

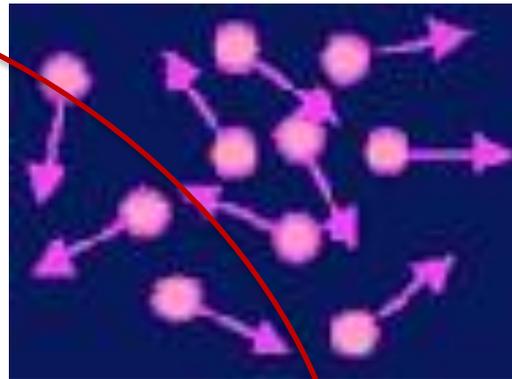
Física del Estado Sólido

Física de la Materia Condensada

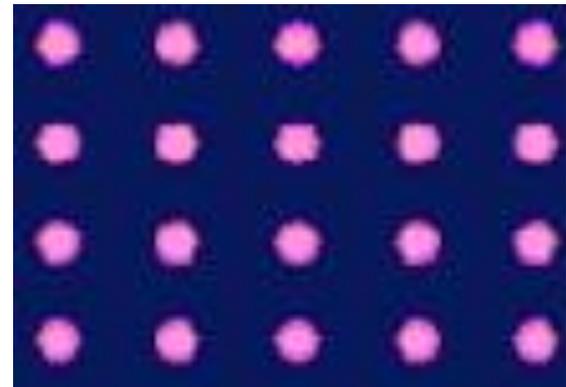
gas →



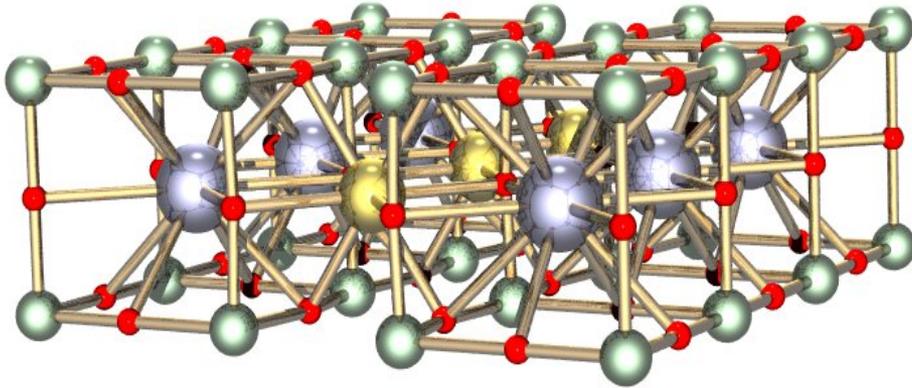
líquido →



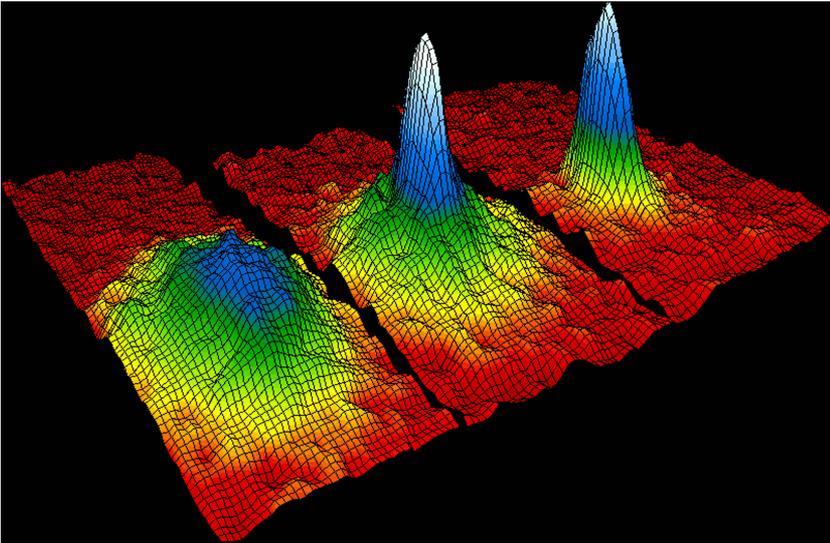
sólido →



Propiedades electrónicas de óxidos de cobre



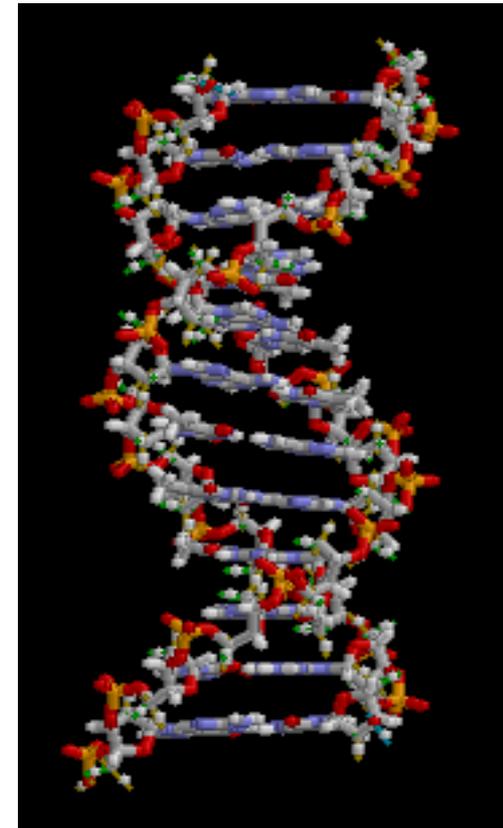
Condensados de átomos fríos



Superconductividad



ADN



Impacto en otras ramas de la Física

- Mecanismo Anderson-Higgs de generación de masa: propuesto primero por Phillip W. Anderson en Materia Condensada fue fundamental para Peter Higgs (Premio Nobel 2013) para explicar el origen de la masa de partículas elementales en experimentos de Física de Partículas.
- La Física de la Materia Condensada es la subrama más grande de toda la Física!

Contenido

- ¿Que estudia la Física del Estado Sólido?
- Aplicaciones tecnológicas.
- Resumen de la asignatura.

¿Qué estudia?

■ Sólidos:

Estructuras periódicas de átomos (núcleo atómico+electrones) en el límite termodinámico $\approx 10^{23}$ átomos/cm³

Aparentemente una tarea imposible de acometer!

Preguntas fundamentales

- ¿Cómo describimos los sólidos desde un punto de vista fundamental tratando los núcleos y electrones con la mecánica cuántica?
- ¿Que propiedades tienen los sólidos: metálicos, aislantes,...?
- ¿Cómo se mantiene unido un sólido?

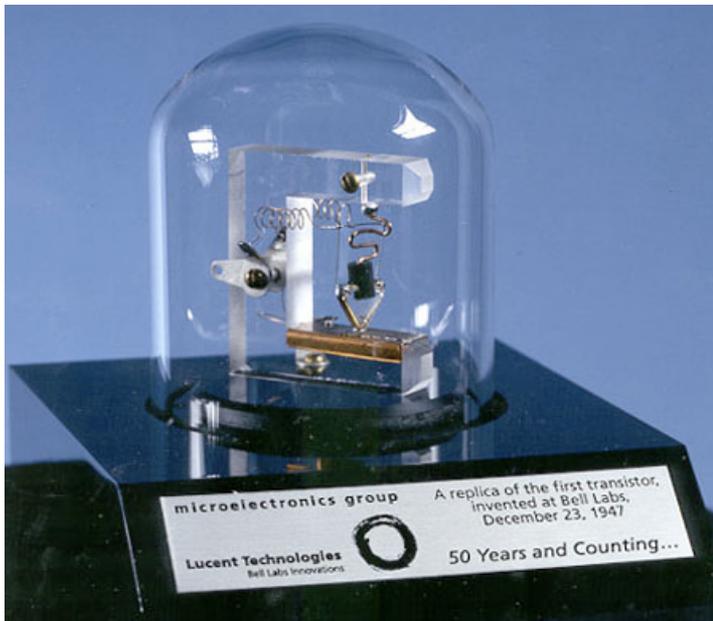
¿Qué estudia?

- Las distintas estructuras cristalinas observadas en los sólidos y como éstas influyen en sus propiedades.
- Propiedades electrónicas/magnéticas de los sólidos: resistividad, calor específico, magnetismo y propiedades ópticas.

Aplicaciones de la física del estado sólido

- Transistor (Bardeen, Brattain, Schockley, Premio Nobel 1956):

Primer transistor (1947)



Electrónica:

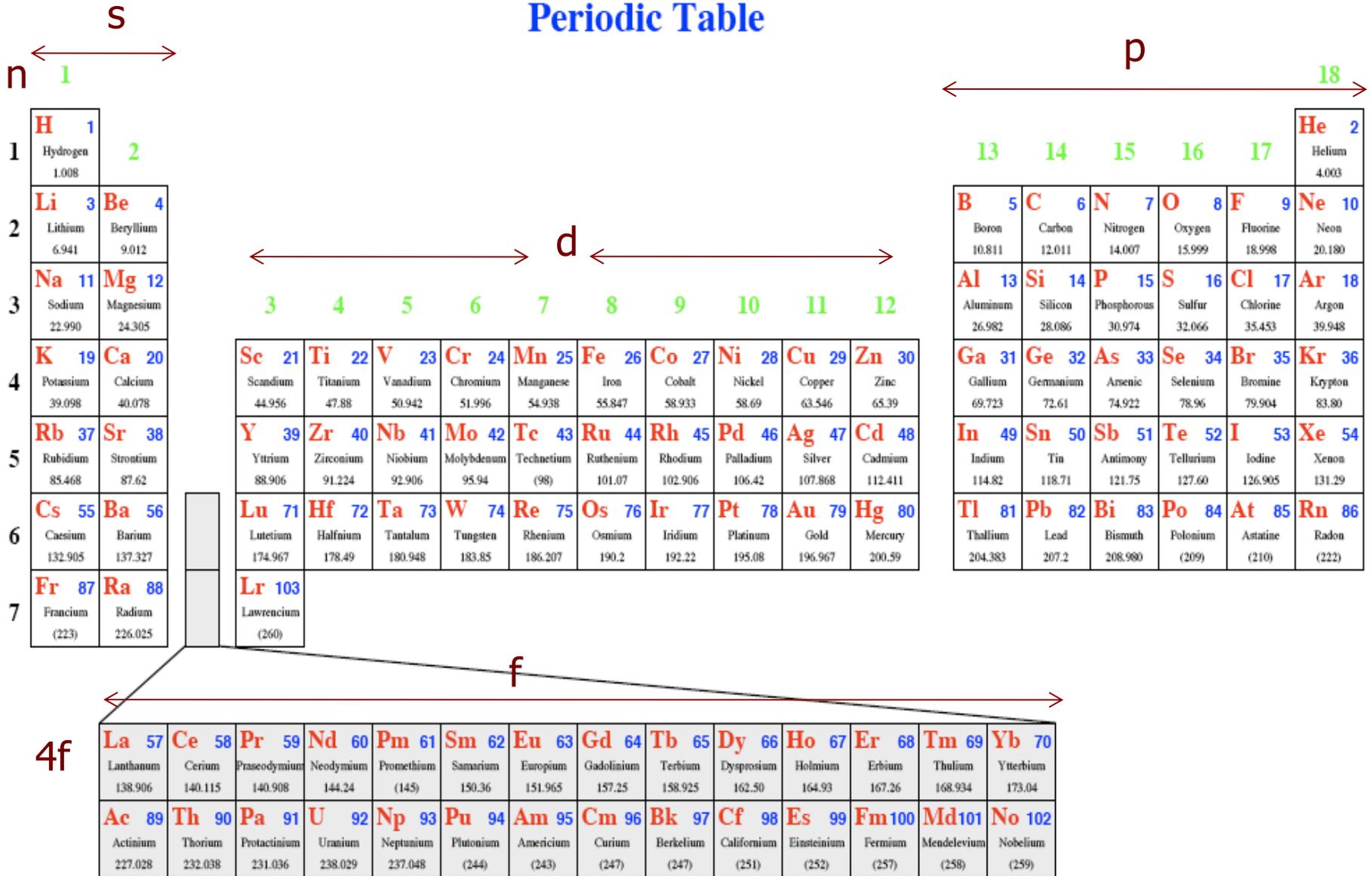


¿Cómo estudiamos los sólidos?

- Leyes fundamentales de la física: Newton, Maxwell.
- Mecánica cuántica.
- Mecánica Estadística.

De los átomos al sólido

Periodic Table



Llenado de orbitales atómicos

nl	elemental solid
1s	H,He
2s	Li,Be
2p	B→Ne
3s	Na,Mg
3p	Al→Ar
4s	K,Ca
3d	transition metals Sc→Zn
4p	Ga→Kr
5s	Rb,Sr
4d	transition metals Y→Cd
5p	In-Xe
6s	Cs,Ba
4f	Rare Earths (Lanthanides) Ce→Lu
5d	Transition metals La→Hg
6p	Tl→Rn

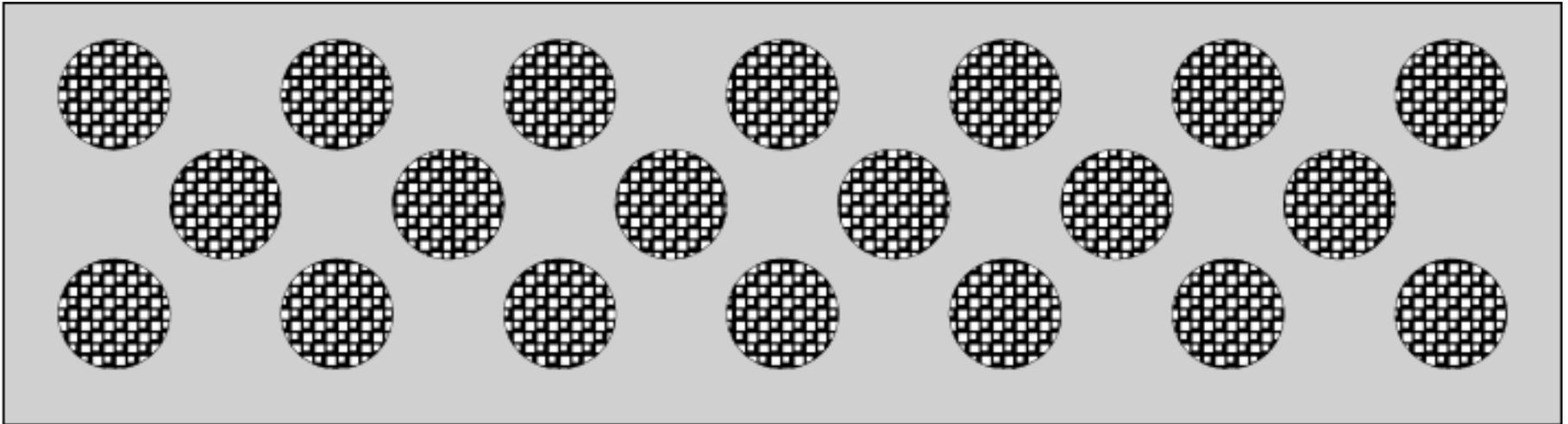
Aumenta el número de electrones y llenamos niveles de energía con $n+1$ cada vez mayores.

Tipos de enlaces

Bond	Overlap	Lattice	constituents
Ionic NaCl	very small ($< a$)	closest unfrustrated packing	dissimilar
Covalent Diamante	small ($\sim a$)	determined by the structure of the orbitals	similar
Metallic Na, Al	very large ($\gg a$)	closest packed	unfilled valence orbitals

Dependiendo del solape de los orbitales podemos tener distintos tipos de enlace entre los átomos que componen el sólido.

Simplificaciones fundamentales



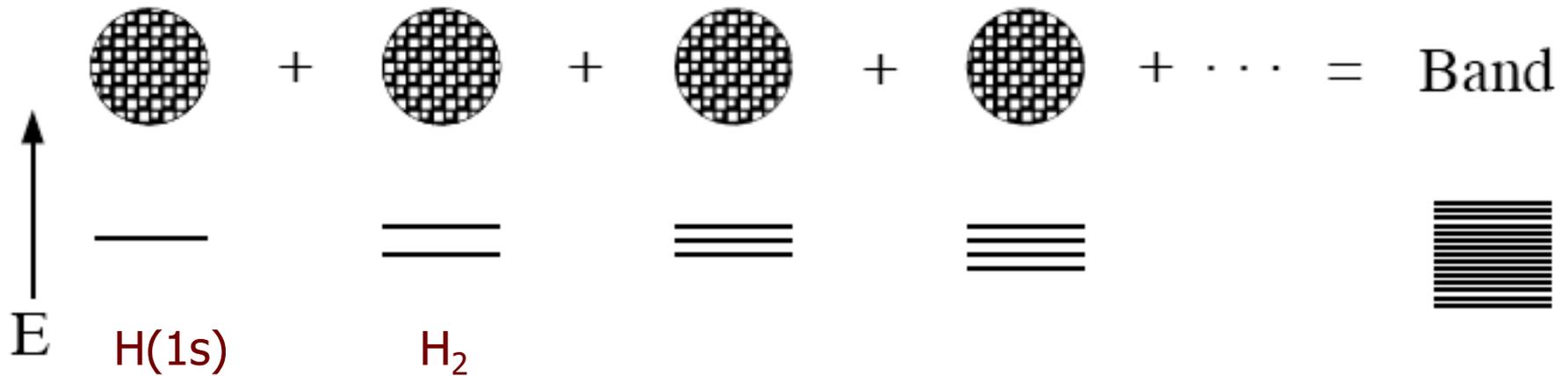
Simetría traslacional+electrones de core fuertemente ligados a los núcleos=

Electrones de valencia en presencia del potencial periódico de los iones atómicos.

¿Qué pasa cuando juntamos los átomos?

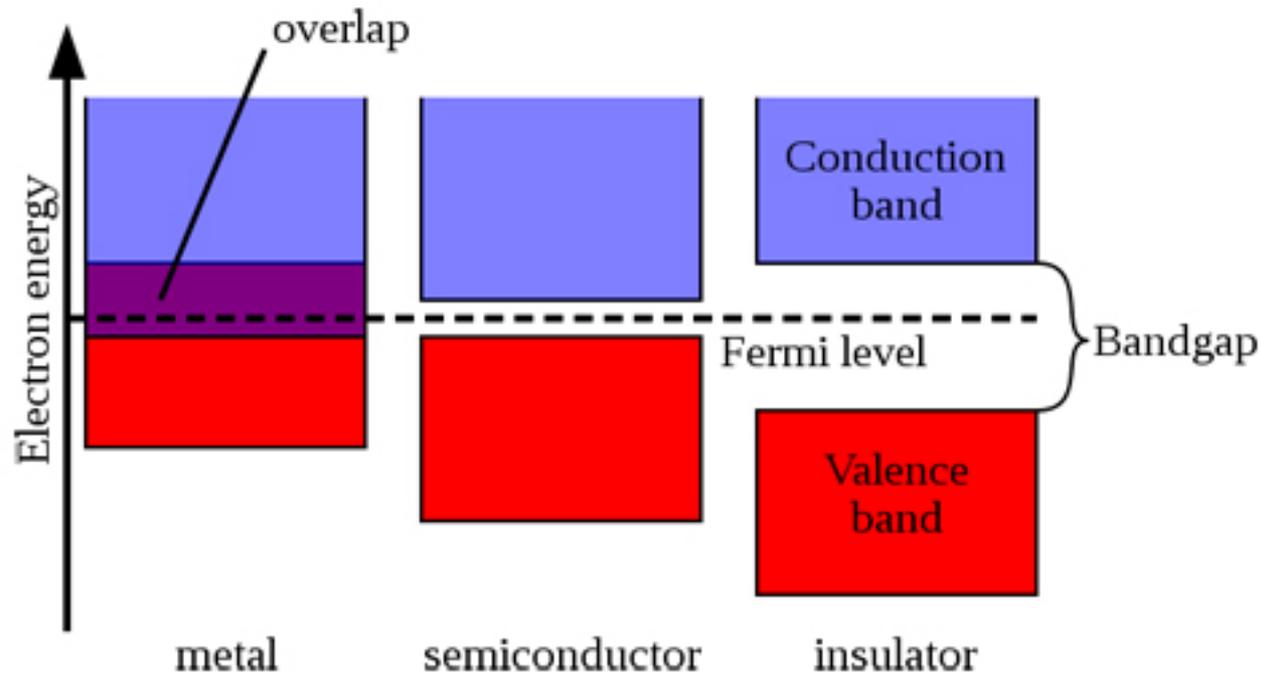
El sólido más sencillo: juntamos átomos de hidrógeno (1 electrón en un orbital 1s):

1 átomo + 2 + 3 + 4 + ... = sólido



La estructura electrónica y propiedades del sólido dependen de la estructura del átomo y de la geometría.

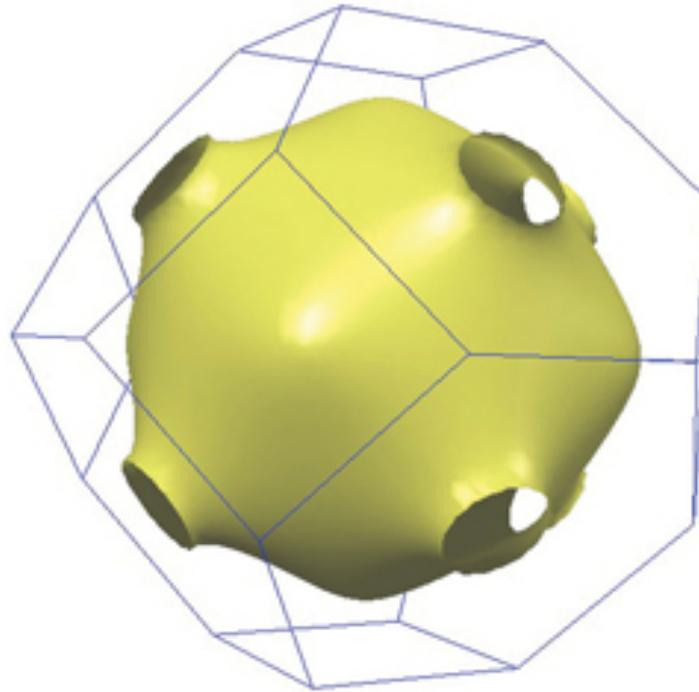
Independent electrons in solids



Conduction in metals is due to quasi-free electrons in bands formed when bringing together many atoms.

Fermi surface in real metals

Fermi surface of Copper



FERMI SURFACE concept is **ESSENTIAL** to understand properties of metals.

The Nobel Prize in Physics 2010

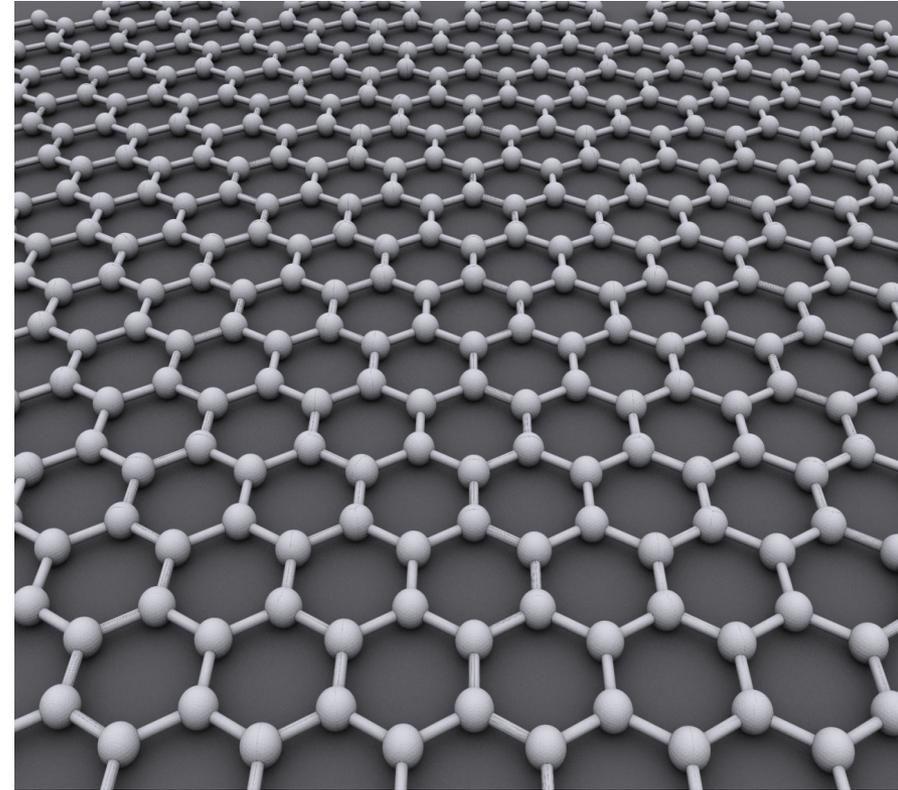
Grafeno



© The Nobel Foundation.
Photo: U. Montan
Andre Geim
Prize share: 1/2



© The Nobel Foundation.
Photo: U. Montan
**Konstantin
Novoselov**
Prize share: 1/2



The Nobel Prize in Physics 2010 was awarded jointly to Andre Geim and Konstantin Novoselov "for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene."

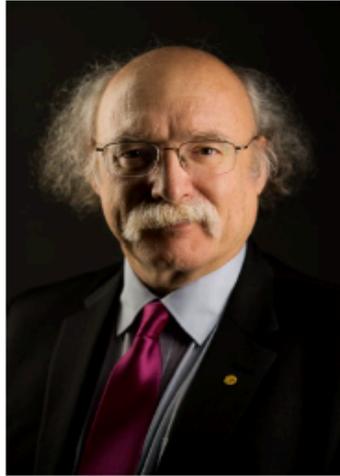
The Nobel Prize in Physics 2016



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

David J. Thouless

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

**F. Duncan M.
Haldane**

Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

**J. Michael
Kosterlitz**

Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2016 was divided, one half awarded to David J. Thouless, the other half jointly to F. Duncan M. Haldane and J. Michael Kosterlitz "for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter."

<https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>

Premios Nobel en Física del Estado Sólido:

Ver www.nobel.se

2003 Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett

"for pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids"

1998 Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer, Daniel C. Tsui

"for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations"

1996 David M. Lee, Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson

"for their discovery of superfluidity in helium-3"

1994 Bertram N. Brockhouse, Clifford G. Shull

"for pioneering contributions to the development of neutron scattering techniques for studies of condensed matter"

1991 Pierre-Gilles de Gennes

"for discovering that methods developed for studying order phenomena in simple systems can be generalized to more complex forms of matter, in particular to liquid crystals and polymers"

1987 J. Georg Bednorz, K. Alex Müller

"for their important break-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials"

1986 Ernst Ruska, Gerd Binnig, Heinrich Rohrer

"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"

"for their design of the scanning tunneling microscope"

1985 Klaus von Klitzing

"for the discovery of the quantized Hall effect"

1982 Kenneth G. Wilson

"for his theory for critical phenomena in connection with phase transitions"

1981 Nicolaas Bloembergen, Arthur L. Schawlow, Kai M. Siegbahn

"for their contribution to the development of laser spectroscopy"

"for his contribution to the development of high-resolution electron spectroscopy"

1978 Pyotr Kapitsa

"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

1977 Philip W. Anderson, Sir Nevill F. Mott, John H. van Vleck

"for their fundamental theoretical investigations of the electronic structure of magnetic and disordered systems"

1973 Leo Esaki, Ivar Giaever, Brian D. Josephson

"for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"

"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects"

1956 William B. Shockley, John Bardeen, Walter H. Brattain

for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"

1952 Felix Bloch, E. M. Purcell

"for their development of new methods for nuclear magnetic precision measurements and discoveries in connection therewith"

1946 Percy W. Bridgman

"for the invention of an apparatus to produce extremely high pressures, and for the discoveries he made therewith in the field of high pressure physics"

1937 Clinton Davisson, George Paget Thomson

1930 Venkata Raman

"for his work on the scattering of light and for the discovery of the effect named after him"

1929 Louis de Broglie

1923 Robert A. Millikan

1915 William Bragg, Lawrence Bragg

1914 Max von Laue

1909 Guglielmo Marconi, Ferdinand Braun

1901 Wilhelm Conrad Röntgen

Estructura cristalina de cupratos

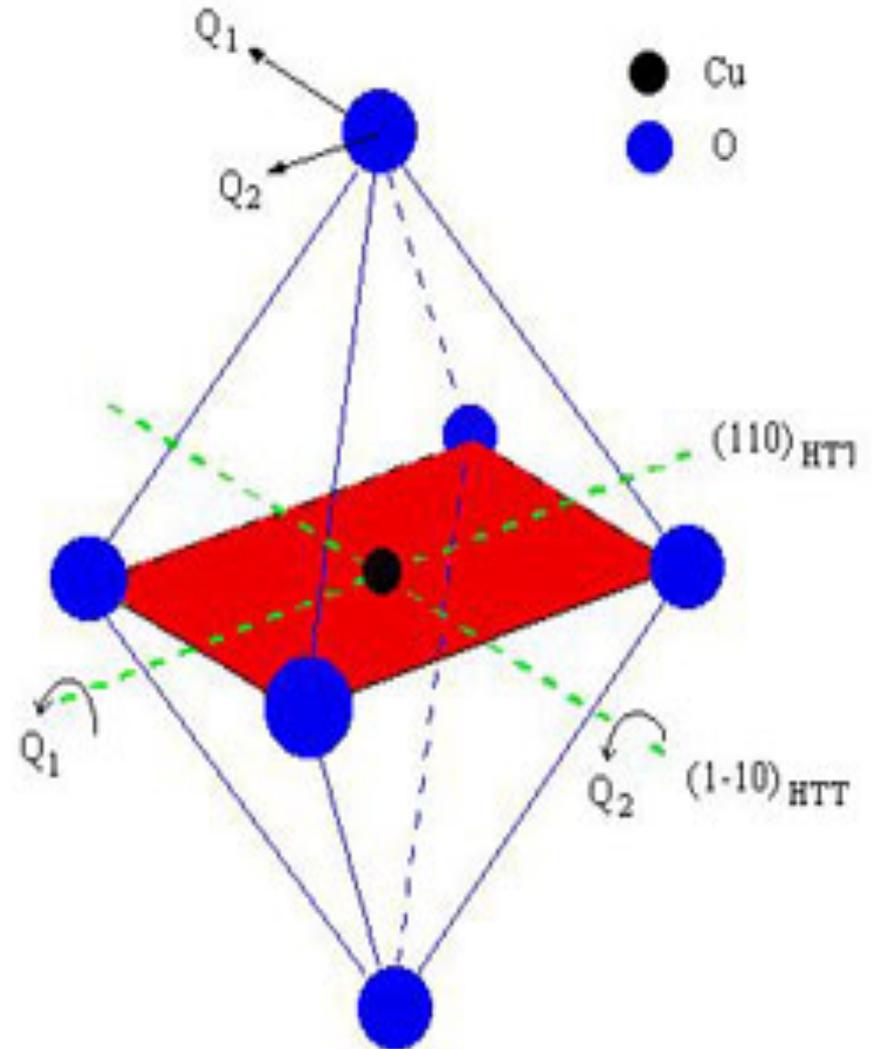
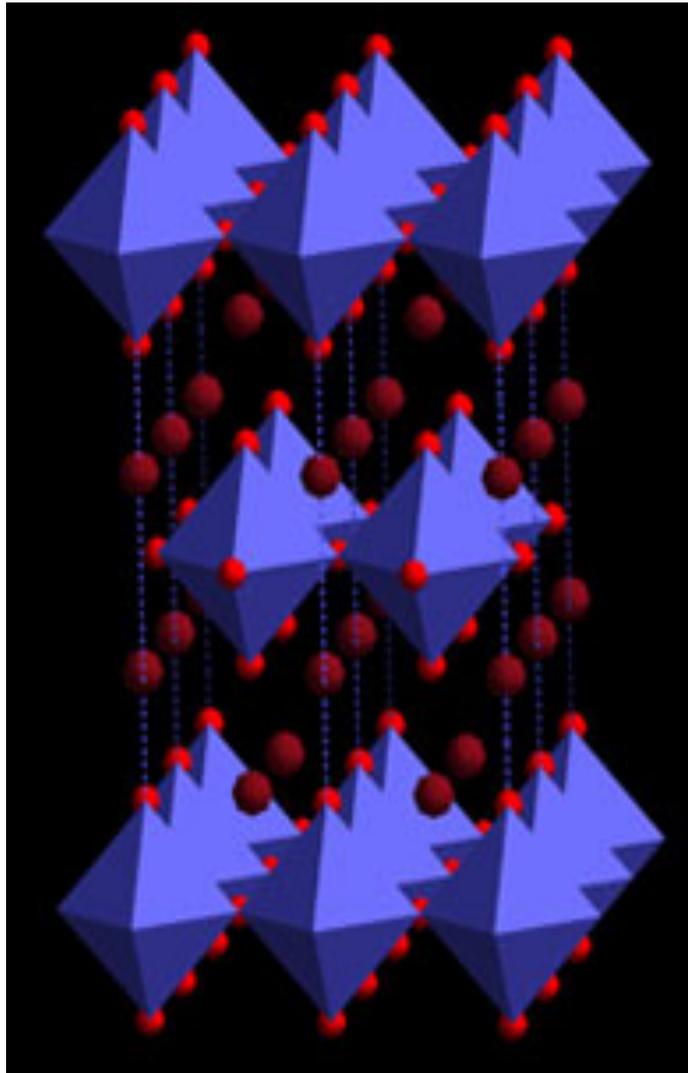
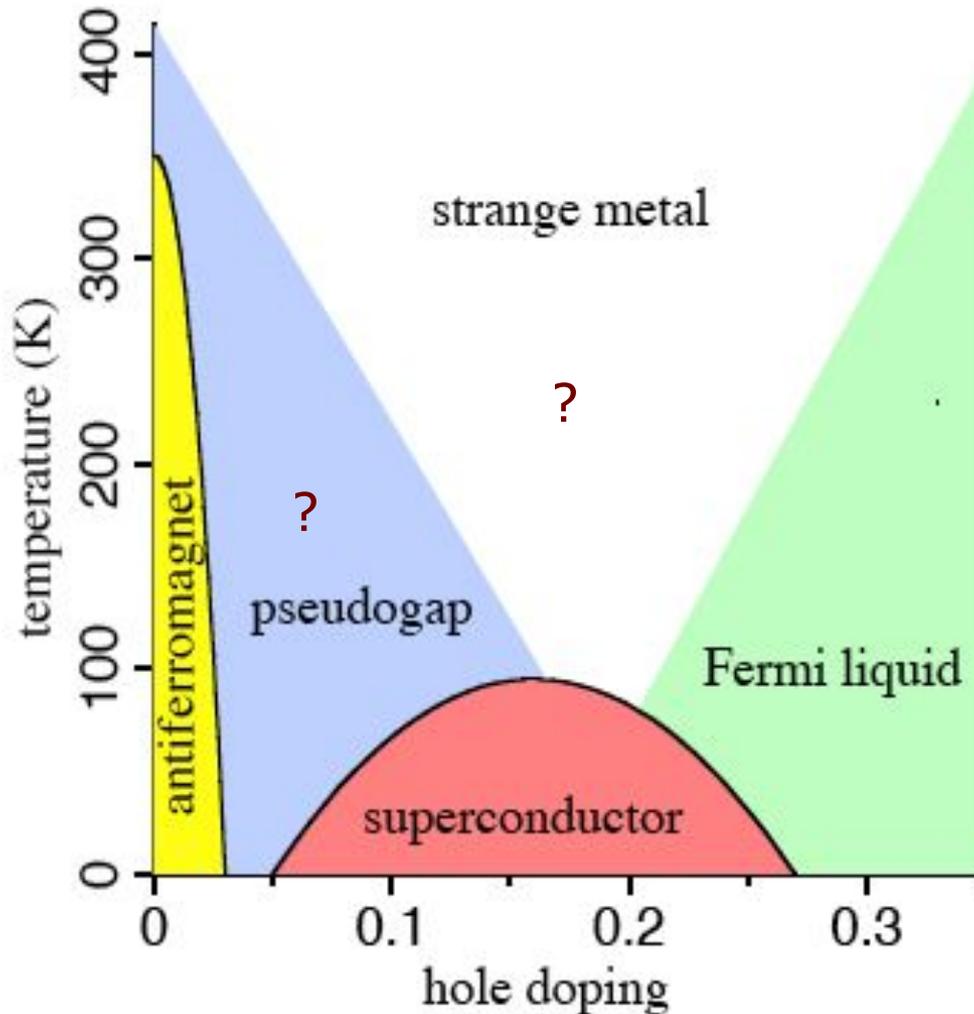


Diagrama de fases de cupratos

Berdnorz and Müller, Nobel Prize (1987).



Temperaturas críticas
de más de 100 K!
Metales convencionales
(Al,Sn,Pb) sólo 1-7 K!

Falta explicación teórica del mecanismo de superconductividad en cupratos!



P. A. Dirac: "The fundamental laws necessary for the mathematical treatment of large part of physics and the whole chemistry are known."

$$H = \sum_i \left(-\frac{\hbar^2 \nabla_i^2}{2m} - \sum_l \frac{Z_l e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_l|} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$
$$- \sum_l \frac{\hbar^2 \nabla_l^2}{2M} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq m} \frac{Z_l Z_m e^2}{|\vec{R}_l - \vec{R}_m|}$$

$$H\psi = E\psi$$

"The difficulty lies **only** in the fact that these laws lead to equations too complex to be solved"

Approximations are needed to analyze the solid state.

Aproximaciones al Hamiltoniano del sólido:

$$H = \sum_i \left(-\frac{\hbar^2 \nabla_i^2}{2m} - \sum_l \frac{Z_l e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_l|} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$
$$- \sum_l \frac{\hbar^2 \nabla_l^2}{2M} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq m} \frac{Z_l Z_m e^2}{|\vec{R}_l - \vec{R}_m|}$$

Aproximaciones al Hamiltoniano del sólido:

Modelo de Drude
Modelo de Sommerfeld

$$H = \sum_i \left(\underbrace{-\frac{\hbar^2 \nabla_i^2}{2m}}_{\text{Modelo de Drude}} - \sum_l \frac{Z_l e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_l|} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$
$$- \sum_l \frac{\hbar^2 \nabla_l^2}{2M} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq m} \frac{Z_l Z_m e^2}{|\vec{R}_l - \vec{R}_m|}$$

Aproximaciones al Hamiltoniano del sólido:

Teorema de Bloch
Teoría de bandas

Modelo de Drude
Modelo de Sommerfeld

$$H = \sum_i \left(-\frac{\hbar^2 \nabla_i^2}{2m} - \sum_l \frac{Z_l e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_l|} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$
$$- \sum_l \frac{\hbar^2 \nabla_l^2}{2M} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq m} \frac{Z_l Z_m e^2}{|\vec{R}_l - \vec{R}_m|}$$

Hartree-Fock, Apantallamiento, Landau

Teorema de Bloch
Teoría de bandas

Modelo de Drude
Modelo de Sommerfeld

$$H = \sum_i \left(-\frac{\hbar^2 \nabla_i^2}{2m} - \sum_l \frac{Z_l e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_l|} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$
$$- \sum_l \frac{\hbar^2 \nabla_l^2}{2M} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq m} \frac{Z_l Z_m e^2}{|\vec{R}_l - \vec{R}_m|}$$

Aproximaciones al Hamiltoniano del sólido:

$$H = \sum_i \left(-\frac{\hbar^2 \nabla_i^2}{2m} - \sum_l \frac{Z_l e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_l|} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$
$$- \underbrace{\sum_l \frac{\hbar^2 \nabla_l^2}{2M} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq m} \frac{Z_l Z_m e^2}{|\vec{R}_l - \vec{R}_m|}}_{\text{Ley de Dulong y Petit}} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$

Ley de Dulong y Petit

Modelo de Debye y Einstein

Física del Estado Sólido

■ 0. LA TEORÍA CLÁSICA DEL GAS DE ELECTRONES LIBRES: MODELO DE DRUDE

- 0.1 Hipótesis básicas del modelo de Drude. Tiempo de relajación y conductividad eléctrica.
- 0.2 Efecto Hall y Magnetoresistencia. Conductividad eléctrica AC: función dieléctrica y frecuencia de plasma.
- 0.3 Conductividad térmica y poder termoeléctrico.

■ 1. LA TEORÍA CUÁNTICA DEL GAS DE ELECTRONES LIBRES: MODELO DE SOMMERFELD

- 1.1 Descripción cuántica del gas de electrones libres a $T=0$. Distribución de Femi-Dirac y potencial químico.
- 1.2 Propiedades térmicas del gas de electrones libre.
- 1.3 Conducción en metales a partir de la teoría de Sommerfeld. Comparación de las predicciones de la teoría de Drude y de Sommerfeld y sus limitaciones.

Física del Estado Sólido I

■ 2. ESTRUCTURAS CRISTALINAS Y LA RED RECÍPROCA

- 2.1 La red de Bravais y vectores primitivos: Estructuras cristalinas.
- 2.2 La red recíproca: zonas de Brillouin.
- 2.3 Determinación de estructuras cristalinas con difracción de rayos-X.
- 2.4 Formulación Bragg y Von Laue. Factor de estructura geométrico y atómico.

■ 3. ELECTRONES EN POTENCIALES PERIÓDICOS

- 3.1 El teorema de Bloch. Demostración del teorema de Bloch.
- 3.2 La superficie de Fermi. Metales, aislantes y semiconductores.

■ 4. LA APROXIMACIÓN DE ELECTRONES CUASI-LIBRES

- 4.1 Ecuación de Schrödinger con un potencial periódico débil.
- 4.2 Planos Bragg. Estructura de bandas: zonas extendida, reducida y repetida.

■ 5. LA APROXIMACIÓN DE ELECTRONES LOCALIZADOS

- 5.1 Descripción de los estados electrónicos en términos de orbitales atómicos localizados.
- 5.2 Ejemplos de cálculo de estructura de bandas.

Física del Estado Sólido I

■ 6. TEORÍA CLÁSICA DE VIBRACIONES EN UN CRISTAL

6.1 Limitaciones de la teoría estática de la red iónica.

6.2 Teoría clásica del cristal armónico. Calor específico: la ley de Dulong y Petit.

6.3 Modos normales de una cadena unidimensional monoatómica.

6.4 Modos normales de una cadena unidimensional diatómica: modos acústicos y ópticos.

■ 7. TEORÍA CUÁNTICA DE VIBRACIONES EN UN CRISTAL

7.1 Cuantización del hamiltoniano del cristal armónico: Fonones.

7.2 Calor específico del cristal armónico.

7.3 Modelos de Debye y Einstein del calor específico.

Física del Estado Sólido I

■ 8. MODELO SEMICLÁSICO DE LA DINÁMICA DE ELECTRONES EN METALES.

8.1 Dinámica de los electrones en presencia de la red iónica.

8.2 Portadores de carga efectiva: electrones y huecos.

8.3 Electrones en presencia de un campo magnético uniforme.

■ 9. MODELO SEMICLÁSICO DEL TRANSPORTE EN METALES

9.1 La ecuación de Boltzmann y la aproximación del tiempo de relajación.

9.2 Conductividad eléctrica. Corriente en metales y en aislantes.

9.3 Conductividad térmica y la ley de Wiedemann-Franz. Poder termoeléctrico.

Física del Estado Sólido I

- **10. EFECTOS DE LA INTERACCIÓN ELECTRÓN-ELECTRÓN: APROXIMACIÓN HARTREE-FOCK, APANTALLAMIENTO Y LA TEORÍA DE LANDAU DEL LÍQUIDO DE FERMÍ**
 - 10.1** Electrones interactuando débilmente: aproximación Hartree y Hartree-Fock.
 - 10.2** Apantallamiento: método de Thomas-Fermi.
 - 10.3** Teoría de Landau del líquido de Fermi: Noción de cuasipartícula y cuasihueco, interacción entre cuasipartículas, función de distribución de cuasipartículas.
 - 10.4** Propiedades de las cuasipartículas: velocidad, masa efectiva y calor específico. Comparación con las propiedades del gas de Fermi.

Bibliografía

- Textos recomendados:
 - [Solid State Physics](#), N. W. Ashcroft and N. D. Mermin (1976)
 - [Introduction to Solid State Physics](#), C. Kittel (1996)
 - [Solid State Physics](#), H. Ibach y H. Luth (1991)
- Textos complementarios
 - [The Theory of the properties of metals and alloys](#), N. F. Mott and H. Jones (Dover 1958).
 - [Quantum Theory of Solids](#), C. Kittel (1987)
 - [Theory of interacting Fermi systems](#), P. Nozières (1997).

Física del Estado Sólido

- Asignatura del 4º curso del grado en Física.
- Número de créditos = 6 ECTS.
- Comprende 15 semanas de clases = 45 horas de clases teóricas + 15 horas de problemas.
- Evaluación: control + exámen final.