

**PROGETTO FINALE**

**CORSO DI REALTA' VIRTUALE**

**“SIMULAZIONE DI UNO SPETTROMETRO DI MASSA IN  
AMBIENTE GRAFICO 3D”**



**AUTORI:**

**FRANCESCO PIZZO**

**DAVIDE FUSCO**

**DOCENTE:**

**FRANCESCO CORATO**

## INTRODUZIONE

Il seguente progetto ha lo scopo di simulare una legge fisica mediante l'utilizzo della realtà virtuale. Nel particolare caso infatti l'obiettivo fondamentale è soffermarsi in maniera preponderante su uno dei tanti scopi per cui la RV è utilizzata: l'ambito scientifico. La branca della fisica presa in considerazione, è quella relativa ai fenomeni della magnetostatica, nello specifico la realizzazione di uno spettrometro di massa. Qui di seguito verranno illustrati gli aspetti fondamentali che hanno determinato la struttura del progetto, fornendo prima dei cenni fondamentali inerenti la parte teorica, e successivamente, una descrizione del lavoro relativo all'implementazione dello scenario grafico e delle leggi fisiche mediante l'utilizzo del calcolatore. La scelta della magnetostatica non è casuale, poiché così come nell'ambito reale, sarà in base alla variazione delle variabili in gioco che i risultati ottenuti ci restituiranno output diversi, aspetto di notevole importanza anche nel campo industriale. La realizzazione dello scenario grafico è stato effettuata mediante il programma di grafica tridimensionale 3D Studio Max, le cui funzionalità sono state indispensabili anche per impostare le equazioni fisiche. Lo scenario in questione è una stanza con diversi abbellimenti e caratteristiche che, malgrado non influenzino in alcun modo la parte fisica, vogliono costituire uno scenario gradevole agli occhi dell'osservatore, essendo anche la parte grafica aspetto significativo per realizzare una buona immersività. L'equazione del moto descritta è quella del moto circolare uniforme, in quanto essa si lega al campo magnetico nella maniera seguente: una particella che si muove in uno spazio e risente del campo di induzione magnetica  $\mathbf{B}$ , subisce una variazione della sua direzione che la porterà a compiere il moto considerato; il tutto è basato su uno dei principi cardine della magnetostatica, la Forza Di Lorentz. Adesso in maniera più dettagliata ci soffermeremo sugli aspetti teorici.

## TEORIA

- Cenni sul campo magnetico
- Forza di Lorentz
- Spettrometro di massa

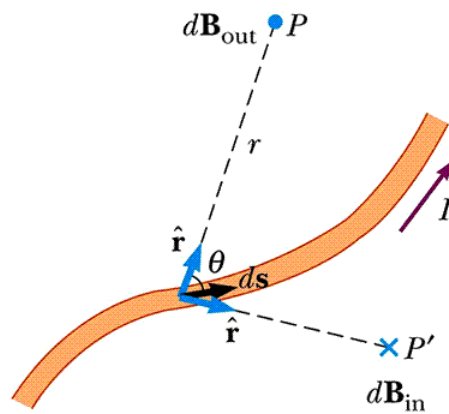
### Il Campo magnetico

Il **campo magnetico** è un campo vettoriale: associa, cioè, ad ogni punto nello spazio un vettore, eventualmente variabile nel tempo, il cui effetto fisico si esplica in termini della forza di Lorentz subita da una carica elettrica in movimento oppure nel momento torcente che agisce su un dipolo magnetico. Le sorgenti del campo magnetico sono le correnti elettriche oppure i dipoli magnetici. Storicamente gli effetti magnetici vengono scoperti grazie a magneti naturali che, allo stesso tempo, generano un campo magnetico e ne subiscono gli effetti per via delle correnti elettriche su scala atomica. La direzione del vettore campo è la direzione indicata dalla posizione d'equilibrio dell'ago di una bussola immersa nel campo. Il verso del vettore campo si determina con la regola della presa della mano destra. Il campo magnetico, solitamente indicato con il vettore  $\mathbf{B}$ , storicamente era la *densità di flusso magnetico* o *induzione magnetica*, mentre  $\mathbf{H} = (\mathbf{B}/\mu)$  era il campo magnetico (questa terminologia è oggi utilizzata per distinguere tra il campo magnetico nel vuoto  $\mathbf{B}$  e quello in un materiale  $\mathbf{H}$ , con  $\mu$  diversa dall'unità). L'unità di misura dell'induzione magnetica nel SI è il tesla. A questo tipo di definizione tuttavia si è potuti arrivare grazie alla considerazione della forza di Lorentz poiché, a differenza del campo elettrico, non essendo presente in natura l'esistenza di monopoli magnetici è stato necessario determinare il campo magnetico "a posteriori". La determinazione di  $\mathbf{B}$  a livello pratico può essere effettuata anche mediante l'utilizzo della legge di Biot-Savart espressa in termini differenziali che mediante integrazione ci restituisce i risultati

richiesti. La formula segue la regola del prodotto vettoriale poiché, essendo infatti  $\mathbf{B}$  un vettore, bisogna determinare anche direzione e verso.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

Con  $d\mathbf{s}$  indichiamo la direzione della corrente in un punto, ad esempio di un filo (retta tangente), mentre  $\mathbf{r}$  è il vettore che ha come modulo la distanza del contributo di campo magnetico dal punto in cui si vuole calcolare  $\mathbf{B}$ . Riportiamo un esempio mediante la figura.

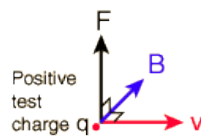


### Forza di Lorentz

Il concetto di forza di Lorentz è illustrato mediante l'esperimento che determinò l'esistenza della stessa. A partire da una carica esploratrice, supponiamo che essa possa essere lanciata con una certa velocità in una regione dello spazio in cui è presente un campo magnetico uniforme. Probabilmente, la carica, appena risentirà del campo sarà soggetta ad una forza che devierà la traiettoria della stessa, per curvarla lungo una circonferenza. L'esperimento, se effettuato più volte in dinamiche leggermente differenti fa notare come è in base all'angolo che si viene a formare tra il vettore  $\mathbf{v}$  e il vettore  $\mathbf{B}$ , che la forza assume un'entità differente. Anche in questo caso ci si avvale della regola del prodotto vettoriale per cui, conseguentemente, capiamo subito che se  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{B}$  formano un angolo nullo allora la forza è nulla. Da qui si può definire il campo magnetico come una grandezza vettoriale diretta parallelamente alla direzione particolare di forza nulla. A partire dall'intensità di forza il modulo di  $\mathbf{B}$  in funzione di questa intensità è:

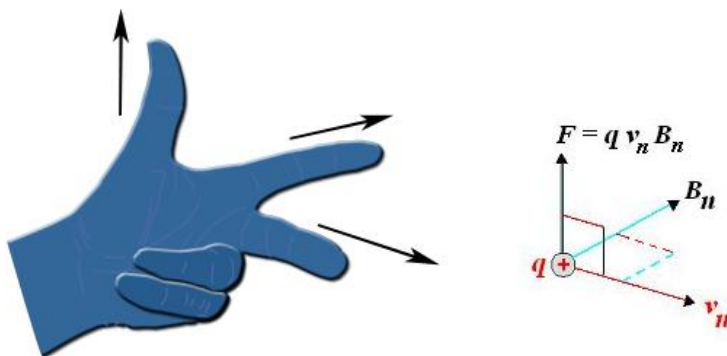
$$B = F_L / (qv)$$

Dove  $q$  rappresenta la carica della particella. Il risultato ottenuto è riassunto nella seguente equazione:

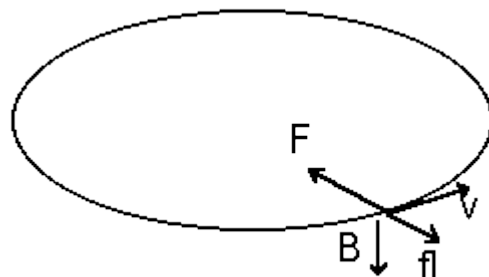
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$


Ovviamente se velocità e campo sono perpendicolari la forza è massima. Essendo dinanzi a un prodotto vettore, se  $q$  è positiva allora la forza ha lo stesso verso del prodotto vettoriale tra velocità e campo altrimenti verso opposto. La forza agente su una particella in moto con velocità  $\mathbf{v}$  attraverso un campo magnetico  $\mathbf{B}$  è sempre perpendicolare a  $\mathbf{v}$  e a  $\mathbf{B}$ ; ne consegue che la forza di Lorentz non ha mai una componente parallela a  $\mathbf{v}$  diversa da zero, e perciò non può modificare la parte scalare della velocità della particella, ma solo la direzione. Il lavoro compiuto dalla  $\mathbf{F}$  allora è nullo. In generale, infatti, il lavoro di una forza è dato dal prodotto della sua componente lungo la direzione dello spostamento, per lo spazio percorso; poiché la forza è perpendicolare alla velocità della carica (e quindi allo spostamento), la sua proiezione è nulla e il lavoro è anch'esso nullo. L'azione della forza di Lorentz viene sfruttata su fasci di particelle, ad esempio, negli acceleratori, per costringere il fascio di particelle lungo un cammino dato, e negli spettrometri di massa, apparecchi che permettono di determinare la massa delle particelle, misurando la curvatura che esse subiscono in un campo magnetico. Qui di seguito alcune immagini inerenti i concetti appena esposti.

### LA FORZA DI LORENTZ



### IL MOTO CIRCOLARE



Per determinare l'espressione matematica che utilizzeremo nel nostro progetto consideriamo un fascio di atomi iniettato in una camera chiusa da un cannone elettronico G. Gli elettroni che entrano con una certa velocità nel cannone dunque risentono del campo magnetico. Come risultato, la forza di Lorentz devia continuamente gli elettroni e poiché  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{B}$  sono continuamente perpendicolari tra loro, questa deflessione li induce a seguire un moto circolare. Desideriamo determinare i parametri che caratterizzano il moto di questi atomi, o di qualsiasi particella di carica  $q$  e massa  $m$ , che si muove perpendicolarmente a un campo magnetico uniforme. Utilizzando l'espressione in modulo della forza di Lorentz e la seconda legge di Newton si può impostare il sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = qv \cdot B \\ \mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \end{array} \right.$$

Da cui dunque si ricava la seguente poiché l'accelerazione in questione è la centripeta:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Lo spettrometro di massa segue la stessa logica appena considerata.

### SPETTROMETRO DI MASSA

Lo **spettrometro di massa** è uno strumento che serve a misurare la massa di ioni. Esso separa gli ioni aventi la stessa carica e massa diversa, o, più in generale aventi rapporto di carica su massa diverso, come sono, ad esempio, gli isotopi. Uno spettrometro particolarmente adatto alla misura delle abbondanze isotopiche è quello esclusivamente magnetico progettato intorno al 1920 da Dempster. Gli ioni prodotti da una sorgente passano attraverso una coppia di fenditure strette che ne definiscono la traiettoria e tra le quali è applicata una differenza di potenziale. All'uscita dalla seconda fenditura tutti gli ioni, indipendentemente dalla loro massa se hanno la stessa carica, possiedono l'energia cinetica:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = qV$$

Si ottiene così un fascio di ioni isoenergetici sottile e collimato che entra in una regione in cui agisce soltanto un campo magnetico  $\mathbf{B}$  uniforme. Essi sono in questo modo sottoposti alla forza di Lorentz che in maniera più generica ha la seguente espressione:

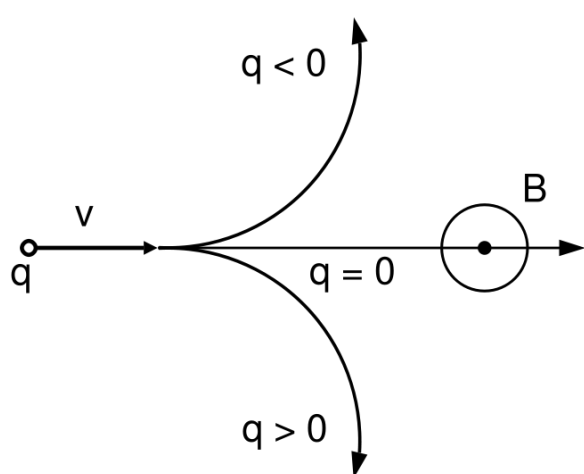
$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Poiché il campo elettrico  $\mathbf{E}$  in questo caso è nullo, la forza è dovuta al solo campo magnetico. Il raggio di curvatura della traiettoria, che si ricava eguagliando la forza di Lorentz alla forza centripeta, è dato nuovamente da:

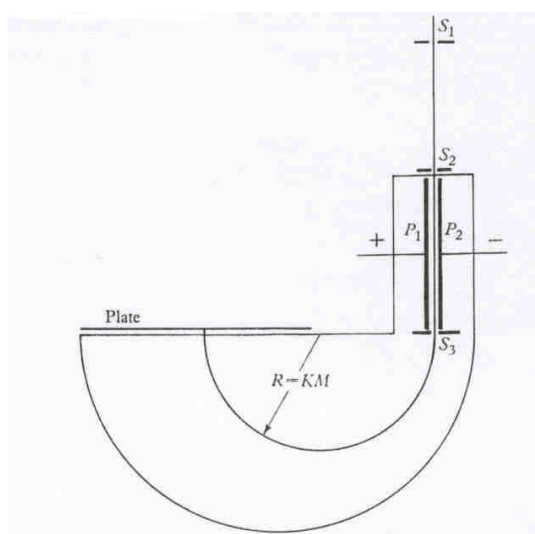
$$r = \frac{mv}{qB}$$

Poiché la massa  $m$ , il campo  $\mathbf{B}$  e la carica  $q$  sono costanti, e la velocità  $v$  non cambia in modulo essendo la forza esclusivamente centripeta, anche il raggio di curvatura è costante, dunque la traiettoria descritta dalla particella è un arco di circonferenza. A parità di energia cinetica e di carica, a masse diverse corrispondono velocità diverse, e quindi raggi diversi. Il rapporto massa carica risulta quindi determinato per i vari tipi di ioni dalla misura di  $r$ , noti il campo magnetico e la differenza di potenziale acceleratrice. Il rivelatore di posizione può essere, ad esempio, una lastra fotografica.

### LOGICA DI BASE DELLO SPETTROMETRO



### SPETTROMETRO DI BRAINBRIDGE

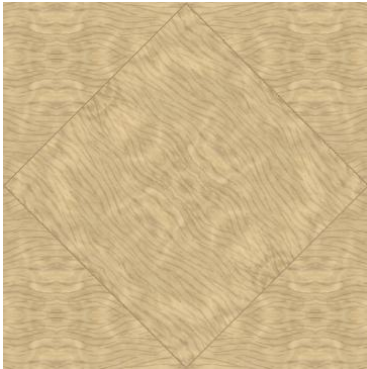


### LO SCENARIO

A questo punto soffermiamoci sugli aspetti che hanno determinato lo scenario in cui si svolge l'esperimento ed elenchiamo una serie di informazioni relative la parte grafica. Partiamo in primo luogo da una premessa: anche se l'ambientazione non è troppo legata a tutti i concetti espressi sopra, si è deciso comunque di realizzarla in quanto la realizzazione dell'esperimento nel vuoto avrebbe compromesso tutta la parte relativa i concetti di grafica tridimensionale comunque fondamentali nella RV. Per questo motivo allora senza una precisa ambientazione sarebbe stato possibile soltanto implementare la legge fisica in questione. Anche la creazione del solo spettrometro sarebbe risultata inadeguata. Per cui si è deciso di realizzare una stanza con vari oggetti tra cui anche un tavolo sul quale è posto lo spettrometro per effettuare l'esperimento. L'unità di misura che abbiamo utilizzato per impostare la grafica è stata quella del metro. La nostra stanza è stata realizzata mediante l'utilizzo di una delle primitive standard, cioè un cubo. A partire da ciò, esso è stato prima svuotato e successivamente con l'utilizzo del comando Shell, si è potuto dare uno spessore sia interno che esterno alle pareti per arrivare al risultato di una stanza. Una particolare delucidazione la effettuiamo sulle pareti. L'applicazione delle texture è stata necessaria per dare vitalità sia alle mura che alla pavimentazione. In particolare per rendere il più credibile possibile la visualizzazione degli elementi ora citati sono state utilizzate delle texture "seamless". Le seguenti texture infatti, hanno la caratteristica di essere perfettamente sovrapposte l'una con l'altra se ripetute a scacchiera; in questo modo si mantiene la condizione di omogeneità necessaria affinché chi visualizza l'ambiente non ritrovi delle

imperfezioni nella struttura base. La texture del pavimento utilizzata è riportata qui di seguito così come quella inerente le pareti.

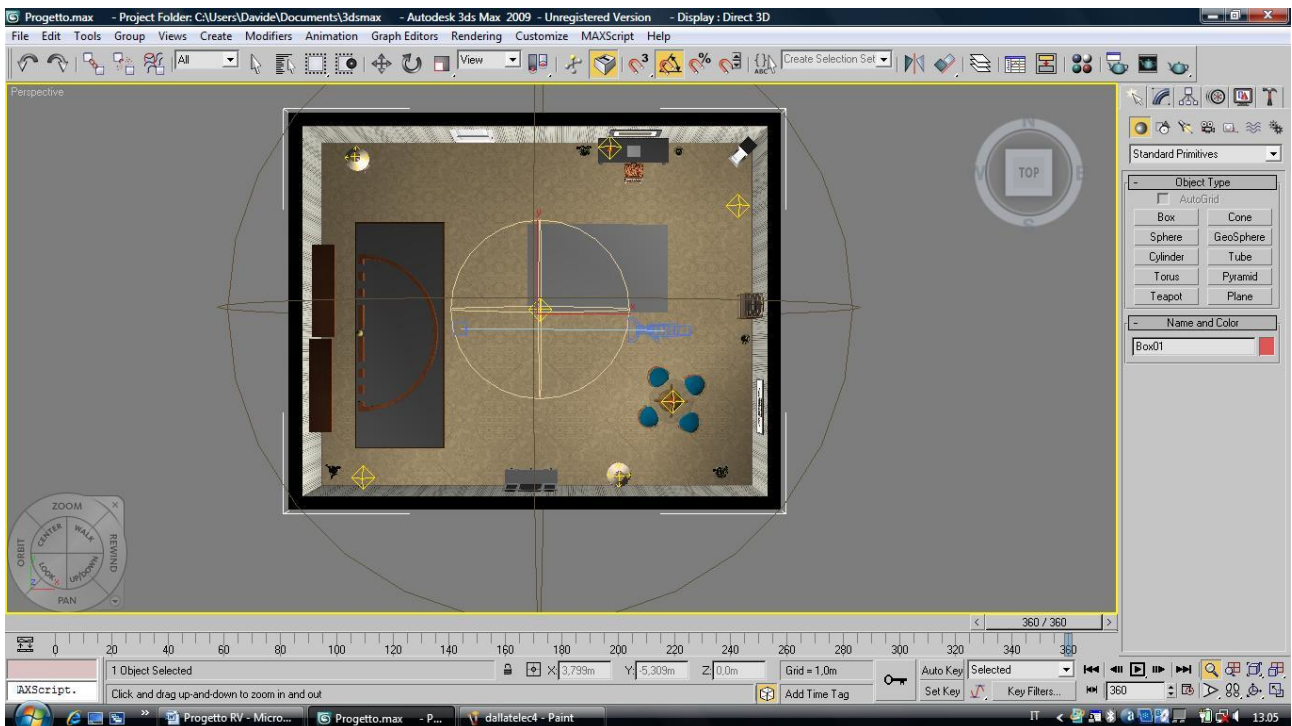
**TEXTURE PAVIMENTO**



**TEXTURE PARETI**



Così come si può notare dalla scena sono diversi gli oggetti di arredamento presenti tra cui oltre al tavolo, quadri, specchi, mensole, uno scrittoio con una sedia, delle piante e infine un tavolino con altre sedie e delle lampade. Anche per tutti gli oggetti elencati l'utilizzo delle texture è stato fondamentale. Per quanto riguarda le lampade esse influiscono anche sull'illuminazione della stanza. In figura è mostrata un frame renderato che da un'idea su come sono state applicate le luci. Una è stata posizionata al centro della stanza per dare una visibilità generale all'ambiente; le restanti cinque invece sono all'incirca nelle quattro estremità della stanza e a differenza della generica, esse sono inserite proprio all'interno di alcuni oggetti. L'applicazione delle luci è stata effettuata tramite la funzionalità di 3ds max "Omni Light". Qui di seguito due immagini che rendono l'idea su come sono state applicate le luci.





Per quanto riguarda la parte più strettamente legata all'esperienza da simulare, dobbiamo tenere presente che le particelle che vengono coinvolte in esperimenti di questo tipo non sono visibili all'occhio umano. Le masse degli ioni e delle cariche coinvolte infatti hanno ordini di grandezza relativamente piccoli per cui è opportuno fare la seguente precisazione. La sfera visibile nello scenario, rappresentante lo ione in gioco, ha delle dimensioni che per convenzione sono assunte molto più grandi del normale, questo per favorire sia la visione della sfera stessa che il suo raggio di curvatura. Tuttavia la matematica impostata è relativa comunque a ioni con ordini di grandezza rientranti nei canoni standard della fisica al fine di ottenere risultati veritieri e attendibili. A questo punto ci soffermiamo in particolare sulla parte relativa al nostro spettrometro e alla nostra sfera, di modo che successivamente potremo passare ad illustrare la parte di progetto inerente l'implementazione della legge fisica.



## MODELLO SPETTROMETRO DI MASSA

Il modello estetico dello spettrometro di massa è stato realizzato a partire da una “gabbia” semi circolare realizzata in legno (tramite texture) e una sfera che modella l’atomo sul quale saranno realizzate le simulazioni.

Come già accennato la sfera utilizzata per simulare l’atomo ha dimensioni molto maggiori di quelle reali, ma ciò è necessario per poter apprezzare la qualità della simulazione. A tal proposito si precisa che nonostante la particella sia modellata da una sfera, a tutte le variabili in gioco sono stati dati valori realistici e quindi anche il raggio di curvatura della sfera è quello reale, così come la massa e la carica dell’atomo.

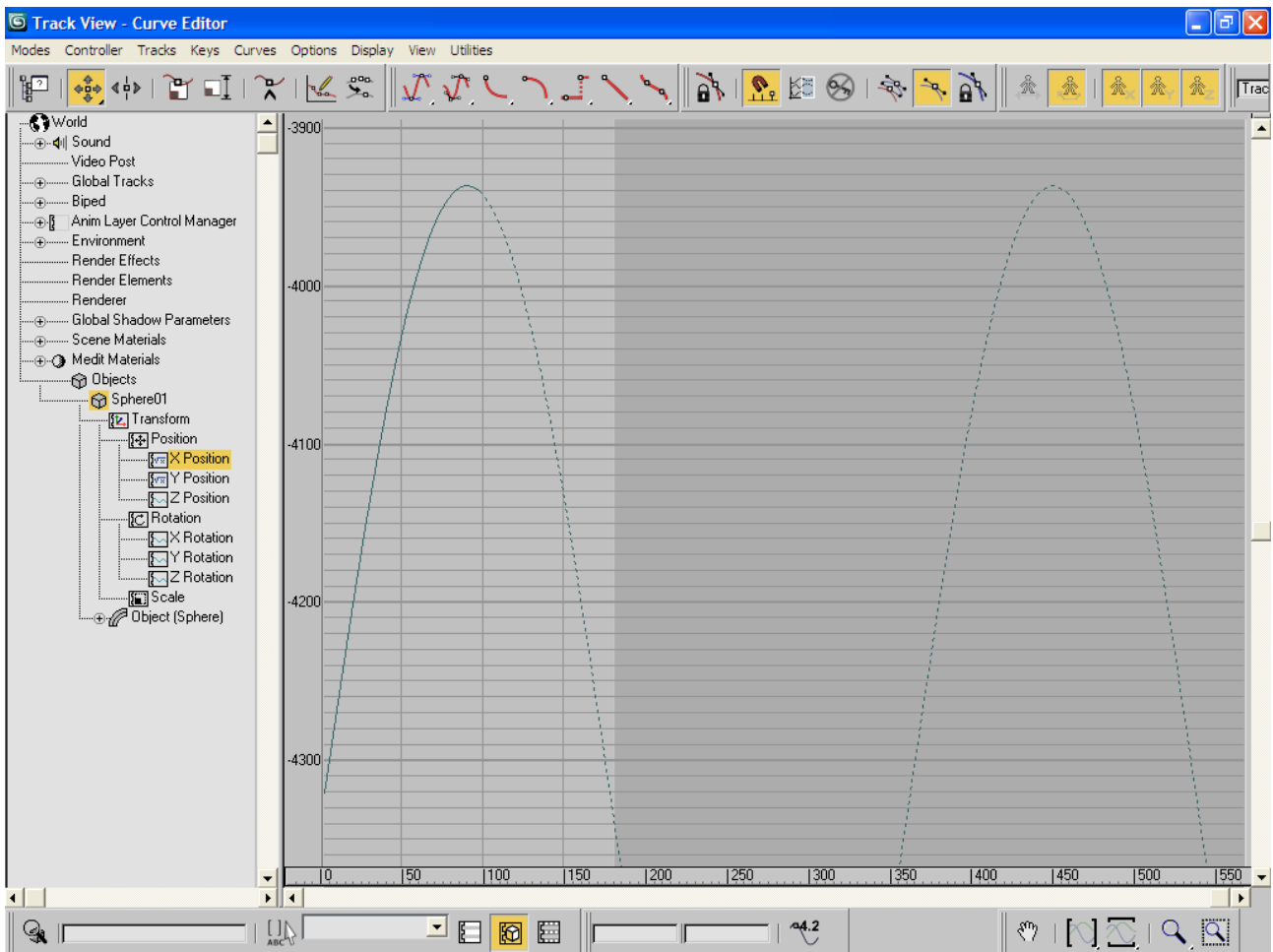
Il modello è stato creato con lo scopo di permettere diverse simulazioni a seconda del valore delle variabili fisiche, per questo motivo la “gabbia” è stata dotata di diversi fori per permettere appunto tali simulazioni.



Modello estetico spettrometro di massa

Le equazioni matematiche progettate per la simulazione del fenomeno fisico sono un mèrge tra le equazioni del moto circolare e quelle della magnetostatica. In pratica è stata trovata l’equazione del raggio di curvatura in funzione di massa, velocità iniziale, carica elettrica e campo magnetico e sono state

sostituite nelle parametriche della circonferenza. Per far ciò una volta progettate, prima su carta, tutte le matematiche necessarie sono state implementate tramite le utili funzionalità dei **controller** e dei **grapheditor** di 3DS Max.



Nonostante 3DS Max non sia un software parametrico, utilizzando il **sistema descritto**, le **float expressions** e creando le **variabili del problema**, nonché grazie ad una buona progettazione matematica del problema fisico, è stato possibile realizzare una **simulazione parametrica** fittizia che ci ha permesso di effettuare più prove velocemente soltanto modificando le variabili e i parametri sopra descritti che vedremo nel dettaglio a breve.

Grazie ai suddetti controller, una volta definite come variabili:

m = massa

V = velocità iniziale

Q = carica particella

B = valore scalare campo induzione magnetica

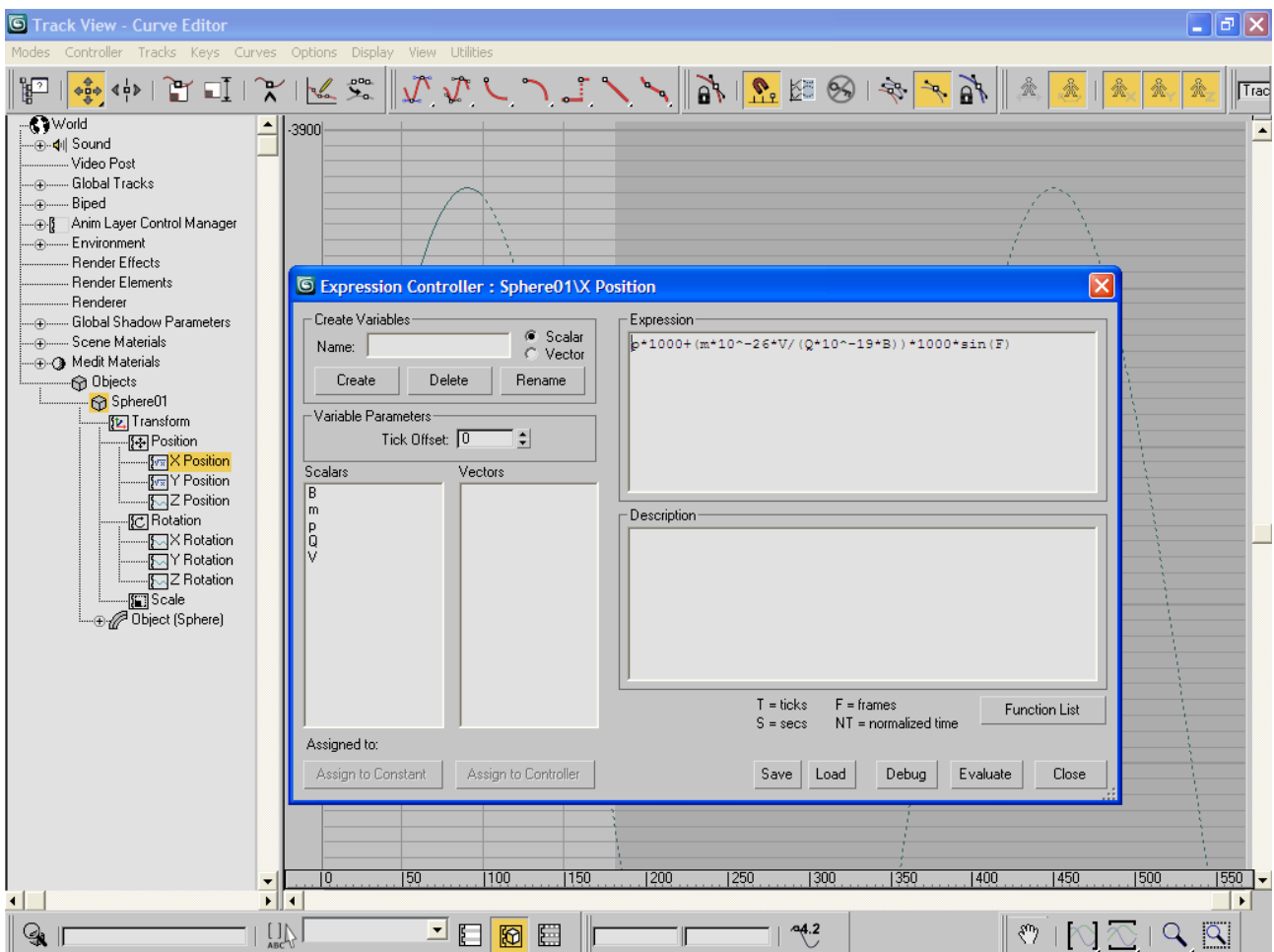
P = posizione iniziale sfera

Ognuna espressa nelle proprie unità di misura del Sistema Internazionale (SI), è stata inserita l'equazione necessaria sia nel controller dell'asse x sia in quello dell'asse y.

$$\begin{cases} X=x_0+r \cos(t) \\ Y=y_0+r \sin(t) \\ r=(mv)/(qB) \end{cases} \quad t \text{ tra } 0 \text{ e } 2\pi \text{ greco}$$

Il campo magnetico è stato quindi inteso perpendicolare al modello dello spettrometro di massa. Notiamo che il moto della sfera lungo la circonferenza con raggio di curvatura deciso dalle suddette variabili, può verificarsi sia in senso orario che in senso antiorario, ciò a causa del verso di B. A tale scopo è stato introdotto un nuovo parametro, che indica appunto il verso del campo, denominato con  $K = \{-1,+1\}$ .

Inoltre essendo i controller progettati per accettare float expressions in millimetri, tutte le equazioni sono state opportunamente riscalate.



Creazione variabili e inserimento equazioni

Poiché in un ambiente come 3ds la variabile Tempo non ha senso di esistire, per realizzare la variazione delle funzioni seno e coseno nel tempo, è stata utilizzata una **variabile globale** messa a disposizione da Autodesk proprio per casi come questo, la variabile in questione è **F** che invece di rappresentare lo scorrere del tempo, rappresenta lo scorrere dei frame.

Le simulazioni effettuate sono state 4, utilizzando una velocità  $V$  e un campo induzione magnetica  $B$  rispettivamente di  **$10^7$  m/s** e **1 Tesla**.

I valori utilizzati per le altre variabili sono invece:

**Simulazione 1:**  $m=6,4 \cdot 10^{-11}$  Kg;  $Q=8 \cdot 10^{-4}$  C; Verso campo=uscente; Dx

**Simulazione 2:**  $m=0,96 \cdot 10^{-26}$  Kg;  $Q=1,6 \cdot 10^{-19}$  C; Verso campo=entrante; Sx

**Simulazione 3:**  $m=0,64 \cdot 10^{-26}$  Kg;  $Q=1,6 \cdot 10^{-19}$  C; Verso campo=entrante; Sx

**Simulazione 4:**  $m=0,96 \cdot 10^{-26}$  Kg;  $Q=1,6 \cdot 10^{-19}$  C; Verso campo=uscente; Dx

Le 4 simulazioni, ciascuna della durata di circa 6 secondi ciascuna, sono state renderizzate su un PC con le seguenti caratteristiche:

**CPU:** Intel Core2 Duo E6750 @2,66 GHz

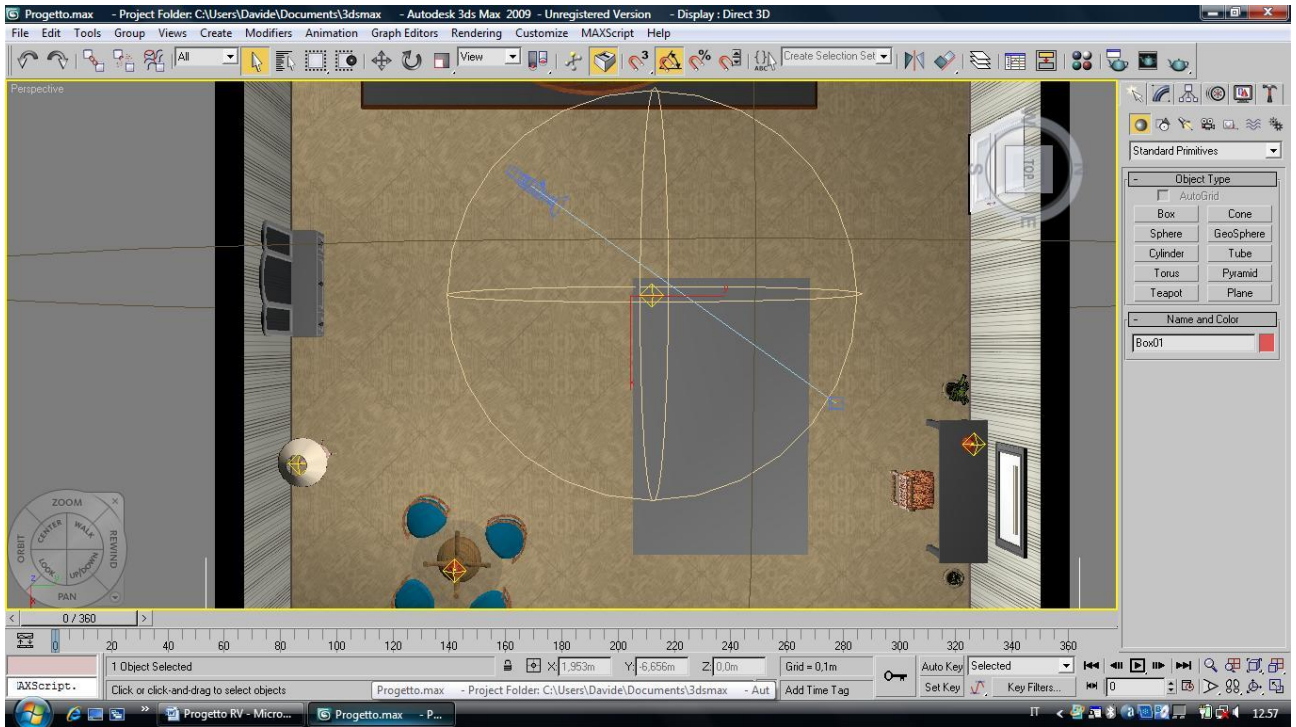
**Memoria Ram:** DDR2 2,00GB

**Scheda Grafica:** Radeon X1550 Series 512MB

Impiegando un tempo di rendering di circa 19h e 20m. E' stata poi realizzata un'animazione finale per presentare l'ambiente grafico circostante, della durata di circa 12 secondi che ha impiegato la macchina per un tempo di rendering di altre 10h.

L'animazione finale è stata realizzata utilizzando una camera di tipo **Target** e sfruttando il metodo dell'**Autokey** per una durata di 360 frame.

Il campionamento dei keyframe da selezionare è stato suddiviso in slot da 40 frame ciascuno in modo da realizzare un breve percorso.



In fine tutti i video renderizzati sono stati utilizzati per creare una presentazione complessiva del progetto tramite un software di video editing.