

MONDI NELL'OMBRA

*Il Lato Oscuro del Sistema
Solare nel buio dei suoi confini*

Il "Lato Oscuro" del Sistema Solare

L'atomo non è come lo immagini

Il COSMo al Brasimone

Il telescopio che filmerà l'Universo

66

2025

PROPRIETÀ:

A.P.S. "Il C.O.S.Mo" (Circolo di Osservazione Scientifico-tecnologica di Modena)

C.F.:94144450361

RESPONSABILE:

Davide Borghi

REDAZIONE:

a cura del Consiglio Direttivo

SITO INTERNET:

www.ilcosmo.net

CONTATTI:

info@cosmo.net

COSTO:

Gratuito sul WEB

CONSIGLIO DIRETTIVO:

Leonardo Avella

Davide Borghi

Luigi Borghi

Roberto Castagnetti

Ciro Sacchetti

Questa rivista, le copie arretrate, i suoi articoli e le sue rubriche, non possono essere duplicati e commercializzati.

È vietata ogni forma di riproduzione, anche parziale, senza l'autorizzazione scritta del circolo "Il C.O.S.Mo".

La diffusione all'esterno del circolo è vietata.

Può essere utilizzata solo dai soci per scopi didattici.

SOMMARIO**IN QUESTO NUMERO:****ASTRONOMIA****Il "Lato Oscuro" del Sistema Solare**

Alla scoperta di fenomeni e incertezze che caratterizzano le zone più remote e meno esplorate del nostro Sistema Solare

di Luigi Borghi pag. [5](#)

FISICA**L'atomo non è come lo immagini**

Dalle orbite alle nuvole: il vero volto dell'atomo secondo la meccanica quantistica

di Roberto Castagnetti pag. [21](#)

TECNOLOGIA**Il COSMo al Brasimone**

Gita scientifica al Centro ENEA del Brasimone

di Davide Borghi pag. [37](#)

ASTRONOMIA**Il telescopio che filmerà l'universo**

Dal fotogramma al film: il Vera C. Rubin Observatory inaugura l'era dell'astronomia in time-lapse

di Roberto Castagnetti pag. [46](#)

GLI EVENTI DEL C.O.S.Mo

L'elenco dei prossimi eventi pag. [52](#)

IN COPERTINA

Rappresentazione artistica di Planet Nine. Credit: Caltech/R. Hurt (IPAC)





Il lato oscuro

Siamo giunti al numero 66 in cui desidero evidenziare il racconto della nostra visita scientifica di Luglio al **Centro ENEA del Brasimone**, un appuntamento che si è rivelato di grande successo e interesse.

In questo numero trovano spazio anche il **"lato oscuro" del Sistema Solare** – tema di copertina, dedicato alla stabilità del nostro sistema planetario e alle visite di corpi erranti provenienti dall'esterno, come 3I/ATLAS di cui parlo in questo editoriale – lo straordinario **Osservatorio Vera C. Rubin**, che sta iniziando a "scaldare i motori" per la sua incredibile ed innovativa missione scientifica, ed un ricco approfondimento sull'atomo: **"L'atomo non è come lo immagini"**.

Di questi ultimi tre mesi voglio soffermarmi solo su alcuni fatti, tutti in ambito astronautico o astronomico e legati a temi trattati negli articoli di questo numero e nelle nostre prossime conferenze.

A 97 anni, ci ha lasciato **Jim Lovell**, quattro volte nello spazio, con Gemini VII e XII, Apollo VIII e XIII e due volte attorno alla Luna. Nella sua ultima missione, con resilienza, sangue freddo e professionalità, è stato capace di trasformare una sconfitta quasi certa in un sorprendente successo (*"un fallimento di grande successo"*). Un pilota collaudatore, poi astronauta, due volte in missioni lunari, pur non essendo mai riuscito a mettere piede sulla Luna, è stato ammirato anche dagli altri astronauti del programma Apollo fra cui ad esempio il grande Buzz Aldrin (Apollo XI) che sul suolo lunare ci ha camminato, di cui era non solo ex-collega ma anche grande amico.

Passiamo alla NASA di oggi, parecchio ridimensionata, ormai da decenni, rispetto a quella di oltre mezzo secolo fa. Il nuovo amministratore in carica della NASA **Sean Duffy** (dopo che Trump ha ritirato la nomina dell'astronauta Jared Isaacman amico di Musk) intende portare uno o più **piccoli reattori nucleari sulla Luna** entro il 2030. Si tratta di uno step essenziale per una base permanente sul nostro satellite naturale, e in questo non è una novità, ma la mossa è dettata anche da motivi strategici che hanno a che fare con la competizione coi cinesi per tornare sulla Luna.

La proprietà di territori extraterrestri infatti è proibita, secondo il Trattato ONU sullo Spazio Extra-Atmosferico, che, però, obbliga anche a esercitare la "dovuta considerazione" nelle attività: non invadere o interferire con infrastrutture sensibili costruite da altri. Un reattore nucleare posizionato sulla Luna, quindi, potrebbe consentire la dichiarazione di quella che la direttiva Duffy definisce una "zona di divieto di accesso" (**"keep-out zone"**).

Potrebbe essere una buona notizia per il ritorno sulla Luna, stavolta per restarci, se non fosse che le ultime mosse della Casa Bianca tendono a tagliare i fondi alla NASA in modo considerevole: speriamo quindi che siano confermate le missioni Artemis II (*rendez-vous* umano della Luna) per il 2026 e Artemis III (sbarco umano al Polo Sud lunare) per il 2027.

Visti i tagli, non credo sarà così semplice, ma vediamo.

Passiamo alle notizie astronomiche che mi hanno colpito.

Hubble Space Telescope (HST) – a cui dedicheremo una conferenza in ottobre – ha ancora molto da offrire: di recente ha osservato nel dettaglio l'oggetto 3I/ATLAS, il terzo corpo noto proveniente dall'esterno del Sistema Solare, che presto ci saluterà a causa della sua altissima velocità. 3I/ATLAS non è un oggetto qualsiasi: non solo perché appartiene al ristretto *club* dei corpi extra Sistema Solare che ci visitano, ma anche perché per qualche giorno alcuni scienziati hanno ipotizzato la lontana possibilità che fosse di origine artificiale. In prima fila c'era Avi Loeb: astronomo (direttore e fondatore di Black Hole Initiative di Harvard University e direttore dell'*Institute for Theory and Computation* del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics - quindi



non l'ultimo arrivato). Le osservazioni di HST hanno, però, confermato senza dubbio la sua natura cometaria, evidenziata dall'inconfondibile coda. Dovremo attendere ancora (forse per sempre?) prima di trovare un oggetto extra solare di origine artificiale... Cosa ne pensate?

Passo all'ultima notizia astronomica, che ci riguarda abbastanza da vicino: l'asteroide 2024 YR4. Forse lo ricorderete, non molto tempo fa aveva raggiunto un 3.1% di possibilità di impatto con la Terra il **22 Dicembre 2032** (sempre a proposito del lato scuro del Sistema Solare...). In realtà non ci colpirà, ma la probabilità che invece colpisca la Luna, è in aumento, e oggi è stimata al 4.3%. Un eventuale impatto sarebbe uno spettacolo notevole visto dalla Terra, ma potrebbe rappresentare un rischio per i satelliti in orbita, poiché l'oggetto – circa 60 metri di diametro – creerebbe un cratere di un chilometro, mandando nello spazio una grande quantità di materiale lunare...

Passiamo ora agli eventi della nostra associazione:

Dopo il successo della visita ai laboratori ENEA del Brasimone lo scorso 4 luglio (eravamo in 26 – leggete l'articolo in questo numero), **sabato 6 settembre** è in programma la gita, già annunciata, ai **Laboratori INFN di Legnaro** (Padova). Le iscrizioni sono ancora aperte: se siete interessati, fatemelo sapere il prima possibile, poiché i nominativi vanno comunicati in anticipo.

Sempre a **settembre** avvieremo una collaborazione con la **web-radio Radioattiva** di Nonantola (<https://www.radioattivanonantola.it> – scaricate l'app!), per fornire contenuti scientifici, astronomici e astronautici sotto forma di brevi clip su argomenti mirati di interesse pubblico, oltre a brevi letture degli anniversari del giorno legati a questi ambiti.

A **ottobre** proporrò il nostro consueto ciclo di quattro conferenze **"Un altro equinozio con Il COSMo"**, ogni martedì sera alle 21:00 al Planetario.

Si parte il **7 ottobre** con un tema molto attuale e purtroppo poco discusso: **Nexus – Verità, potere e intelligenza artificiale**. Prendendo spunto dall'omonimo libro di Noah Harari (Nexus) rifletteremo su come, in un mondo sempre più dominato da algoritmi e intelligenze artificiali, quali implicazioni ci saranno sulla verità, il potere e il futuro dell'umanità.

Si prosegue il **14 ottobre** con **Hubble Space Telescope**, che è stato ed è ancora senza dubbio il nostro sguardo verso l'Universo (vedi ad esempio notizia sopra riportata sull'oggetto 3I/ATLAS).

Ma Hubble è stato superato in tecnologia e prestazioni da diversi telescopi più moderni e mirati come scopo, come ad esempio il James Webb a cui abbiamo già dedicato una conferenza e diversi articoli. Ma anche da telescopi terrestri, come il **Vera C. Rubin Observatory**, a cui è dedicata infatti la nostra terza conferenza il **21 Ottobre** (oltre che da un articolo in questo numero). Il Vera Rubin, per la prima volta nella storia, non si limiterà a fotografare l'universo: lo filmerà.

Chiudiamo il ciclo di conferenze il **28 ottobre** con **"100Km al secondo: andiamo su Marte in 45 giorni"**. La propulsione nucleare, infatti, promette di ridurre i tempi a sole sei o sette settimane. Un cambio di paradigma per l'esplorazione spaziale, tra scienza, sfide e visione.

Nello stesso mese, l'**11 ottobre** saremo alla Sala Lettura di Baggiovara a presentare il tema **"Dinosauri, l'estinzione e il meteorite dello Yucatan"** a studenti delle scuole elementari mentre qualche giorno prima, il 5 Ottobre, parleremo nello stesso luogo ad un pubblico più adulto del **James Webb Space Telescope** (appunto...)

Il sabato precedente (perdonatemi sto andando a ritroso), si terrà invece un grande evento di respiro nazionale, organizzato insieme a CICAP, CESDA e GAGBA. Il **4 Ottobre al Planetario di Modena**, terremo infatti l'evento: **"Verso la Luna e oltre: tra esplorazione e immaginazione"**. La serata si svolgerà in occasione

dell'evento NASA internazionale "**Observe The Moon**" (<https://moon.nasa.gov/observe-the-moon-night/>). In questa conferenza cercheremo di ripercorrere i punti principali dell'esplorazione lunare, che rimarrà nella storia, toccando gli aspetti tecnici, umani e culturali. Ci sarà quindi occasione di partecipare alla conferenza ma anche di vedere il planetario in cupola nonché di osservare il cielo, Luna compresa ovviamente. L'ingresso è gratuito, ma i posti sono limitati: per partecipare è necessario prenotarsi sul sito <https://www.planetariodimodena.it/>

Il **2 Ottobre** e il **5 Novembre** terremo due conferenze su "**La comunicazione: dalla stampa a Marconi ed ai social su internet**" per il *sagrato degli artigiani* e per l'associazione *l'Incontro*. E, sempre per il *sagrato degli artigiani*, l'evento "**Il Sole: fonte di vita, di morte e di energia**" il **20 Novembre**.

Ultima ma non per importanza, la **Cena Sociale Giovedì 27 Novembre**, come le ultime volte all'**Agriturismo Ai Gelsi** in Via Canalazzo 129, a Ganaceto (la strada di fronte all'Esselunga di Soliera - Appalto).

Ultimissima cosa: sembra un po' prestino, ma stiamo già tentando di organizzare una gita scientifica nei paesi baschi spagnoli in occasione dell'**eclissi totale** del **12 Agosto 2026**. In realtà sembra sia già tardi per trovare un posto letto nella fascia di totalità, ma vediamo...

A presto!

Il Presidente

Davide Borghi

davide.borghi@ilcosmo.net



Jim Lovell durante la missione Gemini XII (preparatoria alle missioni Apollo) e dopo l'ammarraggio, avvenuto il 15 novembre 1966, a bordo della portaerei USS Wasp, a conclusione della missione di 4 giorni. [Credits: Italy Photo Press]

Il “Lato Oscuro” del Sistema Solare

Alla scoperta di fenomeni e incertezze che caratterizzano le zone più remote e meno esplorate del nostro Sistema Solare

di Luigi Borghi



La “Forza” di Star Wars non c’entra nulla!

Per “lato oscuro” non intendo quella forza del mitico Darth Vader e neanche un luogo fisico del sistema solare, quanto una serie di fenomeni e incertezze che caratterizzano le zone più remote e meno esplorate del nostro vicinato cosmico. Scenari potenziali che potrebbero influenzare la stabilità del sistema nel tempo.

Il Sistema Solare è un insieme dinamico: è cambiato nel passato, cambia oggi, e cambierà nel futuro. Non solo! Il suo sviluppo progredisce in un ambiente, la Via Lattea, in cui si muovono circa 200 miliardi di stelle da quasi 13 miliardi di anni con tutte le loro storie, i loro pianeti, le loro collisioni, le loro vite e le loro morti.

Pertanto, andiamo con ordine e cerchiamo di sviluppare l’analisi raggruppando fenomeni in capitoli distinti.

1. INSTABILITÀ DEL SISTEMA SOLARE

Per capire meglio questo aspetto dobbiamo partire dal tempo di Lyapunov (o Ljapunov).

È un concetto fondamentale nella **Teoria del Caos** e serve a quantificare la **predicibilità** di un sistema dinamico.

Indica il tempo oltre il quale un sistema diventa caotico e quindi imprevedibile. In altre parole, è il limite di tempo oltre il quale le previsioni su quel sistema diventano inaffidabili.

Nel contesto del sistema solare, indica quanto a lun-

go possiamo prevedere con precisione le orbite dei pianeti prima che piccole incertezze nelle condizioni iniziali (anche infinitesimali) vengano amplificate esponenzialmente, rendendo le previsioni inaffidabili.

Che cos'è esattamente il Tempo di Lyapunov?

Immaginiamo di avere due scenari identici per il sistema solare, con un'unica, minuscola differenza nella posizione di un pianeta, magari un millimetro.

Il tempo di Lyapunov è il tempo necessario affinché questa piccola differenza iniziale si amplifichi di un fattore pari ad e (il numero di Nepero, circa 2,71828).

Dopo ogni "tempo di Lyapunov", l'incertezza sulla posizione del pianeta si moltiplica per e . Questo significa che anche un errore quasi impercettibile può portare a una divergenza enorme nelle traiettorie future, rendendo impossibile prevedere con precisione dove si troverà un pianeta dopo un certo periodo.

Il Tempo di Lyapunov nel Sistema Solare

Per il sistema solare nel suo complesso, il tempo di Lyapunov è stimato in un intervallo di **5-10 milioni di anni** o, in alcune stime più ampie, **tra 2 e 230 milioni di anni**. Questo numero varia a seconda del pianeta e del modello utilizzato per le simulazioni.

Alcuni esempi specifici:

- **Mercurio e Marte** sono considerati i pianeti le cui orbite sono più "caotiche" e imprevedibili a lungo termine, con tempi di Lyapunov più brevi. Mercurio è il pianeta più vulnerabile all'instabilità. Le simulazioni mostrano una piccola, ma non nulla, probabilità (circa l'1%) che nei prossimi 5 miliardi di anni la sua eccentricità orbitale aumenti a tal punto da farlo collidere con Venere, cadere nel Sole, o addirittura essere espulso dal sistema solare.
- L'orbita di **Plutone** ha un tempo di Lyapunov di circa 10-20 milioni di anni, il che significa che oltre questo periodo, la sua posizione precisa diventa impraticabile da prevedere, anche se

l'orbita di Plutone è "protetta" da una risonanza con Nettuno su scale temporali più brevi.

- Per la **Terra**, le previsioni accurate si estendono per circa 100 milioni di anni

Cosa Implica il Tempo di Lyapunov per la Stabilità del Sistema Solare?

Il fatto che il sistema solare abbia un tempo di Lyapunov relativamente breve non significa che i pianeti stiano per scontrarsi o essere espulsi domani. Indica solo che le previsioni a lungo termine, su scale di miliardi di anni, sono intrinsecamente limitate a causa della natura caotica del sistema.

Paradossalmente, nonostante un tempo di Lyapunov "breve" che evidenzia la sensibilità alle condizioni iniziali, il sistema solare mostra una **notevole stabilità dinamica su scale temporali molto più lunghe**, spesso miliardi di anni.

Questo perché le perturbazioni caotiche avvengono entro certi "confini" imposti dalle leggi fisiche e dalle masse dei pianeti. Le orbite possono variare (in termini di eccentricità e inclinazione), ma rimangono generalmente stabili e non portano a collisioni o espulsioni nel breve o medio periodo.

In sintesi, il tempo di Lyapunov è uno strumento cruciale per capire i limiti della nostra capacità di prevedere il futuro delle orbite planetarie, rivelando la natura complessa e dinamica del nostro sistema cosmico.

Tenuto conto di questa imprevedibilità determinata dal tempo di Lyapunov, sono stati progettati dei modelli per capire l'evoluzione del nostro sistema solare, dalla sua formazione fino ai giorni nostri e oltre.

Il modello ad oggi condiviso dalla comunità scientifica è il **Nice Model** (Modello di Nizza, dal nome della città francese dove è stato sviluppato).

È un modello dinamico che simula l'evoluzione del nostro Sistema nelle sue fasi iniziali, proponendo un'interpretazione innovativa di come i pianeti giganti (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) abbiano raggiunto le loro attuali posizioni.

In sintesi, il Nice Model afferma che:

- ✓ **Configurazione iniziale più compatta:** Inizialmente, i quattro pianeti giganti non si trovavano nelle orbite attuali, ma erano posizionati in una configurazione più compatta e vicina al Sole, con orbite più circolari e risonanti. Ad esempio, una versione del modello suggerisce che Giove e Saturno fossero inizialmente in una risonanza 3:2 (il che significa che per ogni tre orbite di Giove, Saturno ne compiva due), mentre Urano e Nettuno potevano essere in altre risonanze.
- ✓ **Disco di planetesimali esterno:** Oltre l'orbita di Nettuno, esisteva un vasto e massiccio disco di planetesimali ghiacciati (corpi minori, simili a comete e asteroidi). Questo disco era molto più denso e massiccio dell'attuale Fascia di Kuiper.
- ✓ **Migrazione planetaria lenta e graduale:** Le interazioni gravitazionali tra i pianeti giganti e questo disco di planetesimali hanno causato una lenta e graduale migrazione dei pianeti.
- ✓ **Urano e Nettuno** sono stati "spinti" verso l'esterno, scambiando momento angolare con i planetesimali che venivano dispersi verso l'interno.
- ✓ **Saturno** è stato anch'esso spinto verso l'esterno.
- ✓ **Giove**, essendo il pianeta più massiccio, ha "lanciato" la maggior parte dei planetesimali verso l'esterno del sistema solare o addirittura al di fuori, e per reazione si è mosso leggermente verso l'interno. Poi si è di nuovo lanciato verso l'esterno (figura 1.1.).

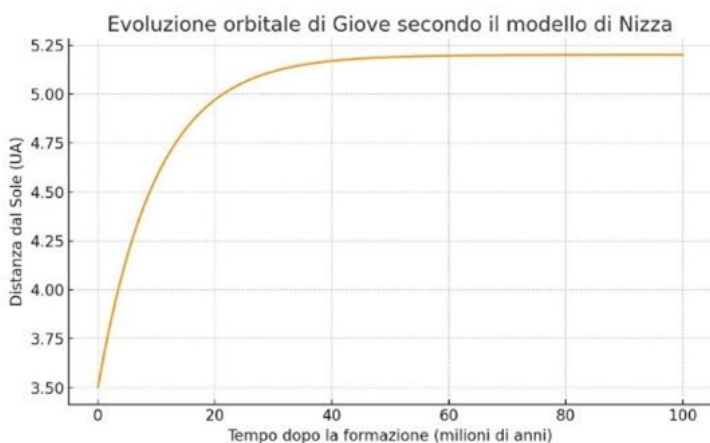


Figura 1.1 Evoluzione di Giove nel tempo

Instabilità dinamica e "Grande Saltellamento" (Grand Tack/Jump)

Dopo diverse centinaia di milioni di anni di questa lenta migrazione, le interazioni gravitazionali tra i pianeti giganti hanno raggiunto un punto critico.

Si ritiene che Giove e Saturno abbiano attraversato una risonanza 1:2 (per ogni orbita di Saturno, Giove ne compiva due). Questo evento ha destabilizzato l'intero sistema planetario, causando:

- ✓ Un aumento improvviso delle eccentricità e delle inclinazioni orbitali dei pianeti giganti.
- ✓ Interazioni gravitazionali "caotiche" tra i pianeti, che hanno portato alla loro rapida riorganizzazione nelle posizioni attuali. In alcuni scenari, Urano e Nettuno potrebbero anche aver scambiato posto durante questa fase.
- ✓ La dispersione della maggior parte del disco di planetesimali

La figura 1.2. combina gli scenari di Walsh et al. 2011 e Batygin & Laughlin 2015.

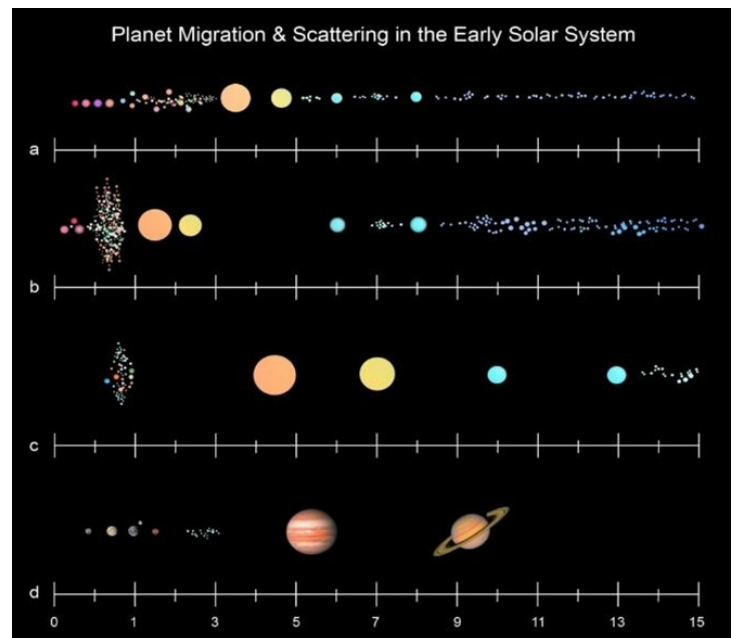


Figura 1.2 Mappa storica dei transiti di Giove.
Fonte: Black Alley Astronomer

Scenario a) mostra l'inizio del Grand Tack a un'età del sistema di circa 1-2 milioni di anni. La nebulosa gassosa è ancora presente e l'accrescimento è progredito in tutto il sistema, con diversi pianeti di pic-

cola massa già formati sulle orbite interne e due giganti gassosi in crescita nella "regione innevata" oltre 3 UA dove l'acqua congela. (Nota: BL15 colloca il punto di partenza di Giove a 6 UA.).

Scenario b) mostra la massima incursione dei due giganti gassosi nel sistema interno, dove disperdono pianeti e planetesimi mentre stabiliscono una risonanza orbitale. Alcuni dei pianeti di piccola massa originali sono già stati inghiottiti dal Sole. Nel sistema esterno, due o più pianeti di piccola massa aggiuntivi stanno crescendo all'interno di una massiccia cintura di planetesimi.

Scenario c) mostra il ritiro del proto-Giove e del proto-Saturno mentre le loro orbite risonanti li riportano nella regione nevosa, proprio mentre la nebulosa gassosa inizia a dissiparsi. Nel frattempo, i planetesimi dispersi verso l'interno dal proto-Giove hanno già ammassato tutti i pianeti originali di piccola massa verso il Sole, lasciando un anello di planetesimi e detriti in collisione vicino all'attuale orbita terrestre.

Scenario d) mostra la configurazione stabile finale del Sistema Solare a un'età di circa 1 miliardo di anni. L'assemblaggio collisionale dei quattro pianeti terrestri ha disperso detriti residui in una "**orbita spazzatura**" oltre Marte, creando l'ancestrale Fascia degli Asteroidi, mentre la migrazione verso l'esterno di Saturno ha spinto Urano e Nettuno su orbite ampie, al di fuori della scala di questo diagramma.

Implicazioni e successi del Nice Model

Il Nice Model è ampiamente accettato perché spiega in modo efficace molte delle caratteristiche osservate del Sistema Solare che i modelli precedenti non riuscivano a giustificare, tra cui:

Il Grande Bombardamento Tardivo (Late Heavy Bombardment - LHB)

L'instabilità dinamica proposta dal modello avrebbe causato una massiccia ondata di corpi celesti (planetesimali) diretti verso il sistema solare interno, spiegando l'intenso bombardamento di Luna, Mercurio, Venere e Marte avvenuto circa 3,8-4 miliardi di anni fa (ben dopo la formazione iniziale dei

pianeti).

Circa 4 miliardi di anni fa, il nostro giovane sistema solare interno subì un'esplosione catastrofica da parte di asteroidi che scavarono enormi bacini nella Luna terrestre. Questa è la **teoria dell'Intenso Bombardamento Tardivo**, che postula che un improvviso cambiamento nelle orbite dei pianeti giganti, Giove, Saturno, Urano e Nettuno, gettò nel caos la fascia degli asteroidi e fece sì che i resti della formazione del sistema solare si schiantassero contro i pianeti interni. (vedi figura 1.3.)



Figura 1.3 In questa illustrazione del bombardamento pesante tardivo, i meteoriti bombardano un paesaggio fuso.

Laboratorio di immagini concettuali del Goddard Space Flight Center della NASA

Autore: Tracy Vogel; Consulenti scientifici: Daniel P. Moriarty (Università del Maryland a College Park), Natalie M. Curran (Goddard Space Flight Center della NASA)

Tra le prove di questo periodo, che si pensa sia durato tra i 20 e i 200 milioni di anni, ci sono le superfici sfregiate della Luna, di Mercurio e di Venere, la distribuzione degli asteroidi nella fascia degli asteroidi e le date di fusione da impatto **nelle rocce lunari rilevate dalle missioni Apollo**.

Quando gli astronauti hanno visitato la Luna, hanno riportato campioni di roccia contenenti fusione da impatto, un tipo di roccia che si forma solo quando il materiale si fonde istantaneamente dopo essere stato colpito da un impatto.

Gli scienziati hanno scoperto che molti dei campioni, pur provenendo da diverse località sul lato visibile della Luna, avevano età simili di circa quattro miliardi di anni, con pochissimi campioni che mostravano impatti più antichi. Questo potenzialmente in-

dicava un periodo di collisioni più intense e drammatiche nel sistema solare.

La Fascia di Kuiper e la Nube di Oort

La dispersione del disco di planetesimali da parte dei giganti ghiacciati avrebbe formato la Fascia di Kuiper (con la sua struttura attuale e le sue popolazioni di oggetti) e la Nube di Oort (un serbatoio di comete a lunghissimo periodo).

Le Popolazioni di Asteroidi

Il modello spiega la presenza di asteroidi troiani di Giove e Nettuno e la distribuzione di alcuni tipi di asteroidi nella fascia principale.

Le Lune Irregolari dei Giganti Gassosi

L'instabilità avrebbe fornito il meccanismo per la cattura di molti satelliti irregolari da parte dei giganti gassosi.

Versioni e sviluppi del Nice Model

Esistono diverse "versioni" o affinamenti del Nice Model (es. il "Nice 2 model" o il "Grand Tack model"), che tentano di risolvere alcune delle sfide o delle incertezze del modello originale.

Ad esempio, il "Grand Tack" si concentra specificamente sulla migrazione di Giove, suggerendo che si sia mosso significativamente verso l'interno prima di "fare un tack" (cambiare rotta) e migrare di nuovo verso l'esterno (figura 1.1.), influenzando la formazione della fascia degli asteroidi e la composizione dei pianeti terrestri

In sintesi, il Nice Model ha rivoluzionato la nostra comprensione dell'evoluzione del Sistema Solare, trasformando l'idea di un sistema statico in una visione dinamica e caotica delle sue fasi iniziali.

Molti di voi lettori avranno anche sentito spesso parlare della ipotetica stella compagna del Sole, la mitica NEMESIS.

E dal momento che parliamo di instabilità del sistema solare, viene spontaneo pensare che possa essere LEI una fonte determinante di disturbo periodico.

Quindi ne devo parlare anche se ormai l'idea è rimasta confinata solo nella fantasia e non più

nella scienza.

L'ipotetica stella è una teoria che ha affascinato e dibattuto la comunità scientifica per decenni, ma è importante sottolineare che **attualmente non ci sono prove concrete della sua esistenza**, e la teoria è ampiamente considerata **debunkata** o **estremamente improbabile** dalla maggior parte degli astronomi.

Ecco cosa si sa e perché è stata proposta.

Origine della Teoria di Nemesis

La teoria di Nemesis fu proposta per la prima volta nel **1984** dagli astronomi **Richard A. Muller, Marc Davis e Piet Hut**.

L'idea nacque per spiegare una **"percepita" periodicità negli eventi di estinzione di massa sulla Terra**. Alcuni studi paleontologici suggerivano che le estinzioni di massa si verificassero approssimativamente ogni 26-27 milioni di anni.

Per spiegare questa periodicità, Muller e i suoi colleghi ipotizzarono l'esistenza di una compagna stellare del nostro Sole, una stella così piccola, debole e distante da essere ancora non scoperta.

Caratteristiche Ipotetiche di Nemesis

- **Tipo di stella:** Si pensava che Nemesis potesse essere una nana rossa (il tipo di stella più comune e più debole) o una nana bruna (un "fallimento stellare" che non ha massa sufficiente per sostenere la fusione nucleare al suo interno). Entrambe queste tipologie di stelle sono estremamente deboli e difficili da rilevare a grandi distanze.
- **Orbita:** Si ipotizzava che Nemesis orbitasse attorno al Sole su una traiettoria molto ellittica e distante, con una distanza media stimata tra 25.000 e 150.000 Unità Astronomiche (UA), cioè oltre 2 anni luce, ovvero appena oltre la Nube di Oort, e con un periodo orbitale di circa **26-27 milioni di anni**.
- **Meccanismo delle estinzioni:** L'idea era che, durante il suo passaggio più vicino al Sole (il perielio della sua orbita), la gravità di Nemesis avrebbe perturbato la **Nube di Oort** (un vasto

serbatoio di comete ai confini del Sistema Solare). Questo avrebbe inviato una "pioggia" di comete verso il Sistema Solare interno, aumentando drasticamente la probabilità di impatti con la Terra e, di conseguenza, causando estinzioni di massa.

Perché la Teoria è stata Largamente Smentita (o considerata improbabile)

- **Mancanza di prove osservative:** Nonostante decenni di ricerche e l'avvento di telescopi sempre più potenti e sensibili (come il Wide-field Infrared Survey Explorer - WISE della NASA), **non è stata trovata alcuna stella con le caratteristiche previste per Nemesis**. Se una stella così vicina e con le caratteristiche proposte esistesse, sarebbe stata quasi certamente rilevata dai moderni survey astronomici.
- **Instabilità Orbitale:** Un'orbita così distante ed eccentrica, come quella proposta per Nemesis, sarebbe intrinsecamente **instabile** su scale temporali astronomiche. Interazioni gravitazionali con stelle di passaggio nella galassia avrebbero molto probabilmente espulso Nemesis dal Sistema Solare miliardi di anni fa, o alterato la sua orbita in modo significativo. Non sarebbe stata in grado di mantenere una periodicità così precisa per così tanto tempo.
- **Periodicità delle estinzioni:** Le evidenze della periodicità delle estinzioni di massa sono diventate **meno convincenti** con l'aumento dei dati geologici e paleontologici.
La periodicità precedentemente osservata potrebbe essere stata il risultato di *bias* di campionamento o di analisi statistica.

Stato Attuale

Oggi, la teoria di Nemesis è in gran parte relegata al campo delle curiosità scientifiche e delle ipotesi non supportate. La maggior parte degli astronomi ritiene che il Sole sia una stella singola, o che, se avesse avuto una compagna alla sua nascita, questa si sarebbe allontanata molto tempo fa.

È importante distinguere Nemesis dal concetto di "Pianeta Nove"

Mentre il Pianeta Nove è un'ipotesi attuale basata su anomalie orbitali di oggetti trans-nettuniani e su solide simulazioni dinamiche (anche se ancora da confermare con un'osservazione diretta), Nemesis era un'ipotesi basata su una periodicità di eventi terrestri che non ha retto all'esame approfondito e alla mancanza di dati osservativi.

Detto questo, l'idea che il Sole possa aver avuto una compagna alla sua nascita (una "sorella" che poi si è allontanata) è un concetto astrofisico separato, supportato dal fatto che molte stelle nascono in sistemi binari o multipli. Ma questa "sorella" primordiale non sarebbe la "Nemesis" responsabile delle estinzioni di massa periodiche.

Nonostante il tempo **Lyapunov** per il sistema solare sia compreso tra 2 e 230 milioni di anni, una cosa la possiamo comunque affermare fin d'ora: tra circa cinque miliardi di anni, il Sole diventerà una gigante rossa e inizierà a perdere massa.

Questa perdita di massa farà espandere le orbite dei pianeti. Ciononostante, Mercurio e Venere potrebbero essere inglobati, mentre la Terra probabilmente no, ma sarà inabitabile.

I pianeti esterni, come Giove e Saturno, continueranno la loro rivoluzione su orbite ancora più ampie.

Quindi se il caos orbitale o la nostra incapacità di vivere in pace non provvederanno prima (come penso) a mettere la parola fine alla vita sulla Terra, di certo ci penserà il Sole quando diventerà una stella morente.

2. IL PIANETA NOVE

Konstantin Batygin e Michael Brown del Caltech (California Institute of Technology) hanno avanzato l'ipotesi dell'esistenza del "Pianeta Nove" (o "Planet Nine") non osservandolo direttamente, ma basandosi su **evidenze indirette legate al raggruppamento anomalo delle orbite di diversi oggetti trans-nettuniani estremi (ETNOs)**.

Ecco come hanno proceduto:

a) L'osservazione delle anomalie orbitali

Hanno notato che un certo numero di oggetti nella Fascia di Kuiper più esterna (distanti oltre l'orbita di

Nettuno), in particolare gli ETNOs con orbite molto allungate e distanti, mostravano un allineamento inspiegabile delle loro orbite. Questi oggetti non solo avevano un perielio (il punto più vicino al Sole) raggruppato in una particolare regione dello spazio, ma anche le loro inclinazioni orbitali (rispetto al piano del Sistema Solare) e gli argomenti del perielio (la direzione dell'orbita) sembravano essere correlati. (figura 2.2.)

La probabilità che un tale raggruppamento fosse casuale era estremamente bassa (stimata in meno dello 0,007%).

b) L'esclusione di altre spiegazioni

Batygin e Brown hanno considerato varie ipotesi per spiegare questo raggruppamento, come gli effetti di selezione osservativa (ossia, se si osservano solo determinate regioni del cielo in determinati momenti, si potrebbe creare un'illusione di raggruppamento). Hanno però dimostrato che queste distorsioni non erano sufficienti a spiegare il pattern osservato.

c) Le simulazioni numeriche

Hanno quindi eseguito complesse simulazioni numeriche del Sistema Solare esterno, introducendo un ipotetico pianeta massiccio. Hanno scoperto che l'aggiunta di un pianeta con determinate caratteristiche (massa, orbita eccentrica e inclinata) era in grado di "guidare" gravitazionalmente le orbite degli ETNOs osservati, facendole raggruppare proprio nel modo in cui erano state rilevate.

Il modello più efficace prevedeva un nono pianeta con queste caratteristiche:

- **Una massa** compresa tra 5 e 10 volte quella della Terra (simil-Super Terra).
- **Un'orbita** molto eccentrica e inclinata rispetto al piano dell'eclittica (il piano in cui orbitano la maggior parte dei pianeti).
- **Un periodo orbitale** estremamente lungo, fino a 10.000-20.000 anni.
- **Una distanza media dal Sole** molto grande, tra 500 e 700 Unità Astronomiche (UA), ma con un perielio più vicino (circa 200 UA) e un afelio (il punto più lontano) molto distante (fino a 1200

UA). Vedi Figura 2.1

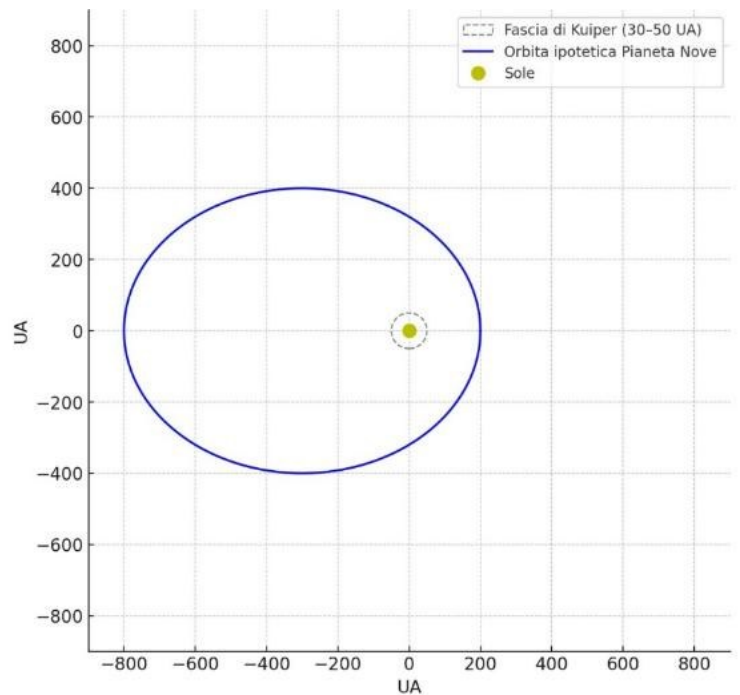


Figura 2.1 Orbita ipotetica del Pianeta Nove

Analogia storica

Batygin e Brown hanno richiamato l'analogia con la scoperta di **Nettuno**.

Infatti, Nettuno è stato matematicamente individuato prima di essere direttamente osservato.

L'astronomo francese Urbain Le Verrier lo individuò matematicamente.

John Herschel scoprì Nettuno quasi allo stesso modo in cui suo padre, William Herschel, aveva scoperto Urano, nel 1781, cioè con un'osservazione casuale, ma quella volta non lo riconobbe come un pianeta e lo scambiò per una stella.

Ma il 23 settembre 1846, all'osservatorio di Berlino l'astronomo Johann Gottfried Galle finalmente lo vide! Esattamente dove Le Verrier lo aveva previsto! Fu un momento straordinario per la scienza del XIX secolo e rappresentò la spettacolare conferma della teoria gravitazionale newtoniana.

Batygin e Brown hanno applicato un ragionamento simile: le "anomalie" sono le orbite raggruppate degli ETNOs, e la causa ipotizzata è il Pianeta Nove. (figura 2.2.)

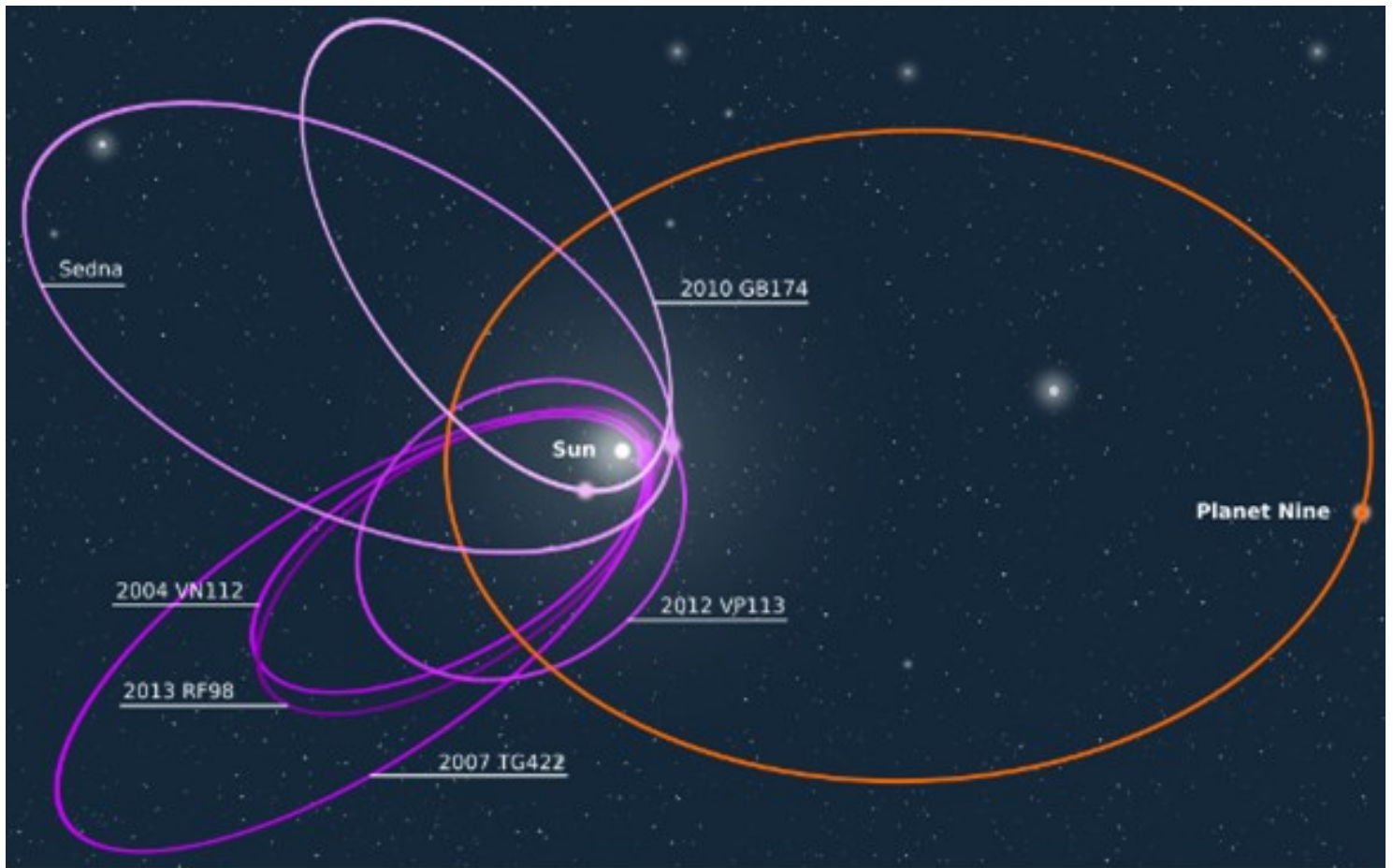


Figura 2.2 Orbite degli ETNOs e ipotesi di orbita del Pianeta Nove. Vedi simulazione [qui](#)

In sintesi, la loro ipotesi si basa su una combinazione di:

- **Dati osservativi:** Le orbite allineate di diversi oggetti trans-nettuniani estremi.
- **Analisi statistica:** La bassissima probabilità che tale allineamento sia casuale.
- **Modellazione dinamica** (simulazioni): La dimostrazione che l'introduzione di un pianeta con specifiche caratteristiche può spiegare naturalmente le anomalie osservate

Sebbene questa sia un'evidenza forte e ampiamente dibattuta nella comunità scientifica, la prova definitiva dell'esistenza del Pianeta Nove arriverà solo con la sua osservazione diretta attraverso telescopi potenti, una sfida notevole data la sua presunta distanza e debolezza.

Grandi osservatori come il nuovo Vera C. Rubin Observatory in Cile sono tra i candidati più promettenti per questa ricerca.

Uno studio recentissimo (2025) della Rice University e del Planetary Science Institute, pubblicato su *Nature Astronomy*, propone un meccanismo per spiegare come si formano i pianeti con orbite molto estese, come l'ipotetico Pianeta Nove del Sistema Solare. Attraverso complesse simulazioni, i ricercatori hanno mostrato che questi pianeti possono formarsi naturalmente durante le fasi iniziali caotiche dei sistemi planetari: interazioni gravitazionali tra pianeti giganti possono scagliarli lontano dalla loro stella, dove rimangono stabilizzati dall'influenza gravitazionale di altre stelle vicine nell'ammasso stellare originario.

Il modello suggerisce poi che il Pianeta Nove, se esiste, potrebbe essersi formato proprio così, con una probabilità fino al 40% che sia rimasto intrappolato in un'orbita ampia dopo le fasi di instabilità primordiali del Sistema Solare.

La ricerca confronta anche questi pianeti in orbita larga con i cosiddetti pianeti "erranti" (espulsi del tutto nello spazio interstellare) e stima che i sistemi

simili al nostro trattengano circa il 5-10% di questi corpi.

Le scoperte potrebbero orientare la ricerca di esopianeti, puntando su stelle ad alta metallicità dove è più probabile trovare pianeti a orbita larga.

Infine, l'Osservatorio Vera C. Rubin, di prossima operatività, potrebbe fornire dati cruciali per confer-



Figura 2.3 Rappresentazione artistica di Planet Nine
Crediti: Nasa

mare l'esistenza del Pianeta Nove e ampliare la conoscenza dell'evoluzione dei sistemi planetari.

3. INCONTRI RAVVICINATI CON PIANETI ER-RANTI O INTERSTELLARI

Si stima che nella nostra galassia ci siano più pianeti erranti (non legati gravitazionalmente a nessuna stella) che stelle.

Questi mondi vagano nello spazio interstellare, diciamo all'interno della Via Lattea, ma non si può escludere, anche se decisamente improbabile, che siano oggetti talmente vecchi (diversi miliardi di anni) da arrivare anche da altre galassie.

Ad oggi non sono mai stati osservati direttamente, ma nel maggio 2023, i telescopi terrestri del progetto **OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment)** hanno registrato un lampo luminoso molto breve in termini astronomici (appena otto ore) denominato **OGLE-2023-BLG-0524**, attribuibile a un fenomeno di **microlensing gravitazionale**.

OGLE è un ambizioso progetto astronomico polacco, avviato nel 1992 e condotto dall'Università di Varsavia. Il suo scopo principale è **lo studio dell'Univer-**

so attraverso la tecnica delle "microlenti gravitazionali", un metodo che sfrutta la curvatura della luce causata dalla gravità di oggetti massicci per rilevare corpi celesti altrimenti invisibili.

In questo fenomeno, previsto già da Einstein, un oggetto di massa significativa agisce come lente, amplificando la luce di una stella o di una galassia più lontana mentre le passa accanto rispetto al nostro punto di vista qui sulla Terra.

Quello che rende **OGLE-2023-BLG-0524** un **caso unico** è la casualità fortunata: **il telescopio spaziale Hubble aveva immortalato la stessa porzione di cielo nel 1997**, durante un altro evento di microlensing.

Questo ha fornito una base di osservazione con un intervallo di ben 25 anni, il più lungo mai utilizzato finora, per capire cosa fosse l'oggetto che produceva la lente gravitazionale.

La durata così breve dell'evento e l'assenza di una stella ben visibile rilevata nelle immagini di Hubble del 1997 e poi nel 2023 hanno indirizzato gli astronomi a considerare la possibilità che a produrre tutto ciò fosse un pianeta orfano.

Questi mondi, espulsi dai loro sistemi originali, **vagano liberi nella galassia senza stelle ospite**. Forse anche il nostro sistema solare, ai suoi primordi, espulse dei pianeti che ora vagano orfani della loro stella madre, il Sole.

Sulla base dei dati, **la massa del presunto pianeta oscilla tra quella terrestre e quella di Saturno**, a seconda della sua posizione, se nel disco galattico o nel bulbo centrale, che finora non è stata definita.

Lo studio evidenzia il grande potenziale delle osservazioni archiviate: immagini realizzate per scopi diversi, come quelle del 1997, possono rivelarsi decisivi anni dopo.

Un caso di **serendipity**, cioè la scoperta inaspettata e fortunata di qualcosa di prezioso o utile, mentre si cerca qualcos'altro.

Lo studio è un banco di prova per le missioni future. Il James Webb Space Telescope, grazie alla sua sensibilità nell'infrarosso, potrebbe individuare stelle

molto più deboli e fare luce sulla natura di oggetti di microlensing come questo.

Ancora più ambiziosa è la missione Nancy Grace Roman, che debutterà nel 2027 e **utilizzerà il microlensing per sondare la nostra galassia proprio alla ricerca di pianeti orfani**. Secondo previsioni, potrebbe scoprirne migliaia, rivelando finalmente la vera abbondanza di questi "**nomadi interstellari**".

Anche se è molto improbabile che un pianeta errante passi abbastanza vicino da interagire significativamente con il nostro sistema solare interno, un incontro ravvicinato potrebbe avere potenzialmente conseguenze drammatiche, alterando le orbite dei pianeti o persino collidendo con la Terra.

Tuttavia, le probabilità sono estremamente basse, anche se è del primo luglio la notizia che, per la terza volta, abbiamo osservato un oggetto interstellare delle dimensioni di un asteroide, proveniente dalla profondità della Via Lattea che sta attraversando il nostro "cortile", cioè il sistema solare.

Vediamo meglio questi incursori stranieri che non sono pericolosi come un pianeta errante perché sono decisamente piccoli. Quindi non sono "estintori" di vita ma possono comunque fare molto male

1i/'Oumuamua (2017 U1)

È forse il più famoso. Scoperto nell'ottobre 2017 è stato il primo oggetto interstellare riconosciuto a passare nel Sistema Solare (figura 2.4. e 2.5.).

Aveva una traiettoria iperbolica, con velocità troppo alta per rimanere legato gravitazionalmente al Sole.

Ha un aspetto allungato (stimato fino a 10 volte più lungo che largo) ed una superficie rossastra.

Nessuna evidente attività cometaria (niente coda di gas o polveri), ma un'accelerazione anomala ha fatto ipotizzare che fosse spinto da un degassamento difficile da rilevare o, in teorie più speculative, addirittura da tecnologie aliene (ipotesi ovviamente non confermata).



Figura 2.4 Raffigurazione artistica di Oumuamua

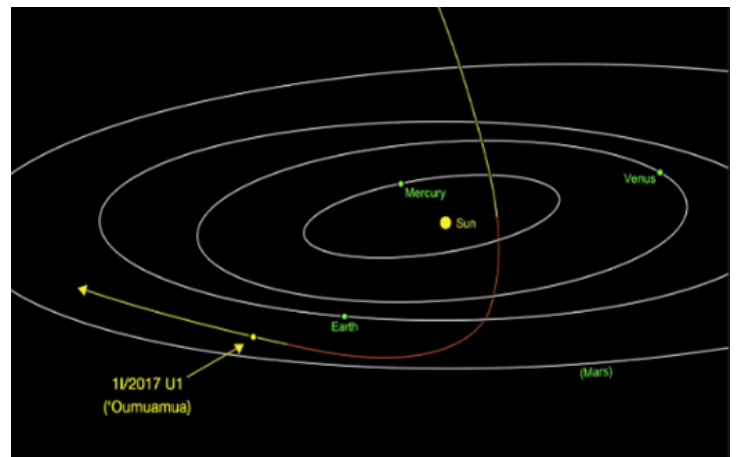


Figura 2.5 Traiettoria di Oumuamua

2i/Borisov (2019 Q4)

È stato scoperto nell'agosto 2019 da Gennadiy Borisov. Primo oggetto interstellare a mostrare chiaramente caratteristiche di una cometa (chioma e coda visibili). Dalle analisi ottiche risulta una composizione simile alle comete del Sistema Solare, con presenza di acqua e monossido di carbonio.

È passato a circa due AU dal Sole, si è comportato come una cometa classica ma con un'orbita proveniente dallo spazio interstellare.

3i/ATLAS (ufficialmente designato 3i, terzo oggetto interstellare identificato)

È un oggetto di cui si è cominciato a discutere tra la fine del 2023 e il 2024, dopo la sua individuazione dalla survey **ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System)** alle Hawaii. Vediamo le caratteristiche che sappiamo.

La **traiettoria** è un'orbita iperbolica, con eccentricità maggiore di 1, confermando che proviene dall'esterno del Sistema Solare.

Il suo **aspetto** è ancora in fase di studio. I dati preliminari indicano un corpo più simile a un asteroide, senza attività cometaria evidente, ma con riflettività piuttosto bassa (albedo scuro).

La sua **velocità** è consistente e superiore alla velocità di fuga solare.

Le **osservazioni** stanno proseguendo per ottenere spettroscopie dettagliate, ma finora non sono state rilevate firme chimiche particolarmente strane (in modo simile a 1i/Oumuamua).

In sintesi, 3i/ATLAS conferma la crescente capacità dei nostri sistemi di sorveglianza di intercettare visitatori interstellari, anche se i dati su dimensioni precise, forma e rotazione sono ancora in aggiornamento. Tuttavia, una nuova ricerca ha dimostrato che questo visitatore potenzialmente "ricco di ghiaccio d'acqua" potrebbe essere ancora più straordinario di quanto inizialmente creduto.

3i/ATLAS potrebbe avere circa 3 miliardi di anni in più del nostro sistema solare, vecchio di 4,5 miliardi di anni, e quindi di qualsiasi cometa mai osservata prima.

L'astronomo Matthew Hopkins dell'Università di Oxford fa parte di un team di scienziati che ritiene che 3i/ATLAS, effettivamente scoperto solo il 1° luglio 2025 dal telescopio spaziale ATLAS, abbia circa 7 miliardi di anni. La chiave dell'età avanzata di 3i/ATLAS è il fatto che proviene da una regione della Via Lattea completamente diversa rispetto a quella dei precedenti visitatori interstellari.

Basandosi sulla traiettoria ripida che 3i/ATLAS sembra seguire attraverso la nostra galassia, Hopkins e i suoi colleghi ipotizzano che abbia avuto origine nel "disco spesso" di stelle della Via Lattea.

Quindi la buona notizia è che possiamo stare più che tranquilli: con le strumentazioni a disposizione oggi, se dovessimo incrociare un pianeta errante, ce ne accorgeremmo con molti anni di anticipo.

La brutta notizia è che, se ciò che ci sta venendo addosso è un asteroide tipo Oumuamua possiamo

anche sperare di "farlo fuori" (deviarlo) ma se sarà un pianeta errante, sarà comunque lui a far fuori noi.

4. INCONTRI RAVVICINATI CON STELLE ER-RANTI O STELLE DI PASSAGGIO.

Il nostro sistema solare si muove attraverso la galassia e, di tanto in tanto, incontra altre stelle. Se una stella dovesse passare sufficientemente vicino, la sua gravità potrebbe disturbare la Nube di Oort inviando comete e asteroidi verso l'interno, aumentando potenzialmente il rischio di impatti con la Terra.

Fortunatamente, passaggi ravvicinati abbastanza significativi da causare una catastrofe sono rari su scale temporali di miliardi di anni.

Ma ci possono essere ombre invisibili: corpi oscuri in transito nel sistema solare!

Per quanto possa sembrare il prologo di un racconto di fantascienza, gli astronomi considerano possibile, seppur altamente improbabile, che una nana bianca ormai fredda o persino una stella di neutroni "spenta", cioè priva di emissioni rilevabili, possa attraversare furtivamente il nostro sistema solare.

Questi oggetti, residui estremi dell'evoluzione stellare, possono diventare incredibilmente compatti e massicci, ma quasi del tutto invisibili.

Se non emettono più luce o radiazioni significative e non interagiscono con materia circostante (come gas o polveri), potrebbero sfuggire completamente alla nostra osservazione diretta.

Tuttavia, anche questi fantasmi cosmici lasciano delle tracce. La loro presenza potrebbe essere scoperta solo attraverso i loro effetti gravitazionali o di occultazione:

- Potrebbero perturbare le orbite di comete o oggetti ai margini del sistema solare, come quelli della Nube di Oort, generando anomalie difficili da spiegare.
- Potrebbero anche loro ed in misura più intensa di un pianeta errante agire come **lenti gravitazionali**, incurvando la luce di stelle lontane che si trovano esattamente dietro di loro rispetto alla

nostra linea di vista: un fenomeno che può produrre **una breve amplificazione della luminosità** della stella di fondo.

- Oppure potrebbero causare una eclissi o occultazione, bloccando temporaneamente la luce di una stella distante: un **calo improvviso e localizzato di luminosità**, che può essere rilevato da telescopi sensibili, soprattutto se l'evento viene monitorato da più punti d'osservazione sulla Terra o nello spazio.

Questi metodi indiretti sono oggi impiegati in diversi progetti astronomici, che analizzano migliaia di stelle in cerca di variazioni anomale di luminosità.

Finora, nessun oggetto del genere è stato mai identificato nel nostro vicinato cosmico, ma **la possibilità resta aperta**. Lo spazio è vasto, e le sue ombre sono più profonde di quanto immaginiamo.

5. SEDNA

Sedna è uno dei corpi celesti più lontani e misteriosi del Sistema Solare. Scoperto poco più di vent'anni fa dagli astronomi Michael Brown, Chad Trujillo e David Rabinowitz, è stata battezzata in onore della **dea Inuit del mare**, un nome che evoca la solitudine e la lontananza che caratterizzano questo misterioso corpo celeste.

Diciamo subito che Sedna non costituisce un problema per l'umanità ma lo cito perché "abita" in una zona del sistema solare abbastanza simile a quella del Pianeta Nove, anche se è molto più vicino a noi... ma non poi tanto.

Sedna ha un'orbita ellittica eccezionalmente allungata, con un semiasse maggiore che la porta fino a 937 unità astronomiche (1UA=150 milioni di km) dal Sole. Il suo percorso intorno alla nostra stella è così ampio che il ciclo orbitale completo richiede circa 11.400 anni terrestri. Al punto più vicino della sua orbita (perielio), Sedna si trova a circa 76 UA dal Sole, mentre al punto più lontano (afelio) può arrivare a oltre 900 UA. Questa distanza è ben oltre la fascia di Kuiper, dove si trovano la maggior parte degli oggetti transnettuniani, e anche oltre il limite della Nube di Oort interna.

Sedna è grande, ma non tanto da essere considera-

ta un pianeta nano secondo i criteri attuali. La sua dimensione è stimata in un diametro compreso tra 900 e 1.100 km, il che la rende paragonabile a oggetti come Quaoar e Orcus.

La superficie di Sedna è caratterizzata da un colore rossastro, simile a quello di Marte, dovuto probabilmente alla presenza di **toline**, composti organici complessi che si formano in seguito all'irradiazione ultravioletta e ai raggi cosmici.

L'orbita di Sedna è una delle più peculiari mai osservate. La grande distanza e l'eccentricità orbitale hanno fatto pensare agli astronomi che possa essere stata "spinta" nella sua attuale posizione da qualche evento esterno al Sistema Solare. Tra le teorie principali vi è quella dell'influenza gravitazionale di una stella di passaggio nella lontana storia del Sistema Solare, oppure la presenza del "Pianeta Nove" di cui abbiamo parlato prima (vedi figura 2.2.).

Il Pianeta Nove, se esistesse, avrebbe una massa e un'orbita tali da perturbare le orbite degli oggetti transnettuniani e "spingerli" in traiettorie ellittiche, come appunto è successo con Sedna.

Sedna si trova oltre la Fascia di Kuiper, una regione ricca di piccoli corpi ghiacciati che orbitano oltre Nettuno. Tuttavia, la sua distanza la colloca in un'area che si avvicina più alla Nube di Oort interna, una vasta sfera di oggetti ghiacciati che si estende fino a 100.000 UA dal Sole e che rappresenta il confine esterno del Sistema Solare.

Sebbene Sedna non appartenga propriamente alla Nube di Oort, la sua posizione contribuisce a colmare il divario tra la Fascia di Kuiper e la Nube di Oort, fornendo indizi su cosa potrebbe trovarsi in queste zone inesplorate.

La scoperta di Sedna ha suscitato grande interesse nella comunità scientifica, perché sfida le attuali teorie sulla formazione del Sistema Solare e suggerisce che potrebbero esistere **molte altri corpi remoti e sconosciuti, tra cui appunto anche il Pianeta Nove**.

Attualmente, la sua distanza estrema dal Sole rende difficile l'osservazione dettagliata di Sedna, ma la futura generazione di telescopi, come il James

Webb Space Telescope e il Vera C. Rubin Observatory, potrebbe fornire nuove informazioni.

Questi strumenti avanzati permetteranno di ottenere immagini e dati più precisi, aiutando a scoprire altre caratteristiche e magari nuovi oggetti simili a Sedna nelle regioni più remote del Sistema Solare.

Come abbiamo detto Sedna percorre un'orbita lunghissima e allungata che lo porta a compiere un giro completo intorno al nostro Sole ogni 11mila anni. Un tempo immenso, che rende il suo passaggio ravvicinato alla nostra stella un evento più unico che raro.

E proprio questo passaggio è previsto per la metà di questo secolo. Un'occasione del genere capita una sola volta in decine di generazioni.

È per questo che diversi gruppi di ricerca stanno studiando come raggiungere **Sedna** prima che torni nel buio cosmico. Per farlo, si stanno valutando tecnologie spaziali che fino a pochi anni fa sembravano solo teoria.

Una delle proposte più promettenti si basa su un motore a fusione compatto, capace di produrre **sia spinta sia energia elettrica (ne abbiamo parlato nel numero precedente di questa rivista, il 65: propulsione nucleare ([Link Qui](#))).**

Se tutto andasse come previsto, questo motore permetterebbe di arrivare a destinazione in circa dieci anni, **con la possibilità di rallentare e fermarsi in orbita attorno al pianeta nano.**

Una missione del genere aprirebbe la strada a **osservazioni dettagliate e prolungate**, impossibili con i sistemi attuali.

Ma c'è anche un **Piano B**, più realistico a breve termine.

Si tratta di una vela solare potenziata, realizzata per usare la luce del Sole e per liberare particelle che accrescono la spinta. Grazie a questa tecnologia e ad un po' di astuzia nelle traiettorie, una sonda potrebbe arrivare a Sedna in meno di sette anni. Il rovescio della medaglia sarebbe un **sorvolo veloce, senza possibilità di rimanere nei dintorni per analisi approfondite.**

In entrambi i casi, però, il segreto è che bisogna fare in fretta. Per riuscire a intercettare Sedna durante il suo passaggio ravvicinato, il lancio dovrà avvenire entro la prossima decina d'anni.

Ovviamente io preferirei la prima soluzione per diversi motivi:

- ✓ Consentirebbe finalmente di avere a disposizione propulsori a fusione utilissimi per i viaggi nello spazio profondo.
- ✓ Consentirebbe di restare su Sedna tutto il tempo necessario per fare una analisi approfondita.

6. OSSERVAZIONI E CONCLUSIONI

Il lato oscuro del nostro sistema solare, popolato da orbite misteriose, pianeti forse ancora sconosciuti e corpi freddi che sfuggono ai nostri occhi, rappresenta una frontiera ancora tutta da esplorare.

Che si tratti di pianeti erranti, nane bianche ormai spente o dell'inafferrabile Pianeta Nove, ciò che ci sfida è la difficoltà stessa di vedere ciò che non emette luce, o che si muove lentamente ai margini del nostro sguardo.

Ma oggi la tecnologia sta cambiando le regole del gioco.

Il telescopio spaziale **James Webb**, con la sua sensibilità all'infrarosso, ci permette già di osservare oggetti freddi e lontani come mai prima d'ora.

E presto entrerà in funzione il **Vera C. Rubin Observatory**, progettato per scandagliare il cielo notturno con una gigantesca telecamera CCD con 189 sensori individuali e scatterà foto da **3.2 gigapixel** (figura 6.3), la più grande mai costruita per l'astronomia. Ogni notte fotograferà vaste porzioni del cielo, registrando anche i più lievi movimenti di oggetti debolissimi e lontani.

Grazie a strumenti come questi, potremmo presto ottenere risposte alle domande ancora aperte:

- ✓ esiste davvero un Pianeta Nove?
- ✓ Quali altri corpi oscuri si nascondono là fuori?

E riusciremo finalmente a studiare da vicino oggetti affascinanti come **Sedna**, che si sta avvicinando al

ASTRONOMIA

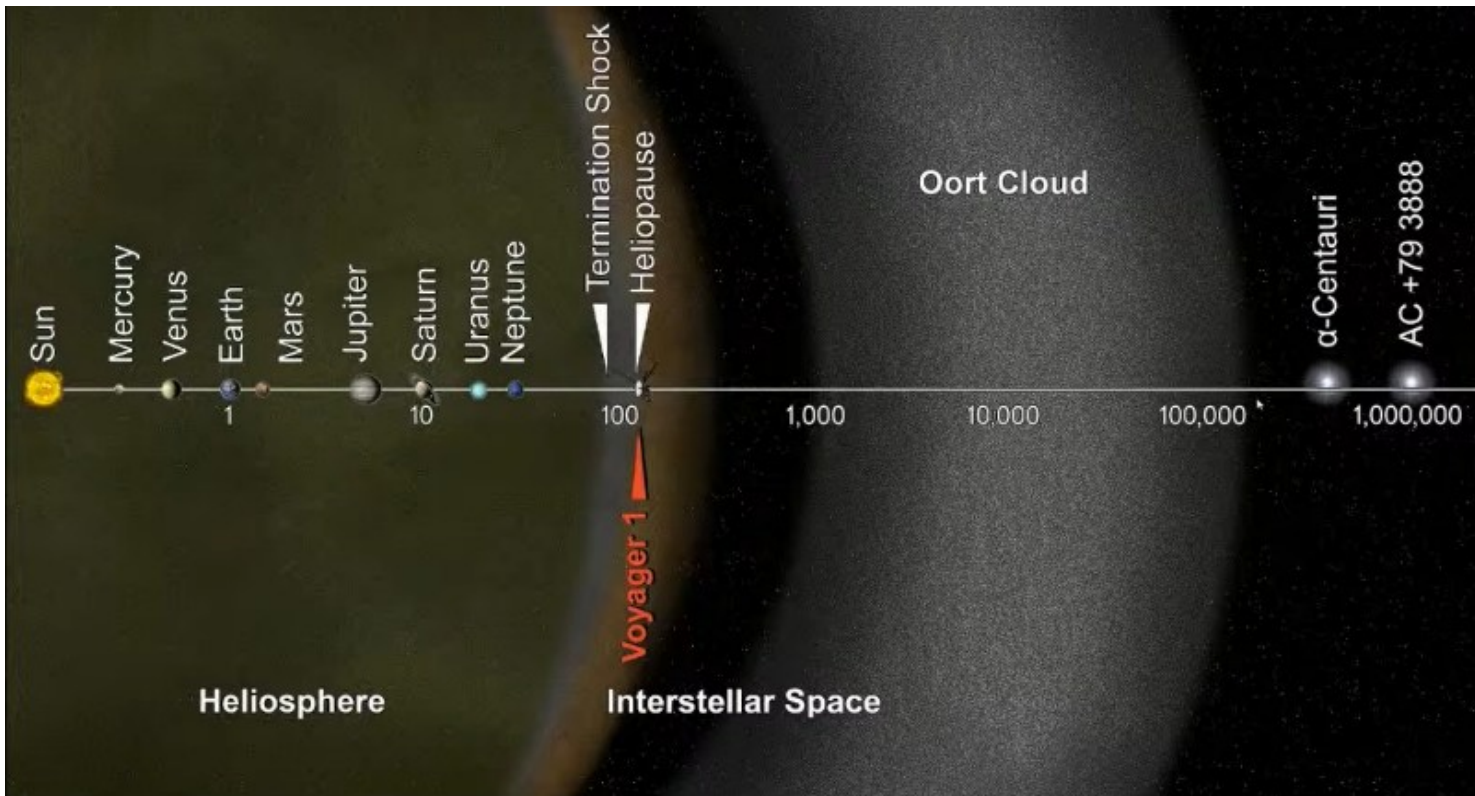


Figura 6.1 Distanze in scala logaritmica dai pianeti noti fino alla stella più vicina Proxima centauri

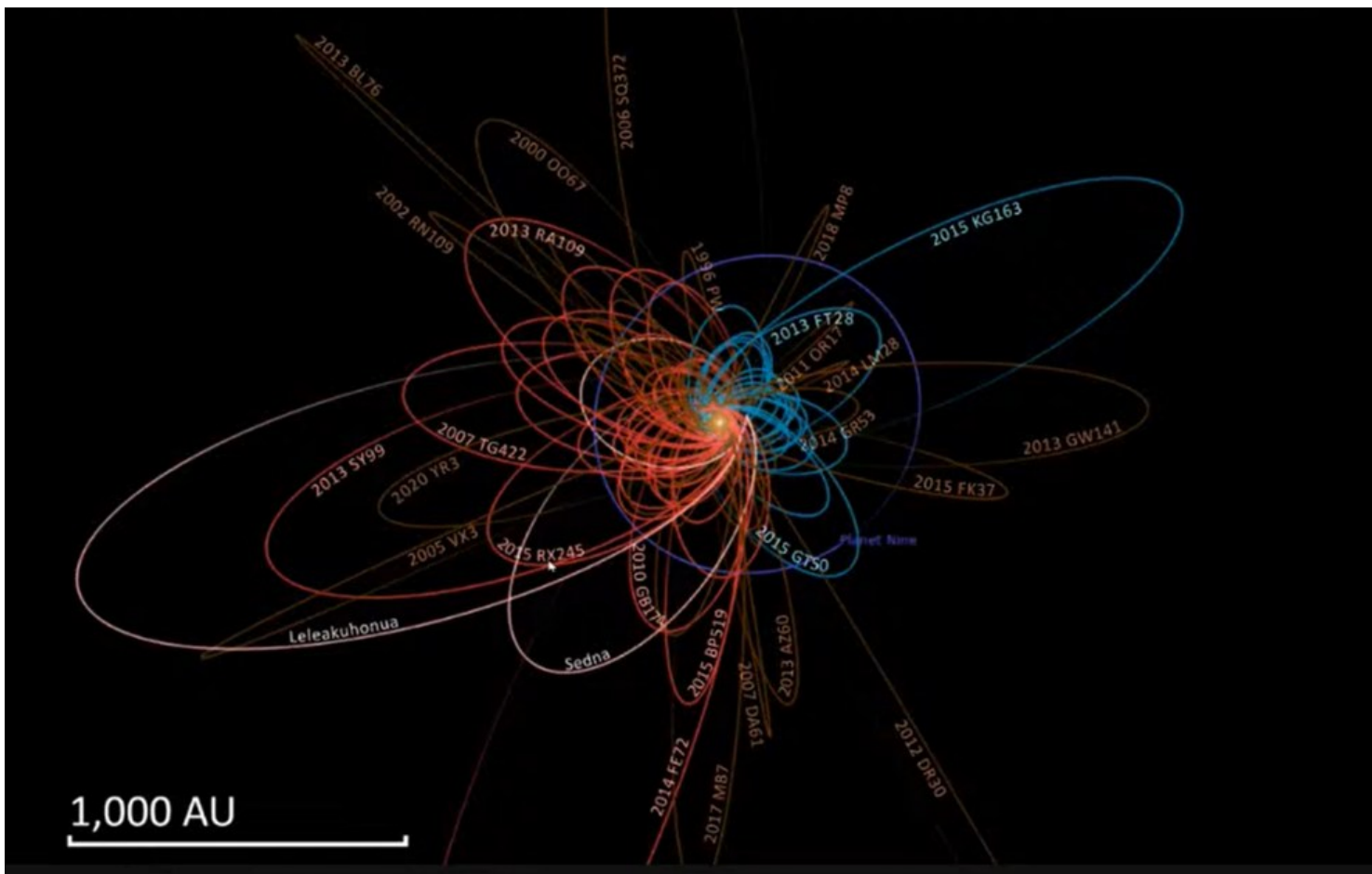


Figura 6.2 Orbite dei tantissimi pianeti nani oltre l'orbita di Nettuno

punto più vicino della sua lunghissima orbita?

Il futuro dell'esplorazione spaziale passa anche da queste ricerche silenziose e pazienti, alla scoperta di ciò che per ora rimane invisibile. Ma forse, non ancora per molto.



Figura 6.3 Fotocamera del Vera C. Rubin Observatory, presso lo SLAC di Palo Alto

7. NOTA FINALE SULLE PSEUDOSCIENZE

Vi chiederete come mai non ho parlato di **Nibiru**, del **Pianeta X**, del **Decimo Pianeta** o del pianeta chiamato **X-Proserpina**.

Non ne ho parlato perché non fanno parte di teorie fondate sulla scienza ma rientrano in un vastissimo campo che affonda le sue radici nella fantascienza, nell'astrologia, nell'ufologia e tante altre "discipline" partorite dalla fantasia umana.

Lo scrittore Zecharia Sitchin è un sostenitore dell'esistenza di un decimo pianeta chiamato Nibiru nel contesto della teoria degli antichi astronauti. Vi rimando a lui.

Su queste pagine parliamo di scienza ed anche se a volte, come in questo caso, parliamo del Pianeta Nove che nessuno ha mai visto, resta una teoria basata su considerazioni scientifiche concrete e condivise dal mondo accademico.

Luigi Borghi

FONTI

Link web (per aprire: Ctrl+click)

Geopop: ["L'elusivo "Pianeta Nove": abbiamo un possibile candidato, ma ci sono dubbi sul nuovo studio"](#)

ANSA: ["Rafforzati gli indizi sull'esistenza del Pianeta 9"](#)

Fanpage: ["Cos'è il Pianeta Nove e perché non si trova: "Ora ha un solo posto dove nascondersi"](#)

Wikipedia: ["Planet Nine"](#)

Media INAF: [Così Planet Nine potrebbe aver preso il largo](#)

National Geographic: [Esiste davvero il "Pianeta Nove"?](#)

Harold Connolly Blog: [The Grand Tack: A discussion with Kevin Walsh \(Podcast sull'ipotesi Grand Tack\)](#)

SpaceTH: [Grand Tack Hypothesis \(interessante articolo di un sito thailandese sull'ipotesi di migrazione di Giove e Saturno agli albori del Sistema Solare\) Per leggerlo utilizzare la traduzione automatica](#)

NASA Science: [What is the Late Heavy Bombardment?](#)

Media INAF: [Svelato il mistero di 'Oumuamua](#)

FOCUS: [Gli archivi astronomici di Hubble rivelano la possibile presenza di un pianeta orfano](#)

EveryEye Tech: [Sedna è un misterioso pianeta nano: riusciremo mai a raggiungerlo?](#)

YouTube: [Planet X, Planet 9: mondi nell'oscurità \(Luca Nardi - TEDx Talk\)](#)

Space.com: [Portale di notizie spaziali](#)

Articoli e pubblicazioni affidabili

Migrazione planetaria e modello di Nizza

Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., & Gomes, R. (2005). Chaotic capture of Jupiter's Trojan aste-

roids in the early Solar System. *Nature*, 435, 462–465. <https://doi.org/10.1038/nature03540>

⇒ *Paper fondamentale sul ruolo della migrazione dei giganti*

Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., & Levison, H. F. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435, 459–461. <https://doi.org/10.1038/nature03539>

⇒ *Introduce il cuore del modello di Nizza.*

Pianeta Nove

Batygin, K., & Brown, M. E. (2016). Evidence for a distant giant planet in the Solar System. *The Astrophysical Journal*, 151(2), 22. <https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/2/22>

⇒ *studio che ha riaperto in modo rigoroso la caccia al "Planet Nine"*

Brown, M. E., & Batygin, K. (2021). The Planet Nine hypothesis. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 59, 97–131. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-112420-020023>

⇒ *la più recente revisione completa, perfetta per un articolo divulgativo ma ben fondato*

L'evoluzione futura del Sistema Solare

Schröder, K.-P., & Connon Smith, R. (2008). Distant future of the Sun and Earth revisited. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386(1), 155–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13022.x>

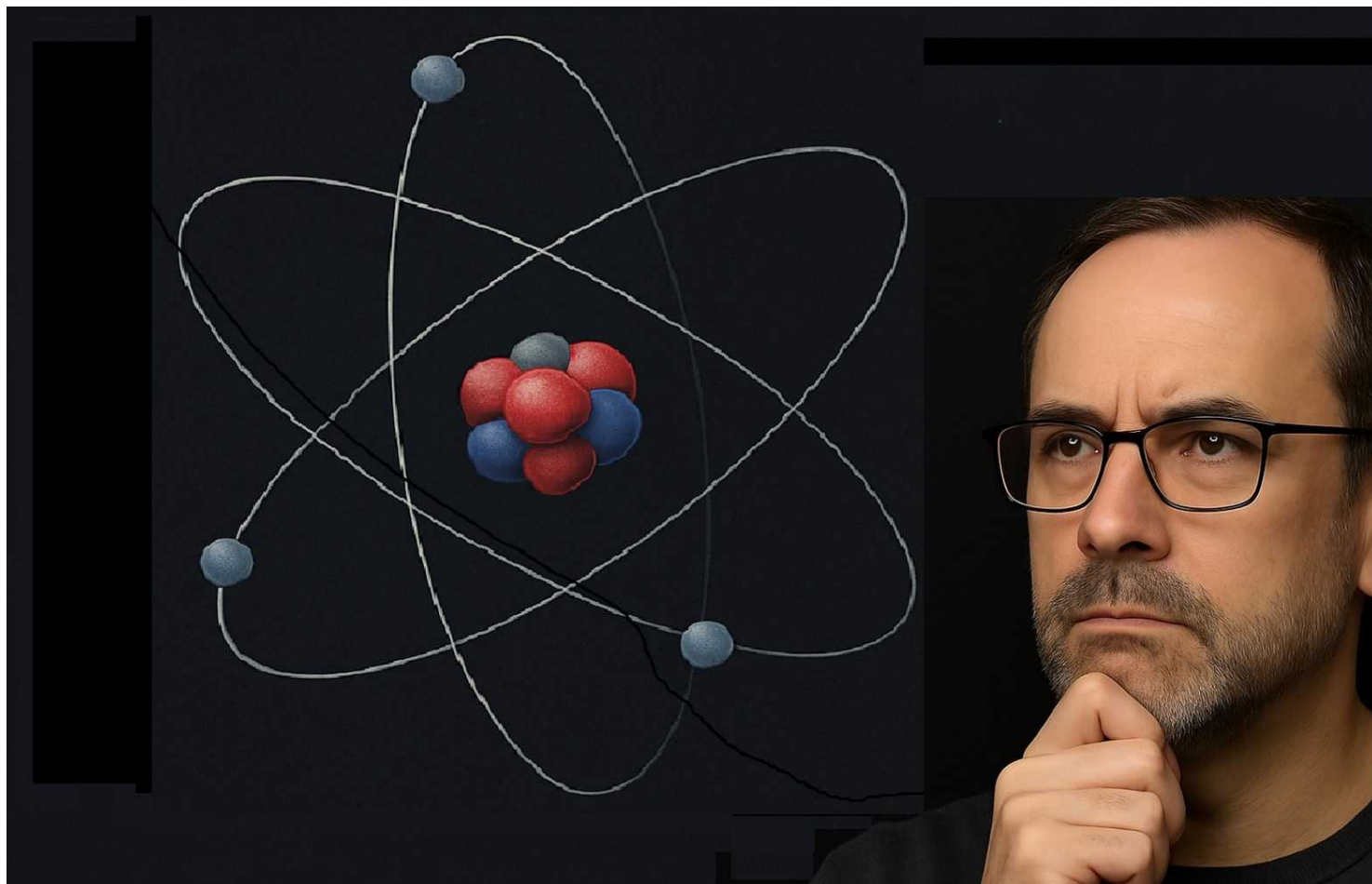
⇒ *spiega come il Sole evolverà in gigante rossa e come cambieranno le orbite planetarie*



L'ATOMO NON È COME LO IMMAGINI

Dalle orbite alle nuvole: il vero volto dell'atomo secondo la meccanica quantistica

di Roberto Castagnetti



Il Modello Planetario: un'Immagine Fuorviante

Spesso immaginiamo l'atomo come una sorta di **sistema solare in miniatura**: un nucleo centrale attorno al quale gli elettroni ruotano lungo orbite ben definite, caratterizzate da determinati livelli energetici in cui è possibile disporsi.

Questa rappresentazione, semplice e intuitiva, è radicata nell'immaginario collettivo e costituisce solitamente il primo modello che ci viene insegnato a scuola.

Non sorprende, quindi, che anche una rapida ricerca su Google restituisca immagini simili a quella mostrata in Figura 1. Si tratta, tuttavia, di una visione ormai superata e, sotto molti aspetti, fuorviante.

Non solo non riflette la reale struttura dell'atomo, ma è imprecisa sia dal punto di vista concettuale sia da quello dimensionale.

Il modello planetario di Figura 1 ha certamente un valore didattico: è utile per introdurre concetti come la disposizione degli elettroni nei livelli energetici. Ma non deve essere confuso con la **reale "forma" dell'atomo**.

Il problema principale è che questo schema ignora le scoperte sperimentali emerse da oltre un secolo di ricerca. Gli esperimenti di **Rutherford**, prima, e l'avvento della **Meccanica Quantistica**, poi, hanno completamente rivoluzionato la nostra comprensione della struttura atomica.

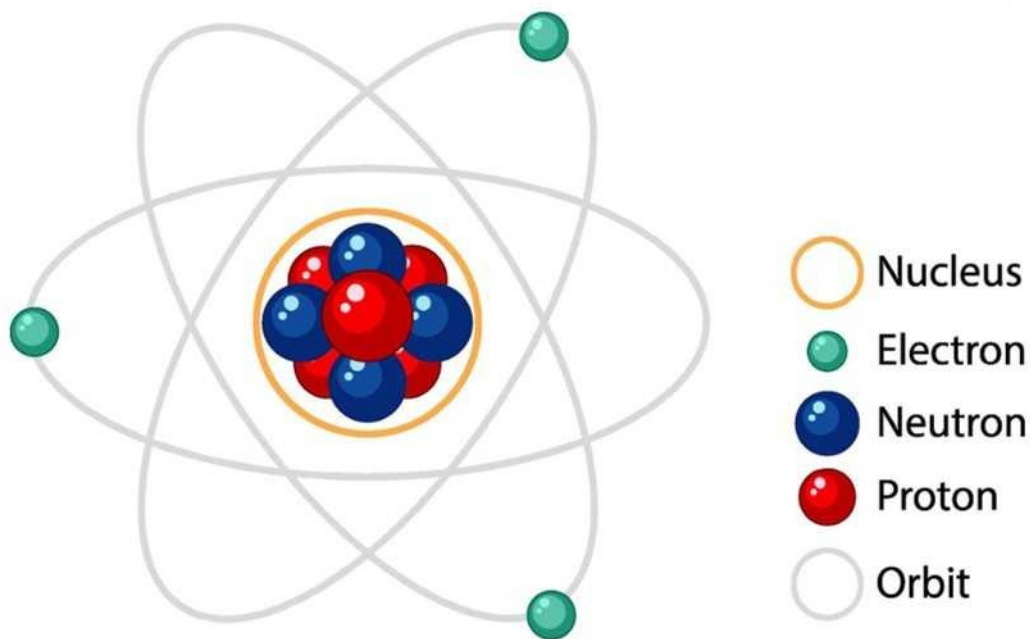


Figura 1: La rappresentazione "Classica" dell'atomo

I Limiti della Fisica Classica

Questi studi hanno mostrato che le particelle subatomiche non seguono le regole della fisica classica, ma si comportano secondo leggi probabilistiche, spesso profondamente controintuitive.

Nel tentativo di spiegare tali comportamenti con modelli familiari, si è ricorso a una **rappresentazione "classica" dell'atomo**: delle palline che ruotano attorno ad altre palline, ognuna con posizione, velocità e quantità di moto ben definite (Figura 1). Ma questo approccio, valido nella meccanica classica, fallisce completamente nel descrivere il mondo atomico.

Il **paradosso dell'elettrone classico**: se applicassimo le leggi classiche a questo modello, otterremmo **risultati paradossali**:

Secondo **l'elettrodinamica classica**, un elettrone in movimento accelerato (come sarebbe necessario per mantenere un'orbita circolare) dovrebbe irradiare energia elettromagnetica continuamente. Questo comporterebbe una perdita di energia che porterebbe l'elettrone a *spiraleggiare* verso il nucleo in una frazione di secondo. Di conseguenza, gli atomi non esisterebbero... e con essi, neanche la materia o la realtà come la conosciamo.

Per fortuna, esiste un modello alternativo, e molto più accurato, fornito dalla **Meccanica Quantistica**.

La Struttura Fondamentale dell'Atomo

Prima di addentrarci in questa nuova visione, vediamo quali regole fondamentali devono essere rispettate.

Un punto fermo, condiviso da entrambi i modelli, è che l'atomo è costituito da tre tipi di particelle fondamentali: **protoni**, **neutroni** ed **elettroni**.

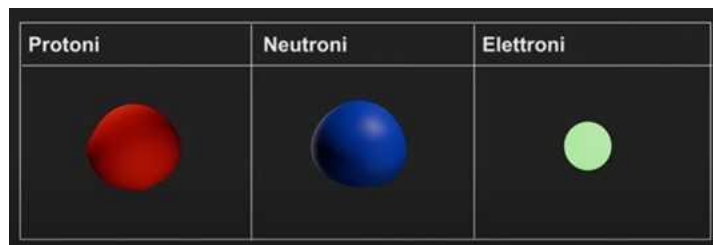


Figura 2: Protoni, Neutroni ed Elettroni

I **protoni** e i **neutroni** costituiscono il **nucleo dell'atomo** e sono tenuti strettamente uniti al centro di esso.

I protoni possiedono **carica elettrica positiva**:

$$(+e = +1,602 \times 10^{-19} \text{ C})$$

I **neutroni**, invece, sono elettricamente neutri.

Protoni e neutroni hanno **massa simile**:

$$(\sim 938\text{-}939 \text{ MeV}/c^2)$$

A questo punto, per i protoni, emerge l'**Enigma**

della Coesione Nucleare: da un punto di vista intuitivo, la loro coesione nel nucleo potrebbe sembrare paradossale. I protoni possiedono tutti carica positiva e, secondo la **Legge di Coulomb**, dovrebbero respingersi con forza a causa della **repulsione elettrostatica**. Eppure, nel cuore dell'atomo, questi protoni restano sorprendentemente compatti.

La chiave di questo equilibrio è l'**Interazione Nucleare Forte**, una delle quattro forze fondamentali della natura (insieme alla gravità, all'elettromagnetismo e all'interazione nucleare debole). Questa forza:

- È **molto più intensa** della repulsione elettrostatica
- Ha un **raggio d'azione estremamente corto** (~ 1 **femtometro** = 10^{-15} metri)
- Agisce tra tutti i nucleoni (protoni e neutroni)

Quando i nucleoni si trovano a questa distanza ravvicinata, la forza forte domina e riesce a tenerli uniti, superando la naturale repulsione tra le cariche positive dei protoni.

Quindi, i protoni riescono a stare insieme all'interno del nucleo solo grazie alla **interazione nucleare forte**: una forza potentissima ma limitata a piccolissime distanze, che tiene uniti i nucleoni e **compensa la repulsione elettrostatica** tra i protoni.

I neutroni, pur non avendo carica elettrica, svolgono un ruolo cruciale nella **stabilità del nucleo**: partecipano all'interazione forte che tiene uniti protoni e neutroni e contribuiscono a contrastare la repulsione elettrostatica tra i protoni. Se il numero di protoni è troppo alto rispetto ai neutroni, il nucleo può diventare instabile e andare incontro a **processi di decadimento radioattivo**.

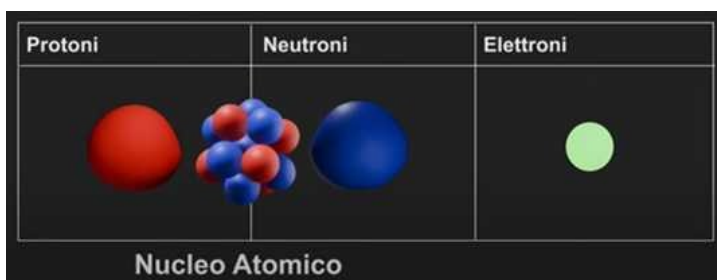


Figura 3: Il Nucleo Atomico

Ed ora vediamo gli **Elettroni**.

Hanno **massa estremamente piccola** rispetto ai nucleoni ($\sim 1/1836$ della massa del protone), per avere una visualizzazione si può dire che è quasi **2.000 volte più leggero**

PARTICELLA	CARICA (q)	MASSA (m)
PROTONE	$+e$	$938,3 \text{ MeV}/c^2$
NEUTRONE	0	$939,6 \text{ MeV}/c^2$
ELETTRONE	$-e$	$0,51 \text{ MeV}/c$

$e = 1,610^{-19} \text{ C}$

Figura 4: Carica e massa dei componenti dell'Atomo

Gli elettroni possiedono carica negativa ($-e$) e vengono **attratti dal nucleo positivo**, ma non collassano su di esso.

Secondo il **Modello Classico** (Figura 1), questo avviene perché gli elettroni si muovono in orbite circolari attorno al nucleo, e la forza centrifuga bilancia l'attrazione elettrostatica.

Tuttavia, questo modello presenta il grave problema sopra citato, ovvero il **paradosso dell'elettrone classico**. Un elettrone in movimento circolare dovrebbe accelerare continuamente e quindi irraggiare energia elettromagnetica, perdendo energia e spirando verso il nucleo in frazioni di secondo. Questo renderebbe gli atomi instabili, il che contraddice l'evidenza sperimentale

Come vedremo la realtà è più strana e la spiegazione corretta venne fornita dalla **meccanica quantistica** secondo cui gli elettroni esistono in stati quantizzati stabili chiamati orbitali, dove non irradiano energia ... ma andiamo con ordine perché esistono altre ... anomalie.

Il Problema delle Dimensioni

Uno dei primi problemi del modello planetario riguarda le proporzioni.

Saremmo portati a pensare che, essendo più "massiccio", il protone debba essere rappresentato

come molto più grande dell'elettrone.

In realtà è esattamente il contrario: se guardiamo

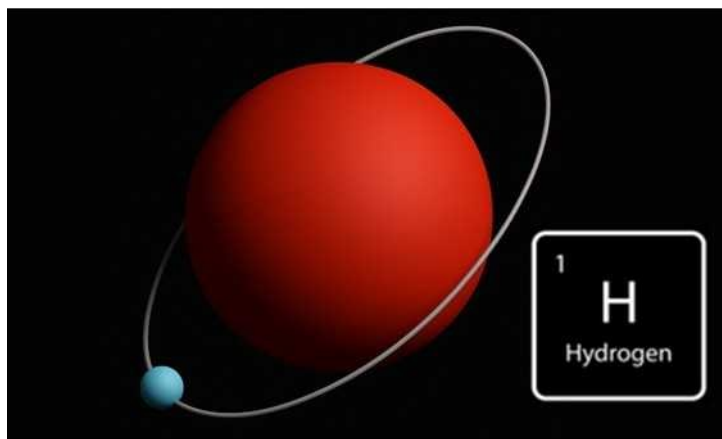


Figura 5: L'Atomo di Idrogeno col nucleo "allargato"

alle dimensioni fisiche, e non alla massa, il **nucleo si rivela essere minuscolo rispetto all'intero atomo**.

Cerchiamo di capire quali sono le reali proporzioni in gioco:

- Il **raggio del protone** è $\sim 0,84$ femtometri ($0,84 \times 10^{-15}$ m)
- Il **raggio dell'orbitale 1s dell'idrogeno** (Raggio di Bohr) è pari a $\sim 0,53$ Ångström ($5,3 \times 10^{-11}$ m)

Questo significa che l'atomo è grande circa **100.000 volte** più del suo nucleo.

Un'analogia efficace: Immaginiamo una ruota panoramica da luna park con un raggio di circa 10 metri. Tutta la massa di questa gigantesca struttura sarebbe concentrata al centro in un volume minuscolo, paragonabile a quello di un granello di sale con un raggio di 0,1 millimetri.

Questa è, in maniera approssimativa ma efficace, la proporzione tra il **nucleo atomico** e l'intero atomo.

Nel nostro modello, quindi, il nucleo non va ingrandito, bensì **drasticamente rimpicciolito**, tanto da risultare **praticamente invisibile** su qualsiasi rappresentazione in scala dove si voglia mostrare anche gli elettroni. Non possiamo raffigurare contemporaneamente protone ed elettrone in modo proporzionato su una pagina o uno schermo.

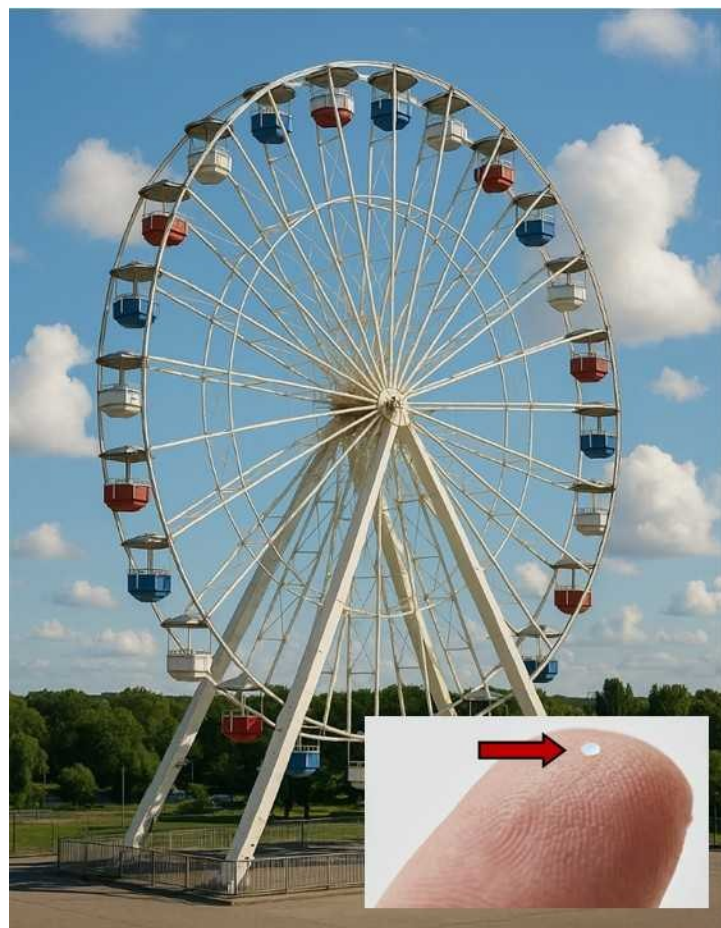


Figura 6: Le dimensioni in gioco: il nucleo atomico è il granello di sale indicato dalla freccia rossa, e l'intero atomo è rappresentato dalla ruota panoramica

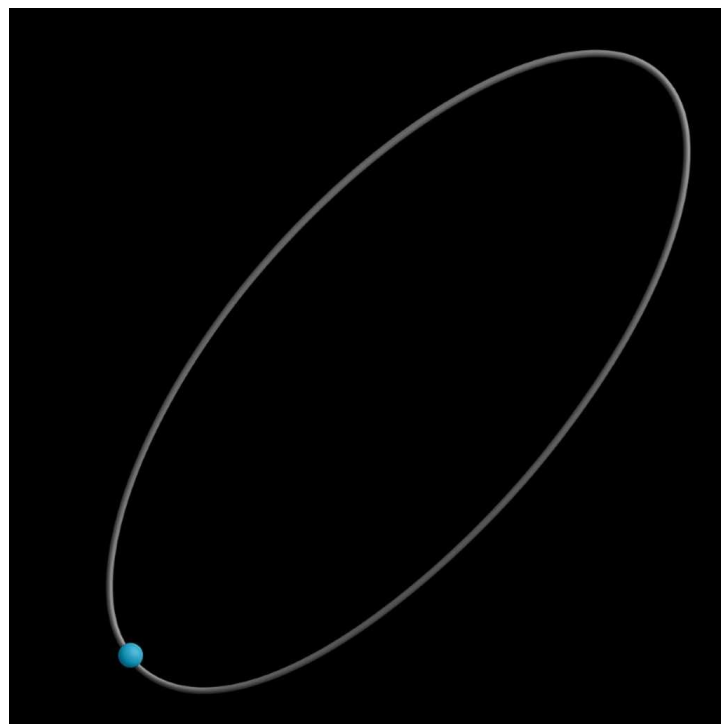


Figura 7: Il nucleo "scompare" se rispettiamo le proporzioni. Nella raffigurazione, però, l'elettrone è ancora troppo grande

La Rivoluzione Quantistica

La seconda correzione che dobbiamo affrontare è ancora più impegnativa e coinvolge un **cambio radicale di prospettiva**: dobbiamo **abbandonare la fisica classica** e addentrarci nel mondo della meccanica quantistica e, come vedremo, si tratterà di qualcosa di inconcepibile; pochissime persone al mondo sono riuscite a fare veramente questo salto concettuale.

Come disse Richard Feynman, uno dei più grandi fisici teorici del XX secolo e Premio Nobel per l'elettrodinamica quantistica: *"Penso di poter dire con sicurezza che nessuno capisce davvero la meccanica quantistica."*

Le differenze sono profonde e sconcertanti.

La **Fisica Classica** si basa su concetti che ci sono **familiari** dalla vita quotidiana: quando lanciamo una palla, possiamo prevedere esattamente dove cadrà conoscendo la sua posizione iniziale, la velocità e la direzione. Tutto è **deterministico** e **prevedibile**. Possiamo osservare gli oggetti, toccarli, misurarli con precisione senza alterare il loro comportamento.

La **Meccanica Quantistica**, invece, ci catapulta in un regno dove queste certezze crollano. Qui le **regole del senso comune non valgono più**: i fenomeni diventano intrinsecamente probabilistici, come se la natura stessa giocasse a dadi. Ancora più inquietante, le particelle subatomiche sembrano rifiutarsi di avere una posizione e una velocità simultaneamente definite – è come se l'atto stesso di cercare di localizzare con precisione un elettrone lo rendesse "sfocato" nella sua velocità, e viceversa.

Cercare di spiegare i fenomeni quantistici con metafore della nostra realtà quotidiana è **fuorviante**, perché **nessuno di noi ha esperienza diretta** di ciò che accade su scala subatomica.

È proprio questa distanza concettuale che spinge molti a interpretare la meccanica quantistica in chiave **mistica** o **esoterica** – con affermazioni tipo "tutto è connesso" – ma si tratta di **fraintendimenti**.

La meccanica quantistica è **fisica rigorosa, matematica precisa**, ed è in grado di fare **previsioni**

esatte sul comportamento della materia, che **trovano riscontro negli esperimenti**.

Entriamo quindi nel mondo affascinante – e spesso controintuitivo – della meccanica quantistica.

La Funzione d'Onda e il Principio di Indeterminazione

La prima cosa da sapere è che l'**elettrone non è localizzato**: non possiamo descriverlo come un **puntino** o una **pallina** che ruota attorno al nucleo seguendo una **traiettoria** precisa, con una **posizione** e una **velocità** note in ogni istante.

Questo tipo di descrizione **non è più possibile** quando entriamo nel mondo della meccanica quantistica.

In questo ambito, infatti, il **concetto stesso di posizione** viene profondamente **rivoluzionato** o, meglio, **sradicato**: non ha più senso dire che una particella *"si trova qui, con questa velocità e questo impulso"* in un dato istante.

Il fondamentale **Principio di Indeterminazione di Heisenberg** stabilisce, infatti, che non possiamo conoscere simultaneamente con precisione arbitraria la posizione e la quantità di moto di una particella.

Per descrivere il comportamento dell'elettrone in un **atomo di idrogeno**, dobbiamo adottare un **linguaggio completamente diverso**.

Non si parla più di traiettorie o coordinate precise nel tempo, ma si introduce uno **strumento matematico fondamentale**: la **Funzione d'Onda (ψ)**, detta anche **Ampiezza di Probabilità**.

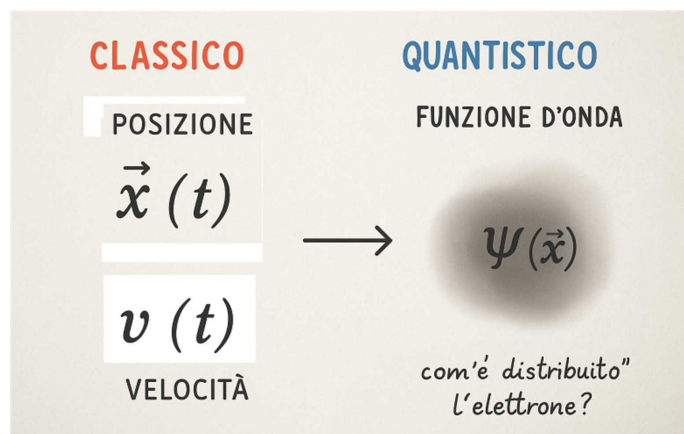


Figura 9: Approccio CLASSICO e QUANTISTICO

La funzione d'onda è un concetto astratto, ma potentissimo; non ha un significato fisico diretto osservabile. Indica, in un certo senso, **come è distribuita la presenza dell'elettrone nello spazio** intorno al nucleo, ovvero **non dove si trova**, ma **dove è più probabile trovarlo**.

A questo punto, sorge una domanda naturale: una volta trovata la funzione d'onda, possiamo davvero sapere **come l'elettrone è distribuito** nello spazio?

La risposta è: **non direttamente**. La funzione d'onda, da sola, **non ha un significato fisico osservabile**. In altri termini: è un "oggetto" che non ha un corrispettivo nella realtà che percepiamo tutti i giorni.

Per ottenere un'informazione concreta, dobbiamo **elevare al quadrato il modulo della funzione d'onda**.

$$|\psi(\vec{x})|^2 = P(\vec{x})$$

Questo calcolo ci fornisce la cosiddetta **Densità di Probabilità** $P(\vec{x})$ cioè la probabilità di **trovare l'elettrone** in un punto specifico dello spazio intorno al nucleo dell'atomo.

L'Equazione di Schrödinger

Per descrivere il comportamento quantistico dell'elettrone, abbiamo visto che è necessario introdurre il concetto fondamentale di **funzione d'onda**.

Questa funzione non si ottiene in modo arbitrario, ma **si ricava risolvendo** la celebre **Equazione di Schrödinger**

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

$\psi \rightarrow$ funzione d'onda

$E \rightarrow$ energia del sistema

$\hat{H} \rightarrow$ operatore Hamiltoniano

Figura 10: Equazione di Schrödinger

Nel caso dell'atomo di idrogeno, l'equazione di Schrödinger descrive **come si comporta l'elettrone nel potenziale coulombiano del protone**.

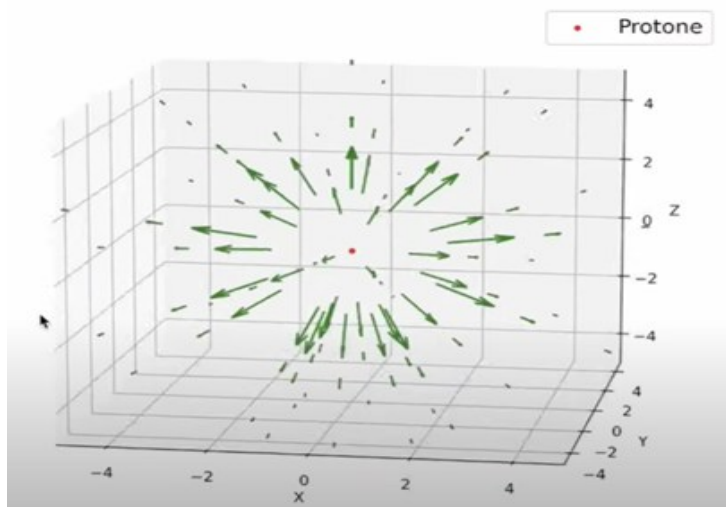


Figura 11: elettrone all'interno di un campo elettrico

Ecco, quindi, il cuore della questione: l'Equazione di Schrödinger consente di determinare **quali livelli di energia** sono possibili per il sistema elettrone-nucleo e **quale funzione d'onda** corrisponde a ciascuno di essi.

Al centro di questa equazione troviamo **l'Operatore Hamiltoniano**

$$\hat{H} = \hat{T} + \hat{V}$$

che rappresenta l'**energia totale del sistema**, ovvero la somma di "**energia cinetica + energia potenziale**", espressa però in forma matematica e applicata alla funzione d'onda.

- **Energia Cinetica** $\hat{T}$ dell'elettrone (cioè, legata al suo "**movimento**" quantistico).
- **Energia Potenziale** $\hat{V}$ dovuta all'interazione elettrostatica tra elettrone e nucleo (protone).

Ragionando in termini "**classici**": il concetto di energia cinetica è legato al **movimento** di un oggetto: più l'oggetto è veloce, maggiore sarà la sua energia cinetica; l'energia potenziale, invece, dipende dalla **posizione** dell'oggetto all'interno di un campo di forze — nel nostro caso, il campo elettrico

generato dal protone.

Senza entrare nei dettagli tecnici di cosa significhino energia cinetica ed energia potenziale **nella meccanica quantistica**, è importante sottolineare che **non sono semplici numeri**, ma **operatori matematici**: strumenti che **agiscono sulla funzione d'onda**.

Quando l'operatore Hamiltoniano agisce sulla funzione d'onda, **produce l'energia del sistema per quella stessa funzione d'onda**.

Questa relazione

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

prende la forma di un'equazione differenziale, nota appunto come **equazione di Schrödinger**. E come tutte le equazioni differenziali, **non restituisce un numero**, ma una **funzione**: qualcosa che varia **nel tempo e nello spazio**.

Questa funzione risultante è proprio la **funzione d'onda** dell'elettrone.

Livelli Energetici Quantizzati

Una caratteristica fondamentale della meccanica quantistica è che l'energia dell'elettrone nell'atomo può assumere solo **valori discreti** (quantizzati).

Non esistono energie "intermedie": un elettrone può trovarsi solo in **livelli energetici specifici**.

A ciascun livello energetico possono essere associate **una o più funzioni d'onda**, ognuna delle quali descrive un modo specifico in cui l'elettrone può "esistere" attorno al nucleo.

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

Una o più ψ associate

Nel caso dell'**atomo di idrogeno**, il **livello energetico fondamentale** (denominato **E₁**) ha una

sola funzione d'onda come soluzione dell'Equazione di Schrödinger.

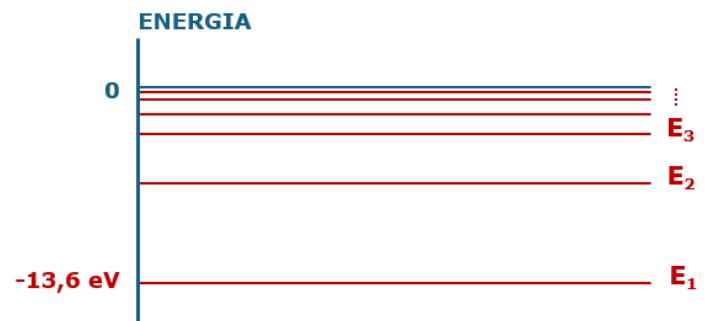


Figura 12: Livelli Energetici

Salendo al **secondo livello energetico (E₂)**, troviamo **quattro possibili soluzioni**, e quindi **quattro funzioni d'onda** differenti che l'elettrone può assumere a quella energia.

Al **terzo livello (E₃)**, il numero di soluzioni sale a **nove**.

$$\begin{aligned} E_1 &\longrightarrow \psi_{100} \\ E_2 &\longrightarrow \psi_{200} \quad \psi_{210} \quad \psi_{211} \quad \psi_{21-1} \\ E_3 &\longrightarrow \psi_{300} \quad \psi_{310} \quad \psi_{311} \quad \psi_{31-1} \quad \psi_{320} \quad \psi_{321} \quad \psi_{32-1} \quad \psi_{32-2} \quad \psi_{322} \end{aligned}$$

In generale, **più l'energia del legame si riduce** (cioè, quanto più l'elettrone è "lontano" dal nucleo e meno vincolato), **maggiore sarà il numero di funzioni d'onda possibili**.

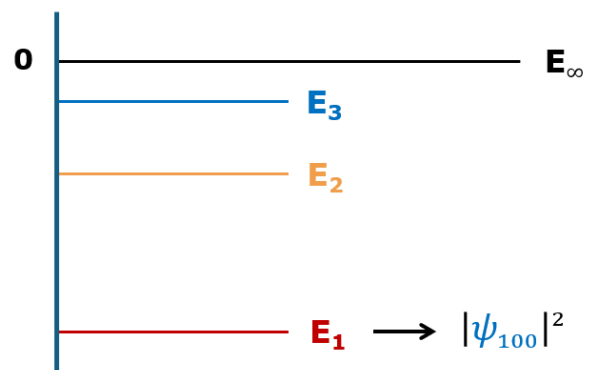


Figura 13: Densità di probabilità a E₁

Ogni funzione rappresenta un diverso **stato quantico** compatibile con quell'energia. .

A questo punto, **elevando al quadrato la funzione d'onda**, otteniamo una **rappresentazione quantistica dell'atomo** (Figura 14), che ci mostra **dove è più probabile trovare l'elettrone** nello spazio attorno al nucleo.

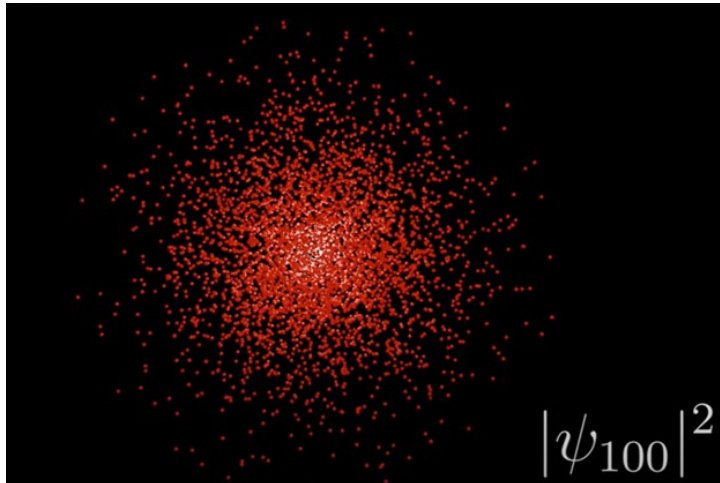


Figura 14: Probabilità di presenza dell'elettrone nello stato fondamentale E_1

Ma cosa significa esattamente questa immagine?

Quella che osserviamo nell'immagine è una **distribuzione di "puntini"** intorno al protone.

Attenzione: **questi puntini non rappresentano elettroni reali**, né tantomeno tante particelle diverse. Rappresentano invece **la probabilità di trovare un elettrone** in una specifica regione dello spazio attorno al nucleo.

Gli orbitali sono le funzioni d'onda degli elettroni nell'atomo

L'immagine della Figura 14 mostra il **primo livello energetico** dell'atomo di idrogeno, cioè lo **stato più stabile e più fortemente legato** che un elettrone può occupare.

In questo stato esiste **una sola funzione d'onda** possibile, e quindi **una sola densità di probabilità** – ottenuta, come abbiamo visto, elevando al quadrato la funzione d'onda.

Questa specifica funzione d'onda, con la sua caratteristica distribuzione spaziale, viene chiamata **orbitale** – in questo caso, l'orbitale 1s.

Le zone con **più puntini** indicano una **maggiore probabilità** di trovare lì l'elettrone.

Le zone con **meno puntini** indicano una probabilità minore.

Dove **non ci sono affatto puntini**, la probabilità è praticamente nulla. Tuttavia, esiste sempre una **piccola "coda di probabilità"**, che si estende verso l'infinito: la densità non si annulla mai del tutto, ma **decresce asintoticamente verso zero**.

Se ci spostiamo al **secondo livello energetico**, caratterizzato da una **energia di legame più bassa**, le cose si fanno più articolate.

ENERGIA

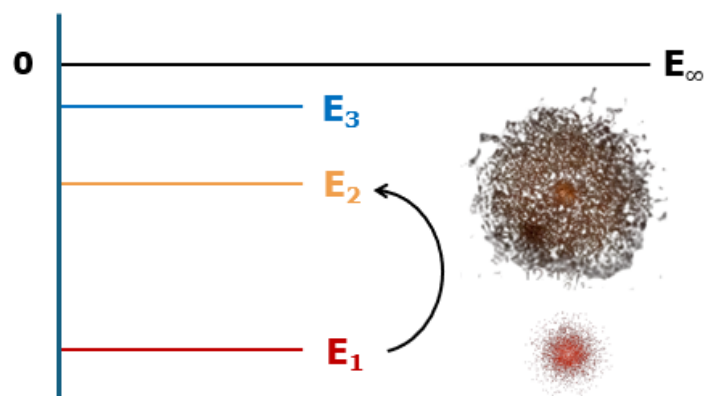


Figura 15: La probabilità di presenza dell'elettrone nello stato fondamentale E_2

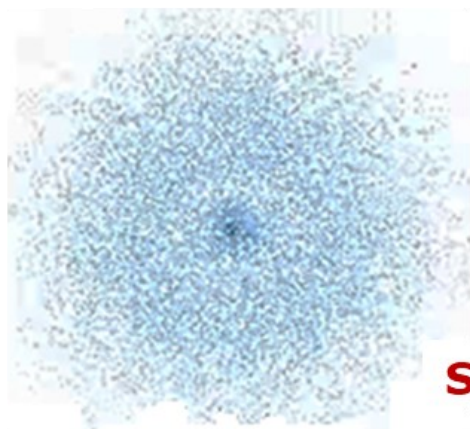
A questo livello esistono **quattro configurazioni distinte**: quattro diverse funzioni d'onda che descrivono **altrettanti modi in cui l'elettrone può distribuirsi** intorno al protone.

Queste quattro configurazioni sono i quattro orbitali del secondo livello.

Entriamo nel dettaglio di questo **secondo livello energetico**.

In Figura 16 sono rappresentate le **quattro diverse densità di probabilità** associate al **secondo livello energetico** dell'atomo di idrogeno.

- La **prima distribuzione** è sfericamente **simmetrica**, ovvero **non dipende dall'angolo**: la probabilità di trovare l'elettrone varia solo in base alla distanza dal nucleo. Rappresenta un **orbitale di tipo "s"**.



S

$$|\psi_{200}|^2 |\psi_{210}|^2 |\psi_{21-1} \pm \psi_{211}|^2$$



P_z

$$|\psi_{200}|^2 |\psi_{210}|^2 |\psi_{21-1} \pm \psi_{211}|^2$$



P_x

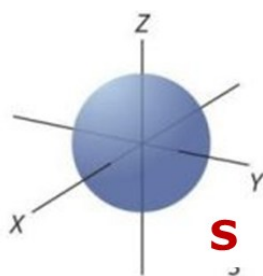
$$|\psi_{200}|^2 |\psi_{210}|^2 |\psi_{21-1} \pm \psi_{211}|^2$$



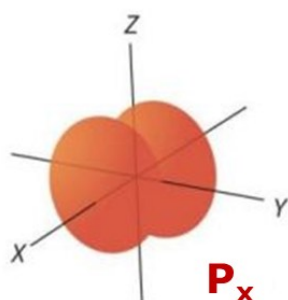
P_y

$$|\psi_{200}|^2 |\psi_{210}|^2 |\psi_{21-1} \pm \psi_{211}|^2$$

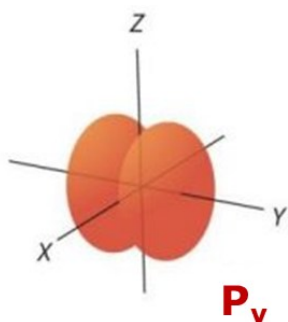
Figura 16: La quattro diverse densità di probabilità associate al secondo livello energetico E_2



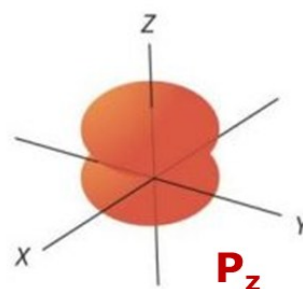
S



P_x



P_y



P_z

Figura 17: schematizzazione della figura 16 con la denominazione degli orbitali S e P visualizzazione degli orientamenti degli orbitali P

- Le **altre tre distribuzioni**, invece, **dipendono anche dall'angolo**: ciò significa che l'elettrone ha maggiore probabilità di trovarsi in **regioni spaziali direzionali**, orientate rispetto al nucleo. Queste corrispondono agli **orbitali di tipo "p"**, ciascuno con una propria **direzione preferenziale**.

Quando arriviamo al **terzo livello energetico (E_3)**, la situazione si fa molto complessa (Figura 18).



Figura 18: Densità di probabilità al livello energetico E_3 (semplificato)

A questo livello, ci sono ben **nove possibili configurazioni**, ovvero **nove funzioni d'onda** distinte, che descrivono diversi modi in cui l'elettrone può distribuirsi attorno al nucleo.

Visualizzare tutte queste densità di probabilità diventa progressivamente più difficile, anche perché alcune distribuzioni assumono **forme molto articolate** e valori apparentemente "insensati": in certi punti, la probabilità di trovare l'elettrone è esattamente **zero** – e questo è perfettamente previsto dalla meccanica quantistica.

Con la "visualizzazione" ci fermiamo qui ...

A questo punto, però, sorge una domanda: se nel primo livello energetico (Figura 19) esiste una sola funzione d'onda, **come possono starci due elettroni?**

E nel secondo livello (Figura 20), con **quattro configurazioni**, perché si dice che **può ospitare fino a otto elettroni?**

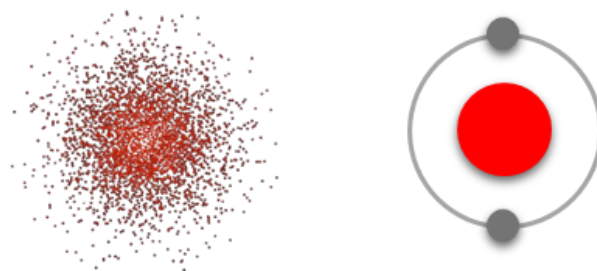


Figura 19: Livello $E_1 \rightarrow 2$ elettroni

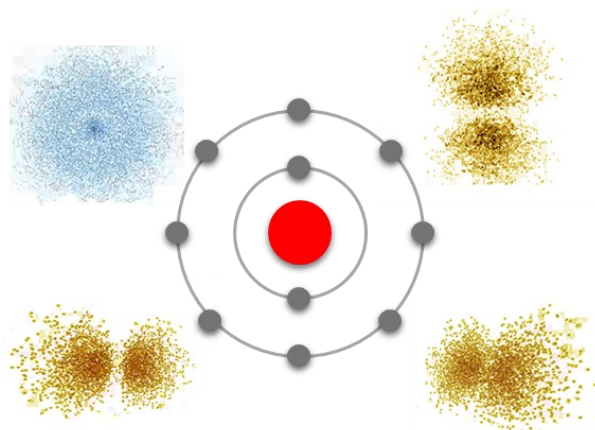


Figura 20: Livello $E_2 \rightarrow 8$ elettroni

Nel terzo livello (Figura 21), poi, ci sono **nove funzioni d'onda**, eppure possono starci **18 elettroni**.

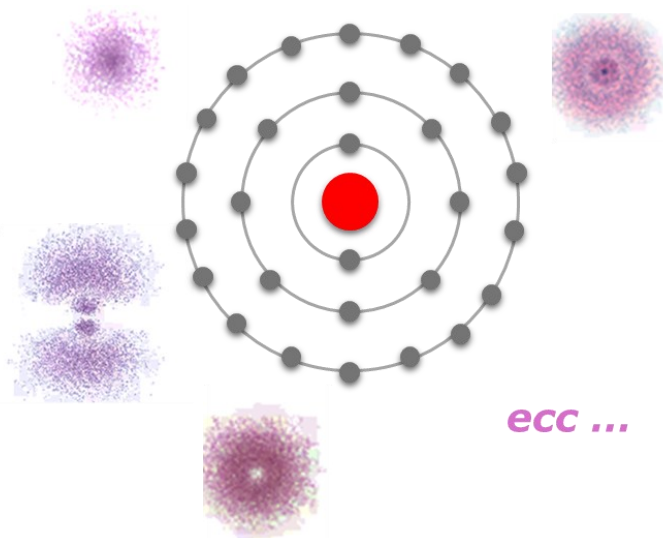


Figura 21: Livello $E_3 \rightarrow 18$ elettroni

La risposta sta nel

Principio di Esclusione di Pauli

Questo principio afferma che due **fermioni identici** (come gli elettroni) **non possono trovarsi nello stesso stato quantico** contemporaneamente.

Tuttavia, ogni funzione d'onda ammette due **elettroni** con **spin opposto**: uno con spin "**Up**", l'altro con spin "**Down**".

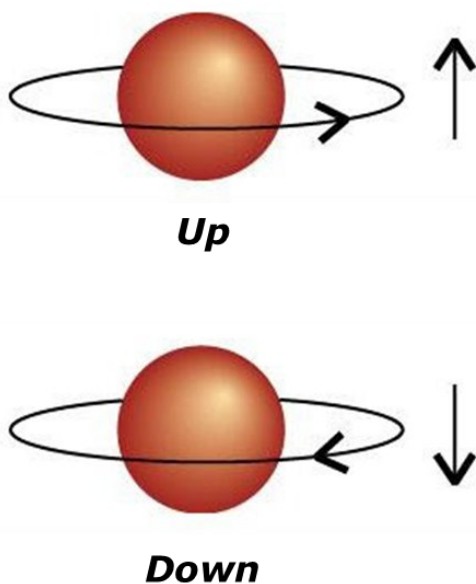


Figura 22: Rappresentazione degli Spin Up e Down ... ma solo per semplificazione visiva

Ecco, quindi, spiegato il motivo per cui il numero di elettroni per livello è il doppio del numero di funzioni d'onda disponibili.

Lo **spin** è una **proprietà quantistica intrinseca** delle particelle subatomiche, **assimilabile a un momento angolare**, anche se non corrisponde a una rotazione fisica nello spazio.

Come molte caratteristiche della meccanica quantistica, non ha un vero equivalente nella nostra esperienza quotidiana, ma è fondamentale per spiegare il **comportamento magnetico** delle particelle e le **regole con cui si organizzano nella materia**.

Una breve sintesi per ricapitolare:

- 1 funzione d'onda → 2 elettroni (livello **1s**)
- 4 funzioni d'onda → 8 elettroni (livello **2s** e **2p**)
- 9 funzioni d'onda → 18 elettroni (livello **3s**, **3p** e **3d**)

Ogni funzione d'onda **descrive un diverso modo in cui un elettrone può esistere e distribuirsi nello spazio attorno al nucleo di un atomo**. L'insieme di queste funzioni determina la **struttura elettronica dell'atomo**, ovvero la disposizione degli elettroni nei vari livelli e orbitali.

La struttura elettronica quantistica spiega elegantemente l'organizzazione della **Tavola Periodica**.

Tavola Periodica

1																	2		
3	4													5	6	7	8	9	10
11	12													13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118		

Figura 23: La Tavola Periodica

Questa organizzazione, nata da principi quantistici apparentemente astratti, riesce a spiegare in modo sorprendentemente preciso **l'ordine e le proprietà degli elementi**

La Tavola Periodica Spiegata

Il riempimento degli orbitali segue regole precise, note come *Principio di Aufbau*.

Prima di tutto, gli elettroni sono "pigri": occupano sempre gli orbitali con energia più bassa, proprio come l'acqua che scorre verso il punto più basso. Una volta sistemati negli orbitali più convenienti energeticamente, solo allora passano a quelli successivi.

Abbiamo visto che **ogni orbitale ha una capienza limitata: può ospitare al massimo due elettroni, e solo se hanno spin opposto**. È come se ogni orbitale fosse una stanza con due letti, e gli elettroni possano dividerla solo se sono "compatibili".

Quando ci sono più orbitali con la stessa energia - come i tre orbitali p o i cinque orbitali d - succede qualcosa di interessante: gli elettroni preferiscono sistemarsi prima da soli, uno per orbitale, piuttosto che andare subito in coppia. È come se preferissero avere ciascuno la propria stanza prima di essere costretti a dividerla. Solo quando tutti gli orbitali di pari energia hanno almeno un elettrone, iniziano a formare le coppie.

Queste regole, apparentemente semplici, governano l'intera architettura elettronica degli atomi e spiegano la struttura della Tavola Periodica.

Vediamo ora una breve descrizione riguardante la **Costruzione della Tavola Periodica** (Figura 23) considerando i concetti che abbiamo visto.

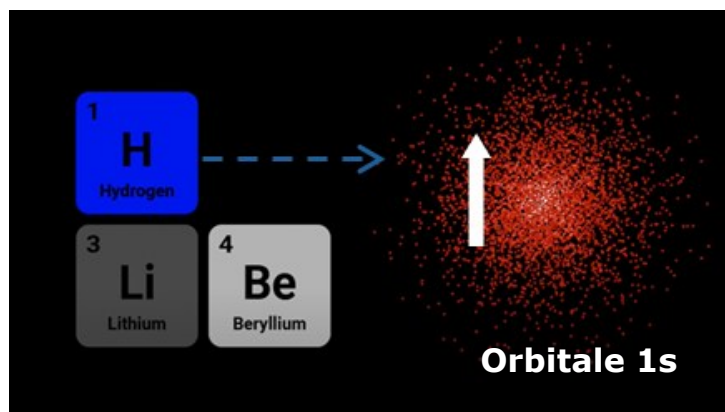


Figura 24: Idrogeno (H)

L'**idrogeno**, (Figura 24) ha un solo elettrone e lo colloca nel **livello fondamentale (1s)**, dove ha la massima probabilità di trovarsi.

È importante chiarire che l'elettrone, all'interno dell'atomo di idrogeno, può occupare uno qualsiasi dei livelli energetici consentiti. Tuttavia, in condizioni normali, **tende spontaneamente a collocarsi nel livello energetico più basso**, noto come **stato fondamentale**. Questo corrisponde al primo orbitale e rappresenta la **configurazione più stabile e legata per l'elettrone**: è lì che si "sistemerà" naturalmente.

Con **due protoni**, l'**elio** può attrarre un secondo elettrone, anch'esso nel livello 1s, ma con spin opposto.

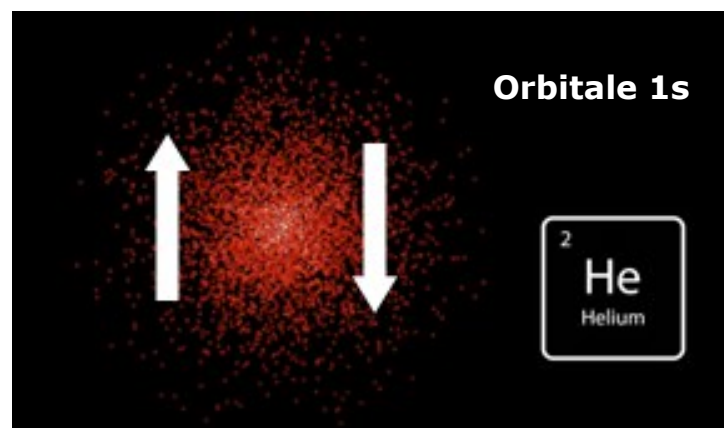


Figura 25: Elio (He)

Aggiungendo un terzo protone, otteniamo il **litio**: il terzo elettrone **non può più stare nell'orbitale 1s** (già completo) e va nel **secondo livello (2s)**.



Figura 26: Litio (Li)

Con **quattro elettroni**, il **berillio** completa l'orbitale **2s**.



Figura 27: Berillio (Be)

Il **boro**, con cinque elettroni, inizia a riempire i **tre orbitali 2p** — quelli "lobati". (Figura 28).

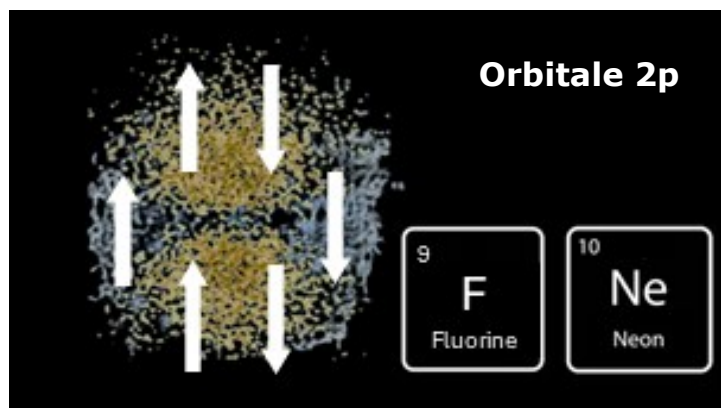
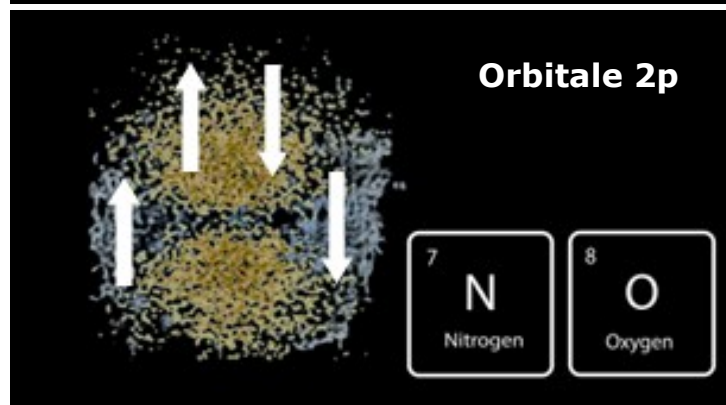
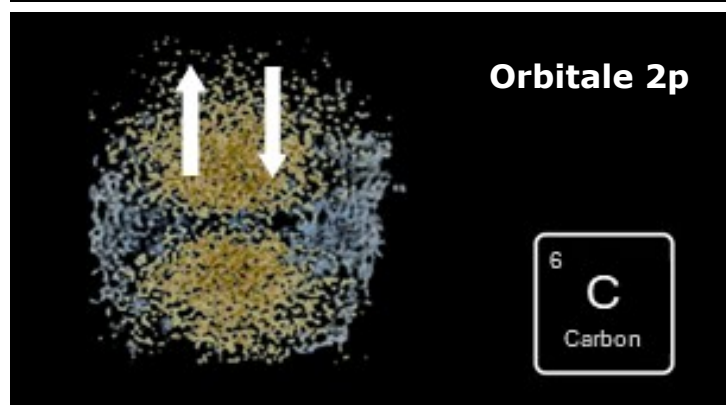
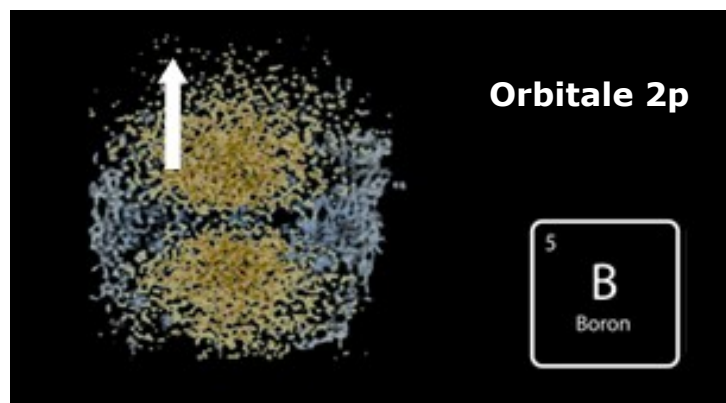


Figura 28: In successione, gli atomi di Boro (B), Carbonio (C), Azoto (N), Ossigeno (O), Fluoro (F), Neon (Ne) ed il progressivo riempimento degli orbitali 2p

Riassumendo: abbiamo visto che aumentando il numero di protoni nel nucleo, aumenta anche il numero di elettroni necessari per mantenere l'atomo neutro. Questi elettroni vanno a occupare gli orbitali disponibili secondo un ordine ben preciso. Dopo il **riempimento completo degli orbitali 2s**, gli elettroni iniziano a occupare progressivamente **gli orbitali 2p**. Quando anche questi risultano pieni, il sistema **non può più ospitare altri elettroni nello stesso livello energetico**. A questo punto, si passa al terzo livello energetico, in cui si cominciano a **riempire nuovi orbitali (3s e 3p)**. Questo cambiamento corrisponde anche al **passaggio a una nuova riga nella Tavola Periodica**, segnando l'inizio di un nuovo periodo chimico e l'apertura di un nuovo strato elettronico.

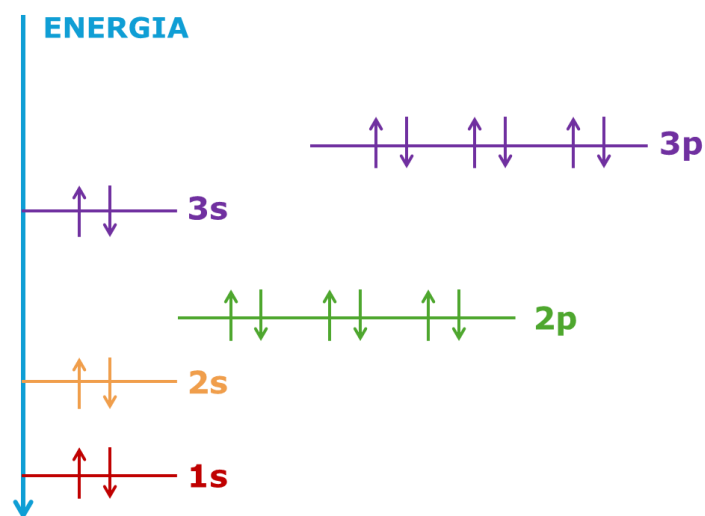


Figura 29 Regole nella Tavola Periodica

In figura 29 una rappresentazione delle regole che descrivono la sistemazione degli elementi nella Tavola Periodica.

Vediamo un'interessante eccezione: il **terzo livello** può teoricamente contenere **18 elettroni**, ma la **terza riga della Tavola Periodica ha solo 8 elementi** (Figura 30). Perché questa discrepanza?

La risposta sta nel fatto che i **livelli energetici non crescono in modo ordinato**. Succede, quindi, qualcosa di inaspettato: **l'orbitale 4s** (del quarto livello) **ha un'energia più bassa degli orbitali 3d** (del terzo livello). Di conseguenza, quando gli atomi costruiscono la loro configurazione elettronica, riempiono prima il 4s e solo dopo i 3d.

È come se gli elettroni "**scavalcassero**" parte del terzo livello per occupare una posizione energeticamente più vantaggiosa nel quarto. Questo spiega perché nella terza riga troviamo solo gli 8 elementi che corrispondono al riempimento degli orbitali 3s e 3p, mentre **i 10 elettroni degli orbitali 3d vengono aggiunti più avanti**. Questo fenomeno di **sovrapposizione energetica** è uno dei motivi per cui la Tavola Periodica ha la struttura che conosciamo.

Ma questi dettagli, come direbbero molti, "**sono questioni da chimici...**"

Giunti a questo punto, facciamo una breve sintesi dei concetti chiave che abbiamo approfondito.

Nel **modello classico** che abbiamo considerato all'inizio – quello che più o meno tutti abbiamo in mente – abbiamo modificato **due aspetti fondamentali**: uno relativamente semplice da accettare, e uno molto più difficile.

1. Il primo è stato riscalare le dimensioni del nucleo rispetto all'intero atomo: abbiamo visto quanto sia **infinitamente piccolo** rispetto alla dimensione complessiva dell'atomo.
2. Il secondo, più profondo, è stato il **passaggio concettuale** da una visione "classica" fatta di **palline che ruotano attorno ad altre palline**, a una visione "**quantistica**", in cui parliamo di **densità di probabilità**: cioè, della probabilità di trovare un elettrone in una certa regione attorno al nucleo.

Ora abbiamo una visione più corretta dell'atomo Ma, nonostante i suoi limiti, la **rappresentazione classica non va scartata completamente**.

È una semplificazione utile e intuitiva, che può aiutare a comprendere rapidamente concetti fondamentali come i **livelli energetici** o la **struttura a gusci** dell'atomo.

Questa rappresentazione può **essere ancora utilizzata a fini didattici**, sia a livello scolastico che, in alcuni casi, accademico.

L'importante è **essere consapevoli dei suoi limiti**: non riflette la reale scala delle dimensioni né la

Figura 30: La Tavola Periodica degli Elementi: ogni riga (periodo) rappresenta il riempimento progressivo dei livelli energetici degli atomi. Man mano che aumenta il numero atomico, gli elettroni si distribuiscono in orbitali sempre più esterni, aprendo nuovi periodi e determinando la struttura a strati dell'atomo

vera natura del comportamento elettronico, ma **resta uno strumento utile**, purché si sappia che **esiste un modello più preciso e completo**: quello **quantistico**.

In estrema sintesi possiamo affermare che l'atomo è composto da un **nucleo centrale**, contenente **protoni e neutroni**, e da una **nube elettronica** che lo circonda.

Gli elettroni **non seguono orbite fisse**, ma **occupano regioni di spazio** chiamate **orbitali**, dove è più probabile trovarli.

In altri termini, questa descrizione nasce dalla **meccanica quantistica**, che non interpreta il mondo subatomico in termini deterministici, ma attraverso i concetti di **probabilità** e **funzioni d'onda**.

Vorrei concludere riprendendo il primo aspetto che abbiamo analizzato e modificato, ritenendo che fosse il più semplice da "digerire", ovvero la consapevolezza della **dimensione ridotta del nucleo rispetto all'atomo**.

Proviamo a quantificare il rapporto tra le due scale con un semplice calcolo e una metafora.

1. **Raggio del protone**: circa **0,84 femtometri (fm)**, cioè $0,84 \times 10^{-15}$ metri
2. **Raggio dell'orbitale 1s** dell'idrogeno (noto come **raggio di Bohr**): circa **0,53 Ångström**, ovvero $5,3 \times 10^{-11}$ metri

Questo significa che l'elettrone si trova, in media, a una distanza dal protone pari a circa **63.000 volte il raggio del nucleo**.

Per visualizzare meglio questa proporzione, immaginiamo un atomo di idrogeno in cui il **protone** del nucleo sia ingrandito fino a diventare grande quanto una **pallina da ping-pong** (≈ 4 cm di diametro). In questa scala, l'elettrone orbiterebbe a circa **2,5 chilometri di distanza**.

Una distanza enorme, soprattutto se si considera che tra i due **non c'è nulla di materiale**.

Questa metafora, pur restando **una semplificazione classica**, ci aiuta a cogliere un concetto fondamentale: il **99,9999999999996%** di un atomo è **vuoto**.

Ciò che rende la materia **"solida" alla nostra percezione**, ciò che le **dà forma, consistenza e struttura**, non è la presenza di "sostanza" fisica ma le **interazioni elettromagnetiche** tra gli atomi: le forze che impediscono agli elettroni degli atomi vicini di "invadere" lo stesso spazio.

Gli atomi, la materia, noi stessi... **siamo fatti di vuoto**.

Se eliminassimo il vuoto dagli atomi, l'intero genere umano sarebbe contenuto nel volume di una zolletta di zucchero



Conclusione: La Natura Profonda della Realtà

Il viaggio dalla concezione classica dell'atomo alla comprensione quantistica rappresenta una delle più profonde rivoluzioni concettuali della scienza moderna.

Con la Meccanica Quantistica abbiamo scoperto che:

- La **materia è principalmente costituita da vuoto**, tenuto insieme da forze invisibili
- La **realtà fondamentale è probabilistica**, non deterministica
- Le **particelle subatomiche sfuggono alla logica quotidiana**, esistendo in stati di sovrapposizione quantistica
- La **misura cambia la realtà**, collassando le possibilità quantistiche in eventi classici

È una rivoluzione che non è solo accademica: ha reso possibili tecnologie che definiscono la nostra era moderna, dai semiconduttori che alimentano i computer ai LED che illuminano le nostre case, dalla

risonanza magnetica che salva vite umane ai pannelli fotovoltaici che catturano l'energia solare.

La meccanica quantistica, per quanto controintuitiva, è la teoria fisica più precisa mai sviluppata dall'umanità.

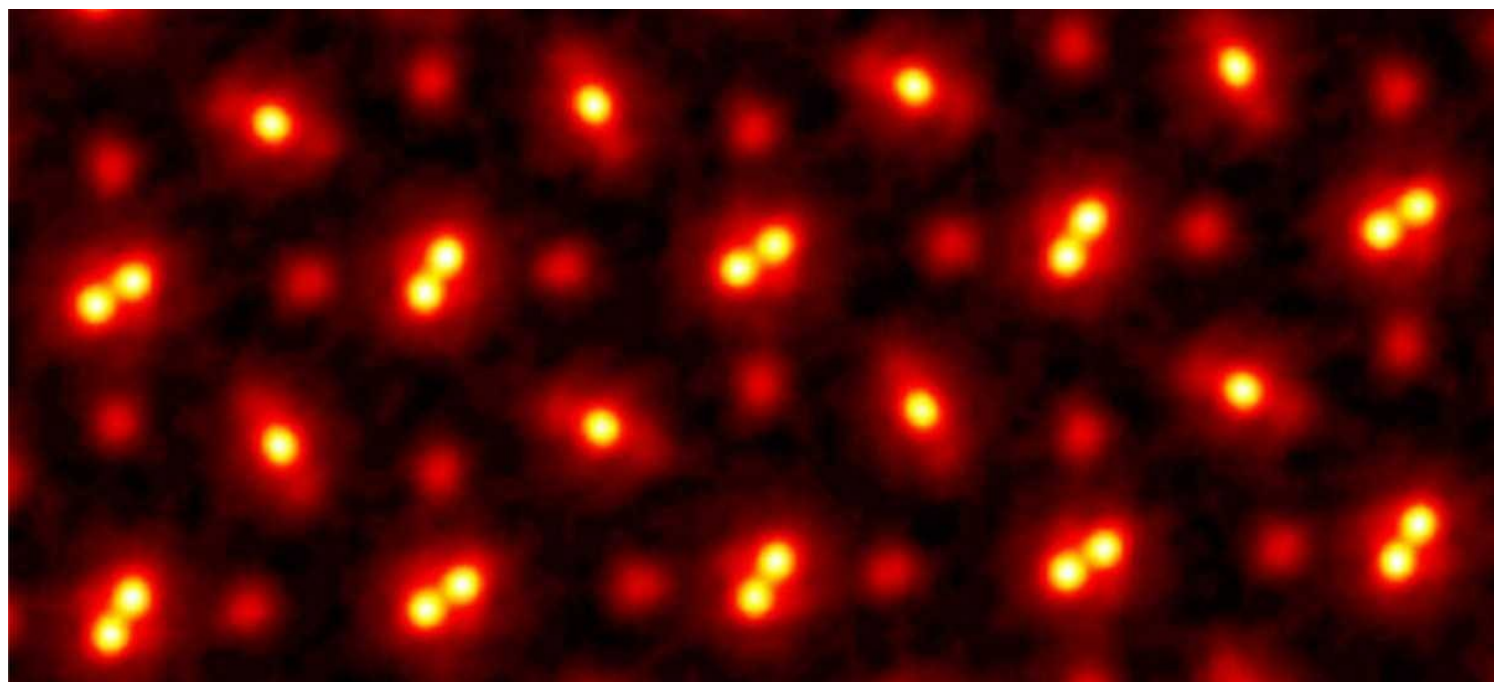
Il **modello planetario**, pur con i suoi limiti, mantiene valore didattico come punto di partenza per comprendere concetti come i livelli energetici. L'importante è riconoscere che rappresenta solo un'approssimazione di una realtà molto più ricca e affascinante.

Forse la lezione più profonda è che la natura, al suo livello più fondamentale, sfida costantemente le nostre intuizioni.

Come scrisse il biologo J.B.S. Haldane: "*L'universo non è solo più strano di quanto immaginiamo, è più strano di quanto possiamo immaginare.*"

In questo senso, la meccanica quantistica non rappresenta solo una teoria scientifica, ma un invito all'umiltà intellettuale e alla meraviglia di fronte al mistero profondo dell'esistenza. Ci ricorda che la realtà è sempre più ricca e complessa delle nostre rappresentazioni mentali, e che il progresso della conoscenza richiede la disponibilità ad abbandonare le nostre concezioni più radicate quando la natura ci mostra qualcosa di nuovo.

L'atomo non è come lo immaginiamo, ed è proprio per questo che è ancora più straordinario.



Ricostruzione pticografica elettronica di un cristallo di praseodimio ortoscandata (PrScO3) con risoluzione record di 100 milioni di ingrandimenti.

La pticografia (**ptychography**) è una tecnica di imaging computazionale avanzata che ricostruisce immagini ultra-precise analizzando come fasci di elettroni si diffrangono quando colpiscono gli atomi da angoli diversi, proprio come ricostruire la forma di un oggetto nascosto osservando le ombre che proietta.

I punti luminosi gialli rappresentano singoli atomi: **le coppie luminose sono atomi di praseodimio**, i **punti singoli più brillanti sono atomi di scandio**, mentre **le aree rosse più tenui corrispondono agli atomi di ossigeno**.

L'alone rosso che circonda ogni atomo non è un artefatto dell'imaging, ma la visualizzazione diretta delle vibrazioni termiche atomiche - il movimento quantistico che definisce la temperatura della materia.

Questa è stata l'immagine con **la più alta risoluzione di atomi individuali fino al 2025**, quando nuove tecniche di pticografia stanno permettendo di superare questo record e visualizzare per la prima volta atomi liberi in movimento.

Tecnica: Electron ptychography - Risoluzione: <20 picometri - Pubblicazione: Science, maggio 2021

Credito: Cornell University/David Muller Lab

IL COSMO AL BRASIMONE

GITA SCIENTIFICA AL CENTRO ENEA DEL BRASIMONE

di Davide Borghi



Dopo tanta preparazione ci siamo riusciti: siamo stati in gita al centro ENEA del Brasimone!

È stata un'occasione per approfondire temi di ricerca e sviluppo sulla Fusione Nucleare e sulla Fissione Nucleare di ultima generazione, ma anche di visita ad un centro che è stato, ed ora si riconferma, **un vanto della scienza italiana**.

In particolare, abbiamo rilevato una enorme competenza, di livello mondiale, sui **materiali in condizioni estreme e sui metalli liquidi**. E tanto entusiasmo da parte dei ricercatori, che sono di tutte le età, anche e soprattutto giovani.

Innanzitutto, c'eravamo davvero tutti fra quelli che si erano iscritti alla gita: ben **26 persone**! Un successo di pubblico e di interesse per la nostra associazione! (Anche considerato il fatto che era in un giorno feriale visto che non c'erano altre possibilità).

Ci accoglie una giornata non troppo calda, con aria frizzante e cielo blu.

Abbiamo iniziato coi laboratori sugli aspetti di **Fusione Nucleare**. Prima di proseguire è opportuno un approfondimento.

Approfondimento: cos'è la Fusione Nucleare?

Due o più atomi (leggeri) vengono avvicinati, compressi e riscaldati a tal punto per cui l'agitazione termica fa superare la repulsione coulombiana provocando una fusione tra loro generando il nucleo di un elemento di massa minore della somma dei due originali.

La fusione di elementi fino ai numeri atomici 26 e 28 esclusi (ferro e nichel) è una reazione esotermica, cioè emette energia, essendovi una perdita di massa; per numeri atomici superiori la reazione è endotermica.

La differenza di massa (dovuta all'energia di legame) dopo la fusione o fissione è trasformata in energia: $E=mc^2$

Le stelle sono reattori a Fusione Nucleare naturali.

Elementi che fonderanno	Prodotto della fusione	Energia generata
Deuterium + Tritium	Neutron + Helium-4	17.6 MeV
Deuterium + Deuterium	50% Neutron + Helium-3 50% Hydrogen + Tritium	3.3 MeV 4.0 MeV
Deuterium + Helium-3	Hydrogen + Helium-4	18.4 MeV
Helium-3 + Helium-3	Hydrogen + Hydrogen + Helium-4	12.9 MeV

Con deuterio e trizio si genera un neutrone, elio-4 e 18MeV di energia. Il neutrone generato può essere un problema perché nel tempo può danneggiare e rendere radioattivo il corpo del reattore che quindi avrà una sua vita utile.

Inoltre, il deuterio si trova in natura e in abbondanza negli oceani terrestri, mentre il trizio invece no (è infatti radioattivo e quindi decade), per cui bisogna crearlo. Ad esempio, tramite reattori a fusione nucleare.

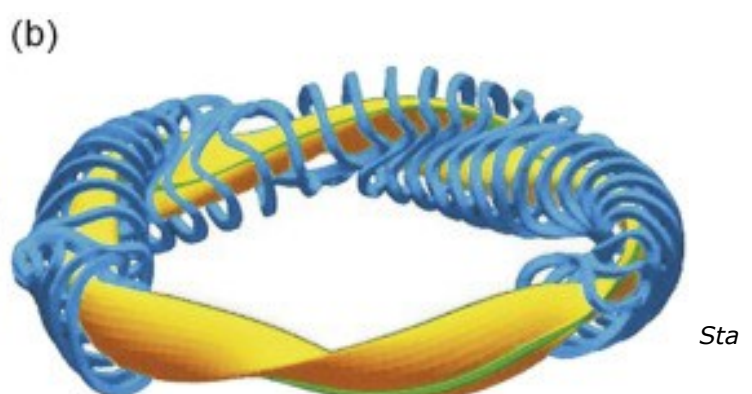
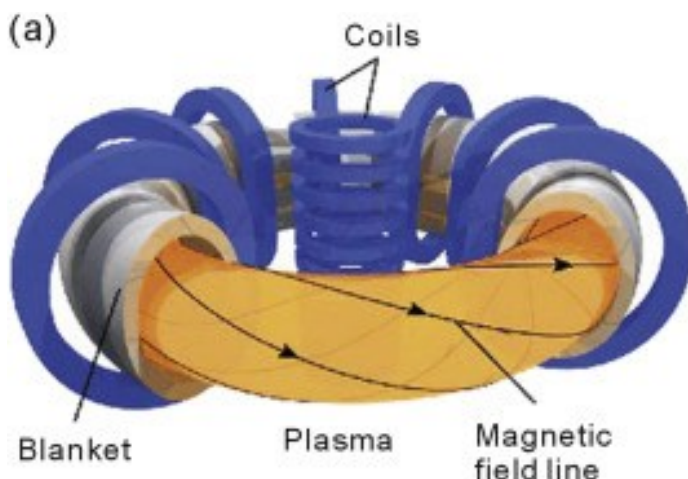
Infatti, con deuterio e deuterio si crea anche trizio, oltre ad elio-3, ma la reazione crea poca energia ed è quindi inefficiente.

Ma se la reazione usasse elio 3 il discorso cambia: l'elio-3 si può creare con la reazione precedente ma si trova anche sulla superficie lunare in abbondanza; ragion per cui americani e cinesi vogliono tornare sulla Luna...

Con deuterio ed elio-3 si ottiene Idrogeno, elio-4 e tanta energia: 18.4MeV. E niente pericolosi neutroni liberi ad alta energia.

Ma perché è così difficile la fusione? (Il «confinamento»). Le temperature necessarie per arrivare alla fusione di due atomi leggeri (isotopi di idrogeno) sono di diverse decine di milioni di gradi celsius. I gas (cioè il plasma) in fusione non devono venire a contatto con nessun tipo di contenitore. Bisogna quindi tenere il processo «confinato» a distanza.

Il confinamento magnetico (usato ad esempio nell'ITER in Francia o nello stellarator in Germania) fun-



zione così: il plasma viene racchiuso all'interno di "bottiglie magnetiche" a forma di ciambella (toroide, tokamak o stellarator) e riscaldato fino a portarlo alle condizioni richieste.

I tokamak sono simmetrici e confinano tutte le particelle senza collisioni. Ma la corrente toroidale è normalmente generata da un trasformatore, il che rende il dispositivo vulnerabile alle instabilità guidate dalla corrente (che circola nel plasma).

Gli stellarator, intrinsecamente privi di corrente sono in grado di far funzionare il plasma in uno stato stazionario. Ma le particelle non più confinate possono portare a un elevato trasporto di particelle energetiche e termiche.

Il ricercatore ci mostra un impianto per estrarre il prezioso **trizio** in modo efficiente e a livello industriale. Il trizio al momento costa 30 mila Euro al grammo sul mercato internazionale e ne esistono solo pochi Kg al mondo.

Il metodo prevede un mantello che avvolge il toroide del tokamak, con tre funzioni:

- 1) Produrre trizio
- 2) Schermare i magneti
- 3) Asportare calore

Il mantello usa litio che reagisce con i neutroni generati dalla fusione con reazione esotermica (cioè consuma calore) e molto efficiente: in pratica assorbe neutroni e li converte in trizio. Inoltre, contribuisce alla sostenibilità del ciclo del combustibile, protegge le pareti del reattore e assorbe calore e radiazioni.

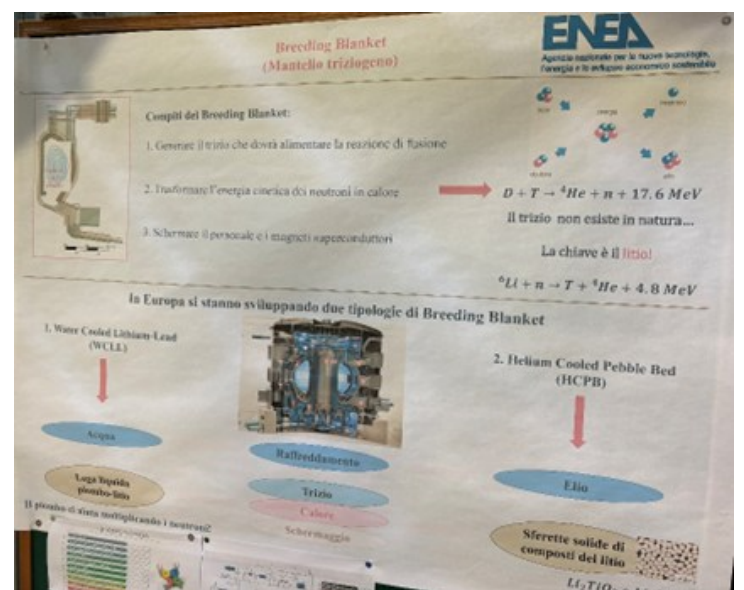
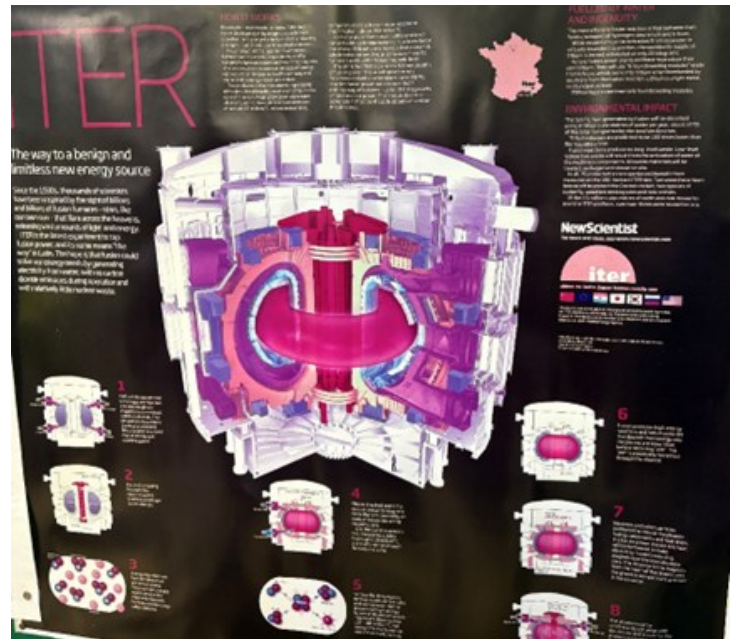
Ma questa è già letteratura scientifica consolidata.

Il contributo originale del centro ENEA del Brasimone sta nel piombo liquido aggiunto.

La **lega eutettica piombo-litio (LiPb)** è una miscela liquida molto promettente per i reattori a fusione, soprattutto nei sistemi chiamati **breeding blanket**, che hanno il compito di generare trizio, assorbire calore e schermare le radiazioni.

Il piombo contribuisce alla **moltiplicazione neu-**

tronica e quindi alla diffusione dei neutroni, contribuendo indirettamente alla produzione di Trizio.



Inoltre, la lega LiPb ha un punto di fusione relativamente basso ($\sim 235^{\circ}\text{C}$) e può operare a temperature elevate ($>700^{\circ}\text{C}$), ideale per trasferire calore. Infine, rispetto al litio puro, la lega LiPb è meno reattiva e più stabile, riducendo i rischi di corrosione e migliorando la sicurezza del reattore.

Il piombo è fatto fluire con una pompa magnetica.

Oltre al piombo, come moltiplicatore può essere usato anche il **berillio**, che ha anche buone proprietà termiche e può contribuire alla distribuzione del calore nel blanket, anche se non è il materiale principale per la gestione termica. In pratica, il Berillio è come un "booster" silenzioso: non fa parte della reazione di fusione diretta, ma potenzia l'efficacia del sistema complessivo, rendendo la produzione di trizio più efficiente.

Non è però tutto così semplice: ci sono delle sfide da vincere. Il flusso continuo di LiPb può danneggiare le pareti in acciaio del reattore. Per questo si studiano rivestimenti protettivi come l'ossido di alluminio o il carburo di silicio e il Brasimone qua ha diverse soluzioni (che non sono del tutto rivelabili per ragioni di confidenzialità). L'Italia è quindi coinvolta nello sviluppo del **WCLL (Water-Cooled Lithium-Lead Blanket)** per il reattore ITER, dove la lega LiPb è usata per generare trizio e trasferire calore. ENEA e altri centri di ricerca stanno studiando le proprietà termofisiche e chimiche della lega per ottimizzarne l'uso nei futuri reattori a fusione.

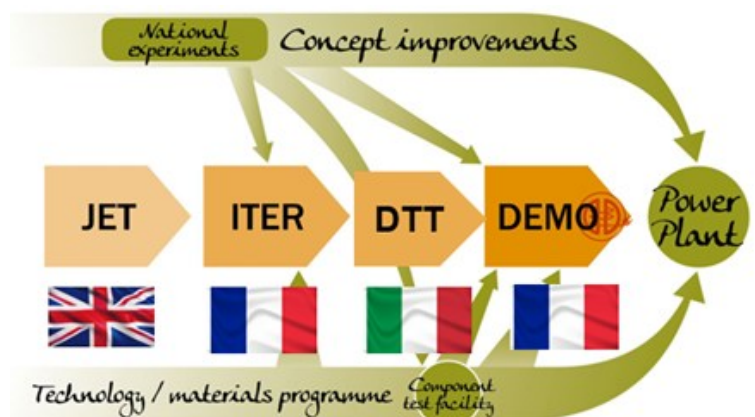


Un'altra tecnologia chiave entra in gioco: il **Permeator Against Vacuum (PAV)** per l'estrazione

del trizio nel blanket a litio-piombo (LiPb), come nel concetto WCLL (*Water-Cooled Lithium Lead*) del reattore europeo DEMO. Consente di estrarre trizio direttamente dal LiPb sfruttando la permeazione attraverso una membrana metallica. Da un lato della membrana c'è il LiPb liquido, che contiene trizio, mentre all'altro lato c'è il vuoto, mantenuto tramite pompe. Il gradiente di pressione parziale del trizio tra i due lati induce la sua diffusione attraverso la membrana, dove viene raccolto e inviato al sistema di gestione del combustibile. Sono usate membrane in **niobio** o **vanadio**: scelti per la loro alta permeabilità al trizio e compatibilità con LiPb₂, con **struttura in acciaio F22** (resistente alla corrosione da LiPb e compatibile con le condizioni operative). Anche qua ci sono sfide da vincere: la giunzione dei materiali, siccome il niobio ha un punto di fusione molto più alto dell'acciaio, quindi non si può saldare facilmente. Si usa quindi una brasatura sottovuoto con leghe a base di nichel. E la **compatibilità chimica**: il niobio è stato testato in flussi di LiPb a 500°C per oltre 4000 ore per verificarne la resistenza. Il prototipo **PAV-ONE** (☺) è stato realizzato e installato presso il centro ENEA Brasimone, dove viene testato nella struttura **TRIEX-II**.

Questi test simulano condizioni operative reali del blanket WCLL, con temperature tra $350\text{--}450^{\circ}\text{C}$ e pressioni parziali di idrogeno tra $100\text{--}300\text{ Pa}$.

ENEA, ENI, INFN partecipano a **DEMO** e **DTT Divertor**** successore di ITER, per dimostrazione industriale di produzione di elettricità con tokamak.



Ci hanno citato anche il processo **Helium-Cooled Pebble Bed (HCPB)**: è un design affascinante di blanket per reattori a fusione, sviluppato principal-

mente in Europa — incluso da programmi come EU-DEMO. Contiene piccoli granuli (pebbles) di ceramici al litio come Li_4SiO_4 o Li_2TiO_3 . Questi materiali interagiscono con i neutroni per generare trizio. E il **berillio** è usato come moltiplicatore di neutroni per aumentare l'efficienza della reazione di breeding. Spesso disposto in strati alternati o miscelato con le sfere. Infine, è usato elio come fluido refrigerante che circola nel blanket per rimuovere il calore. L'elio è chimicamente inerte, non attivabile, e consente alte temperature operative — ideale per generare elettricità con efficienze elevate. In pratica i neutroni prodotti dalla fusione colpiscono il berillio, generando neutroni secondari. Questi neutroni **reagiscono con il litio nei pebbles**, producendo trizio. Il **calore generato viene rimosso** dall'elio, che passa attraverso canali di raffreddamento. Il HCPB usa quindi materiali solidi (pebbles) e non liquidi

Il concetto HCPB (*Helium-Cooled Pebble Bed*) è quindi una **soluzione alternativa** al blanket con **lega litio-piombo (LiPb)**, ma entrambi condividono lo stesso obiettivo: supportare la reazione di fusione producendo **trizio**, rimuovendo calore e schermando dai **neutroni ad alta energia**.

Infine, con HCPB, c'è anche il sistema **Hydrex** che è una tecnologia avanzata per l'estrazione del trizio nei blanket solidi come l'HCPB (*Helium-Cooled Pebble Bed*).

Hydrex (*Hydrogen Extraction*) è un sistema basato su membrane permeabili al trizio, progettato per estrarre il trizio dal gas di spurgo (tipicamente elio con piccole quantità di idrogeno) che attraversa il letto di sfere ceramiche al litio. Il trizio generato nel blanket viene rimosso dal letto ceramico tramite il gas di spurgo. Questo gas, contenente trizio, viene inviato al sistema Hydrex, dove passa attraverso **membrane metalliche** (es. palladio o leghe speciali). Il trizio **diffonde attraverso la membrana** e viene raccolto in un circuito secondario sottovuoto.

Nel concetto HCPB, il trizio è prodotto nei pebbles di Li_4SiO_4 o Li_2TiO_3 , e viene rimosso tramite elio purificato. Hydrex è uno dei sistemi proposti per la **gestione del trizio** in modo sicuro ed efficiente, evitando accumuli e facilitando il recupero per il ciclo

del combustibile.

In sintesi, **Hydrex è il "fratello solido" del PAV**: mentre il PAV lavora con blanket liquidi come LiPb, Hydrex è pensato per blanket solidi come HCPB. Entrambi mirano a **chiudere il ciclo del trizio**, ma con tecnologie adattate ai materiali coinvolti.

C'è poi l'impianto sperimentale **IELLO** (sì con tre L) che è stato installato nel laboratorio ENEA Brasi-mone nel 2007 con lo scopo di supportare la progettazione dei moduli di test a mantello liquido che saranno installati nell'ITER e di contribuire allo sviluppo delle tecnologie Piombo-Litio Eutettico (LLE).

I macchinari che vediamo vanno spesso con Idrogeno invece che Trizio, ovviamente, dato il costo del Trizio, e viste le proprietà simili dell'Idrogeno e del suo isotopo trizio.

L'opportunità non è solo quella di studiare l'estrazione efficiente del Trizio, ma anche quella di inventare e sviluppare nuova strumentazione e nuovi materiali che possono essere usati in altri campi, con possibili ricadute commerciali.



Abbiamo anche visto **HEFUS3** (*Helium Fusion Simulator 3*) che è un impianto sperimentale con loop **ad elio ad alta pressione e temperatura**, pensato per testare componenti e sistemi dei blanket a fusione, in particolare per i concetti **HCLL** (*Helium-Cooled Lithium Lead*) e **HCPB** (*Helium-Cooled Pebble Bed*). È in pratica una **piattaforma strategica per la fusione nucleare europea**, che consente di testare e qualificare materiali, componenti e modelli

numerici in condizioni simili a quelle dei futuri reattori. Serve in particolare per la simulazione termoidraulica: riproduce le condizioni operative dei blanket di reattori a fusione, con pressioni fino a 80 bar e temperature fino a 530 °C. Ma anche per la **validazione di codici numerici** (ad esempio per imparare a gestire i transitori e gli scenari incidentali) e per i **test su componenti prototipici**.



E qua entrano in gioco i giapponesi di **Kyoto Fusionneering**, startup nata come *spin-off* dell'Università di Kyoto, che **collabora con ENEA e altri enti europei** per sviluppare tecnologie critiche per i reattori a fusione. *Kyoto Fusionneering* non costruisce direttamente HEFUS3, che è fatto al Brasimone da ENEA, ma **fornisce know-how, componenti e supporto ingegneristico** per testare e qualificare tecnologie che saranno usate nei reattori DEMO e commerciali.

Siamo poi passati in un altro edificio per iniziare a parlare e vedere di **Fissione Nucleare**.

Abbiamo visto nuovamente l'uso di Piombo liquido, ma stavolta principalmente come estrattore di calore. **Il piombo liquido** è infatti uno dei refrigeranti più promettenti per i reattori nucleari di quarta generazione, in particolare per i **Lead-cooled Fast Reactors (LFR)**.

Ha infatti numerosi vantaggi:

- **Sicurezza intrinseca**: il piombo non reagisce violentemente con l'acqua o l'aria (a differenza del sodio), riducendo il rischio di incendi o esplo-

sioni in caso di perdite.

- **Alta temperatura di ebollizione**: oltre 1700 °C, consente di operare a temperature elevate senza pressurizzazione, migliorando l'efficienza termica.
- **Schermatura naturale**: il piombo è un eccellente assorbitore di radiazioni gamma, riducendo la necessità di schermature aggiuntive.
- **Circolazione naturale**: grazie alla sua densità e conducibilità termica, può circolare anche senza pompe, aumentando la sicurezza passiva.
- **Solidificazione protettiva**: in caso di incidente, il piombo solidifica rapidamente, sigillando il nocciolo e limitando la dispersione di materiali radioattivi.
- **Compatibilità con combustibili avanzati**: come nitruri e carburi di uranio/plutonio, che offrono migliori prestazioni e minore produzione di scorie

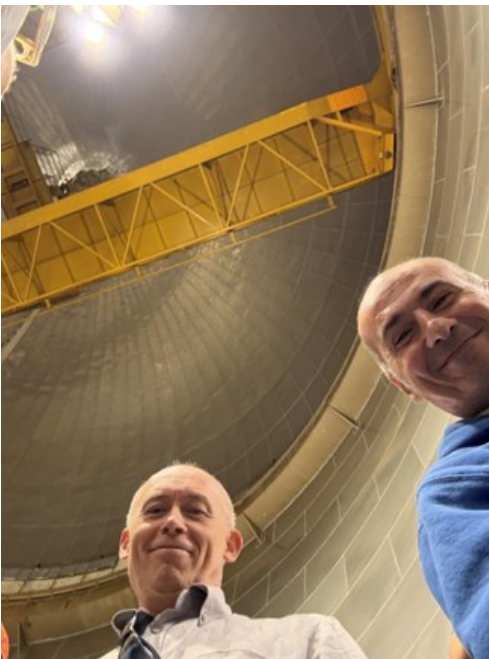
Inoltre, il Piombo liquido offre sostenibilità e gestione delle scorie, con basso impatto ambientale ed è considerato una risorsa abbondante: il piombo è più disponibile e meno costoso rispetto ad altri metalli liquidi come il bismuto. Il piombo liquido offre quindi **robustezza, sicurezza e sostenibilità**, rendendolo ideale per i reattori di IV generazione.

Abbiamo poi visto **CIRCE (Circolazione Eutettica)** ovvero un impianto sperimentale progettato e realizzato per supportare lo sviluppo della tecnologia dei metalli liquidi pesanti per gli impianti nucleari a fissione. Utilizza come fluido di lavoro la lega (detta eutettica) di piombo-bismuto. Lo scopo è investigare il comportamento termo-fluidodinamico di sistemi nucleari a piscina refrigerati a metallo liquido pesante.

Nell'attuale configurazione, denominata **ICE (Integral Circulation Experiment)** è installata una sorgente termica della potenza di 1 MW, ed uno scambiatore di calore prototipico proposto come sistema di rimozione del calore di decadimento di un sistema LFR. Gli esperimenti condotti hanno permesso di dimostrare la fattibilità tecnologica del reattore LFR in scala 1 MW, analizzandone il com-

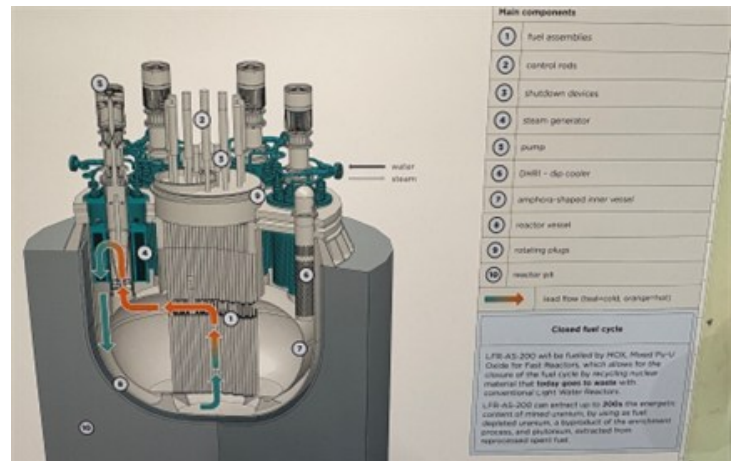
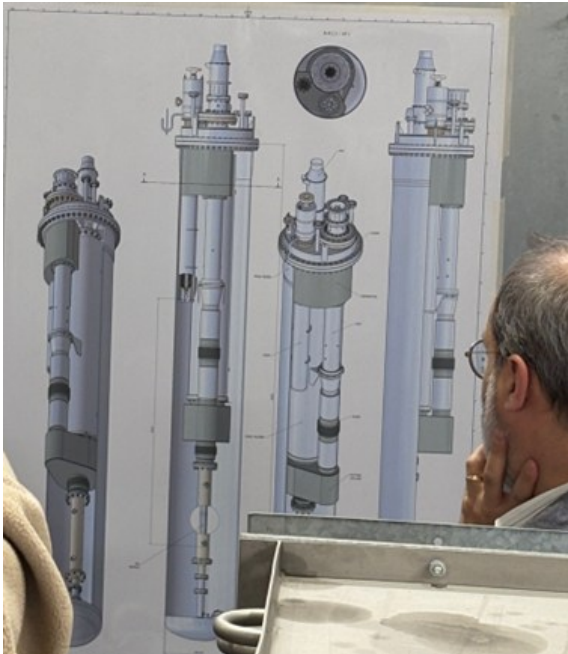
portamento termo-fluidodinamico, e qualificando i sistemi ausiliari presenti al contorno del nocciolo.

Siamo entrati nella camera del nocciolo del reattore sperimentale, realizzata mezzo secolo fa e mai completata col nocciolo del reattore. Si tratta infatti di una **struttura incompiuta del reattore PEC (Prova Elementi di Combustibile)**, un impianto nucleare sperimentale che avrebbe dovuto essere raffreddato a sodio liquido. Progettato negli anni '70 come parte del programma italiano sui reattori veloci, in collaborazione con la Francia, la costruzione **è andata avanti fino al 1987**, quando le opere civili erano completate al 95% e quelle nucleari all'85%. Ma non è stato **mai attivato**: dopo l'incidente di Chernobyl e il referendum sul nucleare del 1987, il progetto fu abbandonato.



Abbiamo quindi visitato quello che rimane oggi: la **cupola grigia** visibile da fuori è la struttura di contenimento del reattore PEC. All'interno, ENEA ha

riconvertito gli spazi per la **ricerca sulla fissione di IV generazione** e sulla **fusione nucleare**, come appunto **CIRCE**. In pratica, il PEC è diventato una sorta di "cattedrale incompiuta" del nucleare italiano, inclusi i reattori modulari sicuri e sostenibili.



La visita si è conclusa con una visita ai laboratori di **NewCleo** (pronunciato in modo simile alla parola "Nucleo" in italiano), startup creata nel 2021, con ora la capacità di progettare sistemi per reattori a fissione di ultima generazione, sviluppando quindi competenze e servizi a supporto dell'intero settore nucleare. È composta da ben 1100 innovatori nel settore nucleare e una di loro ci ha illustrato gli impianti e la relativa sala di controllo.

Al termine abbiamo anche fatto una foto di gruppo includendo l'altro gruppo che si è unito a noi nella visita: un gruppo di dipendenti dell'**Amaro Montenegro**!

In uscita dalla gita scientifica, non poteva mancare un ottimo pranzo a base di "carnaccia" al ristorante Da Gilberto dall'altra parte del lago del Brasimone.

La prossima gita scientifica della nostra associazione Il COSMo si terrà il **6 Settembre 2025 al centro INFN di Legnaro** (Padova) dove si continuerà a vedere e parlare di tecnologie nucleari. Se volete partecipare ditemi qualcosa. A presto!

PS: in chiusura vorrei ringraziare il socio COSMo **Flavio Tabanelli** che mi ha fornito i suoi preziosi appunti, presi durante la visita, senza i quali molti dei dettagli di questo articolo sarebbero stati persi.

LINK WEB

(per aprire: Ctrl+click)

[ENEA: Centro Ricerche Brasimone](#)

[Newcleo: pagina web/](#)



IL TELESCOPIO CHE FILMERÀ L'UNIVERSO

Dal fotogramma al film: il Vera C. Rubin Observatory inaugura l'era dell'astronomia in time-lapse

di Roberto Castagnetti



Nelle remote montagne del Cile settentrionale, a oltre 2.600 metri di altitudine, sorge quello che molti considerano il più ambizioso progetto astronomico del XXI secolo.

Il **Vera C. Rubin Observatory**, che ha avviato la sua operatività scientifica quest'anno, promette di rivoluzionare la nostra comprensione dell'universo grazie alla più vasta indagine "cinematografica" del cielo mai realizzata.

Una Visione Pionieristica

La storia di questo straordinario osservatorio prende forma nei primi anni 2000, quando un gruppo di astronomi visionari immaginò un telescopio **capace di mappare l'intero cielo australe ogni tre notti**. Un'idea audace: invece di concentrarsi su singoli oggetti celesti come fanno i telescopi tradizionali, il

nuovo strumento avrebbe "**sorvegliato costantemente**" ampie porzioni di cielo, componendo un vero e proprio **film dell'universo in movimento**.

La nascita del progetto rispondeva a una consapevolezza sempre più diffusa nella comunità scientifica: **molti dei fenomeni più affascinanti del cosmo sono transitori o variabili**.

Supernove che esplodono in galassie lontane, asteroidi che attraversano silenziosamente il Sistema Solare, stelle che pulsano o si offuscano cambiando luminosità, buchi neri che divorano materia: eventi effimeri che richiedevano un **nuovo approccio osservativo più sistematico, rapido e continuo**.

Il progetto, inizialmente noto come **Large Synoptic Survey Telescope (LSST)**, ha attraversato oltre **due decenni di sviluppo tecnologico e costruzione**, coinvolgendo istituzioni di ricerca in tutto il

mondo e mobilitando investimenti superiori agli **800 milioni di dollari**.

La costruzione dell'osservatorio è iniziata nel 2015 sul **Cerro Pachón**, una vetta delle Ande cilene già sede di altri importanti telescopi internazionali, sfruttando le eccezionali condizioni di osservazione astronomica del **deserto di Atacama**.



Vista dell'Osservatorio Vera C. Rubin sul Cerro Pachón (Cile) - Crediti: NOIRLab/NSF/AURA/T. Matsopoulos

Nel 2019, la struttura è stata ribattezzata in onore di **Vera Cooper Rubin**, l'astronoma americana che ha fornito alcune delle prove più convincenti dell'esistenza della materia attraverso i suoi studi sulla rotazione delle galassie. Un tributo più che meritato a una scienziata che ha dedicato la vita a svelare i misteri più profondi del cosmo e che ha aperto la strada a intere generazioni di ricercatori e ricercatrici.

ci.

La scelta del nome non è casuale: come Vera Rubin seppe rivelare componenti invisibili dell'universo grazie a osservazioni pionieristiche, così l'osservatorio che porta il suo nome si propone di svelare gli aspetti più nascosti del cosmo.

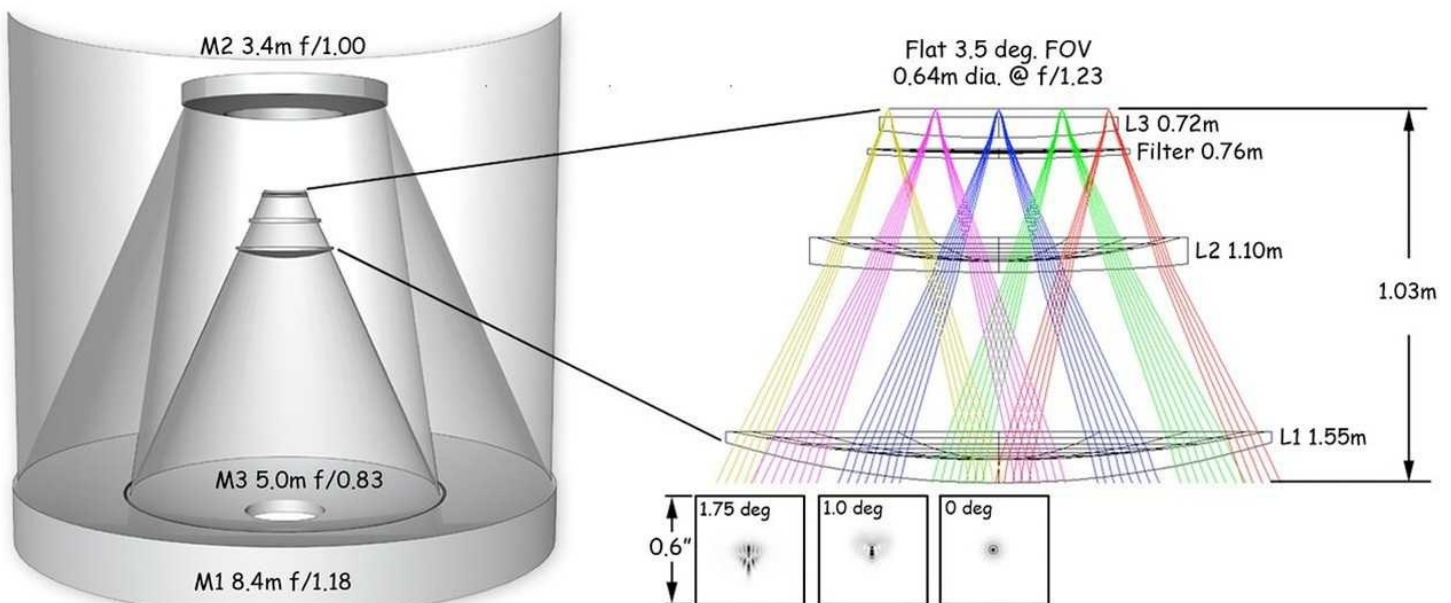


Vera C. Rubin

Un Gigante Tecnologico

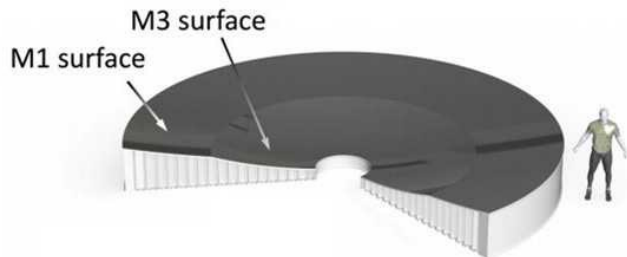
Il cuore pulsante dell'osservatorio è il **Simonyi Survey Telescope**, un telescopio da **8,4 metri di diametro**, dotato di un rivoluzionario sistema ottico a tre specchi (M1, M2, M3) noto come **Design Simonyi**, sviluppato appositamente per massimizzare sia il campo visivo sia la qualità dell'immagine su vaste porzioni di cielo.

Gli specchi primario e terziario (M1 ed M3) sono stati realizzati in un unico blocco dando vita allo



Schema ottico del Simonyi Survey Telescope, con i suoi tre specchi: M1, M2 ed M3

specchio primario/terziario monolitico **Rubin Observatory Primary/Terziary Mirror (M1M3)**. Lo specchio secondario **Rubin Observatory Secondary Mirror (M2)** è il più grande specchio convesso mai realizzato



Il Rubin Observatory Primary/Terziary Mirror (M1M3) a confronto con una figura umana - Crediti: Vera C. Rubin Observatory

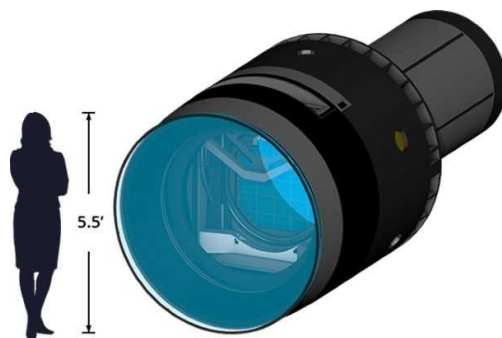
Il telescopio può riposizionarsi da un punto all'altro del cielo in appena **15 secondi**: una velocità straordinaria per uno strumento di queste dimensioni.



Rendering tridimensionale della struttura contenente il Simonyi Survey Telescope - Crediti: Vera C. Rubin Observatory

Ma ciò che rende davvero unico questo strumento è la sua fotocamera digitale (**LSSTCam**): con i suoi **3,2 miliardi di pixel**, è la più grande mai costruita per l'astronomia. Per dare un'idea delle sue dimensioni, questa fotocamera è **grande quanto un'automobile e pesa oltre tre tonnellate**. Il suo sensore principale è costituito da **189 dispositivi CCD** (*Charge-Coupled Device*) di altissima qualità, cia-

scuno dei quali da 16 megapixel, assemblati con precisione millimetrica per formare un mosaico perfettamente uniforme.

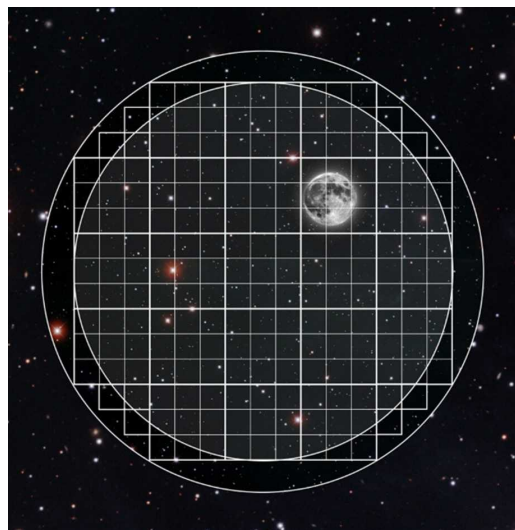


La LSST Camera è la più grande fotocamera mai costruita per l'astrofisica. Si tratta di una fotocamera ottica ad ampia apertura e ampio campo, in grado di visualizzare la luce dalle lunghezze d'onda del vicino ultravioletto al

La realizzazione di questa fotocamera ha rappresentato una sfida ingegneristica senza precedenti. Tutti i componenti devono lavorare in perfetta sincronia, ad una temperatura operativa di **-100°C** per ridurre al minimo il rumore elettronico.

Il sistema di raffreddamento criogenico, i circuiti elettronici di lettura ultra-rapidi e i filtri ottici intercambiabili sono capolavori di tecnologia progettati su misura per questo progetto.

La combinazione di un ampio campo visivo - **equivalente a 40 lune piene affiancate** - e l'incredibile sensibilità della fotocamera permetterà al Vera Rubin Observatory di catturare immagini di qualità e profondità senza precedenti.



Il campo visivo del Vera Rubin Observatory Crediti: Vera C. Rubin Observatory

Ogni esposizione coprirà un'area di cielo di **9,6 gradi quadrati**, e la sensibilità rileverà oggetti fino alla **magnitudine 24.5**, oltre un miliardo di volte più deboli di quanto l'occhio umano possa percepire.

Ogni notte, il telescopio raccoglierà circa **20 terabyte** di dati grezzi, l'equivalente di centinaia di migliaia di foto ad alta risoluzione. Questi dati saranno elaborati quasi in tempo reale da sistemi di calcolo avanzati, capaci di individuare automaticamente cambiamenti nel cielo e allertare la comunità astronomica mondiale entro 60 secondi dalla rilevazione.

Il Vera Rubin Observatory non è soltanto un telescopio: è un **sistema integrato** che comprende sofisticati sistemi di elaborazione e algoritmi di intelligenza artificiale. Il **Data Management System** del Vera Rubin Observatory rappresenta uno dei più sofisticati **sistemi di elaborazione dati** mai sviluppati per l'astronomia, capace di processare, calibrare e catalogare automaticamente miliardi di oggetti celesti. Un'infrastruttura essenziale per gestire il **flusso torrenziale di informazioni** e individuare in tempo reale i fenomeni più interessanti del cosmo.

Il Legacy Survey of Space and Time (LSST)

Il progetto principale del Vera Rubin Observatory è il **Legacy Survey of Space and Time (LSST)**, un'indagine decennale che fotograferà ripetutamente l'intero cielo australe. In **dieci anni di osservazioni**, l'osservatorio produrrà oltre **60 petabyte** di dati: un archivio digitale dell'universo così vasto da richiedere nuovi paradigmi di elaborazione per la sua analisi e comprensione.

La strategia osservativa del LSST è stata meticolosamente pianificata: ogni regione di cielo sarà fotografata circa **1000 volte** nell'arco del decennio, utilizzando sei diversi filtri colorati – ultravioletto, blu, verde, rosso, vicino infrarosso e un filtro a banda larga. Questo approccio multicolore permetterà di determinare **diverse proprietà fisiche** degli oggetti osservati: dalla temperatura alla composizione chimica, dalla distanza alla loro evoluzione nel tempo.

Il programma prevede di catalogare oltre **37 mi-**

liardi di stelle e galassie, realizzando il più completo censimento dell'universo mai realizzato. Ma il vero valore aggiunto non sta solo nel numero di oggetti osservati, bensì nella dimensione temporale delle osservazioni: ogni oggetto sarà monitorato costantemente per un intero decennio, permettendo di studiarne l'evoluzione e di catturare eventi rari e transitori.

Questo approccio, definito **time-domain astronomy**), permetterà di osservare come l'universo evolve nel tempo, rilevando fenomeni transitori come, ad esempio, esplosioni di supernovae, passaggi di asteroidi, attività di buchi neri supermassicci, variazioni stellari, lampi gamma e, forse, altri eventi ancora sconosciuti.

Si stima che l'osservatorio identificherà **circa 10 milioni di eventi transitori all'anno**, trasformando radicalmente la nostra comprensione della natura dinamica del cosmo.

Le Frontiere della Scoperta

Le potenzialità scientifiche del Vera Rubin Observatory sono straordinarie e abbracciano praticamente ogni campo dell'astronomia moderna. La struttura è stata progettata per affrontare alcune delle domande più profonde della cosmologia, sfruttando tecniche di analisi statistica e gestione dati impensabili fino a pochi decenni fa.

Nel campo della **materia oscura** e dell'**energia oscura** – due componenti misteriose che insieme costituiscono il 95% dell'universo – il Vera Rubin Observatory fornirà misurazioni di precisione senza precedenti. Attraverso l'osservazione di miliardi di galassie e l'analisi della loro distribuzione, gli astronomi utilizzeranno tecniche come il *weak gravitational lensing* per mappare la distribuzione della **materia oscura** su scale cosmologiche. L'**energia oscura**, responsabile dell'accelerazione dell'espansione dell'Universo, sarà indagata tramite lo studio di supernove di tipo Ia, dei modelli caratteristici nella distribuzione delle galassie (le cosiddette *oscillazioni acustiche barioniche*) e della crescita delle strutture cosmiche nel tempo.

Il Vera Rubin Observatory rivoluzionerà anche lo

studio del **Sistema Solare**, scoprendo milioni di nuovi asteroidi e comete. Si stima che identificherà oltre **5 milioni di oggetti**, tra cui circa 300.000 asteroidi della fascia principale e decine di migliaia di oggetti transnettuniani. Questa capacità avrà ricadute cruciali per la **difesa planetaria**, consentendo di individuare e catalogare con efficienza inedita oggetti potenzialmente pericolosi per la Terra. Il monitoraggio continuo permetterà di calcolare con precisione le orbite di questi corpi celesti e di prevedere i loro movimenti futuri.

Nel campo dell'**astronomia stellare**, l'osservatorio mapperà la Via Lattea con una ricchezza di dettagli mai raggiunta, tracciando i movimenti e l'evoluzione di miliardi di stelle e aiutandoci a comprendere la storia e la struttura della nostra galassia.

Il progetto contribuirà in modo significativo allo studio dell'**archeologia galattica**, identificando con precisione popolazioni stellari di diverse età e *metallicità* in modo da ricostruire la storia della formazione e dell'evoluzione della Via Lattea.

Le osservazioni delle **stelle variabili** permetteranno di migliorare le misurazioni delle distanze cosmiche, affinando, così, la nostra comprensione della scala dell'universo.

L'**astronomia extragalattica** trarrà enormi benefici dal LSST, con la scoperta e catalogazione di milioni di galassie lontane che ci permetteranno di studiare l'evoluzione delle galassie dall'universo primordiale fino a oggi.

Il telescopio sarà particolarmente efficace nell'identificare galassie ad **alto redshift**, ovvero galassie così distanti che la loro luce ha viaggiato per miliardi di anni prima di raggiungerci, offrendo così una finestra diretta sul passato remoto del cosmo.

Un campo particolarmente promettente è quello dell'**astronomia multi-messaggero**, dove le **osservazioni ottiche** del Vera Rubin Observatory potranno essere combinate con le rilevazioni di **onde gravitazionali**, **neutrini** e **raggi gamma** per ottenere una visione completa di eventi cosmici estremi. Grazie alla sua rapidità di risposta, l'osservatorio sarà lo strumento ideale per il **follow-up** rapido di segnali di onde gravitazionali, permettendo di lo-

calizzare le controparti ottiche di fusioni di stelle di neutroni e buchi neri.

Ma forse l'aspetto più emozionante è la prospettiva di **scoperte inattese**. La storia dell'astronomia dimostra che i grandi *balzi tecnologici* spesso aprono strade impensabili che portano a rivelazioni che cambiano la nostra visione dell'universo.

Con la sua capacità unica di **monitorare ampie porzioni di cielo e di seguire fenomeni variabili su scale temporali che vanno da pochi minuti a interi decenni**, il Vera Rubin Observatory è idealmente posizionato per catturare eventi rari e imprevedibili che potrebbero aprire nuovi orizzonti nella ricerca scientifica.

Verso un Nuovo Paradigma

Il **Vera Rubin Observatory** segna l'alba di una nuova era nell'astronomia: quella dei *big data* cosmici e dell'intelligenza artificiale applicata all'esplorazione dell'universo. Non è soltanto un nuovo telescopio, ma un nuovo modo di fare astronomia – più sistematico, più completo, più aperto alla collaborazione globale.

La gestione e l'analisi dell'enorme flusso di dati prodotti richiederanno approcci radicalmente nuovi. I metodi tradizionali di analisi astronomica, basati sull'esame di singoli oggetti o di piccoli campioni, non saranno più adeguati di fronte a *dataset* di dimensioni senza precedenti. Sarà indispensabile sviluppare algoritmi di *machine learning* e sistemi di intelligenza artificiale capaci di individuare *pattern* nascosti e relazioni complesse all'interno di questa immensa mole di informazioni.

Questo **cambio di paradigma** influenzerà profondamente la formazione delle nuove generazioni di astronomi, che dovranno padroneggiare non solo la fisica e l'astrofisica, ma anche l'informatica, la statistica e le tecniche di analisi dei *big data*. Il Vera Rubin Observatory sta già stimolando la nascita di programmi educativi che integrano l'astronomia tradizionale con le scienze computazionali.

Tutti i dati raccolti saranno resi disponibili gratuitamente alla comunità scientifica mondiale attraverso la **Rubin Science Platform**, un'infrastruttura che

consentirà ai ricercatori di tutto il mondo di accedere e analizzare i dati direttamente online, senza la necessità di scaricare localmente volumi imponenti di informazioni. Questa democratizzazione dell'accesso alla ricerca astronomica di frontiera potenzialmente accelererà il ritmo delle scoperte, permettendo anche a istituzioni con risorse computazionali limitate di partecipare alla ricerca avanzata.

L'impatto del Vera Rubin Observatory si estenderà ben oltre la comunità astronomica professionale. I dati pubblicamente disponibili offriranno opportunità senza precedenti per l'educazione scientifica e la divulgazione. Studenti, educatori e appassionati di astronomia avranno la possibilità di lavorare con gli stessi dati utilizzati dagli scienziati, contribuendo a progetti di *citizen science* e trasformando potenzialmente la divulgazione in partecipazione attiva.

Il progetto è anche un modello di collaborazione scientifica internazionale che coinvolge istituzioni di ricerca di Stati Uniti, Cile, Francia, Regno Unito e molti altri paesi. La condivisione aperta dei dati stabilisce nuovi standard di trasparenza e cooperazione che potrebbero essere replicati in future grandi imprese scientifiche su scala globale.

La condivisione aperta dei dati rappresenta anche un passo significativo verso una scienza più trasparente e collaborativa.

Mentre assistiamo all'inizio delle operazioni scientifiche di questo straordinario strumento, possiamo solo immaginare le meraviglie che ci attendono.

Il Vera Rubin Observatory non solo ci mostrerà l'universo come non l'abbiamo mai visto prima, ma potrebbe anche riscrivere i libri di testo di astronomia per le future generazioni di scienziati.

Dalle prime galassie nate nell'universo primordiale agli asteroidi potenzialmente pericolosi per il nostro pianeta, dalle esplosioni più violente del cosmo alle sottili increspature nello spazio-tempo, questo osservatorio promette di rivelare i segreti più nascosti del cielo – e forse di svelarne altri completamente inattesi.

Il Cosmo sta per svelare i suoi segreti più profondi, e noi avremo il privilegio di essere testimoni di questa rivoluzione scientifica che ridefinirà la nostra

comprensione del posto che occupiamo nell'infinita vastità dell'universo.

Concludo dicendo che questo articolo è solo un'introduzione a questo meraviglioso strumento. Per approfondire il tema vi aspetto **Martedì 21 ottobre 2025 alle ore 21 presso il Civico Planetario "F. Martino" di Modena**. Terrò una conferenza dal titolo:

Vera C. Rubin Observatory: L'Universo in Movimento

Dal Fotogramma al Film: il Vera C. Rubin Observatory e la Nuova Astronomia in Time-Lapse. Per la prima volta nella storia, un telescopio non si limiterà a fotografare l'universo: lo filmerà. Dieci anni di riprese continue del cielo ci permetteranno di osservare nascite stellari, esplosioni cosmiche e la danza invisibile della materia oscura.

Approfondiremo gli aspetti tecnici del Vera C. Rubin Observatory, vedremo la sua storia e guarderemo insieme le sue prime immagini



Posizione del Vera C. Rubin Observatory

GLI EVENTI DEL C.O.S.MO

Di seguito l'elenco (parziale) dei prossimi eventi del C.O.S.Mo. Sono quelli che sono già organizzati, ma altri potrebbero essere realizzati, per questo restate sintonizzati con i nostri social (trovate i link in fondo a questa sezione).



Sabato 6 settembre 2025 – Ore 11:00
Centro INFN di Legnaro (Padova)

Visita al Centro INFN di Legnaro (Padova)
Gite Scientifiche de Il COSMo

Gita scientifica al Centro INFN di Legnaro. Ci troviamo direttamente al centro INFN alle 10:45 con mezzi propri, la visita inizia alle 11:00.

E' necessario essere iscritti all'associazione Il COSMo per aderire all'iniziativa (costo della tessera: 15eur).

Luogo: Viale dell'Università 2, 35020 Legnaro (PD)

Accompagnatore: Davide Borghi

Giovedì 2 ottobre 2025 – Ore 21:00
Presso Il Sagrato degli Artigiani (Modena)

La comunicazione: dalla stampa a Marconi ed ai social su internet

Dibattito sulla comunicazione, la sua evoluzione e gli effetti sulla società e sullo sviluppo della nostra civiltà: dalla stampa a Marconi ed ai social su internet, dalla comunicazione analogica alla grande svolta digitale.

Luogo: Il Sagrato degli Artigiani, via Leonardo da Vinci 270, Modena.

Relatore: Luigi Borghi

Sabato 4 ottobre 2025 – Ore 21:00
Planetario di Modena

Stregati dalla Luna: verso la Luna e oltre, tra esplorazione e immaginazione

In collaborazione con le associazioni Il CICAP, COSMo, CESDA, GAGBA.

La serata è in occasione dell'evento NASA internazionale "Observe The Moon"

<https://moon.nasa.gov/observe-the-moon-night/>

In questa conferenza cercheremo di ripercorrere i punti principali di questa avventura, che rimarrà nella storia, toccando sia gli aspetti tecnici sia quelli umani sia quelli culturali.

Ci sarà quindi occasione di partecipare alla conferenza ma anche di vedere il planetario in cupola nonché di osservare il cielo, Luna compresa ovviamente. L'ingresso è gratuito, ma i posti sono limitati: per partecipare è necessario prenotarsi sul sito

<https://www.planetariodimodena.it/> .

Relatori: Davide Borghi, Ciro Sacchetti, Rita Scaffidi

Martedì 7 ottobre 2025 – Ore 21:00
"Un altro equinozio con il COSMo"
Planetario di Modena

Verità, potere e intelligenza artificiale

Il futuro dell'umanità secondo Noah Harari in Nexus. In un mondo sempre più dominato da algoritmi e intelligenze artificiali, quali sono le implicazioni per la verità, il potere e il futuro dell'umanità? Un invito a esplorare le sfide etiche, politiche e culturali che ci attendono. Un dialogo aperto su come l'IA sta trasformando il nostro modo di pensare, decidere e vivere.

Relatori: Davide Borghi e Leonardo Avella

Martedì 14 ottobre 2025 – Ore 21:00
"Un altro equinozio con il COSMo"
Planetario di Modena

Hubble Space Telescope, il nostro sguardo verso l'Universo

GLI EVENTI DEL C.O.S.MO

Una macchina meravigliosa voluta da tantissimi scienziati e astronomi, all'inizio ebbe grosso un problema di miopia, nulla che non si potesse risolvere con un paio di occhiali e da allora ci ha fatto, e ci fa ancora oggi sognare con le sue strabilianti scoperte e le sue emozionanti immagini, Hubble è stato ed è ancora senza dubbio il nostro sguardo verso l'Universo...

Relatore: *Ciro Sacchetti*

Martedì 21 ottobre 2025 – Ore 21:00

"Un altro equinozio con il COSMo"

Planetario di Modena

Vera C. Rubin Observatory: l'Universo in Movimento

Dal Fotogramma al Film: il Vera C. Rubin Observatory e la Nuova Astronomia in *Time-Lapse*. Per la prima volta nella storia, un telescopio non si limiterà a fotografare l'universo: lo filmerà. Dieci anni di riprese continue del cielo ci permetteranno di osservare nascite stellari, esplosioni cosmiche e la danza invisibile della materia oscura.

Relatore: *Roberto Castagnetti*

Martedì 28 ottobre 2025 – Ore 21:00

"Un altro equinozio con il COSMo"

Planetario di Modena

100Km/s: andiamo su Marte in 45 giorni

Cosa significa oggi e nell'immediato futuro andare su Marte? Oggi un viaggio verso il Pianeta Rosso richiede oltre 6 o 7 mesi: troppo, se vogliamo davvero colonizzarlo. La propulsione nucleare promette di ridurre i tempi a sole sei o sette settimane. Un cambio di paradigma per l'esplorazione spaziale, tra scienza, sfide e visione. Dalla fantascienza alla realtà: a che punto siamo? Un viaggio tra teoria e tecnologia, verso il futuro dell'umanità.

Relatori: *Luigi Borghi*

Mercoledì 5 novembre 2025 – Ore 15:30

Presso APS L'Incontro

La comunicazione: dalla stampa a Marconi ed ai social su internet

Dibattito sulla comunicazione, la sua evoluzione e gli effetti sulla società e sullo sviluppo della nostra civiltà: dalla stampa a Marconi ed ai social su internet, dalla comunicazione analogica alla grande svolta digitale.

Luogo: Largo Alberto Maria Pucci, 7, Modena.

Relatore: *Luigi Borghi*

Giovedì 20 novembre 2025 – Ore 21:00

Presso Il Sagrato degli Artigiani (Modena)

Il Sole: fonte di vita, di morte e di energia

Esploriamo la nostra stella dal punto di vista fisico, la sua vita e la sua morte. Vedremo anche quanto sia fondamentale il suo contributo per lo sviluppo non solo della nostra vita ma anche del progresso dell'umanità. Una fonte di vita, di energia e di morte.

Luogo: Il sagrato degli artigiani, via Leonardo da Vinci 270, Modena.

Relatore: *Luigi Borghi*

Giovedì 27 novembre 2025 – Ore 20:00

Presso Osteria I Gelsi - Soliera (MO)

Cena sociale della nostra associazione Il COSMo

La cena sociale sarà Giovedì 27 Novembre alle 20:00, come le ultime volte all'Agriturismo Ai Gelsi in Via Canalazzo 129, a Ganaceto (la strada di fronte all'Esselunga di Soliera - Appalto).

Luogo: Agriturismo Ai Gelsi in Via Canalazzo 129, Ganaceto (Modena)



GLI EVENTI DEL C.O.S.MO

**Altre attività ed altri eventi sono in fase di organizzazione
Per essere informati è possibile utilizzare il nostro sito**

[Clicca qui per andare alla pagina Eventi](#)

RESTATE AGGIORNATI!

Ma non solo sul sito

SEGUITECI SUI NOSTRI SOCIAL

[Clicca qui per l'elenco dei social](#)

Per Info e Contatti

Sito: www.ilcosmo.net

Email: info@cosmo.net



Il Consiglio Direttivo

Uscita del prossimo numero:

DICEMBRE 2025