

UN CUORE ATOMICO PER LO SPAZIO PROFONDO

*Il futuro è nella
propulsione nucleare?*

Propulsione nucleare: verso Marte e oltre

The Lost Graves of Peenemünde

Victor Boys

Werner Heisenberg: l'uomo e la particella

65

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:****ASTRONAUTICA****100 km/s**

Propulsione nucleare: verso Marte e oltre!

di Luigi Borghi pag. [5](#)

LE NOSTRE RECENSIONI**The Lost Graves of Peenemünde**

Riflessioni sul libro di Mike McLeod e Sean Feast

di Davide Borghi pag. [23](#)

Victor Boys

Riflessioni sul libro di David Graeber e David Wengrow

di Davide Borghi pag. [26](#)

GRANDI PERSONAGGI**Werner Heisenberg**

L'uomo e la particella

di Ciro Sacchetti..... pag. [30](#)

GLI EVENTI DEL C.O.S.MO

L'elenco dei prossimi eventi pag. [56](#)

IN COPERTINA

Lockheed Martin e BWXT, svilupperanno un veicolo per la NASA e la DARPA per dimostrare le tecnologie di propulsione nucleare. Crediti: Lockheed Martin (ricostruzione artistica da fonti: NASA ed ESA)





AVANTI A TUTTA VELOCITÀ: 100Km/s !!!

Nei tre mesi che ci separano dall'ultimo editoriale, la ricerca scientifica ha compiuto passi da gigante in diversi settori a noi cari. Ma prima di illustrarne alcuni, vorrei soffermarmi sui temi principali di questo numero. Affrontiamo in grande dettaglio la propulsione nucleare, una tecnologia che potrebbe ridurre drasticamente i tempi delle missioni spaziali verso lo spazio profondo, permettendo di raggiungere velocità altrimenti impensabili (fino a **100 km/s!**). Di tecnologie nucleari parleremo anche nelle nostre due gite scientifiche, al Brissone e a Legnaro. Inoltre, questo numero ospita due articoli dedicati ad altrettanti libri acquistati a **Duxford** durante la recente gita in Inghilterra: uno sul bombardamento di **Peenemünde**, centro di progettazione e produzione delle V-2, e l'altro sui bombardieri britannici a capacità nucleare dell'immediato dopoguerra. Infine — last but not least — un articolo su Werner **Heisenberg**: un altro protagonista dell'intreccio tra scienza, tecnologia e storia, in una delle fasi più cruciali e tormentate del XX secolo.

Le iniziative che abbiamo portato avanti o a cui abbiamo partecipato come associazione Il COSMo, negli ultimi tre mesi sono molteplici. Procedendo a ritroso cito: la **Space Week** a **Mirandola**, la conferenza privata **"Siamo soli nell'universo?"** tenuta al salotto **"l'infinito"** di Rosario Cardillo a **Carpi**, **Jurassic Cosmo** alla Scuola Primaria Saliceto Panaro, il nostro stand alla **fiera PLAY** a **Bologna** (con diverse visite di **Phil Eklund** — autore del gioco spaziale High Frontier), il corso di Astrofisica e Astronautica presso **UTE a Modena**, gli interventi a **TeleReggio** in collaborazione con gli amici di **REA**, le conferenze primaverili di **"Un altro equinozio con il COSMo"** che hanno visto anche la presenza di un ospite d'eccezione: **Federico Tosi**, ricercatore INAF.

Ma torniamo al presente, agli avvenimenti scientifici e tecnologici degli ultimi tre mesi. Mi concentrerò solo su alcuni, scelti a titolo esemplificativo.

Partendo dallo **Spazio** (sempre in prima fila nei nostri approfondimenti): l'ESA ha lanciato con successo la missione **Biomass**, col razzo Vega-C a forte contributo italiano, con a bordo un satellite per misurare il carbonio delle foreste e studiare suoli e calotte glaciali. Il lancio ha confermato il **ruolo strategico dell'Italia** nel settore aerospaziale, dimostrando la capacità di produrre un vettore completo e competitivo. In questo caso il vettore è realizzato da Avio a Colleferro (Roma), dove sono progettati e costruiti il secondo, terzo e quarto stadio, mentre il primo stadio è frutto di una collaborazione tra Avio e Ariane Group e altri sottosistemi sono forniti da altre aziende italiane dell'indotto aerospaziale, che sta vivendo un periodo di forte crescita (+5,4% su base annua). L'Italia è il **settimo Paese al mondo** per rapporto tra investimenti spaziali e PIL, con un fatturato aerospaziale nazionale di 13 miliardi di euro. Questo è importante soprattutto ora che l'Europa sta cercando di assumere un ruolo più autonomo nella politica ed economia globale.

Spostandoci sulla Luna (il cambio di scala è enorme: dalle poche centinaia di Km delle orbite basse del Vega-C ai 380 mila Km della distanza lunare): il lander privato **Blue Ghost** è atterrato sulla Luna con un carico di tecnologia, inclusa quella italiana. La sonda ha anche fotografato l'eclisse, che sulla Terra era di Luna ma sulla Luna era ovviamente di Sole...

Continuando con l'**Astronomia**: il telescopio spaziale *James Webb Space Telescope* (**JWST**) ha scoperto una stella che ha inghiottito il suo pianeta, un fenomeno mai osservato prima. A circa 12.000 anni luce da noi, nella costellazione dell'Aquila, un insolito lampo di luce si è verificato attorno a una stella simile al Sole. Recenti osservazioni del James Webb rivelano che un "suo" pianeta (10 volte la taglia di Giove!) è probabilmente caduto nella sua stella madre. Del JWST e del suo predecessore HST ne abbiamo parlato anche a Mirandola alla Space Week a cui abbiamo partecipato a Maggio.

Ma non posso non citare i progressi continui e sorprendenti fatti in altri campi alla ribalta, e spesso citati in queste righe: **Intelligenza Artificiale** (AI), Biotecnologie, Computer Science.

Partiamo con l'AI: Amazon ha svelato **Ocelot**, il suo primo chip per il calcolo quantistico. Poche settimane prima Microsoft aveva svelato **Majorana-1**, anch'esso basato su *qubit* topologici, una tecnologia che potrebbe rendere i computer quantistici più stabili e facili da scalare. Abbiamo parlato di questi sviluppi con i ricercatori di UniMoRe alla mostra **Quantum** in Sant'Eufemia a Modena a fine Marzo.

Nel campo delle biotecnologie, è stata sviluppata **Evo 2**, l'intelligenza artificiale più potente mai creata per la ricerca biologica. Un "ChatGPT per CRISPR" (CRISPR è una tecnologia di "*editing genetico*" che consente di modificare il DNA in modo preciso, come se fosse un'editor di testo molecolare), che entusiasma ma pone anche problemi etici: è capace di progettare e analizzare il codice genetico e rappresenta il modello di **biologia computazionale** più grande mai sviluppato, addestrato su oltre 9,3 trilioni di nucleotidi estratti da oltre centomila genomi di altrettante specie viventi attraverso tutto l'albero della vita. È stato sviluppato dall'Arc Institute, l'Università di **Stanford** col colosso dei semiconduttori **NVIDIA**.

Voglio chiudere con una amara notizia italiana legata alla storia dei calcolatori elettronici e della *Computer Science*. Il 18 Aprile ci ha lasciato a 89 anni l'ingegner **Giovanni De Sandre**, uno dei protagonisti dello sviluppo della **Olivetti Programma 101**, considerata a livello internazionale come il **primo personal computer** della storia. Era nel leggendario gruppo della Programma 101 guidato dall'ingegner Pier Giorgio Perotto (1930-2002) con Giuliano Gaiti, Gastone Garziera e Giancarlo Toppi. Il primo computer da tavolo ideato dalla Olivetti venne presentato ufficialmente al BEMA (*Business Equipment Manufacturers Association*) di New York nell'ottobre 1965. Nel 1962 era stato il giovane neo assunto De Sandre a mettere a punto la parte elettronica del primo personal computer. All'epoca, l'americana **General Electric**, dopo l'acquisizione della sezione elettronica della Olivetti, non voleva saperne di un computer italiano. Per evitarne la cancellazione, la Programma 101 fu allora classificata come macchina calcolatrice perché la divisione calcolatori non faceva parte dell'accordo con la General Electric. In quel modo l'invenzione poté essere perfezionata. La Olivetti Programma 101 non aveva processori o circuiti stampati, ma transistor, diodi e condensatori raggruppati in micro-unità funzionali, una tecnologia brevettata appositamente per la macchina. È un pezzo di storia italiana, poco conosciuta dal grande pubblico e di cui, invece, bisognerebbe andare orgogliosi.

Ci vediamo ai prossimi eventi: saremo a Badi (Appennino Bolognese) il 18 Luglio con "**La tigre e la Luna**" a celebrare Rocco Petrone, direttore (di origine italiana) di Cape Canaveral durante le missioni Apollo e poi ancora il 12 Agosto con "**Enrico Fermi – L'ultimo uomo che sapeva tutto**". Poi abbiamo le gite di cui abbiamo già parlato in queste righe: il 4 Giugno saremo al **centro ENEA del Brasimone** (vicino a Badi) e il 6 Settembre ai **Laboratori INFN** di Legnaro (Padova).



Foto a sx, seduti in prima fila: Pier Giorgio Perotto, Giovanni De Sandre; in piedi dietro: Gastone Garziera, Giancarlo Toppi.

Foto a dx: esemplare di Programma 101 (credits: Fondazione Adriano Olivetti); un esemplare analogo si trova al National Museum of Computing, Bletchley Park, U.K.

Il Presidente

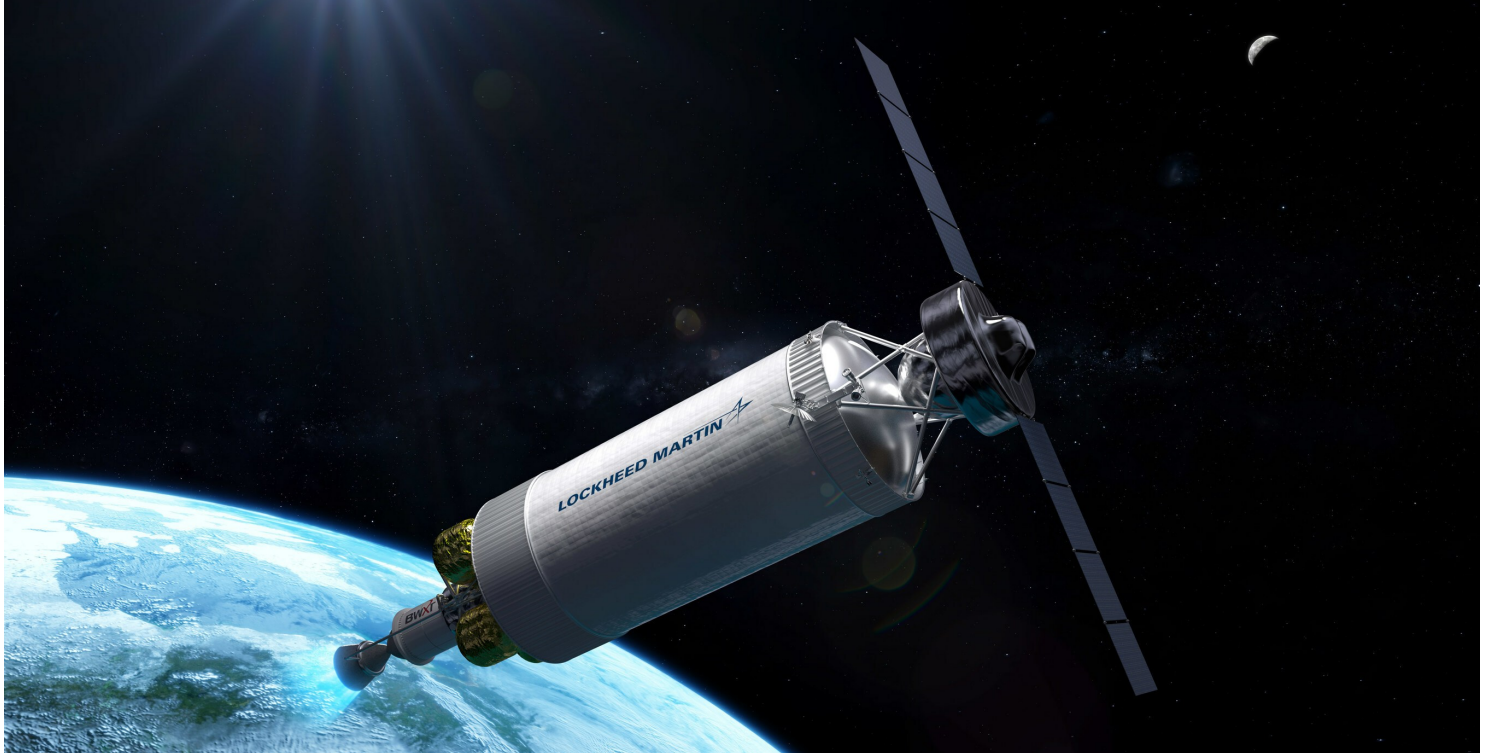
Davide Borghi

davide.borghi@ilcosmo.net

100 km/s

Propulsione nucleare: verso Marte e oltre!

di Luigi Borghi



INTRODUZIONE

Nel mondo accademico ed astronautico, fin da fine millennio, si discute seriamente sulla possibilità di colonizzare altri mondi grazie ai progressi tecnologici e alle motivazioni più o meno valide.

Mi riferisco ovviamente alla colonizzazione dei pianeti e dei satelliti presenti nel nostro sistema solare.

Nessun addetto ai lavori, a parte gli scrittori di fantascienza, immagina di poter colonizzare o visitare oggetti fuori dal sistema solare, come gli esopianeti, anche mettendo il turbo alle nostre proiezioni più rosee dei prossimi sviluppi tecnologici basati su ciò che sappiamo oggi sulle leggi della fisica. Nonostante il pessimismo però, molti scienziati lavorano per sviluppare nuove tecnologie che consentano all'umanità di andare oltre. Ma temo ci vorrà molto tempo.

In realtà, **sia le motivazioni che le tecnologie attuali non sono ancora all'altezza di esplorare**

neanche il sistema solare esterno, se consideriamo di coinvolgere astronauti e non solo robot.

Facciamo fatica ad andare sulla Luna!

Quindi tralasciamo per ora le motivazioni, che meriterebbero un serio approfondimento e dovrebbero essere alla base delle decisioni e concentriamoci invece sull'analisi delle tecnologie.

Ed ecco i 100 km/s !

Se disponessimo di astronavi in grado di ospitare un equipaggio umano per lunghi periodi, con dei propulsori capaci di garantire quella velocità di crociera, **potremmo inviare persone su Marte in meno di un mese e su un satellite di Giove in quattro mesi.** Tempi lunghi, ma umanamente affrontabili.

I tempi di volo brevi garantirebbero una limitata e accettabile esposizione alle radiazioni dello spazio profondo senza la necessità di trasportare pesanti

schermature.

Abbiamo oggi i mezzi in grado di garantire una velocità di 100 km/s? **No!**

Tuttavia, la sonda della NASA **Parker Solar Probe** supera questa velocità durante il suo percorso intorno al Sole, arrivando fino a **195 km/s**, ma solo nel giro di boa intorno al Sole, dopo una vertiginosa caduta verso la nostra stella, per poi ridursi a poco più di **20 km/s** all'afelio della sua orbita molto ellittica.

I nostri obiettivi, Marte, i satelliti di Giove e quelli di Saturno, sono però più lontani dal Sole, il che significa che non possiamo sfruttare la "caduta" nel pozzo gravitazionale del Sole ma dobbiamo generare una spinta significativa per allontanarci dalla forte attrazione, prima della Terra e poi del Sole.

Oggi però, nel settore dei motori a razzo, abbiamo diverse tecnologie emergenti molto promettenti, ancora in fase di sviluppo e di test, che potrebbero garantirci questo traguardo di 100 km/s di crociera e anche oltre, senza dover far affidamento alle cosiddette **"fionde gravitazionali"** di Venere o della Terra che usiamo oggi per arrivare anche solo su Marte e che dilatano di mesi il tempo di viaggio.

La maggior parte di queste tecnologie richiede l'energia nucleare in diverse forme. Con essa è possibile usufruire di rapporti di energia specifica (cioè, energia resa su massa propellente) di almeno un ordine di grandezza superiore rispetto ad un razzo chimico. Nel caso della propulsione nucleare termica questa energia si traduce in un riscaldamento del gas di scarico che passa attraverso l'ugello (il cono convergente-divergente di de Laval) con **temperature molto più elevate** della combustione nei razzi chimici.

Le **elevate temperature** privilegiano l'idrogeno come propellente, poiché la velocità di uscita di un gas dall'ugello del razzo è inversamente proporzionale alla radice quadrata della sua massa. Ciò è stabilito dall'equazione di **Maxwell-Boltzmann** che

$$v \propto \sqrt{kT/m}$$

stabilisce la velocità media delle molecole di un gas

in un flusso supersonico:

dove α sta per "proporzionale a"; v è la velocità delle particelle; k è la costante di Boltzmann, T è la temperatura del gas; m la massa.

L'idrogeno (H_2) ha una massa molare molto più bassa (2 g/mol) rispetto al metano (16 g/mol) o al kerosene ($C_{12}H_{26}$ ~170 g/mol).

Quindi una particella, pesante come un idrocarburo, indispensabile in un motore chimico ma inutile in un motore nucleare, a parità di energia spesa per scaldarlo ha un rendimento molto inferiore all'idrogeno.

Un rendimento che è espresso dall'impulso specifico **Isp**. In termini pratici, un impulso specifico più elevato indica che il motore utilizza il propellente in modo più efficiente, consentendo al razzo di ottenere una maggiore variazione di velocità (delta-v) con una quantità minore di carburante. Si misura in secondi! Semplificando: per quanti secondi riesco a mantenere una spinta di "x" Newton con una massa di propellente di pari massa?

L'idrogeno è perfetto per questo scopo perché è disponibile ovunque nel sistema solare, anche se normalmente aggregato in molecole più complesse come acqua e metano.

Prima di affrontare queste tecnologie cerchiamo di capire cosa significa andare per esempio su Marte, che sembra la destinazione che interesserà di più i nostri astronauti nel prossimo decennio.

1. LA "FINESTRA" DI LANCIO

Marte orbita attorno al Sole in un'orbita ellittica con un semiasse maggiore di 227,94 milioni di chilometri, percorrendo una rivoluzione completa in 1,88 anni (~687 giorni). La sua orbita è inclinata di 1,85° rispetto all'eclittica ed è eccentrica di un fattore 0,093. La terra, come sappiamo, gira intorno al Sole in un anno, quindi bisogna cercare il momento buono, la "finestra" appunto tale per cui il percorso sia il miglior compromesso tra tempo di volo ed energia necessaria per il viaggio.

Quindi è evidente che la "finestra" sarà fortemente condizionata dalla posizione reciproca Terra Marte, ma anche dalla velocità con cui si può percorrere la

traiettoria o, se volete, il trasferimento dal riferimento inerziale terrestre a quello marziano e viceversa. Le condizioni per il lancio si verificano **solo ogni circa 26 mesi**.

2. LA TRAIETTORIA

Nella figura 2.1 si vede bene che la traiettoria è fortemente influenzata dalla velocità.

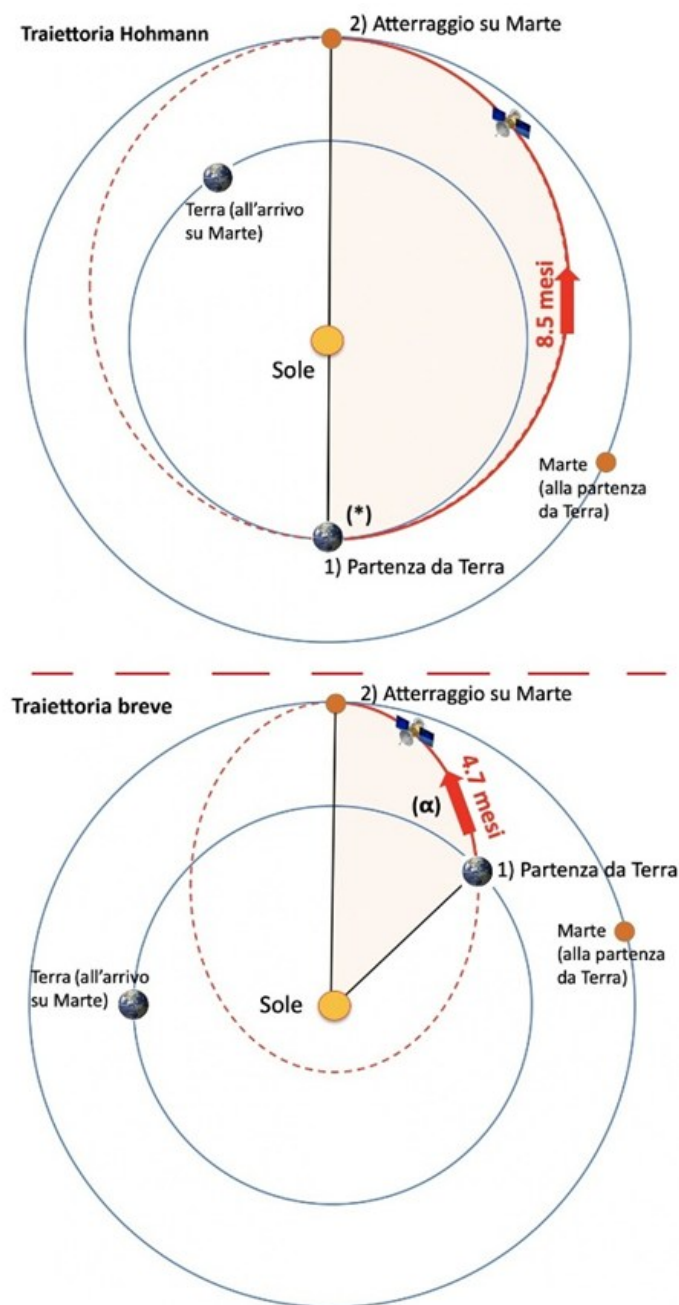


Figura 2.1 Le traiettorie per Marte

Più è alta la velocità che può assumere il veicolo (ma poi vedremo che sarà soprattutto l'accelerazione iniziale) quanto è **più corto** il percorso che biso-

gna fare. Infatti, nel caso lento (sopra, traiettoria **"alla Hohmann"**, la più economica in termini di dispendio di energia) dove impiega **8,5 mesi** (che è la situazione dei viaggi di oggi, 2025), l'astronave parte dalla Terra quando essa non ha ancora superato Marte nel suo percorso intorno al Sole. Nella figura, in alto, la Terra (1, partenza da Terra) si trova circa 50° più indietro di Marte. Il percorso totale sarà pertanto più di una mezza orbita terrestre, cioè circa **400 milioni di km**.

Questa partenza chiamata **"manovra mono ellittica bitangente"** è quella che comporta il minor incremento di velocità da imprimere alla astronave (o delta V). Infatti, **sfrutta in pieno la velocità orbitale della Terra di 30 km/s intorno al Sole, come se fosse un "trampolino" perché sono entrambe sulla stessa tangente e nella stessa direzione (*)**.

Nel caso della traiettoria breve invece (Figura 2.1 in basso), il percorso è di soli 4,7 mesi, quasi la metà, perché anche il percorso è più corto.

Quando l'astronave parte, la Terra ha già superato Marte che ha ancora 4,7 mesi per arrivare all'appuntamento. L'astronave farà pertanto un percorso di soli **100 milioni di km**. Il guaio è che abbreviando la durata del volo, **si perde la piena spinta della Terra** (infatti vi è un angolo α tra la traiettoria della terra e quella dell'astronave. Non è più "tangente"), pertanto c'è bisogno di un incremento di velocità maggiore ovvero maggiore quantità di propellente. E il propellente possiede massa che richiede a sua volta altro propellente per essere trasportato in orbita e accelerato; quindi, il carburante necessario aumenta in maniera esponenziale con l'aumento di velocità richiesto! Insomma, un bel grattacapo!

Da qui si evince che anziché aumentare il propellente potrebbe essere molto più utile un motore più efficiente, con un elevato impulso specifico, come quelli nucleari, che possa garantire una spinta, anche se minore, ma per molto tempo. Lasciarlo acceso ore anziché dieci minuti, porterebbe agli stessi risultati.

Se facciamo un semplice calcolo della velocità me-

dia del percorso scopriamo una stranezza: la velocità del percorso lungo, alla Hohmann, di circa 400 milioni di km in 8,5 mesi è di 18 km/sec.

Il percorso più corto, che intuitivamente dovrebbe essere più veloce, si scopre invece che 100 milioni di km in 4,7 mesi si fanno a 8,2 km/sec.

Andiamo più piano? Sì, mediamente sì, ma bisogna tener conto che dei circa 42 km/s necessari all'inizio per accedere alla giusta traiettoria, nel caso Hohmann, l'astronave ne ha dovuti produrre solo 12 perchè 30 glieli ha regalati la Terra, mentre nel caso della traiettoria breve la povera astronave, dovendo raggiungere la stessa velocità di fuga, **ne dovrebbe produrre quasi 20: il doppio.**

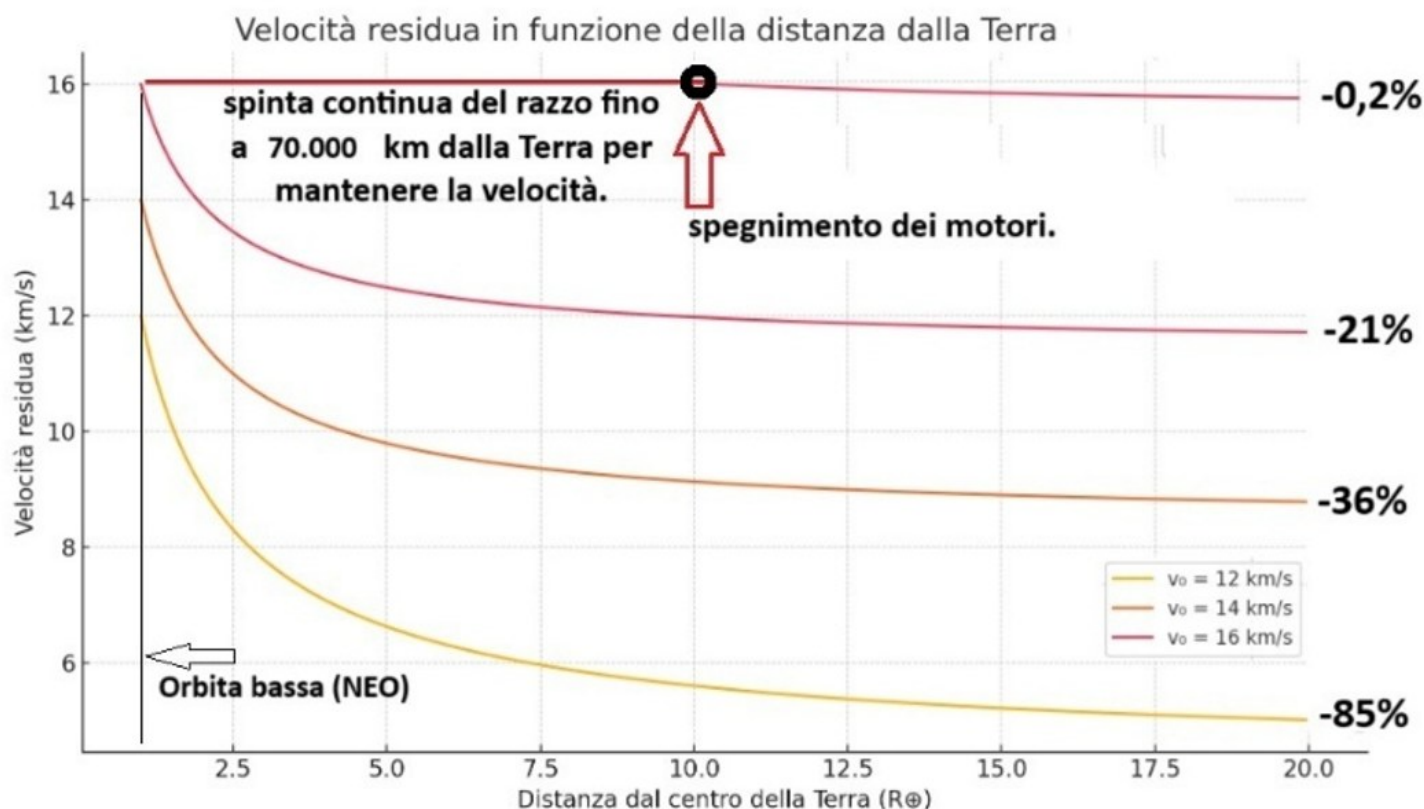
Come si vede dal grafico in fig. 2.2, raggiunta la velocità iniziale relativa alla Terra si spengono i motori e l'astronave va verso la destinazione perdendo continuamente velocità. Questo approccio garantisce risparmio di carburante in andata, **ma anche risparmio di carburante all'arrivo perchè la ve-**

locità finale è abbastanza bassa. Ma se si potessero mantenere accesi i motori, dopo l'accelerazione iniziale, al fine di mantenere i 42 km/s (30+12) ancora per qualche tempo, ecco che il tempo totale si accorcerebbe di parecchio, evitando all'eventuale equipaggio di essere sottoposto a radiazioni e stress per troppo tempo. Ma avrebbe anche controindicazioni notevoli dal punto di vista energetico: **servirebbe molto più carburante per mantenere la velocità di 42 km/s, magari anche salire a 100, all'inizio, ma anche per poi rallentare vigorosamente all'arrivo.**

Nel grafico di figura 2.2. si evidenzia questo aspetto.

Se si esce dall'orbita terrestre a **12 km/s** e si spengono subito i motori, alla distanza di 20 raggi terrestri (oltre 120.000 km) la velocità **sarà inferiore dell'85%.**

Se usciamo con **16 km/s** perderemmo solo il **21%**, ma se continuiamo a spingere fino al punto segnato



$$v(r) = \sqrt{v_0^2 - 2GM_T \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_T} \right)}$$

Figura 2.2 Grafico della velocità residua in funzione di quella iniziale

dalla freccia scopriamo che possiamo continuare verso Marte o verso sistemi esterni con velocità diminuita **solo dello 0,2%**. Quindi maggiore velocità minore tempo! **Molto minore!**

Il grafico in figura 2.2 è approssimativo perché non tiene conto dell'influenza di altri corpi celesti, la cui vicinanza potrebbe aumentare la velocità. Non considera nemmeno che, mentre la sonda si allontana, anche la Terra continua il suo percorso orbitale, modificando così la velocità relativa tra la Terra e la sonda; quindi, sono velocità riferite al punto di partenza.

Quindi per concludere questo capitolo possiamo riassumere che calcolare la traiettoria verso Marte, o qualsiasi altro corpo celeste, è molto complesso, perché vi sono parecchie variabili da valutare.

Bisogna considerare l'accelerazione e la velocità di lancio, la velocità all'arrivo, se entrare in orbita oppure atterrare, la differenza di velocità tra l'astronave e il pianeta target e coordinare la velocità e la direzione dell'astronave con quelle di Marte al momento dell'arrivo, quanto carburante deve avere l'astronave e quanto di questo carburante viene utilizzato semplicemente per accelerare sé stesso. 60 anni fa questi calcoli si facevano con carta, penna e regolo calcolatore. Ora vi sono computer che hanno già in memoria tutti gli algoritmi necessari ed i dati di tutti corpi orbitanti nel sistema solare, quindi è un po' più facile, anche se, volendo essere quasi perfetti, considerando il problema dei tre o più corpi in gioco, la faccenda diventa veramente da grattacapo.

3. LE TECNOLOGIE

Da ciò che è emerso nei capitoli precedenti è evidente che cercare di accorciare il tempo di transito Terra Marte è un obiettivo irrinunciabile nel momento in cui il viaggio deve essere sostenuto da un equipaggio umano. Per questa ragione esamineremo le tecnologie basate su processi nucleari, sia di fissione che di fusione, considerate promettenti.

Restano però accessibili e per nulla inefficaci anche altri scenari basati sulla tecnologia dei razzi chimici, utilizzando la tecnica del rifornimento **spaziale in orbita** per caricare l'astronave di tutto il carburante

necessario per mantenere una velocità elevata e per poi poter "frenare" all'arrivo.

Tra queste proposte con razzi tradizionali la più promettente sembra essere quella di **SpaceX** con la sua **Starship**.

La sequenza di eventi di una missione di questo tipo dipenderà moltissimo dal tipo di carico, se solo robotico o anche umano.

In ogni caso, se la missione prevede il ritorno sulla Terra della Starship che è atterrata su Marte, occorrerà lanciare in anticipo una missione preparatoria robotizzata in grado di garantire la disponibilità di carburante su Marte per rifornire di nuova la Starship che avrà esaurito il combustibile e l'ossidante con la sola missione di andata.

Premesso ciò, Elon Musk ha in previsione una missione suddivisa in diverse fasi:

FASE 1: Lancio dalla Terra

- **Super Heavy Booster:** Starship parte dalla Terra agganciata al suo primo stadio, il **Super Heavy**, che la spinge fuori dall'atmosfera.
- **Separazione:** Il booster rientra sulla Terra per essere riutilizzato, mentre Starship prosegue fino all'orbita, a 7 km/s.

FASE 2: Rifornimento in orbita terrestre

- Starship da sola **non ha abbastanza carburante** per arrivare su Marte e tornare indietro. Per questo motivo, una o più **Starship-tanker** (versione cargo solo per il rifornimento) verranno lanciate preventivamente in orbita terrestre per **trasferire il carburante** a Starship.
- Una volta avvenuto il rifornimento, Starship può accelerare di nuovo fino a 42 km/s (relativi alla Terra) o anche di più se vuol fare prima (ma non arriverà ai 100 km/s) e quindi partire per Marte.

FASE 3: Viaggio interplanetario verso Marte

- La durata del viaggio dipende molto da quanto carburante è stato caricato, dal fatto che vi siano o no astronauti a bordo; quindi, può

durare dai **2 ai 9 mesi**.

- Starship naviga nello spazio utilizzando il **suo sistema di propulsione**, mantenendo un orientamento corretto per la gestione termica e protezione dalle radiazioni e provvedendo ai necessari **aggiustamenti di rotta**.

FASE 4: Atterraggio su Marte

- Starship entra nell'atmosfera marziana ad alta velocità, utilizzando la **schermatura termica** per frenare con l'attrito dell'aria, come fa una capsula spaziale.
- L'atmosfera di Marte però è molto meno densa di quella terrestre; quindi, il **freno atmosferico da solo non basta** pertanto a circa 1-2 km dalla superficie, Starship si assesta con i razzi in frenata e accende i **motori Raptor** per un atterraggio controllato in modalità propulsiva.
- Tocca il suolo e si appoggia sui **piedi di atterraggio**, pronta per rilasciare il carico utile.

FASE 5: Ritorno sulla Terra (Opzionale)

- Se previsto il ritorno, Starship deve **rifornirsi su Marte** con metano e ossigeno prodotti localmente tramite **elettrolisi e Sabatier** (usando CO₂ marziana e acqua ghiacciata) oppure da dei serbatoi portati su Marte da missioni precedenti.
- Una volta caricato di carburante, Starship decolla da Marte e punta alla traiettoria verso la Terra .

FASE 6: Rientro sulla Terra

- Starship rientra nell'atmosfera terrestre a velocità **ipersonica**.
- Usa la **schermatura termica** per dissipare la maggior parte dell'energia con il calore dell'attrito atmosferico .
- Esegue una manovra "**belly flop**" (caduta di pancia) per stabilizzarsi e rallentare ulteriormente.
- A pochi km dal suolo, accende i **motori Raptor** per raddrizzarsi e atterrare verticalmente

sulla piattaforma di SpaceX o su terraferma.

Tuttavia, anche se sulla carta la procedura è chiara, **SpaceX deve dimostrare che è in grado di effettuarla e che il mega razzo è affidabile e sicuro** per un eventuale equipaggio. Andare su Marte è abbastanza "semplice", tornare è tutta un'altra storia!

Un'altra possibilità per i razzi chimici nello spazio profondo potrebbe essere la tecnologia emergente dei razzi chimici a **detonazione rotante**.

Ho avuto modo di esaminare questa tecnologia — **Rotation Detonation Rocket Engine (RDRE)** — nel 2023 attraverso una conferenza al Civico Planetario di Modena, ma anche in una pillola di scienza su YouTube (<https://youtu.be/PAAmB-65wvA>) a cui rimando per l'approfondimento.

Una tecnologia promettente soprattutto per il volo ipersonico terrestre, anche se il suo elevato impulso specifico la renderebbe idonea anche alla propulsione spaziale. Nonostante tutto la RDRE resta comunque una propulsione con un Isp di un ordine di grandezza in meno rispetto ad un razzo che usa la reazione nucleare come fonte di energia, cioè quelli su cui ci concentreremo in questo articolo.

Affrontiamo quindi le tecnologie più promettenti che saranno coinvolte in queste imprese, che sono sostanzialmente **tre**:

1. **Razzi a propulsione termica nucleare (NTP), a fissione.**
2. **Razzi a propulsione elettrica nucleare (NEP), a fissione.**
3. **Razzi a propulsione elettrica e termica nucleare a fusione.**

Quindi vedremo di esaminarli tutti, capirne le differenze a valutare lo stato di avanzamento della tecnologia.

PREMESSA

Prima però devo fare una precisazione sulla differenza di rendimento tra NEP e NTP.

Le tecnologie NEP (Nuclear Electric Propulsion) e NTP (Nuclear Thermal Propulsion) sfruttano entram-

be un reattore nucleare, ma differiscono nel modo in cui utilizzano l'energia prodotta, con impatti significativi sul rendimento e sulla spinta.

Nella **Nuclear Electric Propulsion (NEP)** il processo è il seguente:

- Il reattore nucleare genera calore, che **viene poi convertito in energia elettrica** attraverso un sistema termodinamico (come turbine o termoelementi).
- Questa energia alimenta un motore elettrico, come un motore a ioni o a plasma.
- Rendimento globale basso: la conversione da calore a elettricità **ha un'efficienza limitata (~20-30%), e il resto del calore deve essere dissipato tramite radiatori.**
- Spinta molto bassa, ma altissima efficienza del propellente (impulso specifico elevato, tipicamente **>3000 s**).
- Ideale per missioni a lungo termine con carichi ridotti, ma non adatto a rapide accelerazioni.

Per dare una idea, questa energia in calore (che chiamiamo **kWt**, dove **t** sta per termici) di scarto da dissipare in una NEP normalmente è superiore alla energia elettrica resa (**kWe**, dove **e** sta per elettrici). Un reattore nucleare a fissione da 200 megawatt, con una densità di potenza-massa di 1.000 Watt per chilogrammo, **richiede radiatori delle dimensioni di un campo da football.**

Nella **Nuclear Thermal Propulsion (NTP)** invece, il processo è:

- Il reattore nucleare **riscalda direttamente un gas (tipicamente idrogeno) che viene espulso attraverso un ugello per generare spinta.**
- Quasi tutto il calore prodotto viene utilizzato per riscaldare il propellente, senza bisogno di convertirlo in elettricità.
- **Rendimento globale molto più alto**, poiché il calore è trasferito direttamente al fluido di espulsione senza conversioni intermedie.
- Spinta molto superiore rispetto alla NEP, con

un impulso specifico intorno ai **900 s**, circa il doppio rispetto ai migliori razzi chimici.

- Perfetto per missioni con equipaggio o trasporto rapido tra pianeti, dove serve un'accelerazione significativa.

Quindi in sintesi possiamo concludere questa premessa affermando che:

- **NEP ha un'efficienza elevata nell'uso del propellente ma un rendimento globale basso (~ 30%) e una spinta quasi nulla (dai milli-Newton ai pochi Newton).**
- **NTP utilizza il calore in modo più diretto e con meno perdite, offrendo una spinta molto maggiore (centinaia di migliaia di Newton) e un rendimento decisamente più alto (~ 60%). Ma non produce energia elettrica direttamente, ad uso dei servizi della astronave. Un problema che la NEP non ha.**

Ora esaminiamo le singole tecnologie.

4. I RAZZI A PROPULSIONE TERMICA NUCLEARE (NTP), A FISSIONE

Una **propulsione nucleare termica a fissione**, dal punto di vista concettuale, funziona come un normale razzo chimico tradizionale: **un gas viene riscaldato ed espulso ad alta velocità da un ugello, producendo una spinta all'intero razzo secondo la terza legge di Newton.**

La notevole differenza rispetto ad un razzo chimico è **come** questi gas vengono originati, riscaldati ed accelerati.

Dentro al motore, prima dell'ugello di uscita convergente divergente ed al posto della camera di combustione, viene posto un piccolo reattore nucleare a fissione (Fig. 4.1.), che, grazie alla reazione nucleare, scalda dell'idrogeno che poi viene espulso dall'ugello.

Un motore termico nucleare di questo tipo riesce a essere teoricamente **dalle 4 alle 7 volte più efficiente** di un motore chimico quindi **con Isp che**

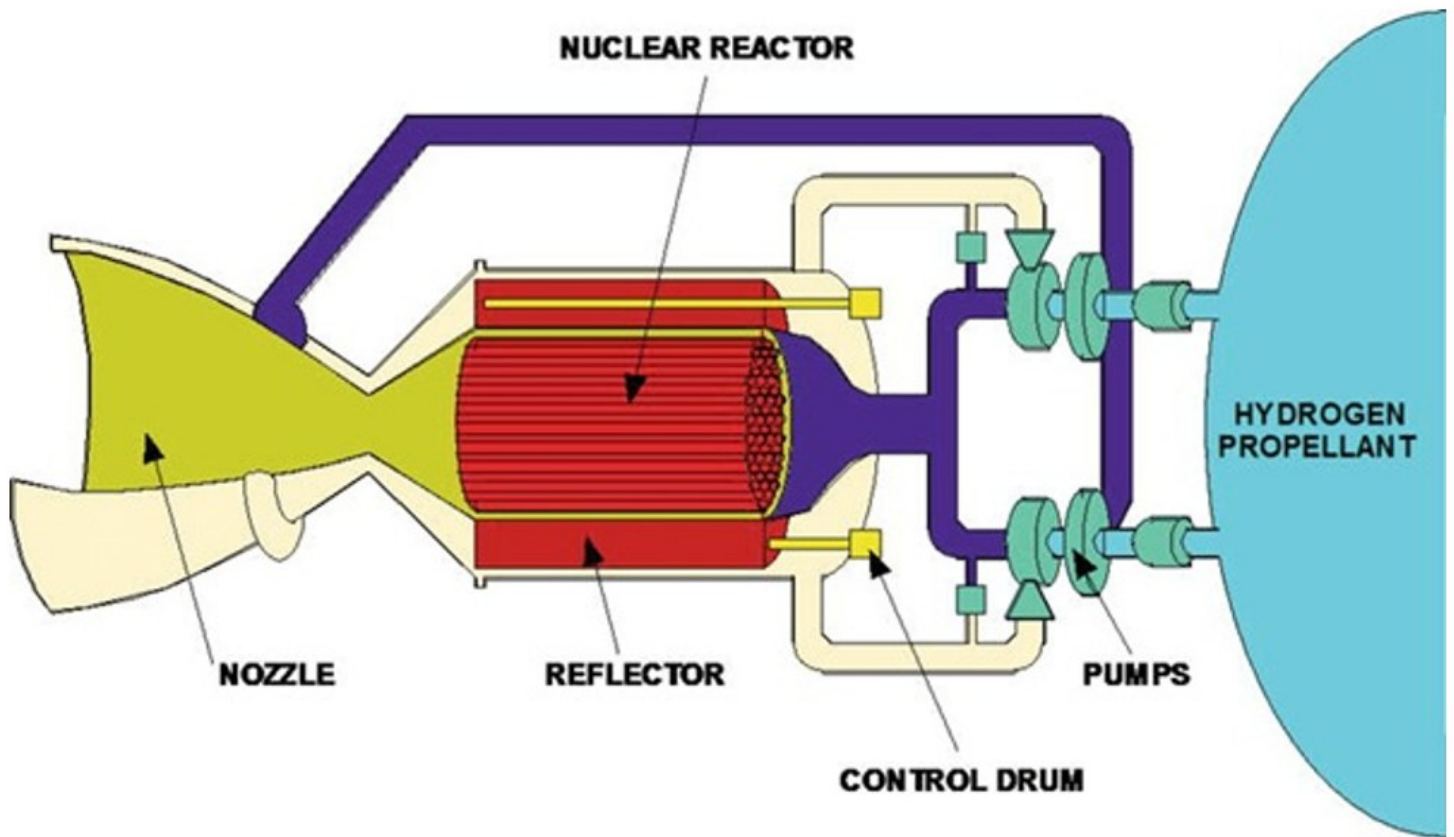


Figura 4.1 schema di un motore NTP

può superare i 1000 secondi.

Allo stesso modo riuscirebbe a generare **un rapporto spinta/peso anche 10.000 volte maggiore** di quello di una **propulsione elettrica nucleare (NEP)** che vedremo di seguito.

Il vantaggio è ottenuto principalmente nei **viaggi molto lunghi**, durante i quali questi motori con prestazioni di spinta ed efficienza maggiori, riescono a ridurre la lunghezza della traiettoria di viaggio, e quindi anche i tempi di viaggio. Secondo le stime attuali, un viaggio verso Marte potrebbe ridursi dagli attuali sei o otto mesi a meno di sessanta giorni. Un vantaggio fondamentale per le missioni con equipaggio, quando ridurre la permanenza nello spazio sarà un obiettivo primario. Lo sarà sia per questioni di sicurezza e salute dell'equipaggio, ma anche per la sostenibilità economica di questi viaggi.

A che punto è questa tecnologia? Come al solito riesco a vedere lo sviluppo di progetti soprattutto in campo occidentale, cioè principalmente Stati Uniti, Europa. Immagino che la Cina, dai vari "rumors" che si sentono, stia anche sviluppando propulsioni

di questo tipo; ma qui io mi limiterò ad esaminare ciò che è accessibile e che è basato su programmi in corso di sviluppo e test.

Tra questi troviamo, come esempio, il razzo a propulsione termica nucleare DRACO.

Il **DRACO "Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations"** (Fig. 4.2.) è un progetto della **NASA** e della **DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)** per sviluppare una propulsione nucleare termica (NTP).

Lockheed Martin si occuperà della progettazione, dell'integrazione e dei test del veicolo spaziale e **BWX Technologies** si occuperà della progettazione e della costruzione del reattore a fissione nucleare.

I test di questo nuovo razzo, se tutto va come previsto, dovrebbero partire nel 2027. Il vettore dovrebbe usare un carburante a base di **uranio ad alta concentrazione ma al tempo stesso a basso arricchimento**. Durante il test è previsto che, per ragioni di sicurezza, il reattore a fissione, costruito da BWX Technologies, resti spento sinché il vettore non raggiungerà l'orbita prevista.

La distanza che dovrebbe coprire il razzo durante il

test sarà di circa **700 km**, e non più i quasi 2.000 inizialmente previsti. Nessuna manovra programmata allo stato attuale delle cose, ma la possibilità di sfruttare i dati del test oltre all'opportunità di provare un eventuale rifornimento in orbita grazie ai due mesi di idrogeno liquido presente a bordo.



Figura 4.2 Illustrazione artistica del DRACO

Il problema, semmai, sarà quello di far riscaldare l'idrogeno a quasi **2.500 °C**, visto che quest'ultimo si conserva a **-215 °C**.

Il test servirà quindi anche a dimostrare la possibilità di stoccare in orbita dell'idrogeno liquido.

Il costo del progetto si aggira sui **500 milioni di dollari**.

Un altro progetto: Exlabs e Antares, due startup della California meridionale, il **19 marzo 2025 a San Francisco** hanno annunciato una partnership strategica per sviluppare un veicolo spaziale a propulsione nucleare per missioni nello spazio profondo. (figura 4.3.)

La navicella spaziale modulare dell'azienda, chiamata **Science Exploration and Resource Vehicle (SERV)**, sarà progettata per ospitare i microreattori Antares.

Sarà un veicolo spaziale progettato da **ExLabs**, equipaggiato con microreattori sviluppati da **Antares Nuclear**.

L'idea è semplice sulla carta, ma incredibilmente

ambiziosa nella pratica: usare la potenza dell'energia nucleare per garantire una spinta costante e affidabile, superando i limiti dei tradizionali pannelli solari.



Figura 4.3 Immagine artistica del progetto di ExLabs

Il traguardo è chiaro: **mandare il primo veicolo spaziale commerciale alimentato dal nucleare in orbita geostazionaria entro il 2029**.

SERV potrà affrontare missioni a lungo raggio e trasportare carichi fino a 5.000 kg, rendendolo un'opzione ideale per l'esplorazione dello spazio profondo o per operazioni di supporto a infrastrutture già presenti in orbita.

Antares Nuclear ha già mosso i primi passi concreti, **inaugurando una struttura di 11.900 metri quadrati a Torrance, in California, dedicata allo sviluppo dei microreattori**.

Le sfide non mancano. Sicurezza, regolamentazioni e ostacoli tecnici sono da sempre un problema quando si parla di nucleare, e **portarlo nello spazio aggiunge un livello di complessità non da poco**.

Ma se il progetto avrà successo, potremo assistere ad una vera rivoluzione nel settore spaziale.

5. I RAZZI A PROPULSIONE ELETTRICA NUCLEARE (NEP) A FISSIONE.

A che punto siamo e cosa bolle in pentola?

In campo vi sono due progetti con altrettanti prototipi testati: uno dell'americana **Ad Astra Rocket Company** supportata dalla **NASA** e l'altro della russa **ROSCOSMOS**.

Partiamo dalla NASA

Parliamo del **VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket)**.

È un tipo di propulsore al plasma elettrotermico/propulsore al magnetoplasma elettrotermico (Fig. 5.1.).

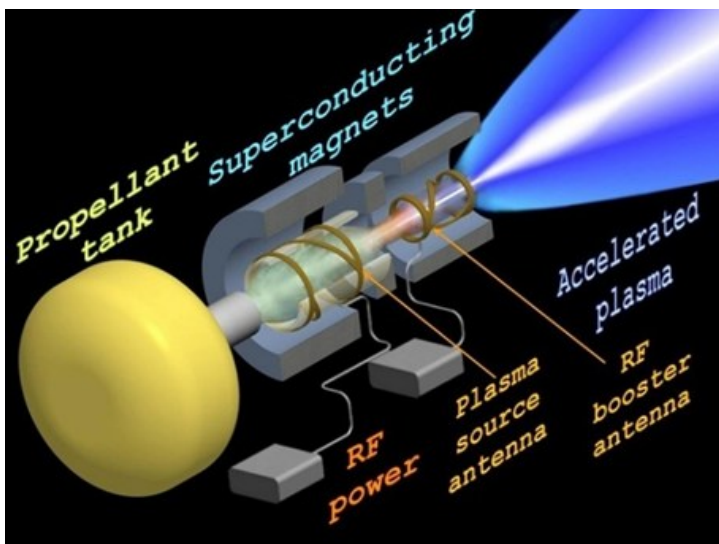


Figura 5.1 Schema di principio di un VASIMR

È un progetto di motore a plasma sviluppato dalla **Ad Astra Rocket Company**, guidata dall'ex astronauta della NASA **Franklin R. Chang Díaz**. Ne abbiamo già parlato sia nelle nostre conferenze al Planetario che su queste pagine alcuni anni fa. Secondo **Zion Market Research**, il mercato globale dei motori VASIMR raggiungerà i 77 miliardi di dollari entro il 2030.

Come funziona?

In questo motore, un propellente neutro e inerte (**Argon** o **Xeno**) viene ionizzato e riscaldato utilizzando onde radio.

VASIMR non utilizza elettrodi, eliminando così la loro erosione, una delle principali fonti di usura nei

motori ionici.

Rispetto ai tradizionali motori a razzo chimici con tubature molto complesse, valvole ad alte prestazioni, attuatori e turbopompe, **VASIMR non ha quasi nessuna parte mobile** (a parte quelle minori, come le valvole del gas), massimizzando la durata a lungo termine.

All'ingresso nel motore, il gas viene prima riscaldato a "plasma freddo" da un'antenna/accoppiatore **RF Helicon** che bombarda il gas con energia elettromagnetica, a una frequenza da 10 a 50 MHz, strappando elettroni dagli atomi del propellente e producendo un plasma di ioni ed elettroni liberi.

Variando la quantità di energia di riscaldamento RF e plasma, si afferma che VASIMR **è in grado di generare uno scarico a bassa spinta e impulso specifico elevato o uno scarico a spinta relativamente elevata e impulso specifico basso**.

La seconda fase del motore è un forte elettromagnete a configurazione solenoide che incanala il plasma ionizzato, agendo come un ugello convergente-divergente come quello fisico nei motori a razzo convenzionali.

Secondo Ad Astra, nel 2015, il motore **VX-200** richiedeva **200 kW di potenza elettrica per produrre 5 N** di spinta, ovvero **40 kW/N**. Al contrario, il propulsore ionico convenzionale **NEXT produce 0,327 N con soli 7,7 kW**, ovvero **24 kW/N**.

Dal punto di vista elettrico, il motore NEXT è quasi due volte più efficiente. Ha completato con successo oltre 50.000 ore (circa 5,5 anni) di funzionamento in prove a terra a partire dal dicembre 2009 ed è stato utilizzato da alcune sonde spaziali.

Tuttavia, non è in grado di produrre una spinta sufficiente per alimentare un'astronave con equipaggio o manovre rapide.

I 0,327 Newton di spinta continuativa sono adatti per accelerare piccole sonde o satelliti.

Un propulsore ionico produce bassi livelli di spinta ma lo fa con un maggior impulso specifico (dovuto ad una maggiore velocità di scarico dei gas **che può arrivare anche a 100 km/s**), il che significa che un propulsore ionico offre **un'efficienza nei**

consumi di carburante 10-12 volte maggiore rispetto un propulsore chimico.

Negli ultimi anni, il progetto VASIMR ha compiuto notevoli progressi:

- **Finanziamento NASA:** Nel 2015, la NASA ha assegnato un contratto di 10 milioni di dollari alla Ad Astra per avanzare nella tecnologia del motore VASIMR, con l'obiettivo di soddisfare le esigenze delle missioni nello spazio profondo.
- **Test di lunga durata:** Nel 2021, il prototipo **VX-200SS** ha completato con successo un test di resistenza di 88 ore a una potenza di 80 kW, stabilendo un nuovo record mondiale per la propulsione missilistica ad alta potenza.

Tuttavia, con VASIMR **emergono anche nuove problematiche**, come l'interazione con forti campi magnetici e la complessa gestione del calore.

L'inefficienza operativa del motore genera una notevole quantità di calore di scarto, che deve essere dissipato in modo efficace per evitare sovraccarichi e stress termici.

Gli elettromagneti superconduttori necessari per contenere il plasma caldo generano campi magnetici molto alti che possono causare problemi con altri dispositivi di bordo e produrre una coppia indesiderata tramite interazione con la magnetosfera.

Per contrastare quest'ultimo effetto, due unità propulsore possono essere confezionate con campi magnetici orientati in direzioni opposte, creando un quadrupolo magnetico a coppia netta zero.

ROSCOSMOS, Venerdì 7 febbraio 2025. (Fig. 5.2.)

Gli scienziati della Rosatom (Russia) hanno prodotto un prototipo di laboratorio di un **motore a razzo elettrico al plasma basato su un acceleratore di plasma magnetico**. Affermano che potrebbe ridurre i tempi di viaggio su Marte a uno o due mesi. Funziona a idrogeno e può accelerare le particelle cariche, **elettroni e protoni**, fino alla velocità di uscita di **100 km/sec**.

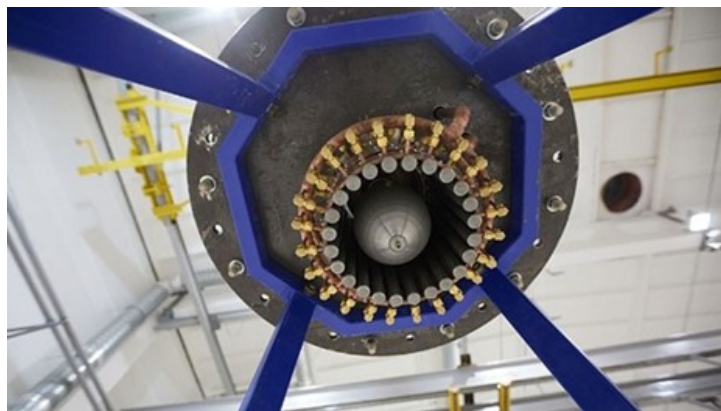


Figura 5.2 Il motore elettrico di ROSCOSMOS

In questo caso il motore a razzo al plasma è **basato su due elettrodi**. Tra questi passano particelle cariche, mentre agli elettrodi viene applicata un'alta tensione. Di conseguenza, la corrente genera un campo magnetico che spinge le particelle fuori dal motore. In questo modo, il plasma acquisisce un moto direzionale e genera spinta.

È stato preparato un prototipo di motore destinato ai test a terra e allo sviluppo delle modalità operative (fig. 5.2.).

Il prototipo di volo apparirà nel 2030.

È stato anche costruito uno speciale banco sperimentale per simulare le condizioni dello spazio; la camera di prova ha un diametro di 4 metri e una lunghezza di 14 metri ed è dotata di sensori avanzati, sistemi di pompaggio del vuoto e meccanismi di dissipazione del calore.

Sebbene il lancio iniziale in orbita avverrà con razzi chimici tradizionali, come del resto avverrà con qualsiasi altra tecnologia nucleare, il motore al plasma sarà attivato una volta che il veicolo spaziale avrà raggiunto la sua orbita designata.

Questa tecnologia potrebbe essere utilizzata anche negli **space tug**, veicoli destinati al trasporto di carichi tra pianeti.

Un vantaggio della nuova installazione rispetto al VASIMR è che, nel meccanismo proposto, il plasma non deve essere riscaldato a temperature elevate. Di conseguenza, le parti e i componenti del motore non subiscono sovraccarichi termici e l'energia elettrica utilizzata per il suo funzionamento viene quasi completamente convertita in movimento.

Alexey Voronov, primo vicedirettore generale per la scienza presso il **Rosatom Research Institute** di **Troitsk** afferma che la potenza media del motore, operante in modalità impulso-periodica, **raggiunge i 300 kW**, consentendo di accelerare la navicella spaziale a velocità molto più elevate rispetto ai motori convenzionali.

Con una spinta calcolata di circa 6N, (quindi 50 kW/N) la più alta tra i progetti comparabili (il VASIMR ha un rendimento più elevato di **40kW/N**, **ma non è mai arrivato alla massima potenza di 200 kW**), il motore dovrebbe consentire fasi di accelerazione e decelerazione fluide durante i viaggi interplanetari.

In entrambi i casi (Roscosmos e NASA), i progetti presuppongono una fonte di energia elettrica esterna. Questa può essere nucleare, che però, come ho chiarito nella premessa, avrà notevoli perdite dovute alla conversione calore-energia elettrica, o attraverso enormi pannelli solari che forniscono energia gratuita senza effetti collaterali, ad eccezione delle loro dimensioni esagerate e del fatto che nello spazio profondo oltre Marte, sono particolarmente inefficienti.

6. I RAZZI A PROPULSIONE ELETTRICA E TERMICA NUCLEARE A FUSIONE

La propulsione spaziale termica a fusione nucleare è un concetto avanzato che **sfrutta le reazioni di fusione per generare sia spinta che energia elettrica**, rendendola estremamente efficiente per missioni spaziali a lungo raggio.

La prima cosa che si pensa quando si parla di fusione nucleare nello spazio è questa:

"produrre energia da fusione nucleare sulla Terra sta rivelando davvero difficile. Ci proviamo da oltre mezzo secolo e non ci siamo ancora riusciti. Produrla nello spazio deve essere una proposta folle!"

In realtà nello spazio c'è un'asticella più bassa.

Buona parte del problema è fare la fusione nell'at-

mosfera, come per esempio le enormi dimensioni del vuoto nel progetto ITER e le sfide nel far funzionare i reattori a fusione di tipo toroidale come fonte di energia sulla Terra.

Nello spazio, le cose sono a tuo favore: **non c'è bisogno di creare il vuoto e non c'è nemmeno la gravità.**

Infine, non di meno, l'enorme calore prodotto dalla reazione della fusione, sulla Terra lo devo gestire per creare energia, scaldando un gas che poi azionerà delle turbine.

Nello spazio invece questo calore viene scaraventato nello spazio immediatamente per generare spinta.

Il **Dual Direct Fusion Drive (DDFD)** è un esempio di questo tipo di tecnologia.

Il DDFD si basa su un reattore a fusione compatto (fig. 6.1.) che sfrutta il confinamento magnetico per riscaldare un plasma a temperature di milioni di gradi, facendo fondere nuclei leggeri (come il deuterio e il trizio o, idealmente, il deuterio e l'elio-3).

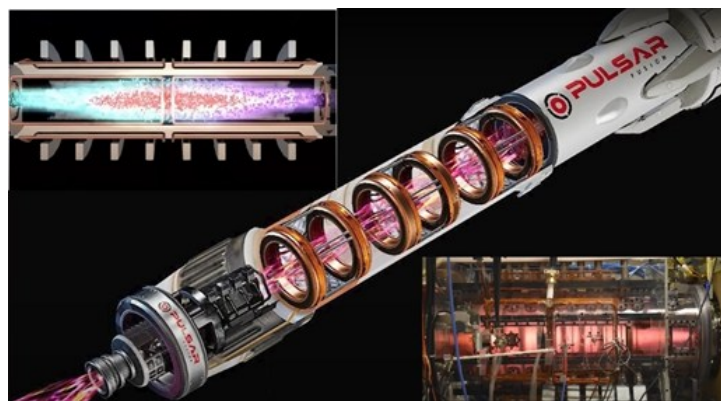


Figura 6.1 Rappresentazione schematica del funzionamento del Pulsar Fusion

Il processo segue questi passi:

- A. **Generazione del Plasma:** Il combustibile di fusione viene ionizzato e confinato in un campo magnetico con una configurazione ottimizzata per mantenere il plasma stabile.
- B. **Reazione di Fusione:** Quando il plasma raggiunge temperature estreme (**oltre i 100 milioni di °C**), avviene la fusione nucleare, rilasciando una grande quantità di energia sotto

forma di particelle cariche (ioni ed elettroni).

- C. **Produzione di Spinta (Propulsione Termica):** parte dell'energia rilasciata dalla fusione viene utilizzata per riscaldare ulteriormente un gas propellente (come idrogeno o altri gas leggeri), che viene poi espulso ad altissima velocità attraverso un ugello magnetico, generando spinta.
- D. **Produzione di Energia Elettrica:** le particelle cariche accelerate dalla fusione possono essere convertite in energia elettrica tramite conversione diretta (uso di campi elettromagnetici per estrarre energia dalle particelle cariche). **L'energia elettrica servirà per alimentare i sistemi di bordo**, strumenti scientifici e, se necessario, propulsori elettrici secondari per un'ulteriore efficienza.

Vantaggi della Propulsione a Fusione Termica.

- ➔ **Alta Efficienza Specifica (Isp elevato).** Consente velocità molto superiori ai razzi chimici, riducendo i tempi di viaggio nello spazio profondo.
- ➔ **Produzione di Energia e Propulsione Insieme.** A differenza dei razzi convenzionali, o della NTP, un sistema come il DDFD può fornire energia continua per la nave spaziale.
- ➔ **Combustibile Relativamente Pulito.** Se si utilizza il deuterio-elio-3, la fusione produce pochissime radiazioni, a differenza delle reazioni con trizio o della NTP a fissione.
- ➔ **Riduzione della Massa di Carburante.** Poiché la fusione rilascia enormi quantità di energia per unità di massa, una nave può portare meno propellente rispetto ai sistemi tradizionali.

Applicazioni del Direct Fusion Drive

- ➔ **Missioni interplanetarie rapide:** con questa tecnologia, un viaggio su Marte potrebbe durare settimane invece di mesi.
- ➔ **Esplorazione dello spazio profondo:** permetterebbe di raggiungere la fascia di Kuiper o le lune di Giove e Saturno in tempi ragione-

voli.

- ➔ **Stazioni spaziali energeticamente autonome:** la produzione di energia potrebbe rendere le future colonie spaziali più autosufficienti.

Il DDFD rappresenta una delle tecnologie più promettenti per il futuro dell'esplorazione spaziale, combinando propulsione e generazione di energia in un unico sistema efficiente.

Vediamo, allora, a che punto siamo e cosa bolle in pentola su questa promettente tecnologia innovativa.

BLETCHLEY, Regno Unito, 10 marzo 2025 (GLOBE NEWSWIRE) – Pulsar Fusion, sviluppatore di sistemi e servizi di propulsione spaziale pulita basata sulla fusione, ha annunciato la presentazione di **Sunbird** (Fig. 6.2), un concetto di razzo a fusione nucleare sviluppato in totale segretezza nel corso dell'ultimo decennio.

Sunbird rappresenta un importante passo avanti nella tecnologia di propulsione spaziale, con il potenziale di ridurre drasticamente i tempi di viaggio interplanetario e di consolidare ulteriormente la posizione del Regno Unito come leader nell'innovazione spaziale e nell'eccellenza scientifica. Sunbird è stato presentato pubblicamente per la prima volta allo **Space-Comm EXPO presso ExCeL London**.



Figura 6.2 Il "rimorchiatore" nucleare Sunbird

Fondata nel 2013 come *Applied Fusion Systems*, **Pulsar Fusion** sviluppa sistemi di propulsione spaziale iperveloci utilizzando la fusione nucleare.

La fusione offre la migliore alternativa con velocità

di scarico e spinta sufficienti per spingere i veicoli spaziali oltre il nostro sistema solare.

Nel 2022, Pulsar Fusion ha ricevuto fondi dall'Agenzia spaziale britannica per condurre ricerche sulla propulsione elettrica nucleare. Pulsar sta creando un ecosistema di sistemi di propulsione e servizi che promuovono l'uso della fusione come fonte di energia pulita e pressoché illimitata.

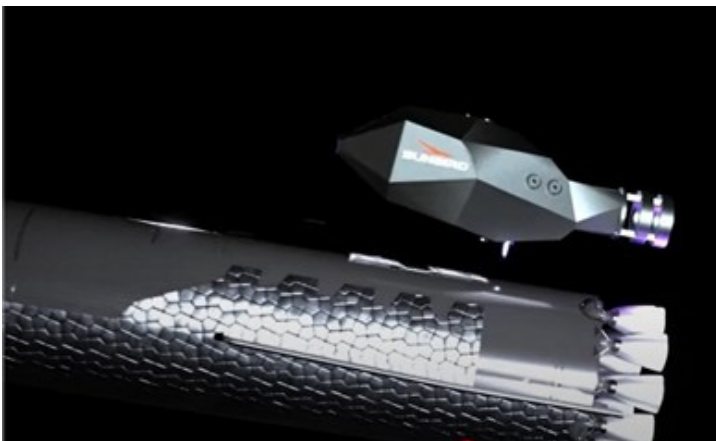
Il concetto di razzo nucleare a fusione proposto da **Pulsar Fusion**, noto come **Sunbird Migratory Transfer Vehicle**, è progettato per funzionare come un "**rimorchiatore spaziale**" permanente nello spazio (Fig. 6.3.), capace di agganciarsi a diverse astronavi per trasportarle rapidamente su lunghe distanze.



Figura 6.3 Il Sunbird mentre esce dalla stazione

Sebbene Pulsar Fusion non abbia divulgato dettagli sulle fasi operative del Sunbird, possiamo delineare una sequenza tipica basata su pratiche standard di missioni di servizio in orbita. Figg. 6.4-6.6)

Fase di Aggancio (Docking) (Fig. 6.4):



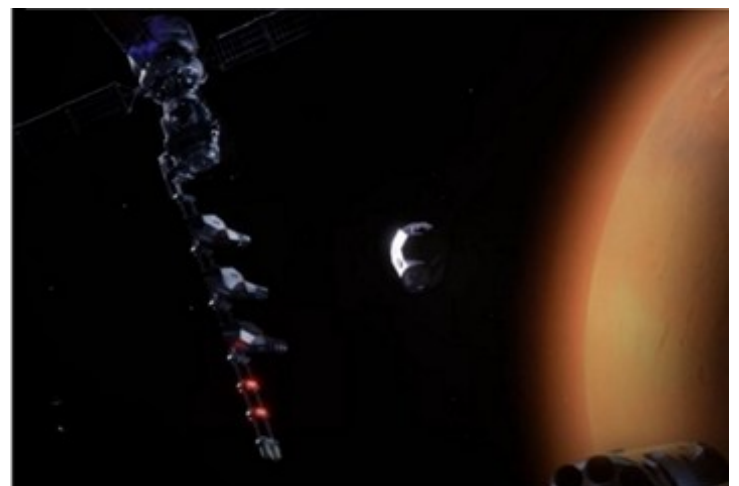
Il Sunbird si avvicina all'astronave cliente utilizzando sistemi di navigazione avanzati e sensori per il rendez-vous. Una volta in prossimità, esegue manovre di precisione per allinearsi e agganciarsi in modo sicuro all'astronave.

Fase di Propulsione (Fig. 6.5):



Dopo l'aggancio, il Sunbird attiva il suo motore a fusione nucleare per fornire la spinta necessaria a trasferire l'astronave verso la destinazione desiderata. Durante il viaggio, il Sunbird **può fornire fino a 2 MW di potenza elettrica ai sistemi dell'astronave**.

Fase di Sgancio (Undocking) (Fig. 6.6):



Una volta raggiunta la destinazione, il Sunbird esegue procedure per sganciarsi in modo sicuro dall'astronave cliente. Utilizza sistemi di controllo per allontanarsi a distanza di sicurezza.

Dopo lo sgancio, il Sunbird si riposiziona in un'orbita

di attesa o si dirige verso una nuova astronave cliente per una missione successiva.

Queste fasi riflettono le operazioni standard per veicoli di servizio in orbita, come evidenziato in studi sul tema.

Le immagini e la descrizione dell'uso di questo "rimorchiatore" mostrano che siamo ancora lontani dalla sua realizzazione pratica.

Le tecnologie necessarie includono non solo il motore a fusione, ma anche stazioni di rifornimento orbitanti.

la realizzazione di stazioni di rifornimento orbitanti che sono in cantiere oggi sono pensate come **"serbatoi di carburante"** per razzi chimici come metano e ossigeno liquido, per rifornire le Starship di SpaceX. Ma per Pulsar Fusion, servirebbe lo stoccaggio di **deuterio** e **elio-3**, oltre a sistemi automatici di aggancio e sgancio dei rimorchiatori e altre innovazioni da sviluppare.

L'azienda però afferma che, a differenza delle grandi quantità di carburante richieste per un razzo chimico, **le quantità relativamente ridotte di miscela di deuterio ed elio-3 richieste implicano che "un veicolo spaziale verrebbe lanciato con una scorta fissa, sufficiente per missioni come quella su Plutone in quattro anni, senza necessità di rifornimento durante il volo".**

Fatta questa doverosa constatazione andiamo avanti con l'approfondimento.

Questo sistema è il primo a ipotizzare un motore a fusione compatto **"Dual Direct Fusion Drive"**.

Il DDFD, come abbiamo già detto ad inizio capitolo, è progettato attraverso reazioni di fusione nucleare per offrire una fonte di accelerazione a lungo termine con un **approvvigionamento di carburante autosufficiente**.

Le simulazioni indicano che questa tecnologia potrebbe potenzialmente spingere un veicolo spaziale con una massa di circa **1.000 kg fino a Plutone in 4 anni. Inoltre, il DDFD potrebbe fornire fino a 2 MW di potenza ai carichi utili, ampliando ra-**

dicalmente le capacità scientifiche delle missioni planetarie.

Elementi coinvolti nella fusione:

Il motore DDFD del Sunbird utilizza **una miscela di deuterio ed elio-3 come combustibile** per le reazioni di fusione.

Sappiamo bene che attualmente la produzione di elio-3 sulla terra è estremamente costosa, ma sappiamo anche che la nuova corsa sulla Luna è proprio spinta dalla necessità di estrarlo dalla polvere lunare.

Questa combinazione è scelta per la sua capacità di produrre elevate quantità di energia con una bassa produzione di neutroni, rendendola ideale per applicazioni spaziali.

Quindi **il Pulsar Fusion ha due acceleratori**, uno per la spinta ed uno per generare energia elettrica, due sistemi distinti ma interconnessi:

- ➔ **Un acceleratore per la propulsione (ugello magnetico).** Questo sistema prende il plasma ad alta energia prodotto dalla fusione e lo accelera con campi magnetici, espellendolo nello spazio per generare spinta (**simile a un motore a plasma come il VASIMR**).
- ➔ **Un acceleratore per la conversione diretta di energia:** Un sistema separato di griglie elettrostatiche e/o campi magnetici raccoglie gli ioni carichi ad alta energia prodotti nella fusione, rallentandoli per trasformare la loro energia cinetica direttamente in elettricità.

Proviamo ora ad immaginare una missione standard verso Marte con un DDFD.

Un veicolo che viene lanciato dalla Terra per Marte ha bisogno di ~11,3 km/s (9,4 km/s a LEO + ~1,9 km/s per l'iniezione trans-marziana) di velocità in riferimento alla Terra al momento del lancio.

Sommando i 30 km/s della terra nel caso di una **"manovra mono ellittica bitangente"** si arriva ai **41,3 km/s** minimi, rispetto al piano dell'eclittica,

per sganciarsi ed andare oltre il sistema Terra-Luna. Per le missioni del sistema solare esterno (ad esempio, Giove), è ancora più alto ($\sim 14,4$ km/s, quindi un totale di **44,4 km/s**).

Con Sunbird in orbita: un veicolo spaziale viene lanciato in LEO ($\sim 9,4$ km/s), attracca con un Sunbird e poi la propulsione a fusione del Sunbird si occupa del resto. 3-5 km/s verso Marte o 6-10 km/s verso Giove.

Il veicolo di lancio iniziale ha bisogno solo di una quantità sufficiente di delta-V per raggiungere l'orbita, non dell'intero viaggio interplanetario.

L'elevato impulso specifico del Sunbird (10.000-15.000 s) e la potenza di 2 MW significano che può fornire in modo efficiente al delta-V aggiuntivo un propellente minimo, grazie alla sua velocità di scarico a fusione (~ 100 km/s).

Ciò potrebbe ridurre il carico totale del delta-V sul veicolo di lancio del 20-50%, a seconda della destinazione, e ridurre enormemente la massa del carburante, rendendo le missioni più economiche, più leggere e più flessibili.

Come funziona la produzione di energia elettrica direttamente dalla fusione senza passare attraverso a complicati sistemi di produzione di vapore e relative turbine per alimentare meccanicamente dei generatori elettrici?

- ➔ **Produzione di Particelle Cariche.** Nella fusione nucleare, quando i nuclei leggeri si fondono, rilasciano energia sotto forma di ioni ad alta energia (carichi positivamente), come nuclei di elio (particelle alfa) nel caso della fusione D-T ed elettroni liberi prodotti nelle reazioni secondarie.
- ➔ **Separazione dei Prodotti della Fusione.** Un sistema di campi magnetici e/o elettrici viene utilizzato per separare le particelle cariche in base alla loro energia e carica. Gli elettroni, molto più leggeri, possono essere deviati più facilmente rispetto agli ioni pesanti.
- ➔ **Decelerazione Elettrostatica (Conversione dell'Energia Cinetica in Energia Elettrica).**

Le particelle cariche vengono fatte passare attraverso una serie di griglie elettrostatiche a potenziale crescente. Questo riduce gradualmente la loro velocità, convertendo l'energia cinetica in differenza di potenziale elettrico. L'energia così raccolta viene immessa in un circuito esterno e trasformata in elettricità.

- ➔ **Recupero e Riuso degli Ioni.** Alcuni ioni possono essere recuperati e reimmessi nel plasma per migliorare l'efficienza del sistema. Gli elettroni in eccesso possono essere neutralizzati per evitare dispersioni di carica.

Vantaggi della Conversione Diretta.

- ➔ **Altissima Efficienza** ($\sim 80-90\%$ teorici): la conversione diretta evita le perdite di energia tipiche delle turbine termiche.
- ➔ **Peso ridotto:** non servono turbine, generatori meccanici o fluidi di lavoro.
- ➔ **Ideale per applicazioni spaziali:** permette di alimentare sistemi elettrici o motori a plasma senza bisogno di generatori tradizionali.

Quali sono i limiti attuali?

La tecnologia è ancora sperimentale e necessita di miglioramenti nella gestione del plasma e delle griglie elettrostatiche. L'obiettivo è quello di ottenere la fusione di **deuterio con elio3 ($D-He^3$)** perché è più efficace con reazioni che producono ioni molto energetici e di carica nota.

Dimostrazione in orbita.

Pulsar Fusion ha comunicato che i test statici inizieranno già quest'anno (2025), seguiti da una dimostrazione in orbita (IOD) dei componenti tecnologici di base nel 2027-2028.

Le tecnologie avanzate di elettrodinamica rappresentano un campo affascinante e promettente per la conversione diretta dell'energia in elettricità, ed è su questa che mi vorrei concentrare.

Sulla conversione della fusione nucleare in spinta c'è poco da aggiungere perché è una tecnologia

molto simile alla NTP classica: la reazione a fusione produce calore che scalda un gas che viene espulso dall'ugello generando spinta.

Al momento, Pulsar Fusion non ha divulgato dettagli specifici sui metodi esatti di conversione dell'energia nel loro Dual Direct Fusion Drive (DDFD). Tuttavia, considerando che il DDFD è progettato per generare sia spinta che energia elettrica, è plausibile che vengano utilizzate tecniche di conversione diretta, come la **Magneto-Idro-Dinamica (MHD)**, per trasformare l'energia del plasma in elettricità (Fig. 6.7.)

Inoltre, Pulsar Fusion ha avviato una collaborazione con Princeton Satellite Systems per applicare la propulsione a fusione nucleare ai viaggi spaziali futuri.

Obiettivo: **utilizzare l'intelligenza artificiale per progettare un razzo spaziale iperveloce, con l'obiettivo di creare un motore per razzo spaziale profondo con un potenziale di 500.000 mph (800.000 km/h).**

Come funziona la MHD

- I. **Fluido conduttivo:** un fluido conduttore di elettricità, come un plasma (gas ionizzato), si muove all'interno di un condotto o di una camera. Nel contesto della fusione nucleare, il plasma è il prodotto delle reazioni termonucleari.
- II. **Campo magnetico:** un potente campo magnetico viene applicato perpendicolarmente al

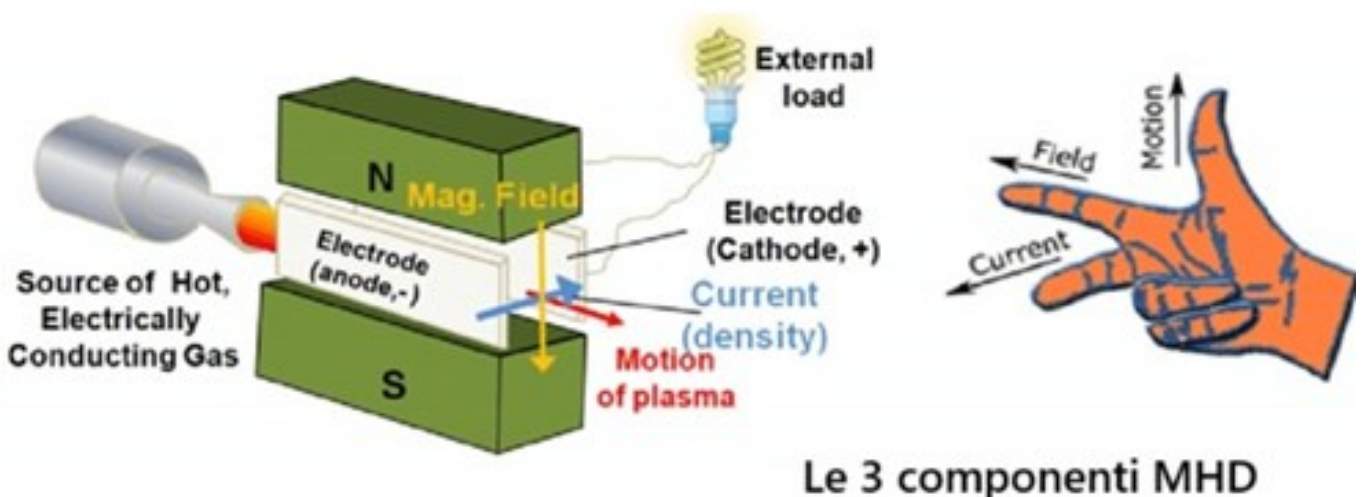
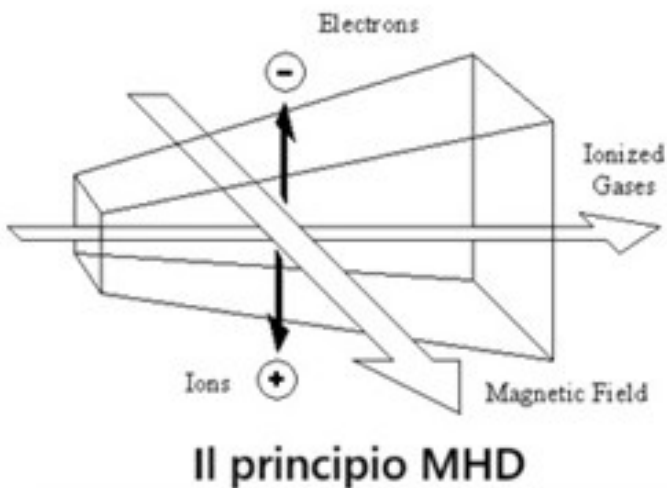


Figura 6.7 Conversione MHD

flusso del fluido conduttore. Questo campo è essenziale per la generazione di correnti elettriche.

- III. **Forza di Lorentz:** quando il fluido si muove attraverso il campo magnetico, viene generata una forza chiamata forza di Lorentz. Questa forza induce correnti elettriche nel fluido, creando così un potenziale elettrico.
- IV. **Estrazione di energia elettrica:** gli elettrodi situati ai lati del condotto raccolgono la corrente generata, convertendola in elettricità utilizzabile.

Le sfide principale da superare

- ➔ **Efficienza limitata:** attualmente, l'efficienza energetica dei sistemi MHD è inferiore alle tecnologie più consolidate.
- ➔ **Materiali resistenti alle alte temperature:** il plasma estremamente caldo e i campi magnetici intensi possono danneggiare i materiali utilizzati nei dispositivi MHD.
- ➔ **Complessità del controllo del plasma:** Il comportamento del plasma è altamente instabile e complesso, il che rende difficile mantenere la continuità della generazione elettrica. Effetto noto anche per le centrali a fusione terrestri.

7. CONCLUSIONE

La strada è già tracciata!

Oggi, i razzi chimici, come la **Starship di SpaceX**, sono **l'unica tecnologia disponibile per portare carichi utili in orbita terrestre**, e lo saranno anche nel prossimo futuro.

Tuttavia, questa tecnologia non è competitiva per viaggi oltre l'orbita terrestre a causa del rapporto proibitivo tra il peso dei motori più il carburante e la spinta nel tempo resa.

Per questo motivo, l'astronautica globale sta investendo nella propulsione nucleare la quale, è ormai evidente, non sarà mai adeguata per la messa in orbita terrestre per ragioni di sicurezza (emissione di sostanze radioattive in atmosfera) e capacità di

spinta.

Un razzo a combustibile solido come un booster di un SLS può spingere fino a 1600 tonnellate, mentre si ipotizza che i razzi nucleari tipo NTP, sia a fissione che a fusione, non superino le centinaia di tonnellate.

Ne parleremo alla conferenza di ottobre al Planetario.

Luigi Borghi

Link e riferimenti utili

<https://pulsarfusion.com/products-development/sunbird-fusion-propulsion/pulsarfusion.com>

world-nuclear-news.org

<https://www.globenewswire.com/NewsRoom/AttachmentNg/1d1765a9-f287-41e2-938c-d00ad9a22318>

<https://www.globenewswire.com/NewsRoom/AttachmentNg/f53e394c-c0f8-41e6-8943-6d6aa30a448f>

<https://www.globenewswire.com/NewsRoom/AttachmentNg/914f7b5e-676f-482f-aa3a-c45133401fcf>

<https://youtu.be/mjIdbHUAw4s>

<https://youtu.be/UvSAfrCp2Vo>

https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_Specific_Impulse_Magnetoplasma_Rocket

<https://italianspace.it/astronews/razzo-plasma-vasimr-marte/>

<https://spacenews.com/exlabs-and-antares-form-alliance-to-develop-nuclear-powered-spacecraft/>

<https://poefactory.brera.inaf.it/astrocuriosita-dicembre-2021-un-biglietto-per-marte-andata-e-ritorno-grazie/>

<https://www.scienzeotizie.it/2025/03/20/nuove-tecnologie-nucleari-per-lesplorazione-spaziale-profonda-37108391>

https://www.prnewswire.com/news-releases/pulsar-fusion-enters-research-partnership-with-princeton-satellite-systems-to-apply-nuclear-fusion-propulsion-to-future-space-travel-301843617.html?utm_source=chatgpt.com

THE LOST GRAVES OF PEENEMÜNDE

Riflessioni sul libro di Mike McLeod e Sean Feast

di Davide Borghi



Nella foto: Un razzo V2 in fase di accensione statica o lancio verticale sulla rampa di test a Peenemünde

Di seguito alcune riflessioni sul libro *"The lost graves of Peenemünde"* acquistato durante l'**Air Show di Duxford** lo scorso settembre.

L'ho comprato da George Dunn, un aviare veterano della Seconda Guerra Mondiale dalla veneranda età di ben 102 anni, mentre sopra di noi passavano in volo diversi **Spitfire** e **Mustang**, un **B-17** e un **Lancaster**.

Un momento da brividi.

George Dunn prese parte alla prima ondata del primo bombardamento del sito segreto nazista di Peenemünde, dove venivano sviluppate le micidiali V-2. George faceva parte del 76° squadrone della RAF e pilotava un bombardiere **Halifax** leggermente più leggero e con un raggio d'azione più limitato rispet-

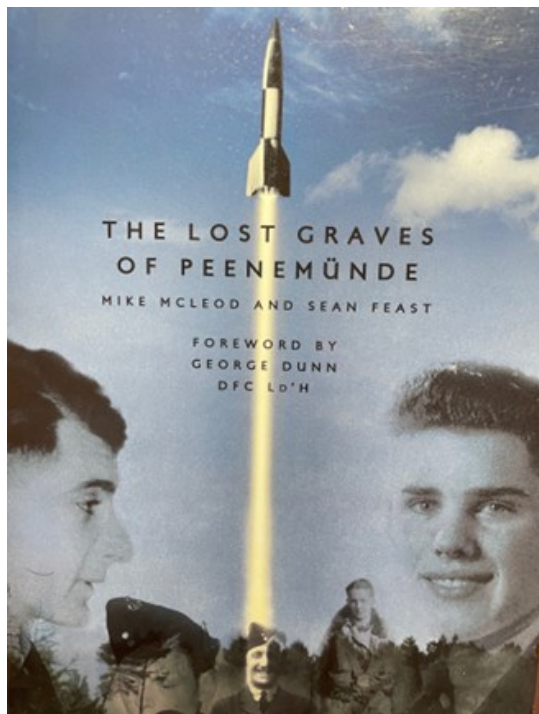
to al **Lancaster**, uno dei protagonisti dell'**Air Show** di Duxford.

Il libro è stato scritto da Mike McLeod e Sean Feast, che — iniziando quasi per caso — si sono dedicati alla ricerca dei luoghi di sepoltura dei membri della Royal Air Force (RAF) caduti durante l'operazione.

Un compito non semplice, vista la scarsità di documentazione rimasta, ma resa possibile, almeno nella prima parte della Seconda Guerra mondiale, dalla maniacale precisione tedesca che teneva traccia di ogni cosa e comunicava al nemico i nomi e circostanze dei caduti, quando erano noti. Almeno inizialmente.

Un compito non semplice, vista la scarsità di documentazione rimasta, ma resa possibile, almeno per

quanto riguarda la prima parte della Seconda Guerra mondiale, dalla maniacale precisione tedesca che, quantomeno inizialmente, teneva traccia di ogni cosa e comunicava al nemico i nomi e circostanze dei caduti, quando erano noti.



La copertina del libro

La parte che più mi ha appassionato è (ovviamente per chi mi conosce bene) la parte storica, che inizia con la scelta del sito di **Peenemünde nel Mar Baltico**, un luogo sufficientemente tranquillo, lontano da osservatori, e vicino al mare in caso di razzi fuori controllo.

All'inizio, il Führer credeva fermamente nel programma missilistico, ma lo accantonò presto, convinto che la guerra stesse volgendo al meglio: dopotutto, le nuove armi non sembravano necessarie. Cambiò idea solo quando la situazione cominciò a precipitare.

Il 18 marzo 1942 a Peenemünde un primo prototipo di razzo **Aggregat 4 (A4)** — poi chiamati **Vergeltungswaffe 2 (V2)** — esplose in fase di lancio.

Anche il secondo prototipo fallì il lancio, proprio mentre, a Berlino, Adolf Hitler iniziò ad alzare le aspettative su queste nuove armi, nella speranza che potessero risollevare le sorti della guerra.

Finalmente, il 3 ottobre 1942, il terzo tentativo —

denominato "*Cucumber*" — segnò il primo lancio riuscito: il razzo raggiunse una distanza di 190,5 km, con una velocità di 1,34 km/s e una quota massima di 85 km.

Due mesi dopo, nel dicembre 1942, ebbe inizio la produzione su larga scala.

Nella notte tra il 17 e il 18 agosto 1943, gli inglesi decisero di colpire Peenemünde.

L'obiettivo era distruggere le strutture produttive, i laboratori e, se possibile, eliminare scienziati e ingegneri coinvolti nello sviluppo delle armi missilistiche, tra cui Wernher von Braun, con l'intento di rallentare il programma tedesco.

Fu una notte di plenilunio. Una formazione di 579 quadrimotori del **Bomber Command** bombardò la base nazista di Peenemünde, dove venivano progettate e costruite le V1. Le vittime furono centinaia, ma, a parte due scienziati (o ingegneri) che persero la vita, l'intero team di von Braun rimase illeso.

Un dettaglio curioso: sul posto erano presenti anche il I e il II battaglione nebbiogeno italiano.

Il raid, denominato **Operazione Hydra**, fu preceduto da un'incursione separata su Berlino con otto aerei Mosquito, volta a sviare l'attenzione della difesa tedesca. All'attacco principale presero parte 15 bombardieri Halifax, 23 Lancaster e 2 Stirling.

Si trattò della prima operazione contro il programma delle *V-weapons* tedesche, che diede inizio alla più ampia campagna denominata **Crossbow**.

Le perdite britanniche furono significative: 40 bombardieri abbattuti e 215 membri d'equipaggio caduti.

In totale furono sganciate 1.938 tonnellate di bombe e la Luftwaffe perse 12 caccia notturni e, tra i circa 170 civili tedeschi uccisi, vi furono anche due scienziati del progetto V2. Anche tra i lavoratori schiavizzati del vicino campo di lavoro forzato di **Trassenheide** si contarono più di 500 vittime.

Le valutazioni sull'efficacia dell'operazione sono controverse: secondo lo **United States Strategic Bombing Survey** (1945), il raid fu definito "**non efficace**", mentre lo storico **Adam Tooze**, nel 2006, lo definì un "**grande successo**"; In ogni ca-

LE NOSTRE RECENSIONI

so, le stime sul ritardo causato al programma missilistico tedesco oscillano tra due e sei settimane.



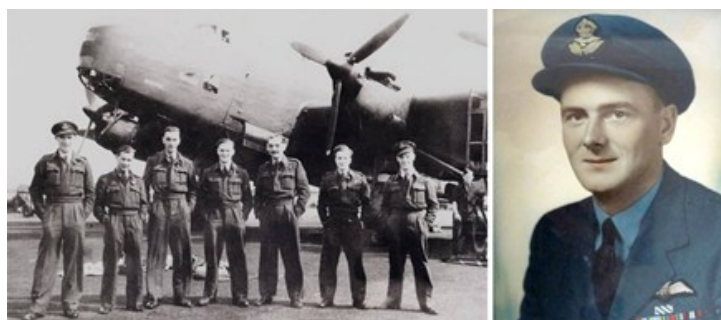
George Dunn, 102 anni



Il mio, emozionante, incontro con George Dunn



Duxford Air Show, Settembre 2024



George Dunn all'epoca della missione, in cui era pilota del bombardiere. Nella foto di gruppo è il primo a sinistra



Un B-17 (a sinistra) ed un Lancaster (a destra) in volo all'Air Show di Duxford - Settembre 2024

Bibliografia

McLeod, M., & Feast, S. (2020). *The lost graves of Peenemünde*. Fighting High Ltd. Foreword by George Dunn .

Davide Borghi

VICTOR BOYS

True Stories from Forty Memorable Years of the Last V Bombers Feast

di Davide Borghi



Nella foto del 13 gennaio 1958: la RAF V-Force, la spina dorsale della deterrenza nucleare britannica durante la Guerra Fredda. Un Avro Vulcan B1A (al centro), un Vickers Valiant (a sinistra) e un Handley Page Victor B1 (a destra)

Il Duxford Air Show è stato davvero un'occasione ricca di spunti, tra informazioni e nuove esperienze. Oltre al libro su Peenemünde, ho avuto modo di acquistare anche un volume dedicato agli ultimi bombardieri nucleari britannici.

Si tratta di aerei che un amico inglese, anche lui appassionato, mi aveva mostrato in un hangar diversi anni fa, durante il mio primo Air Show a Duxford.

All'epoca — era il lontano 2007 — non ne avevo mai sentito parlare.

Si tratta di una serie di tre bombardieri a reazione noti come V-Bombers, costruiti da tre diversi produttori britannici e progettati per trasportare e sganciare armi nucleari.

I tre modelli — il **Vickers Valiant**, l'**Handley Page Victor** e l'**Avro Vulcan** — condivisero questa funzione strategica, ma differivano notevolmente per design, prestazioni ed il loro impiego dopo la fine del loro ruolo nucleare.

Il loro scopo principale, negli anni '50 e '60, fu quello di garantire una deterrenza nucleare durante il periodo della Guerra Fredda.

Il programma britannico per lo sviluppo di armi atomiche fu avviato subito dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale.

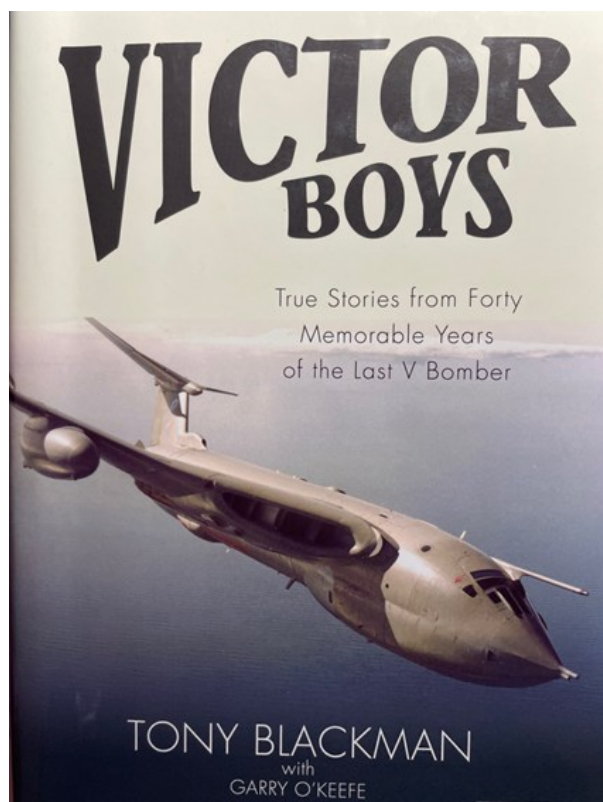
Oltre alla progettazione delle testate nucleari, il governo incaricò la Royal Air Force di sviluppare nuovi velivoli in grado di trasportarle.

Questi dovevano essere aerei a reazione — una tecnologia allora emergente — segnando un netto cambiamento rispetto ai pesanti bombardieri quadrimotori utilizzati durante il conflitto mondiale.

Si trattava inoltre di bombardieri a medio raggio, capaci di raggiungere l'Unione Sovietica partendo direttamente dalle basi sul territorio del Regno Unito.

Alla fine, **tutti e tre i progetti ebbero successo**, e ciascun produttore portò a termine la realizzazione del proprio bombardiere: il Vickers Valiant, l'Handley Page Victor e l'Avro Vulcan.

La decisione di affidare il compito a tre aziende diverse non solo garantì una certa ridondanza strategica, ma portò anche alla creazione di tre velivoli profondamente differenti, ciascuno con un proprio insieme di caratteristiche e capacità operative.



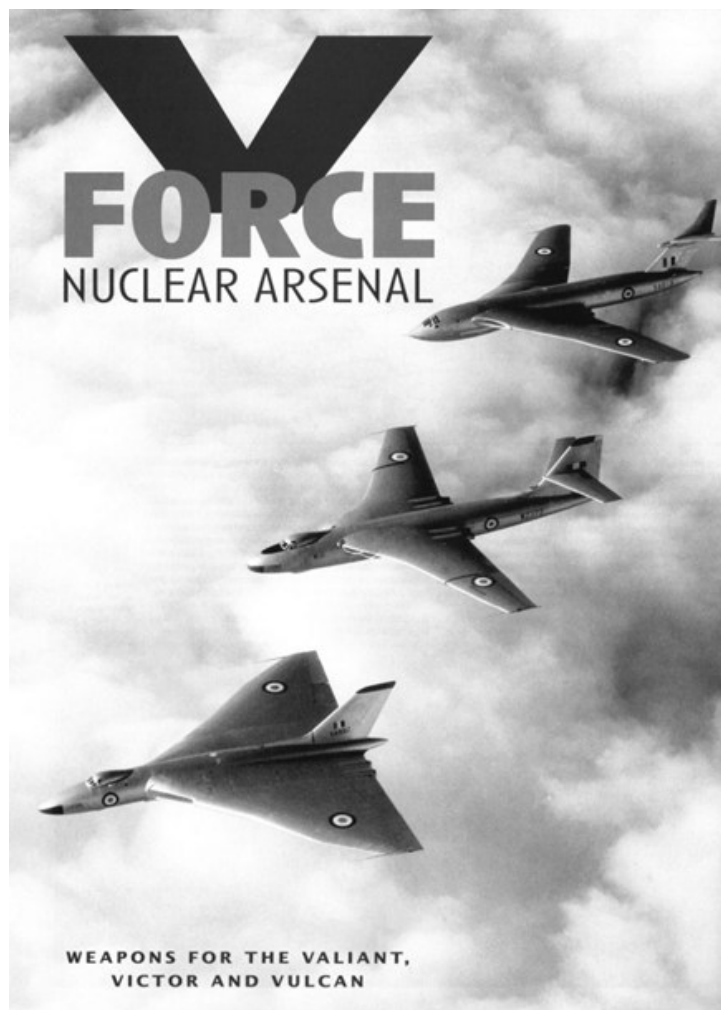
La copertina del libro

Quando, in questa mia seconda visita al Duxford Air Show, ho trovato un libro dedicato a un V-bomber — per di più autografato dagli autori — non ho esitato ad acquistarlo... e a divorarlo.

Il volume è incentrato sull'**Handley Page Victor**,

l'ultimo dei bombardieri V a entrare in servizio, nel 1957.

Come il **Vulcan**, anche il Victor adottava un design avanzato — in particolare la caratteristica **ala a mezzaluna** — che inizialmente suscitò qualche perplessità da parte del governo, ritenendolo rischioso. Il Victor si dimostrò però un velivolo versatile, efficace sia ad alta che a bassa quota, e offriva la **maggiore autonomia operativa** tra i tre modelli. Anche per lui, come per il Vulcan, fu realizzata una **variante B.2**, migliorata rispetto alla prima versione.



I V-bombers britannici

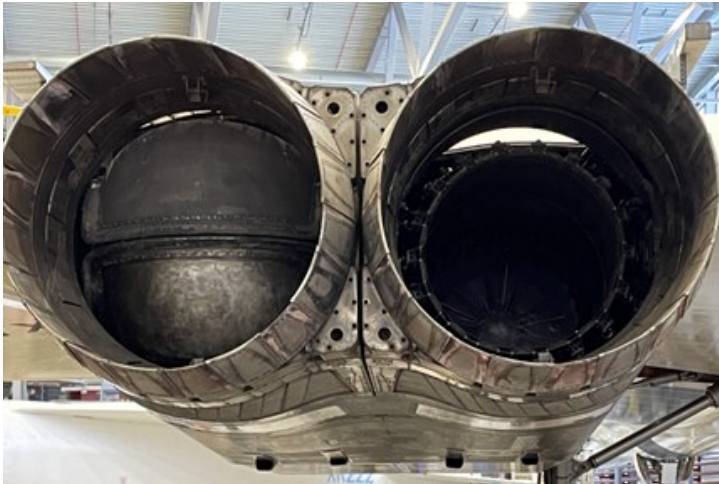
Dopo aver concluso il loro ruolo come piattaforme di deterrenza nucleare, **molti dei Victor** vennero convertiti in **aerocisterne** — una trasformazione molto utile, come vedremo fra poco.

Il Vulcan, grazie alla sua ala a delta, offriva prestazioni superiori a bassa quota, motivo per cui fu pre-

LE NOSTRE RECENSIONI

ferito al Victor nelle operazioni di bombardamento prolungate.

Alla fine degli anni '60, la capacità di rifornimento in volo era piuttosto limitata, e la conversione dei Victor rappresentava una soluzione efficace per colmare questa lacuna. Il Victor continuò a svolgere il ruolo di aerocisterna fino al 1993, partecipando a missioni cruciali come il supporto ai Vulcan durante la guerra delle **Falkland** e il rifornimento della RAF e della USAF durante la **Prima Guerra del Golfo**.



Il Vulcan



Il Victor

Il primo dei bombardieri strategici nucleari britannici, l'**Avro Vulcan**, effettuò il suo volo di prova il **30 agosto 1952**.

Quattro mesi più tardi, il **25 dicembre**, fu la volta dell'**Handley Page Victor**.

Il primo ad entrare in servizio, tuttavia, fu il **Vickers Valiant**, concepito come una soluzione tem-

poranea per colmare una lacuna operativa in attesa dei modelli più avanzati in fase di sviluppo.

Insieme, questi tre velivoli — **Valiant, Vulcan e Victor** — costituirono la cosiddetta **V-Force**, la componente nucleare strategica della Royal Air Force durante gli anni della Guerra Fredda.

Furono prodotti:

- **107 Vickers Valiant**
- **136 Avro Vulcan**
- **86 Handley Page Victor**

I progetti del Vulcan e del Victor vennero approvati **contemporaneamente**, nel **giugno del 1952**, e messi in **competizione diretta**, dato il ruolo cruciale che avrebbero avuto nella strategia di **deterrenza nucleare** britannica.

Il **Vulcan** fu utilizzato anche in **missioni operative**, in particolare come **bombardiere** durante la Guerra delle Falkland. Il **Victor**, come già detto, fu riconvertito in **aerocisterna** e impiegato con successo sia durante il conflitto delle Falkland che nella Prima Guerra del Golfo.

Il **primo Vulcan B.1** venne consegnato alla RAF nel **1956**, mentre le consegne del modello migliorato, il **Vulcan B.2**, iniziarono nel **1960**. Quest'ultimo era dotato di motori più potenti, un'ala di maggiore apertura, sistemi elettrici aggiornati e contromisure elettroniche.

Molti esemplari furono inoltre modificati per trasportare il **missile nucleare Blue Steel**.

Sebbene il Vulcan fosse pensato principalmente per l'impiego con armamento nucleare, era in grado di effettuare anche missioni di **bombardamento convenzionale**. Ne è prova l'impiego durante l'**Operazione Black Buck** del **1982**, nell'ambito della Guerra delle Falkland tra Regno Unito e Argentina.

Con l'invasione argentina delle Falkland e la conseguente risposta britannica, arrivò anche il **battesimo del fuoco per i Victor**.

Il **18 aprile 1982**, la prima ondata di aerocisterne Victor si dispiegò sull'isola equatoriale di **Ascension**, in preparazione dell'Operazione **Black Buck 1**, eseguita il **30 aprile**.

Le Black Buck (dalla Black Buck 1 alla Black Buck 7)

furono una serie di **sette attacchi aerei a lunghissimo raggio** condotti dai bombardieri **Vulcan** della RAF, appartenenti allo **Waddington Wing** (che comprendeva gli squadroni 44, 50 e 101), contro obiettivi argentini nelle isole Falkland.

Cinque di queste missioni riuscirono a completare l'attacco.

L'obiettivo principale era colpire l'**aeroporto di Port Stanley** e le difese antiaeree circostanti, allo scopo di ridurre la capacità operativa delle forze argentine.

Con circa **6.600 miglia nautiche** (oltre **12.000 km**) e **16 ore di volo andata e ritorno**, questi raid furono — all'epoca — **i più lunghi bombardamenti aerei della storia**.

Poiché il **Vulcan** era stato progettato per missioni nucleari a medio raggio in Europa, **non disponeva di autonomia sufficiente** per raggiungere le Falkland senza rifornimenti in volo.

Anche le **aerocisterne Victor**, derivate da bombardieri e con autonomia simile, **necessitavano a loro volta di rifornimento in volo**.

L'operazione logistica fu imponente: **per supportare un solo Vulcan operativo (più uno di riserva), furono necessari 11 Victor** in una complessa catena di rifornimento, con tutti gli aerei che utilizzavano **la stessa pista** sull'isola di Ascension.

Il **secondo e ultimo impiego operativo del Victor** come aerocisterna avvenne durante la **Prima Guerra del Golfo**.

Nella notte del **17 gennaio 1991**, all'inizio dei bombardamenti sull'Iraq nell'ambito dell'**Operazione Desert Storm**, i Victor completarono le loro **ultime missioni operative** prima del definitivo ritiro dal servizio.

Bibliografia

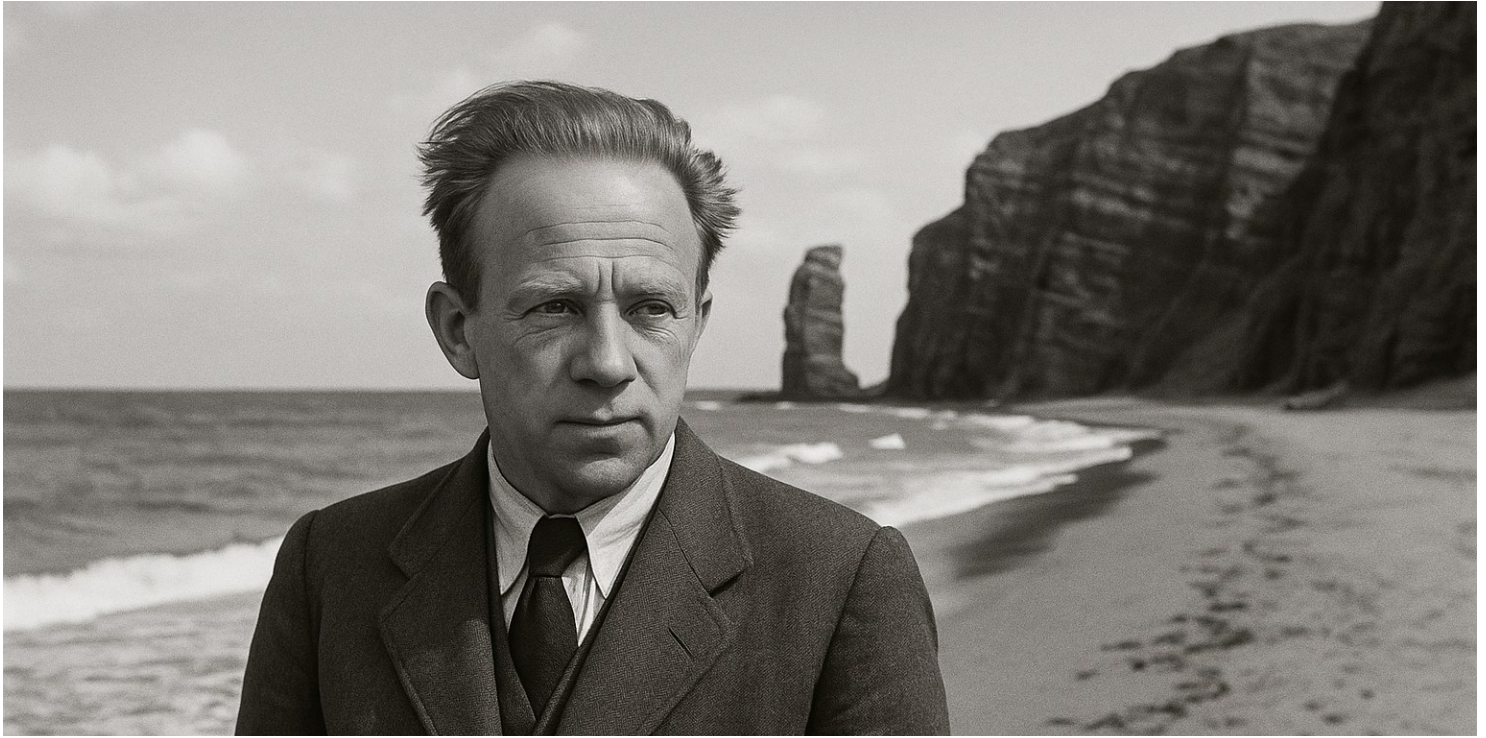
Blackman, T. (2012). *Victor Boys: True stories from forty memorable years of the last V bomber*. Grub Street

Davide Borghi

WERNER HEISENBERG

L'UOMO E LA PARTICELLA

di **Ciro Sacchetti**



È difficile racchiudere nelle righe di un solo articolo un personaggio come Heisenberg, un uomo che ha caratterizzato la Fisica, che ha veramente buttato lo sguardo oltre il parapetto della Meccanica Quantistica dando un contributo fondamentale a questa branca della scienza.

Parleremo della sua carriera scientifica, della sua vita costellata da successi ma anche da molte ombre, che lo portarono ad avvicinarsi ad un regime disumano e sanguinario, il Terzo Reich... La Meccanica Quantistica è una delle teorie della fisica più contro intuitiva e al tempo stesso di maggior successo in campo scientifico e nelle applicazioni più in uso, a partire dai ormai vecchi lettori CD, al laser, ai microscopi a scansione, agli orologi atomici ai satelliti artificiali, e la lista sarebbe lunghissima...

GEBOREN AM... (NATO IL...)

Nasce a Würzburg, in Germania. L'estratto dell'atto di nascita riporta che alle 16.45 del 5 dicembre 1901 la Sig.ra Anna Wecklein Heisenberg mette al

mondo il suo secondogenito, Werner Karl Heisenberg.



In quel periodo l'Europa vive la seconda rivoluzione industriale che si alterna ai primi "venti" che porteranno al Primo Conflitto Mondiale. Le correnti imperialiste e il continuo impoverimento della manodopera

pera nelle campagne tedesche a favore delle crescenti industrie nelle città, porta Guglielmo II° a guidare un paese ereditato da Bismark verso un conflitto che trasformerà radicalmente l'Europa.

Il padre August professore di storia greca antica, a quel tempo era una vera rarità, è stato da poco nominato libero docente presso il Luitpold-Gimnasium, una nomina prestigiosa e a dir poco unica; grazie a questo la famiglia Heisenberg vive in condizioni agiate, Werner e il fratello maggiore Erwin vivono una infanzia contornata da poche rinunce ma anche da un grande rigore morale e da un forte senso del dovere come era in uso nella società tedesca, impartito prevalentemente dal padre.

La Germania di inizio Novecento era un Paese dove il partito SPD (Partito Social Democratico) era in costante ascesa. La parte conservatrice che contrastava il socialismo esercitava un ascendente in costante aumento, August Heisenberg era persona allineata alle politiche tedesche e viveva secondo lo stile della società, e anche se in privato dimostrava di non essere molto religioso, i figli vennero tuttavia battezzati secondo la religione cristiana, e seguirono le rigide regole ecclesiastiche. Una piccola nota di colore, Werner all'età di quattro anni, impara a suonare il pianoforte, passione che coltiverà per tutta la vita e che lo porterà a diventare un buon pianista e a innamorarsi della musica classica, dopo la Seconda guerra mondiale apprezzerà anche il Jazz. Ma di Scienziati che suonavano uno strumento ne abbiamo molte testimonianze: Einstein suonava il violino, Planck il pianoforte e non scordiamoci del grande Feynman che adorava i bonghi.

Il padre, come spesso accadeva allora, riversava nel primogenito Erwin tutte le sue attenzioni a discapito di Werner, spesso mettendo i due fratelli in competizione su tutto: musica, storia, letteratura, e matematica; in quest'ultima però Werner era molto più brillante del fratello maggiore. L'incentivo alla competizione era finalizzato a far scaturire nei due figli le migliori capacità di apprendimento e conoscenza in vista di una società che grazie alle innovazioni tecnologiche stava cambiando profondamente la Germania e tutta l'Europa. Anche questo aspetto caratterizzerà la vita futura di Heisenberg.



La madre Annemarie aveva invece verso Werner un forte attaccamento, dovuto probabilmente ad un episodio in cui da bambino aveva quasi perso la vita a seguito di una forte crisi allergica; probabilmente il disinteresse del padre nei suoi riguardi suscitò in Werner un carattere molto chiuso e sviluppò in lui una serie di allergie probabilmente psicosomatiche che lo tormenteranno per molti anni.

Heisenberg frequentò la scuola elementare (Grundschule) a Würzburg, dove ricevette una formazione tradizionale, ma la sua passione verso la scienza si manifestò in modo più che evidente, lasciando il padre sconsolato che lo voleva più portato verso materie letterali.

Dopo le scuole elementari, Heisenberg continuò la sua formazione nel liceo (Gymnasium), che frequentò a Monaco di Baviera, città in cui la sua famiglia si trasferì quando lui aveva 10 anni.

Werner si iscrive al prestigioso Maximilians Gymnasium dove solo l'élite poteva permettersi di iscriversi i propri figli grazie anche al fatto che era il figlio di August e che aveva un illustre nonno da parte di madre che ne era il direttore. All'inaugurazione del nuovo edificio del Gymnasium, Werner recita davanti al principe Ludwig una poesia scritta dalla madre, il principe gli dona due gemelli con le sue iniziali che Werner conserverà per tutta la vita. Qui la sua passione per la scienza si fece ancora più forte, e si dedicò in particolare agli studi di matematica e fisica con voti più che invidiabili, nonostante il carattere molto riservato, quasi schivo, riscuote un gran-

de rispetto da parte dei suoi compagni che sono affascinati dalla passione che Heisenberg mette nello studio delle materie scientifiche e nelle relative interrogazioni...

Il 14 giugno 1914 a Sarajevo, per mano di un nazionalista serbo (Gavrilo Princip), vengono uccisi l'arciduca ereditario dell'Impero Austro Ungarico, Francesco Ferdinando, e sua moglie.

Questo segna "la goccia..." che scatena la Prima Guerra Mondiale.

La famiglia Heisenberg, molto patriottica, non si tira indietro dal fare il proprio dovere: il padre August chiede di essere assegnato al fronte dopo una prima destinazione che non lo faceva sentire utile. Poi però chiede di essere messo nelle retrovie e viene accontentato. Il figlio Werner vuole fare la sua parte e viene assegnato come agricoltore in una fattoria casearia.



Alla fine della Grande Guerra, l'Europa conta oltre 26 milioni di morti, sia militari che civili. Altri 20 milioni furono feriti. In contesto come questo dove si spera che un conflitto così non avvenga mai più (speranza vana), il giovane Werner si mette in luce come brillante studente.

I risultati scolastici sono veramente impressionanti, il padre ne è più che soddisfatto con una punta di rammarico perché lo voleva indirizzare verso le materie umanistiche, ma Werner è portato per le scienze: fisica, e soprattutto matematica.

Il padre gli procura una copia della tesi di Laurea in latino di Leopoldo Kronecker "De Unitatibus Complexis" dove il grande matematico si impegna senza

successo nella dimostrazione del famoso teorema di Fermat. Werner la divora con passione. Legge anche il testo di Einstein presentato nelle scuole per spiegare la Teoria della Relatività, ma è indignato su come vengono rappresentati gli atomi dotati di ganci e occhielli per potersi legare e formare le molecole, ne parla a lungo con l'amico Kurt Pflügel in una passeggiata nel 1920. Con forti carenze nelle materie letterarie vince una borsa di studio alla Stiftung Maximilianeum.

È il 7 luglio 1920.

LA FORMULA DI PLANCK (7 OTTOBRE 1900)

IRRAGGIAMENTO DEL CORPO NERO

Agli inizi del 900 sembrava che la fisica avesse scoperto tutto, ma Max Planck dimostrò che non era così. Le osservazioni di Planck traggono origine dallo studio delle proprietà della radiazione termica, cioè della radiazione emessa ed assorbita da un corpo in virtù della propria temperatura; più precisamente, lo scienziato tedesco studiò la radiazione emessa da un particolare tipo di corpo, il cosiddetto "corpo nero", che emette una radiazione con uno spettro di carattere universale, mentre, in generale, lo spettro dipende dalla composizione del corpo in questione. Un corpo si dice "nero" quando assorbe tutta la radiazione incidente su di esso; il nome è sicuramente appropriato perché tali oggetti non riflettono la luce ed appaiono di colore nero quando la temperatura è sufficientemente bassa per impedire che brillino di luce propria.

In fisica, un corpo nero è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente e non la riflette.

Per capire meglio possiamo provare a fare un esperimento mentale: proviamo ad immaginare un corpo nero sotto forma di una scatola chiusa con un piccolo foro, con pareti ad una certa temperatura. Esse emettono radiazione secondo una legge che lega l'energia emessa per unità di volume alla frequenza della radiazione ed alla temperatura ma che è indipendente dal materiale di cui è costituito il corpo nero.

Nessuno era riuscito prima di lui a spiegare il perché, nemmeno il buon William Strutt, terzo barone di Rayleigh, utilizzando la fisica classica in collaborazione con James Jeans cercarono di spiegare lo spettro del corpo nero, formulando la legge di Rayleigh-Jeans, che naufragava alle alte frequenze.

Fu comunque un importante passo anche se incompleto che contribuì ad una formulazione classica dello spettro del corpo nero. Questo portò alla **legge di Planck**, che descrive accuratamente lo spettro del corpo nero a tutte le lunghezze d'onda.

Planck affermava che lo spettro di irraggiamento del

ENERGIA del singolo pacchetto di luce

$$E = h \nu$$

Costante di Planck
 $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$

Frequenza dell'onda Elettromagnetica

corpo nero potrebbe essere perfettamente spiegato ipotizzando come artificio matematico che la luce sia emessa da **particelle** immateriali alle quali è affidato il trasporto dell'energia elettromagnetica.

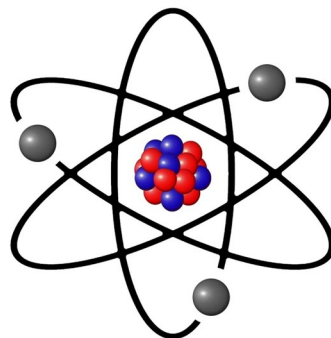
La formula di Planck si avvicina alle osservazioni sperimentali molto più del metodo tradizionale di Rayleigh ma è in contraddizione con le equazioni del campo elettromagnetico di Maxwell (per Maxwell c'era la natura ondulatoria della luce).

UN PO' DI STORIA ...

Facciamo ora un salto indietro nel passato e andiamo a vedere come nasce il modello che prova a dare le prime definizioni della particella infinitamente piccola. Daremo una occhiata alla vecchia faccenda degli atomi e di quelli che la storia definirà "gli ato-

misti" (400/500 a.C.). Il modello atomico oggi riconosciuto è l'ultima tappa di una serie di ipotesi che sono state avanzate nel tempo. Partiamo da Leucippo (V secolo a.C.) che fondò una teoria secondo la quale ipotizzò la non continuità della materia, affermò che la materia stessa era costituita da minuscole e indivisibili particelle. Questa teoria venne chiamata "atomismo".

Molti greci ripresero questa teoria: Democrito (V-IV secolo a.C.) ed Epicuro (IV-III secolo a.C.), e anche romani, quali Tito Lucrezio Caro (I secolo a.C.). Questa corrente prese il nome di "teoria atomica", secondo cui la materia è costituita da minuscole particelle, diverse tra loro, chiamate atomi, la cui unione dà origine a tutte le sostanze conosciute



Saltiamo ora dall'era precristiana ad un'epoca più vicina a noi: John Dalton (1808).

Secondo gli studi di Dalton tutta la materia è fatta da particelle microscopiche indistruttibili e indivisibili chiamate atomi sposando la teoria atomica.

La teoria atomica di Dalton si articola su sei punti:

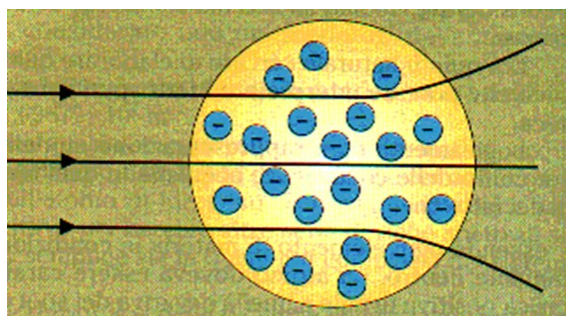
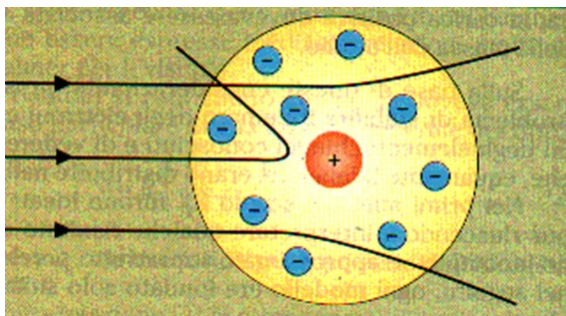
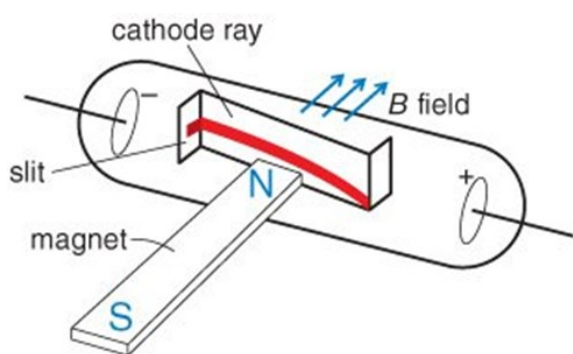
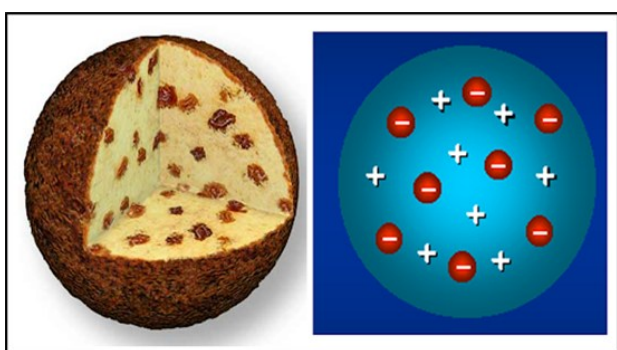
- 1) La materia è costituita da atomi, particelle di materia indistruttibili e indivisibili.
- 2) Tutti gli atomi di uno stesso elemento sono identici e hanno uguale massa. Un oggetto di rame, ad esempio, è costituito da soli atomi di rame.
- 3) Gli atomi di un elemento non possono essere convertiti in atomi di altri elementi.
- 4) Elementi diversi sono costituiti da atomi diversi per volume, massa e proprietà. Ad esempio, l'idrogeno, ossigeno....
- 5) Atomi uguali o diversi possono unirsi tra loro per formare composti chimici e lo fanno sola-

mente con numeri interi di atomi di altri elementi.

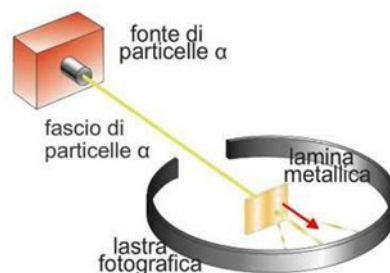
- 6) Gli atomi non possono essere né creati né distrutti, ma si trasferiscono interi da un composto a un altro.

LE PARTICELLE DI RUTHERFORD (1897)

Joseph John Thomson nel 1897, scoprì che i gas catodici (ionizzati) all'interno di un tubo di Crookes sono soggetti all'effetto dei campi magnetici esterni.



L'esperimento di Rutherford



non tutte attraversavano la materia

I raggi catodici cambiano direzione se sottoposti ad un campo magnetico. Il fenomeno suggerisce a Thomson il primo modello moderno dell'atomo, che immagina come un panettone (1904). Meno di 10 anni dopo la teoria di Thomson viene sostituita da quella di Ernest Rutherford. Lui sparò particelle alfa (nuclei ionizzati di elio-4) su una sottilissima lamina d'oro. Alcune passano irradiandosi a raggiera, ma altre tornano indietro rivelando che la teoria dell'atomo a panettone dove gli elettroni sono sparpagliati è sbagliata. L'atomo ha un nucleo centrale pesante carico positivamente, e una serie di elettroni leggeri che «orbitano» intorno al nucleo, e tra i due vi è uno spazio enorme.

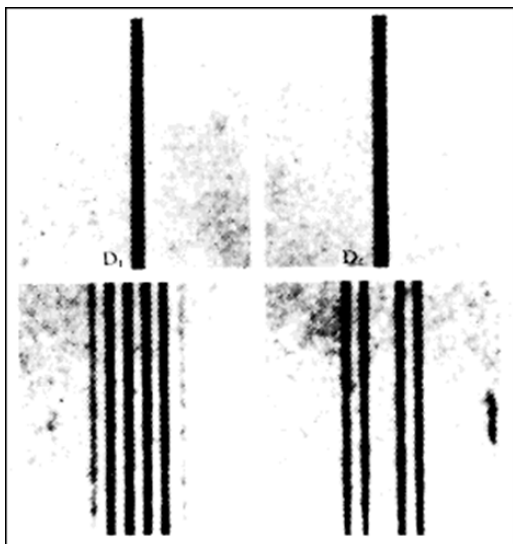
In scala, se il protone di un atomo di idrogeno fosse grande come una formica di 5 mm, l'elettrone orbiterebbe a una distanza di circa 500 metri! (circa 5 campi da calcio).

GLI SPETTRI DEGLI ATOMI (1896)

Il sole e le sorgenti di luce a noi più famigliari come la fiamma emettono luce a varie lunghezze d'onda (colori diversi) con intensità diverse a seconda della lunghezza d'onda. Questo è lo spettro della radiazione emessa. Se io scaldo un elemento, emetterà luce con picchi a frequenze specifiche. Questo è lo spettro di emissione. Ogni elemento ha il suo spettro caratteristico suddiviso in righe.

Le righe sono suddivise ad intervalli regolari ma alcuni gas sottoposti ad un intenso campo magnetico

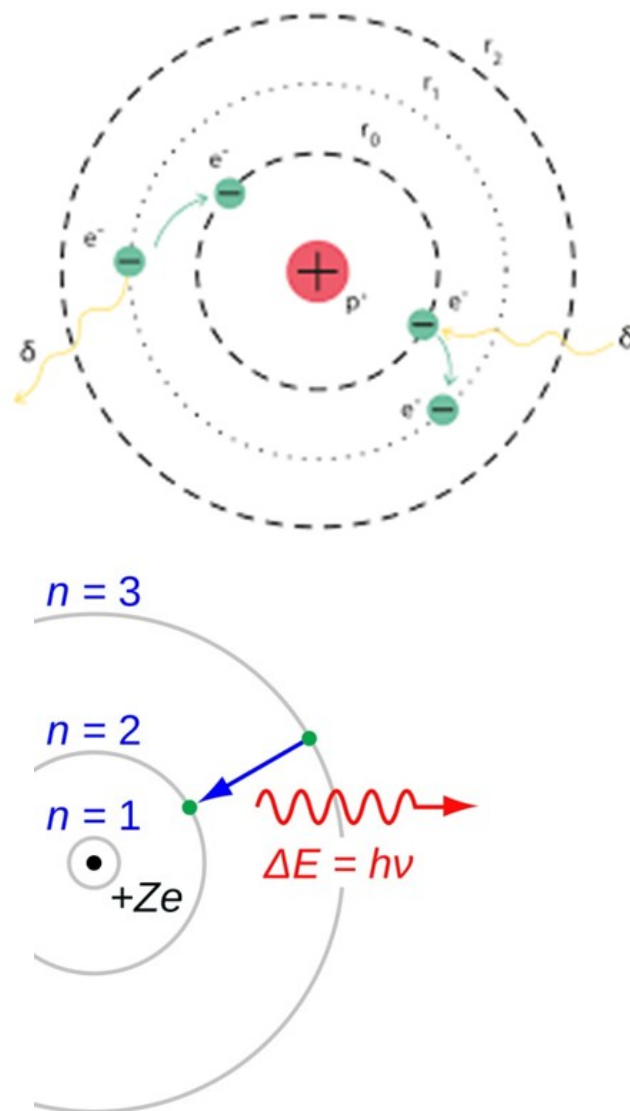
hanno una complicata suddivisione delle linee spettrali (effetto Zeeman anomalo) che non si spiega considerando l'elettrone come una particella che descrive un'orbita attorno al nucleo atomico, come descritto dal modello atomico di Bohr.



LE ORBITE STAZIONARIE DI BOHR (1913)

Niels Bohr, allievo di Rutherford, propone che l'elettrone possa muoversi solo lungo definite orbite circolari, **senza mai perdere la propria energia**. Le fasce circolari lungo cui si muovono gli elettroni però devono rispettare alcune condizioni precise:

- Le orbite sono circolari e discrete, con energia definita e costante (stati stazionari).
- Gli elettroni che si muovono su tali orbite non irradiano e quindi non emettono energia in modo continuo (contrariamente a quanto previsto dall'elettromagnetismo classico).
- Un elettrone irraggia energia soltanto quando eccitato e quindi passa (mediante un salto quantico discontinuo) da un'orbita stazionaria ad un'altra. Deve passare ad un'orbita stazionaria più esterna nel caso di assorbimento di radiazione elettromagnetica, mentre salta ad una più interna nel caso di emissione, cioè quando perde l'energia ricevuta emettendo un fotone (luce).



LA GERMANIA NEL CAOS (1918 – 1919)

Gli ultimi anni di ginnasio di Heisenberg coincidono con uno dei periodi più turbolenti che la storia tedesca ricordi. La Germania tra il 1918 e il 1919 è flagellata dagli ammutinamenti di marina ed esercito, la cocente sconfitta e il trattato di Versailles piuttosto restrittivo e lo smembramento di parte del territorio oltre ad onerosi indennizzi, hanno lasciato il paese in ginocchio. In questo contesto la sinistra guadagna terreno ma si frammenta subito in una manciata di partiti e viene proclamata la traballante Repubblica di Weimar. Werner e suo fratello si arruolano nelle Freikorps (milizie formate da ex combattenti smobilitati dalle forze armate imperiali), ma senza troppa convinzione. Il trattato di Versailles che strangola economicamente ed umilia la Germania, dà il via libera ad un pericolosissimo rigurgito nazionalista e ad un altrettanto pericoloso personaggio, che riesce in un momento come questo a fare breccia nel popolo tedesco. Rispondeva al nome di Adolf Hitler! Heisenberg visti i tumulti e una società che sembra andare in frantumi, per lui che è a pieno titolo "uomo di scienza", questo caos gli provoca un moto di repulsione facendogli maturare un sempre maggiore disinteresse verso la politica.



IL MOVIMENTO GIOVANILE (1919-1921)

Il 1° agosto 1919 nella Germania post bellica, 250 giovani Pfadfinder (ossia membri del movimento scout tedesco) si radunano presso il castello di Prunn per discutere con forte disillusione sul significato dei sacrifici della Grande Guerra di fronte a una

civiltà industriale, borghese e conservatrice. Si creano ben presto correnti contrastanti tra loro, una tra queste appoggiava con passione la corrente politica conservatrice, l'ala moderata del movimento invece rifiuta la partecipazione politica per intraprendere attività vicine alla gente comune. Così fa Heisenberg che, una volta alla settimana, terrà lezioni serali al suo gruppo sull'opera lirica tedesca e corsi di astronomia. Col gruppo Heisenberg diventa molto affiatato e coeso, ma si tratta anche di una comunità chiusa, quasi una setta segreta. Si danno regole molto rigide, la partecipazione alle riunioni cadenzate è praticamente obbligatoria, alcol, tabacco e donne sono severamente proibiti. Nelle vacanze estive fanno lunghi viaggi, fino in Tirolo o in Finlandia.



"LA MATEMATICA NON FA PER LEI..."

Nel 1920 Heisenberg è pronto per fare il grande salto: si iscrive alla facoltà di fisica dell'università di Monaco.

Il nonno di Werner ne è stato il Rettore per lungo tempo quindi la sua ammissione dovrebbe essere una mera formalità, tuttavia non sarà così. Werner

ha un primo colloquio con il grande Von Lindemann (professore di matematica).



Ferdinand von Lindemann

Von Lindemann è un professore molto austero e dopo una chiacchierata che ad Heisenberg è sembrata una doccia fredda, gli viene detto testualmente "la matematica non fa per lei!!!" quindi la facoltà di Fisica lo scarta in malo modo... Il padre riesce a fargli avere un colloquio con Arnold Sommerfeld, preside della facoltà di fisica teorica, sempre dell'università di Monaco.



Arnold Sommerfeld

Sommerfeld è impressionato da Heisenberg, ma capisce che la sua frenesia di conoscenza lo ha fatto correre molto, anzi troppo; quindi, rimprovera Heisenberg per aver letto testi troppo complicati per la sua preparazione, ma lo elogia per il grande l'impe-

gno.

Werner si iscrive al corso fisica teorica di Sommerfeld (sei semestri) e frequenta anche un corso di fisica classica come gli aveva suggerito lo stesso Sommerfeld: Heisenberg può finalmente buttarsi alle spalle l'incubo vissuto con Lindemann.

Sommerfeld mette al lavoro il suo brillante studente sul difficile problema dell'effetto Zeeman anomalo.

Il giovane Werner in modo irriverente ma senza dubbio genuino, formula una teoria in cui assegna numeri quantici semi-interi ($1/2$, $3/2$, ...) ad ogni stato dell'effetto Zeman, e tutto torna!!!

Ma Sommerfeld e tutti gli studenti compagni di corso si oppongono indignati, perché tutti i numeri quantici possono essere solo interi.

Sommerfeld lascia comunque che Heisenberg continui a lavorarci ma gli impedisce di divulgare la cosa o di pubblicare questa sua teoria, per quanto lui ne fosse fortemente convinto.

Ed è così che il destino beffardo gioca un brutto scherzo ad Heisenberg.

Landè, fisico teorico, da Francoforte nel marzo 1921 comunica a Sommerfeld di aver raggiunto le stesse conclusioni e pubblica prima di Heisenberg le sue scoperte.



Landè

Heisenberg è giustamente indignato, si sente ingannato e tradito, lo spirito di competizione instillato dal padre fa scaturire in lui una grande invidia, che prova anche per alcuni aiutanti di Sommerfeld che

lo avevano deriso.

Durante un convegno a Jena, Heisenberg presenta il suo "modello della regione centrale dell'atomo", che spiega molti dei fenomeni fino ad allora inspiegabili, anche se per molti è visto con scetticismo, altri fisici lo trovano interessante o addirittura geniale.

Il 17 dicembre 1921 la «Zeitschrift für Physik», una delle più importanti riviste di fisica, accetta il manoscritto proposto da Heisenberg per la pubblicazione.

Il grande Fisico Niels Bohr è scettico perché ritiene il modello inconciliabile con i principi basilari della teoria dei quanti.

Nel 1922 a Gottinga Heisenberg incontra per la prima volta Niels Bohr.

Bohr è in Germania per un tour di conferenze sulla fisica atomica quantistica, conferenze ricordate come "il festival di Bohr". Una mattina durante una colazione dove Sommerfeld e Bohr si incontrano per la prima volta, quest'ultimo usa toni gentili e diplomatici per definire le conclusioni del giovane studente. Cinque giorni dopo, il 20 giugno, nella sua quinta conferenza, Bohr critica con toni duri ed aspri il modello della regione centrale dell'atomo di Heisenberg.



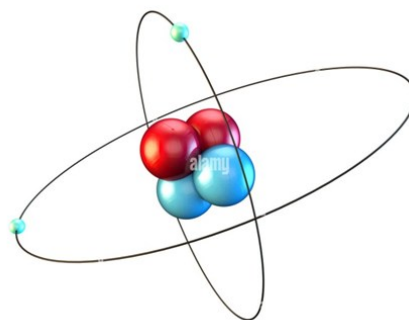
Ma Heisenberg è affascinato e conquistato da Niels Bohr: da quel momento nasce il loro sodalizio, Heisenberg lo riconoscerà come il suo grande maestro e consigliere ed il suo rispetto nei confronti di Bohr aumenterà sempre più negli anni a venire. Dopo una vacanza estiva in sud Tirolo, Heisenberg approda a Lipsia dove si tiene un congresso nel quale è atteso Einstein e la sua teoria della relatività. L'attesa sarà vana, Einstein non si presenta, la ragione è

legata alla politica antisemitista che si sta diffondendo in Germania in quegli anni.

Alla vigilia del congresso Lenard pubblica un documento dove attacca la teoria di Einstein e conclude con una "sparata" antisemita in linea con la politica che si faceva avanti. Heisenberg, sconvolto da tutto questo e dal furto subito nell'ostello dove soggiornava, il giorno dopo torna a casa a Monaco.

Max Born (direttore dell'istituto di fisica teorica di Gottinga) chiede a Sommerfeld di poter ospitare Heisenberg nel suo istituto per un semestre.

Al Kolloquium di Fisica presenta le sue teorie ed è un successo, risponde a tutte le domande e diventa il pupillo della Gottinga dei Fisici. A gennaio 1923 Born gli offre il ruolo di assistente. Nello stesso anno applica le sue teorie utilizzando valori quantistici semi interi agli spettri dell'atomo dell'elio con risultati strabilianti, dove Bohr e Pauli avevano fallito.



Nel 1923 Heisenberg è senza dubbio un brillante ricercatore, ma non si è ancora laureato, gli impegni a Gottinga lo portano a ritornare a Monaco solo nel maggio del 1923 con una tesi sulla turbolenza dei fluidi di appena 59 pagine. Sommerfeld è molto preoccupato per le conclusioni piuttosto approssimative, viene ammesso con una certa riserva alla

sessione orale dove risponde prontamente alle domande di fisica teorica e matematica, ma inciampa a quelle di fisica sperimentale dove il vetusto professor Wein lo incalza indignato dal comportamento di uno studente indubbiamente brillante che pensava di laurearsi senza padroneggiare la fisica sperimentale. Heisenberg si laurea con un modesto «III» (la sufficienza) e la sera stessa fa le valige per raggiungere a Gottinga Born



Ricorre l'anniversario dell'armistizio della Prima Guerra Mondiale, e la sera dell'8 novembre 1923, Hitler irrompe nella birreria Bürgerbräu, dove Kahr (commissario generale della Baviera) stava tenendo un discorso davanti a 3.000 persone. Hitler è alla testa di un gruppo di 603 SA (la milizia paramilitare del partito nazista) e annunciando la proclamazione di un nuovo governo, chiede il sostegno di Kahr.



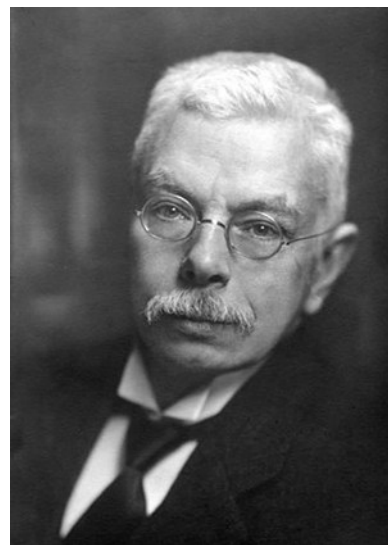
Kahr si oppone: il giorno dopo la polizia disperde i manifestanti ed arresta i leader del tentato putsch,

tra cui Hitler. In questo clima Heisenberg, sempre più schifato dalla politica, ritira il suo primo (modesto) stipendio di 50 rentenmark da Born.

Heisenberg torna a Gottinga nell'autunno 1923. La teoria della meccanica quantistica ha fatto passi in avanti grazie a Landè, ma ancora parti di essa, come la formulazione dell'effetto Zeeman, erano un miscuglio di termini classici e termini quantistici.

Heisenberg inventa ed introduce l'hamiltoniana quantistica e applicandola alla regione centrale del nucleo riesce a riprodurre tutti i risultati di Landè per l'effetto Zeeman. Born lo spinge a pubblicare, ma il padre si oppone dopo aver chiesto lumi a Sommerfeld che si mostra nuovamente contrario ad una pubblicazione.

L'hamiltoniana, opera una differente scelta di coordinate per generare lo spazio delle fasi, diverse da quelle nelle equazioni del moto di Eulero-Lagrange. L'hamiltoniana è una funzione scalare solitamente associata all'energia totale del sistema, somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale.



Pieter Zeeman

Nel 1924 Heisenberg arriva all'Istituto di ricerca sulla Fisica Sperimentale a Copenhagen, nel tempio di Niels Bohr che ne è il fondatore. Qui Werner ha la possibilità di esprimere tutta la sua genialità, ma le cose per il giovane fisico si complicano: la concorrenza è spietata, Hendrik Kramer (assistente di Bohr) non digerisce la notorietà (e la superbia) del nuovo arrivato. Kramer è sempre in sintonia con il maestro Bohr, è più vecchio di un anno ed è un bra-

vissimo musicista, questo rende Heisenberg molto geloso ed invidioso verso Kramer che sembra concentrare su di sé tutte le attenzioni di Bohr, l'invidia è tale che Werner ha alcuni episodi di forte malessere con forti dolori all'addome, e un aumento esponenziale delle sue allergie.

Pauli modifica e migliora i risultati di Heisenberg: l'effetto Zeeman non è da attribuirsi alla regione centrale, ma all'elettrone di valenza. Pauli in un articolo che arriva alla «Zeitschrift für Physik» nel dicembre 1924 precorre la scoperta dello spin dell'elettrone e formula il famoso **principio di esclusione**: due elettroni non possono avere tutti e quattro i numeri quantici uguali. Dai numeri quantici ricava tutta la tavola periodica degli elementi, ma Arthur Compton dopo pochi mesi però grazie a studi sperimentali sembra demolire la teoria di Pauli: la luce sembra essere costituita da quanti. Con tutto quello che stava passando invece di disperarsi, affetto da un enorme raffreddore da fieno, Heisenberg a giugno 1925 parte per **Helgoland**, una minuscola isola del mare del Nord, a meditare sugli ultimi sviluppi teorici.



Wolfgang Pauli

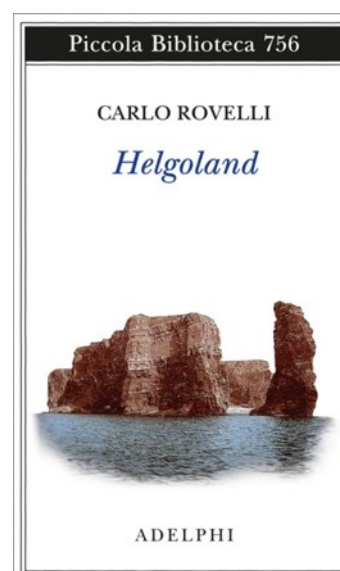
Helgoland è un vero e proprio sasso in mezzo al mare, un'isola completamente priva di alberi e vegetazione. E' piccola e poco abitata (oggi vi abitano circa 1.200 anime), ed è qui che trova, oltre al giovamento dalla sua allergia, anche la concentrazione per provare a dare un senso alle contraddizioni teoriche della meccanica quantistica. Dopo essersi scervellato per settimane, ha un'intuizione. Sostituisce le orbite classiche degli elettroni con una serie ordinata di enti matematici che diventano gli ele-

menti di una matrice, poi applica il principio di conservazione dell'energia. Ricava l'energia degli stati stazionari, moltiplicando gli elementi della matrice ed apre la strada al suo **principio di indeterminazione**.

La nuova meccanica matriciale di Heisenberg mette ordine nel caotico insieme di ipotesi che, fino a quel momento, costituiva la meccanica quantistica. Heisenberg ce l'ha fatta!!!

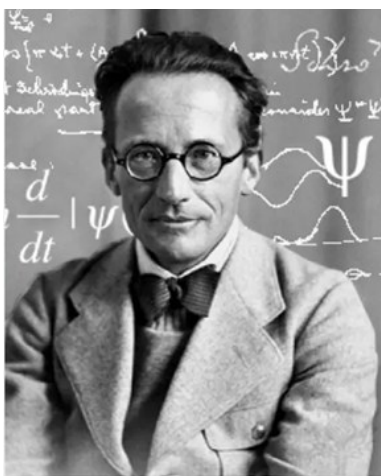


Da "Helgoland" di Carlo Rovelli: *"Erano più o meno le tre del mattino quando il risultato finale dei miei conti fu davanti a me. Mi sentivo profondamente scosso. Ero così agitato che non potevo pensare di dormire. Lasciai la casa e mi misi a camminare lentamente nell'oscurità. Mi arrampicai su una roccia a picco sul mare, sulla punta dell'isola, e attesi il sorgere del sole..."*. Mentre guardava la vastità delle onde, aspettando il sorgere del sole, Heisenberg aveva appena gettato per primo lo sguardo su uno dei più vertiginosi segreti della natura che l'Umanità abbia mai intravisto. Werner Heisenberg aveva solo ventitré anni...



Nell'autunno del 1925, due fisici di Leida (Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck) per spiegare l'effetto Zeeman suggeriscono di trasferire all'elettrone il momento angolare semintero (lo spin) che Heisenberg aveva attribuito al nucleo centrale.

Heisenberg e Pauli inizialmente non ne vogliono sapere di rimettere tutto in discussione ma i fisici di Leida hanno ragione: applicando la matematica delle matrici agli elettroni si spiegano perfettamente gli strani risultati empirici dell'effetto Zeeman. Subito si fa avanti un'altra sfida: la meccanica matriciale di Heisenberg contro la meccanica ondulatoria di **Schrödinger**.



Schrödinger

Nel Natale 1925 Schrödinger elabora la nuova teoria: se le particelle o gli elettroni hanno proprietà

ondulatorie, allora deve essere possibile descriverle attraverso una **funzione d'onda**. I salti discreti di un elettrone da uno stato stazionario all'altro diventano transizioni continue da un modo di vibrazione all'altro (dualismo onda-particella). Inizia una vera e propria diatriba tra i due studiosi, che (lo vedremo più avanti) si risolverà più o meno con un pareggio anche se le loro discussioni si accendono arrivando quasi alle mani.

L'interpretazione della meccanica quantistica è senza dubbio il premio in palio più ambito della fisica degli inizi del XX secolo. In competizione ci sono la meccanica ondulatoria/continua di Vienna e quella particellare/matriciale/discreta di Copenaghen.

Il 23 febbraio del 1927 Heisenberg, divenuto a pieno titolo discepolo di Bohr, invia da Copenaghen una lettera all'amico Wolfgang Pauli presso l'Università di Amburgo. La lettera è un manoscritto di 14 pagine: ne scaturisce uno scambio epistolare dal quale emergerà una teoria che sconvolge il mondo della Fisica, **Il principio di indeterminazione!!!**

Nel 1927 Heisenberg si rende conto che ogni volta che proviamo a misurare una particella (ad esempio, la posizione di un elettrone), dobbiamo interagire con essa, ad esempio usando un fotone di luce. Ma questa interazione non è innocua: il fotone "disturba" l'elettrone, modificandone la velocità.

Quindi non possiamo mai misurare contemporaneamente

$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$

Incertezza sulla Posizione

Incertezza sulla quantità di moto

← Costante di Planck ridotta

Posizione e quantità di moto sono grandezze incompatibili

Costante di Planck ridotta

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$

$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$

36

mente posizione e velocità con precisione assoluta.

Heisenberg ha tradotto questo in una equazione, utilizzando le proprietà non commutative delle moltiplicazioni tra matrici.

Questa scoperta non era solo un problema di misurazione, **ma una proprietà fondamentale della natura**.

Dimostrava che, a livello quantistico, il mondo non è "deterministico" come credeva Newton, ma è **intrinsecamente probabilistico**. Questo ha segnato una svolta epocale nella scienza!

Riassumendo, Heisenberg ci è arrivato combinando:

- L'idea che misurare significa "interagire".
- Nuovi strumenti matematici come le matrici.
- Le osservazioni sperimentali di quel tempo.

Nell'aprile 1927 Heisenberg pubblica un articolo dal taglio divulgativo sulle implicazioni del principio di indeterminazione su "Forschungen und Fortschritte". Il titolo dell'articolo è "Über die Grundprinzipien" (informazioni sui principi di base). Heisenberg sottolinea come la fisica all'inizio del '900 fosse costituita dalla meccanica newtoniana e dall'elettromagnetismo (equazioni di Maxwell).

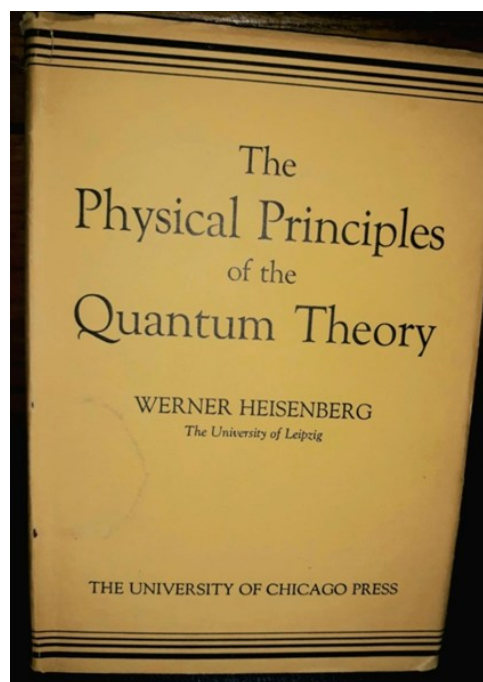
Le nozioni di spazio-tempo furono ripensate dalla teoria della relatività. Ora era necessaria una nuova rivoluzione per poter esplorare l'infinitamente piccolo: la meccanica quantistica.

Heisenberg afferma che è impossibile conoscere con precisione assoluta e simultanea sia la posizione che la quantità di moto di una particella subatomica, come un elettrone. Il principio di indeterminazione è una conseguenza fondamentale della meccanica quantistica.

Questa interpretazione ha profonde implicazioni **filosofiche**, in un certo senso smette di essere valida la legge di causalità; quindi, il determinista Laplace è definitivamente demolito. Il principio ha portato alla nascita di concetti come la dualità onda-particella e la **non determinazione degli stati quantici prima della misura**.

Al rientro dalle ferie, Bohr trova un errore sull'esperimento che dovrebbe avallare l'articolo di Heisen-

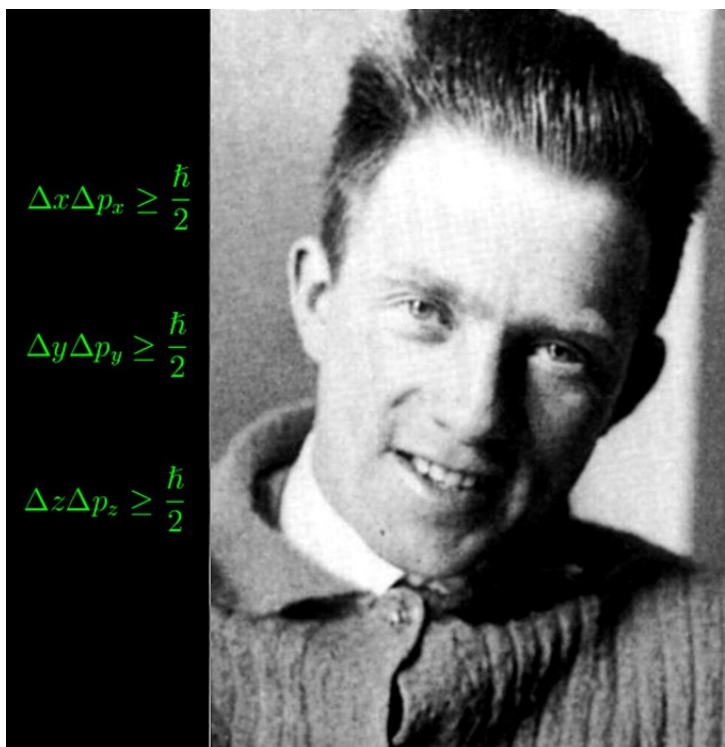
berg: l'impossibilità di una doppia misurazione simultanea di posizione e quantità di moto non ha nulla a che vedere con il rinculo dell'elettrone colpito da un fotone, ma bensì con la diffusione delle onde che compongono il quanto di luce all'apertura dell'obiettivo del microscopio. Bisogna perciò considerare anche la teoria ondulatoria di Schrödinger (tanto odiato)... Heisenberg trova Schrödinger un uomo dissoluto e mediocre per il suo stile di vita con ripetute avventure extraconiugali e l'abitudine all'uso di alcol e stupefacenti.



Le formule di indeterminazione si compongono con simboli ondulatori e corpuscolari: nella materia convivono le due essenze. È la necessità di scegliere nella misurazione tra le caratteristiche ondulatorie e quelle corpuscolari che introduce il disturbo e ne impedisce la precisione.

Alla fine, Werner capitola ed a metà maggio 1927, suo malgrado, invia alla rivista un addendum nel quale ammette che l'indeterminazione non deriva solo dalla quantizzazione ma dal voler prendere in considerazione un solo aspetto, in fenomeni che comprendono sia l'aspetto corpuscolare che quello ondulatorio della materia.

Nel settembre 1927 l'istituto Carducci di Como ospita un convegno per commemorare il centenario della morte di Alessandro Volta. Bohr si rende conto



che il principio di indeterminazione è fondamentale per poter capire la fisica quantistica. Prova a far passare una posizione di compromesso, che definisce complementarità tra gli aspetti corpuscolari e quelli ondulatori. Il tentativo è un fiasco, le risposte alle obiezioni sono confuse, incerte.

In questa prima uscita a Como, la complementarità ha fatto fiasco, ma la strada è tracciata e questa

interpretazione della meccanica quantistica (oggi nota come **interpretazione di Copenaghen**) avrà un glorioso futuro.

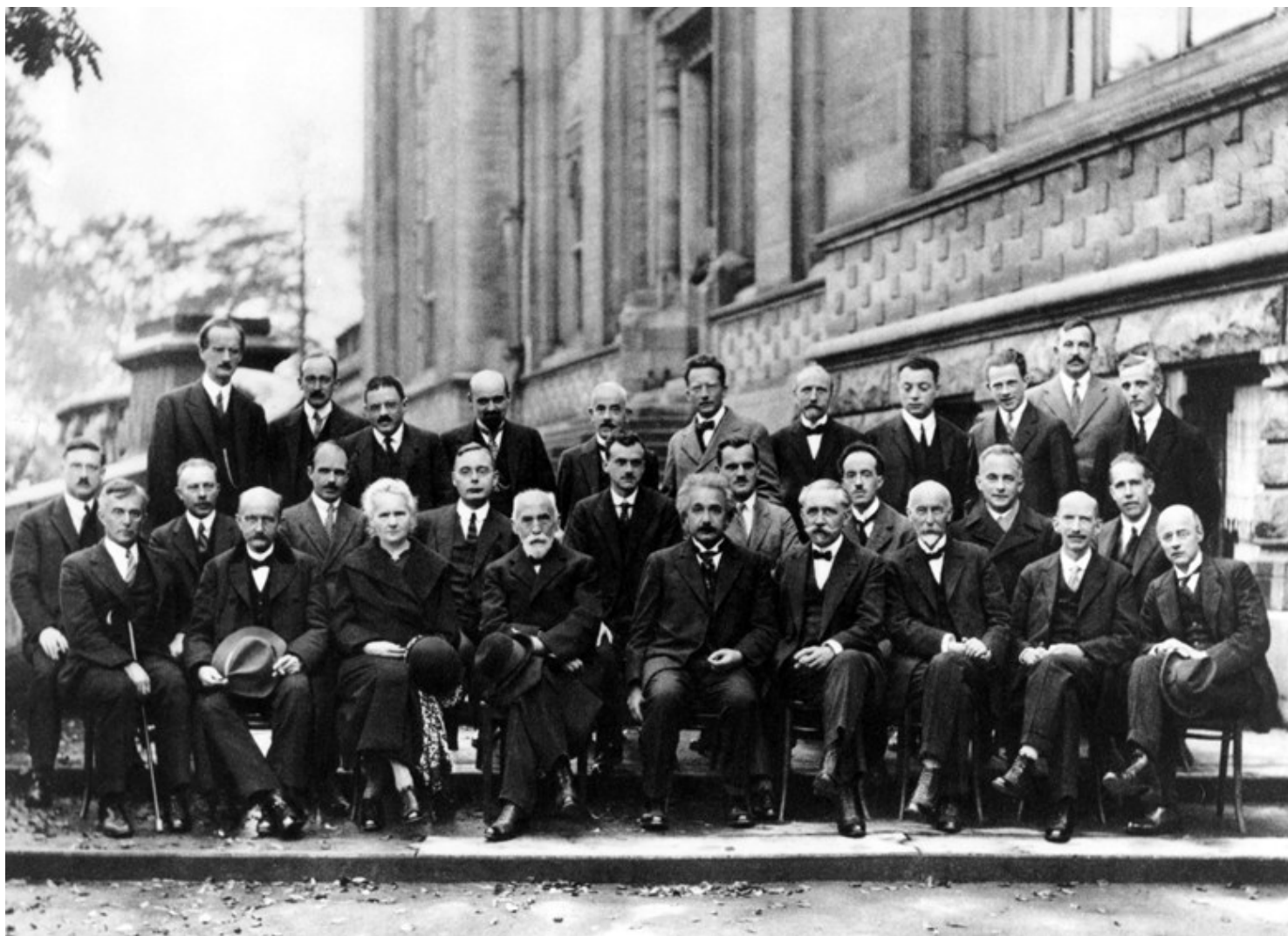
Arriviamo alla **quinta edizione del congresso di Solvay** in Belgio. Bohr presenta "Lo Spirito di Copenaghen" in modo più chiaro: tutti capiscono che nei processi quantistici, le nature ondulatorie e corpuscolari si manifestano in modo complementare.

Ad Einstein risultava indigesto che la meccanica quantistica fosse una teoria fondamentalmente statistica e non deterministica. Otto Stern raccontava che Einstein scendeva ogni volta a colazione con un nuovo esperimento mentale per screditare la meccanica quantistica e alla sera a cena Bohr chiariva tutto... Per Einstein, la realtà fisica doveva esistere indipendentemente dall'osservatore, mentre per la meccanica quantistica si devono prendere in considerazione anche gli strumenti di misura.

Il Congresso di Solvay sarà l'ultima volta di Heisenberg in un ruolo di secondo piano.

L'Università di Halle gli offre una cattedra di fisica teorica e Sommerfeld gli propone una cattedra di professore straordinario presso l'Università di Monaco. Heisenberg sarebbe molto contento di tornare a Monaco, ma lui ha una offerta che non può rifiutare.





Peter Debye lo propone a luglio 1927 per la cattedra di Lipsia, informando anche Sommerfeld.

Anche alcune università americane vorrebbero il giovane Werner, ma lui ha già deciso di accettare l'offerta di Debye: poter collaborare con una figura come Debye lo affascina moltissimo.

Arriva a Lipsia nel novembre 1927. La facoltà di fisica appena lasciata da Des Coudres è in pessime condizioni. Al primo seminario di fisica atomica ha solo uno studente, ai seminari estivi arriva a dodici grazie anche a tre studenti inviati da Sommerfeld. Il corso superiore di fisica atomica arriva ad una ottantina di studenti, la fama e la capacità di Heisenberg di trasmettere la sua passione per la fisica, ha ridato vita e smalto a questo corso.

Il numero di iscritti al corso di fisica in un anno è raddoppiato, ma Heisenberg sta per partire per un ciclo di conferenze negli USA e per un giro intorno al mondo per diffondere la nuova fisica...



L'arrivo di Heisenberg in America dà il via ad un lungo tour che lo porterà a tenere conferenze e lezioni in tutto il territorio americano, continuando anche in Giappone. La società americana impressio-

na molto Heisenberg, stringe facilmente amicizia con molte persone in un modo a cui non era abituato, fa escursioni sulle montagne rocciose.

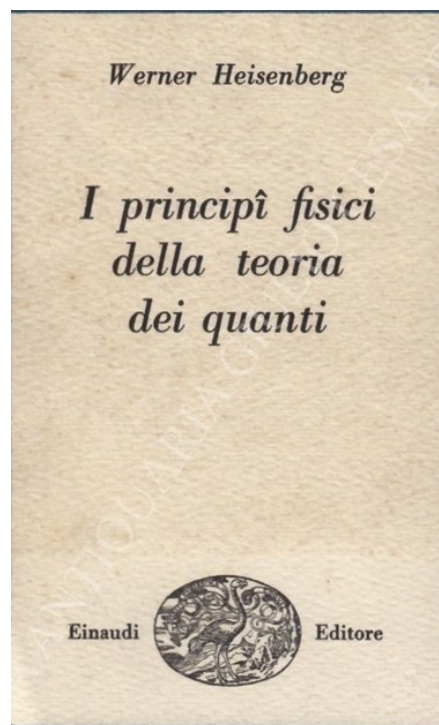
A Yellowstone stringe amicizia con il fisico **Paul Adrien Maurice Dirac** che lo accompagnerà nella lunga traversata del Pacifico verso il Giappone. Rientra a Lipsia un anno dopo, in tempo per la sessione invernale. Nelle lezioni tenute negli states, Heisenberg getta i principi per il suo primo libro "I Principi Fisici della Teoria dei Quanti"



I cinque anni successivi sono bellissimi: grazie alla scuola di Copenaghen con la sua interpretazione della meccanica quantistica, Heisenberg diventa un personaggio di spicco a Lipsia. Professore giovanissimo, raffinato fisico con la passione per la musica, in breve lo fanno entrare nei circoli esclusivi. E' spesso ospite di Otto Mittelstadt, influente avvocato del Reich.

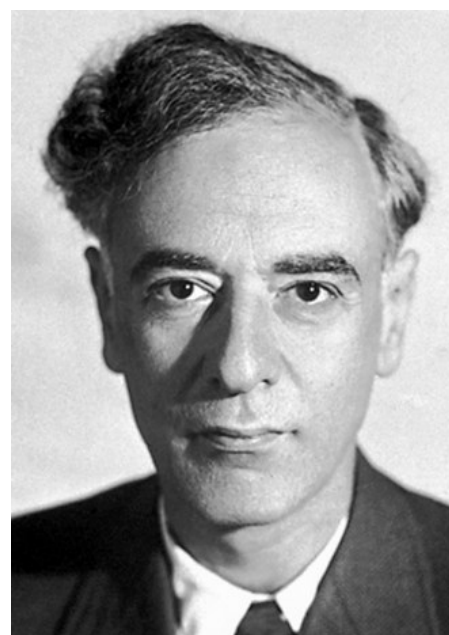
Nel 1930 entra nell'accademia sassone delle scienze dove coltiva amicizie che gli serviranno con l'avvento di Hitler. Il suo carisma attira intorno a sé giovani menti brillanti come Landau, Teller e Weizsäcker (che diventerà un caro amico). Insieme a Friedrich ed ai suoi allievi si dedica al rapporto tra elettrone e quanti di luce: iniziano a sviluppare una teoria che legghi tra la fisica quantistica e la teoria della relatività di Einstein (teoria di campo quantistica relativistica).

Su questo si è già messo al lavoro Dirac. Heisen-



berg e Pauli capiscono che sia le onde di materia di Schrödinger che i campi elettromagnetici devono essere quantizzati. Le equazioni devono essere compatibili con la relatività. Dalle equazioni dovrebbero emergere i valori di carica e massa degli elettroni, che a quel tempo erano postulati a priori.

Dirac il 2 gennaio 1928 presenta alla Royal Society di Londra l'equazione che oggi prende il suo nome e che sostituisce l'onda di Schrödinger quando gli effetti relativistici non sono trascurabili. Dall'equazione emerge facilmente lo spin dell'elettrone. Ma ci



Landau



Teller

sono problemi: l'auto energia infinita dell'elettrone. Essendo considerato puntiforme, il campo elettrico che lo circonda schizza all'infinito nel punto corrispondente alla posizione dell'elettrone. Il secondo problema è che l'elettrone può saltare in stati stazionari di energia negativa.

A novembre 1929 Heisenberg affronta il problema: considera lo **spazio come un reticolo discreto** la cui dimensione minima ΔL è $h/(2\pi Mc)$ dove h è la costante di Planck, c la velocità della luce ed M la massa a riposo del protone. Il metodo funziona: vengono calcolate le osservabili fisiche, compresa la massa dell'elettrone. Quando le dimensioni diventano tre però il reticolo si ingarbuglia e vengono meno concetti come la conservazione della massa, dell'energia e della carica elettrica.

A novembre 1930 il padre si ammala gravemente di febbre tifoide: ha bevuto acqua contaminata ad un congresso di filologia in Grecia. Morirà il 22 novembre ad appena 61 anni.

Il padre era un punto di riferimento molto importante: questa scomparsa improvvisa segna profondamente Heisenberg che cade in uno stato di depressione. Si riprende quando **James Chadwick** a marzo 1931 scopre il neutrone (fino a quel momento le particelle elementari note erano solo il protone e l'elettrone).

Il 20 giugno 1932 Heisenberg spedisce una lettera a Bohr con la traccia di un articolo per «Zeitschrift für Physik», dove chiarisce che il neutrone ha un ruolo di protagonista: è una particella fondamentale che

compone i nuclei atomici ed è anche la somma di un protone e di un elettrone. Nel decadimento beta il neutrone si trasforma in un protone espellendo un elettrone.



30 gennaio 1933 è un momento in cui la Germania fa una svolta importante, ma non certo positiva. Quel giorno Heisenberg rientra in albergo accompagnato dall'amico Weizsäcker con il quale ha trascorso la serata ascoltando musica e parlando della nuova particella appena scoperta, il positrone. Incontrano un gruppo in divisa che festeggia la nomina di Hitler a Cancelliere. Sono le camicie brune.

Paul von Hindenburg ha affidato ad Hitler l'incarico di creare un nuovo governo, e Hitler non perde tempo: scioglie il parlamento, pensiona la costituzione di Weimar ed il 27 febbraio sospende le libertà civili e decreta lo stato di emergenza permanente.



Alle elezioni però il partito nazionalsocialista di Hitler non sfonda: arriva al 43,9%. Hitler passa alle maniere forti e chiede al parlamento il 27 marzo di dargli per decreto pieni poteri. I partiti dell'opposizione si auto sciolgono ed inizia da aprile la persecuzione contro oppositori politici ed ebrei. Il 30 giugno 1934 avviene la notte dei lunghi coltelli nella quale furono assassinati per ordine di Adolf Hitler

un centinaio di persone, tra cui diversi esponenti di spicco del partito: ecco i primi effetti della...svolta

Sotto la tagliola del decreto sul «servizio pubblico professionale» viene emesso un nuovo decreto che vieta a Insegnanti di religione ebraica, l'insegnamento nelle scuole tedesche di ogni ordine e grado. All'inizio del semestre estivo gli insegnanti cominciano a scappare dalla Germania, i premi Nobel Fritz Haber e James Franck rassegnano immediatamente le dimissioni, Max Born se ne va in Val Gardena e Albert Einstein decide di rimanere in America.

A Lipsia Heisenberg medita le dimissioni. Va dal settantacinquenne Planck che gli dice: «Lei è venuto a chiedermi consiglio su una faccenda politica ma temo di non essere più in grado di consigliarla. Non c'è speranza di fermare la catastrofe che si sta per abbattere sulle nostre università e sulla Germania» ma anche «Sono certo che se riusciamo a guidare gruppetti di giovani di mente acuta e retta attraverso i tempi spaventosi che ci aspettano, avremo fatto molto affinché la Germania, dopo la guerra, possa risorgere»

In autunno continuano i licenziamenti: lasciano il paese anche Hermann Weyl ed Erwin Schrödinger

Heisenberg riceve la **medaglia Max Planck** nel 1933 ed anche la notizia che il **premio Nobel** non assegnato nel 1932 andrà a lui. Gli viene consegnato, sempre nel 1933, insieme a quello attribuito a Schrödinger e Dirac. Dopo la premiazione Heisenberg è imbarazzato: a lui un premio intero mentre Schrödinger (tanto odiato) e Dirac ne hanno ricevuto uno a metà... E che dire di Pauli, Jordan e Born che non hanno ricevuto nemmeno quello.

Heisenberg sviluppa una repulsione ancora più accesa verso la politica. In occasione della cerimonia di tutti i docenti a Hitler, decide di non partecipare ad una cerimonia. Johannes Stark, fisico tedesco schierato apertamente a favore del partito nazional socialista, critica pubblicamente questa scelta.

Mentre Heisenberg riceve il premio Nobel, **Carl Anderson** scopre il **positrone** (1932), confermando fisicamente le soluzioni a energia negativa previste dall'equazione di Dirac del 1928. Quest'ultima era stata formulata per descrivere l'elettrone in modo

compatibile con la meccanica quantistica e la relatività ristretta. Poco dopo, **Patrick Blackett** e **Giuseppe Occhialini** ne ottengono la prima immagine in una camera a nebbia.

Il positrone dà finalmente una spiegazione fisica alle misteriose soluzioni a energia negativa previste da Dirac, aprendo la strada alla comprensione dell'antimateria.

Aumentano i problemi politici: torna alla carica Johannes Stark che vorrebbe che tutti i Nobel tedeschi facessero una dichiarazione pubblica di sostegno al regime.

Werner Heisenberg risponde nel settembre 1934 quando difende pubblicamente la teoria della relatività accostando agli ebrei Albert Michelson ed Albert Einstein il nome di Philippe Lenard, di provata fede nazista.

Ma per Philippe Lenard e Johannes Stark la fisica ebraica ha preso corpo nelle teorie della meccanica quantistica e della relatività, mentre la buona fisica – la fisica ariana – si fonda sulla verità stabilita dalla meccanica newtoniana.

Il 1935 vede la nomina di Johannes Stark a presidente della NDW, l'ente che si occupa del finanziamento e dello sviluppo della fisica tedesca. Un'altra novità nel campo dell'insegnamento è il nuovo provvedimento che impone ai professori universitari di andare in pensione dopo i 65 anni: Arnold Sommerfeld deve quindi lasciare la cattedra di fisica teorica



Johannes Stark

di Monaco.

Nonostante lo scarsissimo entusiasmo per il fanatismo nazista, Heisenberg è in prima linea per assumere quel posto, ma è conteso anche da Berlino (dove Schrödinger ha lasciato) e Gottinga, orfana di Max Born.

Werner preferisce Monaco dove si sente più a casa sua, ma la burocrazia ha le sue strade: il ministero nazionale della pubblica istruzione ha già deciso di assegnarlo a Gottinga.

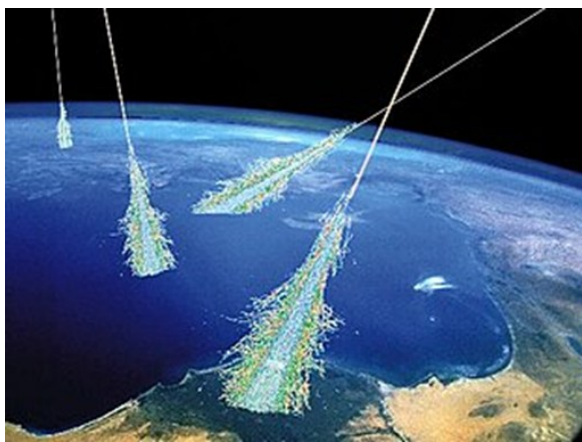
Stark e Lenard fanno pubblicare sul giornale di partito un attacco furibondo nei confronti di Heisenberg a firma di Willi Menzel (un anonimo studente del politecnico di Berlino).

La nomina viene quindi sospesa!

Heisenberg risponde a Menzel con una relazione che ha la approvazione della quasi totalità dei professori. Finalmente nel novembre 1936 ottiene il via libera ministeriale al suo incarico a Monaco

LA FACCENDA DEI RAGGI COSMICI (1936-37)

L'**Elettrodinamica Quantistica di Dirac (QED)** è in grave imbarazzo nello spiegare i **raggi cosmici**. Questi hanno energie che superano di gran lunga il limite di validità della teoria. Werner studia la teoria di campo di Fermi e scopre che questa spiega meglio gli sciame di particelle liberati dai raggi cosmici.



Approfondisce il **modello di Fermi** ma al **Caltech** grazie ad una nuova camera a nebbia scoprono che i raggi cosmici hanno due componenti: una molle, fatta di elettroni e fotoni e completamente spiegabile con la QED ed una dura capace di penetrare a

grandi profondità ed inspiegabile.

Ci sono due modelli in competizione per la spiegazione del fenomeno:

- 1) Heisenberg Fermi secondo cui gli sciame di raggi cosmici danno luogo a violente esplosioni di particelle che si liberano nello stesso punto
- 2) Dirac ed Oppenheimer che sostengono che gli sciame sono formati da una cascata di creazioni di coppie particella antiparticella che avvengono quando un fotone o un positrone ad alta energia colpiscono un pezzo di materia ordinaria.

Nel 1937 vince la teoria di Dirac ed Oppenheimer. Heisenberg non ha difficoltà ad ammetterlo.

LA SIGNORA HEISENBERG (1937)

Lipsia, 30 gennaio 1937. Angolo tra Aeschenplatz e Wagnerstrasse. Heisenberg in tenuta da simpatizzante del Terzo Reich è «costretto» dal regime a vendere bandierine per raccogliere fondi per il regime.

Dirà in seguito: «Ero disperato non solo per la sottovalutazione cui dovevo fare mostra, ma per la totale assurdità ed inutilità di quanto andavo facendo e di tutto quello che scorgevo intorno a me».

Era un periodo in cui era veramente demotivato e profondamente depresso. «Ricordo bene gli anni che precedettero immediatamente la guerra», «fu, in Germania, un periodo di estrema solitudine individuale». Heisenberg è sulla buona strada per diventare uno dei più grandi fisici al mondo, ma sente che la sua vita personale gli sta sfuggendo via.

Quella sera si reca a cena a casa dei Backing, editori di Lipsia, ed esegue al pianoforte il Trio in Sol Maggiore di Beethoven. Quella sera è presente una giovane ragazza, Elizabeth Schumacher, allora 22enne. Lavora presso una delle librerie dei Backing. I due si scambiano sguardi sempre più insistenti per tutta la sera ed è in questo momento che tra loro succede qualcosa che in fisica è ancora inspiegabile, ma che accade da sempre: scocca il colpo di fulmine. Dopo due settimane, sono fidanzati. Il matrimonio avverrà il 29 aprile 1937. Avranno 7 figli, di cui due gemelli, nove mesi dopo il matrimo-

nio.

LA SPORCA GUERRA DI STARK (1937)

Monaco, luglio 1937. Heisenberg di ritorno dal viaggio di nozze, sta per iniziare il suo incarico all'università.

Ma c'è un problema: Leopold Kölbl, rettore dell'Università di Monaco, lo informa di un articolo a firma del nemico Johannes Stark apparso sul «Schwarze Korps» il settimanale delle SS. Il titolo è «Ebrei bianchi, nella scienza». L'articolo inizia così: «non è l'ebreo come razza a costituire di per sé una minaccia, ma piuttosto lo spirito che diffonde. E se il portatore di questo spirito non è un ebreo ma un tedesco, lo si dovrebbe combattere con impegno ancora maggiore rispetto all'ebreo razziale». Poi continua elencando i «misfatti» che Heisenberg avrebbe commesso, come quando aveva difeso la relatività di Einstein nel settembre 1934.



Conclude paragonando Heisenberg ad Ossietzky, oppositore del regime, premio Nobel per la pace nel 1935, rinchiuso a Dachau. I colleghi insorgono contro Stark ed a favore di Heisenberg, ma è evidente che le SS stanno indagando su di lui e si preparano ad un suo arresto.

Heisenberg rischia il tutto per tutto: tramite sua

madre, che aveva conosciuto la madre di Himmler, chiede l'intervento sulla questione di Himmler in persona. La madre di Heisenberg consegna alla madre di Himmler una lettera destinata ad Himmler. Ai primi di novembre 1937 Himmler risponde chiedendo ad Heisenberg di difendersi dalle accuse. Heisenberg risponde ma viene avviata una inchiesta ufficiale che assegna tre agenti delle SS trovati tra gli studenti della facoltà di Fisica dell'Università di Berlino al fianco dello Scienziato per indagare e scovare nei suoi comportamenti e nelle sue abitudini aspetti o presunte prove, che lo indichino come un nemico del regime o del popolo tedesco. L'inchiesta va avanti per mesi.



L'indagine lo sfianca e sta quasi per cedere, ovvero organizzare la fuga dalla Germania ma alla fine i tre giovani ispettori sono conquistati e affascinati e lo prosciogliono da ogni accusa, elogiandone i suoi aspetti. Heisenberg non ha fatto altro che essere sé stesso, cioè un uomo di scienza che non ha mai fatto mistero di amarla senza fare differenze di nessun genere, credo religioso o politico, perché la Scienza è Scienza a trecentosessanta gradi, senza distinzioni.



La madre di Heisenberg

Il 21 luglio 1938 Himmler invia a Stark una lettera in cui disapprova l'attacco sul «Schwarte Korps» di un anno prima e lo informa di aver proibito ogni ulteriore manovra contro di lui. Werner Heisenberg ha vinto!!!

Novembre 1938: la cattedra di Monaco viene assegnata a Wilhem Muller che ha come unico merito ha quello di avere santi in paradiso negli uffici che contano.

Tra il 9 ed il 10 novembre la **notte dei cristalli**: vetrine distrutte ed ebrei catturati verso i campi di concentramento. Werner profondamente sconvolto scrive alla madre di una Lipsia in macerie e del crollo della società come l'avevano conosciuta.



È di quel periodo la scoperta che l'uranio bombardato da neutroni produce bario che ha peso atomico circa la metà dell'uranio. A febbraio 1939 esce un articolo sulla rivista britannica Nature, che nomina

per la prima volta la **fissione nucleare**. E' l'inizio delle ricerche che porteranno alla **bomba atomica**.

Nell'agosto 1939, Heisenberg è di ritorno dall'America.



È deluso perché la sua teoria degli sciame è stata accolta molto freddamente e poi perché i colleghi d'oltreoceano gli chiedono con insistenza come mai si ostini a voler rimanere in Germania. Sul tavolo c'è sempre l'offerta della Columbia University e quella di Princeton ma Werner, forte di aver vinto la battaglia di contro Stark è irremovibile. Tornerà in patria.

Il 23 agosto, appena una settimana dopo il suo rientro, vi è la firma del patto di non aggressione tra Unione Sovietica e Germania (**Patto Molotov-Ribbentrop**), che spianerà la strada all'invasione della Polonia ed alla Seconda Guerra Mondiale (gli avevano già lasciato annettere l'Austria pensando che questo avesse potuto calmare le sue mire espansionistiche).

A novembre i russi invadono la Finlandia e il 9 aprile 1940 i tedeschi conquistano Danimarca e Norvegia.

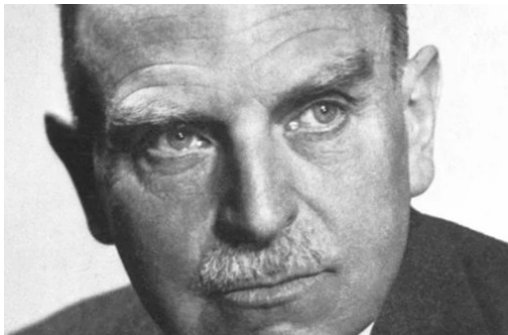
Il 22 giugno 1940 con la firma dell'armistizio la Francia perde metà del suo territorio.

Il Regno Unito sotto un marmoreo Winston Churchill, resiste.

IL CLUB DELL'URANIO (1939-1940)

26 settembre 1939, Heisenberg viene convocato con sollievo a Berlino. Pensava sarebbe potuto tor-

nare con i fucilieri di montagna come già successo, ma gli fu detto che avrebbe dovuto lavorare ai problemi connessi con lo sfruttamento dell'energia atomica. All'appuntamento trova il fior fiore della fisica tedesca: Otto Hahn, Carl Friedrich von Weizsäcker.



Otto Hahn



Carl Friedrich von Weizsäcker

«Si direbbe che non sia possibile innescare una reazione a catena nell'uranio con i neutroni veloci, insomma non è possibile fabbricare una bomba atomica. Ma se si potesse aggiungere una sostanza moderatrice che li rallenta, si potrebbe innescare una reazione che libera quantità utilizzabili di energia». Pensa ad un reattore, l'ingenuo Heisenberg. Ma non è quello l'obiettivo dei militari. Heisenberg si mette subito al lavoro. In natura ci sono due isotopi dell'uranio: il 238 ed il rarissimo 235. Bisogna rallentare i neutroni veloci e tra grafite ed acqua pesante viene scelta quest'ultima. Bisogna arricchire l'uranio portando la percentuale del 235 almeno al 3-4%. Se si riesce a superare il 90% si può fare la bomba atomica.

Tre problemi principali:

- 1) metodo per arricchire l'uranio,
- 2) procurarsi grandi quantità di uranio ed acqua

pesante,

- 3) individuare la geometria giusta per la pila critica.

I tedeschi riusciranno solo a raccogliere le materie prime grazie alle invasioni compiute fino ad allora.

Nel 1940 Fritz Houtermans propone di usare il plutonio: l'uranio 238 assorbendo un neutrone diventa U239, poi, dopo pochi mesi, plutonio 239

Il 16 settembre 1941 avviene un incontro in Danimarca, per la precisione a Copenhagen, tra Bohr e Heisenberg. Fanno una lunga passeggiata tra i due, completamente soli, in un parco, il Faelledpark, dove converseranno a lungo. Il maestro e l'allievo che stava superando il maestro, passeggiando, si sono goduti quel momento in una situazione dove sapevano che niente e nessuno avrebbe potuto carpire i loro discorsi. Quindi cosa si sono detti???



Il punto di vista di Bohr:

Secondo Aage Bohr, il figlio di Niels, Heisenberg disse a Bohr «Devi capire che se partecipo al progetto è perché sono fermamente convinto che si possa fare».

In ogni caso la missione fu un fallimento perché Bohr non crederà che sia possibile costruire la bomba e perché isolato nella Danimarca occupata non

può essere di aiuto.

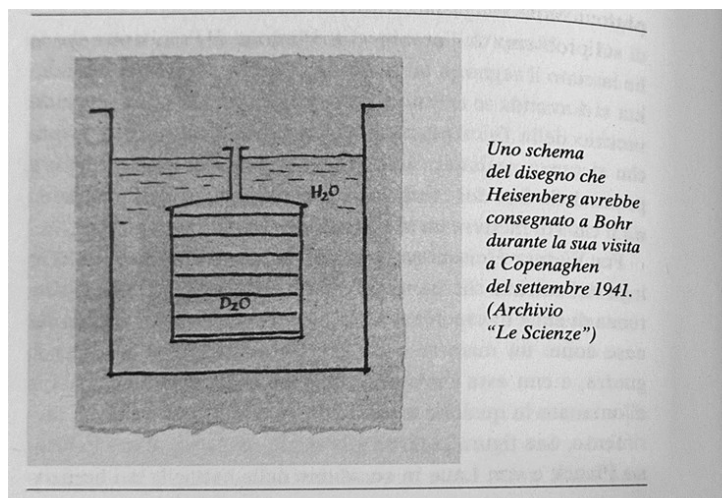
Il punto di vista di Heisenberg:

Heisenberg sostenne dopo la guerra di aver aperto la conversazione chiedendo a Niels se: «in quanto fisici abbiamo il diritto morale a lavorare allo sfruttamento pratico dell'energia atomica»...

Ma cosa si siano veramente detti durante quella passeggiata nel Faelledpark rimarrà sempre un vero mistero.

IL DISEGNO FANTASMA (1943)

Il 29 settembre 1943 i partigiani danesi riescono a mettere in salvo la maggior parte delle famiglie ebre in Danimarca, tra cui quella di Bohr che passando dalla Svezia, arriva in Inghilterra. Il 29 novembre Niels ed il figlio Aage Bohr partono per New York, dove arrivano il 6 dicembre. Il 28 dicembre Niels è già alla volta di Los Alamos, al progetto Manhattan.



Alla prima riunione Bohr racconta dell'incontro con Heisenberg. La ricostruzione di Hans Bethe non manca di ironia (fonte New Yorker 1994, articolo a firma di Jeremy Bernstein): «Heisenberg diede un disegno a Bohr e Bohr lo diede a noi. Era il disegno di un reattore nucleare, non di una bomba».

Aage Bohr si schiera contro questa ricostruzione, dice che il padre non gli ha mai parlato di un bozzetto di Heisenberg.

Anche Thomas Powers, vincitore di un Pulitzer è contro questa ricostruzione.

A favore c'è uno dei partecipanti a quella prima riunione di Bohr a Los Alamos, Robert Serber, che ricorda di aver visto un disegno di una specie di pentola piena d'acqua con dentro un cilindro contenenti strati di uranio e acqua pesante. E tra le sue carte trova una relazione di Bethe e Teller che discutono dell'efficienza di un simile dispositivo come reattore. E' evidente che si tratta di quello di Heisenberg, perché gli americani nel 1943 avevano già scartato quella configurazione perché non poteva funzionare. Perché Heisenberg andò a Copenaghen? Quali erano le sue reali intenzioni?



Voleva un consiglio etico su come comportarsi davanti alla possibilità concreta di costruire la bomba o semplicemente voleva avvertirlo dei progressi tedeschi?

Non avremo mai risposte definitive. Sicuramente entrambi erano troppo preoccupati di essere spiati per parlare liberamente. E poi Heisenberg se fosse stato scoperto sarebbe sicuramente finito in un campo di concentramento.

Nel 1946 Heisenberg in una lettera a Waerden, afferma che la sua intenzione era quella di evitare che gli americani si impegnassero in un programma accelerato per la costruzione della bomba. La moglie ricorda che Heisenberg era torturato all'idea che gli americani potessero realizzare la bomba ed usarla contro la sua Germania e contro la sua famiglia. Comunque siano andate le cose, l'incontro del 16 settembre 1941 fu del tutto influente sulla costruzione della bomba atomica e sull'esito del conflitto

Il 4 giugno 1942, avviene la riunione alla Harnack

Haus della Kaiser Wilhelm Gesellschaft (KWG). Heisenberg aveva in mente un reattore nucleare per la produzione di energia, o per la propulsione atomica, ma Milch gli chiede quando potrebbe essere grande una bomba nucleare che possa distruggere Londra. Heisenberg risponde: come un ananas. Speer e gli altri militari pensano che sia impazzito ed escono convinti che non vale la pena investire in quel ramo di ricerca. Speer decide di privilegiare i razzi di Von Braun e alla ricerca nucleare lascia solo le briciole.



Albert Speer



Von Braun

Il 1° luglio Heisenberg viene assegnato al Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik a Berlino ed ottiene anche una cattedra all'università di Berlino.

A Berlino Heisenberg si disinteressa della fisica nucleare. Si torna ad occupare di fisica teorica. Wick risveglia in Heisenberg la vecchia passione per la teoria di campo quantistica. Prova a sviluppare la teoria della matrice S ma con poca fortuna.

LA BRUTTA FACCENDA DEI GOUDSMIT (1944)

Gennaio 1944 – è in Danimarca per stabilire se Bohr fosse impegnato in attività clandestine.

Heisenberg si presenta a Copenhagen, perfettamente inquadrato nel suo ruolo di liquidatore dell'istituto. Va a cena, pubblicamente, con il commissario delle SS Werner Best, principale artefice della repressione della Danimarca.

Probabilmente è solo una facciata. Infatti, Heisenberg riesce a «salvare» l'istituto danese che viene comunque privato di molta della sua strumentazione scientifica.

Si reca anche in Olanda, con lo stesso ruolo. Qui trova una strenua opposizione al nazismo.

Nel 1945 Hendrik Casimir affermerà che Heisenberg era perfettamente al corrente dei campi di concentramento e dei saccheggi delle SS ma non voleva che la Germania uscisse sconfitta dal conflitto.

È l'Unione Sovietica l'ossessione di Werner. Nella delirante alternativa tra bolscevichi e nazisti continua apparentemente a preferire i secondi.

Nel 1943 vengono deportati gli anziani genitori di Samuel Goudsmit, fisico olandese amico di Heisenberg. Goudsmit chiede aiuto ad Heisenberg che non fa granché: manda una lettera il 16 febbraio nella quale afferma che i Goudsmit furono ospitali con lui anni addietro. Non ci sono notizie di altre azioni da parte di Heisenberg e gli anziani genitori muoiono poco prima che la lettera sia recapitata. Un po' poco per il giudizio che la storia riserverà all'uomo Heisenberg...

Con l'arrivo degli alleati in Germania a seguito dello sbarco in Normandia, un drappello di soldati alleati comandati proprio da Goudsmit ha come intento quello di trovare il **Club dell'Uranio** e giustiziarli. Per Goudsmit si tratta anche di qualcosa di personale visto la fine dei genitori. Goudsmit prova un forte rancore verso Heisenberg: è convinto che i genitori siano morti a causa del ritardo nell'invio della lettera che avrebbe potuto salvarli. Senza considerare che, se Heisenberg si fosse esposto un po' troppo, avrebbe corso il rischio di finire esso stesso in un

campo di sterminio. Nonostante vengano nascosti in un paesino nei pressi della foresta nera, finiscono per essere catturati, ma Goudsmit non li passa per le armi, vengono invece deportati in Inghilterra



Samuel Goudsmit

DAL PROGETTO MANHATTAN AL SOLE DI HIROSHIMA (1945)

Alle 8.15 del 6 agosto 1945 viene sganciata su Hiroshima la prima bomba atomica. Tre giorni dopo tocca a Nagasaki. Il 10 agosto l'imperatore del Giappone dichiara la resa incondizionata.

A **Farm Hall**, nella campagna inglese, sono stati riuniti gli scienziati tedeschi catturati dagli americani. Vengono soprannominati i «soci del club dell'uranio».

Oltre ad Heisenberg vi sono anche Otto Hahn, Max Von Laue, Walther Gerlach, Carl Fidorich von Weizsäcker, Karl Wirtz, Bothe, Harteck, Diebner ed il giovane Erich Bagge.

Sono trattati con gentilezza ma completamente isolati dal mondo esterno. Non sospettano che la villa sia infarcita di microfoni. Significativo un loro dialogo al proposito. Diebner: «Mi chiedo se ci sono dei microfoni installati qui». Heisenberg: «Microfoni installati? Ma no, non sono così astuti dopo tutto. Non credo conoscano i veri metodi della Gestapo. Sono un po' arretrati sotto questo punto di vista».

Apprendono con stupore della bomba atomica su

Hiroshima l'8 agosto 1945, quando gli ufficiali britannici fecero ascoltare loro un notiziario radiofonico della BBC.

Heisenberg sconcertato non ci crede.

Otto Hahn ironizza così: «Se gli americani hanno una bomba ad uranio tutti, voi siete scienziati di seconda categoria. Povero vecchio Heisenberg»

Abram Pais, storico, commenta: Heisenberg ha avuto paura di promettere un'arma che non avrebbe potuto dare.

L'arma più terribile mai vista fino ad allora, è stata costruita con il significativo contributo dei fisici ebrei perseguitati da Hitler.



UNO DEI PIÙ ECCELSI FISICI DEL NOSTRO TEMPO (1946...)

Dopo la fine della guerra il suo obiettivo è riportare la scienza tedesca ai fasti degli anni della sua giovinezza.

Insieme con Amaldi è uno dei promotori della creazione del **CERN**.

Si oppone al piano nato del 1955 di dare alla Germania testate nucleari tattiche per difendersi dall'Unione Sovietica. E' possibile che durante la Seconda Guerra Mondiale, Werner Heisenberg, ben consapevole degli effetti di un bombardamento atomico, abbia risposto a Speer in modo vago sulle dimensioni di una bomba H, per far desistere dall'intento di costruirla e per non darla in mano a degli squilibrati...

Muore il primo febbraio 1976 a Monaco.

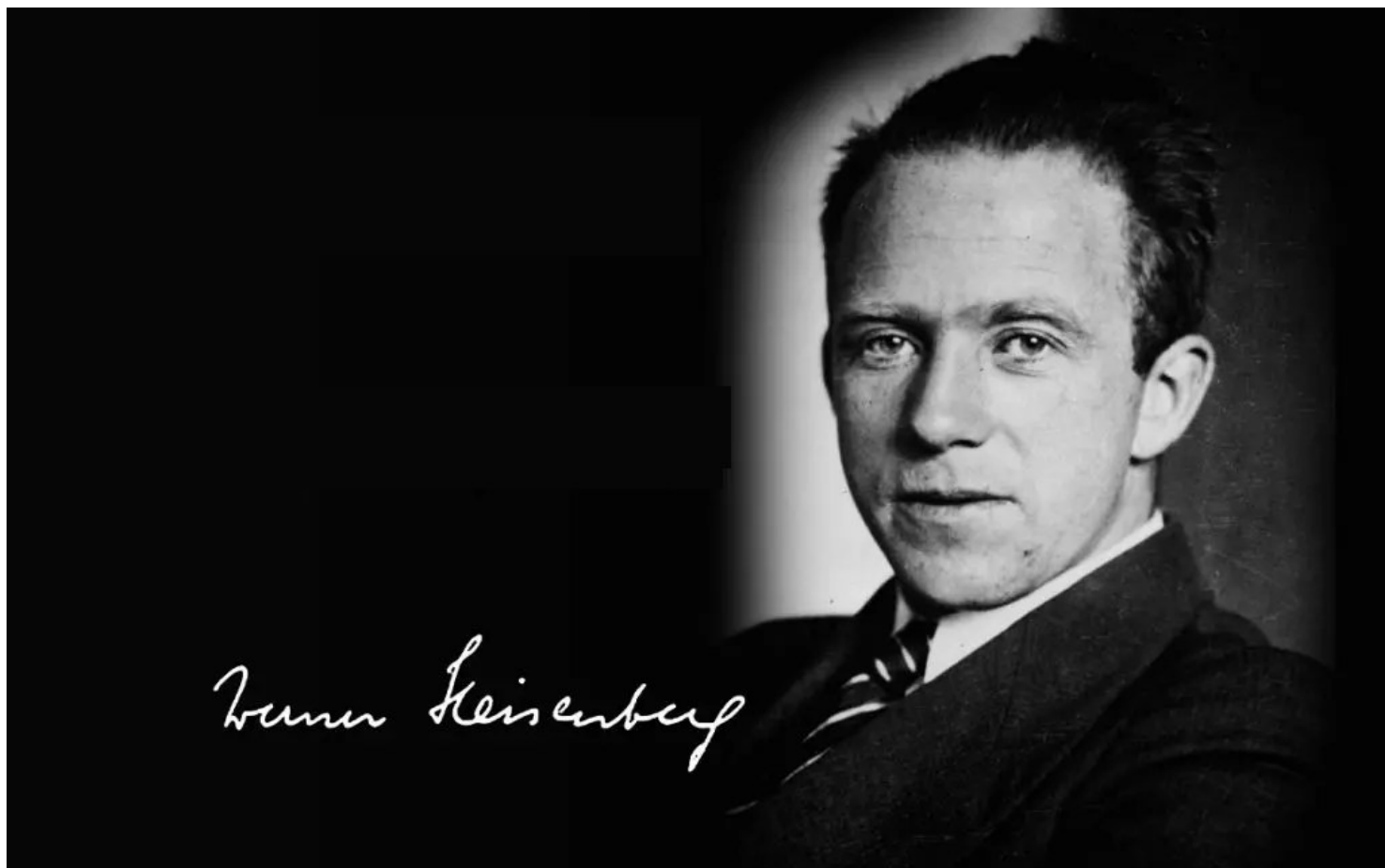
Samuel Goudsmit, quel Samuel Goudsmit che tanto lo ha odiato ricorda così:

«fu un fisico geniale, un pensatore profondo, un grande essere umano e anche una persona coraggiosa. Fu uno dei più eccelsi fisici del nostro tempo ma soffrì molto per gli attacchi ingiustificati di colleghi fanatici. A mio giudizio si deve ritenere che sia stato sotto certi aspetti una vittima del regime nazista»

C'era stata una riconciliazione tra loro.....

P.S. Vorrei ringraziare **Leonardo Avella**, grazie al suo fondamentale contributo è stato possibile realizzare la Conferenza dalla quale è scaturito questo Articolo

Ciro Sacchetti



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) .



Mercoledì 4 Giugno 2025

Presso Centro ENEA del Brasimone (Bologna)

Visita al Centro ENEA del Brasimone – Gite Scientifiche de Il COSMo

Gita scientifica al Centro ENEA del Brasimone nell'Appennino Bolognese.

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

Accompagnatore: Davide Borghi

Venerdì 18 Luglio 2025 – Ore 21 presso Badi (Bologna)

La tigre e la Luna

In una fredda mattina due giovani da poco sposi con due valigie piene di speranze varcano il bordo di una grande nave che li porterà dallo sperduto paesino di Sassi di Castalda in Basilicata agli Stati Uniti d'America. In questa conferenza vi raccontiamo di un americano con un nome italiano che, con la sua caparbia e il suo acume ha permesso a dodici uomini di camminare sulla Luna. La storia di Rocco Antony Petrone, direttore di lancio a Cape Canaveral, e della conquista della Luna.

Relatore: Ciro Sacchetti

Martedì 12 Agosto 2025 – Ore 21 Presso Badi (Bologna)

Enrico Fermi – L'ultimo uomo che sapeva tutto

Panoramica sull'uomo, la pila, la bomba. Un fisico sperimentale e allo stesso tempo teorico, ai massimi livelli. Dai Ragazzi di Via Panisperna, agli anni negli Stati Uniti: New York, Chicago, il Progetto Manhattan e il dopoguerra. Luci e ombre di una figura al centro delle drammatiche vicende del XX secolo.

Relatore: Davide Borghi

Sabato 6 Settembre 2025 – Ore 11 presso Laboratori INFN di Legnaro (Padova)

Visita ai Laboratori INFN di Legnaro – Gite Scientifiche de Il COSMo

Gita scientifica ai Laboratori INFN di Legnaro (Padova).

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

Accompagnatore: Davide Borghi

Ogni Martedì di Ottobre 2025 – Ore 21 presso Planetario di Modena

Conferenze COSMo – Ciclo "Un altro equinozio con il COSMo"

Nuovo ciclo di conferenze della nostra associazione per il ciclo "un altro equinozio con il COSMo" al Planetario di Modena .

Relatori: Davide Borghi, Roberto Castagnetti, Ciro Sacchetti, Luigi Borghi, Leonardo Avella

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:

SETTEMBRE 2025