

**Seminario 5: Come “vedere” la materia?**

Per studiare e comprendere

- la struttura dei materiali; la composizione dei materiali
- reazioni chimiche; passaggi di stato
- ecc.

si devono usare degli strumenti.

*La scelta dello strumento  
dipende  
da quale materiale  
e da quale fenomeno  
si vuole studiare.*

1

**Seminario 5: Come “vedere” la materia?**

*Negli ultimi 10-20 anni c'è stato un grande sviluppo degli strumenti per vedere la materia e i fenomeni.*

*Questo sviluppo porterà senz'altro un grande sviluppo anche alla nostra comprensione della materia e delle interazioni.*

Il seminario intende dare una sintesi di alcuni di questi strumenti.

Per una buona comprensione del funzionamento degli strumenti è necessario comprendere le proprietà della luce e delle onde.

2

**Seminario 5: Come “vedere” la materia?****Dal microscopio al LHC**

- L'ottica geometrica - ripasso
- Il microscopio
- La diffrazione e il limite di risoluzione - ripasso
- La dualità onda-particella
- Microscopio elettronico
- Microscopio a effetto tunnel
- Microscopio a forza atomica
- Cristallografia a raggi X - diffrazione dei raggi X
- Diffrazione dei neutroni

3

# **L'ottica geometrica**

## **Ripasso**

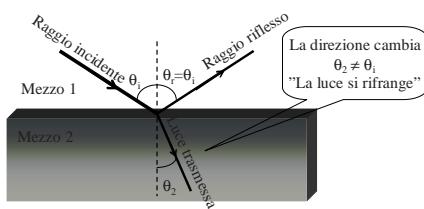
4

**La rifrazione**

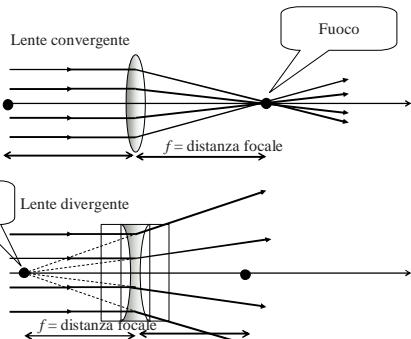
Il fenomeno della rifrazione si ha ogni volta che un'onda incide sulla superficie di separazione tra due mezzi:

- parte della sua energia viene riflessa
- parte viene trasmessa

La direzione in cui si propaga l'onda trasmessa è diversa dalla direzione dell'onda incidente.



5

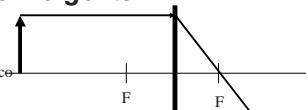
**La rifrazione si sfrutta nelle lenti**

6

## Costruzione dell'immagine lente convergente

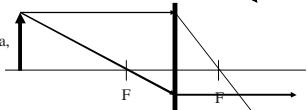
### Raggio 1

Inizialmente parallelo all'asse ottico, viene deviato e passa attraverso il fuoco



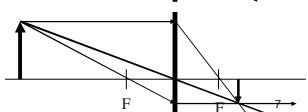
### Raggio 2

Passa inizialmente dal fuoco di sinistra, viene deviato e va via parallelo all'asse ottico



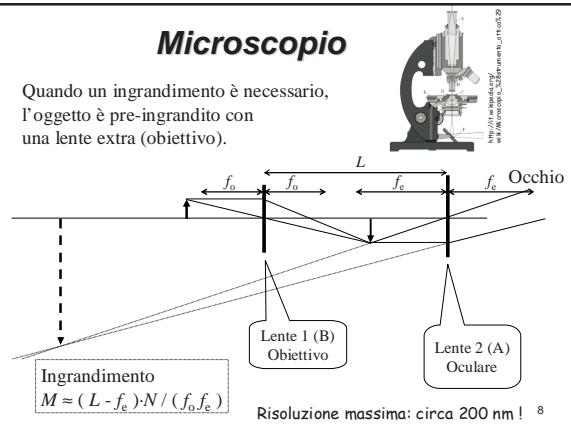
### Raggio 3

Passa attraverso il centro della lente e non viene deviato



## Microscopio

Quando un ingrandimento è necessario, l'oggetto è pre-ingrandito con una lente extra (obiettivo).



## La diffrazione

9

## Onde

- Un'onda è una perturbazione (oscillazione) che si propaga
- Un'onda trasporta energia e quantità di moto da un luogo all'altro

*Succede senza trasporto di materia*

10

## Onde

Impulso d'onda

Onda periodica

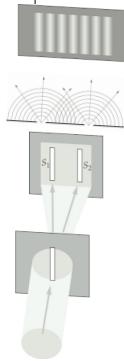
1111

## SOVRAPPOSIZIONE di impulsi d'onda positivi

## SOVRAPPOSIZIONE di impulsi d'onda positivi e negativi



## La natura ondulatoria della luce



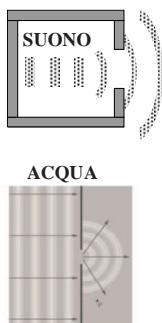
### Esperimento della doppia fenditura di Young

Nel 1801 Thomas Young realizzò un esperimento storico in cui dimostrò la natura ondulatoria della luce e riuscì a determinare per la prima volta la lunghezza d'onda della luce.

La sovrapposizione delle onde provenienti da due sorgenti coerenti genera la tipica figura di interferenza con linee nodali = luogo di punti con interferenza distruttiva

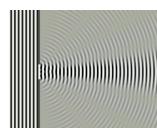
14

## Diffrazione



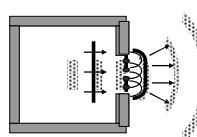
Un'onda che si piega attorno ad un ostacolo o al bordo di un foro si chiama **diffrazione**

È un fenomeno caratteristico di tutte le onde che si propagano in due e tre dimensioni



15

## Diffrazione - Principio di Huygens



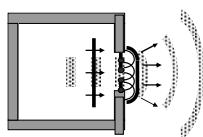
### Principio di Huygens

Ogni punto del fronte d'onda funziona come una sorgente che emette una piccola onda che si propaga con la stessa velocità dell'onda originale.

Il nuovo fronte d'onda si ottiene dall'inviluppo delle onde secondarie

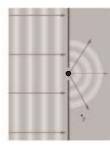
16

## Diffrazione - Principio di Huygens



### Principio di Huygens

Spiegha perché l'effetto di diffrazione è massimo quando la grandezza dell'apertura è circa uguale alla lunghezza d'onda

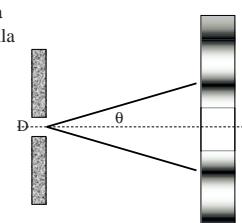


17

## Diffrazione della luce

Per vedere la diffrazione della luce occorre un foro la cui larghezza,  $D$ , sia comparabile alla lunghezza d'onda della luce, cioè dell'ordine del micrometro

Oltre al fatto che la luce si piega e illumina una zona molto più larga del foro, si notano anche delle zone più chiare e più scure che sono dovute all'INTERFERENZA delle onde secondarie emesse

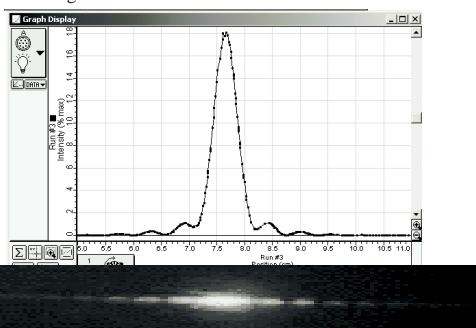


Primo minimo di intensità per:  $D \sin \theta = \lambda$   
Secondo minimo di intensità per:  $D \sin \theta = 2\lambda$

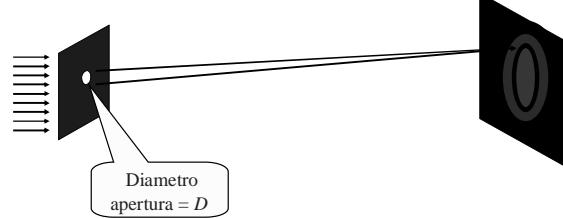
18

## Intensità della figura di diffrazione

Larghezza della fenditura = 40 micrometri



## Diffrazione da apertura circolare

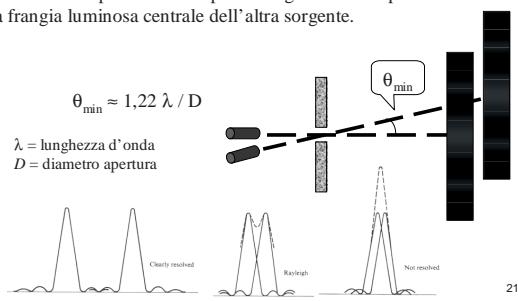


Primo minimo di intensità per:  $D \sin \theta = 1,22 \lambda$   
Secondo minimo di intensità per:  $D \sin \theta = 2,23 \lambda$

20

## Risoluzione

Due sorgenti puntiformi possono essere viste separatamente (risolte) se il primo minimo della figura di diffrazione prodotta dalla prima sorgente cade sopra la frangia luminosa centrale dell'altra sorgente.



## Studiare il mondo senza vederlo

Per vedere il mondo microscopico non possiamo usare gli occhi  
Ci dobbiamo servire di altri strumenti

bacchetta  
sottile



bastone  
grosso

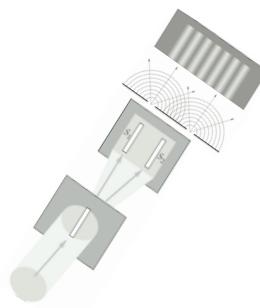
Riconosco parti con dimensioni  $\approx$  sezione della bacchetta

## La dualità onda-particella

23

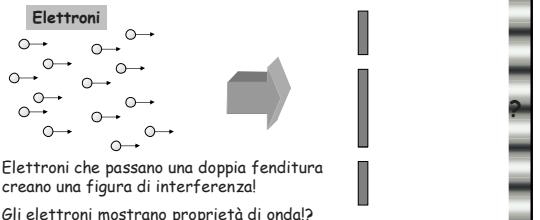
## La natura ondulatoria della luce

Esperimento della doppia fenditura di Young



24

## Particelle e onde



La meccanica quantistica da una descrizione dell'elettrone, ma quando dobbiamo interpretare la meccanica quantistica, abbiamo qualche volta bisogno di usare il concetto di particella e qualche volta il concetto di onda.

25

## Fotoni

Einstein propose 1905 (premio Nobel 1921) di spiegare l'effetto fotoelettrico facendo l'ipotesi che la luce fosse formata da pacchetti di energia, fotoni, ognuno con l'energia  $E$ :

$$E = hf, \quad \text{energia per un fotone}$$

$h$  è la costante di Planck con il valore

$$h \approx 6,626 \ 0755 \cdot 10^{-34} \ \text{J} \cdot \text{s}.$$

N.B: I fotoni non hanno massa

Più intesa è la luce su una superficie, più fotoni colpiscono la superficie nell'unità di tempo.

26

## La dualità onda particella

Anche le onde elettromagnetiche mostrano in certe situazioni proprietà di particella.

- L'effetto fotoelettrico
- L'effetto Compton

### La dualità onda particella

Sia la radiazione elettromagnetica, sia le particelle subatomiche mostrano, in certi fenomeni, natura ondulatoria, in altri, natura corpuscolare.

27

## Lunghezza d'onda di de Broglie

Nel 1923 Louis de Broglie formulò l'ipotesi che le particelle che mostrano proprietà ondulatorie hanno una lunghezza d'onda che dipende dalla massa e dalla velocità

Lunghezza d'onda di de Broglie  
 $(\lambda = h / [m \cdot v]).$

Interpretazione:

Onde di particelle sono onde di probabilità  
 (confronta la figura di diffrazione dell'elettrone).



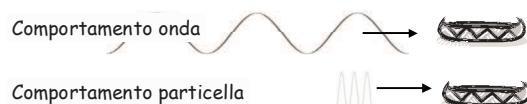
28

## Modo intuitivo: Quando particella, quando onda?

La domanda:

Quando dobbiamo descrivere un oggetto come particella e quando dobbiamo descriverlo come onda?

La risposta dipende dall'oggetto, dalla sua velocità e da con cosa stiamo studiando l'oggetto.



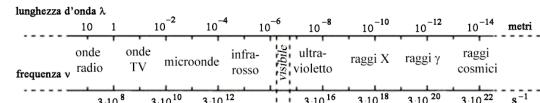
29

## Lunghezza d'onda e la risoluzione

• Per la luce abbiamo visto che la risoluzione di un oggetto che "si sta guardando" è proporzionale alla lunghezza d'onda della luce.

• La luce ha una lunghezza d'onda di circa 400-700 nm, da cui segue che non è possibile risolvere oggetti più piccoli di circa 100 nm.

• In linea di principio si può usare radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda più piccola, cioè luce ultravioletta, raggi-X e radiazione gamma.



Il problema, però, è che aumenta anche l'energia dei fotoni, e quest'energia è data all'oggetto studiato che potrebbe essere danneggiato.

30

## Lunghezza d'onda e la risoluzione

Particella	Lunghezza d'onda (nm)	Energia (eV)
Fotone (luce)	500	2,5
Fotone (raggi-X)	50	25
Fotone (raggi-X)	1	1241
Elettrone	50	0,0006
Elettrone	1	1,5
Elettrone	0,1	151
Neutrone	1	0,0008
Neutrone	0,1	0,08
Neutrone	0,01	8

31

## Studiare il mondo senza vederlo

Per vedere il mondo microscopico non possiamo usare gli occhi

Ci dobbiamo servire di altri strumenti

bacchetta  
sottile

Testa, occhi,  
naso ...



bastone  
grosso

Corpo

32

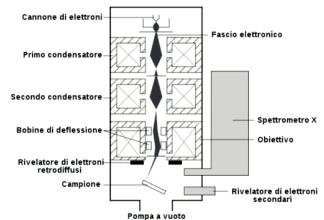
## Microscopio elettronico

Particella	Lunghezza d'onda (nm)	Energia (eV)
Fotone (luce)	500	2,5
Fotone (raggi-X)	50	25
Fotone (raggi-X)	1	1241
Elettrone	50	0,0006
Elettrone	1	1,5
Elettrone	0,1	151
Neutrone	1	0,0008
Neutrone	0,1	0,08
Neutrone	0,01	8

33

## Microscopio elettronico

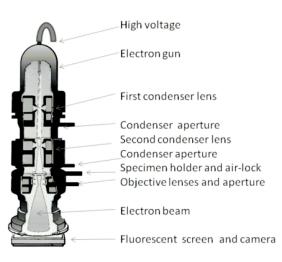
Il microscopio elettronico è un tipo di microscopio che non sfrutta la luce come sorgente di radiazioni ma un fascio di elettroni.



34

## Microscopio elettronico

Risoluzione: circa 50 pm



Transmission Electron Microscope

[http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission\\_electron\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscope)

35

## Microscopio elettronico



36

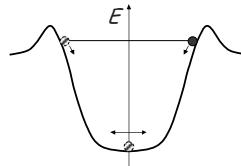
## Microscopio a effetto tunnel

37

### Effetto tunnel

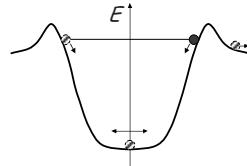
#### Meccanica classica

La particella non può superare la barriera se non ha l'energia necessaria per farlo.



#### Meccanica quantistica

Una particella ha una probabilità diversa da zero di attraversare spontaneamente una barriera arbitrariamente alta.

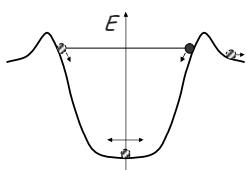


38

### Effetto tunnel

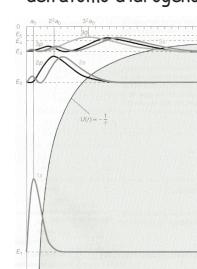
#### Meccanica quantistica

C'è una probabilità di trovare la particella fuori dalla barriera.



39

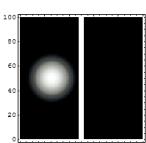
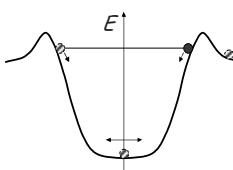
#### Funzione d'onda dell'atomo d'idrogeno



### Effetto tunnel

#### Meccanica quantistica

C'è una probabilità di trovare la particella fuori dalla barriera.



http://it.wikipedia.org/wiki/Effetto\_tunnel

40

### Premio Nobel per la Fisica, 1986

**ICROSCOPES**

**Scanning Tunneling Microscope**

The Scanning Tunneling Microscope (STM) is a type of electron microscope that shows three-dimensional images of a sample. A sharp metal tip is held close to a surface and scans the surface at a fixed distance from it.

**Currents Control the Surface**

An extremely fine conducting probe is held close to the surface of a sample. As the tip is moved across the surface, it produces an electrical signal. The tip is extremely sharp, the tip being formed by one single atom. It slowly scans over the surface, moving the tip up and down to follow over the surface profile of the surface. Recording the vertical movement of the stylus makes it possible to create a profile of the surface. From this profile a 3D profile of the surface is created, and from that a computer-generated contour map of the surface is produced.

**Important In Many Sciences**

The STM is an important part of physics, with particular applications in semiconductor physics and nanoelectronics. In chemistry, surface science can also play an important role. The STM works best with conducting materials, but it is also possible to study organic molecules on a surface and study their structures. For example, this technique has been used in the study of DNA molecules.

**Try the Simulator!**

You need Shockwave Player 5.5 to drive the microscope. Go to the help page to download.

<http://nobelprize.org/physics/educational/microscopes/scanning/index.htm>

41

### Microscopio a effetto tunnel

#### Una punta di scansione

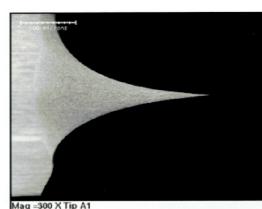
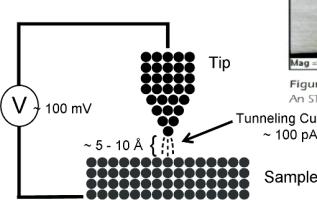


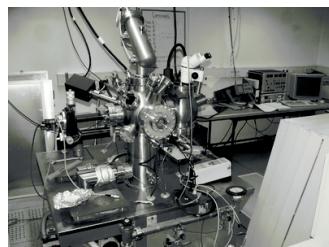
Figure 4.2  
An STM tip made of tungsten.



<http://www.personal.psu.edu/evh10/ResearchBackground.htm>

42

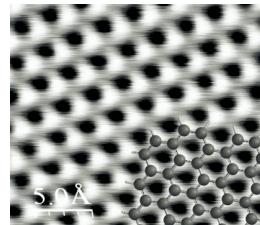
## Microscopio a effetto tunnel



[http://nano.tu-dresden.de/pages/equipment\\_7.html](http://nano.tu-dresden.de/pages/equipment_7.html)

43

## Microscopio a effetto tunnel



[http://www.indiana.edu/~taillab/?p=research/instr\\_liq\\_stm](http://www.indiana.edu/~taillab/?p=research/instr_liq_stm)

44

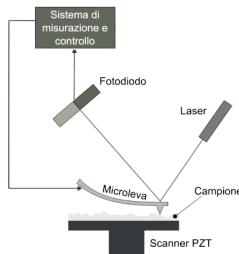
## Microscopio a forza atomica

45

## Microscopio a forza atomica

Il microscopio a forza atomica consiste di

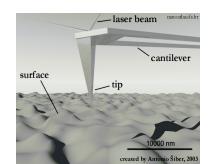
- una microleva (cantilever)
- una punta acuminata (tip),
- laser
- riflettore
- fotodiodi



[http://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_a\\_forza\\_atomica](http://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_a_forza_atomica)

46

## Microscopio a forza atomica



[http://www.nanotech-now.com/images/Art\\_Gallery/AS-AFM.jpg](http://www.nanotech-now.com/images/Art_Gallery/AS-AFM.jpg)

La punta viene collocata nelle strette vicinanze della superficie del campione di cui si vuole effettuare la scansione.

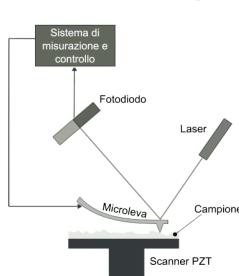
La forza di Van der Waals che agisce tra la punta ed il campione provoca una deflessione della microleva (la cui costante elastica è nota), in accordo con la legge di Hooke.

La punta acuminata (tip) è tipicamente composta di silicio o nitruro di silicio, e presenta un raggio di curvatura dell'ordine dei nanometri.

47

## Microscopio a forza atomica

Tipicamente, la deflessione è misurata utilizzando un punto laser riflesso dalla sommità della microleva verso una matrice di fotodiodi.



[http://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_a\\_forza\\_atomica](http://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_a_forza_atomica)

48

## Microscopio a forza atomica

### Atomic Force Microscopy of a Virus Crystal



This atomic force microscope scan of a crystal of satellite tobacco mosaic virus particles comes from Alex McPherson's lab.

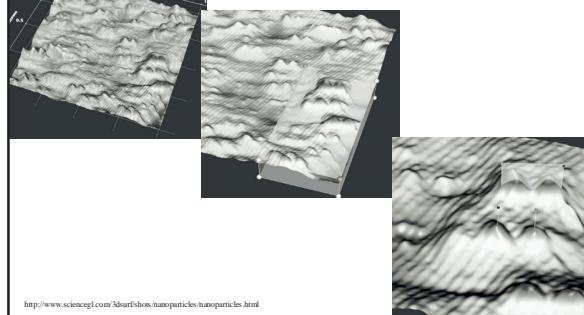
- Coloring is by height, low to high is red to blue.
- A few hundred virus particles are shown.
- Individual particles are about 16 nanometers in diameter.

<http://www.cglucf.edu/chimera/ImagcGallery/entries/afm/stm-afm.html>

49

## Microscopio a forza atomica

<http://www.sciencemag.org/3dsurf/shots/nanoparticles/nanoparticles.html>

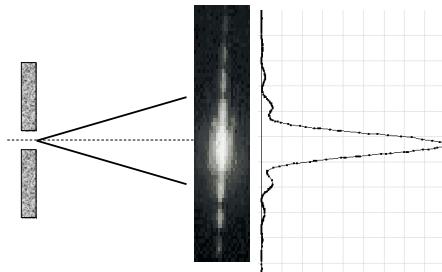


## Cristallografia a raggi X

Particella	Lunghezza d'onda (nm)	Energia (eV)
Fotone (luce)	500	2,5
<b>Fotone (raggi-X)</b>	<b>50</b>	<b>25</b>
<b>Fotone (raggi-X)</b>	<b>1</b>	<b>1241</b>
Elettrone	50	0,0006
Elettrone	1	1,5
Elettrone	0,1	151
Neutrone	1	0,0008
Neutrone	0,1	0,08
Neutrone	0,01	8

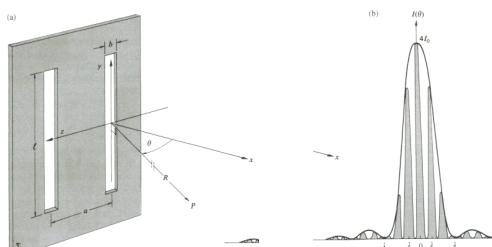
51

## Diffrazione della luce fenditura singola



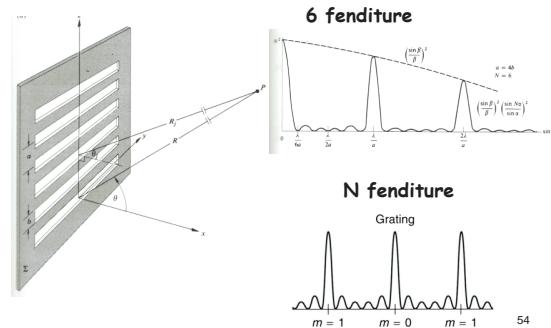
52

## Diffrazione della luce di due fenditure



53

## Diffrazione della luce da un reticolo di fenditure



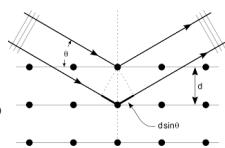
54

## Cristallografia a raggi X

La cristallografia a raggi X è una tecnica:

- l'immagine, prodotta dalla diffrazione dei raggi X attraverso lo spazio del reticolato atomico in un cristallo, viene registrata
- l'immagine registrata viene analizzata per rivelare la natura del reticolato.

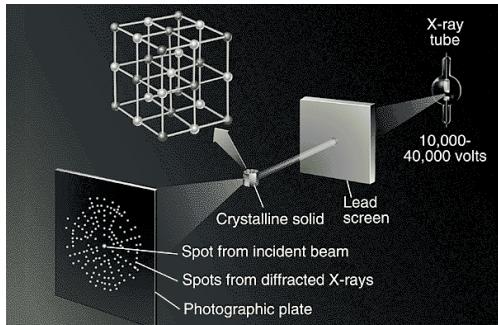
In genere, questo porta a determinare il materiale e la struttura atomica o molecolare di una sostanza.



[http://it.wikipedia.org/wiki/Cristallografia\\_a\\_raggi\\_X](http://it.wikipedia.org/wiki/Cristallografia_a_raggi_X)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray\\_diffraction](http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_diffraction)

55

## Cristallografia a raggi X

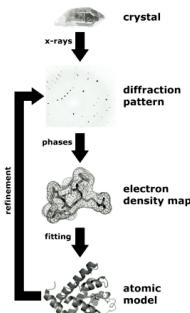


<http://www.sciencecool.org/solids/intro.html>

56

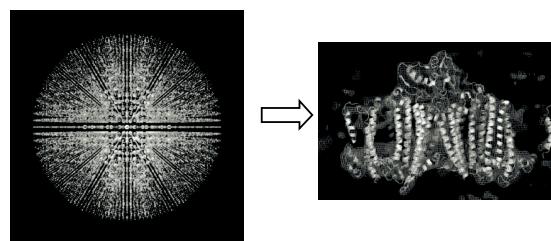
## Cristallografia a raggi X

- Nella cristallografia a raggi X un fascio di raggi X colpisce il cristallo stesso e viene quindi diffuso in direzioni specifiche.
- A seconda degli angoli e dell'intensità di questi raggi diffusi un cristallografo può produrre un'immagine tridimensionale della densità di elettroni nel cristallo.
- Da questa è possibile ricavare le posizioni media degli atomi, così come anche i loro legami chimici ed altre informazioni.



[http://it.wikipedia.org/wiki/Cristallografia\\_a\\_raggi\\_X](http://it.wikipedia.org/wiki/Cristallografia_a_raggi_X)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray\\_diffraction](http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_diffraction)

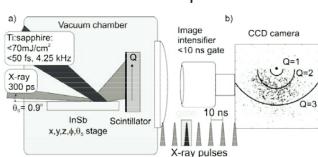
## Cristallografia a raggi X



58

## Ultrafast X-ray science

Impulsi (pacchetti) di raggi-X, durata di circa  $10^{-12}$  -  $10^{-15}$  s (ps-fs), sono usati in fisica e chimica per studiare la materia.



La durata dell'impulso corrisponde al tempo in cui reazioni chimiche e passaggi di stato accadono.

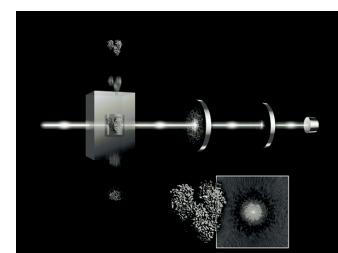
[http://www.atomic.physics.lsu.edu/research/ultrafast\\_x-ray\\_science/](http://www.atomic.physics.lsu.edu/research/ultrafast_x-ray_science/)

59

## Ultrafast X-ray science

During recent years a rapid development of ultrashort-pulsed X-ray sources has been achieved

- Laser-based table top sources;
- Sources based on particle accelerations

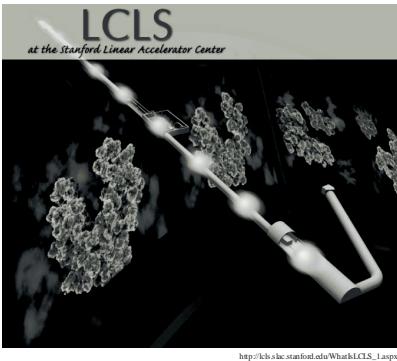


[http://www.atomic.physics.lsu.edu/research/ultrafast\\_x-ray\\_science/](http://www.atomic.physics.lsu.edu/research/ultrafast_x-ray_science/)  
[http://lcls.sns.stanford.edu/WhatIsLCLS\\_1.aspx](http://lcls.sns.stanford.edu/WhatIsLCLS_1.aspx)

## Linac Coherent Light Source (LCLS)

Stanford, USA,  
(vicino a San  
Francisco)

La costruzione  
della sorgente  
di raggi-X è  
iniziata nel 2006.



[http://lcls.saclc.stanford.edu/WhatIsLCLS\\_1.aspx](http://lcls.saclc.stanford.edu/WhatIsLCLS_1.aspx)

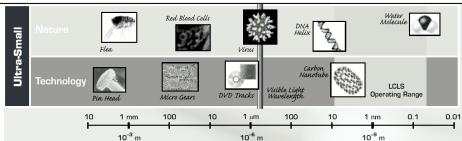
## Linac Coherent Light Source (LCLS)



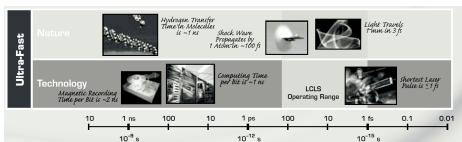
- Un acceleratore lineare, di circa 3 km, accelera elettroni a un'energia di ~ GeV.
- Una sezione di magneti ondulatori, di circa 800 m, crea impulsi di raggi-X.
- Gli impulsi sono monochromatici, coerenti, molto intensi con una durata ultra breve.

[http://lcls.saclc.stanford.edu/WhatIsLCLS\\_1.aspx](http://lcls.saclc.stanford.edu/WhatIsLCLS_1.aspx)

## Linac Coherent Light Source (LCLS)

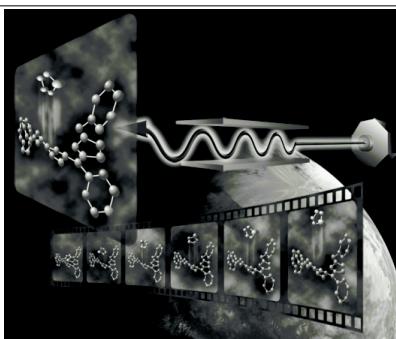


L'intensità dei raggi-X prodotti da LCLS è circa  $10^9$  volte  
più grande dell'intensità usata per raggi-X in medicina



63

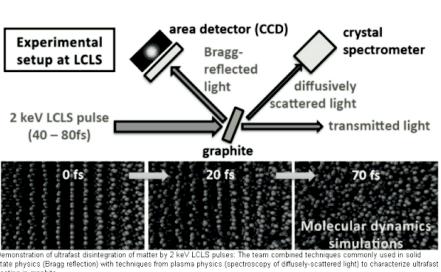
## Linac Coherent Light Source (LCLS)



64

[http://lcls.saclc.stanford.edu/WhatIsLCLS\\_1.aspx](http://lcls.saclc.stanford.edu/WhatIsLCLS_1.aspx)

## Ultrafast X-ray science



Demonstration of ultrafast disintegration of matter by 2 keV LCLS pulses. The team combined techniques commonly used in solid state physics (Bragg reflection) with techniques from plasma physics (spectroscopy of diffusely-scattered light) to characterize ultrafast heating in graphite.

<https://www.fnal.gov/news/newsreleases/2012/May/NR-12-05-02.html>

65

## Ultrafast X-ray science

### X-ray Laser Sees Photosynthesis in Action

February 14, 2013

**Menlo Park, Calif.** — Opening a new window on the way plants generate the oxygen we breathe, researchers used an X-ray laser at the Department of Energy's (DOE) SLAC National Accelerator Laboratory to simultaneously look at the structure and chemical behavior of a natural catalyst involved in photosynthesis for the first time.

Artist's rendering shows a Photosystem II crystal hit by a femtosecond X-ray pulse



<http://www.fnal.gov/news/2013-02-14-x-ray-photosynthesis.aspx>

66

## Diffrazione di neutroni

Particella	Lunghezza d'onda (nm)	Energia (eV)
Fotone (luce)	500	2,5
Fotone (raggi-X)	50	25
Fotone (raggi-X)	1	1241
Elettrone	50	0,0006
Elettrone	1	1,5
Elettrone	0,1	151
<b>Neutrone</b>	<b>1</b>	<b>0,0008</b>
Neutrone	0,1	0,08
Neutrone	0,01	8
		67

## Diffrazione di neutroni

In linea di principio la diffrazione di neutroni è simile alla cristallografia a raggi X con l'uso di neutroni invece di raggi X.

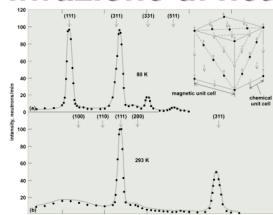
Si studia la struttura atomica, molecolare o magnetica di materiali solidi, amorfi, liquidi e gassosi.

Il neutrone è elettricamente neutro, ma possiede spin, perciò interagisce con campi magnetici. Quindi, la diffrazione di neutroni può rivelare la struttura magnetica microscopica dei materiali.

<http://www.isis.ac.uk/instruments/neutron-diffraction2593.html>

68

## Diffrazione di neutroni



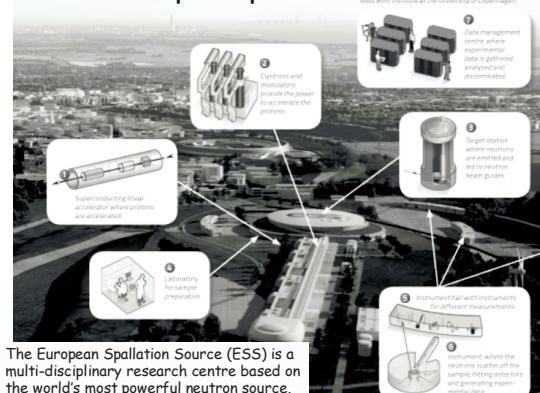
Neutron diffraction patterns from polycrystalline manganese oxide, MnO, at temperatures (a) below and (b) above the antiferromagnetic transition at 122 K (-151°C).

At 293 K (20°C), only nuclear reflections are observed, while at 80 K (-193°F), additional reflections are obtained from antiferromagnetic structure.

<http://www.accessscience.com/search.aspx?rootID=795113>

69

## ESS - The European Spallation Source



The European Spallation Source (ESS) is a multi-disciplinary research centre based on the world's most powerful neutron source.

## ESS - The European Spallation Source

### Construction data:

Planned start of construction: 2011  
Planned completion: 2018  
Opening: 2019  
Full operability: 2025

The facility will be built in an area of two square kilometers.



Illustration of the European Spallation Source (ESS) © ESS

71

## ESS - Accelerator

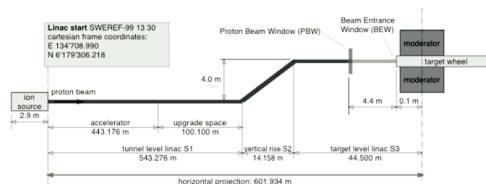
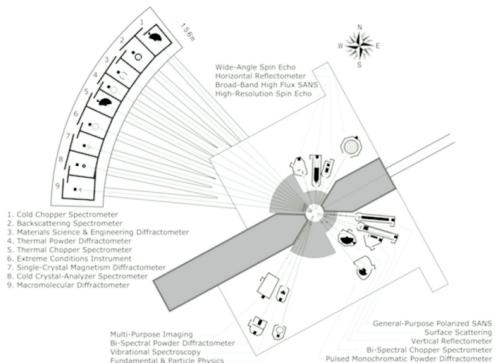


Figure 4.7: Schematic showing the dimensions of the accelerator from ion source to target.

<http://europeanspallationsource.se/>

72

## Neutron Instruments



## Neutron Science

### Archeology



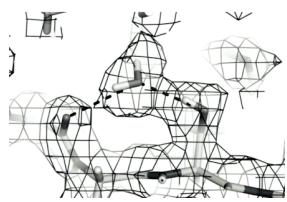
The neutron penetrates deep into complex specimens, to address their composition and structure without destroying the sample

<http://europeanspallationsource.se>

74

## Neutron Science

### Life Science



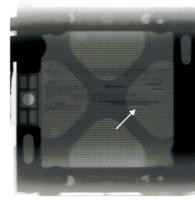
The study of biological systems from the atomic and molecular to organism level is crucial not only for understanding health and disease, but also for biotechnological applications.

<http://europeanspallationsource.se>

75

## Neutron Science

### Energy Materials



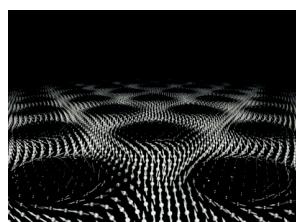
Energy Materials are an integral part of our daily lives, with applications ranging from consumer electronics (battery life, size and power) to the drive to reduce our dependence on fossil fuels with alternatives such as solar- and fuel-cells to power vehicles and generators.

<http://europeanspallationsource.se>

76

## Neutron Science

### Superconductivity and magnetism



In recent years huge leaps in technological advances have been made by better understanding the electronic properties of materials.

<http://europeanspallationsource.se>

77