

Rivelazione dei Neutrini Solari del Ciclo CNO con l'Esperimento BOREXINO



Nicola Rossi

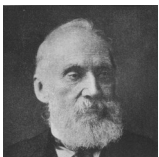
Laboratori Nazionali del Gran Sasso – INFN

106° Congresso Nazionale

SOCIETA' ITALIANA DI FISICA

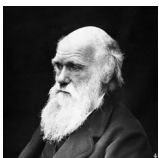
14-18 Settembre 2020

La Sorgente dell'Energia del Sole



"Complessivamente sembra che il sole non abbia irraggiato la Terra per più di 100 milioni di anni [...] a meno che sorgenti di energia attualmente sconosciute sono già pronte nel grande magazzino della creazione."

(W. Thomson, 1863)



"[...] Molti filosofi non sono ancora disposti ad ammettere che non conosciamo abbastanza della costituzione dell'universo e dell'interno del nostro globo per giudicare con certezza la sua età."

(C. Darwin, VI ed. dell'Origine)



"Il problema della costituzione interna degli atomi è ancora aperto. Non è impossibile che essi siano sistemi complessi nei quali risiede una quantità enorme di energia [...] ed è improbabile che nessun chimico si sentirebbe in grado di negare che le condizioni straordinarie che si incontrano al centro del sole non possano liberare parte di questa energia."

(T.C. Chamberlin, 1899)



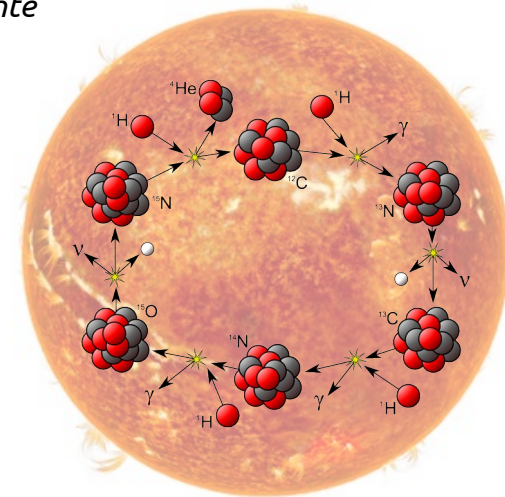
"È sensato sperare che in un futuro non troppo lontano avremo la competenza per capire una cosa tanto semplice come una stella."

(A. Eddington, 1920)



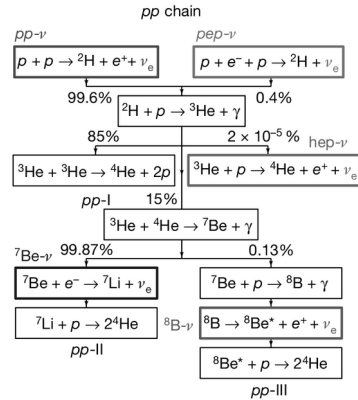
"Dovremmo guardare a tutte le informazioni sperimentali a disposizione, non solo alle più rilevanti, ed essere pronti a fare congetture se questo può essere di aiuto."

(H. A. Bethe, 1938)

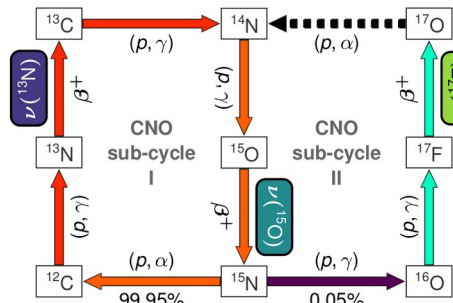


... e oggi sappiamo che l'energia del sole è prodotta dai processi di fusione nucleare (catena pp e ciclo CNO*)

Il Ciclo CNO nel Sole e i Neutrini

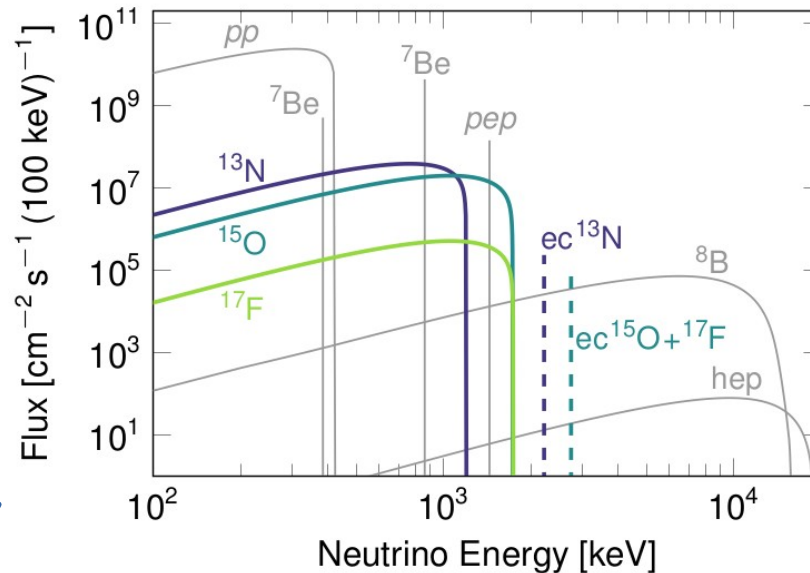


Catena pp
energia prodotta ~99%



Ciclo CNO
energia prodotta ~1%

Flusso di Neutrini Solari



Neutrini Solari:

- Astrofisica
- Fisica delle Particelle

La rivelazione dei neutrini CNO è fondamentale per la *fisica del sole e per l'astrofisica in generale.*

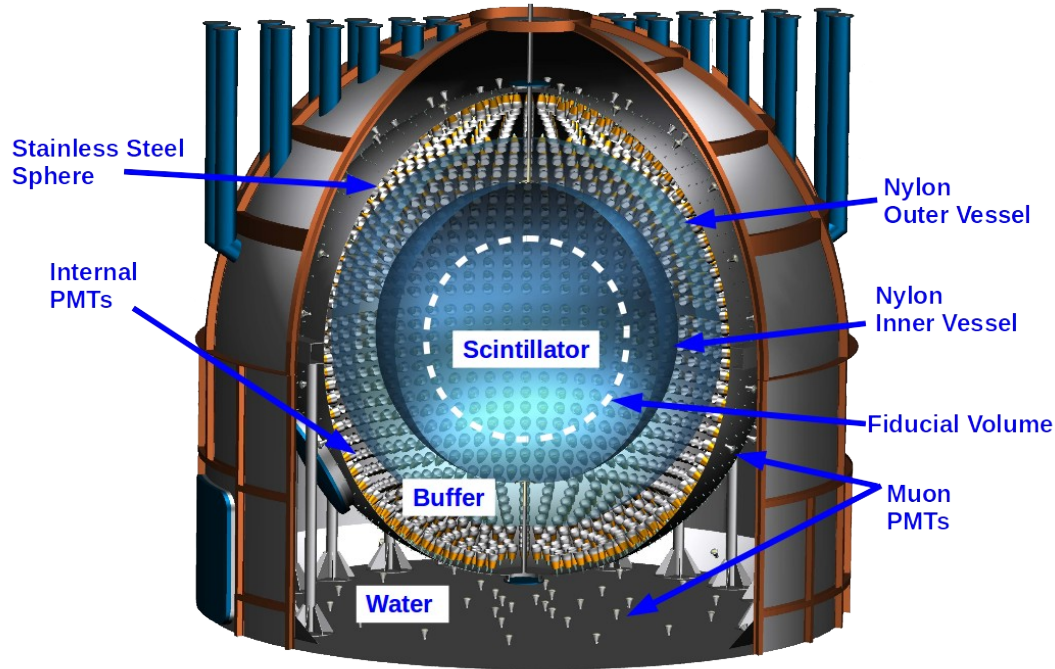
La misura di precisione del flusso del CNO aiuta a far luce sul **problema della metallicità** (abbondanza di elementi con $Z > 2$)

CNO dominante in stelle con masse superiori a ~1.3 masse solari

Borexino e i Neutrini Solari

Neutrini	Pubblicazione	Rate [cpd/100t]	Flusso [cm ⁻² s ⁻¹]
pp	Nature 2014, Nature 2018, PRD 2019	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3} \times 10^{10}$
⁷ Be	PLB 2008, PRL 2011, Nature 2018, PRD 2019	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06} \times 10^9$
pep	PRL 2012, Nature 2018 PRD 2019	$2.7 \pm 0.4_{-0.2}^{+0.1}$	$1.3 \pm 0.3_{-0.1}^{+0.1} \times 10^8$
⁸ B	PRD 2010, Nature 2018, PRD 2020	$0.223_{-0.022}^{+0.021}$	$5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03} \times 10^6$
hep	Nature 2018	<0.002 (90% CL)	<2.2x10 ⁵ (90% CL)
CNO	PRL 2010, Nature 2018 (upper limit)	<8.1 (95% CL)	<7.9x10 ⁸ (95%CL)

Il rivelatore BOREXINO



Collocazione: Laboratori Nazionali del Gran Sasso (INFN) 3800 m w.e.

Bersaglio: Scintillatore Liquido (~300t) con ~2200 PMT (nominali)

Principio di rivelazione: diffusione elastica
 $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

Risoluzione ($E = 1$ MeV): energia 6%, posizione 11% al centro

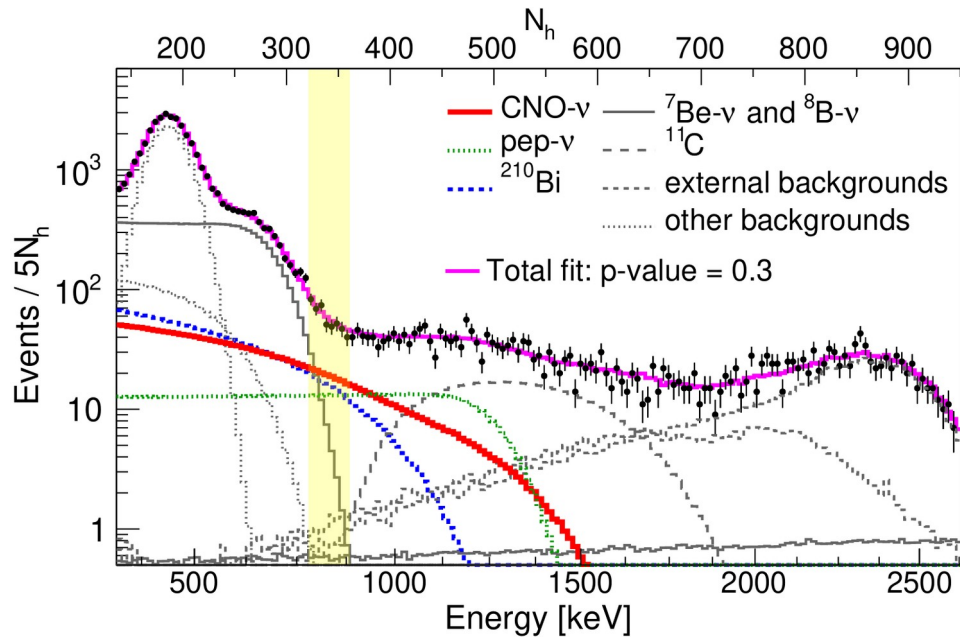
Discriminazione di particelle: α, β^+, β^-

Radiopurezza: flusso di neutri 6×10^9 (poche decine di cpd/100t). Attività del fondo confrontabile.

Fasi sperimentali:

Fase 1 → Calibrazione e Purificazione → Fase 2 → Isolamento Termico → Fase 3

La Rivelazione dei neutrini CNO



Distribuzione energetica dei rinculi elettronici nel volume fiduciale

Contaminanti principali

^{85}Kr , ^{210}Bi , ^{210}Po , ^{11}C , Fondo esterno γ

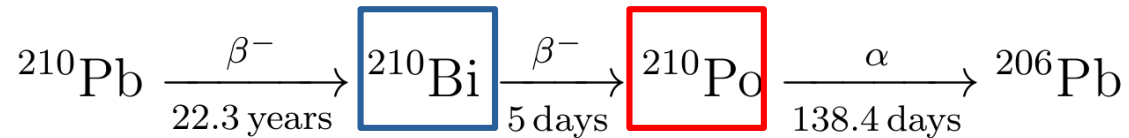
Energia degli eventi associati al CNO: 0-1517 keV. Interazioni: pochi cpd/100t

Degenerazione e correlazione:

$^{210}\text{Bi} \leftrightarrow \text{pep} \leftrightarrow \text{CNO}$

Soluzione per il pep: vincolo 1.4% (rapporto pp/pep, dati sperimentali sui neutrini solari, vincolo sulla luminosità del sole, parametri di oscillazione)

Vincolo indipendente del ^{210}Bi



[Villante et al.
(2011)]

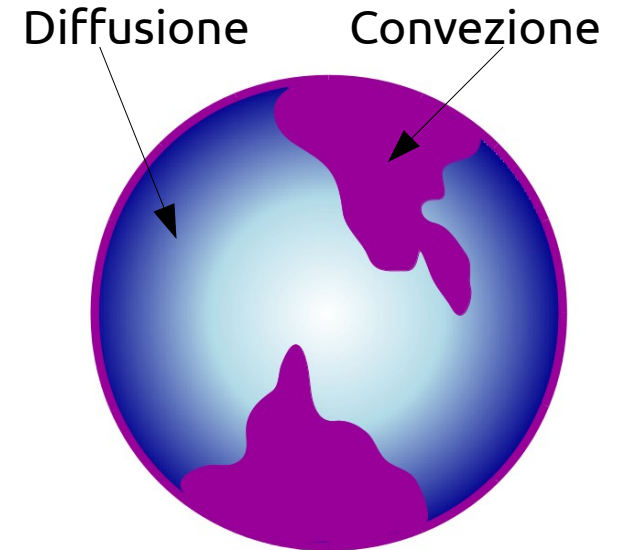
Equilibrio secolare della catena A = 210. L'attività del polonio è misurabile selezionando gli eventi alfa. Dall'attività del polonio si deduce quella del bismuto.

Problema del ^{210}Po fuori equilibrio (termine di sorgente dal Vessel di Nylon)

Migrazione del ^{210}Po : *diffusione* ($D \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, lenta e regolare) + *convezione* (veloce e caotica)

$^{210}\text{Po} = ^{210}\text{Po}$ (sorgente esterna) + ^{210}Po (scintillatore)

Inoltre: Nessuna evidenza di rilascio di ^{210}Pb dal Vessel di Nylon. (ad ogni modo quantificato nelle *sistematiche*)



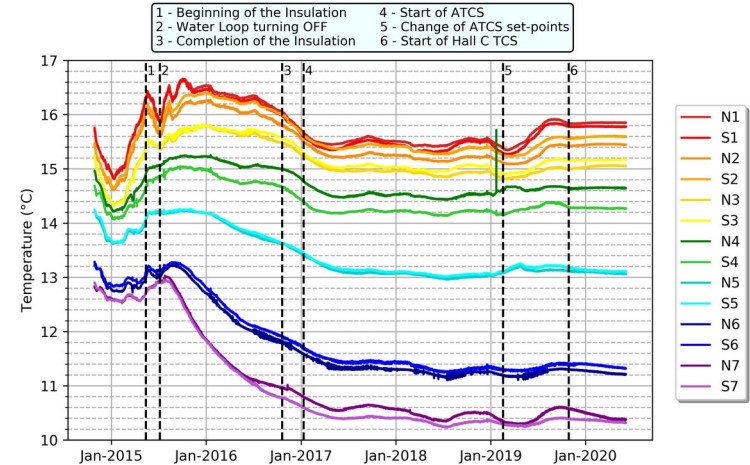
Migrazione del ^{210}Po

Isolamento Termico



Isolamento termico

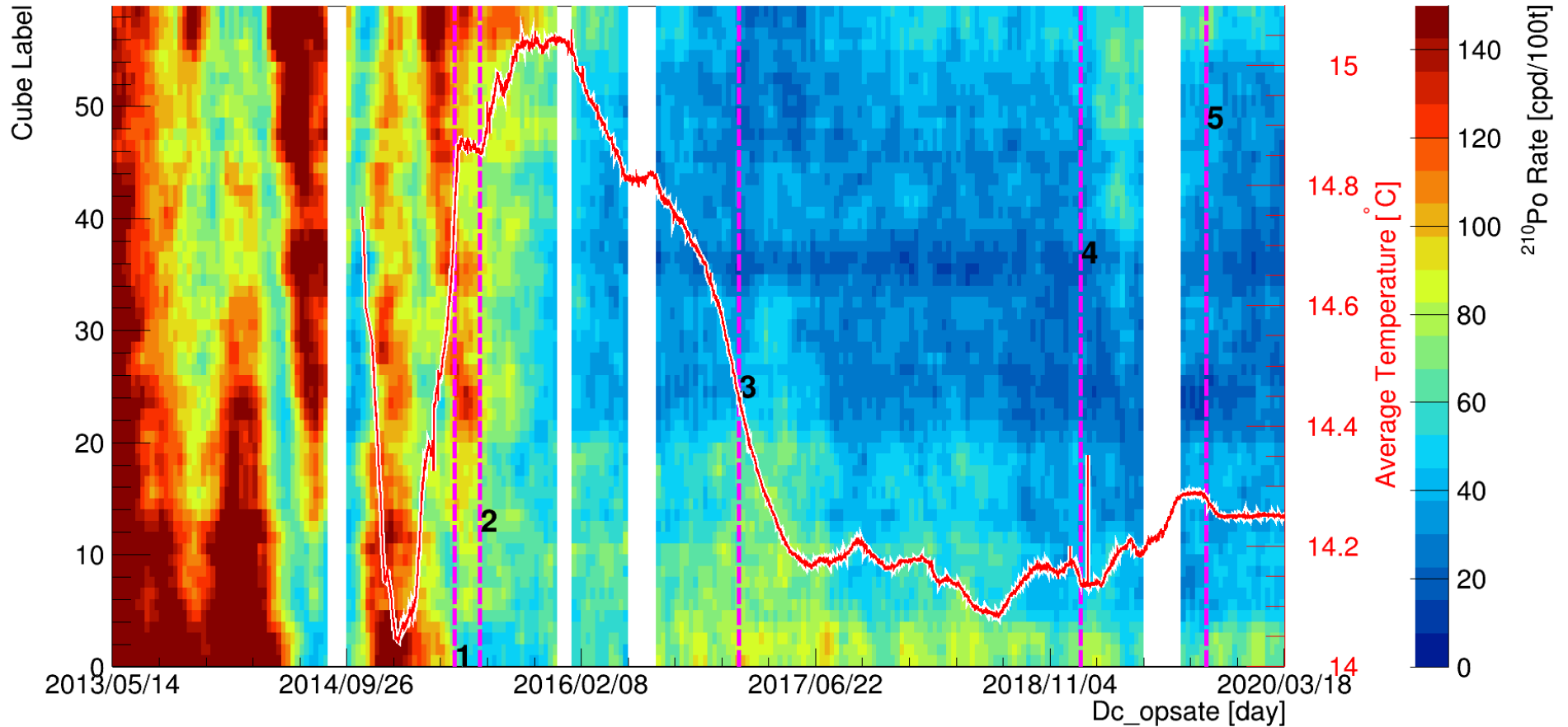
L'idea è quella di stabilire un gradiente verticale che sopprime i moti convettivi che rimescolano il ^{210}Po (~ 0.5 °C/m)



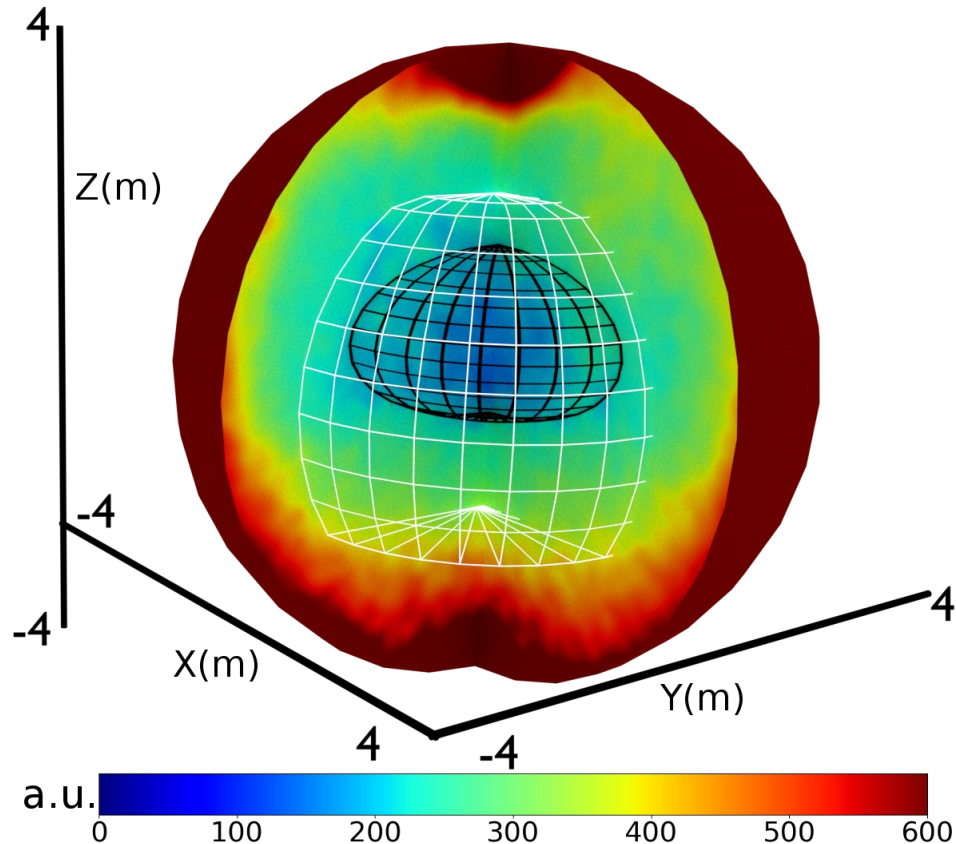
Programma di isolamento Termico

- Installazione sonde di precisione (2014)
- Isolamento del rivelatore con lana di roccia (2015)
- Sistema attivo di controllo della temperatura (2016)
- Controllo attivo di Sala C (2019)

Effetto sul ^{210}Po



Regione a Bassa Attività



Collocata a circa $z=+80$ cm

Volume compatibile con **simulazioni fluidodinamiche** numeriche.

Risultato stabile a fronte di piccole variazioni di forma e movimento.

Attività nella regione:

$$R(\text{minimo}) = R(^{210}\text{Bi}) + R(\text{Nylon})$$

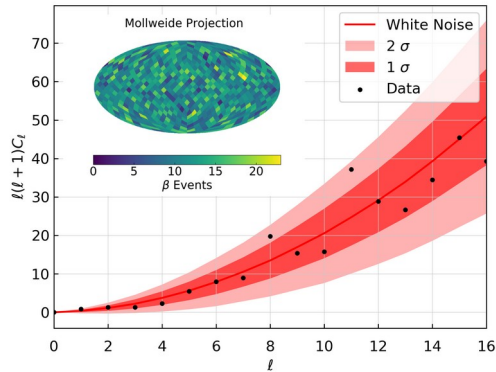
$R(\text{Nylon}) > 0$ implica

$R(\text{minimo})$ dà **limite superiore** a $R(^{210}\text{Bi})$ e quindi limite inferiore al CNO (anti-correlazione)

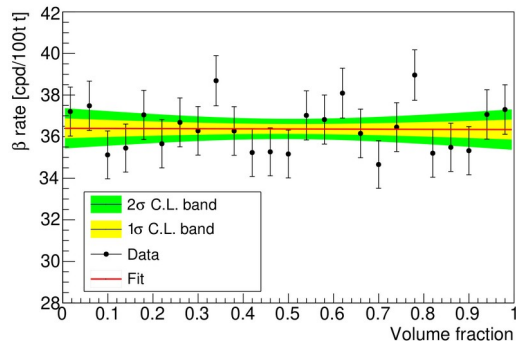
$$Bi < 11.5 \pm 1.04 \text{ cpd}/100t$$

L'Uniformità del ^{210}Bi

Esempi di studi



Uniformità angolare



Uniformità radiale

IL valore del ^{210}Bi misurato nel centro può essere esteso a tutto il volume fiduciale **se il ^{210}Bi è uniforme.**

Uniformità studiata nella regione energetica che massimizza il rapporto segnale rumore del ^{210}Bi

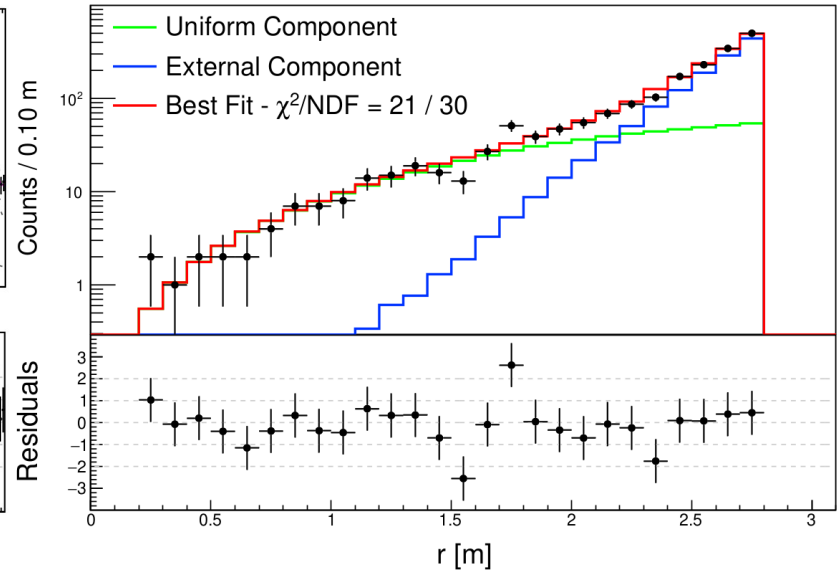
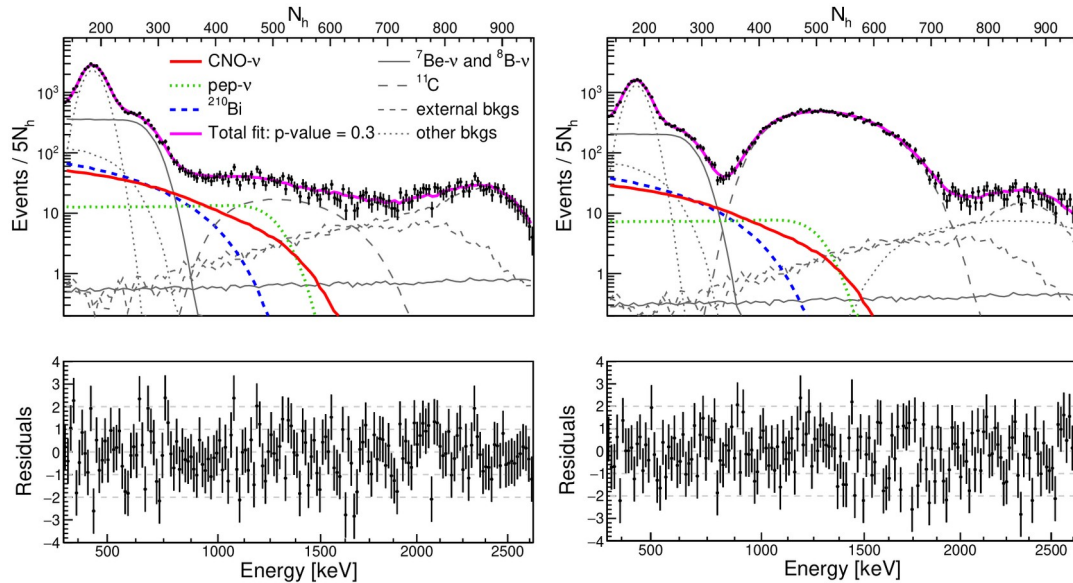
Risultato: **uniforme dentro l'errore.** Sistematica $0.78 \text{ cpd}/100\text{t}$

Simulazione fluidodinamica a supporto.

^{210}Bi Stabile nel tempo: emanazione del ^{210}Pb dal nylon trascurabile.

Vincolo finale: $^{210}\text{Bi} < 11.5 \pm 1.3 \text{ cpd}/100\text{t}$

Analisi col ^{210}Bi Vincolato

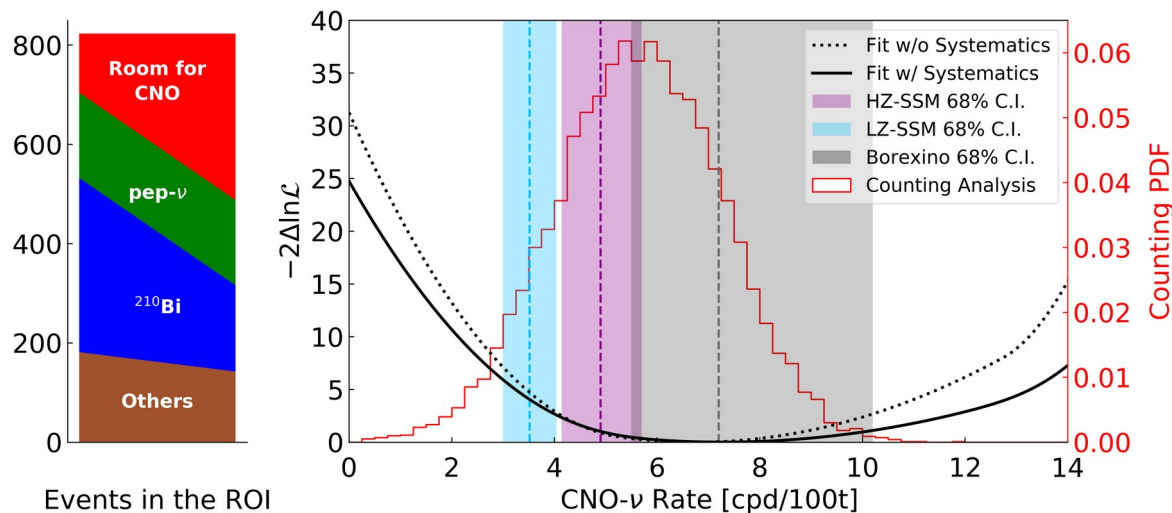


Periodo di analisi: metà 2016, inizio 2020 (Fase III)
Finestra energetica: 320-2640 keV
Vincolo del **pep**: 2.74 ± 0.04 cpd/100t (Gaussiano)
Vincolo del ^{210}Bi : 11.5 ± 1.3 cpd/100t (Semi-gaussiano)
Metodo: fit con spettri Monte Carlo Multivariato

Risultato:
(68% CL stat)

$7.2_{-1.7}^{+2.9}$ cpd/100t

Sistematiche e Risultato Finale



Sistematiche dominanti:

- Forma dello spettro ^{210}Bi shape
- Risposta e Risoluzione dello Scintillatore
- Resa in luce

Simulazione di diversi milioni di pseudo-esperimenti deformate ed analizzare con quelle non deformate: $\sigma_L = -0.5$, $\sigma_R = +0.6$
(Significatività: 5.1σ)

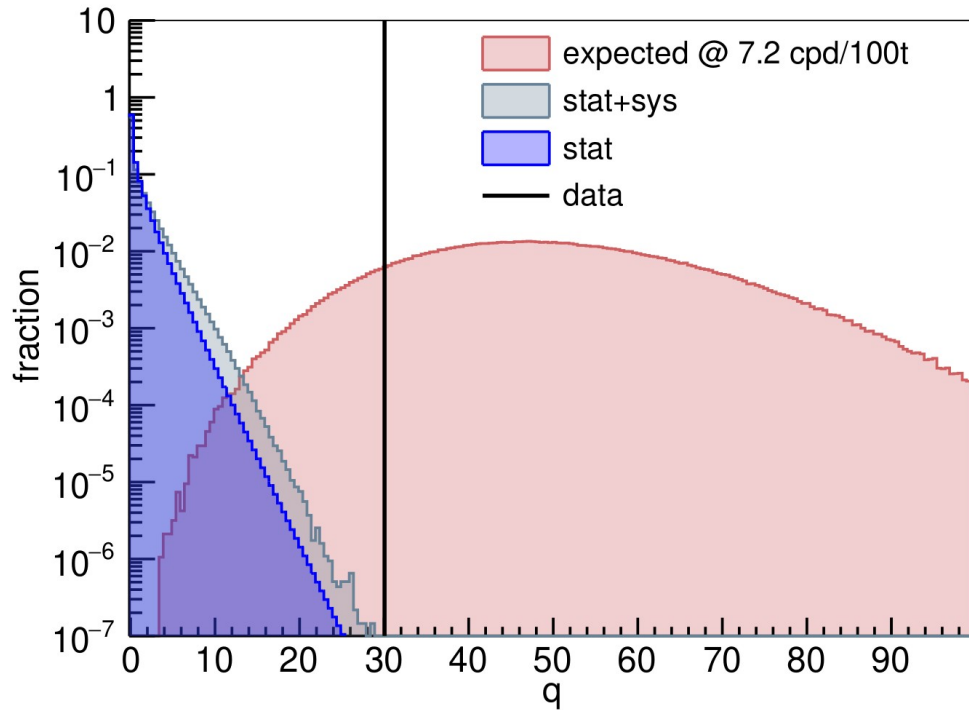
Metodo del Conteggio nella ROI:

- Conferma della sensibilità al CNO dalla regione 780-885 keV
- CNO + ^{210}Bi + pep: 80% del contenuto

Risultato:
(68% CL stat + sys)

$7.2_{-1.7}^{+3.0}$ cpd/100t

Significatività con Profile Likelihood



Verifica delle ipotesi: approccio con la *Profile likelihood*

13.8×10^6
pseudo-esperimenti

Escludiamo l'ipotesi CNO=0
a 5.0σ al 99%CL

CNO in [5.5 - 10.2] cpd/100 t (68% CL)

Compatibilità Modelli

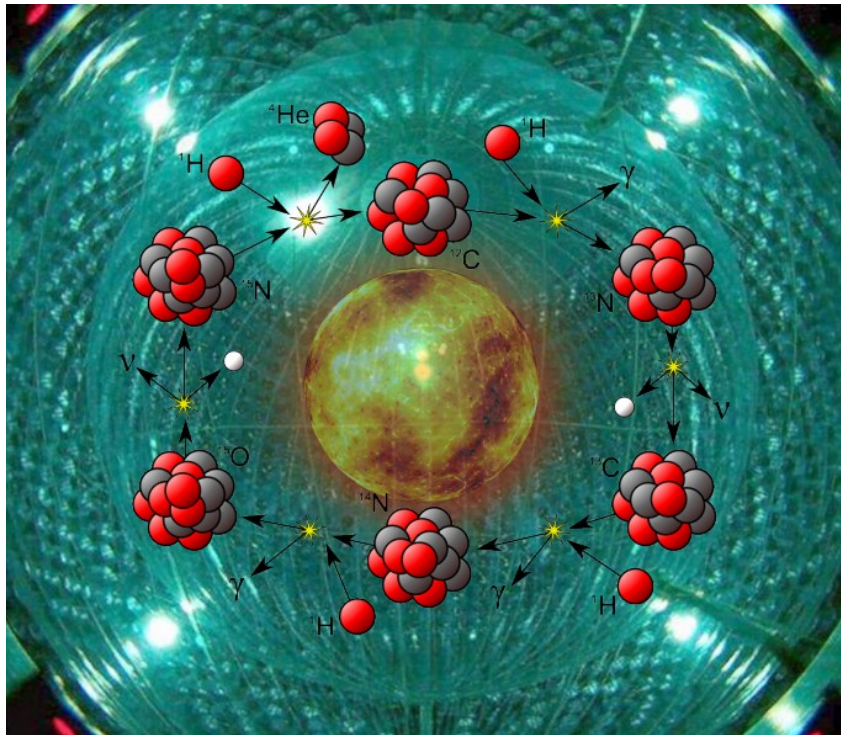
- 0.5σ (HZ)
- 1.3σ (LZ)
- LZ sfavorito a 2.1σ se includiamo gli altri flussi del pp misurati da Borexino

Completando la Tabella...

NeutriniSu bmiteSub	Publicazione	Rate [cpd/100t]	Flusso [cm ⁻² s ⁻¹]
pp	Nature 2014, Nature 2018, PRD 2019	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3} \times 10^{10}$
⁷ Be	PLB 2008, PRL 2011, Nature 2018, PRD 2019	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06} \times 10^9$
pep	PRL 2012, Nature 2018 PRD 2019	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08} \times 10^8$
⁸ B	PRD 2010, Nature 2018, PRD 2020	$0.223_{-0.022}^{+0.021}$	$5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03} \times 10^6$
hep	Nature 2018	<0.002 (90% CL)	<2.2 × 10 ⁵ (90% CL)
CNO	Articolo inviato a rivista	$7.2_{-1.7}^{+3.0}$	$7.0_{-2.0}^{+3.0} \times 10^8$

CONCLUSIONE: Questa rappresenta la prima rivelazione diretta di neutrini dal ciclo CNO!

Grazie per l'attenzione!



First Direct Experimental Evidence of CNO neutrinos

M. Agostini^{a, b}, K. Altenmüller^b, S. Appel^b, V. Atroshchenko^c, Z. Bagdasarian^{d, 2}, D. Basilio^c, G. Bellini^a, J. Benziger^f, R. Biondi^g, D. Bravo^{h, 3}, B. Caccianiga^g, F. Calaprice^h, A. Caminata⁴, P. Cavalcante^{4, 5}, A. Chepurnov⁶, D. D'Angelo⁶, S. Davini¹, A. Derbin¹, A. Di Giacinto⁶, V. Di Marcello⁸, X.F. Ding¹, A. Di Ludovico⁸, L. Di Noto¹, I. Drachnev¹, A. Formozov^{9, 10}, D. Franco⁶, C. Galbiati^{h, 10}, C. Ghiano⁶, M. Giammarchi⁶, A. Goretti^{h, 4}, A.S. Göttel^{4, 9}, M. Gromov^{h, 11}, D. Guffanti⁹, Aldo Ianni⁶, Andrea Ianni⁶, A. Jany¹, D. Jeschke⁶, V. Kobychev⁶, G. Korgia^{1, 8}, S. Kumaran^{4, 9}, M. Laubenstein⁶, E. Litvinovich¹⁰, P. Lombardi⁶, I. Lomskey¹, L. Ludhova^{4, 9}, G. Lukyanchenko⁶, L. Lukyanchenko⁶, I. Machulin¹⁰, J. Marty⁹, E. Meroni¹, M. Meyer¹, L. Miramonti⁶, M. Misiaszek¹, V. Muratov¹, B. Neumai¹⁰, M. Nieslony^{9, 10}, R. Nugmanov¹², L. Oberauer¹³, V. Orekhov⁶, F. Ortica¹⁰, M. Pallavicini¹, L. Papp¹, L. Pellicci¹⁰, Ö. Penek^{4, 9}, L. Pietrofaccia¹⁰, N. Pilipenko¹, A. Pocar⁸, G. Raikov⁶, M.T. Ranalli⁶, G. Ranucci⁶, A. Razeto⁶, A. Re^{1, 11}, Redchuk^{4, 9}, A. Romani¹⁰, N. Rossi⁶, S. Schönert¹, D. Semenov¹, G. Settanta⁶, M. Skorokhvatov^{6, 10}, A. Singh¹, O. Smirnov¹⁰, A. Sotnikov¹⁰, Y. Suvorov^{6, 15}, R. Tartaglia⁶, G. Testera¹, J. Thurn¹, E. Unzhakov¹, F.L. Villante^{6, 10}, A. Vishneva¹⁰, R.B. Vogelaar¹, F. von Filitzsch¹, M. Wojcik¹, M. Wurm⁸, S. Zavatarelli¹, K. Zuber¹, G. Zuzel¹

THE BOREXINO COLLABORATION¹

^aDepartment of Physics and Astronomy, University College London, Gower Street, London WC1E 6BT, UK; ^bPhysik-Department E15, Technische Universität München, 85748 Garching, Germany; ^cNational Research Centre Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia; ^dInstitut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany; ^eDipartimento di Fisica, Università degli Studi and INFN, 20133 Milano, Italy; ^fChemical Engineering Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA; ^gINFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67038 Assergi (AQ), Italy; ^hPhysics Department, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA; ⁱDipartimento di Fisica, Università degli Studi and INFN, 16146 Genova, Italy; ^jPhysics Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA; ^kLomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, 119234 Moscow, Russia; ^lSt. Petersburg Nuclear Physics Institute NRC Kurchatov Institute, 188350 Gatchina, Russia; ^mJoint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia; ⁿUniversité de Paris, CNRS, Astroparticule et Cosmologie, F-75013 Paris, France; ^oGran Sasso Science Institute, 67100 L'Aquila, Italy; ^pIII. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen University, 52062 Aachen, Germany; ^qInstitute of Physics and Excellence Cluster PRISMA⁺, Johannes Gutenberg University Mainz, 55099 Mainz, Germany; ^rM. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30348 Krakow, Poland; ^sInstitute for Nuclear Research of NAS Ukraine, 03028 Kyiv, Ukraine; ^tDepartment of Physics, Royal Holloway, University of London, Department of Physics, School of Engineering, Physical and Mathematical Sciences, Egham, Surrey TW20 0EX; ^uNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia; ^vDepartment of Physics, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany; ^wDipartimento di Chimica, Biologia e Tecnologia, Università degli Studi e INFN, 06123 Perugia, Italy; ^xAmherst Center for Fundamental Interactions and Physics Department, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA; ^yDipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università dell'Aquila, 67100 L'Aquila, Italy.

Notes:

¹Corresponding author: spokesperson-borexino@ngs.infn.it;

²Present address: University of California, Berkeley, Department of Physics, CA 94720, Berkeley, USA;

³Present address: Departamento de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid, Campus Universitario de Cantoblanco, 28049 Madrid, Spain;

⁴Present address: INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67010 Assergi (AQ), Italy;

⁵Present address: Dipartimento di Fisica, Università degli Studi Federico II e INFN, 80126 Napoli, Italy;

⁶Also at Institute for Nuclear Research (Atomki), H-4001, Debrecen, POB.51., Hungary.

-- Version: August 20, 2020 --

Abstract

We report the direct observation of neutrinos produced in the carbon-nitrogen-oxygen (CNO) fusion cycle in the Sun with the Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italy. This is the first experimental evidence of the existence of such reaction sequence in a star. The CNO solar neutrino interaction rate is $7.2^{+3.0}_{-1.7}$ counts per day per 100 tonnes of target at 68% C.L., corresponding to a flux of neutrinos on Earth of $7.0^{+3.0}_{-2.0} \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The absence of CNO signal is disfavoured at 5.0 σ .