



Daniele Guffanti
University & INFN Milano-Bicocca

Tesi triennali in Fisica del neutrino e tecnologie collegate

Novant'anni di neutrini (and counting)

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvoUet
ansuhren bitte, Ihnen das naheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der K - und $Li-6$ Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifalten Ausweg
verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
sünste von derselben Grosseordnung wie die Elektronenmasse sein und
sogarfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
würde, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment M ist. Die Experimente

W. Pauli, letter to L. Meitner

(CERN document archive)

Ich traue diese Idee
zu publizieren und würde mich erst vornehmlich an Sie, liebe
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis
eines solchen Neutrons stünde, wenn dieses ein ebensolches oder etwa
noch grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein
gamma-Strahl.

1930: Pauli ipotizza una particella neutra di spin $1/2$ per
spiegare lo spettro continuo dei decadimenti β

Novant'anni di neutrini (and counting)

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abchrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvoUet anhören bitte, Ihnen das nähären auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der β - und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verzweifalten Ausweg verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente

W. Pauli, letter to L. Meitner

(CERN document archive)

Ich traue diese Idee zu publizieren und würde mich erst vorüberwoll an Sie, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stünde, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein α -Strahl.

1930: Pauli ipotizza una particella neutra di spin $1/2$ per spiegare lo spettro continuo dei decadimenti β

1933: Fermi propone una teoria dei decadimenti β che include il neutrino

Novant'anni di neutrini (and counting)

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abchrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvoUet anhören bitte, Ihnen das nähären auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der β - und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verzweifalten Ausweg verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grosseordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass jedes β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente

W. Pauli, letter to L. Meitner

(CERN document archive)

Ich traue diese Idee zu publizieren und würde mich erst vorüberwilling an Sie, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stünde, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein α -Strahl.

1930: Pauli ipotizza una particella neutra di spin $1/2$ per spiegare lo spettro continuo dei decadimenti β

1933: Fermi propone una teoria dei decadimenti β che include il neutrino

1956: Cowan & Reines ottengono la prima evidenza sperimentale del neutrino

Novant'anni di neutrini (and counting)

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abchrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvoUet anhören bitte, Ihnen das nähären auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der β - und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verzweifalten Ausweg verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass jedes β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment ist. Die Experimente

W. Pauli, letter to L. Meitner

(CERN document archive)

Ich traue mir diese Idee zu publizieren und würde mich erst verantwortvoll an Sie, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stünde, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein α -Strahl.

1930: Pauli ipotizza una particella neutra di spin $1/2$ per spiegare lo spettro continuo dei decadimenti β

1933: Fermi propone una teoria dei decadimenti β che include il neutrino

1956: Cowan & Reines ottengono la prima evidenza sperimentale del neutrino

1956 → Fondamentali risultati sperimentali e un po' di sorprese lungo la strada

Cosa sappiamo

Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

Piccolissima sezione d'urto



$$\nu-e^- \text{ ES@1 MeV: } \sigma \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$$

$$\gamma-e^- \text{ ES@1 MeV: } \sigma \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Materia trasparente a ν 's

✓ ν che vengono da lontano

✗ Servono rivelatori molto grandi

Cosa sappiamo

Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

Piccolissima sezione d'urto

$$\nu-e^- \text{ ES@1 MeV: } \sigma \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$$

$$\gamma-e^- \text{ ES@1 MeV: } \sigma \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Materia trasparente a ν 's

✓ ν che vengono da lontano

✗ Servono rivelatori molto grandi

Sorgenti

Artificiali:

- ▶ Acceleratori
- ▶ Reattori
- ▶ Sorgenti radioattive

Naturali:

- ▶ Sole
- ▶ Terra
- ▶ Supernova
- ▶ Raggi cosmici
- ▶ Eventi astrofisici



Cosa sappiamo

Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

Piccolissima sezione d'urto



$$\nu-e^- \text{ ES@1 MeV: } \sigma \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$$

$$\gamma-e^- \text{ ES@1 MeV: } \sigma \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$$

- Materia trasparente a ν 's
- ✓ ν che vengono da lontano
- ✗ Servono rivelatori molto grandi

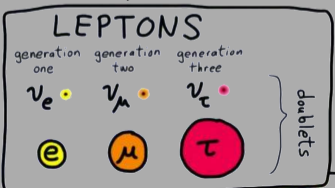
Sorgenti



- | | |
|------------------------|----------------------|
| Artificiali: | Naturali: |
| ▶ Acceleratori | ▶ Sole |
| ▶ Reattori | ▶ Terra |
| ▶ Sorgenti radioattive | ▶ Supernova |
| | ▶ Raggi cosmici |
| | ▶ Eventi astrofisici |

Tre sapori, molta leggerezza

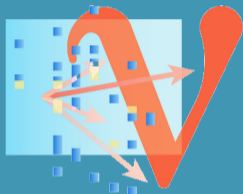
Sono particelle elementari dello SM, previsti con massa nulla



Cosa sappiamo

Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

Piccolissima sezione d'urto



$$\nu - e^- \text{ ES @ 1 MeV: } \sigma \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$$

$$\gamma - e^- \text{ ES @ 1 MeV: } \sigma \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$$

- Materia trasparente a ν 's
- ✓ ν che vengono da lontano
- ✗ Servono rivelatori molto grandi

Sorgenti



Artificiali:

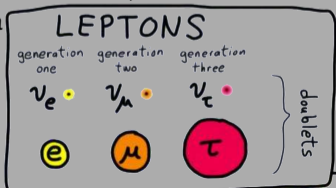
- ▶ Acceleratori
- ▶ Reattori
- ▶ Sorgenti radioattive

Naturali:

- ▶ Sole
- ▶ Terra
- ▶ Supernova
- ▶ Raggi cosmici
- ▶ Eventi astrofisici

Tre sapori, molta leggerezza

Sono particelle elementari dello SM,
previsti con massa nulla



Oscillazioni di sapore

Massa non nulla!
autostati di massa \neq autostati di sapore



Cosa non sappiamo

Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

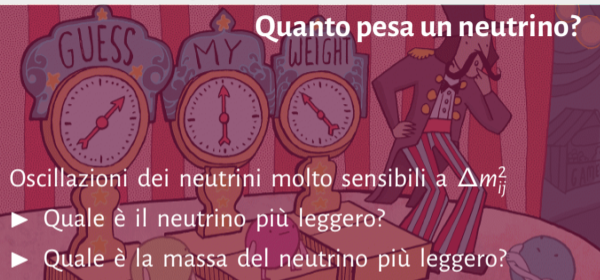
Quanto pesa un neutrino?

Oscillazioni dei neutrini molto sensibili a Δm_{ij}^2

- ▶ Quale è il neutrino più leggero?
- ▶ Quale è la massa del neutrino più leggero?

Cosa non sappiamo

Quanto pesa un neutrino?



Oscillazioni dei neutrini molto sensibili a Δm_{ij}^2

- ▶ Quale è il neutrino più leggero?
- ▶ Quale è la massa del neutrino più leggero?

Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

Antineutrini allo specchio?



- ▶ Neutrini e antineutrini si comportano allo stesso modo?

Violazione di CP nei neutrini può aiutare a spiegare perché l'Universo è fatto di materia

Cosa non sappiamo

Quanto pesa un neutrino?

Oscillazioni dei neutrini molto sensibili a Δm_{ij}^2

- ▶ Quale è il neutrino più leggero?
- ▶ Quale è la massa del neutrino più leggero?

Solo tre sapori?

Alcuni risultati sperimentali non del tutto compatibili con modello a tre sapori

- ▶ Esiste un quarto stato di sapore?
- ▶ Uno o più neutrini *sterili*?



Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine



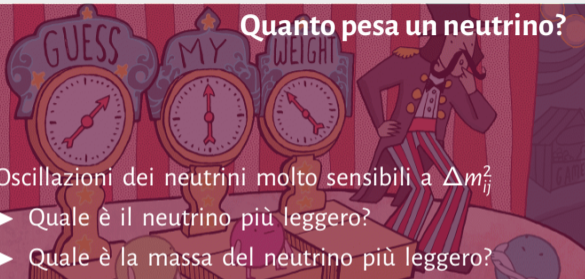
Antineutrini allo specchio?

- ▶ Neutrini e antineutrini si comportano allo stesso modo?

Violazione di CP nei neutrini può aiutare a spiegare perché l'Universo è fatto di materia

Cosa non sappiamo

Quanto pesa un neutrino?



Oscillazioni dei neutrini molto sensibili a Δm_{ij}^2

- ▶ Quale è il neutrino più leggero?
- ▶ Quale è la massa del neutrino più leggero?

Solo tre sapori?

Alcuni risultati sperimentali non del tutto compatibili con modello a tre sapori

- ▶ Esiste un quarto stato di sapore?
- ▶ Uno o più neutrini *sterili*?



Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

Antineutrini allo specchio?



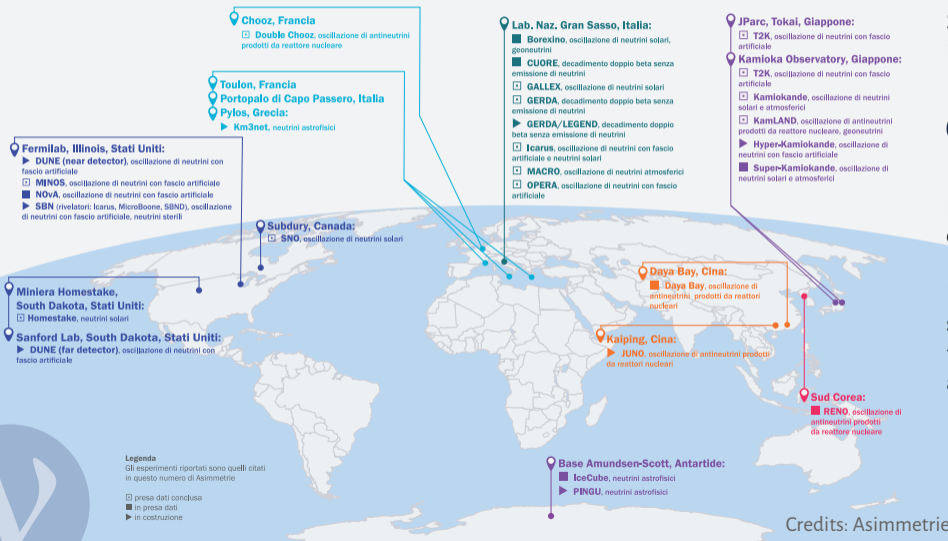
- ▶ Neutrini e antineutrini si comportano allo stesso modo?

Violazione di CP nei neutrini può aiutare a spiegare perché l'Universo è fatto di materia

La stessa particella?

- ▶ Cosa distingue un neutrino da un antineutrino?
- ▶ Il neutrino è una particella di Majorana?

Neutrini nel mondo



Settori di punta
INFN



Laboratori
Nazionali
del Gran Sasso
Il più grande
Laboratorio
sotterraneo per la
fisica delle
astroparticelle

Credits: Asimmetrie

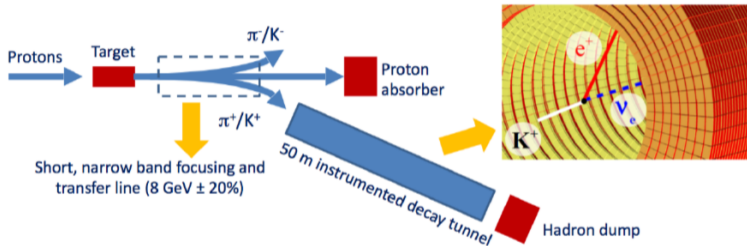
Neutrini da acceleratore: ENuBet



F. Terranova, A. Branca, G. Brunetti, A. Falcone
M. Torti, C. Brizzolari, E. Parozzi, E. Cristaldo

per informazioni tesi: francesco.terranova@unimib.it

- ▶ Neutrini da acceleratore sono ottimi per studiare le **oscillazioni** con estrema **precisione**
- ▶ **Nuovi acceleratori** sono in costruzione per la nuova generazione di esperimenti
- ▶ **Come monitorare un fascio di neutrini?**



Neutrini prodotti da decadimenti di μ^\pm e K^\pm

↔ Contando i leptoni prodotti nei decadimenti è possibile inferire composizione e intensità del fascio

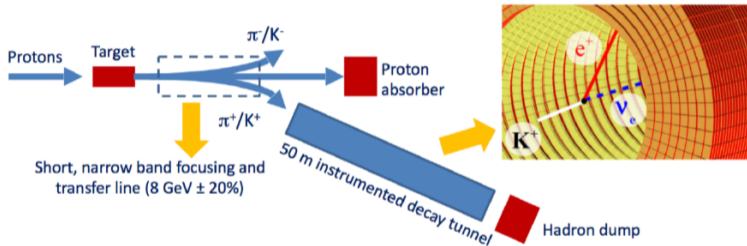
Neutrini da acceleratore: ENuBet



F. Terranova, A. Branca, G. Brunetti, A. Falcone
M. Torti, C. Brizzolari, E. Parozzi, E. Cristaldo

per informazioni tesi: francesco.terranova@unimib.it

- ▶ Neutrini da acceleratore sono ottimi per studiare le **oscillazioni** con estrema **precisione**
- ▶ **Nuovi acceleratori** sono in costruzione per la nuova generazione di esperimenti
- ▶ **Come monitorare un fascio di neutrini?**



Neutrini prodotti da decadimenti di μ^\pm e K^\pm

↪ Contando i leptoni prodotti nei decadimenti è possibile inferire composizione e intensità del fascio

- ▶ Identificazione π^\pm
- ▶ Beam-dump → range-meter

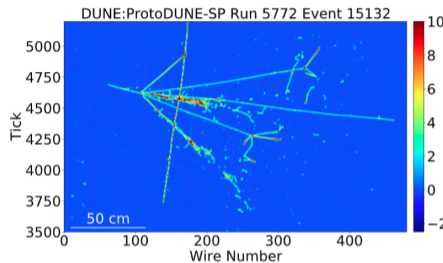
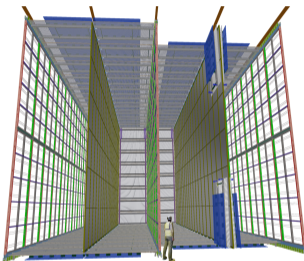
- ▶ Stima coincidenze accidentali nei tagged ν -beam
- ▶ Test del dimostratore ENUBET @ CERN

Neutrini da acceleratore:

F. Terranova, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, E. Cristaldo, C. Cattadori
M. Delgado, A. Falcone, C. Gotti, D. Guffanti, A. Minotti, M. Torti, E. Parozzi

per informazioni tesi: francesco.terranova@unimib.it

- ▶ A 1300 km dal Fermilab e a 1500 m di profondità (Sanford Underground Lab, SD)
- ▶ 3(4) LArTPC da 17 kton ($12 \times 14 \times 60 \text{ m}^3$)
- ▶ TPC misura la carica prodotta da particelle ionizzanti
- ▶ Starting time dato da luce di scintillazione del LAr ($\lambda \approx 128 \text{ nm}$)

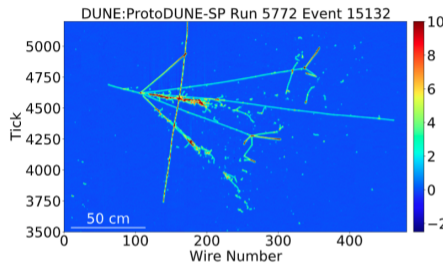
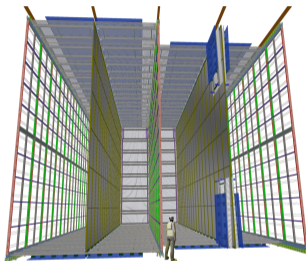


Neutrini da acceleratore:

F. Terranova, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, E. Cristaldo, C. Cattadori
M. Delgado, A. Falcone, C. Gotti, D. Guffanti, A. Minotti, M. Torti, E. Parozzi

per informazioni tesi: francesco.terranova@unimib.it

- ▶ A 1300 km dal Fermilab e a 1500 m di profondità (Sanford Underground Lab, SD)
- ▶ 3(4) LArTPC da 17 kton ($12 \times 14 \times 60 \text{ m}^3$)
- ▶ TPC misura la carica prodotta da particelle ionizzanti
- ▶ Starting time dato da luce di scintillazione del LAr ($\lambda \approx 128 \text{ nm}$)



- ▶ Caratterizzazione SiPM a temperature criogeniche
- ▶ Analisi della risposta di luce del rivelatore X-ARAPUCA
- ▶ Ganging attivo per il PDS di DUNE

▶ La scheda DAPHNE per l'esperimento DUNE

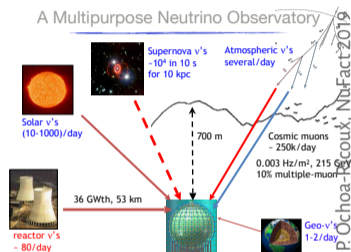
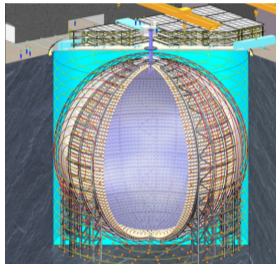
▶ Sensibilità di DUNE al decadimento $0\nu\beta\beta$ dello ^{136}Xe

Neutrini da reattore: JUNO

M. Sisti, E. Previtali,
D. Chiesa, M. Nastasi

per informazioni tesi: monica.sisti@mib.infn.it

- ▶ Due complessi di reattori a ~ 50 km, 700 m di profondità
- ▶ 20 kton di scintillatore liquido (LAB), letto da 18k+35k PMT
- ▶ Obiettivo primario: gerarchia delle masse, misura di precisione dei parametri di oscillazione
- ▶ Importanti possibilità per neutrini solari, atmosferici, geo-neutrini



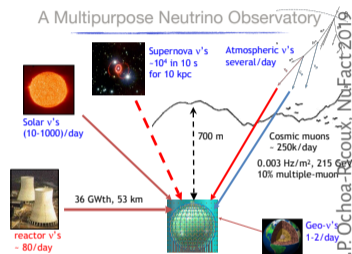
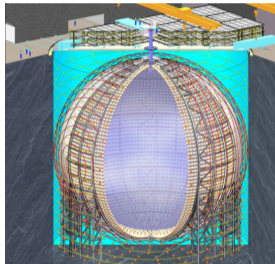
Rigorous selection of materials, characterization and suppression of the radioactive background

Neutrini da reattore: JUNO

M. Sisti, E. Previtali,
D. Chiesa, M. Nastasi

per informazioni tesi: monica.sisti@mib.infn.it

- ▶ Due complessi di reattori a ~ 50 km, 700 m di profondità
- ▶ 20 kton di scintillatore liquido (LAB), letto da 18k+35k PMT
- ▶ Obiettivo primario: gerarchia delle masse, misura di precisione dei parametri di oscillazione
- ▶ Importanti possibilità per neutrini solari, atmosferici, geo-neutrini



Rigorous selection of materials, characterization and suppression of the radioactive background

- ▶ Simulazione e studio del flusso di neutrini da reattore
- ▶ Simulazione Monte Carlo del fondo radioattivo

▶ Misure ultra-sensibili di contaminanti radioattivi

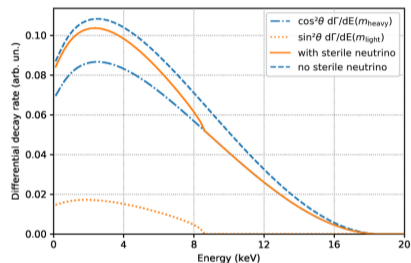
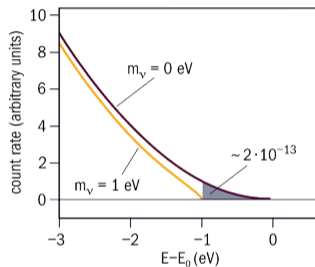
Misura diretta m_{ν_e} : KATRIN/TRISTAN



M. Biassoni, O. Cremonesi,
M. Pavan, S. Pozzi, A. Nava

per informazioni tesi: matteo.biassoni@mib.infn.it

- ▶ Misura dello spettro β di ${}^3\text{H}$ ($Q = 18.6 \text{ keV}$)
- ▶ KATRIN: studio dell'endpoint dello spettro per misura m_e
- ▶ **TRISTAN**: misura di tutto lo spettro per ricerca di nuova fisica (neutrini sterili con massa eV-keV)



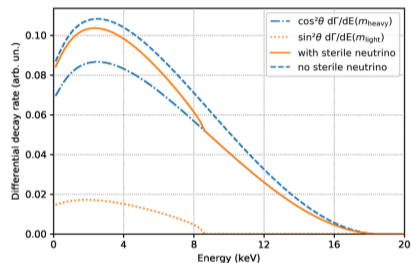
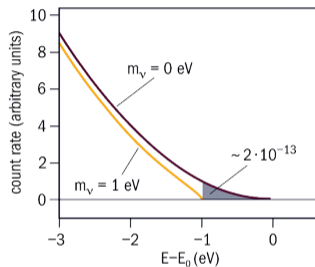
Misura diretta m_{ν_e} : KATRIN/TRISTAN



M. Biassoni, O. Cremonesi,
M. Pavan, S. Pozzi, A. Nava

per informazioni tesi: matteo.biassoni@mib.infn.it

- ▶ Misura dello spettro β di ${}^3\text{H}$ ($Q = 18.6$ keV)
- ▶ KATRIN: studio dell'endpoint dello spettro per misura m_e
- ▶ **TRISTAN**: misura di tutto lo spettro per ricerca di nuova fisica (neutrini sterili con massa eV-keV)



- ▶ Simulazione Monte Carlo interazione e^- con SDD
- ▶ Simulazione di setup per la misura di spettri β (SDD + cristallo scintillatore)
- ▶ Studio sensibilità di TRISTAN al neutrino sterile

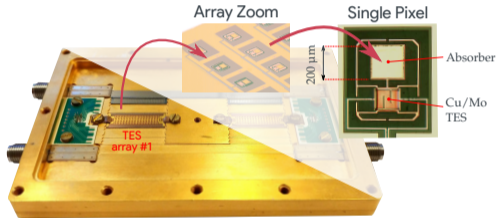
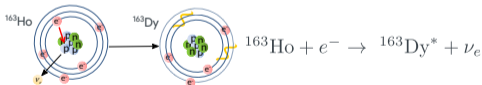
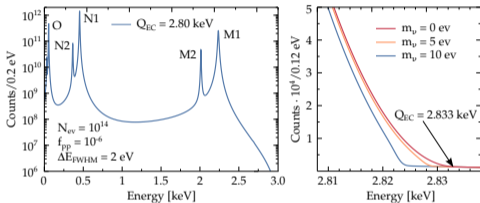
- ▶ Misure di backscattering in funzione di energia, angolo e materiali
- ▶ Misure di elettroni con SDD (confronto dati vs simulazione)

Misura diretta m_{ν_e} : HOLMES

A. Nucciotti, M. Borghesi, M. Faverzani,
E. Ferri, A. Giachero, D. Labranca, L. Origo

per informazioni tesi: angelo.nucciotti@mib.infn.it
marco.faverzani@mib.infn.it

Misura della massa del neutrino **attraverso lo studio dell'end-point di uno spettro di cattura elettronica**



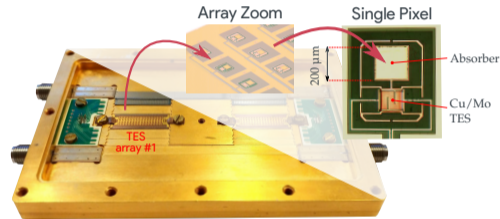
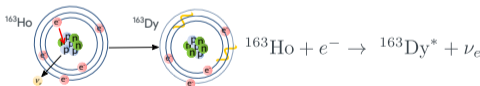
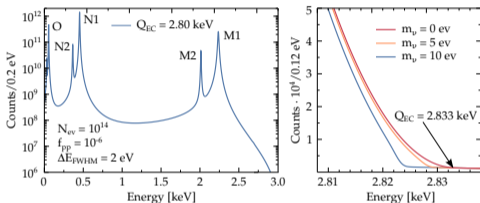
Rivelatori criogenici ($T \sim 60$ mK) superconduttivi (TES) ad altissima risoluzione e letti con tecniche a microonde;
Esperimento fisicamente svolto in Bicocca

Misura diretta m_{ν_e} : HOLMES

A. Nucciotti, M. Borghesi, M. Faverzani,
E. Ferri, A. Giachero, D. Labranca, L. Origo

per informazioni tesi: angelo.nucciotti@mib.infn.it
marco.faverzani@mib.infn.it

Misura della massa del neutrino attraverso lo studio dell'end-point di uno spettro di cattura elettronica



Rivelatori criogenici ($T \sim 60$ mK) superconduttivi (TES) ad altissima risoluzione e letti con tecniche a microonde;
Esperimento fisicamente svolto in Bicocca

- ▶ Microfabbricazione e ottimizzazione di rivelatori TES
- ▶ Sviluppo sistema di lettura e multiplexing per matrici di micro-calorimetri

- ▶ Sviluppo software per analisi e discriminazione pile-up
- ▶ Studio sensibilità di esperimenti per la misura della massa del neutrino con approccio bayesiano

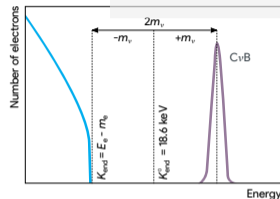
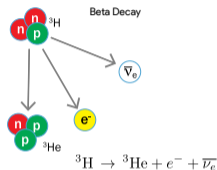
Misura dei neutrini primordiali: PTOLEMY

A. Nucciotti, M. Borghesi, M. Faverzani,
E. Ferri, A. Giachero, D. Labranca, L. Origo

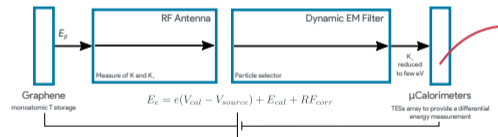
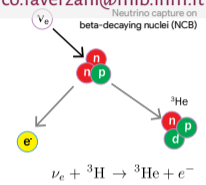
Rivelazione dei neutrini *primordiali*

Neutrini prodotti durante il Big Bang,
disaccoppiati dalla materia dopo ~ 1 s
e raffreddati dall'espansione
dell'universo

Rivelati tramite cattura su ${}^3\text{H}$



per informazioni tesi: angelo.nucciotti@mib.infn.it
marco.faverzani@mib.infn.it



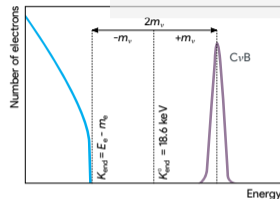
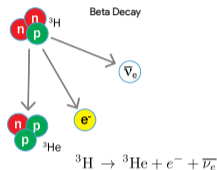
Misura dei neutrini primordiali: PTOLEMY

A. Nucciotti, M. Borghesi, M. Faverzani,
E. Ferri, A. Giachero, D. Labranca, L. Origo

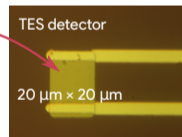
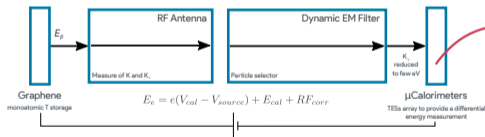
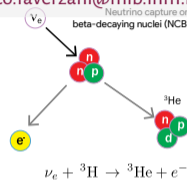
Rivelazione dei neutrini *primordiali*

Neutrini prodotti durante il Big Bang,
disaccoppiati dalla materia dopo ~ 1 s
e raffreddati dall'espansione
dell'universo

Rivelati tramite cattura su ${}^3\text{H}$



per informazioni tesi: angelo.nucciotti@mib.infn.it
marco.faverzani@mib.infn.it

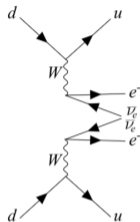


- Sviluppo, realizzazione e ottimizzazione di rivelatori TES per basse energie
- Sviluppo di un sistema criogenico per la caratterizzazione dei rivelatori

- Studio della sensibilità dell'esperimento con approccio bayesiano

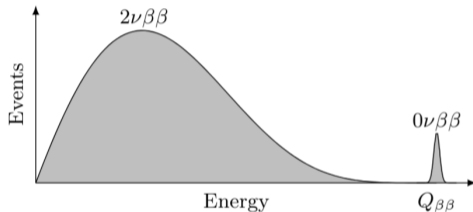
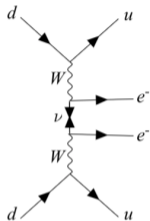
Decadimento $\beta\beta$ senza neutrini

- Decadimento $2\nu\beta\beta$ previsto da SM, già osservato in diversi nuclei



Decadimento $\beta\beta$ senza neutrini

- ▶ Decadimento $2\nu\beta\beta$ previsto da SM, già osservato in diversi nuclei
- ▶ Se possibile, un decadimento $\beta\beta$ **senza emissione di neutrini** avrebbe $K_{\beta_1} + K_{\beta_2} = Q$



From M. Agostini et al,
arXiv:2202.01787

Immense implicazioni di fisica fondamentale

- ▶ ν e $\bar{\nu}$ sono la stessa particella
- ▶ Diverso meccanismo di generazione della massa
- ▶ Possibile spiegazione per la leggerezza dei neutrini

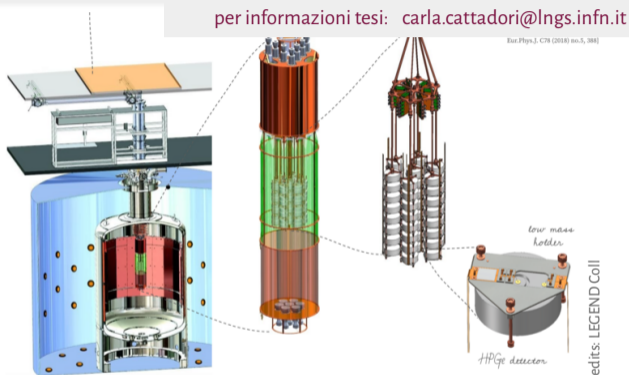
Requisiti per la ricerca di decadimenti rarissimi

- ▶ Ottima risoluzione energetica
- ▶ Basso fondo radioattivo
- ▶ Grande massa di isotopi candidati al decadimento

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$: LEGEND

C. Cattadori

- ▶ Isotopo: ^{76}Ge
- ▶ Rivelatori HPGe arricchiti con ^{76}Ge
Tecnologia consolidata, ottima risoluzione energetica
- ▶ LEGEND-200 (200 kg di ^{76}Ge) a cui seguirà LEGEND-1000



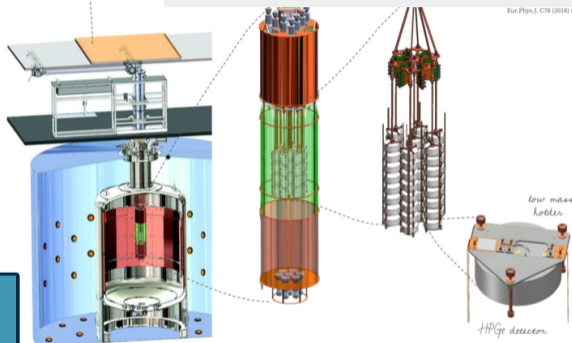
Credits: LEGEND Coll

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$:

LEGEND

C. Cattadori

- ▶ Isotopo: ^{76}Ge
- ▶ Rivelatori HPGe arricchiti con ^{76}Ge
Tecnologia consolidata, ottima risoluzione energetica
- ▶ LEGEND-200 (200 kg di ^{76}Ge) a cui seguirà LEGEND-1000

per informazioni tesi: carla.cattadori@lngs.infn.it

- ▶ Misura e analisi performance di preamplificatori criogenici
- ▶ Performance cavi coassiali criogenici per polarizzazione HPGe
- ▶ Misure di efficienza di lastre wavelength-shifter come guida di luce

- ▶ Digital processing di dati di luce di scintillazione di LAr misurati con SiPM
- ▶ Digital processing di dati di rivelatori HPGe

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$: CUORE



M. Biassoni, C. Brofferio, S. Capelli, O. Cremonesi, S. Dell'Oro,
L. Gironi, I. Nutini, M. Pavan, S. Pozzi, E. Previtali, M. Sisti

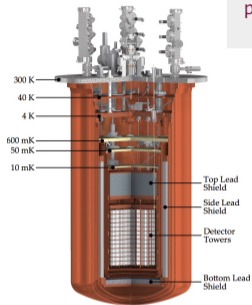
per informazioni tesi: chiara.brofferio@unimib.it [CUORE]
luca.gironi@mib.infn.it [CUPID]

► Rivelatore *bolometrico*

Energia depositata misurata tramite
incremento di temperatura di un
cristallo

► Temperature $\lesssim 10$ mK

► CUORE: ^{130}Te ► CUPID: ^{100}Mo



CUORE:

Readout segnale termico

CUPID: Cuore Upgrade with Particle ID

Readout segnale termico

+ Luce di scintillazione

↪ Possibile discriminare β da fondo α
(quantità diversa di luce per la stessa energia)

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$: CUORE



M. Biassoni, C. Brofferio, S. Capelli, O. Cremonesi, S. Dell'Oro,
L. Gironi, I. Nutini, M. Pavan, S. Pozzi, E. Previtali, M. Sisti

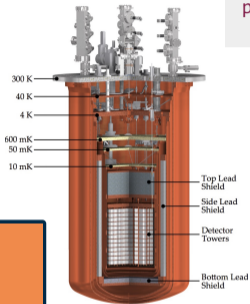
per informazioni tesi: chiara.brofferio@unimib.it [CUORE]
luca.gironi@mib.infn.it [CUPID]

► Rivelatore *bolometrico*

Energia depositata misurata tramite
incremento di temperatura di un
cristallo

► Temperature $\lesssim 10$ mK

► CUORE: ^{130}Te ► CUPID: ^{100}Mo



CUORE:

Readout segnale termico

CUPID: Cuore Upgrade with Particle ID

Readout segnale termico

+ Luce di scintillazione

↪ Possibile discriminare β da fondo α
(quantità diversa di luce per la stessa energia)

- Calibrazione risposta energetica di CUORE
- Studio performance di algoritmi di trigger
- Studio algoritmi di riconoscimento pile-up nei dati di CUORE
- Sottrazione di rumore monocromatico
- Ricerca contaminazioni radioattive localizzate

► Caratterizzazione sensori super-conduttori

- Simulazioni Monte Carlo di bolometri scintillanti
- Analisi bayesiana dei fondi di CUORE e CUPID-0, proiezioni del fondo per CUPID

► Misure di caratterizzazione dei bolometri LiMo adottati in CUPID

Tecnologie quantistiche

Forte sinergia tra tecnologie sviluppate per la fisica delle particelle e quelle necessarie per tecnologie e informazione quantistica

A. Giachero, M. Borghesi, M. Faverzani,
E. Ferri, D. Labranca, A. Nucciotti, L. Origo

per informazioni tesi: andrea.giachero@mib.infn.it
marco.faverzani@mib.infn.it
elena.ferri@mib.infn.it

DARTWARS

Sviluppo di amplificatori e sistemi di lettura a larga banda caratterizzati da rumore a livello quantistico per matrici di qubit e rivelatori superconduttivi.

- ▶ Sviluppo e validazione di un sistema di misura criogenico a basso rumore per la caratterizzazione di dispositivi superconduttivi (TWPA, qubit)
- ▶ Caratterizzazione di amplificatori TWPA e misure di test con matrici di qubit e rivelatori superconduttivi
- ▶ Sviluppo del modello teorico, del design e simulazioni di amplificatori TWPA utilizzando tool commerciali (Ansys, Sonnet, etc) e sviluppati ad hoc (sfruttando python e julia);

qubit & SQMS

Disegno, sviluppo e caratterizzazione di qubit superconduttivi (transmon) per computazione quantistica e per la rivelazione di radiazione

- ▶ Caratterizzazione di qubit con misura di parametri fondamentali (longitudinal/transverse coherence time)
- ▶ Sviluppo di un sistema di controllo e lettura per matrici di qubit basato su logiche programmabili
- ▶ Disegno e simulazione di qubit transmon sfruttando tools dedicati (qiskit-metal di IBM e QMS del NIST) e programmi sviluppati ad hoc (python, julia). Ottimizzazione dei parametri di disegno sfruttando tecniche di ML;

Quantum computing

Sviluppo e applicazione di algoritmi quantistici sfruttando piattaforme cloud di quantum computing (qiskit di IBM e AWS Braket di Amazon)

- ▶ Simulazione di sistemi quantistici (molecole, energie di legame, sistemi bosonici, etc)
- ▶ Classificazione attraverso reti neurali (quantistiche o ibride) o kernel quantistici, con applicazioni anche nell'ambito della fisica delle particelle
- ▶ Studio del rumore dei qubit e implementazione di tecniche di mitigazione degli errori, anche basate su Machine Learning;
- ▶ Ottimizzazione di qubit attraverso misure di caratterizzazione a impulsi;
- ▶ Sviluppo di algoritmi per la crittografia e comunicazione quantistica;

A. Giachero, M. Borghesi, M. Faverzani,
E. Ferri, D. Labranca, A. Nucciotti, L. Origo

per informazioni tesi: andrea.giachero@mib.infn.it

```
In [7]: from qiskit import QuantumRegister, ClassicalRegister, QuantumCircuit
        from qiskit.tools.visualization import circuit_drawer
        import numpy as np

        qr = QuantumRegister(2)
        cr = ClassicalRegister(2)
        qp = QuantumCircuit(qr, cr)

        qp.rx(np.pi/2, qr[0])
        qp.cx(qr[0], qr[1])

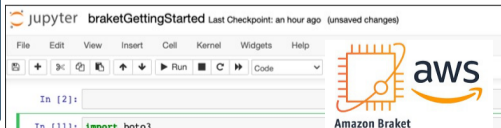
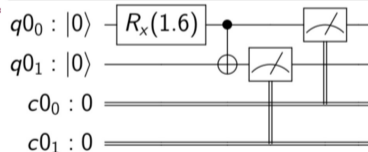
        qp.measure(qr, cr)

        circuit_drawer(qp)
```



Qiskit

Out[7]:



Grazie per l'attenzione

Proposte di tesi per fisica delle particelle

daniele.guffanti@unimib.it