

Final limit on the **P**auli Exclusion Principle **V**iolation by electrons by the VIP Experiment.



Laura Sperandio

for the VIP Collaboration ,LNF–INFN, RM

Indice

Principio di esclusione di Pauli e sue implicazioni

Possibili violazioni...

Modello di Ignatiev and Kuzmin

Esperimento di Ramberg and Snow

Esperimento VIP

- Obiettivo***
- Metodo sperimentale***
- Setup***
- Calcolo dell'energia***
- Analisi degli spettri***

Risultati pubblicati

Prospettive future: VIP2

Implicazioni

Il principio di esclusione di Pauli è un principio della meccanica quantistica che si applica solo ai fermioni , particelle a spin semi-intero che formano stati quantistici antisimmetrici.

Il principio di esclusione di Pauli è alla base della comprensione di molte delle caratteristiche distintive della materia.

Esso gioca un ruolo fondamentale in un gran numero di fenomeni fisici

Sebbene non ci sia motivo di dubitare della validità del principio di esclusione di Pauli, molti ricercatori continuano ad interrogarsi su di esso.

Perchè?

"Possible external motivations for violation of statistics include: (a) violation of CPT, (b) violation of locality, (c) violation of Lorentz invariance, (d) extra space dimensions, (e) discrete space and/or time and (f) noncommutative spacetime...."

O.W. Greenberg: AIP Conf.Proc.545:113-127,2004

Possibili violazioni in teorie non locali che incorporano il principio olografico

(Bousso, RMP 74 (2002) 825)

Possibili violazioni in teorie non locali che prevedono una "electron substructure"

(Akama et all., PRL Vol.68 12 (1992) 1826)

Potrebbero segnalare la presenza di dimensioni nascoste

(Greenberg and Mohapatra, PRD 39 (1989) 2032)

Violazioni in teoria di stringa con dimensioni nascoste compatte

Possibili violazioni del PEP...

Problema → costruire una teoria che incorpori una eventuale violazione

3 assunzioni

Indistinguibilità di particelle di una stessa classe
Antisimmetrizzazione della Ψ globale
Connessione tra spin e statistica

Modello di Ignatiev & Kuzmin: la più semplice algebra degli operatori di creazione e distruzione che incorpora nel parametro β le piccole violazioni del principio di esclusione di Pauli.

Operatori di creazione e distruzione connettono 3 stati:

$|0\rangle$ vuoto

$|1\rangle$ stato di singola occupazione

$|2\rangle$ stato non-standard di doppia occupazione

attraverso le relazioni:

$$a^+|0\rangle = |1\rangle \quad a|0\rangle = 0$$

$$a^+|1\rangle = \beta|2\rangle \quad a|1\rangle = |0\rangle$$

$$a^+|2\rangle = 0 \quad a|2\rangle = \beta|1\rangle$$

Il parametro β esprime il grado di violazione nella transizione

$$|1\rangle \rightarrow |2\rangle$$

Atomi non pauliani aventi una anomala distribuzione degli elettroni sugli orbitali

Notare che per $\beta \rightarrow 0$ ritrovo la statistica di Fermi – Dirac e il principio di esclusione è assolutamente vero.

Metodo sperimentale

*Ricerca di raggi-X provenienti da transizioni anomale
(mixed symmetry state)*



Transizione normale
 $2p \rightarrow 1s$

8.05 keV in Cu



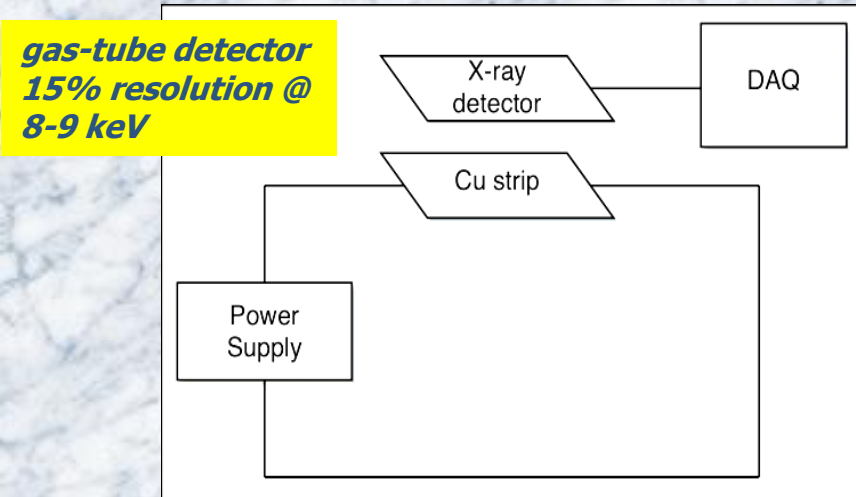
*Transizione che viola il principio
di Pauli*
 $2p \rightarrow 1s$

~ 7.74 keV in Cu

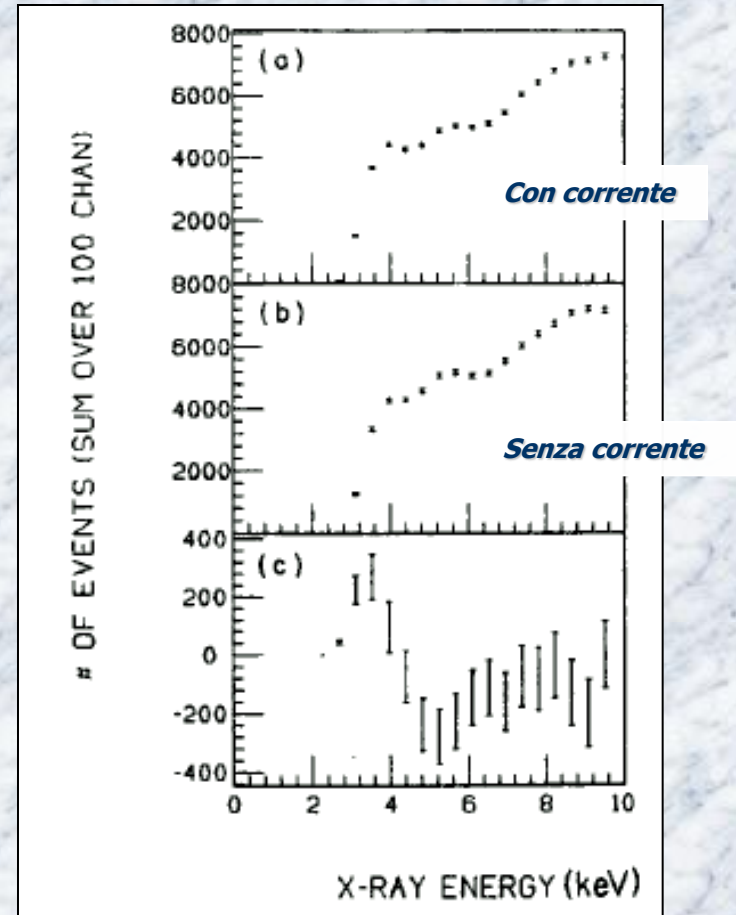
(Greenberg and Mohapatra, PRL 59(1987) 2507; PRL 62(1989)712; PRD 39(1989)2032)

L'esperimento di Ramberg and Snow

Phys. Lett. B238 (1990) - 438



Ricerca di transizioni elettroniche anomale nel rame indotte da una corrente circolante (elettroni esterni "fresh", che interagiscono con elettroni di valenza), cioè transizioni di tipo $2p \rightarrow 1s$ con $1s$ già occupato da due elettroni di spin opposto.



Per 2 mesi di dati

Calcoli (Ramberg & Snow)

Numero di elettroni "nuovi" che attraversano il Cu:

$$N_{new} = \left(\frac{1}{e}\right) \Sigma I \Delta t$$

Il numero minimo di urti che compie l'e con gli atomi di Cu, raccolti dall'area sensibile del rivelatore è dell'ordine di :

$$\frac{D}{\mu}$$

← Diametro del rivelatore

← Libero cammino medio degli e nel Cu

Una stima elementare mostra che la probabilità di cattura è $> 1/10$ della probabilità di scattering.

I raggi-X generati dalle transizioni atomiche possono essere riassorbiti prima di arrivare al rivelatore. Sia σ la sezione d'urto di assorbimento, la lunghezza media di assorbimento sarà:

$$\lambda = \frac{1}{\sigma \rho}$$

Se z è lo spessore del Cu la frazione di corrente visibile al rivelatore sarà λ/z e il **numero di raggi-X aspettati** è:

$$N_x \geq \frac{1}{2} \beta^2 N_{new} \frac{N_{int}}{10} = \frac{\beta^2 (\Sigma I \Delta t) D}{e \mu \rho z \sigma}$$

$$\int_T I(t) dt = 15.44 \cdot 10^6 C$$

$$D = 0.025 m$$

$$\mu = 3.9 \cdot 10^{-8} m$$

$$\rho = 8.96 \cdot 10^3 kg \cdot m^{-3}$$

$$\sigma = 10 m^2 \cdot kg^{-1}$$

$$z = 1.5 \cdot 10^{-3} m$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$

$$N_x \geq \beta^2 (0.90 \cdot 10^{28})$$

$$\beta^2 / 2 \leq 1.7 \cdot 10^{-26} (> 95\% C.L.)$$

Scopo di VIP:

L'esperimento VIP ha lo scopo di ridurre di quattro ordini di grandezza l'attuale limite sperimentale sulla probabilità di violazione del Principio di Esclusione di Pauli per elettroni, attraverso l'uso di rivelatori CCD più sensibili e l'abbattimento del background,

da...

$$\beta^2 / 2 \leq 1.7 \cdot 10^{-26}$$

(Ramberg & Snow, Phys. Lett. B 238 (1990) – 438)

$$\beta^2 / 2 \leq 4.5 \cdot 10^{-28}$$

(VIP collaboration, Physics Letters B 641 (2006) 18–22)

oggi...

$$\beta^2 / 2 \leq 5.72 \cdot 10^{-29}$$

(VIP collaboration, IL NUOVO CIMENTO, Vol.122 B, N.6-7(2007) 641-647)

$$\beta^2 / 2 \leq 3.25 \cdot 10^{-29}$$

(Ultima analisi → correzioni trasporto di carica, pre print INFN-15-04/LNF)

...a

$$\beta^2 / 2 \leq 10^{-31}$$

(dopo l'upgrade di VIP → VIP2)

Energia dei raggi-X anomali

Calcolo delle energie di transizione dei raggi-X anomali, usando la "SUDDEN APPROXIMATION", per i tre canali di decadimento:

K-edge → dalla banda di conduzione

K_α → dal livello 2p

K_β → dal livello 3p

Il caso della K-edge è il meno probabile: la **regola di selezione Δl=1** favorisce i decadimenti 3d → 2p e 2p → 1s piuttosto che il diretto 3d → 1s.

$$\Delta t_T \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \cong 10^{-19} \text{ s} \gg \Delta t_R \cong 10^{-15} \text{ s}$$

Tempo della transizione

Tempo di riarrangiamento degli orbitali

METODO MULTICONFIGURAZIONALE DIRAC-FOCK

Software per atomi muonici adattato a elettroni non antisimmetrizzati

Ottimizzazione dei parametri attraverso un processo autoconsistente

Tiene conto di: correzioni relativistiche e radiative, lamb-shift, operatore di Breit,

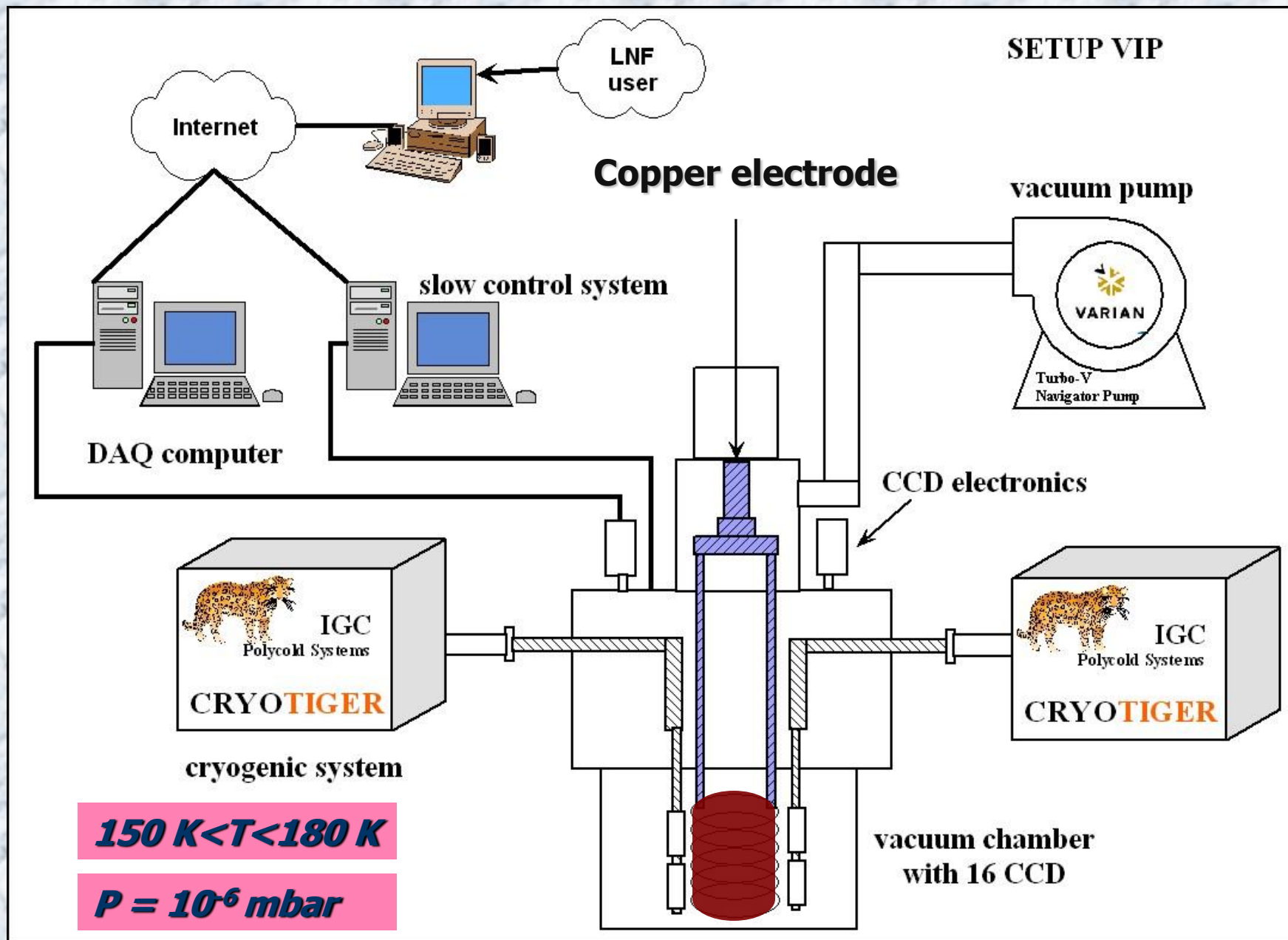
L'incertezza su tali valori è di qualche eV

1. **K_α** e **K_β** hanno rate di transizione più elevate rispetto a tutte le altre.
2. All'aumentare del numero atomico **Z** cresce la probabilità di transizione e il **ΔE** tra transizione permessa e proibita → le due linee di emissione si distanziano.
3. **Au** e **Pb** potrebbero essere buoni candidati per esperimenti di questo tipo.

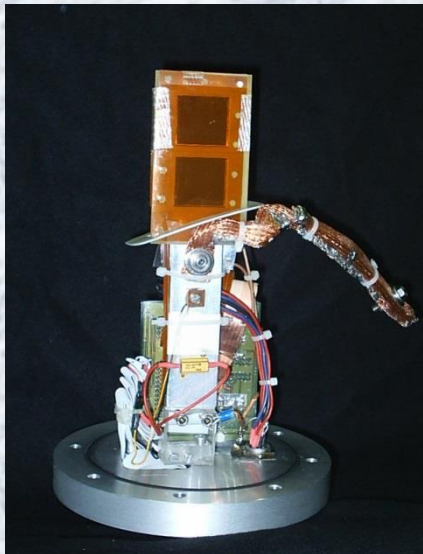
"Evaluation of the anomalous X-ray energy in VIP experiment", 2013, INFN-13-19/LNF

"Evaluation of the anomalous X-ray energy in VIP experiment, some values from Dirac-Fock method", 2013, INFN-13-20/LNF

"Evaluation of the X-ray transition energies for the pauli-principle-violating atomic transitions in several elements by using Dirac-Fock method", 2013, INFN-13-21/LNF



Test setup con 2 CCD-55 e parte dell'elettronica



Perchè Charge Coupled Device?

*Migliori rivelatori per raggi – X
fino alla decina di KeV*



$\Delta E \sim 350 \text{ eV}$

*Risoluzione in energia
(FWHM) $\sim 300 \text{ eV}$*



Setup and target



Attività sperimentale con test-setup

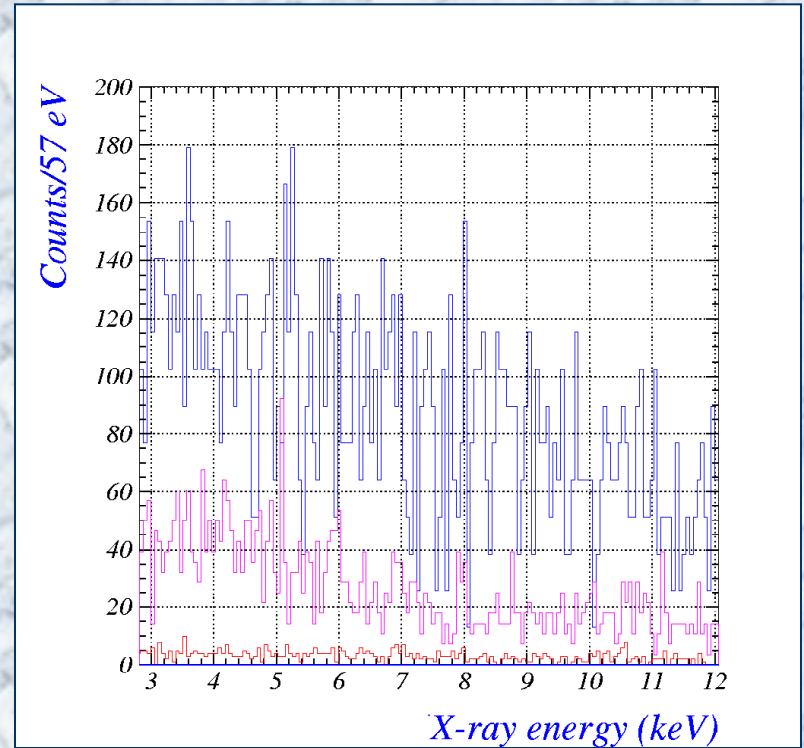
Novembre-Dicembre 2004: misure preliminari con 2-CCD test setup nei LNF, con e senza shielding;

Fine di Dicembre 2004: trasporto ed installazione del test setup ai LNGS prime misure (senza shielding);

21 Febbraio 2005 – 28 Marzo 2005: 5 settimane di presa dati con shielding, con il test setup ai LNGS;

**Test setup con 2 CCD –
distribuzioni normalizzate**

— LNF no sh.
— LNF con sh.
— LNGS con sh.



Febbraio 2006 – Aprile 2008: presa dati non continuativa con setup completo e shielding ai LNF

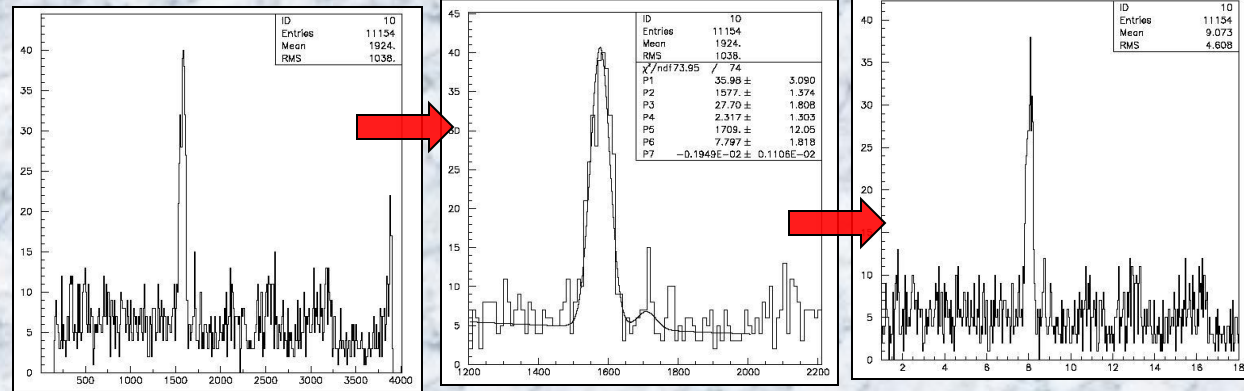
Fondo ($I = 0$ A) → **83118 files** x 5 min = **415590 min**
Segnale ($I = 40$ A) → **79654 files** x 5 min = **398270 min**

Analisi degli spettri

a) calibrazione in energia dei rivelatori CCD



16 spettri calibrati con scale in energia perfettamente allineate



b) Somma degli spettri di ogni set di dati in un unico spettro ($I=0A$, $I=40A$)

c) normalizzazione rispetto al tempo e sottrazione degli spettri (segnale – fondo)

$$C = T_{40A} / T_{0A}$$

d) individuazione della regione di interesse (ROI)

$$ROI = 7740 \pm \frac{(\Gamma + 10)}{2} \text{ eV} \quad \Gamma = (2.354 \cdot \sigma) \text{ eV} = \text{risol. rivel.}$$

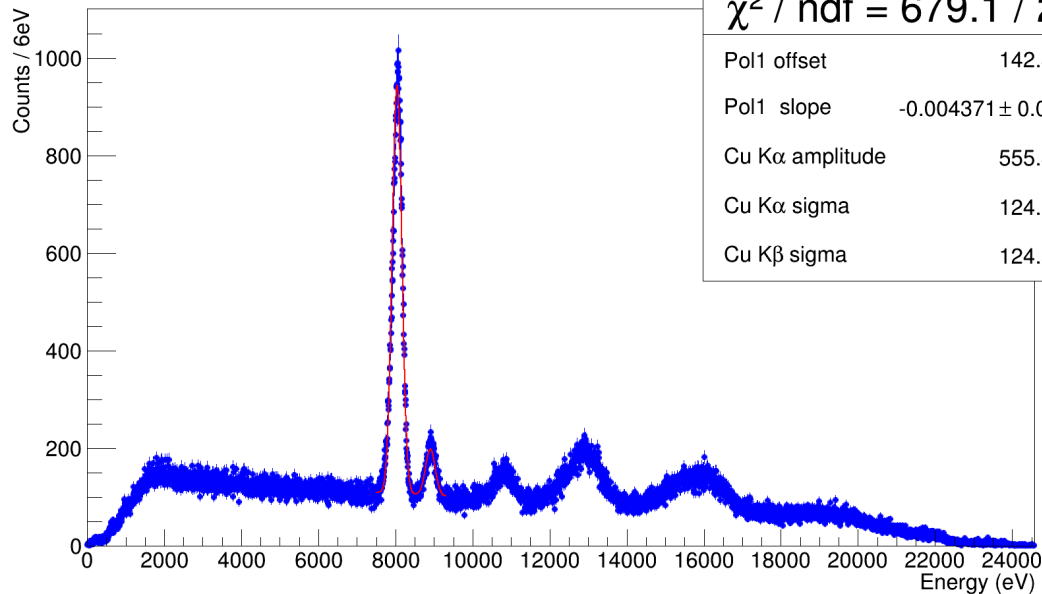
e) conteggio eventi nella ROI

$$N_X \pm \varepsilon_X \quad \varepsilon_X = \sqrt{N_{ev}(\text{segnale}) + c^2 N_{ev}(\text{fondo})}$$

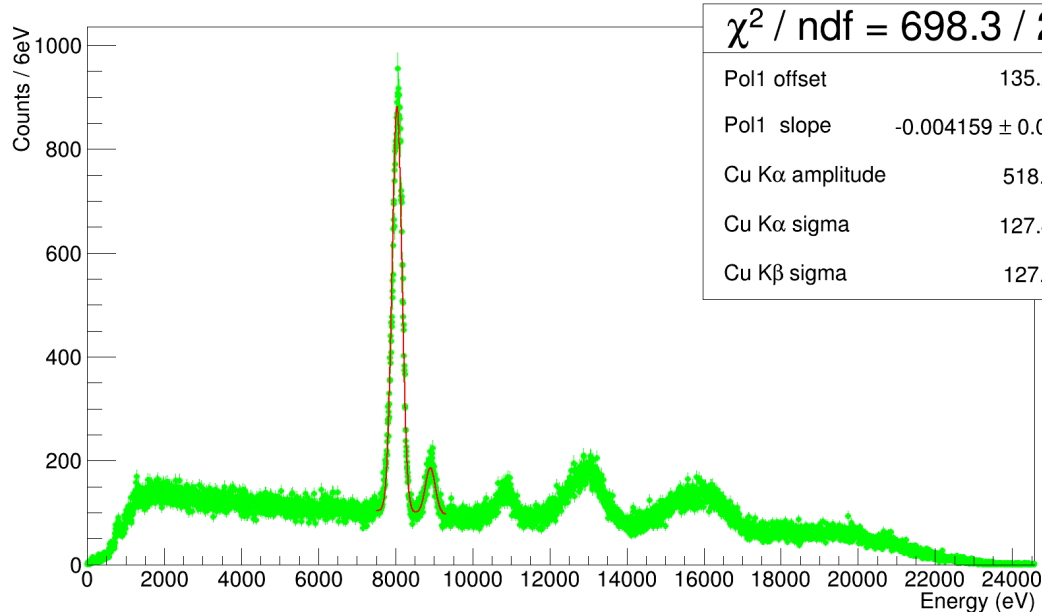
f) calcolo del parametro di violazione $\beta^2/2$ alla R&S

Il limite migliore!

Background spectra fit



Current spectra fit



CORREZIONI DEL TRASPORTO DI CARICA

Ha lo scopo di migliorare la risoluzione dei rivelatori a cui è correlato il valore sperimentale di β .

E' necessario applicare tale correzione per via della struttura intrinseca delle CCD, in cui il segnale viene shiftato nei vari pixel, per cui durante questi passaggi parte della carica viene persa.

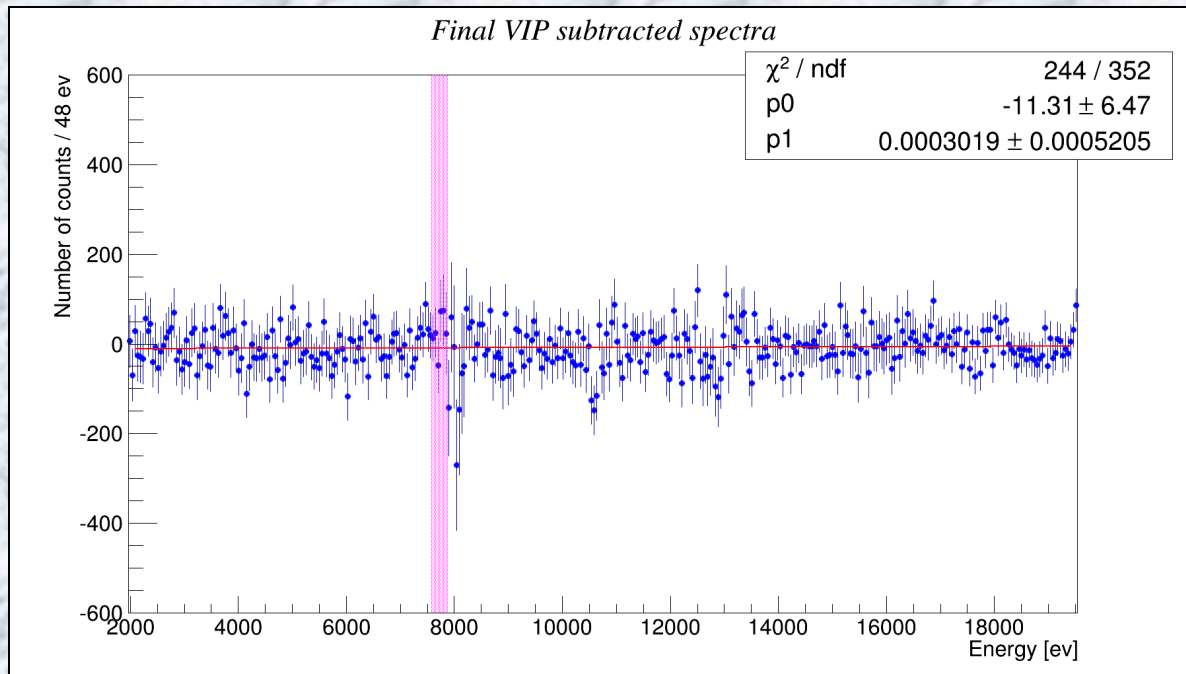


L'algoritmo delle correzioni applicato a tutti i set di dati non altera gli spettri e $\sigma_{K\alpha}$ migliora del 20%

FWHM = Γ = 300 eV

ROI: [7585, 7895]

Lo spettro sottratto

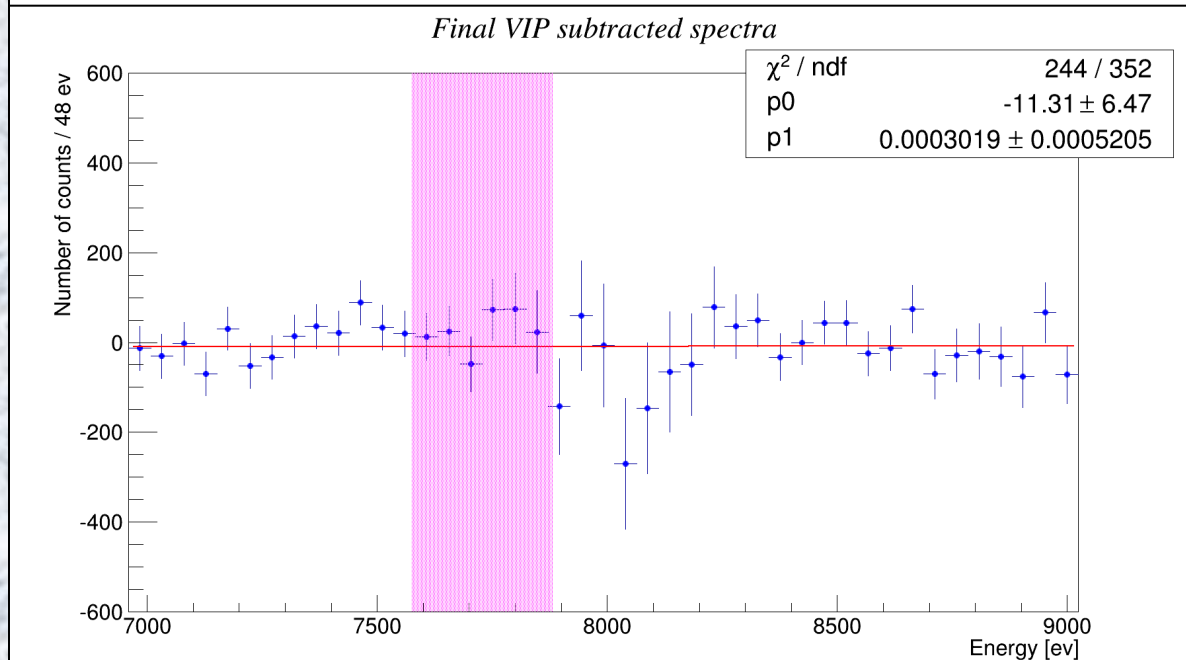


ROI: [7585,7895]

$$N_x + \epsilon_x = 37 \pm 146$$

$$\beta^2 / 2 \leq 3.25 \times 10^{-29}$$

at 99.7 C.L.



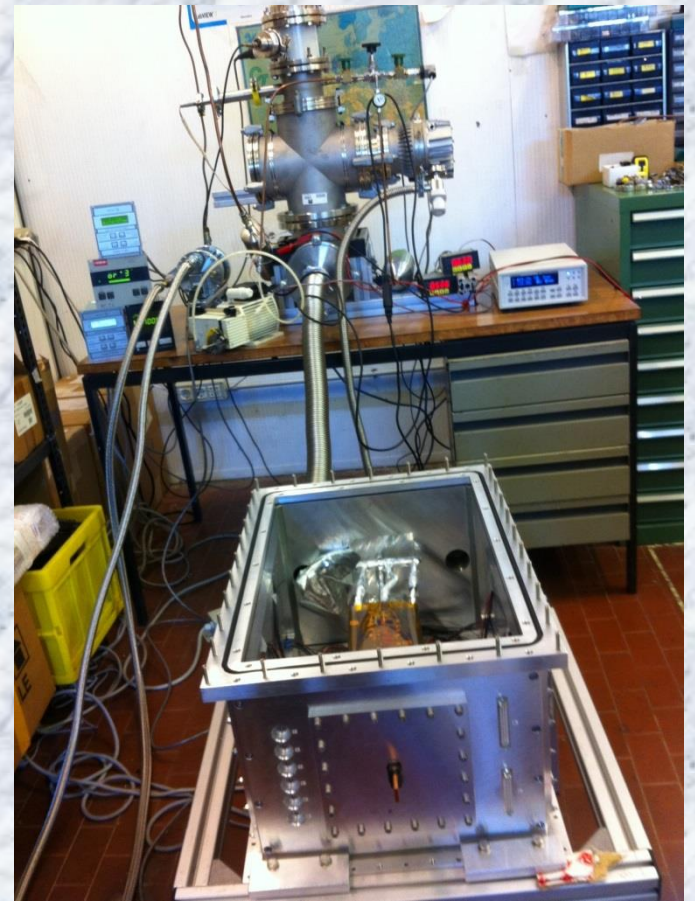
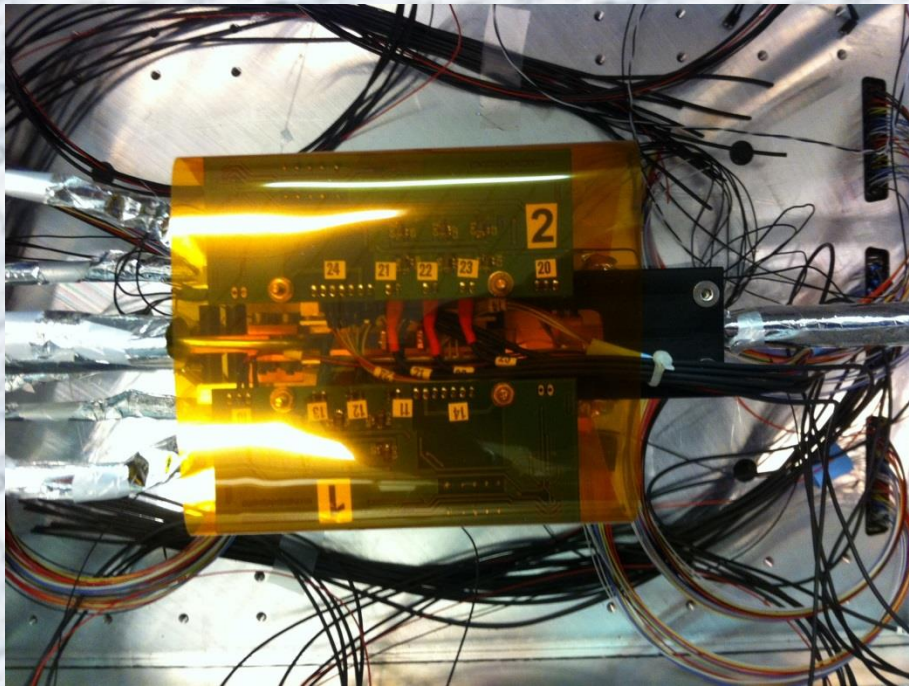
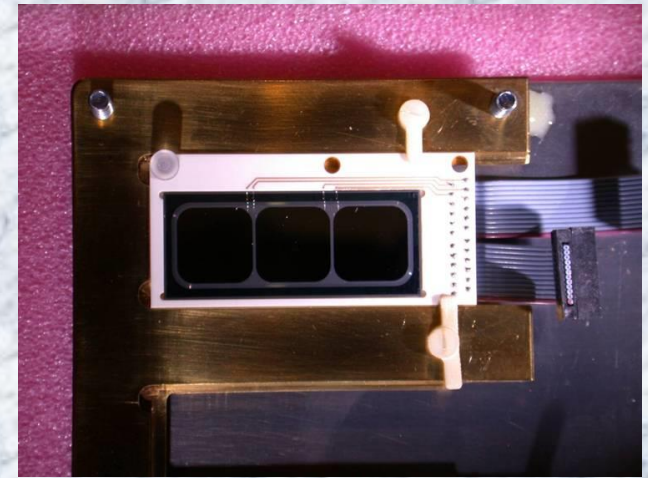
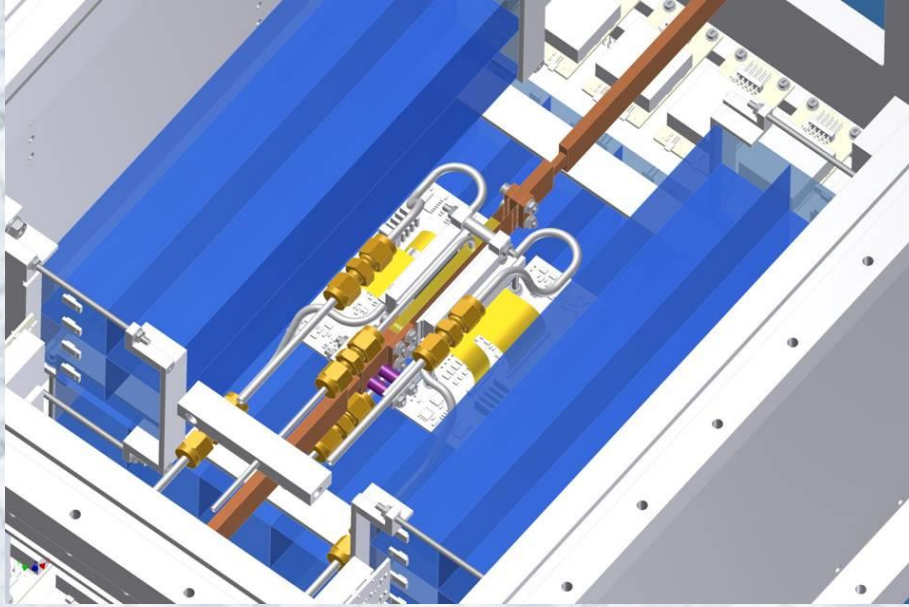
**Così abbiamo
migliorato il limite
ottenuto da
Ramberg & Snow
di un fattore ~ 250.
(circa 3 ordini di
grandezza)**

VIP 2

- ***Maggiore compattezza del sistema → migliora l'accettazione***
- ***Nuovo target → 3,5 cm x 1,2 cm x 25 μm***
- ***Diverso sistema di raffreddamento del target (ad acqua)***
- ***Corrente circolante nel target → fino a 150 A***
- ***Flussaggio di azoto per ridurre il radon***
- ***Nuovi rivelatori SDD (Silicon Drift Detector) triggerabili (110 K) raffreddati ad Argon liquido a circolo chiuso***
- ***Sistema di veto con scintillatori plastici letti da SiPM (Silicon Photomultiplier)***
- ***Durata presa dati prevista 3-4 anni***

$$\beta^2 / 2 \leq 10^{-31}$$

VIP 2



Conclusioni

- **Obiettivo: migliorare il limite sulla probabilità di violazione del PEP per elettroni di 3-4 ordini di grandezza**
- **La DAQ ai LNGS (iniziata in Aprile 2006) ci ha permesso di raggiungere il valore : 5.72×10^{-29}**
- **Una analisi più raffinata che ha tenuto conto delle correzioni per il trasporto di carica ci ha fornito il miglior limite al mondo: 3.25×10^{-29}**
- **Tale limite potrà essere ancora migliorato nei prossimi anni (arrivare a toccare 10^{-31})**
- **Il futuro: VIP2 (rivelatori SDD - silicon drift detector)**

Possibili violazioni del PEP...

Possibili violazioni in teorie non locali che incorporano il principio olografico

(Bousso, RMP 74 (2002) 825)

Possibili violazioni in teorie non locali che prevedono una "electron substructure"

(Akama et al., PRL Vol.68 12 (1992) 1826)

Potrebbero segnalare la presenza di dimensioni nascoste

(Greemberg and Mohapatra, PRD 39 (1989) 2032)

Violazioni in teoria di stringa con dimensioni nascoste compatte

Come legare la probabilità di violazione del PEP e il raggio di compattezza delle extra dimensioni?

[Medvedev → stochastic interpretation of the ambiguous statistics]

$$\ell = \frac{\beta^2}{2} c \leq 1.35 \cdot 10^{-19} m \quad \text{per} \quad \frac{\beta^2}{2} \leq 4.5 \cdot 10^{-28}$$

$$\ell = \frac{\beta^2}{2} c \leq 1.71 \cdot 10^{-20} m \quad \text{per} \quad \frac{\beta^2}{2} \leq 5.72 \cdot 10^{-29}$$

(Medvedev, PRL 78 (1997) 4147)

(E ~ TeV)

Calcoli delle energie di transizioni standard e proibite per vari elementi, attraverso il metodo Dirac-Fock

Elemento (Z)	E_{ST} (KeV)	E_{PEPV} (KeV)	Rate Trans. (s^{-1})	ΔE (eV)
Cu 29	$K_{\alpha 1}$ 8,027	7,746	$2,569 \cdot 10^{14}$	279,84
	$K_{\alpha 2}$ 8,047	7,729	$2,637 \cdot 10^{14}$	318,86
	$K_{\beta 1}$ 8,905	8,531	$2,674 \cdot 10^{13}$	373,72
	$K_{\beta 2}$ 8,905	8,529	$2,766 \cdot 10^{13}$	375,87
Ge 32	$K_{\alpha 1}$ 9,887	9,556	$3,997 \cdot 10^{14}$	330,37
	$K_{\alpha 2}$ 9,855	9,526	$4,122 \cdot 10^{14}$	329,21
	$K_{\beta 1}$ 10,982	10,568	$4,460 \cdot 10^{13}$	414,42
	$K_{\beta 2}$ 10,978	10,564	$4,620 \cdot 10^{13}$	413,97
Ag 47	$K_{\alpha 1}$ 22,163	21,680	$2,115 \cdot 10^{15}$	482,70
	$K_{\alpha 2}$ 21,990	21,511	$2,247 \cdot 10^{15}$	478,80
	$K_{\beta 1}$ 24,942	24,323	$3,338 \cdot 10^{14}$	619,51
	$K_{\beta 2}$ 24,912	24,294	$3,462 \cdot 10^{14}$	617,10
Au 79	$K_{\alpha 1}$ 68,805	68,002	$1,784 \cdot 10^{16}$	802,41
	$K_{\alpha 2}$ 66,991	66,208	$2,104 \cdot 10^{16}$	783,15
	$K_{\beta 1}$ 77,980	76,938	$3,699 \cdot 10^{15}$	1041,89
	$K_{\beta 2}$ 77,575	76,548	$3,866 \cdot 10^{15}$	1027,09
Pb 82	$K_{\alpha 1}$ 74,970	74,134	$2,064 \cdot 10^{16}$	836,22
	$K_{\alpha 2}$ 72,805	74,134	$2,064 \cdot 10^{16}$	836,22
	$K_{\beta 1}$ 84,939	83,856	$4,348 \cdot 10^{15}$	1082,64
	$K_{\beta 2}$ 84,450	83,385	$4,541 \cdot 10^{15}$	1065,09

At the root of the Exclusion Principle: proof of spin-statistics theorem by Lüders and Zumino

Postulates:

- I. The theory is invariant with respect to the proper inhomogeneous Lorentz group (includes translations, does not include reflections)***
- II. Two operators of the same field at points separated by a spacelike interval either commute or anticommute (locality - microcausality)***
- III. The vacuum is the state of lowest energy***
- IV. The metric of the Hilbert space is positive definite***
- V. The vacuum is not identically annihilated by a field***

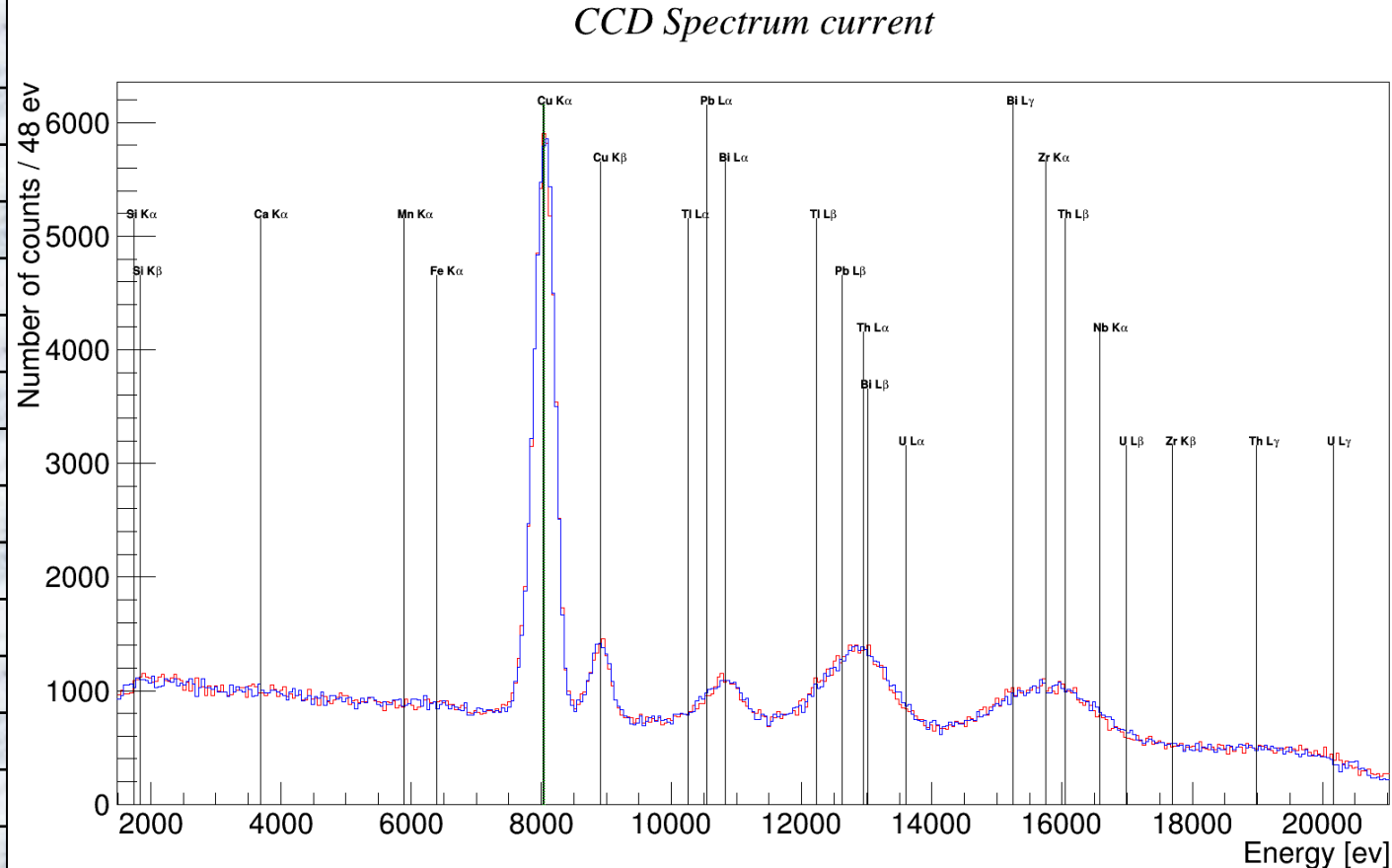
From these postulates it follows that (pseudo)scalar fields commute and spinor fields anticommute.

(G. Lüders and B. Zumino, Phys. Rev. 110 (1958) 1450)

Studio del fondo

$I=40A$; $T=142905 \text{ min.}$; $N_{ev}(1\div 18 \text{ KeV})=117300$

Line	Element	Energy (KeV)
1	$K_{\alpha}(Si)$	1.74
2	$K_{\alpha}(Ca)$	3.69
3	$K_{\alpha}(Cu)$	8.04
4	$K_{\beta}(Cu)$	8.91
5	$L_{\alpha}(Pb)$	10.54
6	$L_{\alpha}(Bi)$	10.83
7	$L_{\beta}(Pb)$	12.62
8	$L_{\alpha}(Th)$	12.95
9	$L_{\beta}(Bi)$	13.01
10	$L_{\alpha}(U)$	13.60
11	$L_{\gamma}(Bi)$	15.25
12	$K_{\alpha}(Zr)$	15.75
13	$L_{\beta}(Th)$	16.04
14	$L_{\beta}(U)$	16.98
15	$K_{\beta}(Zr)$	17.70



We tried to match the observed spectral peaks with the known energies of some elements, which may actually be found in the materials of the setup (ceramics of the circuits, soldering, materials of the same setup,.....) as this also affords a rough check of detector linearity. We conclude that the detectors display a good linearity also for energies outside the interval 7000-10000 keV for which the first calibration was made.

A few remarks on the Ignatiev-Kuzmin model

(A. Yu. Ignatiev and V. A. Kuzmin, Yad. Fiz. 46 (1987) 786, and ICTP preprint IC/87/13 (1987))

Three base states: $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$

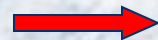
Action of creation-annihilation operators

$$\begin{aligned} a^+ |0\rangle &= |1\rangle & a |0\rangle &= 0 \\ a^+ |1\rangle &= \beta |2\rangle & a |1\rangle &= |0\rangle \\ a^+ |2\rangle &= 0 & a |2\rangle &= \beta |1\rangle \end{aligned}$$

There are nontrivial trilinear relations between creation and annihilation operators

$$\begin{aligned} a^2 a^+ + \beta^2 a^+ a^2 &= \beta^2 a \\ a^2 a^+ + \beta^4 a^+ a^2 &= \beta^2 a a^+ a \\ a^3 &= (a^+)^3 = 0 \end{aligned}$$

A modified number operator
$$N = \frac{1}{1 - \beta^2 + \beta^4} \left[(2 - \beta^2)I + (-1 + 2\beta^2)a^+ a + (-2 + \beta^2) a a^+ \right]$$



Toy model Hamiltonian:

$$H = H_0 + H_{\text{int}} = EN + \varepsilon V$$

$$V = a^2 a^\dagger + a^\dagger a^2 + aa^\dagger a + h.c.$$

with $\varepsilon = E$

so that from standard perturbation theory, one finds the following transition rates:

$$W_{01} = 2 \frac{\varepsilon^2}{E^2} (1 - \cos Et)$$

$$W_{02} = 0$$

$$W_{12} = 2\beta^2 \frac{\varepsilon^2}{E^2} (1 - \cos Et)$$

***Pauli violating transition rate
proportional to β^2***

Misure preliminari

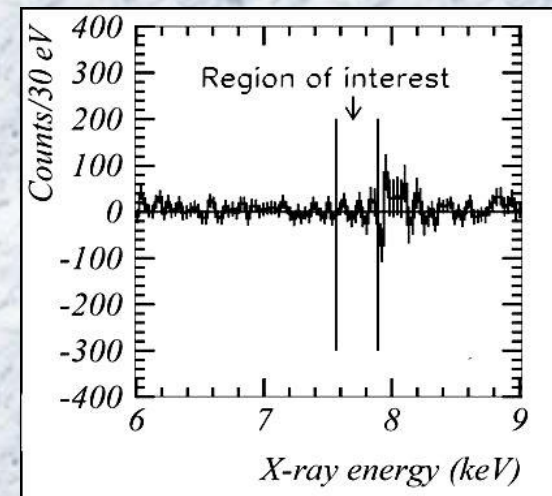
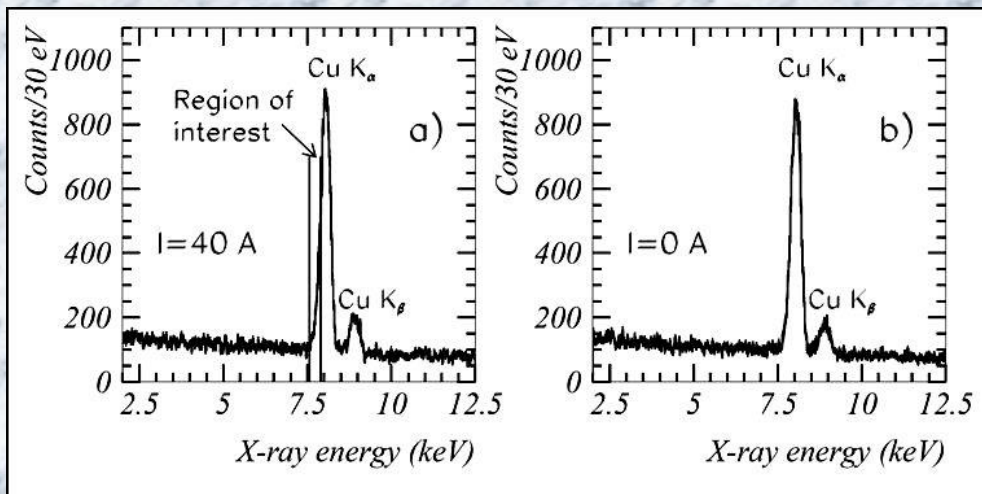
Misura preliminare effettuata nel periodo 21 Novembre – 13 Dicembre 2005, senza shielding, ai LNF- INFN .

Circa 10 giorni con $I=40A$

(CCD lette ogni 5 min)

Circa 10 giorni con $I=0A$

Allo scopo di ottenere il numero di raggi-X dovuti ad una eventuale violazione del PEP, lo spettro senza corrente è stato sottratto a quello con corrente. La ROI in cui mi aspetto l'evidenza della violazione si ha a ± 170 eV attorno alla posizione della transizione anomala (7.729 keV).



Primi risultati

Seguendo i calcoli di R&S ma usando i nostri parametri:

$$N_{X+\varepsilon_X} = 2721 \pm 52 \quad @ I=40A$$

$$N_{X+\varepsilon_X} = 2742 \pm 52 \quad @ I=0A$$

$$N_X \geq 4.9 \times 10^{29} \cdot \frac{\beta^2}{2}$$

*Numero di raggi-X
nella ROI*

Per il parametro di violazione del PER si ha:

$$\beta^2 / 2 \leq 4.5 \times 10^{-28}$$

*Il limite ottenuto da Ramberg & Snow è stato
migliorato di un fattore ~ 40.*

*"New experimental limit on the Pauli Exclusion Principle violation
by electrons", S. Bartalucci et al.,*

Physics Letters B 641 (2006) 18–22