

CARLO ZAMPARELLI

**STORIA, SCIENZA E LEGGENDA
DEGLI SPECCHI USTORI DI ARCHIMEDE**



2005

DAI LEGGENDARI SPECCHI USTORI DI
ARCHIMEDE ALLE MODERNE CENTRALI
ELETTRICHE SOLARI, OVE SI NARRA
DELLA FERTILE SCIENZA UMANA DEGLI
ANTICHI CON NOVISSIME FIGURE
RIPORTATE E FATTI MIRABILI
COMMENTATI A CONFUTAZIONE DEGLI
SCETTICI E PER LA COMPrensIONE DEI
NOVELLI MARCHINGEGNI CHE UOMINI ED
ARCHITETTI MODERNI APPARECCHIANO
PER LA FELICITÀ ED ONNIPOTENZA
DELLA NOSTRA ERA.

Prima stesura: 5 maggio 2005

Opera originale di:

Carlo Zamparelli
Pisa – Via Carducci 17
Tel. 050-556207
e-mail: carlo_zamparelli@fastwebnet.it

Tutti i diritti riservati
Non è consentito effettuare copie, anche
parziali, del presente lavoro, se non dietro
esplicita autorizzazione dell'autore.

Riassunto

Archimede impiegò realmente gli specchi ustori, così come ci è stato leggendariamente tramandato da secoli? E' possibile oggi ripetere la sua impresa, impiegando la tecnologia dell'epoca?

Per rispondere a queste domande si è preliminarmente svolto un excursus storico, dall'epoca di Archimede ai nostri giorni, in merito alle conoscenze tecniche e scientifiche che potrebbero essere state alla base, epoca per epoca, dei numerosi tentativi di emulare il grande scienziato siracusano.

Per quanto riguarda il periodo classico si commentano le principali fonti storiche e letterarie che riportano la presa di Siracusa da parte dei Romani, nel 212 a.C., e le macchine belliche archimedee, alla ricerca, spesso vana, di qualche accenno agli specchi ustori.

La storia della scienza della concentrazione solare prosegue poi con lo studio degli sviluppi dell'ottica in epoca medioevale, avvenuti principalmente ad opera di scienziati del mondo arabo, per arrivare al Rinascimento con gli esperimenti, fra gli altri, di Leonardo, Cardano e Kircher.

I secoli seguenti vedranno nascere i primi esperimenti di utilizzo concreto dell'energia solare per scopi termici, quali quelli ad opera di Buffon con i suoi specchi ustori e le prime macchine protoindustriali di Mouchot e Pifre .

Le prime applicazioni commerciali cominciano ai primi del '900, e fra le più mature sono da annoverare quelle dello scienziato americano F. Shuman che tramite concentratori parabolici lineari realizzò macchine termiche solari di qualche decina di KW.

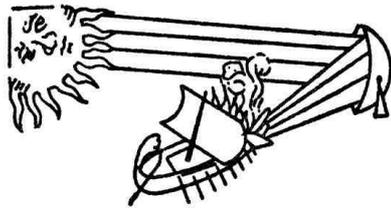
Oggi la tecnologia solare è giunta a piena maturità, come è anche dimostrato dal costruendo impianto ENEL a specchi parabolici (impianto "Archimede", di circa 30 MW), fra Priolo Gargallo e Siracusa, nei luoghi dell'antico attacco del console romano Marcello.

Queste note si concludono con una analisi critica dell'esperienza degli specchi ustori di Archimede, dimostrandone la sua infondatezza storica, ma contemporaneamente asserendo che Archimede avrebbe potuto portare a termine la sua leggendaria impresa, nel caso avesse utilizzato, per esempio, un dispositivo concentratore composto da numerosi specchi piani elementari ed indipendenti.

In conclusione una risposta positiva al primo degli interrogativi postici è, a nostro giudizio, da subordinare non tanto alle capacità od ai vincoli tecnologici dell'epoca, quanto piuttosto a riflessioni in merito all'utilità ed opportunità di una simile macchina bellica.

**STORIA, SCIENZA E LEGGENDA
DEGLI SPECCHI USTORI DI ARCHIMEDE**

Introduzione	pag. 1
Il mondo classico	pag. 3
La scienza degli specchi ustori nel medioevo	pag. 17
Il Rinascimento	pag. 21
L'epoca della rivoluzione industriale	pag. 29
Le prime applicazioni commerciali dell'idea di Archimede	pag. 35
Le attuali tecnologie della concentrazione dell'energia solare	pag. 40
Analisi critica degli specchi ustori di Archimede	pag. 45
Conclusioni	pag. 73



Introduzione

“*Nihil novi sub sole*” dicevano gli antichi.

Il contenuto del presente lavoro costituisce, per mio personale appagamento culturale, una divagazione storica in un campo che mi vede professionalmente impegnato nella progettazione di moderni impianti termodinamici solari per produzione di energia elettrica.

Faccio infatti parte del team di progettazione del futuro impianto solare “Archimede” che ENEL ed ENEA intendono realizzare in Sicilia e di cui è dato un rapido cenno in queste pagine.

Il libro, nel suo insieme, prende le mosse da molto lontano, con temi storici e critici sicuramente alieni dalla mia formazione (e di questo chiedo venia agli esperti del settore), frutto genuino di quella curiosità che non può essere definita né solo scientifica né solo umanistica.

La prima parte della trattazione ripercorre la storia della scienza per quanto riguarda le conoscenze e le applicazioni dell’energia solare con strumenti ottici a riflessione, i comuni specchi, non dimenticando il genio di Archimede e gli studi sull’ottica di epoca medioevale. Con piacere ho ritrovato, fra le esperienze di epoca preindustriale, alcuni macchinari che, perfettamente funzionanti, anticipano le attuali soluzioni tecnologiche, come i concentratori parabolici, i collettori lineari e molti altri.

Una trattazione a parte è stata condotta per analizzare, criticare e verificare l’impiego degli specchi ustori da parte di Archimede contro la flotta del console romano Marcello nel 212 a.C., se non altro in onore di un mio concittadino siracusano troppo spesso dimenticato nella sua città natale.

Oggi si fa e si parla troppo di tecnologia, in un inebriante ed autoesaltante senso di dominio delle leggi della natura; una riflessione sulla scienza e sulla storia della scienza credo contribuisca a dare il giusto valore a quanto facciamo per mestiere.

La scienza nel mondo classico

Le conoscenze delle proprietà termiche dell'irraggiamento solare sono certamente note all'umanità dai suoi primi albori, se non altro per lo spontaneo uso del sole come fonte di riscaldamento naturale e gratuito.



Fig. 1 – Moderni giochi olimpici

Questa cerimonia si ripete identica nei moderni giochi olimpici con la rituale ed antica invocazione ad Apollo (dio del sole):

“Sacro silenzio, lascia che il cielo, la terra, il mare e il vento risuonino; che le montagne restino silenziose; che cessino i suoni ed il verso degli uccelli. Affinché Febo, il re che porta la luce, sia con noi. Apollo, re del sole e dell'idea di luce, manda i tuoi raggi e accendi la sacra torcia. Apollo, dio del

sole, e dell'idea di luce, manda i tuoi raggi e accendi la sacra torcia per l'ospitale città di Atene, e tu Zeus, dà pace a tutti i popoli della terra e incorona i vincitori della sacra corsa”.

Il culto delle Vestali nel mondo antico ha sempre legato la cura del focolare alla custodia del fuoco sacro, immagine e manifestazione della divinità solare e “magicamente” ottenuto tramite parabole bronzee. In caso di accidentale estinzione del fuoco (evento funesto) il suo ripristino, partendo da altra fiamma e non dal sole, era ritenuto un atto dissacratorio.

Viene spontaneo immaginare che le prime tecniche utilizzate dall'uomo per concentrare l'energia solare siano state quelle basate sulla riflessione piuttosto che sulla rifrazione, cioè tramite l'uso di specchi piuttosto che di lenti, per la maggiore facilità di fabbricazione dei primi (metalli lucidati) rispetto alle seconde (vetri o cristalli naturali).

La giustificazione e lo studio sistematico dei fenomeni ottici connessi all'uso dell'energia solare comincia nel mondo classico, come per tanti altri campi della fisica, a seguito ed a coronamento dello studio della matematica e della geometria, come conseguenza delle proprietà delle coniche ¹, parabole, ellissi ed iperboli, figure geometriche che avranno un ruolo centrale in tutta l'ottica.

Tradizionalmente si fa risalire al nome di **Menecmo** (IV sec. a.C.) il primo studio sulle coniche, anche se i primi riferimenti certi risalgono al ben più famoso **Euclide di Alessandria** (circa 325 a.C. – circa 265 a.C.).

Euclide, oltre ai suoi scritti sui principi della geometria (“*Elementi*”) ed altri generici sull'ottica, è autore della “*Catottrica*” in merito alla riflessione su specchi sferici concavi, e di un'opera sulle coniche in quattro libri che è andata perduta.

Le principali notizie su Euclide ci pervengono dagli scritti di **Proclo**, un filosofo greco che scrive attorno al 450 d.C.

¹ Si chiamano “coniche” le curve nate dall'intersezione di un cono con un piano; a seconda della giacitura del piano si generano circonferenze, ellissi, iperboli e parabole. Ognuna di queste curve per rotazione attorno ad un asse di simmetria genera il corrispondente solido di rivoluzione, come per esempio la sfera generata dalla circonferenza.

Diocle (circa 240 a.C. – circa 180 a.C.), contemporaneo di Apollonio, è universalmente famoso per il problema della duplicazione del cubo che egli cercò di risolvere attraverso lo studio delle proprietà della cissoide, una curva da lui definita e che, applicata alla parabola, lo porterà ad interessanti conclusioni nel campo dell’ottica geometrica fra le quali l’asserzione che il paraboloide è l’unica superficie a focalizzare in un sol punto i raggi del sole.

Gli studi sulla cissoide, applicati alla parabola, influenzeranno molti matematici moderni come Fermat, Huygens, Newton, etc, anche al di fuori dai problemi di ottica. Oltre alle informazioni che di lui ci da **Eutocio di Ascalona**² (VI sec d.C.) in un suo commentario ai testi di Archimede, possediamo oggi notizie originali tratte da un antico manoscritto arabo recante la traduzione dell’opera di Diocle “*gli specchi ustori*” e rinvenuto in Iran nel 1970.

L’opera in arabo risale al 1462 e sfortunatamente il traduttore/copista non ha riportato le figure che dovevano invece essere presenti nell’originale (περι πυριτων).

Nell’introduzione Diocle narra dell’interesse per gli specchi ustori da parte di matematici a lui contemporanei:

“Pitia il geometra scrisse una lettera a Conone per chiedergli come trovare una superficie specchiante tale che, posta di fronte al sole, ne rifletta i raggi su una circonferenza. Inoltre quando Zenodoro, l’astronomo, venne da noi, ci chiese come realizzare una simile superficie specchiante tale da concentrare i raggi solari in un sol punto e così produrre il fuoco”

L’opera di Diocle è divisa in tre parti: la prima tratta di problemi sugli specchi ustori, la seconda di problemi archimedei relativi alla sfera, e la terza della duplicazione del cubo.

La parte relativa agli specchi ustori affronta in 16 proposizioni problemi relativi agli specchi parabolici e sferici, al loro punto focale ed alla costruzione geometrica della parabola.

² Che a sua volta riporta l’opera di Geminus (commentatore di Aristotile del 1° sec a.C) dove fra l’altro si parla anche di Diocle.

Inoltre studiò il problema di trovare uno specchio tale che l'involuppo dei raggi solari riflessi formasse una data curva (la “*caustica*”), ovvero quello di ricavare a posteriori tale curva per la realizzazione, per esempio, di meridiane.

Vengono ancora investigati da Diocle altri campi di utilizzo della tecnologia solare a concentrazione, come per esempio quelli connessi alla cremazione durante i riti sacri.

Gli studiosi di storia della matematica, in base ai recenti ritrovamenti, cominciano oggi a mettere in dubbio la paternità dello studio rigoroso delle coniche, tradizionalmente finora assegnata ad Apollonio. Anche l'introduzione dei nuovi termini, “*iperbole*”, “*parabola*” ed “*ellisse*”, sembrerebbe infatti risalire a Diocle piuttosto che ad Apollonio, come normalmente riportato nei testi di matematica.

Diocle pertanto può a buon diritto essere considerato il primo matematico ad aver affrontato rigorosamente il problema degli specchi ustori, riflettendo, si ritiene, sui presunti esperimenti di Archimede, quasi suo contemporaneo. Non possediamo, però, alcuna documentazione certa che dimostri un collegamento scientifico fra Diocle ed Archimede sul tema specifico degli specchi ustori.

Ebbe invece maggior fama presso i posteri **Apollonio di Perga** (262 a.C. – 190 a.C.), il più noto matematico del mondo classico, conosciuto come “*il geometra greco*”. Egli nel suo lavoro sulle coniche affronta in maniera completa i problemi legati alle loro proprietà ed alla loro tracciabilità. Del suo lavoro sulle coniche i primi quattro libri ci sono pervenuti in greco originale, i libri 5, 6 e 7 sono noti tramite una traduzione araba e l'ottavo è andato completamente perduto.

I suoi studi sull'ottica riguardarono l'uso del paraboloide per la realizzazione di specchi ustori e la dimostrazione delle proprietà ottiche del fuoco.

E' in discussione, oggi, l'originalità degli studi di ottica in merito agli specchi ustori, specie dopo il recente ritrovamento del manoscritto arabo su tali ricerche da parte di Diocle, a lui contemporaneo.

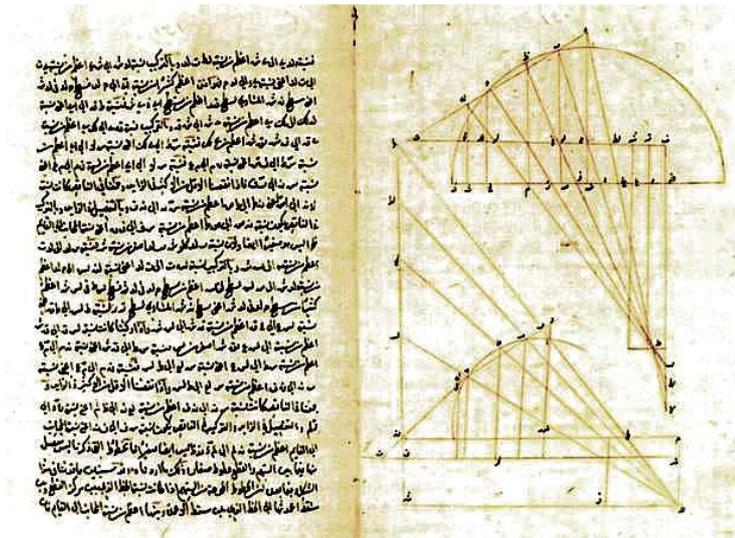


Fig. 2 – Traduzione araba del 5° libro sulle Coniche di Apollonio

Il problema degli specchi ustori, e della matematica ad essi connessa, ci porta inevitabilmente a parlare di **Archimede di Siracusa** (287 a.C. – 212 a.C.)

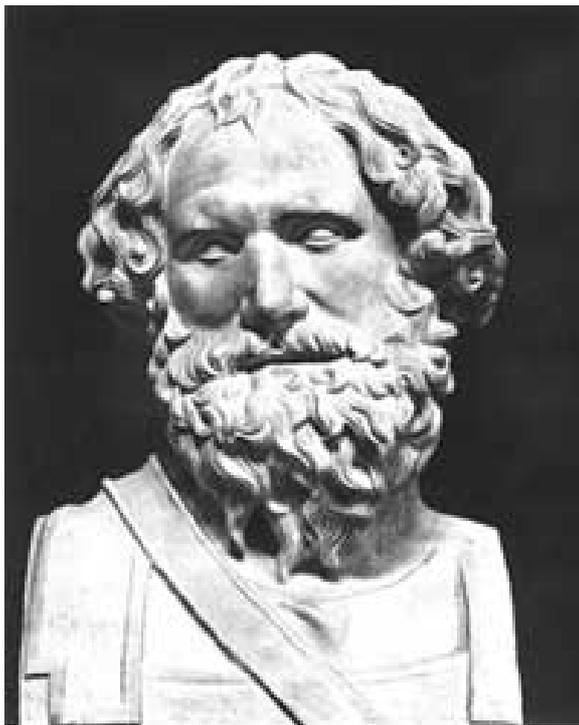


Fig. 3 – Archimede di Siracusa

Gli specchi ustori sono sempre stati collegati al nome del grande scienziato greco di Siracusa la cui opera è senz'altro da ricordare per ben più importanti contributi alla scienza nel campo della matematica e della fisica. Gli specchi ustori sono sempre stati attribuiti alla figura di Archimede, sia dai matematici del mondo classico che dagli scienziati medioevali e moderni, spesso con trattazioni e ricostruzioni al limite del fantastico per una sorte di ammirazione verso il grande genio.

Purtroppo non possediamo alcuno scritto di Archimede sull'argomento³,

ed anche dal punto di vista storico le uniche fonti che ne parlano risalgono a molti

³ Il corpus archimedeo giunto fino a noi, fra varie vicissitudini e con le inevitabili interpolazioni dei copisti, storici e scienziati dei secoli successivi, è costituito dalle seguenti 12 opere, nessuna autografa: Sulla sfera e il cilindro, Misura del cerchio, Sui conoidi e sferoidi, Sulle spirali, Sull'equilibrio

secoli dopo la vicenda e sono spesso commenti e sunti, non si sa quanto fedeli, di altre opere non giunte fino a noi.

Il contesto storico nel quale sarebbe avvenuta l'avventura degli specchi ustori di Archimede è quello della seconda guerra punica (218 a.C. – 201 a.C.). Siracusa alleata dei romani con il tiranno Gerone, alla sua morte (216) vede il prevalere della fazione filocartaginese capeggiata da Ippocrate ed Epicide che respinsero i numerosi tentativi di mediazione da parte romana.

La città viene pertanto attaccata da terra e da mare dall'esercito romano al comando del console Marcello che nel 212 a.C., dopo un lungo assedio, ha la meglio sui siracusani con un'azione che fra l'altro provoca la morte dello stesso Archimede.

Gli specchi ustori, assieme ad altre mirabolanti macchine belliche, sarebbero stati usati da Archimede proprio in occasione dei numerosi tentativi di conquista della città dal mare, da parte delle quinqueremi di Marcello. Per inciso la conquista finale di Siracusa avvenne da terra, forse per il tradimento di un siracusano.

Le fonti storiche, principalmente Tito Livio (L.24, cap.34), ci parlano della flotta romana, composta da 60 navi quinqueremi e da 8 navi da carico.

Le quinqueremi erano delle navi di recente concezione e costruzione che gli architetti navali romani introdussero nel corso della prima guerra punica, copiandole da alcuni esemplari punici caduti nelle loro mani all'inizio degli scontri. Rispetto alle triremi, usate precedentemente, avevano maggiore velocità e maggiore capacità di carico, anche se erano di più difficile governo.

Le principali fonti storiche sulle imprese di Archimede, durante le azioni di guerra da parte dei romani, sono le seguenti:

- **Polibio** (200 a.C. – 118 a.C.) – “*Storia Universale*”, Libro VIII, 3 - 7;
- **Livio** (59 a.C. – 17 d.C.) – “*Storia di Roma dalla sua fondazione*”, Libro XXIV, 34;
- **Plutarco** (45 d.C. – 120 d.C.) – “*Vite parallele: Vita di Marcello*”;
- **Dione Cassio** (155 d.C. – 235 d.C.) – “*Storia romana*”, Libro XV.

dei piani, Arenario, Quadratura della parabola, Sui galleggianti, Stomachion, Sul metodo meccanico, Libro dei lemni, Il problema dei buoi.

Le prime tre, giunte fino a noi, rispettivamente in greco, latino e greco, parlano in maniera diffusa delle macchine belliche ideate da Archimede per contrastare l'attacco dei romani lungo le mura di Siracusa: si descrivono catapulte, leve, imbracature per sollevare navi⁴, ma non si fa alcun cenno agli specchi ustori.

L'unico riferimento agli specchi ustori si ha nell'opera di Dione Cassio che però è giunta a noi attraverso i compendi e le sintesi attuate nel medioevo dai due cronisti:

- **Giovanni Tzetzes** (1110 – 1186) poeta bizantino e grammatico, nella sua opera “*Chiliades*” (libro II, 118 – 128).
- **Giovanni Zonaras** (XII secolo) cronista, canonico e comandante delle guardie imperiali dell'imperatore bizantino Alessio Comneno, nella sua opera “*Epitome ton istorion*” 9, 4.

Si tratta di poche righe, non si sa con quanta fedeltà riportate dall'originale di Dione Cassio, che peraltro, fra tutte le fonti storiche, rappresenta la fonte più lontana temporalmente dall'epoca di Archimede (quasi 400 anni dopo).

Le notizie che si traggono dai due storici bizantini, utili ai nostri fini, sono comunque le seguenti:

1. Impiego degli specchi contro le navi che sono “*ad un tiro d'arco*”, come letteralmente riportato da Tzetzes.
2. Impiego di uno specchio a forma esagonale, composto da numerosi e piccoli specchi elementari.
3. Utilizzo di corde e pulegge per il movimento dello specchio in modo da averlo sempre puntato con il suo centro verso i raggi solari, sia in estate che in inverno.

Si riportano i due testi nella traduzione in inglese da parte della Harvard University Press, Cambridge, 1914.

⁴ Come per esempio la famosa “*manus ferrea*”, una sorta di uncino all'estremità di una leva che, sporgendo oltre le mura, agganciava e rovinava le navi nemiche che vi si accostassero.

J. Tzetzes - Book of Histories (Chiliades) 2, [109-128](#)

And when once Marcellus, the Roman general, was assaulting Syracuse by land and sea, this man [Archimedes] first by his engines drew up some merchantmen [ships], and lifting them up against the wall of Syracuse dropped them again and sent them every one to the bottom, crews and all. Again, when Marcellus removed his ships to a little distance, the old man gave all the Syracusans the power to lift stones of a waggon's size, and hurling them one at a time, to sink the ships. When Marcellus withdrew them a bow-shot thence, the old man constructed a kind of hexagonal mirror, and at an interval proportionate to the size of the mirror, he set similar small mirrors with four edges, moving by links and by a kind of hinge, and made the glass the centre of the sun's beams--its noontide beam, whether in summer or in the dead of winter. So after that, when the beams were reflected into this, a terrible kindling of flame arose upon the ships, and he reduced them to ashes a bow-shot off. Thus by his contrivances did the old man vanquish Marcellus.

J. Zonaras - Epitome ton Istorion [9, 4](#)

Marcellus crossed into Sicily and proceeded to besiege Syracuse. The city had submitted to him, but then had revolted again as the result of a false message sent by the treachery of certain men. Now he would have subdued it very speedily, as the result of a joint assault upon the wall by land and sea, had not Archimedes with his inventions enabled the inhabitants to resist for a very long time. For this man by his devices suspended stones and heavy-armed soldiers in the air, and these he would let down suddenly, and presently draw them up again. And he would lift up ships, even those equipped with towers, by means of other appliances which he dropped upon them; and raising them aloft, would let them drop suddenly, so that when they fell into the water they were sunk by the impact. At last in an incredible manner he burned up the whole Roman fleet. For by tilting a kind of mirror toward the sun he

concentrated the sun's beam upon it; and owing to the thickness and smoothness of the mirror he ignited the air from this beam and kindled a great flame, the whole of which he directed upon the ships that lay at anchor in the path of the fire, until he consumed them all.

Zonaras, uno dei due trascrittori dell'opera di Dione Cassio, è anche la fonte storica per le vicende militari che, molti secoli dopo Archimede, vedranno **Proclo** nel 512 d.C. respingere l'assedio di Costantinopoli da parte di Vitellio con la stessa tecnica degli specchi ustori.

Dione Cassio (Cassius Dio Cocceianus) era nato a Nicea in Bitinia ed era il nipote del famoso oratore Dione Crisostomo. Divenne senatore romano nel 180 e seguì una fortunata carriera politica al seguito di Settimio Severo e Caracalla, fino a diventare proconsole in Africa, governatore della Dalmazia ed infine della Pannonia.

La sua opera di storia romana (da Enea al 229 d.C.) consiste di 80 libri dei quali sono giunti intatti fino a noi circa un terzo; fra i libri perduti rientra purtroppo anche quello relativo (libro 15°) alla presa di Siracusa durante la seconda guerra punica. Già all'epoca del commentatore Zonaras erano però dati per perduti molti libri originali di Dione Cassio.

Fra le innumerevoli rappresentazioni artistiche o scientifiche, più o meno fantasiose, si riporta l'affresco (fig. 4) nella volta dello stanzino delle matematiche, agli Uffizi di Firenze, dipinto nel 1599 - 1600 da Giulio Parigi (1571 – 1635) artista ed ingegnere militare per volere del granduca di Toscana Ferdinando I

E' interessante notare come l'artista abbia voluto rispettare la distanza “*ad un tiro d'arco*” e, ancora più interessante, come, forse inconsapevolmente, abbia rappresentato uno specchio piano⁵ piuttosto che un solido parabolico o sferico. Queste considerazioni saranno approfondite nel prosieguo della trattazione, nell'apposito paragrafo dedicato all'analisi critica dell'esperimento di Archimede.

⁵ Lo si evince dall'inclinazione dei raggi in arrivo ed in partenza dallo specchio che hanno quasi la stessa angolazione rispetto alla normale alla superficie. Se si fosse in presenza di un solido di rivoluzione, ancorché di esigua curvatura, la nave dovrebbe essere nel punto focale dello specchio,



Fig. 4 – Affresco (1600) della volta dello stanzino delle matematiche – Museo degli Uffizi, Firenze

Esistono infine, nel mondo classico, numerosi altri richiami agli specchi di Archimede, specialmente nel campo letterario, nel campo naturalistico ed in quello pseudoscientifico. Pur non essendo essi fondamentali per un giudizio storico o scientifico sul reale impiego da parte di Archimede di queste macchine solari, è interessante notare come in qualche caso (Valerio Massimo, Luciano, Galeno) la citazione degli specchi ustori, o comunque di dispositivi con una certa libertà interpretabili come tali, sia cronologicamente anteriore a qualunque fonte storica di nostra conoscenza, anteriore anche a Cassio Dione stesso, avvalorando l'ipotesi che sia esistita un'opera di qualche storico minore o locale andata oggi perduta⁶.

Fra queste opere, di carattere più letterario che storico, citiamo le seguenti:

Silio Italico (25 d.C. – 101 d.C.) con la sua opera “*Puniche*”, 17 libri in versi, oggi in parte perduti, ripercorre le vicende narrate da Livio. Non parla mai espressamente degli specchi ustori ma racconta di torri di difesa siracusane dalle quali Archimede

punto che geometricamente deve appartenere alla retta normale che passa per il suo vertice, contrariamente a quanto raffigurato.

⁶ E' stata avanzata l'ipotesi che la fonte di Dione Cassio (per quanto riguarda la seconda guerra punica avvenuta oltre 400 anni prima) sia un'opera in 7 libri, perduti, dello storico romano **Lucio Celio Antipatro** (II sec. a.C.) di pochi decenni posteriore ad Archimede.

lanciava contro la flotta nemica dardi incendiari. In altri passi, non connessi con l'assedio di Siracusa, cita battaglie navali fra romani e cartaginesi dove l'uso del fuoco svolse un ruolo fondamentale.

Erone di Alessandria (100 d.C.) secondo una testimonianza di Maurolico (matematico del XVI secolo), recentemente messa in dubbio, avrebbe scritto sull'argomento un'opera intitolata “*De speculis*”.

Valerio Massimo (I sec. d.C.) scrittore latino, nella sua opera “*Memorabilia*” riporta fra fatti e detti memorabili del passato anche la vicenda degli specchi ustori.

Luciano di Samosata (121 d.C. – 181 d.C.) nell'opera “*Hippias*” dice: “*Archimede che ridusse in cenere le navi ...per mezzo della sua scienza*”. Da notare che il mezzo usato da Archimede per ridurre le navi in cenere non è chiaramente descritto; ciononostante, dato che lo stesso autore, in un altro passo della stessa opera, ci rende noto che Archimede avrebbe scritto un trattato sulle lenti e sugli specchi, è facile rendersi conto del fraintendimento operato successivamente da parte di quegli storici e scienziati che hanno invocato il nome di Luciano per asserire la veridicità dell'uso degli specchi ustori.

Nell'antichità Luciano ha sempre goduto di una positiva fama di scrittore scientifico, tanto da essere a volte chiamato “*il padre della finzione scientifica*”.

Sembra molto probabile, comunque, che Luciano, sull'argomento della difesa contro la flotta romana da parte di Archimede, sia rimasto nell'ambito delle fonti e dei dati già noti e descritti da Silio Italico.

Apuleio (125 d.C. – 180 d.C.) asserisce che Archimede avrebbe scritto un trattato di catottrica⁷.

Galeno di Pergamo (129 d.C. – 200 d.C.) nel suo terzo libro dell'opera “*De temperamentis*” dice: “*Archimede che con gli specchi ustori bruciò le navi romane*”.

L'uso della dizione “*specchi ustori*” nasce però da una traduzione in latino (*speculi ustorii*) del termine greco “*πυρρεια*” originariamente utilizzato da Galeno. Questo

termine greco, secondo alcuni studiosi, vuol primariamente indicare “*miscele incendiarie*” “*esche*” e simili dispositivi per appiccare un incendio, e solo in senso traslato si adatterebbe ad indicare dispositivi “*ustorii*” come per esempio i famosi specchi.

La testimonianza di Galeno pare dunque soffrire della stessa ambiguità evidenziata per Luciano.

E’ da osservare inoltre, per un corretto giudizio di credibilità storica, che sia Galeno che Luciano, parlando della flotta romana contro cui si scagliò Archimede, la descrivono come formata da triremi, già da tempo invece abbandonate e sostituite dalle più moderne quinqueremi, e non utilizzate da Marcello durante l’assedio di Siracusa.

Tolomeo (II sec. d.C.); Maurolico, un umanista del XVI secolo, gli attribuisce la paternità di due opere “*Specula*” e “*De speculo comburente*” che purtroppo non sono pervenute a noi e che peraltro altrove, con grande confusione, sono ricordate come opere dello stesso Archimede.

La sua opera principale (“*Almagesto*”) costituì il riferimento ufficiale per tutti gli studi di astronomia, geometria ed ottica, sia per il mondo islamico (che ne conservò traccia in numerose traduzioni) che per il mondo scientifico occidentale fino al XVI secolo ed oltre.

La più importante testimonianza sull’argomento, sul finire del mondo classico, e datata oltre l’opera perduta di Dione Cassio (ma prima della sua supposta trascrizione da parte dei bizantini Zonaras e Tzetze), è quella di **Antemio di Tralle** (474 d.C. – 534 d.C.) contemporaneo di Proclo, e famoso per essere stato l’architetto della basilica di S. Sofia a Costantinopoli nel 532.

⁷ Notizia tratta dall’opera di Theone di Alessandria, circa due secoli dopo.



Fig. 2.7 – Manoscritto bizantino raffigurante Antemio di Tralle e la basilica di S.Sofia

Antemio scrisse un piccolo trattato in greco “*Paradossi meccanici*” dove un capitolo è interamente dedicato alla descrizione degli specchi ustori.

In un'altra sua opera “*Gli specchi ustori*” descrive le proprietà focali dell'ellisse e della parabola ponendosi il problema di che tipo di specchio debba usarsi nel caso che, con specchio fisso, si vogliano indirizzare i raggi del

sole sempre in un punto, a prescindere dai movimenti solari apparenti.

Pare inoltre che abbia anche condotto esperimenti pratici del genere di quelli da lui descritti, e che abbia ispirato l'azione bellica di Proclo contro Vitellio, quale novello Archimede contro Marcello.

Una trascrizione in arabo dell'opera di Antemio, recentemente scoperta e risalente al IX secolo, riporta il passo relativo all'impresa di Archimede, in linea con l'interesse scientifico e divulgativo da parte della cultura islamica per la scienza del mondo classico. Antemio sarà noto ai principali studiosi di ottica del mondo islamico (Ibn Sahl, Al kindi, etc.) che contribuiranno a rilanciare e perpetuare, con fantastiche interpretazioni, la leggendaria impresa degli specchi ustori di Archimede.

Nel capitolo dei “*Paradossi meccanici*” relativo agli specchi ustori di Archimede, Antemio dice⁸:

“Come è possibile, ad una distanza di un tiro d'arco, produrre un incendio per mezzo dei raggi del sole? La situazione del posto deve essere tale che i raggi del sole siano riflessi in obliquo od anche in direzione opposta a quella di provenienza da parte dello stesso sole. Essendo tale distanza ragguardevole, sembra che sia impossibile raggiungere questo effetto; ma come dimostrato dal grande Archimede, la cui impresa è universalmente riconosciuta, ciò è possibile in virtù del

principio detto prima. Archimede per trovare in che posizione mettere uno specchio piano per focalizzare i raggi del sole in un dato punto, dimostrò inizialmente che l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione, ed avendo posizionato opportunamente lo specchio osservò che con un numero maggiore di specchi, riflettenti tutti i raggi nello stesso fuoco, sarebbe stato più facile, per effetto della concentrazione, arrivare alla deflagrazione. Quindi quando un corpo si trova in questo punto, prima si infuoca l'aria ad esso intorno, così che si sommano le due forze, quella del sole e quella dell'aria incendiata attorno, aumentando il loro calore. E' necessario pertanto disporre di un numero adeguato di specchi piani orientati ad un unico punto, ad un tiro d'arco, per provocare il fuoco tutto intorno. Per mettere in pratica questa idea si potrebbe pensare a diverse posizioni degli specchi descritti, ma per evitare confusione (essendo necessari almeno 24 specchi) è preferibile utilizzare un altro metodo consistente nel fissare gli specchi piani su un supporto esagonale, in modo che ogni specchio possa essere fissato e regolato con cerniere in ogni direzione. Avendo diretto opportunamente lo specchio centrale dell'esagono, verso il fuoco, è poi agevole regolare ed indirizzare tutti i restanti specchi. Per riuscire meglio in questa impresa è poi necessario disporre di un certo numero di questi specchi composti, da quattro a sette. Tutti gli autori che riportano la storia degli specchi di Archimede non parlano mai di un solo specchio ma di una combinazione di molti”

⁸ Mia libera traduzione

La scienza degli specchi ustori nel medioevo

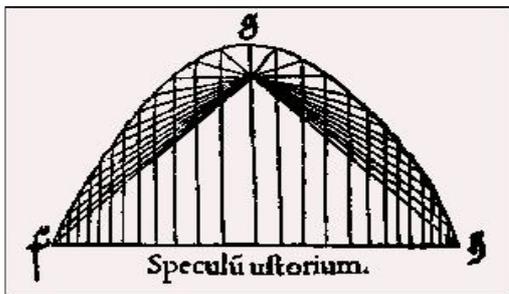


Fig. 6 – Da una illustrazione di un trattato medioevale di ottica

Appartengono al IX - X secolo molti manoscritti arabi di originali greci che trattano il problema degli specchi ustori, problema affrontato come un'estensione o un completamento della teoria delle coniche.

Fra questi è importante rammentare la trascrizione dell'opera di Antemio di Tralle che influenzerà molto gli studi degli scienziati

islamici dei secoli X ed XI, e l'opera dei matematici arabi Al Kindi, Ibn Sahl e principalmente di Alhazen di Bassora.

Al Kindi (circa 801 – 873) nato e vissuto in Iraq studiò a Bagdad e fece parte della “*casa della saggezza*”, fondata dal Califfo Al Mamun e che costituiva, con la sua biblioteca, il principale centro del sapere dai tempi di Alessandria. Al Kindi, filosofo ma anche matematico, scrisse un'opera di ottica criticando la narrazione degli specchi ustori di Archimede fatta da Antemio, non tanto per dimostrarne l'infondatezza ma quanto per fissare i presupposti scientifici che, secondo lui, erano carenti; dice infatti:

“Antemio non avrebbe dovuto accettare informazioni senza prove ... Ci dice come costruire uno specchio dal quale 24 raggi sono riflessi in un singolo punto, senza mostrare come stabilire il punto in cui i raggi si uniscono ad una data distanza dal centro della superficie dello specchio. Noi, d'altro canto, abbiamo descritto ciò con tanta prova quanto la nostra abilità ce lo consente, fornendo ciò che mancava, poiché egli non ha menzionato una distanza definita”

Ibn Sahl (X sec.), matematico vissuto a Bagdad, è l'autore di un trattato “*Sugli strumenti ustori*”⁹ datato 984, dove vengono sistematicamente affrontati i problemi di produzione di fuoco sia attraverso uno specchio che attraverso una lente, distinguendo inoltre il caso di sorgente di calore vicina (ellissoidi o lenti biconvesse) dal caso di sorgente molto lontana (paraboloidi o lenti piano-convesse).

Alhazen di Bassora¹⁰ (965 – 1038), successore spirituale di Ibn Sahl, continua gli studi dell'ottica (catottrica ed anaclastica), dedicando un intero libro (il 7°) della sua opera allo studio delle sfere ustorie, anticipando le scoperte delle leggi di Snell sulla rifrazione.

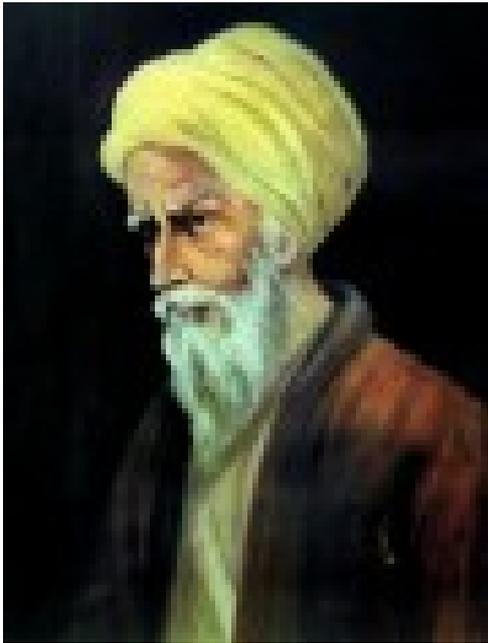


Fig. 7 - Alhazen di Bassora

Scienziato, teologo, inventore e filosofo, tradusse principalmente le opere di Euclide e Tolomeo, perfezionandole, correggendole ed inserendo proprie osservazioni sperimentali. La sua gigantesca opera “*Ottica*”, è sopravvissuta in migliaia di manoscritti ed è stata tradotta e commentata in tutto il mondo occidentale, in latino ed ebraico, già a partire dal XII secolo.

Per quanto riguarda gli specchi ustori di Archimede, riportando le numerose leggende sopravvissute fino a lui, descrive correttamente il percorso dei raggi solari riflessi da specchi concavi di varia forma, inducendo però, qualche secolo dopo, i suoi traduttori a fantasiose ricostruzioni come quella riportata nella traduzione commentata e pubblicata a Basilea nel 1572 da Vitellione (1220 – 1275), scienziato polacco che studiò a Parigi e Padova.

⁹ Manoscritto arabo rinvenuto recentemente da Roshdi Rashed

¹⁰ Il suo nome completo è al-Hasan Ibn al-Haytham, conosciuto nel mondo latino con la forma latinizzata del suo nome proprio.

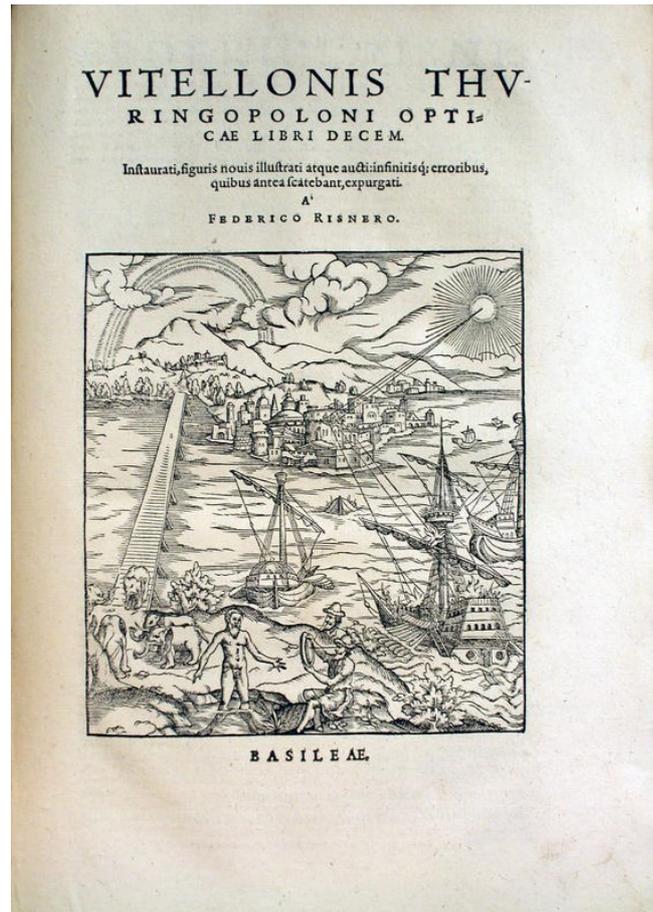


Fig. 8 – Edizione del 16° secolo delle opere di Vitellone (Basilea, 1572)

La tradizione degli specchi ustori di Archimede trova, in epoca medioevale, eco anche nel mondo culturale occidentale, sia da parte di studiosi di filologia classica che da parte di propugnatori della ripetizione dell'esperienza, come, rispettivamente Eustazio di Tessalonica e Ruggero Bacone.

Eustazio di Tessalonica (XII sec.), vescovo scrittore e filologo bizantino, in un suo commentario all'Iliade, fra l'altro, narra che Archimede con non meglio definite macchine catottriche bruciò le navi romane di Marcello ad un tiro d'arco di distanza. E' evidente la coincidenza con quanto riportato da Tzetzes, a lui contemporaneo, nelle sue "*Chiliades*".

Ruggero Bacone (circa 1214 – circa 1294) Frate francescano e filosofo inglese, soprannominato "*Doctor mirabilis*", allievo di Grosseteste, oltre a vari esperimenti

sulla rifrazione, sull'uso della camera oscura, e sulla formazione dell'arcobaleno, condusse accurate misurazioni sperimentali della distanza focale di specchi parabolici illuminati dai raggi solari.

L'attività di Bacone è tutta pervasa dal senso di una missione da compiere, di fronte all'incalzare della civiltà araba e nel timore dell'avvento dell'Anticristo. Con questi presupposti egli ritiene che la scienza dell'epoca debba costituire un valido baluardo all'imbarbarimento dei costumi, servendosi in maniera sinergica di teologia, matematica, fisica, letteratura e filologia, non disdegnando, fra l'altro, le arti militari. La sua visione della scienza, non come “realtà compiuta” già tutta presente nella dottrina della Chiesa, ma come qualcosa in divenire, lo porrà in contrasto con la gerarchia ecclesiastica dell'epoca, fino ad arrivare a subire accuse di eresia e ad essere privato della libertà personale, oltre che del permesso di continuare i suoi studi.

In un momento di relativa tolleranza egli presentò, nel 1267, al papa Clemente IV la sua opera “*Opus Majus*”, che contiene, fra l'altro, i risultati dei suoi studi sugli specchi ustori; sembra che Bacone abbia approfittato dell'occasione per dimostrare praticamente il funzionamento di uno specchio del genere da lui progettato, e che forse intendeva utilizzare come arma militare contro i mussulmani.

Il Rinascimento

Agli albori del XVI secolo gli interessi dell’ottica della riflessione erano ancora differenziati fra le applicazioni per la formazione di immagini e le proprietà ustorie degli specchi, con una netta prevalenza di queste ultime, sulla scia degli ultimi scienziati del secolo precedente: Giovanni Fusoris, Giovanni Fontana e Regiomontanus.

Inoltre, per quanto riguarda l’interesse dell’ottica per il campo più strettamente connesso all’energia termica solare, si è prevalentemente in presenza di studi di dotta erudizione e recupero dell’esperienza antica ovvero di applicazioni curiose come nel campo dell’alchimia.

Un discorso a parte merita l’opera di Leonardo da Vinci, che affrontò l’argomento degli specchi ustori con spirito pratico e, diremmo oggi, con intenti ingegneristici.

Gli interessi di **Leonardo** (1452 – 1519) per l’ottica risalgono al 1480, durante il suo periodo fiorentino, prima del successivo soggiorno a Milano. Fra le fonti conosciute da Leonardo sono da annoverare gli scritti di Pecham, Witelo, Alhazen ed Henry di Langenstein. L’interesse per l’ottica si riscontra in Leonardo nella realizzazione di macchine per tornire e lucidare specchi concavi metallici e contemporaneamente nello studio teorico delle proprietà focali di sfere e paraboloidi.

Fanno parte del “codice atlantico” i disegni in fig. 9 dove, in alto ed in basso, sono progettate due macchine per la realizzazione di specchi concavi di grande curvatura, tramite un utensile opportunamente sagomato ed oscillante con un movimento circolare di raggio imposto dalla lunga asta ivi rappresentata.

Lo specchio ruotante su di un piano perpendicolare al piano di oscillazione dell’utensile, veniva pertanto lavorato con il raggio di curvatura voluto. Dal testo che accompagna i disegni si apprende che l’asta oscillante doveva essere di 20 braccia (12 metri), con una conseguente distanza focale di 10 braccia (*“ab essendo lungo 20 braccia, la spera gitterà il razzo remoto da sé 10 braccia e sarà nata d’un cerchio che è 40 braccia di punto”*)

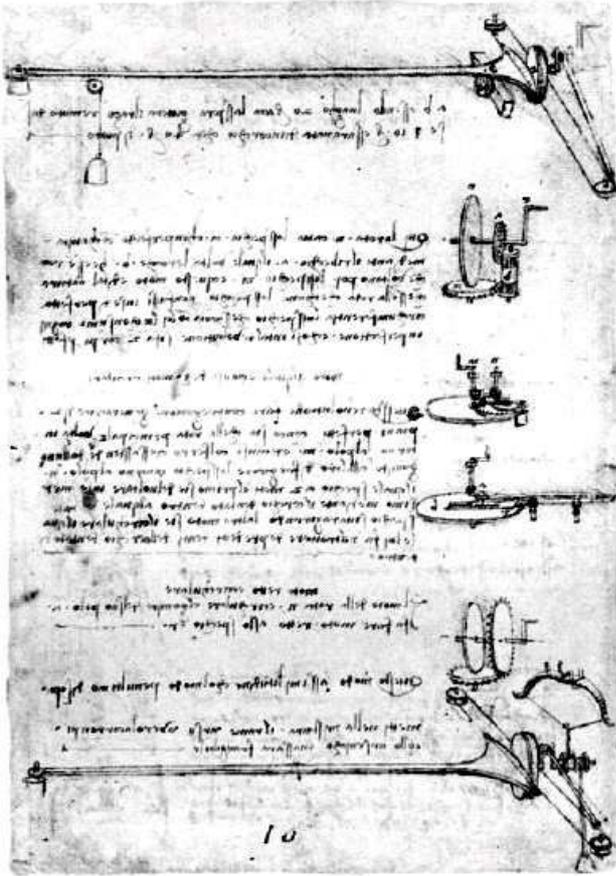


Fig. 9 – Codice atlantico – Macchine per la molatura di specchi concavi e piani

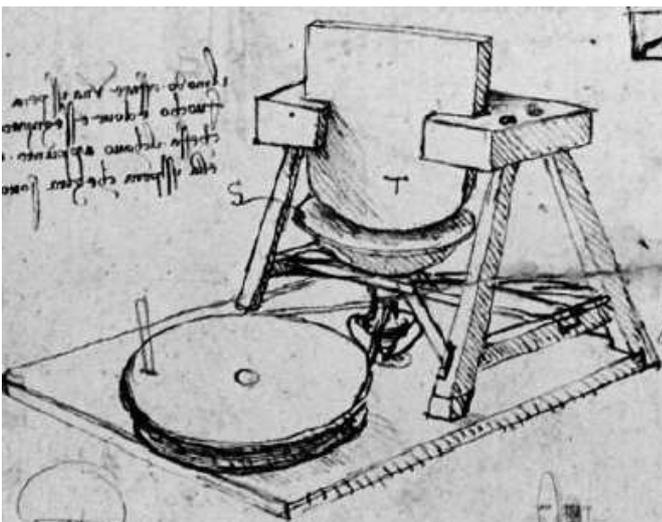


Fig. 10 – Codice atlantico – Macchina per la molatura di specchi concavi

Una realizzazione di un concentratore solare di minor lunghezza focale è nel successivo manoscritto, sempre del “codice atlantico” (vedi fig. 10) dove l’utensile, al contrario del caso precedente, è fisso, realizzando così, secondo le parole di Leonardo, *“il modo a fare una ispera in cavo da gittar fuoco”*

Nella fig. 11 è inoltre progettata una macchina per tornire specchi concavi con raggi di curvatura grandissimi, tramite un utensile creato da una lamina di rame la quale, sotto tensione, si incurva leggermente. Leonardo stimò che la barra di rame, sotto opportuna tensione, potesse assumere la curvatura di un cerchio di 400 braccia, (*“questa stanga po’ avere curvità di circolo di 400 braccia”*) potendo quindi realizzare specchi con lunghezza focale di 100 braccia (60 metri).

La conoscenza teorica dei problemi focali è dimostrata dal seguente altro passo in altro foglio del “codice Arundel”: *“Qui si dimostra come il concorso de’ razi refressi non passi il 4° del diametro delle spere donde li specchi concavi*

anno la loro curvità, come si dimostra nella linea AO”

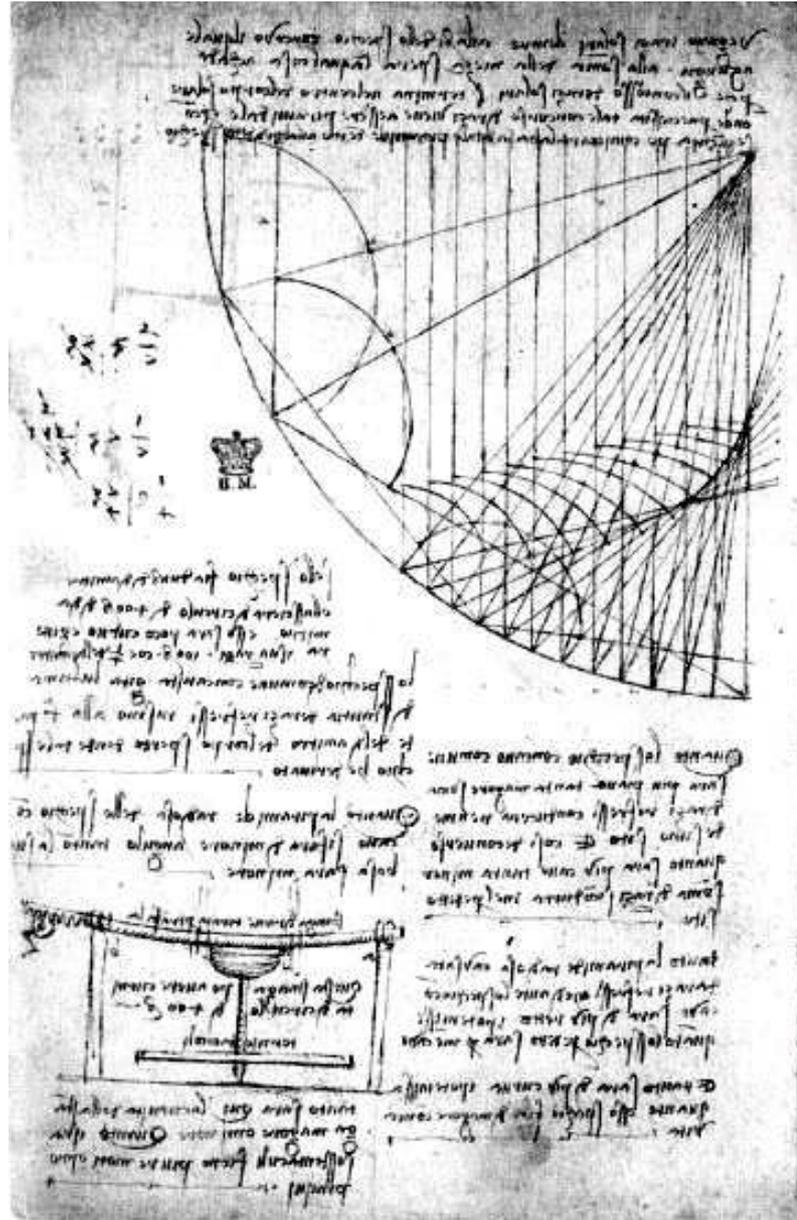


Fig. 11 – Codice Arundel – Costruzione della caustica e macchina per molatura di specchi concavi di grande raggio di curvatura

Le applicazioni pratiche di questi studi sugli specchi erano, per Leonardo, strettamente collegate alle loro proprietà “ustorie”, avendo egli in mente di creare una sorta di macchina per la fusione e saldatura di parti di statue bronzee che aveva in cantiere. Nel 1482 Leonardo lasciò Firenze per entrare, a Milano, al servizio della corte di Ludovico Sforza, dove fra l’altro, progettò una grande statua equestre di Ludovico che intendeva realizzare in più parti saldate fra di loro per fusione dei bordi, ottenuta con un concentratore solare. La statua non fu mai realizzata, ma un simile

problema gli si ripresentò nel 1510 per un altro progetto di statua equestre dedicata a Giovanni Giacomo Trivulzio, governatore di Milano dopo l'ingresso dei francesi. Nei suoi schizzi si legge: “... e del cavallo fa prima tutta la sua metà, poi li dà l'armatura di ferro. E fa prima li pezzi tutti, e da te segreto metti insieme”. Questa tecnologia di fusione pensata da Leonardo, da lui custodita come “segreto”, non troverà però mai pratica realizzazione.

Dal 1513 Leonardo è a Roma, protetto da Giuliano dei Medici, fratello del papa Leone X, che gli commissiona la realizzazione di un grande specchio ustorio (progetto “*ignia*”) mettendogli a disposizione il Belvedere del Vaticano e la mano d'opera di artigiani tedeschi esperti nell'arte degli specchi. Lungaggini, difficoltà e gelosie in merito alle conoscenze tecniche che Leonardo non intendeva condividere con alcuno, fecero fallire anche questo progetto.

Appartengono al periodo romano gli appunti di Leonardo in merito ad una applicazione più squisitamente termica dell'energia solare che intendeva sfruttare per riscaldare l'acqua contenuta in una caldaia. Il progetto si riferiva ad una industria di tintoria che avrebbe, in tal modo, potuto disporre a volontà di acqua bollente per le proprie lavorazioni sui tessuti. Il “codice Arundel” riporta lunghi calcoli per la determinazione della potenza degli specchi ustori necessari.

Nell'ambito della tradizione dei maestri vetrai veneti, si assiste, nel corso del XVI secolo, alle prime realizzazioni concrete di specchi concavi; un nome da ricordare è quello di **Ettore Ausonio** (circa 1520 – circa 1570), anche per i suoi influssi sugli studi di ottica da parte di Galileo.

Ausonio fu un matematico e costruttore di strumenti ottici a Venezia. Era uno stimato ed apprezzato realizzatore di specchi concavi di notevoli dimensioni e di alta qualità ottica, secondo la tradizione veneta degli “*specchiai*” che, primi in Europa, già dalla metà del '300 avevano introdotto il sistema di depositare su lastra di vetro una amalgama di stagno e mercurio. Il monopolio veneto durò circa due secoli con segreti di fabbricazione gelosamente custoditi e con una abilità e precisione che facevano dello specchio uno dei prodotti più ricercati in Europa, nonostante il loro alto prezzo. Si narra che nel 600 uno specchio piano di ottima qualità di poco meno di 1 metro quadro arrivasse a costare tre volte un dipinto di Raffaello. Nel 1680 uno specchio di tali dimensioni fu venduto per l'equivalente di 50.000 euro odierni.

Ausonio, Intorno al 1560, si presentò al Duca di Savoia, Emanuele Filiberto, proponendogli una serie dei suoi specchi concavi.

La sua opera “*Theorica speculi concavi sphaerici*”, del 1560 ma pubblicata postuma nel 1602, presenta molte similitudini con una simile opera di Vitellione (*Perspectiva*), anche se, rispetto alla scienza medioevale, l’opera di Ausonio si presenta più scientificamente gradevole e rigorosa tramite l’uso di figure ed appropriate didascalie.

Il principale contributo di Ausonio agli studi dell’ottica della riflessione, con positive ricadute per gli studi di Galileo, risiede nella nuova concezione unificatrice delle proprietà “ustorie” degli specchi concavi con le proprietà più intrinsecamente legate alla formazione di immagini ed alla loro posizione e grandezza in funzione delle posizioni geometriche relative. Si tratta di un fondamentale passo in avanti rispetto all’ottica medioevale degli specchi ustori, riconducibile in sintesi al riconoscimento dell’identità del “*punctum inversionis*” di una immagine generica, con il punto di combustione dello specchio ustorio sottoposto a raggi solari paralleli.

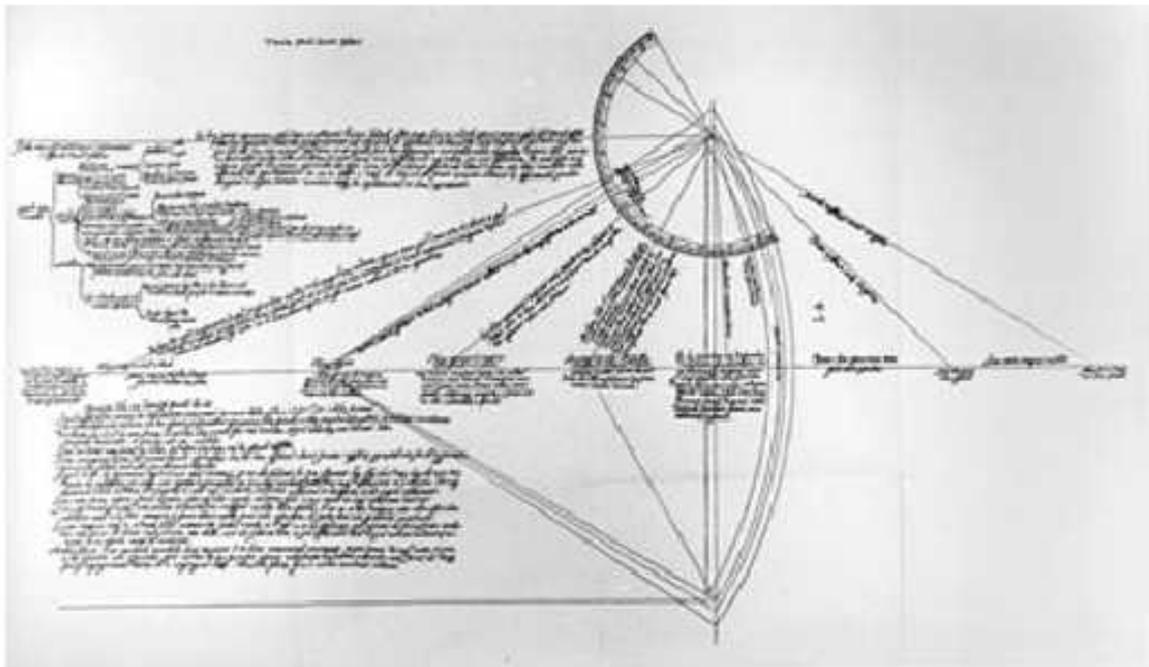


Fig. 12 - Illustrazione da “*Theorica speculi concavi sphaerici*” di E. Ausonio (1602)

Galileo aveva, durante il suo soggiorno a Padova, redatto una copia dell’opera di Ausonio e l’aveva inserita fra i suoi interessi scientifici, assieme a studi di prospettiva,

matematica e tecniche militari nell’ambito degli insegnamenti tenuti sin dal 1580 dal suo maestro Ostilio Ricci da Fermo.

Ricci portò i suoi insegnamenti anche in Toscana, a Firenze, presso il laboratorio di Bernardo Buontalenti, come maestro di Giovanni de’ Medici, in un contesto scientifico di difesa militare cui sicuramente faceva parte lo stesso Galileo.

Fra i vari interessi matematici vi era, in quel consesso, nell’ambito dello studio di fortificazioni, il tentativo di riprodurre l’arma archimedeica degli specchi ustori. Il progetto non andò mai in porto ma, attorno al 1597, Filippo Pigafetta propose al Granduca di Toscana Ferdinando I, la realizzazione di un museo che raccogliesse gli strumenti di misura già posseduti dai Medici assieme ad architetture e macchine militari allo studio presso la corte medicea. Tutto si ridimensionò, nel 1600, con l’opera di affresco pittorico dello stanzino delle matematiche, da parte di Giulio Parigi con immagini militari che confermano, tramite riproduzioni di Archimede difensore di Siracusa, ancora una volta l’interesse presente per gli specchi ustori.

In campo matematico la leggenda degli specchi ustori incuriosì moltissimo i grandi scienziati del periodo, fra i quali Bonaventura Cavalieri, Cartesio e Keplero.

Bonaventura Cavalieri (1598 – 1647), gesuita, allievo di Galilei, scrisse un’opera intitolata “*Lo specchio ustorio, ovvero trattato delle sezioni coniche e alcuni lor mirabili effetti intorno al lume, caldo, freddo, suono, e molto ancora*” pubblicato a Bologna nel 1632 da Clemente Ferroni.

In questa opera sono richiamati gli studi precedenti sulla geometria dei mirabolanti specchi di Archimede: studi di Vitellione, Marin Ghetaldo, Orotio, Cardano, Giovan Battista Porta, ed altri valenti matematici.

Il cattedratico Cavalieri, insigne matematico, analizza le proprietà della parabola ed arriva alla conclusione che sarebbe stato impossibile per Archimede costruire uno specchio ustorio

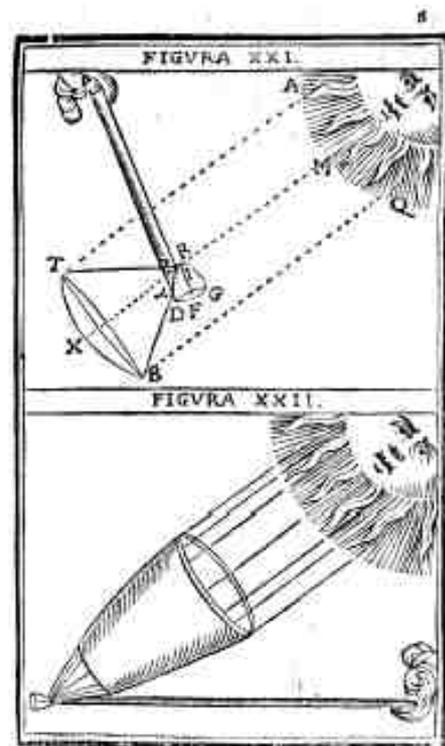


Fig. 13 – Dall’opera di Cavalieri (1632)

concavo con un fuoco di decine di metri stante la esigua sua curvatura e quindi la necessità di ricorrere ad una meccanica di altissima precisione.

Per Cavalieri invece si tratta di veri e propri dispositivi ottici di foggia composita, e propone un impiego misto di due specchi parabolici, uno concavo ed uno convesso, di curvature ragionevolmente più realizzabili, in modo da creare una sorta di cannone solare: il primo specchio concentra i raggi sul suo fuoco, dal quale il secondo li invia paralleli sul bersaglio.

Le figura XXI e XXII del suo trattato (vedi fig. 13) illustrano due configurazioni teoriche ipotizzate.

Fra i razionalisti convinti dell'impossibilità dell'impiego di specchi concavi, per usi quali quelli leggendariamente attribuiti ad Archimede, sono da rammentare **Cartesio** (1596 – 1650), **Keplero** (1571 – 1630) e **Gabriel Naudè** (1600 – 1653), erudito e storico francese. Secondo il loro parere gli specchi ustori di Archimede sarebbero stati tramandati ai posteri come una bella favola, facendo chiaramente intendere che la fama di “*magò*” di cui aveva goduto Archimede nei secoli precedenti doveva lasciar posto alla figura dello scienziato razionale.

Sulla scia delle interpretazioni di Cavalieri si pone, invece, l'opera di un altro matematico, **Atanasius Kircher** (1602 – 1680), autore dell'opera “*Ars magna lucis et umbrae*” del 1646 e di cui riportiamo in fig. 14 il frontespizio

In questa sua opera Kircher affronta, fra l'altro, il leggendario uso da parte di Archimede degli specchi ustori. La sua ricostruzione storica dell'evento si avvale della topografia di Siracusa antica come riportata nel 1613 dallo storico siracusano Vincenzo Mirabella, e le sue riflessioni sull'argomento lo portano a convincersi del reale utilizzo degli specchi ustori.

Kircher auspicò di poter ripetere praticamente l'esperienza di Archimede, ma si dovette attendere almeno fino al secolo seguente quando Buffon raccolse la sfida.

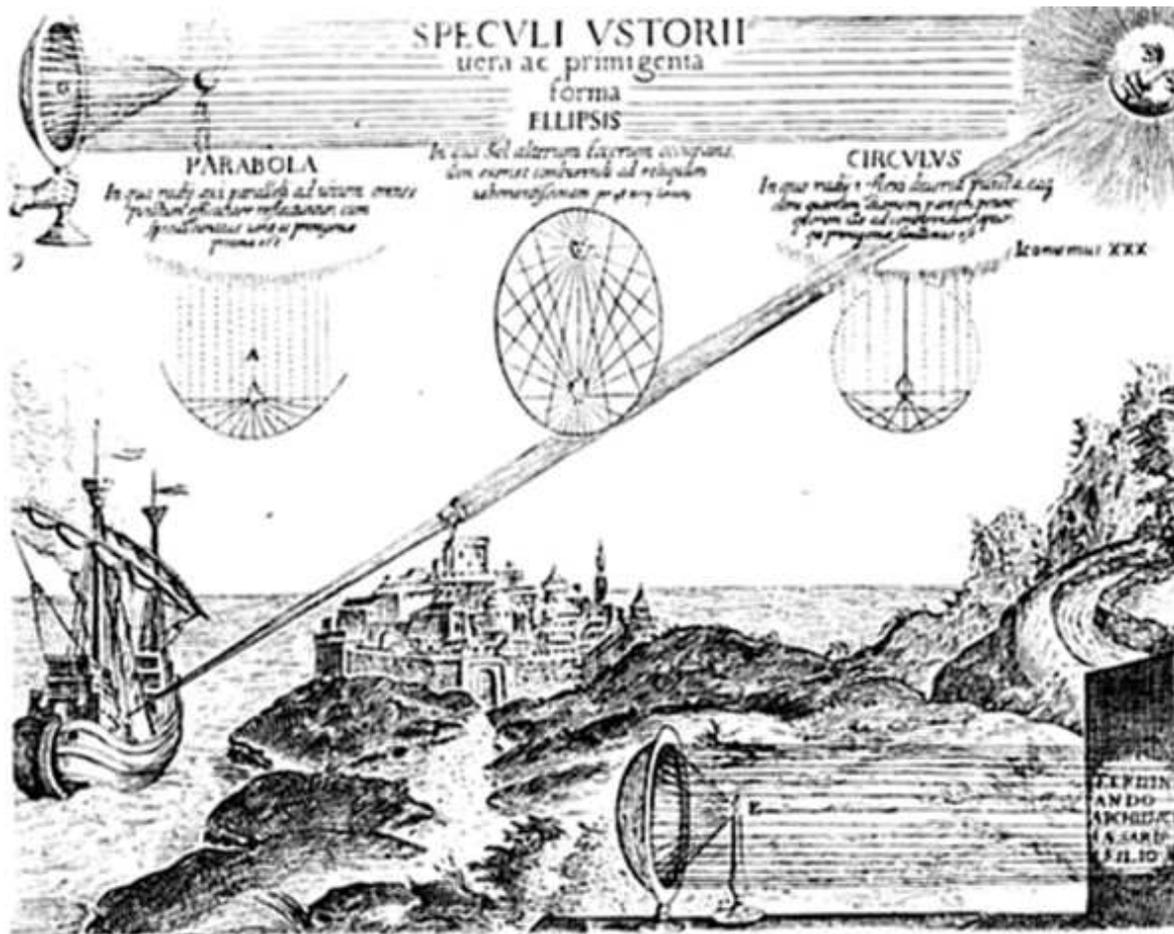


Fig. 14 – Illustrazione tratta da “Ars magna lucis et umbrae” di Kiercher (1646)

Fra le altre curiosità dell’epoca ricordiamo, infine, le esperienze che avrebbe condotto un certo Vallette.

Vallette (fine XVII sec.), ottico francese di Lione, costruì, attorno al 1670, vari specchi sferici concavi, fino ad un metro di diametro, con fuoco a circa 90 cm. Uno di essi fu comprato dal re di Francia .

Sulla stampa inglese dell’epoca, non si sa con quanta attendibilità, si legge che avrebbe potuto fondere, con l’uso dei raggi solari, dello stagno in tre secondi, rame in otto, e forare una lastra di ferro in sedici. Tentò anche degli esperimenti per vetrificare l’ardesia ed il granito.

L'epoca della rivoluzione industriale

Continuano in quest'epoca, anche se con minore incisività rispetto ai secoli precedenti, gli studi teorici di matematica e di ottica della riflessione, come per esempio quelli di **Favaro** e **Mazzucchelli**, due matematici dell'inizio del 700, scettici sulla impresa degli specchi di Archimede; in particolare è da ricordare nel 1737 Mazzucchelli, con la sua opera “*Notizie intorno ad Archimede*”

Nel campo sperimentale gli esempi presenti sono invece più numerosi e significativi, quasi sempre sorretti da una fede incrollabile di poter trarre concreto vantaggio dallo sfruttamento della risorsa termica solare con una ovvia propensione, da parte di molti, per la veridicità dell'impresa di Archimede con i suoi specchi ustori.

Tranne che per gli esperimenti di **Peter Hoesen** (inizi XVIII sec), scarsamente documentati, siamo in questi secoli in possesso di precise e credibili resoconti sulle macchine solari ustorie create da valenti scienziati, primi fra tutti i francesi Buffon, Mouchot e Pifre.



Fig. 15 - George Louis Leclerc, conte di Buffon

George Louis Leclerc, conte di **Buffon** (1707 – 1788), originario di una ricca famiglia francese, si dedicò a studi di matematica, medicina e botanica, con una conoscenza enciclopedica ed un desiderio di sistematizzazione universale del sapere, tipico del suo tempo. Nei 50 volumi della sua “*Storia naturale*” affronta problemi di biologia, matematica, chimica, ottica, filosofia e molti altri. Dal 1739, divenuto sovrintendente dei giardini reali di Parigi, si dedicò ad esperimenti sulla concentrazione dell'energia solare a supporto della sua convinzione di storicità degli

specchi ustori di Archimede. Tale convinzione gli proveniva dalla conoscenza delle opere bizantine di Tzetzes e Zonaras ritenendo il silenzio sulle avventure degli specchi da parte di Polibio, Livio e Plutarco, di minor valore storico rispetto agli esperimenti che andava facendo.

Nella sua ricostruzione dell'esperienza archimedeica, assume una distanza specchio – obiettivo (il “tiro d'arco” di Tzetzes) di circa 150 – 200 piedi (45 – 60 metri) e propende per l'uso di specchi piani singoli orientati su un unico obiettivo.

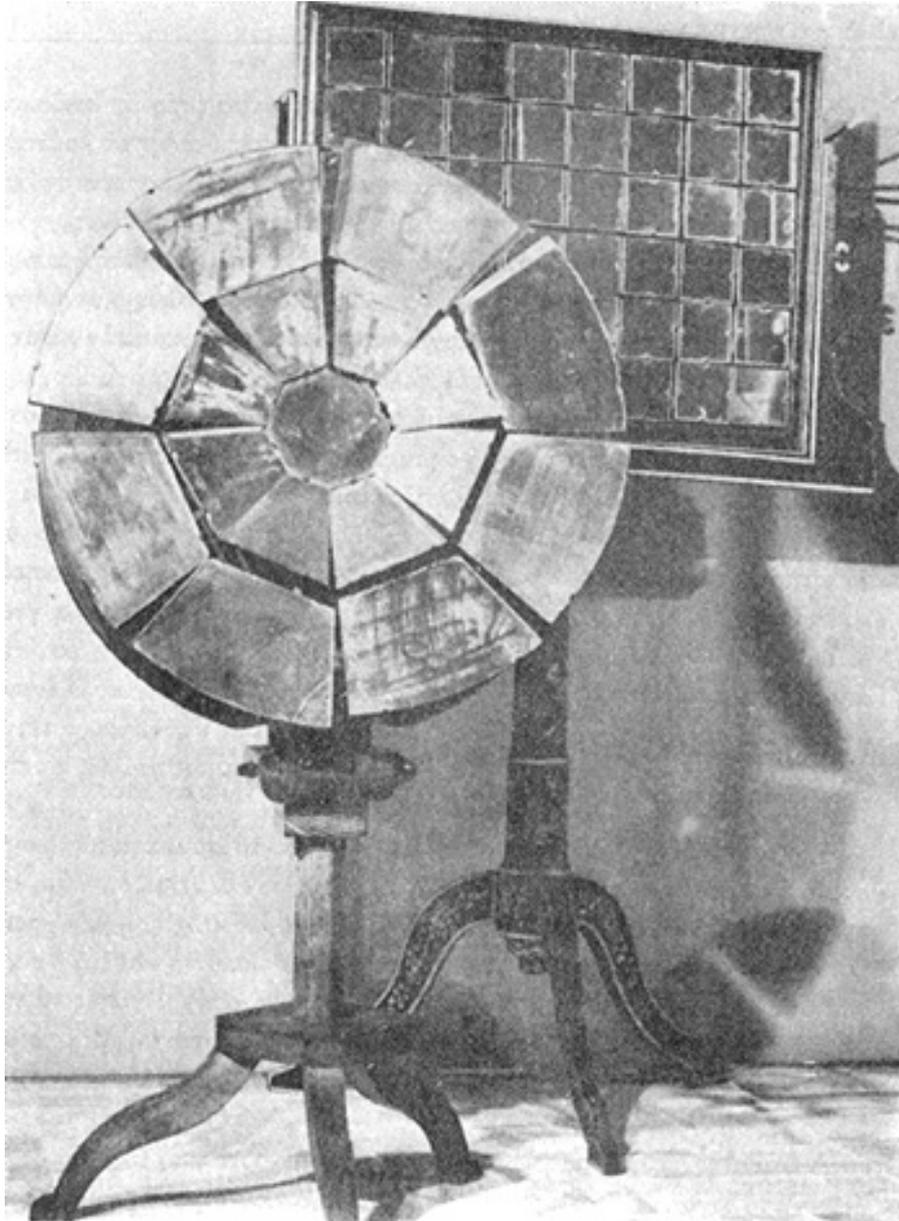


Fig.16 - Specchi ustori di Buffon, conservati al museo tecnologico di Parigi

In un primo esperimento (10 aprile 1747) utilizzò 148 elementi piani di specchio, ciascuno delle dimensioni di circa 6 x 8 pollici (16 x 22 cm), montati con uno spazio fra di loro di circa 1 cm, su un supporto piano ligneo e singolarmente aggiustabili su due assi tramite leverismi e viti anch'esse di legno.

Gli specchi erano realizzati con vetro ricoperto posteriormente da amalgama di stagno. Ad una distanza di 150 piedi riuscì a portare a combustione del legno di abete, sia nudo che ricoperto di bitume o di lana. In altri esperimenti simili sarebbe arrivato alla fusione del piombo e dello stagno ad una distanza di 120 piedi, e dell'argento a 50 piedi.

Consapevole del fatto che Archimede ben difficilmente avrebbe avuto la disponibilità di specchi di vetro, realizzò negli anni seguenti (1749 – 1750) degli specchi quadrati di rame lucidato con dimensioni 4 x 4 pollici, ripetendo numerosi esperimenti che lo convinsero della verità e fattibilità dell'impresa di Archimede.

Per la sua cultura enciclopedica ma superficiale, Buffon fu, anche dai contemporanei, visto sempre con sospetto per quanto riguarda il rigore della sua analisi storica e scientifica; alla luce delle conoscenze attuali si può però asserire che certamente le esperienze di Buffon avranno avuto l'esito da lui descritto, ma che ciò non è sufficiente per arrivare alle conclusioni storiche cui lui arrivò.

Augustin Mouchot (1825 – 1912) professore di matematica al liceo di Tours, in Francia, mosse i suoi primi passi in merito alla sperimentazione di macchine solari spinto da considerazioni termodinamiche sul degrado dell'energia e dalle previsioni di esaurimento delle fonti fossili (carbone) massicciamente utilizzate al suo tempo per alimentare le macchine termiche giunte ormai a maturazione tecnologica e che si diffondevano a macchia d'olio.

I suoi primi esperimenti riguardano la realizzazione di una sorta di alambicco solare, un cilindro nero ricoperto da un involucro di vetro, che utilizzava per distillare il vino in brandy. La stessa tecnica lo portò a brevettare e realizzare, attorno al 1861, la prima caldaia solare in grado di produrre vapore e che fu presentata all'imperatore Napoleone III nel 1866.

I suoi esperimenti continuarono, con l'appoggio economico del governo francese, con la realizzazione, nel 1869, di una caldaia composta da tubi e da un concentratore solare metallico a specchio troncoconico; si trattò della prima

macchina di una qualche utilità, potendo azionare un motore alternativo di circa mezzo cavallo con 80 impulsi al minuto e con pressione di vapore di circa 3 bar. Assieme alla macchina solare Mouchot mise pure in opera un inseguitore automatico per il continuo orientamento azimutale ed in elevazione dello specchio nei confronti del sole. E' dello stesso periodo la pubblicazione della sua opera *“Il calore solare e le sue applicazioni industriali”*.

Assieme al suo assistente Abel Pifre, partecipò nel 1878 all'esposizione mondiale di Parigi, esponendo un motore solare con uno specchio di diametro di circa 4 metri ed una caldaia di 70 litri di acqua. Riuscì a produrre vapore a 7 bar di pressione azionando una macchina per la produzione del ghiaccio: l'impressione del pubblico fu enorme; ghiaccio dal sole!

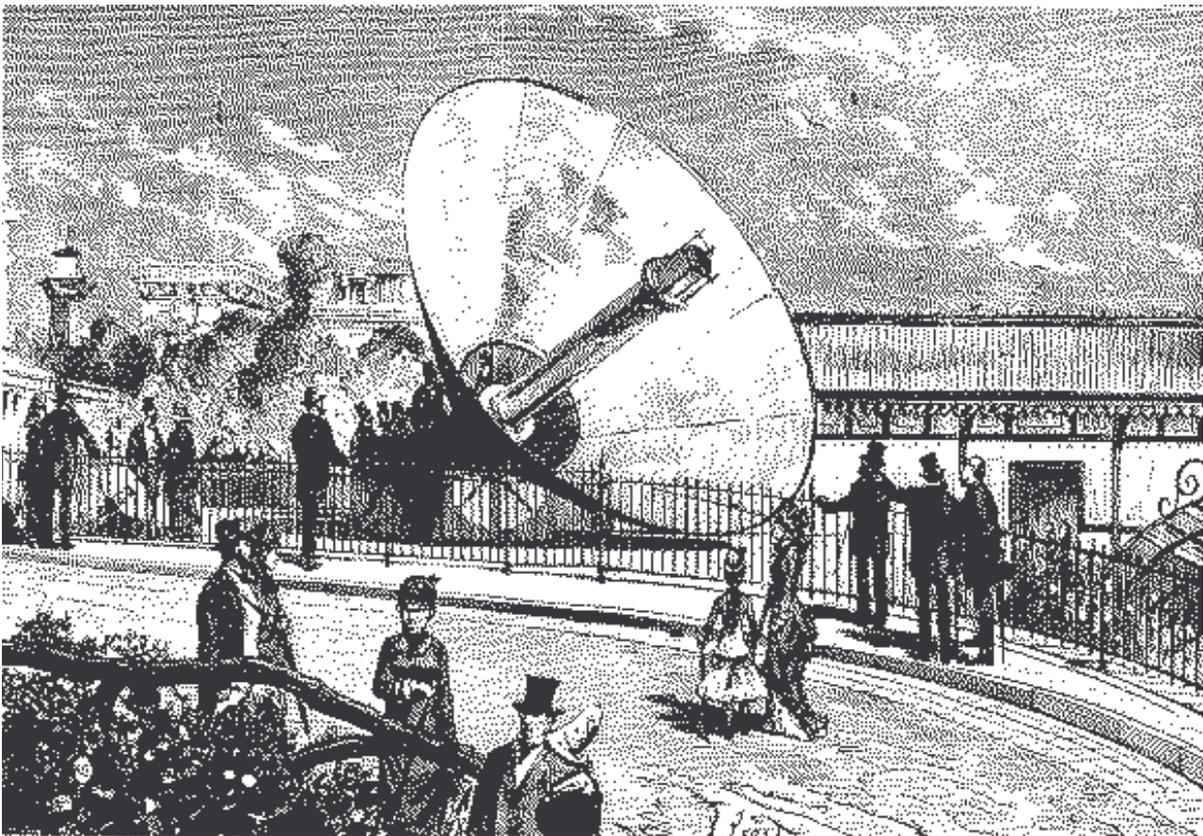


Fig. 17 – Esposizione di Parigi del 1878 con la macchina solare di Mouchot

Purtroppo attorno al 1880 gli appoggi da parte del governo francese, inizialmente interessato alla nuova tecnologia, cominciarono a venire meno grazie ai migliorati rapporti franco-inglesi ed allo sviluppo delle ferrovie che portarono a poter disporre di carbone a prezzi notevolmente più competitivi che negli anni precedenti.

L'assistente di Mouchot, **Pifre**, continuò a costruire motori solari sempre più grandi ed efficienti, arrivando nel 1880 ad esporre nei giardini delle Tuileries, a Parigi, un generatore di vapore solare a concentrazione che alimentava a 7 bar una macchina tipografica con la quale stampò 500 copie del “*Giornale del sole*”, una pubblicazione creata per l'occasione.

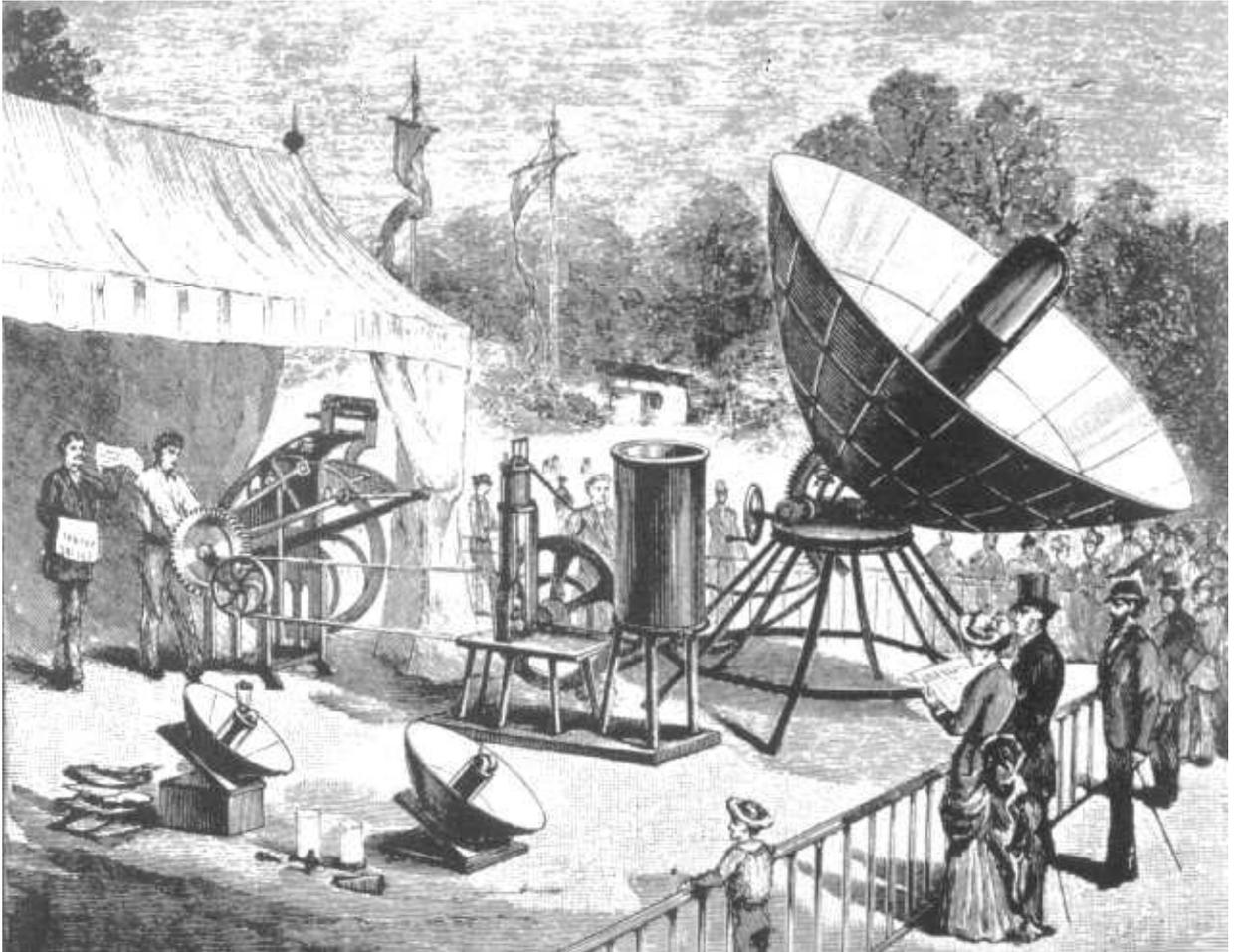


Fig. 18 – Macchina da stampa alimentata dal motore solare di Pifre (1880)

Le prime applicazioni commerciali dell'idea di Archimede

All'inizio del XX secolo la tecnologia solare a concentrazione, dopo i primi fruttuosi esperimenti di Mouchot del secolo precedente, era finalmente pronta ad essere utilizzata commercialmente, incoraggiata anche dalle prime avvisaglie di crisi energetiche del carbone dei primi decenni del '900.

Fra la fine dell'800 ed i primi decenni del 900, specialmente in America, si assiste ad un impressionante numero di brevetti depositati in merito alla realizzazione di motori solari, macchine termiche, concentratori, etc..

In mezzo a tanti progetti, sogni, fantasie ed illusioni, non mancarono però realizzazioni pratiche tecnologicamente interessanti e valide, come i primi collettori parabolici di Ericsson, le pompe idrauliche alimentate dai concentratori solari di Eneas ed i primi impianti industriali di Shuman.

John Ericsson (1803 - 1889) Ingegnere svedese, esercitò la sua professione dal 1839 prevalentemente in America a New York, con una sterminata serie di brevetti ed idee su fornaci solari, dissalatori, motori termici ad aria calda, etc.

Il punto di partenza di Ericsson erano gli esperimenti francesi di Mouchot, che egli criticava per la loro esigua resa energetica e per le notevoli dimensioni delle macchine realizzate. Nel 1872 brevettò un motore a pistoncini alimentato da aria calda ottenuta da uno specchio solare parabolico.

La produzione di Ericsson in definitiva si limitò a qualche perfezionamento della macchina di Mouchot, con la sostituzione, in qualche progetto, dell'acqua con l'aria quale fluido di lavoro, e con una migliore qualità del riflettore attraverso l'uso di specchi argentati.

La sua attività di ingegnere e costruttore fu dispersiva e continuamente all'inseguimento di idee, spesso balzane, che lo portarono raramente a concretizzare

un qualche prodotto industrialmente utile, con l’eccezione forse di una pompa per irrigazione mossa da vapore solare e costruita nel 1888, poco prima della sua morte. E’ difficile oggi entrare nel merito degli effettivi contributi scientifici dati da Ericsson alla scienza solare; fantasioso, altero e sostenitore ad oltranza delle proprie idee anche di fronte ad evidenti errori, distrusse, prima di morire, tutti i suoi disegni ed i suoi prototipi nella dichiarata intenzione di non far rintracciare ai posteri qualche sua imprecisione tecnica, e rispose con uno sprezzante rifiuto al museo di Stoccolma che gli chiedeva di poter esporre qualche frutto del suo ingegno.

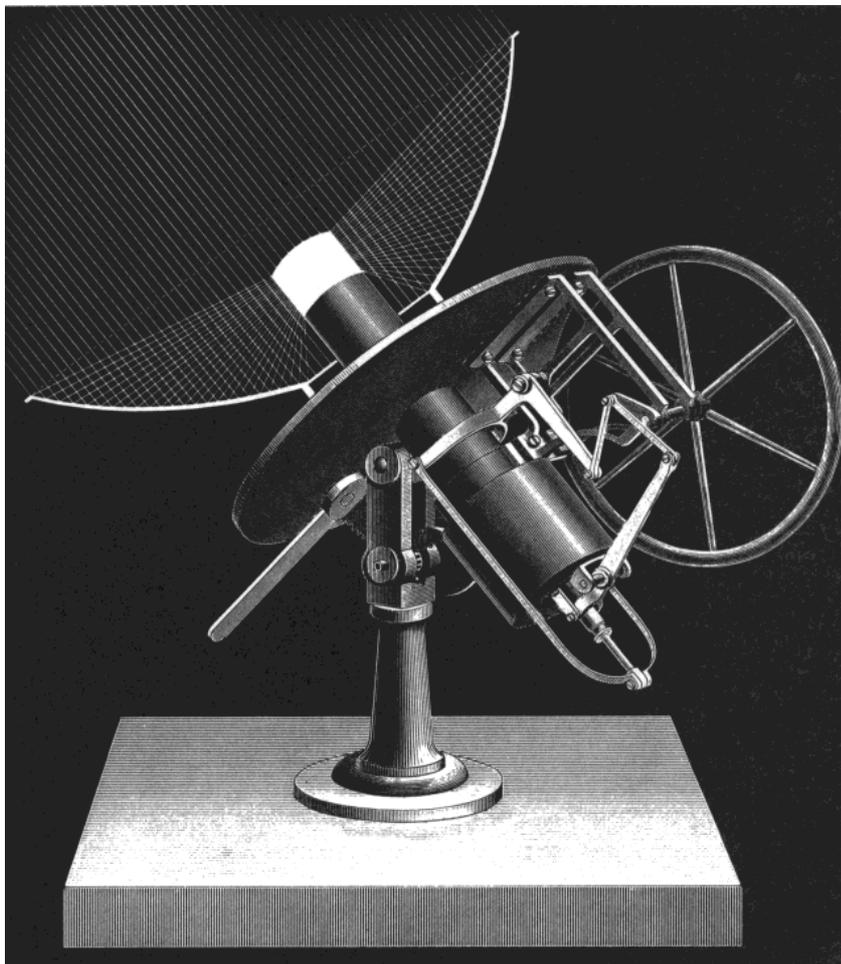


Fig.19 – Brevetto Ericsson del 1872 per motore solare ad aria calda

Aubrey Eneas (circa 1860 - 1920) inventore di origine inglese ma residente in America a Boston, fondando una apposita società commerciale, progettò e costruì dei concentratori solari troncoconici di notevoli dimensioni (circa 10 metri)

vendendone qualche esemplare agli agricoltori della California per azionare, con il vapore prodotto dall’energia solare, pompe idrauliche di irrigazione.



Fig. 20 – Collettore a disco troncoconico di Eneas (1903)

La più importante applicazione degli specchi concentratori solari, fino ai nostri giorni, è, agli inizi del '900, l'opera di **Frank Shuman** (1862 - 1918) inventore autodidatta di Tacony (Filadelfia). Nel 1911 le sue prime realizzazioni a bassa temperatura ed a bassa pressione erano in grado di azionare una pompa che sollevasse 12000 litri/min di acqua a 10 metri, con una potenza di circa 20 KW. Il rendimento fra risorsa solare ed energia termica utile si stima fosse stato attorno al 30%.

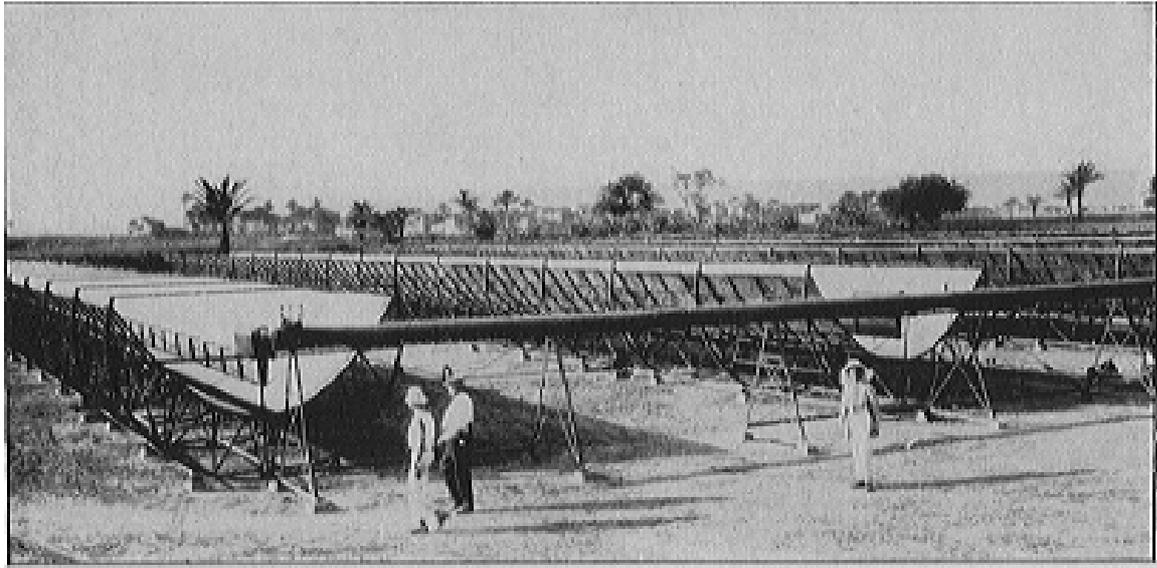


Fig. 21 – Impianto solare realizzato da Shuman a Meadi (Egitto 1913)

Nel 1912, grazie ad accordi di finanziamento, si recò in Egitto a Meadi, 20 Km distante dal Cairo, dove costruì il più grande impianto solare dell'epoca: circa 1200 m² di collettori solari per un impianto di pompe da irrigazione della potenza complessiva di 55 cavalli, ed una capacità di pompaggio fino a 27000 litri di acqua al minuto. L'impianto, ultimato nel luglio 1913, funzionava 24 ore al giorno, grazie ad un sistema di accumulo termico ad acqua calda, con un rendimento (energia termica utile/energia solare) di circa il 40%.

I collettori ricevitori (in numero di 5) erano costituiti da concentratori parabolici lineari larghi 4 metri e lunghi ciascuno 60 metri

Fu veramente un'impresa eccezionale che confermò, specie per i paesi in via di sviluppo, la possibilità di affrancarsi dai combustibili fossili. Il console generale egiziano lord Horatio Kitchener, prevedendo favolosi sviluppi offrì a Shuman un terreno di 30000 acri per un simile impianto da realizzare in Sudan. Numerose altre offerte arrivarono anche da altri stati europei che avevano all'epoca possedimenti in Africa.

Il sogno di Shuman era quello di creare in Africa un centro di produzione di energia per tutta l'Europa sfruttando la nascente tecnologia di trasmissione dell'energia elettrica alternata a grandi distanze con elettrodotti anche sottomarini.

Si tornò con i piedi per terra l'anno seguente, nel 1915 allo scoppio della prima guerra mondiale che costrinse ad interessarsi di problemi più immediati e senza

quella cooperazione fra più Stati auspicata da Shuman. Quando la guerra finì, la nuova era del petrolio a basso costo inflisse il definitivo colpo di grazia al progetto solare. Shuman morì nel 1918.

Le attuali tecnologie della concentrazione dell'energia solare

Per la produzione di energia elettrica, sono oggi attualmente impiegate le seguenti tecniche di concentrazione solare nei seguenti tipi di impianto:

- Impianti a torri
- Impianti a collettori parabolici a disco
- Impianti a collettori parabolici lineari



Fig. 22 – Campo eliostati di impianto a torre

Gli impianti a torre (Fig. 22) inseguono il movimento solare su due assi di rotazione, attraverso degli specchi piani, chiamati eliostati, che concentrano l'energia su un ricevitore montato sulla sommità di una torre. L'utilizzo di sali fusi per raccogliere ed immagazzinare tale calore, permette di raggiungere temperature di oltre 550 °C con benefici effetti sul rendimento di un tradizionale ciclo a vapore seguente.

Un inconveniente legato a tale tecnologia è quello relativo alle dimensioni in altezza che deve possedere la torre per ricevere l'energia riflessa dalla periferia del campo, e la disposizione degli specchi periferici che per non farsi ombra devono essere

posizionati con maggiore occupazione di terreno. Non sono infrequenti progetti con torri di 200 metri per una potenza installata di qualche decina di MW.

Dando per superabili le citate difficoltà, la conversione energetica è, in questi impianti, fra le più convenienti del settore termico solare, con costi di produzione che oggi sono stimati nell'intorno di 0,09 – 0,12 euro / kWh

Le realizzazioni positivamente sperimentate sono relative ad impianti di circa 10 MWe, come l'impianto Solar Two nel deserto della California.



Fig. 23 – Disco parabolico solare

Gli impianti a collettori parabolici a disco (Fig.23), sfruttano parimenti la concentrazione dei raggi solari con doppio inseguimento, permettendo di raggiungere alti fattori di concentrazione ed alte temperature di utilizzo. La loro dimensione (di circa 10 - 15 metri di diametro) ne limita l'impiego per la generazione elettrica da parte di apparecchiature dedicate montate direttamente sul fuoco del paraboloide. Ciascuno specchio è in grado di raccogliere 100 – 200 kWt e quindi di generare una potenza elettrica dell'ordine delle decine di kW. Nella figura è riportato

un paraboloide del diametro di 17 metri con un generatore elettrico a motore Stirling in grado di erogare una potenza di 50 KW.

Gli impianti con collettori parabolici lineari (Fig. 24) concentrano la radiazione solare su una tubazione posta nella linea focale di un cilindro a sezione parabolica con asse longitudinale parallelo al terreno. A causa delle loro notevoli dimensioni è sempre attuato un inseguimento solare su un solo asse, riducendo quindi leggermente l'input termico disponibile da parte del sole.

Negli impianti attualmente funzionanti nel mondo, e basati sulla tecnologia dei collettori parabolici lineari, la radiazione solare provvede a riscaldare un fluido termovettore (generalmente olio diatermico) che scorre all'interno di una tubazione posta sull'asse focale del cilindro parabolico. Con una successiva trasformazione termica l'olio cede il suo calore all'acqua per generare vapore da inviare ad una tradizionale turbina.



Fig. 24 – Collettori parabolici lineari

Una recente innovazione ENEA, per un progetto di una centrale solare termodinamica che dovrebbe nascere a Priolo (Siracusa) come integrazione dell'attuale impianto termoelettrico dell'ENEL, prevede l'utilizzo di sali di sodio fusi, al posto degli olii diatermici, permettendo temperature di oltre 500 gradi con evidenti benefici sul rendimento.

Sono attualmente funzionanti 9 impianti a collettori solari parabolici, nel deserto del Mojave in California, con potenze di impianto fino ad 80 MWe attraverso l'impiego integrato di combustibili fossili.

Forme più o meno paraboliche sono attualmente adottate nelle cosiddette cucine solari, in via di diffusione, con alterne vicende, nei paesi del terzo mondo come soluzione alla carenza di fonti energetiche.



Fig. 25 – Esempi di cucine solari, sviluppate per i paesi del terzo mondo

Nel campo delle fornaci solari per usi termochimici è usualmente adottato il sistema di concentrazione con specchi compositi, formato cioè da numerosi elementi piani singolarmente indirizzati sull'obiettivo che presentandosi a non eccessiva distanza (al contrario degli impianti a torre) gode della proprietà di avere una macchia solare di minori dimensioni e quindi un maggiore rapporto di concentrazione.

Nella seguente figura 26 è riportato un esempio tratto dalle installazioni del centro sperimentale PSA (Plataforma Solar de Almeria) in Spagna.



Fig. 26 – Specchio riflettore di una moderna fornace solare