

International Cosmic Day 2022

Bari, 22 Novembre 2022

# Neutrini cosmici

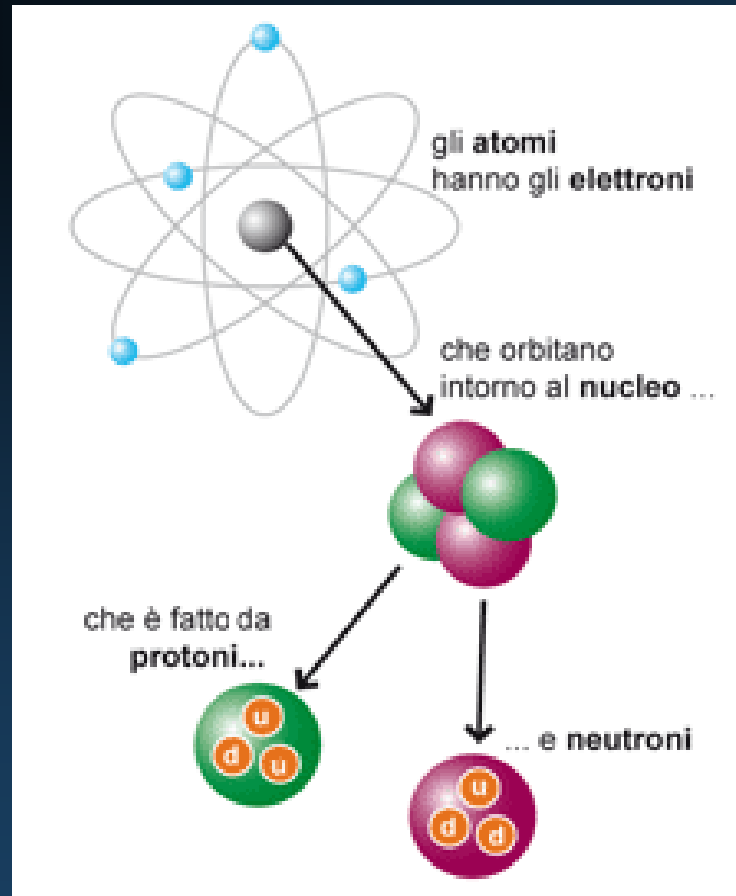
Marco Circella

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari

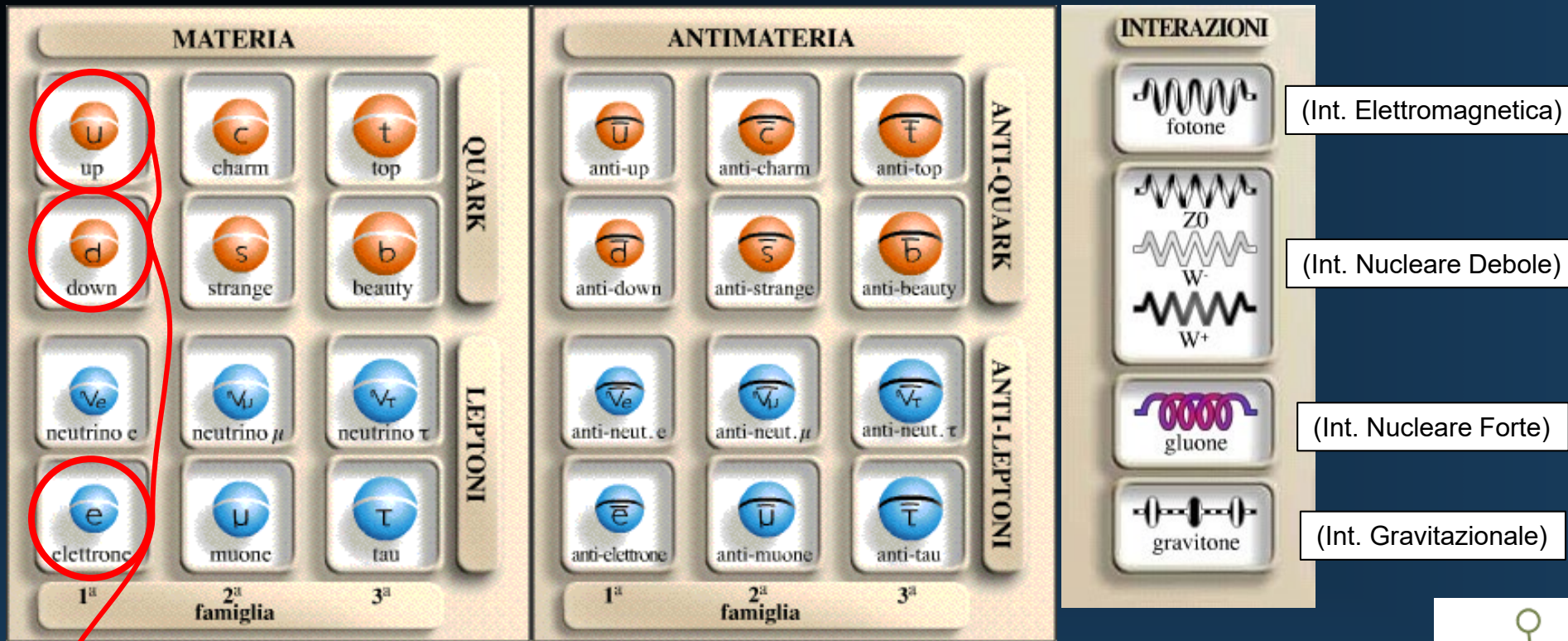
[marco.circella@ba.infn.it](mailto:marco.circella@ba.infn.it)



# I componenti elementari della materia «ordinaria»

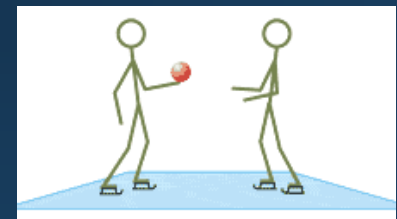


# I componenti elementari della materia (e antimateria)



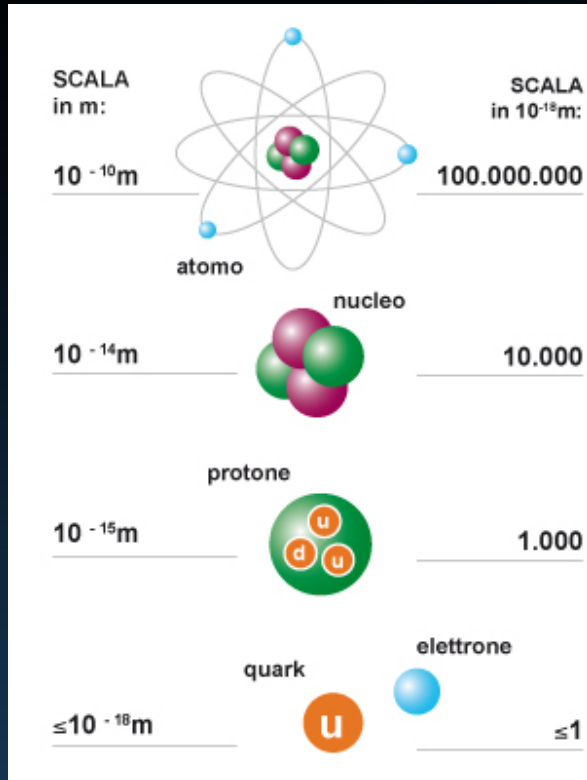
+ bosone di Higgs!

Noi stessi e tutto ciò che ci circonda siamo «costruiti» con tre sole particelle!

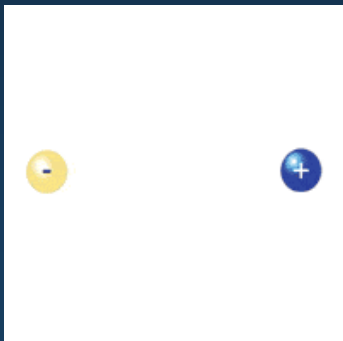


Le interazioni fondamentali possono essere pensate come scambio di opportune particelle

# Bizzarrie delle particelle elementari



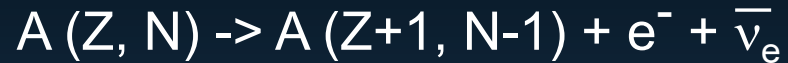
- Quarks e leptoni sono virtualmente puntiformi (stati aggregati no)
- I quarks e gli antiquarks non amano vivere da soli; tuttavia creano stati legati ragionevolmente stabili solo come combinazione di:
  - 1 quark e 1 un antiquark
  - 3 quarks (o 3 antiquarks)
- Particelle instabili possono decadere (con rilascio di energia)  
Es.  $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} (\bar{\nu}_{\mu})$
- Nuove particelle, nelle opportune condizioni, possono essere create convertendo energia,  $E = m c^2$



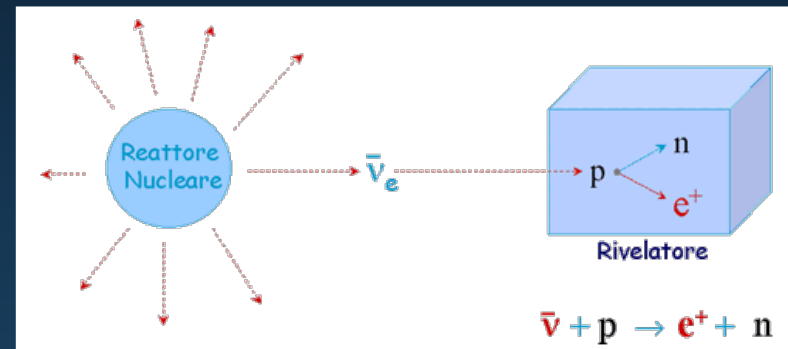
- Materia e antimateria, incontrandosi, vanno incontro all'annichilazione (o, viceversa, nelle opportune condizioni, si possono creare coppie di particelle e antiparticelle)

# Cos'è un neutrino?

- Particella elettricamente neutra, leggerissima (e perciò velocissima) che interagisce solo attraverso l'interazione debole
- Ipotizzati (da Wolfgang Pauli) negli anni '30 del secolo scorso per spiegare alcune stranezze (tra cui l'apparente violazione della conservazione dell'energia) dei decadimenti  $\beta$ , poi introdotti da Enrico Fermi nella sua prima trattazione dell'interazione debole



- Identificati per la prima volta negli anni '50 (esperimento di Clyde Cowan e Frederick Reines):



- Esistono tre tipi di neutrini:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  (che possono «oscillare» tra loro)

# La scoperta dei neutrini

original - Photocopy of PLC 0393  
Abschrift/15.12.56 PM

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

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930  
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zellen, den ich huldvollst  
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselsatz" (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  
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die  
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron sehe  
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer  
dieser Zellen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein  
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment  $\mu$  ist. Die Experimente  
verleihen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons  
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann  
 $\mu$  wohl nicht grösser sein als  $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$ .

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee  
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, 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  
gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein  
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn  
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,  
gesteht und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum  
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,  
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:  
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen  
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.-  
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht  
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht  
vom 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich  
bin.- Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baez, Euer  
untertänigster Diener

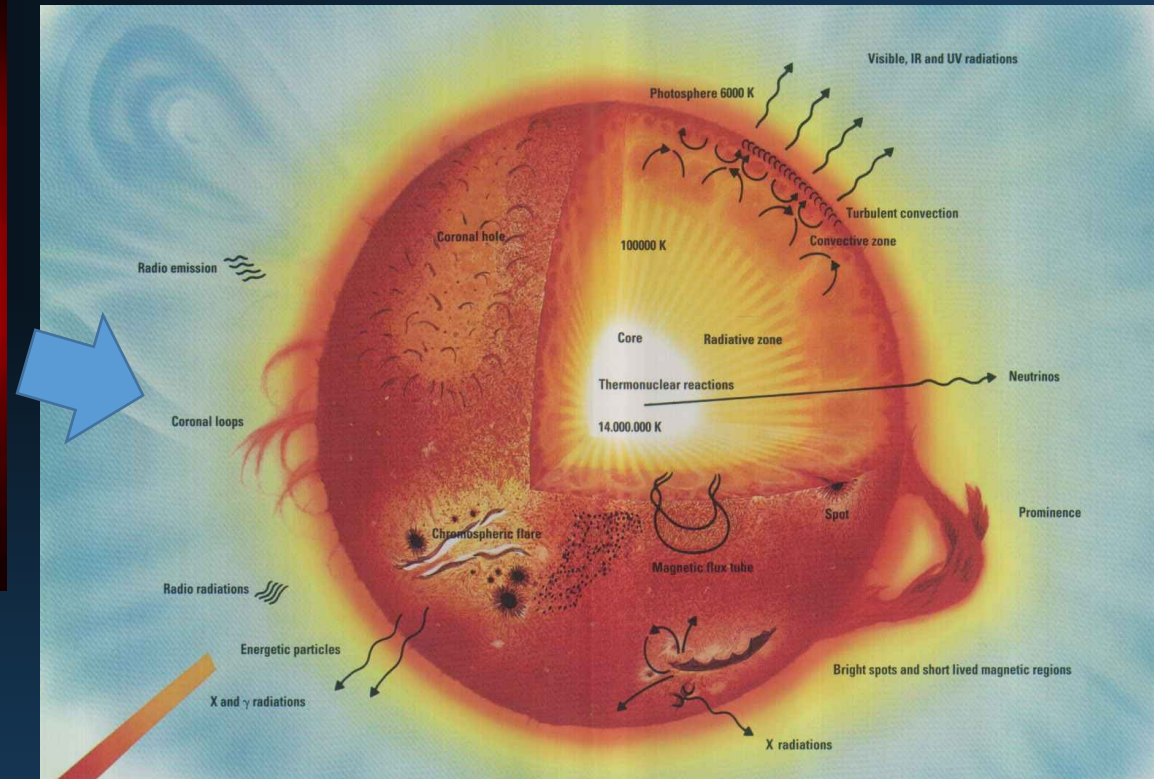
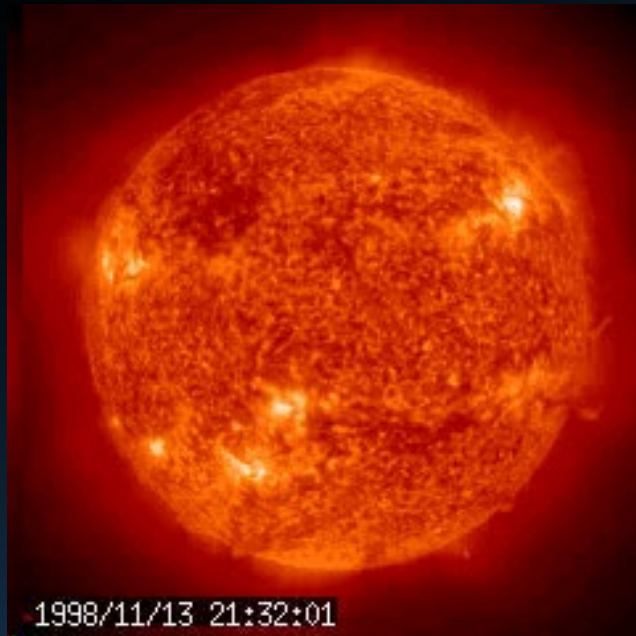
ges. W. Pauli

Frederick REINES and Clyde COWAN  
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico  
Thanks for message. Everything comes to  
him who knows how to wait.

Pauli

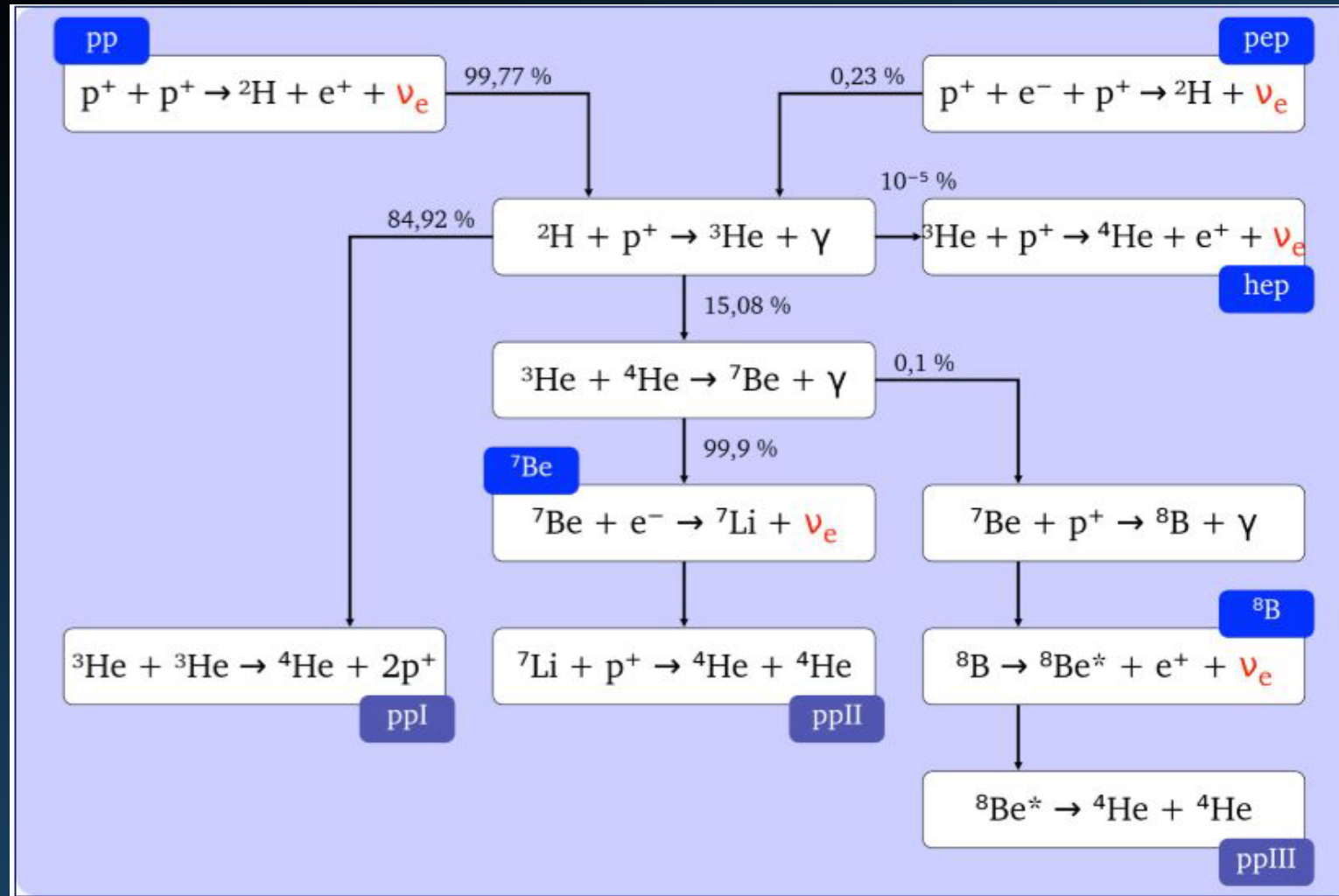
RADIO-SCHWEIZ AG. RADIO-SUISSE S.A.  
RADIOGRAMM - RADIOGRAMME 56 14 1310  
SBZ1311 ZHW UW1844 FM BZJ116 WH CHICAGOILL PLC 00253  
Befördert - Transmis  
NAME - NOM  
"VIA RADIOSUISSE"  
nach - à  
Stunde - Heure  
Erhalten - Reçu  
von - de  
NAME - NOM  
Stunde - Heure  
74 15.VI.56 --1 10  
Brieffotogramm  
LT  
PROFESSOR W PAULI  
ZURICH UNIVERSITY ZURICH ①  
Per Post  
NACHLASS  
PROF. W. PAULI  
NACHLASS  
PROF. W. PAULI  
WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED  
NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY  
OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX  
TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS  
FREDERICK REINES AND CLYDE COWAN  
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO  
Nr. 20 6500 X 100 3/54

# Cos'è una stella?



Struttura resa compatta dall'attrazione gravitazionale e nel cui nucleo, innescate dall'enorme riscaldamento conseguente alla contrazione, sono in atto catene di reazioni nucleari

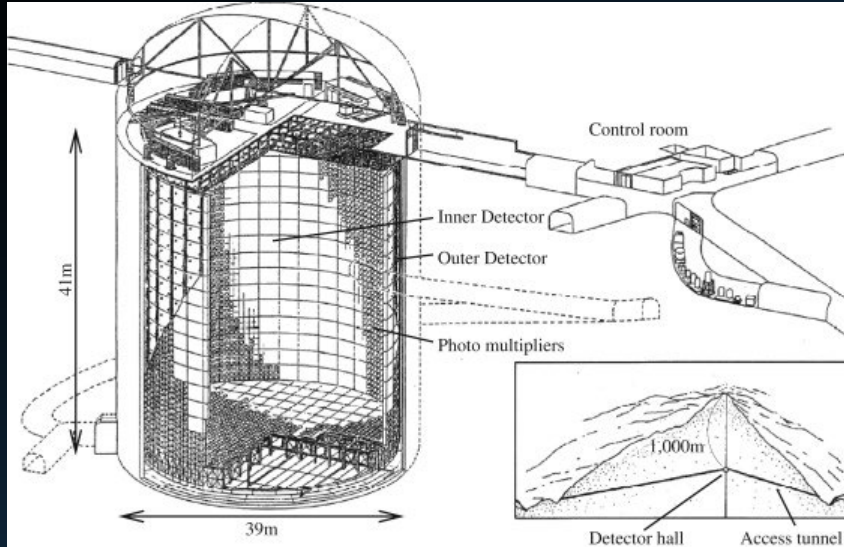
# Reazioni nucleari nel Sole



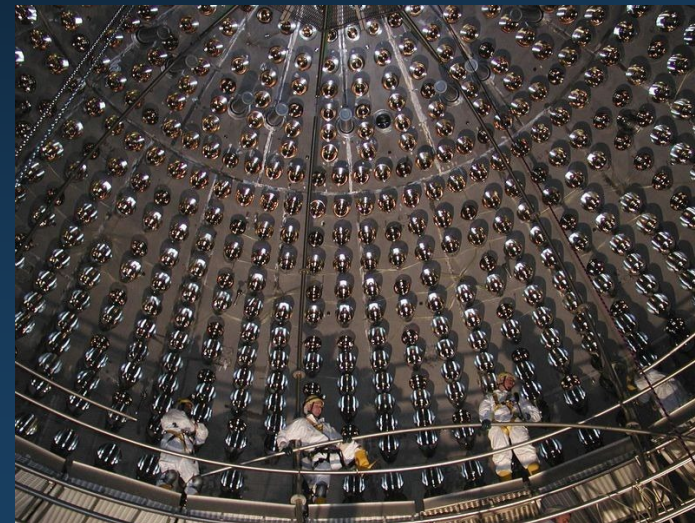
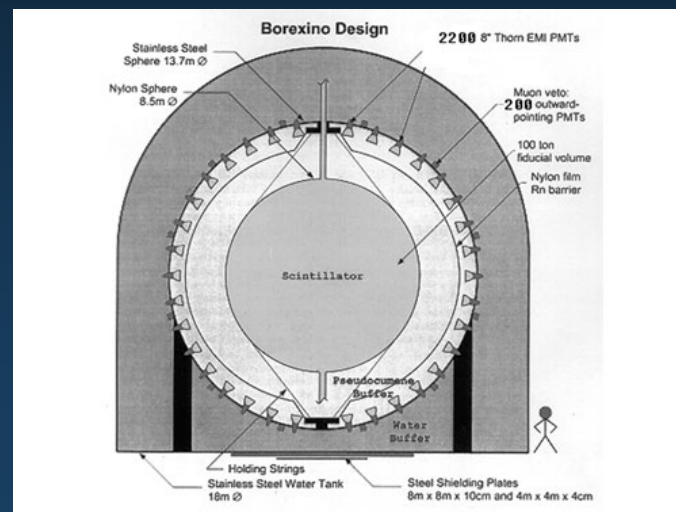
N.B. Questo è il ciclo principale (non l'unico!) per la produzione di energia nel Sole



# Studio del Sole mediante $\nu$

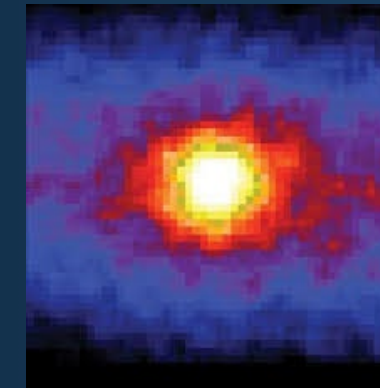
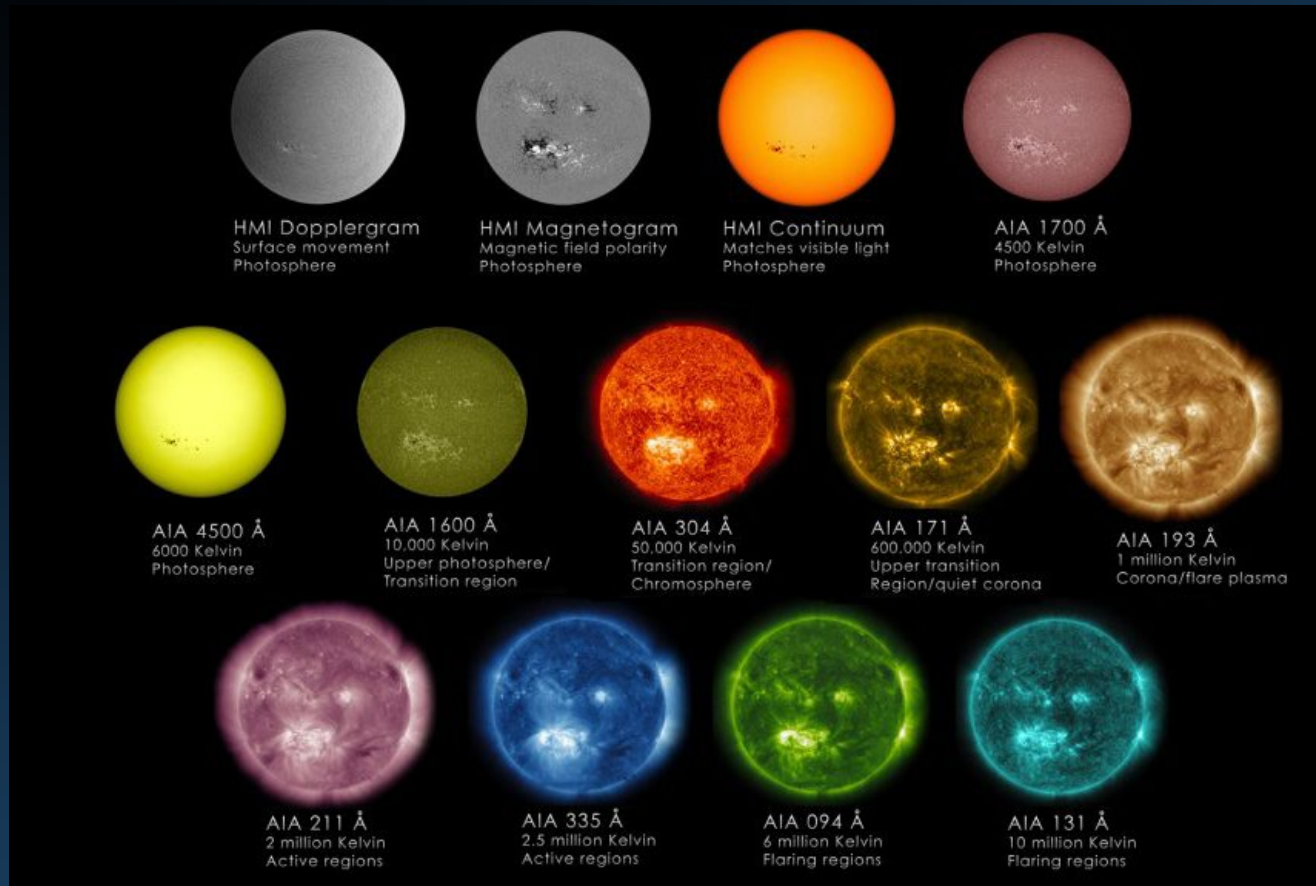


Occorrono apparati sotterranei molto specializzati come Super-Kamiokande in Giappone (sopra) o Borexino al Gran Sasso (sotto) – N.B. le foto sono relative alle operazioni di allestimento



# Osservazioni del Sole

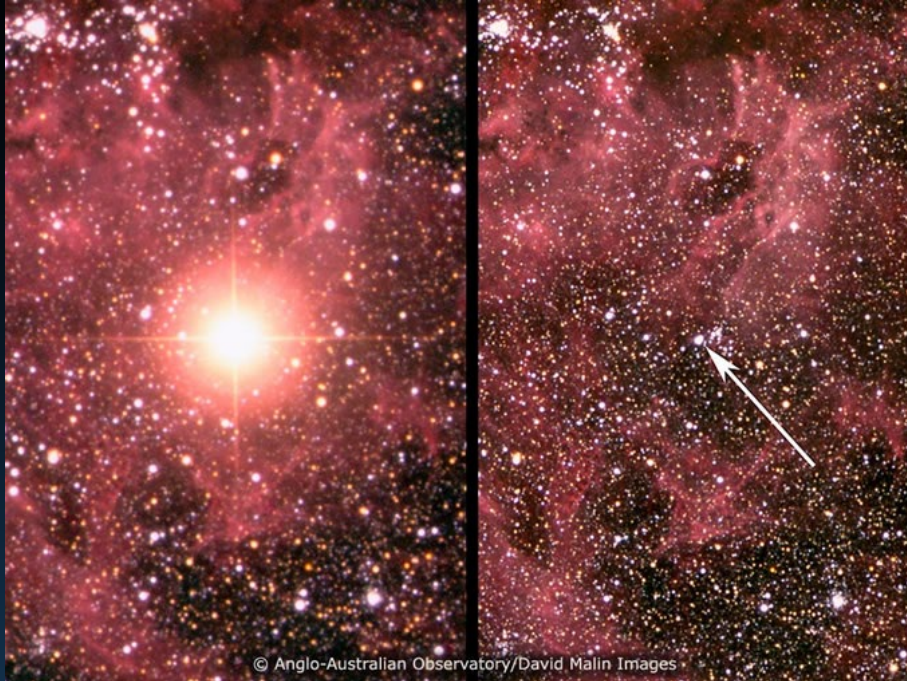
Credit: NASA / SDO / Goddard Space Flight Center



Neutrino grafia del (nucleo del) Sole

Il Sole a diverse lunghezze d'onda

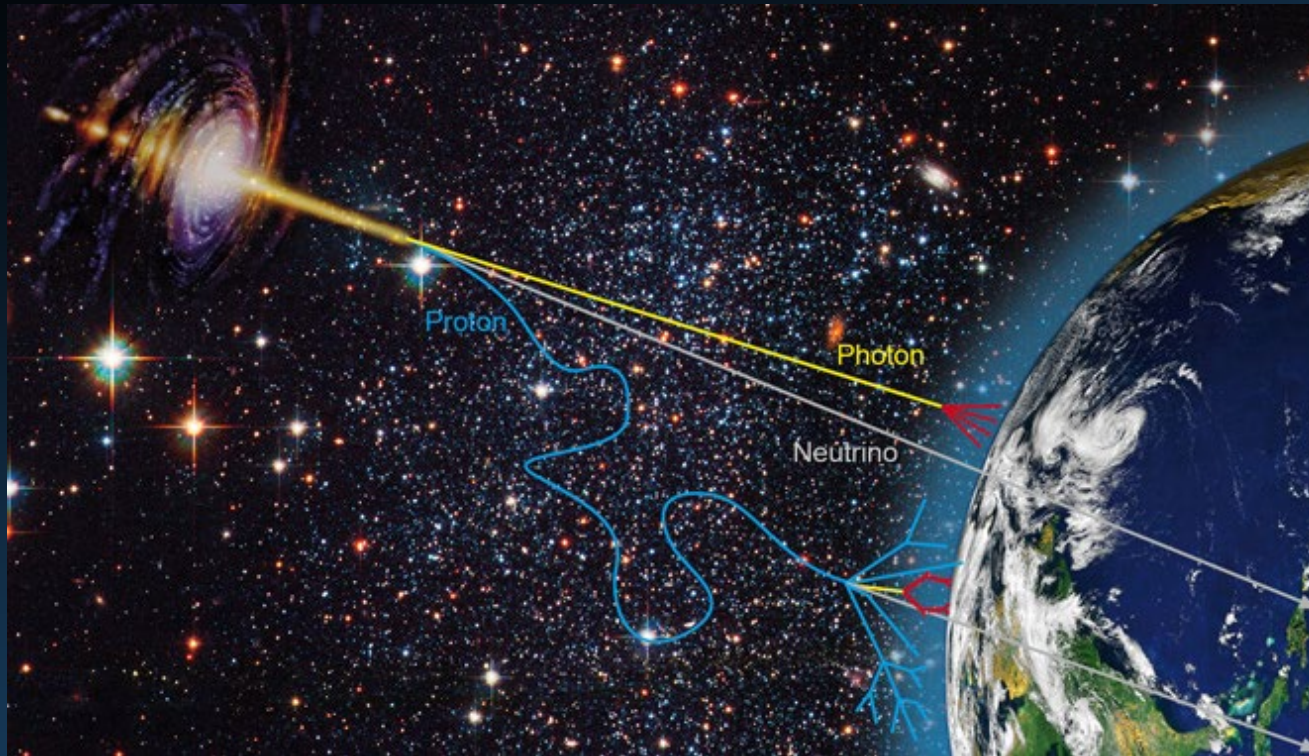
# Studio del Cosmo con i $\nu$



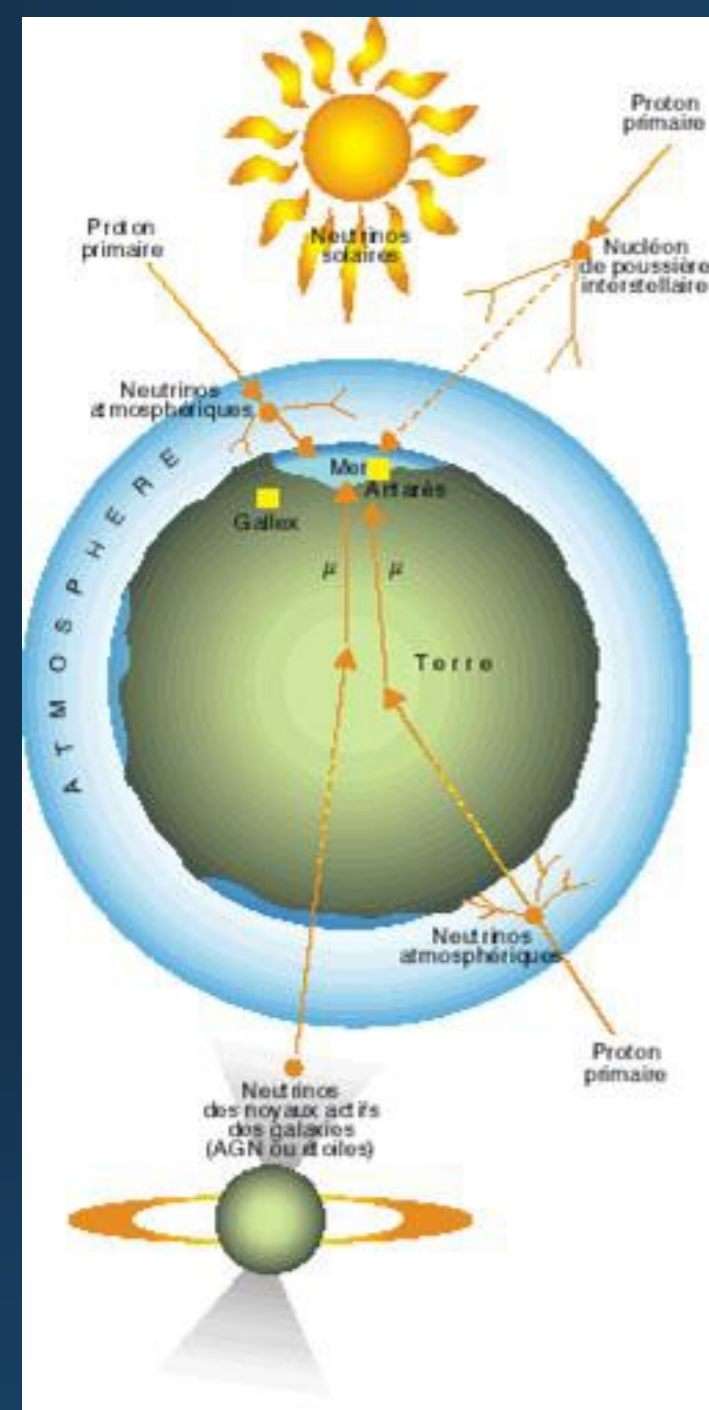
I resti della SN 1987A

Segnali di neutrini sono stati riportati da tre diversi esperimenti (IMB, Kamiokande e Baksan) in occasione della esplosione di supernova 1987A (nella Grande Nube di Magellano)

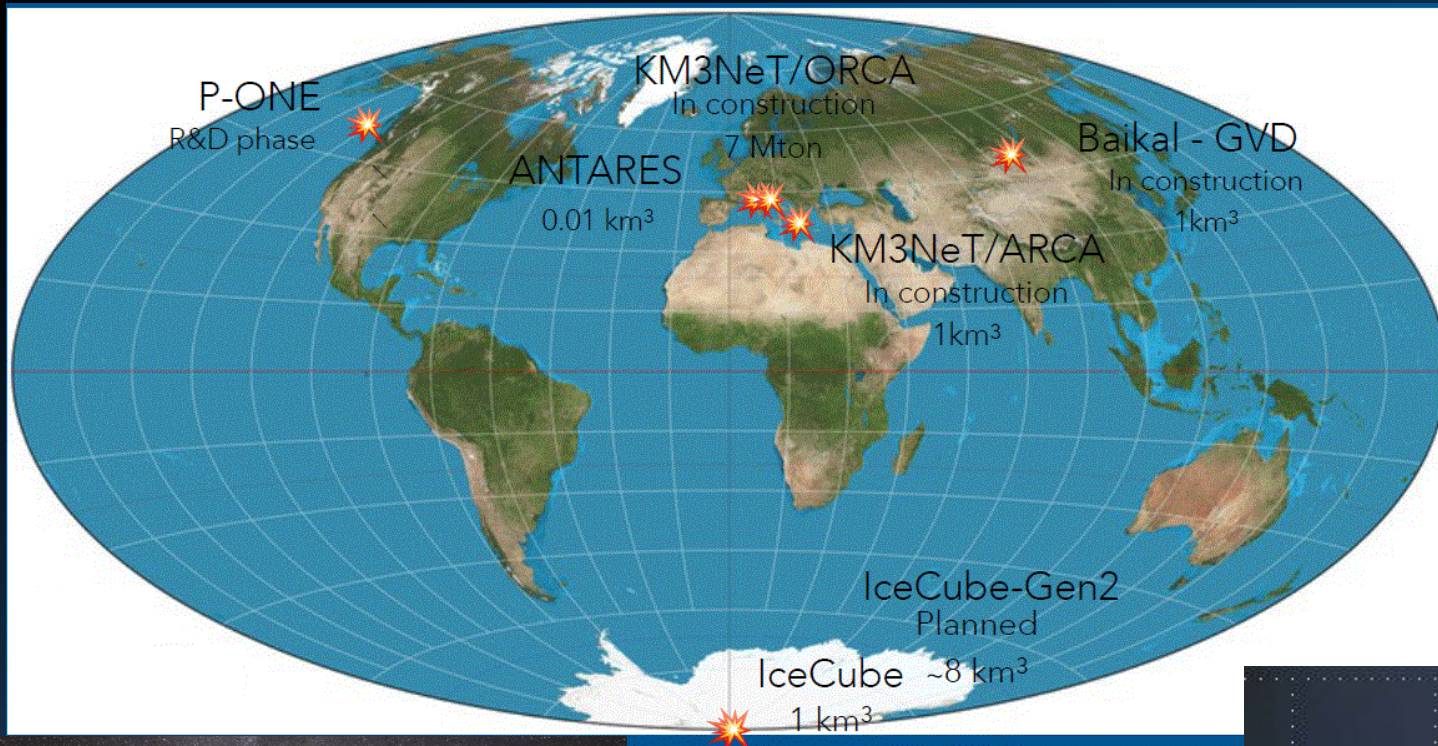
# La neutrino-astronomia di alte energie



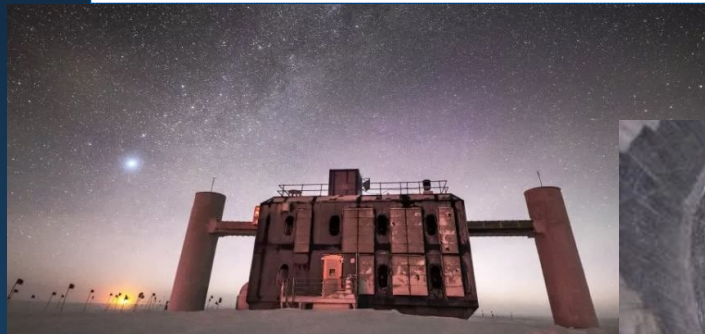
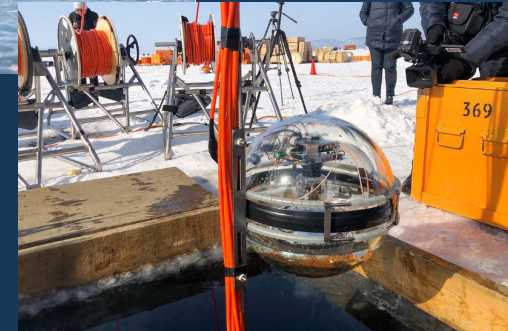
Enormi potenzialità, ma... occorrono apparati enormi (con volumi di qualche km<sup>3</sup>) ad alta profondità in un mezzo trasparente (acqua o ghiaccio)



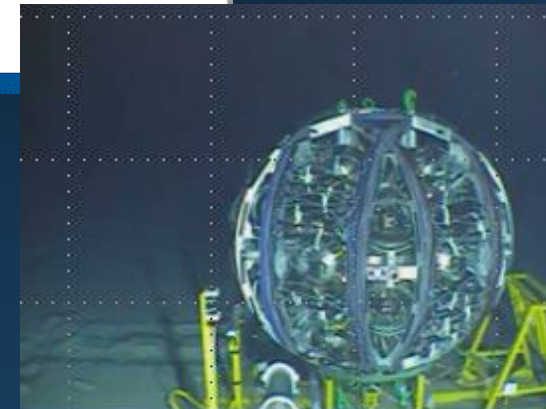
# Telescopi per $\nu$ in acqua e ghiaccio



Costruzione del Baikal  $\nu$ -telescope



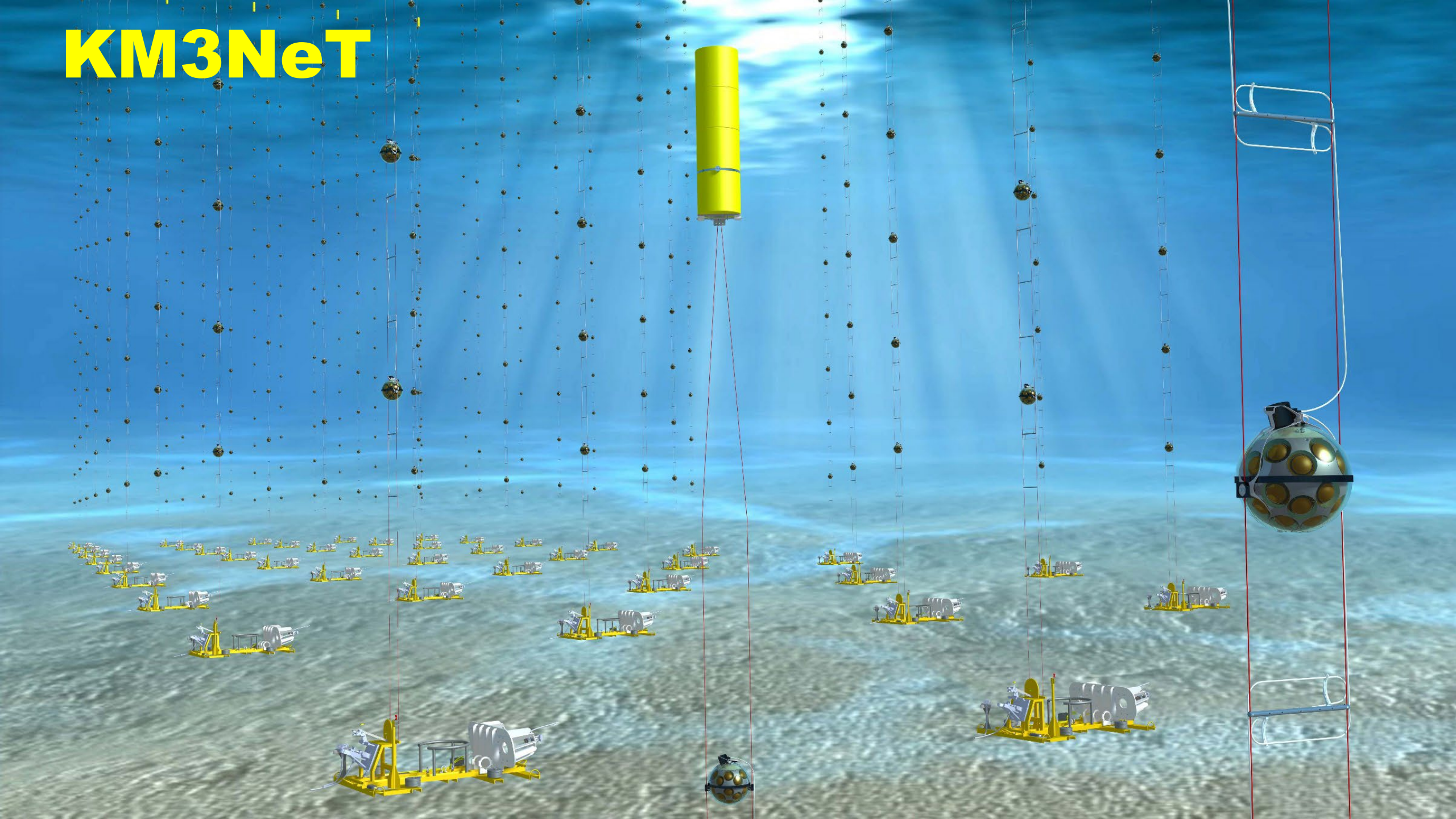
Costruzione di IceCube al Polo Sud



Costruzione di KM3NeT



# KM3NeT



# La neutrino-astronomia: risultati recenti

Esistono neutrini cosmici di altissima energia che investono la terra in maniera pressoché uniforme

Sono state riportate le prime evidenze di sorgenti celesti di neutrini di alta energia (TXS 506+056, NGC 1068)



NGC 1068

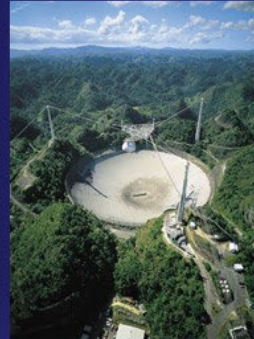
# Studi multi-messaggero del Cosmo

Osservazioni complementari sono oggi possibili mediante rivelatori di: radiazione elettro-magnetica (ottico, infrarosso, onde radio, raggi x e  $\gamma$ , ecc.), particelle cariche (raggi cosmici), neutrini e onde gravitazionali

## Telescopi antichi e moderni



Telescopio di Galileo



Radiotelescopio (Arecibo)



Telescopio Fly's Eye per raggi cosmici



Telescopio per sciami estesi di raggi cosmici (KASCADE)



Telescopi per raggi  $\gamma$  (MAGIC)



Telescopio spaziale Hubble



Radiotelescopi interferometrici (VLA)



Telescopio per raggi cosmici spaziale (AMS sulla ISS)



# Cielo e terra



*La filosofia è scritta in questo  
grandissimo libro che continuamente  
ci sta aperto innanzi a gli occhi  
(io dico l'universo)*

*Galileo Galilei*

# L'origine degli elementi

Origine degli elementi:

Big Bang										Stelle molto massive					Raggi cosmici				
Stelle poco massive					Supernove					Prodotti dall'uomo									

1 H Idrogeno																	2 He Elio															
3 Li Litio	4 Be Berillio																	5 B Boro	6 C Carbonio	7 N Azoto	8 O Ossigeno	9 F Fluoro	10 Ne Neon									
11 Na Sodio	12 Mg Magnesio																	13 Al Alluminio	14 Si Silicio	15 P Fosforo	16 S Zolfo	17 Cl Cloro	18 Ar Argon									
19 K Potassio	20 Ca Calcio	21 Sc Scandio	22 Ti Titanio	23 V Vanadio	24 Cr Cromo	25 Mn Manganese	26 Fe Ferro	27 Co Cobalto	28 Ni Nichel	29 Cu Rame	30 Zn Zinco	31 Ga Gallio	32 Ge Germanio	33 As Arsenico	34 Se Selenio	35 Br Bromo	36 Kr Cripto															
37 Rb Rubidio	38 Sr Stronzio	39 Y Ittrio	40 Zr Zirconio	41 Nb Niobio	42 Mo Molibdenu	43 Tc Tecnecio	44 Ru Rutenio	45 Rh Rodio	46 Pd Palladio	47 Ag Argento	48 Cd Cadmio	49 In Indio	50 Sn Stagno	51 Sb Antimonio	52 Te Tellurio	53 I Iodio	54 Xe Xenon															
55 Cs Cesio	56 Ba Bario																	72 Hf Hafnio	73 Ta Tantalio	74 W Tungsteno	75 Re Renio	76 Os Osmio	77 Ir Iridio	78 Pt Platino	79 Au Oro	80 Hg Mercurio	81 Tl Tallio	82 Pb Piombo	83 Bi Bismuto	84 Po Polonio	85 At Astatio	86 Rn Radon
87 Fr Francio	88 Ra Radio																	104 Rf Rutherfordio	105 Db Dubnio	106 Sg Seaborgio	107 Bh Bohrio	108 Hs Hassio	109 Mt Meitnerio	110 Ds Darmstadtio	111 Rg Roentgenio	112 Cn Copernicio	113 Uut Ununtrio	114 Fl Flerovio	115 Uup Ununpentio	116 Lv Livermorio	117 Uus Ununseptio	118 Uuo Ununoctio
																		57 La Lantanio	58 Ce Cerio	59 Pr Praseodimio	60 Nd Neodimio	61 Pm Promezio	62 Sm Samario	63 Eu Europio	64 Gd Gadolinio	65 Tb Terbio	66 Dy Diprosio	67 Ho Olmio	68 Er Erbio	69 Tm Tulio	70 Yb Itterbio	71 Lu Lutenzio
																		89 Ac Attinio	90 Th Torio	91 Pa Protattinio	92 U Uranio	93 Np Nettunio	94 Pu Plutonio	95 Am Americio	96 Cm Curio	97 Bk Berkelio	98 Cf Californio	99 Es Einsteinio	100 Fm Fermio	101 Md Mendelevio	102 No Nobelio	103 Lr Laurenzio

*"The nitrogen in our DNA, the calcium in our teeth, the iron in our blood, the carbon in our apple pies were made in the interiors of collapsing stars. We are made of star stuff."*  
*C. Sagan*