

Neutrinii astrofizici – „mesagerii fantomă” ai Cosmosului

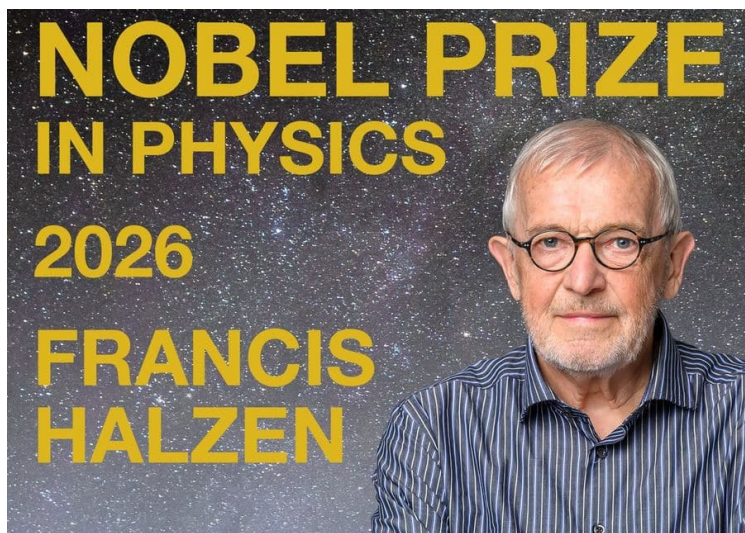
Povestea științifică din spatele Premiului Nobel pentru Fizică 2026

Prof. dr. Coriolan V. Tiușan

Facultatea de Fizică, Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca

Cercetător Științific I, CNRS, Franța

Articol realizat pe baza și adaptat după prezentarea susținută de Prof. Mark Pearce (KTH Royal Institute of Technology, Stockholm), președintele Comitetului Nobel pentru Fizică 2026, cu ocazia anunțării Premiului Nobel pentru Fizică.



*Prin anunțul făcut pe 6 octombrie 2026 de Academia Regală Suedeză de Științe, am aflat că **Premiul Nobel pentru Fizică 2026** i-a fost acordat lui **Francis Halzen**, profesor la University of Wisconsin–Madison (SUA), născut în Belgia în 1944, pentru contribuțiile sale decisive la realizarea Observatorului IceCube și la descoperirea neutrinelor de origine astrofizică.*

O incursiune excepțională în povestea științifică din spatele acestui Premiu Nobel ne este oferită de profesorul **Mark Pearce** (KTH Stockholm), specialist în fizica astroparticulelor și președinte al Comitetului Nobel pentru Fizică 2026, în discursul susținut imediat după anunțarea laureatului. În cele ce urmează, vom sintetiza principalele idei și momente-cheie evidențiate de profesorul **Pearce**, care oferă o perspectivă deosebit de relevantă asupra parcursului științific ce a condus la această distincție.

În fiecare secundă, peste un miliard de particule minuscule străbat palma mâinii noastre fără ca noi să simțim ceva. Majoritatea acestor particule provin de la Soarele nostru, alunecând prin materie ca printr-un tărâm al fantomelor. Dar, departe în cosmos, mult dincolo de galaxia noastră, fenomene violente de energetice - găuri negre supermasive, stele care explodează și acceleratoare cosmice - emit mesageri de un cu totul alt tip.

Este vorba despre **neutrinii astrofizici de înaltă energie**, particule care pot transporta energii de peste o mie de ori mai mari decât cele atinse în coliziunile produse de om la **Large Hadron Collider (LHC)** de la **CERN**. Ei iau naștere în unele dintre cele mai violente și îndepărtate fenomene din Univers și, datorită proprietăților lor extraordinare, constituie o **sursă unică de informație** despre aceste **processe cosmice extreme**. Numiți adesea „**particule fantomă**”, neutrinii nu au sarcină electrică, au o masă extrem de mică și interacționează foarte slab cu materia. Din acest motiv, pot străbate galaxii, stele și planete aproape neperturbați, fără a fi deviați de câmpurile electromagnetice și având o probabilitate extrem de redusă de a fi absorbiți. Tocmai această capacitate îi transformă în **mesageri cosmici excepționali**, care le permit cercetătorilor să sondeze direct „inima” celor mai puternice acceleratoare naturale de particule din Univers.

Timp de decenii, astrofizicienii s-au confruntat cu o **provocare fundamentală**: investigarea proceselor fizice extreme care au loc în galaxiile îndepărtate era limitată de însăși natura semnalelor cosmice utilizate în mod tradițional pentru observarea Universului.

- **Protonii**, fiind particule cu sarcină electrică, sunt deviați de câmpurile magnetice cosmice întâlnite de-a lungul propagării lor. În consecință, direcția lor de sosire pe Pământ nu mai indică în mod direct sursa din care provin, ceea ce face dificilă reconstituirea traiectoriei și identificarea originii lor astrofizice.

- **Razele gamma**, constituite din fotoni de foarte înaltă energie, nu sunt deviate de câmpurile magnetice, însă pot interacționa cu câmpurile de radiație întâlnite în timpul propagării prin Univers. Aceste interacțiuni pot conduce la atenuarea sau absorbția lor înainte de a ajunge la observatoarele terestre, limitând astfel informația pe care o pot furniza despre sursele cosmice foarte îndepărtate.

Neutrinii, în schimb, reprezintă **mesageri cosmici aproape ideali**. Lipsiți de sarcină electrică și având o masă extrem de mică, ei pot traversa regiuni vaste de materie, nori de gaz și praf cosmic și chiar corpuri cerești, fără a fi deviați de câmpurile magnetice și cu o probabilitate foarte redusă de a interacționa. În consecință, direcția din care un neutrino ajunge pe Pământ poate indica, cu o bună precizie, regiunea cosmică în care acesta a fost produs, oferind astfel o cale directă către identificarea celor mai energetice surse din Univers.

Această proprietate remarcabilă generează însă și **principala dificultate experimentală**: tocmai pentru că neutrinii interacționează extrem de slab cu materia, detectarea lor este extraordinar de dificilă. Pentru a înregistra un număr suficient de evenimente era necesar un detector cu un volum enorm – la o scară care, pentru mult timp, a părut aproape imposibil de realizat experimental.

Visul Îndrăzneț din Antarctica

În anul 1988, **Francis Halzen**, un fizician teoretician de la Universitatea Wisconsin–Madison, a propus o idee uluitoare: ce-ar fi dacă, în loc să construiască un rezervor artificial uriaș, cercetătorii ar transforma însăși calota glaciară a Antarcticii într-un detector gigantic de particule?

Foarte puțini fizicieni conservatori au crezut că ideea va funcționa. Însuși Halzen a recunoscut ulterior că puțini oameni — inclusiv el însuși — erau siguri de succes. Cu toate acestea, alături de primii colaboratori de la instituții precum Universitatea din Uppsala și Universitatea din Stockholm, Halzen s-a înhămat la construcția observatorului IceCube. Pentru realizarea detectorului, inginerii au forat în calota glaciară antarctică puțuri cu adâncimi de până la aproximativ **2,5 kilometri**, utilizând jeturi de **apă încălzită la înaltă presiune** pentru a topi gheața polară extrem de transparentă. În interiorul acestor puțuri au fost coborâte cabluri de mare lungime, pe care au fost instalați **mii de senzori optici sferici**, denumiți **Module Optice Digitale (Digital Optical Modules – DOMs)**, concepuți pentru a detecta semnalele luminoase extrem de slabe asociate interacțiunilor neutrinilor cu materia.



O nouă eră în astronomie

Finalizat în **2011**, Observatorul IceCube transformă aproximativ **un kilometru cub de gheață antarctică** într-un gigantic detector de particule. La numai doi ani după finalizarea IceCube, colaborarea internațională a raportat **primele dovezi convingătoare ale existenței neutrinelor de foarte înaltă energie de origine extraterestră**, într-un articol publicat în 2013 în prestigioasa revistă *Science* [2].

Prin detectarea și analiza acestor veritabili **mesageri cosmici**, **Francis Halzen** și ampla colaborare internațională IceCube au contribuit la deschiderea unei noi ferestre de observare a Universului: **astronomia cu neutrini de înaltă energie**. Observațiile au demonstrat că o parte dintre neutrinii detectați provin din afara Galaxiei și au permis asocierea unor evenimente cu surse astrofizice extrem de energetice, inclusiv **nuclee galactice active și blazari**, alimentați de găuri negre supermasive. Mai recent, utilizarea unor metode avansate de analiză a datelor și **machine learning** a făcut posibilă obținerea primei imagini a **Căii Lactee în neutrini**, oferind o perspectivă fundamental diferită de cea furnizată de astronomia bazată pe radiația electromagnetică.

Realizarea IceCube reprezintă rezultatul a **decenii de dezvoltare conceptuală, tehnologică și experimentală**, precum și al perseverenței lui **Francis Halzen** în susținerea unei idei care, la început, părea aproape imposibil de transpus în practică. Recunoașterea acestei contribuții prin acordarea **Premiului Nobel pentru Fizică 2026** încununează un parcurs științific care a schimbat modul în care putem investiga fenomenele cele mai energetice din cosmos.

Astfel, un kilometru cub de gheață aflat la **Polul Sud** a fost transformat într-un extraordinar „ochi” îndreptat spre **Univers**, capabil să observe cosmosul nu prin lumină, ci prin intermediul unora dintre cele mai elusive particule cunoscute – **neutrinii** – și să inaugureze, astfel, o nouă eră a astronomiei multimessenger.

Moștenirea IceCube – spre o nouă astronomie

IceCube a deschis calea către **o nouă formă de astronomie**, în care Universul poate fi explorat nu doar prin intermediul radiației electromagnetice, ci și prin detectarea neutrinelor de înaltă energie. Succesul observatorului de la Polul Sud a demonstrat potențialul extraordinar al acestei abordări și a stimulat dezvoltarea unei **rețele globale de detectoare de neutrini**.

În anii următori, IceCube va continua să colecteze date, beneficiind totodată de **extinderea și modernizarea infrastructurii sale în gheața antarctică**. În paralel, noi observatoare sunt dezvoltate în alte regiuni ale globului, unele dintre acestea utilizând **volumele imense de apă ale mărilor și oceanelor** drept mediu natural de detecție, după același principiu al înregistrării radiației Cherenkov.

Combinarea observațiilor realizate de detectoare amplasate în diferite regiuni ale planetei va permite **o acoperire mult mai completă a cerului și o monitorizare aproape continuă a surselor cosmice**, oferind posibilitatea studierii fenomenelor astrofizice extreme dintr-o perspectivă fundamental nouă.

Aceasta este, poate, **cea mai importantă moștenire a IceCube**: nu doar descoperirea neutrinelor astrofizici de înaltă energie, ci inaugurarea unei noi modalități de a observa Universul. IceCube își va continua misiunea, însă conceptul pe care l-a validat se extinde acum la scară globală, transformând **astronomia cu neutrini într-unul dintre pilonii astronomiei multimessenger a secolului XXI**.

Din gheața Antarcticii în apele Lacului Baikal – o rețea globală de „ochi” pentru neutrini

Succesul IceCube a demonstrat că natura însăși poate furniza mediul necesar construirii unor detectoare de neutrini de dimensiuni imposibil de realizat într-un laborator convențional. În cazul IceCube, acest mediu este **gheața extrem de pură și transparentă a Antarcticii**, în care mii de module optice au fost instalate la adâncimi cuprinse între aproximativ **1,45 și 2,45 kilometri**, rămânând apoi înghețate definitiv în calota polară. Așa cum am văzut, aceste module nu detectează neutrinii în mod direct, ci lumina Cherenkov produsă de

particulele încărcate electric generate în rarele interacțiuni ale neutrinelor cu materia. Distribuția spațială și temporală a acestei lumini permite reconstruirea traiectoriei particulei secundare și, implicit, estimarea direcției din care a sosit neutrino-ul.

Gheața antarctică prezintă avantaje excepționale pentru un asemenea experiment. La adâncimi mari este extraordinar de transparentă, mediul este practic lipsit de lumină ambientală, iar imensa masă naturală de gheață permite instrumentarea unui volum de ordinul **unui kilometru cub**, fără necesitatea construirii unui rezervor artificial. În plus, amplasarea detectorului în profunzime îl protejează de o mare parte a fondului de particule produs în atmosferă de razele cosmice. Pentru neutrinii care sosesc din direcția emisferei nordice, avantajul este și mai spectaculos: **Pământul însuși devine un filtru gigantic**. Neutrinii îl pot traversa datorită probabilității lor extrem de reduse de interacțiune, în timp ce particulele încărcate care ar putea imita semnalul sunt în mare măsură eliminate. Geometria acestui principiu este ilustrată și în schema detectorului IceCube prezentată anterior în articol, unde neutrino-ul traversează Pământul înainte de a ajunge la volumul instrumentat din gheața antarctică.

Dar gheața nu este singurul mediu natural care poate fi transformat într-un telescop pentru neutrini. La mii de kilometri distanță, în Siberia, **Baikal-GVD (Baikal Gigaton Volume Detector)** utilizează același principiu fundamental într-un mediu diferit: **apa dulce și profundă a Lacului Baikal**. În loc ca modulele optice să fie încorporate permanent într-o masă solidă de gheață, acestea sunt dispuse de-a lungul unor cabluri verticale ancorate pe fundul lacului și suspendate în apa lichidă. Volumul enorm și transparența apei transformă astfel unul dintre cele mai adânci lacuri ale planetei într-un observator de particule.

Cele două medii de detecție prezintă proprietăți optice diferite și, într-o anumită măsură, complementare. În gheața antarctică, fotonii Cherenkov pot suferi o împrăștiere mai pronunțată pe neomogenitățile microscopice ale gheții, ceea ce influențează reconstrucția exactă a direcției particulelor. Apa lichidă a Lacului Baikal prezintă, în general, o împrăștiere mai redusă a luminii, favorabilă unei **reconstrucții unghiulare precise** a anumitor tipuri de evenimente. Pe de altă parte, apa poate introduce propriul fond optic natural, inclusiv luminescență biologică și alte surse de lumină ambientală, pe care sistemele de analiză trebuie să le distingă de semnalele Cherenkov extrem de slabe.

Există însă și o complementaritate astronomică fundamentală. **IceCube, amplasat la Polul Sud, și Baikal-GVD, situat în emisfera nordică, privesc Universul din geometrii diferite**. Pentru că în astronomia neutrinelor este deosebit de avantajos să se caute particule care au traversat Pământul înainte de a ajunge la detector, cele două observatoare beneficiază de sensibilități complementare față de diferite regiuni ale cerului. Din poziția sa nordică, Baikal-GVD oferă un acces deosebit de important la **cerul sudic și la regiunea centrului Căii Lactee**, în timp ce IceCube dispune de condiții foarte favorabile pentru observarea neutrinelor proveniți din emisfera cerească nordică. Această complementaritate ilustrează direcția în care evoluează astăzi astronomia cu neutrini. Nu mai este vorba despre un singur detector, ci despre construirea unei **rețele globale de observatoare**, amplasate în gheață sau în volume naturale enorme de apă și capabile să studieze cerul din perspective diferite. Corelarea evenimentelor observate de IceCube, Baikal-GVD și alte telescoape de neutrini cu observațiile realizate în unde radio, lumină vizibilă, raze X, raze gamma sau cu detectoarele de unde gravitaționale transformă neutrinii într-o componentă esențială a **astronomiei multimessenger**. Universul nu mai este astfel „privit” exclusiv prin lumină: același fenomen cosmic poate fi investigat prin mai mulți mesageri fundamentali, fiecare aducând o informație diferită despre procesele fizice care au loc la sursă.

Post-scriptum – De la o particulă „imposibil de detectat” la astronomia cu neutrini

Povestea neutrinelor începe cu aproape un secol înainte de **IceCube**. În **1930**, fizicianul austriac **Wolfgang Pauli** a postulat existența unei particule subatomice neutre, extrem de dificil de detectat, pentru a explica aparenta încălcare a legilor de conservare a energiei, impulsului și momentului cinetic în dezintegrarea beta. Conștient de

dificultatea verificării experimentale a ipotezei sale, Pauli avea să remarcă, într-o formulare devenită celebră: „*Am făcut un lucru teribil: am postulat o particulă care nu poate fi detectată.*” Câteva ani mai târziu, **Enrico Fermi** a integrat această particulă în **teoria dezintegrării beta** și a consacrat denumirea de „**neutrino**”.

Ceea ce în 1930 părea aproape imposibil din punct de vedere experimental a devenit realitate în **1956**, când fizicienii americani **Clyde Cowan și Frederick Reines** au demonstrat existența neutrinului folosind fluxul intens de antineutrini electronici produs de reactorul nuclear de la **Savannah River**. Experimentul lor a reprezentat confirmarea directă a particulei postulate de Pauli cu mai bine de un sfert de secol înainte.

Importanța fundamentală a acestei realizări a fost recunoscută prin acordarea lui **Frederick Reines a Premiului Nobel pentru Fizică în 1995**, „pentru detectarea neutrinului”. Clyde Cowan, care contribuise în mod esențial la experiment, încetase din viață în 1974 și, conform regulilor Premiului Nobel, nu mai putea fi recompensat.

Există astfel o remarcabilă continuitate istorică: de la particula pe care **Pauli se temea că nu o vom putea detecta niciodată**, la demonstrarea existenței sale de către **Cowan și Reines**, iar apoi la transformarea neutrinului într-un **mesager cosmic** capabil să ne dezvăluie unele dintre cele mai energetice și îndepărtate fenomene ale Universului. În mai puțin de un secol, neutrino-ul a parcurs, simbolic, drumul de la o ipoteză formulată pentru a salva legile de conservare ale fizicii la fundamentul unei **noi forme de astronomie**.

Post-post-scriptum – Neutrino, Gretchen și „diavolul” Pauli

Istoria neutrino-ului conține și un episod savuros, aflat la granița dintre fizică, literatură și umor academic. În celebra sa carte de popularizare a științei ***Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*** („**30 de ani care au zguduit Fizica**”, 1966) [3], **George Gamow** evocă o parodie după *Faust* de Goethe, pusă în scenă în **aprilie 1932**, în cadrul tradiționalelor reuniuni ale marilor fizicieni de la Institutul de Fizică Teoretică din Copenhaga al lui **Niels Bohr**. Textul piesei avea să fie inclus ulterior în cartea lui **Gamow**. Distribuția era ea însăși o extraordinară caricatură a fizicii epocii. **Niels Bohr** apărea în rolul lui **Dumnezeu, Wolfgang Pauli** devenea **Mephistopheles**, alegere inspirată de spiritul său critic și de sarcasmul său proverbial, iar **Paul Ehrenfest**, permanent frământat de dificultățile conceptuale ale noii fizici, era **Faust**. Rolul lui **Gretchen**, personajul misterios și greu de atins, îi revenea însă unei protagoniste cu totul neobișnuite: **particula ipotetică propusă de Pauli**, viitorul **neutrino**. Intriga transpunea cu mult umor una dintre marile probleme ale fizicii începutului anilor 1930. **Faust–Ehrenfest** era confruntat cu aparenta încălcare a conservării energiei în dezintegrarea beta, iar **Mephisto–Pauli** îi oferea drept soluție existența unei particule neutre, invizibile și extrem de greu de detectat. **Neutrino–Gretchen** devenea astfel întruchiparea perfectă a caracterului evaziv al noii particule: exista, cel puțin în ipoteza lui Pauli, dar părea imposibil de „prins” experimental. Anecdota relatată de **Gamow** surprinde remarcabil atmosfera intelectuală a uneia dintre cele mai fertile perioade din istoria fizicii: ideile fundamentale se confruntau cu scepticismul, critica și îndoiala, dar și cu o extraordinară libertate intelectuală și cu mult umor. Privită din perspectiva prezentului, povestea dobândește o ironie istorică extraordinară. „**Gretchen**”, **particula aproape imposibil de prins în 1932**, **avea să fie detectată experimental în 1956**, iar **aproape un secol după ipoteza lui Pauli**, **aceleași particule evazive** aveau să devină mesageri prin care **putem observa cele mai violente fenomene ale Cosmosului**.

Cercul poveștii IceCube se poate închide astfel: „**fantoma**” cu care **Mephisto–Pauli** îi ispita pe fizicienii anilor **1930** a devenit, în secolul XXI, unul dintre cei mai prețioși mesageri ai Universului.

Bibliografie

- [1] Announcement of the 2026 Nobel Prize in Physics https://www.youtube.com/live/HTi0PU_yPvU
- [2] IceCube Collaboration (M. G. Aartsen et al.), *Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector*, *Science*, Vol. 342, Issue 6161, Article 1242856 (2013). DOI: 10.1126/science.1242856.
- [3] G. Gamow, ***30 de ani care au zguduit fizica. Istoria teoriei cuantice***, Editura Științifică, București, 1969.