

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

**DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE
LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS I SOCIALS**



**DIFICULTATS EN L'ENSENYAMENT-
APRENTATGE DE LA FÍSICA
QUÀNTICA**

TREBALL D'INVESTIGACIÓ

**VICENT SINARCAS I GRANELL
JORDI SOLBES I MATARREDONA**

VALÈNCIA, SETEMBRE de 2009

ÍNDIX

1. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA	4
2. HIPÒTESI I LA SEUA FONAMENTACIÓ.	6
2.1. FONAMENTACIÓ DIDÀCTICA	6
2.1.1. <i>Estat de la qüestió.</i>	6
2.1.2. <i>Física quàntica i aprenentatge</i>	10
2.2. FONAMENTACIÓ HISTÒRICA	13
2.2.1. <i>INTRODUCCIÓ.</i>	13
2.2.2. <i>CRISI DE LA FÍSICA CONTINUISTA: APARICIÓ DELS QUANTS.</i>	14
2.2.2.1. La radiació del cos negre: antecedents. La hipòtesi de Planck.	14
2.2.2.2. L'efecte fotoelèctric.	16
2.2.2.3. Calors específiques.	17
2.2.3. <i>EL MODEL DE BOHR I ANTECEDENTS.</i>	17
2.2.3.1. Espectroscòpia i ratlles espectrals.	17
2.2.3.2. Àtom de Bohr, Sommerfeld i les seues limitacions.	18
2.2.4. <i>PRINCIPI DE CORRESPONDÈNCIA I TEORIA DE LA RADIACIÓ.</i>	19
2.2.4.1. Dificultat de vincular l'antiga teoria dels quants amb la teoria de la radiació. Principi de correspondència de Bohr	19
2.2.4.2. La teoria quàntica de la radiació d'Einstein.	19
2.2.4.3. Els treballs de Copenhague sobre teoria de la radiació.	20
2.2.4.4. Efecte Compton.	21
2.2.5. <i>ANYS DECISIUS.(1923-1927)</i>	21
2.2.5.1. Començaments de la mecànica quàntica en Gotinga.	21
2.2.5.2. Orígens de la mecànica ondulatoria.	22
2.2.5.3. Difracció d'electrons.	23
2.2.5.4. Mecànica quàntica (1924-26).	23
2.2.5.4.1. Sobre la mecànica quàntica.	23
2.2.5.4.2. Les idees directrius de Heisenberg.	24
2.2.5.4.3. Contribució de Dirac.	25
2.2.5.4.4. El treball dels tres homes.	26
2.2.5.5. La mecànica ondulatoria de Schrödinger	26
2.2.5.6. Desenvolupament de la mecànica quàntica.	28
2.2.5.6.1. Identitat de la mecànica quàntica i de la mecànica ondulatoria.	28
2.2.5.6.2. Interpretació probabilística de la funció d'ones.	29
2.2.5.6.3. Les relacions d'incertesa.	30
2.2.5.6.4. El teorema de Ehrenfest.	31
2.2.5.6.5. El principi de complementarietat.	32
2.2.5.6.6. Els principis de la mecànica quàntica.	32
2.2.5.6.7. La teoria de la quantificació en la nova mecànica.	33
2.2.6. <i>DESENVOLUPAMENTS FONAMENTALS I APLICACIONS DE LA MECÀNICA QUÀNTICA</i>	34
2.2.6.1. Les equacions de Pauli i Dirac.	34
2.2.6.2. L'espín. Sistemes de partícules idèntiques. Principi d'exclusió de Pauli.	35
2.2.6.3. Estadístiques quàntiques.	36
2.2.6.4. Radiactivitat i física nuclear	36
2.2.6.5. El camp electromagnètic unificat	37
2.2.6.6. Estat sòlid	38
2.2.7. <i>LA FÍSICA QUÀNTICA I LA SEUA INTERPRETACIÓ</i>	39
2.2.8. <i>IMPLICACIONS DIDÀCTIQUES</i>	40
3. DISSENY EXPERIMENTALS PER CONTRASTAR LA HIPÒTESI.	43
3.1. DISSENY DE LA XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.	43
3.1.1. <i>XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.</i>	43
3.1.2. <i>CRITERIS PER A LA VALORACIÓ DELS ÍTEMS DE LA XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.</i>	47
3.2. DISSENY DEL QÜESTIONARI DE PROFESSORS.	55
3.2.1. <i>QÜESTIONARI DE PROFESSORS.</i>	55
3.2.2. <i>CRITERIS PER A LA VALORACIÓ DELS ÍTEMS DEL QÜESTIONARI DE PROFESSORS.</i>	56
3.3. DISSENY DEL QÜESTIONARI D'ALUMNES	59
3.3.1. <i>QÜESTIONARI D'ALUMNES.</i>	59
3.3.2. <i>CRITERIS PER A LA VALORACIÓ DELS ÍTEMS DEL QÜESTIONARI D'ALUMNES.</i>	60

3.3.3.	<i>CONNEXIÓ DELS ÍTEMS DEL QÜESTIONARI D'ALUMNES AMB ELS OBJECTIUS I LES DIFICULTATS.</i>	65
4.	PRESENTACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS EXPERIMENTALS PER CONTRASTAR LA HIPÒTESI.	68
4.1.	PRESENTACIÓ I ESTUDI DELS RESULTATS OBTESOS AMB LA XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.	68
4.2.	PRESENTACIÓ I ANÀLISI DELS RESULTATS OBTESOS AMB EL QÜESTIONARI DE PROFESSORS.	82
4.3.	PRESENTACIÓ I ANÀLISI DELS RESULTATS OBTESOS AMB EL QÜESTIONARI D'ALUMNES.	90
5.	RECAPITULACIÓ, CONCLUSIONS I PERSPECTIVES	103
	Referències bibliogràfiques	108

1. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA

Al llarg del treball que a continuació es detalla intentarem donar resposta al següent problema, plantejat en termes de dues qüestions bàsiques:

¿Quines dificultats tenen els estudiants de física de 2n de batxillerat en la comprensió dels aspectes més bàsics de la física quàntica?

¿Quines són les principals mancances de l'ensenyament de la física quàntica que entrebanquen la comprensió dels estudiants de física de 2n de batxillerat?

Ambdues preguntes estan íntimament relacionades i ens demanen un anàlisi bastant exhaustiu que, d'una banda, fent referència a la primera qüestió, se centre en les dificultats per part dels estudiants per assolir una sèrie d'objectius fonamentals que servisquen com a indicadors de la comprensió del tema, i de l'altra, en els orígens d'aquestes dificultats, entre els quals estan les mancances de l'ensenyament que reben en totes les seues vessants, però que nosaltres hem volgut enfocar en concret en dues de molt importants: les mancances, o també dificultats, del professorat de física de 2n de batxillerat, i les mancances dels llibres de text corresponents. Entenent mancança no només en el sentit d'absència d'allò que seria més adequat, sinó també en el de presència d'allò que podria substituir-se per quelcom més addient o, fins i tot, d'allò incorrecte que caldria substituir-se pel que és correcte.

D'altra banda, hem d'admetre que si ens preocupa el problema plantejat és perquè li concedim una importància al fet que els estudiants d'aquest curs puguen comprendre els aspectes més bàsics de la física quàntica i de la física moderna en general, encara que en aquest treball ens centrarem només en els de la primera. Per què, doncs, donem aquesta importància a la física moderna? o, dit d'una altra manera, per què ensenyar física moderna?. Se'ns acudeixen una sèrie de raons que ens ratifiquen en aquesta tasca a diversos nivells:

1) A nivell de naturalesa i història de la física: Perquè permet donar una imatge més correcta de com es desenrotlla la ciència; sobretot per posar de relleu els entrebancs, paradigmes i crisis que ha hagut de superar, i que, entre d'altres coses, han propiciat el naixement de la física moderna.

2) a nivell conceptual perquè és la base de coneixement necessària per a una interpretació adequada de l'estructura de la matèria i l'evolució dels fenòmens microscòpics. A més, els fenòmens quàntics són imprescindibles per entendre el món que ens envolta i el seu estudi està cada vegada més present en altres disciplines científiques com biologia, química o medicina; però també per comprendre millor la pròpia física clàssica, en mostrar els seus límits de validesa i les diferències entre ambdós teories.

3) A nivell de les relacions ciència-tecnologia-societat (CTS), donada la creixent importància de les aplicacions de la física moderna en la nostra societat (electrònica, física nuclear, etc.).

4) A nivell actitudinal perquè als alumnes els interessin no només les aplicacions, sinó també aspectes més teòrics i, per tant, contribueix a millorar l'aprenentatge de la física, atès que aquest està limitat si l'estudiant no veu la connexió amb els seus interessos personals.

Així doncs, creiem que, pels motius acabats d'exposar, a més d'altres, està justificada l'existència de la física moderna en el temari de 2n de batxillerat, i això ens porta, en el cas concret de la física quàntica, a donar la importància que, pensem, es mereix el problema que hem plantejat inicialment.

2. HIPÒTESI I LA SEUA FONAMENTACIÓ.

Plantejat i fonamentat el problema, el pas següent en tota investigació científica és plantejar una solució temptativa o hipòtesi, que posarem a prova mitjançant una sèrie de dissenys experimentals, en forma de qüestionaris a professors i estudiants, i de xarxa d'anàlisi de textos per als llibres de text, a partir dels quals s'obtidran uns resultats que, analitzats detingudament, ens permetran extraure conclusions que ens ajudaran a falsar o verificar aquesta hipòtesi.

La nostra hipòtesi de partida és, doncs, la següent:

***Hipòtesi:** “La introducció dels principals conceptes implicats en l'ensenyament convencional de la física quàntica es fa sense tindre en compte els resultats de la recerca didàctica sobre les dificultats de l'alumnat i els nous models d'ensenyament aprenentatge, i això farà que no s'afavorisca en els estudiants de secundària la comprensió de la física quàntica.”*

Existeixen un seguit d'arguments que ens permeten fonamentar la present hipòtesi tant a nivell didàctic com històric. Tot seguit els exposarem.

2.1. FONAMENTACIÓ DIDÀCTICA

2.1.1. Estat de la qüestió.

En la dècada dels 80 no hi havia quasi investigació didàctica en física quàntica. Com a molt es podien trobar treballs sobre com introduir determinats temes en revistes com *American Journal of Physics*, *Physics Education*, *The Physics Teacher*... Açò possiblement fora degut a la recent introducció de la física quàntica en els currículums de secundària a nivell internacional.

En el nostre país la situació encara era pitjor, donat que els currículums vigents en Física i Química de 3r de BUP i Física de COU quasi no introduïen res de física quàntica. En efecte, la presència d'aquesta es reduïa a un tema sobre “Naturaleza de luz. Dualidad onda corpúsculo” en la Física de COU, on com es pot veure en el propi enunciat es barregen temes de física clàssica i quàntica. Es cert que en Física i química de 3r també hi havia un tema semblant a aquest, però la inabastable extensió del temari d'aquest curs (amb 28 temes, 14 de Física i 14 de química) feia impossible que s'impartiren molts temes, en particular, el de física quàntica..

Per això les investigacions pioneres sobre didàctica de la física moderna en el nostre país (Solbes 1986, Gil, Senent y Solbes 1986 y 1989, Gil y Solbes 1993), es limitaren a l'anàlisi de si els alumnes de 3r de BUP i Física de COU coneixien la crisi de la física clàssica, els límits de validesa d'aquesta i les diferències entre la concepció clàssica i moderna (incloent relativitat i quàntica) del comportament de la matèria. També si coneixien el comportament dual dels electrons o raons en contra de les òrbites de Bohr.

En la dècada dels 90 en el nostre país es va introduir amb la LOGSE l'ensenyament de la física quàntica en 2n de Batxillerat (Solbes, 1996). També s'ha començat a introduir per primera vegada el seu ensenyament en països llatinoamericans, amb tots els problemes que això comporta (Fernández et al., 1997).

Des dels anys 90 fins a l'actualitat, encara que han aparegut articles sobre el tema, es pot constatar que la investigació continua sent escassa, que moltes vegades se centra en el nivell universitari i en treballs sobre simulacions informàtiques i experiments "senzills".

Es veu que hi ha un consens general sobre la necessitat d'abordar l'estudi de la física quàntica des del final de l'educació secundària i en els primers cursos de la universitat, interès que deriva, com hem comentat en el capítol anterior, de la importància del tema per a l'alfabetització científica dels individus que van a seguir o no estudis científics i tecnològics. En esta línia, cal destacar a alguns autors, preocupats pel poc interès dels alumnes cap a la ciència i en un intent de transformar els continguts en quelcom atractiu, recomanen modernitzar els cursos introductoris de física en la universitat mitjançant la presentació de les idees quàntiques i relativistes en els primers anys de la instrucció universitària (Holbrow et al, 1995). Taylor i Zafiratos (1991), destaquen la importància d'incloure els principis que regeixen la física contemporània en cursos d'estudiants que no continuaran amb estudis científics posteriors i presenten un text en què intenten desenvolupar els tòpics de la física clàssica amb un nivell accessible.

També hi ha consens en que no s'està aconseguint un aprenentatge addient dels mínims tòpics ensenyats en la majoria dels països (l'efecte fotoelèctric, el model de Bohr i els espectres atòmics, l'equació de De Broglie i les relacions d'incertesa) En canvi, hi ha discrepàncies sobre la conveniència i necessitat d'usar el formalisme quàntic en els cursos introductoris, l'orientació metodològica amb què es fa front al tema, el paper de la física clàssica i especialment del model de Bohr, els aspectes a tractar i les diferències a resaltar entre el paradigma clàssic i el quàntic...

Aprofundirem en les causes que no s'estiga produint aprenentatge addient a continuació:

- En el cas dels fenòmens quàntics, els conceptes i models involucrats, estan encara més allunyats de les percepcions quotidianes que molts altres tòpics de la física clàssica, raó per la qual la seua inclusió en l'ensenyament de nivell mitjà no sempre ha sigut ben vista per mestres i professors, partidaris d'una ensenyança focalitzada en els models clàssics (Oñorbe, 1996; Solbes, 1996). Moltes vegades això pot ésser degut que el professorat no té la suficient claredat conceptual sobre la matèria que imparteix (Kalkanis et al. 2003). D'altra banda, la investigació educativa en ciència ha mostrat que els docents tenim preconcepcions, o idees de sentit comú sobre la naturalesa de la ciència, el treball científic i la seua ensenyança, que han sigut adquirides de manera

incidental, en llargs períodes de formació, són persistents i escapen generalment a la crítica (Maiztegui et al 2001).

- Altres parlen que els conceptes involucrats en l'estudi de la física quàntica són complexos i contraintuïtius i és necessari tindre en compte que un tractament correcte de la mecànica quàntica suposa l'ús d'un formalisme matemàtic molt complex, impossible d'entendre, per als estudiants de batxillerat (Johnston et al. 1998). Esta postura s'accentua quan alguns autors afirmen que la física quàntica només pot ser formulada en termes de conceptes matemàtics (Gunter, 1980) o que la seua potencialitat explicativa només podrà apreciar-se a través d'un bon maneig del formalisme (Fischler et al, 1992).

- Però això és contradictori amb el fet que dels tòpics ensenyats majoritàriament, abans esmentats, es dona un visió ràpida i superficial, exclusivament formulística, sense ressaltar allò que aporten de nou tant al coneixement científic com a les seues implicacions CTS. És a dir, es redueix a l'aprenentatge d'unes poques equacions matemàticament senzilles, que s'apliquen en "problemes tipus" (Solbes, 1996). En el nostre país, això es reforça perquè és la forma en què apareix la física quàntica en les proves d'accés a la universitat.

- Alguns autors atribueixen la dificultat a l'ensenyança d'idees errònies i, en conseqüència, es manifesten contra l'ús del model de Bohr per evitar una descripció de l'àtom que incloga òrbites (Fischler i Lichtfeldt, 1992). Altres (Solbes et al. 1987; Navarro y Solbes, 1989) es manifesten en sentit contrari per les següents raons:

per a familiaritzar als alumnes amb la forma de treball dels científics, que elaboren models per a explicar els problemes fins que sorgeixen dificultats que obliguen a canviar-los. La utilització dels models o teories clàssics o prequàntics (semiclàssics) és quelcom freqüent en la pràctica corrent de la física, i els científics no es priven de fer-ho sempre que es troben en l'àmbit dels fets que explicava l'anterior model, en el domini de validesa de l'anterior teoria, és a dir, com a aproximacions.

L'interés didàctic de la utilització de models, per les mateixes raons que són utilitzats pels físics: com a explicació de forma esquemàtica i senzilla de fenòmens que, altrament, requeririen una descripció complicada. No obstant, apareix un inconvenient: molts textos presenten les aproximacions d'un model com a descripció real i correcta, ignorant que tot model té les seues limitacions i que només és útil si s'és conscient d'elles.

els alumnes, com a resultat de les informacions dels mitjans de comunicació, de l'ensenyança rebuda en l'educació primària, etc posseeixen una representació atòmica mitjançant òrbites, que proposem explicitar per a canviar-la seguidament, mostrant els límits tant teòrics com experimentals del model.

. per a evitar la imatge que són únicament les limitacions de l'electromagnetisme les que justifiquen la introducció d'idees quàntiques, donat que la crítica del concepte de trajectòria (òrbita) contribueix a mostrar també les limitacions de la mecànica clàssica.

- perquè permet introduir de forma senzilla, encara que reduït al cas particular d' un electró lligat a un nucli, el concepte d'estat, caracteritzat pels valors definits d'unes magnituds, l'energia i el moment angular. A més, permet veure que estes magnituds no poden prendre tots els valors possibles, sinó que estan quantitzades per un número quàntic.

- L'existència de dificultats no superades o de visions deformades que persisteixen encara després del procés d'ensenyança aprenentatge ha sigut assenyalada per Solbes et al (1988), Fischler et al (1992); Petri et al (1998); Johnston et al (1998); Greca et al (1998) y otros. Tanmateix, no es troben suficients estudis en la literatura, que caracteritzen el pensament del professor, o que proposen alternatives de superació d'estes dificultats (Solbes et al 2001, Fernández et al. 2005). Al mateix temps, certs textos destinats a l'ensenyança de la FC, assenyalen l'escassa incorporació de tractaments que tinguen en compte estes dificultats (Ohanian 1989).

Aquest tema de les dificultats és important, per la qual cosa ens hi detindrem. En les investigacions inicials sobre el tema al nostre país (Solbes 1986, Gil, Senent y Solbes 1986), donats els pocs coneixements quàntics introduïts al currículum, l'objectiu no era detectar errors conceptuals (com s'anomenaven en aquell moment), sinó, com abans em esmentat, si coneixien la crisi de la física clàssica, etc. Però en les respostes dels qüestionaris vàrem trobar que, molts alumnes de tercer curs de BUP i COU consideraven l'electró com un corpuscle, limitaven la dualitat de tota la matèria a la llum o associaven l'ona al moviment ("el moviment porta associada una ona"). Altres afirmaven que "l' electró no es pot localitzar amb precisió", mentre que en realitat cada magnitud característica dels fenòmens atòmics pot ser mesurada amb tanta precisió com vulguem. La impossibilitat fa referència a la determinació simultània amb precisió absoluta de dues magnituds conjugades. Arribem a la conclusió (Gil y Solbes 1993) que en aquest tema les idees alternatives tenen el seu origen majoritàriament en l' ensenyança, bé perquè s'introdueixen explícitament, bé perquè no se mostra la contradicció entre les noves idees i les clàssiques i, en conseqüència, els estudiants segueixen utilitzant aquestes darreres.

Ens plantejem explícitament (Solbes et al 1988) veure si estes idees persisteixen en alumnes de segon curs de física. Un 10,1% considera que l'electró és un corpuscle i un 3,1% el consideren només com una ona. Un 26,4% respon que la dualitat és una propietat exclusiva dels sistemes microscòpics. Les relacions d'indeterminació impliquen per a un 14,5% que no es pot mesurar sense error i per a un 15,7% que la posició i la quantitat de moviment no són bons observables. Per al 40,9 % dites relacions solament són aplicables al món microscòpic. Quant als orbitals atòmics, un 59,1% els atribueix una existència independent dels propis electrons i un 10,1% arriba inclús a afirmar que els orbitals són les envelopants de les possibles trajectòries de l'electró en l'àtom.

2.1.2. Física quàntica i aprenentatge

Per últim, i molt important, es pot utilitzar l'ensenyament aprenentatge de la física quàntica per entendre aspectes de l'aprenentatge dels estudiants en general (Gil i Carrascosa, 1994, Linder 1993) o sobre l'ús d'analogies (Kalkanis 2003, McKagan, 2008, Neressian 1992). Aquest últim autor, ressalta la importància de recórrer a l'ús d'analogies en el planteig inicial d'una nova teoria. La seua proposta es basa en la investigació a la manera en què raonaven els grans científics de la història, per quins els models de teories ja vigents eren el punt de partida per a l'explicació de nous fenòmens. Kalkanis et al. (2003), assenyalen que podem trobar dos tipus d'analogies entre el professorat en formació que posteriorment seran traslladades als estudiants:

- Les analogies clàssiques, basades en l'aplicació de la física clàssica a l'anàlisi dels fenòmens estudiats que haurien de servir per introduir trets quàntics. Reforcen el pensament determinista dels estudiants en tant que concilien les visions quàntica i clàssica i fan que els objectes quàntics, en donar-los un tractament clàssic, siguin considerats d'una categoria ontològica a la qual realment no pertanyen.
- Analogies pedagògiques, basades en l'ús de símls de la vida quotidiana. Porten a la construcció de models sintètics erronis difícils de superar. Aquest és el tipus que més es detecta en els professors en formació i possiblement tenen el seu origen en el fet que parlar qualitativament sobre la teoria quàntica d'una forma adequada és pràcticament impossible en tant que tots els nostres conceptes han estat desenvolupats a partir de la nostra experiència diària (Pospiech, G. 1999).

Quant a l'aprenentatge en general, Posner et al. (1982) realitzaren un paral·lelisme entre *canvi conceptual* de la física preclàssica a la clàssica i el canvi conceptual en els alumnes. Perquè es produisca aquest, és necessari, segons estos autors, que:

- Existisca insatisfacció amb les idees prèvies, per això el professor ha de presentar un nombre suficient d'anomalies o problemes que l'esquema no puga resoldre.
- Les idees noves siguin intel·ligibles (l'alumne ha de comprendre què signifiquen), plausibles (reconciliables amb els fenòmens coneguts) i fructíferes (capaces d'explicar les anomalies trobades i ampliar el camp de coneixements, obrint nous camps d'investigació).

Un dels models per a l'ensenyança de les ciències basats en el canvi conceptual més conegut és el de Driver (1986, 1988). S'estructura en torn a una seqüència d'activitats específicament elaborades per aconseguir aquest canvi, en quatre fases:

- *Orientació*: Destinada a despertar l'atenció i l'interés dels alumnes pel tema.
- *Explicitació*: Consisteix en l'exposició pels alumnes de les seues idees, que permet la identificació i clarificació de les mateixes.
- *Reestructuració*: On han de modificar-se les idees dels alumnes per mitjà de diferents estratègies que poden incloure l'ús combinat de contraexemples o activitats destinades a provocar insatisfacció amb les pròpies idees, models, analogies, disseny d'experiències per a ajudar a clarificar i diferenciar idees, etc. Dintre d'esta fase s'inclou també la

inclusió de diverses oportunitats perquè els alumnes proven i apliquen les seues concepcions revisades i fer així que adquirisquen confiança en les mateixes

- *Revisió del canvi d'idees*: Es tracta de comparar les noves idees amb les inicials.

Les estratègies de canvi conceptual proposades per Driver foren posteriorment usades per altres investigadors per introduir en elles algunes modificacions i per fer les seues pròpies propostes al respecte. La proposta de considerar l'aprenentatge com un *canvi conceptual* exercí una particular influència en el replantejament de l'ensenyança de les ciències, fonamentada en l'analogia existent entre l'aprenentatge individual i el canvi conceptual en les disciplines científiques que, como assenyalava Hewson (1981) fou molt fructífera i propicià un marc adequat per l'anàlisi de l'aprenentatge de les ciències. Seguint amb esta analogia, convé tindre en compte que en el desenvolupament de les ciències es distingeix entre els petits canvis en l'interior d'un mateix marc teòric (per exemple, del calòric a la teoria cinètica de la calor, del model corpuscular de la llum a l'ondulatori, de l'acció a distància a la teoria de camps, o del model atòmic de Bohr al de Schrödinger, etc.) i les grans crisis teòriques (per exemple, el pas de la ciència aristotèlic-escolàstica a la clàssica i d'aquesta a la moderna) (Gil y Solbes, 1993).

D'altra banda, en la revolució científica es produeix no solament un canvi de conceptes, sinó també de metodologia i de valors. A nivell metodològic tenim una nova forma d'abordar els problemes, que substitueix un pensament basat en "les evidències del sentit comú" i en les autoritats (Plató i Aristòtil, els doctors de l'Església i, en última instància, la Bíblia), per un pensament a la vegada més creatiu i rigorós, que planteja hipòtesis, realitza experiments i/o observacions per contrastar-les i usa les matemàtiques. Això suposa un canvi en el criteri de veritat, en la finalitat de la ciència o en el criteri de demarcació entre el que és ciència i el que no ho és, és a dir, un canvi axiològic.

I, a més, aquest plantejament d'ajustar l'ensenyança a les característiques de la metodologia científica, porta a alguns autors (Gil y Carrascosa, 1985; Gil et al., 1991; González, 1992) a enfocar l'aprenentatge, no només com a canvi conceptual, sinó també com a canvi metodològic. Els alumnes únicament arribaran a canviar les seues formes usuales de raonament i a superar les seues tendències metodològiques usuales de traure conclusions precipitades i a generalitzar acríticament a partir d'observacions merament qualitatives si són posats reiteradament en situació d'aplicar la metodologia científica, és a dir, en situació de plantejar-se problemes, emetre hipòtesis a la llum dels coneixements previs, dissenyar experiments, realitzar-los, analitzar els resultats, que verifiquen o falsen la hipòtesi, etc. I açò és necessari, no únicament perquè la familiarització dels alumnes amb el treball científic siga un objectiu en sí, sinó perquè els canvis conceptuals durables es veuen afavorits per canvis metodològics en l'alumne. Però esta associació de canvi conceptual i metodològic, que funciona tan bé en la revolució científica de la física aristotèlic-escolàstica a la física clàssica no és tan adequada en el sorgiment de la física moderna, on canvia el paradigma teòric i amb ell els conceptes acceptats, que passen a ser aproximacions amb un determinat camp de

validesa. Però no són tan evidents els canvis metodològics i axiològics associats a la física moderna. Historiadors de la física com Kragg (2007) adverteixen:

“En algunos otros temas, la física y los físicos no han cambiado mucho a lo largo del siglo. De esta manera, las reglas fundamentales de este juego –la metodología de investigación- son prácticamente tan iguales en la década de 1990 como en la de 1890. Como evaluar una aseveración, qué cuenta como un buen experimento, procedimientos de prueba, la función de la matemática en el razonamiento físico y el uso de experimentos bien razonados; estos y otros temas metodológicos básicamente se han mantenido igual, aunque desde los años 70 los experimentos computerizados se han visto añadidos a los métodos de la física moderna.”

Linder (1993) sembla concordar amb açò quan assenyala que la situació de crisi de la física clàssica i el sorgiment de la física moderna no és la mateixa que la de la substitució de la física aristotèl·lico-escolàstica per la física clàssica. Segons aquest autor, en el primer cas se produeix una evolució o reestructuració que no impedeix que continuem utilitzant els coneixements i principis de la física clàssica per a, per exemple, enviar un satèl·lit a Mart. En el segon, es produeix una substitució i el concepte aristotèl·lic de força no s'admet com a vàlid en cap dels contextos científics posteriors.

Però això, que pot ser cert a nivell històric, és discutible a nivell didàctic, perquè oblida els canvis procedimentals i axiològics i, a més, és molt difícil que es produisca una substitució (Solbes 2009 a y b).

Si volem aprofundir en els canvis que es produeixen en l'aprenentatge de la física quàntica és necessari tindre en compte les aportacions de la psicologia cognitiva. Segons Chi et al (1994), les persones classifiquem els objectes en un nombre determinat de categories a les quals atribuïm unes propietats determinades. Estes categories són matèria (que té pes, volum, és emmagatzemable), processos i estats mentals. A títol d'exemple, assenyalar que la matèria es divideix en natural (que alhora es divideix en vius i no vius) i artificial (o artefactes).

Estes representacions dels subjectes, han de ser analitzades des de la perspectiva de sistemes de coneixement com a estructures o subestructures complexes i no com a entitats aïllades (Vosniadou, 1994). Distingeix per això tres nivells d'organització del coneixement: les teories marc o estructurals, amb principis ontològics (allò que pot o no existir) i epistemològics (allò que ha de ser o no explicat), les teories específiques, per a un rang limitat de fenòmens i els models mentals, que es generen in situ en resposta a demandes contextuais (amb el que es pot explicar el fet conegut pels investigadors en didàctica de les ciències que molts errors conceptuals no responen a idees alternatives, sinó que es tracta de respostes ad hoc).

Chi et al. (1994), que pretenen unificar les discrepàncies en la bibliografia sobre canvi conceptual, assenyalen que es produeix un canvi ontològic (o canvi conceptual radical) quan es canvia entre diferents categories (per exemple, els estudiants tenen conceptes com energia, força, intensitat, etc., classificats com matèria i passen a classificar-los

com processos, igual que la ciència els qualifica). Es parla de canvi conceptual normal quan aquest es produeix dintre d'una mateixa categoria.

Per tant, sembla que la principal dificultat que tenen els alumnes en l'aprenentatge de la física quàntica és ontològica: No són capaços de comprendre que els electrons, fotons, etc., no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous amb un comportament nou, el quàntic. Per altra banda, també sembla que hi ha una dificultat epistemològica, relacionada amb el que es pot o no conèixer i, per tant, amb les relacions d'indeterminació de Heisenberg i amb la interpretació probabilista.

Novament hi ha coincidències amb Kragh (2007):

“A escala ontològica, los cambios han sido sin duda muy profundos, en la mayor parte como resultado de la revolución cuántica... La mecánica cuántica nos ha proporcionado estructuras fundamentales que no tienen similitud ninguna con todo lo que puede ser percibido o medido directamente. Nuestras creencias actuales sobre lo que en última medida constituye el mundo distan mucho de las de la década de 1890, cuando todavía tenía sentido pensar en la materia como una colección de bloques en miniatura.”

2.2. FONAMENTACIÓ HISTÒRICA

2.2.1. INTRODUCCIÓ.

Les històries més recents de la ciència (Sánchez Ron, 1992; Kragh, 2007) acostumen a presentar alhora la història “interna” (els científics i els seus descobriments) com la “externa” (les relacions amb la tecnologia i la societat). Ací ens hem limitat bàsicament a la primera per dues raons: la primera és que a partir dels obstacles que es manifesten al llarg de la història de la ciència es pot extraure informació sobre les dificultats dels estudiants, si bé la idea d'un paral·lelisme estricte entre elles ha estat qüestionada (Saltiel y Viennot, 1985; Driver et al. 1989); la segona, per la gran extensió que tindria aquest apartat si es tractaren les dues, ja que cobreix un període de temps prou llarg amb molts esdeveniments. Però s'utilitzarà aquesta història externa en la proposta dels estudiants, ja que la recerca didàctica ha posat de manifest el seu caràcter motivador (Matthews, 1991; Solbes y Traver, 1996 y 2003).

Hem dividit aquest apartat en sis parts:

- La primera tracta dels orígens, bàsicament els treballs de Planck i Einstein, on es pot veure que si bé Planck introduí la hipòtesi d'emissió discreta i la seua constant, fou incapaç d'acceptar l'estructura discontinua de la radiació introduïda per Einstein.
- La segona sobre l'escola de Bohr, l'explicació dels espectres i malgrat que no s'ensenye, les regles de quantificació per a sistemes amb molts graus de llibertat, que porten al model de Sommerfeld.
- La tercera sobre la teoria de la radiació i el principi de correspondència, que no apareix en absolut en el currículum, però sense ell el procés de constitució de la quàntica és incomplet i incompreensible.

-La quarta tracta dels orígens i desenvolupament de la mecànica quàntica. En ell, hem optat per un desenvolupament cronològic en comptes de la presentació típica: mecànica ondulatoria per una banda i mecànica de matrius per altra, tanmateix ambdues no es confonen perquè apareixen vinculades a llocs i dates diferents.

-La cinquena tracta sobre els desenvolupaments fonamentals que completaren la mecànica quàntica (l'espín de l'electró i el postulat de simetrització) i sobre les primeres aplicacions de la mecànica quàntica a les diferents branques de la física, així com els problemes d'interpretació.

Quant a la bibliografia utilitzada trobem, per una part, recopilacions d'articles originals (Van der Waerden, 1968; Butler et al, 1972), de ressenyes d'articles (Dugas, 1950), llibres d'història de la ciència (Forman, 1984; Kragh, 2007; Mason, 1985; Mehra, 1976; Moreno, 1987; Sánchez Ron, 1992; Taton, 1973), llibres on els autors clàssics expressen les seues idees sense aparell matemàtic (Born, 1971; De Broglie, 1965; Heisenberg, 1979; Schrödinger, 1975), llibres de text, clàssics com el de Dirac (1967) i més moderns, amb moltes referències històriques (Galindo y Pascual, 1978; Tipler, 1985); llibres sobre la interpretació filosòfica de la mecànica quàntica i altres interpretacions diferents de la de Copenhaguen (Lapedra, 2004; Rae, 1989; Selleri, 1986); llibres d'implicacions de la quàntica en la tecnologia (Eckert y Schubert, 1991; Han, 1992) i, fins i tot, llibres de divulgació (Gribbin, 1988; Navarro, 2009).

2.2.2. CRISI DE LA FÍSICA CONTINUÏSTA: APARICIÓ DELS QUANTS.

2.2.2.1. La radiació del cos negre: antecedents. La hipòtesi de Planck.

La teoria de la radiació del cos negre fou desenvolupada amb l'ajuda dels mètodes de la termodinàmica clàssica per:

- i) Kirchoff (Ann Phys (Poggendorf 109 (1860) 207) que va demostrar que l'estat d'equilibri en el qual els canvis d'energia entre els cossos i la radiació continguts en un recipient mantingut a temperatura uniforme és únic, i correspon a una distribució d'energies entre les diferents freqüències perfectament determinada.
- ii) Stefan i Boltzman trobaren que la densitat total de la radiació del cos negre és proporcional a la quarta potència de la temperatura.
- iii) Wien trobà que l'espectre es trasllada cap a més altes freqüències en augmentar la temperatura.

$$\lambda_{\text{màx.}} \cdot T = ct$$

el que es coneix amb el nom de Llei de Desplaçament.

En 1896 trobà una llei de distribució de l'energia

$$U(\nu, T) = \nu^3 c e^{-\beta\nu/T}$$

que s'ajustà als resultats experimentals. Posteriorment Lummer i Pringsheim trobaren el 1899 que la llei de Wien era només vàlida a altes freqüències.

- iv) Rayleigh i Jeans veieren que amb arguments termodinàmics no es podia arribar més lluny i per això basant-se en les lleis de l'electromagnetisme de Maxwell trobaren una llei de distribució que sí concordava a baixes freqüències amb els resultats de Lummer i Pringsheim, però que a altes freqüències predeia una densitat d'energia infinita (catàstrofe ultraviolada). L'expressió a què arribaren fou

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

A principi de segle es tenien dues fórmules que, com ja hem vist, ajustaven bé l'una a altes freqüències i l'altra a freqüències pròximes a zero. Calia trobar una nova expressió que, mitjançant la interpolació d'estes dues, ens donara bon resultat per a tot l'espectre. Aquesta fou la labor de Planck que, mitjançant una hipòtesi *ad hoc* (imaginà que la matèria estava formada per oscil·ladors electrònics que no podien emetre energia més que per quantitats finites proporcionals a la freqüència, essent el factor de proporcionalitat la constant h --constant de Planck--), trobà la nova llei de repartició espectral que ajustà amb l'experiència i reproduïa a altes freqüències la de Wien i a baixes la de Rayleigh i Jeans.

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi h^3}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

El valor numèric d' h fou obtingut des del principi, només amb dades relatives a la radiació, amb gran exactitud, com confirmarien posteriorment les experiències de Millikan.

Així com per als oscil·ladors la freqüència és independent de l'amplitud i per a cadascun es pot definir un quant d'energia $h\nu$, per a un sistema mecànic qualsevol susceptible de vibrar periòdicament, la freqüència depén, en general, de la intensitat del moviment, això implica que el sistema no té un quant d'energia ben definit.

Però si es té un moviment periòdic amb una sola variable sempre podem calcular la integral d'acció de Maupertius i exigir que siga múltiple d' h . Obtenim així la condició de quantificació per a una sola variable.

2.2.2.2. L'efecte fotoelèctric.

Experimentalment, gràcies als treballs de Hertz (1887), Halwachs (1888), Stoletow (1888), i Lenard (1889), s'havia comprovat que la matèria sotmesa a radiació de longitud d'ona curta emet electrons.

L'energia cinètica d'eixos electrons és proporcional a la freqüència i independent de la intensitat. Per contra, el nombre d'electrons és proporcional a la intensitat. D'altra banda, per a cada metall existeix una freqüència llindar ν_0 per a la radiació, de forma que per a freqüències menors que ella no s'emeten electrons.

La teoria clàssica era incapaç d'explicar aquest efecte, ja que segons ella l'energia es repartia uniformement en l'ona i per tant l'electró rebia energia d'una forma contínua i proporcional a la intensitat de l'ona.

Einstein (Ann Phys, 17 (1905) 132, 20 (1906) 199 i 22 (1907) 180), en el seu primer article suposa que l'energia és absorbida (i no sols emesa com suposava Planck) discontinuament. Als altres dos articles simplement intenta explicar el rendiment quàntic de l'efecte (la relació entre el nombre de fotons incidents i el nombre d'electrons emesos).

Anem a centrar-nos en el primer: en ell compara l'expressió del canvi d'entropia d'una radiació electromagnètica distribuïda segons la llei de Wien amb l'expressió anàloga per a un sistema de partícules. Concloué que la radiació monocromàtica de freqüència ν es comporta com si constara d'un nombre finit de quants d'energia $E = h \nu$. En la nomenclatura actual deguda a G.N.Lewis (Nature 118 (1926) 874) estos quants reben el nom de fotons. Amb aquest resultat la interpretació de l'efecte fotoelèctric és immediata: la llum de freqüència ν està formada per fotons d'energia $E = h \nu$ que, en incidir sobre el metall, poden ser absorbits pels electrons.

L'energia del fotó s'usa, en part per alliberar l'electró del seu lligam, i en part per subministrar-li una energia cinètica, per tant es verificarà

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W$$

D'esta expressió es dedueix evidentment l'existència de la freqüència llindar.

Millikan (Phys.Rev. 7 (1916) 356) fou el primer a confirmar el valor d'h mitjançant experiments sobre l'efecte fotoelèctric.

Planck fou incapaç d'acceptar l'estructura discontinua de la llum. Retrocedí davant aquesta conseqüència postulant que l'absorció hauria de ser contínua. Això fou desmentit per l'efecte fotoelèctric, ja que l'emissió d'electrons apareix i desapareix amb la radiació sense interval de temps mesurable.

2.2.2.3. Calors específiques.

Una de les primeres aplicacions de la hipòtesi dels quants fou el càlcul exacte de la calor específica. Clàssicament la calor específica hauria de ser 6 cal/mol (Llei de Dulong i Petit). Açò fallava en el diamant a totes les temperatures i, en la majoria dels sòlids, a temperatures menors que l'ambient.

Per explicar açò Einstein (1905) suposà que l'agitació tèrmica pot subministrar a la majoria dels sòlids, excepte el diamant (enllaços molt forts), el seu quant d'energia de vibració, ja que aquest és molt menut. En canvi, a petites temperatures açò no és possible, i per això la calor específica disminueix.

Aquesta teoria fou desenvolupada posteriorment per Debye, Born i Von Karman.

2.2.3. EL MODEL DE BÖHR I ANTECEDENTS.

2.2.3.1. Espectroscòpia i ratlles espectrals.

El paper fonamental de l'espectroscòpia respecte a l'estructura de l'àtom es deu al fet que aquesta no pot ser-nos revelada més que pels fenòmens observables a la nostra escala que són conseqüència d'ella. Per exemple, les ratlles espectrals.

Els començaments de l'espectroscòpia atòmica es situen en 1859 amb Bunsen i Kirchhoff, que estudien els primers espectres d'emissió: començaren a classificar-se les ratlles obtingudes en sèries l'estructura de les quals presentava grans analogies en els distints elements, trobant-se que les freqüències presentaven entre sí relacions regulars. La més famosa d'estes relacions empíriques és la llei de Balmer (1885) per a les línies visibles de l'hidrogen,

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

L'estudi de les ratlles espectrals portà en 1908 al principi de conservació de Ritz: "per a cada espècie d'àtoms és possible trobar una successió de nombres anomenats termes espectrals tals que la freqüència de cada ratlla siga igual a la diferència de dos d'aquests termes,

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

on R és la constant de Rydberg.

En aquest mateix any, Paschen trobà tres ratlles de la sèrie que porta el seu nom.

També s'estudiaren les variacions de freqüència de les línies espectrals sota l'acció de camps exteriors. Zeeman (1896) descobrí desdoblaments en camps magnètics que foren interpretats per Lorentz. Però l'efecte Zeeman anòmal i l'efecte Paschem-Back (1912) així com l'efecte Stark (1913) (desdoblaments produïts per camps elèctrics) no pogueren ser correctament explicats. Per a això era necessari la introducció de l'espín.

2.2.3.2. Àtom de Böhrr, Sommerfeld i les seues limitacions.

Bohr, deixeble de Rutherford a Manchester, va tractar de buscar una teoria que compatibilitzara el model planetari amb l'estabilitat de l'àtom i l'existència de ratlles espectrals. En 1913 publica la seua teoria: "Sobre la constitució d'àtoms i molècules" (Phyl. Mag. 26 (1913) 1, 476 i 857).

Böhrr va advertir la perfecta concordança entre la seua llei de freqüències amb la sèrie empíricament obtinguda per Balmer en 1885 a $n_2=2$.

La sèrie corresponent a $n_2=1$, les ratlles de la qual pertanyen a l'ultravioleta, va ser observada per Lyman en 1914.

La sèrie corresponent a $n_2=3$ va ser observada per Brackett, així com la sèrie corresponent a $n_2=4$. les altres sèries (Pfund) se situen en l'infraroig llunyà.

A més, Böhrr va estendre la seua teoria als àtoms hidrogenoides (heli ionitzat) trobant-se que en la llei de freqüències apareixia la constant de Rydberg multiplicada per quatre. Algunes ratlles de la sèrie $n_2=2$ han sigut observades per Lyman.

Franck i Hertz (Verh. Deut. Phys. Ges. 16 (1914) 457 i 512), en una sèrie d'experiments van donar una confirmació directa de la existència de nivells d'energia estacionaris d'acord amb la hipòtesi de Bohr.

L'any següent (1916) Epstein, Schwarzschild i Sommerfeld van estudiar les condicions de quantificació per a sistemes quasiperiòdics de variables separables (diverses variables varien periòdicament amb períodes diferents, els que permet descompondre la integral d'acció en diverses integrals dependents d'una variable).

Com a aplicació de les regles de quantificació es va estudiar l'àtom hidrogenoide. Es va trobar que a més de quantificar-se l'energia (obtenint la fórmula de Bohr), es quantifica el mòdul del moment angular i la seua tercera component.

El mateix Bohr era conscient que el seu model era una aliança estranya entre teories clàssiques i mètodes quàntics introduïts "ad hoc" per a restringir el nombre d'òrbites clàssiques possibles.

D'altra banda, només era capaç de calcular la freqüència de les ratlles emeses però no la seua intensitat ni el seu estat de polarització.

A més, Kramers, en calcular el potencial de ionització de l'àtom d'He va obtindre resultats en desacord amb l'experiència.

També cal consignar el fracàs de Sommerfeld en els àtoms complexos.

2.2.4. PRINCIPI DE CORRESPONDÈNCIA I TEORIA DE LA RADIACIÓ.

2.2.4.1. Dificultat de vincular l'antiga teoria dels quants amb la teoria de la radiació. Principi de correspondència de Böhrr

Böhrr, des de 1914, en una memòria titulada “*L'efecte dels camps elèctrics i magnètics en les línies espectrals*” (PHIL.MAG.27 (1914) 506), s'esforça per establir una certa connexió entre la seua dinàmica i la teoria electromagnètica clàssica degut a:

- i) Amb la seua teoria, deroga l'electromagnetisme clàssic, on a tota càrrega accelerada li correspon una radiació.
- ii) Amb la seua teoria només és capaç de calcular la freqüència de les ratlles espectrals emeses, quan la teoria electromagnètica clàssica, donada l'estructura i el moviment d'un conjunt de càrregues elèctriques, permet calcular les intensitats i polaritzacions de les radiacions emeses.

El formula explícitament en un article de 1918 titulat: “*la teoria de les línies espectrals*”. En ell diu:

“Com la teoria electromagnètica es verifica sempre molt aproximadament en el domini dels fenòmens macroscòpics, que, des del punt de vista quàntic, són aquells en què intervé un nombre de quants elevat, això implica que “les previsions de la teoria quàntica han de tendir asimptòticament cap a les de la teoria clàssica en el domini dels grans nombres quàntics”.

2.2.4.2. La teoria quàntica de la radiació d'Einstein.

Article d'Einstein, publicat en (Mitt. Phys. Ges. (Zurich) 18 (1916) 47), que, junt al principi de correspondència, fou la base de tots els treballs posteriors sobre radiació.

Einstein s'adona que en la teoria de Bohr la interacció entre la matèria i la radiació queda un tant ambigua, es formula les següents preguntes crucials:

per què no emet l'àtom en el seu estat fonamental?, què succeeix quan passa d'un estat a un altre? i, quines lleis determinen les probabilitats de les transicions?.

Per respondre-les, Einstein, en primer lloc, accepta l'existència d'estats discrets d'energia. Després, basant-se en l'estadística clàssica de Boltzmann, calcula la probabilitat que les molècules estiguen en un estat d'energia E_n .

$$W_n = p_n \cdot e^{-\frac{E_n}{kT}}$$

Quan incideix una radiació sobre la molècula, aquesta pot absorbir-la i passar a l'estat E. Quina és la probabilitat que tal succés ocòrriga en un dt?. Einstein formula la següent hipòtesi

$$dW = B_n^m \rho dt$$

on B_n^m és la constant que caracteritza la transició de “n” a “m” i ρ és la densitat de radiació.

D'altra banda, en presència de la radiació, una molècula en E_m pot emetre i passar a E_n tal que $E_m > E_n$. La probabilitat d'esta transició serà

$$dW = (A_m^n + B_m^n \rho) dt$$

on B_m^n és una constant que caracteritza l'emissió induïda i A_m^n , l'emissió espontània.

Si la radiació està en equilibri amb la distribució de molècules en la temperatura T, les probabilitats han de ser iguals, i obtenim la llei de distribució de Planck.

25 anys després de la teoria d'Einstein, N. Bassov, A. Prokhorov i CH. Townes van realitzar investigacions sobre l'amplificació de microones, que va portar en 1945 a la construcció del primer màser operatiu. Van rebre per això el premi Nobel de 1964. En 1957 Gordon Gould i CH. Townes van plantejar una amplificació anàloga de la llum, la qual cosa va conduir en 1960 al primer làser de robí satisfactori.

2.2.4.3. Els treballs de Copenhague sobre teoria de la radiació.

Slater en una carta al director de la revista *Nature* titulada “Radiació i àtom” (Nat.113 (1924) 307), intentà conciliar la teoria dels quants de llum amb l'electrodinàmica, creant un camp que guie els quants discrets, que han de moure's, per exemple, en la direcció del vector de Poynting d'aquest camp.

Realitza això mitjançant el concepte de “camp virtual de radiació” emés pels “oscil·ladors virtuals de Lademburg”.

En això consistí la primera part de l'article de Bohr, Slater i Kramers titulat: “Teoria quàntica de la radiació” (Phyl. Mag. 47 (1924) 785). Una altra (de què s'exculpà Slater repetidament) fou:

“La conservació estadística de l'energia (suposem que l'energia no es conserva en cada procés individual, però sí en un conjunt de processos)”.

Utilitzaren esta idea per intentar explicar l'efecte Compton i, posteriorment també s'intentà explicar amb ella la desintegració β . En ambdós casos aquesta hipòtesi no fou acceptada.

2.2.4.4. Efecte Compton.

Obtingué que en incidir un feix de raigs X amb una freqüència definida sobre un blanc de grafit, una part d'ella era difosa en totes direccions. Segons la teoria clàssica, la radiació difosa ha de tindre la mateixa freqüència que la incident.

No obstant, en mesurar la intensitat dels raigs X en diferents direccions, en funció de la longitud d'ona, es veu que els dispersats tenen dues longituds d'ona, una d'elles idèntica a la incident i una altra major en un $\Delta\lambda$ (desplaçament Compton). A més, comprovà que eixa longitud d'ona era independent de la substància utilitzada.

Publicà els seus resultats en (Phil. Mag. 41 (1921) 749) i (Phys.Rev. 18 (1921) 96).

Intentà una explicació ondulatoria d'aquest fenomen, perquè s'oposava a la hipòtesi heurística d'Einstein, però fracassà.

Compton (Phys. Rev. 21 (1923) 483 i 715) i Blothe i Geiger (1924), aplicant una interpretació corpuscular a l'efecte Compton, demostraren que l'energia i el moment lineal s'havien de conservar en cada procés individual de col·lisió del fotó amb l'electró, enterrant així la teoria de Bohr i Kramers sobre la conservació estadística. Això suposà el triomf definitiu dels principis de conservació de E i "p" i del concepte de fotó. S'obtingué

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

2.2.5. ANYS DECISIUS.(1923-1927)

2.2.5.1. Començaments de la mecànica quàntica en Gotinga.

Fins a 1920, l'ensenyament i desenvolupament de la teoria de Bohr estigué restringida a dues universitats: (Copenhague (Bohr) i Munich (Sommerfeld). En 1920 es contracta a Born i a Franck en Gotinga, que la introdueixen allà.

La data decisiva és l'estiu de 1922 quan s'organitza l'anomenat "festival Born" en Gotinga (l'audiència fou molt nombrosa: Born, Franck, Sommerfeld, i dos deixebles d'aquest: Heisenberg i Pauli).

En les discussions del festival es plantejaren dos problemes fonamentals:

- i) ¿És possible determinar en general i correctament les energies dels estats discrets en aplicar les condicions de Bohr-Sommerfeld als moviments dels electrons en els àtoms?.
- ii) Fins a quin punt s'adapta el model de Bohr a explicar les propietats químiques i òptiques del sistema periòdic?

En el semestre d'hivern (1922-23) Sommerfeld va a Amèrica. Born organitza un seminari en Gotinga al qual assisteixen Heisenberg i Pauli.

El seminari tractà sobre mecànica clàssica: teoria de perturbacions i problema dels tres cossos, ja que la mecànica clàssica presentava trets que reapareixien en la mecànica quàntica.

2.2.5.2. Orígens de la mecànica ondulatoria.

Naix en 1923, amb els treballs de Louis de Broglie en (Comtes Rendues 177 (1923) 507,548 i 630). La primera exposició sistemàtica d'esta mecànica és la seua tesi doctoral "*Investigacions sobre la teoria dels quants*" (1924).

Segons les seues pròpies declaracions, per establir la mecànica ondulatoria es basà en:

i) Arguments heurístics: per a la descripció completa de la radiació havien d'ésser usades alternativament les imatges ondulatoria i corpuscular. Per què no trobar una dualitat anàloga en totes les parts on es manifeste la presència d' h , per exemple, en els electrons?

D'altra banda, en les condicions de quantificació apareixen nombres enters, els que es troben en totes les branques en què es consideren ones.

ii) Arguments basats en les analogies entre la mecànica analítica i la teoria ondulatoria: la teoria de Jacobi permet agrupar les trajectòries possibles d'un punt material de manera que a les trajectòries d'una mateixa família s'associa una família de superfícies normals que es determina a partir de l'equació de Jacobi. Això mostra un paral·lelisme entre els rajos i les superfícies d'ona de les teories ondulatories i les trajectòries i les seues superfícies d'ona de la teoria de Jacobi.

D'això es dedueix que el principi de mínima acció de la mecànica analítica

$$p(\vec{r}, E) = \sqrt{2M(E - V(\vec{r}))} \quad \delta \int_a^b p(\vec{r}, E) ds = 0$$

resulta ser la traducció del principi del temps mínim de Fermat

$$\delta \int_a^b \frac{ds}{\lambda(\vec{r}, \nu)} = 0$$

$$\text{d'on } |\vec{p}| = \frac{A}{n}$$

El programa era associar a tot corpuscle la propagació de certa ona de manera que les regles generals donaren quan se li aplicaren al fotó les relacions que Einstein havia obtingut en la seua teoria de la relativitat especial. Per tant, com que per al fotó

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

d'on es dedueix que $A = h$ tant per a fotons com per a partícules materials.

La conseqüència que se'n deriva és que es fa correspondre a la partícula la propagació d'un grup d'ones la freqüència central de les quals siga igual a l'energia de la partícula dividida per h . Per tant la velocitat de grup del tren d'ones serà igual a la de la partícula i com, per altra banda, també és igual a la velocitat de transport de l'energia, això implica que la partícula romandrà lligada al grup d'ones en el seu moviment.

2.2.5.3. Difracció d'electrons.

Pocs anys després Davisson i Germer (Phys.Rev. 30 (1927) 705) confirmaren la predicció de Louis de Broglie bombardejant amb electrons de 54 eV un cristall de níquel. Obtingueren una figura de difracció de Von Laue (taques) corresponent a una longitud d'ona de 1,65 Å (teòricament s'obtenia 1,67 Å, així doncs, la precisió era molt notable).

Posteriorment Thompson i Reid (Proc. Roy. Society 117 (1928) 600) estudiaren la difracció fent passar un feix monocinètic d'electrons sobre pols de cristall; el resultat es tradueix en l'aparició d'anells de difracció de Debye-Scherrer, el diàmetre dels quals és funció de la distància reticular dels cristalls i de la longitud d'ona del feix incident.

Posteriorment es van fer unes altres experiències: Rupp (que demostra l'aparició d'un factor $1/\beta$ en la longitud d'ona d'electrons ràpids), Kikuchi i Bonte.

Açò va donar origen en la dècada de 1930 als primers microscopis electrònics en què les lents de vidre van ser substituïdes per lents magnètiques. També s'utilitzen electrons, neutrons, etc., per a determinar l'estructura dels vidres o inclús de virus i de molècules importants biològicament, amb els que és possible formar un vidre. En l'actualitat, basats en la física quàntica s'han desenrotllat els microscopis d'agranat d'efecte túnel, que permeten veure (i inclús manipular) els àtoms d'una superfície.

2.2.5.4. Mecànica quàntica (1924-26).

2.2.5.4.1. Sobre la mecànica quàntica.

Aquest és el títol d'un article de Born de 1924. La idea és tractar la interacció entre sistemes mecànics usant els mateixos mètodes que va utilitzar Kramers per a estudiar la interacció entre el camp de radiació i l'àtom.

Assumeix que un àtom en un estat estacionari "n" es pot reemplaçar per un conjunt d'oscil·ladors virtuals de freqüència

$$v_{nm} = \frac{1}{h}(E_n - E_m)$$

A cada ressonador virtual li correspon, en el sentit del principi de correspondència, un terme de la sèrie de Fourier del moviment en l'estat "n" calculat clàssicament.

Resulta que la freqüència d'aquest terme és a la freqüència quàntica teòrica com un quocient diferencial és a un quocient de diferències, per tant, per a obtenir fórmules quàntiques a partir de fórmules clàssiques s'han de reemplaçar tots els quocients diferencials per quocients de diferències (aplicant aquest mètode a la fórmula clàssica reproduí la de Kramers).

La importància d'esta idea es veurà més endavant quan veiem la utilització que Heisenberg va fer d'ella.

2.2.5.4.2. *Les idees directrius de Heisenberg.*

Al semestre d'hivern de 1924-25, Heisenberg va a Copenhague i treballa amb Kramers en la dispersió. Estengueren la fórmula d'aquest últim a la dispersió incoherent de llum per àtoms, és a dir, als casos en què la freqüència de la llum dispersada ve donada per

$$\nu' = \nu + \nu_{nm}$$

on ν_{nm} és una de les freqüències característiques de l'àtom.

A l'abril de 1925 Heisenberg torna a Gotinga, on tracta de conjeturar les intensitats de les línies de l'hidrogen, però fracassa. Arribà a la conclusió que les dificultats que apareixen a l'hora d'interpretar les esmentades línies mitjançant les regles de quantització no eren degudes al fet de partir de la mecànica clàssica, sinó més bé a la ruptura de la cinemàtica que subjau a aqueixa mecànica. Per això Heisenberg assumí que l'equació del moviment de l'electró:

$$\ddot{x} + f(x) = 0$$

pot continuar essent vàlida, però que la interpretació cinemàtica de la quantitat "x" com una posició dependent del temps hauria d'ésser rebutjada.

En un moviment periòdic clàssic $x(t)$ pot estendre's en sèrie de Fourier. Quànticament els coeficients de la sèrie i de les freqüències depenen d'un nombre quàntic:

$$x(t) = \sum_n a_n e^{i\omega_n t}$$

Per a Heisenberg el major problema consistia a calcular la intensitat de la radiació emesa en una transició, per tant reemplaçà en els coeficients i en les freqüències les "n" per (n; n- α) corresponents a la transició de "n" a "n- α ".

A més sabia que aqueixa intensitat era proporcional a la probabilitat d'emissió d'Einstein. Assumí que aqueixa probabilitat era:

$$A_n^{n-\alpha} \propto |a(n; n-\alpha)|^2$$

justificant tal hipòtesi sobre la base que tant les intensitats com $|a(n;n-\alpha)|^2$ eren observables en contrast amb les funcions $x(t)$.

Estenent el seu raonament obté una reformulació de la llei de combinació de freqüències de Ritz, que el porta a una llei de multiplicació per a les $x(t)$ a través dels seus desenvolupaments en sèrie de Fourier

$$x(t)y(t) = \sum_{\alpha=-\infty}^{\infty} c(n;n-\alpha) e^{-i\alpha\omega(n;n-\alpha)t}$$

on

$$c(n;n-\alpha) = \sum_{\beta} A(n;n-\beta) \cdot B(n-\beta;n-\alpha)$$

aquest producte presenta la nova i insòlita dificultat que és no commutatiu.

Heisenberg aplicà el seu mètode a un problema particular, l'oscil·lador inharmoni que li porta a determinar les amplituds de dispersió excepte una constant, que només determina en l'estiu quan, afectat per les febres del fenc fou a l'illa de Helgoland.

En tornar de Helgoland entregà els resultats del seu treball a Born, que els féu publicar. Aparegueren en els (Zeits. Phys. 33 (1925) 879).

Heisenberg va a Leyden convidat per Ehrenfest. Entretant Born i Jordan aprofundiren les conseqüències matemàtiques del seu treball cap a finals de setembre, adonant-se que "l'eina" introduïda per Heisenberg es componia de matrius, les quals tenen una llei de multiplicació no commutativa (cada coordenada es representa per una matriu hermítica

$$q_k = \left| D_{m,n}^k e^{i\omega_{m,n}t} \right|$$

També trobaren la relació $qp - pq = i\hbar$

2.2.5.4.3. Contribució de Dirac.

En setembre de 1925, Heisenberg passa de Leyden a Cambridge on Fowler l'havia convidat a donar unes conferències.

W. Heisenberg li donà les proves d'impremta del seu article, que Fowler passà a Dirac. Aquest últim, convençut que la base del problema estava en el mètode de Hamilton, els aparta una setmana, després de la qual torna a reflexionar sobre ells, i troba la connexió entre la interpretació teòrica de les variables cinemàtiques de Heisenberg amb la teoria de Hamilton.

El fonament d'aquesta connexió fou l'equivalència del parèntesi Poisson amb la regla de multiplicació no commutativa de Heisenberg.

$$\xi\eta - \eta\xi = i\hbar[\xi, \eta]$$

Dirac publica els seus resultats en octubre de 1925 sota el títol de “*equacions fonamentals de la mecànica quàntica*”. En aquest article resumeix les idees de Heisenberg i les posa més elegants, anticipa resultats del treball dels tres homes, estableix les equacions canòniques del moviment quàntic

$$i\hbar \frac{d\xi}{dt} = [\xi, H]$$

i introdueix els operadors de creació i destrucció.

2.2.5.4.4. *El treball dels tres homes.*

En tornar Heisenberg a Gotinga inicia junt a Born i Jordan el treball que donà una consistència lògica a la mecànica de matrius i que “*contenia tot el diluvi de coneixement formal*” (Pauli): valors propis, vectors propis, transformacions canòniques, eixos principals de transformació, formes quadràtiques de Hilbert d’un nombre infinit de variables, relacions generals de commutació i aplicacions físiques, incloent la quantització del camp electromagnètic i el càlcul de les fluctuacions en aqueix camp.

En la realització d’aquest treball hagueren petites discrepàncies, ja que a Heisenberg li interessava fer èmfasi sobre tot en el contingut físic de la teoria (en especial l’absència d’òrbites electròniques), en tant que Born considerava la transformació d’eixos com centre de la teoria.

Una altra dificultat fou que Born se n’anà a Amèrica a finals d’octubre (on amb Norbert Wiener escrigué una nova formulació matemàtica de la teoria quàntica que utilitzava el concepte d’operador lineal) i Jordan i Heisenberg hagueren de publicar el seu treball després de la seua marxa en els (*Zeits. Phys.* 35 (1926) 557). P.

En aquell temps mantenien correspondència regular amb Pauli, que residia en Hamburg, qui abans que s’acabara el treball dels tres homes demostrà que la nova teoria proporcionava l’espectre correcte de l’àtom d’hidrogen. També aconseguí tractar amb total exactitud el cas més complicat de l’àtom d’hidrogen en camps elèctrics i magnètics transversals.

Aquest mateix problema fou tractat per Dirac en un article de 1926 titulat: “*La mecànica quàntica i investigació preliminar de l’àtom d’hidrogen*”.

Després de concloure el treball de Heisenberg escrigué a Pauli una carta manifestant-li la seua preocupació pel fet que, si bé l’article contenia tot l’aparell matemàtic, era incapaç, per exemple, de descriure la trajectòria de l’electró en una cambra de boira.

2.2.5.5. **La mecànica ondulatòria de Schrödinger**

Einstein recalca la importància dels treballs de Louis de Broglie, i Schrödinger en Zurich partint de la idea fonamental d’aquest (“*l’òptica geomètrica és a l’òptica*”).

ondulatòria com la mecànica clàssica ha de ser a la mecànica ondulatòria”), escrigué els seus famosos articles base de la mecànica ondulatòria (Ann. Phys. 79 (1926) 109, 361, 437 i 489).

Al primer d’ells Schrödinger es proposa construir un paquet d’ones molt restringit en totes dimensions susceptible de reemplaçar al punt representatiu d’un sistema mecànic conservatiu la velocitat del qual coincideix amb la velocitat de grup del paquet.

Per desenvolupar aquest caràcter ondulatori, pren com a punt de partida una equació d’ones en l’espai de configuració

$$\nabla^2\Psi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} = 0$$

Equació que no és vàlida més que per a fenòmens que depenen del temps mitjançant un factor $e^{i\omega t}$. Tenint, a més, en compte l’expressió de la velocitat de l’ona en funció de l’energia o de la freqüència obtingué l’equació

$$\left[-\frac{\hbar}{2m}\nabla^2 + V(\vec{r}) \right] \Psi(\vec{r}) = E \cdot \Psi(\vec{r})$$

que es coneix amb el nom de “equació d’Schrödinger per a estats estacionaris”.

Per demostrar l’elegància i el poder del seu nou esquema resolgué, en un altre article, el problema de l’àtom d’hidrogen, el de l’oscil·lador harmònic i els efectes de Stark i Zeeman.

Per a l’àtom d’hidrogen trobà que no existeixen solucions monocromàtiques que satisfacen les condicions de contorn més que per a certes energies de l’electró, que són els valors propis de l’equació i coincideixen amb els resultats de Bohr; encara que la degeneració corresponent a un nivell energètic no coincidí amb la del model de Sommerfeld ja que els valors possibles per al moment angular no són $n_\psi = 1, \dots, n$ sinó $l = 0, \dots, n-1$ i per tant la degeneració no és $\Sigma 2n_\psi H = n(nH)$ sinó $\Sigma(2l+1) = n^2$.

Quant a l’oscil·lador lineal obtingué que l’energia és igual a

$$E = \left(n + \frac{1}{2} \right) h\nu$$

com semblaven indicar els fenòmens físics en què intervenia la quantificació de l’oscil·lador (per exemple, els espectres de bandes de les molècules biatòmiques). En l’antiga teoria dels quants, el valor de l’energia era

$$E = nh\nu$$

Respecte als efectes Stark i Zeeman introduí per a estudiar-los un mètode de pertorbacions anàleg a les de la mecànica celeste ja que \vec{E} i \vec{B} són molt febles en

relació als camps dels sistemes atòmics. Cal, per tant, calcular la modificació molt feble que el camp pertorbador imprimeix als valors quantificats. No pogué explicar l'efecte Zeeman anòmal per no introduir l'espín \vec{S} de l'electró.

En un altre treball, ataca el problema de generalitzar la seua equació per a estats estacionaris ja que aquesta no és aplicable per a estats que depenguen del temps.

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right] \cdot \Psi$$

També es va preocupar del sentit físic de Ψ : considerà que l'electró estava difós en l'àtom i que la seua càrrega estava repartida de forma contínua, de manera que

$$e\Psi^*(q,t)\Psi(q,t)$$

és la densitat de càrrega. Tot passa com si aqueixa distribució que varia amb el temps irradiara segons les lleis clàssiques.

Sobre aquest punt va tindre una sèrie de discussions en Munich (on fou invitat per Sommerfeld per donar un col·loqui) que es resolgueren amb l'abandó d'aquesta concepció, ja que el procés d'emissió per transmissions quàntiques és massa discontinu perquè pugua representar-se per l'emissió clàssica d'una distribució.

2.2.5.6. Desenvolupament de la mecànica quàntica.

En finalitzar els treballs anteriorment esmentats, l'aparell matemàtic de la teoria estava pràcticament formulat, però no així la seua interpretació física (que és fruit dels treballs que anem a ressenyar a continuació) ni la seua coherència interna (axiomatització).

2.2.5.6.1. Identitat de la mecànica quàntica i de la mecànica ondulatòria.

Després de la sorpresa que causaren els treballs de Schrödinger en Gotinga, el 18 de març de 1926 aparegué en els Annalen der Phys. la prova de l'equivalència entre ambdós formalismes.

La idea directriu de Schrödinger: *“ha de ser possible construir amb les ajudes de les funcions d'ona de la mecànica ondulatòria magnituds que tinguen les propietats de les matrius de la mecànica quàntica”*.

Per això acoblà les funcions pròpies dos a dos: una funció pròpia amb ella mateixa o amb una altra diferent. Les primeres van unides a un estat estacionari únic i les segones a la transició entre dos estats estacionaris diferents.

Ara bé, com segons Heisenberg a cada magnitud li correspon una matriu diferent, Schrödinger associà a cada parell de funcions una magnitud formada a partir d'un cert operador actuant sobre una de les funcions de manera que:

$$\langle \Psi_m | p | \Psi_n \rangle = \int \Psi_m^* p \Psi_n dv$$

Les matrius formades per aquest procediment satisfan les regles d'addició i multiplicació i obeeixen les equacions canòniques de la mecànica quàntica.

2.2.5.6.2. Interpretació probabilística de la funció d'ones.

En Gotinga s'aprofità l'estiu per fer-se amb els mètodes de Schrödinger, pel que el més simple era, segons Heisenberg, “*escriure un treball sobre un problema físic concret*”. Fruit d'això foren els articles de Heisenberg sobre l'àtom d'heli (del qual parlarem més endavant), el de Jordan sobre teoria general de les transformacions i el de Born sobre processos de col·lisió. Aquest últim article publicat en els (*Zeits. Phys.* 38 (1926) 803) jugà un paper fonamental ja que a més d'iniciar el tractament dels problemes de xoc en la mecànica quàntica introduí la interpretació probabilística de la funció d'ones de Schrödinger.

Born partí del fet que així com en l'esperit de Heisenberg tota descripció exacta dels fenòmens en l'espai i en el temps apareix impossible, en l'esperit de Schrödinger les ones posseïen una certa realitat física.

Per la seua part, proposa una nova interpretació procedent d'una observació d'Einstein sobre les relacions entre fotons i camps d'ones. Einstein deia que les ones no serveixen més que per a mostrar el camí de les partícules i parlava en aquest sentit d'un camp “*virtual*”. Aquest camp determina la probabilitat perquè un fotó portador d'energia i moment, prengui un camí determinat, però que no posseeix el mateix ni energia ni ninguna quantitat de moviment. Per a Born, les ones de la mecànica quàntica es limitarien de forma anàloga al paper de “*pilots*”.

Aquesta ona es propagarà segons l'equació de Schrödinger però no determina més que les probabilitats respectives de les diferents trajectòries possibles.

Born resumeix açò en la fórmula següent: “*el moviment de les partícules segueix les lleis de la probabilitat, però la probabilitat es propaga segons el principi de causalitat*”.

Com tota funció d'ona es deixa desenvolupar en sèrie

$$\Psi(q) = \sum_n c_n \Psi_n(q)$$

la probabilitat de trobar la partícula en una regió dq vindrà donada per

$$\int |\Psi(q)|^2 dq = \sum_n |c_n|^2$$

2.2.5.6.3. Les relacions d'incertesa.

El problema de la trajectòria de l'electró plantejat per Heisenberg fou discutit entre els mesos d'octubre de 1926 i febrer de 1927, quasi sense interrupció. Per fi Heisenberg trobà una explicació, publicant la seua famosa memòria (Zeits. Phys. 43 (1927)).

En ella Heisenberg estima que només s'arriba a la comprensió intuïtiva d'una teoria física, quan es pot, en tots els casos simples, imaginar qualitativament les seues conseqüències i quan s'ha reconegut, amb l'ús, que aquesta teoria no presenta contradiccions.

“La significació intuïtiva de la teoria quàntica està encara plena de contradiccions internes” – segons les seues pròpies paraules- on s'oposen les nocions extremes del continu i del discontinu, de les ones i de les partícules. Sembla que amb l'ajuda dels conceptes mecànics i cinemàtics habituals no es poden evitar estes contradiccions.

A més, la necessitat d'una revisió dels esmentats conceptes cinemàtics i dinàmics apareix com una conseqüència immediata de les equacions fonamentals de la mecànica quàntica. En efecte, quan tenim una massa determinada “m”, clàssicament trobem una significació immediata a la posició i velocitat d'eixa massa. Però en mecànica quàntica, hem de tindre entre la massa, la posició i la velocitat la relació

$$qp-pq=i\hbar$$

És possible resoldre eixes contradiccions? Si es busca definir què ha d'entendre's per posició d'un objecte s'ha d'imaginar una experiència que permeta mesurar eixa magnitud. Per exemple, s'il·lumina un electró i s'observa al microscopi. La precisió d'aquesta mesura està determinada per la longitud d'ona emprada. Z. Si s'utilitzen raigs γ hem de poder obtindre tota la precisió volguda. Però apareix una dificultat: l'efecte Compton. En el moment que es determina la posició, és a dir, en el moment que el fotó ha xocat amb l'electró, s'enregistra una discontinuïtat en la seua quantitat de moviment: esta alteració és tant més gran com menor és la longitud d'ona utilitzada. Com més es coneix la posició, menys es coneix la quantitat de moviment i a la inversa. Això troba la seua expressió matemàtica en la relació d'incertesa:

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Arribem al concepte de trajectòria: *“ l'expressió correntment emprada de trajectòria de l'electró en l'àtom d'hidrogen apareix buida de sentit. Per mesurar la trajectòria caldria il·luminar l'àtom amb una $\lambda < 10^{-8}$ cm. Però un sol quant d'eixa llum seria suficient per expulsar l'electró fora de la seua trajectòria...Es pot seguir aquesta experiència sobre un gran nombre d'àtoms en l'estat “s”, s'obtindrà així un repartiment de probabilitats de la posició de l'electró. Des de Born esta probabilitat és $\Psi \cdot \Psi^*$ si Ψ és la funció d'ona de Schrödinger en l'estat “s”.*

D'altra banda, la paraula velocitat pot ser definida per una experiència quan es tracta de moviments en absència de forces. Es pot, per exemple, il·luminar un objecte amb llum roja i definir la seua velocitat amb ajuda de l'efecte Doppler-Fizeau. La precisió sobre la velocitat serà tant millor com major siga la λ de la llum emprada. Correlativament la posició de l'objecte serà tant més imprecisa conforme a la relació d'incertesa".

Pas seguit discuteix en el seu article la mesura de l'energia, trobant que s'acompleix

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

I conclou, "tots els conceptes utilitzats en teoria clàssica per a la descripció d'un sistema mecànic es deixen encara definir de forma anàloga en el domini atòmic. Però les experiències que utilitzen estes definicions comporten una indeterminació tan prompte com volguem deduir els valors de dues magnituds conjugades. El grau d'aquesta indeterminació està donat per la relació

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar"$$

2.2.5.6.4. El teorema de Ehrenfest.

Es preguntà quin camí és possible partint de la mecànica quàntica cap a la llei de Newton del moviment. Publicà els seus resultats en el (Zeits. Phys. 45 (1927) 455).

Trobà que, "en tots els casos en què la dimensió del paquet d'ones de probabilitat siga suficientment petita amb referència les distàncies macroscòpiques, la derivada de quantitat de moviment del paquet d'ones en el sentit de la mecànica de Newton és igual al valor de la força en el punt on es troba localitzat aquest paquet". Expressat matemàticament

$$m \frac{d^2}{dt^2} \langle q \rangle = - \left\langle \frac{\partial V}{\partial q} \right\rangle$$

on

$$\langle q \rangle = \int \psi^* q \psi dq \qquad \left\langle \frac{\partial V}{\partial q} \right\rangle = \int \psi^* \left(\frac{\partial V}{\partial q} \right) \psi dq$$

L'extensió en el transcórrer del temps del paquet d'ones és una qüestió difícil estudiada posteriorment per Kennard i Darwin.

2.2.5.6.5. *El principi de complementarietat.*

En 1928, poc després del treball de Heisenberg sobre les relacions d'incertesa, Bohr escriví una memòria en què intentà superar la contradicció entre les ones i les partícules que existia en el si de la mecànica quàntica.

Partint que la descripció d'una entitat com l'electró ha de fer-se amb l'ajuda de la imatge corpuscular o de la imatge ondulatoria, digué que les relacions d'incertesa no permetien a les dues imatges emprades entrar en conflicte directe. En efecte, quan l'electró té una longitud d'ona bastant ben definida com per poder interferir, no està localitzat i no respon a la imatge corpuscular. A la inversa, si està ben localitzat, les propietats interferencials desapareixen.

En resum, les propietats ondulatories i corpusculars no existeixen mai al mateix temps.

2.2.5.6.6. *Els principis de la mecànica quàntica.*

Sota aquest títol publicà Dirac el seu llibre en 1929. En ell la mecànica quàntica assoleix una formulació que, pràcticament sense modificacions essencials continua ensenyant-se actualment.

Parteix de la idea que la formulació de les lleis exigeix l'ús de les matemàtiques de les transformacions. Els elements importants del món físic apareixen com les invariants d'aquestes transformacions (o, més en general, quantitats que es transformen de manera senzilla).

Respecte al formalisme matemàtic, segons les seues pròpies paraules, "*l'autor ha de decidir-se des del principi entre dos mètodes. Un és el mètode simbòlic, que considera directament i de forma abstracta les quantitats d'importància fonamental, i l'altre es basa en l'ús de coordenades o representacions i tracta amb conjunts de nombres que corresponen a aquestes quantitats. Per regla general sempre s'ha utilitzat el segon que es coneix amb els noms de mecànica ondulatoria i mecànica de les matrius, segons a quin dels elements físics, estats o variables dinàmiques del sistema se li concedisca major importància*".

Dirac opta decididament pel mètode simbòlic: els seus conceptes fonamentals són estat, observació i observable.

L'estat, és molt delicat de definir, dir que un sistema està en un estat donat, després d'haver sigut convenientment preparat, és donar tots els elements relatius a la seua estructura, la seua posició en l'espai i en el temps i els seus moviments interns.

L'estat roman ja que permanentment excepte pertorbació (la noció de pertorbació és ella mateixa relativa, si es pot incorporar la causa pertorbadora al sistema). Però s'admet que la pertorbació que consisteix en preparar un sistema per conduir-lo a un estat donat té un caràcter absolut, així com la pertorbació que entranya en general tota observació feta sobre un sistema en un instant donat.

S'admet també que un estat qualsevol ha de poder ser considerat com el resultat de la superposició de dos o més estats diferents (principi de superposició).

Arribem així a la noció d'observació. En general, tota mesura efectuada sobre un sistema prèviament preparat d'una manera convenient modifica l'estat inicial del sistema. El resultat d'una observació no està en general completament determinat i la repetició d'una observació a partir de condicions inicials idèntiques no produeixen un únic resultat. Es pot únicament, amb ajuda d'un gran nombre d'experiències idèntiques, deduir la probabilitat d'un resultat donat. Esta indeterminació relativa està lligada al principi de superposició d'estats.

Cal especificar, en general, l'interval de temps que transcorre entre la preparació d'un sistema i l'execució de la mesura (perquè un mateix estat és relatiu a l'espai i al temps i no exclou una evolució determinada la qual és susceptible de modificar el resultat d'una mesura). De vegades, per a certs estats anomenats per definició estacionaris aquest interval no té incidència.

Hi ha un cas on l'observació no pertorba al sistema, és aquest on existeix, en comptes d'una probabilitat, una certesa d'obtindre un resultat donat amb l'ajuda d'esta observació. Dirac admet que és així en el moment de la repetició immediata (darrere de la pertorbació produïda per una primera mesura) d'una observació que ha donat un primer resultat: el segon és aleshores idèntic al primer.

Dues observacions es diuen compatibles quan la probabilitat d'obtindre un resultat donat per la segona no és modificat per la pertorbació deguda a la primera. Esta propietat és recíproca.

El cas més important és aquest on dues o més observacions compatibles són efectuades simultàniament. Si s'efectuen així simultàniament, el nombre màxim d'observacions independents i compatibles que comporta el sistema obtenim que l'estat final es troba definit per aquesta observació màxima independentment de l'estat inicial.

Després d'aquestes definicions, Dirac introdueix l'aparell matemàtic en el qual, anàlogament al que succeí a Heisenberg, ha fet ús de conceptes ja coneguts en matemàtiques sense saber-ho. En el seu cas es tracta, com ja notaren els matemàtics Von Newman i Neil, que havia fet ús dels espais de Hilbert.

2.2.5.6.7. La teoria de la quantificació en la nova mecànica.

Aquest és el títol d'un llibre de Louis De Broglie publicat en 1932 en el qual tracta d'arribar a la mateixa teoria general de Dirac partint del punt de vista més intuïtiu de la mecànica ondulatòria.

Per això estableix els següents postul·lats:

- 1) a cada magnitud li correspon un operador lineal i hermític, els valors propis del qual són reals, i les funcions pròpies del qual formen un sistema complet de funcions base.
- 2) Principi de quantificació: la mesura exacta d'una magnitud mecànica no pot subministrar com a valor d'eixa magnitud més que un dels valors propis de l'operador corresponent. (Aquest postul·lat ens fixa els valors possibles d'una magnitud).

- 3) Principi de descomposició espectral: les probabilitats dels diferents valors possibles d'una magnitud mecànica d'una partícula de la qual es coneix la seua funció d'ones, són proporcionals als quadrats dels mòduls de les amplituds corresponents en la descomposició espectral de la funció d'ona segons les funcions pròpies de la magnitud considerada.

2.2.6. DESENVOLUPAMENTS FONAMENTALS I APLICACIONS DE LA MECÀNICA QUÀNTICA

2.2.6.1. Les equacions de Pauli i Dirac.

El primer intent de formular una equació d'ones que fora consistent amb l'espín de l'electró fou la de Pauli. Observà que l'espín d'un cos en rotació podria ser representat per una matriu i , a continuació, introduí les matrius d'espín en l'equació d'ones clàssica. L'efecte d'estes matrius fou dividir l'equació d'ones en un sistema de dues equacions simultànies de manera que les seues solucions apareixien acoblades.

$$H \begin{Bmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{Bmatrix} = E \begin{Bmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{Bmatrix} \quad ; \quad H = \frac{1}{2m} \left[\vec{\sigma} \left(\vec{p} - \frac{q}{c} \vec{A} \right) \right]^2 + q\phi$$

Ara bé, aquestes equacions no eren invariants sota la transformació de Lorentz.

Per això Dirac (Proc.Roy.Soc. 117 (1928) 610 i 118 (1928) 351) formulà l'equació que porta el seu nom. Partí que no podia tractar-se d'una equació de segon ordre respecte del temps, ja que la conservació de la probabilitat total no estaria perfectament assegurada.

Per això va suposar que seria de primer ordre respecte del temps i, com la teoria de la relativitat exigeix la simetria de l'espai amb el temps, això implica que l'equació també hauria de ser de primer ordre respecte a l'espai.

Així aconseguí una equació invariant:

$$\left[\rho \vec{\sigma} (\vec{p} - q\vec{A}) + \beta m + q\phi \right] \psi = E\psi$$

L'equació, obtinguda per raonament relativista, sense fer intervindre la hipòtesi del spin, contenia totes les propietats de l'electró magnètic.

La funció d'ones hauria de tindre 4 components, i si el moviment de l'electró és lent respecte a la llum, les dues primeres són negligibles front a les altres: es troba novament l'equació de Pauli.

La teoria de Dirac permeté posar en clar la qüestió de l'estructura fina i justificà les fórmules de Sommerfeld. També explica les anomalies magnètiques, ja que atribueix l'electró un moment magnètic propi, justificant les fórmules de Landé.

L'equació de Dirac admet solucions corresponents a estats d'energia negativa (esta possibilitat prové del caràcter relativista de les equacions).

Però aquests estats, que poden efectuar transicions cap a estats positius, no havien sigut observats.

Dirac, per justificar-ho emeté la següent hipòtesi: “*tots els estats d’energia negativa estan ocupats per electrons; els excedents són els electrons d’energia positiva. Quan un electró d’energia negativa passa a un estat d’energia positiva, apareix un forat en el mar d’electrons negatius, que es manifesta com una partícula amb massa igual a la de l’electró i la càrrega del qual és igual a la de l’electró però canviada de signe. Aquest forat pot ser tornat a ocupar per un electró amb energia positiva amb emissió de radiació*”.

En 1932 Anderson, Bleket i Cochialini en fer col·lisionar àtoms amb rajos còsmics trobaren una partícula que acomplia totes les característiques del forat de Dirac: el positró.

2.2.6.2. L’espín. Sistemes de partícules idèntiques. Principi d’exclusió de Pauli.

La mecànica quàntica no està completa si no es tenen en compte l’*espín* i el postulat de simetrització (ambdós van haver de ser introduïts “*ad hoc*”).

Quedaven una sèrie de fets d’orde espectroscòpic i magnètic que no havien pogut ser explicats: entre ells les estructures fines dels àtoms complexos, l’efecte Zeeman anòmal, l’efecte Stern i Gerlach i les anomalies giromagnètiques.

Estos fets només van poder ser explicats amb la introducció del *espín*. Uhlembeck i Goudsmit van introduir la idea de l’*espín* segons les seues paraules “*considerant a l’electró com una xicoteta esfera que poguera girar...*” després d’estudiar un article de Pauli en el que aquest formulava el seu principi d’exclusió i en el qual, per primera vegada se li assignaven quatre nombres quàntics a l’electró.

Ja hem introduït l’*espín*; ara per completar la mecànica quàntica hem de tindre en compte que així com clàssicament dues partícules de la mateixa natura eren idèntiques, en mecànica quàntica cal renunciar completament a la possibilitat de distingir dos partícules de la mateixa natura d’un mateix sistema i vore com identificar dos estats d’un sistema que no difereixen l’u de l’altre més que per la permutació d’aquestes dues partícules.

Aquesta permutabilitat te conseqüències molt importants. Així, si permutant les coordenades de dues partícules d’un sistema, la funció d’ones no canvia el seu valor, diem que és simètrica en relació a aquestes partícules.

Per altra banda, si permutant-les canvia de signe, diem que és antisimètrica.

Això ens porta que donat un sistema físic de partícules idèntiques, les funcions d’ona que descriuen els seus estats han de ser totes simètriques o totes antisimètriques.

2.2.6.3. Estadístiques quàntiques.

Els mètodes de la mecànica estadística clàssica de Boltzman consisteixen en enumerar les reparticions possibles dels àtoms del gas entre els estats de moviment per a una energia donada i buscar la repartició global més probable.

Per a desenvolupar completament la fórmula quàntica de l'estadística clàssica és necessari calcular el nombre de diverses reparticions dels àtoms (o altres elements del sistema) entre els diversos estats quànticament possibles.

Per això cal tindre en compte:

- 1) La indistingibilitat de les partícules que ens obliga a considerar com idèntiques dues reparticions que diferisquen solament per la permutació d'aquestes dues partícules.
- 2) El fet que els nostres elements obeisquen o no al principi d'exclusió de Pauli.

Si l'obeeixen, és a dir, si les seues funcions d'ona són necessàriament antisimètriques, hi haurà a tot estirar una partícula en cada estat.

Si no l'obeeixen, les funcions d'ona són simètriques i res limita el nombre d'elements que es troben en un estat possible.

En el primer cas, s'arriba a l'estadística de Fermi-Dirac (formulada per Fermi en 1926 en generalitzar el principi de Pauli).

En el segon, a l'estadística de Bose-Einstein (formulada pel primer en 1924 en el marc de l'antiga teoria dels quants).

Les dues noves estadístiques es confonen asimptòticament amb la clàssica si es fa tendir el valor de h cap a zero.

Com els fotons no obeeixen el principi de Pauli, un gas de fotons segueix l'estadística de Bose-Einstein. La radiació en equilibri present en un recinte isoterm és assimilable a un gas de fotons, amb la diferència que el nombre de fotons no és constant (processos d'emissió i d'absorció) i per tant se li pot aplicar a esta radiació l'estadística de Bose: es torna a trobar la llei de distribució de Planck, que com està molt ben comprovada, dona una notable confirmació de l'estadística de Bose.

2.2.6.4. Radiactivitat i física nuclear.

La primera aplicació de la mecànica quàntica a la física nuclear fou deguda a Gamow per explicar la desintegració. Es pot suposar que els rajos preexisteixen al nucli de l'àtom i es troben en ell com en una "cubeta" envoltats per una muntanya de potencial. Com la llei de Coulomb ha sigut verificada al voltant del nucli, es coneix la forma del vertent exterior de la muntanya; l'interior és desconegut.

Els rajos α que ixen dels nuclis semblen tindre una energia massa feble per permetre-li franquejar la muntanya de potencial; açò s'explica mitjançant l'efecte túnel.

Aquest model només és vàlid per a una sèrie de nuclis: Be, C i O.

Poc després s'aplicà per l'elaboració de models nuclears:

- 1) Model de partícules α : que ja hem explicat anteriorment i que s'introduí per intentar comprendre la radiació.
- 2) Model de partícules independents (estructura de capes): aquest model s'utilitzà des de 1932. Consisteix en trasposar el model que s'havia utilitzat per a l'àtom, però com el potencial central predominant no existeix, se li substitueix per un potencial mig que minimitze les energies calculades, (mètode de Hartree).
En 1934 Elsasser observà l'estabilitat excepcional dels nuclis de 82 neutrons o 126 protons considerant que corresponien a certes capes del nucli al complet i confirmant així el model de partícules independents.
- 3) Model de la gota líquida: en multiplicar-se les objeccions contra el model anterior degut que els alts valors de les forces nuclears no permeten considerar les partícules com independents, Bohr introduí el seu model en que suposà que els nucleons es trobaven en un estat anàleg al del líquid.
- 4) Model de capes de Jensen i Maria G. Mayer, amb interacció spin-òrbita: igual que en els àtoms es considerà la interacció entre \vec{L} i \vec{S} , puguent-se explicar així els nombres màgics: 2,8,20,50,82,126, que correspondrien a capes plenes.
- 5) Model unificat de A. Bohr i Mottelson: el model de capes no ha aconseguit explicar la forma el·lipsoïdal del nucli que es produeix en moments quadripolars elevats. Per això, en 1952 consideraren el nucli compost per un "cor" (amb moviments col·lectius a l'igual que en el model de la gota) i extra- nucleons amb nivells induïts per un potencial no esfèric.

Quant a les reaccions nuclears, s'aplica la teoria quàntica de les col·lisions, que permet estudiar tant la dispersió elàstica (coulombiana) i la inelàstica (amb pèrdua d'energia). Aquesta aplicació fou molt fructífera per a la teoria de col·lisions, en induir el seu ràpid desenvolupament en el que cap destacar: la descomposició de les ones planes en ones esfèriques de moments angulars diferents, deguda a Faxen i Holtsmarts en 1927, el mètode dels desfases, i el concepte de matriu de col·lisió introduït per Wheeler en 1937.

2.2.6.5. El camp electromagnètic unificat.

En 1928 Dirac, Jordan, Wigner, Heisenberg i Pauli abordaren la quantificació del camp electromagnètic.

Per això, a cada camp li associaren un operador que actua sobre un estat: el nombre de fotons de cada freqüència.

Així, les amplituds del camp es podien expressar en funció d'un operador de creació de fotons (emissió) i un altre de destrucció (absorció).

De l'àlgebra d'aquests operadors es dedueix que l'energia i la quantitat de moviment estan quantificades.

La probabilitat d'una transició d'una partícula carregada és proporcional a la constant d'estructura fina α . La probabilitat del procés doble és proporcional a α^2 . Açò permet calcular la probabilitat de transició pel mètode de pertorbacions.

Aquesta teoria dona compte de l'existència de fotons, permet calcular les probabilitats d'absorció o emissió i també les característiques "clàssiques" de la radiació, per exemple, la polarització. Permet explicar la propagació a velocitat finita de la interacció de dues partícules carregades. En teoria clàssica un camp no radiant està emès per una de les partícules i actúa sobre l'altra instantàniament. En teoria quàntica al camp no radiant li correspon un fotó "virtual" que es propaga amb velocitat finita.

2.2.6.6. Estat sòlid.

Estudis sobre metalls i molècules apareixen després de l'equació de Schrödinger (1926) i l'estadística de Fermi Dirac (1926), quan una sèrie de científics joves, i per tant sense gran adscripció disciplinar, intenten aplicar la nova mecànica quàntica a tots els sistemes atòmics possibles. En aquest treball pioner van destacar les universitats de Munic (Arnold Sommerfeld, Hans Bethe), Leipzig (Werner Heisenberg, Rudolf Peierls), Zuric (Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Fèlix Bloch) i Gotinga (Max Born, Walter Heitler, Lothar Nordheim). Així mateix, a aquests centres van acudir per a formar-se en quàntica molts científics nord-americans, com Linus Pauling, John Slater, RS Mulliken, John Van Vleck, Philip Morse, etc. També va destacar la xicoteta universitat de Bristol on va treballar Lennard-Jones fins que accepta la càtedra de química física de Cambridge en 1932, sent substituït per Nevill Mott.

Els mètodes de Born - Oppenheimer (que considera els nuclis fixos) i d'Hartree i Fock (o camp autoconsistent), van permetre simplificar l'equació de Schrödinger al separar la contribució dels nuclis i considerar els electrons com a partícules independents. La principal contribució de John Slater són els determinants de Slater, utilitzat per a què la funció d'ones total d'un sistema d'electrons siga antisimètrica (com exigeixen el principi d'exclusió i el postulat de simetrització).

Sommerfeld va ser autor en 1927 d'una teoria semiclàssica dels metalls. Bethe va estudiar la dispersió de les ones d'electrons pels àtoms i va ser coautor amb Sommerfeld en 1933 del clàssic "*Electronentheorie der Metalle*". Bloch resol en 1928 l'equació de Schrödinger per a un potencial periòdic, la solució del qual per als electrons de conducció era una ona plana modulada per una funció periòdica i, encara que ell no va acabar de veure-ho, les seues solucions portaven a la teoria de bandes, desenrotllada per Peierls, Bethe, Nordheim, etc.

Eugene Wigner i Frederic Seitz en 1933 van aplicar el mètode cel·lular al sodi metàl·lic i van obtenir la primera estructura de bandes. En Cambridge en 1932 Nevill Mott i Harry Jones van publicar "*La teoria dels metalls i aliatges*". En 1940 Seitz va escriure el clàssic "*La teoria moderna dels sòlids*".

Però l'actual desenrotllament de l'electrònica es produïx quan l'antiga electrònica de vàlvules és reemplaçada per l'electrònica d'estat sòlid. Esta s'inicia en 1947 amb la invenció del *transistor de contacte* per J. Bardeen, W. Brattain i W. Shockley, dels laboratoris de la Bell Telephone, pel que van rebre el premi Nobel de Física en 1956.

Este, el mateix que molts altres dispositius útils, s'obté a partir de la unió de semiconductors de tipus n i p.

2.2.7. LA FÍSICA QUÀNTICA I LA SEUA INTERPRETACIÓ

Assenyalar que tant durant la seua gènesi, com posteriorment, la Física quàntica va tindre grans debats sobre la seua interpretació. Alguns físics com de Broglie (i la seua onda associada), Schrödinger (reducció a l'aspecte ondulatori), Landé i alguns físics soviètics (reducció a l'aspecte corpuscular) i inclús el mateix Einstein, van mantindre postures contràries a la interpretació probabilista. La major part dels físics, com Bohr, Heisenberg, Born, Pauli o Dirac, van defensar la dita interpretació probabilista (també denominada ortodòxia de Copenhaguen, en la universitat en la qual treballava Bohr), encara que mesclada amb altes dosis de filosofia positivista.

El debat va tindre les següents fites. En 1930 el 6t Congrés Solvay, centrat en el magnetisme, per la qual cosa va acudir el físic espanyol Blas Cabrera, director del Laboratori d'Investigacions Físiques i reconegut expert en les propietats magnètiques de la matèria, tema en què es va iniciar amb Weiss en 1910-12 a Zuric. Però les estones lliures van estar ocupats per la discussió sobre els fonaments quàntics a càrrec de Bohr i Einstein. Este últim escèptic respecte a la interpretació probabilista, proposava experiències intel·lectuals que aparentment qüestionaven les relacions d'indeterminació, la qual cosa era refutat per Bohr.

En 1935 es va proposar la paradoxa del gat de Schrödinger. Este imaginava un gat engabiat amb un dispositiu letal que s'activava si es desintegrava un àtom en una substància radioactiva. Com s'havia comprovat en àtoms i molècules la validesa del principi de superposició, es podia afirmar que abans d'obrir la caixa l'àtom estava en una superposició d'estats ($\Psi_{\text{desintegrat}} + \Psi_{\text{no desintegrat}}$), per la qual cosa el gat estaria també en estat superposició ($\Psi_{\text{viu}} + \Psi_{\text{mort}}$). Fins que no es realitza la mesura, en este cas obrir la caixa, no sabem si el gat esta viu o mort. A este canvi sobtat en la funció d'estat I del sistema quan es realitza la mesura, des d'un estat superposició a un estat definit, se la denomina reducció o col·lapse de la I, que es convertix en un nou principi de la quàntica. I esta era la idea que Schrödinger volia qüestionar, ja que és impossible que el gat siga viu i mort al mateix temps abans d'obrir la caixa. Per a resoldre esta paradoxa, alguns físics com Eugene Wigner atribuïen el col·lapse a la intervenció d'un ens suposadament més enllà de la física, la consciència de l'observador, però esta idea és qüestionable, perquè moltes vegades l'observador és un aparell de mesura o un ordinador. Altres, com John Wheeler, suposen que quan s'observa el gat, l'univers es desplega en dos, un en què segueix viu el gat i un altre en què ha mort. Açò elimina el col·lapse, però resulta una solució molt cara en universos.

Actualment s'accepta que hi ha un grandària (o energia) crític en què la superposició deixa de ser vàlida i que la interacció del sistema amb la resta de l'univers (i una mesura és només una interacció controlada i reproduïble) produirà la decoherència de l'estat. Açò introduïx una evolució contínua, reversible i causal de la funció d'estat regida per

l'equació de Schrödinger i una interacció (o mesurament) discontinua, irreversible i aleatòria. Segons açò les interaccions introduïxen una irreversibilitat essencial que justifica el caràcter universalment vàlid del segon principi de la termodinàmica.

També en 1935 es desenrotlla la famosa paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen, que aclarisc David Bohm en 1951, al proposar un sistema format per dos electrons amb espins antiparal·lels que s'allunyen. Si es mesura el porc Espí de u, instantàniament sabem el porc Espí de l'altre, la qual cosa contradiu el caràcter límit de la velocitat de la llum establert per la relativitat especial. De Broglie i Bohm, consideren que hi ha partícules amb trajectòries ben definides, guiades per una onda o potencial quàntic (una variable oculta), que no té energia però pot influir en les partícules. Bohr i altres consideren que es tracta d'un únic sistema i que per tant un mesurament sobre un electró és un mesurament sobre l'altre. La veritat és que Bell va establir unes correlacions per a les mesures d'estos sistemes, denominades desigualtats de Bell, el compliment de les quals ha sigut verificat experimentalment en 1982 per Aspect i altres amb fotons polaritzats, la qual cosa pareix haver conclòs la qüestió a favor de la interpretació probabilista. Recentment s'estan utilitzant sistemes d'este tipus (d'estats enredats) en aplicacions pràctiques com la criptografia o la computació quàntica.

Esta controvèrsia que va durar diverses dècades és un bon exemple del caràcter conflictiu, controvertit, del desenrotllament de la ciència. El seu resultat va ser la tendència de molts textos de física a refugiar-se en l'incontestat aparell matemàtic, adornat amb algunes idees confuses sobre la complementarietat i dualitat, del que estos debats estaven marginats com a autèntiques heterodòxies, sense tindre en compte que van suposar un gran esforç d'aclariment i reformulació dels conceptes quàntics.

En l'actualitat, pràcticament tots els físics accepten la interpretació probabilista, i prou rebutgen que esta vaja indissolublement unida al positivisme, com ja feren en el seu moment Vladimir Fock, Langevin o Levy-Leblond. Açò és degut al fet que el positivisme, entre altres coses, no aclarix la diferència entre enunciats amb significació objectiva i amb significació empírica. Els primers fan referència a objectes autònoms no pertorbats per mesurament, com un àtom en estat estacionari (que no absorbiu i irradia energia) o un fotó que viatja per un espai buit, en el qual cap dispositiu pot detectar-ho, absorbint-ho. Els segons es referixen a objectes en observació, mesurament o, en general, interacció amb sistemes macroscòpics, com un feix d'electrons que travessa un sistema de ranures. Els positivistes i els que atribueixen la indeterminació únicament a l'observació, intenten reduir la teoria quàntica a enunciats del segon tipus, la qual cosa, si fóra cert, impediria l'aplicació d'esta a objectes com els mencionats en el primer tipus d'enunciats i, per tant, a l'astrofísica o la cosmologia.

2.2.8. IMPLICACIONS DIDÀCTIQUES

Un mètode d'ensenyança purament cronològic per a introduir els conceptes té alguns inconvenients que convé posar de manifest. En primer lloc, s'introduïxen les noves idees, en particular des de Planck fins de Broglie, tal com es va fer en els orígens de la

Física quàntica, sense tindre en compte els desenrotllaments posteriors d'estes idees (per exemple, limitar-se a parlar d'òrbites estacionàries en els àtoms, no introduir la interpretació dual per als fotons, etc) ni les seues relacions amb els principis de la Física quàntica. D'altra banda, amb este mètode correspondria cronològicament començar amb la teoria de Planck, la qual cosa no pareix convenient didàcticament per als nivells mitjans, perquè, com hem vist en este apartat històric, esta presenta una gran dificultat (suposa coneixements d'Electromagnetisme i Física estadística) i perquè Planck no concep l'expressió h com quant de radiació electromagnètica.

Concedim una gran importància al desenrotllament històric de les ciències, no tant per "comptar" la història del tema tractat, com per extraure de la dita història els problemes significatius i posar a l'alumne en situació d'abordar-los i resoldre'ls (Solbes i Traver, 1996 i 2003). Per això, proposem iniciar l'estudi dels fenòmens quàntics amb dos dels problemes que van originar la crisi de la Física clàssica: l'efecte fotoelèctric i l'existència d'espectres atòmics.

El procediment seria mostrar com l'efecte fotoelèctric no pot ser explicat per la teoria electromagnètica, per la qual cosa es requerixen nova hipòtesi sobre la naturalesa de la llum que trenquen amb la teoria clàssica. És convenient iniciar ací els alumnes en la idea de dualitat, perquè no incórreguen en l'error de reduir el fotó al seu aspecte corpuscular, tornant a les concepcions de Newton. També és necessari recalcar la quantització de l'energia, que es planteja per primera vegada.

A continuació, s'ha de ressaltar la potència del concepte de fotó, aplicant-ho a nous fenòmens com l'efecte Compton (que només s'aborda a nivell qualitatiu) i els espectres discrets, per a evitar la visió simplista de què les teories s'abandonen a conseqüència d'uns pocs resultats negatius. En ambdós casos és necessari mostrar com la Física clàssica era incapaç d'explicar-los. A l'introduir el model de Bohr és necessari insistir en la quantització de l'energia i del moment angular i en la idea d'estat estacionari.

Alguns autors es manifesten contra l'ús del model de Bohr per a evitar una descripció de l'àtom que incloga òrbites. Ací se segueix l'opció contrària per les següents raons històriques (Solbes i Traver, 1996 i 2003), vàlides no sols en esta, sinó en altres situacions:

- per a familiaritzar els alumnes amb la forma de treball dels científics que elaboren models per a explicar els problemes fins que sorgixen dificultats que obliguen a canviar-los. La utilització dels models o teories clàssics o prequàntics (semiclàssics) és quelcom freqüent en la pràctica corrent de la Física i els científics no es priven de fer-ho sempre que es troben en l'àmbit dels fets que explicava l'anterior model, en el domini de validesa de l'anterior teoria, és a dir, com a aproximacions.
- per a evitar la imatge que són únicament les limitacions de l'Electromagnetisme les que justifiquen la introducció d'idees quàntiques, atés que la crítica del concepte de trajectòria (òrbita) contribuïx a mostrar també les limitacions de la Mecànica clàssica.

La breu revisió històrica ací realitzada posa de manifest la gran complexitat del desenrotllament històric. En primer lloc com a pesar de l'oposició de científics com Compton els seus propis experiments confirmen la hipòtesi heurística d'Einstein, la qual cosa posa de manifest com resulta d'excessiu negar l'ús de criteris per a avaluar els desenrotllaments de la ciència o equiparar la ciència amb qualsevol altre producte cultural com fan alguns filòsofs i sociòlegs de la ciència (Barnes, Latour...) (Osborne, 1996) o com a pesar dels èxits del model de Bohr, prompte van sorgir dificultats que van obligar a modificar-ho i substituir-ho per un model més complex, el de Sommerfeld.

També veiem com en el marc d'una teoria incompleta, l'antiga teoria dels quants, sorgixen aportacions que després permetran el desenrotllament del máser i làser. Finalment, veiem com els mateixos fenòmens poden ser explicats per teories diferents, la mecànica matricial o quàntica de Heisenberg, Born i Jordan i la mecànica ondulatoria de Schrödinger. Este últim va demostrar la identitat d'ambdós, la qual cosa va permetre que els físics, molt més familiaritzats amb les seues equacions diferencials que amb les matrius de Heisenberg, utilitzaren quasi exclusivament la teoria de Schrödinger, cosa també recomanable a nivell didàctic.

D'altra banda, encara que la idea d'un paral·lelisme estricte entre algunes concepcions alternatives dels estudiants i idees científiques errònies aparegudes en la història de la ciència ha sigut qüestionada, la veritat és que a partir dels obstacles que es manifesten al llarg de la història de la ciència es pot extraure informació sobre les dificultats dels estudiants (Saltiel i Viennot, 1985). Destaquem les idees de de Broglie de partícula i onda, de Schrödinger que considera a l'electró difós (només onda), la complementarietat de Bohr, que manté les imatges corpuscular i ondulatoria, encara que no existisquen mai al mateix temps, les contradiccions que posen de manifest les relacions de Heisenberg, etc.

Finalment, la revisió històrica ens permet detectar errors dels textos com atribuir-los a Davisson i Germer el diagrama de difracció en circumferències concèntriques (semblant a l'obtingut per Debye i Scherrer per als rajos X), quan en realitat este va ser obtingut per G.P Thomson i el que van obtindre Davisson i Germer va ser un diagrama de punts (semblant a l'obtingut per Von Laue per als rajos X).

En conseqüència, és recomanable acudir a les interpretacions més recents (Feynman, 1971; Balibar i Levy-Leblond, 1984) que consideren que els electrons, fotons, etc. no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous (els quants) amb un comportament quàntic. En conseqüència, es complixen les relacions d'indeterminació i es fa necessari un nou model per a descriure l'estat i evolució dels quants, diferent dels utilitzats per a les partícules i ones clàssiques: la funció d'ones i la seua interpretació probabilista. I aplicar este concepte a l'estudi de fenòmens previs al mateix: l'efecte fotoelèctric, els espectres, la difracció d'electrons, etc.

3. DISSENY EXPERIMENTALS PER CONTRASTAR LA HIPÒTESI.

En la preparació dels qüestionaris s'ha tingut en compte les següents tècniques usuals d'investigació educativa, és a dir, elaboració d'un primer esbrossament que examinen experts; realització d'un assaig pilot per analitzar la validesa del qüestionari revisat; i reelaboració del qüestionari a la llum dels resultats del assaig pilot.

L'anàlisi quantitativa dels resultats s'ha realitzat independentment per dos investigadors, amb objecte de contrastar la validesa dels resultats obtinguts.

3.1. DISSENY DE LA XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.

3.1.1. XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.

Presentem a continuació la xarxa d'anàlisi de textos que consta de 22 ítems, dels quals alguns estan dividits en subítems, amb la qual cosa tenim un total de 17 subítems. Hem pretès així fer un sondeig que abarque els aspectes més rellevants, a criteri nostre, del tema de física quàntica de 2n de batxillerat.

Cal afegir que els llibres han estat analitzats per dos investigadors.

ÍTEMS	SÍ	NO	AMPLIACIÓ RESPOSTA
ÍTEM 1.1: S'ESMENTEN ELS PROBLEMES QUE POSAREN EN QÜESTIÓ LA FÍSICA CLÀSSICA?			
ÍTEM 1.2: QUINS S'ESMENTEN?			
ÍTEM 2.1: EN L'EFECTE FOTOELÈCTRIC S'ENTÉN EL FOTÓ COM: -Una partícula (interpretació corpuscular de Newton) -Un paquet o quant d'energia -S'aclara el seu comportament dual			
ÍTEM 2.2: EN L'EFECTE COMPTON S'ENTÉN EL FOTÓ COM: -Una partícula (interpretació corpuscular de Newton) -Un paquet o quant d'energia -S'aclara el seu comportament dual			
ÍTEM 3: COM ES REPRESENTA GRÀFICAMENT EL FOTÓ?: -Rajos -Boleta			

-Paquet d'ones -OHP			
ÍTEM 4: ES CLARIFICA QUE L'ENERGIA ESTÀ QUANTIFICADA QUAN L'ELECTRÓ ESTÀ LLIGAT PERÒ NO QUAN ESTÀ LLIURE (O EN LES BANDES)?			
ÍTEM 5.1: ES MOSTREN ALTRES MAGNITUDS QUANTIFICADES?			
ÍTEM 5.2: QUINES?			
ÍTEM 6: S' ESTABLEIXEN CORRESPONDÈNCIES CLARES ENTRE ELS NIVELLS ENERGÈTICS DELS ÀTOMS I LES LÍNIES DELS ESPECTRES D'ABSORCIÓ I EMISSIÓ (O SIMPLEMENT ES LIMITEN A LA FÓRMULA GENERAL $E_n - E_m = hv$)?			
ÍTEM 7: S' INSISTEIX MÉS EN LA IDEA D'ÒRBITES (ONES ESTACIONÀRIES EN LES ÒRBITES)?			
ÍTEM 8.1: ES POSEN EN QÜESTIÓ LES ÒRBITES?			
ÍTEM 8.2: COM?			
ÍTEM 9.1: ES PRESENTEN ELS LÍMITS DEL MODEL DE BOHR?			
ÍTEM 9.2: QUINS?			
ÍTEM 9.3: ES PRESENTA COM UN MODEL PRE-QUÀNTIC?			
ÍTEM 10: S'ASSIMILA EL COMPORTAMENT ONDULATORI DE L'ELECTRÓ A LA DUALITAT, EXCLOENT ALS FOTONS?			
ÍTEM 11: COM S'INTERPRETA LA DUALITAT?: -Ona i partícula, associada o pilot (De Broglie) -Ones de matèria -Ona o partícula, segons experiència -Ni ona ni partícula, sinó objecte quàntic (Feynman)			
ÍTEM 12: ¿S'EXPLIQUEN, I ES CONNECTEN AMB LA DIFRACCIÓ DE LA LLUM, LES EXPERIÈNCIES DE DIFRACCIÓ D'ELECTRONS QUE COMPROVEN LA HIPÒTESI DE DE BROGLIE: DAVISSON I			

GERMER PER REFLEXIÓ EN MONO-CRISTALL (DIAGRAMA DE CERCLES), G.P.THOMPSON, PER TRANSMISSIÓ EN FINA LÀMINA POLICRISTALINA, (DIAGRAMA DE PUNTS)?			
---	--	--	--

<p>ÍTEM 13: COM ES REPRESENTA GRÀFICAMENT L'ELECTRÓ?:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Boleta -Paquet d'ones -OHP 			
<p>ÍTEM 14.1: S'INTRODUEIX L'EX-PERIMENT DE LA DOBLE ESCLETXA?</p>			
<p>ÍTEM 14.2: DE QUINA FORMA?</p>			
<p>ÍTEM 15: ES PLANTEGEN LES RELACIONS D'INDETERMINACIÓ COM:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Un principi d'incertesa -Impossibilitat de mesurar amb $\Delta=0$ dues magnituds conjugades -Es contraposa al determinisme 			
<p>ÍTEM 16: ES RELACIONA LA INCERTESA:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Amb la impossibilitat de mesurar amb precisió pel propi procés de mesura -Amb la naturalesa ondulatoria de l'electró (les ones clàssiques aconsegueixen que $\Delta x \Delta k \sim 1$) -Amb la inexistència de trajectòria 			
<p>ÍTEM 17: LA FUNCIÓ Ψ S'INTRODUEIX:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Solament lligada a la probabilitat -Com funció que representa l'estat del sistema, caracteritzada per les magnituds compatibles del mateix -Orbital (abandó de l'òrbita) 			
<p>ÍTEM 18: S'INTRODUEIX L'ESPIN:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Relacionat amb la rotació de l'electró -Com un nombre quàntic intrínsec -Altres 			
<p>ÍTEM 19: LA QUÀNTICA NOMÉS S'APLICA A OBJECTES MICROSCÒPICS?</p>			
<p>ÍTEM 20: ASSENYALA ELS LÍMITS DE VALIDESA DE LA FÍSICA CLÀSSICA?</p>			
<p>ÍTEM 21: ES MOSTREN LES DIFERÈNCIES ENTRE LA FÍSICA CLÀSSICA I LA FÍSICA QUÀNTICA?</p>			
<p>ÍTEM 22.1: ES PRESENTEN LES MÚLTIPLES RELACIONS DE LA FÍSICA QUÀNTICA AMB LA TECNOLOGIA?</p>			
<p>ÍTEM 22.2: QUINES?</p>			

ÍTEM 22.3: ES PRESENTEN LES MÚLTIPLES RELACIONS DE LA FÍSICA QUÀNTICA AMB LA SOCIETAT?			
ÍTEM 22.4: QUINES?			

3.1.2. CRITERIS PER A LA VALORACIÓ DELS ÍTEMS DE LA XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.

A continuació presentem els criteris per fer la valoració dels ítems corresponents a la xarxa d'anàlisi de textos.

ÍTEM 1.1: S'ESMENTEN ELS PROBLEMES QUE POSAREN EN QÜESTIÓ LA FÍSICA CLÀSSICA?

El criteri que hem adoptat és que es consideren adequats aquells llibres on almenys s'esmenten 3 dels problemes següents: efecte fotoelèctric, efecte Compton, espectres atòmics (i model de Bohr), cos negre, raigs X, experiment de Franck i Hertz. Cal puntualitzar, però, que no hem cregut suficient que només hi facen esment, ja que el programa de 2n de batxillerat obliga que així siga, sinó que també figuraren al principi del tema com una recapitulació dels problemes que la física clàssica no fou capaç de resoldre.

ÍTEM 1.2: QUINS S'ESMENTEN?

S'han considerat adequats per a aquest ítem aquells textos que incloguen qualsevol dels problemes anteriorment esmentats.

ÍTEM 2.1: EN L'EFECTE FOTOELÈCTRIC S'ENTÉN EL FOTÓ COM:

- Una partícula (interpretació corpuscular de Newton)
- Un paquet o quant d'energia
- S'aclara el seu comportament dual

En aquest cas, el text adequat seria aquell que aclarira el comportament dual del fotó, entés com que no és ni ona ni partícula (sinó objecte quàntic), ja que si es parla de paquet o quant d'energia sense afegir més explicacions, els estudiants interpreten el fotó com un ens clàssic.

ÍTEM 2.2: EN L'EFECTE COMPTON S'ENTÉN EL FOTÓ COM:

- Una partícula (interpretació corpuscular de Newton)
- Un paquet o quant d'energia
- S'aclara el seu comportament dual

Novament, el text adequat seria aquell que aclarira el comportament dual del fotó en Compton, entés com que no és ni ona ni partícula (sinó objecte quàntic), ja que si es parla de paquet o quant d'energia sense cap comentari més, els estudiants interpreten el fotó com un objecte clàssic.

ÍTEM 3: COM ES REPRESENTA GRÀFICAMENT EL FOTÓ?:

- Rajos
- Boleta
- Paquet d'ones
- OHP

La imatge més acceptable seria el paquet d'ones, tot i que, per no caure en una concepció gràfica exclusivament ondulatoria o exclusivament corpuscular, hauríem de plasmar gràficament el caràcter dual, la qual cosa és irrepresentable, per tant el més recomanable és evitar aquestes representacions en la mesura del possible. Els rajos corresponen a l'òptica geomètrica, les boletes a la teoria corpuscular de Newton i una ona harmònica plana (OHP) és una representació ideal, que no respon a una situació espacial limitada.

ÍTEM 4: ES CLARIFICA QUE L'ENERGIA ESTÀ QUANTIFICADA QUAN L'ELECTRÓ ESTÀ LLIGAT PERÒ NO QUAN ESTÀ LLIURE (O EN LES BANDES)?

En aquesta qüestió valorem com acceptables els llibres que ens parlen de la diferència energètica fonamental (discretització o no de l'energia) entre un electró lligat i un de lliure (o en les bandes). Els llibres de text no solen contemplar aquesta darrera situació, o siga, l'electró lliure.

ÍTEM 5.1: ES MOSTREN ALTRES MAGNITUDS QUANTIFICADES?

Entre les quals es poden esmentar: el moment angular, que s'introdueix al model de Bohr, el radi de les òrbites permeses de Bohr, la freqüència de la radiació absorbida o emesa en els salts electrònics, o els nombres quàntics n , l , m_l i m_s , que caracteritzen els estats d'energia de l'electró en el model quàntic de Schrödinger.

Hem adoptat com a criteri d'acceptació que es mostre la quantització d'almenys 2 d'aquestes magnituds.

ÍTEM 5.2: QUINES?

Per a aquest ítem hem acceptat com a vàlides qualsevol magnitud quantificada de les esmentades abans.

ÍTEM 6: S' ESTABLEIXEN CORRESPONDÈNCIES CLARES ENTRE ELS NIVELLS ENERGÈTICS DELS ÀTOMS I LES LÍNIES DELS ESPECTRES D'ABSORCIÓ I EMISSIÓ (O SIMPLEMENT ES LIMITEN A LA FÓRMULA GENERAL $E_n - E_m = h\nu$)?

En aquest cas considerariem addients aquells textos on es mostre una clara correspondència entre els diversos salts electrònics entre nivells energètics i les subsegüents línies espectrals.

ÍTEM 7: S' INSISTEIX MÉS EN LA IDEA D'ÒRBITES (ONES ESTACIONÀRIES EN LES ÒRBITES)?

El que es considera adequat en aquest ítem és que els textos es desvinculen de la idea de trajectòria en general, òrbites en concret per als electrons lligats, com a conseqüència de les relacions d'incertesa de Heisenberg.

ÍTEM 8.1: ES POSEN EN QÜESTIÓ LES ÒRBITES?

Com hem dit ja a l'ítem anterior, hi ha d'haver un abandó de les òrbites. Hem d'aclarir que, segons aquests criteris de correcció, no considerem suficient que es diga que es renuncia a parlar d'òrbites, sinó que exigim que hi haja una adequada justificació en termes de les relacions d'incertesa de Heisenberg.

ÍTEM 8.2: COM ES POSEN EN QÜESTIÓ?

En les relacions d'incertesa se'ns diu que és impossible determinar simultàniament i amb imprecisió zero la posició i la quantitat de moviment de, per exemple, un electró. Com a conseqüència d'això, i tenint en compte que per determinar qualsevol trajectòria necessitem conèixer amb precisió la posició i la quantitat de moviment per a cada instant de temps, es pot deduir que aquestes relacions ens aboquen a una manca de sentit del concepte de trajectòria que, a efectes pràctics, es tradueix en una inexistència de trajectòria. Si es tracta d'un electró lligat, podem parlar, doncs, d'inexistència d'òrbita.

Així, tot comentari que vaja en la línia del que acabem d'exposar es considerarà adequat per a aquest ítem.

ÍTEM 9.1: ES PRESENTEN ELS LÍMITS DEL MODEL DE BOHR?

Esta vegada el criteri és numèric, de tal forma que el que es pot demanar, al nostre entendre, és que els llibres donen almenys 2 limitacions d'entre les següents del model de Bohr: no explica el desdoblament de les ratlles espectrals, la major intensitat d'unes línies respecte d'altres, l'amplada de les mateixes (tot això en el propi espectre de

l'àtom d'hidrogen), tampoc explica els espectres d'àtoms polieletrònics, ni l'existència de direccions privilegiades en els enllaços atòmics.

ÍTEM 9.2: QUINS?

Per a aquest ítem hem acceptat com a vàlida qualsevol limitació de les esmentades abans.

ÍTEM 9.3: ES PRESENTA COM UN MODEL PRE-QUÀNTIC?

Consideraríem com a acceptable com a pre-quàntic si s'explicita clarament que en el model de Bohr hi ha trets clàssics i quàntics.

ÍTEM 10: S'ASSIMILA EL COMPORTAMENT ONDULATORI DE L'ELECTRÓ A LA DUALITAT, EXCLOENT ALS FOTONS?

El que considerem addient ací és que se'ns parle dels electrons i dels fotons en termes d'igualtat, és a dir, que es mostre que ambdós presenten un comportament dual. Cal puntualitzar que, en aquest ítem, no entrem a valorar si hi ha una correcta interpretació d'aquesta dualitat, ja que ho fem a l'ítem següent.

ÍTEM 11: COM S'INTERPRETA LA DUALITAT?:

- Ona i partícula, associada o pilot (De Broglie)
- Ones de matèria
- Ona o partícula, segons experiència
- Ni ona ni partícula, sinó objecte quàntic (Feynman)

La concepció de dualitat que considerem adequada és la que fa referència que els electrons, protons, fotons, etc. no són ni ones ni partícules en sentit clàssic, sinó que els hem de considerar com a objectes nous amb un comportament nou, diferent del clàssic, un comportament quàntic. Això no obstant, quan tenim un gran nombre d'aquests objectes, el seu comportament pot aproximar-se al d'un ens clàssic, ja siga ona o partícula, i per tant la seua evolució pot ser controlada per les lleis de la mecànica clàssica.

ÍTEM 12: ¿S'EXPLIQUEN, I ES CONNECTEN AMB LA DIFRACCIÓ DE LA LLUM, LES EXPERIÈNCIES DE DIFRACCIÓ D'ELECTRONS QUE COMPROVEN LA HIPÒTESI DE DE BROGLIE: DAVISSON I GERMER PER REFLEXIÓ EN MONOCRISTALL (DIAGRAMA DE CERCLES), G.P.THOMPSON, PER TRANSMISSIÓ EN FINA LÀMINA POLICRISTALINA, (DIAGRAMA DE PUNTS)?

Creiem que és interessant i adequat que els textos no només expliquen els experiments de difracció d'electrons, sinó que facen la connexió amb el que succeeix amb la llum, cosa que, des del nostre punt de vista, es pot fer millor si s'usa l'experiment de difracció d'electrons per transmissió, ja que quan s'estudia la difracció en llum, els diagrames que s'obtenen també són de punts, essent, per tant, més fàcil i coherent la comparació.

ÍTEM 13: COM ES REPRESENTA GRÀFICAMENT L'ELECTRÓ?:

- Boleta
- Paquet d'ones
- OHP

Estem ara en un cas similar al de l'ítem 3 (com es representa gràficament el fotó?). Com ja hem comentat en aquell ítem, donada la impossibilitat de poder representar gràficament la dualitat, el més recomanable seria evitar aquest tipus de representacions si no volem caure en una visió exclusivament ondulatoria o exclusivament corpuscular. En aquest sentit, la boleta respon al model de partícula clàssica, el paquet d'ones és admissible (si s'aclareix la dualitat en el text) i una ona harmònica plana (OHP) és una representació ideal, que no respon a una situació espacial limitada.

ÍTEM 14.1: S'INTRODUEIX L'EXPERIMENT DE LA DOBLE ESCLETXA?

El criteri que hem seguit és el d'acceptar com a vàlid aquell llibre que faça una introducció adequada de l'experiment de la doble escletxa, o bé amb electrons, o bé amb fotons, és a dir, no ens és suficient que se'n parli, sinó que s'ha de fer correctament. Així, el que es demana és que es mostri clarament que estem davant d'objectes que tenen un comportament intrínsec, diferent del dels clàssics, que es posa de manifest en aquest experiment.

ÍTEM 14.2: DE QUINA FORMA?

Si prenem, per exemple, electrons, aquest comportament especial de què parlàvem es posa de manifest quan, si l'experiment es fa sense usar cap mecanisme que detecte el pas dels electrons per les escletxes, el resultat és una interferència, mentre que si s'usa aquest mecanisme, siga quin siga, el resultat és que no hi ha interferència. És més, en el segon cas, és impossible predir per quina de les escletxes va a passar l'electró, i en el primer, ni tan sols es pot afirmar ni desmentir que l'electró pugui passar per ambdues a la vegada, o més encara, no es pot saber què fa. Esta limitació de coneixement no és una limitació relacionada amb el procés de mesura, sinó que ens la imposa la pròpia naturalesa, que té un caràcter quàntic, un caràcter intrínsecament probabilista.

Per tant, considerariem vàlida tota explicació de l'experiment que oriente els alumnes en aquesta línia.

ÍTEM 15: ES PLANTEGEN LES RELACIONS D'INDETERMINACIÓ COM:

- Un principi d'incertesa
- Impossibilitat de mesurar amb $\Delta=0$ dues magnituds conjugades
- Es contraposa al determinisme

En aquesta ocasió pensem que seria adequat que els llibres no introduïren les relacions d'incertesa titllant-les de principi, ja que en realitat es tracta d'un postulat, que deixaren clara la seua significació, o siga, la impossibilitat de mesurar simultàniament i amb imprecisió zero dues magnituds conjugades (el producte d'aquestes té dimensions d'acció), i que ho contrastaren amb el cas clàssic, on és perfectament factible conèixer dues magnituds simultàniament i amb imprecisió zero. O, dit d'una altra manera, el determinisme de la mecànica clàssica front a l'indeterminisme de la mecànica quàntica.

ÍTEM 16: ES RELACIONA LA INCERTESA:

- Amb la impossibilitat de mesurar amb precisió pel propi procés de mesura
- Amb la naturalesa ondulatoria de l'electró (les ones clàssiques aconsegueixen que $\Delta x \Delta k \sim 1$)
- Amb la naturalesa dels ens quàntics

La interpretació, al nostre criteri, més adequada és que és la pròpia naturalesa dels ens quàntics la que ens imposa els límits definitius en aquestes determinacions.

Una altra interpretació admissible és la que usa la imatge del paquet d'ones per explicar les relacions, tot i que per a admetre-la, caldria que s'especificara abans el caràcter dual de l'objecte que es pren com a paquet, cosa que pot servir de fre a que els alumnes es decanten per interpretar aquest objecte com una ona en sentit clàssic.

D'altra banda, totes aquelles interpretacions on es lliguen les incerteses amb el fet que el propi procés de mesura altera allò observat, les considerem inadequades, donat que aquesta alteració de què parlem no és genuïna de la física quàntica, ja que no oblidem que també es dona en física clàssica: recordem que la mesura de la temperatura amb un termòmetre ens altera el valor d'aquesta temperatura, la mesura del voltatge amb un voltímetre ens altera el valor d'aquest voltatge, etc., per tant no és la que hauríem de considerar com la raó de fons en el cas de les relacions d'incertesa, que van, com hem dit al principi d'aquesta discussió, molt més enllà.

ÍTEM 17: LA FUNCIO Ψ S'INTRODUEIX:

- Solament lligada a la probabilitat
- Com funció que representa l'estat del sistema, caracteritzada per les magnituds compatibles del mateix
- Orbital (abandó de l'òrbita)

Considerem que els textos adequats serien aquells on es fera explícit que la funció d'ona té un valor propi, que no és només quelcom que elevat al quadrat ens proporciona

probabilitats, sinó que cal que es presente com la funció que representa l'estat del sistema, de manera anàloga a com ho fan la posició i la velocitat en mecànica clàssica. També considerem admissible una definició de la funció d'ona en termes d'amplitud de probabilitat.

ÍTEM 18: S'INTRODUEIX L'ESPIN:

- Relacionat amb la rotació de l'electró
- Com un nombre quàntic intrínsec
- Altres

Pel que respecta a aquest ítem, el que seria addient per part dels llibres és presentar l'espín com una propietat intrínseca, definida pel nombre quàntic intrínsec m_s , sense cap anàleg clàssic, sobretot, no relacionar-lo amb cap rotació, interpretació aquesta darrera desmentida clarament per la comunitat científica, després que Uhlenbeck i Goudsmit la introduïren, com ja s'ha explicat a la fonamentació històrica.

ÍTEM 19: LA QUÀNTICA NOMÉS S'APLICA A OBJECTES MICROSCÒPICS?

En aquest cas, el criteri que proposem és que s'accepten aquells tractaments en què l'estudiant no es quede amb la concepció que la física quàntica només importa a nivell microscòpic, sinó que es faça èmfasi en la multiplicitat d'aplicacions i d'implicacions d'aquesta en el món macroscòpic.

ÍTEM 20: ASSENYALA ELS LÍMITS DE VALIDESA DE LA FÍSICA CLÀSSICA?

En aquest punt, és important assenyalar que els límits de validesa de la física clàssica vénen donats per les relacions d'incertesa de Heisenberg, en el sentit que quan el producte de les imprecisions de dues magnituds conjugades és molt més gran que la constant de Planck, el problema on resulten involucrades pot afrontar-se des d'un tractament clàssic, mentre que, en cas contrari, és prescriptiu aplicar la mecànica quàntica.

Acceptem, per aquestes raó, com a vàlids, aquells llibres on quede constància de la concepció abans esmentada.

ÍTEM 21: ES MOSTREN LES DIFERÈNCIES ENTRE LA FÍSICA CLÀSSICA I LA FÍSICA QUÀNTICA?

Hem de dir que novament el criteri a aplicar és quantitatiu, de forma que es poden considerar adequats aquells textos on es mostren, almenys, 3 de les següents diferències:

1. Caràcter continu de magnituds com l'energia i el moment angular front al caràcter discret.

2. Emissió de radiació de les càrregues accelerades lligades (igual que les lliures) front a l'emissió de radiació de les càrregues lligades només en les transicions de nivell energètic (a diferència de les lliures).
3. Partícules i camps clàssics front a quants (electrons, fotons, etc) amb un comportament probabilista.
4. Possibilitat front a impossibilitat de determinar simultàniament amb absoluta precisió la posició i velocitat d'una partícula.
5. Trajectòries definides front a la manca de sentit del concepte de trajectòria per a les "partícules".

ÍTEM 22.1: ES PRESENTEN LES MÚLTIPLES RELACIONS DE LA FÍSICA QUÀNTICA AMB LA TECNOLOGIA?

Hem proposat també, en aquest cas, un criteri numèric, de forma que considerem addients aquells llibres de text que incloguen almenys 5 exemples de relacions de la física quàntica amb la tecnologia. Per la nostra part, presentem les següents:

La microelectrònica (base dels ordinadors, les telecomunicacions, la robòtica, l'automatització), el làser (entre les seues aplicacions tenim els lectors de codis de barres en els supermercats, de discs compactes CD i de videodiscs, les bèl·liques de direcció de projectils, les industrials de direcció de túnels, soldadura i gravat de metalls, taladrat de materials durs, tallat de teixits, etc., la microcirurgia, les científiques en experiències d'interferència, difracció holografia, etc., les impressores làser), el microscopi electrònic, les cèl·lules fotoelèctriques i les seues múltiples aplicacions, la física nuclear (centrals, bombes, medicina nuclear), els nous materials (fruit de la química moderna).

ÍTEM 22.2: QUINES?

Per a aquest ítem hem acceptat com a vàlida qualsevol relació de les esmentades abans, o qualsevol altra que estíem correcta.

ÍTEM 22.3: ES PRESENTEN LES MÚLTIPLES RELACIONS DE LA FÍSICA QUÀNTICA AMB LA SOCIETAT?

Hem proposat també, en aquest cas, un criteri numèric, de forma que considerem addients aquells llibres de text que incloguen almenys 2 exemples de relacions de la física quàntica amb la societat. Per la nostra part, presentem les següents:

La quàntica influí en filòsofs com Russell o els neopositivistes Carnap, Reichenbach, Popper, etc. Els filòsofs idealistes com Cassirer i físics amb idees semblants (Heisenberg, Compton o Eddington) capitalitzen l' indeterminisme en defensa de les

seues idees metafísiques (el lliure arbitri, la immortalitat, Déu). Les lleis probabilistes quàntiques entren en conflicte amb la ideologia de l'estat soviètic, el qual produí acusacions de "idealisme burgés" a Frenkel i Khaikin, pèrdua de càtedres a Landau i Lifschitz, etc. També influeix en literatura ("El jardí de senderols que es bifurquen" de Borges), en ciència ficció (universos paral·lels...), art (Dalí).

ÍTEM 22.4: QUINES?

Per a aquest ítem hem acceptat com a vàlida qualsevol relació de les esmentades abans, o qualsevol altra que estímem correcta.

3.2. DISSENY DEL QÜESTIONARI DE PROFESSORS.

3.2.1. QÜESTIONARI DE PROFESSORS.

Presentem a continuació el qüestionari de professors que consta de 7 ítems, els quals intenten fer un sondeig que abarque els aspectes més importants, al nostre entendre, del tema de física quàntica de 2n de batxillerat.

Cal dir que prèviament es va fer un assaig pilot que ens va permetre detectar i eliminar alguns dels ítems que estaven inicialment al qüestionari.

ÍTEMS
ÍTEM 1: QUINS ASPECTES O ACTIVITATS CREUS QUE INTERESSA PROPOSAR A L'INICI DEL TEMA DE FÍSICA QUÀNTICA DE 2N DE BATXILLERAT?
ÍTEM 2: QUINES CREUS QUE SÓN LES PRINCIPALS DIFICULTATS QUE PODEN TINDRE ELS ALUMNES A L'HORA DE TRACTAR EN CLASSE EL TEMA DE FÍSICA QUÀNTICA?
ÍTEM 3: QUINS OBJECTIUS IMPORTANTS PODEN SERVIR COM A INDICADORS QUE L'ESTUDIANT HA COMPRÉS EL TEMA AL QUAL ENS REFERIM?
ÍTEM 4: COM EXPLICARIES LA DUALITAT ONA-PARTÍCULA?
ÍTEM 5: COM EXPLICARIES LES RELACIONS D'INDETERMINACIÓ?
ÍTEM 6: COM EXPLICARIES ALS ALUMNES EL CONCEPTE DE PROBABILITAT PER INTENTAR QUE CAPTEN EL SEU SIGNIFICAT?
ÍTEM 7: ASSENYALA APLICACIONS TANT TEÒRIQUES COM PRÀCTIQUES DE LA QUÀNTICA

3.2.2. CRITERIS PER A LA VALORACIÓ DELS ÍTEMS DEL QÜESTIONARI DE PROFESSORS.

A continuació presentem els criteris per fer la valoració dels ítems corresponents al qüestionari de professors.

ÍTEM 1: QUINS ASPECTES O ACTIVITATS CREUS QUE INTERESSA PROPOSAR A L'INICI DEL TEMA DE FÍSICA QUÀNTICA DE 2N DE BATXILLERAT?

El que seria adequat en aquest ítem és que els professors proposaren activitats per posar de relleu que el sorgiment de la física moderna, en concret de la física quàntica, ve com a conseqüència d'una pèrdua de "credibilitat" en els models clàssics a l'hora d'explicar fenòmens com l'efecte fotoelèctric o l'estabilitat dels àtoms, fet que deriva en una crisi, que pot contrastar-se a la viscuda quan la física aristotèl·lico-escolàstica, o també anomenada del sentit comú, va donar pas a la física clàssica.

D'altra banda, aquesta crisi de què parlem, no només deriva en el naixement de la física quàntica, sinó que altres problemes no explicables tampoc per la física clàssica, sobretot l'existència d'un límit natural en la velocitat dels objectes, acaben sent la porta d'entrada cap a la física relativista.

Tot açò seria interessant comentar-ho a l'inici del tema de física quàntica, per tal de situar als alumnes en el context adequat.

ÍTEM 2: QUINES CREUS QUE SÓN LES PRINCIPALS DIFICULTATS QUE PODEN TINDRE ELS ALUMNES A L'HORA DE TRACTAR EN CLASSE EL TEMA DE FÍSICA QUÀNTICA?

Nosaltres creiem que les respostes adequades han d'incloure les següents dificultats:

Dificultats a l'hora d'entendre la pròpia física newtoniana en els seus conceptes més bàsics.
Veuran el fotó com una partícula clàssica.
Les òrbites dels electrons. No sabran relacionar un salt d'un electró entre 2 nivells amb la corresponent banda de color de l'espectre.
Veuran l'electró com a partícula clàssica o bé amb una interpretació errònia de dualitat (ones i partícules, ones o partícules segons l'experiència).
No tindran una imatge clara del que representa la Ψ i, per tant, un orbital. No tindran clars els conceptes de probabilitat.
Interpretaran les relacions d'incertesa com un error en la mesura per la petitesa de l'electró, el protó, etc. Mantindran el determinisme o les òrbites clàssiques.

No tindran clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuran la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana.

No veuran les connexions de la quàntica amb la tecnologia i la societat.

ÍTEM 3: QUINS OBJECTIUS IMPORTANTS PODEN SERVIR COM A INDICADORS QUE L'ESTUDIANT HA COMPRÉS EL TEMA AL QUAL ENS REFERIM?

Considerem que les respostes adequades han d'incloure els següents objectius:

1. Comprendre que la física clàssica (FC) funciona amb els models de partícula i ona, deterministes, que no poden explicar una sèrie d'experiències

2. Comprendre que els electrons, protons, fotons, etc. no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous amb un comportament nou, el quàntic.

3. Explicar la quantització de la llum, la matèria i determinades magnituds (E; L...)

4. Comprendre la funció d'estat Ψ i la seua interpretació probabilista

5. Entendre el significat de les relacions d'incertesa de Heisenberg

6. Assenyalar els límits de validesa de la FC i indicar les diferències més notables entre FC i física quàntica (FQ)

7. Valorar l'important desenvolupament científic i tècnic que suposà la FQ

ÍTEM 4: COM EXPLICARIES LA DUALITAT ONA-PARTÍCULA?

Es consideraria adequada una resposta que introduïra la hipòtesi de De Broglie, a partir d'aquesta entrar en els experiments de difracció d'electrons en els termes que hem comentat en els criteris de valoració dels ítems del qüestionari de llibres de text, per a finalment oferir la interpretació de Feynman sobre la dualitat, interpretació a la qual li donem suport, i que presentem parcialment:

“ No obstant podem dir alguna cosa més: els electrons es comporten exactament com la llum. El comportament quàntic dels objectes atòmics (electrons, protons, neutrons, fotons, etc.) és el mateix per a tots ells. Tots són “ones de partícules” o com es vulguen anomenar. D'aquesta manera, tot el que sabem de les propietats dels electrons (...) ho aplicarem també a totes les “partícules” incloent els fotons de llum”.

En resum, els electrons o els fotons, per exemple, no són ni petites boles (partícules) ni petites onades (ones) i han de ser absolutament concebuts com a objectes de tipus nou, els quantons.

Per tant, un quantó no és ni una partícula clàssica ni un camp clàssic, que són sols models aproximats que descriuen el comportament d'un gran nombre de quantons.

ÍTEM 5: COM EXPLICARIES LES RELACIONS D'INDETERMINACIÓ?

Consideraríem addient una contestació on s'introduïren aquestes relacions d'indeterminació explicant-les en contraposició al determinisme clàssic, i en què quan es posaren les expressions matemàtiques es clarificara que es tracta del producte de les imprecisions (excepte) de dues magnituds conjugades (el seu producte té dimensions d'acció). En el cas de la relació $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$, Δt representa un interval de temps característic de l'evolució del sistema (Messiah, 1973).

Fer veure també que, una de les conseqüències més importants de la relació que lliga posició i moment, és la pèrdua de sentit del concepte de trajectòria.

El darrer pas seria posar de relleu que les pròpies relacions d'incertesa constitueixen els límits de validesa de la física clàssica.

ÍTEM 6: COM EXPLICARIES ALS ALUMNES EL CONCEPTE DE PROBABILITAT PER INTENTAR QUE CAPTEN EL SEU SIGNIFICAT?

Tota resposta que faça referència a una probabilitat intrínseca de sistemes quàntics com electrons, protons, fotons, etc. la considerem adequada. Per exemple el fet que, en l'experiment de doble escletxa amb electrons o fotons, no es puga predir la trajectòria de l'electró, sinó únicament la probabilitat que arribe a un punt o altre del detector.

Val a dir, però, que aquesta probabilitat intrínseca no es limita només a qüestions de localització. També existeix la probabilitat de trobar-se en un determinat estat de polarització, la probabilitat de tindre un valor o un altre de spin, o de ser disperat amb un angle determinat, o la d'emissió i absorció, etc.

És convenient recalcar la connexió de la interpretació probabilista amb la dualitat i la indeterminació que, en impedir descriure l'estat de l'electró en un instant determinat donant simultàniament els valors de les coordenades i les velocitats com en mecànica clàssica, únicament permeten predir les probabilitats dels diferents valors que poden obtindre's en mesurar les coordenades o la magnitud que es tracte (Solbes i Tarín, 1996).

Altrament, si la probabilitat és descrita en termes d'una probabilitat igual que la clàssica, creem inadequada la resposta.

ÍTEM 7: ASSENYALA APLICACIONS TANT TEÒRIQUES COM PRÀCTIQUES DE LA QUÀNTICA

Entre les aplicacions pràctiques que, a criteri nostre, es poden assenyalar, proposem les següents:

El làser (entre les seues aplicacions tenim els lectors de codis de barres en els supermercats, de discs compactes CD i de videodiscs, les bèl·liques de direcció de

projectils, les industrials de direcció de túnels, soldadura i gravat de metalls, taladrat de materials durs, tallat de teixits, etc., la microcirurgia, les científiques en experiències d'interferència, difracció holografia, etc., les impressores làser), el microscopi electrònic, les cèl·lules fotoelèctriques i les seues múltiples aplicacions, centrals nuclears, bombes, medicina nuclear, els nous materials (fruit de la química moderna), la nanotecnologia.

Entre les aplicacions teòriques que, pensem, es poden indicar, proposem les següents:

La microelectrònica (base dels ordinadors, les telecomunicacions, la robòtica, l'automatització), la física nuclear i de partícules, l'òptica quàntica, la teoria quàntica de camps, l'electrodinàmica quàntica, la computació quàntica, l'encriptatge quàntic.

3.3. DISSENY DEL QÜESTIONARI D'ALUMNES

3.3.1. QÜESTIONARI D'ALUMNES.

Presentem a continuació el qüestionari presentat als alumnes, que consta de 9 ítems, la major part dels quals es divideixen en subítems, havent-hi un total de 15 subítems. Pretenem, doncs, fer un exhaustiu sondeig que abarque els aspectes més fonamentals, des del nostre punt de vista, del tema de física quàntica de 2n de batxillerat.

Cal esmentar que prèviament es va fer un assaig pilot que ens va permetre detectar i eliminar alguns dels ítems que estaven inicialment al qüestionari.

ÍTEMS
ÍTEM 1.1: QUÈ ÉS UN ESPECTRE DISCONTINU?
ÍTEM 1.2: COM EXPLICA EL MODEL DE BOHR ELS ESPECTRES DISCONTINUS?
ÍTEM 1.3: POT TINDRE QUALSEVOL VALOR L'ENERGIA D'UN ELECTRÓ LLIGAT EN UN ÀTOM D'HIDROGEN? JUSTIFICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 2.1: QUINA IDEA TENS D'UNA PARTÍCULA?
ÍTEM 2.2: QUINA IDEA TENS D'UNA ONA?
ÍTEM 2.3: QUINA IDEA TENS D'UN ELECTRÓ?
ÍTEM 2.4: QUINA IDEA TENS D'UN FOTÓ?
ÍTEM 3.1: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN PERDIGÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 3.2: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA? EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 3.3: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN ELECTRÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 3.4: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA? EXPLICA-HO

BREUMENT.
ÍTEM 4.1: EL DETERMINISME CLÀSSIC AFIRMA QUE SI ES CONEIXEN LES CONDICIONS INICIALS D'UN SISTEMA I LA SEUA EQUACIÓ DE MOVIMENT (p.e un MRUA) PODEM PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA SOBRE EL MATEIX. EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 4.2: S'APLICA AQUEST DETERMINISME IGUALMENT ALS ÀTOMS, ELECTRONS, FOTONS, ETC.? JUSTIFICA-HO.
ÍTEM 5.1: COM ES CARACTERITZA EL MOVIMENT (O ESTAT DE MOVIMENT) D'UN PERDIGÓ EN UN INSTANT DONAT?.
ÍTEM 5.2: COM ES CARACTERITZA L' ESTAT D'UN ELECTRÓ?
ÍTEM 6: LA PROBABILITAT S'USA QUAN NO ÉS POSSIBLE PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA. S'UTILITZA EN L'ESTUDI DE FOTONS, ELECTRONS? JUSTIFICA LA RESPOSTA.
ÍTEM 7: EN QUINES SITUACIONS DEIXA DE SER VÀLIDA LA FÍSICA CLÀSSICA?.
ÍTEM 8: QUINES DIFERÈNCIES HI HA ENTRE LA FÍSICA CLÀSSICA I LA FÍSICA QUÀNTICA?.
ÍTEM 9: QUINES IMPLICACIONS TECNOLÒGIQUES I SOCIALS CONEIXES DE LA FÍSICA QUÀNTICA?

3.3.2. CRITERIS PER A LA VALORACIÓ DELS ÍTEMS DEL QÜESTIONARI D'ALUMNES.

A continuació presentem els criteris per fer la valoració dels ítems corresponents al qüestionari d'alumnes.

ÍTEM 1.1: QUÈ ÉS UN ESPECTRE DISCONTINU?

Considerem que el concepte adequat d'espectre d'absorció o d'emissió atòmica d'un element és aquell que el caracteritza com el conjunt discret de freqüències absorbides o emeses pels àtoms d'aquell element, i que alhora recalca el seu caràcter únic.

ÍTEM 1.2: COM EXPLICA EL MODEL DE BOHR ELS ESPECTRES DISCONTINUS?

Considerem una resposta addient aquella que afirme que Bohr ho explica perquè l'electró només pot estar en estats amb energia E (i moment angular L) ben definits, i l'emissió o absorció d'energia radiant es produeix quan l'electró passa d'un estat (òrbita) a un altre, essent la freqüència ν de la radiació emesa o absorbida proporcional a la diferència d'energia entre nivells, $E_n - E_m = h\nu$.

ÍTEM 1.3: POT TINDRE QUALSEVOL VALOR L'ENERGIA D'UN ELECTRÓ LLIGAT EN UN ÀTOM D'HIDROGEN? JUSTIFICA-HO BREUMENT.

Pensem que la resposta adequada és no, ja que de la infinitat d'òrbites que permet la física clàssica, l' electró només pot moure's en les que el moment angular orbital es $mvr=nh/2\pi$, on $n=1,2,3\dots$. En conseqüència, l'energia de l'electró està quantificada pel número quàntic principal n .

ÍTEM 2.1: QUINA IDEA TENS D'UNA PARTÍCULA?

El concepte adequat al nostre entendre és el que parla d'una partícula com una petita porció de matèria, de massa m , que es mou, evoluciona d'acord amb les lleis de Newton.

ÍTEM 2.2: QUINA IDEA TENS D'UNA ONA?

Creem que la imatge adequada d'ona és la d'una vibració que es propaga en l'espai, de forma que transmet energia (però no matèria) de forma contínua, i es distingeix dels fluxos de partícules per les propietats d'interferència i difracció. Es propaga seguint una equació d'ones (D'Alambert).

ÍTEM 2.3: QUINA IDEA TENS D'UN ELECTRÓ?

Considerem que el concepte adequat d'electró és el d'una "partícula" elemental carregada negativament (amb 0.5 MeV de massa i spin 1/2) que constitueix un dels components fonamentals de l'àtom, i que no és ni una partícula clàssica ni un camp (ona) clàssic.

ÍTEM 2.4: QUINA IDEA TENS D'UN FOTÓ?

Estimem que el concepte adequat de fotó és aquell que el caracteritza com el paquet o quant d'energia que constitueix la radiació electromagnètica, sense massa (es propaguen amb velocitat c) ni càrrega, i que, de la mateixa manera que l'electró, no és ni una partícula clàssica ni un camp clàssic.

ÍTEM 3.1: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN PERDIGÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.

Pensem que la resposta adequada és sí, donat que res prohibeix que la posició i velocitat d'un perdigó (que podem considerar com una partícula clàssica en bona aproximació) es

coneguen simultàniament (ambdues amb altíssima precisió), a partir de les equacions de moviment que es dedueixen de la 2^a llei de Newton.

ÍTEM 3.2: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA?
EXPLICA-HO BREUMENT.

Igualment sí es pot representar la trajectòria del perdigó, ja que aquesta es pot obtenir a través de les equacions de moviment ja esmentades anteriorment.

ÍTEM 3.3: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN ELECTRÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.

Des del nostre punt de vista, la contestació addient és que no es poden determinar simultàniament amb precisió absoluta la posició x i la quantitat de moviment p de l'electró, donat que les relacions d'incertesa de Heisenberg ho impedeixen.

ÍTEM 3.4: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA?
EXPLICA-HO BREUMENT.

Creiem que la resposta adequada és que no es pot determinar (i encara menys representar) la trajectòria de l'electró, com a conseqüència de les relacions d'incertesa de Heisenberg, que impedeixen determinar simultàniament amb precisió absoluta la posició x i la quantitat de moviment p d'aquest, on els límits d'aquesta imprecisió venen donats per $\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$.

ÍTEM 4.1: EL DETERMINISME CLÀSSIC AFIRMA QUE SI ES CONEIXEN LES CONDICIONS INICIALS D'UN SISTEMA I LA SEUA EQUACIÓ DE MOVIMENT (p.e un MRUA) PODEM PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA SOBRE EL MATEIX. EXPLICA-HO BREUMENT.

Pensem que el comentari addient, en aquest cas, és que la mecànica clàssica permet, si coneixem l'equació de moviment $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ i l'estat del sistema en un instant donat, és a dir, les condicions inicials, determinar l'estat en qualsevol altre instant.

ÍTEM 4.2: S'APLICA AQUEST DETERMINISME IGUALMENT ALS ÀTOMS, ELECTRONS, FOTONS, ETC.? JUSTIFICA-HO.

Al nostre entendre, seria adequat dir que no es pot aplicar igualment el determinisme a estos objectes, ja que, per exemple en el cas de l'electró, s'associa, de forma qualitativa, el seu caràcter ondulatori a una certa deslocalització que impedeix situar-lo en un punt determinat. S'introdueix, per tant, una certa indeterminació en el moviment que pot

seguir l'electró, per la qual cosa aquest mancarà d'una trajectòria absolutament determinada. En el fons d'aquest argument, subjauen les relacions d'indeterminació de Heisenberg.

ÍTEM 5.1: COM ES CARACTERITZA EL MOVIMENT (O ESTAT DE MOVIMENT) D'UN PERDIGÓ EN UN INSTANT DONAT?.

El tractament adequat a l'hora de descriure el moviment d'un perdigó (que podem considerar en bona aproximació com una partícula en sentit clàssic) en un instant donat és mitjançant les magnituds de posició \mathbf{r} i velocitat \mathbf{v} (o quantitat de moviment \mathbf{p}), i en qualsevol instant mitjançant la seua equació de moviment, ja que el perdigó es regeix segons la mecànica clàssica.

ÍTEM 5.2: COM ES CARACTERITZA L' ESTAT D'UN ELECTRÓ?

Caracteritzar de forma adequada l'estat d'un electró, ha de fer-se en base a un model més general que no el clàssic per descriure el seu comportament, a partir del que Schrödinger va anomenar funció d'ones o funció d'estat Ψ , que s'obté resolent la denominada equació de Schrödinger. Model que hem d'utilitzar perquè els electrons, fotons, etc., no són ni simplement ones ni simplement partícules, sinó objectes nous amb un comportament quàntic.

ÍTEM 6: LA PROBABILITAT S'USA QUAN NO ÉS POSSIBLE PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA. S'UTILITZA EN L'ESTUDI DE FOTONS, ELECTRONS?. JUSTIFICA LA RESPOSTA.

La contestació addient és que sí s'utilitza la probabilitat, que ve donada pel quadrat de la funció d'estat Ψ d'un sistema quàntic (electró, àtom, etc.). Segons Born $|\Psi(\mathbf{r},t)|^2$ representa la probabilitat per unitat de volum de trobar-lo.

ÍTEM 7: EN QUINES SITUACIONS DEIXA DE SER VÀLIDA LA FÍSICA CLÀSSICA?.

La següent és una concepció adequada del que podem anomenar el límit clàssic: quan el producte de dues magnituds conjugades pren un valor numèric superior a la constant de Planck ens trobem en el domini de la física clàssica. Encara que generalment açò succeeix en els fenòmens macroscòpics, hi ha també fenòmens i dispositius macroscòpics de caràcter quàntic (p.e., el làser, els díodes i transistors, els superconductors, l'heli superfluid, etc).

ÍTEM 8: QUINES DIFERÈNCIES HI HA ENTRE LA FÍSICA CLÀSSICA I LA FÍSICA QUÀNTICA?.

Es poden esmentar les següents diferències entre la visió clàssica i la quàntica del comportament de la matèria:

1. Caràcter continu de magnituds com l' energia i el moment angular front al caràcter discret.
2. Emissió de radiació de les càrregues accelerades lligades (igual que les lliures) front a l'emissió de radiació de les càrregues lligades només en les transicions de nivell energètic (a diferència de les lliures).
3. Partícules i camps clàssics front a quants (electrons, fotons, etc) amb un comportament probabilista.
4. Possibilitat front a impossibilitat de determinar simultàniament amb absoluta precisió la posició i velocitat d'una partícula.
5. Trajectòries definides front a la manca de sentit del concepte de trajectòria per a les "partícules".

Consideraríem acceptables totes aquelles respostes on almenys s'esmentaren dues d'aquestes diferències, ja que la pregunta està formulada en plural.

ÍTEM 9: QUINES IMPLICACIONS TECNOLÒGIQUES I SOCIALS CONEIXES DE LA FÍSICA QUÀNTICA?

Pel que fa a les implicacions tecnològiques, consideraríem vàlides aquelles respostes on almenys resulten involucrades tres de les implicacions següents:

La microelectrònica (base dels ordinadors, les telecomunicacions, la robòtica, l'automatització), el làser (entre les seues aplicacions tenim els lectors de codis de barres en els supermercats, de discs compactes CD i de videodiscs, les bèl·liques de direcció de projectils, les industrials de direcció de túnels, soldadura i gravat de metalls, taladrat de materials durs, tallat de teixits, etc., la microcirurgia, les científiques en experiències d' interferència, difracció holografia, etc., les impressores làser), el microscopi electrònic, les cèl·lules fotoelèctriques i les seues múltiples aplicacions, la física nuclear (centrals, bombes, medicina nuclear), els nous materials (fruit de la química moderna).

Pel que respecta a les socials, únicament n'exigiríem dues de les que s'esmenten a continuació:

La quàntica influí en filòsofs com Russell o els neopositivistes Carnap, Reichenbach, Popper, etc. Els filòsofs idealistes com Cassirer i físics amb idees semblants (Heisenberg, Compton o Eddington) capitalitzen l' indeterminisme en defensa de les seues idees metafísiques (el lliure arbitri, la immortalitat, Déu). Les lleis probabilistes quàntiques entren en conflicte amb la ideologia de l'estat soviètic, el qual produí

acusacions de “idealisme burgés” a Frenkel i Khaikin, pèrdua de càtedres a Landau i Lifschitz, etc. També influeix en literatura (“El jardí de senderols que es bifurquen” de Borges), en ciència ficció (universos paral·lels...), art (Dalí).

3.3.3. CONNEXIÓ DELS ÍTEMS DEL QÜESTIONARI D'ALUMNES AMB ELS OBJECTIUS I LES DIFICULTATS.

Tot seguit presentem una taula on es relacionen els ítems del qüestionari d'alumnes amb els objectius que proposem i les corresponents dificultats per assolir-los.

Per altra banda, hem volgut ser precisos a l'hora d'assenyalar estes connexions, per això, en alguns casos, apareix un ítem seguit d'un nombre entre parèntesi en què es vol indicar amb quina part de l'objectiu (en cas que aquest objectiu el puguem dividir en dues parts detectables a simple vista) té relació l'ítem en qüestió.

Per facilitar la lectura de la taula, presentem també, abans d'aquesta, la relació d'ítems corresponent (l'hem posada a la següent pàgina perquè queden tots els ítems a la vista).

ÍTEM 1.1: QUÈ ÉS UN ESPECTRE DISCONTINU?
ÍTEM 1.2: COM EXPLICA EL MODEL DE BOHR ELS ESPECTRES DISCONTINUS?
ÍTEM 1.3: POT TINDRE QUALSEVOL VALOR L'ENERGIA D'UN ELECTRÓ LLIGAT EN UN ÀTOM D'HIDROGEN? JUSTIFICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 2.1: QUINA IDEA TENS D'UNA PARTÍCULA?
ÍTEM 2.2: QUINA IDEA TENS D'UNA ONA?
ÍTEM 2.3: QUINA IDEA TENS D'UN ELECTRÓ?
ÍTEM 2.4: QUINA IDEA TENS D'UN FOTÓ?
ÍTEM 3.1: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN PERDIGÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 3.2: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA? EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 3.3: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN ELECTRÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 3.4: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA? EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 4.1: EL DETERMINISME CLÀSSIC AFIRMA QUE SI ES CONEIXEN LES CONDICIONS INICIALS D'UN SISTEMA I LA SEUA EQUACIÓ DE MOVIMENT (p.e un MRUA) PODEM PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA SOBRE EL MATEIX. EXPLICA-HO BREUMENT.
ÍTEM 4.2: S'APLICA AQUEST DETERMINISME IGUALMENT ALS ÀTOMS, ELECTRONS, FOTONS, ETC.? JUSTIFICA-HO.
ÍTEM 5.1: COM ES CARACTERITZA EL MOVIMENT (O ESTAT DE MOVIMENT) D'UN PERDIGÓ EN UN INSTANT DONAT?.
ÍTEM 5.2: COM ES CARACTERITZA L'ESTAT D'UN ELECTRÓ?
ÍTEM 6: LA PROBABILITAT S'USA QUAN NO ÉS POSSIBLE PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA. S'UTILITZA EN L'ESTUDI DE FOTONS, ELECTRONS? JUSTIFICA LA RESPOSTA.
ÍTEM 7: EN QUINES SITUACIONS DEIXA DE SER VÀLIDA LA FÍSICA CLÀSSICA?.
ÍTEM 8: QUINES DIFERÈNCIES HI HA ENTRE LA FÍSICA CLÀSSICA I LA FÍSICA QUÀNTICA?.
ÍTEM 9: QUINES IMPLICACIONS TECNOLÒGIQUES I SOCIALS CONEIXES DE LA FÍSICA QUÀNTICA?

OBJECTIUS	DIFICULTATS	ÍTEMS
1. Comprendre que la física clàssica (FC) funciona amb els models de partícula i ona, deterministes, que no poden explicar una sèrie d'experiències.	Dificultats a l'hora d'entendre la pròpia física newtoniana en els seus conceptes més bàsics.	2.1(1 ^a part), 2.2 (1 ^a part), 3.1, 3.2, 4.1, 5.1(1 ^a part), 7 (2 ^a part)
2. Comprendre que els electrons, protons, fotons, etc. no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous amb un comportament nou, el quàntic.	Veuran l'electró com a partícula clàssica o bé amb una interpretació errònia de dualitat (ones i partícules, ones o partícules segons l'experiència). Veuran el fotó com una partícula clàssica.	2.3, 2.4, 3.3, 3.4, 4.2
3. Explicar la quantització de la llum, la matèria i determinades magnituds (E; L...).	Les òrbites dels electrons. No sabran relacionar un salt d'un electró entre 2 nivells amb la corresponent banda de color de l'espectre.	1.1, 1.2, 1.3
4. Comprendre la funció d'estat Ψ i la seua interpretació probabilista.	No tindran una imatge clara del que representa la Ψ i, per tant, un orbital. No tindran clars els conceptes de probabilitat.	3.4, 5.2, 6
5. Entendre el significat de les relacions d'incertesa de Heisenberg.	Interpretaran les relacions d'incertesa com un error en la mesura per la petitesse de l'electró, el protó, etc. Mantindran el determinisme o les òrbites clàssiques.	3.3, 3.4, 4.2, 6, 7
6. Assenyalar els límits de validesa de la FC i indicar les diferències més notables entre FC i física quàntica (FQ)	No tindran clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuran la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana.	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.1, 4.2, 5.1 (2 ^a part), 5.2 (2 ^a part), 7 (1 ^a part), 8 (2 ^a part)
7. Valorar l'important desenvolupament científic i tècnic que suposà la FQ	No veuran les connexions de la quàntica amb la tecnologia i la societat.	9

4. PRESENTACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS EXPERIMENTALS PER CONTRASTAR LA HIPÒTESI.

4.1. PRESENTACIÓ I ESTUDI DELS RESULTATS OBTENIDOS AMB LA XARXA D'ANÀLISI DE TEXTOS.

Mostrem a continuació l'estudi dels resultats obtinguts després d'aplicada la xarxa d'anàlisi als ítems proposats per als llibres de text.

Malgrat que la mostra és reduïda, es tracta d'una selecció d'alguns dels llibres més emprats.

ÍTEM 1.1: S'ESMENTEN ELS PROBLEMES QUE POSAREN EN QÜESTIÓ LA FÍSICA CLÀSSICA?	SÍ (almenys 3) 3/7
--	-----------------------

Amb el criteri que hem adoptat, és a dir, que almenys n'esmenten 3, podem dir que solament ho fan 3/7 dels llibres analitzats. Val a dir que hem considerat que no era suficient que hi feren esment, ja que el programa de 2n de batxillerat obliga que es faci, sinó que també figuraren al principi del tema com una recapitulació dels problemes que la física clàssica no fou capaç de resoldre.

ÍTEM 1.2: QUINS S'ESMENTEN?	NOMBRE DE LLIBRES/7
Efecte fotoelèctric	6/7
Efecte Compton	3/7
Espectres atòmics	6/7
Raigs X	1/7
Cos negre	6/7
Exp. Franck-Hertz	1/7

Observem que els que més s'esmenten són l'efecte fotoelèctric, els espectres atòmics i el problema del cos negre (6/7 cadascun). Cal dir que aquest últim no és gens adequat didàcticament perquè resulta sempre d'especial dificultat a l'hora que els alumnes l'entenguin bé, ja que exigeix coneixement d'electromagnetisme, termodinàmica, etc., que no tenen.

ÍTEM 2.1: EN L'EFECTE FOTOELÈCTRIC S'ENTÉN EL FOTÓ COM:	NOMBRE DE LLIBRES/7
Una partícula (interpretació corpuscular de Newton)	2/7
Un paquet o quant d'energia	5/7
S'aclara el seu comportament dual	0/7

en la majoria de casos, 5/7, es parla de quant o paquet d'energia, que pot ser interpretat pels estudiants com una partícula o una ona clàssica, ja que és destacable el fet que en cap llibre se li dóna un comportament dual al fotó en l'efecte fotoelèctric.

ÍTEM 2.2: EN L'EFECTE COMPTON S'ENTÉN EL FOTÓ COM:	NOMBRE DE LLIBRES/7
Una partícula (interpretació corpuscular de Newton)	0/7
Un paquet o quant d'energia	4/7
S'aclara el seu comportament dual	1/7

Novament en la majoria de casos, 4/7, es parla de quant o paquet d'energia que pot ser interpretat pels estudiants com una partícula o una ona clàssica, ja que no més 1/7 dels llibres aclara el comportament dual del fotó en Compton. Diu textualment “el caràcter de partícula del fotó està lligat a la seua energia quan topa amb l'electró, mentre que per a analitzar les característiques dels fotons dispersos acudim al seu comportament ondulatori en interaccionar amb una xarxa cristal·lina en el detector, la qual cosa permet mesurar-ne la longitud d'ona”, que posa de manifest la concepció ona o partícula segons l'experiència.

ÍTEM 3: COM ES REPRESENTA GRÀFICAMENT EL FOTÓ?:	NOMBRE DE REPRESENTACIONS/14
Rajos	3/14
Boleta	3/14
Paquet d'ones	0/14
OHP	8/14

Per aprofundir en la imatge del fotó que donen realment els llibres hem analitzat els dibuixos en què apareix. En la majoria dels casos, 8/14, la representació és una ona harmònica plana. El raig clàssic de l'òptica geomètrica o la partícula clàssica apareixen en 6/14.

És de notar el fet que cap llibre representa el fotó com un paquet d'ones que, curiosament, si ens fixem en l'ítem 2.1, correspon a la terminologia més utilitzada per referir-s'hi (**paquet** o quant d'energia). Per últim, és curiós que en dos llibres en l'efecte Compton la freqüència gràfica de la OHP no canvia del fotó incident al dispersat.

ÍTEM 4: ES CLARIFICA QUE L'ENERGIA ESTÀ QUANTIFICADA QUAN L'ELECTRÓ ESTÀ LLIGAT PERÒ NO QUAN ESTÀ LLIURE (O EN LES BANDES)?	SÍ 1/7

Només un dels llibres ho clarifica, en unes “notes al marge”, tot i que de forma essencialment matemàtica, emprant càlculs bastant complexos per al nivell dels

alumnes. En dos dels llibres, en cap moment es parla explícitament de “energia quantitzada” amb l’electró lligat, només ho fan implícitament sense deixar-ho clar. En la resta, només es considera el cas de l’electró lligat a l’àtom.

ÍTEM 5.1: ES MOSTREN ALTRES MAGNITUDS QUANTIFICADES?	SÍ (almenys 2) 2/7
---	------------------------------

Amb el nostre criteri, o siga, que es mostren almenys dues magnituds quantificades (com per exemple el moment angular, el radi de les òrbites permeses de Bohr, la freqüència de la radiació absorbida o emesa en els salts electrònics, o els nombres quàntics n , l , m_l i m_s , que caracteritzen els estats d’energia de l’electró) a banda de l’energia, només 2/7 dels llibres investigats ho aconsegueixen.

La resta en presenten 1 correcta.

ÍTEM 5.2: QUINES?	NOMBRE DE LLIBRES/7
Moment angular	6/7
Radi de l’òrbita	1/7
Freqüència	2/7

És el moment angular la magnitud que més es mostra (6/7), quan es parla de la quantització per a l’energia de les òrbites en el model de Bohr.

Cal afegir que en un dels llibres es parla de “tres nombres quàntics que caracteritzen els estats d’energia de l’electró”, però no se’ls nomena explícitament. Només apareixen n i l en una figura explicativa, raó per la qual no ho hem inclòs a la taula anterior.

ÍTEM 6: S’ ESTABLEIXEN CORRESPONDÈNCIES CLARES ENTRE ELS NIVELLS ENERGÈTICS DELS ÀTOMS I LES LÍNIES DELS ESPECTRES D’ABSORCIÓ I EMISSIÓ (O SIMPLEMENT ES LIMITEN A LA FÓRMULA GENERAL $E_n - E_m = h\nu$)?	SÍ 0/7
--	------------------

Cap llibre aclareix simultàniament l’emissió i l’absorció. Hi ha, tanmateix, 4 llibres que només ho fan explícit en l’espectre d’**emissió** de l’àtom d’hidrogen (zona UV i zona visible).

D’altra banda, un llibre ho explica però de forma molt confusa per als alumnes, com a conseqüència de l’estacionarietat del que anomena “ones de matèria”, on, dit siga de passada, novament hi veem reflectida una concepció errònia de dualitat.

Finalment, assenyalar que un altre llibre simplement es limita a establir una correspondència entre les sèries espectrals i les transicions electròniques, sense aprofundir-ne més.

ÍTEM 7: S' INSISTEIX MÉS EN LA IDEA D'ÒRBITES (ONES ESTACIONÀRIES EN LES ÒRBITES)?	SÍ 4/7
--	-----------

Fixem-nos que la idea de les ones estacionàries en les òrbites està bastant estesa (4/7). Malgrat això, en un dels llibres, en introduir la funció d'ona hi renuncia: “*l'interior de l'àtom no es descriu mitjançant òrbites electròniques circulars o el·líptiques sinó mitjançant funcions d'ona Ψ que envolten als nuclis atòmics*”. Tanmateix, aquest mateix llibre, quan explica la dualitat, torna a la idea d'ones estacionàries en les òrbites.

Per contra, també cal destacar que, en un dels llibres, sorprenentment, no es parle d'òrbites ni tan sols quan s'explica el model de Bohr.

ÍTEM 8.1: ES POSEN EN QÜESTIÓ LES ÒRBITES?	SÍ 2/7
--	-----------

Així, dels llibres investigats, únicament en 2/7 casos, en algun moment hi ha un qüestionament adequat de les òrbites. Hem d'aclarir que, segons els nostres criteris de correcció, no hem considerat suficient que es diga que es renuncia a parlar d'òrbites, sinó que hem exigit que hi haja una adequada justificació en termes de les relacions d'incertesa de Heisenberg. En aquest sentit, hi ha 5 llibres que posen en qüestió les òrbites, però només 2 d'ells ho fan de forma correcta.

ÍTEM 8.2: COM?	NOMBRE DE LLIBRES/7
Atenent a la hipòtesi fonamental de dualitat	1/7
A partir de la naturalesa ondulatoria de l'electró	1/7
“Principi” de Heisenberg	3/7
Incapacitat predir trajectòries, sols probabilitats.	1/7
A través de la funció de probabilitat	1/7
Substitució òrbites per orbitals	1/7

El principal argument, les relacions d'incertesa de Heisenberg, que en els llibres s'anomena de forma inadequada **principi** d'incertesa de Heisenberg, únicament es dona en 3/7 casos. A tall d'exemple: “*La hipòtesi de De Broglie i el Principi d'incertesa condueixen a la impossibilitat de confinar el moviment de l'electró a òrbites senzilles ben definides, donat que si així fora es podria determinar exactament i a la vegada el moment lineal i la posició de l'electró a cada instant, i això estaria en contradicció amb els principis exposats*”. Cal aclarir, però, que en un d'aquests 3 llibres, a banda d'aquest argument, també se'n dona un d'incorrecte: “*la naturalesa ondulatoria de l'electró*”, on se'ns està dient de forma explícita que els electrons són ones clàssiques. És per això que

no l'hem inclòs dintre dels correctes. Tot i això, en aquest mateix llibre es parla clarament de substitució d'òrbites per orbitals, una contribució interessant.

Altres arguments, més que justificacions són, simplement, afirmacions: “*en mecànica quàntica no diem que el radi de l'òrbita circular de l'electró és..., sinó que sols afirmem que la localització més probable de l'electró correspon a la distància...*”, o també “*únicament es poden predir les probabilitats de trobar-se l'electró en una determinada regió*”.

ÍTEM 9.1: ES PRESENTEN ELS LÍMITS DEL MODEL DE BOHR?	SÍ (almenys 2) 1/7
---	-----------------------

Únicament un llibre fa referència almenys a 2 limitacions d'entre les següents del model de Bohr: no explica el desdoblament de les ratlles espectrals, la major intensitat d'unes línies respecte d'altres, l'amplada de les mateixes (tot això en el propi espectre de l'àtom d'hidrogen), tampoc explica els espectres d'àtoms polieletrònics, ni l'existència de direccions privilegiades en els enllaços atòmics.

La resta de llibres en mostren 1, i un d'ells cap.

ÍTEM 9.2: QUINS?	NOMBRE DE LLIBRES/7
Només aplicable a l'àtom d'H	4/7
No és aplicable a les forces d'enllaç entre àtoms	1/7
Algunes idees en contradicció amb la tª em	1/7

La limitació més repetida (4/7) és la que fa referència a la no aplicabilitat a àtoms polieletrònics, però cal dir que en algun cas l'únic que es diu és que era aplicable a l'àtom d'hidrogen, no que no ho era per als altres àtoms.

D'altra banda, com hem dit, només un llibre mostra limitacions en sentit plural, de manera que comenta que el model no és aplicable als àtoms amb més d'un electró, ni a les forces d'enllaç entre àtoms. A més “*es barrejaven idees clàssiques amb altres quàntiques i algunes estaven en contradicció amb la teoria electromagnètica*”.

ÍTEM 9.3: ES PRESENTA COM UN MODEL PRE-QUÀNTIC?	SÍ 4/7
--	-----------

Hem considerat acceptable com a pre-quàntic si s'explicita que hi ha trets clàssics i quàntics. Així doncs, 4/7 llibres sí ho expliciten. A tall d'exemple: “*combina idees clàssiques amb postul·lats de caràcter quàntic*”, o també, “*és una combinació del model de Rutherford i de la idea quàntica de nivells d'energia determinats*” En algun altre cas, però, queda una mica ambigu “*la solució a aquest problema vindrà de la mecànica quàntica*”.

ÍTEM 10: S'ASSIMILA EL COMPORTAMENT ONDULATORI DE L'ELECTRÓ A LA DUALITAT, EXCLOENT ALS FOTONS?	SÍ 5/7
--	------------------

Ens n'adonem que, majoritàriament (5/7), el fotó queda exclòs de la dualitat perquè no es torna enrere després d'exemplificar-la per al cas dels electrons, així que aquest primer “queda” com a partícula clàssica.

Tanmateix, en els altres 2 llibres sí s'assimila el fotó a la dualitat, p.e., *“en definitiva, els fotons i qualsevol altra partícula material en moviment tenen un doble comportament ona-partícula (comportament dual)”*.

ÍTEM 11: COM S'INTERPRETA LA DUALITAT?:	NOMBRE DE VEGADES/12
Ona i partícula, associada o pilot (De Broglie)	7/12
Ones de matèria	3/12
Ona o partícula, segons experiència	2/12
Ni ona ni partícula, sinó objecte quàntic (Feynman)	0/12

Primer que tot hem de dir que en 4/7 llibres s'usa més d'una concepció, cosa que contribueix a augmentar-ne la confusió. En un d'ells, per exemple, es cita textualment De Broglie: *“de la mateixa manera que un fotó no pot aïllar-se de l'ona que hi està associada, també els corpuscles de matèria estan al seu torn associats sempre a una ona”*, on hi ha explícita la concepció ona i partícula, però la interpretació que en fa després el llibre ens aboca a la concepció ona o partícula segons experiència: *“en definitiva, els fotons i qualsevol altra partícula material en moviment tenen un doble comportament ona-partícula (comportament dual), i així es fa palés un o l'altre segons el fenomen en què està implicada la radiació o la partícula”*.

Podem veure que la concepció de dualitat que més es dona als llibres (7/12) és la de De Broglie, partícules que porten associada una ona. També hi trobem en segon lloc (3/12) la concepció d'ones de matèria. Un dels llibres, en principi, aposta decididament per aquesta concepció: *“estes ones de matèria són tan reals com les ones lluminoses i les del so”*, però, en la línia del que dèiem abans, posteriorment es desdiu: *“donat que l'electró en el seu moviment porta associada una ona”*, per adoptar la d'ona i partícula. Pel que fa a la concepció ona o partícula segons experiència l'hem trobada en 2/12 ocasions.

I sobretot, es fa evident que en cap d'ells s'ofereix la visió de canvi ontològic que proposa Feynman entre d'altres: ni ona ni partícula, ens quàntics. Aquest fet també queda reflectit en el cas dels professors i també dels estudiants.

ÍTEM 12: ¿S'EXPLIQUEN, I ES CONNECTEN AMB LA DIFRACCIÓ DE LA LLUM, LES EXPERIÈNCIES DE DIFRACCIÓ D'ELECTRONS QUE COMPROVEN LA HIPÒTESI DE DE BROGLIE: DAVISSON I GERMER PER REFLEXIÓ EN MONOCRISTALL (DIAGRAMA DE CERCLES), G.P.THOMPSON, PER TRANSMISSIÓ EN FINA LÀMINA POLICRISTALINA, (DIAGRAMA DE PUNTS)?.	SÍ 0/7
---	-----------

S'ha de dir que tots els llibres esmenten les experiències de difracció de Davisson-Germer, i alguns fan la representació en diagrames de cercles, però és realment significatiu el fet que s'opte per aquesta, malgrat ser difícilment comparable respecte a la difracció en llum, cosa que amb la difracció per transmissió (diagrama de punts) seria més senzill de fer, ja que, en el tema d'òptica, els alumnes poden veure per exemple la difracció del làser per un pèl (diagrama de punts), i establir així comparacions entre els diagrames respectius. És per això que indiquem que no hi ha cap llibre que faci la connexió amb la difracció en llum, cosa que resultaria molt interessant a l'hora d'entendre què passa amb els electrons.

ÍTEM 13: COM ES REPRESENTA GRÀFICAMENT L'ELECTRÓ?:	NOMBRE DE REPRESENTACIONS/11
Boleta	7/11
Paquet d'ones	2/11
OHP	2/11

Per aprofundir en la imatge de l'electró que donen realment els llibres hem analitzat els dibuixos en què apareix. En la majoria (7/11) representacions gràfiques, l'electró és, a tots els efectes, una partícula (boleta), la qual cosa entra en contradicció amb l'indiscutible caràcter dual que se li associa. Com es pot comprovar fàcilment mirant la taula, també hem trobat més d'una representació diferent en alguns llibres, i fins i tot en un d'ells apareixen totes tres representacions. Açò no fa més que contribuir a augmentar la confusió novament.

D'altra banda, tant la imatge de paquet d'ones com la d'ona harmònica plana (OHP) apareixen en 2/11 casos i, com ja hem esmentat als criteris de valoració, el paquet seria admissible (si s'explicita dualitat en el text), però no la OHP, que és una representació ideal, que no respon a una situació espacial limitada.

ÍTEM 14.1: S'INTRODUEIX L'EXPERIMENT DE LA DOBLE ESCLETXA?	SÍ 1/7
---	-----------

Solament en 1 de 7 llibres s'introdueix adequadament aquest interessant experiment, que pot ajudar a clarificar la noció de dualitat, ben entesa, per descomptat.

En realitat hi ha també un altre llibre que l'introdueix, però de forma errònia, com comentarem tot seguit.

Dels 5 llibres restants, únicament en un d'ells s'esmenta aquest experiment, quan es parla dels fenòmens de difracció i interferència d'electrons, però no s'explica.

ÍTEM 14.2: DE QUINA FORMA?	NOMBRE DE LLIBRES/7
Amb electrons	1/7
Amb llum	1/7

Pel que fa al primer cas reflectit a la taula, i enllaçant amb el que dèiem abans, hi ha un llibre que introdueix l'experiment de forma errònia: “*cada electró passa al mateix temps per ambdues esclertes*”, i ho justifica dient que “*l'electró no és un punt sinó una entitat dispersa...*”, interpretació que des del nostre punt de vista és incorrecta perquè, com diu Feynman al seu llibre, no podem afirmar que passe per ambdues a la vegada, ni tampoc desmentir-ho, excepte si l'observem, en aquest darrer cas sí podem afirmar que passa per una de les dues esclertes.

Finalment, un llibre sí dona una interpretació correcta per al cas de considerar la llum com un xorro de fotons: “*cada fotó ha de passar per l'esclerta R1 o per l'altra R2, pensem, i per això la imatge I12 hauria de coincidir amb l'obtinguda superposant les intensitats I1, I2 corresponents a l'actuació de cada esclerta per separat. No és així. L'afirmació ingènua que el fotó passa per una o per l'altra no és sostenible més que si tenim un dispositiu que enregistra per quina d'elles passa. L'acció d'un tal dispositiu trenca la coherència entre els rajos que passen per cadascuna de les esclertes*”.

ÍTEM 15: ES PLANTEGEN LES RELACIONS D'INDETERMINACIÓ COM:	NOMBRE DE LLIBRES/7
Un principi d'incertesa	7/7
Relacions d'incertesa	1/7
Impossibilitat de mesurar amb $\Delta=0$ dues magnituds conjugades	6/7
Es contraposa al determinisme	6/7

En tots els llibres analitzats les relacions d'indeterminació es presenten com un principi, (en un d'ells, però, s'afegeix també en ocasions la terminologia de relacions d'incertesa) quan en realitat es tracta d'un postul·lat.

Pel que fa al contingut, cal, però, dir que en 6/7 llibres les relacions d'incertesa apareixen contraposades al determinisme clàssic i són interpretades com la impossibilitat de mesurar simultàniament i amb imprecisió zero dues magnituds conjugades. Resulta significatiu que només en dos dels llibres s'aclarisca què són, en aquest context, dues magnituds conjugades (aquelles que el producte d'una per l'altra té dimensions de la constant de Planck, h), encara que també altres utilitzen esta terminologia també. Val a dir també que, en la majoria de llibres, únicament s'exemplifica amb detall la relació que involucra les magnituds posició i moment d'un

electró. A tall d'exemple: “*impossibilitat de mesurar amb precisió i simultàniament parells de propietats de l'electró, com per exemple la posició i el moment*”, on, dit siga de passada, es parla erròniament de qualsevol parell de propietats, no de solament les conjugades.

ÍTEM 16: ES RELACIONA LA INCERTESA:	NOMBRE DE LLIBRES/7
Amb la impossibilitat de mesurar amb precisió pel propi procés de mesura	3/7
Amb la naturalesa ondulatoria de l'electró (les ones clàssiques aconsegueixen que $\Delta x \Delta k \sim 1$)	1/7
Amb la naturalesa dels ens quàntics	1/7
Amb els propis fonaments de la quàntica	1/7
Amb la dualitat	2/7

Malgrat el que hem dit als comentaris de l'ítem 16, observem clarament que no hi ha tanta sintonia a l'hora de dir quina és la causa de l'esmentada incertesa, però val a dir que en 3/7 llibres es lliguen les incerteses amb el fet que el propi procés de mesura altera allò observat, un exemple: “*Un electró no es pot observar sense alterar-lo d'alguna manera*”, o més en detall: “*si emprem llum de longitud d'ona curta, podem determinar la posició de forma bastant precisa, ja que no es produeixen fenòmens de difracció, però els fotons d'ona curta tenen freqüència alta i energia elevada, i per tant, modificarien la velocitat de l'electró.... Si emprem llum de longitud d'ona llarga, la quantitat de moviment de l'electró no canvia, però es produeixen fenòmens de difracció i queda indeterminada la posició de l'electró*”, però aquesta interpretació de la indeterminació, que no oblidem que també es dona en física clàssica (recordem que la mesura de la temperatura amb un termòmetre ens altera el valor de la mesura, la mesura del voltatge amb un voltímetre ens altera el valor del voltatge, etc.), no és la que hauríem de considerar com la raó última en el cas quàntic. En aquest sentit, un únic llibre sí relaciona la incertesa amb la pròpia naturalesa dels ens quàntics.

Paga la pena comentar un últim cas: un dels llibres afirma que “el principi d'indeterminació és una propietat intrínseca de les partícules, lligada a la seua naturalesa dual”, i a continuació usa el model de paquet d'ones per explicar les relacions d'incertesa (en concret, la que lliga posició i quantitat de moviment). Tot i que això seria admissible d'acord amb els nostres criteris, els estudiants poden pensar que, en el fons, poden interpretar els electrons com a ones exclusivament.

Per tot l'exposat anteriorment, s'evidencia que tampoc els llibres de text, igual que passa amb professors i estudiants, presenten la visió de canvi epistemològic en el sentit que és la pròpia naturalesa dels ens quàntics la que ens imposa els límits definitius en aquestes determinacions, la qual cosa ve a reforçar la nostra hipòtesi de partida.

ÍTEM 17: LA FUNCIO Ψ S'INTRODUEIX:	NOMBRE DE LLIBRES/7
Solament lligada a la probabilitat	3/7
Com funció que representa l'estat del sistema, caracteritzada per les magnituds compatibles del mateix.	1/7
Com amplitud de probabilitat	1/7
Orbital (abandó de l'òrbita)	1/7
Com amplitud de l'ona associada a l'electró	1/7
Com a magnitud variable que caracteritza les ones de De Broglie, lligada a la probabilitat	1/7

Solament en un cas es parla explícitament de “funció que representa l'estat del sistema, caracteritzada per les magnituds compatibles del mateix”. Val a dir, però, que un altre llibre també hi dona una definició correcta, en termes d'amplitud de probabilitat: “siga $\Psi(x,t)$ la funció d'ona d'una partícula sense spin en l'instant t , ço és, l'amplitud de probabilitat que, en aquell instant, la partícula estiga en el punt x ”.

En 3 llibres s'esmenta la funció d'ona simplement com a pont per arribar a la probabilitat, sense donar-li significat propi.

Trobem també altres definicions incorrectes, com la de “amplitud de l'ona associada a l'electró” o la de “magnitud variable que caracteritza les ones de De Broglie”, on no queda clar quin paper juga aquesta funció.

Finalment, comentar que només un llibre fa referència explícita a la substitució del concepte d'òrbita pel d'orbital en introduir la Ψ .

ÍTEM 18: S'INTRODUEIX L'ESPIN:	NOMBRE DE LLIBRES/7
Relacionat amb la rotació de l'electró	1/7
Com un nombre quàntic intrínsec	1/7
No s'introdueix	5/7

És significatiu que en 5/7 llibres ni tan sols s'introdueix l'spin, de fet en algun sí fa acte de presència, però amb cap explicació al respecte, com si els estudiants de 2n de batxillerat ja hi estiguessen familiaritzats, p.e., “Siga $\Psi(x,t)$ la funció d'ona d'una partícula sense spin en l'instant t ”. En un altre simplement l'ignoren i només s'esmenten tres nombres quàntics.

Pel que fa als únics dos que sí l'introdueixen, un d'ells el relaciona amb la rotació de l'electró: “en 1925 Uhlenbeck i Goudsmit demostraren experimentalment que l'electró en el seu moviment gira sobre sí mateix comportant-se com un petit imant. Aquest comportament magnètic de l'electró rep el nom de spin”, i ho fa de forma errònia com ja hem comentat a l'apartat de fonamentació històrica. L'altre l'introdueix correctament com un nombre quàntic intrínsec que apareix ,posteriorment als altres tres, “en un tractament de Dirac que combina la Mecànica Quàntica i la Teoria de la Relativitat”.

ÍTEM 19: LA QUÀNTICA NOMÉS S'APLICA A OBJECTES MICROSCÒPICS?	SÍ 4/7
---	------------------

Una altra de les idees bastant esteses (4/7) és la que fa referència que la quàntica sols és aplicable a sistemes microscòpics, oblidant que juga un paper fonamental en molts de macroscòpics. Almenys així ho dóna a entendre un llibre quan diu que “*esta limitació (referint-se a les relacions d’incertesa) en la nostra capacitat de coneixement no cal tindre-la en compte en objectes amb masses grans*”. Un altre d’estos 4, tot i que relaciona contínuament la quàntica amb el món microscòpic, ens deixa aquesta frase: “*la tria d’un tractament clàssic o d’un de quàntic vindrà donada per les relacions d’incertesa de Heisenberg*”. Pel que respecta als altres 3, en un d’ells no hi ha cap dubte que, clarament, admet l’aplicabilitat a sistemes macroscòpics: “*pot aplicar-se a tots els sistemes físics, incloent àtoms molècules i objectes macroscòpics*”, de fet, “*tota la física és física quàntica*”. Un altre va en la mateixa línia, encara que no és tan directe: “*qualsevol teoria quàntica ha de conduir als mateixos resultats que la física clàssica quan s’aplica a sistemes macroscòpics*”. Finalment, el tercer ens parla d’exemples d’aplicabilitat de la quàntica a sistemes macroscòpics, com “*la superfluïdesa o la superconductivitat*”.

ÍTEM 20: ASSENYALA ELS LÍMITS DE VALIDESA DE LA FÍSICA CLÀSSICA?	SÍ 2/7
---	------------------

En 5/7 dels textos sí s’assenyala el límit, però 3 d’aquests 5 situen aquest límit en “*el món subatòmic*” o el “*micromón*”, per tant ho fan de forma inadequada (per això els hem deixat fora), cosa que és coherent amb el que hem assenyalat en l’ítem anterior, i que referma més les nostres hipòtesis.

Els altres dos s’expressen adequadament al respecte. En un d’ells recordem, a tall d’exemple, la frase que ja hem esmentat a l’ítem 22: “*la tria d’un tractament clàssic o d’un de quàntic vindrà donada per les relacions d’incertesa de Heisenberg*”. En l’altre s’infereix la mateixa concepció de fons: “*El Principi de Heisenberg. manca d’interés en Mecànica Clàssica, perquè les magnituds involucrades són molt grans comparades amb el valor de la constant de Planck*”.

També és significatiu que 2 dels llibres no es preocupen per clarificar esta qüestió.

ÍTEM 21: ES MOSTREN LES DIFERÈNCIES ENTRE LA FÍSICA CLÀSSICA I LA FÍSICA QUÀNTICA?	Nombre de llibres/7
3 o més diferències correctes	2/7
2 diferències correctes	3/7
1 diferència correcta	1/7
Cap diferència correcta	1/7

Hem considerat com a acceptables aquells llibres que mostraven almenys tres diferències correctes, i hem de dir que només 2 dels llibres analitzats mostren almenys 3 de les següents diferències:

1. Caràcter continu de magnituds com l' energia i el moment angular front al caràcter discret.
2. Emissió de radiació de les càrregues accelerades lligades (igual que les lliures) front a l'emissió de radiació de les càrregues lligades només en les transicions de nivell energètic (a diferència de les lliures).
3. Partícules i camps clàssics front a quantons (electrons, fotons, etc) amb un comportament probabilista.
4. Possibilitat front a impossibilitat de determinar simultàniament amb absoluta precisió la posició i velocitat d'una partícula.
5. Trajectòries definides front a la manca de sentit del concepte de trajectòria per a les "partícules".

Resulta curiós que en ambdós llibres les tres diferències siguin les mateixes, la 1, la 4 i la 5. Però en açò hi ha una certa coherència amb el que hem trobat als ítems anteriors, ja que, per exemple, pel que fa a la diferència 1, quan es presenta el model de Bohr (la majoria de llibres el presenten) es parla de la quantització del moment angular i de l'energia; i les diferències 4 i 5 les expliciten alguns llibres quan tracten les relacions d'incertesa de Heisenberg. Cal dir, però, que les diferències 2 i 3 no les trobem en cap dels llibres, perquè, d'una banda, només 1 llibre dóna una certa informació (en unes notes al marge) sobre el cas de l'electró lliure, i de l'altra, cap llibre pren partit per la interpretació de dualitat en què els electrons, protons, fotons, etc. no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous, quàntics, que anomenem quantons.

D'altra banda, hi ha tres llibres que donen 2 diferències correctes, les mateixes ambdós, la 1 i la 4, possiblement pels motius abans esmentats. De la mateixa forma tenim 1 llibre amb una única diferència correcta i, finalment, un altre que no presenta cap diferència correcta.

ÍTEM 22.1: ES PRESENTEN LES MÚLTIPLES RELACIONS DE LA FÍSICA QUÀNTICA AMB LA TECNOLOGIA?	Nombre de llibres/7
5 o més implicacions tecnològiques correctes	1/7
4 implicacions tecnològiques correctes	2/7
3 implicacions tecnològiques correctes	1/7
2 implicacions tecnològiques correctes	2/7
1 implicació tecnològica correcta	1/7
Cap implicació tecnològica correcta	0/7

Hem posat sobre la taula esta pregunta per veure en quina mesura es mostra la connexió de la quàntica amb la realitat tecnològica que viuen els estudiants, ja que d'això en depèn fortament el grau de motivació d'aquests.

Observem que, en els millors dels casos, solament 2 llibres presenten les corresponents implicacions.

D'altra banda, hem acceptat llibres amb almenys 5 exemples de relacions de la física quàntica amb la tecnologia, amb el resultat que només un dels llibres presenta 5 implicacions tecnològiques correctes d'entre les de la taula següent:

ÍTEM 22.2: QUINES?	NOMBRE DE VEGADES/20
làser	4/20
microscopi d'efecte túnel	4/20
Cèl·lules fotoelèctriques	3/20
microscopi electrònic	3/20
Nanotecnologia/Límits de miniaturització	2/20
Superconductivitat i superfluïdesa	1/20
criptografia quàntica	1/20
computació quàntica	1/20
raigs X i medicina (radioscòpies i radiografies)	1/20

Si mirem la taula anterior, ens adonem que les opcions més repetides són el làser i el microscopi d'efecte túnel (4/20 vegades), en segon lloc hi ha el microscopi electrònic i tot el que estaria relacionat amb les cèl·lules fotoelèctriques (3/20 vegades). Després tenim que sols un llibre esmenta la nanotecnologia, camp de la ciència que està prenent cada vegada més importància. Un dels llibres esmenta també aplicacions interessants, fins i tot, amb visió futura, com l'encriptatge i la computació quàntiques, així com també la superconductivitat i la superfluïdesa.

A més a més, indicar que únicament un dels llibres parla de les implicacions en medicina pel que fa als raigs X, d'ús habitual en radioscòpies i radiografies.

Finalment, afegir que, com podem comprovar, les aplicacions mostrades són limitades i no s'esmenten altres com l'electrònica, l'òptica quàntica, etc., que sí assenyalen els professors, o com la física nuclear i de partícules, que hem proposat en els criteris.

ÍTEM 22.3: ES PRESENTEN LES MÚLTIPLES RELACIONS DE LA FÍSICA QUÀNTICA AMB LA SOCIETAT?	Nombre de llibres/7
2 o més implicacions socials correctes	0/7
1 implicació social correcta	1/7
Cap implicació social correcta	6/7

Ens hem plantejat esta pregunta per veure en quina mesura es mostra la connexió de la quàntica amb la realitat social i cultural que viuen els estudiants, ja que d'això en depèn fortament el grau de motivació d'aquests.

Cal dir que el criteri numèric adoptat en aquest ítem és considerar acceptables aquells llibres que donen exemples d'almenys 2 implicacions socials correctes, que no ho aconsegueix cap d'ells. De fet, únicament en un dels set llibres estudiats es relaciona la física quàntica amb el seu context social, cosa que connecta clarament amb el fet que els professors qüestionats assenyalen esta desconexió aparent de la realitat com una de les dificultats a l'hora que l'alumne s'interessa per la quàntica.

ÍTEM 22.4: QUINES?	NOMBRE DE RELACIONS/1
Art abstracte i mecànica quàntica	1/1

Tan sols, com hem dit, es presenta en els llibres una relació social, de la mecànica quàntica amb l'art abstracte i, a més, es mostra com una curiositat o extravagància, com l'excepció que confirma la regla.

En canvi, es poden assenyalar moltes altres com qualsevol de les següents, proposades als criteris de correcció:

la quàntica influí en filòsofs com Russell o els neopositivistes Carnap, Reichenbach, Popper, etc. Els filòsofs idealistes com Cassirer i físics amb idees semblants (Heisenberg, Compton o Eddington) capitalitzen l'indeterminisme en defensa de les seues idees metafísiques (el lliure arbitri, la immortalitat, Déu). Les lleis probabilistes quàntiques entren en conflicte amb la ideologia de l'estat soviètic, el qual produí acusacions de "idealisme burgés" a Frenkel i Khaikin, pèrdua de càtedres a Landau i Lifschitz, etc. També influeix en literatura ("El jardí de senderols que es bifurquen" de Borges), en ciència ficció (universos paral·lels...), art (Dalí).

4.2. PRESENTACIÓ I ANÀLISI DELS RESULTATS OBTENUTS AMB EL QÜESTIONARI DE PROFESSORS.

Presentem tot seguit l'anàlisi dels resultats obtinguts per als ítems proposats al qüestionari destinat als professors.

El qüestionari s'ha passat a 34 professors en actiu i formació.

El nombre de respostes en el primer ítem és 76, el que ens dona una mitjana, no molt abundant, de 2,2 respostes per professor. Això vol dir que, en calcular els percentatges de professors que tenen una determinada idea alternativa o alguna proposta didàctica inadequada, la suma serà major que cent.

ÍTEM 1: QUINS ASPECTES O ACTIVITATS CREUS QUE INTERESSA PROPOSAR A L'INICI DEL TEMA DE FÍSICA QUÀNTICA DE 2N DE BATXILLERAT?	Nombre de professors/34
Ones associades a partícules. Partícula i ona són formes d'entendre una mateixa realitat. (dualitat ona –corpuscle) Concepte d'ona i de partícula (pulsos en cordes)	9/34
Experiment doble escletxa	8/34
No podem determinar amb exactitud on es troba la partícula/Heisenberg	7/34
Relació FQ amb fenòmens quotidians/tecnologia	6/34
Efecte fotoelèctric, Experiment efecte fotoelèctric	6/34
Experiment difracció e-	5/34
FC=MÓN MACRO, FQ=MÓN MICRO	4/34
Exemples/concepte probabilitat, Probabilitats quàntiques	4/34
Quantització E.Nivells E. Espectre cos negre	4/34
La FC no ho explica tot/límits	3/34
Ferramentes (matemàtiques) a utilitzar	3/34
Bohr, espectres	2/34
Parlar dels experiments clau. Experiències amb la llum	2/34
ALTRES	13/34
NS/NC	0/34

Primerament, cal destacar que hi ha algunes respostes inadequades didàcticament, ja que no s'ajusten a la programació oficial o són molt difícils per als estudiants de 2n de batxillerat, com el concepte de probabilitat, el cos negre o les eines matemàtiques. Respecte al cos negre cal assenyalar que com històricament la física quàntica va començar així, molts professors (i llibres) també comencen així, oblidant els coneixements d'electromagnetisme, termodinàmica, etc. necessaris per a comprendre'l i que no tenen els alumnes de 2n de batxillerat. També és significatiu que alguns professors facen referència en aquest ítem al formulisme matemàtic i, fins i tot en algun

cas, apunten a la “*resolució de derivades i integrals*”, posant de manifest que tenen una visió operativa i excessivament formulística de la física que transmetran als estudiants.

Resulta curiós que alguns professors parlen de l'experiment de la doble esclatxa, interessant proposta per encetar la quàntica realitzada en la Física de Feynman (1964), però prou incompatible amb la programació de 2n. De fet alguns llibres la introdueixen, però no a l'inici sinó com aclariment de la dualitat.

Però el més important és l'elevat nombre de professors que tenen idees alternatives, com el 28,1%, que fan referència a la concepció de dualitat com ona associada a partícula. No hi ha en aquesta concepció res que indique el canvi ontològic que es dona en la física quàntica, és a dir, que no es tracta ni d'ones ni de partícules clàssiques, sinó quantons. Aquest mateix concepte de “taula de surf” es reproduïx també en el cas dels alumnes de 2n de batxillerat, cosa que ens reafirma en la nostra hipòtesi de partida.

També es pot dir el mateix d'una altra concepció errònia que fa referència a les relacions d'indeterminació de Heisenberg (20,6%), la idea que no és possible determinar amb precisió la posició d'una *partícula*, mentre que si entenem bé les citades relacions d'incertesa, el que se'ns diu és que, en tot cas, el preu que hauríem de pagar per tindre la posició determinada amb precisió és que desconixeríem per complet el valor del moment lineal, però el que no diuen és que l'esmentada posició no es puga determinar amb precisió. Com hem dit, aquesta mateixa concepció també apareix en el cas dels alumnes de 2n.

D'altra banda, també observem una associació de la física clàssica al món macroscòpic i de la quàntica al microscòpic (11,8%), tot i que, com s'exposa en aquest treball, existeixen fenòmens i situacions macroscòpiques que es regeixen per la física quàntica. Aquest primer pensament és també present en els alumnes de 2n.

Sí que hi ha, però, tres professors que, en la línia del que hem comentat als criteris de valoració d'aquest ítem, aboguen per posar de manifest els problemes/limitacions de la física clàssica en aquest inici del tema.

Finalment, assenyalar que hi ha 13 respostes úniques. Destacarem, a tall d'exemple una resposta que, encara que amb bona intenció, no té en compte la limitació de temps que imposa el temari de física de 2n bat: “*Repàs del que han donat en 1r Bat (o començar x ahí cas que no ho hagen donat)*”.

El nombre de respostes en el segon ítem és 57, el que ens dona una mitja, no molt abundant, de 1,7 respostes per professor. Això vol dir que, en calcular els percentatges, la suma serà major que cent.

ÍTEM 2: QUINES CREUS QUE SÓN LES PRINCIPALS DIFICULTATS QUE PODEN TINDRE ELS ALUMNES A L'HORA DE TRACTAR EN CLASSE EL TEMA DE FÍSICA QUÀNTICA?	Nombre de professors/34
La veuen desconnectada de la realitat/quotidianitat/lògica (o sentit comú), com a conseqüència hi ha una manca de comprensió dels conceptes (massa abstractes).	19/34
Trencar amb la visió determinista de la física. Alliberar-se de pensaments que es pensaven eren certs. Activitats x trencar la visió mecanicista de la física. Passar del determinisme newtonià a l'indeterminisme quàntic (“mateixes c.i suposen dif. resultat???”).Canviar d'una FC mecanicista a una FQ probabilista (orbitals)	7/34
Eines matemàtiques complicades i càlculs costosos	6/34
No s'enten bé dualitat ona-corpúscle	5/34
Comprendre bé concepte incertesa	3/34
No hi ha “visibilitat” experimental	3/34
Manca d'interés/comprensió pel/del micromón	3/34
Comprensió comportament quàntic vs comportament món macro	3/34
ALTRES	8/34
NS/NC	0/34

Molts professors tenen prou clar en quins dominis poden aparèixer les dificultats dels alumnes, possiblement perquè tinguen clars quins són els conceptes bàsics, però com s'ha vist en l'ítem anterior, hi un percentatge de professors que no entenen bé la dualitat o la incertesa i, per tant, quines són les veritables dificultats. També hi ha alguns professors en formació que se n'obliden que el nivell a què fa referència el qüestionari és el de 2n BAT, no el de les respectives facultats, i per això parlen “*d'eines matemàtiques complicades i càlculs costosos*”, quan en realitat es tracta d'un dels temes més senzills matemàticament de tota la Física de 2n de Batxillerat. Dins d'altres (8 respostes) hi ha alguna resposta interessant, com que “*l'alumne ha fet seua la idea que els electrons són partícules clàssiques (imatge bola billar), i no entén bé el concepte d'ona*”.

El nombre de respostes en el tercer ítem és 72, el que ens dóna una mitja, no molt abundant, de 2,1 respostes per professor. Això vol dir que al calcular els percentatges la suma serà major que cent.

ÍTEM 3: QUINS OBJECTIUS IMPORTANTS PODEN SERVIR COM A INDICADORS QUE L'ESTUDIANT HA COMPRÉS EL TEMA AL QUAL ENS REFERIM?	Nombre de professors/34
Saber posar exemples on es pose de manifest la dualitat o-c/entendre-la	11/34
Resolució/comprensió problemes	10/34
Saber explicar amb les pròpies paraules les nocions del tema	9/34
Saber posar exemples on es posen de manifest les relacions d'indeterminació/entendre-les	8/34
Definir el concepte de probabilitat. Entendre q el món té naturalesa probabilística.	8/34
Saber explicar l'efecte fotoelèctric. Resoldre problemes senzills efecte fotoelèctric. Saber explicar l'efecte Compton.	6/34
Comprendre el concepte de partícula. Diferenciar entre ona i partícula.	3/34
ALTRES	17/34
NS/NC	0/34

El primer objectiu que s'apunta per part del professorat és el d'entendre bé el concepte de dualitat ona- corpuscle, encara que cal advertir que no diuen com s'ha d'entendre. Aquest encaixa amb l'objectiu 2: “comprendre que els electrons, protons, fotons etc., no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous amb un comportament nou, el quàntic”, tot i que aquest comportament es pot aproximar al d'ones clàssiques o partícules clàssiques quan el nombre d'objectes és molt gran.

D'altra banda, fixem-nos que també els professors esmenten la comprensió de les relacions d'incertesa de Heisenberg com a objectiu a tindre en compte, cosa que també fem nosaltres amb l'objectiu 6: “entendre el significat de les relacions d'incertesa de Heisenberg”.

Un altre dels conceptes assenyalats en els objectius marcats pels professors és el de la probabilitat, que connecta tangencialment amb el nostre objectiu 5: “comprendre la Ψ i la seua interpretació probabilista”.

També fan referència a l'efecte fotoelèctric i l'efecte Compton, encara que no diuen explícitament que ho fan perquè són uns dels problemes que la física clàssica no va ser capaç de resoldre. Malgrat això, aquest objectiu el podríem encabir en els nostres 1: “comprendre que la física clàssica funciona amb els models de partícula i ona, deterministes, que no poden explicar una sèrie d'experiències”, i 3: “explicar la quantització de la llum, la matèria i determinades magnituds (E; L...)”.

Assenyalar també que els professors donen importància a tindre clars els conceptes d'ona i partícula clàssiques, cosa que també hem reflectit a l'objectiu 1 abans esmentat.

Finalment, apuntar que el 29,4% dels docents fan referència a la resolució de problemes com a objectiu, però pensem que tenen la idea d'una col·lecció de problemes numèrics,

sobretot no plantejats com una investigació (emissió d'hipòtesis, verificar o falsar les hipòtesis, extraure conclusions i fer-se noves preguntes...).

Per altre costat, pel que fa a les respostes úniques (hi ha 17) alguns apunten com a objectiu la comprensió de les relacions d'indeterminació de Heisenberg com causades pel procés de mesura, “*Entendre les relacions d'indeterminació com originades pel procés de mesura*”, que constitueix una mostra més de com d'arrelada està esta idea entre els professors. Una altra idea molt arrelada és la concepció que la física quàntica només és aplicable en el món microscòpic, per tant implícitament s'està dient que no té aplicabilitat ni tan sols transcendència al macroscòpic, la qual cosa fa que els alumnes perguen l'interés. A tall d'exemple: “*Entendre que la física quàntica tracta els fenòmens microscòpics*”.

El nombre de respostes en el quart ítem és 34, el que ens dóna una mitja de 1 resposta per professor, ja q no hi ha cap de NC.

ÍTEM 4: COM EXPLICARIES LA DUALITAT ONA-PARTÍCULA?	Nombre de professors/34
Ona o partícula segons experiència. Ona o partícula segons experiència (agafant l'exemple de la llum).	15/34
Ona i partícula alhora. Ona de probabilitat associada a partícula (taula de surf, De Broglie)	5/34
Difracció d'e-	3/34
Presentar eq. De Broglie	2/34
Ni partícula ni ona, ens quàntic (Feynman)	3/34
ALTRES	6/34
NS/NC	0/34

Cal destacar que, com veiem, les contestacions responen bàsicament a dues concepcions errònies, la primera, molt arrelada, la de dualitat entesa com ona o partícula segons experiència: hi ha professors (26,5%) que proposen explicar la dualitat a partir dels experiments de la doble escletxa, on la llum es comporta com una ona, i l'efecte fotoelèctric, on es comporta com partícules, per tant, implícita o explícitament donen a entendre als alumnes que els fotons són partícules clàssiques; i la segona, l'entesa com ona i partícula a la vegada (alguns també parlen d'ona de probabilitat associada a partícula), idea defensada en primera instància per De Broglie. Això ve a dir-nos que tampoc els professors veuen els electrons o els fotons com objectes nous, diferents als de partícula i ona clàssics, i per tant no poden fer partíceps als alumnes d'aquest canvi ontològic. Fins i tot en algún cas es parla de “*ona o partícula segons medi*”.

En aquest sentit, però, hi ha tres que donen la interpretació correcta, “*Ni partícula ni ona, ens quàntic (Feynman)*”, possiblement perquè com diuen coneixen el text de Feynman que afavoreix una interpretació correcta.

El nombre de respostes en l’ítem 5 és 36, el que ens dóna una mitja de 1,1 resposta per professor, on hi ha 6 de NC.

ÍTEM 5: COM EXPLICARIES LES RELACIONS D’INDETERMINACIÓ?	Nombre de professors/34
Imprecisions associades al procés de mesura	10/34
No podem determinar posició i moment simultàniament amb incertesa 0	7/34
No podem tindre completament determinades la posició i el moment d’una partícula. Exemple del nucli i els e-.	4/34
Nomenen indeterminació E-t xo no l’expliquen.	3/34
Posen únicament les expressions matemàtiques (o + algun exemple pràctic)	2/34
Assumir la limitació q ens imposa la natura a l’hora de mesurar amb precisió certes magnituds q es troben relacionades, com posició-moment o E-t.	2/34
ALTRES	8/34
NS/NC	6/34

Un altre punt clau és la concepció de les relacions d’indeterminació de Heisenberg, on podem veure que el 29,4% associen aquesta indeterminació a la *interacció* entre l’objecte mesurat i l’aparell de mesura i, com a conseqüència, modificació, de les magnituds mesurades. En algun cas posen el típic exemple del termòmetre (clàssic, per cert). En definitiva, associen les imprecisions al procés de mesura, la qual cosa posa de manifest que tampoc els professors tenen la visió que hi ha un canvi epistemològic: és la pròpia naturalesa quàntica la que estableix límits al coneixement. Per tant, tampoc donaran aquesta visió als alumnes de 2n bat. A més a més, és significatiu que els professors que esmenten la relació d’indeterminació que lliga l’*energia* amb el *temps*, no l’expliquen, en canvi sí ho fan en el cas de la que relaciona *posició* i *moment*. No obstant, no podem obviar que aquesta primera relació és bastant més complexa d’explicar si ho comparem al rendiment que se li pot traure, mentre que la darrera és més senzilla per als estudiants.

Cal destacar també que, en algun cas, la resposta són simplement les expressions matemàtiques sense cap altre comentari, la qual cosa ens indica que hi ha una visió excessivament operativa en alguns d’ells. En aquest sentit, és de destacar el següent exemple, on fins i tot es parla de valors esperats i autovalors: “*Fent diferenciar el valor*

esperat (valor mitjà) d'alguna magnitud amb els possibles valors mesurables (autovalors), de manera que queda clar que hi ha una certa indeterminació a les mesures i de cap manera es pot afinar més” on, dit siga de passada, roman la idea que la causa de les indeterminacions és el propi procés de mesura.

Tanmateix, hi ha professors (6/34) que ens donen idees correctes: “No podem tindre completament determinades la posició i el moment d’una partícula. Exemple del nucli i els electrons”, o també . “assumir la limitació que ens imposa la natura a l’hora de mesurar amb precisió certes magnituds que es troben relacionades, com posició-moment o energia-temps”.

El nombre de respostes en el sisé ítem és 33, el que ens dóna una mitja de 0,97 respostes per professor, i on hi ha 2 de NC.

ÍTEM 6: COM EXPLICARIES ALS ALUMNES EL CONCEPTE DE PROBABILITAT PER INTENTAR QUE CAPTEN EL SEU SIGNIFICAT?	Nombre de professors/34
Probabilitat clàssica. Exemple dau o moneda	18/34
Exp. doble esclatxa amb fotons (Feynman)	4/34
ALTRES	11/34
NS/NC	2/34

Com podem observar, hi ha una majoria clara de professorat que no faria cap distinció entre el concepte de probabilitat quan tractem aspectes quàntics i el de probabilitat entesa des del punt de vista clàssic: posen els típics exemples del dau o la moneda.

Fins i tot en algun cas aquesta probabilitat s’associa al fet que l’aparell de mesura sempre té un error, p.e., “*No podem estar 100% segurs del que nosaltres mesurem, sempre hi haurà un error donat per l’aparell*”, on el fons subjau la concepció d’imprecisió/probabilitat associada a la mesura discutida anteriorment.

D’altra banda, hi ha qui circumscriu el concepte de probabilitat únicament per al cas dels orbitals, p.e., “*Probabilitat de trobar l’electró en una zona determinada de l’àtom. Aqueixa zona és on més pot estar l’electró*”.

No obstant, hi ha tres professors que parlen, una vegada més, de l’experiment de la doble esclatxa ja esmentat, proposta interessant per aclarir la qüestió de la probabilitat en quàntica. A tall d’exemple: “faria un experiment de doble esclatxa amb un feix d’un sol fotó. Aleshores quan faig passar el feix continue tenint el diagrama d’interferència. Això ho puc explicar dient que realment jo no puc predir la trajectòria del fotó (ja no té sentit parlar de trajectòries), però sí predir la probabilitat que acabe en un punt o altre”, amb el ben entés que quan el professor parla d’un feix d’un sol fotó, es suposa que es refereix que als detectors només els arriba un fotó cada vegada (com també proposa Feynman).

El nombre de respostes en l'ítem 7 és 172, el que ens dóna una mitja de 5,1 respostes per professor, i on hi ha 1 de NC.

ÍTEM 7: ASSENYALA APLICACIONS TANT TEÒRIQUES COM PRÀCTIQUES DE LA QUÀNTICA	Nombre de professors/34
Efecte fotoelèctric	13/34
Física mèdica/TAC/PET	12/34
Efecte túnel/microscopi e.t	10/34
Cèl·lules fotoelèctriques, cèl·lules fotovoltaiques, alarmes, sensors, portes automàtiques	10/34
Ordinadors/computació quàntics	9/34
Acceleradors/col·lisionadors de partícules (LHC,..)	7/34
Espectroscopia	7/34
Radioteràpia/hadronteràpia	6/34
Làser	7/34
Estructura atòmica/subatòmica de la matèria	7/34
Microscopi electrònic	6/34
Electrònica/componentes electrònica	6/34
Física de partícules i d'altres energies	3/34
Energia nuclear (bomba nuclear)	3/34
Ressonància magnètica nuclear	4/34
Teledetectors	3/34
Nanotecnologia/nous materials	4/34
ALTRES	55/34
NS/NC	1/34

Nombre de professors que donen 5 o més respostes correctes	14/34
Nombre de professors que donen 4 respostes correctes	7/34
Nombre de professors que donen 3 o menys de 3 respostes correctes	13/34

Observem que menys de la meitat de professors, en concret 14/34, ens ofereixen cadascun 5 o més exemples correctes d'aplicacions, mentre que la resta n'ofereixen menys de 4 cadascú. No obstant, podem veure que hi ha un ampli ventall de possibilitats a l'hora d'esmentar-ne, des de l'efecte fotoelèctric i la tecnologia que se'n deriva, fins a la nanotecnologia i els nous materials, passant per la computació quàntica, la física mèdica, el làser, etc...

Açò ens ve a dir que, igual que passa amb els llibres, si els professors en les seues classes esmenten aplicacions ho fan en nombre reduït i amb caràcter anecdòtic.

4.3. PRESENTACIÓ I ANÀLISI DELS RESULTATS OBTESOS AMB EL QÜESTIONARI D'ALUMNES.

Mostrem a continuació l'anàlisi dels resultats obtesos per als ítems proposats al qüestionari destinat als estudiants.

El qüestionari s'ha passat a una mostra de 61 alumnes de 2n de Batxillerat.

ÍTEM 1.1: QUÈ ÉS UN ESPECTRE DISCONTINU?	%CONCEPCIÓ ADEQUADA 14,8	Sd 4,5
---	------------------------------------	------------------

Únicament un petit percentatge (14,8 %) té un concepte adequat d'espectre q el caracteritza com el conjunt discret de freqüències absorbides o emeses pels àtoms d'un element, i que alhora recalca el seu caràcter únic, d'acord amb els criteris establerts al capítol anterior. Amb criteris benignes també em considerat correctes els que sols diuen la primera part.

En la resta hi ha un 32,7% de NS/NC i un 52,5% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com quan diuen que és el propi espectre qui absorbeix o emet energia, p.e., "*Espectre lluminós que absorbeix l'energia (llum) que els diferents tipus d'àtoms emeten*".

D'altra banda, el 29,5% del total d'estudiants de la mostra conceben l'espectre discontinu com un conjunt de freqüències o longituds d'ona absorbides o emeses, però la majoria d'aquests no tenen clara la diferència entre l'espectre d'absorció i el d'emissió, açò fa que presenten incorreccions greus com p.e., "*Un espectre discontinu és quan en un espectre òptic d'alguna substància es veuen ratlles negres on hauria de ser continu*".

I una dada bastant significativa és que tan sols un 8,2% del total d'estudiants de la mostra deixa entreveure la idea que cada espectre és únic.

Estos resultats venen a refermar la nostra hipòtesi de partida, on en particular tot apunta que els estudiants no aconsegueixen l'objectiu 3: "explicar la quantització de la llum, la matèria i determinades magnituds (E; L...)" perquè "No saben relacionar un salt d'un electró entre 2 nivells amb la corresponent banda de color de l'espectre".

ÍTEM 1.2: COM EXPLICA EL MODEL DE BOHR ELS ESPECTRES DISCONTINUS?	%CONCEPCIÓ ADEQUADA 8,2	Sd 3,5
--	-----------------------------------	------------------

Com podíem preveure a la vista del que hem extret a l'ítem 1.1, en aquesta 2a pregunta sobre espectres, els resultats encara són més preocupants: tan sols el 8,2% dels alumnes és capaç d'explicar satisfactòriament els espectres discontinus a partir de les corresponents transicions electròniques entre òrbites permeses amb energia E (i moment angular L) ben definida, de tal manera que l'emissió o absorció d'energia radiant es produeix quan l'electró passa d'un estat (òrbita) a un altre, essent la

frequència de la radiació emesa o absorbida proporcional a la diferència d'energia entre nivells. De fet, fent ús d'un criteri benigne hem donat també per bones aquelles respostes que no fan ni aquest darrer comentari ni el de l'energia E ben definida.

En la resta hi ha un 65,6% de NS/NC (alt nombre d'*abstencions*) i un 26,2% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, greus, com quan les afirmacions són inacabades en el següent exemple: “*Bohr ho explica mitjançant els fotons, que són partícules..*” .

D'altra banda, solament un petit percentatge (14,8%) esmenta les transicions electròniques, i alguns d'ells ho fan parcialment, com quan parlen de transicions *de pujada* (espectre d'absorció) , però no *de baixada* (espectre d'emissió), p.e., “*Bohr ho explica per l'excitació dels electrons a nivells superiors per exposició a l'energia de la llum*”.

ÍTEM 1.3: POT TINDRE QUAalsevol VALOR L'ENERGIA D'UN ELECTRÓ LLIGAT EN UN ÀTOM D'HIDROGEN? JUSTIFICA- HO BREUMENT.	%CO.AD 8,2	Sd 3,5
---	---------------	-----------

En la mateixa línia que l'ítem anterior, i tenint en compte el que hem dit abans, observem que novament el percentatge d'alumnes que manifesten tindre un adequat concepte quant al nombre discret de valors que, d'acord amb el postulat on Bohr quantifica el moment angular (mitjançant el nombre quàntic principal n), pot tindre l'energia d'un electró lligat en un àtom d'hidrogen, és molt baix (8,2%), fins i tot després de considerar també com a adequades, emprant criteris de benignitat, contestacions on es parla de la quantització de l'energia E per n, però no s'esmenta el moment angular.

En la resta hi ha un 18% de NS/NC i un 73,8% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, greus, com quan s'afirma que l'energia de l'electró no canvia, p.e., “*No, un electró sempre té la mateixa energia*” o d'altres, basades en el que podríem anomenar una satel·lització del problema, que oblida els trets quàntics del model de Bohr, p.e., “*Ha d'estar en un interval per poder orbitar al voltant del nucli, com els satèl·lits*”. Val a dir que aquesta darrera frase es reproduïx en el 8,9% dels casos considerats incorrectes.

Cal fer esment també d'aquelles respostes (20% dels incorrectes) que venen a dir que l'energia de l'electró ha de ser menor que l'energia d'ionització, a tall d'exemple: “*No, perquè si sobrepassa l'energia llindar se separa de l'àtom*”, que són incorrectes perquè el problema no es que hi haja un límit als valors de l'energia sinó que aquesta esta quantitzada.

Així doncs, podem concloure que, per tot plegat, tant a l'ítem 1.2 com en aquest, els estudiants tenen massa dificultats per assolir l'objectiu 3 abans esmentat.

ÍTEM 2.1: QUINA IDEA TENS D'UNA PARTÍCULA?	%CO.AD 9,8	Sd 3,8
---	----------------------	------------------

Únicament un molt petit percentatge (9,8 %) té un concepte adequat de partícula com una petita porció de matèria, de massa m , que evoluciona d'acord amb les lleis de Newton. Amb criteris benignes també em considerat correctes els que sols diuen la primera part.

En la resta hi ha un 11,5% de NS/NC i un 78,7% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, greus, com la confusió amb el concepte de partícula elemental, p.e., *“La part més petita de la matèria”*.

Com a contrapartida, tenim que el 32,8% del total d'estudiants de la mostra conceben la partícula com un petit fragment de matèria, però la majoria d'aquests no esmenten la seua característica principal, la massa, i per tant presenten incorreccions greus com ara p.e., *“És una petita part de la substància que poden ser àtoms, molècules, partícules subatòmiques...”*

Açò ens porta a pensar que els aprenents no tenen clar el concepte clàssic de partícula i que, consegüentment, es troben amb dificultats a l'hora d'entendre la pròpia física newtoniana en els seus conceptes més bàsics, per tant encara més quan es fa el pas cap a la quàntica.

ÍTEM 2.2: QUINA IDEA TENS D'UNA ONA?	%CO.AD 8,2	Sd 3,5
---	----------------------	------------------

Pel que fa al concepte d'ona es reproduïxen els resultats, si no s'agreugen: el 8,2% de la mostra té la imatge d'ona com la d'una vibració que es propaga en l'espai, de forma que transmet energia (però no matèria) de forma contínua, i es distingeix dels fluxos de partícules per les propietats d'interferència i difracció. Aplicant criteris de benignitat hem inclòs també dins d'aquest grup aquells que només diuen la primera part.

En la resta hi ha un 6,6% de NS/NC i un altíssim percentatge (85,2%) d'incorrectes, cosa sorprenent ja que en 2n de batxiller hi ha un tema de “Vibracions i ones”. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com la idea que una ona és un flux de partícules, p.e., *“És un moviment de partícules”*.

D'altra banda, només un 23% del total concep l'ona com una vibració que es propaga, de manera que en la resta trobem expressions greus com la de canviar vibració per energia (el que sí es pot dir és que aquesta vibració transmet energia), p.e., *“És una propagació d'energia”*.

Açò ens reforça encara més en la idea que els aprenents no tenen clar el concepte clàssic d'ona i que, consegüentment, es troben amb dificultats a l'hora d'entendre la pròpia física newtoniana en els seus conceptes més bàsics, per tant encara més quan es fa el pas cap a la quàntica.

Així, podem deduir que, tant en aquest ítem com en el 2.1, no aconsegueixen ni l'objectiu 1 en la seua primera part: “comprendre que la física clàssica funciona amb els

models de partícula i ona, deterministes, que no poden explicar una sèrie d'experiències", ja que la dificultat de "entendre la física newtoniana en els seus conceptes més bàsics" els ho impedeix, ni el 6: "assenyalar els límits de validesa de la física clàssica i indicar les diferències més notables entre la física clàssica i la física quàntica", perquè "No tindran clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuen la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana".

ÍTEM 2.3: QUINA IDEA TENS D'UN ELECTRÓ?	%CO.AD 14,8	Sd 4,5
--	-----------------------	------------------

Solament un 14,8% té un concepte adequat d'electró pel que fa que és una "partícula" elemental carregada negativament i amb massa que constitueix un dels components fonamentals de l'àtom, i que no és ni una partícula clàssica ni un camp clàssic (on hem tornat a aplicar criteris de benignitat en no exigir ni la característica d'elementarietat, ni que se'ns parlara dels electrons com a objectes nous que no són ni partícules ni ones en sentit clàssic. De fet, no n'hi ha cap que comente aquests dos trets).

En la resta hi ha un 0% de NS/NC, però un 85,2% (altíssim percentatge) d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, confusions, com p.e., "*Una partícula electro negativa que orbita al voltant del nucli d'un àtom*" (segurament l'alumne volia dir de càrrega negativa).

Per altre costat, dir que el 24,6% dels alumnes qüestionats fan referència al concepte d'òrbita quan parlen del moviment de l'electró al voltant del nucli. Sembla, per cert, que els electrons sols poden existir en eixa situació, com si no hi haguera electrons lliures. També arriben a dir en el 8,2% dels casos que la massa és negligible o quasi nul·la, com en aquest exemple: "*És una partícula subatòmica de massa negligible i càrrega negativa que orbita al voltant del nucli de l'àtom, de càrrega positiva*".

ÍTEM 2.4: QUINA IDEA TENS D'UN FOTÓ?	%CO.AD 6,6	Sd 3,2
---	----------------------	------------------

Únicament un baixíssim percentatge (6,6%) té un concepte adequat de fotó com el paquet o quant d'energia que constitueix la radiació electromagnètica, sense massa (es propaguen amb velocitat c) ni càrrega, i que, de la mateixa manera que l'electró, no és ni una partícula clàssica ni un camp clàssic. En aquest sentit, val a dir que no hi ha cap estudiant que faça referència a aquest últim i fonamental tret, així que amb criteris benignes també em considerat correctes aquelles respostes que només parlen de la primera accepció, incloent-hi les que anomenen partícula al fotó.

En la resta hi ha un 18% de NS/NC i un 75,4% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com quan, paral·lelament al cas de l'ítem 1.1, es diu que és el propi fotó qui emet llum, p.e., "*És una partícula que emet llum*".

Com a contrapartida, tenim que el 44,3% del total d'estudiants de la mostra relacionen al fotó amb la llum, però la majoria cometen una incorrecció greu en oblidar-se'n de la seua característica principal, l'energia, p.e., *“És la partícula component de la llum”*.

És per tot açò que podem afirmar que, tant a l'ítem 2.3 com en aquest, els aprenents no assoleixen l'objectiu 2: “comprendre que els electrons, protons, fotons., no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous amb un comportament nou, el quàntic”, perquè “els veuen com a partícules clàssiques, en el cas dels fotons, i com a partícules clàssiques o “duals” (ona i partícula, o bé ona o partícula segons experiència), en el cas dels electrons”. Una altra evidència que no s'ha produït el canvi ontològic d'ona i partícula clàssica a quantons, objectes nous amb un comportament quàntic.

Tampoc aconseguixen el 6 : “assenyalar els límits de validesa de la física clàssica i indicar les diferències més notables entre la física clàssica i la física quàntica”, perquè “No tindran clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuen la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana”.

ÍTEM 3.1: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN PERDIGÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.	%CO.AD 9,8	Sd 3,8
--	---------------	-----------

Tan sols un baix percentatge (9,8%) dels estudiants mostra una concepció adequada pel que fa referència a l'estat de moviment d'un perdigó (que podem considerar en bona aproximació com una partícula en sentit clàssic), on res prohibeix que posició i velocitat es coneguen simultàniament (ambdues amb altíssima precisió), a partir de les equacions de moviment que es dedueixen de la 2^a llei de Newton.

En la resta hi ha un 8,2% de NS/NC i un 82% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com quan es diu que el moviment que segueix el perdigó és un moviment rectilini uniforme, p.e., *“Sí, mitjançant l'equació. del MRU”* Per contra, un 31,1% del total d'alumnes cita en les seues respostes les equacions/fórmules del moviment, però malgrat això alguns d'ells contesten de forma exclusivament matemàtica i operativa, com p.e., *“Sí que es pot determinar, ja que tenint certa informació sobre el perdigó, podem saber les altres coses, encara que per saber la velocitat o la posició, es necessita conèixer l'altra, perquè és una dada necessària en la fórmula”*.

ÍTEM 3.2: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA? EXPLICA-HO BREUMENT.	%CO.AD 18,0	Sd 4,9
---	----------------	-----------

El 18% de la mostra contesta adequadament que sí es pot representar la trajectòria del perdigó, ja que aquesta es pot obtenir a través de les equacions de moviment ja esmentades anteriorment.

En la resta hi ha un 9,9% de NS/NC i un 72,1% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com la confusió amb una gràfica posició-temps, p.e., “Sí, es pot realitzar una gràfica que expresse la posició en funció del temps”(completa amb un dibuix d'una gràfica posició-temps d'un MRU). Val a dir que aquesta confusió es reproduceix en un percentatge del 15,9% dels incorrectes.

Així, podem concloure que, tant a l'ítem 3.1 com en aquest, no assoleixen l'objectiu 1: “comprendre que la física clàssica funciona amb els models de partícula i ona, deterministes, que no poden explicar una sèrie d'experiències ” (ja que la partícula i ona clàssiques inclouen lleis de moviment clàssiques), ja que la dificultat de “entendre la física newtoniana en els seus conceptes més bàsics” els ho impedeix.

Ni tampoc aconsegueixen el 6 : “assenyalar els límits de validesa de la física clàssica i indicar les diferències més notables entre la física clàssica i la física quàntica”, perquè “No tindran clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuen la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana”.

<p>ÍTEM 3.3: ES POT DETERMINAR SIMULTÀNIAMENT LA POSICIÓ I LA VELOCITAT D'UN ELECTRÓ? EXPLICA-HO BREUMENT.</p>	<p>%CO.AD 6,6</p>	<p>Sd 3,2</p>
---	-----------------------	-------------------

En aquest cas observem un baixíssim percentatge (6,6%) quant al nombre d'alumnes que responen adequadament indicant que no es poden determinar simultàniament amb precisió absoluta la posició x i la quantitat de moviment p de l'electró, donat que les relacions d'incertesa de Heisenberg ho impedeixen.

En la resta hi ha un 18% de NS/NC i un 75,4% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com les que al·ludeixen a la *invisibilitat* de l'electró, “En el cas de l'electró no es pot determinar ja que aquest no es pot observar”

D'altra banda el 15,2% de les respostes incorrectes manifesten una incorrecció greu basada en que és el procés de mesura el causant de les indeterminacions respectives, p.e., “No, quan intentes determinar on està, ja has canviat la seua velocitat i posició”.

Estos resultats venen a refermar la nostra hipòtesi de partida, on en particular tot apunta que els estudiants no aconsegueixen ni l'objectiu 2: “comprendre que els electrons, protons, fotons, etc., no són ni ones ni partícules clàssiques, sinó objectes nous amb un comportament nou, el quàntic” perquè “els veuen com a partícules clàssiques, en el cas dels fotons, i com a partícules clàssiques o “duals” (ona i partícula, o bé ona o partícula segons experiència), en el cas dels electrons”, ni l'objectiu 5: “Entendre el significat de les relacions d'incertesa de Heisenberg” ja que “Interpreten les relacions d'incertesa de Heisenberg com un error en la mesura per la petitesa de l'electró, protó, etc. /Mantenen

el determinisme o les òrbites clàssiques”, ni el 6: “assenyalar els límits de validesa de la física clàssica i indicar les diferències més notables entre la física clàssica i la física quàntica”, donat que “No tindran clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuen la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana”.

ÍTEM 3.4: ES POT REPRESENTAR LA SEUA TRAJECTÒRIA? EXPLICA-HO BREUMENT.	%CO.AD 8,2	Sd 3,5
---	---------------	-----------

Com veiem es manté un baix percentatge (8,2%) en aquesta 2^a qüestió sobre l'estat d'un electró, així doncs és un reduït nombre d'estudiants qui contesta adequadament que no es pot determinar (i encara menys representar) la trajectòria de l'electró, com a conseqüència de les relacions d'incertesa de Heisenberg, que impedeixen determinar simultàniament amb precisió absoluta la posició x i la quantitat de moviment p d'aquest, on els límits d'aquesta imprecisió venen donats per $\Delta x \Delta p_x > h/4\pi$. Hem fet ús de criteris de benignitat acceptant respostes que justifiquen el no basant-se en arguments probabilístics, p.e, “ *No es pot representar la seua trajectòria perquè funciona amb probabilitats*”.

En la resta hi ha un 21,3% de NS/NC i un 70,5% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com aquelles que parteixen de la base que com no es pot veure l'electró, no podem saber com és la trajectòria, però que en el fons sí accepten que es pugui parlar de trajectòria, com en el cas clàssic, p.e., “*No es pot representar, l'electró és un element molt menut que no es pot veure, amb l'electró entraríem dins el món micro*”.

D'una altra banda és molt significatiu que només el 8,2% del total faça referència als orbitals en les seues contestacions, i la majoria d'aquests no tenen clar el propi concepte d'orbital, donat que el conceben com una regió que existeix amb independència de l'electró, com queda palés al següent exemple, considerat com una incorrecció greu: “*No, es pot determinar més o menys en l'orbital que es troba*”.

D'esta manera, podem concloure que no assoleixen ni l'objectiu 2 (ja citat a l'ítem 3.3), ni l'objectiu 4: “Comprendre la funció d'estat Ψ i la seua interpretació probabilista” perquè no tenen “una imatge clara del que representa la Ψ i, per tant, un orbital / No tindran clars els conceptes de probabilitat”. Tampoc assoleixen ni l'objectiu 5 ni el 6, també esmentats anteriorment.

ÍTEM 4.1: EL DETERMINISME CLÀSSIC AFIRMA QUE SI ES CONEIXEN LES CONDICIONS INICIALS D'UN SISTEMA I LA SEUA EQUACIÓ DE MOVIMENT (p.e un MRUA) PODEM PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA SOBRE EL MATEIX. EXPLICA-HO BREUMENT.	%CO.AD 16,4	Sd 4,7
---	----------------	-----------

Únicament el 16,4% del total de la mostra presenta una concepció adequada que es fonamenta en que la mecànica clàssica permet, si coneixem l'equació de moviment $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ i l'estat del sistema en un instant donat, és a dir, les condicions inicials, determinar l'estat en qualsevol altre instant. Novament hem usat criteris de benignitat acceptant respostes fonamentades solament en les equacions del MRUA, sense generalització posterior.

En la resta hi ha un 42,6% de NS/NC i un 41% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com les que posen en contraposició probabilitat i experimentació, p.e., *“Es pot predir amb exactitud perquè no s'aplica probabilitat, donat que es basa en l'experiència”*.

A més, el 27,5% dels que contesten ho fan de forma totalment matemàtica o formulística, en termes de paràmetres/dades i fórmules que donaran uns resultats, això fa que queden patents incorreccions greus com p.e., *“La fórmula del moviment relaciona als diferents paràmetres, per tant si coneixem els paràmetres i la fórmula per relacionar-los podem aconseguir qualsevol mesura”*.

Açò fa que les dificultats “a l'hora d'entendre la pròpia física newtoniana en els seus conceptes més bàsics” i el fet que “no tenen clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuen la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana”, els impedisquen assolir els objectius 1 i 6, respectivament.

ÍTEM 4.2: S'APLICA AQUEST DETERMINISME IGUALMENT ALS ÀTOMS, ELECTRONS, FOTONS, ETC.? JUSTIFICA-HO.	%CO.AD 9,8	Sd 3,8
---	---------------	-----------

Hi ha un baix percentatge d'estudiants (9,8%) que mostra una concepció adequada en el sentit que no es pot aplicar igualment el determinisme a estos objectes, ja que, per exemple en el cas de l'electró, s'associa, de forma qualitativa, el seu caràcter ondulatori a una certa deslocalització que impedeix situar-lo en un punt determinat. S'introdueix, per tant, una certa indeterminació en el moviment que pot seguir l'electró, per la qual

cosa aquest mancarà d'una trajectòria absolutament determinada. En el fons d'aquest argument, subjauen les relacions d'indeterminació de Heisenberg.

Hem fet ús de criteris de benignitat acceptant respostes que justifiquen el no basant-se en arguments probabilístics, p.e., “No, perquè funciona amb probabilitats”.

En la resta hi ha un 52,5% de NS/NC i un 37,7% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com aquelles que confereixen a aquests objectes un comportament clàssic, p.e., “Sí, perquè també es pot esbrinar la posició d'un element atòmic sabent les seues condicions inicials”

Com a contrapartida, trobem que un 58,6% dels que contesten ho fan a favor del no, però la majoria usen arguments erronis com associar la indeterminació a l'error en la mesura donada la petitesa dels objectes, els quals són incorreccions greus, p.e., “No, ja que aquestes partícules són tan menudes que ens és impossible determinar-ho amb exactitud”.

Així doncs, podem concloure que, per tot plegat, els estudiants no assoleixen els objectius 2,5 i 6, donat que les respectives dificultats els ho impedeixen.

ÍTEM 5.1: COM ES CARACTERITZA EL MOVIMENT (O ESTAT DE MOVIMENT) D'UN PERDIGÓ EN UN INSTANT DONAT?.	%CO.AD 11,5	Sd 4,1
---	-----------------------	------------------

Observem un 11,5% de respostes que mostren una concepció adequada a l'hora de descriure el moviment d'un perdigó (que podem considerar en bona aproximació com una partícula clàssica) en un instant donat mitjançant les magnituds de posició \mathbf{r} i velocitat \mathbf{v} (o quantitat de moviment \mathbf{p}), i en qualsevol instant mitjançant la seua equació de moviment. Hem emprat de nou criteris de benignitat en validar respostes que, a més de posició i velocitat, contenen altres magnituds com acceleració o temps.

En la resta hi ha un 16,4% de NS/NC i un 72,1% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com quan es posa a l'acceleració com a magnitud per caracteritzar el moviment, i a més es fa malament, p.e., “Degut a la seua acceleració, si aquesta és nul·la està en repós o en MRU”.

D'altra banda el 31,1% de la mostra sí inclou en les seues afirmacions la posició i la velocitat, però n'esmenten d'altres que són del tot irrellevants per al que es demana, com la força o forces, o bé ja estan contingudes en la informació que proporcionen \mathbf{r} i \mathbf{v} , a tall d'exemple: “Es caracteritza per la posició i la velocitat, i la seua direcció”.

Per tant, podem dir que els alumnes no aconsegueixen ni l'objectiu 1 (en la seua primera part): “comprendre que la física clàssica funciona amb els models de partícula i ona, deterministes, que no poden explicar una sèrie d'experiències”, ja que la dificultat de “entendre la física newtoniana en els seus conceptes més bàsics” els ho impedeix; ni l'objectiu 6 (en la seua segona part): “assenyalar els límits de validesa de la física clàssica i indicar les diferències més notables entre la física clàssica i la física quàntica”, ja que “No tindran clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb

la quàntica, perquè no veuen la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana”.

ÍTEM 5.2: CARACTERITZA L'ESTAT D'UN ELECTRÓ?	COM ES %CO.AD 4,9	Sd 2,8
--	-------------------------	-----------

Comprovem que un baixíssim percentatge de la mostra (4,9%) caracteritza de forma adequada l'estat d'un electró en base a un model més general que no el clàssic per descriure el seu comportament, a partir del que Schrödinger va anomenar funció d'ones o funció d'estat Ψ , que s'obté resolent la denominada equació de Schrödinger. Model que hem d'utilitzar perquè els electrons, fotons, etc., no són ni simplement ones ni simplement partícules, sinó objectes nous amb un comportament quàntic. També hem considerat com equivalents les respostes que apunten els quatre nombres quàntics n , l , m_l i m_s que es dedueixen de la Ψ .

En la resta hi ha un 39,4% de NS/NC i un 55,7% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com els que mantenen les mateixes magnituds que en el cas clàssic, és a dir, posició i velocitat, però n'afegeixen una altra, p.e., *“Igual que el perdigó, però a més per la seua energia elèctrica”*.

Per altra banda, val a dir que només un 4,9% d'aprenents fan referència en les seues contestacions a conceptes com probabilitat i orbital; malgrat això, no tenen clar el propi concepte d'orbital, donat que el conceben com una regió que existeix amb independència de l'electró, com queda palés al següent exemple, *“Mitjançant la probabilitat de trobar-lo en un orbital”*.

Estos resultats venen a refermar la nostra hipòtesi de partida, on en particular tot apunta que els estudiants no aconseguen els objectius 4 i 6 (segona part) perquè les respectives dificultats no els ho permeten.

ÍTEM 6: LA PROBABILITAT S'USA QUAN NO ÉS POSSIBLE PREDIR AMB EXACTITUD EL RESULTAT D'UNA MESURA. S'UTILITZA EN L'ESTUDI DE FOTONS, ELECTRONS?. JUSTIFICA LA RESPOSTA.	%CO.AD 6,6	Sd 3,2
--	---------------	-----------

Solament un 6,6% d'alumnes ofereix un concepte adequat quan, d'acord amb els nostres criteris de correcció, esmenten que sí s'utilitza la probabilitat, en particular el quadrat de la Ψ , $|\Psi(r,t)|^2$, representa la probabilitat per unitat de volum de trobar l'electró. També hem acceptat com a vàlides respostes que addueixen al concepte d'orbital.

En la resta hi ha un 22,9% de NS/NC i un 70,5% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com aquelles en què es justifica l'ús de la

probabilitat per minimitzar la indeterminació causada per l'error en la mesura degut a la petitesa d'estos objectes, p.e., *“Sí, perquè en tractar-se de partícules tan menudes és difícil prendre mesures amb exactitud”*.

Per altre costat, observem un percentatge d'un 14,9% que justifiquen que s'utilitze la probabilitat perquè no es pot determinar amb exactitud la posició, p.e., *“Sí, ja que és impossible determinar amb exactitud la posició d'un electró.”*, la qual cosa suposa una incorrecció greu perquè les relacions d'incertesa de Heisenberg no diuen que no es puga determinar amb precisió la posició d'un electró en un instant donat, sinó que, en tot cas, el preu que caldria pagar per poder-ho fer és desconéixer totalment la seua quantitat de moviment en aqueix instant.

És per tot açò que podem afirmar que els aprenents no assoleixen els objectius 4 i 5 donat que les respectives dificultats els ho impedeixen.

ÍTEM 7: EN QUINES SITUACIONS DEIXA DE SER VÀLIDA LA FÍSICA CLÀSSICA?.	%CO.AD 1,6	Sd 1,6
--	---------------	-----------

Només un ínfim percentatge (1,6%) dels qüestionats té una concepció adequada del que podem anomenar el límit clàssic: quan el producte de dues magnituds conjugades pren un valor numèric superior a la constant de Planck ens trobem en el domini de la física clàssica. Encara que generalment açò succeeix en els fenòmens macroscòpics, hi ha també fenòmens i dispositius macroscòpics de caràcter quàntic (p.e., el làser, els díodes i transistors, els superconductors, l'heli superfluid, etc). En aquest cas hem optat també per aplicar criteris de benignitat considerant acceptables respostes en què es fa referència a l'efecte fotoelèctric, els espectres atòmics o el model de Bohr, i ho relacionen amb la quantització de l'energia.

En la resta hi ha un 26,3% de NS/NC i un 72,1% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, molt greus, com les que venen a qualificar d'incorrectes totes les teories atòmiques clàssiques, p.e., *“La física clàssica introdueix teories que no són correctes, com per exemple totes les teories relacionades amb l'àtom, que han sigut desterrades”*, com si l'aparició de la teoria quàntica suposara la invalidesa automàtica de les anteriors teories en qualsevol context.

També cal destacar un cert percentatge (11,5%) de mostra que es fonamenta en la idea que la física quàntica solament és aplicable en el món microscòpic, p.e., *“A nivell atòmic o subatòmic”*.

D'esta manera, podem concloure que no assoleixen els objectius 1 (segona part),5,6 (primera part), ja que les dificultats respectives no els ho permeten.

ÍTEM 8: QUINES DIFERÈNCIES HI HA ENTRE LA FÍSICA CLÀSSICA I LA FÍSICA QUÀNTICA?.	%CO.AD	Sd
Percentatge d'estudiants que donen 2 o més diferències correctes	0	0
Percentatge d'estudiants que donen 1 diferència correcta	4,9	2,8

Fixem-nos que la pregunta parlava de diferències, en plural, tanmateix no hi ha cap estudiant que n'haja donat més d'una correcta, possiblement perquè en física i química no hi ha "tradició" ni per part dels professors, ni dels llibres, d'explicitar-les, excepte en el cas del camp gravitatori i el camp elèctric, on es pregunta, fins i tot en les PAU, les analogies i diferències entre ells. Sent així hem considerat acceptar com a vàlides respostes amb una única diferència correcta.

Observem que un baixíssim percentatge de la mostra (4,9%) té una concepció adequada a l'hora d'assenyalar com a mínim una diferència, amb respostes com p.e., "*La física clàssica parla de certeses i la física quàntica de probabilitats*", o "*quantització de l'energia*" encara que no s'ajusten del tot als nostres criteris.

En la resta hi ha un 18% de NS/NC i un 77,1% d'incorrectes. Les incorreccions que hem trobat són, en alguns casos, greus, com la confusió de la física quàntica amb la relativitat, p.e., "*Que la física quàntica s'usa quan les velocitats s'aproximen a la de la llum, de tal forma que les fórmules canvien ja que es produeixen deformacions del temps i l'espai*". Val a dir que aquesta incorrecció es dona en un 36,1% dels casos.

Altres tipus d'incorreccions que trobem són derivades de la contraposició dels termes exactitud i probabilitat, p.e., "*La física clàssica és més exacta i la quàntica té un caràcter més probabilístic*".

Açò vol dir que "no tenen clars els límits de la física clàssica ni les diferències amb la quàntica, perquè no veuen la física quàntica com un canvi necessari front als inconvenients de la newtoniana" i esta dificultat els impedeix assolir l'objectiu 6 en la seua segona part: "Assenyalar els límits de validesa de la física clàssica i indicar les diferències més notables entre física clàssica i física quàntica".

ÍTEM 9: QUINES IMPLICACIONS TECNOLÒGIQUES I SOCIALS CONEIXES DE LA FÍSICA QUÀNTICA?	%CO.AD	Sd
Percentatge d'estudiants que donen 3 o més implicacions tecnològiques correctes	9,8	3,8
Percentatge d'estudiants que donen 2 implicacions tecnològiques correctes	28,1	5,8
Percentatge d'estudiants que donen 1 implicació tecnològica correcta	19,1	5,0
Percentatge d'estudiants que no donen cap implicació tecnològica correcta	43,0	6,3

Únicament hi ha un percentatge del 9,8% que dona exemples adequats d'implicacions tecnològiques (de socials no en donen cap) de la física quàntica, majoritàriament els del làser i el microscopi electrònic. Com a criteri de correcció, hem considerat vàlides aquelles respostes on almenys resulten involucrades tres de les implicacions següents, esmentades pels alumnes:

“El làser, el microscopi electrònic, la nanotecnologia, la tecnologia dels ordinadors, la medicina, la radiació que emet el pas d'un electró d'un nivell a un altre per crear la llum que il·lumina les nostres llars”.

Es pot veure que són limitades i que no esmenten aplicacions com el microscopi d'efecte túnel o les cèl·lules fotoelèctriques, que sí apareixen en els llibres de text, o com la física nuclear i de partícules, que hem proposat en els criteris.

En la resta hi ha un 13,2% de NS/NC i un 77% d'incorrectes. Alguns d'estos últims, en la línia del que comentàvem a l'ítem anterior, ens han posat exemples de relativitat com “el problema dels bessons”, i altres ens han sorprès parlant-nos de *l'ull de falcó*, dispositiu que s'usa en el tennis per determinar, en cas de dubte, si la pilota se n'ha eixit o no dels límits de la pista corresponents.

És per tot açò que podem afirmar que els estudiants no assolixen l'objectiu 7: “Valorar l'important desenvolupament científic i tècnic que va suposar la física quàntica” donat que “No veuran les connexions de la quàntica amb la tecnologia i la societat”.

5. RECAPITULACIÓ, CONCLUSIONS I PERSPECTIVES

En el primer capítol s'ha plantejat el problema de l'ensenyament de la quàntica, que ha propiciat el desenvolupament d'aquesta investigació, i que es concretà en les preguntes següents:

¿Quines són les dificultats dels estudiants de física de 2n de batxillerat en la comprensió dels aspectes més bàsics de la física quàntica?

¿Quines són les principals mancances de l'ensenyament de la física quàntica que entrebanquen la comprensió dels estudiants de física de 2n de batxillerat?

Com a punt de partida per a iniciar la investigació d'aquest problema, al capítol dos s'ha introduït una hipòtesi o solució temptativa orientada a la seua clarificació i formulada en els següents termes:

Hipòtesi: *“La introducció de la física quàntica i/o dels principals conceptes implicats en l'ensenyament convencional de la física es fa sense tindre en compte els resultats de la recerca didàctica sobre les dificultats de l'alumnat i els nous models d'ensenyament aprenentatge, i això farà que no s'afavorisca en els estudiants de secundària la comprensió de la física quàntica.”.*

Aquesta hipòtesi ha sigut fonamentada tant des del punt de vista històric com didàcticament, recorrent a les aportacions de la comunitat científica al respecte. Amb l'objectiu de testar la hipòtesi s'han elaborat uns dissenys experimentals que s'han aplicat als principals agents implicats en el procés: alumnes, professors i llibres de text. En particular, la xarxa d'anàlisi de textos s'ha aplicat sobre 7 dels llibres de text més usats en l'ensenyament de la física de 2n de batxillerat. També s'ha passat un qüestionari a professors, de manera que s'ha pogut comptar amb la col·laboració d'un total de 34 professors en actiu i en formació. Finalment, s'ha passat un qüestionari a alumnes de 2n de batxillerat, en concret 61 estudiants.

Tot açò per a indagar, d'una banda, quines són les dificultats dels alumnes i, de l'altra, quin grau de responsabilitat té en això l'ensenyança rebuda, en concret a través de dues fonts d'informació, el professorat i els llibres de text.

CONCLUSIONS.

De l'estudi dels dissenys o instruments desenvolupats, podem extraure'n les següents conclusions:

1.-En resum, després de l'anàlisi dels resultats obtinguts amb l'aplicació de la xarxa d'anàlisi de textos, podem concloure que els llibres, considerats globalment, presenten característiques que no afavoreixen el correcte aprenentatge de la física quàntica.

Sostenim aquesta afirmació, com acabem de dir, atenent a l'estudi dels resultats obtinguts en els diferents ítems proposats, que resumim en els següents punts:

- Menys de la meitat (3/7) dels llibres estudiats adverteixen de l'existència d'una crisi en la física clàssica que dóna lloc posteriorment a la física moderna, en el nostre cas concret, a la física quàntica.

-La majoria de llibres (6/7) insisteixen a explicar el problema del cos negre, sense tindre en compte que no és gens adequat didàcticament perquè resulta sempre d'especial dificultat a l'hora que els alumnes l'entenguin bé, ja que exigeix coneixements d'electromagnetisme, termodinàmica, etc., que no tenen.

-Cap dels llibres (0/7) presenta els electrons, protons, neutrons, fotons, etc. com a objectes de tipus nou, és a dir, diferents dels models clàssics de partícula i ona.

-Pocs llibres (2/7) presenten altres magnituds quantificades a banda de l'energia, quedant la quantització limitada a esta darrera magnitud.

-Pocs llibres (2/7) ofereixen una justificació adequada a l'abandó de les òrbites en quàntica.

-Únicament un dels llibres (1/7) presenta les limitacions del model de Bohr, la qual cosa contribueix a la pèrdua de sentit per a l'alumne dels model quàntic presentat posteriorment.

-Solament un llibre (1/7) relaciona la incertesa com intrínseca a la pròpia naturalesa dels ens quàntics, la qual cosa no afavoreix la visió de canvi epistemològic en el sentit del que podem o no conèixer dels sistemes quàntics.

-Més de la meitat dels llibres (4/7) desvinculen la física quàntica del món macroscòpic, amb la consegüent pèrdua de motivació per part dels estudiants.

-Tan sols en dos dels llibres (2/7) es poden trobar 3 diferències correctes entre la física clàssica i la quàntica, diem trobar perquè cap dels llibres les fa explícites, cosa que contribuiria a comprendre i delimitar millor ambdues.

-Únicament un llibre (1/7) mostra les implicacions de la quàntica amb la medicina, i el mateix succeeix amb la nanotecnologia. Idem en el cas de les implicacions de la

quàntica amb la societat. Això denota l'escassa importància que se li dóna a les relacions CTS, que, justament, és on moltes vegades es centra l'interés dels alumnes, més encara a aquest nivell (2n de batxillerat).

2.-La pràctica habitual no afavoreix un aprenentatge significatiu, el professorat introdueix de forma acrítica els conceptes, des d'orientacions epistemològiques distorsionades i sense comptar amb els resultats de la investigació didàctica.

Basem aquesta conclusió en l'anàlisi dels resultats obtinguts en els diversos ítems proposats al qüestionari de professors, que resumim en les observacions següents:

-Un elevat nombre de professors, el 28,1%, tenen idees alternatives que fan referència a la concepció de dualitat com ona associada a partícula. No hi ha en aquesta concepció res que indique el canvi ontològic que es dóna en la física quàntica, és a dir, que no es tracta ni d'ones ni de partícules clàssiques, sinó quantons. Aquest patró es repeteix, com hem vist, als llibres de text.

- També es pot dir el mateix d'altres dues concepcions errònies que fan referència a les relacions d'indeterminació de Heisenberg. La primera, el 20,6% dels ensenyants tenen la idea que no és possible determinar amb precisió la posició d'una *partícula*, idea que transmetran als seus alumnes. La segona, el 29,4% associa les imprecisions al procés de mesura, la qual cosa posa de manifest que tampoc els professors tenen la visió que hi ha un canvi epistemològic: és la pròpia naturalesa quàntica la que estableix límits al coneixement. Per tant, tampoc donaran aquesta visió als alumnes de 2n de batxillerat.

-Un percentatge significatiu del professorat (11,8%) estableix una doble associació: de la física clàssica al món macroscòpic i de la quàntica al microscòpic, que a efectes pràctics es tradueix en una desvinculació de la quàntica respecte del món macroscòpic, amb la conseqüent pèrdua de motivació per part dels estudiants. Aquest patró es repeteix també als llibres de text.

-El 29,4% dels docents fan referència a la resolució de problemes com a objectiu, però tenen la idea d'una col·lecció de problemes numèrics, sobretot no plantejats com una investigació (emissió d'hipòtesis, posada a prova d'aquestes per verificar-les o falsar-les, extraure conclusions, fer-se noves preguntes...), i això contribueix a un aprenentatge quasi exclusivament matemàtic del tema.

-Menys de la meitat de professors ens ofereixen cadascun 5 o més exemples correctes d'aplicacions tant teòriques com pràctiques de la quàntica, açò ens ve a dir que, igual que passa amb els llibres, si els professors en les seues classes esmenten aplicacions ho fan en nombre reduït i amb caràcter anecdòtic.

3.-Els alumnes, com a conseqüència de l'ensenyança rebuda, mostren un aprenentatge escassament significatiu i es consoliden poc les noves concepcions en els estudiants. Tampoc desenvoluparan significativament actituds positives cap a la ciència i el seu aprenentatge.

Les anteriors proposicions es fonamenten en l'estudi dels resultats obtinguts als ítems proposats al qüestionari d'alumnes, que resumim en els següents punts:

-Tan sols el 8,2% dels alumnes és capaç d'explicar satisfactòriament els espectres discontinus a partir del model de Bohr, la qual cosa pot entrebancar la comprensió de la quantització.

-Menys del 10% dels estudiants té clars els conceptes clàssics de partícula i ona, cosa que entrebanca la comprensió de la física clàssica i, per tant, també de la quàntica.

-Cap estudiant (0%) veu els electrons, protons, neutrons, fotons, etc. com a objectes de tipus nou, és a dir, diferents dels models clàssics de partícula i ona. Aquest patró es repeteix tant en professors com en textos.

-Només un 6,6% dels estudiants entén adequadament el significat de les relacions d'incertesa de Heisenberg.

-Un baixíssim percentatge (4,9%) caracteritza de forma adequada l'estat d'un electró en base a un model més general que no el clàssic per descriure el seu comportament. Ho fa a partir del que Schrödinger va anomenar funció d'ones o funció d'estat Ψ , que s'obté resolent la denominada equació de Schrödinger.

-Un ínfim percentatge (1,6%) té una concepció adequada a l'hora de definir el que anomenem el límit clàssic a partir de les relacions d'incertesa. Açò fa que pràcticament el total d'alumnes siga incapaç de delimitar en quin cas ens trobem amb un sistema tractable des del punt de vista clàssic, i en quin cas hem d'acudir necessàriament a la quàntica.

-Un percentatge significatiu (11,5%) dels estudiants té la idea que la física quàntica solament és aplicable en el món microscòpic. Novament el patró es repeteix respecte al que hem comentat per a professors i per a llibres.

-Únicament el 4,9% dels alumnes és capaç d'assenyalar una diferència correcta entre la física clàssica i la quàntica.

-Tan sols el 9,8% dels alumnes és capaç de donar tres exemples d'implicacions tecnològiques de la quàntica, i cap d'ells en dóna de socials. Aquesta limitació la trobem també en llibres i professors.

En definitiva, podem dir amb el rigor suficient que la nostra hipòtesi de partida ha resultat verificada, a la llum de tot el que hem exposat al llarg d'aquest treball.

Aquesta és, però, una primera part del treball que ens obri noves perspectives per continuar investigant: a grans trets, el disseny d'una unitat didàctica, i experimentar-la amb estudiants als que prèviament se'ls passarà el mateix qüestionari per tal de poder comparar pre i post. Això ens permetrà comprovar si una nova manera d'enfocar el procés d'ensenyament de la física quàntica, aporta canvis positius en l'aprenentatge d'aquesta per part dels estudiants.

Tanquem així aquesta memòria deixant, però, la porta oberta a aquesta segona part que extenga la present investigació.

Referències bibliogràfiques

- BALIBAR, F. y LEVY-LEBLOND, J.M. (1984) *Quantique. Rudiments* Paris: Interditions.
- BORN, M. (1971) *Ciencia y conciencia en la era atómica*. Madrid: Alianza
- BUTLER, C., DAVIES, B. JACQUIER, M. & McCARTHY (Ed). (1972). *The concept of the atom*. Heineman Educational. Victoria.
- CARVALHO, A. GIL PÉREZ, D. (2001). La formación de los profesores de ciencias en Iberoamérica. *Revista Iberoamericana de Educación*, Número 24, pp. 163-187.
- DE BROGLIE, L. (1965) *La física nueva y los cuanta*. Losada. Buenos Aires
- DIRAC, P.A.M. (1967). *Principios de la mecánica cuántica*. Barcelona : Ariel
- DRIVER, R. GUESNE, E. y TIBERGHIE, A. (1989). *Ideas Científicas en la infancia y la adolescencia*. Madrid : Morata.
- DUGAS, RENÉ (1950) *Histoire de la Mécanique*. Ed. Du Griffon Neuchatel,
- ECKERT, M. Y SCHUBERT (1991) *Cristales, electrones, transistores. Del gabinete del sabio a la investigación industrial*. Madrid : Alianza.
- FERNÁNDEZ, P., GONZÁLEZ, E. y SOLBES, J. (2005) Evolución de las representaciones docentes en la física cuántica. *Enseñanza de las Ciencias, VII Congreso Internacional*.
- FERNÁNDEZ, P., GONZÁLEZ, E. Y SOLBES, J. (1997). La inclusión de temas actuales de física en el polimodal. Algo más que ampliación de contenidos, *Educación en Ciencias*, 1 (3), pp. 5-10.
- FEYNMAN, R. (1971)
- FISCHLER H., LICHTFELDT M., (1992). Modern Physics and Students' Conceptions. *International Journal of Science Education*. Vol 14 (2) pp. 181-190.
- FORMAN, P. (1984), *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica 1918-1927*. Madrid: Alianza.
- GALINDO, A. Y PASCUAL, P. (1978) *Mecánica cuántica*. Madrid: Alambra.
- GIL, D. Y SOLBES, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, *International Journal of Science Education*, 15 (3), pp. 255-260.
- GIL, D., SENENT, F. Y SOLBES, J. (1989). La física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados, *Revista Española de Física*, 3(1), pp 53-58.
- GIL, D., SENENT, F. Y SOLBES, J. (1986), Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2(1), pp 16-21.
- GRECA, I. Y FREIRE (2003) Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics?. *Science & Education* 12, pp 541-557

- GRECA, I., MOREIRA, A. (1998) O que estão entendendo alunos universitários nas aulas de mecânica quântica. *II ENPEC*. Brasil.
- GRIBBIN, J. (1988) *En busca del gato de Schrödinger*, Barcelona:Salvat.
- GUNTER, L. (1980) Models in Physics: Some pedagogical reflections based on the history of science, *Eur. J. Sci. Educ.*, Vol 2(1), pp. 15-23.
- HADZIDAKI, P (2008) The Heisenberg microscope: a powerful instructional tool for promoting meta-cognitive and meta-scientific thinking on quantum mechanics and the “nature of science”. *Science & education*. 17:613-639.
- HAN, M.Y. (1992), *La vida secreta de los cuantos*, Aravaca: Mc Graw-Hill.
- HEISENBERG, W. (1979) *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*. Madrid: Alianza.
- HOLBROW, CH., AMATO, JC., GALVEZ, EJ. Y LLOYD, JN. (1995). Modernizing Introductory Physics. *Am. J. Phys.* Vol 63 (12), pp. 1078-1090.
- JOHNSTON, I., CRAWFORD, K. Y FLETCHER, P. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics, *Int. J.of Sci. Educ.* 20(4), pp. 427-446.
- JUSTI, R. I GILBERT, J. (2000) History and philosophy of science through models: some challenges in the case of 'the atom'. *International Journal of Science Education*
- KALKANIS, G., HADZIDAKI, P., STAVROU, D. (2003) An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*. 87 (2), pp. 257-280.
- KE, J. ET AL. (2005) Learning introductory quantum physics: sensori-motor experiences and mental models. *International Journal of Science and Education*. (27:13)
- KRAGH, E. (2007). *Generaciones Cuánticas*. Madrid. Tres Cantos.
- LAPIEDRA, R. (2004), *Els dèficits de la realitat i la creació del món*, Universitat de València.
- MAIZTEGUI, A., GONZÁLEZ, E., TRICÁRICO, H., SALINAS, J., PESSOA DE NERESSIAN, N. (1992). Constructing and Instructing: The role of “Abstraction Techniques” in creating and learning Physics. *Philosophy of Sc. Cognitive Psychology, and Educational Theory and Practice*. Cap. 2, pp. 48-67. Ed.Duschl R. & Hamilton R. NY.
- MASON, SF. (1986), *Historia de las ciencias, 5. la ciencia del siglo XX*, Madrid: Alianza.
- MATTHEWS, M. R. (1991). Un lugar para la historia y la filosofía en la enseñanza de las Ciencias. *Comunicación, Lenguaje y Educación*, 11-12, 141-155.
- MCKAGAN, S. B. ET AL. (2008) Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*. 76(4&5)
- MERHA, JAGDISH. (1976) *The birth of quantum mechanics*, Ed. Cern.
- MICHELINI, M. ET AL. (2000) Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*. 35 (6).

- MORENO, A. (1987), *Aproximación a la física*, SP Junta de Cdades Castilla-La Mancha, Ciudad Real.
- NASHON, S. ET AL. (2008) Whatever happenend to STS? Pre-service physics teachers and the history of quantum mechanics. *Science and Education* (17)
- NAVARRO J. (2009). *Una ecuación y un gato. Schrödinger*. Nivola, Tres Cantos
- NAVARRO, J. Y SOLBES, J. (1989). En torno a los orbitales atómicos, *Enseñanza de las Ciencias*, 7(3), pp 304-306.
- NAIAZ, M. ET AL. (2008) Understanding Quantum numbers in general chemistry textbooks. *International Journal of Science Education*. (30:7)
- OHANIAN, H. (1989). *Principles of Quantum Mechanics*. Prentice Hall.
- OLSEN, V. (2002) Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *Int. J.of Sci. Educ.* 24(6), pp. 565-574.
- OÑORBE, A. (1996). Avance de la ciencia en el currículum. *Alambique*. Vol 10, pp 7-9.
- OSBORNE, R. (1996). Beyond constructivism. *Science Education*, 80 (1), 53-82.
- PARK, E. AND LIGHT, G. (2007) Identifying atomic structure as a threshold concept: student mental models and troublesomeness. *Intenational Journal of Science and Education*.
- PETRI, J., NIEDDERER, H. (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *Int. J. of Sci. Educ.* Vol 20 (9), 1075-1088.
- POSPIECH, G. (2000) Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics. *Physics education* 35 (6).
- RAE, A. (1989), *Física cuántica, ¿ilusión o realidad?*, Madrid.Alianza.
- SALTIEL, E. y VIENNOT, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 137-144.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1992). *El poder de la ciencia. Historia socio-económica de la física (s.XX)*, Madrid: Alianza
- SCHRÖDINGER, E. (1975) *¿Qué es una ley de la naturaleza?* México: Fondo de cultura económica.
- SELLERI (1986), *El debate de la teoría cuántica*, Madrid.Alianza.
- SOLBES, J. (2009). Dificultades de aprendizaje y cambio conceptual, procedimental y axiológico (I): resumen del camino avanzado. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6 (1), 2-20.
http://www.apac-eureka.org/revista/Volumen6/Numero_6_1/Solbes_2009a.pdf
- SOLBES, J. (2009). Dificultades de aprendizaje y cambio conceptual, procedimental y axiológico (II): nuevas perspectivas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6 (2), 190-212.
http://www.apac-eureka.org/revista/Volumen6/Numero_6_2/Solbes_2009b.pdf
- SOLBES, J. & TRAVER, M. (2003). Against negative image of science: history of science in the physics & chemistry Education, *Science & Education*, 12, 703-717.

- SOLBES, J., FERNÁNDEZ, P. y GONZÁLEZ, E. (2001). Carencias en la formación docente en temas de física contemporánea en Argentina, *Enseñanza de las Ciencias, n° extra, VI Congreso Internacional*, Tomo 1. Comunicaciones, 407-409.
- SOLBES, J. (1999). Determinismo vs probabilidad en la enseñanza de la física, *Catedra Nova*, n° 12, pp. 343-351.
- SOLBES, J. (1996). La física moderna y su enseñanza, *Alambique*. 10, pp. 59-67.
- SOLBES, J. y TRAVER, M. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química, *Enseñanza de las ciencias*, 14 (1), 103-112.
- SOLBES, J. (1990) La crisis de la física clásica y el surgimiento de la moderna en la investigación didáctica, *Enseñanza de las Ciencias*, 8(2), pp 179-181.
- SOLBES, J., BERNABEU, J., NAVARRO, J. Y VENTO, V. (1988), Dificultades en la enseñanza /aprendizaje de la física cuántica, *Revista Española de Física*, 2(1), pp 22-27.
- SOLBES, J., CALATAYUD, M.L., CLIMENT, J.B., NAVARRO, J. (1987), Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos, *Enseñanza de las Ciencias*, 5(3), pp 189-195
- SOLBES, J. (1986). *Introducción a los conceptos básicos de física moderna*. Tesis doctoral. Universitat de València
- STEINBERG, R. N. ET AL(1996) Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect. *American Journal of Physics*. 64(11)
- TATON R (Ed) (1973). *La ciencia contemporánea (s XX)* , Destino, Barcelona.
- TAYLOR, JR. ZAFIRATOS, C. (1991). *Modern Physics for Scientist and Engineers*. New Jersey: Prentice-Hall.
- TIPLER, P.A.. (1985). *Física moderna*. Barcelona: Reverté.
- TSAPARLIS, G. AND PAPAPHOTIS, P. (2008) High school students' conceptual difficulties and attempts at conceptual change: the case of basic quantum chemical concepts. *International Journal of Science Education*.
- VAN DER WAERDEN, B.L. (1968). *Sources of quantum mechanics*. New York: Dover.
- ZOLLMAN, D. A. ET AL. (2002) Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology. *American Journal of Physics*. 70(3).