



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



UNIVERSITÀ
DI PADOVA

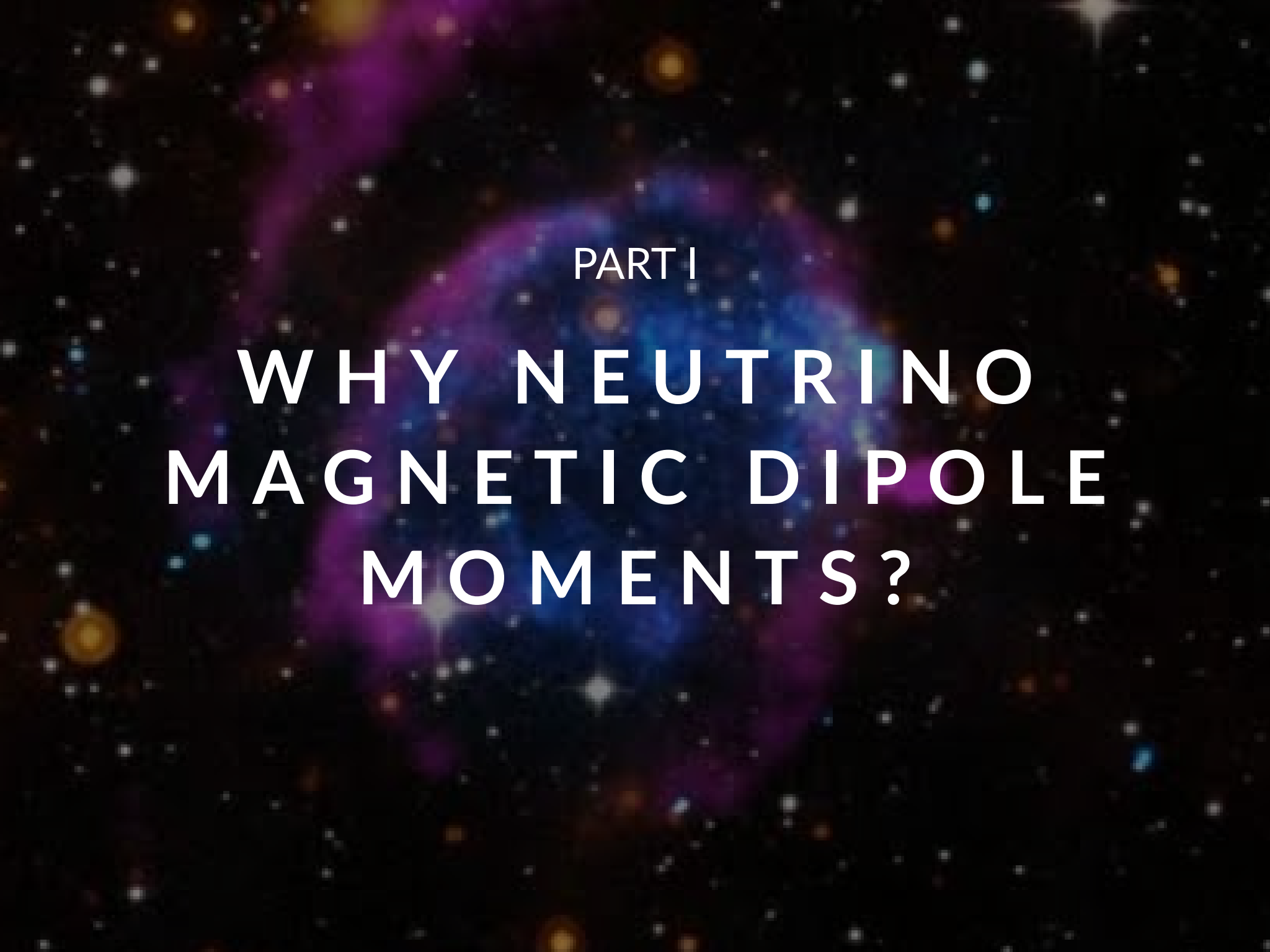


REMODELING SUPERNOVA CONSTRAINTS FROM SN 1987A ON NEUTRINO MAGNETIC DIPOLE MOMENTS

MARTINA LA ROSA

CO-AUTHORS: D.F. FIORILLO, F. TESTAGROSSA, E. VITAGLIANO

International School of Nuclear Physics
Erice, 16-22 Sept. 2026

The background of the slide is a deep space image featuring a prominent nebula with swirling patterns of purple, magenta, and blue. The nebula is set against a black field densely populated with stars of various colors, including white, yellow, and blue. The overall effect is a sense of vastness and cosmic mystery.

PART I

WHY NEUTRINO MAGNETIC DIPOLE MOMENTS?

MOTIVATIONS

W.E. Pauli, 1930

MOTIVATIONS

W.E. Pauli, 1930

...wird, so können wir erwarten, dass die Energie der Neutronen, die bei dem Zerfall freigesetzt wird, in dem Kern des Tochteratoms absorbiert wird und das Ausschleussungsprinzip der Neutronen aus dem Kern bewirkt wird. Es ist zu erwarten, dass die Neutronen aus dem Kern des Tochteratoms nach dem Zerfall des Mutteratoms noch dadurch unterscheiden, dass sie eine höhere Geschwindigkeit haben. Die Masse der Neutronen ist etwas größer als die der Protonen. Die Masse der Neutronen ist ebenfalls größer als die der Protonen. Das kontinuierliche Spektrum ist demnach verhältnissmäßig unter der Annahme, dass beim Zerfall mit dem Neutron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron constant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (sicherer wäre der Überbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein wesentlicher Kippel von einem gewissen Moment M ist. Die Experimente verraten wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht größer sein kann, als die eines γ -Strahls und darf dann $\pm$ wohl nicht größer sein als $\sim 10^{13}$ cm).

Ich weiss mich noch nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und werde mich erst vertanowenlich am Sach, lichte Initiative, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons glänge, wenn dieses ein abgelenktes oder eben damit Prozess des Nachdringungsvermögens besitzen würde, wie ein Neutron.

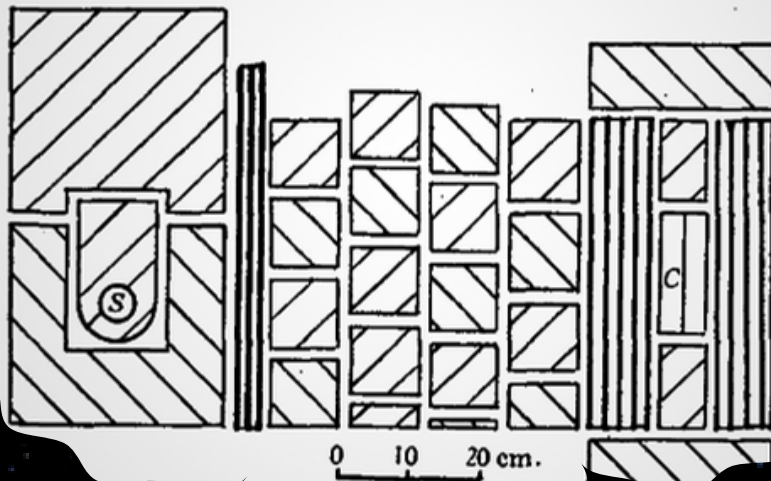
Ich gebe zu, dass mein Umgang vielleicht von vornherein
wahrscheinlich symbolisch wird, weil man die Medaillon, wenn
man es, wohl schon Kräfte gesehen hätte. Aber nur was sagt,
der Ernst der Situation beim kontinentalen Betriebs-Spektakel
eines vertrieben Vorgesetzten
wir schließlich im Prozess
nicht denken, dass

"Dear radioactive ladies and gentlemen..."

MOTIVATIONS

W.E. Pauli, 1930

... WITH A FIVE GRAMS ...
 carry the investigation still further, we have inv...
 radiation from 4.9 gm. of radium which penetrates th...
 of lead. In the first experiments (Fig. 1), the source was plac...



angement. S, source.

... es könnten all...
 ... wollen will, in den Kern...
 ... und das Ausschliessungsprinzip...
 ... werden noch dadurch unterscheiden, dass die...
 ... Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen...
 ... derselben Größenordnung wie die Elektronenmasse sein und...
 ... falls nicht größer als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche...
 ... Spektrum wäre dann verhältnissmäßig unter der Annahme, dass beim...
 ... Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert...
 ... 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 (z.B. dass es aus der Überlagerung dieser Teilchen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutronen nicht größer sein kann, als die eines γ -Strahls und darf dann μ wohl nicht größer sein als $\mu = (10^{-23} \text{ cm})$.

Ich weiss mich wohl nicht, dass über diese Idee...
 ... illustrieren und werde mich erst vertrauensvoll an Sie, liebe...
 ... tive, mit der Frage, wie es von den experimentellen Nachweis...
 ... den Neutronen ginge, wenn diese ein objektives oder ein...
 ... Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein...
 ... Strahl.

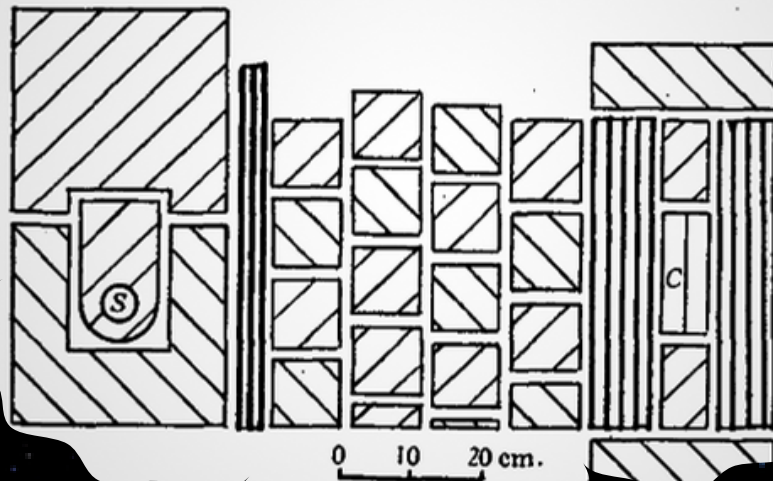
... so, dass sein Aussehen vielleicht von vorübergeh...
 ... llich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn...
 ... wohl schon Kräfte gesehen hätte. Aber man darf wohl...
 ... lert der Situation beim kontinuierlichen beta-Spekt...
 ... eines veralteten Vorganges...
 ... mir Mitleid im Hinblick auf...
 ... nicht denken, dass...

M.E. Nahmias, 1935

MOTIVATIONS

W.E. Pauli, 1930

... WITH A FIVE GRAMS ...
 carry the investigation still further, we have inv...
 radiation from 4.9 gm. of radium which penetrates th...
 of lead. In the first experiments (Fig. 1), the source was plac...



...ngement. S, source.

... es könnten all...
 ...en will, in den Kern...
 ... und das Ausschließungsprinzip...
 ... werden noch dadurch unterschieden, dass die...
 ... Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen...
 ... von derselben Größenordnung wie die Elektronenmasse sein und...
 ... falls nicht größer als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche...
 ... Spektrum wäre dann verträglich unter der Annahme, dass beim...
 ... 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 (zithern vieles der Überlagerung...
 dieser Teilchen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein...
 magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente...
 verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutronen...
 nicht größer sein kann, als die eines γ -Strahls und darf dann...
 wohl nicht größer sein als $\mu = 10^{-23}$ em.

Ich teile mich wohl für, aber nicht, etwas über diese Idee...
 ... und werde mich erst vertrauensvoll an Sie, liebe...
 ... mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis...
 ... Neutronen stünde, wenn dieses ein objektives oder ein...
 ... Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein...
 ... Strahl.

... dass sein Aussehen vielleicht von vorübergeh...
 ... kommen wird, weil man die Neutronen, wenn...
 ... Kräfte gesehen hätte. Aber wir wissen nicht...
 ... Situation beim kontinuierlichen beta-Spekt...
 ... eines verarbeiteten Vorganges...
 ... dir Mitleid im Herzen...
 ... nicht denken, dass...



ν_e ?



NEUTRINO MAGNETIC MOMENTS

In the simplest extension of the Standard Model with three massive neutrinos:

$$\mathcal{L}^D = -\frac{1}{2} \sum_{k,j} \bar{\nu}_{kL} \sigma^{\alpha\beta} \mu_{kj}^D \nu_{jR} F_{\alpha\beta} + \text{h.c.}$$

$$\mu_{kk}^D \simeq \frac{3eG_F m_k}{8\sqrt{2}\pi^2} \simeq 3 \times 10^{-19} \left(\frac{m_k}{\text{eV}} \right) \mu_B$$



Credit: Giunti et al. (2024), arXiv:2411.03122 [1]

BOUNDS ON MDM:

The most stringent experimental constraint on the electron neutrino magnetic moment is provided by the GEMMA collaboration [2]:

$$\mu_{\nu_e} < 2.9 \times 10^{-11} \mu_B \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

For *muon neutrinos*, accelerator-based measurements from LSND give [3]:

$$\mu_{\nu_\mu} < 6.8 \times 10^{-10} \mu_B \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

While the best limits for *tau neutrinos* are [4]:

$$\mu_{\nu_\tau} < (4 - 5) \times 10^{-7} \mu_B \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

Additional cosmological constraints arise from BBN and N_{eff} [5].

$$\mu_\nu \lesssim \mathcal{O}(10^{-12}) \mu_B$$

Astrophysical systems also place stringent constraints on μ . To date, the strongest bounds have been derived from **red giants** cooling arguments [6, 7]:

$$\mu_\nu < 6 \times 10^{-12} \mu_B$$

PART II

WHY CORE-COLLAPSE SUPERNOVAE?

Extreme conditions in the
PNS core

Enormous neutrino flux,
with total released energy
 $E_\nu \sim 3 \times 10^{53}$ erg

Neutrinos dominate the
cooling of the proto-neutron
star over a timescale of
about 10 seconds

About 99% of the
gravitational binding energy
is released as neutrinos

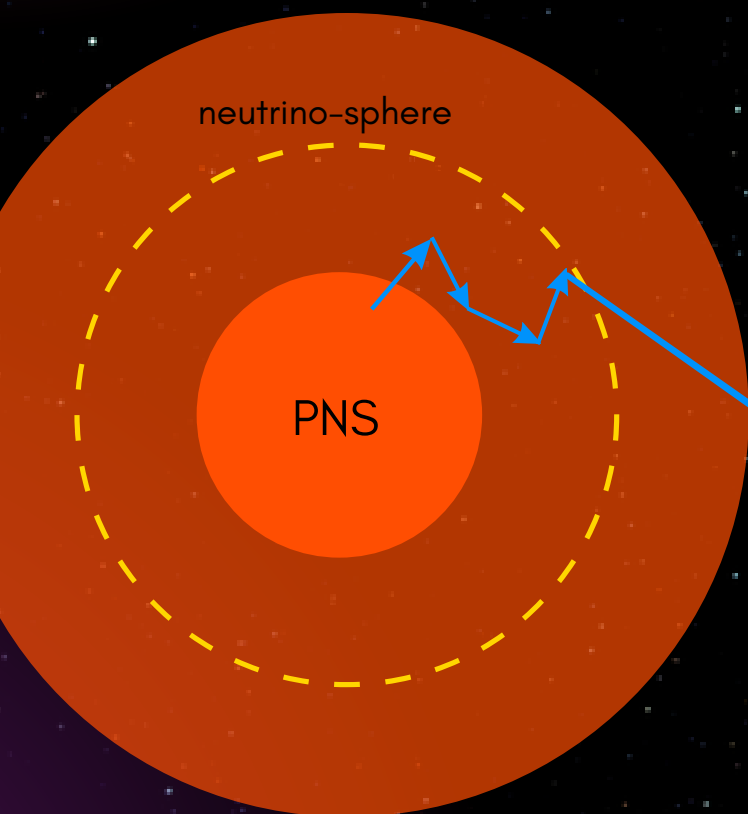


MAXIMIZATION OF THE IMPACT OF
POSSIBLE NON-STANDARD NEUTRINO
INTERACTIONS

THE COOLING BOUND

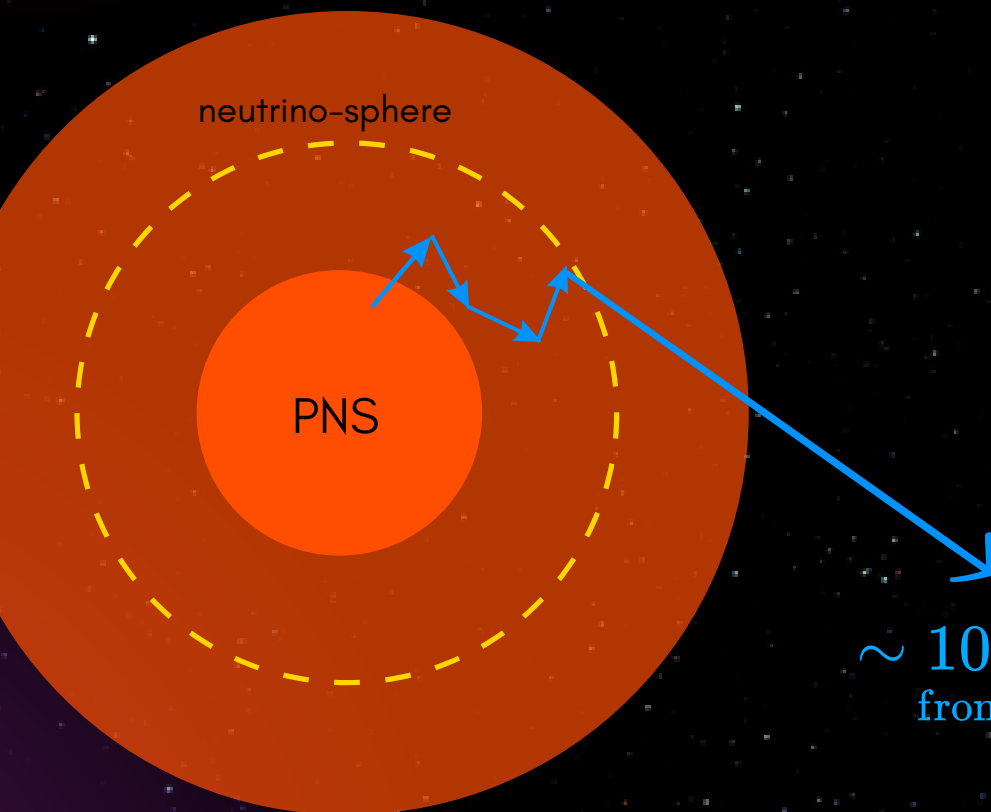
If neutrinos have a non-vanishing magnetic dipole moment

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \mu_\nu \bar{\nu} \sigma_{\alpha\beta} \nu F^{\alpha\beta},$$



$\sim 10 - 20 \text{ MeV } \nu_L$
from neutrino - sphere

THE COOLING BOUND



If neutrinos have a non-vanishing magnetic dipole moment

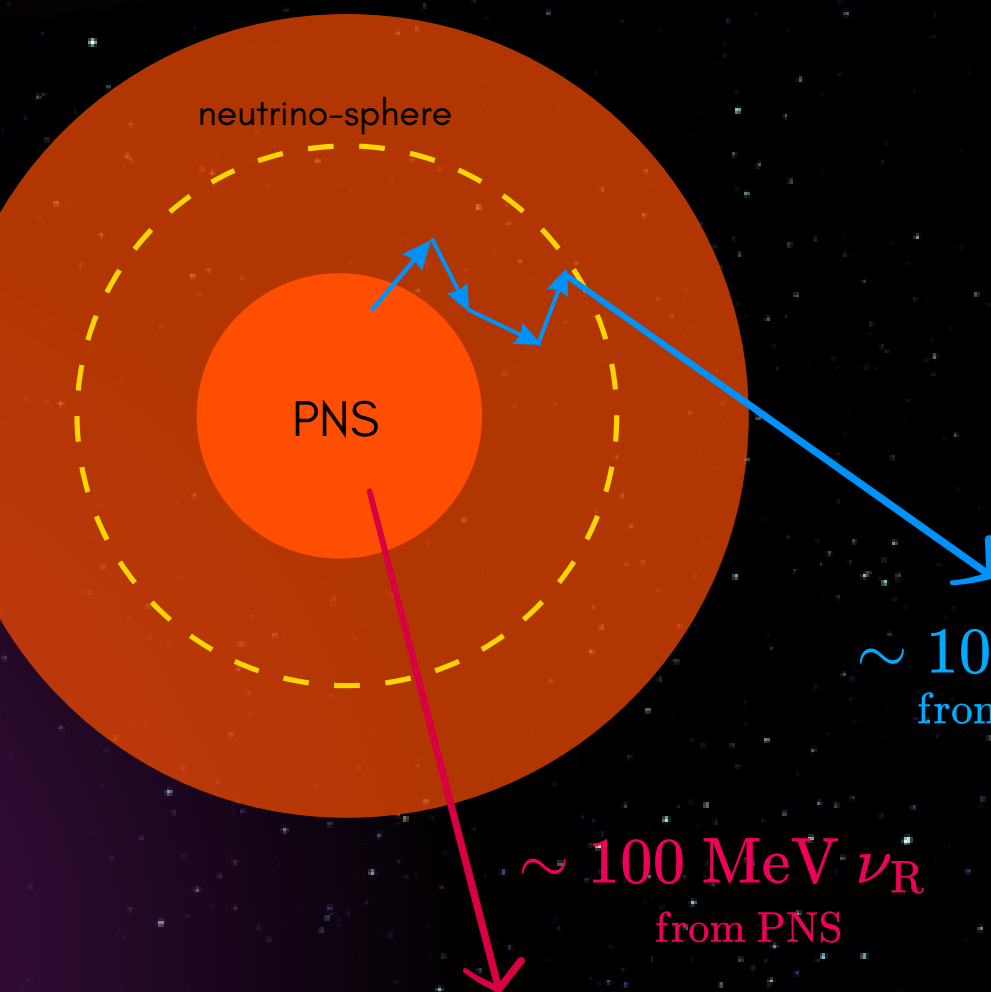
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \mu_\nu \bar{\nu} \sigma_{\alpha\beta} \nu F^{\alpha\beta},$$

left-handed (anti)neutrinos can turn into sterile, right-handed states through the process

$$\nu_L + p \rightarrow \nu_R + p$$

$\sim 10 - 20 \text{ MeV } \nu_L$
from neutrino - sphere

THE COOLING BOUND



If neutrinos have a non-vanishing magnetic dipole moment

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \mu_\nu \bar{\nu} \sigma_{\alpha\beta} \nu F^{\alpha\beta},$$

left-handed (anti)neutrinos can turn into sterile, right-handed states through the process

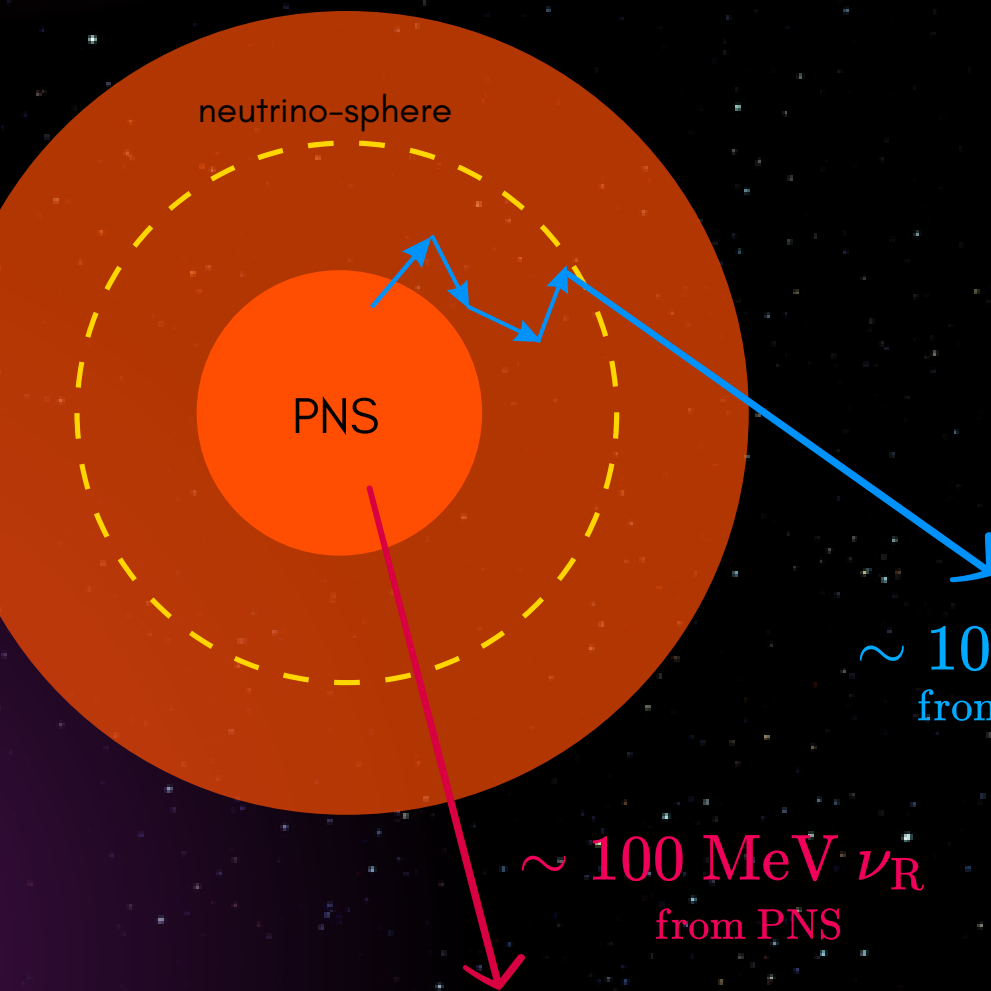
$$\nu_L + p \rightarrow \nu_R + p$$

$\sim 10 - 20 \text{ MeV } \nu_L$
from neutrino - sphere

$\sim 100 \text{ MeV } \nu_R$
from PNS

Conversion
($\nu_L \rightarrow \nu_R$)
of trapped ν_L
into free-
streaming ν_R

THE COOLING BOUND



In the PNS:

$$\sigma = \alpha(Z\mu_\nu)^2 \ln \left(1 + \frac{4E_\nu^2}{k_s^2} \right)$$

We impose the condition:

$$L_{\nu_R} < L_\nu(1s)$$

$\sim 10 - 20 \text{ MeV } \nu_L$
from neutrino - sphere

$\sim 100 \text{ MeV } \nu_R$
from PNS

THE COOLING BOUND

Using the previous considerations, it is possible to derive a first estimate of the upper bound on the neutrino magnetic dipole moment:

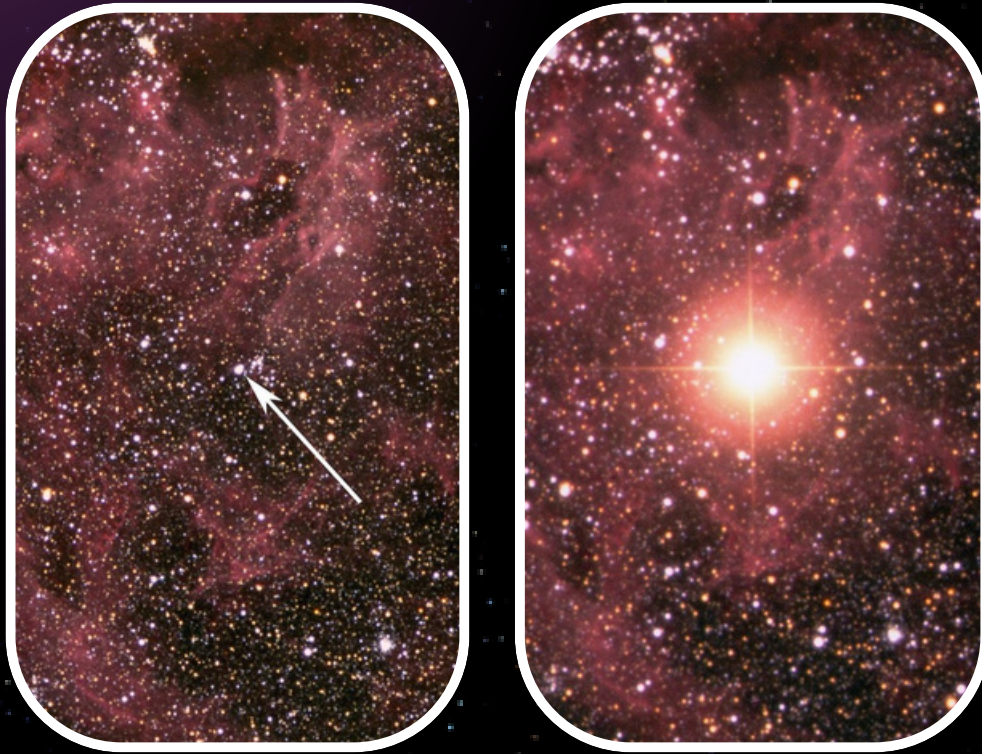
$$\mu_\nu \lesssim 3.04 \times 10^{-12} \mu_B$$

By using Garching 1D model SFHo-18.8 (cold model):

- Internal temperature: $T \sim 40$ MeV
- Initial chemical potential for electron neutrinos in the center: $\mu \sim 150$ MeV
- Radial extent of the lepton core: $R \sim 10\text{--}20$ km

SN1987A

SN1987A



Credit: Anglo-Australian Observatory

- **Direct probe** of neutrino emission from supernova
- Possibility to study the duration, luminosity and energy spectrum of the burst
- Possibility to **constrain** new physics

Where: Large Magellanic Cloud

When: 23 February 1987

What: Type II supernova, previously a blue supergiant known as Sanduleak -69° 202

How: Gravitational collapse, core-collapse supernova explosion, intense neutrino burst

PART III

EVENT COUNTING BOUND

HELICITY REFLIP IN THE GALACTIC MAGNETIC FIELD

The probability for a neutrino mass eigenstate to flip its helicity is:

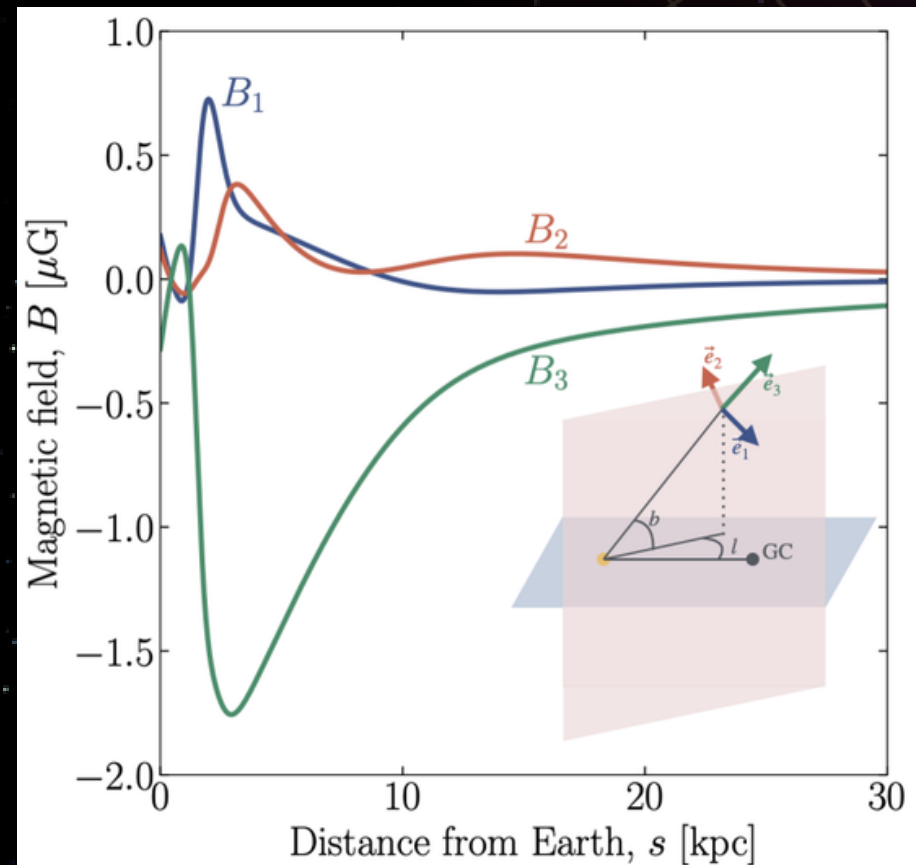
$$P_i = |\mu_i|^2 \left| \int_D ds B_{\perp}(s) \right|^2$$

Integrating this magnetic field over the luminosity distance D :

$$P_i = 7.2 \times 10^{-2} \left| \frac{\mu_i}{10^{-13} \mu_B} \right|^2$$

$$B_{\perp} \sim \mu G$$

$$D \sim 50 \text{ kpc}$$



Credit: Fiorillo et al. (2026), arXiv:2509.13322

EXPECTED DETECTIONS

The fluence at Earth is:

$$\Phi_\nu = \frac{N_\nu}{4\pi D^2} \quad \text{with } N_\nu \text{ number of re-flipped neutrinos}$$

At the typical energies of supernova neutrinos, the primary detection channel is Inverse Beta Decay of electron antineutrinos on hydrogen nuclei.

However, **above roughly 60 MeV**, the interaction rate in water becomes dominated by charged-current (CC) reactions on oxygen nuclei. For electron neutrinos and antineutrinos, these channels follow:



EXPECTED DETECTIONS

The cross-section in the energy range of interest can be expressed as:

$$\sigma \simeq \bar{\sigma} E_\nu^2, \quad \text{with} \quad \bar{\sigma} \simeq 10^{-43} \text{ cm}^2/\text{MeV}^2$$

We are interested in the **number of events** produced by the interaction of these highly-energetic neutrinos. This can be estimated as

$$N_{e^\pm} \simeq \sigma N_p \Phi_\nu$$

$$N_p = 4.5 \times 10^{32} \text{ fiducial protons}$$

$$N_o = N_p/2 \text{ oxygen nuclei}$$

Since no event with energies **above 60 MeV** was observed in IMB and Kamiokande II at the time of neutrino arrival, we can place new, more stringent constraints on the values of the magnetic moments of neutrinos

These represent the **most stringent preliminary bounds** on the neutrino magnetic dipole moments

EVENT COUNTING BOUND

Given the null detection by IMB, we set an upper bound on μ_x imposing that

$$N_{e^\pm}(\mu_x) \lesssim 2.996$$

From this procedure we derive the following upper limits:

$$\mu_{ee} \lesssim 3.5 \times 10^{-13} \mu_B \quad \mu_{\bar{e}e} \lesssim 0.80 \times 10^{-12} \mu_B$$

$$\mu_{\mu\mu} \lesssim 1.04 \times 10^{-12} \mu_B \quad \mu_{\bar{\mu}\mu} \lesssim 0.84 \times 10^{-12} \mu_B$$

$$\mu_{\tau\tau} \lesssim 0.94 \times 10^{-12} \mu_B \quad \mu_{\bar{\tau}\tau} \lesssim 1.08 \times 10^{-12} \mu_B$$

BRAND
NEW
BOUNDS!

EVENT COUNTING BOUND

Given the null detection by IMB, we set an upper bound on μ_x imposing that

$$N_{e^\pm}(\mu_x) \lesssim 2.996$$

From this procedure we derive the following upper limits:

$$\mu_{ee} \lesssim 3.5 \times 10^{-13} \mu_B \quad \mu_{\bar{e}e} \lesssim 0.80 \times 10^{-12} \mu_B$$

$$\mu_{\mu\mu} \lesssim 1.04 \times 10^{-12} \mu_B \quad \mu_{\bar{\mu}\mu} \lesssim 0.84 \times 10^{-12} \mu_B$$

$$\mu_{\tau\tau} \lesssim 0.94 \times 10^{-12} \mu_B \quad \mu_{\bar{\tau}\tau} \lesssim 1.08 \times 10^{-12} \mu_B$$

R. Barbieri, R.N. Mohapatra [8]: $\mu_{\nu_e} \lesssim (0.1 - 1) \times 10^{-12} \mu_B$

D. Nötzold [9]: $\mu_{\nu_e} \lesssim 1.5 \times 10^{-12} \mu_B$

**BRAND
NEW
BOUNDS!**

CONCLUSIONS

- Our bounds overcome **any other existing bound to date**.
- All the neutrino magnetic moments considered are improved, leading to more stringent bounds with respect to the previous limits.
- CCSNe provide a **powerful laboratory** to constrain new physics beyond the SM, hopefully giving us new hints about the nature of neutrinos themselves and their electromagnetic properties.
- A new CCSN explosion would provide an extremely interesting probe of new physics, offering information about neutrino interactions and their role in both particle physics and astrophysics.

The background of the image is a deep space visualization of the cosmic web, showing a complex network of dark matter filaments and galaxy clusters. The filaments are primarily blue and purple, with some brighter, more intense regions of red and yellow. The overall texture is intricate and fibrous, resembling a vast, interconnected web. The text "THANK YOU!" is centered over this background in a bold, white, sans-serif font.

THANK YOU!

REFERENCES

- [1] C. Giunti, K. Kouzakov, Y.-F. Li, A. Studenikin, *Neutrino Electromagnetic Properties*, Annual Review of Nuclear and Particle Science 75, 1 (2025).
- [2] A. G. Beda, V. B. Brudanin, V. G. Egorov, D. V. Medvedev, V. S. Pogosov, M. V. Shirchenko, A. S. Starostin, *The Results of Search for the Neutrino Magnetic Moment in GEMMA Experiment*, Advances in High Energy Physics 2012, 350150 (2012).
- [3] LSND Collaboration, L. B. Auerbach et al., *Measurement of Electron-Neutrino Electron Elastic Scattering*, Physical Review D 63, 112001 (2001) [hep-ex/0101039].
- [4] A. M. Cooper-Sarkar, S. Sarkar, J. Guy, W. Venus, P. O. Hulth, K. Hultqvist, *Bound on the Tau-Neutrino Magnetic Moment from the BEBC Beam Dump Experiment*, Physics Letters B 280, 153 (1992)
- [5] E. Grohs, A. B. Balantekin, *Implications on Cosmology from Dirac Neutrino Magnetic Moments*, Physical Review D 107, 123502 (2023).
- [6] N. Franz, M. Dennis, J. Sakstein, *Tip of the Red Giant Branch Bounds on the Neutrino Magnetic Dipole Moment Revisited*, arXiv:2307.13050 (2023).
- [7] G. G. Raffelt, *Stars as Laboratories for Fundamental Physics*, University of Chicago Press (1996).
- [8] R. Barbieri, R. N. Mohapatra, *Limit on the Magnetic Moment of the Neutrino from Supernova SN1987A Observations*, Physical Review Letters 61, 27 (1988).
- [9] D. Nötzold, *New Bounds on Neutrino Dipole Moments from SN1987A*, Physical Review D 38, 1658 (1988).