

LA SCOPERTA DI NETTUNO

prof. Maurizio Trauceno

21-1-04

Sommario

1. Tavola sinottica per un inquadramento storico della vicenda	p. 1
2. Differenze rispetto alla tecnologia attuale	p. 2
3. Conoscenze astronomiche del periodo	p. 3
4. Le scoperte di Urano e Cerere	p. 6
5. Le osservazioni di Urano e le anomalie del moto	p. 6
6. L'analisi teorica di J. C. Adams	p. 8
7. L'analisi teorica di U. J. J. Le Verrier	p. 10
8. La scoperta di Nettuno	p. 11
9. Dopo la scoperta	p. 13
10. Nettuno ieri e oggi	p. 14
11. <i>Figure e note</i>	p. 16

Appendice: risposta a un quesito

ANNO	STORIA - POLITICA	CULTURA	SCIENZA - TECNICA	ASTRONOMIA
1775-		"La ricchezza delle nazioni" A. Smith (1776)	Elettroforo di Volta (1775)	
80-		"Critica della ragion pura" I. Kant (1781)	Composizione aria A.L. Lavoisier (1780)	Scoperta di Urano W. Herschel (1781)
85-	Indipendenza USA Versailles (1783)		Invenzione telaio meccanico (1784)	
90-	Costituzione USA Rivoluzione francese (1789)	"Don Giovanni" W.A. Mozart (1787)		
95-				
1800-	Periodo napoleonico		Pila di Volta (1800)	"Meccanica celeste" P.S. Laplace (1799)
05-	e guerre	"L'eroica" L.v. Beethoven (1803)	Illuminazione a gas Inghilterra (1807)	Scoperta di Cerere G. Piazzi (1801)
10-	della Francia		Teoria atomica di Dalton (1808)	
15-	Congresso di Vienna Santa Alleanza (1815)	"Le Grazie" U. Foscolo (1813)		Righe di Fraunhofer nello spettro solare (1814-15)
20-			Esperimento di Oersted (1820) 2° principio termodin. S. Carnot (1824)	
1825-			Prima linea ferroviaria Inghilterra (1825)	
30-	G. Mazzini fonda la "Giovane Italia" (1831)	"I promessi sposi" A. Manzoni (1827) "A Silvia" G. Leopardi (1828)	Induzione elettromagn. M. Faraday (1831)	
35-		"12 Studi" F. Chopin (1837)		Passaggio cometa di Halley (1835)
40-		"Certosa di Parma" Stendhal (1839)	Ferrovia Napoli-Portici (1839) Primo francobollo post. Inghilterra (1841)	
45-	Elezione di Pio IX (1846)			Scoperta di Nettuno J. Galle (1846)
1850-	Prima guerra d'indipendenza in Italia (1848)			

DIFFERENZE RISPETTO A OGGI

L'ITALIA NON ERA ANCORA UNA NAZIONE

NON C'ERANO LE AUTO E GLI AEREI CON IL TRAFFICO ATTUALE

IL TRASPORTO PER FERROVIA ERA APPENA AGLI INIZI

NON ESISTEVA ANCORA LA DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

INIZIAVA L'ILLUMINAZIONE A GAS DELLE CITTA'

FUNZIONAVANO A VAPORE LE MACCHINE INDUSTRIALI

NON ESISTEVANO IL TELEFONO, LA RADIO, LA TELEVISIONE

NON ESISTEVA ANCORA IL CINEMA, LA DECIMA MUSA

SOPRATTUTTO NON ESISTEVANO ANCORA GLI ELABORATORI ELETTRONICI

I CALCOLI SI FACEVANO TUTTI CON CARTA E PENNA

LE COMUNICAZIONI ERANO AFFIDATE AGLI INCONTRI PERSONALI,

AI DISPACCI, ALLA POSTA

I GIORNALI USCIVANO UNA O DUE VOLTE ALLA SETTIMANA

SISTEMA SOLARE

PIANETA	DISTANZA DAL SOLE (UA)	PERIODO (ANNI)	MASSA (MASSA TERRA)	SATELLITI
MERCURIO	0,39	0,241	0,055	0
VENERE	0,72	0,615	0,815	0
TERRA	1,00	1,000	1,000	1
MARTE	1,52	1,881	0,107	0 (2 nel 1877)
GIOVE	5,2	11,86	317,8	4 (5 nel 1892)
SATURNO	9,54	29,46	95,2	5 (7 nel 1789) + gli anelli

Le distanze dei pianeti dal Sole confermavano la "legge" di Titius-Bode. (Fig. 1), (Nota)

Il sistema solare comprendeva anche le comete e i meteoriti.

La Galassia (Via Lattea) e le nebulose rappresentavano l'universo conosciuto.

Si cominciava a discutere se le nebulose fossero o meno oggetti della Galassia.

ASPETTI TEORICI RELATIVI AL SISTEMA SOLARE

a) le tre leggi di Keplero (ricordiamo in particolare la prima) (Fig. 2)

b) le leggi della meccanica (Newton)

c) la legge di gravitazione universale (Newton)

Le a) sono implicite nel sistema delle b) e della c)

Ricorrendo a queste leggi è possibile, quando si disponga di alcuni dati di osservazione che forniscano la posizione di un pianeta in epoche diverse, dedurre matematicamente i parametri che individuano la sua traiettoria intorno al Sole. (Fig. 3)

I procedimenti di calcolo sono piuttosto laboriosi, ma si può prevedere con precisione quale posizione nel cielo dovrebbe occupare il pianeta in qualsiasi momento lungo la sua orbita ellittica e quindi preparare delle tavole di valori numerici.

Operando alla stessa maniera per ciascuno dei pianeti si avrebbe una descrizione completa dei loro moti e si potrebbe stabilire dove essi si trovino in ogni epoca.

C'è però un inconveniente.

La teoria indicata prende in considerazione solo l'interazione gravitazionale tra il Sole e ogni singolo pianeta, come se tutti gli altri non ci fossero. E' una teoria a due corpi: Sole e Terra, Sole e Marte, Sole e Giove, e così via. Molto comoda perché, quando i corpi sono solo due, le equazioni matematiche sono risolvibili esattamente, ma il quadro che fornisce è valido solo in prima approssimazione.

Infatti, osservando giorno dopo giorno, mese dopo mese, anno dopo anno, la posizione dei pianeti, si finirebbe per trovare una differenza tra i valori previsti dalla teoria e quelli ottenuti dalle osservazioni, differenza che andrebbe variando e crescendo nel tempo.

Per ottenere una descrizione più aderente alla realtà è necessario prendere in considerazione non solo l'attrazione gravitazionale tra il Sole e i pianeti, ma anche quella dei pianeti fra loro. Così, nello studio del moto di un determinato pianeta, Marte per esempio, occorre tenere presente, oltre all'azione del Sole, anche quella degli altri pianeti. Almeno i più influenti, come Giove nel caso di Marte.

Si passa così da una teoria a due corpi a una a tre o più corpi.

Tuttavia, mentre il problema della interazione fra due soli corpi è risolvibile matematicamente in modo esatto, quello di tre o più corpi non lo è più. Si possono scrivere tutte le equazioni necessarie, ma non si sa come risolverle.

Viste le difficoltà matematiche presentate dal problema dei tre corpi, per tenere conto dell'influenza planetaria sul moto di un corpo attorno al Sole si è ricorsi a un interessante compromesso.

Poiché i pianeti hanno masse molto più piccole di quella solare, le loro forze di attrazione su un qualsiasi oggetto celeste sono molto inferiori a quella esercitata dal Sole, quindi si può ritenere che il loro effetto sia solo quello di perturbare un poco il moto di quell'oggetto intorno al Sole.

Per esempio, si comprende come sia possibile che Giove disturbi un pochino il moto di Marte, soprattutto in prossimità della congiunzione, oppure il moto di Saturno, così come Giove e Saturno si influenzino reciprocamente o, insieme, influiscano sul moto di Marte. E così via.

Nella teoria del moto di un pianeta, l'influenza di un pianeta vicino viene inserita nei calcoli come un piccolo effetto, che altera un pochino i valori dei parametri dell'orbita descritta dal primo intorno al Sole.

L'orbita descritta da un pianeta, quindi, sarà sostanzialmente un'ellisse con il Sole in un fuoco, ma invece di essere sempre la stessa, fissa nello spazio, varierà piano piano, a causa dell'influenza perturbatrice del pianeta vicino. (Fig. 4)

Già nel '700 vennero messi a punto procedimenti di calcolo numerico che consentivano, conoscendo la posizione del pianeta perturbatore, di determinare i parametri delle varie ellissi successive e stabilire così le posizioni del pianeta perturbato.

In questo modo si potevano compilare tavole con le posizioni dei vari pianeti calcolate per intervalli regolari di tempo (effemeridi).

LA SCOPERTA DI URANO

Urano fu scoperto il 13 marzo 1781 da William Herschel, musicista, astrofilo e costruttore dei propri telescopi. Inizialmente Herschel lo ritenne una cometa.

Solo dopo alcuni mesi dalla scoperta il nuovo astro risultò essere un pianeta, il settimo del sistema solare, distante dalla nostra stella 19,2 UA con un periodo di rivoluzione di 84 anni. La distanza era in accordo con la "legge" di Titius-Bode. (Fig.1)
(vedi Figg. 5 a), b), c))

LA SCOPERTA DI CERERE

Il pianetino Cerere, primo fra gli asteroidi, fu scoperto il 1° gennaio 1801 da Giuseppe Piazzi, fondatore dell'osservatorio astronomico di Palermo, il quale dopo quaranta giorni lo perse di vista. L'asteroide venne ritrovato, in dicembre, nella posizione prevista dal giovane matematico Karl F. Gauss, che ne aveva calcolato l'orbita con un nuovo procedimento. Cerere dista dal Sole 2,76 UA con un periodo di 4,6 anni e anche la sua distanza risulta in accordo con la "legge" di Titius-Bode. (Fig.1)

LE OSSERVAZIONI DI URANO

Dopo la scoperta, Urano venne osservato da molti astronomi, in particolare a Parigi e a Greenwich, per determinarne l'orbita.

Venne anche fatta un'accurata ricerca per controllare se l'astro fosse stato osservato in epoche precedenti, ma senza essere riconosciuto come pianeta.

Si raccolsero parecchi dati osservativi relativi sia a prima sia a dopo la sua scoperta e si pubblicarono, in epoche successive, tavole numeriche sul moto del pianeta, ma per tutte accadeva che dopo qualche tempo non si accordavano più con le osservazioni.

Nel 1820 l'astronomo francese Bouvard aveva raccolto diciassette osservazioni precedenti la scoperta di Urano e molte altre effettuate nei quarant'anni successivi. Quelle fatte prima della scoperta erano state eseguite da astronomi di prim'ordine.

DATA	ASTRONOMO	Si nota dalla tabella che i dati andavano dal
23 DIC 1690	Flamsteed	1690 al 1771, per cui, aggiungendo quelli degli
2 APR 1712	Flamsteed	anni dal 1781 al 1820, risulta un periodo
29 APR 1715	Flamsteed	complessivo di 130 anni, che copriva ben più
14 OTT 1750	Lemonnier	di una rivoluzione di Urano intorno al Sole.
3 DIC 1750	Lemonnier	Eppure Bouvard, nella premessa alle tavole
3 DIC 1753	Bradley	sul moto del pianeta pubblicate nel 1821,
25 SET 1756	Mayer	avvertiva di non essere stato in grado di trovare
15 GEN 1764	Lemonnier	una singola orbita ellittica che soddisfacesse
27 DIC 1768	Lemonnier	sia alle vecchie, sia alle più recenti osservazioni:
30 DIC 1768	Lemonnier	"La costruzione delle tavole di Urano implica
15 GEN 1769	Lemonnier	questa alternativa:
16 GEN 1769	Lemonnier	- se si combinano le vecchie osservazioni
20 GEN 1769	Lemonnier	con quelle più recenti, le prime saranno
21 GEN 1769	Lemonnier	rappresentate adeguatamente, ma le seconde
22 GEN 1769	Lemonnier	non saranno descritte entro le loro note
23 GEN 1769	Lemonnier	precise tolleranze;
18 DIC 1771	Lemonnier	- se invece rigettiamo le vecchie osservazioni

e consideriamo soltanto quelle più recenti, le tavole risultanti rappresenteranno queste ultime, ma non soddisferanno ai vecchi risultati.

Dobbiamo scegliere tra le due vie. Io ho adottato la seconda, in quanto fornisce le maggiori garanzie in favore della verità e lascio ai posteri il compito di scoprire se la difficoltà di far conciliare i due casi derivi dall'imprecisione delle vecchie osservazioni o se dipenda invece da qualche influenza estranea e sconosciuta che può aver agito sul pianeta."

Per di più, qualche anno dopo, cominciarono a evidenziarsi sensibili differenze tra i valori delle tavole e quelli derivanti da nuove osservazioni di Urano. Situazione che andò progressivamente peggiorando al punto che, dopo una decina d'anni, si trovarono discrepanze dell'ordine di mezzo minuto d'arco. (Fig. 6)

Nessun altro pianeta dava luogo a un fenomeno simile e ci si cominciò a chiedere quale potesse essere la causa di questo comportamento. Si dubitò persino della validità della legge di gravitazione universale sulle grandi distanze, ma poco a poco iniziò a farsi strada l'idea che ci fosse, al di là di Urano, un pianeta sconosciuto che ne perturbava il moto.

Questa era sostanzialmente la situazione agli inizi degli anni '40 dell'ottocento, quando l'affrontarono i due principali protagonisti della nostra storia: l'inglese John Couch Adams e il francese Urbain Jean Joseph Le Verrier.

JOHN COUCH ADAMS (1819 - 1892)

Nato a Lidcot, in Cornovaglia, fin da piccolo si dimostrò un ragazzo precoce, con una grande inclinazione per la matematica, e si appassionò presto all'astronomia. Studiò da autodidatta e nel 1839 superò brillantemente gli esami di ammissione alla Università di Cambridge. Nel 1841 venne a conoscenza del problema del moto di Urano e si propose di indagarne le irregolarità "...dopo la laurea, per stabilire se esse siano dovute a un pianeta sconosciuto e, in tal caso, determinarne l'orbita."

Nel 1843 superò i Mathematical Tripos, gli esami finali per il conseguimento del diploma con grande successo (undici anni dopo, Maxwell risulterà secondo) e diventò assistente all'Università di Cambridge.

In quegli anni James Challis (1803-1882) era professore di Astronomia a Cambridge e George Airy (1801-1892) era Astronomo Reale presso l'Osservatorio di Greenwich.

Incoraggiato da Challis, Adams iniziò a studiare il problema di Urano nell'estate del

1843 e a ottobre aveva fatto un primo passo, che confermava come le irregolarità del moto fossero da attribuire proprio a un pianeta esterno.

Adams doveva risolvere un problema di perturbazioni all'incontrario:

- 1) determinare la perturbazione subita da Urano per ogni data epoca;
- 2) correlare le perturbazioni alle caratteristiche dell'orbita e alla massa del pianeta perturbatore, scrivendo delle equazioni opportune;
- 3) risolvere numericamente le equazioni.

Per il punto a) occorre disporre di dati osservativi utili e Adams li ottenne, nel febbraio 1844, dall'Osservatorio di Greenwich, in particolare per il periodo 1818-1826, nel quale si erano riscontrate le maggiori discordanze.

Per il punto b) egli decise di fissare la distanza del pianeta che disturbava il moto di Urano in base alla legge di Titius-Bode (circa 38 UA).

Nel settembre 1845, a ventisei anni, Adams aveva terminato i suoi calcoli e trovato valori delle caratteristiche orbitali e della massa del pianeta cercato, tali da spiegare le anomalie che erano state riscontrate nel moto di Urano. Del pianeta perturbatore aveva anche calcolato la posizione al 1° ottobre 1845, trovando per la longitudine il valore di 323,5°.

Verso la fine del mese Challis scrisse ad Airy per presentargli la ricerca di Adams e questi, alla fine di Ottobre, consegnò all'Osservatorio di Greenwich un articolo con tutti i risultati del proprio lavoro, sperando di suscitare l'interessamento del Direttore e così favorire la ricerca osservativa del pianeta.

Purtroppo Adams non poté parlare direttamente ad Airy, e questi si limitò a inviargli, il 5 novembre, una lettera di ringraziamento in cui chiedeva alcuni chiarimenti, senza fare alcun cenno a possibili osservazioni per cercare un pianeta esterno a Urano.

Queste cose avvenivano in Inghilterra nell'autunno 1845, mentre in Francia lo stesso problema veniva affrontato da Le Verrier che, qualche mese prima, aveva ricevuto

l'incarico di studiare le anomalie del moto di Urano da François Arago, Direttore dell'Osservatorio Astronomico di Parigi.

URBAIN JEAN JOSEPH LE VERRIER (1811 - 1877)

Nato a Saint Lô, in Normandia, studiò matematica dapprima a Caen, quindi, nel 1831, si iscrisse alla École Polytechnique di Parigi. Laureato a pieni voti, lavorò come chimico nell'amministrazione statale sotto la guida di Gay-Lussac fino al 1837, anno in cui accettò l'incarico di assistente di Astronomia presso l'École Polytechnique.

Come astronomo, si fece apprezzare per i suoi studi rigorosi sulla stabilità del sistema solare e sulle perturbazioni dei moti delle comete, fino a quando non fu incaricato di occuparsi del moto di Urano.

Le Verrier affrontò il nuovo problema in modo sistematico e rigoroso, riferendo puntualmente all'Académie des Sciences sui risultati che andava via via ottenendo.

Il 10 novembre 1845 presentò una prima Memoria, nella quale illustrava l'analisi da lui fatta delle influenze di Giove e Saturno sul moto di Urano, per concludere che esse non erano sufficienti a spiegare gli scarti riscontrati, tra le posizioni osservate e quelle previste, per cui si dovevano ricercare altre cause.

Il 1° giugno 1846 venne presentata una seconda ampia Memoria, nella quale, dopo una severa critica delle tavole di Bouvard, era espressa la necessità di riimpostare completamente il problema di Urano e venivano discussi i punti che ora esamineremo.

a) Le anomalie nel comportamento del pianeta avrebbero potuto avere una delle seguenti spiegazioni: la non validità della legge di gravitazione universale sulle grandi distanze, la presenza di un etere che offriva resistenza, un satellite di grande massa non ancora scoperto, una collisione con una cometa, un pianeta sconosciuto. Escludendo, con fondate motivazioni, le prime quattro possibilità, Le Verrier prese in esame l'eventualità che un pianeta sconosciuto perturbasse il moto di Urano.

b) Il pianeta non avrebbe potuto essere all'interno dell'orbita di Saturno e neppure trovarsi tra Saturno e Urano, perché la sua influenza sarebbe risultata incompatibile con le lente perturbazioni di quest'ultimo, quindi doveva essere esterno.

c) Era ragionevole supporre che la sua distanza dal Sole fosse circa doppia di quella di Urano (38 UA), come previsto dalla legge di Titius-Bode, e che il piano orbitale fosse poco inclinato rispetto all'eclittica, come per gli altri pianeti.

Con queste premesse Le Verrier ricavò una espressione per la longitudine che dipendeva dalla massa del pianeta; quindi, procedendo per tentativi, cercò i valori di entrambe in modo che risultassero compatibili con le perturbazioni di Urano e, infine, determinò la longitudine del pianeta al 1° gennaio 1847, trovando un valore di 325° con un'incertezza massima di 10° .

Il lavoro svolto da Le Verrier fu molto apprezzato, ma nessun astronomo francese si mosse per cercare di osservare il pianeta.

Alla fine di giugno Airy venne a conoscenza della memoria e poté constatare l'accordo esistente tra i due valori di longitudine calcolati da Adams e Le Verrier, ottenuti indipendentemente e con procedimenti diversi. Scrisse allora all'astronomo francese per complimentarsi e per sottoporgli le stesse perplessità che aveva espresso ad Adams, senza però fare alcun cenno alla precedente ricerca di quest'ultimo.

Le Verrier rispose subito, spiegando che i dubbi erano infondati e dichiarandosi disposto a inviare, su richiesta, nuove posizioni del pianeta da osservare.

LA SCOPERTA DEL NUOVO PIANETA

Finalmente, nel mese di luglio, Airy invitò Challis a iniziare le ricerche con lo strumento di Cambridge, più potente di quello di Greenwich, suggerendogli di scandagliare sistematicamente e mappare una fascia zodiacale lunga 30° e larga 10° , centrata sulla longitudine di 325° , riportando la posizione di ogni stella fino alla 11^a

magnitudine (un lavoro che, purtroppo, richiedeva centinaia di ore di osservazione).

E alla fine dello stesso mese Adams, informato della ricerca, fornì a Challis le coordinate del pianeta, ascensione retta e declinazione, calcolate per ogni ventesimo giorno del periodo dal 20 luglio all'8 ottobre 1846 e ogni cinque gradi di longitudine da 315° a 335° , allo scopo di facilitare le osservazioni.

Si ha l'impressione, a questo punto, che la ricerca, e infine la scoperta, del pianeta esterno a Urano fosse nelle mani degli astronomi inglesi, ma le cose andarono diversamente.

Il 31 agosto Le Verrier presentò all'Académie des Sciences la sua terza Memoria con i risultati degli ultimi calcoli. In particolare, l'astronomo francese:

- a) spiegò il procedimento seguito per risolvere il sistema di 33 equazioni a cui era pervenuto;
- b) fornì i parametri orbitali del pianeta e la sua longitudine al 1° gennaio 1847 (326° , un grado in più rispetto al valore ottenuto tre mesi prima);
- c) fornì le dimensioni angolari del dischetto che si sarebbe presentato all'osservatore ($3''$ d'arco);
- d) illustrò l'elegante metodo adottato per valutare i limiti di precisione nel valore della longitudine, individuando un intervallo da 321° a 335° . (LV me.)

Il 2 settembre Adams inviò a Greenwich una dettagliata lettera con i risultati di uno studio più recente sul problema e nuovi dati utili per le osservazioni, riservandosi di presentare anche una nota all'Associazione Britannica per il Progresso delle Scienze.

Il 10 settembre a Southampton, dove l'Associazione stava svolgendo i suoi lavori, John Herschel informò i presenti sulla possibile prossima scoperta di un nuovo pianeta: "Noi lo vediamo, affermò, come Cristoforo Colombo vedeva l'America dalle coste della Spagna". Purtroppo Adams giunse in ritardo ai lavori, il 15 settembre,

e non poté presentare la propria comunicazione.

Il 18 settembre Le Verrier, visto che negli osservatori astronomici francesi non era stata intrapresa alcuna ricerca del pianeta, scrisse a Johann Galle, assistente presso l'Osservatorio di Berlino, fornendogli i dati per individuare il pianeta.

Ricevuta la lettera il 23 settembre, Galle ottenne dal direttore Johann Encke il permesso di effettuare la ricerca e la sera stessa si mise al lavoro con il rifrattore da 23 cm, aiutato dallo studente di astronomia Heinrich d'Arrest. Poiché non riuscivano a trovare nulla, d'Arrest propose di utilizzare, per quella parte del cielo, la nuova mappa realizzata dal Dr. Bremiker, molto dettagliata e precisa. Recentissima, non era ancora stata distribuita agli altri osservatori astronomici.

Galle, allo strumento, indicava la posizione e la luminosità di una stella e d'Arrest controllava sulla mappa: facevano così la spunta degli astri osservati, uno per uno. A un certo punto Galle diede la posizione di una stella di ottava magnitudine e d'Arrest esclamò: "Non c'è sulla mappa!" Avvertito subito Encke, tutti e tre seguirono l'astro fino al suo tramonto, senza avere la certezza che si trattasse di un pianeta. Ma la sera successiva poterono verificare un piccolo spostamento e misurare il diametro angolare, che risultò in accordo con la previsione di Le Verrier ($3''$ d'arco).

DOPO LA SCOPERTA

Il 25 settembre Galle rispose a Le Verrier per annunciargli la scoperta e qualche giorno dopo lo stesso Encke gli scrisse per congratularsi. La notizia si diffuse rapidamente e il nuovo pianeta venne osservato anche presso altri osservatori astronomici. (vedi Figg. 7 a), b), c))

Il 29 settembre, ancora all'oscuro di tutto, Challis venne a conoscenza dell'ultima memoria di Le Verrier, del mese precedente, e si propose di controllare, durante le sue osservazioni, se qualche astro potesse presentarsi con un piccolo disco.

Ma il 1° ottobre lesse sul "Times" di Londra la notizia della scoperta e allora decise di riesaminare gli appunti presi durante le osservazioni che aveva fatto dal 29 luglio in poi. Trovò che aveva osservato il nuovo pianeta due volte, il 4 e il 12 agosto, senza rendersene conto perché non aveva effettuato i necessari controlli sugli spostamenti dell'astro.

Le notizie, che Adams aveva effettuato i calcoli di previsione prima di Le Verrier e che Challis aveva visto il pianeta nel mese di agosto (sia pure riconoscendolo in ritardo), si diffusero presto in Inghilterra e scoppiò la polemica. In particolare contro Airy e Challis, i quali dovettero cercare di giustificare il proprio comportamento.

E dall'Inghilterra la polemica rimbalzò in Francia per via della priorità della scoperta.

Accadde che i limiti umani, già emersi negli atteggiamenti di sfiducia ingiustificata manifestati da Airy e Challis nei confronti del giovane Adams, si evidenziarono anche in altre persone, per motivi di orgoglio nazionale o per ambizione personale. Lo stesso Le Verrier, dopo essersi rifiutato di osservare al telescopio il pianeta da lui individuato con i calcoli, chiese, con il sostegno di Arago, che gli venisse dato il proprio nome.

Tuttavia, in seno alla comunità scientifica internazionale il buon senso finì per prevalere: il merito della previsione matematica venne equamente attribuito ad Adams e a Le Verrier, i quali, incontrandosi nei Convegni di astronomia, fecero anche amicizia, e il nuovo pianeta venne chiamato Nettuno.

NETTUNO

Quando si riuscì a valutare con sufficiente accuratezza i parametri orbitali e la massa del nuovo pianeta, fu possibile effettuare un confronto con i dati ottenuti da Adams e Le Verrier. I valori sono riportati nella Tabella seguente.

CONFRONTO DI DATI RELATIVI A NETTUNO

	Adams	Le Verrier	Walker (1847)	attuali
Semiassse maggiore (UA)	37,3	36,2	30,3	30,1
Eccentricità	0,1206	0,1076	0,0088	0,0088
Periodo orbitale (anni)	227,3	217,4	166,4	164,8
Massa (Terra = 1)	49,8	35,7	22,1	17,2
Longitudine, 1° gennaio 1847	330°	326,5°	328°	-----

Date le discordanze evidenti, si accesero nuove discussioni. Senza entrare nel merito delle polemiche, limitiamoci a elencare le considerazioni conclusive.

1) La "legge" di Titius-Bode cade in difetto. (Fig. 1)

2) La discordanza sulla distanza dal Sole non ha influito sul valore della longitudine al 1° gennaio 1847, e quindi non ha impedito di scoprire Nettuno. Il periodo orbitale e la massa, invece, risultano necessariamente più piccoli.

3) Gli effetti perturbativi sul moto di Urano si possono comprendere meglio ricostruendo le posizioni relative dei due pianeti nell'intervallo di tempo che intercorre fra le loro scoperte. La figura, che mostra i loro percorsi, permette di spiegare come mai le anomalie siano risultate più evidenti negli anni fra il 1800 e il 1840. (Fig. 8)

4) La rapidità con cui Galle e d'Arrest riuscirono a individuare Nettuno, da un lato, e le difficoltà incontrate da Challis, dall'altro, mettono in evidenza il ruolo importante avuto dalla mappa berlinese del Dr. Bremiker nella scoperta del nuovo pianeta.

5) Come nel caso di Urano, anche in quello di Nettuno si poterono rintracciare osservazioni fatte prima della sua scoperta, utili per il calcolo dei parametri orbitali.

Una ventina di anni fa è stato dimostrato che anche Galileo, il 28 gennaio 1613, aveva osservato Nettuno mentre studiava il moto dei satelliti di Giove. (Figg. 9 a), b), c)

Considerazioni di Nick Kollerstrom

1.
 - a) Recuperata una grossa cartella di documenti raccolti da Airy e, sembra, mai consultati e citati da coloro che si sono interessati alle vicende della scoperta di Nettuno.
La cartella era stata sottratta al Royal Greenwich Observatory negli anni '60 da un certo Olin Eggen, astronomo stellare, e fu ritrovata solo alla sua morte avvenuta nell'ottobre 1998.
 - b) Diventati consultabili, nel 1999, alcuni documenti di Adams, conservati negli archivi della biblioteca del Saint John College di Cambridge.

2. Alla luce di questi documenti Nick Kollerstrom, del Science & Technology Studies Department presso l'University College di Londra, ricostruisce la storia della scoperta di Nettuno sulle seguenti basi.
 - a) A differenza di Le Verrier, Adams non ha reso pubblici i risultati della sua ricerca e i relativi calcoli *prima* della scoperta. Tutto quello che si sa è stato raccontato da altri, in particolare da Airy e da Challis.
 - b) Airy e Challis avrebbero fatto il nome di Adams, e parlato della sua ricerca, *dopo* la scoperta del pianeta.
 - c) Mentre le previsioni di Le Verrier sulla posizione effettivamente osservabile del pianeta andavano progressivamente migliorando, quelle di Adams (poche) peggioravano e soltanto la prima, fornita ad Airy alla fine del 1845, aveva una certa validità.
 - d) Non è vero che tale previsione concordasse con quella di Le Verrier "entro un grado", come dicevano gli inglesi, perché i due dati erano diversi e non direttamente confrontabili. Per un confronto valido occorre riportare i dati alle stesse condizioni e così si trova che la differenza è di circa quattro gradi. (Tabelle)
 - e) La storia della scoperta, sul versante inglese dal 1852 al 1947, è stata fatta sempre da simpatizzanti di Adams che erano stati alunni di uno dei due colleghi di Cambridge, il Saint John e il Trinity, e/o presidenti della Royal Astronomical

Society (RAS): Adams era stato alunno del Saint John e per due volte presidente della RAS.

- f) Challis, che aveva osservato Nettuno il 4 e il 12 agosto 1846 senza rendersene conto, si era giustificato affermando di non avere a disposizione, come Galle e D'Arrest, la mappa del Dr. Bremiker relativa alla 21-ma ora di ascensione retta (AR). In realtà aveva quella della 22-ma ora, che si estendeva fino al limite di 21 h 56 min e, proprio in quei giorni, il pianeta aveva rispettivamente AR 21 h 58 min e AR 21 h 57 min.
- g) Le Verrier si è molto lamentato di non avere potuto vedere il lavoro fatto da Adams.

3. Kollerstrom non dice quasi nulla di Adams e della sua opinione sullo studio di Le Verrier e sulla scoperta di Galle (vedere al riguardo: RAS, *Monthly Notices*, p. 150 [8]).
4. Nemmeno accenna ai rapporti stabilitisi tra Adams e Le Verrier (vedere al riguardo: *Biographical Notice*, p. XXXIV).
5. Sulle qualità personali di Adams vedere anche: *Professor Challis's Report*, p. LIV.

Personalmente ho ricavato l'impressione di una ricostruzione a tesi, facente leva su molte incongruenze di Adams, di Airy e di Challis, supponendo che gli inglesi fossero in mala fede.

Va anche considerato, a mio parere, che

- a) il valore fornito da Adams cadeva abbondantemente entro l'intervallo d'incertezza dato da Le Verrier,
- b) a Berlino erano in due a lavorare, facendo la spunta degli astri osservati e prestando attenzione agli spostamenti di Nettuno, mentre a Cambridge Challis, forse lavorando da solo, non aveva purtroppo controllato gli spostamenti del pianeta.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. M. Grosser, "The discovery of Neptune", Dover Publications, Inc., New York, 1979
2. P. Moore, "The planet Neptune", John Wiley & Sons, Chichester, 1996
3. U. J. J. Le Verrier, Sei Memorie degli anni 1842, 1845, 1846, da *Comptes rendus*, Paris
4. J. W. L. Glaisher, "Biographical Notice", da "The Scientific Papers of John Couch Adams", Vol. I, a cura di W. G. Adams, Cambridge University Press, 1896
5. J. Challis, "Report to the Observatory Syndicate", da "The Scientific Papers of John Couch Adams", Vol. I, a cura di W. G. Adams, Cambridge University Press, 1896
6. W. Sheehan, "Secret Documents Rewrite the Discovery of Neptune", Sky & Telescope, July 2003
7. N. Kollerstrom, "Neptune's Discovery", al sito web <http://www.ucl.ac.uk/sts/nk/neptune/>
8. F. R. Moulton, "An introduction to celestial mechanics", Dover Publications, Inc., New York, 1970
9. S. Drake e C. T. Kowal, "L'osservazione di Nettuno fatta da Galileo", Le Scienze, n. 150, Febbraio 1981
10. L. Stefanini e A. Berra, "Titius e Bode contro Keplero: un'attività didattica sul concetto di legge fisica", La Fisica nella Scuola, Anno XXXV, n. 2, aprile-giugno 2002

(Note 2)

Legge di Titius - Bode

$$D(n) = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n \quad (1)$$

con D in UA e $n = 0, 1, 2, \dots$

$$\left\{ D = 0,4 \text{ per } n \rightarrow -\infty, \text{ Mercurio} \right\}$$

Considerando D in UA/10 si ha

$$D(n) = 4 + 3 \cdot 2^n$$

e passando ai logaritmi

$$D - 4 = 3 \cdot 2^n$$

$$\ln(D - 4) = \ln 3 + n \cdot \ln 2 \quad (1')$$

La relazione (1') è lineare (vedi grafico)

Fig. 4 -

Variazioni di un'orbita planetaria dovute alle forze di perturbazione \vec{f}_1 e \vec{f}_2 .

(schema illustrativo)

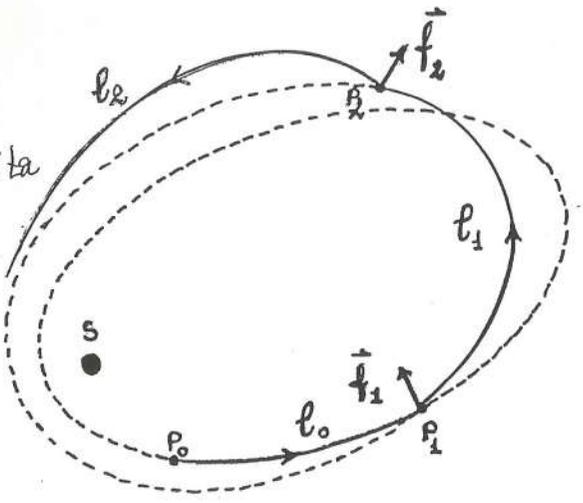
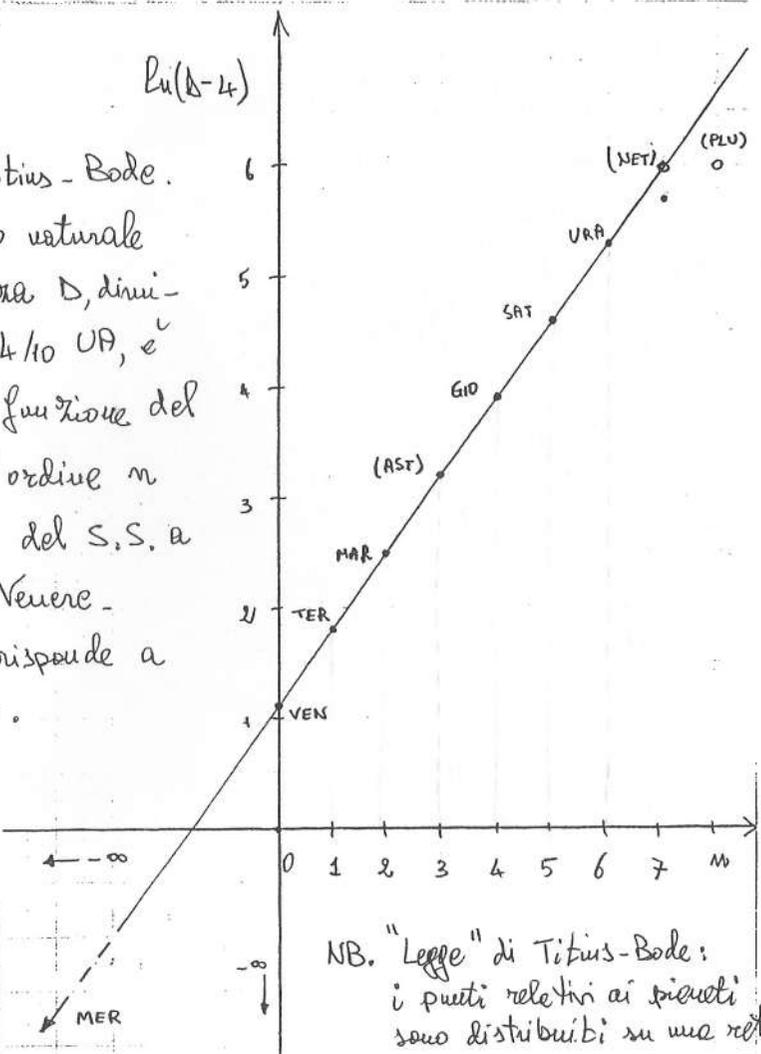


Fig. 1

"Legge" di Titius - Bode.
 Il logaritmo naturale della distanza D, diminuita di 4/10 UA, è espresso in funzione del numero d'ordine n dei pianeti del S.S. a partire da Venere.
 Mercurio corrisponde a $n \rightarrow -\infty$.



NB. "Legge" di Titius-Bode: i punti relativi ai pianeti sono distribuiti su una retta.

ELLISSE

O: centro

A, B, C, D: vertici

F1, F2: fuochi

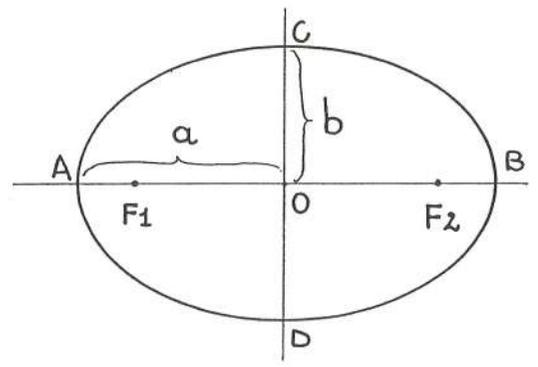
AB = 2 a : asse maggiore

CD = 2 b : asse minore

$$e = \frac{F1F2}{AB} : \text{eccentricità}$$

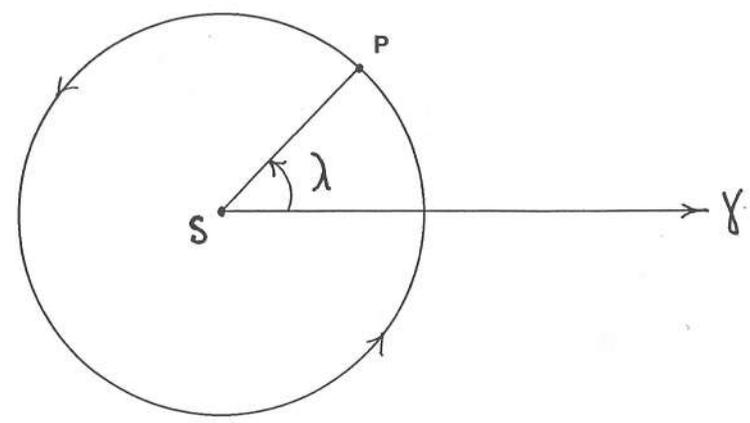
NB. Nel sistema solare l'eccentricità delle orbite planetarie è molto piccola e le traiettorie risultano quasi circolari (ellisse \rightarrow circonferenza per $e = 0$)

Fig. 2



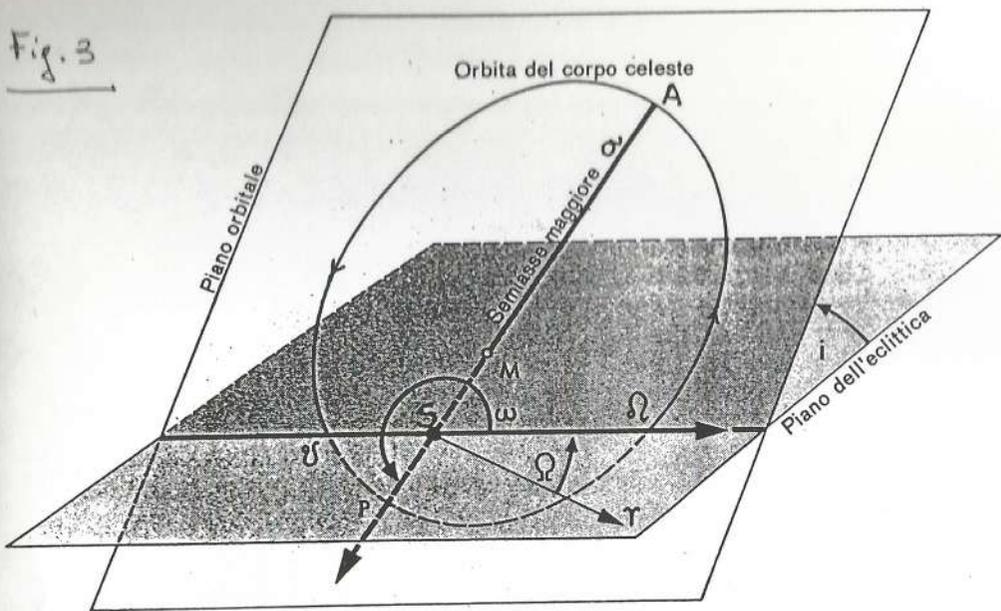
ORBITA

APPROSSIMATA



λ = longitudine eliocentrica del pianeta P considerata rispetto alla direzione del punto γ

Fig. 3



A) Gli elementi di un'orbita

a: semiasse maggiore, che stabilisce le dimensioni dell'orbita e il periodo di rivoluzione (in base alla terza legge di Keplero)

e: eccentricità, che stabilisce la forma dell'orbita

Ω : longitudine del nodo ascendente
 i : inclinazione sul piano dell'eclittica
 } stabiliscono la giacitura del piano orbitale

ω : longitudine del perielio (rispetto al nodo Ω oppure rispetto al punto γ), che stabilisce l'orientamento dell'orbita nel suo piano

T: istante del passaggio del pianeta al perielio

Fig. 5 a) - Fratrespizio del giornale di Parma - la data e il numero indicano che la "gazetta" uscì una volta alle settimane 28/5/1781



VENERDI 28. MAGGIO 1781.

VIENNA 2. Maggio.

Anche la mattina del dì 25. dell'ora scaduto mese Sua Maestà Imperiale, e Regia Apostolica si è compiaciuta recarsi di nuovo a pranzare nel suo delizioso Castello dell'Augarten. Il 30. verso l'ore 7. della mattina fece da qui partenza Sua Altezza Reale la Serenissima Arciduchessa Elisabetta alla volta d'Innsbruck, per istabilirvi il suo soggiorno. Prese la Reale Altezza Sua la via della Carintia, ad oggetto di abbracciare un'altra volta nel suo passaggio per Clangensfurt la Reale Arciduchessa Marianna sua Sorella. All'opposto circa l'ore 11. della suddetta mattina pervenne da Milano un Corriere alla nostra Corte colla lieta nuova di essersi la Reale Arciduchessa Maria Beatrice sgravata felicemente la notte del dì 25. venendo il 26. pur dello scorso di un Principino. In esso gior-

no venne a nome del prelodato augustissimo nostro Monarca rinnovata da questa Eccelsa Reggenza la pubblicazione di un Sovrano Decreto, con cui resta proibito a' Sudditi degli Stati Ereditarij di Germania, e di Boemia di più presentare alla riferita M. S. immediatamente, od a' suoi Aulici Dicasterj Rappresentanze, Suppliche, o Memoriali quando che non sieno stati prima sottoscritti da un Agente autorizzato, essendovene già anche di questi a tal uopo pagati dal Regio Erario per vantaggio de' poveri Sudditi; e ciò specialmente perchè vengono umiliate tante istanze mal concepite, insufficienti, e da non ammetterli. Aggiugnési pertanto; che tutte le Suppliche ec. non sottoscritte dall'Agente non faranno, nè dovranno essere in avvenire accettate dagli Aulici Dicasterj; e che se in qualche maniera ne giugneste qualcuna fra le mani del Sovrano, verranno considerate come non presentate, ed immeritevoli di rifles-

156
 la numerazione delle pagine era progressiva, da gennaio a dicembre
 ra, comandate dal Maggior-Generale D. Bonaventura Moreno; e ad onta del fuoco nemico, e di essere forte, e contraria la corrente andarono approssimandosi per cominciare il loro. Lo fecero col maggior vigore dal levar del Sole fino alle sette e mezzo, disprezzando l'imminente pericolo, in cui furono continuamente; giacchè ad ogni scarica si vedevano ribattute dalla stessa corrente, e marcò al tiro di tutta l'artiglieria de' nemici da quella parte, i quali sparavano con attività; e ciò non ostante non vi fu il meno piccolo accidente nè in quelle piccole Barche, nè nella gente, che tanto animosamente le maneggiava. Siccome i nostri fuochi si dirigevano al Molo nuovo, allo Spedale di marina, ed ai Quartieri della Punta d'Europa, debbono aver fatto bastante danno; mentrechè si osservò, che vi furono pure alcune bombe, che caddero intorno al Magazzino della polvere, e che tanto gli abitanti situati nelle baracche contigue a' Quartieri, quanto la Truppa che eravi accampata, eranfi ritirati con somma precipitazione al più alto della montagna.

PARIGI 27. Aprile

Comparese una nuova Cometa, che il Sr. Messier Astronomo della Marina, e dell' Accademia delle Scienze, osserva dal 15. di questo mese in qua, dopo l'annunzio, che ne avea ricevuto dal Sr. Maskelyne, Astronomo Regio d'Inghilterra, che gli scrive » vedesi attualmente una Stella di 5.^a in 6.^a grandezza, che ha un movimento, e caratteri singolari, somigliante ad un Pianeta,

che avesse 4. in 5. secondi di diametro, d'una luce biancastra, e brillante, come quella di Giove. Le notti del 3. al 5. Aprile l'ascensione retta di quest'Astro era di 84. gradi, 23. minuti, 35. sec., e la sua declinazione 23. gradi, 34. minuti, 14. secondi boreali: il suo moto era di due minuti, in ascensione retta per giorno, e quello in declinazione quasi nulla ».

Con una seconda Lettera di Londra si scorge, che questo nuovo Astro è stato scoperto a Bath dal Sr. Hertfthel, dilettante d'Astronomia.

Questa Cometa era tanto più difficile da scoprire, secondo la succennata posizione, in quantochè non porta seco alcuni caratteri distintivi delle Comete: che essa non somiglia ad alcuna di quelle, che il Sr. Messier avea osservate in numero di diciotto, e che era facile di confonderla con le Stelle vicine. Il Sr. Messier halla riconosciuta il 15. di questo mese: il 23. ne determinò la posizione: alle ore 8., minuti 23., secondi 33. della sera, tempo vero, essa avea d'ascensione retta 85. gradi, 9. minuti, 48. secondi, e di declinazione boreale 23. gradi, 35. minuti, 26. secondi. Il suo moto seguiva l'ordine de' Segni.

Questo nuovo Astro è osservabile per la sua luce brillante, che però è un poco smontata, e biancastra, quale sembra averla Giove ne' cannocchiali. In quanto ad ora non vi si vede alcuna traccia nè di chioma, nè di coda, ed in ciò è differente da tutte le Comete.

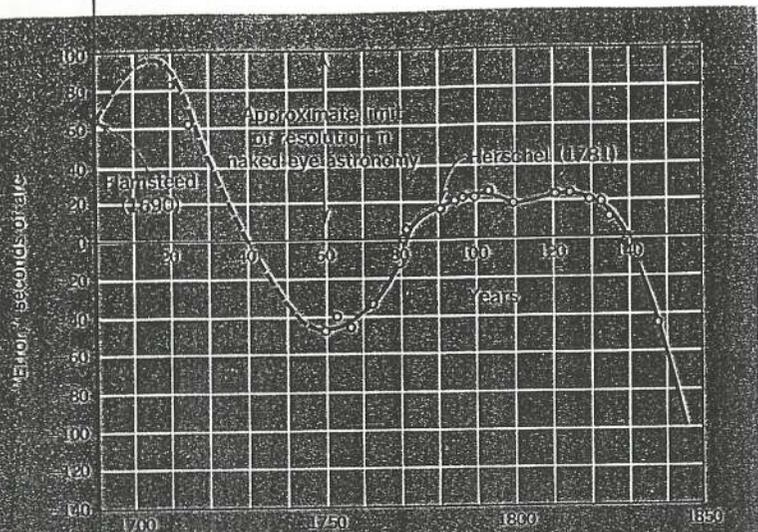
di legno roventi, ma tutto coperti di cenere; giacchè per mezzo de' carboni roventi, e della cenere insieme si ottiene il calore affatto uniforme, necessario all'operazione. Sopra il fuoco di carboni si pone un treppiè, e sopra questo una sottile lastra di ferro, ovvero una latta, la quale sia acconcia allo stromento da vernicare, ovvero, che sia larga e lunga abbastanza per riceverlo sopra, senza che le sue estremità ne sporgano in fuori. Solamente quando lo stromento da vernicare fosse troppo grosso, ed alquanto cavo, allora si potrebbe tenere pendolone con un uncinello di ferro da adattarvisi, e vernicarlo a poco a poco, mentrechè i pezzi grossi assai devono essere intonacati più d'una volta, dove fa d'uopo osservare, che un luogo non venga più impinguato dell'altro, perchè il colore non rimarrebbe da per tutto uguale.

In quarto luogo, subito che il pezzo scaldato sopra il fuoco in questa maniera è tanto caldo, che non possa soffrirsi con la mano, dovendo levarsi con la lastra, su di cui giace, principalmente guardisi dal toccarlo con mano; mentrechè il luogo toccato non riceverebbe la vernice. Questa viene applicata con un pennello di setole, che non sia troppo sottile, nè puntato: osservisi che il pennello ogni volta si prenda ugualmente pieno, e guardisi rigorosamente di non toccare due volte uno stesso luogo, ovvero di guastare il tratto una volta preso dal pennello

con impiastrare indietro. Si può certamente intonacare più volte un luogo con la vernice; ma bisogna, che ogni strato si asciughi da sè. L'asciugamento si fa molto facilmente, quando si tiene ancora alquanto spazio il suo pezzo vernicato al calore, affinchè lo spirito di vino svapori totalmente. Per quegli stromenti, che non hanno una superficie piana, ma sono adorni di diverse figure o prominenti, o incavate, a vernicarli convenevolmente è necessario di farli stare alcun tempo o con aceto, o con acqua-forte indebolita, o pure semplicemente in acqua-forte scaldata: fa però di mestieri, quando sono opportunamente purgati dalle lorde annessi, nettarli totalmente con una spazzola, e con acqua ben calda, affinchè l'acrimonia dell'acqua-forte intrusa nelle più piccole cavità non sia di pregiudizio alla vernice.

La nuova Cometa è stata osservata l'8. a Mannheim. Ad occhi nudi pareva come una stella della terza grandezza. Essa accostasi alla terra con grandissima velocità, e si è già inoltrata sino a' piedi davanti dell' Orsa maggiore. Il nuovo Pianeta si può vedere la sera alle ore 9. con buona vista: fa il movimento a rigore secondo l'annunzio del Sr. Bode di Berlino: ed ora è un fatto decisivo, che sia un Pianeta del nostro Sole, e quasi una volta ancora lontano come Saturno.

$\Delta_{\text{Oss-TEOR}}$ (secondi d'arco)



t (anni)

Fig. 6

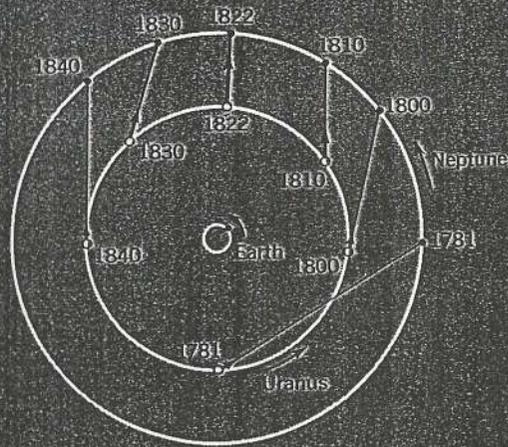


Fig. 8

Fig. 6 - Andamento del disaccordo fra i dati di osservazione e le previsioni teoriche in funzione del tempo.

Fig. 8 - Posizioni relative di Urano e di Nettuno nel periodo dal 1781 al 1840 - Prima del 1822 l'azione perturbatrice di Nettuno ha indotto Urano ad anticipare rispetto alle previsioni; dopo il 1822, a ritardare -

L V me. Le Verrier 31/8/46

« Je passe à la détermination des limites entre lesquelles on peut faire varier chacun des éléments ci-dessus déterminés, sans cesser de représenter les observations; non plus, sans doute, avec la plus entière rigueur, mais avec une approximation dont on pourrait se contenter, si les observations avaient été faites dans des circonférences peu favorables.

« Reprenons la position que nous avons déterminée plus haut pour la planète troublante. Nous pourrions écarter notablement l'astre de cette position dans une direction déterminée, située dans l'écliptique, et continuer de satisfaire aux observations d'Uranus, si nous faisons varier d'une manière convenable les éléments des orbites des deux planètes. Et, toutefois, à mesure que nous nous éloignerons de la première position, les observations d'Uranus seront moins bien représentées; et nous arriverons, dans la direction que nous avons suivie, à un point de l'écliptique au delà duquel on ne pourra placer la planète troublante sans introduire entre la théorie et les observations des différences inadmissibles. La suite des points analogues, situés dans toutes les directions autour de la première position, formera une enceinte en dedans de laquelle l'astre cherché sera de toute nécessité renfermé. En menant à cette enceinte deux tangentes extrêmes par le Soleil, on connaîtra deux longitudes entre lesquelles il suffira de chercher la nouvelle planète. Mais le tracé de l'enceinte est fort compliqué; je vais me borner à exposer d'une manière générale comment je suis arrivé à l'effectuer.

« Le demi-grand axe de l'orbite, auquel j'ai trouvé pour valeur la plus précise 36,154, ne peut varier qu'entre les limites 35,04 et 37,90. Les durées extrêmes correspondantes de la révolution sidérale sont 207 et 233 ans environ.

« Ces limites étant connues, restreignons d'abord le problème de la détermination de l'enceinte à un cas particulier. Considérons spécialement une

planète qui effectuerait sa révolution en un temps déterminé, en 220 années par exemple; et, laissant tous les autres éléments arbitraires, proposons-nous de tracer l'enceinte dans laquelle il faudra renfermer cet astre, pour qu'on puisse satisfaire aux observations d'Uranus. Cette enceinte ne sera pas continue; ce sera un polygone à côtés curvilignes, un pentagone généralement. La raison de cette particularité se comprendra aisément, si l'on réfléchit que les anciennes observations d'Uranus, qui jouent un rôle important dans ces discussions, ne se rencontrent qu'à des intervalles de temps très-long et très-différents les uns des autres.

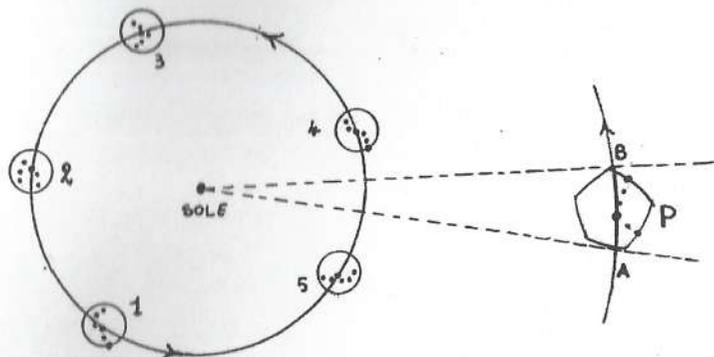
« Imaginons que nous venions à écarter notre planète de sa position la plus précise, dans une direction déterminée, et sans faire varier la durée de sa révolution. Toutes les observations continueront à être représentées jusqu'à une certaine distance de l'origine, où nous serons obligés de nous arrêter, parce qu'une des observations, une seule en général, ne permettra pas d'aller plus loin. Supposons, pour fixer les idées, que ce soit la première observation de Flamsteed. Tant que ce sera cette première observation qui limitera l'écart de la planète, par rapport à l'origine, et dans une direction différente de la première, la limite qu'on obtiendra ainsi sera une courbe continue; mais, lorsqu'une autre observation, celle par exemple qui fut faite en 1756 par Mayer, se substituera à la précédente, parce qu'elle deviendra plus exigeante qu'elle, la courbe limite changera de forme; au point où elle

intervalli
successive
valori

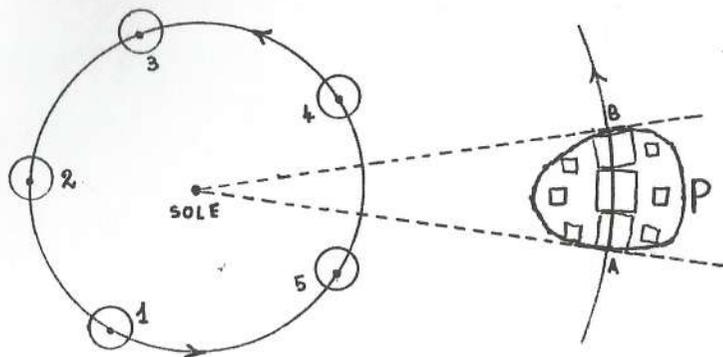
coupera la première, il y aura discontinuité dans l'enceinte; cette enceinte sera, comme je l'ai annoncé, un polygone à côtés curvilignes.

» Nous pourrions tracer de même les polygones curvilignes, dans l'intérieur desquels serait comprise une planète qui mettrait à effectuer sa révolution, non plus 220 années, mais bien 222 ans, 224 ans..., ainsi de suite jusqu'à 233 ans: on ne saurait supposer une révolution plus longue. Semblablement, nous pourrions supposer que la durée de la révolution s'abaisse successivement à 218 ans, 216 ans..., ainsi de suite jusqu'à 207 ans. L'amplitude des polygones ainsi formés diminuera, en général, à mesure que la durée de la révolution se rapprochera de ses valeurs extrêmes; et quand on supposera cette durée égale à l'une de ses limites, le polygone se réduira à un point: ce sera la seule position que puisse occuper la planète.

» Revenons maintenant au problème le plus général; laissons la durée de la révolution variable comme les autres éléments. La planète pourra dès lors être cherchée dans l'un quelconque des polygones curvilignes que nous venons de tracer. Après avoir multiplié convenablement le nombre de ces polygones, on pourra les circonscrire, les envelopper par une courbe qui consti-



CALCOLO INCERTEZZA SECONDO LE VERRIER



tuera l'enceinte demandée. Il ne me reste plus qu'à faire connaître les longitudes des tangentes extrêmes menées à cette enceinte.

» La longitude de la tangente menée à l'Ouest, est, en nombre rond, de 221 degrés. La position la plus précise assignée à l'astre étant de 326°32', on voit qu'on aura à explorer, en arrière de cette position, une étendue de 5 degrés et demi.

» La limite supérieure est loin d'être aussi restreinte; mais il ne me paraît pas qu'elle puisse être acceptée avec une grande probabilité dans toute son étendue; car, à mesure qu'on fait croître la longitude, on voit, à partir d'un certain point, l'excentricité de l'astre cherché grandir sans cesse, et acquérir des valeurs qui paraissent peu en harmonie avec la constitution du système des grosses planètes, système dont le nouvel astre fait partie sous le double rapport de sa situation et de la grandeur de sa masse. Quoi qu'il en soit, on peut porter la position actuelle de la planète jusqu'à 335 degrés de longitude héliocentrique, sans que la valeur de l'excentricité grandisse au delà de $(\frac{1}{3})^{\text{ème}}$. Mais si l'on voulait admettre une excentricité supérieure, et égale à $(\frac{1}{2})^{\text{ème}}$, il faudrait pousser les recherches jusqu'à 245 degrés de longitude.

» Ces positions, éloignées du lieu le plus précis, me paraissent, je le répète, peu probables: on n'y arrive qu'en admettant une excentricité considérable, et en se contentant de satisfaire aux observations avec une médiocre exactitude. Il me semble donc que les recherches physiques seraient convenablement conduites de la manière suivante: On partirait du lieu situé par 326°32' de longitude; et, en s'éloignant simultanément à droite et à gauche de ce point, on explorerait la région de l'écliptique qui est comprise entre 321 et 335 degrés de longitude héliocentrique. Si, jusque-là, les recherches avaient été vaines, on recourrait aux longitudes supérieures.

» Dans les discussions dont je viens de donner les principaux résultats, la masse de la planète est restée comprise entre $\frac{1}{14500}$ et $\frac{1}{1700}$. Ainsi, dans toutes les hypothèses admissibles, elle est supérieure à la masse d'Uranus.

caud
opère
nelle
nichia

? 345?

? 321?

Fig. 7 a) - *Fratespizio del giornale di Parma - la data e il numero indicano che le "Gazzetta" uscirà due volte alle settimane -*

Sabato 17 Ottobre



N.° 83. 1846.

GAZZETTA

DI PARMA

OSSERVAZIONI METEOROLOGICHE FATTE NELLA SPECOLA DELL' UNIVERSITÀ

Giorni ed ere delle Osserv.	Barometro ridotto a 0 R.	Termometro di R. esterno	Igrometro di Saussure	Pioggia caduta in 24 ore	Anemoscopio	Stato Atmosferico	NOTE DIVERSE	
							Temperature estreme (T. R.)	
				Centimetri			Mass.	Min.
14 Ottobre	27 10, 0	+ 10, 0	98	—	O	Nuvolo rotto		
15 " 3 matt.	27 9, 4	+ 11, 0	96	—	NE	Nuvolo. Goccia		
15 " 3 pom.	27 7, 5	+ 9, 5	100	—	NE	Nuvolo. Goccia	14. + 15, 0.	+ 9, 0.
16 " 3 matt.	27 6, 5	+ 11, 5	100	—	NO	Nuvolo. V. forte	15. 15, 6.	7, 0.
16 " 3 pom.	27 6, 8	+ 11, 5	100	—	N	Nuvolo rotto	16. + 14, 5.	+ 6, 8.

NOI MARIA LUIGIA PRINCIPESSA IMPERIALE ED ARCIDUCHESSA D'AUSTRIA, PER LA GRAZIA DI DIO DUCHESSA DI PARMA PIACENZA E GUASTALLA ECC. ECC. ECC.

Sovra il rapporto, e la proposta del Nostro Presidente delle Finanze,

Abbiamo decretato, e decretiamo:

Art. 1.° Il signor *Alessandro Chiodelli*, Ispettore-Verificatore dell'ufficio di Revisione dell'Amministrazione delle Contribuzioni indirette, è promosso al posto di Direttore particolare del lotto.

Egli avrà lo stipendio annuo di lire duemila cinquecento.

Art. 2.° Il Nostro Presidente delle Finanze curerà l'esecuzione di questo presente Nostro Decreto.

Dato a Ischl addì 6 di Settembre del 1846.

MARIA LUIGIA.

Da parte di S. M.
Pel Presidente delle Finanze
Il Consigliere di Stato effettivo delegato
V. VICENZI.

NOI MARIA LUIGIA ecc.

Sovra il rapporto, e la proposta del Nostro Presidente delle Finanze,

Abbiamo decretato, e decretiamo:

Art. 1.° Il signor *Giovanni Bocchialini*, Vicispettore dell'Amministrazione delle Contribuzioni indirette nel territorio della Comisseries di Borgotaro, è promosso all'ufficio d'Ispettore delle regalie e bevande nell'Amministrazione antidetta.

Egli avrà lo stipendio di lire mille ottocento all'anno, ed un'indennità di lire seicento per le spese di viaggio.

Art. 2.° Il Nostro Presidente delle Finanze curerà l'esecuzione di questo presente Nostro Decreto.

Dato a Schönbrunn addì 4 d'Ottobre del 1846.

MARIA LUIGIA.

Da parte di S. M.
Pel Presidente delle Finanze
Il Consigliere di Stato effettivo delegato
V. VICENZI.

Parma 16 Ottobre.

SUA MAESTÀ Imp. R. Ap. con Sua Risoluzione del 26 Settembre 1846 ha degnato permettere a Sua Eccellenza il Signor *Barone Andrea Ferrari*, I. R. General Maggiore, di accettare la dignità di Consigliere Intimo Attuale a lui conferita da Sua Maestà l'Augusta nostra Sovrana, e di prevalersene.

INCANTO

Per dare a cottimo i lavori da fare a quel tratto della strada da Fornovo alla Cisa che è nella Sezione di Borgotaro.

Si fa noto che addì 31 del corrente mese di Ottobre, alle ore undici di mattina, nel palazzo della Presidenza delle Finanze in Parma, dinanzi al sottoscritto, coll'intervento del Capo degl'Ingegneri, dell'Ingegnere Ispettore, e dell'Ingegnere della Sezione di Borgotaro, si terrà l'incanto per dar a cottimo i lavori da fare a quel tratto della strada da Fornovo alla Cisa che è nella Sezione predetta, stimati. L. 29,968, 97.

Fig. 7 b) - *Quante pagine di sabato 17/10/1846 -*

che mi seguono. Quando io avrò fatto questo, e tostochè il *ramadan* sarà finito, io mi ritirerò in un luogo ove non susciterò alcun turbamento, nè anche per assalire gl'infedeli, sebbene sia questa la volontà di Dio. Non chiudere adunque l'orecchio alla mia giusta preghiera, poichè se tu ti unisci ai cristiani per farmi la guerra, i tuoi soldati, i tuoi servi, diverranno miei servi e miei soldati, e mi costringerai tu stesso a fare ciò che non vorrei, se così piace a Dio. Pertanto, qualche giorno ancora di rifugio contro il nemico della fede, è tutto ciò che ti domando. „

Pare, aggiunge lo stesso giornale, che *Abd-er-Rhaman* sia rimasto mosso o convinto da questa lettera, in cui la minaccia è mascherata appena sotto un'apparente moderazione. Certo è però che egli si mostrò favorevolissimo alle compre di viveri chieste dall'Emiro, ed ha fatto ritenere a Fez due carovane per aver mancato di fornire ad *Abd-el-Kader* il frumento di cui avevan ricevuto il prezzo; finalmente è certo che gli ha fatto dono di cento cammelli carichi d'orzo e di frumento. (G. M.)

AMERICA.

I giornali di Nuova York, recati dal Britannia, stampano il seguente dispaccio indiritto da lord Aberdeen al ministro degli'affari esteri di Buenos Ayres, per accreditare presso di lui il signor Hood:

„La regina mia sovrana, desiderando sinceramente di rimuovere ogni causa di disaccordo fra il suo governo e il presidente della Confederazione Argentina, e ristabilire le relazioni da ambe le contrade sull'an-

VARIETA.

UN NUOVO PIANETA.

Nel sottoporre ad una profonda disamina la teoria analitica di Urano, il sig. *Leverrier* ha riconosciuto recentemente che le irregolarità considerevoli che scorgonsi dagli astronomi nei movimenti di questo pianeta provenivano dall'azione d'un astro ignoto di cui determinò col calcolo la esatta posizione e il diametro. Tutte le predizioni della teorica si sono verificate, e il nostro sistema solare si è arricchito di un pianeta lontano dal sole 150 milioni di leghe. Il suo volume è 230 volte circa quello della terra.

Ecco un sunto della lettera che il sig. Galle, astronomo di Berlino, scrive al sig. *Leverrier* in data del 25 di settembre su tale proposito:

„Signore, il pianeta di cui avete notata la posizione esiste realmente. Il giorno istesso in cui ricevetti la vostra lettera, trovai una stella di 8.ª grandezza, che non è segnata nell'eccellente carta del dott. *Bremiker*, la quale fa parte della collezione di carte celesti pubblicate dall'accademia reale di Berlino. L'osservazione del dì seguente mi mostrò che quella stella era precisamente il pianeta cercato. Il sig. *Enke* ed io l'abbiamo paragonata coll'ajuto del gran telescopio di *Frauenhofer* a una stella di 9.ª grandezza. „

Gli astronomi sentiranno con piacere che la posizione del nuovo pianeta è precisamente quella che il sig. *Leverrier* le aveva assegnata colla sua teorica, che aveva mandata a Galle, e che si trova registrata nel rendiconto dell'Accademia delle Scienze di Lu-

tico loro tenore amichevole e cordiale, ha ordinato al sig. T. S. Hood, investito alcuni anni sono del consolato generale di S. M. a Montevideo, di partire immediatamente per Buenos Ayres per concertarsi con V. E. e col governo argentino.

„Il sig. Hood è incaricato di trasmettere confidenzialmente a V. E. certe proposte a nome dell'Inghilterra, fondate in gran parte su quelle già comunicate alle stesse due potenze, il 26 di ottobre del 1845, dal governo di Buenos Ayres, onde porre un termine alle difficoltà che esistono nel Rio della Plata. Io spero che simili proposte dettate dal più profondo desiderio di veder terminare uno stato di cose spiacevole a tutte le parti parranno accettarvi al governo di Buenos Ayres.

„Il sig. Hood è anche portatore di proposte analoghe a nome del governo francese, che egli comunicherà parimente all'E. V., stante la profonda cognizione che possiede il sig. Hood di quanto riguarda gl'interessi dei due paesi; io oso sperare che la scelta di questo plenipotenziario per le negoziazioni opportune tornerà gradita al governo di Buenos Ayres. Io prego V. E. di riceverlo graziosamente, e di aver piena fede nelle comunicazioni che egli è incaricato di farle a nome del governo britannico; e porto fiducia che il governo della Confederazione Argentina riconoscerà nel presente passo dei governi della gran Bretagna e della Francia una prova evidente dell'estremo loro desiderio di coltivare una cordiale ed amichevole intelligenza colla Confederazione.

„Ho l'onore, ecc. — (firm.) *ABERDEEN*. „ (G. P.)

nedì primo settembre 1846. Il diametro risultante dalle osservazioni di Berlino è di 3 secondi, come il sig. *Leverrier* aveva preveduto.

Il signor Galle vorrebbe chiamare il nuovo pianeta *Giano*, per considerazioni tolte dall'ipotesi che esso sia ai confini del nostro sistema solare. Il sig. *Leverrier*, a cui spetta evidentemente per diritto il nominare l'astro novello, non accetta il nome troppo significativo di *Giano*; egli dà, del resto, la sua adesione ad ogni altra designazione, quale sarebbe, per esempio, *Nettuno*, che abbia il consenso degli astronomi. (G. P.)

Lotteria per le Scuole d'Asilo Infantili e la Casa di Provvidenza.

La Commissione formatasi per promuovere una Lotteria a beneficio delle Scuole d'Asilo Infantili e della Casa di Provvidenza, nella sua lettera dell'8 Aprile, aveva fissato il giorno 15 del corrente Ottobre come tempo opportuno a formare i premi della Lotteria co'vari regali che si fossero raccolti, a fine di poter poi metterli in esposizione sul cominciar di Novembre: ma avendo saputo che buon numero di cittadini, e specialmente di Signore, desiderano che sia prolungato alquanto il termine sovra indicato, fa noto che la detta operazione si effettuerà verso la metà di Novembre: che quindi l'esposizione verrà anch'essa protratta di un mese; la quale perciò si aprirà sui primi di Dicembre. In quel torno parimente, ossia poco dopo, si potrà far luogo alla emissione de' viglietti.

Si Palveono i Regali, col nome del donatore o senza, nel Palazzo Sanvitale dalle ore 10 alle 2 d'ogni giorno ferialo.

Accuracy of Four Historic Solutions Compared, at the Neptune-Discovery Date

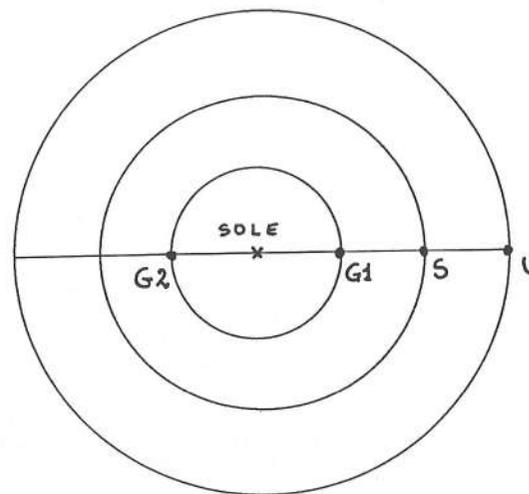
True helio long. of Neptune at D-Day (23.9.46) was $326^{\circ} 57'$

	Adams 1	Adams 2	Leverrier 1	Leverrier 2
Mean Helio Long	$323^{\circ} 34'$	$323^{\circ} 2'$	325°	$318^{\circ} 47'$
Epoch	1st Oct '45	1st Oct '46	1st Jan '47	1st Jan '47
Days to D-day:	357	-8	-100	-100
Distance AU	38.4	37.3	38.4	36.2
Orbit period (Yrs)	237.6	227.4	237.6	217.4
Motion to D-day	$1^{\circ} 28'$	$-0^{\circ} 2'$	$-0^{\circ} 24'$	$-0^{\circ} 27'$
MHL at D-day	$325^{\circ} 2'$	$322^{\circ} 59'$	$324^{\circ} 35'$	$318^{\circ} 19'$
Perihelion	$315^{\circ} 55'$	$299^{\circ} 11'$		$284^{\circ} 45'$
Anomaly	$9^{\circ} 7'$	$23^{\circ} 48'$		$33^{\circ} 34'$
Eccentricity	0.161	0.121	0	0.108
Eqn. of Centre	$3^{\circ} 38'$	$6^{\circ} 27'$	0	$7^{\circ} 39'$
True Helio Long.	$328^{\circ} 41'$	$329^{\circ} 27'$	$324^{\circ} 35'$	$325^{\circ} 58'$
Error	$1^{\circ} 44'$	$2^{\circ} 30'$	$-2^{\circ} 21'$	$-0^{\circ} 58'$
For comparison:				
Herschel (1852)	$328^{\circ} 42'$	$329^{\circ} 25'$		$326^{\circ} 0'$

Leverrier's accuracy increased several-fold, between his first and second prediction, whereas Adams decreased his between his Hyp I (supposedly, October 1845) and Hyp. II (Sept 2nd 1846). The Table has a line giving 'error' in degrees and minutes.

Risposta al quesito di Pietro Fontanesi

Quesito: se Nettuno ha perturbato in modo tanto evidente il moto di Urano, come mai non è stata riscontrata una perturbazione simile da parte di Urano sul moto di Saturno?



$$R_G = 5,2 \text{ UA}, \quad M_G = 317,8 M_T$$

$$R_S = 9,5 \text{ UA}, \quad M_S = 95,2 M_T$$

$$R_U = 19,2 \text{ UA}, \quad M_U = 17,1 M_T$$

$$SU = 9,7 \text{ UA}$$

$$SG_1 = 4,3 \text{ UA (congiunzione Saturno-Giove)}$$

$$SG_2 = 14,7 \text{ UA (opposizione Saturno-Giove)}$$

$$F_g = G \frac{M_1 M_2}{(d_{12})^2}$$

Confronto fra le forze perturbative di Giove e Urano sul moto di Saturno:

$$\frac{F_{SG}}{F_{SU}} = \frac{G M_S M_G / (d_{SG})^2}{G M_S M_U / (d_{SU})^2} = \frac{M_G (d_{SU})^2}{M_U (d_{SG})^2}$$

$$\frac{F_{SG1}}{F_{SU}} = \frac{M_G (d_{SU})^2}{M_U (d_{SG1})^2} = \frac{317,8 \cdot (9,7)^2}{17,1 \cdot (4,3)^2} = 94,6 \approx 95$$

$$\frac{F_{SG2}}{F_{SU}} = \frac{M_G (d_{SU})^2}{M_U (d_{SG2})^2} = \frac{317,8 \cdot (9,7)^2}{17,1 \cdot (14,7)^2} = 8,1 \approx 8$$

E' evidente che la perturbazione del moto di Saturno dovuta a Giove è sempre molto più grande di quella dovuta a Urano e, probabilmente, ne maschera l'effetto.

Agazzi

**LA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO
E DINTORNI**

(Cenni di Cosmologia)

prof. MAURIZIO FRANCESIO

26-2-04

La radiazione cosmica di fondo e dintorni

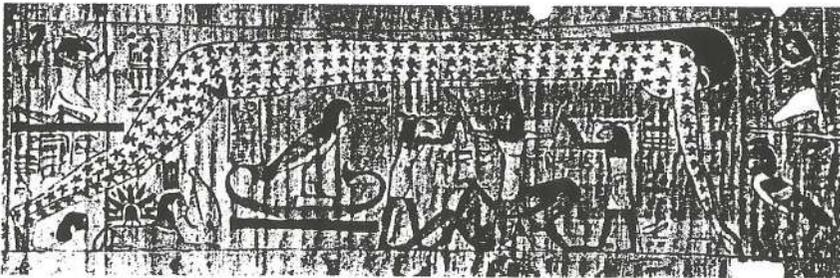
1. Com'è fatto il mondo?

Il quesito è vecchio quanto l'uomo e ogni civiltà ha elaborato il proprio modello:
con alcune raffigurazioni più o meno note.

L' Universo secondo gli egizi

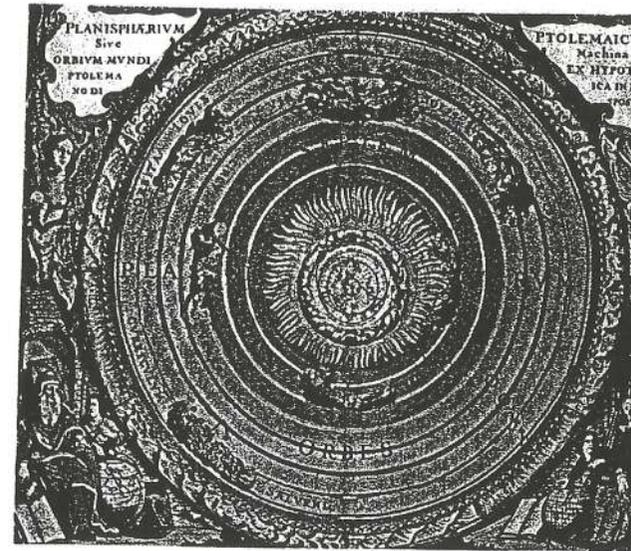


Nut, dea del Cielo, toccando la Terra con le mani e coi piedi, fa da volta alla Barca Solare del dio Ka (il Sole) che transita ogni giorno sotto di lei. Steso al suolo è Geb, dio della Terra.



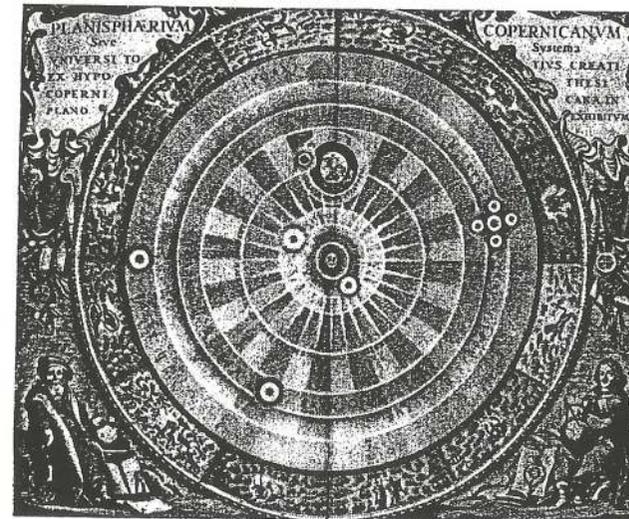
Shu, dio dell'Aria, separa Nut, dea del Cielo ricoperta di stelle, da Geb, dio della Terra prostrato al suolo.

L' Universo geocentrico di Tolomeo

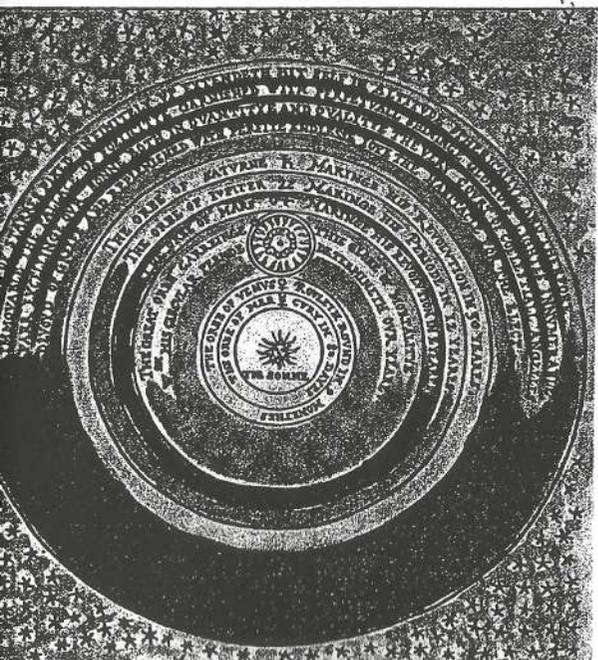
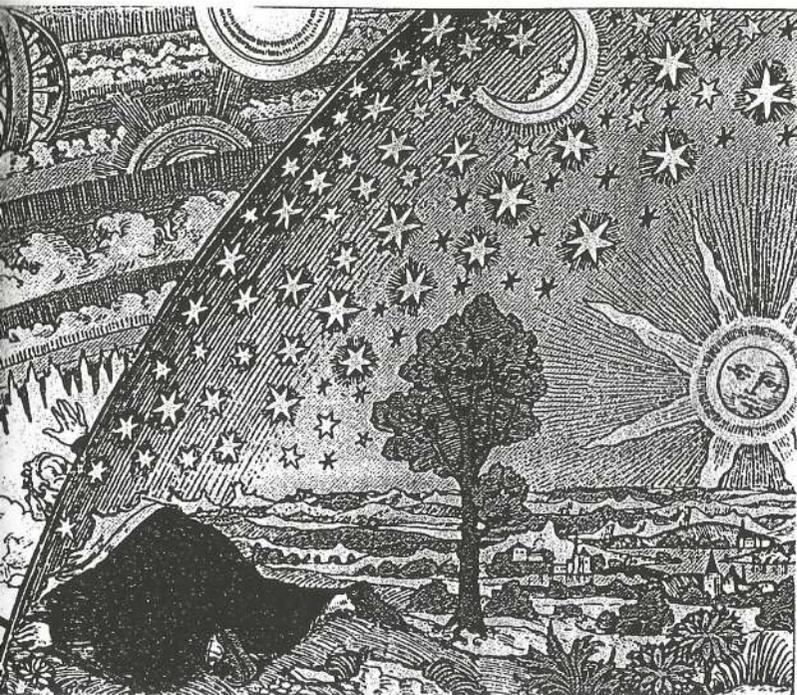


Rappresentazione delle orbite della Luna, del Sole e dei pianeti all'interno della fascia zodiacale, in una stampa del XVII secolo

L' Universo eliocentrico di Copernico



Rappresentazione delle orbite della Luna e dei pianeti all'interno della fascia zodiacale in una tavola di Andrea Cellario (1661). Da notare Giove accompagnato dai quattro satelliti medicei.



(sopra)

L'uomo, pellegrino nel cosmo, si affaccia oltre la sfera delle stelle fisse.

(da un codice svizzero del XVI secolo)

(a sinistra)

Una delle prime rappresentazioni di un Universo infinito. Il Sistema Solare è quello copernicano, ma la sfera delle stelle fisse è sparita e al suo posto compare una distesa di stelle che si estende fino ai confini della tavola.

(T. Digges, Londra 1576)

L 'Universo di una vecchietta (da Stephen Hawking, "Dal Big Bang ai buchi neri")

Un famoso scienziato (secondo alcuni fu Bertrand Russell) tenne una volta una conferenza pubblica su un argomento di astronomia. Egli parlò di come la Terra orbiti attorno al Sole e di come il Sole, a sua volta, compia un'ampia rivoluzione attorno al centro di un immenso aggregato di stelle noto come la nostra galassia. Al termine della conferenza, una piccola vecchia signora in fondo alla sala si alzò in piedi e disse: «Quel che lei ci ha raccontato sono tutte frottole. Il mondo, in realtà, è un disco piatto che poggia sul dorso di una gigantesca tartaruga». Lo scienziato si lasciò sfuggire un sorriso di superiorità prima di rispondere: «E su che cosa poggia la tartaruga?». «Lei è molto intelligente, giovanotto, davvero molto», disse la vecchia signora. «Ma ogni tartaruga poggia su un'altra tartaruga!»

La maggior parte delle persone troverebbe piuttosto ridicola quest'immagine del nostro universo che poggia su una torre infinita di tartarughe, ma perché mai noi dovremmo pensare di saperne di più? Che cosa sappiamo sull'universo, e come lo sappiamo? Da dove è venuto l'universo, e dove sta andando? L'universo ebbe un inizio e, in tal caso, che cosa c'era prima? Qual è la natura del tempo? Il tempo avrà mai fine? Progressi recenti in fisica, resi possibili in parte da fantastiche nuove tecnologie, suggeriscono risposte ad alcune di queste domande di età venerabile. Un giorno queste risposte potrebbero sembrarci altrettanto ovvie del fatto che la Terra orbita attorno al Sole, o forse altrettanto ridicole di una torre di tartarughe. Solo il tempo (qualunque cosa esso sia) ce lo dirà.-

Le conoscenze sull' Universo cento anni fa

Agli inizi del '900 lo stato della ricerca in campo astronomico si può riassumere brevemente nei seguenti punti.

- Il modello copernicano del sistema solare era ormai universalmente accettato, ma non era ancora stato scoperto il pianeta Plutone.
- Le stelle non erano più immobili sulla volta celeste, perché si era trovato che erano dotate di moto proprio. Inoltre, l'analisi spettroscopica della luce emessa, sempre più diffusa per il crescente utilizzo della fotografia, aveva evidenziato che le stelle possono avere caratteristiche differenti le une dalle altre ed era stata proposta una loro classificazione per tipi diversi. Tuttavia rimaneva inspiegabile l'origine della loro energia interna e non esistevano modelli teorici della loro evoluzione.

La Via Lattea costituiva l'agglomerato di stelle a cui apparteneva anche il nostro Sole ed era già stata avanzata l'ipotesi di una sua struttura a spirale, ma non era ancora stato accertato il suo moto di rotazione.

Le osservazioni si erano anche spinte oltre la Via Lattea, riconoscendo l'esistenza di molte nebulose, ma non era ancora stata chiarita la loro natura e si discuteva molto se fossero strutture gassose o agglomerati stellari (galassie).

E' solo negli ultimi cento anni che agli studi sull' Universo viene impressa una forte accelerazione, sia dal punto di vista teorico sia dal punto di vista sperimentale, e la cosmologia acquista le caratteristiche proprie di una scienza.

3. Prima metà del secolo XX

Nei primi decenni del secolo scorso la Fisica e l'Astronomia hanno ottenuto grandissimi risultati sia nell'ambito teorico, sia negli esperimenti di laboratorio e nelle osservazioni. Nella Fisica si sviluppano

- la Teoria della Relatività (Einstein, 1905)
- la Meccanica Quantistica (1900-1930)
- la Teoria della Gravitazione (Einstein, 1915)
- la Fisica Nucleare (1910-1945)

e in Astronomia si verificano alcune scoperte fondamentali che occorre esaminare un po' in dettaglio.

- Nel 1912 Henrietta Leavitt trova la relazione periodo-luminosità delle variabili cefeidi e apre così la strada alla misurazione di grandi distanze stellari, ben oltre la nostra galassia. La spiegazione di questo fatto è semplice: le cefeidi sono stelle la

cui potenza luminosa varia regolarmente nel tempo tra un minimo e un massimo e la Leavitt dimostrò che è possibile stabilirne il valore (medio), misurando il periodo delle oscillazioni. Dal confronto tra la luminosità della stella e l'intensità luminosa dedotta dalle osservazioni, si ricava la distanza dell'astro.

Per questo motivo le cefeidi sono anche chiamate 'candele campione'.

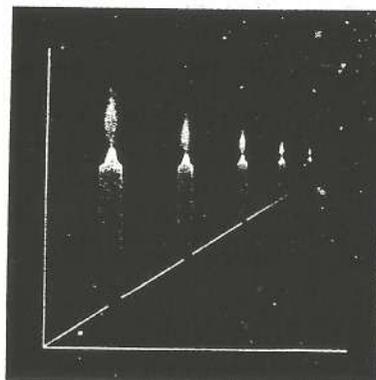


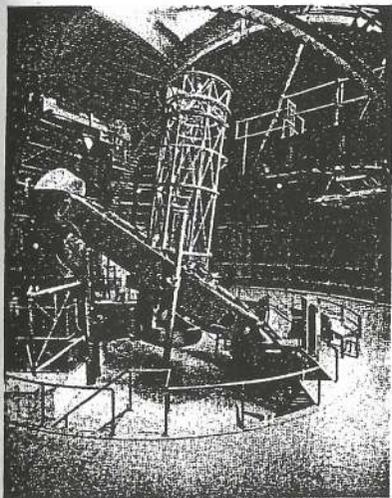
Fig. 1. One can tell how far away each candle is both by the brightness of its flame and from its apparent size. A "standard candle" appears dimmer at greater distances.

- Nel 1923 Edwin Hubble trova una variabile cefeide nella nebulosa di Andromeda e ne misura la distanza. Successivamente dimostra che la nebulosa è una galassia e lo stesso farà per molti altri oggetti celesti.

- Nel 1929 lo stesso Hubble scopre la relazione tra velocità di recessione e distanza per le galassie esterne, favorendo così la nascita della teoria dell'espansione dell' Universo e l'avvio di una cosmologia basata sui fatti.

Già una decina di anni prima, provando ad applicare la propria teoria della gravitazione all'intero Universo, Einstein aveva trovato, come risultato dei suoi calcoli, che l' Universo si modificava con il passare del tempo, espandendosi progressivamente.

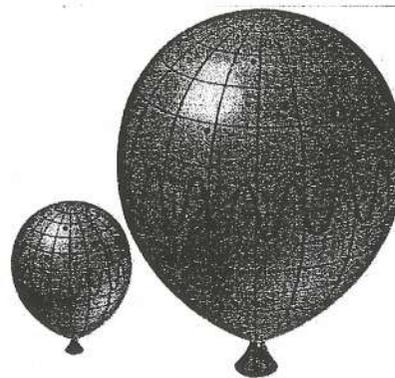
Poiché egli riteneva, secondo l'opinione corrente di allora, che L' Universo fosse statico, credette di essersi sbagliato nel formulare la teoria e inserì nelle equazioni un termine aggiuntivo, noto come *costante cosmologica* e corrispondente a una specie di antigravità che permea tutto lo spazio, allo scopo di ottenere dai calcoli una struttura dell' Universo che fosse in equilibrio stazionario, senza mutazioni nel tempo.



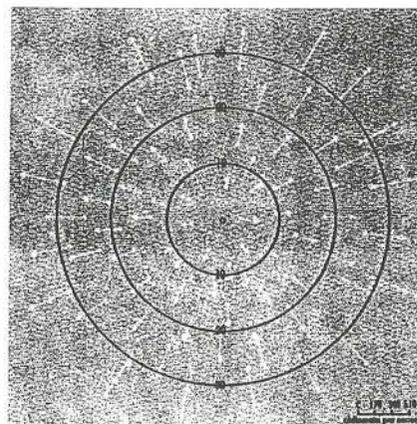
Quando nel 1929 Hubble dimostrò, con le sue osservazioni astronomiche effettuate con il telescopio Hooker da 2,5 m di Monte Wilson, all'epoca il più grande del mondo, che le galassie si allontanano con una velocità proporzionale alla loro distanza ($v = H \cdot d$) e quindi l' Universo non poteva essere statico, ma si andava continuamente espandendo, Einstein dichiarò che quella sua correzione, effettuata inventando una costante (cosmologica) ad hoc da inserire nelle sue equazioni, "era stato il più grande abbaglio della sua vita".

Cerchiamo di capire bene il significato della legge di Hubble, perché comporti l'espansione dell' Universo, quali conseguenze si possano dedurre da essa.

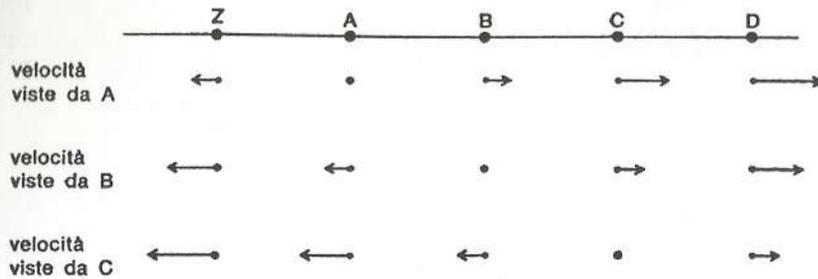
Considerazioni di principio e osservazioni sperimentali inducono a ritenere che l' Universo abbia le stesse proprietà fisiche in ogni punto e in ogni direzione (Universo omogeneo e isotropo). Si tratta del principio cosmologico secondo il quale ciò che si osserva da qui deve essere uguale a quello che si osserva da un'altra parte (in media e su grande scala). Le stesse leggi fisiche che si sperimentano nei laboratori terrestri devono valere anche sui corpi celesti più remoti. Tale principio è necessario per potere impostare una teoria del cosmo intero, ma è anche in accordo con molte osservazioni e, in modo particolare, con la legge di Hubble.



Per semplificare le cose immaginiamo lo spazio con due sole dimensioni, invece delle solite tre. Pensiamo a una superficie sferica sulla quale le galassie siano minuscoli dischetti piatti senza spessore e facciamo dilatare la superficie come quella di un palloncino che si gonfi. Le galassie dischetto si allontaneranno le une dalle altre, senza che si modifichi la loro distribuzione, e un osservatore su una galassia vedrà tutte le altre allontanarsi da lui e con velocità tanto maggiore quanto più sono lontane. Gli sembrerà di essere al centro di un moto generale di fuga, mentre in realtà nessun punto si muove, solo la superficie sferica cresce di dimensioni, si espande. La distribuzione delle galassie non cambierà forma perché, come si può verificare facilmente, la loro velocità di allontanamento



da un osservatore qualsiasi è direttamente proporzionale alla loro distanza. Questo fatto è illustrato nella figura seguente, dove per semplicità sono stati considerati moti in una sola direzione.



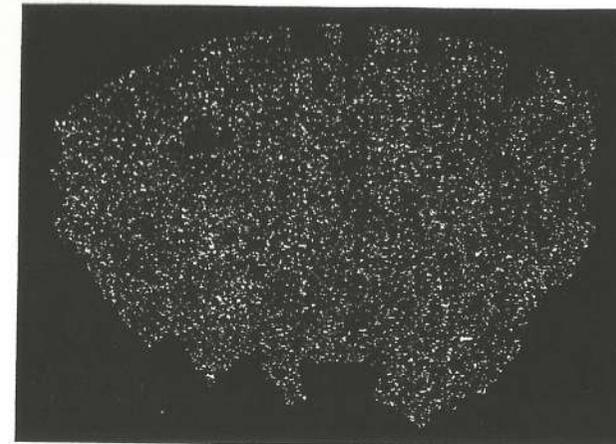
Z, A, B, C, ... sono galassie, uniformemente intervallate, in moto relativo l'una rispetto all'altra. Le velocità sono rappresentate dalla lunghezza e dalla direzione delle frecce.

Il principio cosmologico richiede che la velocità di C vista da B sia uguale a quella di B vista da A; la somma di queste due velocità dà la velocità di C vista da A, che risulta doppia delle precedenti. Procedendo allo stesso modo per tutte le altre galassie si può completare il quadro e si nota subito che le velocità sono distribuite in modo da obbedire alla legge di Hubble.

Dunque il moto di allontanamento delle galassie costituisce una conferma sperimentale dell'espansione dell' Universo prevista dalla teoria gravitazionale einsteiniana. Non solo, ma il fatto che l'allontanamento visto da noi debba presentare le medesime caratteristiche quando venga osservato da qualunque altro punto o galassia, indica che l' Universo non ha un centro.

Siamo di fronte a una rivoluzione concettuale come quella dei tempi di Copernico: il centro del mondo non sta più nel Sole e nemmeno nella nostra galassia, la Via Lattea; semplicemente non esiste. Inoltre, l' Universo non è statico, ma si espande ed evolve nel tempo.

E' tuttavia necessario precisare che le considerazioni precedenti non valgono tanto su piccola scala, dove la materia è distribuita in modo assai irregolare (le stelle sono raggruppate in galassie e queste, a loro volta, sono raggruppate in



ammassi e superammassi), quanto su grande scala, dove la materia si può pensare uniformemente distribuita. Ciò è confermato dall'immagine accanto di una parte del cielo, ampia circa 30°, che mostra un milione di galassie fino a una distanza di circa due miliardi di anni luce.

Un disegno dell' Universo in espansione, sempre dotato di una dimensione in meno per aiutare la nostra immaginazione, è quello della figura a destra, dove lo spazio è rappresentato dalla solita superficie sferica, mentre la dimensione temporale è legata al raggio della sfera: col passare del tempo il raggio aumenta, la superficie si espande.

Durante l'espansione il nostro spazio a due dimensioni mantiene la forma sferica e quindi ha in tutti i punti la stessa curvatura, che si ridurrà col passare del tempo perché aumenta il raggio.

Si può anche ragionare alla rovescia: andando indietro nel tempo il raggio diminuisce, la superficie si contrae, le galassie si avvicinano e l' Universo si presenta com'era nel passato, tanto più piccolo quanto più giovane rispetto all'epoca attuale. Ancora tutti i suoi punti sono equivalenti, non c'è un centro e tutta la materia è addensata in uno spazio più piccolo. Quindi dovrebbe esserci stato un



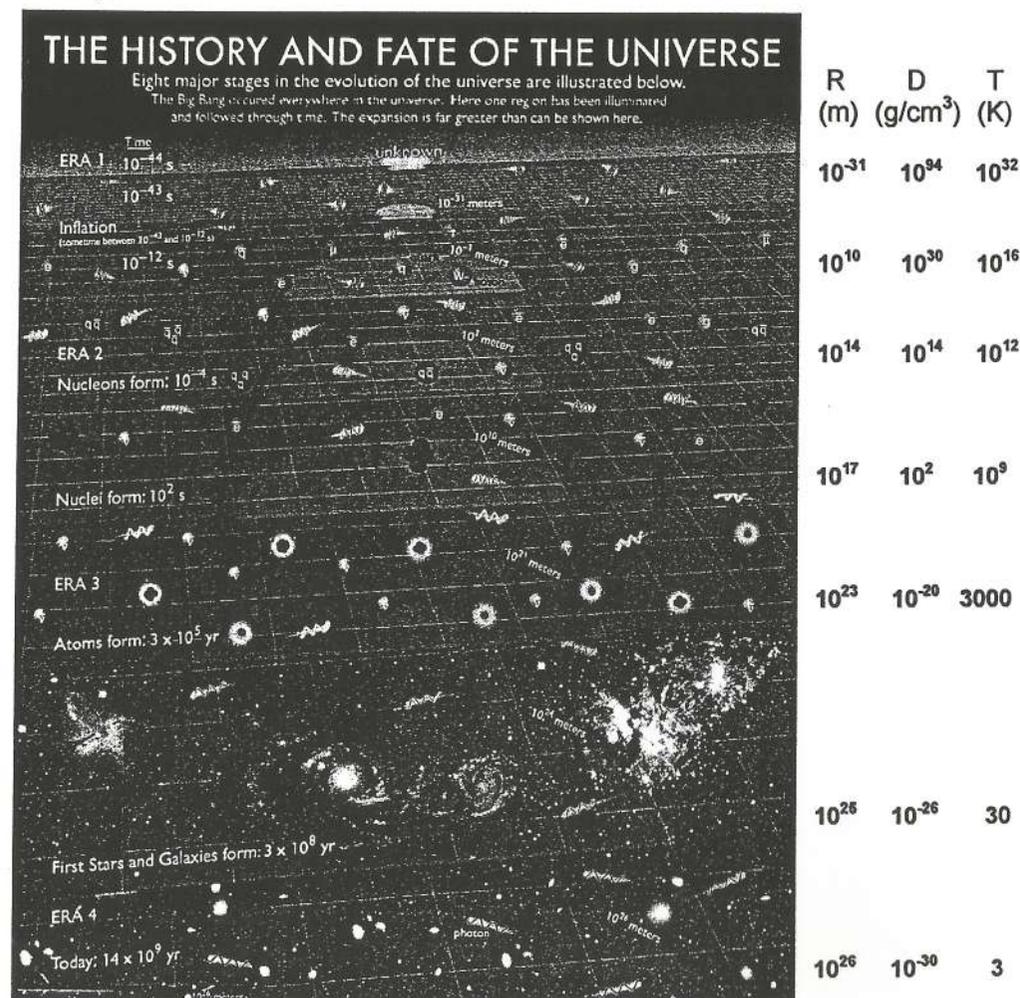
momento in cui il raggio era praticamente nullo, tutto l' Universo era concentrato in un punto, in condizioni estreme di densità e di temperatura. Tale situazione limite, estrapolata arretrando nel tempo, rappresenterebbe, nel quadro che andiamo delineando, l'inizio dell' Universo.

Il primo a suggerire l'idea che l' Universo abbia subito un'evoluzione, a partire da una sorta di esplosione iniziale, per poi espandersi e raffreddarsi progressivamente, è stato il fisico russo George Gamow nel 1946. Negli anni successivi, assieme ai fisici Ralph Alpher e Robert Herman, mise a punto una teoria, nota sotto il nome di teoria del Big Bang, basata sulla gravitazione einsteiniana e sulle più recenti conoscenze di astronomia, di fisica nucleare e di fisica delle alte energie.

La teoria, più volte aggiornata e corretta, descrive l'evoluzione dell' Universo secondo una sequenza di periodi, di varia durata, in cui si sono verificati processi fondamentali per la formazione del mondo. La figura seguente illustra, in modo assai schematico, la successione di tali periodi a partire da un momento vicinissimo all'inizio (10^{-43} s dopo il Big Bang), perché prima è impossibile sapere qualcosa dato che non si conosce la fisica di una situazione tanto eccezionale, fino all'epoca attuale.

1^ periodo (fino a 10^{-12} s): in un tempo così breve l'Universo è già diventato una sfera di raggio $R \sim 10^{10}$ m $\approx 10 R_{\odot}$. Densità e temperatura sono spaventose: $D \sim 10^{30}$ g/cm³ e $T \sim 10^{16}$ K. In queste condizioni di altissima energia la radiazione ha una densità molto superiore alla materia, che è presente solo sotto forma di particelle subnucleari come quark e antiquark. Avvengono reazioni in cui la radiazione altamente energetica si materializza in particelle e antiparticelle e queste si annichilano convertendosi in energia. Si hanno cioè reazioni che si verificano in entrambi i sensi, in uno stato di equilibrio termico fra materia e radiazione uniformemente distribuito.

2^ periodo (10^{-12} s < t < 10^{-4} s): l' Universo si espande fino ad avere un raggio $R \sim 10^{14}$ m e diventare cento volte più grande del nostro sistema solare, allora inesistente. La densità D del plasma scende a $\sim 10^{14}$ g/cm³ e, pur essendosi ridotta di milioni di miliardi di volte, è ancora elevata come quella presente all'interno delle stelle di neutroni. Anche la temperatura T è diminuita, ma è $\sim 10^{12}$ K. I quark, diventati meno energetici, riescono a unirsi per formare i nucleoni (protoni e neutroni) e la radiazione prevale sempre sulla materia, con la quale continua a interagire in condizioni di equilibrio termico.



Primi istanti

- D e T hanno valori altissimi
- U è costituito da un plasma di materia e radiazione sotto forma di particelle (quark, antiquark, elettroni, anti-elettroni, fotoni, ecc.)
- i fotoni e le altre particelle sono in continua interazione con reazioni di materia-radiazione e annichilazione
- condizioni di equilibrio termico uniformemente distribuito

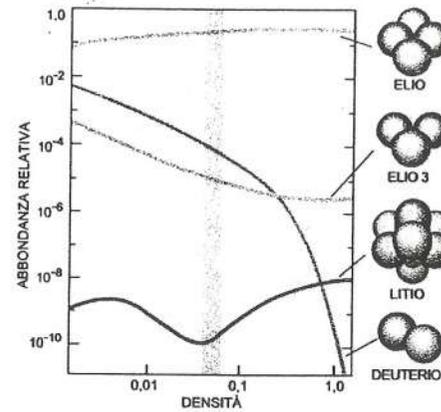
U si espande e si raffredda

- diminuendo T , cambiano le reazioni possibili e le particelle materiali si legano fra loro in tappe successive
 - dai quark ai nucleoni (protoni, neutroni)
 - dai nucleoni ai nuclei leggeri (deuterio, elio, ecc.)
 - dai nuclei leggeri agli atomi leggeri (idrogeno, elio, ecc.)

Disaccoppiamento

- radiazione libera
- materia che andrà ad aggregarsi in stelle, galassie, ecc.

3^a periodo (10^{-4} s $< t < 10^2$ s): l'Universo è diventato mille volte più grande ed $R \sim 10^{17}$ m ≈ 10 al. La densità ha continuato a diminuire e ora $D \sim 10^2$ g/cm³, pari a cento volte la densità dell'acqua; lo stesso è avvenuto alla temperatura che è scesa a $\sim 10^9$ K. Le condizioni del plasma sono tali da consentire le reazioni di fusione dei protoni e dei neutroni per formare i nuclei atomici degli elementi leggeri come deuterio, trizio, elio e litio. Le abbondanze relative di questi elementi misurate di recente ($\sim 75\%$ H, $\sim 25\%$ He) concordano con quelle calcolate in base alla teoria.



La densità dei neutroni e dei protoni nell'Universo ha determinato le abbondanze di alcuni elementi. La regione ombreggiata è in accordo con le osservazioni.

Gli elementi più pesanti, invece, verranno prodotti più tardi nelle reazioni termonucleari presenti nei nuclei centrali delle stelle.

Durante questo periodo la radiazione e la materia continuano a interagire strettamente mantenendo in equilibrio termico ogni parte del plasma, per cui è difficile che una qualche regione possa risultare molto più calda o molto più fredda delle altre.

4^a periodo (10^2 s $< t < 3 \cdot 10^5$ anni): l'Universo si dilata di un milione di volte, $R \sim 10^{23}$ m $\approx 10^7$ al, la densità si abbassa moltissimo, $D \sim 10^{-20}$ g/cm³, e la temperatura scende a 3000 K. I nuclei degli elementi leggeri (ioni) possono legarsi agli elettroni liberi per formare atomi neutri, soprattutto di idrogeno e di elio, e la materia, non più ionizzata, cessa di interagire con la radiazione (disaccoppiamento). La formazione di atomi neutri permette a materia e

radiazione di evolvere indipendentemente: la prima, sotto l'azione della gravità, si addensa poco a poco a formare nubi di gas e la sua densità diventa prevalente, la seconda può ora propagarsi liberamente nello spazio e quindi l' Universo, perduta l'opacità caratteristica del plasma, diventa trasparente.

5^a periodo ($3 \cdot 10^5$ anni $< t < 3 \cdot 10^8$ anni): l'espansione porta l' Universo fino a un raggio $R \sim 10^9$ al, $D \sim 10^{-26}$ g/cm³, $T \approx 30$ K. Piccole differenze di densità nella materia, non più ostacolate dalla pressione della radiazione come nelle prime fasi di vita dell' Universo, vanno accentuandosi a causa dell'attrazione gravitazionale che richiama altra materia. Si formano le prime stelle e, col passare del tempo, crescono strutture sempre più grandi, dalle galassie agli ammassi, ai superammassi. La densità della materia prevale su quella della radiazione che, sempre più tenue, continua a propagarsi liberamente in tutte le direzioni nello spazio dilatato dall'espansione.

6^a periodo ($3 \cdot 10^8$ anni $< t < 14 \cdot 10^9$ anni): l' Universo perviene alle dimensioni attuali con $R \sim 10^{10}$ al, $D \sim 10^{-30}$ g/cm³, $T \approx 3$ K. Il valore di R è in accordo con le distanze ricavate da osservazioni degli oggetti più lontani oggi conosciuti, mentre quello della densità è soltanto indicativo. Sul valore della densità attuale nell' Universo occorrerà ritornare perché, secondo la gravitazione einsteiniana, è il valore di questa grandezza che determina la curvatura dello spazio-tempo e condiziona l'evoluzione futura e il destino ultimo dell' Universo. Quanto al valore della temperatura, esso è stato determinato con grande accuratezza nell'ultimo decennio, come vedremo meglio più avanti.

Negli anni '50 del secolo scorso i dati osservativi a favore della teoria del Big Bang erano pochi e poco sicuri, quindi non tutti gli studiosi erano disposti ad accettarla. Una teoria alternativa, detta dello Stato Stazionario, era stata proposta da Fred Hoyle, Hermann Bondi e Thomas Gold, chiamata così perché affermava che:

- l' Universo è sempre esistito ed è in perenne espansione;
- su grande scala esso mantiene sempre lo stesso aspetto, nonostante l'espansione.
- Il fatto che le galassie si allontanino a grande velocità non implica una dispersione crescente della materia, perché nuova materia viene creata di continuo in misura esattamente sufficiente a sostituire quella che sparisce dall' Universo visibile. Questa nuova materia formerà col tempo stelle e galassie, per cui l' Universo avrà sempre lo stesso aspetto in ogni momento e per ogni osservatore.
- Ne deriva che le galassie di più recente formazione devono essere simili a quelle molto antiche e quindi, essendo la velocità della luce finita, l'aspetto delle galassie più lontane non deve differire da quello delle galassie più vicine.
- Non è prevista l'esistenza di una radiazione che, propagandosi liberamente in tutte le direzioni, pervada lo spazio intergalattico.

Nello specchio sono messi a confronto gli aspetti principali delle due teorie. Per diversi anni esse rivaleggiarono, contendendosi il consenso degli astronomi di tutto il mondo, fino a quando nel 1964, quasi per caso, venne scoperta la radiazione cosmica di fondo a microonde.

Due teorie cosmologiche e le loro previsioni

	TEMPERATURA DELLO SPAZIO	ETÀ DELL'UNIVERSO	CREAZIONE DELLA MATERIA	FORMAZIONE DEGLI ELEMENTI
BIG BANG	Inizialmente molto elevata; oggi pochi gradi al di sopra dello zero assoluto	Due miliardi di anni (stima del 1950); 10-20 miliardi di anni (stima attuale)	Avvenuta in una sola volta	Avvenuta subito dopo il big bang
STATO STAZIONARIO	Zero (nessuna radiazione)	Infinita	Avviene di continuo	Avviene di continuo nelle stelle

$10^4 / \text{km}^3 \cdot \text{anno}$

4. La scoperta della radiazione cosmica di fondo

Due ricercatori americani dei Laboratori Bell nel New Jersey, Arno Penzias e Robert Wilson, nei primi anni '60 avevano l'incarico di perfezionare le prime

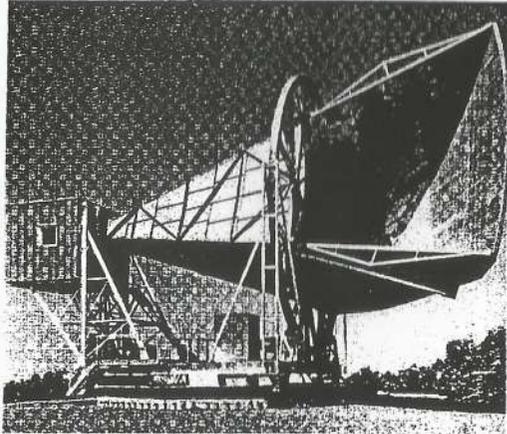


trasmissioni radio intercontinentali via satellite, per comunicare la maggior quantità di informazioni alle frequenze delle microonde.

Dovevano seguire uno dei primi satelliti artificiali, Echo I, con una sensibilissima antenna a tromba in grado di ricevere i deboli segnali riflessi dal satellite, ma durante la sua messa a punto trovarono un eccesso di rumore che non riuscivano a eliminare. Il disturbo era captato da ogni direzione, in qualsiasi momento e in qualunque stagione.

Circola un aneddoto, secondo il quale Penzias e Wilson, per cercare di eliminare il disturbo, avrebbero smontato l'antenna trovando al suo interno un nido di piccioni che avevano sporcato dappertutto. Dopo avere ripulito per bene ogni parte e rimontato

lo strumento, avrebbero però riscontrato che non era cambiato nulla e il segnale persisteva. Approfondendo le ricerche verificarono che il segnale non proveniva da emittenti terrestri, ma giungeva all'antenna direttamente dal cosmo.



Contemporaneamente, poco lontano dal luogo dove operavano Penzias e Wilson, all'Università di Princeton, il fisico Robert Dicke guidava un gruppo di ricerca nella progettazione di un'attrezzatura in grado di rivelare il fondo di radiazione elettromagnetica che, secondo la teoria del Big Bang, avrebbe dovuto permeare tutto lo spazio cosmico fin dal momento in cui si era disaccoppiata dalla materia.

Contattato da Penzias, che volle informarlo del persistente segnale di disturbo proveniente dal cosmo e captato dalla sensibile antenna a tromba, Dicke si rese ben presto conto dell'eccezionale scoperta fatta dai due ricercatori dei Bell Laboratories: essi avevano rivelato per primi la radiazione cosmica di fondo a microonde (CMBR).

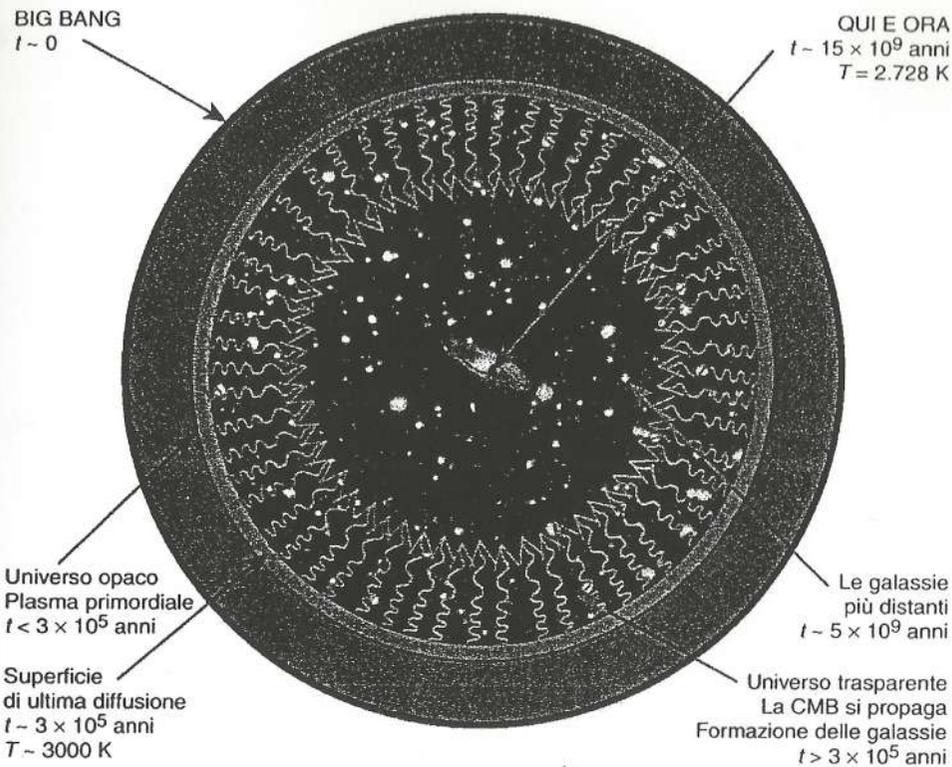
Successivamente lo stesso Dicke poté confermare la scoperta utilizzando l'apparecchiatura messa a punto dal suo gruppo.

Penzias e Wilson, per la grande importanza scientifica del loro lavoro, ricevettero il Premio Nobel della Fisica nel 1978.

5. Le caratteristiche della radiazione di fondo

La scoperta della CMBR costituì un'importante conferma della teoria del Big Bang, mise in crisi la teoria dello Stato Stazionario come riconobbero gli stessi suoi ideatori, avviò una serie di studi e di ricerche che dura tuttora.

Si rendeva necessario, infatti, valutare tutti gli aspetti della CMBR, dato che essa rappresentava ciò che resta oggi della radiazione primordiale emessa in un'epoca in cui l'Universo era ancora molto giovane, denso e caldo. Si riteneva che essa dovesse recare i segni dello stato dell'Universo in quel periodo e dei processi verificatisi al momento della separazione dalla materia, quando la radiazione venne diffusa per l'ultima volta. La figura seguente aiuta a farsi un'idea del significato di questo discorso.

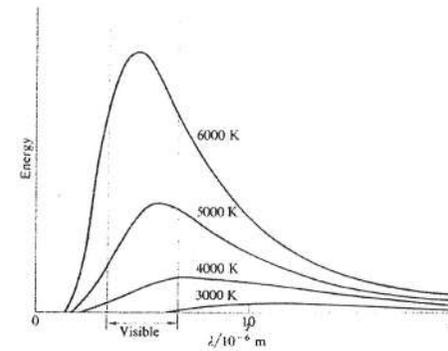


In questo diagramma, andando dal centro verso l'esterno troviamo oggetti via via più lontani da noi sia nello spazio che nel tempo. Il tempo t è misurato a partire dal big bang, circa 15 miliardi di anni fa. I fotoni del fondo cosmico di microonde (CMB) sono stati diffusi per l'ultima volta quando l'età dell'universo era circa 300 mila anni. Da allora hanno viaggiato liberamente portandoci un'immagine dell'universo primordiale.

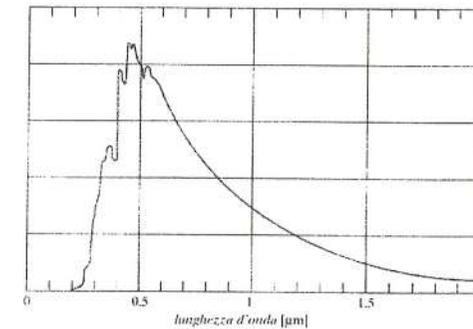
La prima analisi che si è cercato di fare è stata quella relativa alla distribuzione dell'intensità alle varie frequenze. Infatti Penzias e Wilson avevano individuato la CMBR solo su una determinata frequenza radio di circa $4 \cdot 10^9$ Hz corrispondente a una lunghezza d'onda di 7 cm, ma era importante stabilire quale fosse l'intensità del segnale su frequenze sia più elevate, sia più basse.

Secondo la teoria del Big Bang la distribuzione complessiva avrebbe dovuto avere le caratteristiche tipiche della *radiazione di corpo nero*, una espressione tecnica che caratterizza l'emissione di energia raggiante da parte di un corpo in

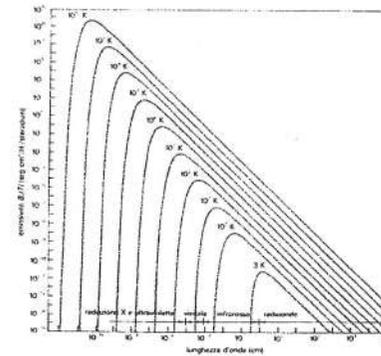
equilibrio termico a una determinata temperatura: in tale equilibrio avrebbe dovuto trovarsi, sempre secondo la teoria, il plasma primordiale. Le figure riportate qui di seguito riportano gli andamenti delle intensità della radiazione di corpo nero a varie temperature e in situazioni diverse, così come sono descritti in fisica (curve planckiane).



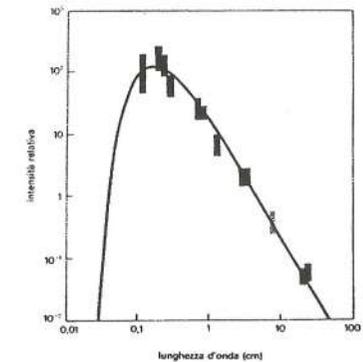
curve planckiane (scale lineari; diminuendo T , il massimo si riduce e si sposta a destra)



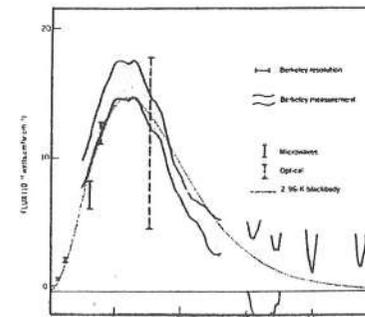
distribuzione intensità radiazione solare



curve planckiane (scale logaritmiche; al diminuire di T , il massimo si sposta a destra)



confronto fra dati e teoria a 3 K (azzurro il dato di Penzias e Wilson)



La linea curva rappresenta una planckiana a 2,96 K, mentre le zone arancione corrispondono a dati riportati con la loro incertezza. Le misurazioni sono state effettuate alla fine degli anni '70, utilizzando palloni sonda recanti a bordo apparecchiature speciali, mantenute alla temperatura di 0,3 K mediante elio liquido.

Le ultime due figure si riferiscono alla CMBR e mostrano come vi sia accordo tra le misure e le curve teoriche nell'ipotesi di una distribuzione di corpo nero alla temperatura di circa 3 K, tuttavia mettono anche in evidenza l'imprecisione e l'incertezza che ancora sussistevano quindici anni dopo la scoperta. La ragione è essenzialmente dovuta alle difficoltà che s'incontrano quando si deve misurare un segnale radio tanto debole. D'altro canto, accertare effettive deviazioni rispetto alla curva di corpo nero avrebbe significato mettere in discussione l'ipotesi di un plasma primordiale in equilibrio termico e quindi creare grosse difficoltà alla teoria del Big Bang.

Un altro aspetto caratteristico della CMBR era l'invariabilità del segnale qualunque fosse la direzione secondo la quale veniva captato. Come si dice con linguaggio tecnico, la radiazione di fondo risultava isotropa.

Questo fatto apriva un interrogativo molto serio: se, come è stato detto, la CMBR si è propagata liberamente nello spazio fin da quando ha subito l'ultima diffusione, 300 000 anni dopo il Big Bang, doveva essere isotropa anche al momento dell'emissione e, dato che era in equilibrio termico con la materia, questa doveva essere distribuita in modo omogeneo ovunque. Come spiegare, allora, il successivo addensarsi della materia e raccogliersi in corpi diversi, separati da grandi spazi vuoti, dando origine alle stelle, alle galassie e ai loro ammassi? Non poteva darsi che nella distribuzione della CMBR attorno a noi fossero presenti delle piccole anisotropie d'intensità che gli strumenti non erano riusciti a rivelare?

Per rispondere a tali interrogativi un gruppo di ricercatori americani progettò un esperimento adatto a esplorare la CMBR con apparecchiature speciali, installate a bordo di un satellite artificiale.

6. Il progetto COBE (Cosmic Background Explorer)

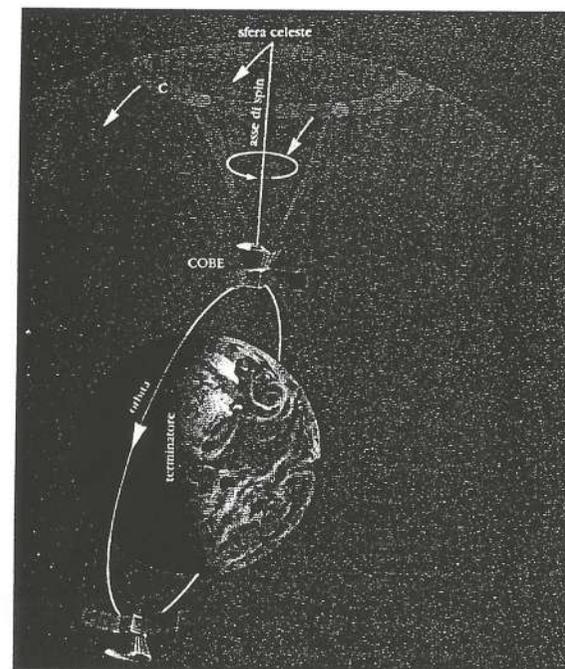
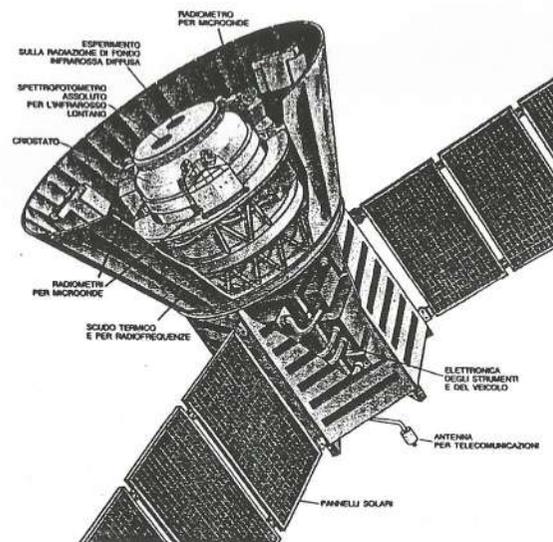
Il progetto, realizzato presso il Goddard Space Flight Center della NASA,

come ogni altro collegato a lanci spaziali ha coinvolto moltissime persone, più di 1500, e diverse università.

A bordo del satellite erano installate apparecchiature studiate appositamente

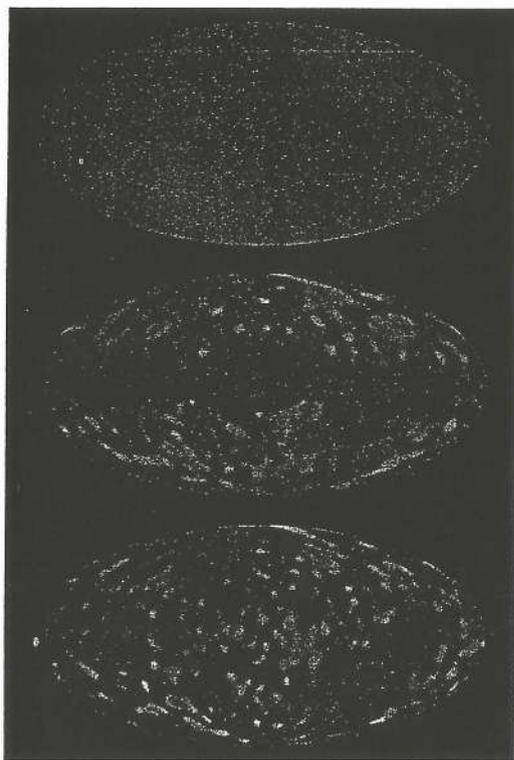
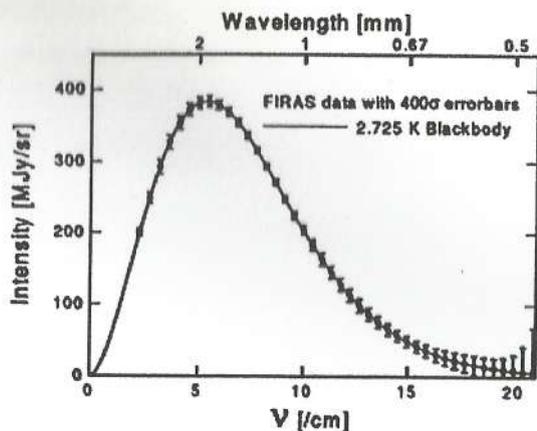
per ridurre al minimo le incertezze di misura pur avendo la sensibilità necessaria a rilevare segnali molto deboli come quelli della CMBR. Tra gli obiettivi principali della missione erano la misurazione dello spettro della CMBR e la ricerca di eventuali anisotropie nella sua intensità.

Il satellite fu lanciato nel novembre 1989 su un'orbita quasi polare a una quota di 900 km. Il modulo che conteneva gli strumenti, alcuni entro un vaso dewar riempito con 650 litri di elio liquido alla temperatura di 1,6 K, era riparato dal sole mediante uno schermo conico. Il satellite ruotava su se stesso a 0,8 giri/min attorno a un asse, orientata sempre a circa 90° dal Sole e 180° dalla Terra per ridurre l'illuminazione solare. In queste condizioni, gli strumenti effettuavano una scansione completa della volta celeste



ogni sei mesi.

La figura accanto mostra la distribuzione dell'intensità della CMBR alle varie lunghezze d'onda (spettro) ottenuta da COBE: i trattini verticali rappresentano i dati sperimentali del satellite e la curva è una planckiana a 2,725 K. L'ottimo accordo conferma l'ipotesi che il plasma primordiale fosse in equilibrio termico quando si è verificato il disaccoppiamento fra la materia e la radiazione, che risulta avere oggi una temperatura media di 2,725 K.



Per quanto riguarda le anisotropie nell'intensità della CMBR, facciamo riferimento alle immagini a fianco, dove la volta celeste è rappresentata in coordinate galattiche e falsi colori sulla base dei segnali captati da una sensibilissima apparecchiatura a bordo del COBE. Si tratta di un radiometro differenziale per microonde in grado di rilevare, secondo due direzioni diverse, differenze d'intensità del segnale che poi venivano registrate come differenze di temperatura.

La prima immagine mostra le

differenze di temperatura fra ampie regioni di cielo: quelle in rosso hanno temperature fino a 3 mK sopra la media, quelle in blu fino a 3 mK al di sotto. La figura mette in risalto un'anisotropia, detta di dipolo, che deriva dall'effetto Doppler dovuto al moto del sistema solare rispetto alla CMBR: la velocità dedotta è $v = 370$ km/s.

La seconda immagine, ottenuta dalla precedente sottraendo il contributo del dipolo, mostra aree più ridotte a colori alternati rosso e blu e una estesa fascia rossa lungo l'equatore galattico. Le tonalità estreme rosse e blu corrispondono a differenze di temperatura di $\pm 0,3$ mK e la fascia rossa corrisponde alla radiazione a microonde emessa dalla nostra galassia la Via Lattea.

La terza immagine è stata a sua volta ottenuta sottraendo il contributo del segnale proveniente dalla Galassia dall'immagine precedente. Essa mostra le tante cercate anisotropie della CMBR, ma sovrapposte al rumore del rivelatore. Per ricavare le variazioni d'intensità della radiazione cosmica è stato necessario effettuare una complessa analisi, combinando i dati di ripetute osservazioni su periodi di tempo molto lunghi (mesi e anni), ma si è potuta raggiungere una sensibilità di circa 10^{-5} K sulle aree della volta celeste distanti più di 20° dall'equatore galattico e rappresentate in rosso o in blu. Ciò ha dimostrato che esistono anisotropie nell'intensità della CMBR, confermando il successo del progetto COBE.

Tuttavia le zone di diverso colore sono viste sotto angoli di circa $7^\circ \times 7^\circ$ e quindi sono molto estese, rendendo la definizione angolare molto scarsa: nel linguaggio fotografico si direbbe che l'immagine ottenuta è troppo sfocata. Considerazioni di natura teorica, infatti, suggeriscono che tali zone dovrebbero avere un'estensione più ridotta ed essere viste sotto angoli inferiori a $1^\circ \times 1^\circ$, un limite questo assolutamente irraggiungibile dagli strumenti a bordo del COBE.

D'altra parte, sempre in base alla teoria, non sarebbero osservabili anisotropie a scale angolari inferiori a $0,1^\circ$, per cui l'intervallo fra $0,1^\circ$ e 1°

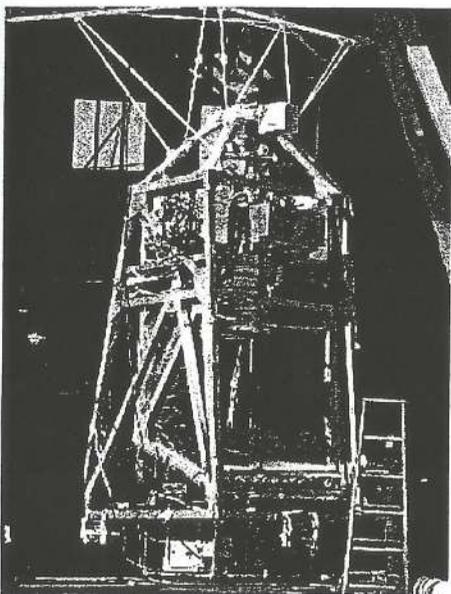
representerebbe la condizione ideale per studiare in dettaglio le anisotropie della CMBR.

Inoltre facendo con tecniche opportune l'analisi statistica di una immagine della volta celeste, ottenuta dalla radiazione di fondo a tali scale angolari, sarebbe possibile ricavare informazioni particolarmente utili sull'evoluzione e sulla composizione dell' Universo.

Sulla spinta di queste considerazioni teoriche e del successo di COBE, negli ultimi anni sono stati progettati diversi esperimenti piuttosto ambiziosi, alcuni dei quali sono già stati portati a termine o sono tuttora in corso. Cercherò di riferire, in modo particolare, su due di essi e sui risultati che hanno dato.

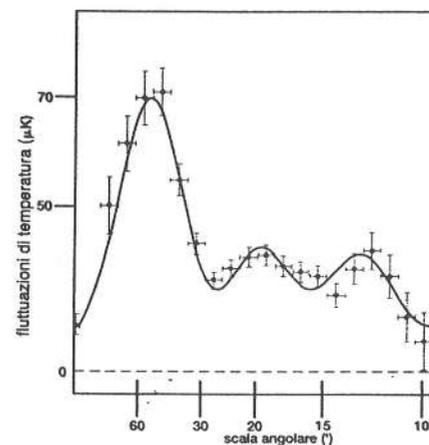
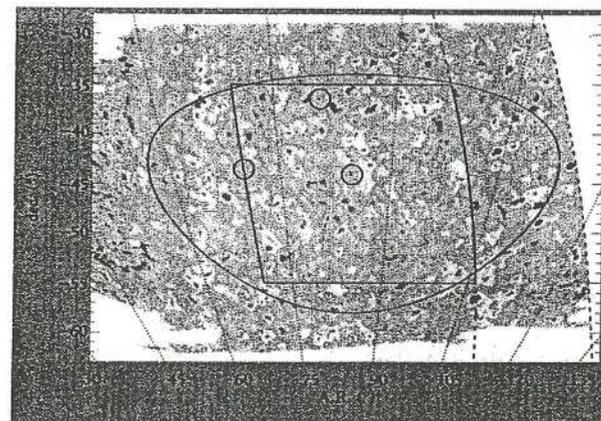
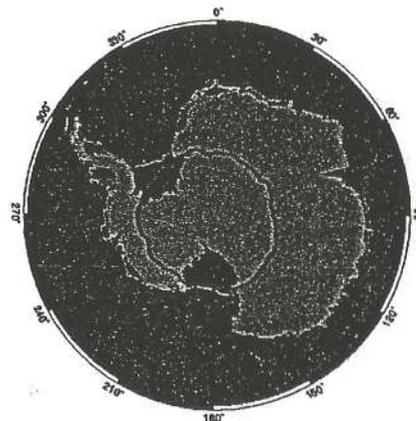
7. Il progetto BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimeter Extragalactic Radiation and Geophysics)

Si tratta di un esperimento italo-americano effettuato in Antartide e costituito dal lancio di un pallone stratosferico che, sfruttando le correnti di alta quota, ha mantenuto per più di dieci giorni, a un'altezza di 38 km, gli strumenti che recava



a bordo. Questi potevano esplorare una porzione di cielo pari a circa il 3% dell'intera volta celeste, con una risoluzione angolare di un quarto di grado, e potevano apprezzare differenze di temperatura fino a $\sim 10^{-9}$ K.

La fotografia mostra la navicella del pallone con le apparecchiature installate, mentre la figura successiva descrive la rotta antartica di Boomerang attorno al Polo Sud.



La terza figura fornisce la mappa termica della porzione di cielo osservata e ricostruita in base ai segnali della CMBR registrati dagli strumenti di bordo. Si tratta di un'area di circa $30^\circ \times 100^\circ$, della quale è stata studiata solo la parte racchiusa dalla linea curva, esclusi i tre piccoli cerchi centrati su altrettanti quasar luminosi. Le regioni rosse sono le più calde, quelle blu le più fredde, con una

differenza massima di $\pm 0,3$ mK rispetto alla temperatura media.

L'accurata analisi statistica della distribuzione di queste piccole regioni a varie temperature ha permesso di spingere la risoluzione angolare a circa 10 primi d'arco. Il grafico così

ottenuto rappresenta l'andamento delle fluttuazioni di temperatura della CMBR in funzione della scala angolare (spettro di potenza). Esso presenta delle oscillazioni con picchi a circa $60'$, $20'$, $13'$, che confermano quanto è già stato detto riguardo alle previsioni teoriche sull'intervallo fra $0,1^\circ$ e 1° (fra $6'$ e $60'$).

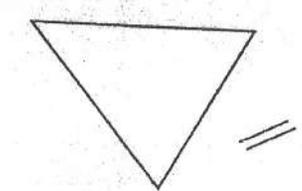
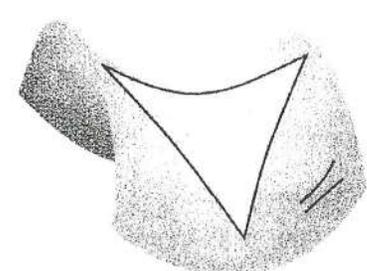
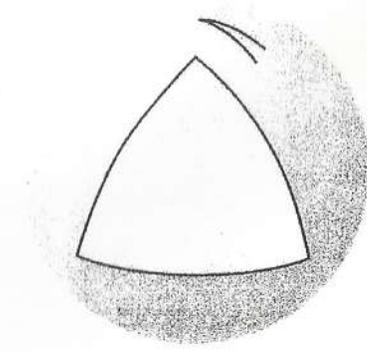
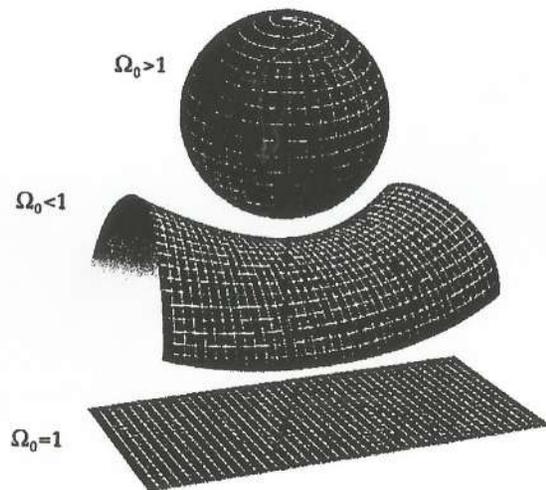
Le fluttuazioni di temperatura della CMBR sono le impronte punto per punto

delle fluttuazioni di densità del plasma primordiale al momento dell'ultima diffusione. Punti più caldi della media nella CMBR corrispondono a zone di densità maggiore della media e, viceversa, punti più freddi corrispondono a zone di densità più bassa. Il plasma era agitato da due processi contrastanti: l'attrazione gravitazionale, che tendeva a far collassare le regioni più dense, e la pressione della radiazione, più intensa in tali regioni, che la contrastava. Le due tendenze innescavano delle oscillazioni di densità che si propagavano nel plasma come "onde sonore", mentre l'Universo andava espandendosi e raffreddandosi. Le fluttuazioni di temperatura registrate nella CMBR rappresentano una specie di foto della sovrapposizione di tutte queste onde e forniscono un'"istantanea" delle condizioni dell'Universo a 300 000 anni dalla sua formazione. Lo spettro di potenza è molto importante, perché la posizione e l'altezza dei suoi picchi e dei suoi avvallamenti contengono informazioni utili sulle caratteristiche del cosmo.

In particolare, la posizione del primo picco è legata direttamente alla densità media D dell'Universo e quindi a tutte le masse in esso presenti.

Secondo la teoria gravitazionale di Einstein, la massa totale condiziona la curvatura dello spazio e determina le caratteristiche geometriche dell'Universo. Vi sono, sostanzialmente, tre casi possibili e per farcene un'idea immaginiamo, come abbiamo fatto

prima, uno spazio a due sole dimensioni, rappresentabile mediante una superficie. Nella figura accanto sono presentati i tre casi: una superficie sferica, una "a sella" e una piana. Ω_0 indica il rapporto D/D_0 fra la densità D del cosmo e D_0 che rappresenta un particolare valore di densità detto "critico".



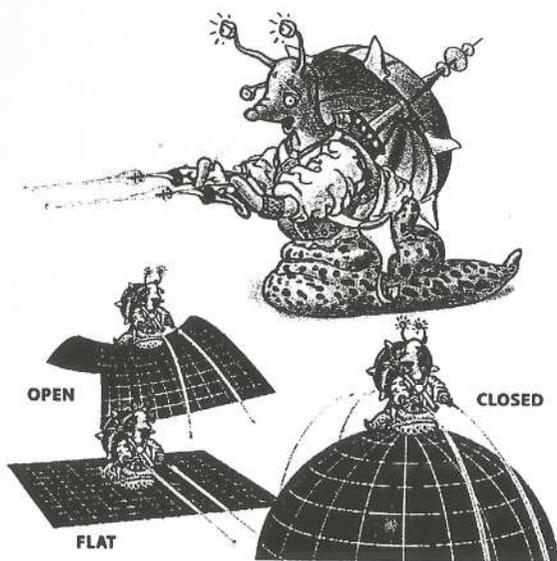
Nel primo caso, in cui $\Omega_0 > 1$ e quindi $D > D_0$, la quantità di massa presente nell'Universo è tanto elevata da riuscire, per effetto dell'attrazione gravitazionale, a rallentare l'espansione fino ad annullarla per dare origine a una contrazione. L'Universo, che iniziato col Big Bang finirebbe, dopo miliardi di anni, in un Big Crunch, è detto "chiuso". La situazione è simile a quella di un proiettile sparato verso l'alto, che a un certo punto della salita si ferma e ricade.

In questo tipo di Universo, a causa della curvatura, la somma degli angoli interni di un triangolo sarebbe maggiore di un angolo piatto (180°).

Nel secondo caso, in cui $\Omega_0 < 1$ e quindi $D < D_0$, l'attrazione gravitazionale, pur rallentando l'espansione, non sarebbe abbastanza forte da annullarla e quindi l'Universo non cesserebbe mai di espandersi e sarebbe "aperto". A causa della curvatura, in un certo senso opposta alla precedente, la somma degli angoli interni di un triangolo sarebbe minore di un angolo piatto.

Il terzo rappresenta un caso limite che separa i primi due, essendo $\Omega_0 = 1$ e quindi $D = D_0$: l'Universo sarebbe appena in grado di continuare per sempre a espandersi e si troverebbe in una specie di equilibrio instabile, che lo riporterebbe a uno dei due casi precedenti se Ω_0 dovesse differire dall'unità per quantità anche piccolissime. Se $\Omega_0 = 1$, vale la geometria euclidea per cui la somma degli angoli interni di un triangolo è uguale a un angolo piatto.

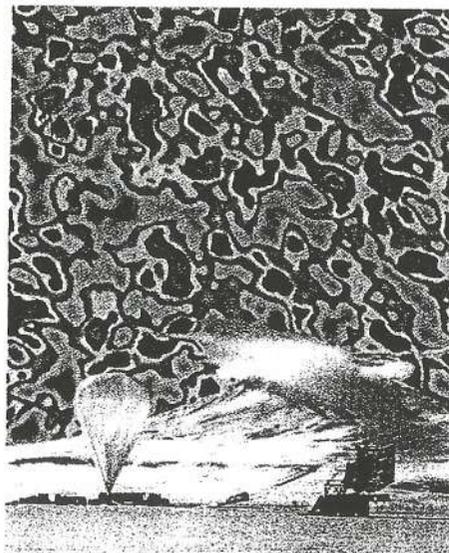
Nella figura sono riproposti i tre casi per evidenziare come due linee parallele convergano nel primo caso, divergono nel



secondo e rimangono equidistanti nell'ultimo.

Ebbene, il valore di D ricavato dalla posizione del primo picco nello spettro di potenza della CMBR, dedotto dai dati di Boomerang, è molto vicino a D_0 ed è per questa ragione che abbiamo sentito dire o letto sulla stampa che il nostro Universo è piatto, nel senso che in esso varrebbe la geometria euclidea.

A causa della limitata regione di cielo esplorata da Boomerang il valore



$\Omega_0 = 1$ è dato con un'incertezza del 10% e solo esperimenti ancor più raffinati potrebbero fornire informazioni più precise.

Fotomontaggio che mostra i preparativi, in Antartide, per il lancio del pallone che ha trasportato gli strumenti di Boomerang.

Sullo sfondo, il cielo come apparirebbe se potessimo osservare le variazioni di temperatura della CMBR con un obiettivo di 35 millimetri.

8. Il progetto WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

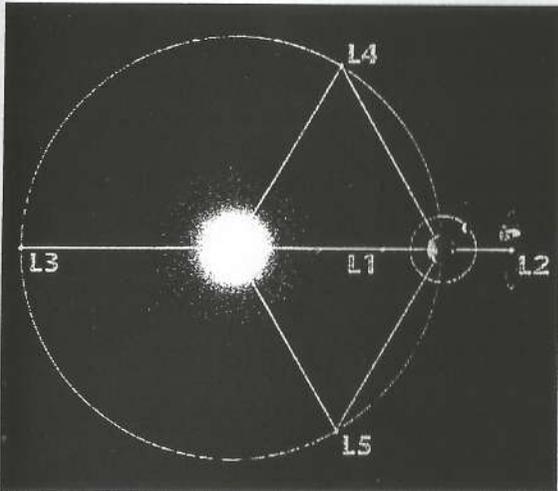
WMAP è una sonda progettata dagli americani, alla quale è stato aggiunto il nome del Prof. David Wilkinson, cosmologo di fama internazionale, per onorarne la memoria dopo la scomparsa avvenuta nel settembre 2002.

Scopo principale della missione, tuttora in corso, è di realizzare una mappa termica della CMBR, estesa a tutta la volta celeste, con una sensibilità di $20 \mu\text{K}$ e una risoluzione angolare di $20'$ d'arco (più o meno come Boomerang, ma per tutto il cielo).

La sonda utilizza radiometri differenziali a microonde che, come quelli di COBE, misurano differenze di temperatura tra due punti diversi della volta celeste, e svolge questo compito orbitando attorno a un punto particolare del sistema Terra-Sole, noto come punto L_2 di Lagrange.

Joseph-Louis Lagrange era un famoso matematico italo-francese del settecento che si è anche occupato di astronomia, in particolare del problema dei tre corpi soggetti alla mutua attrazione gravitazionale, problema molto complesso e non risolvibile in forma esatta. Lagrange riuscì a dimostrare che, nel caso in cui la massa di uno dei tre corpi sia molto più piccola di quella degli altri due, esistono, in prossimità dei due corpi maggiori orbitanti l'uno attorno all'altro, cinque punti particolari (punti di Lagrange) nei quali il corpo minore rimane in equilibrio.

La figura accanto, non in scala, mostra le posizioni dei cinque punti nel sistema



Terra-Sole: L_1 , L_2 , L_3 sulla retta passante per i centri dei due corpi celesti, L_1 fra Terra e Sole, L_2 esterno, L_3 in posizione simmetrica a quella della Terra; L_4 e L_5 ai vertici di due triangoli equilateri aventi come base comune il tratto Terra-Sole. Tutti i punti descrivono, come la Terra, una traiettoria quasi circolare attorno al Sole in un anno.

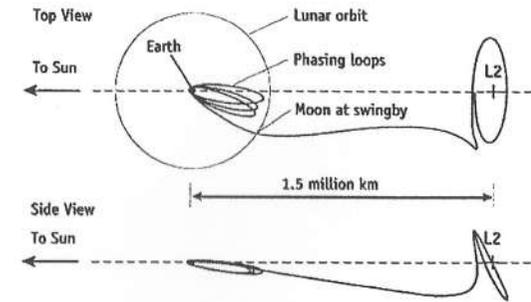
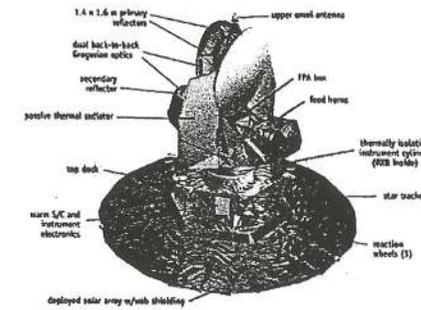
I punti di Lagrange non sono una

novità nel sistema solare perché diversi asteroidi si trovano nei punti L_4 , L_5 del sistema Sole-Giove (Troiani) e di qualche altro sistema del tipo Giove-satellite o Saturno-satellite. Ciò deriva dal fatto che L_4 , L_5 sono punti di equilibrio stabile, a differenza degli altri tre che sono punti di equilibrio instabile.

Allo scopo di studiare il Sole nel punto L_1 del sistema Terra-Sole è stato parcheggiato il satellite SOHO.

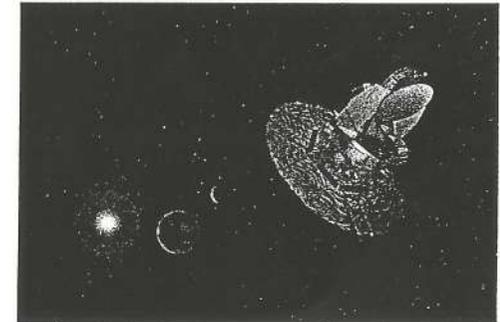
La sonda WMAP, invece, descrive la sua orbita attorno al punto L_2 , posto a $1,5 \cdot 10^6$ km dalla Terra (1/100 UA), e può puntare i suoi strumenti verso il cielo profondo evitando d'intercettare la luce proveniente da Sole, Terra e Luna.

Per rimanere parcheggiati nei punti di equilibrio instabile L_1 e L_2 , entrambi i satelliti ricevono periodicamente dalla Terra comandi opportuni di correzione di

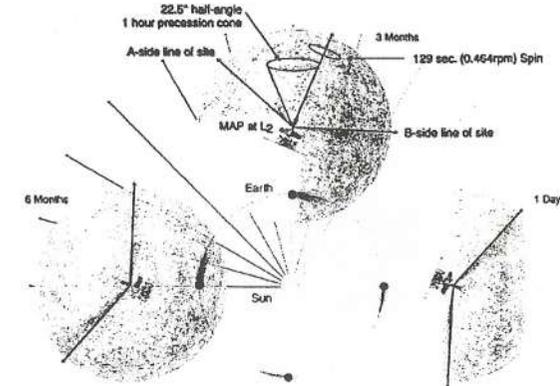


rotta.

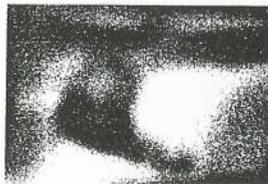
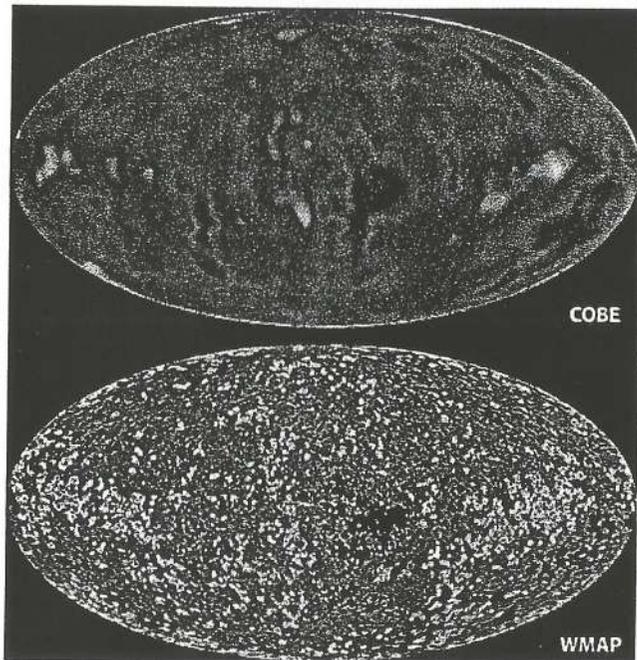
Le tre figure mostrano, in senso orario, la struttura di WMAP, la traiettoria di lancio, vista dall'alto e di lato, per inserire la sonda in orbita attorno a L_2 , la disposizione di WMAP rispetto a Sole, Terra e Luna.



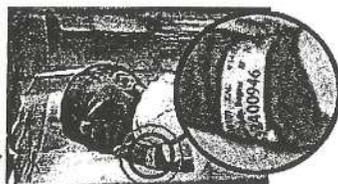
Il lancio è avvenuto il 30 giugno 2001 per una missione di qualche anno. Mentre orbita attorno a L_2 , la sonda compie un giro su se stessa ogni 129 secondi e il suo asse descrive un cono di precessione ogni ora. WMAP ha così potuto esplorare ogni giorno circa il 30% del cielo e, poiché L_2 segue la Terra attorno al Sole, la sonda ha coperto l'intera volta celeste ogni sei mesi.



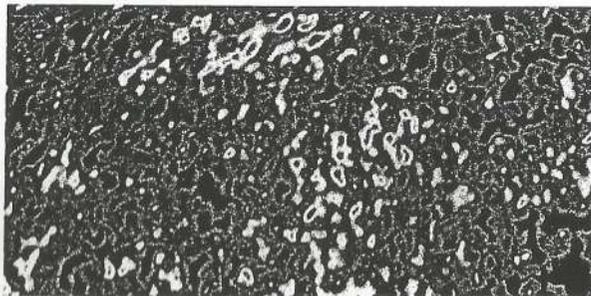
I primi dati, raccolti e accuratamente elaborati con i moderni procedimenti di calcolo, sono presentati nelle figure seguenti, dove la mappa termica registrata da WMAP viene messa a confronto con quella ottenuta da COBE e l'accuratezza della definizione è evidenziata nell'ultima immagine.



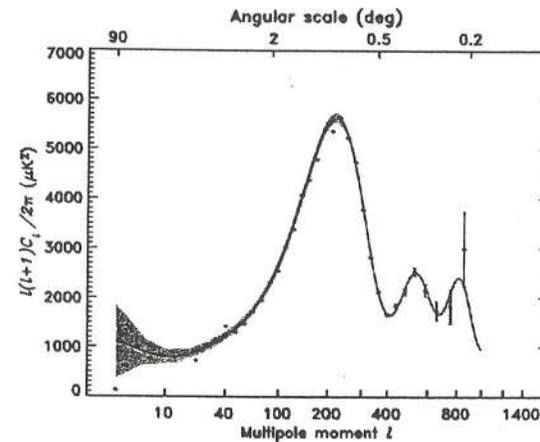
Roll
over



The WMAP image brings the COBE picture into sharp focus, similar to bringing the hospital wristband of the baby into readable focus (above right). The new, detailed image provides firm answers to age-old questions.



L'analisi statistica della distribuzione delle temperature sull'intera mappa della volta celeste ha fornito lo spettro di potenza della figura accanto, confermando e migliorando i risultati di Boomerang e di altri esperimenti. Le posizioni dei primi due



picchi, assai utili per dedurre i valori di alcuni parametri cosmologici, sono state determinate con piccole incertezze, inferiori allo 0,4% la prima e al 2% la seconda.

In particolare, il valore del parametro $\Omega_0 = D/D_0$, direttamente collegato alla posizione del primo picco, viene confermato uguale all'unità entro l' 1%.

Se si mettono insieme i risultati di WMAP con quelli di altri esperimenti, sembra emergere un modello cosmologico abbastanza coerente che si può sommariamente così riassumere: l' Universo

- è praticamente piatto e la sua densità media è molto prossima a quella critica,
- è omogeneo e isotropo su grande scala,
- ha 13,7 miliardi di anni.
- La CMBR, captata dalle sonde come WMAP, è stata emessa 379 000 anni dopo il Big Bang.
- Le prime stelle si sono accese 200 milioni di anni dopo il Big Bang.

Tuttavia, insieme ai grandi progressi fatti nella conoscenza del cosmo, soprattutto negli ultimi dieci anni grazie allo studio della CMBR e delle sue caratteristiche, sono emersi nuovi problemi.

9. Altri misteri

Abbiamo visto che $D \approx D_0$, ma da dove deriva tutta la massa presente nell'Universo per dare questo risultato? Di che cosa è fatto l'Universo?

La materia che conosciamo, quella di cui sono fatti la Terra, i pianeti, le stelle, le galassie, e gli altri oggetti che si osservano nel cielo, è costituita di protoni, neutroni ed elettroni, cioè delle particelle costituenti gli atomi. Anche noi siamo costituiti di questa materia, che gli astronomi chiamano 'materia barionica'.

Tuttavia essa è del tutto insufficiente a spiegare il valore di D_0 perché il suo contributo a tale valore è minimo, solo di qualche percento.

D'altra parte, misurando i moti delle stelle e delle nebulose gassose è possibile risalire alle masse delle galassie, come si fa con il Sole di cui si può determinare la massa conoscendo le caratteristiche del moto di rivoluzione della Terra. In altri termini, si possono trovare le masse dei corpi celesti analizzando gli effetti prodotti dalle loro attrazioni gravitazionali.

Si è così scoperto che la massa complessiva delle galassie e di tutti gli altri oggetti materiali presenti nel cosmo risulta molto maggiore di quella della materia barionica, quindi oltre a questa deve essere presente nell'Universo altra materia non direttamente osservabile, che è stata chiamata 'materia oscura'.

Secondo l'analisi basata sui dati forniti dalla sonda WMAP, la materia barionica e la materia oscura contribuiscono al valore di D_0 per un totale pari al 27%: manca ancora un 73% per raggiungere, come previsto, il valore della densità critica.

Attualmente nessuno sa di preciso che cosa ci sia nell'Universo in grado di dare un contributo così elevato alla sua densità e diverse ipotesi vengono fatte per cercare di spiegarlo in qualche modo.

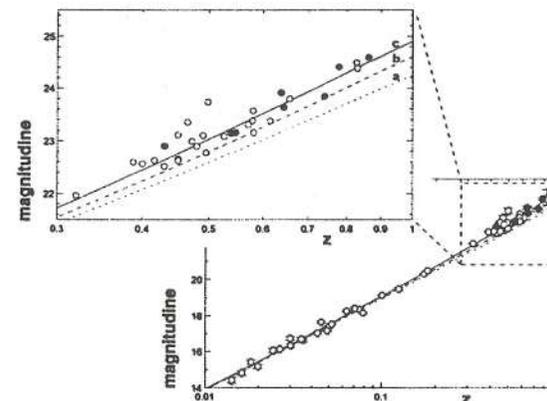
Alcuni studiosi hanno introdotto una 'energia oscura'

attribuita al vuoto, altri parlano di 'quintessenza', richiamandosi alla filosofia dei greci. Altri ancora hanno ripescato la 'costante cosmologica' che Einstein aveva escluso, dopo averla inventata.

Sta di fatto che qualcosa c'è, anche se non lo si sa ancora spiegare. Lo confermano i risultati ottenuti con osservazioni indipendenti di supernovae molto lontane. Le osservazioni sono state effettuate da due gruppi di ricerca che alcuni anni fa sono riusciti a mettere a punto una tecnica particolare per registrare in una sola notte le immagini di diverse supernovae esplose in galassie lontane miliardi di anni luce.

Dallo studio delle curve di luce è stato possibile dimostrare che le supernovae di un certo tipo, indicato come Ia, possono essere utilizzate come candele-campione, consentendo di estendere fino a più di sette miliardi di anni luce le misurazioni di distanza delle galassie in cui compaiono.

Dal 1998 a oggi sono state osservate una cinquantina di supernovae Ia in altrettante galassie più o meno remote e, confrontando la loro distanza con la velocità di allontanamento della galassia ospite, si è trovato che esse sono più lontane di quanto non sia previsto dall'attuale teoria del cosmo. L'unica spiegazione possibile è che l'espansione dell'Universo, invece di rallentare come era stato ritenuto finora, stia accelerando.



Le tre linee rappresentano ciò che ci si aspetterebbe, partendo dal basso, da:

- un Universo piatto con la presenza di materia esattamente alla densità critica;
- un Universo con densità materiale minore di quella critica e senza costante cosmologica;
- un Universo alla cui densità critica contribuiscono per il 25% la materia di ogni tipo e per il 75% la costante cosmologica.

Il fatto, alquanto sorprendente e inaspettato, potrebbe derivare da un effetto repulsivo non contemplato nella teoria della gravitazione, ma che verrebbe introdotto ricorrendo alla costante cosmologica o all'energia del vuoto.

E' troppo presto per dirlo e soltanto dai dati di altri esperimenti, alcuni già in fase di progettazione, potrà derivare una risposta. Uno di essi è il progetto europeo PLANCK, dal nome del satellite che dovrebbe essere lanciato nel 2007 per fornire una mappa della CMBR con sensibilità e risoluzione angolare superiori a quella di WMAP.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. S. Bergia, "Dialogo sul sistema dell' Universo", McGraw-Hill, Milano, 2002
2. E. Fabri, "Argomenti di Cosmologia e Astrofisica Relativistica", Università di Pisa, Anno Accademico 2001-02
3. D. W. Sciama, "Cosmologia Moderna", EST Mondadori, Milano, 1973
4. S. Weinberg, "I primi tre minuti", Oscar Saggi Mondadori, Milano, 1977
5. L. Amendola, P. S. Corasanti, "Il codice genetico dell' Universo", l'astronomia, n. 216, gennaio 2001
6. C. L. Bennet, M. S. Turner, M. White, "The Cosmic Rosetta Stone", Physics Today, November 1997
7. M. Bersanelli, N. Vittorio, "Cosmologia con il fondo cosmico di microonde", Le Scienze Quaderni, n. 117, dicembre 2000
8. G. Brush, "Come la cosmologia divenne una scienza", Le Scienze, n. 290, ottobre 1992
9. P. De Bernardis, S. Masi, "Le protostrutture emergono dal fondo", l'astronomia, n. 155, giugno 1995
10. A. D'Ercole, "La materia oscura nell' Universo", l'astronomia, n.242, maggio 2003
11. B. Goss Levi, "Cosmic background matches blackbody with deviations", Physics Today, June 1979
12. B. Goss Levi, "COBE measures anisotropy in cosmic microwave background radiation", Physics Today, June 1992
13. S. Gulkis, P. M. Lubin, S. S. Meyer, R. F. Silverberg, "Il satellite Cosmic Background Explorer", Le Scienze, n. 259, marzo 1990
14. L. M. Krauss, "The History and Fate of the Universe", The Physics Teacher, vol. 41, n. 3, March 2003
15. C. Lamberti, "Il secondo exploit di COBE", l'astronomia, n. 123, luglio 1992
16. C. Lamberti, "Boomerang conferma il Big Bang con l'inflazione", l'astronomia, n. 210, giugno 2000
17. E. Novati, "Boomerang. Completata l'analisi dei dati", l'astronomia, n. 222, luglio 2001
18. P. J. E. Peebles, D. N. Schramm, E. L. Turner, R. G. Kron, "L'evoluzione dell'universo", Le Scienze, n. 316, dicembre 1994 (anche in Le Scienze Quaderni, n. 97, marzo 2000)
19. P. J. E. Peebles, "Trovare un senso nella cosmologia moderna", Le Scienze, n. 391, marzo 2001
20. S. Perlmutter, "Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe", Physics Today, April 2003
21. B. Schwarzschild, "COBE satellite finds no hint of excess in the cosmic microwave spectrum", Physics Today, March 1990
22. B. Schwarzschild, "Very Distant Supernovae Suggest that the Cosmic Expansion Is Speeding Up", Physics Today, June 1998
23. B. Schwarzschild, "Ballon Measurements of the Cosmic Microwave Background Strongly Favor a Flat Cosmos", Physics Today, July 2000
24. B. Schwarzschild, "WMAP Spacecraft Maps the Entire Cosmic Microwave Sky with Unprecedented Precision", Physics Today, April 2003

25. M. S. Turner, "*Dark Energy: Just What Theorists Ordered*", *Physics Today*, April 2003

SITI WEB

26. BOOMERANG, <http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang/>
27. COBE, <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
28. Cosmology, the study of the Universe, http://map.gsfc.nasa.gov/m_uni.html
29. The High-Z SN Search,
<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/public.html>
30. WMAP, <http://map.gsfc.nasa.gov/index.html>

IMMAGINI

31. F. Bertola, "*L'immagine del mondo*", *l'astronomia*, n. 165, maggio 1996
32. M. Hack, "*Astronomia*", *Enciclopedia Italiana delle Scienze*, Istituto Geografico De Agostini, Novara, 1969
33. A. Paolucci, "*Il centro del mondo*", *l'astronomia*, n. 193, dicembre 1998
34. T. Regge, "*La Cosmologia*", *Corso di Astronomia a cura di M. Hack e C. Lamberti*, vol. 6, Fabbri Editori, Milano, 1984
35. A. E. Roy, "*La celeste eredità di Atlantide*", *l'astronomia*, n. 24, luglio-agosto 1983

EFFETTO SEEBECK

Luigi Togliani (Liceo Scientifico “Belfiore” – Mantova) 12 marzo 2004

Sintesi storica di elettromagnetismo e termodinamica nella prima metà dell’800

1799-1800	A. VOLTA (1745-1827)	PILA – EFFETTO VOLTA – DALL’ELETTRO- STATICA ALL’ELETTRODINAMICA
1820	H.C.OERSTED (1777-1851)	ESPER. DEVIAZIONE DI UN AGO MAGNETICO CON UNA CORRENTE
1820	A.M. AMPERE (1775-1836)	INTERAZIONE TRA CORRENTI
1820	J.B. BIOT (1774-1862) F. SAVART (1791-1841)	LEGGE DI BIOT-SAVART
1821	ARAGO(1786-1853) T.J. SEEBECK(1770-1831)	COSTRUZIONE DEL PRIMO ELETTROMAGNETE
1821-1823	T.J. SEEBECK(1770-1831)	EFFETTO SEEBECK, TERMOELETTRICITA’ <i>“Magnetische Polarisation der metalle und erze durk temperatur-differenz”</i>
1824	S. CARNOT (1796-1832)	MACCHINA TERMICA IDEALE – 2° PRINCIPIO <i>“Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres e developper cette puissance”</i>
1827	G.S. OHM (1789-1854)	LEGGE DI OHM
1832	M. FARADAY (1791-1867)	LEGGI SULL’ELETTROLISI
1832	M. FARADAY (1791-1867)	SCOPERTA DELL’INDUZIONE ELETTROMAGNETICA
1834	J.A. PELTIER (1785-1845)	EFFETTO PELTIER
1834	B.CLAYPERON (1799-1864)	STUDIO SULLA FORZA MOTRICE DEL CALORE - <i>“Journal de L’Ecole Polytechnique”</i>
1840	K.F. GAUSS (1777-1855)	MEMORIA SUL MAGNETISMO
1842	J. HENRY (1797-1878)	MEMORIA SULLE CORRENTI INDOTTE
1842	J. MAYER (1814 - 1878)	“IL MOVIMENTO SI TRASFORMA IN CALORE”
1843	J. P. JOULE (1818 - 1889)	ESPER. MULINELLO A PALE – 1° PRINCIPIO <i>“Philosophical Magazine”</i>
1846	E.C. LENZ (1804-1865) F.E. NEUMANN (1798-1895)	LEGGE DI LENZ
1847	H.HELMHOLTZ (1821-1894)	LEGGE UNIVERSALE DI CONSERVAZIONE ENERGIA - <i>“Uber die Erhaltung der Kraft”</i>
1848	W.T. KELVIN (1824-1907)	SCALA TERMODINAMICA ASSOLUTA
1851	W.T. KELVIN (1824-1907)	FORMULAZIONE DEL 2° PRINCIPIO
1854	W.T. KELVIN (1824-1907)	EFFETTO THOMSON
1854	R. CLAUSIUS (1822 - 1888)	SPIEGAZIONE DEL 1° E DEL 2° PRINCIPIO INTRODUZIONE DELL’ENTROPIA

Seebeck: cenni biografici e storici sulla sua opera

Thomas Johann Seebeck nasce a Reval (Tallin) in Prussia Orientale il 9 aprile 1770.

Studia in Germania (Berlino, Gottinga) e si laurea in medicina nel 1802; preferisce la ricerca in fisica.

All'Università di Jena incontra Goethe; con lui lavora alla teoria dei colori e all'analisi dello spettro solare. Scopre gli effetti termici e chimici riguardanti i diversi colori della luce solare (1806).

Nel 1808 ottiene la prima combinazione di ammoniaca e ossido di mercurio.

Dal 1812 studia la polarizzazione ottica nel vetro sottoposto a tensione (poi studiata Brewster e Biot).

Intorno al 1818 Seebeck torna a Berlino; studia la magnetizzazione del ferro e dell'acciaio attraversati da corrente.

Indaga sulla fotoluminescenza, sugli effetti magnetico e chimico dello spettro solare, sulla polarizzazione e sull'effetto magnetico delle correnti.

All'inizio del 1820 Seebeck cerca sperimentalmente un legame tra elettricità e calore. Nel 1821 unisce due fili di diversi materiali (rame e bismuto) per formare un circuito chiuso, formando due giunzioni; scopre accidentalmente che, se porta una giunzione ad alta temperatura mentre l'altra resta a temperatura più bassa, si nota la presenza di un campo magnetico all'interno del circuito. Non riconosce che viene generata una corrente elettrica quando si scalda una giunzione. Usa i termini 'correnti termomagnetiche' e 'termomagnetismo' per esprimere la sua scoperta. Nei due anni seguenti, 1822-23, riferisce le sue osservazioni all'Accademia Prussiana delle Scienze e le pubblica come "la polarizzazione magnetica dei metalli e dei minerali prodotta da una differenza di temperatura" (*"Magnetische Polarisation der metalle und erze durk temperatur-differenz"*, Abhandlungen der Preussischen Akad, Wissenschaften, Berlin, pp 265-373).

Ritiene (erroneamente) che dalla sua scoperta segua che il campo magnetico terrestre è prodotto da differenze di temperature tra i due poli e l'equatore. Secondo la teoria di Seebeck il gradiente di temperatura causa la magnetizzazione diretta del metallo e il metallo appena magnetizzato produce un campo magnetico attorno ad esso che influenza l'ago magnetico facendolo ruotare; in ciò non è coinvolta alcuna corrente elettrica. Egli accusa gli scienziati suoi contemporanei che, influenzati dall'esperimento di Oersted, interpretano ogni cosa nell'ottica delle correnti elettriche che causano campi magnetici. Ma l'argomentazione di Seebeck fallisce nello spiegare perché non c'è alcun campo magnetico prodotto dal gradiente termico quando il circuito è elettricamente interrotto da materiali che tuttavia sono buoni conduttori termici. Infine prevale la spiegazione dell'effetto termoelettrico, successivamente confermata, secondo la quale la differenza di temperatura tra le due giunzioni di un circuito chiuso bimetallico crea una corrente elettrica che poi produce un campo magnetico.

Seebeck sperimenta con diversi metalli, diverse strutture o forme date agli stessi metalli, con giunzioni ottenute attorcigliando i fili o con saldature e trova sempre gli stessi risultati, cioè la deflessione dell'ago magnetico.

In successivi esperimenti salda una barra di antimonio a una di bismuto e osserva le rotazioni dell'ago magnetico. Costruisce un'ampia serie termoelettrica di materiali in base alla loro potenza termoelettrica.

Seebeck inventa le termocoppie, usa termoelementi per misurare la temperatura, costruisce un polariscopio (apparecchio per misure sulla luce polarizzata) e studia la radiazione termica la luce polarizzata.

Sposatosi, ha un figlio, Louis Frederick.

Diventa membro dell'Accademia di Berlino delle Scienze e dell'Accademia Francese delle Scienze nel 1825. Muore all'età di 61 anni a Berlino il 10 dicembre 1831.

Le ricerche di Seebeck rimangono piuttosto in ombra per un centinaio di anni, finché Shockley e collaboratori creano componenti a semiconduttore.

Effetti termoelettrici

Passano sotto questo nome: l'effetto Thomson, l'effetto Peltier e l'effetto Seebeck e, talora, l'effetto Joule (che non dipende dal verso della corrente).

Effetto Thomson

Nel 1854 William Thomson Kelvin scoprì l'effetto che da lui prese il nome. Se in un circuito elettrico, attraversato da corrente e costituito da un unico tipo di conduttore, è presente un gradiente termico, tra due punti a diverse temperature fluisce una quantità di calore proporzionale all'intensità di corrente e allo sbalzo termico. Dell'effetto Thomson si può dare la seguente spiegazione.

Se una barra metallica viene riscaldata in un suo estremo, il calore ad esso fornito incrementa l'energia cinetica media degli elettroni i quali, raggiungendo la banda di conduzione, si liberano più facilmente e tendono così a raggiungere l'estremo freddo della barra. Tra i due estremi 1 e 2 alle temperature assolute T_1 e T_2 ($T_1 < T_2$) si stabilisce una f.e.m. V_{12} (f.e.m. di Thomson) e un campo elettrico E ; il campo elettrico è legato al gradiente di temperatura dT/dl , ove T è la temperatura assoluta che varia lungo la barra al variare della distanza l . Dunque:

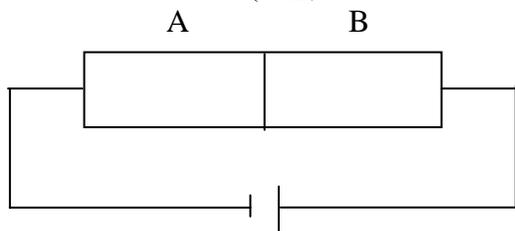
$$E = \sigma dT/dl ;$$

σ è detto coefficiente di Thomson ed è caratteristico del conduttore e dipende dalla temperatura. La f.e.m. di Thomson si ottiene integrando E lungo la linea l , ovvero:

$$V_{12} = \int_{T_1}^{T_2} E dl = \int_{T_1}^{T_2} \sigma dT$$

Effetto Peltier

Quando due conduttori metallici di materiali diversi A e B sono posti a contatto in condizioni di isotermità, vi è diffusione di elettroni di conduzione attraverso la giunzione tra i due metalli, sia da A verso B che viceversa, anche se non in egual misura. La redistribuzione degli elettroni continua finché alla giunzione non si genera un campo di intensità sufficiente a portare il sistema in equilibrio. In questo modo ai capi della giunzione si ottiene una tensione detta f.e.m. di Peltier o coefficiente di Peltier. La f.e.m. di Peltier dipende dai metalli A e B e dalla temperatura T cui essi si trovano; essa si indica col simbolo $(\Pi_{AB})_T$.

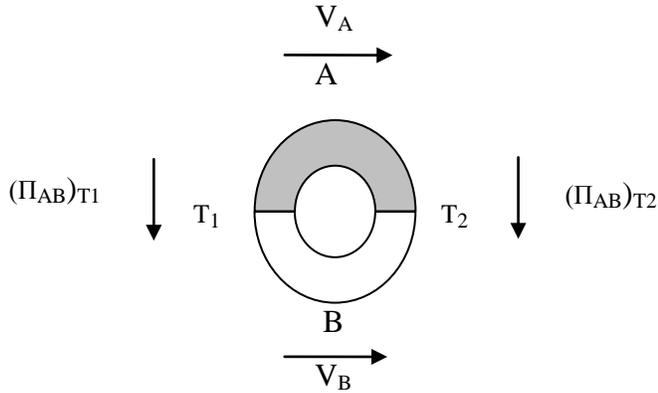


Si può provare l'esistenza della f.e.m. di Peltier collegando gli estremi liberi dei metalli A e B con i poli di una batteria, concordemente o no alla f.e.m. di Peltier esistente prima del collegamento. Oppure la f.e.m. di Peltier può essere semplicemente dovuta al contatto tra i due metalli. Come risultato si ottengono fenomeni termici (raffreddamento, riscaldamento) presso la/e giunzione/i.

La quantità di calore nell'unità di tempo (potenza) che viene assorbita o ceduta dalle giunzioni è proporzionale, con buona approssimazione, all'intensità di corrente passante nel circuito. Il fattore di proporzionalità è il coefficiente di Peltier relativo ai due materiali conduttori presi in esame.

Effetto Seebeck

Consideriamo ora un circuito chiuso costituito da due diversi conduttori metallici A e B e dalle loro giunzioni 1 e 2 mantenute alle rispettive temperature assolute T_1 e T_2 ($T_1 < T_2$).



I versi delle frecce indicano i versi convenzionali delle correnti dovute alle f.e.m. di Thomson V_A e V_B alle f.e.m. di Peltier $(\Pi_{AB})_{T1}$, $(\Pi_{AB})_{T2}$. La somma algebrica V_{AB} di tali f.e.m., cioè la f.e.m. netta, è detta f.e.m. di Seebeck.

Pertanto risulta:

$$V_{AB} = (\Pi_{AB})_{T2} - (\Pi_{AB})_{T1} + V_A - V_B = (\Pi_{AB})_{T2} - (\Pi_{AB})_{T1} + \int_{T_1}^{T_2} \sigma_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \sigma_B dT \quad (1)$$

Il circuito chiuso è una termocoppia e la V_{AB} è anche detta f.e.m. della termocoppia. In genere si fissa una delle due temperature, ad esempio quella inferiore T_1 , e si tiene variabile l'altra temperatura. Posto $T = T_2$, se deriviamo la (1) rispetto a T otteniamo:

$$\frac{dV_{AB}}{dT} = \frac{d(\Pi_{AB})_T}{dT} + \sigma_A - \sigma_B = e_{AB} \quad (2)$$

La derivata della f.e.m. di Seebeck rispetto a T si chiama potenza (o potere) termoelettrica o coefficiente di Seebeck; si indica con e_{AB} , essa dipende dai materiali A e B e la sua unità è $\mu V/K$.

Dalla (2) si ottiene:

$$\frac{d}{dT} \left(\frac{(\Pi_{AB})_T}{T} \right) + \frac{1}{T} (\sigma_A - \sigma_B) = 0 \quad (3)$$

e dalle equazioni (2) e (3) seguono:

$$(\Pi_{AB})_T = T \frac{dV_{AB}}{dT} \quad (4)$$

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{d^2 V_{AB}}{dT^2} \quad (5)$$

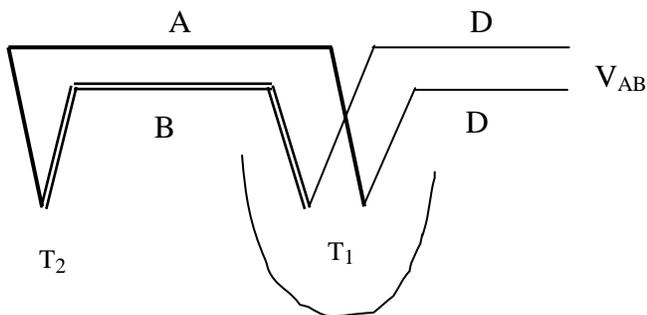
Quindi, nota la variazione della f.e.m. di Seebeck (o della termocoppia), si può ricavare la f.e.m. di Peltier per i due metalli A e B e la differenza tra i coefficienti di Thomson degli stessi metalli.

Termocoppie

La f.e.m. di Seebeck V_{AB} di una termocoppia, anche con notevoli sbalzi termici, è solo dell'ordine di qualche millivolt. Pertanto l'effetto Seebeck non rappresenta un modo pratico per ottenere energia elettrica dal calore. L'impiego più utile delle termocoppie resta quindi quello della costruzione di termometri con ampio range, sfruttando la nota dipendenza di V_{AB} dalla temperatura.

Nel fare i collegamenti con la termocoppia con metalli A e B, generalmente bisogna ricorrere ad un terzo metallo C. Tra le f.e.m. di termocoppia sussiste allora la relazione $V_{AB} = V_{AC} - V_{BC}$ (legge dei metalli intermedi) mantenendo inalterate le temperature assolute T_1 e T_2 ($T_1 < T_2$) delle giunzioni A-B, A-C, B-C. Pertanto si può fissare un certo metallo come riferimento (ad es. piombo) e tabulare, per un fissato sbalzo termico, le f.e.m. degli altri metalli rispetto ad esso: la f.e.m. tra due metalli qualsiasi A e B si otterrà grazie alla precedente equazione. Per la potenza termoelettrica vd tabella.

Inoltre, inserendo un terzo metallo D nel circuito di A e B, in modo che le temperature alle giunzioni A-D e B-D abbiano lo stesso valore T_1 , non si avrà alcuna alterazione della f.e.m. della termocoppia A-B le cui giunzioni si trovino alle temperature T_1 e T_2 . La temperatura minore T_1 potrebbe essere quella del ghiaccio fondente o la temperatura ambiente.



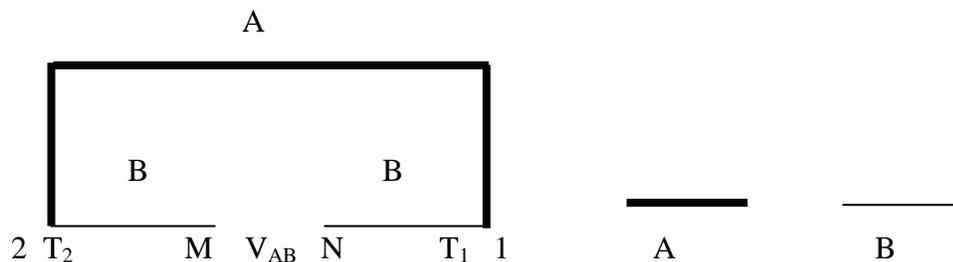
tipo	metalli	$e(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	range($^\circ\text{C}$)
T	Cu - Con	38	0 - 370
K	Al - Cr	40	-200 - 1260
J	Fe - Con	50	0 - 760
E	Cr - Con	59	-200 - 900

Al = alumel ; Cr = chromel ; Con = constantana

Potenza termoelettrica per alcune giunzioni

F.e.m. di Seebeck e temperatura

Due metalli diversi, A e B, sono uniti ad una estremità in modo da formare un circuito. Quando una delle due giunzioni del circuito viene riscaldata ad una temperatura T_2 e l'altra giunzione viene mantenuta ad una temperatura inferiore T_1 ($T_1 < T_2$), la tensione elettrica V_{AB} tra le due estremità aperte del circuito è la f.e.m. di Seebeck ed è alla base della costruzione delle termocoppie. In figura il conduttore B è tagliato nei punti M e N per collegare in parallelo tra essi il voltmetro che consente di misurare V_{AB} . Si evitano così i disturbi elettrici dovuti all'effetto Joule per il passaggio di corrente che si avrebbe a circuito chiuso.



Con approssimazione la tensione V_{AB} (detta f.e.m. di Seebeck o f.e.m. termoelettrica) è proporzionale allo sbalzo termico $T_2 - T_1$, cioè:

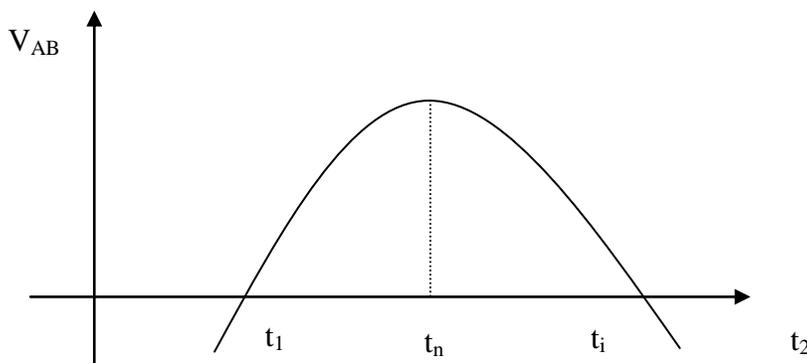
$$V_{AB} = \alpha_{AB} \cdot (T_2 - T_1) \tag{1}$$

Il fattore di proporzionalità α_{AB} è detto coefficiente di Seebeck relativo (rappresenta la potenza termoelettrica) e dipende dai due materiali conduttori A e B presi in esame.

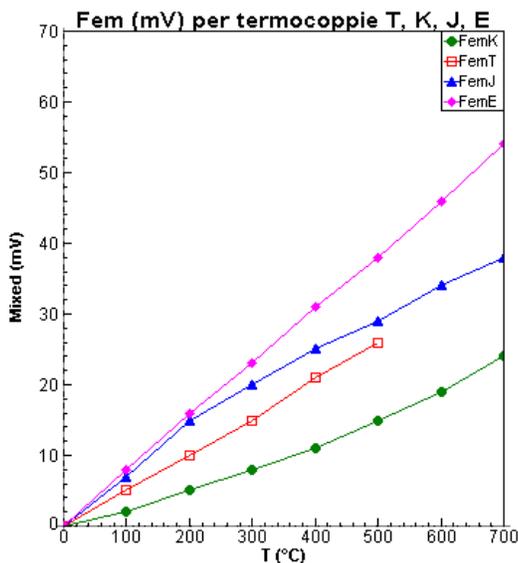
La relazione (1) è un'approssimazione di una legge empirica che vede V_{AB} dipendente dalle temperature centigrade t_2 , t_1 corrispondenti alle temperature assolute T_2 , T_1 ; la sua struttura è del tipo seguente (trascurando addendi di grado superiore):

$$V_{AB} = \alpha \cdot (t_2 - t_1) - \frac{1}{2} \beta \cdot (t_2^2 - t_1^2) \tag{2}$$

con α e β caratteristiche dei materiali costituenti la termocoppia della figura precedente.



Fissando una delle temperature, t_1 , l'andamento di $V_{AB} = V_{AB}(t_2)$ è quello di una funzione quadratica e il grafico è una parabola con la concavità verso il basso. L'ascissa $t_n = \alpha/\beta$ del vertice è detta *temperatura neutra*. L'ascissa $t_i = 2 \alpha/\beta - t_1$ dell'ulteriore intersezione della parabola con l'asse delle ascisse si chiama *temperatura d'inversione*: oltre di essa la tensione V_{AB} cambia di segno, divenendo negativa. Quindi V_{AB} si annulla in t_1 e in t_i . Tuttavia, operando con temperature superiori t_2 molto inferiori a t_n (tratto ascendente della parabola) la (2) è approssimabile con la (1).



tipo	metalli	$e(\mu V/^\circ C)$	range($^\circ C$)
K	Al - Cr	34	-200 - 1260
T	Cu - Con	52	0 - 500
J	Fe - Con	53	0 - 760
E	Cr - Con	76	-200 - 900

Al = alumel ; Cr = chromel ; Con = constantana

Potenza termoelettrica per alcune giunzioni()*

(*) Valori medi approssimati, desunti dal grafico a lato, riportato in [9]

Alcune applicazioni dell'effetto Seebeck

Una delle più note applicazioni dell'effetto Seebeck è la misurazione di temperatura. La tensione elettrica generata in un circuito termoelettrico dipende infatti non solo dai suoi materiali costituenti, ma pure dalla differenza di temperatura tra le due giunzioni, $T_C - T_F$. Pertanto è possibile effettuare precise misure di temperatura mediante semplici misure di tensione elettrica. In questo caso il circuito termoelettrico è una termocoppia. Una delle termocoppie più utilizzate è quella costituita da un filo di rame e uno di constantana.

Un'altra applicazione dell'effetto Seebeck è proprio la diretta produzione di energia elettrica. Invece di usare un fluido evolvente esterno come i comuni motori termici, esso sfrutta la corrente degli elettroni (le cariche elettriche libere) nei conduttori. Si può immaginare che gli elettroni formino un gas che si muove attraverso i materiali conduttori a causa della differenza di temperatura tra le due giunzioni.

In un generatore termoelettrico una quantità di calore Q_C viene quindi trasferita da una sorgente alla giunzione calda, mentre una quantità di calore Q_F viene ceduta dalla giunzione fredda ad un pozzo termico. La differenza tra le due quantità di calore, $Q_C - Q_F$, è pari al lavoro elettrico prodotto dal generatore. Poiché il funzionamento di un generatore termoelettrico è simile a quello di una ordinaria macchina termica, il suo rendimento non può superare il limite: $(T_C - T_F) / T_C$, cioè il rendimento della macchina di Carnot funzionante tra gli stessi termostati T_C e T_F .

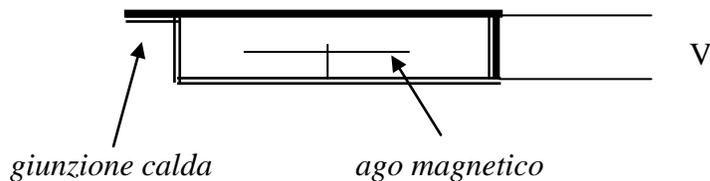
Il principale svantaggio dei generatori (o dei refrigeratori) termoelettrici è la loro bassa efficienza.

Dopo la scoperta di Seebeck, più di un secolo è trascorso prima che sistemi termoelettrici siano stati usati nell'ambito della produzione di elettricità. Solo negli anni 1950-1965, a seguito della scoperta dei semiconduttori, si è infatti potuto aumentare in modo consistente la tensione elettrica fornita dai dispositivi termoelettrici. La sostituzione di coppie di metalli con coppie di semiconduttori nei circuiti termoelettrici non è però sufficiente a garantire un rendimento superiore al 10%. Un tale rendimento rimane troppo basso per un impatto decisivo nel campo dell'elettronica o del recupero di calore in eccesso. Un circuito termoelettrico non è ancora competitivo nei confronti di un classico sistema a compressione di vapore (rendimento del 35-40%). Questo ha portato ad un progressivo abbandono della ricerca e per i più pessimisti la termoelettricità era un tema senza sbocchi futuri. Tuttavia, negli ultimi dieci anni nuovi esperimenti ed idee hanno risvegliato l'interesse del mondo della ricerca per la termoelettricità e per le sue possibili applicazioni. Nuovi materiali con caratteristiche più favorevoli e rendimenti più elevati sono prodotti e studiati in numerosi laboratori di Stati Uniti, Giappone e Europa. Si usano celle di materiali semiconduttori che sfruttando l'effetto Peltier possono refrigerare un piccolo ambiente, se alimentate da adeguata tensione. Un'applicazione è il frigorifero da campeggio alimentato dalla batteria dell'automobile.

Recentemente, la ditta Hi-Z Technology di San Diego ha costruito un generatore termoelettrico di 1000 Watt di potenza capace di sfruttare il calore emesso dal motore diesel di un camion. Il circuito termoelettrico è situato nel tubo di scappamento del camion ed è formato da 49 coppie termoelettriche. Esso sfrutta la differenza di temperatura tra il tubo di scappamento e l'ambiente esterno (circa 200°C). La sua efficienza è del 5%. L'energia elettrica riguadagnata può alimentare diversi sistemi (accessori) elettrici presenti nel camion, diminuendo in tal modo il consumo totale di diesel o, usando la stessa quantità di carburante, aumentando la potenza utile del sistema. Tuttavia anche questa tecnologia non sfrutta ancora abbastanza il calore presente nel tubo di scappamento. Un migliore sfruttamento può venire raggiunto combinando parecchi circuiti termoelettrici o migliorando l'efficienza dei materiali utilizzati. Un circuito termoelettrico con una efficienza del 20% (un obiettivo ambizioso, ma realistico) aumenterebbe considerevolmente la potenza utile del motore. I risultati ottenuti per i camion potranno poi essere estesi anche alle automobili, dove la perdita di energia in forma di calore è ancora maggiore.

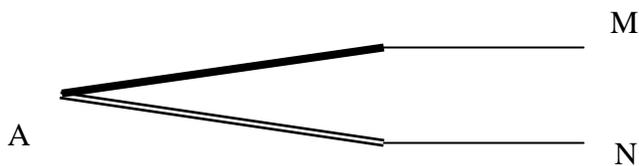
Esperimento: aspetti qualitativi dell'effetto Seebeck

Un apparecchio già predisposto, che ripropone l'esperimento effettuato da Seebeck nel 1821, è costituito da due piastre di diversi metalli saldate da una parte e unite tra loro dall'altra da un terzo conduttore. Scaldando la giunzione alla fiamma si nota una stabile d.d.p. V all'altra estremità, ai capi del terzo conduttore. La d.d.p. V cresce con l'aumento della temperatura della giunzione. E' possibile l'interazione con un ago magnetico inserito.

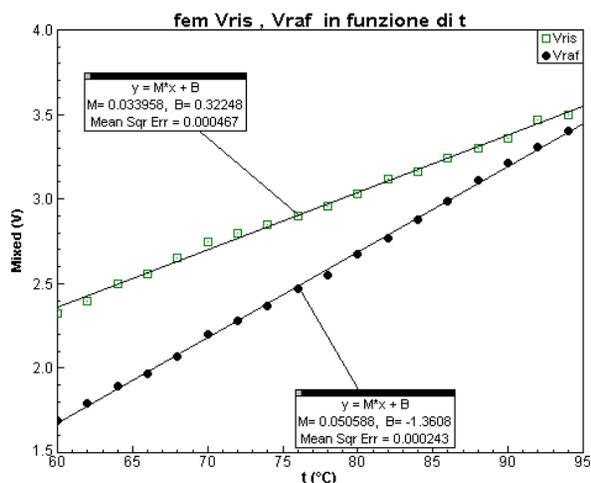
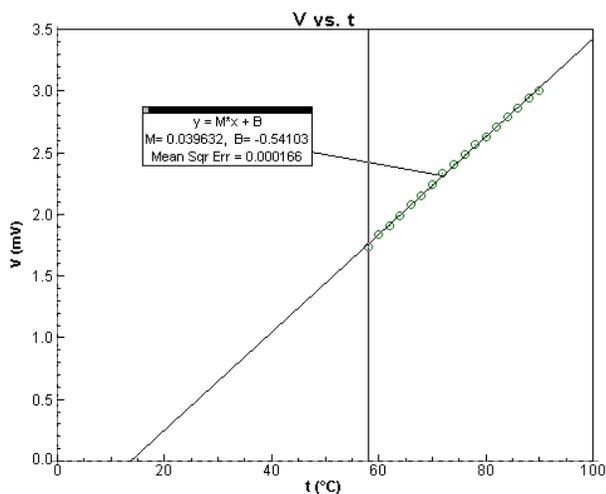


Esperimento: termocoppie

Il termoelemento di Gunther (Phywe) è costituito da una coppia di due grossi fili di conduttori diversi, ferro e costantana saldati ad un'estremità A (tale giunzione è detta J). Alle estremità libere M e N si collega un millivoltmetro (fondo scala 200 mV) che registra la f.e.m. tra questi due punti.



Si immerge la giunzione A in un becher contenente acqua calda (ad esempio a 100°C) insieme ad un termometro digitale a sonda, registrando il valore della f.e.m. V in funzione della temperatura centigrada di raffreddamento t . L'andamento è di tipo lineare e ricorda la relazione (1). In questo caso la temperatura t nella giunzione A funge da t_C , mentre per t_F si dovrebbe assumere la temperatura ambiente cui dovrebbero trovarsi M e N . Sotto è riportato il grafico ricavato in un esperimento, con l'aggiunta della retta di regressione lineare. L'extrapolazione dei dati sperimentali ci dice che la f.e.m. V si annulla per una temperatura di circa 14°C , valore sensibilmente inferiore alla temperatura ambiente registrata che era di circa 22°C . La spiegazione di questa discrepanza può essere forse spiegata col fatto che la retta è solo un'approssimazione dell'andamento di $V=V(t)$: se si considera il grafico parabolico precedente, si può pensare ad una temperatura t_F superiore a 14°C . Il termoelemento di Gunther funziona dunque come una termocoppia.



Un'esperienza analoga si può riproporre con due semplici tratti di filo conduttore, rame e costantana, della lunghezza di circa 15-20 cm l'uno, connessi ad una estremità eventualmente trattati per rendere possibile il contatto elettrico. Alle estremità libere si collega il solito millivoltmetro. La giunzione A viene immersa in un becher con acqua scaldata da un riscaldatore elettrico da 400 W, registrando la temperatura con lo stesso termometro digitale del precedente esperimento. Si può rifare l'esperienza lasciando raffreddare il becher. Si nota una diversa pendenza dei due grafici, approssimativamente lineari; probabilmente il motivo è che mutata la temperatura ambiente (o di riferimento) degli estremi M e N. Per il resto i grafici confermano quanto già dedotto dalla precedente esperienza.

Per tre prove sperimentali affettuate, i coefficienti di Seebeck (pendenze dei grafici) sono circa :

- 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, per la giunzione ferro-costantana (raffreddamento)
- 34 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, per la giunzione rame-costantana (riscaldamento)
- 51 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, per la giunzione rame-costantana (raffreddamento).

Esperimento: Convertitore termoelettrico

E' uno strumento prodotto dalla Pasco. Una cella Peltier di materiale semiconduttore è chiusa tra due conduttori metallici che si aprono in due gambe, ciascuna delle quali può essere immersa in un bicchiere contenente acqua. Il convertitore termoelettrico può essere usato, utilizzando l'apposito commutatore, o per convertire l'energia termica in elettrica (effetto Seebeck, figura a) o per il passaggio contrario, se opportunamente alimentato (effetto Peltier, figura b).

Sfruttando la prima possibilità, occorre immergere le gambe in due bicchieri di polistirolo contenenti l'uno acqua fredda a temperatura assoluta T_F e l'altro acqua calda a temperatura T_C . Per una buona riuscita occorre che $T_C - T_F$ sia di almeno 40 K. Lo sbalzo termico produce un flusso di calore che va dal termostato caldo al termostato freddo, incidendo sulla dinamica degli elettroni e delle lacune presenti all'interno dei semiconduttori di tipo n e di tipo p contenuti nella cella termoelettrica. Ciò determina una f.e.m. di Seebeck ai capi della cella, disponibile per creare una corrente elettrica nel motorino ad essa collegato. Il motorino poi aziona una piccola ventola che rende appariscente la conversione energetica.

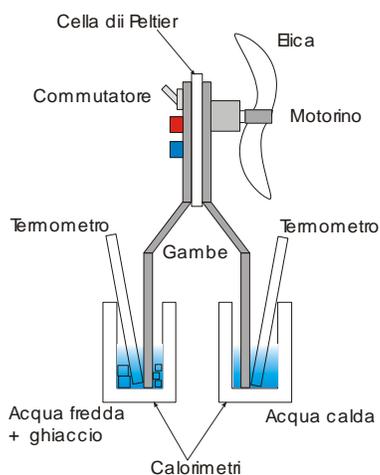


Figura a

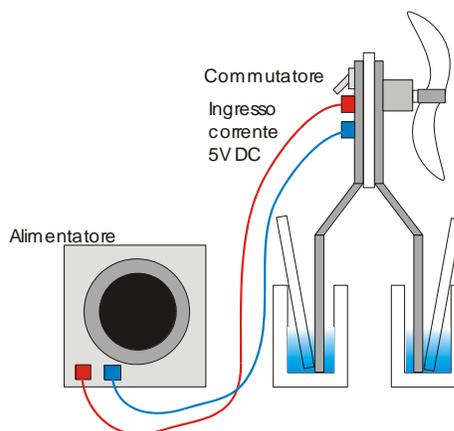


Figura b

Questo dispositivo può essere visto come una macchina termica operante tra due termostati a temperature T_F e T_C . Il massimo rendimento possibile è quello della macchina ideale di Carnot operante tra le stesse temperature estreme, ossia:

$$\eta_{\max} = (T_C - T_F) / T_C$$

Il rendimento η del convertitore è invece molto inferiore.

Se ad esempio si operasse tra le temperature 0°C e 80°C , che già rappresentano valori molto differenti tra loro per le possibilità pratiche di esecuzione, si avrebbe

$$\eta_{\max} = 80/353 \approx 0,23.$$

E' anche utile, sul piano didattico, presentare lo stesso dispositivo con i due termostati alla stessa temperatura: il fatto che ora la ventola non si metta in movimento è una conferma del secondo principio della termodinamica nella formulazione dovuta a Kelvin.

Può essere interessante vedere in quale relazione sta la f.e.m. di Seebeck con lo sbalzo termico. Ciò è realizzabile con un dispositivo on-line tascabile costituito dalla calcolatrice TI-89 della Texas accoppiata con l'interfaccia CBL2 della Vernier che gestisce due sonde termiche e una sonda di tensione. Le sonde termiche registrano le temperature dei due termostati al trascorrere del tempo, mentre la sonda di tensione rileva la f.e.m. di Seebeck della cella. I dati raccolti possono essere trasferiti al PC e qui elaborati col programma Graphical Analysis della Vernier. Nell'elaborazione dei dati si può eliminare la variabile tempo e vedere la dipendenza diretta della f.e.m. dallo sbalzo termico. Il grafico ottenuto (figura c) tuttavia presenta fluttuazioni troppo elevate per avvalorare un andamento di tipo lineare, come previsto dalla (1). Ciò è imputabile alla scarsa sensibilità della sonda di tensione.

Il convertitore utilizza una serie di celle termoelettriche per convertire l'energia termica in energia elettrica. Ciascuna cella è un elemento semiconduttore. Nel convertitore si alternano due cristalli semiconduttori, uno di tipo p e uno di tipo n, con tratti metallici. Durante l'esperienza il calore innalza il livello energetico di alcuni elettroni nei semiconduttori. Gli elettroni disponibili per la conduzione liberano le lacune che poi possono essere occupate da altri elettroni. Gli elettroni migrano attraverso il semiconduttore di tipo n, le lacune in quello di tipo p. Gli elettroni passano attraverso il circuito esterno e fanno girare la ventola, per poi rientrare nel semiconduttore di tipo p (figura d), colmando le lacune. Il termostato caldo assicura il ripetersi del processo.

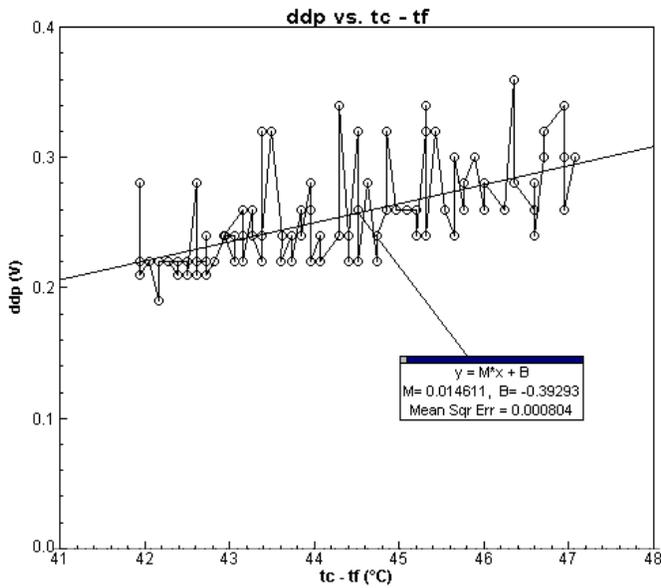


Figura c

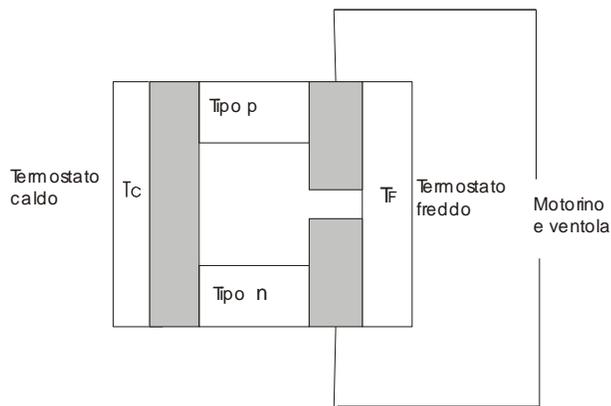


Figura d

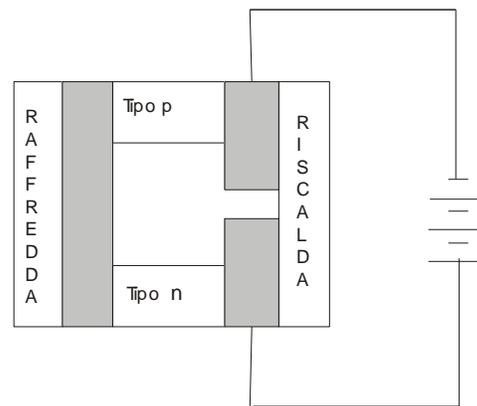
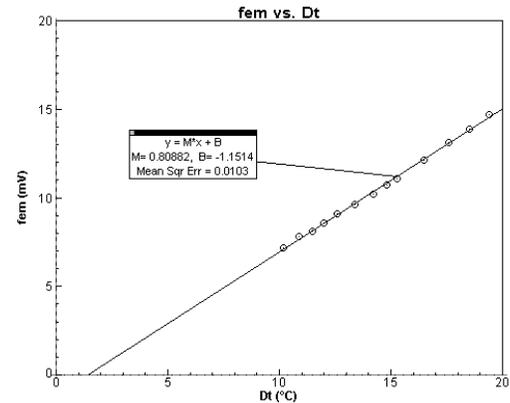
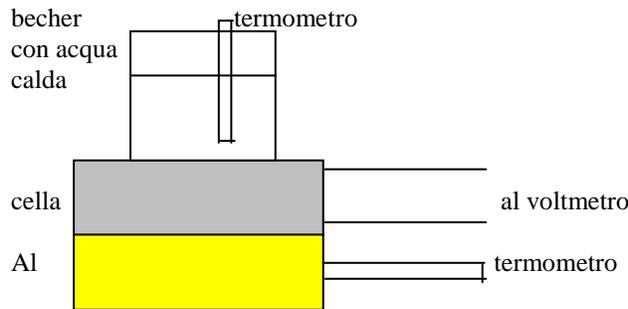


Figura e

Si può utilizzare il convertitore per trasformare energia elettrica in energia termica (effetto Peltier). In questa modalità la d.d.p. fornita dall'alimentatore in c.c. fa sì che gli elettroni e le lacune migrino da un'estremità all'altra del semiconduttore di tipo n e di quello di tipo p. Il movimento degli elettroni nel semiconduttore di tipo n causa un trasferimento di energia interna dalla parte di quel semiconduttore e questa si raffredda. Lo stesso risultato si verifica per il semiconduttore di tipo p durante la migrazione delle lacune. Il passaggio di calore dalla 'gamba' fredda a quella 'calda' è proporzionale alla corrente che passa attraverso il circuito e al numero delle celle (coppie) termoelettriche che costituiscono la pompa termoelettrica o pompa di calore (figura e).

Effetto Seebeck con cella Peltier

Con una cella Peltier di materiali semiconduttori tipo quella del convertitore termoelettrico della Pasco si può riproporre l'esperienza sull'effetto Seebeck già visto con i metalli. La cella presenta queste caratteristiche: $P_{\max} = 51,5 \text{ W}$, $I_{\max} = 6,0 \text{ A}$, $V_{\max} = 15,5 \text{ V}$.



La cella Peltier è collegata al voltmetro. Essa poggia su un blocchetto di alluminio che presenta una cavità atta ad ospitare il bulbo (o la sonda) di un termometro. Un becher con acqua calda, dotato di termometro, poggia sull'altra faccia della cella. L'esperienza consiste nel registrare le temperature t_1 e t_2 lette sui due termometri e la f.e.m. V_s di Seebeck letta dal voltmetro. Si traccia quindi il grafico di V_s in funzione di $\Delta t = t_2 - t_1$. Quello in figura presenta una pendenza di circa $809 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Bibliografia

- [1] Sears, F. W. (1958) "Electricity and Magnetism", Addison-Wesley P.C., Reading, Mass.
- [2] Frank, N. H. (1964) "Elettromagnetismo e Ottica", C.E. Ambrosiana, Milano
- [3] Ricamo, R. (1969) "Guida alle sperimentazioni di Fisica", C.E. Ambrosiana, Milano
- [4] Amaldi, E. (1955) "Fisica sperimentale", Lit. Marves, Roma
- [5] Perucca E. (1946) "Fisica generale e sperimentale", Un. Tip. Ed. Torinese, Torino
- [6] Whittle R.M.-Yarwood J. (1973) "Experimental Physics for Students", Chapman & Hall, London
- [7] AA. VV. (1964) "Enciclopedia della Scienza e della Tecnica", Mondadori, Milano
- [8] Romer, S. (2003) "L'effetto Seebeck", EMPA Dubendorf (sito INTERNET)
- [9] Bossi A. Malcovati P. "Misure elettriche" (sito INTERNET)

ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE
LICEO SCIENTIFICO TECNOLOGICO "E. FERMI - MANTOVA"
AIF-MANTOVA

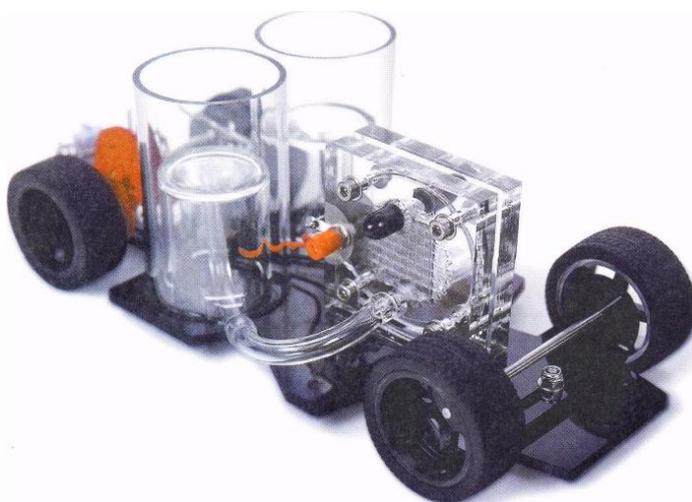
CORSO DI AGGIORNAMENTO PER INSEGNANTI DI FISICA

QUINTA LEZIONE

Prof. Claudio Baraldi

Coord. Corso: Prof. Leo Vioni

PILE A COMBUSTIBILE



AULA DI FISICA n. 611

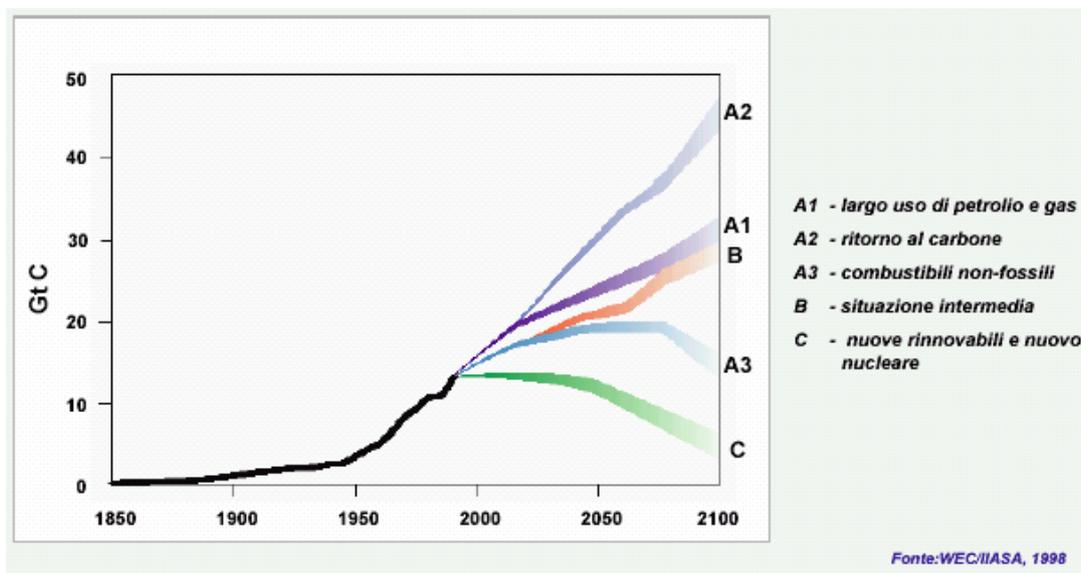
MERCOLEDI' 5 MAGGIO

ORE 14.30 – 17.30

Teoria ed esperimenti con attrezzature fornite dal LABTER CREA- MANTOVA

INTRODUZIONE

La continua crescita della popolazione mondiale e la naturale aspirazione dei paesi in via di sviluppo a raggiungere standard economici e di qualità della vita vicini a quelli dei paesi industrializzati sono le principali cause della crescita inarrestabile della domanda di energia e del conseguente aumento delle emissioni di gas serra, prima fra tutte l'anidride carbonica, prodotto finale dell'uso di combustibili fossili, nella generazione dell'energia termica, meccanica ed elettrica.

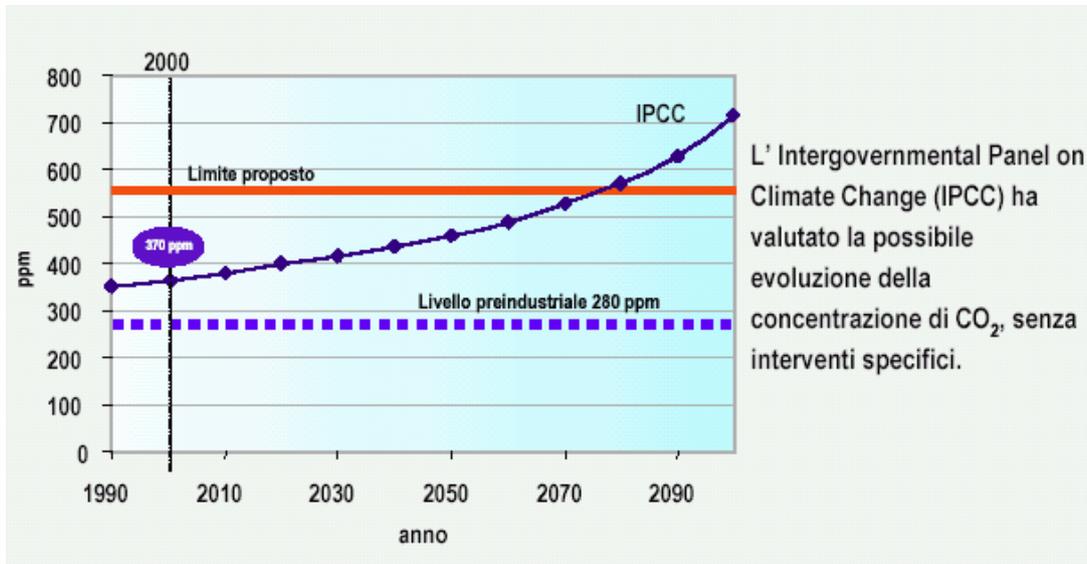


All'inizio del secolo scorso la concentrazione della CO₂ nell'aria era pari a 300 ppm, ora è circa 380 ppm.

La combustione è la maggior responsabile delle emissioni di gas serra (quasi l'80 % in Italia). A livello globale circa il 30 % delle emissioni di CO₂ in atmosfera è causato dai trasporti.

Le previsioni dei consumi di energia per il prossimo secolo fanno prevedere un continuo aumento della CO₂ a meno di sostanziali cambiamenti nel sistema energetico; in particolare per i trasporti oltre a ridurre drasticamente l'uso

dell'automobile, si può agire sull'efficienza dei veicoli o cercare di introdurre combustibili più puliti.



Le “scelte” tecnologiche (e politiche) obbligate

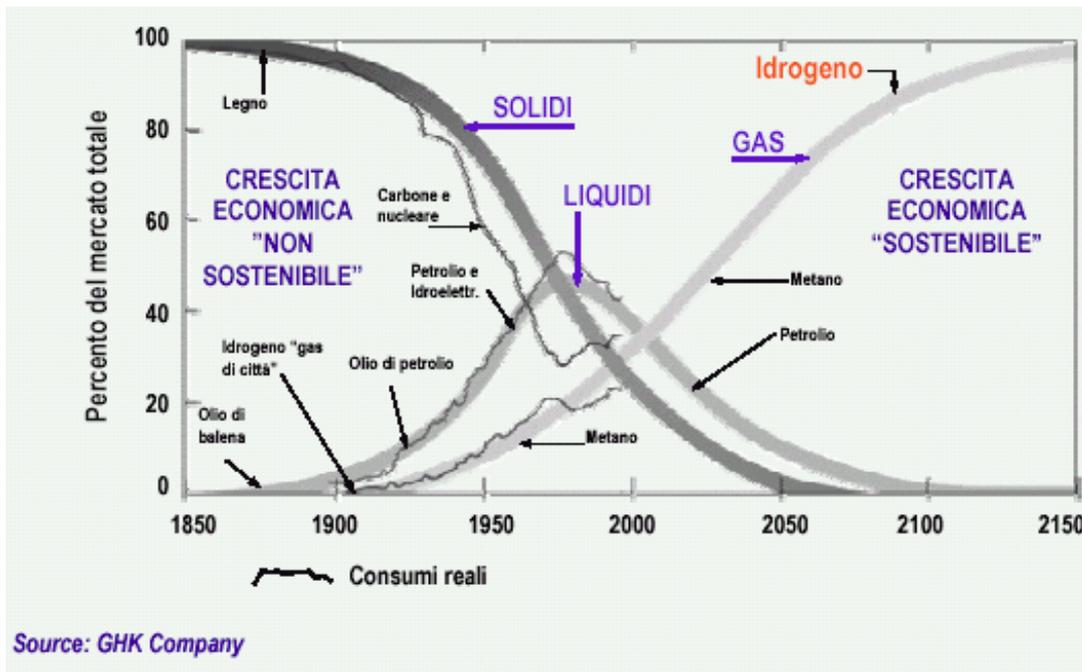
Si impone quindi la necessità di individuare scelte tecnologiche compatibili con l'ambiente (politiche di sviluppo sostenibile), tali scelte tecnologiche dovrebbero idealmente basarsi sull'utilizzo di vettori energetici (*) con le seguenti caratteristiche:

Di impatto ambientale sia globale che locale quasi nullo

Producibile da più fonti energetiche primarie, tra loro intercambiabili e disponibili su larga scala anche in futuro

Distribuibile preferenzialmente attraverso una rete

(*) Vettore energetico : tutto ciò da cui si può ricavare energia utile mediante conversione di fonti energetiche primarie (sia fossili che rinnovabili)



Idrogeno come vettore energetico per uno sviluppo sostenibile

L'idrogeno è un vettore in grado di soddisfare i requisiti precedentemente indicati infatti:

È un gas che brucia nell'aria secondo la semplice reazione:



Può essere prodotto sia da fonti fossili, sia da fonti rinnovabili, sia da fonte nucleare

Può essere distribuito in rete abbastanza agevolmente compatibilmente con gli usi finali e con lo sviluppo delle tecnologie di trasporto e di stoccaggio

Può essere impiegato in diverse applicazioni (produzioni di energia elettrica centralizzata o distribuita, generazione di calore, trazione) con un impatto locale nullo o estremamente ridotto.

L'idrogeno, il cui nome significa "generatore di acqua", rappresenta l'elemento più abbondante dell'universo. Nel sole ad esempio è presente per circa il 90%, e con l'ossigeno ed il silicio è uno degli elementi più diffusi della crosta terrestre.

Particolarmente abbondante è allo stato combinato;

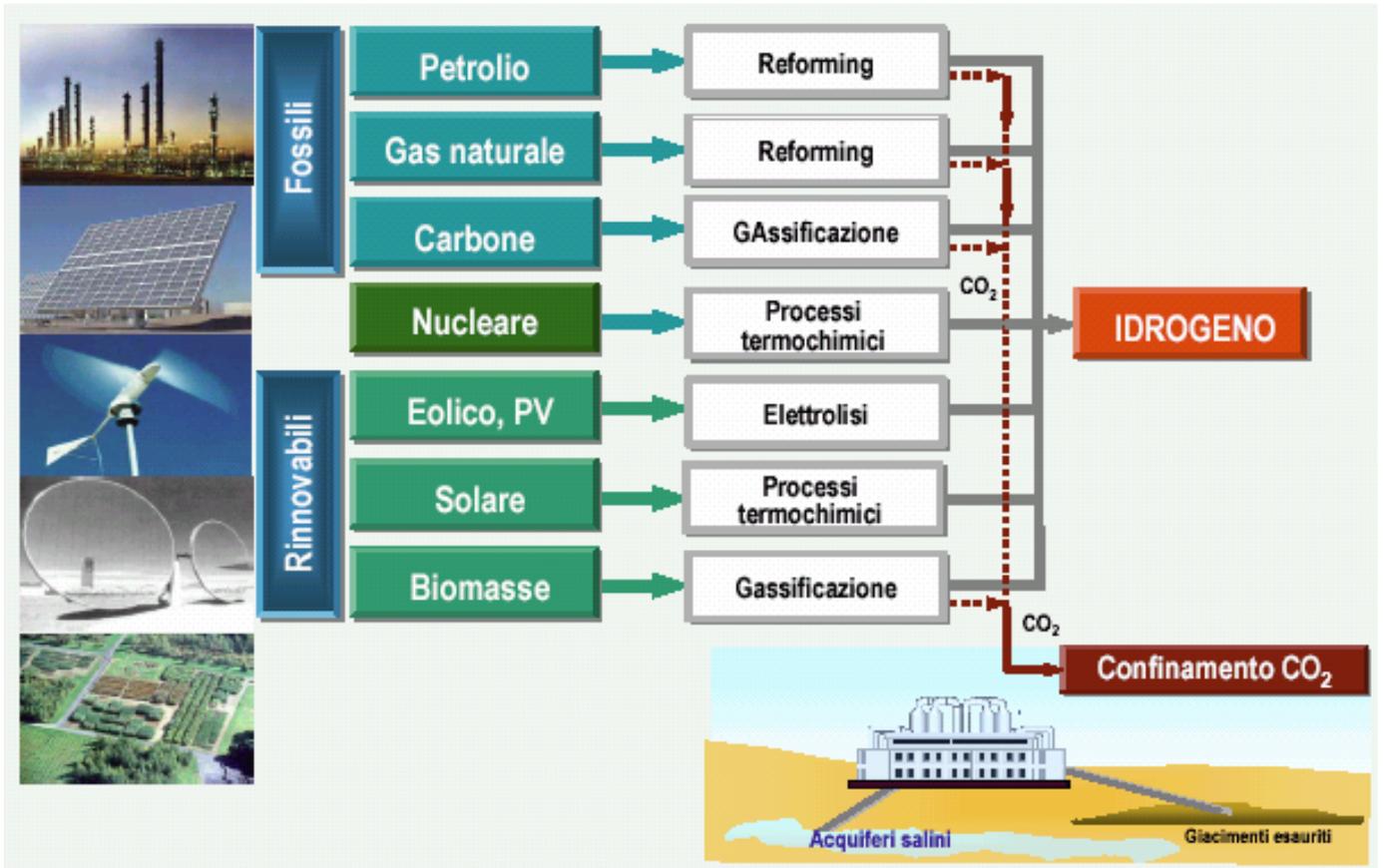
combinato con carbonio, ossigeno ed alcuni altri elementi è uno dei principali costituenti del mondo vegetale e animale.

L'idrogeno è a temperatura ambiente un gas incolore, inodore e praticamente insolubile in acqua. Dopo l'elio è il gas più difficile a liquefarsi. Generalmente poco attivo a freddo, l'idrogeno dà luogo a caldo o in presenza di catalizzatori a numerose reazioni chimiche. La combinazione con ossigeno per dare acqua avviene spesso con esplosione a temperatura elevata o con un catalizzatore.

L'idrogeno ha il più alto contenuto di energia per unità di massa di tutti gli altri combustibili (potere calorico superiore).

Massa molecolare di H ₂	g/mole	2.016
Densità	kg/m ³	0.0838
Densità come liquido	kg/m ³	70.8
Potere calorico superiore	MJ/kg	141.90
Temperatura di ebollizione	K	20.3
Punto critico	K	32.94
	bar	12.84
	kg/m ³	31.40

Nel 2001 (fonte Chemicals Engineering) la produzione mondiale di Idrogeno in grossi impianti industriali per utilizzo interno (raffinerie, petrolchimici, produzione di ammoniaca) ammonta a circa **416** miliardi di m³ /anno mentre solo **16** miliardi di m³ sono prodotti per uso commerciale esterno (gas tecnici, piccole utenze ecc...) con un tasso di crescita medio in EUROPA del **10 -15 %** annuo. Si prevede nel prossimo quinquennio una crescita di oltre il **25 %**



Occorre valutare le diverse soluzioni possibili per il **sequestro della CO₂**, con particolare riferimento al confinamento geologico in acquiferi salini e giacimenti esauriti di metano o petrolio



Un ampio uso dell'idrogeno come **vettore energetico** richiede una sua disponibilità su larga scala, per le diverse applicazioni e in prossimità del punto d'uso

L'idrogeno è attualmente distribuito in **forma liquida** e come **gas compresso**, in bombole utilizzando autocarri o in gasdotto



- ◆ Rete di 720 km in USA e 1500 km in Europa
- ◆ Le condotte utilizzate sono costruite in acciaio ed operano a pressioni di 10-20 bar, con un diametro di 25-30 cm.



- ◆ La più vecchia rete esistente si trova nella regione della Ruhr (Germania). L'idrogenodotto è in servizio dal 1938 ed è lungo 215 km
- ◆ In Europa, è in esercizio una rete lunga 330 km, che attraversa Francia, Belgio e Olanda

Accumulo in forma gassosa

Idrogeno in bombole ad alta pressione in materiale composito

Accumulo in forma liquida

Idrogeno in serbatoi criogenici

Accumulo "chimico"

Idruri metallici

Nanostrutture di carbonio

Nanofibre

Nanotubi



Idrogeno compresso



Serbatoi TriShield™,
Quantum Technology (350 bar)

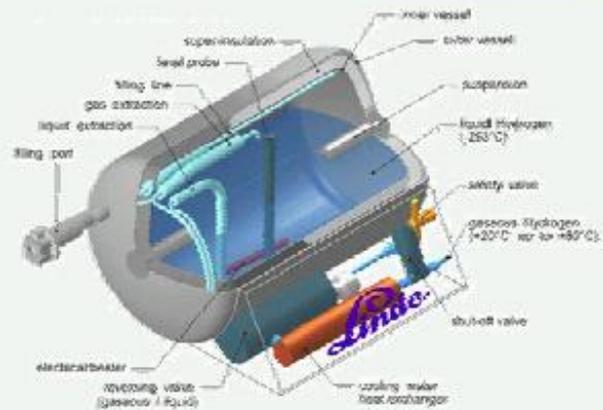
GM e la QUANTUM hanno ricevuto l'omologazione
da parte del TÜV, per serbatoi a 700 bar.

Idruri metallici



Sistema di
accumulo in idruri
metallici - Ovonic

Idrogeno liquido



Serbatoio per idrogeno liquido - Linde

L'idrogeno può essere impiegato per:

Usi industriali

Sistemi di generazione stazionaria

- Celle a combustibile
- Turbine

Sistemi per trasporto

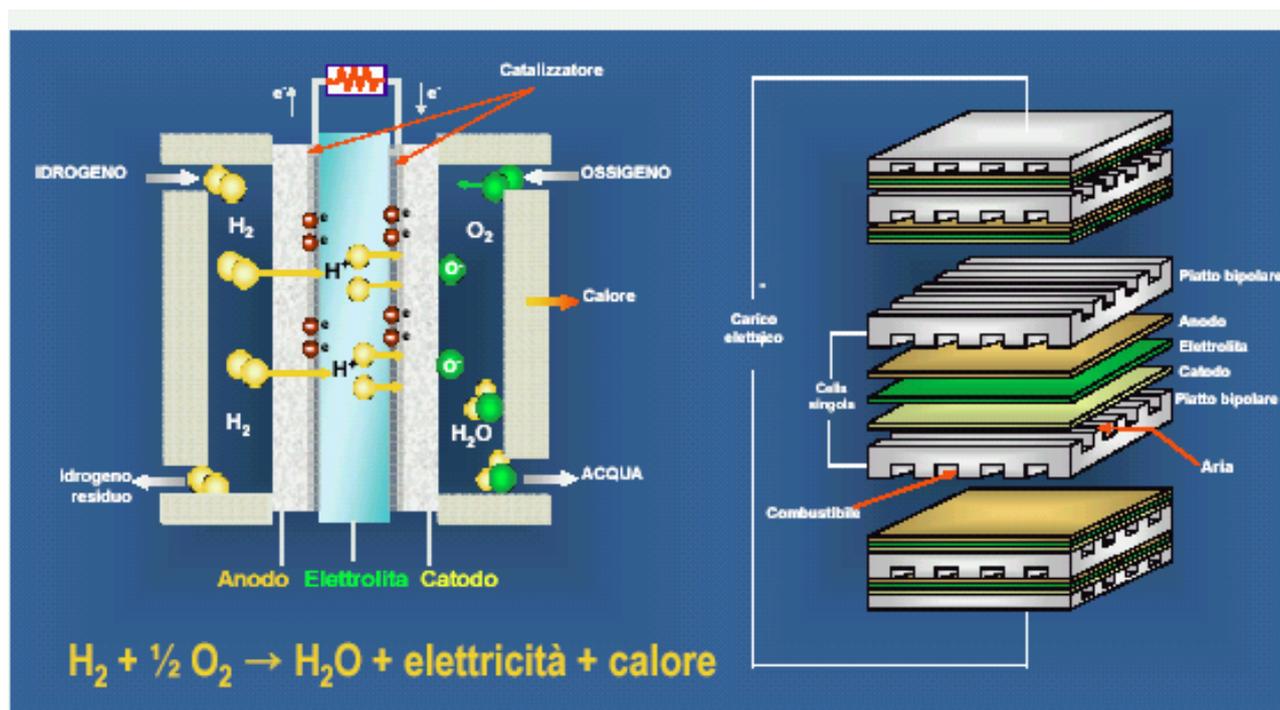
- Celle a combustibile
- Motori a combustione interna



Cosa è una cella a combustibile

È un sistema elettrochimico capace di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) direttamente in energia elettrica senza l'intervento intermedio di un ciclo termico, ottenendo pertanto rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali.

La nascita delle celle a combustibile risale al 1839, anno in cui l'inglese William Grove riportò i risultati di un esperimento nel corso del quale era riuscito a generare energia elettrica in una cella contenente acido solforico, dove erano stati immersi due elettrodi, costituiti da sottili fogli di platino, sui quali arrivavano rispettivamente idrogeno e ossigeno.



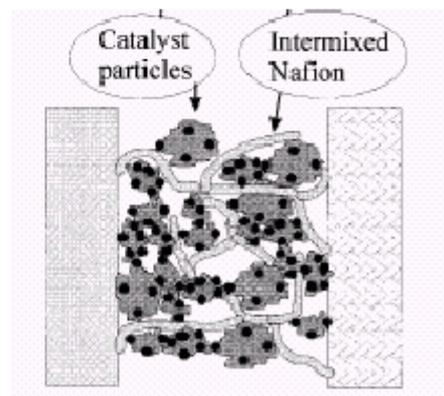
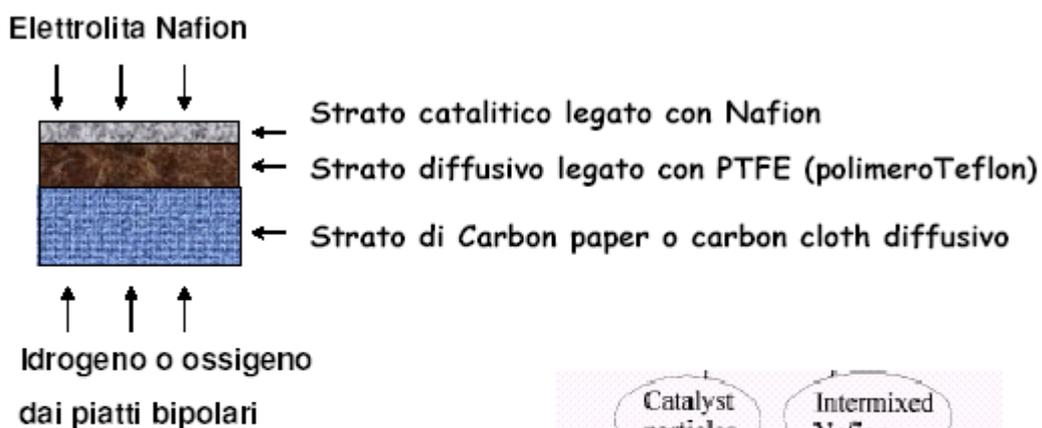
Una cella a combustibile è come una batteria: produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico consumando sostanze provenienti dall'esterno e quindi in grado di funzionare senza interruzioni finché al sistema viene fornito combustibile e ossidante.

Una singola cella a combustibile (idrogeno – ossigeno) produce una tensione di 0,7-0,9 V e correnti comprese tra 300 – 800 mA/cm², quindi per ottenere potenze e

voltaggi desiderati è necessario disporre in serie a mezzo di piatti bipolari più celle a formare i cosiddetto “**stack**”. Gli stack sono a loro volta assemblati in moduli per ottenere generatori della potenza richiesta.

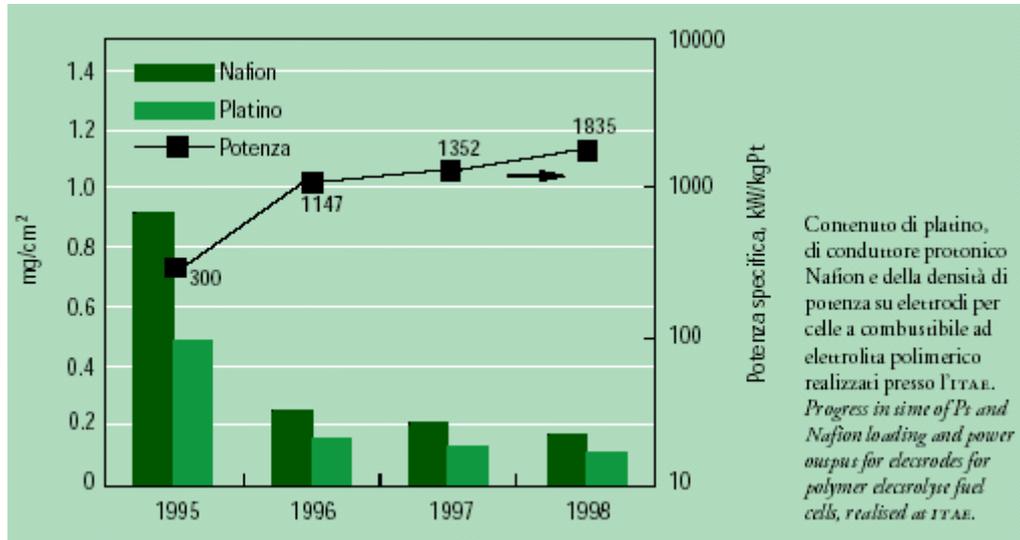
Nelle celle con elettrolita polimerico PEMFC usano come elettrolita una membrana polimerica ad elevata conducibilità protonica (Nafion[®] brevetto Du Pont) costituita da uno scheletro di perfluoroetilene reso idrofilo e conduttore attraverso l’inserimento di gruppi $-\text{SO}_3\text{H}$ che si dissociano in presenza di acqua liberando ioni H^+ in grado di muoversi attraverso i pori della membrana.

Struttura degli elettrodi



L'attuale elevato costo delle celle a combustibile PEM è dovuto principalmente alla membrana polimerica che deve essere opportunamente trattata e combinata con gli elettrodi che sono formati da un substrato rigido (**carbon paper**) o flessibile (**carbon cloth**), uno strato di carbone e uno strato catalitico composto da catalizzatore **Pt** disperso su carbone miscelato con **Nafion[®]** ($\text{Pt} = 0,5 \text{ mg/cm}^2$ di elettrodo)

Attualmente si stanno sperimentando nuove tecniche di applicazione a spray del catalizzatore sul substrato polimerico, riducendo di 4 volte il costo iniziale dell'elettrolita, ottenendo prodotti di migliore qualità.



Le celle vengono classificate sulla base dell'elettrolita utilizzato o alla temperatura di funzionamento.

L'elettrolita determina o condiziona fortemente:

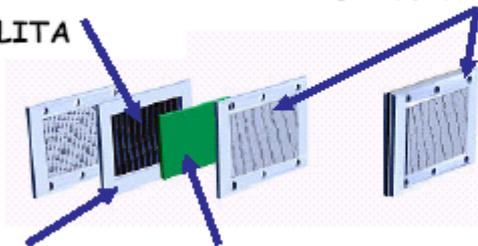
- Il campo di temperatura
- Il tipo di ioni e la direzione in cui diffondono attraverso la cella
- La natura dei materiali costruttivi
- La composizione dei gas reagenti
- Le modalità di smaltimento dei prodotti di reazione
- Le caratteristiche di resistenze dei prodotti di reazione
- La vita della cella

1 - CATALIZZATORE

2 - ELETTROLITA

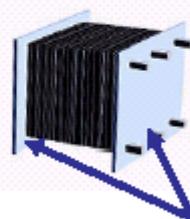
4 - PIATTI DISTRIBUZIONE GAS

5 - PIATTI RAFFREDDAMENTO



6 - GUARNIZIONI

3 - ELETTRIDI



7 - PIATTI DI SERRAGGIO



Stack completo, manca ancora il sistema di alimentazione ed umidificazione



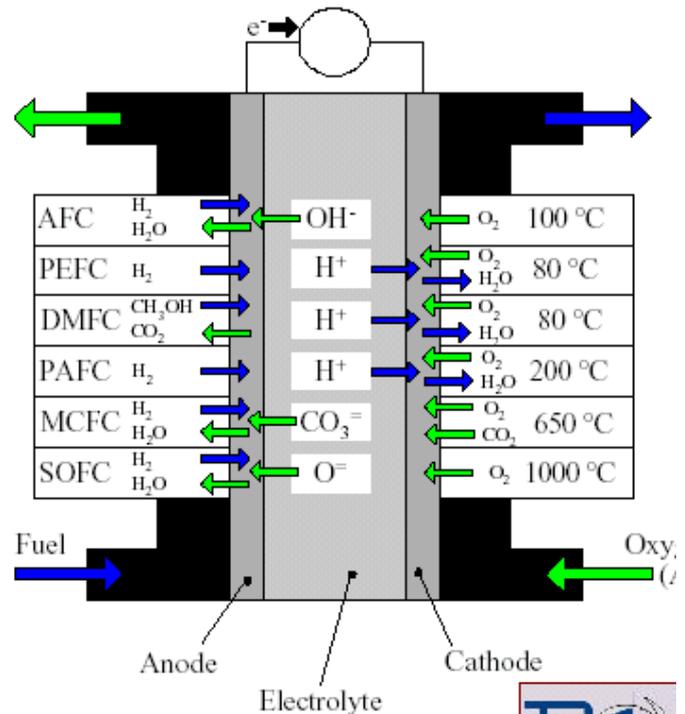
Sistema completo di generazione di energia elettrica a cella a combustibile di 5 kW di potenza presso ENEA

ENERGIA CHIMICA



ENERGIA ELETTRICA

CELLA A COMBUSTIBILE	ELETTROLITA
AFC	Alcalino
PEMFC	Polimerico
DMFC	Polimerico
PAFC	Acido Fosforico
MCFC	Carbonati Fusi
SOFC	Ossidi Solidi



Celle alcaline, AFC

- Temperatura: 60-120 °C
- Efficienza: 60%
- Stato tecnologia: 5-150 kW
- Mercati: Usi speciali (militari, spaziali)
Trasporto



Celle a carbonati fusi, MCFC

- Temperatura: 600-650 °C
- Efficienza: 45-55%
- Stato della tecnologia: 100 kW - 3 MW
- Applicazioni: Cogenerazione commerciale
Generazione distribuita
(impianti fino a 20 MW)



Celle ad elettrolita polimerico, PEMFC

- Temperatura: 70-100 °C
- Efficienza: 40%
- Stato tecnologia: 1-250 kW
- Applicazioni: Trasporto
Residenziale
Premium power
Generazione remota



Celle ad ossidi solidi, SOFC

- Temperatura: 800-1000 °C
- Efficienza: 45 - 60%
- Stato della tecnologia: 50 kW- 1 MW
- Applicazioni: Cogenerazione commerciale
Generazione distribuita
(impianti fino a 20 MW)
Trasporto (APU)



Celle ad acido fosforico, PAFC

- Temperatura: 160-220 °C
- Efficienza: 40-50%
- Stato della tecnologia: 50 kW - 1 MW
Impianti fino a 11 MW
- Applicazioni: Cogenerazione commerciale
Generazione distribuita



Celle metanolo diretto, DMFC

- Temperatura: 50-100 °C
- Efficienza: 30-40%
- Stato tecnologia: < 1kW
- Applicazioni: Generazione portatile
Elettronica di consumo



Termodinamica della cella PEM O₂ / H₂

L'energia massima disponibile in una cella che opera ad una temperatura e pressione costante, in condizioni di equilibrio è data variazione di energia libera di Gibbs associata alla reazione:



$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

$$\Delta G = - nFE_{\text{rev}}$$

dove

$$\Delta G = - 237 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H = - 286 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S = - 163 \text{ J/Kmol}$$

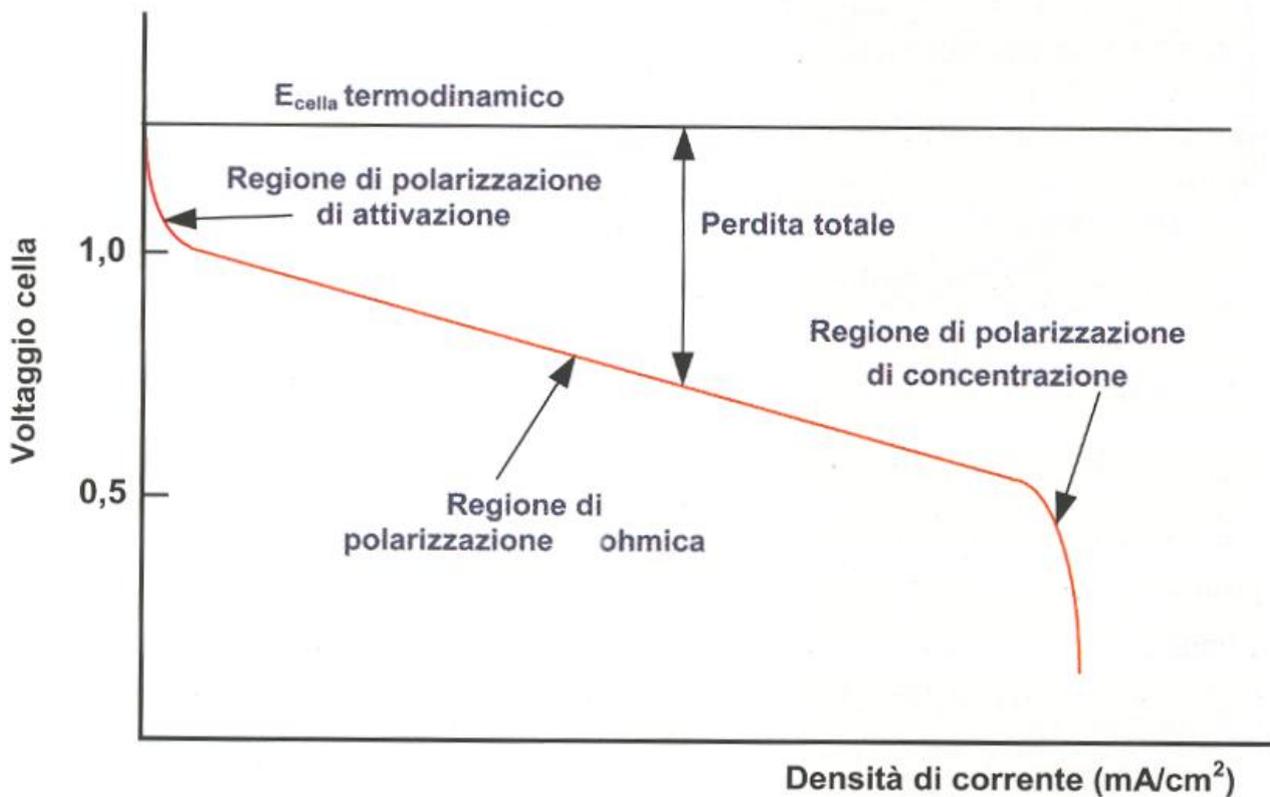
In tali condizioni la tensione massima termodinamica in cella a idrogeno-ossigeno che produce acqua in forma liquida è :

$$E_{\text{rev}} = - \frac{\Delta G}{nF} = 1.23 \text{ V}$$

e la quantità di calore prodotta :

$$Q_{\text{rev}} = T \cdot \Delta S = \Delta H - \Delta G = -49 \text{ kJ/mol}$$

La differenza di potenziale tra gli elettrodi è massima (E reversibile) quando non si ha passaggio di corrente nel circuito esterno, nel momento in cui questa comincia a circolare si ha un allontanamento dall'equilibrio a causa di fenomeni di polarizzazioni (sovratensioni). Si ha quindi una diminuzione dell'energia elettrica fornita rispetto a quella teorica con corrispondente aumento del calore prodotto.



Curva caratteristica tensione/densità di corrente

Polarizzazione di attivazione: collegata allo stadio lento della reazione agli elettrodi, contribuiscono questo tipo di polarizzazione processi che implicano adsorbimento di reagenti, trasferimento di elettroni attraverso il doppio strato, desorbimento di prodotti e la natura della superficie elettronica.

Polarizzazione ohmica: è causata dalla resistenza al flusso di elettroni nell'elettrolita e attraverso i materiali di elettrodo. La perdita più significativa è quella che si verifica nell'elettrolita e può venire ridotta diminuendo la distanza fra gli elettrodi e utilizzando elettroliti ad elevata conducibilità ionica.

Polarizzazione di concentrazione: è dovuta ai fenomeni di trasporto di massa che ostacolano le reazioni agli elettrodi ed è legata alla diffusione dei gas attraverso l'elettrodo, alla soluzione e dissoluzione dei reagenti e dei prodotti entro e fuori l'elettrolita.

Rendimento termodinamico della cella:

$$\varepsilon_T = \frac{\text{Lavoro Utile}_{el}}{H}$$

e può essere come il rapporto tra il massimo lavoro elettrico ottenibile e l'energia rilasciata dalla reazione:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{298 \text{ K} \left(-163 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}\right)}{-286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} = 0,83$$

PARTE SPERIMENTALE

1.1 - Esperimenti con elettrolizzatori PEM

L'elettrolizzatore PEM è un sistema elettrochimico che permette, mediante energia elettrica, l'elettrolisi dell'acqua ed ottenere in due serbatoi separati Idrogeno ed Ossigeno.

In definitiva è una apparecchiatura costituita da una cella a combustibile PEM provvista di opportuni serbatoi per l'accumulo dell'acqua distillata necessaria e la raccolta separata dei gas prodotti durante l'elettrolisi provocata applicando alla cella una differenza di potenziale opportuna dell'ordine di 1,5 –2,0 V .

1.1.1 - Caratteristica corrente tensione degli elettrolizzatori PEM

Premesse

Gli elettrolizzatori PEM scompongono l'acqua in idrogeno e ossigeno.

Il voltaggio applicato all'elettrolizzatore deve superare una certa soglia, deve essere raggiunta la "tensione di decomposizione" dell'acqua che teoricamente deve essere di 1,23 V, ma che per fenomeni di polarizzazione, deve essere superiore. Sotto questo valore non si avranno fenomeni di scomposizione. Lo scopo di questo esperimento è determinare l'intensità di tale voltaggio.

Apparecchiatura

- ⇒ Elettrolizzatore PEM
- ⇒ 2 multimetri
- ⇒ Sorgente elettrica
 - a) Alimentatore variabile, alimentatore elettrico di laboratorio
 - b) Altrimenti, Alimentatore elettrico non variabile come un modulo solare, in questo caso è necessario anche:
 - Una luce per operare con il modulo solare
 - Una decade di resistori, dotati di diverse resistenze o potenziometri

Installazione

- a) Collegare l'elettrolizzatore con la l'alimentatore variabile direttamente. Questo deve essere impostato a 0 V all'inizio e aumentato fino ad un massimo di 2 V.

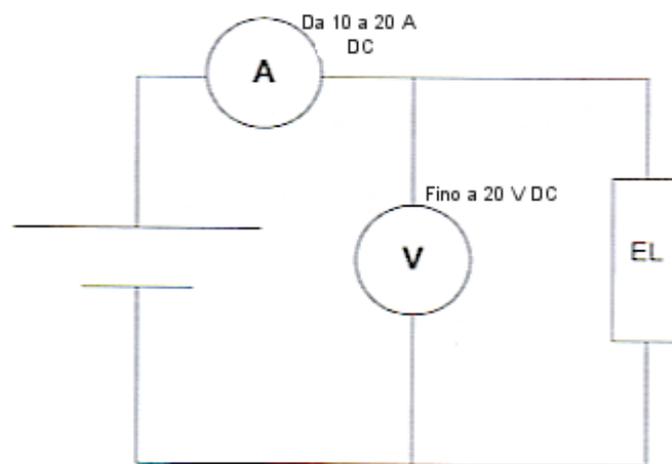


Figura 1 - Installazione per determinare la caratteristica corrente.tensione dell'elettrolizzatore, con un'alimentatore variabile

- b) Collegare gli apparati come mostrato in figura seguente (se non si dispone di alimentatore variabile):

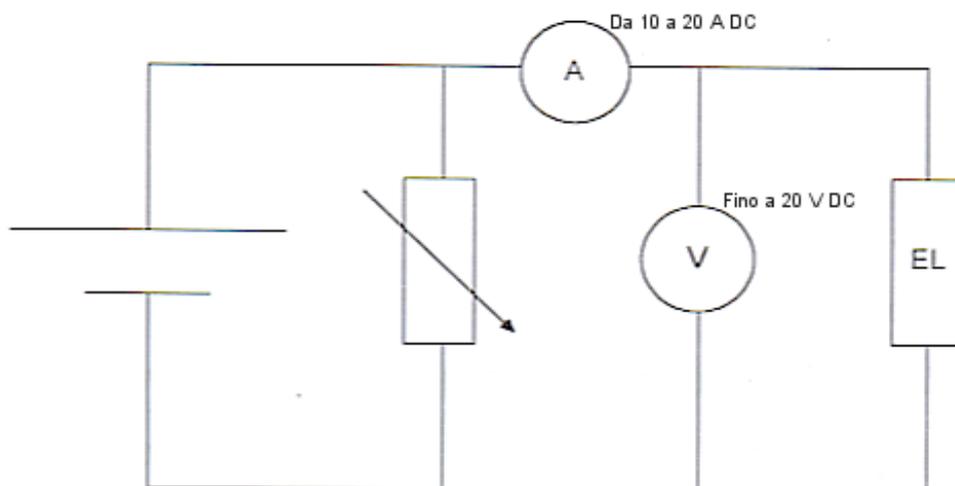


Figura 2- - Installazione per determinare la caratteristica corrente.tensione dell'elettrolizzatore, con un'alimentatore non variabile

Procedura

Mettere in operatività gli apparati secondo i rispettivi manuali di istruzioni.

- a) Incrementare continuamente il voltaggio per passi di 0,1 V da 0 a 2 V, registrando ogni valore e la rispettiva corrente in una tabella. Aspettare 20 secondi tra ogni coppia di misurazioni per ottenere valori attendibili. Prendere nota di quando si ha la formazione di gas e contrassegnare i valori di tensione a cui si sviluppa il fenomeno.
- b) Commutare i valori di resistenza della decade dal più basso al più alto, per ogni modifica registrare tensione e corrente. Aspettare circa 20 s tra ogni coppia di rilevamenti per ottenere valori attendibili. Prendere nota di quando si ha la formazione di gas e contrassegnare i valori a cui il fenomeno si sviluppa.

Esempio con Elettrolizzatore h-tech dalle caratteristiche di tabella:

dimensioni h x b x l	200 x 180 x 120 mm
Superficie elettrodo	16 cm ²
Potenza max	2W
Produzione Idrogeno/Ossigeno	8,6/4,3 cm ³ /min
I max	1 A - 2 A (di cautela)

MISURA	V (volts)	I (A)
1	1,100	0,002
2	1,207	0,002
3	1,308	0,002
4	1,400	0,010
5	1,507	0,106
6	1,550	0,283
7	1,602	0,559
8	1,653	0,865
9	1,675	0,990
10	1,686	1,055

Tabella 1 - Tabella delle misure. L'elettrolizzatore PEM non inizierà a produrre idrogeno fino a che un preciso valore di tensione continua non sarà applicato. Da questo momento in poi i valori di corrente aumenteranno. Questa tabella mostra i valori di corrente che variano al variare della tensione applicata.

Valutazione numerica

Tracciare le coppie di valori registrati su un grafico. La curva risultante è la caratteristica corrente-tensione dell'elettrolizzatore, che approssimativamente passa per l'intersezione di due tratti rettilinei (vedi esempio). Tracciare queste due linee attraverso i punti rappresentati e marcare il punto di intersezione ai piedi dell'asse delle tensioni (V).

Esempio utilizzando Electrolyzer dell'h-tec da 2 W:

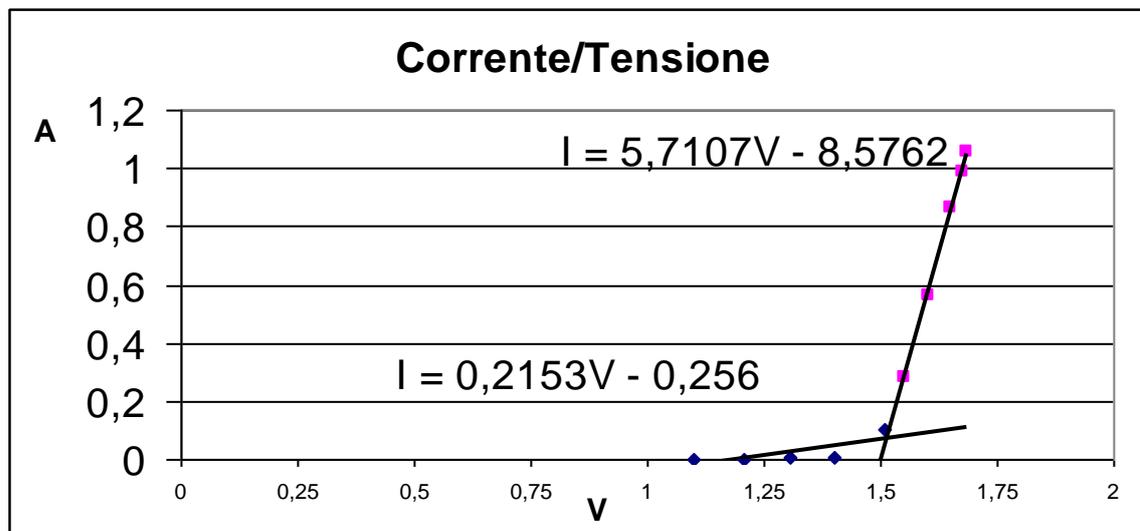


Figura 3 - Caratteristica corrente tensione dell'elettrolizzatore

Osservazioni

La relazione tra corrente e tensione è mostrata dalla Figura 3.

Dalla forma della curva è evidente che la corrente non comincia prima del raggiungimento di un opportuno valore di tensione.

Solo quando inizia un flusso di corrente rilevabile, l'acqua comincia a scomporsi in idrogeno e ossigeno. Nel nostro esempio occorre raggiungere una tensione di 1,501 V (vedi Tabella 1).

Tuttavia il voltaggio di decomposizione è inferiore. Esso è rappresentato dal punto di intersezione della retta ripida con le ascisse (V).

Il voltaggio teorico di decomposizione è 1,23 V. Sotto tale valore nessuna decomposizione avrà luogo. In pratica, tuttavia, il voltaggio ottenuto è maggiore come risultato di un sovravoltaggio. La differenza tra i due valori dipende da svariati fattori, es composizione dei materiali dell'elettrodo, elettrolita e temperatura.

1.1.2 - Efficienza energetica e Efficienza di Farady dell'elettrolizzatore PEM

Apparati

- Elettrolizzatore PEM
- Serbatoi graduati per l'idrogeno per scopi sperimentali
- 2 multimetri
- Cronometro
- Alimentatore
 - a) Variabile da laboratorio

- b) Altrimenti: A. non variabile come il modulo solare, in questo caso è inoltre necessario:
- Una luce necessaria per operare con il modulo solare
 - Una decade di resistori, dotati di resistenze o potenziometri diversi.

Installazione

- a) Collegare direttamente l'elettrolizzatore all'alimentatore variabile. Impostare il voltaggio compreso tra 1,5 V e 2 V (es 1,8 V).

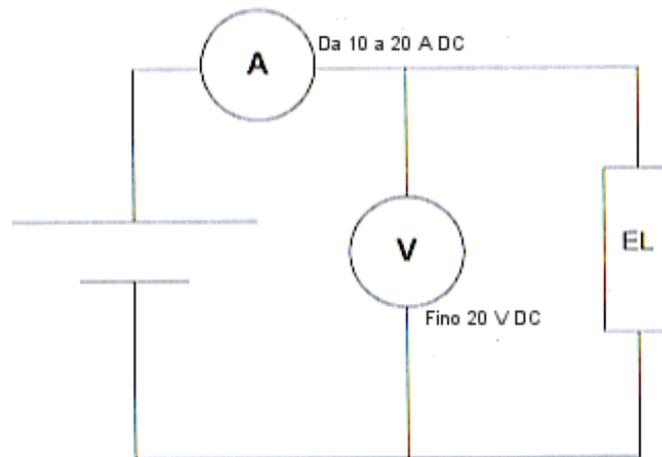


Figura 4 - Installazione per determinare l'efficienza energetica e di Faraday dell'elettrolizzatore con un'alimentatore variabile

- b) Collegare gli apparati come mostrato nella figura seguente:

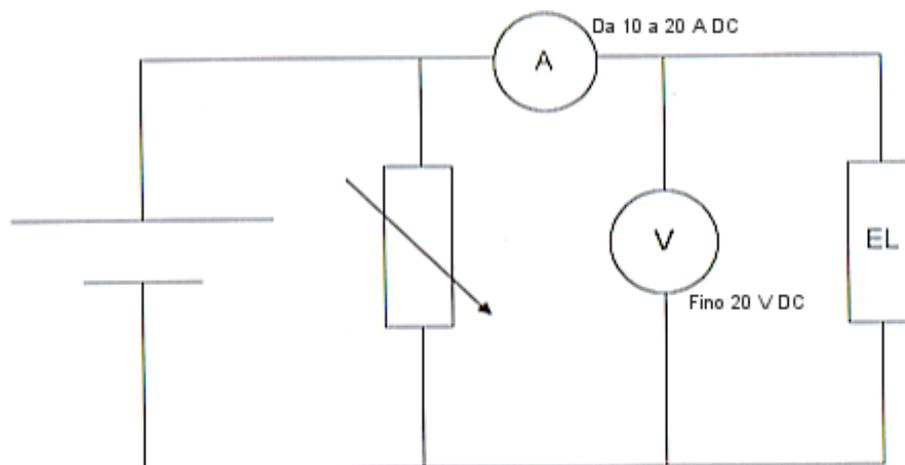


Figura 5 - Installazione per la determinazione dell'efficienza energetica e di Faraday dell'elettrolizzatore con un'alimentatore fisso

Procedura

Mettere in operatività gli apparati secondo le rispettive istruzioni.

Permettere la produzione del gas per alcuni minuti prima di iniziare l'esperimento dopodiché interrompere l'alimentazione all'elettrolizzatore. Aprire le bocche di uscita dai serbatoi del gas per rilasciare completamente i gas prodotti. Quando i serbatoi sono completamente svuotati riempirli

completamente di acqua distillata. In altre parole il livello dell'acqua deve raggiungere la tacca che indica 0 cmc. Chiudere le bocche di uscita dei gas dei serbatoi.

Iniziare a misurare il tempo in cui si chiude di nuovo il circuito (elettrolizzatore con l'alimentazione). Registrare il voltaggio applicato all'elettrolizzatore e la corrente che lo attraversa. Registrare il tempo trascorso, corrente, tensione appena si raggiunge la tacca di graduazione principale. Prendere gli ultimi dati quando il serbatoio raggiunge la massima capienza di idrogeno (30 cm³ per esempio).

t(s)	VH ₂ (cm ³)	I (A)	V (Volt)	P (W)	f (cm ³ /min)	Eel (J)	
0	0	0,930	1,662	1,55			
60	5	0,918	1,664	1,53	5,00	91,65	
110	10	0,910	1,666	1,52	6,00	75,80	
150	15	0,905	1,666	1,51	7,50	60,31	
195	20	0,902	1,666	1,50	6,67	67,62	
240	25	0,908	1,668	1,51	6,67	68,15	
280	30	0,898	1,667	1,50	7,50	59,88	
I media (A)		0,910				Eel Tot (J).=	423,42
eff=		0,90					

Tabella 2 - Tabella delle misure, L'elettrolizzatore PEM produce continuamente idrogeno e ossigeno se una tensione continua sufficiente è applicata. Il tempo, corrente e tensione sono stati registrati per incrementi di volume di idrogeno noti (es 5 cmc)

Efficienza energetica

Premesse

L'efficienza energetica $\eta_{energetica}$ rappresenta la parte dell'energia entrante ($E_{ingresso}$) che lascia il sistema sotto forma di energia utile (E_{utile}), nel nostro caso l'elettrolizzatore.

$$\eta_{energetica} = \frac{E_{utile}}{E_{ingresso}} = \frac{E_{idrogeno}}{E_{elettrica}}$$

Analisi numerica (parte 1)

Rappresentare i dati registrati in un grafico indicante il volume del gas prodotto in funzione del tempo.

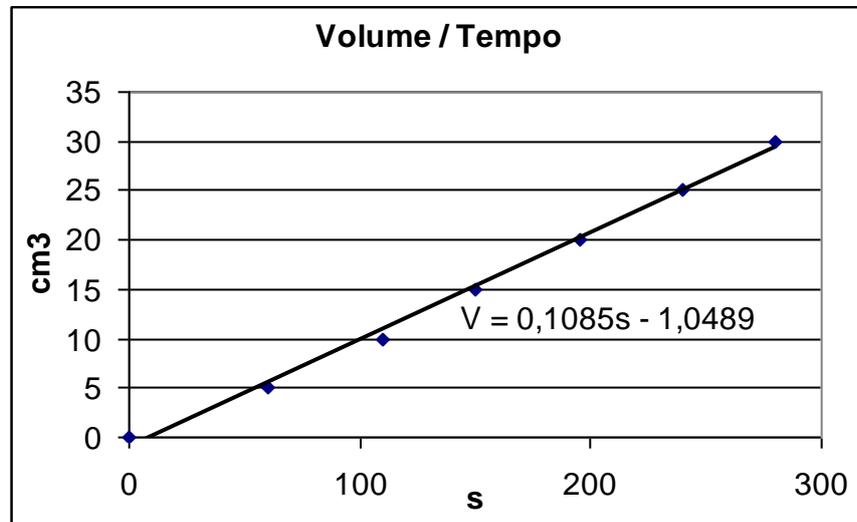


Figura 6 - Volume del gas dell'elettrolizzatore in funzione del tempo (ad una $\bar{P} = 1,52 \text{ W}$)

Analisi numerica (parte 2)

Calcolare l'efficienza energetica dell'elettrolizzatore.

$$\eta_{\text{energetica}} = \frac{E_{\text{idrogeno}}}{E_{\text{elettrica}}} = \frac{V_{\text{H}_2} \cdot H_0}{E_{\text{el tot.}}}$$
$$\eta_{\text{energetica}} = \frac{30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 12,745 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}}{423.42 \text{ J}} = 0,90 = 90\%$$

H_0 : Valore calorifico superiore dell'idrogeno pari a $12,745 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{mc}}$

V_{H_2} : volume di idrogeno prodotto

Osservazioni

E' evidente dalla tabella che il consumo elettrico dell'elettrolizzatore è abbastanza costante nel tempo. Anche la produzione di idrogeno è abbastanza costante come si può vedere dal grafico, il volume di gas prodotto è una funzione lineare del tempo.

L'efficienza energetica dell'elettrolizzatore nel nostro esempio è del 90 %. Questo significa che il 90% dell'energia elettrica assorbita è immagazzinata nell'idrogeno. Le perdite prodotte come la combinazione di sovravoltaggi sono generalmente definite come deviazioni dal voltaggio teorico da quello sperimentale, la resistenza interna della cella elettrolitica e dalle perdite per diffusione dei gas nella cella.

Calcolo dell'efficienza energetica a varie condizioni di esercizio

t(s)	VH ₂ (cm ³)	I (A)	V (Volt)	P (W)	f (cm ³ /min)	Eel (J)	
0	0	0,563	1,595	0,90			
110	5	0,540	1,601	0,86	2,73	95,10	
190	10	0,536	1,602	0,86	3,75	68,69	
270	15	0,531	1,604	0,85	3,75	68,14	
340	20	0,530	1,604	0,85	4,29	59,51	
420	25	0,526	1,605	0,84	3,75	67,54	
500	30	0,523	1,606	0,84	3,75	67,20	
Imedia (A)		0,536				Eel Tot (J).=	426,17
eff=		0,90					

t(s)	VH ₂ (cm ³)	I (A)	V (Volt)	P (W)	f (cm ³ /min)	Eel (J)	
0	0	0,730	1,626	1,19			
60	5	0,713	1,631	1,16	5,00	69,77	
120	10	0,709	1,632	1,16	5,00	69,43	
180	15	0,704	1,633	1,15	5,00	68,98	
230	20	0,694	1,632	1,13	6,00	56,63	
290	25	0,691	1,633	1,13	5,00	67,70	
360	30	0,689	1,634	1,13	4,29	78,81	
Imedia (A)		0,704				Eel Tot (J).=	411,32
eff=		0,93					

Efficienza di Faraday dell'elettrolizzatore PEM

Premesse

La prima legge di Faraday dell'elettrolisi descrive la relazione esistente tra l'intensità della corrente e il volume di gas prodotto. Deriva dal fatto che un atomo di idrogeno viene prodotto per ogni elettrone che ha contribuito al flusso di corrente. La relazione tra corrente e elettroni è $I = \frac{Q}{t}$ (I corrente, Q carica, t tempo). L'efficienza di Faraday dell'elettrolizzatore è ottenuta dal rapporto di volume di gas prodotto con la potenza elettrica.

Valutazione Numerica

La prima legge di Faraday dell'elettrolisi dice:

$$V = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z}$$

V: volume teorico di gas prodotto in m³

R: costante universale dei gas pari a $8,314 \frac{J}{K \cdot mol}$

p = Pressione ambiente in Pa ($1Pa=1 \frac{N}{m^2}$)

F = Costante di faraday = $96485 \frac{C}{mol}$ ($1C = 1A \cdot s$)

T = temperatura ambiente in K

I = corrente in A

t = tempo in s

z = numero di elettroni rilasciati per ogni molecola:

z (H₂) = 2 significa 2 moli di elettroni sono necessari per produrre 1 mole di idrogeno

z (O₂) = 4

$$V_{\text{calcolato}} = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} = \frac{8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot XXX \text{ A} \cdot 293 \text{ K} \cdot XXXs}{96485 \frac{C}{mol} \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 2}$$

L'efficienza di Faraday si ottiene dalla seguente formula:

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{V_{\text{prodotto}}}{V_{\text{teorico}}}$$

L'efficienza di Faraday sarà allora:

N°prova	Volumi teorici (cm ³)	Vprodotto	eff Faraday
1	31,8	30	0,94
2	33,4	30	0,90
3	31,6	30	0,95

Osservazioni

La differenza tra il valore teorico ($\eta=1$) e il valori sperimentali ($\eta=0,90 - 0,95$) è del 10-6%. Questo è dovuto agli errori di misura e dalle perdite per diffusione dei gas nella cella. La perdita per diffusione del gas deriva dal fatto che una parte del gas diffonde attraverso la membrana

dell'elettrolizzatore e reagisce a contatto con il catalizzatore per formare acqua. Una piccola parte del gas prodotto è tuttavia immediatamente riconvertita senza iniziare a fuoriuscire dalla cella.

1.2 - Esperimenti con la cella a combustibile PEM

1.2.1 - Caratteristica corrente tensione e curva di potenza di una cella a combustibile PEM

Premesse

La cella a combustibile converte energia chimica contenuta in ossigeno e idrogeno direttamente in energia elettrica. Idrogeno e ossigeno reagiscono formando acqua, elettricità e calore durante il processo.

La potenza erogata dalla cella dipende dal carico applicato. L'anima dell'esperimento seguente è quella di determinare la resistenza e quindi la corrente per il miglior rendimento elettrico.

Apparati

- Cella a combustibile PEM
- 2 multimetri
- Decade di resistori, con differenti valori di resistenze o potenziometri
- Sorgente di idrogeno
 - a) Serbatoio di idrogeno
 - b) Altrimenti: elettrolizzatore e in questo caso anche:
 - Una sorgente elettrica come un modulo solare o un alimentatore elettrico da laboratorio
 - Una luce necessaria al funzionamento del modulo solare

Per questo esperimento la cella a combustibile deve essere ben umida (vedi le relative istruzioni). Tuttavia, se c'è troppa acqua all'interno della cella a combustibile, questa può ostruire il flusso dei gas e quindi non funzionare a dovere.

Si raccomanda quanto segue:

- ⇒ Quando si inizia ad operare con la cella a combustibile seguire il manuale delle istruzioni;
- ⇒ Smettere di operare per il tempo del collegamento dell'alimentazione elettrica all'elettrolizzatore e scollegare il carico dalla cella a combustibile;
- ⇒ Rimuovere i tubi di alimentazione principali dei gas dalla cella a combustibile, aprire le bocchette della cella a combustibile e dare una breve e decisa soffiata da ambo i lati. In modo da forzare la fuoriuscita dell'acqua.
- ⇒ Chiudere le bocchette di nuovo e collegare i tubi dei serbatoi.

Installazione:

Collegare gli apparati come mostrato nello schema elettrico della figura seguente :

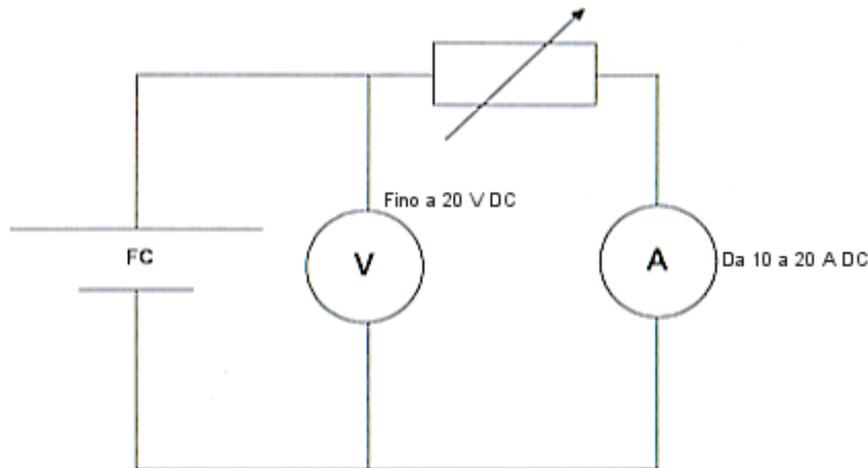


Figura 7- Installazione per determinare la caratteristica corrente-tensione (FC cella a combustibile)

Procedura

Mettere in operatività gli apparati secondo i rispettivi manuali delle istruzioni

- a) Chiudere le valvole di uscita della cella a combustibile. Connettere bocche di uscita dell'idrogeno dalla sorgente alle bocche di alimentazione della cella a combustibile (vedi il manuale delle istruzioni). Aprire le valvole di uscite della cella a combustibile , spurgare leggermente la cella con l'idrogeno e quindi richiudere le valvole nuovamente. Questo per rimuove i gas residui che causerebbero errori nelle misure. Per evitare avviamenti indesiderati della cella a combustibile prima di ogni misurazione lasciare il circuito aperto (morsetti aperti, nessuna corrente).

Mentre si registrano le caratteristiche corrente-tensione iniziare con il circuito aperto. Modificare il valore della decade di resistori o potenziometri da un valore elevato ad uno inferiore e per ogni variazione misure e registrare tensione e corrente . Tra ogni coppia di rilevamenti lasciar trascorrere 20 secondi.

- b) Collegare l'elettrolizzatore all'alimentatore per produrre idrogeno e ossigeno. Collegare le bocche di uscita dell'elettrolizzatore (meglio se con un serbatoio graduato per scopi di laboratorio) agli ingressi della cella a combustibile. Chiudere le uscite della cella a combustibile. Dopo la produzione di almeno 5 cm^3 di idrogeno, aprire le uscite della cella a combustibile, spurgare con il gas e richiudere di nuovo le uscite. Questo per rimuove i residui di gas che causano errori nelle misure. Per prevenire il consumo di idrogeno da parte della cella a combustibile prima dell'esecuzione delle misure, aprire il circuito elettrico (morsetti aperti = circuito aperto = no corrente).

Ora iniziare la produzione di idrogeno. Iniziare a registrare i valori della caratteristica corrente - tensione con il circuito aperto ($R = \infty$), dopodiché variare il valore della decade di resistori da un valore elevato ad uno inferiore. Misurare e registrare i valori di corrente e tensione per ogni variazione di resistenza. Per ottenere dati rappresentativi lasciar trascorrere 20 secondi circa tra ogni coppia di misure.

Esempio (utilizzando il JuniorBasic Hydrogen Experimentation System di h-tec)

R(Ω)	U(V)	I (A)	P(W): P=V-I
∞	0.99	0.00	0.000
330	0.97	0.01	0.001
100	0.94	0.01	0.001
33	0.90	0.03	0.027
10	0.84	0.08	0.075
3.3	0.76	0.22	0.167
1	0.62	0.56	0.347
0.33	0.47	1.05	0.494
0.1	0.32	1.43	0.458
0	0.24	1.61	0.386

Tabella 3 - Tabella delle misure, Misure di tensione e corrente della cella a combustibile per diversi carichi di resistenza

Valutazione Numerica

Tracciare un diagramma dei valori tensione/corrente registrati come in figura seguente:

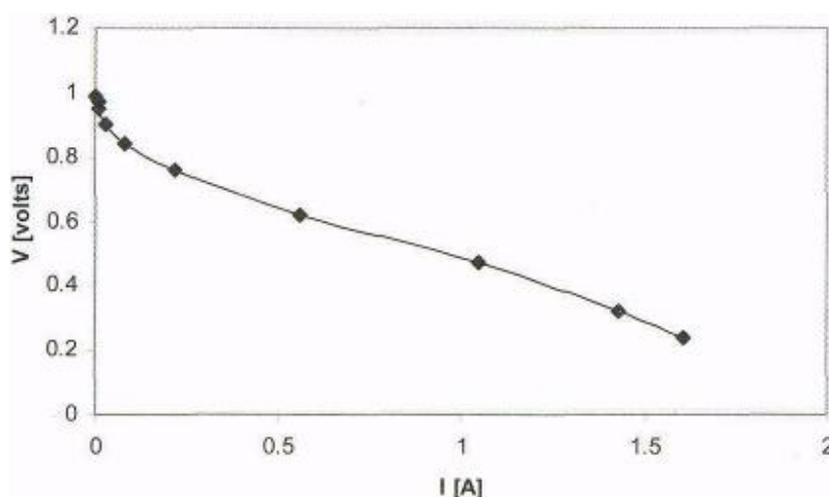
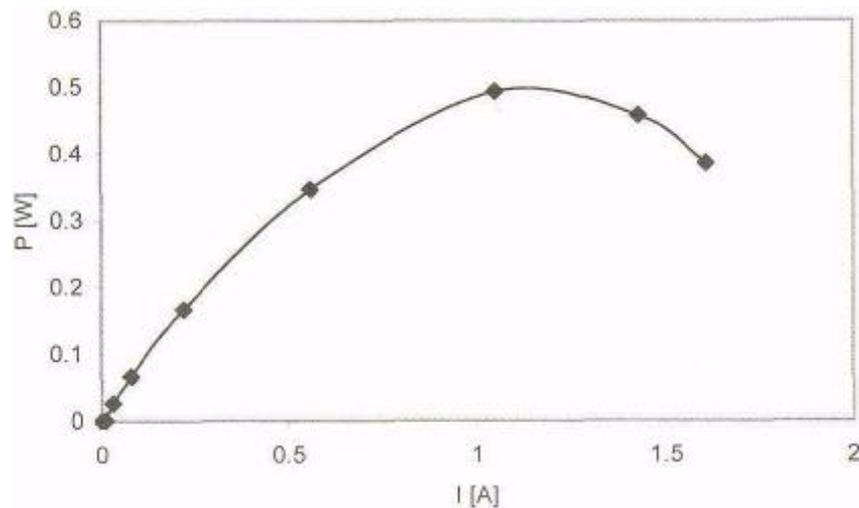


Figura 8 - Grafico della caratteristica tensione corrente della cella a combustibile

Tracciare la curva di potenze in funzione della corrente della cella a combustibile come mostrato in figura seguente:



Osservazioni

La corrente alla quale la cella a combustibile eroga la massima potenza è chiaramente visibile dalla curva della potenza. La massima potenza è raggiunta per una corrente di 1,05 A alla quale corrisponde un carico applicato di 0,33 Ω . Il carico deve perciò essere 0,33 Ω se si vuole il raggiungere il massimo trasferimento di energia.

1.2.2 - Efficienza energetica e di Faraday della cella a combustibile PEM

Prima di iniziare gli esperimenti leggere le Precauzioni di sicurezza nel manuale delle istruzioni.

Apparecchiatura

- ⇒ Cella a combustibile PEM
- ⇒ Sorgente di idrogeno come elettrolizzatore PEM con un serbatoio graduato
- ⇒ Un alimentatore nel caso venga utilizzato un elettrolizzatore, un modulo solare.
- ⇒ Una luce se si utilizza il modulo solare
- ⇒ 2 multimetri
- ⇒ decade di resistori con vari valori di resistenza
- ⇒ Cronometro

Installazione

Collegare gli apparati come mostrato in figura dallo schema elettrico:

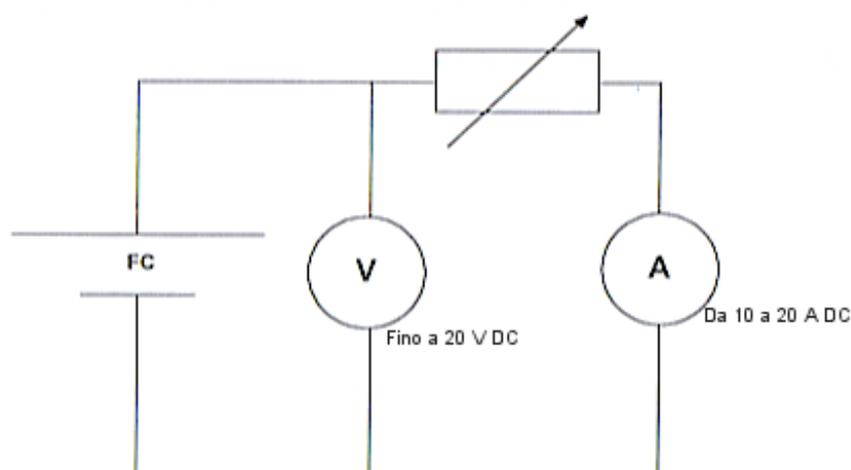


Figura 9 - Installazione per la determinazione dell'efficienza energetica e di faraday della cella a combustibile

Procedura

Mettere in funzione gli apparati secondo i rispettivi manuali delle istruzioni.

Collegare le uscite dei serbatoi di idrogeno agli ingressi della cella a combustibile. Chiudere le valvole di uscite della cella a combustibile. Produrre circa 20 cm³ di idrogeno e rapidamente aprire i morsetti di uscita della cella a combustibile per ventilarla. Produrre il massimo volume di idrogeno possibile con l'apparato. Interrompere l'alimentazione all'elettrolizzatore. Scollegare elettricamente la cella a combustibile e la decade di resistori. Commutare la decade di resistori al valore al quale si intende determinare l'efficienza energetica (es 3,3 Ω). Ricollegare il circuito tra la cella a combustibile e la decade di resistori e iniziare a misurare il tempo trascorso da questo istante.

Registrare tempo, corrente, tensione per ogni incremento di volume di gas fissato (es 5 cm³) senza modificare il valore della resistenza.

Assicurarsi che il valore della corrente non fluttui troppo. Una sostanziale diminuzione della corrente durante l'esperimento si dovrebbe avere per residui di gas che impediscono le operazioni della cella a combustibile rimanendo nei serbatoi. Questo problema diventerà trascurabile solo quando rimarrà poco idrogeno nel serbatoio. (es 5 cm³).

Esempio (usando JunioBasic Hydrogen Experiment System)

V H ₂ [cm ³]	t[s]	V [volts]	I [A]	P[W] P=V·I
20	0	0.813	0.128	0.104
15	281	0.770	0.120	0.092

V H ₂ [cm ³]	t[s]	V [volts]	I [A]	P[W] P=V·I
10	605	0.678	0.106	0.072
Significa		$\bar{V} = 0.754$	$\bar{I} = 0.118$	$\bar{P} = P = 0.089$

Tabella 4 - Tabella delle misure, la cella a combustibile converte continuamente idrogeno e ossigeno in energia elettrica. I valori del tempo, tensione e corrente per precisi valori di consumo dell'idrogeno (es 5cmc) sono registrati in questa tabella.

Efficienza energetica della cella a combustibile PEM

Premesse

L'efficienza energetica $\eta_{\text{energetica}}$ rappresenta la parte dell'energia in ingresso E_{ingresso} che lascia il sistema, nel nostro caso la cella a combustibile, sotto forma di energia utilizzabile E_{utile} .

$$\eta_{\text{energetica}} = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{ingresso}}} = \frac{E_{\text{elettrica}}}{E_{\text{idrogeno}}}$$

Valutazione numerica (parte 1)

Tracciare un diagramma con il volume di gas consumato in funzione del tempo come la seguente figura:

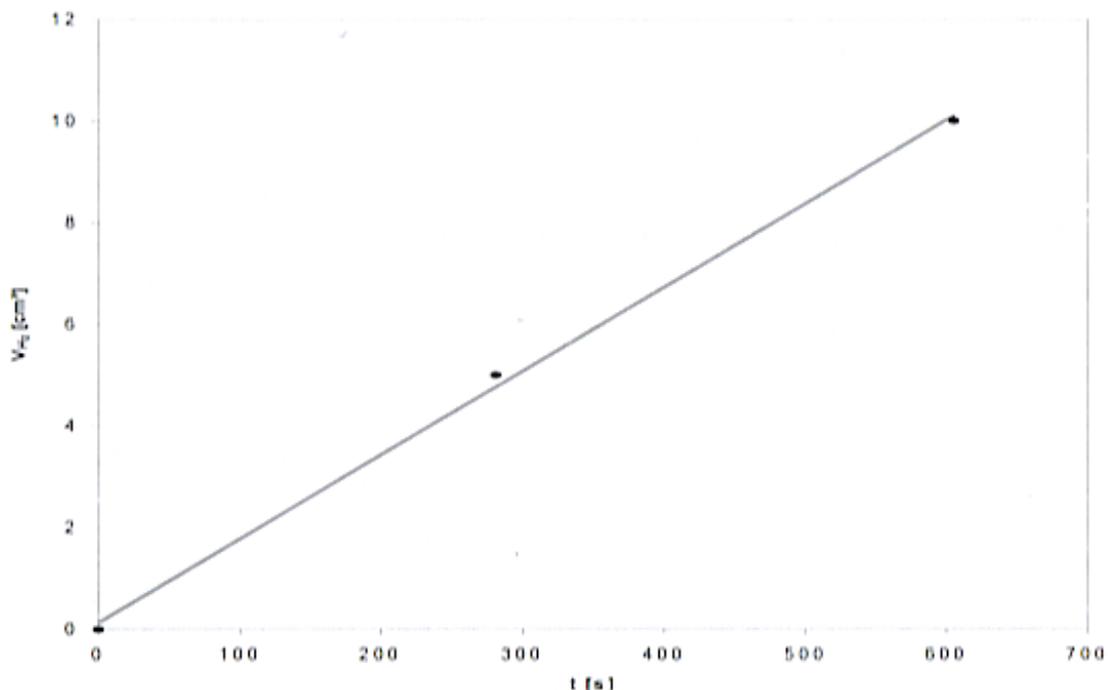


Figura 1 - Grafico dell'idrogeno consumato dalla cella a combustibile in funzione del tempo ad una $\bar{P} = 0,089 \text{ W}$

Valutazione numerica (parte 2)

Calcolo dell'efficienza energetica della cella a combustibile

Esempio (utilizzando il JuniorBasic Hydrogen Experimental System di h-tec):

$$\eta_{\text{energetica}} = \frac{E_{\text{elettrica}}}{E_{\text{idrogeno}}} = \frac{\bar{V} \cdot \bar{I} \cdot t}{V_{H_2} \cdot H_l}$$

$$\eta_{\text{energetica}} = \frac{0,754 \text{ V} \cdot 0,118 \text{ A} \cdot 605 \text{ s}}{10 \cdot 10^{-6} \text{ mc} \cdot 10,8 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{mc}}} = 0,498 \approx 50\%$$

H_l : Potere calorifico inferiore dell'idrogeno

V_{H_2} : volume di idrogeno consumato in m^3

V: tensione in volt

I: corrente in A

T: tempo trascorso in s

Osservazioni

E' evidente dalla tabella che la potenza elettrica in uscita dalla cella a combustibile è approssimativamente costante. Anche il consumo di idrogeno è costante, come si vede dal grafico consumo di idrogeno nel tempo, il consumo è proporzionale al tempo trascorso.

L'efficienza energetica della cella a combustibile nel nostro esempio è del 50%. Questo significa che il 50 % dell'energia contenuta nell'idrogeno che passa attraverso la cella a combustibile è erogato sotto forma di energia elettrica. La cella a combustibile produce anche calore. Se non viene utilizzato il calore generato questo è da considerarsi energia persa. L'efficienza ideale η_{id} bisogna è definita come il rapporto dell'entalpia libera di reazione ΔG (il lavoro rilasciato durante le operazioni es. energia elettrica) con l'entalpia ΔH (energia rilascia durante la reazione)

$$\eta_{\text{id}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

La differenza tra l'entalpia libera di reazione e l'entalpia di reazione è il calore rilasciato $Q = T \cdot \Delta S$.

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S$$

$$\eta_{\text{id}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{298 \text{ K} (-162,985 \frac{\text{J}}{\text{k mol}})}{-285840 \frac{\text{J}}{\text{mol}}} = 0,83 = 83\%$$

T = temperatura = 298 K

$$\Delta S: \text{Entropia di reazione} = -162,985 \frac{\text{J}}{\text{k mol}}$$

$$\Delta H: \text{Entalpia di reazione} = -285840 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Cadute di tensione, che possono manifestarsi anche come calore, riducono ulteriormente l'efficienza. Come risultato di tensioni maggiori dovuti a particolari elettrodi, la resistenza interna della cella a combustibile e perdite per diffusione con la cella a combustibile, la tensione raggiungibile ai terminali non raggiungerà mai il valore ideale di 1,23 V.

Nello stesso modo all'elettrolizzatore, l'efficienza della cella a combustibile è fortemente dipendente dal livello di potenza. Se il carico ha una resistenza elettrica alta, sebbene l'efficienza della cella è alta opera solo sotto particolari carichi. La potenza estratta è tuttavia minore di quella che può produrre.

Per accertarsi delle resistenza di carico con cui l'efficienze della cella a combustibile è maggiore, questo esperimento può essere ripetuto con diversi valori di resistenza di carico.

Efficienza di Faraday della cella a combustibile PEM

Premesse

La prima legge dell'elettrolisi di Farady mette relazione l'intensità di corrente fluente al consumo di gas che si ha. Segue dal principio che un atomo consumato di idrogeno ha un elettrone che contribuisce al flusso di corrente. La relazione tra corrente ed elettroni è $I = Q/t$ (I corrente, Q carica, t tempo). L'efficienza di Faraday della cella a combustibile si ottiene dal rapporto del volume calcolato di gas consumato, per produrre quella quantità di potenza, per il volume di gas effettivamente consumato.

Valutazione numerica

La prima legge di Faraday dell'elettrolisi dice:

$$V = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z}$$

V: volume teorico di gas consumato in mc

R: costante universale dei gas pari a $8,314 \frac{\text{J}}{\text{k} \cdot \text{mol}}$

p= Pressione ambiente in Pa ($1\text{Pa}=1 \frac{\text{N}}{\text{mq}}$)

$$F = \text{Costante di Faraday} = 96485 \frac{C}{mol} (1C = 1A \cdot s)$$

T = temperatura ambiente in K

I = corrente in A

t = tempo in s

Z = numero di elettroni rilasciati per ogni molecola:

$z(\text{H}_2) = 2$ significa 2 moli di elettroni sono necessari per produrre 1 mole di idrogeno

$z(\text{O}_2) = 4$

L'efficienza di Faraday si ottiene dalla seguente formula:

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{V_{\text{teorico}}}{V_{\text{consumato}}}$$

Il volume di gas consumato nell'esperimento è 10 cm^3

$$V_{\text{calcolato}} = \frac{R \cdot \bar{I} \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} = \frac{8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot 0,118 \text{ A} \cdot 293 \text{ K} \cdot 605 \text{ s}}{96485 \frac{C}{mol} \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 2} = 8,89 \text{ cmc}$$

Per cui l'efficienza di Faraday sarà:

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{8,89}{10} = 0,889 \approx 89\%$$

Osservazioni

Il volume di gas consumato è ovviamente maggiore di quello calcolato, siccome si generano perdite per diffusione nell'elettrolizzatore e nella cella a combustibile.

Tuttavia, secondo i risultati sperimentali l'efficienza di Faraday è significativamente peggiore di quella dell'elettrolizzatore. Questo è dovuto alla bassa corrente fluente. Rispettando i risultati di Faraday questi necessitano di maggior tempo per creare un volume di acqua da scomporre. Su un lungo periodo più idrogeno si diffonde attraverso la membrana e non è disponibile per la produzione di elettricità.