

MISURA DELLA MASSA DELL'ELETTRONE

di Arianna Carbone, Giorgia Fortuna, Nicolò Spagnolo
Liceo Scientifico Farnesina – Roma

Interazioni tra elettroni e fotoni

Per misurare la massa dell'elettrone abbiamo sfruttato alcune peculiarità delle interazioni che avvengono tra particelle cariche, in questo caso elettroni, e particelle neutre, i fotoni.

I tre tipi di interazioni presi da noi in considerazione sono:

1. Effetto Fotoelettrico – Consiste nell'assorbimento di un fotone da parte di un elettrone atomico in una dei livelli interni (i.e. fortemente legato). Il risultato dell'interazione, secondo l'energia del fotone, è o il passaggio dell'elettrone ad un livello energetico più alto o la sua espulsione dall'atomo se l'energia del fotone di partenza è sufficiente. L'atomo ionizzato subisce un riarrangiamento degli elettroni per tornare al stato di minima energia possibile, trasferendo un elettrone più esterno nell'orbitale lasciato libero, emettendo quindi raggi X.

$\gamma + e^- \rightarrow e^- + \text{ione}$ Questo tipo di interazione è dominante quando l'energia del fotone $E < 100 \text{ KeV}$, dove l'energia del fotone è $E = h\nu$

2. Effetto Compton – Consiste nella diffusione del fotone che interagisce da parte di un elettrone quasi libero degli ultimi gusci. Il fotone trasferisce una parte della sua energia all'elettrone, deviando dalla loro traiettoria.

$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$ Questo tipo di interazione è dominante quando l'energia del fotone è di circa 1 MeV.

Indicando con θ l'angolo di diffusione del fotone rispetto alla sua direzione iniziale, possiamo esprimere l'energia del fotone dopo l'interazione come :

$h\nu' = h\nu / (1 + \varepsilon(1 - \cos\theta))$, essendo $\varepsilon = h\nu / m_e c^2$.

Invece l'energia T ($= h\nu - h\nu'$) acquisita dall'elettrone avrà la seguente forma :

$T = m_e c^2 \varepsilon^2 (1 - \cos\theta) / (1 + \varepsilon(1 - \cos\theta))$.

Ci interessa considerare due casi particolari :

- 1) $\theta = 0 \rightarrow \nu' = \nu$, quindi $T=0$
- 2) $\theta = \pi \rightarrow h\nu' = h\nu / (1+2\varepsilon)$ e $T = h\nu 2\varepsilon / (1+2\varepsilon)$

Il secondo caso è denominato Compton Edge e corrisponde al valore della massima deflessione del fotone, e quindi rappresenta il massimo dell'energia assorbita dall'elettrone.

3. Produzione di coppie elettrone – positrone – Questo tipo di interazione consiste nell'attraversamento da parte del fotone del campo coulombiano di un nucleo atomico. Il fotone tende quindi a trasformarsi in una coppia elettrone-positrone.

$\gamma + \text{nucleo} \rightarrow e^- + e^+ + \text{nucleo}$ Questo tipo di interazione è dominante per circa $E > 1 \text{ MeV}$, ed avviene solamente quando l'energia del fotone è maggiore di $2m_e$.

La procedura dell'esperimento

La misura della massa dell'elettrone è stata eseguita a partire dalla determinazione dell'energia del Compton Edge associato al fotone da 1.275 MeV emesso dalla sorgente di Sodio 22. Infatti determinando sperimentalmente il valore di tale energia è possibile calcolare la costante ϵ e quindi di conseguenza la massa dell'elettrone.

La misura è stata realizzata utilizzando un rivelatore a scintillazione di ioduro di sodio (NaI), su cui sono state poste tre differenti sorgenti radioattive (Cobalto 60, Cesio 137 e Sodio 22). Negli spettri di tali sorgenti abbiamo individuato la posizione, in canali dell'analizzatore multicanale, dei picchi (corrispondenti alla situazione in cui il fotone perde completamente la sua energia nell'urto con l'elettrone) per costruire una retta di calibrazione che ci permettesse di determinare qual è la relazione tra i canali del multicanale e l'energia teorica dei fotoni emessi dalle sorgenti, e quindi il valore dell'energia del Compton Edge.

Infatti si può notare come la costante $\epsilon = hv/m_e c^2$ dipenda dalla massa dell'elettrone, che dovrà essere di 511 keV. Da questa formula e dal valore dell'energia T dell'elettrone dopo l'urto si ricava la formula:

$$E_{CE} = E_0 2\epsilon / (1 + 2\epsilon). \text{ Essendo } E_0 = hv \text{ otteniamo } \epsilon = E_0 / m_e c^2.$$

Strumenti utilizzati: i rivelatori a scintillazione

Lo strumento utilizzato per determinare gli spettri delle sorgenti è, come già detto, un *rivelatore a scintillazione*. Esso consiste di un materiale scintillante i cui atomi, una volta eccitati a seguito dell'interazione con i fotoni, decadono emettendo luce visibile (tipicamente nella regione del blu). Tale luce viene inviata ad un fotomoltiplicatore che provvede a convertirla in un segnale elettrico che, processato da un opportuno circuito elettronico (essenzialmente, un amplificatore di segnale), viene acquisito dall'analizzatore multicanale.

Il fotomoltiplicatore è costituito da 4 parti :

1. Catodo – Consiste in un materiale fotosensibile che, per effetto fotoelettrico, converte i fotoni riemessi dal materiale scintillante in una corrente elettrica.
2. Sistema di raccolta di elettroni
3. Moltiplicatore di elettroni composto da dinodi.
4. Anodo di raccolta per il segnale finale.

L'analizzatore multicanale è un dispositivo elettronico in cui gli impulsi elettrici vengono distribuiti in base alla loro ampiezza ed è così possibile determinare uno spettro del materiale che viene utilizzato come sorgente.

Risultati e conclusioni dell'esperimento

Abbiamo quindi studiato i dati degli spettri dei tre radioisotopi e li riportiamo qui in seguito con i relativi grafici:

Spettro del cobalto 60 Spettro del sodio 22 Spettro del cesio 137
Amplificazione = 6 Amplificazione = 6 Amplificazione = 10

Chs	Cts
200	499
226	483
247	502
270	452
292	470
306	451

Chs	Cts
250	551
331	445
446	385
590	272
663	189
754	109

Chs	Cts
103	551
137	597
176	635
192	598
294	602
396	545

315	455
325	438
329	452
363	411
384	447
397	408
407	429
409	426
454	472
571	401
649	352
741	332
796	330
841	327
925	311
1020	331
1077	333
1172	354
1225	360
1293	339
1393	350
1491	385
1512	383
1582	411
1641	387
1704	332
1764	293
1869	234
1915	270
1980	631
2015	886
2019	870
2025	853
2031	863
2036	880
2039	866
2045	837
2049	797
2056	771
2060	732
2069	684
2077	630
2099	519
2101	414
2106	359
2116	309
2125	235
2135	193
2140	184
2183	206
2198	258
2214	351
2222	409

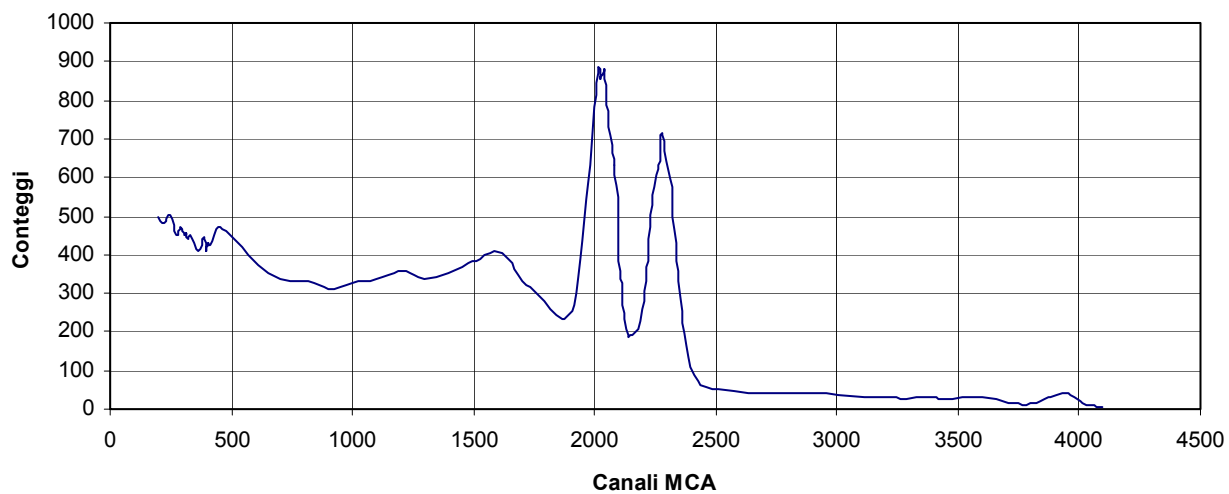
833	93
853	102
873	161
893	325
913	589
933	983
953	1179
973	1003
993	615
1013	292
1033	120
1143	65
1244	72
1321	62
1417	59
1463	62
1523	54
1543	55
1563	51
1583	50
1603	54
1623	51
1643	51
1663	46
1683	53
1703	60
1723	61
1743	61
1763	52
1783	42
1803	39
1823	39
1843	41
1863	37
1883	26
1903	31
1923	35
1943	28
1963	28
1983	17
2003	17
2023	29
2043	24
2063	34
2083	37
2103	51
2124	59
2144	84
2164	110
2182	113
2197	131
2224	102
2245	68

460	534
522	545
564	573
586	583
618	660
659	628
696	631
735	588
793	567
880	520
993	515
1075	584
1180	496
1267	504
1310	527
1353	447
1400	343
1471	198
1523	126
1586	87
1629	74
1698	75
1726	85
1747	143
1760	143
1783	316
1805	537
1830	958
1835	1024
1846	1323
1854	1555
1862	1691
1876	2209
1901	2800
1918	3030
1923	3008
1933	3132
1944	3084
1952	2948
1969	2603
1985	2158
2000	1707
2016	1261
2032	859
2048	554
2065	310
2080	190
2088	134
2105	79
2112	58
2128	35
2139	21
2158	10

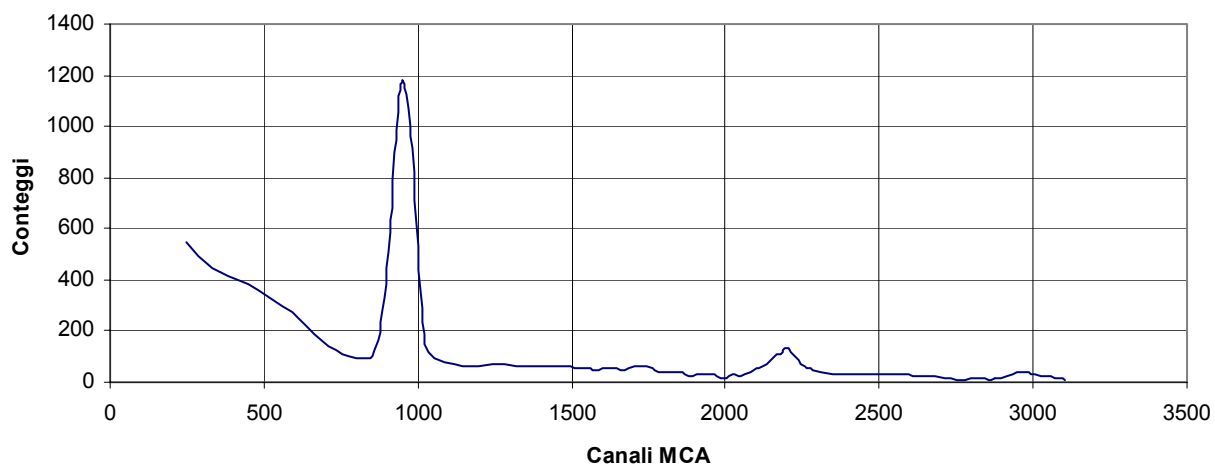
2226	472
2239	529
2248	576
2259	632
2268	654
2274	694
2279	717
2286	693
2299	640
2308	597
2317	556
2323	499
2334	431
2348	332
2363	255
2372	195
2389	137
2408	87
2458	55
2684	44
2716	41
2816	39
2918	39
3004	34
3112	32
3225	31
3288	27
3378	31
3445	27
3604	32
3707	17
3747	13
3779	10
3860	27
3877	32
3930	43
3955	41
3977	29
4001	21
4031	12
4050	8
4068	5
4094	3

2262	55
2273	58
2286	49
2347	35
2476	34
2564	29
2626	24
2730	12
2764	10
2833	12
2858	4
2874	12
2917	21
2950	40
2971	41
2985	40
2990	32
3028	21
3083	18
3101	6

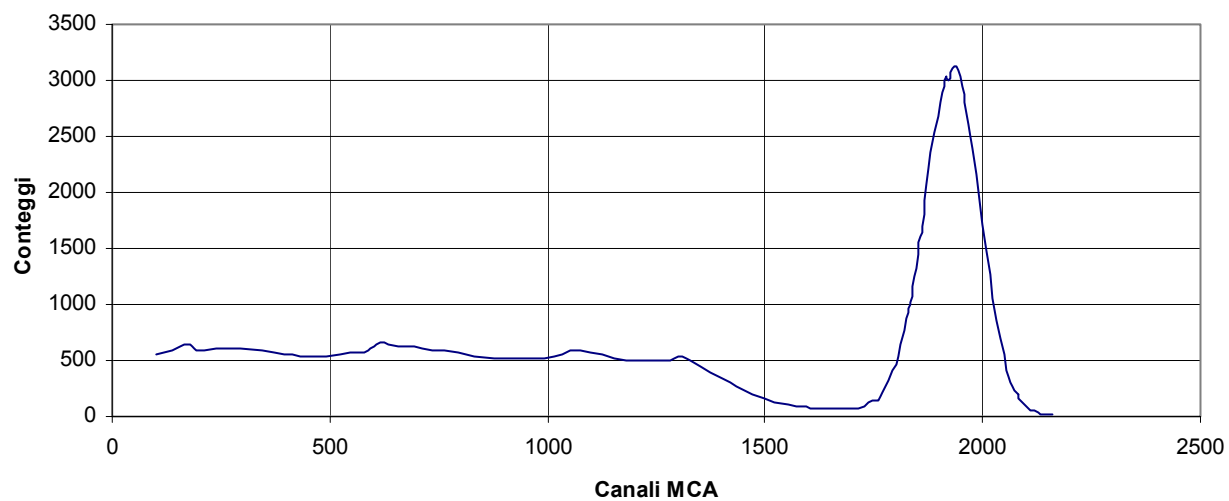
Spettro Cobalto-60



Spettro sodio-22



Spettro del Cesio 137

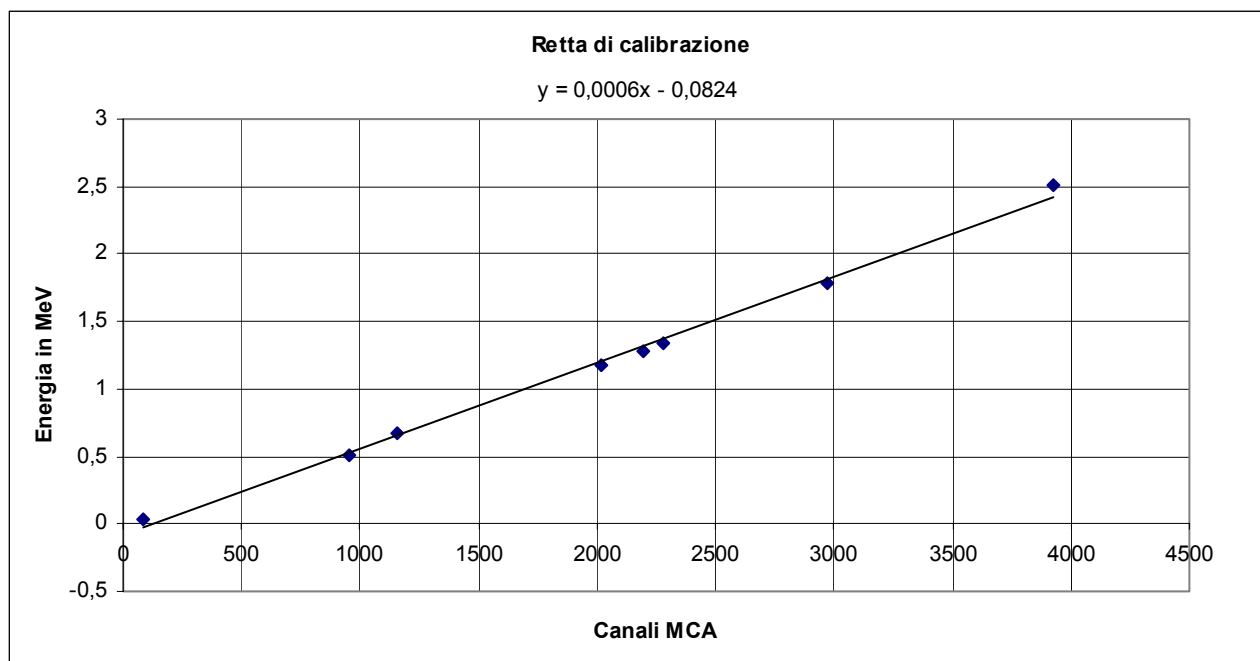


Nella tabella seguente sono riportate le posizioni in canali del multicanale dei picchi delle varie sorgenti e le corrispondenti energie teoriche.

Picco	Canale	E teorica (MeV)
Cs1	82	0,032
Na1	953	0,511
Cs2	1160	0,667
Co1	2015	1,173
Na2	2197	1,275
Co2	2279	1,333
Somma Na	2971	1,786
Somma Co	3930	2,506

N.B. – Nella tabella le posizioni in canali dei picchi della sorgente di Cesio sono scalati per tener conto della diversa amplificazione utilizzata nell’acquisizione dello spettro.
 – I picchi indicati come Somma corrispondono al caso in cui entrambi i fotoni emessi dalle sorgenti cedono completamente la loro energia al rivelatore.

Dalla tabella è possibile costruire la seguente retta di calibrazione



Ovvero:

$$E = m \cdot (\text{Canale}) + q$$

con:

$$m = 6 \cdot 10^{-4} \text{ MeV} \qquad q = -8.24 \cdot 10^{-2} \text{ MeV}$$

Dalle formule precedentemente elencate si ricava la seguente legge risolutiva per esprimere e calcolare la massa dell'elettrone. Sarà quindi:

$$m_e c^2 = 2E_0(E_0 - E_{CE})/E_{CE}.$$

Dallo spettro del Sodio 22 abbiamo stimato individuato nel canale 1923 la posizione del Compton Edge associato al fotone di energia $E_0 = 1.275 \text{ MeV}$. In base alla retta di calibrazione tale canale corrisponde ad una energia $E_{CE} = 1.0718 \text{ MeV}$, per cui, sostituendo nella formula precedente, si ottiene:

$$m_e = 0.483 \text{ MeV}.$$

Il valore ottenuto risulta soddisfacente anche come approssimazione vista la sensibilità degli strumenti a disposizione. Il valore teorico è infatti 0.511 MeV .