

## NOCIONS ELEMENTALS SOBRE LA RELATIVITAT (4)

### El camp gravitatori

Per què quan es deixa anar una pedra cau a terra? Abans es deia: "Perquè la Terra l'atreu". Però la física moderna diu que no hi ha accions immediates a distància. Aleshores hem de dir que la Terra produeix un camp gravitatori al seu entorn, que aquest camp actua sobre la pedra i produeix el seu moviment de caiguda.

A mida que ens allunyem de la Terra la intensitat de l'acció gravitatòria sobre els cossos disminueix segons una llei ben determinada. L'acceleració que sofreixen els cossos en un camp gravitatori no depèn del material de què estan compostos ni del seu estat físic.

D'acord amb la mecànica clàssica, tenim sempre:

Força = massa inercial \* acceleració.

Considerant el cas d'un cos sotmès a la gravetat tenim:

Força = massa pesant o gravitatòria \* intensitat del camp gravitatori.

Ara bé, com que en un camp gravitatori donat, l'acceleració sempre és la mateixa per a qualsevol cos, cal que la massa inercial i la massa pesant o gravitatòria també siguin equivalents. Altrament dit, la mateixa qualitat del cos (la massa) es pot manifestar com a inèrcia o com a pes.

### Per què una nova teoria de la gravitació?

Per dues raons: La primera és que la relativitat especial requereix la invariància de totes les lleis fonamentals de la física sota la transformació de Lorentz, i la llei de la gravitació universal de Newton no compleix aquest requisit.

La segona és que per assolir o identificar un sistema de referència inercial cal poder eliminar totes les forces com a única manera de poder verificar el compliment del principi de la inèrcia, però resulta que la gravetat no es pot eliminar. Ara bé, una persona en caiguda lliure no experimenta cap força gravitatòria, o sigui que la caiguda lliure elimina la gravitació, de manera que podríem dir que una cambra en caiguda lliure seria un SR inercial. Però dos observadors en caiguda lliure, p. ex. un a Europa i un altre a Austràlia, no estan pas en moviment uniforme l'un respecte a l'altre, sinó que estan en moviment relatiu accelerat. Aleshores, podran ser tots dos alhora considerats com a SR inercials?

La resposta és que es podran considerar com a SR locals, o sigui en un entorn petit al seu voltant respectiu, però tot això vol dir que el marc de la relativitat especial és insuficient i que cal poder-lo estendre a SR que tinguin acceleració respecte a d'altres, per poder formular lleis vàlides per a tots els SR sense restriccions de cap mena.

### El principi d'equivalència

Introduïrem aquest principi a partir d'exemples. El més típic és el de la cabina d'ascensor en caiguda lliure i on un observador interior deixa anar dos objectes que es treu de la butxaca. Per a un observador exterior, tots dos objectes cauen amb la mateixa acceleració, igualment com tota la cabina, parets, sostre i terra, i tant la cabina com els cossos que conté es troben en un moviment accelerat d'acord amb la llei de gravitació de Newton. Per a l'observador interior, els dos cossos no es mouen respecte a la cabina, de manera que ignorarà el camp de la gravitació. Veurà que l'ascensor no exerceix cap força sobre els cossos, que estan en repòs com si estiguessin en un SR inercial. Si empeny un cos en qualsevol direcció es mourà uniformement mentre no topi amb el sostre, les parets o el terra. El SR de l'ascensor només difereix d'un SR veritablement inercial pel fet que està limitat en l'espai i en el temps.

És essencial remarcar el caràcter local d'aquest SR. Si no fos així i p. ex. l'ascensor fos molt ample i un cos es deixés anar sobre el pol i l'altre sobre l'equador, l'observador veuria que els dos cossos es mourien un respecte a l'altre a causa dels diferents valors de g. Local en l'espai

i el temps perquè encara que la cabina fos petita, també veuria que a mida que s'acostés al centre de la Terra els dos cossos s'anirien acostant, puix que convergrien cap a aquest centre.

Bé, els punts de vista dels dos observadors són diferents, però és impossible pronunciar-se entre aquestes divergències. L'exemple mostra que és possible fer una descripció coherent dels fenòmens físics en dos SR que no es mouen uniformement un en relació a l'altre, però tenint en compte la gravitació, que existeix per a l'observador exterior però no per a l'interior.

Fem ara un experiment una mica diferent. Estem en un SR inercial on hi ha una cabina d'ascensor, i des de l'exterior s'estira el cable amb una força constant. Essent el SR inercial, la cabina adquirirà una acceleració constant cap amunt. Que diuen ara els dos observadors?

L'observador exterior està en un sistema inercial i veu que l'ascensor té un moviment accelerat perquè rep l'acció d'una força constant. Els cossos que hom deixa anar a dintre topen amb el terra perquè el terra es mou acceleradament amunt en direcció cap a ells.

L'observador interior constata que no està en un SR inercial perquè el terra de l'habitació l'empeny i podrà estar dret tal com ho fem nosaltres a casa nostra, sense flotar a l'espai. Els cossos que deixa anar li cauen cap a terra, per tant creu que ell i cabina estan en un camp gravitatori. Veu que li passa el mateix que li passava quan era a la Terra.

Es preguntarà doncs per què no cauen i no senten ingravidesa, però si veu el cable per una finestreta en el sostre, pensarà que no cauen perquè el cable els aguanta, i que ell i cabina estan immòbils. O sigui que estar en moviment accelerat en un lloc sense camp gravitatori, o estar quiet en un lloc amb camp gravitatori són situacions equivalents i dir una cosa o dir-ne una altra, només depèn de tenir un sistema de referència extern al qual referir el moviment.

Aquest és el principi d'equivalència: *En un punt qualsevol de l'espai els efectes de la gravitació i del moviment accelerat són equivalents i no es poden distingir l'un de l'altre.*

Un altre exemple per il·lustrar el mateix és el d'uns astronautes que viatgen en un coet a velocitat constant i que, per tant es troben en una situació d'ingravidesa. Si de cop i volta el coet accelera, se senten pitjats fortament cap al respall dels seus seients, i si frena, se senten impulsats endavant. O sigui que associen l'empenta endarrera o endavant amb acceleració o frenada. Si estant en velocitat uniforme i sense que ells ho notin, se'ls acosta pel darrera un gran planeta que els atreu amb una forta gravetat (compensada pels motors del coet, de manera que la seva velocitat es mantingui constant) també se sentiran atrets cap endarrera i es pensaran que el coet accelera.

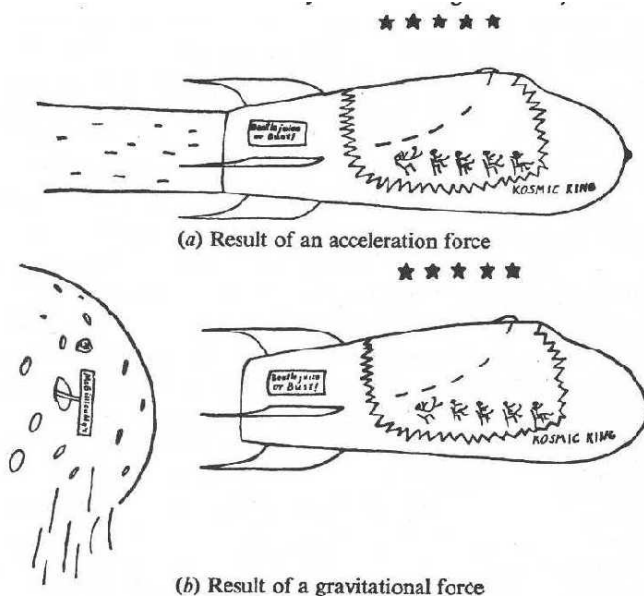


Figure 19. The Principle of Equivalence

Encara uns altres exemples: Estem en una cabina d'ascensor i drets sobre una balança de bany. Quan l'ascensor accelera cap amunt la balança indica un augment del nostre pes, però quan l'ascensor assoleix una velocitat constant, encara que sigui molt i molt alta, recuperem el nostre pes normal. Una acceleració cap amunt de la cabina és interpretada per la balança com un augment de la gravetat. Inversament, quan l'ascensor frena la seva pujada, o bé quan accelera cap avall per baixar, la balança indica una disminució del nostre pes. Això és perquè la balança interpreta aquesta acceleració de sentit contrari a la gravetat de la Terra, com a una disminució de la gravetat.

### Igualtat de la massa gravitatòria i la massa inert

Suposem ara que l'observador de l'interior de la cabina d'ascensor accelerada cap amunt lliga una corda amb un dinamòmetre al sostre i hi penja un objecte. La corda queda en posició vertical i tensa. Però tensa, per què? L'observador interior diria que és a causa del camp gravitatori que atreu l'objecte amb una força que queda compensada per la tensió de la corda, i que aquesta tensió depèn de la massa gravitatòria del cos. L'observador exterior diria que la corda transmet l'acceleració de la cabina al cos i que la tensió de la corda és la suficient per accelerar el cos igualment com a la resta de la cabina. Aquesta tensió depèn doncs de la massa inert del cos. Aquest raonament mostra que el principi d'equivalència exigeix necessàriament la igualtat entre massa gravitatòria i massa inert.

### La curvatura dels raigs de llum

Proseguim l'experiment de la cabina d'ascensor situat en un SR inercial i accelerat cap amunt i suposem que per un foradet lateral entra un raig de llum a la cabina fins a la paret oposada.

L'observador exterior, sense camp gravitatori, veurà que el raig de llum toca la paret oposada una mica més avall de l'horitzontal del punt d'entrada, degut a l'espai recorregut per l'ascensor en el temps que tarda la llum a travessar l'amplada de la cabina.

L'observador interior, amb camp gravitatori, creu que està sotmès a un camp gravitatori i també veurà que la llum toca la paret oposada una mica més avall de l'horitzontal del punt d'entrada. La seva conclusió serà que la llum pesa i que la gravetat ha torçat el raig de llum cap avall. La curvatura dels raigs de llum és doncs una conseqüència necessària del principi d'equivalència.

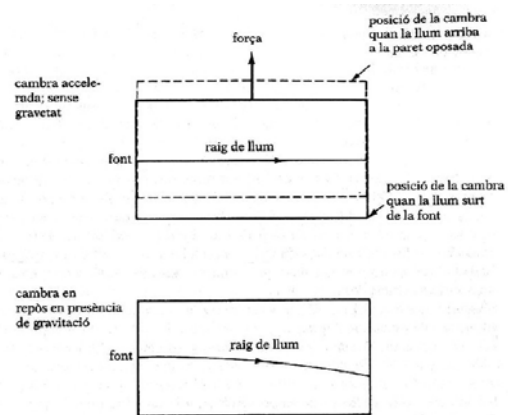


Figura 7.2. El principi d'equivalència ens porta a la conclusió que els raigs de llum es corben a causa de la gravetat.

### La curvatura de l'espai-temps

Comencem amb unes consideracions geomètriques prèvies sobre diferents tipus d'universos i les seves propietats.

a/ Universos unidimensionals:

Un segment és finit i està limitat.

La línia d'una circumferència és finita i no està limitada.

b/ Universos bidimensionals:

Un full de paper (tant si és pla com si està una mica bombat) és finit i està limitat.

Una superfície esfèrica és finita i no és limitada.

c/ Universos tridimensionals:

Una esfera (tot el seu interior) és finita i està limitada.

Un univers tridimensional pot ser finit i no estar limitat, p. ex. si tingués un camp gravitatori tan fort cap al seu centre de manera que cap objecte, ni la llum, se'n poguessin allunyar infinitament.

Un espai teòric sense barreres ni gravitació podria ser considerat com a infinit i il·limitat.

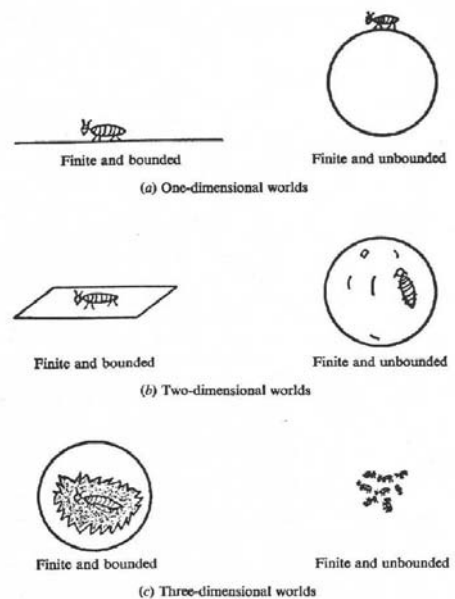


Figure 22. Various Types of Universes

Suposem uns éssers bidimensionals que viuen en un pla. Si se'ls transporta a una superfície esfèrica molt gran primer no notaran res, però si fan mesures de molta precisió s'adonaran p. ex. que dues rectes paral·leles (que sobre una esfera són cercles màxims) es troben en dos punts, talment com tots els meridians es troben en els dos pols terrestres, i també comprovaran que la suma dels angles d'un triangle dóna més de  $180^\circ$ , de manera que no els serviria la geometria d'Euclides i n'haurien d'aplicar una de diferent.

Per prosseguir endavant ens cal una redefinició o generalització del concepte de línia recta. Podem partir de la consideració que una línia recta és la distància més curta entre dos punts, i també que és la trajectòria que segueix un raig de llum. Però el principi d'equivalència ens mostra que un raig de llum es corba per acció de la gravetat.

Si deformem un pla (elàstic) i el transformem en una superfície esfèrica, la línia recta com a distància més curta entre dos punts ja deixa de ser una recta en sentit euclidià i esdevé un arc de cercle màxim. Igualment un raig de llum presoner entre dues superfícies esfèriques reflectants de radis que difereixin en molt i molt poc, també seguirà un arc de cercle màxim. Això ho podem veure nosaltres des d'un espai tridimensional, però no notarien pas els éssers bidimensionals abans esmentats. També el camí de la llum en una fibra òptica de radi infinitesimal seria una recta en aquell univers unidimensional, encara que no ens ho semblés des del nostre espai tridimensional.

Doncs bé, el que passa és que el raig de llum que es corba en l'exemple de l'ascensor accelerat o bé per acció de la gravetat, ens duu a la conclusió que el que passa en un univers bidimensional elàstic i deformable, també ocorre en l'espai tridimensional.

En matemàtiques, la línia que s'ha de seguir per connectar dos punts pel camí més curt s'anomena línia geodèsica, i totes les línies més curtes sobre qualsevol superfície s'anomenen geodèsiques. En el cas de superfícies esfèriques seran arcs de cercle màxim, però en el cas d'altres superfícies com el·lipsoides, hiperboloides o superfícies de grau superior seran altres línies que es poden determinar per càlcul.

La generalització del concepte de recta al de geodèsica dut a l'espai tridimensional ens duu a la generalització de l'espai-temps "pla" de Minkowski a un espai-temps corb anomenat espai-temps de Riemann, en honor del matemàtic alemany Georg Friedrich Bernhard Riemann. La línia més curta que connecta dos successos a l'espai-temps riemannian és una geodèsica, ben definida matemàticament. És en aquest sentit que en presència de gravetat un cos caient lliurement segueix caient en una "línia recta" entre cometes, ara una geodèsica, i que un raig de llum també segueix viatjant en "línia recta" igualment entre cometes.

D'aquesta manera podem generalitzar el principi de la inèrcia en presència de gravetat, o sigui a fora dels sistemes inercials, dient que sota l'efecte de gravitació i en absència d'altres forces, els objectes es mouen per geodèsiques.

### L'exemple del disc giratori

La curvatura de l'espai temps també es dedueix com a necessària a partir de la relativitat especial a través d'un experiment ideal. Tenim un gran disc que pot girar al voltant d'un eix central. També hi ha dos observadors, un que forma part del SR inercial exterior i un altre sobre el disc (sistema de referència SR').

Amb el disc en repòs tots dos mesuren el diàmetre i la circumferència exterior del disc. Tots dos mesuraran els mateixos valors i trobaran que  $C/D = \pi$ . Amb el disc encara aturat, l'observador exterior dibuixarà una circumferència en el seu SR exactament a sota el disc i de les seves mateixes dimensions.

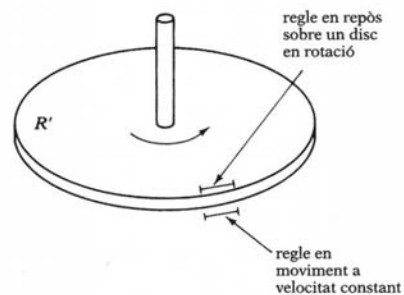


Figura 7.3. Un regle quiet al sistema de referència  $R'$  (disc rotant) es compara amb un regle en moviment amb velocitat constant respecte un sistema de referència inercial  $R$ . A l'instant que es mostra, ambdós regles tenen exactament la mateixa velocitat (en magnitud i direcció).

Amb el disc ja en rotació l'observador exterior mesurarà la circumferència que coincideix amb el disc i trobarà els mateixos valors anteriors.

L'observador interior comprovarà que els valors del radi i del diàmetre són els mateixos. Això s'explica perquè el radi és perpendicular a la direcció del moviment lineal i no sofreix contracció, és a dir, que per efecte de la rotació el disc no s'encongeix.

Ara bé, en mesurar la circumferència, sí que el regle de l'observador interior s'haurà contret, i per això mesurarà un valor  $C' > C$  en un factor  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , essent  $v$  la velocitat lineal de la circumferència exterior del disc respecte a SR i resultarà  $C/D > \pi$ .

En la geometria no euclidiana la raó  $C/D$  d'una circumferència (definida com a lloc geomètric de tots els punts equidistants d'un centre) pot ser igual, major o menor que  $\pi$ , segons quin sigui el tipus de curvatura de l'espai considerat.

En espais bidimensionals tenim  $C/D = \pi$  en el pla euclidià,  $C/D < \pi$  en una superfície esfèrica i  $C/D > \pi$  sobre una sella, que és el mot popular per designar un paraboloid hiperbòlic (cal notar que sobre aquestes superfícies les circumferències no les podem traçar amb un compàs sinó que ho hem de fer amb un cordill que estigui sempre en contacte amb la superfície respectiva).

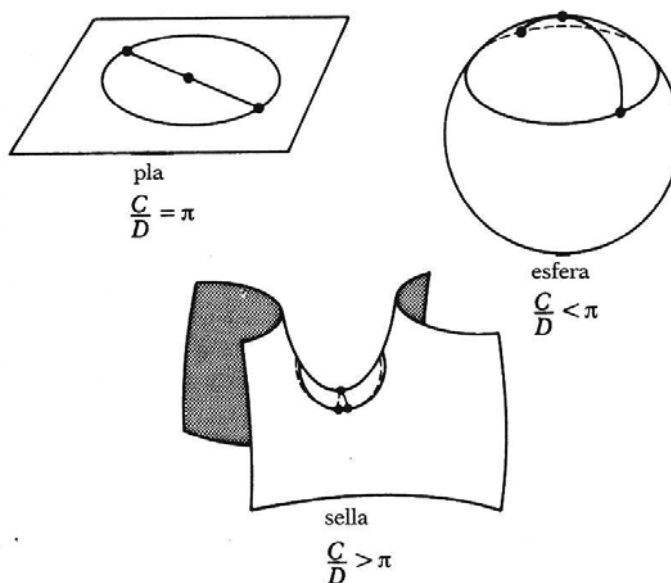


Figura 7.4. Cercles dibuixats sobre un pla, una esfera i una sella. La raó de la circumferència al diàmetre  $C/D$  és igual, menor, i major respectivament.

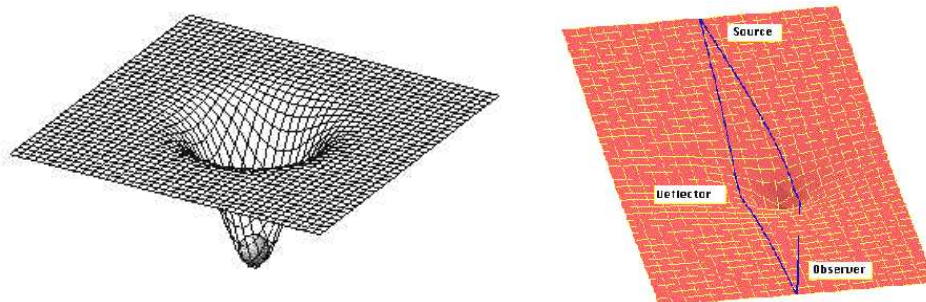
Queda clar doncs que la gravetat (o l'acceleració) produeix una distorsió de l'espai, ja que hem comprovat que en un SR accelerat o sotmès a una gravetat (sistemes equivalents) resulta  $C/D \neq \pi$ .

### Naturalesa de l'espai físic

De tot el que hem repassat d'una manera molt elemental, potser la curvatura de l'espai temps és el que ens pot semblar més estrany i difícil d'entendre.

Tal com jo criticava com a confusiónaires les figures que intentaven representar un espai-temps quadridimensional sobre un full de paper de dues dimensions, també em cal criticar com a nefastes al meu entendre, aquelles figures que intenten il·lustrar aquesta curvatura dibuixant com una mena de xarxa o de llit elàstic amb una bola pesant que l'estiraganya amunt o avall i que

afortunadament ja no apareixen en els textos més solvents (això ja és tot un símptoma), p. ex. aquestes dues figures de la dreta



Cal que ens basti entendre la generalització que hem fet de les línies rectes a les geodèsiques. Estem massa acostumats a la retícula quadriculada de les coordenades cartesianes i hem d'assumir que si en un pla cartesià hi apareix una gran massa, les línies horitzontals i verticals s'hi acostaran talment com si fossin de filferro i suportessin una atracció gravitatòria. Això no ens ha de preocupar, perquè si tenim matemàticament ben definides aquestes línies, ens serveixen igualment per determinar la posició de qualsevol punt per coordenades.

Aquestes noves línies "deformades" en funció de les masses presents i de llur situació relativa serien les "noves" i veritables rectes del pla i no pas les "velles" rectes euclidianes traçades amb un regle. Cal tenir clar que el regle i les rectes només serveixen per al pla o per a l'espai euclidià, però que un espai amb masses i amb gravitació no ho és d'euclidià, i per tant, en l'espai físic les rectes i els regles antics no hi són aplicables.

Igualment en l'espai tridimensional corresponent a la projecció sobre 3 dimensions d'un espai-temps quadridimensional, les línies horitzontals de davant-darrera i de dreta-esquerra i les línies verticals de dalt a baix, i també els plans horitzontals i verticals davant-darrera i dreta-esquerra, que ens serveixen per determinar les coordenades de qualsevol punt és com si fossin elàstics i també s'estiraganyen i es deformen atrets per totes les masses presents.

Aquestes línies i aquests plans deformables són els que defineixen les noves i veritables rectes físiques. Són les línies geodèsiques que corresponen a la menor distància entre dos punts i al camí que recorren els raigs de llum. Per això, segons quin sigui el sentit de la curvatura de l'univers, aquest pot ser finit i il·limitat perquè qualsevol raig de llum podria donar la volta i retornar al punt de sortida, talment com ho fan els cercles màxims de les superfícies esfèriques.

### **Una darrera reflexió**

La gent de la nostra generació i la de les generacions anteriors, durant tota la vida hem estat funcionant amb Newton i sembla que no en sapiguem sortir perquè quan ho intentem ens topem amb un món estrany i aparentment hostil. Els afeccionats a la física i a l'astronomia hem de respectar i apreciar Euclides, Galilei, Newton i Maxwell perquè van ser uns genis que van treure el màxim partit de les possibilitats que tenien al seu abast, però resulta que ja fa més de 80 anys que se sap que el món físic és diferent de com l'explicaven aquests insignes personatges, perquè ho feien d'una manera que només era vàlida en l'àmbit restringit de les moderades velocitats, masses i distàncies.

Per això ara ja és hora de trencar tota inèrcia mental i d'assumir plenament aquestes quatre beceroles de la física moderna que hem explorat duant l'any del centenari de la relativitat especial. Aquesta "nova" física sens dubte anirà essent modificada i perfeccionada en el futur tal com ha ocorregut sempre en la història de la ciència.

Aquesta va ser la genialitat d'Einstein, la d'obrir una gran finestra i mostrar que l'univers funciona d'una manera diferent (més general) a la que tothom es pensava. Passar de Newton a Maxwell i a Einstein és com passar de la música de Bach a la Brahms i a la de Bartok o Xostakòvitx. Encara que ens costi, un moment o altre hem de fer aquest pas, i com més aviat el fem, millor.

### **Les grans unificacions**

Aquí acabava els meus apunts, però encara hi podem afegir algunes consideracions complementàries. Einstein va viure 76 anys, de 1879 a 1955, i és sabut que als seus 40 anys ja havia dut a terme els seus descobriments més importants, més o menys cap allà a 1919 o 1920.

Fins al començament dels anys 30 encara va estar fent de professor a Berlín i després se'n va anar als Estats Units, on va treballar a l'Institut d'Estudis Avançats de la Universitat de Princeton (NJ), però ja no va assolir altres descobriments a l'altura dels anteriors. Sabem que en aquests darrers 25 o 30 anys de la seva vida va dedicar grans esforços a l'estudi d'una teoria o d'unes equacions que apleguessin tota la física.

Així com va estar present al naixement de la mecànica quàntica, p. ex. amb treballs com e, de l'efecte fotoelèctric, també sabem que posteriorment va ser reticent amb el desenvolupament d'aquesta teoria en la línia de Niels Bohr i el seu grup. Acabem doncs veient la suggestiva descripció que ens fa un autor, Fritz Rohrllich, del progrés de la física a base d'unificacions successives.

Ens diu que la física progressa des dels experiments i les observacions cap a les lleis, i de les lleis cap a les teories. Tot això són processos d'unificació, i també ho són quan una teoria permet deduir altres teories més antigues com a casos particulars o aproximats de la teoria nova.

Una unificació va ser, p. ex. el descobriment de Kepler que el moviment dels 6 planetes aleshores coneguts obeïa a les mateixes lleis. Les lleis del moviment de caiguda dels cossos van ser establertes anys per Galilei, i també eren vàlides per a tots els cossos.

Doncs una altra unificació fa ser la Teoria de la Gravitació Universal de Newton, que venia a combinar les lleis del moviment dels astres en el Sistema Solar de Kepler, amb les del moviment dels cossos a la Terra de Galilei.

Una altra unificació, que Fritz Rohrllich qualifica d'impressionant, es va produir uns 200 anys més tard, quan JC. Maxwell va unificar en una sola teoria tots els coneixements de la seva època sobre l'electricitat, el magnetisme i la llum.

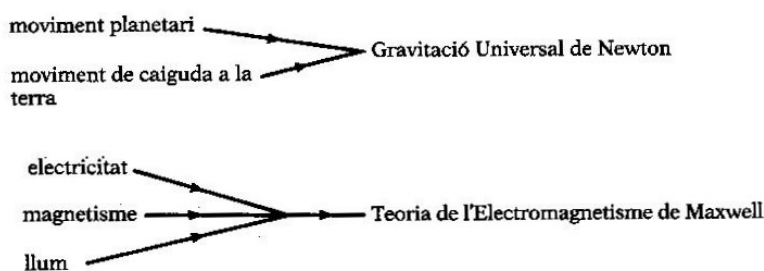


Figura 4.1. Unificació dels fenòmens clàssics en dues teories fonamentals.

Les teories de la física s'han de seguir unificant? P. ex. la relativitat, que es refereix a la física de grans masses, grans distàncies i grans velocitats s'ha d'unificar amb la mecànica quàntica, que es refereix, si bé no pas exclusivament, a fenòmens observats a escala atòmica? Einstein creia que sí i a aquesta tasca va dedicar els darrers 25 o 30 anys de la seva vida. Sobre aquest tema sembla que avui dia una part dels físics creuen que sí que és possible i que val la pena dedicar-hi esforços, i que n'hi ha d'altres que creuen que no tant i que hi ha altres prioritats.

L'estat d'aquesta qüestió l'any 1987 (data del llibre de Rohrllich) es pot veure en aquesta darrera figura, on es mostra la unió de la força electromagnètica, primer amb la interacció dèbil, després amb la interacció forta i finalment, sí és que alguna hora s'hi arriba, amb la gravetat.

El darrer interrogant de la figura seria l'anomenada Teoria de les Cordes, que l'any 87 encara no tenia cap suport empíric sinó que només era una construcció matemàtica.

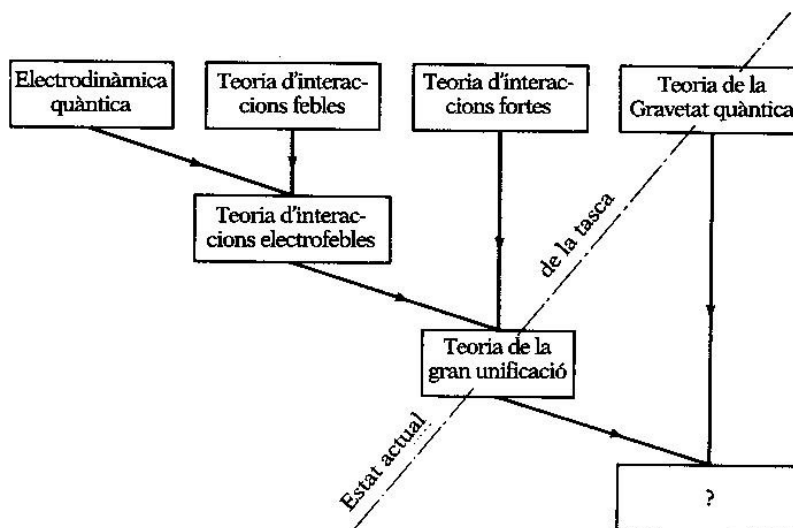


Figura 4.3. Unificació de les quatre interaccions fonamentals. La línia discontinua indica aproximadament l'estat actual de la tasca.

## RESUM

- El principi d'equivalència ens diu que estar en un moviment accelerat en un lloc sense camp gravitatori o estar quiet en un lloc amb camp gravitatori són situacions equivalents, i que poder dir una cosa o una altra només depèn de si es té un sistema de referència extern al qual referir el nostre moviment.
- Dit d'altra manera: En un punt qualsevol de l'espai, els efectes de la gravitació i els del moviment accelerat són equivalents i no es poden distingir l'un de l'altra.
- La igualtat de la massa gravitatòria i de la massa inert, i també la curvatura dels raigs de llum són conseqüències necessàries del principi d'equivalència.
- En un espai bidimensional que es transformi per deformació en una superfície esfèrica, una línia recta passa a ser un cercle màxim. De manera similar l'espai-temps quadridimensional pla de Minkowski es deforma en un espai-temps quadridimensional corbat, ben definit matemàticament, que rep el nom d'espai de Riemann, on les rectes ja no són les rectes euclidianes sinó les trajectòries dels raigs de llum. És a dir, que l'efecte de la gravitació sobre la radiació electromagnètica fa que calgui abandonar la geometria euclidiana com a definitiva de l'espai físic.
- La mateixa relativitat especial també comporta la curvatura de l'espai-temps, ja que la contracció de longituds duu a una relació circumferència-diàmetre diferent de  $\pi$ .
- La física clàssica és vàlida en l'àmbit restringit de les petites masses, distàncies i velocitats, però cal assumir la física relativista en els altres casos.
- Històricament es va assolir la unificació de les lleis del moviment de tots els cossos i també la dels fenòmens de la llum, l'electricitat i el magnetisme. Més recentment s'ha assolit la unificació de l'electrodinàmica quàntica amb la teoria de les interaccions forta i feble, però encara resta pendent la unificació d'aquestes tres forces amb la de la gravetat.
- Finalment, la Relativitat no és només una teoria coherent en si mateixa i amb el resultat de l'experiment de Michelson i Morley sinó que també ha estat corroborada per altres proves experimentals de molt diversa índole.

## APÈNDIX. LA VALIDACIÓ EXPERIMENTAL DE LA RELATIVITAT

### INCREMENT DE MASSA

Partícules radioactives: L'estudi dels raigs  $\beta$  procedents de les substàncies radioactives va mostrar que eren partícules de diferents masses i diferents velocitats (però sempre comparables a  $c$ ). Sempre les partícules de major massa eren les més velocs. De les relacions de massa i velocitat, i aplicant les hipòtesis relativistes, es va comprovar que la massa en repòs de les partícules sempre era la mateixa, i que era equivalent a la de l'electró. Per tant, les radiacions eren electrons, en els quals s'observava l'increment relativista de massa.

Les òrbites electròniques: El 1913, Bohr havia suposat que els electrons voltaven en òrbites circulars al voltant del nucli, però més tard, Sommerfeld va considerar que eren el·lipses. En tal cas, la velocitat de l'electró ha de ser variable en virtut de la 2<sup>a</sup> Llei de Kepler. Aquesta variació és considerable perquè l'òrbita és molt excèntrica i segons la relativitat comporta una variació de massa inert, la qual cosa fa que l'el·lipse no estigui quieta en una posició fixa sinó que giri en un moviment de precessió del seu eix, originant una òrbita resultant en forma de sanefa. Això es va poder comprovar per anàlisi de les ratlles de l'espectre, que apareixen dividides en dues per aquesta causa.

Els acceleradors atòmics: Aquests aparells acceleren p. ex. protons fins a  $0,95 c$ , i s'observa que la seva massa es multiplica per 3. També acceleren electrons fins a  $0,9999999 c$ , i s'observa també l'increment corresponent de massa.



## EQUIVALÈNCIA DE MASSA I ENERGIA

Experiment de Cockroft i Walton: Els protons (+ els neutrons) estan fortament units en el nucli atòmic per una energia d'unió que ha de contrarestar la repulsió elèctrica. Durant la fissió, aquesta energia s'allibera i els fragments resultants del trencament del nucli resulten tenir una massa menor que l'original. Això va ser comprovat per Cockroft i Walton, ja el 1932, trencant nuclis de liti amb protons.

Bombes atòmica i d'hidrogen: És semblant al cas anterior. En la bomba de fissió, la massa disminueix i s'allibera energia en tancar-se (desintegrar-se) un àtom pesant, p. ex. urani o plutoni. En la bomba de fusió passa el mateix en combinar-se 4 àtoms d'hidrògen per formar-ne un d'heli.

Producció d'energia al sol i a les estrelles: Es el cas ja mencionat de fusió de l'H en He.

Centrals nuclears: Es el cas ja explicat de fissió de l'urani.

## EL TEMPS

L'experiment d'Ives: El 1938 va accelerar àtoms d'H en un camp elèctric fins a 0,006 c, i va mesurar la freqüència de la vibració dels seus electrons, que va disminuir d'acord amb els valors relativistes corresponents a la dilatació del temps que van sofrir.

Vida dels mesons: Hi ha unes partícules subatòmiques anomenades mesó  $\mu$ , que vénen de l'espai, produïdes pels raigs còsmics en l'alta atmosfera. La seva massa és 207 vegades la de l'electró, però són inestables i la seva vida només és de l'ordre de 2 microsegons. Ara bé, resulta que en la superfície de la Terra se'n reben en tal quantitat, com si la seva vida fos 15 vegades més gran. Això s'explica per l'efecte de la dilatació del temps, ja que la seva velocitat és de 0,998 c, valor que correspon justament a un efecte de dilatació del temps x 15. Al mesó, en canvi, li sembla que és la seva trajectòria que s'ha escurçat 15 vegades, degut a la contracció de la distància.

## LA GRAVITACIÓ D'EINSTEIN - ROTACIÓ DE L'ÒRBITA DE MERCURI

Einstein, a partir de les seves equacions, va determinar que les òrbites dels planetes havien de girar lentament. Per a la Terra resultava un gir de 3,8 segons per segle = 1 volta cada 34 milions d'anys. Per al planeta Mercuri, la rotació de l'eix de la seva òrbita no explicada per altres causes fora de la relativitat general, és de 43 segons per segle, i la seva coincidència amb els valors mesurats experimentalment, es va considerar com a una de les proves de la Teoria General.

## EFFECTE D'UNA MASSA GRAVITACIONAL EN LA RADIACIÓ ELECTROMAGNÈTICA.

La Teoria General estableix que un camp gravitatori atreu un raig de llum, la qual cosa significa que un raig de llum, passant prop d'un astre de massa considerable es torça, i que per tant, el focus emissor es veu en una posició aparent diferent de la posició real. Aquesta diferència es va comprovar durant un eclipsi de Sol el 29 de maig de 1919, durant el qual es va poder mesurar el canvi de posició aparent d'una estrella, de l'ordre d'1,7 segons d'arc.

L'any 1960, uns experiments fets a la Universitat de Harvard, basats en l'anomenat "efecte Mössbauer", van aconseguir detectar la diferència de l'efecte del camp gravitatori terrestre en uns raigs gamma emesos per cobalt 57 i absorbits per ferro 57, segons si anaven en direcció de baix a dalt o de dalt a baix. La diferència entre l'energia dels fotons ascendents i els descendents, complia amb els valors calculats a partir de la Teoria General.

## UNA PETITA BIBLIOGRAFIA

- Einstein. El Correu de la Unesco n° 17, de juny 1979. Barcelona.
- Bertrand Russell. ABC de la relatividad. Editorial Ariel. Barcelona 1984.
- James A. Coleman. Relativity for the layman. Penguin Books. Londres 1987.
- Albert Einstein i Leopold Infeld. L'evolució de la física. Edicions 62. Barcelona 1984.
- Albert Einstein, Adolf Grünbaum, AS. Eddington i altres. La teoria de la relatividad. Alianza Editorial. Madrid 1986.
- Fritz Rohrllich. De la paradoxa a la realitat. Enciclopèdia Catalana. Barcelona 1994.
- Albert Einstein. Sobre la teoría de la relatividad y otras contribuciones científicas. Antonio Bosch, editor. Barcelona 1985.

- La relativitat (cicle de conferències al Museu de la Ciència de Barcelona). Fundació Caixa de Pensions. Barcelona 1985.
- Manuel Lucini. Principios fundamentales de las nuevas mecánicas. Editorial Labor. Barcelona 1966.