



L'any 2005 és **l'any mundial de la Física** en fer 100 anys de *l'annus mirabilis* d'Einstein (1905). En aquest any va publicar 6 articles, tres dels quals varen revolucionar la Física i són plenament vigents.

El CERN (Centre Europeu de Recerca Nuclear) és un consorci on hi participen la majoria dels països de la CE entre els quals hi ha el nostre. Hi treballen milers de Físics, entre molts altres, investigant l'estructura de la matèria, els inicis de l'Univers i les forces fonamentals. Ja fa molts anys que funciona, però està en renovació contínua. Podem afirmar que està al màxim nivell mundial i en destaca un accelerador de partícules que consisteix en un túnel circular de 6 Km de diàmetre.

Aquí teniu alguns enllaços:

<http://intranet.cern.ch/Public/Content/Chapters/VisitCERN/VisitCERN-en.html>

<http://www.tecnociencia.es/especiales/cern/proyectos.htm>

<http://webs.demasiado.com/Barbosa/particulas.html>

<http://www.ciencia.net/VerArticulo/fisica>

Una salutació molt cordial.

Manel Juny i Lluís Xifra

TEMA 1: TEORIA DE LA RELATIVITAT: (Albert Einstein)**1. RELATIVITAT RESTRINGIDA o ESPECIAL (1905)****1.1. POSTULATS:****1.1.1. POSTULAT 1:**

COVARIÀNCIA DE LES LLEIS FÍSiques O PRINCIPI DE RELATIVITAT D'EINSTEIN:

“Tots els sistemes inercials són equivalents per expressar-hi les lleis de tota la física”.

1.1.2. POSTULAT 2:

CONSTÀNCIA DE LA VELOCITAT DE LA LLUM O INVARIABILITAT O UNIVERSALITAT:

“La velocitat de la llum en el buit és constant: $c=299.792.458$ m/s independent del moviment relatiu entre focus i observador”.

1.1.3. POSTULAT 3:

CONSERVACIÓ DE L'ENERGIA I DE LA QUANTITAT DE MOVIMENT (MOMENT LINEAL):

“En un sistema aïllat, l'energia total relativista i la quantitat de moviment total relativista es conserven”.

1.2. CONSEQÜÈNCIES:**1.2.1. El temps i la longitud no es poden mesurar de manera absoluta:**

1.2.1.1. el temps es dilata.

1.2.1.2. l'espai es contrau.

1.2.2. Crisi de la simultaneïtat:

Dos successos simultanis en un sistema de referència S_1 no tenen perquè ser simultanis en un altre sistema de referència S_2 . La simultaneïtat no és un concepte absolut si no que depèn de l'estat de moviment de l'observador.

2. RELATIVITAT GENERAL (1917)

És la relació entre l'espai, el temps i la massa.

La curvatura d'aquest espai-temps genera el camp gravitatori.

La massa corba l'espai-temps.

L'espai-temps corbat provoca i li marca el moviment de la massa.

En un forat negre, es produeix tal curvatura de l'espai-temps que l'espai es transforma en temps i el temps en espai.

**TEMA 2: FÍSICA QUÀNTICA:****1. RADIACIÓ TÈRMICA:**

És la radiació emesa per un cos deguda a la seva temperatura.

2. COS NEGRE:

És un cos que la seva superfície absorbeix totes les radiacions que li arriben.

3. POSTULAT DE PLANK:

Qualsevol sistema físic que realitza oscil·lacions harmòniques simples (funció sinusoidal) només pot tenir energies totals (E) quantificades (discretes). Aquestes oscil·lacions són ones electromagnètiques, que un cop emeses s'escampen per l'espai com les ones en el aigua. La quantificació de l'energia la creia possible només en el cas d'un electró amés en les parets d'un cos negre.

4. EFECTE FOTOELÈCTRIC: (Albert Einstein 1905)

És l'emissió d'electrons des d'una superfície per l'acció de la llum. La concepció de la llum de l'Einstein era el d'una ona electromagnètica, que tenia una energia quantitzada en paquets concentrats, que va anomenar fotons.

Aquests fotons estan localitzats inicialment en un volum de l'espai petit i es mantenen localitzats mentre es mouen allunyant-se de la font emissora amb velocitat c. La quantitat d'energia del fotó és:

$$E = hn$$

on la h és la constant de Plank ($h=6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s) i ν és la freqüència de la llum.

5. EFECTE COMPTON:

És la col·lisió elàstica entre un fotó i els electrons lliures d'un cos dispersor.

6. RAIGS X: (Roentgen)

És una ona electromagnètica, d'una longitud d'ona una mica inferior a $1 \cdot 10^{-10}$ m, emesa per una superfície quan aquesta para un electró.

7. DUALITAT ONA-CORPUSCLE:

La llum té propietat ondulatòries i corpusculars.

7.1. ONA: reflexió, refracció, interferències....

7.2. CORPUSCLE: efecte fotoelèctric, efecte Compton,

8. POSTULAT DE DE BROGLIE: (Louis de Broglie, 1924)

El comportament dual de la radiació (ona-corpúscle) també és aplicable a la matèria: un cos de massa m que es mou a una velocitat v li correspon una freqüència i una longitud d'ona:

$$E = hn \rightarrow n = \frac{E}{h}$$

i

$$p = \frac{h}{l} \rightarrow l = \frac{h}{p}$$

9. PRICIPIS D'INCERTESA o INDETERMINACIÓ (Heisenberg):

9.1. Primera part: relaciona la quantitat de moviment p i la posició x :

És impossible determinar simultàniament el valor exacte de la quantitat de moviment d'una partícula i la coordenada de la seva posició. La precisió en la mesura està limitada per la pròpia mesura i es compleix:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \text{on} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

9.2. Segona part: relaciona l'energia E i el temps t :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

La constant de Planck serveix per diferenciar els resultats quàntics dels clàssics

Si la quantitat de moviment i la posició no es poden determinar simultàniament, tampoc es podrà determinar el comportament futur d'un sistema

10. TEORIA DE SCHRÖDINGER: (1926)

10.1. FUNCIO D'ONA:

Aplicant l'hipòtesi de De Broglie a l'electró, si aquest té una ona associada, se n'ha de poder descriure el comportament mitjançant les equacions matemàtiques de les ones.

Aquesta equació matemàtica s'anomena **funció d'ona**. $y(\vec{x}, t)$

Si interpretem estrictament la funció d'ona de Schrödinger s'arriba a la conclusió que la partícula (l'electró) es pot trobar en diverses posicions a la vegada. Això ens porta a interpretar a la funció d'ona com la probabilitat de trobar a l'electró. La probabilitat i l'atzar entren a formar part del món de la matèria.

10.2. EQUACIÓ DE SCHRÖDINGER:

És l'equació diferencial que satisfà la funció d'ona:

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 y(\vec{x}, t)}{\partial x^2} + V(\vec{x}, t)y(\vec{x}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} y(\vec{x}, t) \rightarrow Hy(\vec{x}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} y(\vec{x}, t)$$

L'evolució temporal de la funció d'ona està determinada per l'operador Hamiltonià H , que està relacionat amb l'energia del sistema físic considerat.

10.3. ORBITAL:

És la regió de l'espai a l'entorn del nucli en la qual hi ha una gran probabilitat de trobar l'electró. Aquest ve determinat per tres nombres quàntics (n, l, m_l) que són tres nombres enters que fixen les solucions de l'equació d'Schrödinger.

10.4. POSICIÓ DE L'ELECTRÓ:

L'electró ve determinat per quatre nombres quàntics (n, l, m_l, m_s), els tres de l'orbital en es troba situat i el que és propi de l'electró.



11. NOMBRES QUÀNTICS:

11.1. NOMBRE QUÀNTIC PRINCIPAL: n ($n=1, 2, 3, 4, \dots$)

El seu valor determina la mida de l'orbital. Pot prendre valors naturals. Se'ls anomena: K, L, M,

11.2. NOMBRE QUÀNTIC SECUNDARI: l ($l=0, 1, 2, \dots, n-1$)

Determina la forma de l'orbital. Se'ls anomena, respectivament, orbital s, p, d, f, ...

11.3. NOMBRE QUÀNTIC MAGNÈTIC: m_l ($-l$, fins a l)

Determina l'orientació de l'orbital a l'espai segons un eix arbitrari de referència. La direcció d'aquest eix ve donada per un camp magnètic extern.

11.4. NOMBRE QUÀNTIC D'ESPÍN: m_s (dos valors $1/2$ i $-1/2$)

Està associat a les propietats magnètiques de l'electró, que podem considerar com un petit imant que es pot orientar en els dos sentits d'un eix arbitrari.

12. CONFIGURACIÓ ELECTRÒNICA:

La configuració electrònica d'un element ens indica on es troben distribuïts els electrons d'un dels seus àtoms en els orbitals corresponents.

12.1. **PRINCIPI D'EXCLUSIÓ DE PAULI:** en un àtom no hi pot haver dos electrons amb els quatre nombres quàntics iguals.

12.2. **PRINCIPI D'AUFBAU:** els orbitals s'ocupen començant pel que té menys energia i seguint pels altres orbitals en ordre creixent d'energia.

12.3. **DIAGRAMA DE MOELLER:** regla mnemotècnica que ens permet recordar fàcilment la posició energètica relativa dels diferents orbitals.

12.4. **REGLE DE HUND:** els electrons han de romandre desaparellats sempre que sigui possible.

TEMA 3: FÍSICA NUCLEAR

1. ESTRUCTURA ATÒMICA:
 - 1.1. Escorça: electrons (propietats químiques)
 - 1.2. Nucli: protons i neutrons (propietats nuclears)
 - 1.3. Nombre atòmic (Z) (protons)
 - 1.4. Nombre de massa atòmica (A): protons (Z) més neutrons (N)
 - 1.5. Unitat de massa atòmica (uma)
 - 1.6. Ions
 - 1.7. Isòtops
 - 1.8. Radi atòmic
 - 1.9. Radi nuclear
2. RADIACIÓ NUCLEAR:
 - 2.1. Radiació Alfa
 - 2.2. Radiació Beta negativa
 - 2.3. Radiació Gamma
 - 2.4. Radiació Beta positiva
 - 2.5. Captura K
 - 2.6. Series radioactives
3. FORÇA NUCLEAR (interaccions fortes)
 - 3.1. Introducció a la mecànica relativista
 - 3.2. Energia d'enllaç
 - 3.3. Defecte de massa
4. ACTIVITAT RADIATIVA:
 - 4.1. Activitat
 - 4.2. Llei de desintegració
 - 4.3. Constant radioactiva
 - 4.4. Període de semidesintegració
5. REACCIONS NUCLEARS
 - 5.1. Controlades: centrals nuclears
 - 5.2. Descontrolades: bombes nuclears
 - 5.3. FISSIÓ
 - 5.4. FUSIÓ
 - 5.5. Reacció en cadena
 - 5.6. Massa crítica
 - 5.7. Factor de multiplicació
 - 5.8. CENTRALS NUCLEARS
 - 5.8.1. Parts i funcionament
 - 5.8.2. tipus
 - 5.9. BOMBES NUCLEARS
 - 5.9.1. Tipus i potència
 - 5.9.2. Efectes
 - 5.10. El Sol.



1. DISTÀNCIES:

És important tenir clar els ordres de magnitud de les distàncies en funció del tipus de cos del que parlem. Tal és així que, podríem establir la següent correspondència:

<u>COS</u>	<u>ORDRE DE MAGNITUD</u>
Edifici	metres (m)
Ratolí	centímetres ($1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$)
Éssers unicel·lulars	micres ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$)
Molècula	10 angstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)
Àtom	angstrom
Radi de l'àtom de Bohr:	és l'àtom d'hidrogen, que té un radi de 0,529 $\text{\AA}$
Nucli	fermi ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)
Radi nuclear:	$r = r_0 \sqrt[3]{A}$ on A és el nombre màssic o massa atòmica i r_0 és una constant de valor $1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ (1,2 fm).
Radi d'un nucleó:	és el radi del nucli d'hidrogen que li correspon una massa atòmica $A=1$, i amb l'expressió del radi nuclear li correspon: $r = r_0 \sqrt[3]{1} = r_0 = 1,2 \text{ fm}$
Quark	menor que 10^{-18} m .
Longitud de Planck	$L_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}}$ equival a uns 10^{-35} metres, i és la distància on es comencen a notar els efectes quàntics gravitacionals.

2. CLASSIFICACIÓ DE LES PARTÍCULES NUCLEARS:

En funció del tipus de interacció entre les partícules:

2.1 **FOTONS**: paquet (quantum) d'energia electromagnètica (llum) amb espí 1.

2.2 **HADRONS**: són les partícules que interactuen amb les forces nuclears fortes. Estan formats per unitats més elementals anomenats quarks. Es poden subdividir en dos grups:

2.2.1 **MESONS**: tenen tots espí zero o enter (0 o 1), amb una massa entre la massa del electró i la massa del protó. Tots decauen finalment en electrons, positrons, neutrins i fotons.

2.2.1.1 **PIONS**:

2.2.1.2 **KAONS**:

2.2.1.3 **ETA**:

2.2.2 **BARIONS**: tenen massa igual o superior a la del protó i un espí sempre en un valor no enter ($1/2$ o $3/2$). A excepció del protó, tots els barions decauen de tal manera que el resultat final inclou un protó.

2.2.2.1 **PROTONS**:

2.2.2.2 **NEUTRONS**:

2.2.2.3 **LAMBDA**:

2.2.2.4 **SIGMA**:

2.2.2.5 **XI**:

2.2.2.6 **OMEGA**:

2.3 **LEPTONS**: són un grup de partícules que participen en la interacció dèbil. Tots els leptons tenen espins de $1/2$. No tenen estructura interna.

2.3.1 **ELECTRONS**:

2.3.2 **NEUTRÍ (e)**:

2.3.3 **MUÓ**:

2.3.4 **NEUTRÍ (m)**:

2.3.5 **TAU**:

2.3.6 **NEUTRI (t)**:

En funció de partícula-antipartícula:

Cada partícula té la corresponent antipartícula, que és una partícula amb la mateixa massa, però amb càrrega elèctrica, estranyesa (S), isoespí (I_3), nombre de leptons (L) i nombre bariònic (B) oposats. El símbol d'una antipartícula és el mateix que el de la partícula amb una barra a sobre. Les antipartícules del mesons neutres i del fotó són elles mateixes.

PARTÍCULA – ANTIPARTÍCULA

2.4 **FOTONS:** $g - g$

2.5 **HADRONS:**

2.5.1 **MESONS:**

2.5.1.1 **PIONS:** $p^+ - p^-$
 $p^0 - \bar{p}^0$

2.5.1.2 **KAONS:** $K^+ - K^-$
 $K_s^0 - \bar{K}_s^0$
 $K_L^0 - \bar{K}_L^0$

2.5.1.3 **ETA:** $h^0 - h^0$

2.5.2 **BARIONS**

2.5.2.1 **PROTONS:** $p - \bar{p}$

2.5.2.2 **NEUTRONS:** $n - \bar{n}$

2.5.2.3 **LAMBDA:** $\Lambda^0 - \bar{\Lambda}^0$

2.5.2.4 **SIGMA:** $\Sigma^0 - \bar{\Sigma}^0$
 $\Sigma^+ - \bar{\Sigma}^+$
 $\Sigma^- - \bar{\Sigma}^-$

2.5.2.5 **XI:** $\Xi^0 - \bar{\Xi}^0$
 $\Xi^- - \bar{\Xi}^+$

2.5.2.6 **OMEGA:** $\Omega^- - \bar{\Omega}^+$

2.6 **LEPTONS**

2.6.1 **ELECTRONS:** $e^- - e^+$

2.6.2 **NEUTRÍ (e):** $n_e - \bar{n}_e$

2.6.3 **MUÓ:** $m^- - m^+$

2.6.4 **NEUTRÍ (m):** $n_m - \bar{n}_m$

2.6.5 **TAU:** $t^- - t^+$

2.6.6 **NEUTRI (t):** $n_t - \bar{n}_t$

Partícules fonamentals o elementals:

2.7 LEPTONS: semblen ser partícules elementals ja que no tenen mida ni estructura interna mesurable. Són un nombre limitat i no semblen descompassar-se en unitats més petites.

2.8 QUARKS: són les partícules elementals que formen els hadrons. Són fermions amb espí 1/2 que es troben en múltiples de tres o lligats amb un antiquark. Tipus (model estàndard):

2.8.1 AMUNT: $u - \bar{u}$

2.8.2 AVALL: $d - \bar{d}$

2.8.3 ENCÍS: $c - \bar{c}$

2.8.4 ESTRANY: $s - \bar{s}$

2.8.5 CIM: $t - \bar{t}$

2.8.6 FONS: $b - \bar{b}$

I poden tenir tres colors: (cromatografia quàntica)

2.8.7 VERMELL - ANTIVERMELL

2.8.8 VERD - ANTIVERD

2.8.9 BLAU - ANTIBLAU

La força de “color” augmenta amb la distància, i en són responsables els gluons (partícules mitjanceres). De gluons n'hi ha vuit, sis dels quals tenen color. Gràcies a la càrrega de color, els quarks poden atreure entre sí i formar partícules compostes. La força de color és semblant a la força elèctrica: colors iguals es repelen i colors diferents o oposats s'atrauen.

2.8.10 Els MESONS estan formats per un quark i un antiquark (amb colors oposats)

2.8.10.1 PIONS: $p^+ - u\bar{d}$
 $p^- - \bar{u}d$
 $p^0 - u\bar{u}$

2.8.10.2 KAONS: $K^+ - u\bar{s}$
 $K^- - \bar{u}s$
 $K^0 - d\bar{s}$
 $\bar{K}^0 - s\bar{d}$

2.8.10.3 ETA: $h^0 - d\bar{d}$

2.8.11 Els BARIONS estan formats per tres quarks (de colors diferents)

2.8.11.1 PROTONS: p - uud

2.8.11.2 NEUTRONS: n - udd

2.8.11.3 LAMBDA: Λ^0 - uds

2.8.11.4 SIGMA: Σ^0 - uds
 Σ^+ - uus
 Σ^- - dds

2.8.11.5 XI: Ξ^0 - uss
 Ξ^- - dss

2.8.11.6 OMEGA: Ω^- - sss

2.8.12 Els ANTIBARIONS estan formats per tres antiquarks (de colors diferents)

2.8.12.1 antiPROTONS: $\bar{p}$ - $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$

2.8.12.2 antiNEUTRONS: $\bar{n}$ - $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$

2.8.12.3 antiLAMBDA: $\bar{\Lambda}^0$ - $\bar{u}\bar{d}\bar{s}$

2.8.12.4 antiSIGMA: $\bar{\Sigma}^0$ - $\bar{u}\bar{d}\bar{s}$
 $\bar{\Sigma}^+$ - $\bar{u}\bar{u}\bar{s}$
 $\bar{\Sigma}^-$ - $\bar{d}\bar{d}\bar{s}$

2.8.12.5 antiXI: $\bar{\Xi}^0$ - $\bar{u}\bar{s}\bar{s}$
 $\bar{\Xi}^+$ - $\bar{d}\bar{s}\bar{s}$

2.8.12.6 antiOMEGA: $\bar{\Omega}^+$ - $\bar{s}\bar{s}\bar{s}$

En funció del seu comportament (estat energètic):

2.9 FERMIONS: són partícules amb espí enter més $1/2$. Tenen la propietat que cada un d'ells necessita el seu espai propi; dos fermions del mateix tipus no poden estar en el mateix punt, i el seu moviment és tal que s'esquiven els uns als altres. Han de complir el **principi d'exclusió de Pauli**.

2.9.1 LEPTONS

2.9.2 BARIONS

2.10 BOSONS: són partícules amb espí enter. Tenen la propietat que es comporten col·lectivament (són partícules gregàries) i tenen tendència a agrupar-se en un mateix lloc (poden ocupar el mateix lloc amb el mateix estat energètic).

2.10.1 FOTONS

2.10.2 MESONS

3 CLASSIFICACIÓ DE LES PARTÍCULES COMPOSTES (àtoms, molècules....)

3.1 BOSONS: nombre parell de fermions (protons, electrons i neutrons).

3.1.1 GAS DE FERMI DEGENERAT: un gas de fermions compost (${}^6\text{Li}$) es refreda fins a la temperatura de transició en una cavitat òptica. Els àtoms s'agrupen per sí mateixos de dos en dos, en el mínim estat energètic permès, con si fossin electrons (principi d'exclusió de Pauli)

3.2 FERMIONS: nombre senars de fermions.

3.2.1 CONDENSATS DE BOSE-EINSTEIN: un gas de bosons compost (${}^7\text{Li}$) es refreda a la temperatura de transició (a menys d'una milionèsima de grau kelvin) en una cavitat òptica (de làsers) de 1 mm de llarg i una dècima de mil·límetre d'ampla. Amb aquestes condicions, es produeix una ràpida transició d'una situació clàssica (àtoms amb aris nivells d'energia) a una situació quàntica amb tots els àtoms amb el mateix nivell d'energia mínim i la longitud d'ona màxima (els que permet la cavitat òptica), vibrant tots per igual, com si fossin un únic àtom gran.

4 FORCES (INTERACCIONS):

La física actual prediu l'existència de quatre tipus de forces (interaccions), les anomenades forces fonamentals:

- les forces nuclears fortes,
- les forces electromagnètiques,
- les forces nuclears dèbils
- les forces gravitatòries.

Quan parlem de força o interacció no ens referim necessàriament a quelcom que modifica el moviment de les partícules, sinó als fenòmens que fan que les partícules s'alterin d'alguna manera unes amb les altres, incloent-hi el cas en el que intercanvien la seva pròpia identitat. Les partícules poden interaccionar entre sí a distància, però això passa perquè intercanvien una partícula mitjancera.

Aquestes forces les hem anomenat de més a menys intenses. Les seves principals característiques són:

4.1 FORCES NUCLEARS FORTES:

- 4.1.1 Són les forces que mantenen units els nucleons en el nucli (formant el nucli).
- 4.1.2 Actuen a distàncies curtes (són menyspreables a distàncies més grans de 1 fm ($1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$) que equival al radi del nucli).
- 4.1.3 La partícula mitjancera és el **gluó**: quantum d'energia d'interacció forta que transmet la interacció entre el quarks.

4.2 FORCES ELECTROMAGNÈTIQUES:

- 4.2.1 Són les forces que uneixen àtoms i molècules.
- 4.2.2 Tenen un valor de 10^{-2} vegades les forces nuclears fortes.
- 4.2.3 Actuen a grans distàncies.
- 4.2.4 La partícula mitjancera és el **fotó**: quantum d'energia d'interacció electromagnètica.

4.3 FORCES NUCLEARS DÈBILS:

- 4.3.1 Són les forces que provoquen inestabilitat en el nucli, i són les responsables de les desintegracions nuclears.
- 4.3.2 Tenen un valor de 10^{-5} vegades les forces nuclears fortes.
- 4.3.3 Actuen a distàncies molt curtes (10^{-3} fm).
- 4.3.4 La partícula mitjancera és el **bosó** W^+ , W^- i Z^0 pels neutrins.



4.4 FORCES GRAVITATÒRIES:

- 4.4.1 Són les forces que mantenen units els planetes.
- 4.4.2 Tenen un valor de 10^{-39} vegades la força nuclear forta.
- 4.4.3 Actuen a grans distàncies.
- 4.4.4 La partícula mitjancera és el **gravitó**: quantum d'energia de les ones gravitatòries (encara no detectat experimentalment).

5 TEORIES:

Aquestes forces justifiquen la major part dels fenòmens físics i les tenim en les diferents parts de la física:

5.1 Mecànica newtoniana: són les tres lleis de Newton

- 5.1.1 Primera llei: Llei d'inèrcia
- 5.1.2 Segona llei: Llei fonamental de la dinàmica newtoniana
- 5.1.3 Tercera llei: Llei d'acció i reacció.

5.2 Gravitat newtoniana (G):

- 5.2.1 Quarta llei de Newton: Llei universal de gravitació.

5.3 Teoria especial de la relativitat ($1/c$)

- 5.3.1 La velocitat de la llum és constant
- 5.3.2 L'espai es contrau i el temps es dilata
- 5.3.3 La massa és una forma d'energia

5.4 Mecànica quàntica no relativista. ($\hbar$)

- 5.4.1 Principi d'incertesa
- 5.4.2 Equació d'Schrödinger
- 5.4.3 L'energia està quantificada

5.5 Teoria general de la relativitat (G i $1/c$)

- 5.5.1 Curvatura de l'espai-temps = G x densitat d'energia

5.6 Teoria quàntica de camps ($\hbar$ i $1/c$)

5.7 Teoria quàntica de la gravetat ($\hbar$, $1/c$ i G)

- 5.7.1 Ones gravitatòries.