R.S.S.**

*Ma sarà data lode a coloro  
che sulla nuda terra si posero per scrivere  
che si posero in mezzo a chi era in basso  
che si posero a fianco di chi lottava |...|  
Le loro descrizioni di realtà desolate, gli appelli,  
ancora recheranno le impronte del pollice  
di chi era in basso. Perché ad essi  
furono consegnati quelli scritti, essi  
sotto la camicia sudata li portarono avanti  
attraverso i cordoni degli agenti  
fino ai loro simili*

da "La letteratura sarà esaminata" (B. Brecht)

## La biografia

Solzenicyn nasce nel 1918 a Kilovodsk nel Caucaso. Suo padre uno studente in lettere, morto pochi mesi prima della sua nascita. Sua madre una giovane donna appartenente alla piccola nobiltà. Nel 1941 si laurea in matematica e fisica all'università di Rostov. Contemporaneamente, dal 1939, segue per corrispondenza i corsi di filosofia, storia e letteratura dell'università di Mosca. Richiamato nell'armata rossa per combattere contro la Germania nazista rinuncia alla carriera universitaria.

Nel 1945 viene arrestato nella Prussia orientale con l'accusa di propaganda antisovietica per aver scritto dei giudizi critici verso Stalin in una lettera spedita ad un amico d'infanzia. Nonostante questo non fosse sufficiente per una sanzione penale, viene condannato ad otto anni di confino e tre di lavori forzati che trascorse nel Kazakistan. Un mese dopo lo scadere degli otto anni, gli viene notificato l'esilio a vita a Kok-Terek, sempre in Kazakistan.

*Il mio fu l'arresto più facile che si possa immaginare. Non mi strappò all'abbraccio dei miei, non mi tolse alla vita familiare a noi tanto cara.*

*Il comandante di brigata mi chiamò al quartier generale e mi chiese, non sapevo per quale ragione, la pistola. Gliela detti senza sospettare alcuna astuzia quando, improvvisamente, dal seguito di ufficiali che stavano in un angolo, tesi e immobili, uscirono correndo due membri del controspionaggio, attraversarono la stanza in pochi balzi, afferrarono con quattro mani, in una volta sola, la stella del mio berretto, i miei galloni, il cinturone, il tascapane ed esclamarono con voce drammatica: "Lei è in arresto!".*

*Bruciato, trafitto dalla testa ai piedi, non trovai da dire nulla di più intelligente che: "Io? Perché?!". "Lei," chiese calcando le parole "lei ha un amico sul primo fronte dell'Ucraina?". Ma questo mi bastò, avevo già capito che la ragione del mio arresto era la mia corrispondenza con un compagno di scuola, sapevo oramai su quale linea aspettare il pericolo.*

Vive a Kok-Terek fino al 1953 quando gli viene diagnosticato il cancro, che lo conduce sull'orlo della morte (da questa esperienza il libro "Reparto C"). Grazie alla malattia, però, gli viene accordato, il permesso di trasferirsi nella parte europea dell'Unione sovietica.

Nel 1956 in URSS era cominciata la destalinizzazione e Krusciov, nuovo segretario del partito comunista, aveva denunciato le purghe staliniane. A seguito del congresso del partito del 1961, in cui si era deciso di dare al popolo dell'unione sovietica maggiore libertà, viene concesso a Solzenicyn di pubblicare il racconto "Una giornata di Ivan Denisovic" sulla rivista "Novyj Mir" (mondo nuovo). Il breve racconto illustra, per la prima volta, la vita di un uomo qualunque all'interno di un lager. Esso diventerà una sorte di manifesto letterario della nuova politica kruscioviana nella quale si cerca di eliminare il culto della personalità imposto da Stalin per creare un clima di distensione.

*Nei campi e nelle prigioni Ivan Denisovic si era disabituato a pensare a che cosa avrebbe fatto fra un giorno o fra un anno e come avrebbe mantenuto la famiglia. Per lui pensavano a tutto i capi: era più facile vivere...*

Tuttavia nel 1964 Krusciov fu deposto da una cospirazione guidata da Breznev che diventerà il nuovo segretario del partito. Ciò avvenne perché il partito non accettò alcune sue azioni. Il Soviet Supremo lo accusò di aver commesso errori politici durante la crisi dei missili di Cuba nel 1962, di

## Applicazioni della Relatività Speciale

aver organizzato male l'economia sovietica, di aver permesso alla figlia di incontrare papa Giovanni XXIII. La caduta di Krusciov si ripercosse anche su Solzenicyn. Accusato nuovamente di essere sovversivo e filooccidentale, viene espulso dall'unione degli scrittori sovietici.

Nel 1970 gli viene conferito il premio Nobel per la letteratura ma timoroso di non poter rientrare in Patria, non si reca a Stoccolma e ritira il premio solo nel 1975.

Nel 1975 verrà infatti esiliato e vivrà prima a Zurigo, poi negli Usa.

Nel 1989, con la caduta del muro di Berlino, in URSS cade il divieto di pubblicare le opere di Solzenicyn: "Arcipelago Gulag" esce a puntate sulla rivista "Novyj mir".

Nel 1994 Solzenicyn rientra in Russia e riprende il suo percorso intellettuale al servizio del popolo russo.

Il 6 giugno 2007, in occasione della riunione del G8, il presidente russo Putin ha firmato un decreto per insignire Solzenicyn del prestigioso premio di Stato. Lo scorso anno lo stesso premio, il più illustre della Russia, era stato assegnato al patriarca ortodosso di Mosca, Alessio II.

## Reparto C

Reparto C è un libro che ha una matrice fortemente autobiografica. Solzenicyn infatti, dal 1953 al 1956, combatterà a sua volta il cancro in una corsia d'ospedale.

### La vicenda

Nel reparto oncologico dell'ospedale di una città della Russia centrale si incontrano, senza riuscire a entrare in comunicazione, donne e uomini che l'incombere della malattia e della morte costringe a fare un bilancio della propria vita. Il valore dei singoli si misura sulla base della loro capacità di far tesoro dell'esperienza della vita e della sofferenza e di riuscire a trasferire nel mondo esterno le riflessioni avviate in quella corsia ospedaliera. Vi sono molti protagonisti nella "divisione cancro" (questo è il nome del reparto oncologico dell'ospedale), ognuno con la propria storia ma accomunati dalla lotta estrema contro il "Grande Male" (il cancro è l'allegoria della dittatura stalinista). La vicenda tuttavia ruota intorno a due personaggi in completa opposizione tra di loro in qualunque ambito: Rusanov e Kostoglotov. Solzenicyn attraverso essi vuole rendere i conflitti della società socialista russa.

Kostoglotov è un ex-deportato, ora al confino, centro di una serie di opposizioni, attraverso le quali la sua dura esperienza morale si arricchisce e si dispiega con l'inquietudine di chi cerca di stabilire nuove relazioni con il mondo e di realizzarsi in esse. Rusanov, invece, è il consapevole e ligio rappresentante del meccanismo sociale che ha schiacciato Kostoglotov nei suoi ingranaggi repressivi. La rigida gerarchia che nella vita li separa è spezzata momentaneamente dal cancro che costringe nella stessa corsia d'ospedale vittima ed oppressore. Rusanov è un verificatore dell'ineccepibilità ideologica delle vite dei cittadini sovietici e l'ideologia ufficiale per lui non è una maschera ma la base della sua intera coscienza. La forza interiore di Rusanov sta nel fatto che egli è convinto di compiere una sia pur modesta ma fatale missione storica. Egli vuole essere il servo della rivoluzione. Kostoglotov, al contrario vorrebbe rimettere in moto il processo rivoluzionario per eliminare le contraddizioni presenti nella sua società. Al contrario da quel che può sembrare, la vera vittima in questo libro non è il confinato Kostoglotov ma è il ricco e potente funzionario Rusanov che non può imparare nulla neppure dalla malattia e dalla morte; è la prima e la più miserevole vittima

## Applicazioni della Relatività Speciale

dell'ordinamento di cui egli si vuole inflessibile strumento di denuncia e punizione. Per Kostoglotov la malattia è l'occasione per avanzare verso se stesso per conquistare un nuovo possesso di sé. Kostoglotov, è un eroe moderno, che ha fatto della sofferenza la sua forza vitale. Questo romanzo di Solzenicyn non va collocato tra i romanzi a tesi. Reparto C è fortemente saldato alla tradizione realista russa. Solzenicyn svolge delle analisi lucidissime dei principali conflitti socio-politici della realtà che egli penetra e raffigura e non offre soluzioni che d'altronde neanche i politici erano riusciti ad individuare.

**La denuncia**

Reparto C è un libro che comprende fortissimi atti di denuncia. La società socialista viene criticata in ogni suo aspetto tanto che Stalin in una delle più feroci litigate tra Kostoglotov e Rusanov è definito un cannibale. Ciò rispecchia fortemente la biografia dello scrittore che si trova a combattere contro il socialismo.

Un altro aspetto rivoluzionario di questo libro sta nel fatto che Solzenicyn è il primo a scrivere un romanzo in cui si analizza l'uso delle radiazioni e dei raggi X per la cura dei tumori e gli effetti che essi hanno a lungo termine. Una delle pagine più interessanti di quest'opera è quella in cui la dottoressa Ljudmila Afanas'evna ammette a se stessa di essersi ammalata anch'essa di cancro per la continua e prolungata esposizione ai raggi X impiegati per la cura dei suoi pazienti. Ella ammette anche che i raggi venivano usati con troppa leggerezza. Solzenicyn è testimone del momento in cui ci si rende conto che i raggi X, considerati rimedio infallibile ed universale per tutti i mali, sono in realtà nocivi se non usati nella maniera più opportuna.

*"...l'irradiazione con i raggi X appariva un mezzo così diretto, sicuro ed assoluto, una così splendida conquista della tecnica medica contemporanea che rifiutare di ricorrervi e cercare altre vie veniva considerato quasi un sabotaggio. E si irradiava! Si irradiava con entusiasmo! Anche i tumori benigni. Anche quelli dei bambini in tenera età. Ed adesso questi bambini, divenuti adulti, si presentavano con irreparabili mutilazioni nei punti che erano stati irradiati con tanto zelo..."*

Le parole della dottoressa Afanas'evna descrivono i motivi di base che hanno avviato, agli inizi degli anni Sessanta, il processo di ripensamento critico sulle conseguenze dell'uso dei risultati e applicazioni della ricerca scientifica. Gli appartenenti alla comunità tecnologica si rendono conto delle conseguenze negative che sempre sono presenti nell'utilizzo di qualsiasi tecnologia.

L'evidenza sperimentale è innegabile. Senza le corrette precauzioni, ogni tecnologia comporta effetti indesiderati. Il pericolo aumenta quanto più gli effetti richiedono tempi lunghi per manifestarsi.

## Applicazioni biomediche della relatività speciale

Per trattare clinicamente il cancro in modo non invasivo ci si avvale di acceleratori lineari per produrre fasci di particelle ad alta energia che, impattando con la massa tumorale, distruggono le cellule cancerose.

Queste macchine sono conosciute con la sigla LINAC (LINEar ACcelerator). Tipicamente vengono utilizzate per trattare tumori al cervello, permettendo di intervenire sul tumore senza ledere o comunque interessare altri tessuti o strutture cerebrali. L'acceleratore lineare depone una dose uniforme di raggi di alta energia alla sola regione interessata, individuata utilizzando tomografie assiali computerizzate (TAC) o macchine per la risonanza magnetica nucleare (RMN).

L'acceleratore lineare utilizza la tecnologia delle microonde (tipicamente utilizzate nei Radar) per accelerare elettroni in un fascio coerente, per farli poi impattare su un bersaglio formato da un metallo pesante, così da generare raggi X di alta energia. I raggi vengono convogliati in un fascio la cui geometria è determinata dalla forma del tumore da trattare. Questo fascio esce dalla macchina attraverso una testa mobile che ruota intorno alla testa del paziente e un sistema di controllo numerico consente il posizionamento dinamico ideale della testa e del paziente così da colpire solo la regione malata.

La radioterapia attuale è profondamente diversa da quelle del recente passato, come descritta da Solzenycyn in "Reparto C. La sicurezza degli operatori e del paziente è di fondamentale importanza. Durante il trattamento il terapeuta radiologico, controlla in modo continuo il paziente attraverso un sistema a circuito chiuso. Una volta l'operatore lavorava nella stessa stanza dove era il paziente in trattamento, esponendosi così alle radiazioni ionizzanti.

L'acceleratore lineare è installato in un locale protetto, con pareti in cemento armato e schermi in piombo per evitare qualunque fuga di radiazioni.

Le macchine sono dotati di sistemi di controllo e di sicurezza per garantire l'esatto dosaggio temporale ed energetico e il posizionamento del paziente sotto la macchina è verificato di continuo con un opportuno sistema a raggio laser.

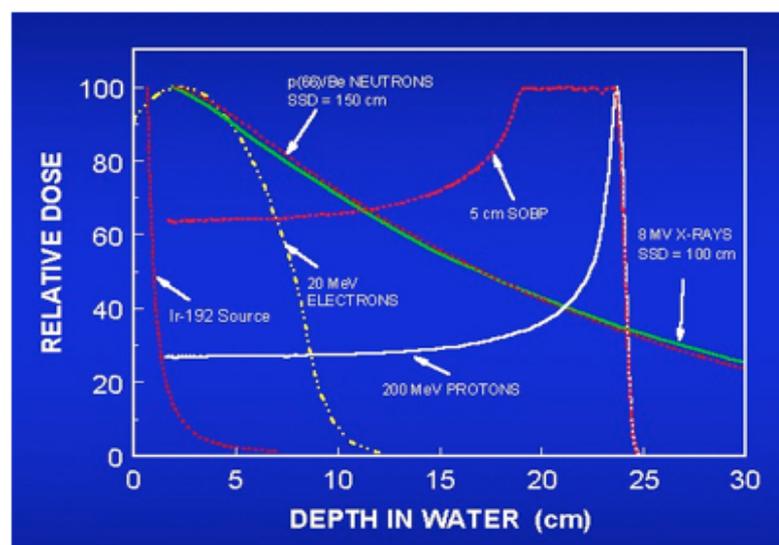


Diagramma dose / profondità

## Applicazioni della Relatività Speciale

Il suddetto grafico spiega perché è preferibile utilizzare fasci di particelle ad alta energia, in particolare protoni, piuttosto che usare i "tradizionali" raggi X. A differenza delle altre particelle, i protoni rilasciano la maggior parte della loro energia in una regione di spazio molto piccola, quindi controllabile. I protoni, arrestandosi ad una profondità prestabilita, evitano danni ai tessuti sottostanti. Questo tipo di cura è quindi decisamente meno invasiva di quella a raggi e ne elimina quasi totalmente gli effetti collaterali.

La profondità di penetrazione viene controllata regolando l'energia iniziale del fascio. In questo modo è possibile irradiare con precisione il volume bersaglio e risparmiare i tessuti sani circostanti.

Ad esempio consideriamo il trattamento presso il CATANA. Si tratta di centro di adroterapia e applicazioni nucleari avanzate realizzato dai fisici dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN a Catania dove vengono trattati melanomi della corioide, dell'iride e altri tipologie di melanomi oculari.

Per potere utilizzare in modo ottimale le caratteristiche fisiche del fascio, come prima accennato, occorre conoscere esattamente l'estensione del tumore all'interno dell'occhio. Durante un'operazione chirurgica preparatoria il medico applica quattro piccoli anelli di tantalio sulla parte posteriore dell'occhio. Questi marcano il bordo del tumore e sono ben visibili con tecniche radiografiche.

Arrivati in sala CATANA, i pazienti vengono fatti accomodare su una particolare sedia motorizzata, controllata da computer, avente sette gradi di libertà (3 per il posizionamento della testa e 4 per quello del corpo).

Al paziente viene applicata una maschera di materiale termoplastico che prende la conformazione del viso; questa è utilizzata per immobilizzare la testa e il collo del paziente, mentre il bloccaggio della bocca viene messo a punto mediante un morso modellato sulla forma delle arcate dentali "bite block". In seguito vengono prese immagini radiografiche con le quali vengono misurate le coordinate della posizione del paziente. Tali valori vengono introdotti in un programma di calcolo, che ricostruisce un modello virtuale dell'occhio. Sulla base dell'informazione del medico viene disegnata la forma del tumore all'interno dell'occhio e viene scelta la posizione ottimale dell'occhio per l'esecuzione dell'irradiazione. In questo modo si riesce trattare il tumore mantenendo minima la quantità di radiazione nei tessuti sani circostanti. Per ciascun paziente viene scelta individualmente sia la profondità di penetrazione del fascio che l'estensione in profondità dove la dose viene applicata in modo omogeneo. Un altro elemento individuale è il collimatore di ottone, che delimita l'estensione della dose nella direzione laterale, corrispondente alla proiezione del tumore nel piano di terapia.

## Applicazioni della Relatività Speciale

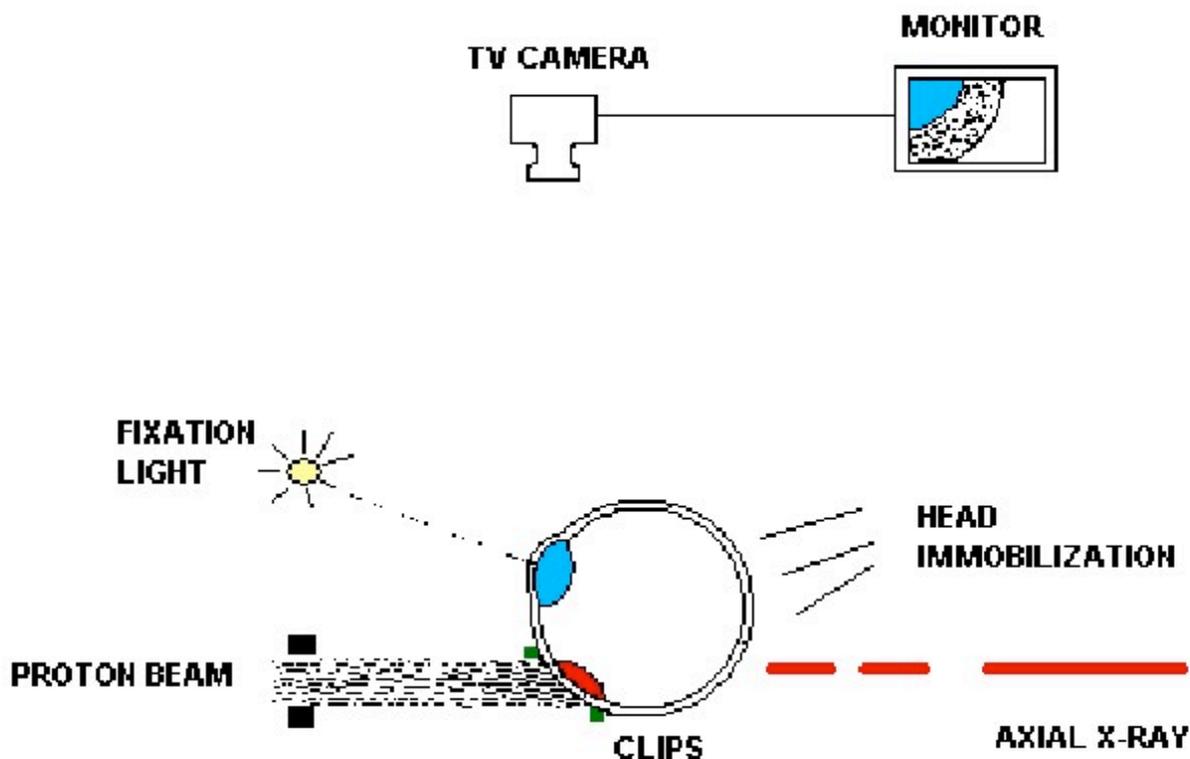


Diagramma schematico sistema CATANA

La terapia consiste generalmente in 4 sedute consecutive. L'applicazione del fascio dai 60 ai 120 secondi.

Per mantenere l'occhio immobile nella direzione desiderata, il paziente durante il trattamento deve fissare un punto luminoso ("led") posizionato in un sistema di coordinate e una telecamera di controllo percepisce gli eventuali movimenti dell'occhio. Dalla consolle di controllo il team del gruppo Catana segue e "controlla", istante per istante, la fase di irradiazione.

Prima di ogni trattamento viene controllata la posizione dell'occhio e del tumore tramite radiografie. Su queste immagini si possono reperire la posizione dei clips con una precisione dell'ordine di 0.1 mm, potendo così posizionare precisamente il paziente rispetto al fascio. Solo quando la posizione attuale corrisponde al piano di terapia con una precisione al di sotto di 0.2 mm viene lanciato il trattamento.

La sperimentazione di Catania è stata la prima di adroterapia in Italia e grazie a essa il nostro Paese è divenuto uno dei pochi al mondo in grado di utilizzare l'adroterapia nella lotta ai tumori.

Grazie alla precisione della tecnica di irradiazione è stato possibile controllare il tumore localmente nel 99% dei casi con arresto della crescita e riduzione del volume del tumore secondo limiti di tempo individuali. In un anno la sperimentazione ha ottenuto risultati positivi in percentuali analoghe a quelle rilevate in altri laboratori che hanno già trattato 7 mila pazienti in Svizzera, Gran Bretagna e Stati Uniti.