

Scheda didattica: costruzione di uno spettroscopio a reticolo di diffrazione per lo studio delle caratteristiche chimico-fisiche del Sole

Pierfranco Bellomo

Resp. Sezione di Spettroscopia della UAI – spettroscopia@uai.it

Associazione Astrofili Bolognesi

1) Introduzione

Lo scopo di questa scheda è di fornire ai docenti, ma anche agli appassionati, tutti gli elementi materiali ed esplicativi per la costruzione di un semplice spettroscopio con il quale realizzare interessanti esperimenti sulla natura della luce. Con il nostro spettroscopio sarà possibile osservare in modo semplice e nitido lo spettro di una varietà di sorgenti, quali una fiamma, diversi tipi di lampade e di alcuni degli astri brillanti che illuminano il nostro cielo. Avremo così una evidenza sperimentale delle leggi che sono alla base dei complessi meccanismi dell' emissione e dell' assorbimento atomico.

2) Un po' di teoria

a) La natura della luce

Iniziamo con il ricordare che fu **Isaaco Newton** (1642 – 1727) a dimostrare per primo la complessa natura della luce. Da grande scienziato sperimentale quale era, dapprima scompose per mezzo di un prisma la luce del Sole nei colori dell' arcobaleno poi, a riprova, ricompose questi in luce bianca, con il famoso esperimento del disco rotante a settori colorati.

La luce ha una stranissima natura. In alcune circostanze possiamo considerarla come palline prive di massa, detti "**fotoni**" che viaggiano nello spazio alla fantastica velocità di 299.792.458 metri al secondo, in altre circostanze essa si comporta come un insieme di onde, che si propagano alla stessa velocità dei fotoni.

E' noto dalla fisica che le onde di qualsiasi natura sono caratterizzate da una proprietà fondamentale: la "**lunghezza d' onda**", ossia la distanza tra due creste consecutive dell' onda. Pertanto la luce rossa sarà costituita da onde la cui lunghezza è all' incirca 0,0006 mm mentre il colore violetto avrà una lunghezza d' onda di circa 0,0004 mm.

I fisici esprimono questa caratteristica della luce per mezzo della **lunghezza d' onda** λ ; per la luce è espressa in nanometri, ossia 10^{-9} m, oppure o della **frequenza** $\nu = c/\lambda$, dove c è la velocità della luce nel vuoto. Per esempio per la luce rossa, (rapportando tutto in metri) avremo:
 $3 \times 10^8 \text{ m/sec} / 6 \times 10^{-7} \text{ m} = 5 \times 10^{14}$ cicli/sec
in altre parole la luce rossa vibra 500.000.000.000.000 di volte al secondo (500 mila gigahertz!)

E' merito di **Max Planck** (1858 – 1947) di aver dimostrato nel 1905, per mezzo della legge che porta il suo nome, la diretta relazione tra la lunghezza d' onda (frequenza) e l' energia del fotone ad essa associata: **$E=h\nu$** . Un fotone associato alla luce violetta avrà più energia di uno di luce rossa.

Come si distribuiscono i fotoni in un pacchetto d' onda? La luce, cosiddetta bianca, ossia la luce che emanano il nostro Sole o una comune lampadina è costituita da un insieme continuo di onde di varie lunghezza d' onda, è un "minestrone" di fotoni, ognuno con una propria frequenza, o energia. La legge con la quale sono distribuiti i fotoni, e quindi la loro energia, alle varie lunghezze d' onda, dipende esclusivamente dalla temperatura del corpo ed è stata formulata dallo stesso Planck, ed è nota come "**Teoria dell' emissione del corpo nero**". Pertanto la distribuzione delle intensità dei vari colori dello spettro ci fornisce misura diretta della temperatura dell' oggetto.

Della stessa natura sono le onde radio, le microonde, l' infrarosso, l' ultravioletto, i raggi X e raggi gamma; essi non visibili al nostro occhio ma si comportano come la luce visibile, tutti insieme costituiscono "**lo spettro della radiazione elettromagnetica**".

Pierfranco Bellomo: Costruzione di un spettroscopio a reticolo di diffrazione - 02/06/2006 11.04.00

b) L' origine della luce

Perché alcune sorgenti emettono una luce rossa piuttosto che viola? Perché alcuni spettri hanno un aspetto continuo, altri sono solcati di righe scure, altri ancora hanno uno sfondo scuro ed intense righe luminose? La risposta è complessa e risiede tanto nelle leggi di Planck quanto nella **teoria atomica** formulata da **Niels Bohr** (1885-1962) nei primi decenni del secolo scorso e suoi successivi sviluppi.

Una prima risposta è stata formulata su base puramente **empirica** da **Gustav Kirchoff** (1824-1887) nel 1859:

- un solido, un liquido o un gas sottoposti a forte pressione emettono uno spettro continuo che copre i colori dell' iride;
- un gas incandescente a bassa pressione emette uno spettro di righe brillanti di emissione;
- quando davanti alla sorgente di spettro continuo, viene posto un gas freddo, si osservano, sovrapposte allo spettro, delle righe scure di assorbimento; queste hanno la stessa lunghezza d' onda delle righe brillanti emesse dal medesimo gas portato all' incandescenza

c) La composizione chimica della sorgente luminosa

Se buttiamo del sale da cucina su una fiamma, la vediamo colorarsi di giallo; guardandola con lo spettroscopio vediamo due intense righe gialle. Analogamente succede con il calcio o con il litio dove la fiamma diventa rossa e nello spettro vediamo delle righe di colore rosso.

L' analisi del colore e della posizione delle righe ci svela la composizione chimica dell' oggetto osservato.

La potenza della spettroscopia applicata all' astronomia sta proprio nella possibilità di ottenere un gran numero di informazioni sulle condizioni fisiche della oggetto celeste e sulla sua composizione chimica, semplicemente analizzato la sua luce.

Gli astronomi si sono spinti oltre ricavando da questi "messaggi" anche informazioni sulla:

- fase evolutiva e sull' età della stella (es. stelle tipo S a cattura di neutroni),
- sua cinematica relativa e velocità di rotazione,
- esistenza di fenomeni cataclistici in superficie (stelle Delta Scutii),
- presenza di involucri di gas e di emissione di materia (stelle Wolf-Rayet), ecc..
- presenza di campi magnetici (macchie solari).

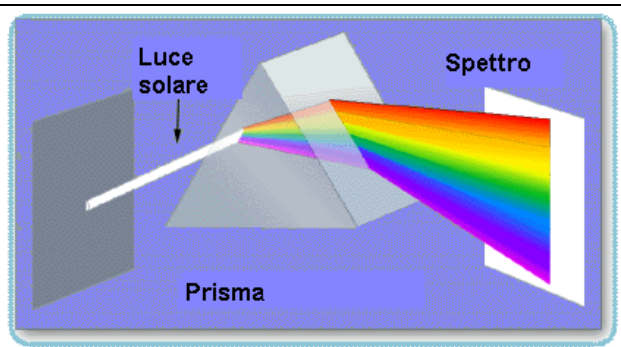
Ultimo, ma più importante, conferma dell' espansione dell' Universo mediante misurazione di spostamento Doppler delle galassie e dei quasars.

d) Come scomporre il segnale luminoso

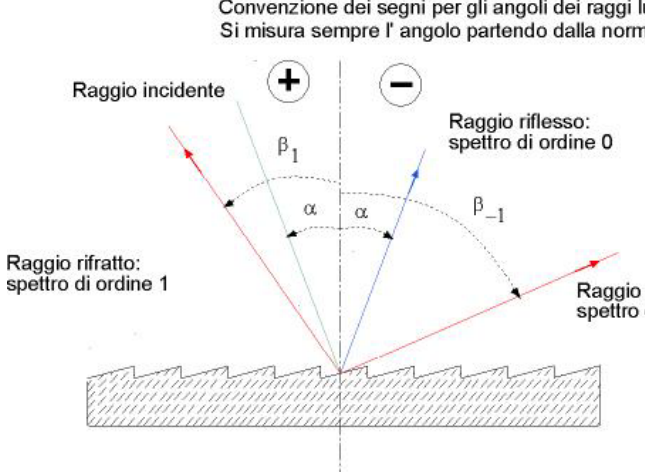
Per analizzare la composizione della luce si fa ricorso a dispositivi ottici che hanno la capacità di generare dei percorsi ottici diversi a secondo della lunghezza d' onda.

Questi dispositivi sono di due tipi :

- a) il prisma,
- b) il reticolo di diffrazione, questo, sua volta può essere:
 - c) a trasmissione.
 - d) a riflessione.



Il prisma è stato usato in passato negli spettroscopi antichi. Oggi si usa quasi esclusivamente il reticolo, che oltre a fornire una risposta lineare, ossia la scala delle lunghezze d' onde è facilmente tarabile, ha un poter risolutivo maggiore.

<p>Schema di funzionamento del reticolo:</p> <p>Il reticolo di diffrazione a riflessione più diffuso è il normale CD o DVD !!!</p>	<p>Convenzione dei segni per gli angoli dei raggi Si misura sempre l'angolo partendo dalla normale</p>  <p>The diagram shows a diffraction grating with a vertical normal line. An incident ray (red) comes from the top left at angle β_1 to the normal. A reflected ray (blue) goes to the top right at angle β_{-1}. A refracted ray (red) goes to the bottom right at angle α. The angle between the incident and refracted rays is α. A sign convention is shown with a '+' for the incident ray and a '-' for the reflected ray.</p>
<p>Formula fondamentale del reticolo:</p> $\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta = -k \cdot \lambda / m$ <p>dove k è l'ordine dello spettro, m è la costante del reticolo (distanza tra due righe)</p>	

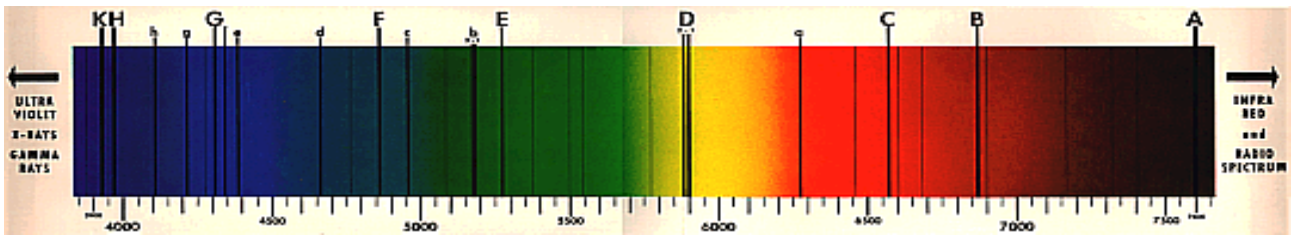
Il poter risolutivo di un reticolo è dato dalla formula: $R = \Delta\lambda/\lambda = k \cdot N$, dove k è il cosiddetto "ordine dello spettro" e vale 1 per i reticoli in ns. dotazione ed N è il numero totale di righe sulla superficie del reticolo.

Pertanto il poter risolutivo del vostro reticolo di 25 mm di larghezza è:

Righe/mm	k	Risoluzione $R = 1 \times N = 1 \times 25 \text{ mm} \times n^\circ \text{ righe/mm}$	Separazione lunghezze d' onda nel rosso a 6563 Angstroms	Separazione lunghezze d' onda nel violetto a 4000 Angstroms
			$\Delta\lambda = R \times \lambda$	$\Delta\lambda = R \times \lambda$
500	1	12.500	8,20 A	5 A
1000	1	25.000	4,10 A	2,5 A

3) COME APPARE LO SPETTRO DEL SOLE

Lo spettro è costituito da un fondo continuo che racchiude tutti i colori dell' iride. A sinistra inizia l' ultravioletto ed a destra l' infrarosso. L' intensità massima di luce si ha in corrispondenza del giallo, da cui si deduce, da considerazioni di natura fisica, che la temperatura superficiale dell' astro è di circa 5.700 °K. Lo spettro è solcato di righe di assorbimento corrispondenti ai vari elementi chimici ed individuabili tramite la tabella di sotto riportata. La prima misurazione delle lunghezze d' onde di queste righe è stata effettuata da **Joseph von Fraunhofer** (1787-1826), dal quale le righe hanno preso il nome.



Le principali righe di Fraunhofer

Riga	Elemento chimico	Lunghezza d' onda in Angstroms
A - (banda di righe)	O ₂ (ossigeno atmosferico)	7594 – 7621
B - (banda di righe)	O ₂ (ossigeno atmosferico)	6867 – 6884
C	H idrogeno	6563
a - (banda di righe)	O ₂ (ossigeno atmosferico)	6276 - 6287
D - 1, 2	Na doppietto del sodio	5896 & 5890
E	Fe ferro	5270
b - 1, 2	Mg tripletto del magnesio	5184 & 5173
c	Fe	4958

Riga	Elemento chimico	Lunghezza d' onda in Angstroms
F	H	4861
d	Fe	4668
e	Fe	4384
f	H	4340
G	Fe & Ca ferro e calcio	4308
g	Ca	4227
h	H	4102
H	Ca	3968
K	Ca	3934

Curiosità

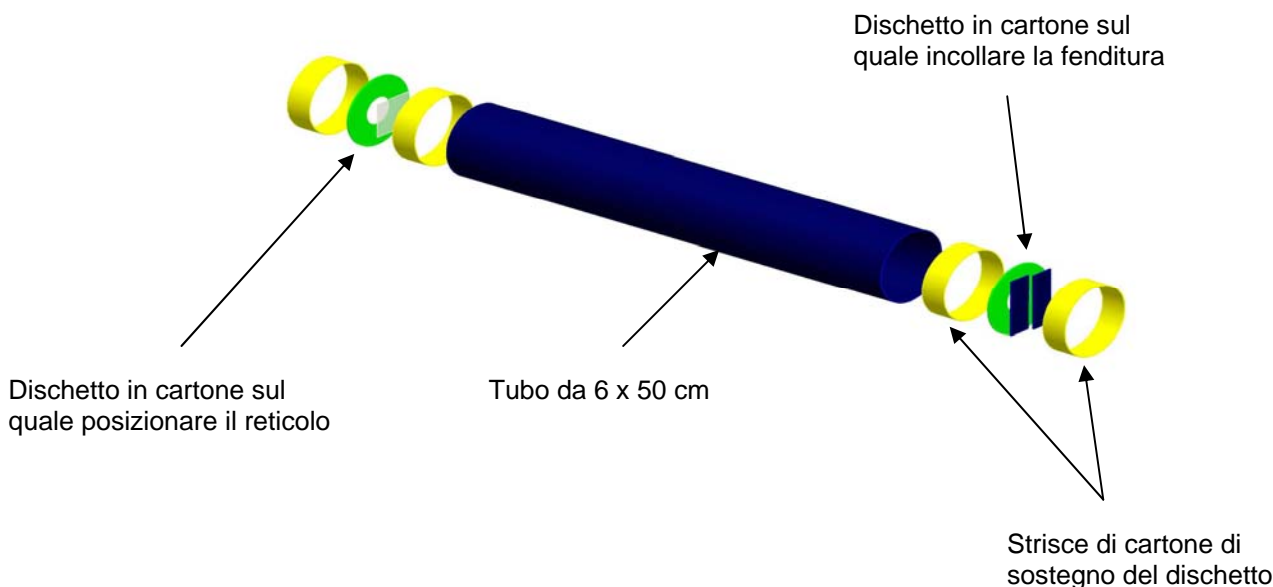
- 1) Puntatelo ora su Sole al tramonto; in cosa differisce lo spettro rispetto all' osservazione del Sole allo zenith? (*Sparisce la parte blu del Sole, aumenta la componente rossa e si notano le intense bande di assorbimento dell' ossigeno atmosferico nel rosso perché la luce del Sole attraversa più strati d' aria*)
- 2) Provate a puntare lo strumento sulla Luna piena. Quale differenza notate? (*Nessuna perché osservate sempre la luce del Sole riflessa dalla Luna!*)
- 3) Provate a puntare lo strumento su sorgenti luminose diverse, tubo al neon, lampade incandescenti, lampade a basso consumo, o a bruciare del sale da cucina sulla fiamma del gas, ecc.. Come è costituito lo spettro? Perché?
- 4) Provate a sistemare il vs. reticolo davanti a l' obiettivo della macchina fotografica e tentate di riprendere lo spettro di qualche stella molto brillante.

4) SCHEMA DI COSTRUZIONE DELLO SPETTROSCOPIO SOLARE

Materiale fornito e accessori:

- viene fornito un tubo di cartone, diametro 6 cm, lungo 50 cm;

- due schemi costruttivi, uno con dei dischetti, da incollare su un cartone più rigido e l' altro con quattro strisce da incollare su un cartone più flessibile, tipo ondulato;
- dotarsi di nastro adesivo, forbici, colla per cartone;
- foglio di alluminio, uso alimentare (Domopack);
- eventuale tempera di colore nero se il cartoncino è colorato.



LEGGETE BENE LE ISTRUZIONI FINO IN FONDO PRIMA DI PROCEDERE !!!

Preparazione della fenditura:

- 1) incollare il foglio con i quattro dischetti su un cartone e ritagliare i contorni e le finestrine interne ai dischetti;
- 2) i dischetti della fenditura sono quelli con la finestrina di 10 x 25 mm;
- 3) prendere un pezzettino di foglio di alluminio, dalle dimensioni di 15 x 30 mm circa e con un deciso colpo di forbici tagliarlo a metà;
- 4) prendere i due frammenti del foglio di alluminio, fissare il primo a filo con la metà della finestrina, assicurarli con un pezzettino di nastro adesivo;
- 5) ripetere l' operazione con il secondo pezzettino di alluminio, accostando i due lembi in modo che la distanza tra i due sia la più piccola possibile, ossia < 0,5 mm. **Questa è l' operazione più difficile, ma la qualità dello spettro dipenderà dalla qualità della fenditura.**
- 6) Assicurate il tutto con ulteriore nastro adesivo e, se volete dare maggior rigidità alla fenditura applicatevi sopra l' altro dischetto di cartone. La fenditura resta intrappolata in una specie di "sandwich".

PRIMA DI PROCEDERE ALLA FASE 3 E SUCC. **VERIFICATE CHE I DISCHETTI RITAGLIATI ENTRINO FACILMENTE NEL TUBO DI CARTONE.** QUESTO NON E' MAI PERFETTAMENTE DI DIAMETRO 59,5 MM. SE TROPPO GRANDE RIDURRE LEGGEREMENTE LA CIRCONFERENZA CON LE FORBICI.

Preparazione del reticolo:

- 1) come sopra, incollare i due dischetti con la finestrina 25 x 35 mm su un cartone e ritagliateli;
- 2) aprite la diapositiva (si apre tranquillamente come un libro) e, senza toccare il reticolo con le dita, rovesciatelo sul cartoncino, centrandolo con l' aiuto della punta duna matita. **Lavorate sempre sui bordi del reticolo, evitando di toccarne il centro.** Fissato con 2 pezzettini di nastro adesivo e fate il vs. "sandwich".

Preparazione delle strisce di sostegno

- 1) incollate la quattro strisce su un cartoncino non troppo rigido;
- 2) ritagliateli.
- 3) Avvolgeteli lentamente sull' esterno del tubo in modo da incurvarli.

Assemblaggio:

- 1) Inserire una striscia arrotolata all' interno del tubo, a circa 2 cm dall' estremità;
- 2) Inseritevi quindi dolcemente il dischetto della fenditura; assicurandovi che le **righe del reticolo siano il più possibile parallele alla fenditura**, in altre parole se la fenditura è montata per la verticale, il reticolo deve avere il lato più corto verticale.
- 3) Bloccatelo inserendovi l' altra striscia di cartone.
- 4) Ripetere l' operazione all' altra estremità con le altre due strisce ed il dischetto del reticolo,
- 5) ... ed il gioco è fatto e puntate lo strumento verso il Sole !!!

Varianti: se usate un reticolo di diffrazione da 1000 righe/mm, che assicura un poter di diffrazione doppio rispetto a quello da 500 righe, cercate di tenere il piano del reticolo più vicino all' occhio, inserendovi una striscia finale di 1 cm, anziché da 2 cm.

Potete provare il montaggio con cartoni diverso dal tubo, come ad esempio una scatola di scarpe, un tubo a sezione triangola disponibile presso Buffetti per al spedizione dei documenti.

Ricordatevi: tubo lungo, eliminate le riflessioni interne annerendolo con della tempera, fenditura stretta e parallela al reticolo!

6) Appendice 1: la formula generale del reticolo

La diffrazione di un raggio luminoso incidente un reticolo di diffrazione è descritta da una legge facilmente deducibile dall' ottica ondulatoria:

$$\sin \alpha + \sin \beta = -k \cdot \lambda / m$$

dove k è l' ordine dello spettro, m è la distanza tra due righe consecutive detta "costante del reticolo".

Usando opportuna attenzione sulle unità di misura è molto interessante studiare l' angolo di diffrazione per le varie incidenze e alle varie lunghezze d' onda; e per questo è di grande aiuto un foglio elettronico.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3	passo del reticolo righe/mm		r=	600			
4	costante del reticolo		m= 10^6/r	1666,66667			
5	ordine dello spettro		k=	-2			
6							
7	lunghezza d' onda in nm		l=	656	l=	300	
8			-k*l/m=	0,7872	-k*l/m=	0,36	
9							
10							
11	sen(a) +sen(b)=-k*l/m	a=	sen(a)=	arcsen(b)=	arcsen(b)=	dispersione	
12		5	0,08716	44,4	15,8	28,6	
13		10	0,17365	37,8	10,7	27,1	
14		15	0,25882	31,9	5,8	26,1	
15		20	0,34202	26,4	1,0	25,4	
16		25	0,42262	21,4	-3,6	25,0	
		30	0,50000	16,7	-8,0	24,7	
		35	0,57358	12,3	-12,3	24,7	

Nel nostro caso la costante del reticolo è $= 1000000/D3$ e vengono calcolati separatamente:

$$\text{sen}(a) = \text{SEN}(\$B12 * \text{PI.GRECO}() / 180)$$

$$\text{arcsen}(a) = \text{ARCSEN}(\$D\$8 - \$C12) * 180 / \text{PI.GRECO}()$$

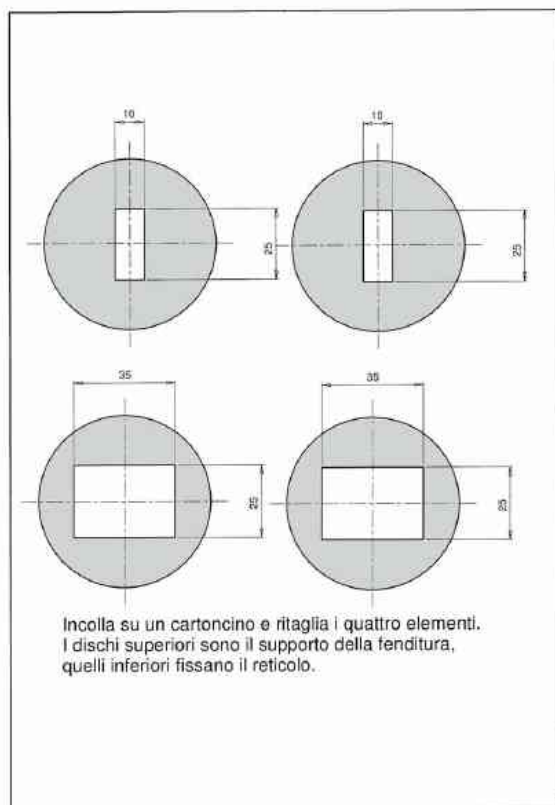
$$\text{arcsen}(b) = \text{ARCSEN}(\$F\$8 - \$C12) * 180 / \text{PI.GRECO}()$$

$$\text{dispersione } G12 = \$D12 - \$F12$$

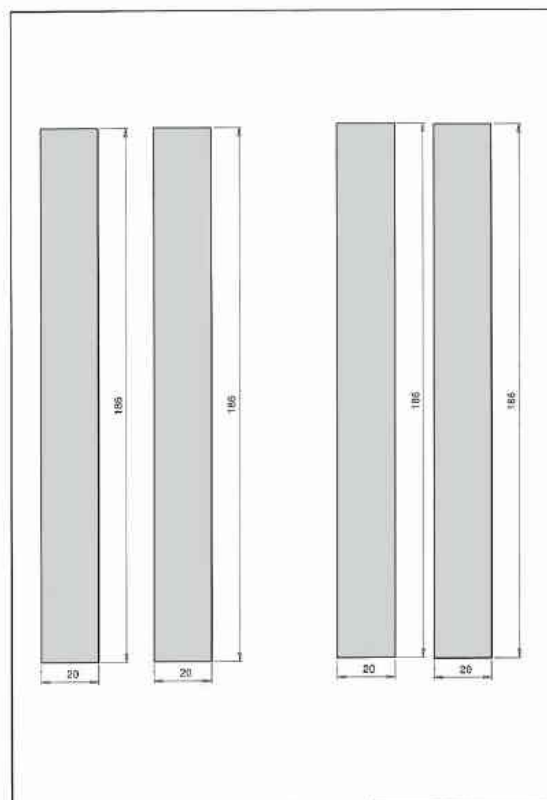
Nelle referenze trovate il collegamento ad un ottimo foglio elettronico della ditta Spectrogon.

7) Appendice 2: particolari costruttivi

Disegno dei particolari costruttivi da eseguire in cartone:



Supporti per la fenditura e d il reticolo



Strisce di cartone di supporto

Per saperne di più

- 1) Il principale sito italiano di storia e teoria della spettroscopia astronomica con numerose referenze : <http://xoomer.virgilio.it/ggsbel/>
- 2) La sezione di spettroscopia della Unione Astrofili Italiani : <http://spettroscopia.uai.it/>
- 3) Interessante sito didattico per la realizzazione di esperimenti di ottica e spettrografi mediante l'impiego di un CD : "Jeux Optiques avec les Disques Compacts" <http://astro.u-strasbg.fr/~koppen/spectro/spectrof.html>
- 4) Sito della Jobin-Yvon con dettagliata monografia intitolata " The optics of spectroscopy" in formato pdf : <http://www.jobinyvon.com/usadivisions/OOS/>

- 5) Sito della Spectrogon, società svedese, con interessante manuale sui reticoli: <http://www.spectrogon.com>. In esso vi trovate un foglio elettronico per il calcolo del dimensionamento di un reticolo di diffrazione: <http://www.spectrogon.com/gratdesign.html>,

Ringraziamenti

Si ringrazia il Prof. Andrew Harmsworth della Leys School di Cambridge (GB) che ci ha concesso di pubblicare lo spettro del Sole:

<http://www.harmsy.freeuk.com/images/spectrum.jpeg>