



#### **Federico Ferraro**

per la collaborazione LUNA

INFN- Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Laboratory for Underground **Nuclear Astrophysics** 







1991-2001:	LUNA 50 kV
2000-oggi:	LUNA 400 kV
oggi-????	LUNA-MV







#### A chi dobbiamo l'idea?







#### Perché mettere un acceleratore nei LNGS?

I raggi cosmici producono molti muoni, che in superficie interagiscono con i rivelatori, nascondendo i **segnali interessanti** 







#### Perché mettere un acceleratore nei LNGS?





#### LUNA 50 kV



Acceleratore elettrostatico Fasci: p, <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He Tensione: 3-50 kV Corrente: fino a 500 μA Energy spread: 20 eV Stabilità: 0.4 eV/h



### LUNA 400 kV



Acceleratore elettrostatico Fasci: p, <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He 2 linee di fascio: gassoso/solido Tensione: 50-400 kV Corrente: fino a: 1 mA per H<sup>+</sup> 500 μA per He<sup>+</sup> Energy spread: 0.1 keV Stabilità: 5 eV/h



#### LUNA MV (parte della IBF dei LNGS)



Acceleratore elettrostatico Fasci: p, <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He, <sup>12</sup>C 2 linee di fascio: gassoso/solido Tensione: 400 kV – 3.5 MV Corrente: fino a 1 emA per H<sup>+</sup> 500 eμA per He<sup>+</sup> 150 eμA per C<sup>+</sup> 100 eμA per C<sup>++</sup> Terminal Voltage spread: 0.01% TV o 50V

Stabilità del Terminal Voltage: 0.001% TV / h Stabilità della corrente: < 5% / h



#### Cosa studia LUNA?





101

101

1010

10 9

10

10

Flux

#### **Evoluzione stellare Evoluzione dell'universo** hydrogen primordiale per hydrogen atom) nelium carbon 10<sup>-2</sup> oxygen 10-4 ilicor argon calcium (atoms 10-6 dance 10<sup>-8</sup> nitrogen abun boron 10-10 relative 15 Billion Years beryllium 10<sup>-12</sup> Bang Theory Phases lithium Present Da 10 20 30 40 50 atomic number (number of protons) Sezioni d'urto Neutrini solari nucleari Astronomia Bahcall-Serenelli 2005 pp→±1% Neutrino Spectrum (±1σ) 7Be→±10.5% ±16% 176. <sup>8</sup>B→ ±10.5% hep→±16%

(Oberlack et al., 1996; Pluschke et al., 2001)

**Nucleosintesi** 

Neutrino Energy in MeV

federico.ferraro@lngs.infn.it

Formazione ed evoluzione del Sistema Solare



#### Il Sole è una stella in Sequenza Principale





Immagine a falsi colori del Sole ottenuta nello spettro ultravioletto estremo (NASA/SDO).



#### Il Sole è una stella in Sequenza Principale



## Nella parte centrale (nucleo) avviene la combustione dell'idrogeno

Un'<u>insieme di processi</u> che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno







Un'<u>insieme di processi</u> che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno





CNO cycle

#### Un'<u>insieme di processi</u> che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno





Un'<u>insieme di processi</u> che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno





Un'<u>insieme di processi</u> che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno





Un'<u>insieme di processi</u> che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno



#### Importanza delle misure dirette

La sezione d'urto può essere fattorizzata:

$$\sigma(E) = \frac{1}{E} e^{-2\pi\eta} S(E)$$

così da fare misure ad "alta" energia e poi estrapolare il **fattore astrofisico** *S(E)*, che varia più lentamente, ad energie più basse







#### Importanza delle misure dirette

La sezione d'urto può essere fattorizzata:

$$\sigma(E) = \frac{1}{E} e^{-2\pi\eta} S(E)$$

così da fare misure ad "alta" energia e poi estrapolare il **fattore astrofisico** *S(E)*, che varia più lentamente, ad energie più basse



le incertezze dovute all'estrapolazione possono andare fuori controllo (ad esempio a causa di possibili risonanze a bassa energia...)





### Il tasso di reazione e il picco di Gamow

A temperature fissata, il tasso di reazione medio per coppia di particelle dipende sia dalla distribuzione della velocità relativa, (i.e. temperatura) sia dalla sezione d'urto:

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{kT}\right)^{\frac{3}{2}} \int_{0}^{\infty} \underbrace{\frac{S(E)}{E} e^{-\sqrt{\frac{E_G}{E}}} E e^{-\frac{E}{kT}} dE}_{\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta}}$$

Le reazioni avvengono all'interno di un intervallo di energia detto finestra di Gamow

$$E_G = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{2\mu}e^2 Z_x Z_A}{\hbar} \pi\right)^2$$
$$E_0 = \left(\frac{\sqrt{E_G}}{2} kT\right)^{\frac{2}{3}}$$





### Il tasso di reazione e il picco di Gamow

A temperature fissata, il tasso di reazione medio per coppia di particelle dipende sia dalla distribuzione della velocità relativa, (i.e. temperatura) sia dalla sezione d'urto:

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{kT}\right)^{\frac{3}{2}} \int_{0}^{\infty} \underbrace{\frac{S(E)}{E} e^{-\sqrt{\frac{E_G}{E}}} E e^{-\frac{E}{kT}} dE}_{\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta}}$$

Le reazioni avvengono all'interno di un intervallo di energia detto finestra di Gamow

$$E_G = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{2\mu}e^2 Z_X Z_A}{\hbar}\pi\right)^2$$

 $E_0 = \left(\frac{\sqrt{E_G}}{2}kT\right)^{\frac{2}{3}}$ 

L'energia in gioco è molto più bassa di quella solitamente esplorata nei comuni esperimenti di fisica nucleare  $(E_0 = 10 \text{ keV} - 1000 \text{ keV})$ 

#### ₩

Il numero di reazioni misurate in laboratorio è così piccolo da rendere impossibile misure in presenza del fondo dovuto ai raggi cosmici (anche solo 2 reazioni al mese)



### 3 reazioni importanti per il Sole







# $^{3}$ He( $^{3}$ He,2*p*) $^{4}$ He

La ricerca della risonanza fantasma





### <sup>3</sup>He(<sup>3</sup>He,2p)<sup>4</sup>He e la risonanza fantasma



LUNA è nato nel 1991 per misurare la sezione d'urto della reazione  ${}^{3}\text{He}({}^{3}\text{He},2p){}^{4}\text{He}$  nella finestra di Gamow (16-27 keV)

Una eventuale risonanza in questa regione avrebbe potuto spiegare il basso flusso di neutrini solari, osservato dall'esperimento di Homestake, rispetto alle previsioni del Modello Solare Standard.

Questa risonanza, infatti, avrebbe diminuito il contributo relativo della reazione  ${}^{3}\text{He}(\alpha,\gamma){}^{7}\text{Be}$ , responsabile della produzione dei neutrini da  ${}^{7}\text{Be}$  e  ${}^{8}\text{B}$  osservati a Homestake.



### <sup>3</sup>He(<sup>3</sup>He,2p)<sup>4</sup>He e la risonanza fantasma





### <sup>3</sup>He(<sup>3</sup>He,2p)<sup>4</sup>He e la risonanza fantasma

Questa è stata la prima misura diretta di astrofisica nucleare in tutta la finestra di Gamow.

A 16.5 keV la sezione d'urto di soli 0.02 pb corrisponde ad un tasso di reazioni di 2 events/month.

L'assenza della risonanza ha permesso di scartare la soluzione nucleare al problema dei neutrini solari.





# $^{3}$ He( $\alpha$ , $\gamma$ ) $^{7}$ Be

#### La maggiore fonte di incertezza

per i flussi dei neutrini solari della catena pp





### <sup>3</sup>He $(\alpha,\gamma)^7$ Be - la maggiore fonte di incertezza per $\Phi_{\nu_{pp}}$

#### THE INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY PRINCETON, NEW JERSEY 08540

E-mail: jnb@sns.ias.edu FAX: (609)924-7592

SCHOOL OF NATURAL SCIENCES

JOHN N. BAHCALL 28 May 1997

Page 2

Professor P. Corvisiero Professor C. Rolfs Spokesmen for the LUNA-Collaboration

#### Dear Professors Corvisiero and Rolfs:

I am writing to you about a historic opportunity of which I first became aware at the recent meeting on Solar Fusion Reactions at the Institute of Nuclear Theory, Washington University. At this meeting, I had the opportunity to see for the first time the results of the LUNA measurements of the important 3He - 3He reaction in a region that covers a significant part of the Gamow energy peak for solar fusion. This was a thrill that I had never believed possible. These measurements signal the most important advance in nuclear astrophysics in three decades.

With the LUNA results, debates on the validity of nuclear physics extrapolations to low energy that were ignited by the differences between standard predictions and observations of solar neutrinos can now be resolved experimentally. At least for the important  ${}^{3}He({}^{2}He, 2p)^{*}He$  reaction, it is becoming clear that no major discrepancy can be attributed to our nuclear physics understanding. (Additional measurements are needed in order to clarify some systematic uncertainties and to extend the results to the lower energy part of the Gamow peak.)

There are a number of other reactions that are crucial for our understanding of solar neutrino experiments and for the evolution of main sequence stars. These include:  ${}^{3}H(\alpha,\gamma)^{7}B_{\kappa}$ ,  ${}^{7}Be_{\kappa}(p,\gamma)^{4}B$ , and  ${}^{4}N(p,\gamma)^{4}O$ . We need to know the rates for these reactions at or near the energies at which fusion occurs in the sun and other main sequence stars.

The LUNA collaboration is superbly qualified to carry out the required studies provided an improved facility, a 200 kV high current machine, is installed in the unique environment of the Gran Sasso Underground National Laboratory.

I have had some experience in helping to set priorities for research in physics and in astronomy, most recently as Chair of the Decade Survey for Astronomy and Astrophysics of the National Academy of the United States and as President (now emeritus) of the American Astronomical Society. I can say, with the perspective provided by these previous assignments, that the work of the LUNA collaboration is unique and essential for further progress in solar neutrino studies and for understanding how main sequence stars evolve. I personally would rank the LUNA project among the highest priorities internationally for research in nuclear astrophysics, in stellar evolution, in solar neutrinos, and in particle phenomenology.

To Professor P. Corvisiero 28 May 1997

Please inform the individuals responsible for making the crucial budgetary decisions regarding the 200 kV high current machine of my eagerness to be personally available for more detailed discussions.

Sincerely yours,

John N. Bahcall Professor of Natural Science

6

JNB:jnb

Neutrini solari e massimi sistemi - 22/02/2023

"The rate of the reaction  ${}^{3}\text{He}(\alpha,\gamma){}^{7}\text{Be}$  is the largest nuclear physics contributor to the uncertainties in the solar model predictions of the neutrino fluxes in the p-p chain. In the past 15 years, no one has remeasured this rate; it should be the highest priority for nuclear astrophysicists."

John Bahcall, 28 Maggio 1997

 $\delta \Phi(^{8}\text{B}) \sim (1 + \delta S_{11})^{-2.73} (1 + \delta S_{33})^{-0.43} (1 + \delta S_{34})^{0.85}$  $(1 + \delta S_{17})^{1.0} (1 + \delta S_{e7})^{-1.0} (1 + \delta S_{1,14})^{-0.02}$ 

Fractional uncertainties



 $^{3}$ He( $lpha,\gamma$ ) $^{7}$ Be - la maggiore fonte di incertezza per  $arPsi_{
u_{
m pp}}$ 





## <sup>3</sup>He $(\alpha,\gamma)^7$ Be - la maggiore fonte di incertezza per $\Phi_{\nu_{pp}}$

#### Misura svolta a LUNA 400 kV



Bersaglio gassoso a pompaggio differenziale Rivelatore al silicio per monitorare il bersaglio Rivelatore HPGe schermato e collimato Calorimetro con inserto per misure di attivazione



## <sup>3</sup>He( $\alpha$ , $\gamma$ )<sup>7</sup>Be - la maggiore fonte di incertezza per $\Phi_{\nu_{pp}}$



![](_page_32_Picture_0.jpeg)

![](_page_32_Figure_2.jpeg)

![](_page_33_Picture_0.jpeg)

è la reazione più lenta del ciclo CNO I  $\rightarrow$  determina la **velocità del ciclo** 

![](_page_33_Figure_4.jpeg)

da questa dipende:

- il flusso atteso di neutrini solari dal ciclo CNO (decadimenti β<sup>+</sup> di <sup>13</sup>N e <sup>15</sup>O);
- la metallicità solare;
- la durata della combustione dell'idrogeno (permanenza in Sequenza Principale);
- l'età dei cluster globulari;

...

![](_page_34_Picture_0.jpeg)

![](_page_34_Figure_3.jpeg)

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

The bottleneck of the CNO burning and the age of the Globular Clusters Astronomy & Astrophysics 420 (2004) 625

Astrophysical S factor of <sup>14</sup>N(p,y)<sup>15</sup>O Physics Letters B 591 (2004) 61

S-factor of <sup>14</sup>N(p,γ)<sup>15</sup>O at astrophysical energies <u>European Physical Journal A 25 (2005) 455</u>

Low energy measurement of the <sup>14</sup>N(p,γ)<sup>15</sup>O total cross section at the LUNA underground facility <u>Nuclear Physics A 779 (2006) 297–317</u>

First measurement of the <sup>14</sup>N(p,γ)<sup>15</sup>O cross section down to 70 keV <u>Physics Letters B 634 (2006) 483</u>

Ground state capture in  ${}^{14}N(p,y){}^{15}O$  studied above the 259 keV resonance at LUNA

Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 35 (2008) 014019

Precision study of ground state capture in the <sup>14</sup>N(p,y)<sup>15</sup>O reaction Physical Review C 78 (2008) 022802(R)

The <sup>14</sup>N(p,y)<sup>15</sup>O reaction studied with a composite germanium detector <u>Physics Review C 83 (2011) 045804</u>

![](_page_35_Picture_12.jpeg)

![](_page_35_Figure_13.jpeg)

![](_page_35_Figure_14.jpeg)

![](_page_36_Picture_0.jpeg)

#### **Bersaglio solido + rivelatore HPGe**

![](_page_36_Figure_4.jpeg)

Bersaglio solido (TiN) Analisi delle single transizioni Misura delle σ parziali e dei BR Intervallo energetico: 119-367 keV

#### **Bersaglio gassoso + rivelatore BGO**

![](_page_36_Picture_7.jpeg)

Bersaglio gassoso (1 mbar) Angolo solido ≈4π per massimizzare l'efficienza Misura della sezione d'urto totale Intervallo energetico: 70-230 keV

![](_page_37_Picture_0.jpeg)

![](_page_37_Figure_2.jpeg)

![](_page_38_Picture_0.jpeg)

#### Bersaglio solido + rivelatore HPGe segmentato con schermatura anti-Compton BGO

![](_page_38_Figure_4.jpeg)

![](_page_39_Picture_0.jpeg)

Prima misura di LUNA-MV (argomento della tesi di dottorato di A. Compagnucci)

![](_page_39_Picture_4.jpeg)

3 rivelatori HPGe disposti a diversi angoli per misure di distribuzione angolare Nuova misura della cattura al GS (ancora dibattuta) Energie: da 275 keV a 1.4 MeV

![](_page_39_Picture_6.jpeg)

![](_page_40_Picture_0.jpeg)

Prima misura di LUNA-MV (argomento della tesi di dottorato di A. Compagnucci)

una misura più accurata della sezione d'urto della reazione <sup>14</sup>N(*p*,γ)<sup>15</sup>O permetterebbe una migliore determinazione della metallicità solare!

Bersaglio solido

3 rivelatori HPGe disposti a diversi angoli per misure di distribuzione angolare Nuova misura della cattura al GS (ancora dibattuta) Energie: da 275 keV a 1.4 MeV

![](_page_40_Picture_7.jpeg)

![](_page_41_Picture_0.jpeg)

#### In sintesi...

- Negli ultimi 32 anni LUNA ha contribuito allo studio di molte reazioni nucleari di interesse astrofisico
- alcune di queste reazioni hanno avuto un impatto enorme nello studio del Sole e dei neutrini
- non pensiate che sia finita... LUNA continuerà a migliorare la conoscenza delle sezioni d'urto di queste reazioni anche in futuro

![](_page_42_Picture_0.jpeg)

### La collaborazione LUNA (oggi)

![](_page_42_Picture_3.jpeg)

**Laboratori Nazionali del Gran Sasso, INFN, ASSERGI, Italy** F.Ferraro, M. Junker

**GSSI, L'AQUILA, Italy** A. Compagnucci, R. Gesuè

Università degli Studi di Bari and INFN, BARI, Italy/\*INFN Lecce, LECCE, Italy F. Barile, G.F. Ciani, V. Mossa, V. Paticchio, R. Perrino, L. Schiavulli

Konkoly Observatory, Hungarian Academy of Sciences, BUDAPEST, Hungary M. Lugaro

Institute of Nuclear Research (ATOMKI), DEBRECEN, Hungary

L. Csedreki, Z. Elekes, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, T. Szücs

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, DRESDEN, Germany

D. Bemmerer, A. Boeltzig, E. Masha

**University of Edinburgh, EDINBURGH, United Kingdom** M. Aliotta, C.G. Bruno, T. Davinson, R. Sidhu

Università degli Studi di Genova and INFN, GENOVA, Italy P. Corvisiero, P. Prati, S. Zavatarelli Università degli Studi di Milano and INFN, MILANO, Italy R. Depalo, A. Guglielmetti

Università degli Studi di Napoli "Federico II" and INFN, NAPOLI, Italy

A. Best, C. Ananna, A. Di Leva, G. Imbriani, D. Rapagnani

**Università degli Studi di Padova and INFN, PADOVA, Italy** C. Broggini, A. Caciolli, P. Marigo, R. Menegazzo, N. Mozumdar, D. Piatti, J. Skowronski

**INFN Roma1, ROMA, Italy** A. Formicola, C. Gustavino

Laboratori Nazionali di Legnaro, Italy M. Campostrini, V. Rigato

Osservatorio Astronomico di Collurania, TERAMO and INFN LNGS, Italy O. Straniero

**Università di Torino and INFN, TORINO, Italy** F. Cavanna, P. Colombetti, G. Gervino

![](_page_43_Picture_0.jpeg)

#### La collaborazione LUNA

![](_page_43_Picture_3.jpeg)

Ma il merito di ciò di cui vi ho parlato è dei collaboratori che hanno lavorato in LUNA a partire dal 1991, tra i quali:

C. Arpesella, E. Bellotti, G. Fiorentini, A. Fubini, U. Greife, J. Lambert, W.S. Rodney, D. Zahnow, A. D'Alessandro, L. Campajola, M. Dessalvi, A. D'Onofrio, L. Gialanella, H. Costantini, R. Bonetti, J. Cruz, A.P. Jesus, A. Lemut, V. Roca, C. Rolfs, M. Romano, C. Rossi-Alvarez, F. Schümann, E. Somorjai, F. Strieder, F. Terrasi, H.-P. Trautvetter, A. Vomiero, C. Angulo, P. Descouvemont, J.N. Klug, D. Schürmann, B. Limata, D. Rogalla, M. Marta, C. Mazzocchi, S. Vezzu, R. Kunz

Neutrini solari e massimi sistemi - 22/02/2023

![](_page_44_Picture_0.jpeg)

#### Grazie per l'attenzione